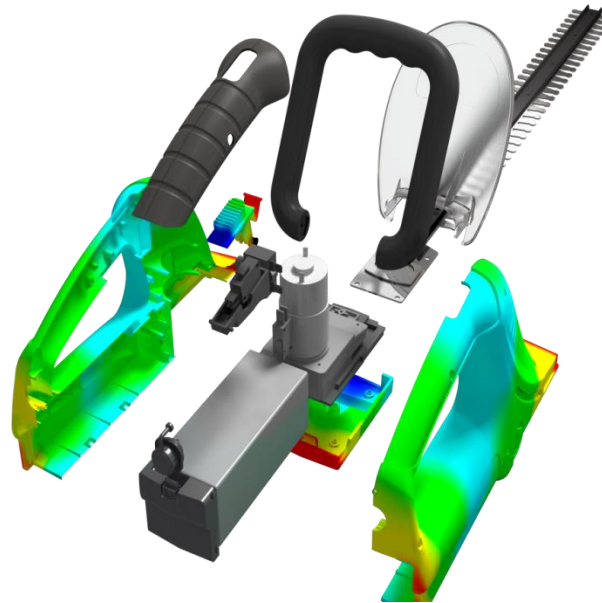


AMI Korean Training Manual

Autodesk Moldflow Insight 2017



The 8th edition of AMI
Korean Manual

Written by David Lee April 20, 2016

Autodesk Moldflow Insight (AMI) Korean Manual

Copyright © 2016 by David Lee, Autodesk Korea Limited

17F ASEM Tower, Samseong-dong, Gangnam-gu, Seoul, Korea

All rights reserved. First published by David Lee in 2004

이 책의 저작권은 (주) 오토데스크코리아와 저자(이 대희)에 있습니다.

소유자 또는 저자의 허락 없는 무단전재 또는 무단복재를 금합니다.

저자 : 이대희 (David Lee)

소속 : 오토데스크코리아(Autodesk Korea limited)

전화 : 02-3484-3456

팩스 : 02-3484-3480

E-mail : david.lee@autodesk.com

Contents

I 사출성형 해석

1. 사출성형 해석?
2. Moldflow

II 사출 성형 해석 기본 이론

1. 플라스틱 수지
2. 금형
3. 사출 성형기
4. 사출성형 공정

III 유동해석

1. 유동해석 이론
2. 성형 불량
3. 유동해석 실습
4. 유동해석 결과

IV 냉각해석

1. 냉각해석 이론
2. 냉각해석 실습- Cool(BEM) 해석
3. 냉각해석 결과

V 변형해석

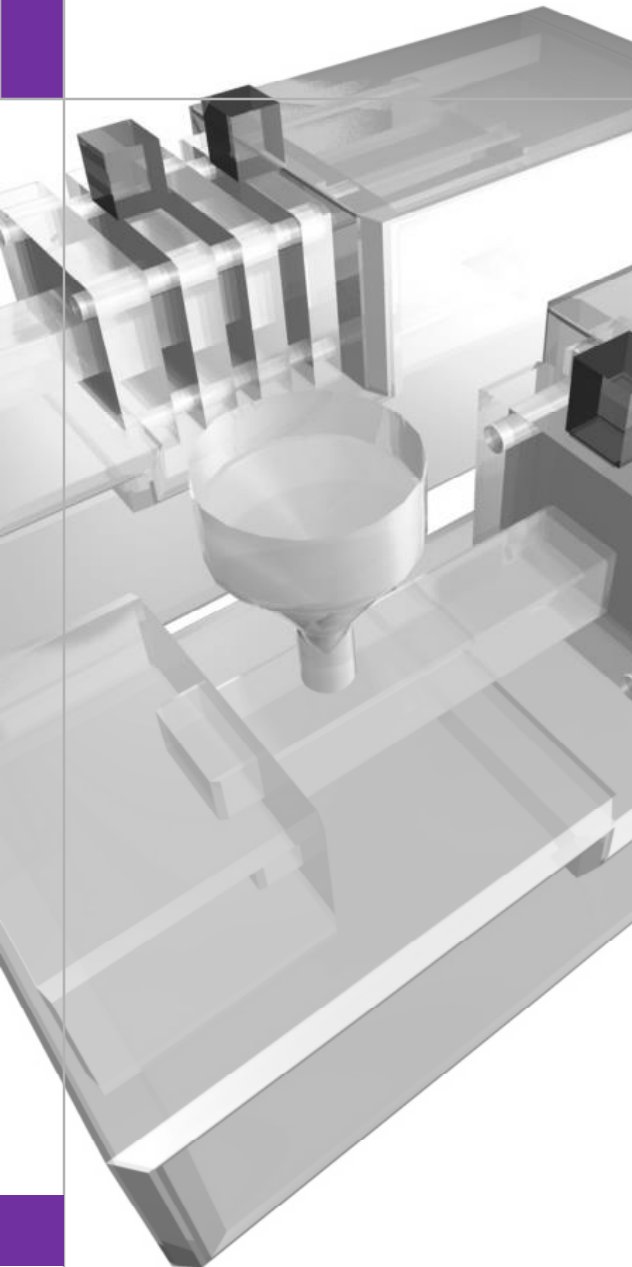
1. 변형해석 이론
2. 변형해석 실습
3. 변형해석 결과

VI 3D 해석

1. 3D 해석이란?
2. 2D와 3D 해석의 차이점
3. 3D 해석의 범위
4. 3D 해석의 방법

VII 3D 해석의 응용

1. Runner shear-heating 고려한 해석
2. Insert Molding 해석
3. 2-shot sequential Overmolding 해석
4. Core-shift 해석
5. 3D Gas 해석
6. Cool(FEM) 해석



I 사출 성형 해석

1. 사출성형 해석 (What's injection Molding analysis?)
2. Moldflow

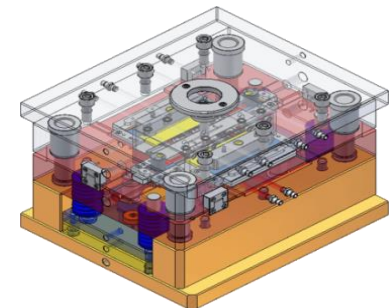
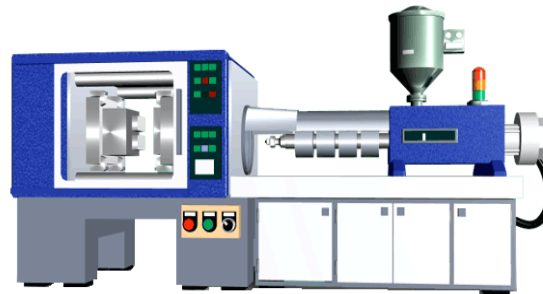
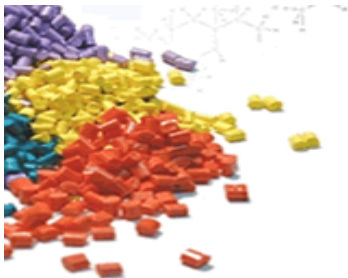
1. 사출 성형 해석

1-1) 사출성형 이란?

플라스틱 제품을 성형하는 방법에는 여러 가지가 있지만 가전, 통신기기, 자동차, 의료기 등의 복잡한 구조를 가지는 제품을 대량생산하기 가장 일반적인 방법이 사출 성형이다.

사출 성형을 위해서는 최소한 제품, 러너시스템, 냉각시스템 등이 가공되어 있는 금형과 플라스틱 수지 그리고 사출 성형기가 요구된다. 플라스틱 수지는 사출 성형기에 의하여 용융되어 러너시스템과 제품이 가공된 금형으로 사출 성형기에 설정된 성형 조건으로 충전되고 금형의 냉각시스템에 의하여 냉각되어 충분한 온도까지 고화되면 취출된다.

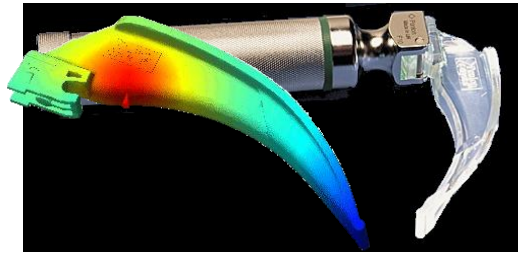
이러한 사출성형 방법은 점도가 높고, 수축률이 큰 수지를 고속, 고압으로 금형에 주입하고 균일하지 않은 보압과 냉각이 가해지게 함으로써 여러 가지 성형 불량(미성형, 웰드라인, 에어트랩, 크랙, 싱크마크, 변형 등)을 일으킨다.



1-2) 사출성형 해석이란?

사출성형해석은 플라스틱 수지의 유동과 냉각과정을 컴퓨터의 도움으로 시뮬레이션하는 것을 말한다. 이것은 사출성형 공정이 많은 성형 불량을 유발하기 때문에 설계 단계에서 이러한 불량 요인들을 미리 예측하여 설계에 반영하지 못한다면 생산 단계에서 여러 가지 성형 불량 문제에 직면하게 된다. 성형 불량이 단순히 성형 조건 변경으로만 해소될 수 있다면 문제가 없겠지만 대부분의 경우에 적합하지 못한 제품 설계 및 금형 설계에서 그 원인을 찾을 수 있다.

따라서 사출성형 해석은 제품 설계 또는 금형 설계 단계에서 사출성형 공정을 컴퓨터로 시뮬레이션하여 수지의 유동과 냉각 과정에서 예상되는 문제점들을 미리 예측하여 제품 설계, 금형 설계를 최적화 하는 것이다.



물론 성형 해석으로 사출성형 공정에서 발생하는 모든 성형 문제점들을 미리 확인하고 제거할 수 있는 것은 아니다. 이론적 성형 해석을 통하여 쉽게 분석 가능한 부분도 있고, 유추하여 분석 가능한 부분도 있고, 분석이 불가능 부분도 있다. 그러나 최소한 기본적인 성형문제 (성형성, 외관 불량, 사이클 시간, 변형) 들은 미리 해석을 통하여 예측하고 개선할 수 있으므로 보다 짧은 시간과 비용으로 완성된 금형을 제조할 수 있다는 것이다.

1-3) 사출 성형 해석의 목적

사출성형 해석의 기본적인 목적은 사출성형 공정에서 예상되는 성형 불량을 미리 검토하여 해소하는 것이지만, 더 넓은 의미에서는 제품 설계와 금형 설계의 최적화이다. 제품 설계와 금형설계의 최적화란 결국 성형품의 품질 향상과 제조 비용 절감을 말한다. 성형품의 품질 향상은 사출성형 과정에서 예상되는 성형 불량을 최소화 하게 하는 것이고, 제조 비용 절감은 제품 중량과 스크랩 비중을 줄이며, 사이클 시간을 단축하는 것이다. 따라서 사출성형 해석을 통하여 제품 설계 업체는 제품의 품질을 향상하고 제품 단가를 낮추며, 제품 개발 기간을 단축하는 효과를 얻을 수 있으며, 금형 업체는 금형의 품질을 향상하고 제작기간을 단축하며, 금형 제작 비용을 절감하는 효과를 얻을 수 있다.

또한 사출성형 해석을 통하여 사출성형 공정을 이론적으로 심도 있게 이해함으로써 기업의 제품 설계 및 금형 설계 기술력이 향상되고 누적될 수 있다.



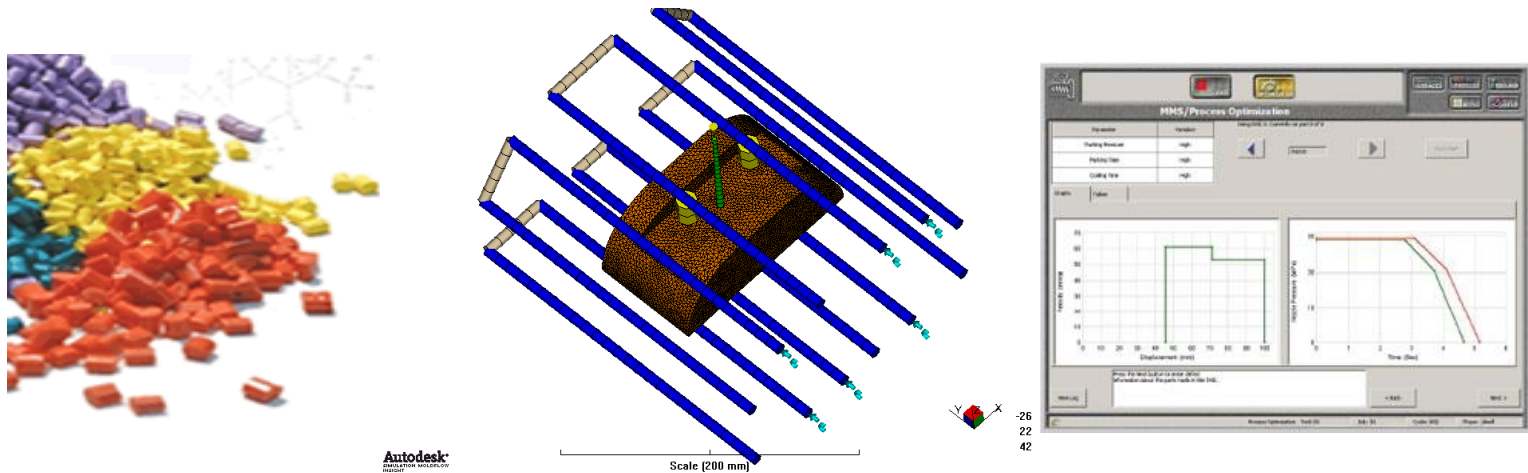
1-4) 사출 성형 해석을 위한 요소

성형해석을 위해서는 최소한 모델링(제품설계, 금형설계), 플라스틱 수지, 공정조건을 입력하여야 하며, 이러한 입력 값들은 MOLDFLOW Solver에 의하여 계산되어 해석 결과로 나타내어진다. 그러면 사용자는 이러한 해석 결과를 참조하여 예상되는 성형 문제를 해결하기 위하여 입력 변수들 중에서 무엇을 변경할 것인가를 판단하여 수정 후 재해석한다. 결국 만족스러운 결과가 도출될 때 까지 반복적으로 이러한 과정이 반복된다.

여기에는 두 가지 문제점이 있을 수 있다. 하나는 해석 결과의 신뢰성이고 두 번째는 해석 결과 분석 과 대안 도출 능력이다.

첫 번째 해석 결과의 신뢰성은 당연히 해석의 입력 값들의 정확성과 Moldflow Solver의 정확성에 의존한다. Moldflow Solver의 정확성은 사용자 측면에서는 평가하기 힘드므로 결국 해석 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 정확한 수지 물성, 정확한 모델링 그리고 정확한 성형 조건이 입력되어야 한다. 부정확한 입력 값은 부정확한 해석 결과를 제공하며 결국 잘못된 대안을 도출하게 한다.

두 번째 해석 결과의 분석과 대안 도출 능력은 사용자가 사출성형 공정을 얼마나 이론적으로 잘 알고 있는가에 달려있다. 이러한 능력이 부족한 사용자는 잘못된 결과 분석으로 잘못된 대안을 도출하게 된다.



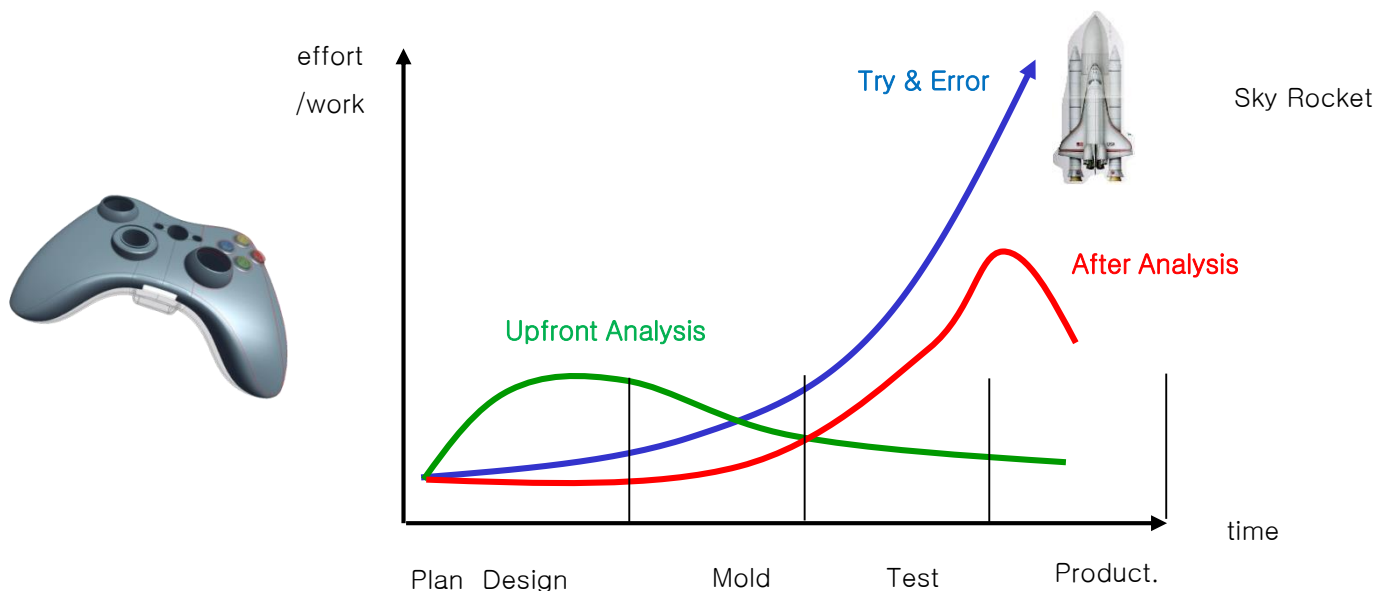
1-5) 사출성형 해석의 시점

사출 성형 해석을 누가 어떤 시점에 진행하여야 할 것인가를 판단하여야 한다. 일반적으로 이 질문에 대한 답은 “금형 설계자가 금형 설계 전에 수행하여야 한다.” 일 것이다.

그러나 이 경우 두 가지가 문제점이 있을 수 있다. 첫 번째는 금형 설계 즉 러너 시스템 및 냉각 시스템 변경만으로 성형 문제가 해결되지 않는 경우가 많다는 것이다. 성형품의 성형 불량량의 많은 경우가 제품 설계 즉 제품의 형상 구조, 제품의 두께 그리고 리브의 구조 등에 의하여 발생한다. 두 번째는 제품 설계 변경이 요구되는 경우에 시기적으로 늦다는 것이다. 금형 설계가 시작되는 시점에는 이미 제품의 구조가 확정된 시점이어서 이를 변경하기 위해서는 다시 많은 노력이 요구되며, 경우에 따라서는 불가능 할 수 있다.

따라서 사출성형 해석은 최소한 제품 설계 과정에서 제품 설계자에 의하여 진행되어야 사출성형 해석의 효과를 극대화 할 수 있다.

물론 제품 설계자의 경우 사출성형 공정과 금형에 대한 지식이 부족하여 현실적으로 어려운 경우가 많이 있다. 그러나 금형 설계자와 협력하여 진행한다면 이러한 문제점들은 극복될 수 있다. 또한 선진 기업에서는 제품 설계자에게 이러한 사출성형 해석을 통하여 제품 설계를 최적화 할 것을 요구하고 있다.



2. Moldflow

2-1) Moldflow 란?

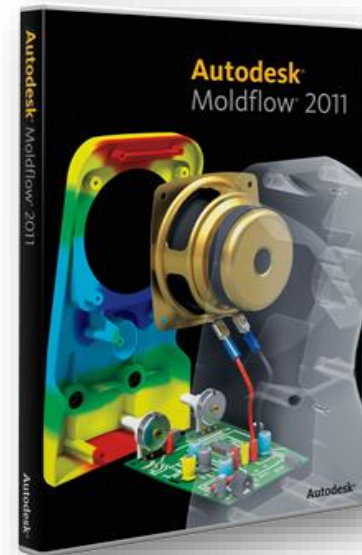
Moldflow는 1978년에 호주에서 개발되어 판매되어온 소프트웨어로써 사출성형 해석 소프트웨어들 중에서 가장 긴 역사를 가지고 있다. 2000년에는 강력한 경쟁사이었던 C-Mold사를 합병하면서 NASTAQ(MFLO)에 상장되었고, 그 이후로 글로벌 시장의 90% 이상을 차지하면서 지속적으로 성장해왔다. 그리고 다시 2008년에는 Moldflow 사는 Autodesk사에 의하여 합병되었다.

이와 같이 최근 대형 CAD사 들이 CAE소프트웨어를 합병하는 것은 단순 매출 증가를 위한 목적이 아니다. CAD 고객들이 제품의 기능적 측면을 고려한 단순 설계가 아닌 최적화 설계가 가능한 CAD를 필요로 하고 있기 때문이다. 특히 플라스틱 제품의 최적화 설계를 위해서는 제품이 사용되는 과정과 제조되는 과정에 문제 없도록 설계하여야 하기 때문에 구조해석이나, 사출성형 해석과 같은 CAE의 도움이 반드시 필요하다.

사출성형 해석 소프트웨어 중에서도 Moldflow는 오랜시간 고객들로부터 검증을 통하여 그 신뢰성이 입증되었다. 특히 사출성형 해석 소프트웨어를 개발하기 위해서는 플라스틱 그 자체에 대한 연구가 뒷받침 되어야 한다. 이런 점에서도 Moldflow는 미국과 호주에 2개의 연구소를 운영하고 있으며, 세계 유명 대학 및 연구소와 협력하고 있다.

“When a brand name becomes synonymous with a type of product, its market impact is unmistakably profound. Like Coke is to soft drinks, Moldflow is the name in injection molding simulation software.”

Modern Plastics Magazine

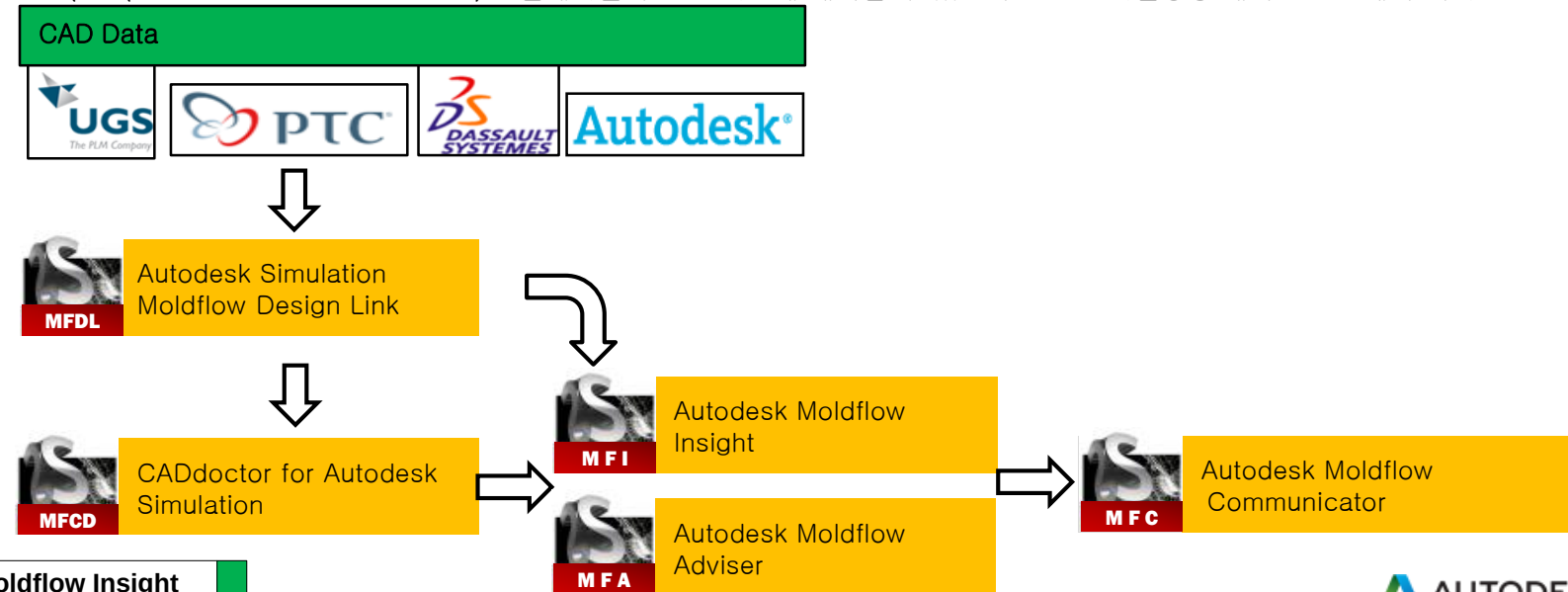


2-2) 사출성형 해석 소프트웨어의 선택

CAD와 CAE 소프트웨어를 선택하는 기준은 달라야 한다. CAD의 결과물은 완성된 설계 모델이다. 따라서 얼마나 쉽고 빠르게 완성된 모델을 설계할 수 있는가에 따라서 CAD 소프트웨어를 선택하면 된다. 그러나 CAE의 결과물은 최적화된 설계이다. 이러한 최적화된 설계를 도출하는 과정이 얼마나 쉽고 빠르며 정확한가를 판단하여야 한다. 쉽고 빠르냐 보다 정확한가가 더 중요하다. 특히 사출성형 해석 소프트웨어의 정확성은 플라스틱에 대한 지속적인 연구 없이는 향상될 수 없다. Moldflow는 이런점에서 큰 강점을 가진다. Moldflow는 호주 Melbourne 과 미국 Itaca에 각각 연구소를 운영하면서 지속적으로 전세계 유명 대학들과 연구기관들과의 협력을 통하여 플라스틱에 대한 연구를 진행하고 그 결과를 바탕으로 Solver를 개선하고 있다.

2-3) Moldflow 소프트웨어의 구성

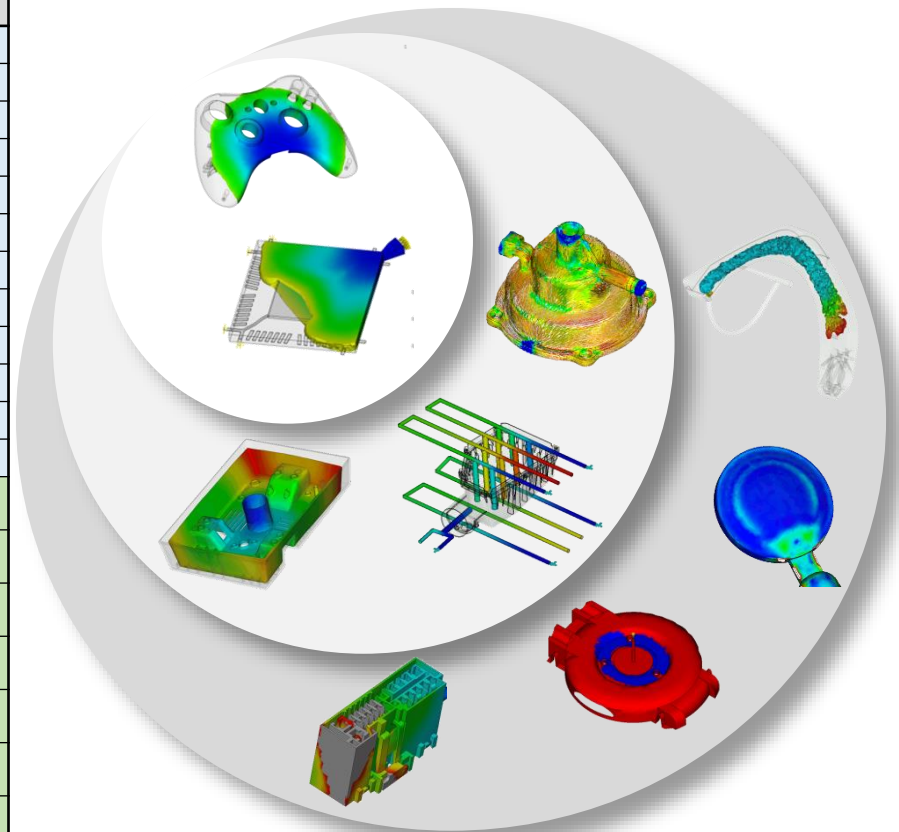
Moldflow 소프트웨어의 구성은 크게 4가지로 되어 있다. 각종 CAD에서 설계된 모델을 Moldflow로 변환하는AMDL(Autodesk Moldflow Design Link), 변환된 모델의 수정과 단순화를 위한 AMCD(Autodesk Moldflow CAD Doctor), 해석을 위한 모델의 요소생성을 포함한 입력 값 설정, 해석 수행 및 해석 결과 표시를 위한 AMI(Autodesk Moldflow Insight), 마지막으로 해석 결과를 공유를 위한 AMC(Autodesk Moldflow Communicator) 이다. 여기서 AMI는 전문가들에 의한 심도있는 사출성형 해석을 위한 소프트웨어이고, AMA(AMI(Autodesk Moldflow Adviser)는 설계자들이 쉽고 빠르게 해석할 수 있도록 고안된 사출성형 해석 소프트웨어 이다.

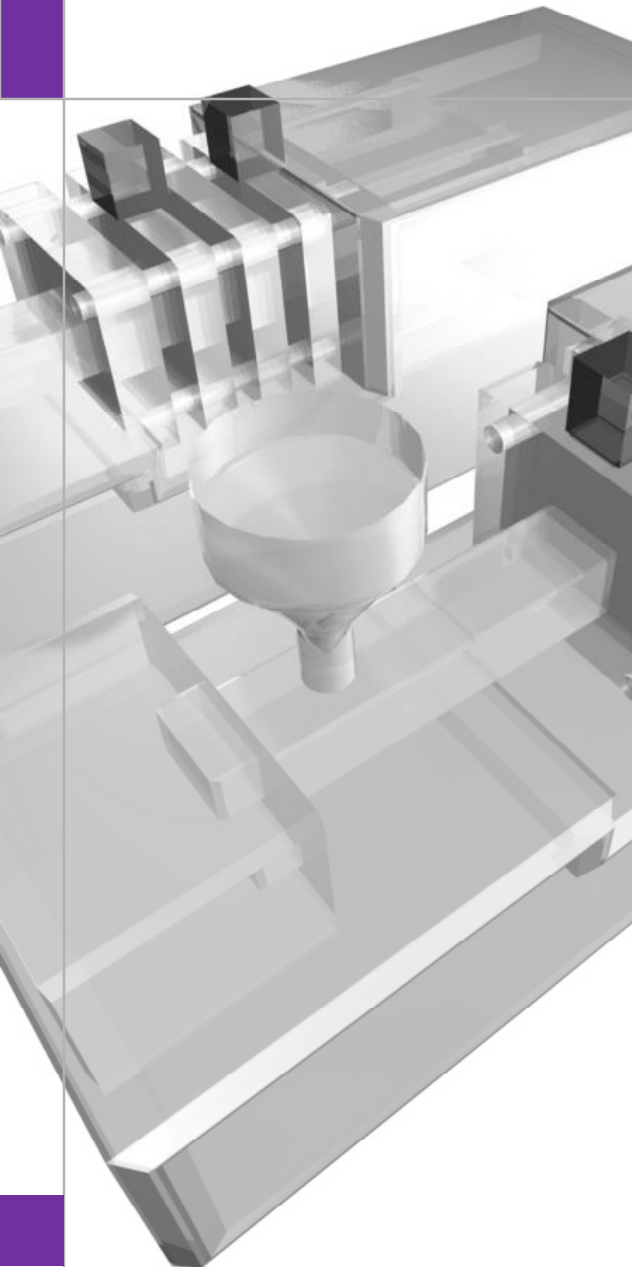


2-4) AMI (Autodesk Moldflow Insight)

AMI는 다시 3가지 모듈로 구성되어 있다. AMI Standard는 AMI Premium과 같이 기본적인 유동해석과 냉각해석, 변형해석, 파이버 배향해석 등 모두 가능하다. 하지만 Standard는 동시해석 가능한 해석 수가 1개 이고 Premium은 3개까지 가능하다. 그리고 AMI Ultimate는 Premium 기능을 포함하여 특수 성형 공정 해석까지 가능하다. 사용자의 업무 환경에 따라 적합 모듈을 선택할 수 있다.

Thermoplastics Simulation	Standard	Premium	Ultimate
Filling & Packing Analysis	•	•	•
Gate Location Analysis	•	•	•
Molding Window Analysis	•	•	•
Runner Balancing Analysis	•	•	•
Design of Experiments	•	•	•
Overmolding Analysis	•	•	•
Cooling Analysis	•	•	•
Fiber Flow Analysis	•	•	•
Shrinkage Analysis	•	•	•
Process Optimization	•	•	•
Warpage Analysis	•	•	•
Structural Alliance	•	•	•
Injection-Compression Molding			•
Co-Injection Molding			•
Gas-Assisted Injection Molding			•
Microcellular Injection Molding			•
Birefringence Prediction			•
Compression Molding			•
Compression Overmolding			•





II. 사출 성형 기본 이론

1. 플라스틱 수지(Plastic Resin)
2. 금형 (Mold)
3. 사출 성형기(Injection Molding Machine)
4. 사출 성형 공정 (Injection Process)

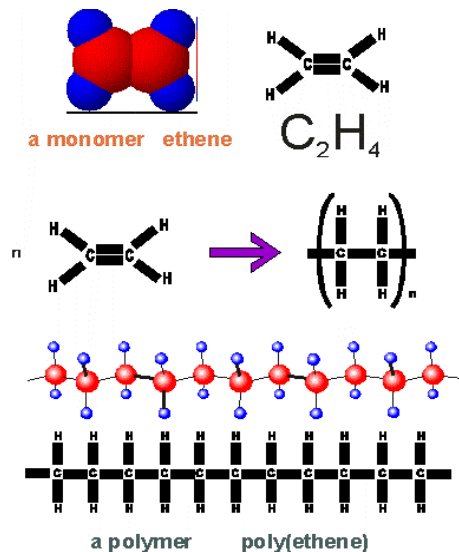
1. 플라스틱 수지 (Plastics)

1-1) 플라스틱 (plastic) 이란?

플라스틱은 기본 구조인 모노머(monomer)는 석탄, 석유, 천연가스 등의 분해 정제를 통해 만들어진다. 이러한 기초 모노머에는 에틸렌, 프로필렌, 부타디엔, 벤젠 등이 있다. 이러한 모노머를 화학적인 중합 공정을 통해 긴 사슬 형태로 만든 것이 고분자이다. 플라스틱은 이러한 고분자에 가공성 및 기능성을 목적으로 가소제(plasticizer), 안정제(stabilizer), 이형제, 충전제(filler), 착색제 및 다른 첨가제를 혼합하여 만든 고분자 복합재료를 말한다.

▶ 가소제(plasticizer): 고분자 상호간에 침투하여 고분자 상호간의 강한 인력을 약하게 하여 마이크로브라운 운동을 하기 쉽게 만들기 때문에 가공온도는 저하한다.

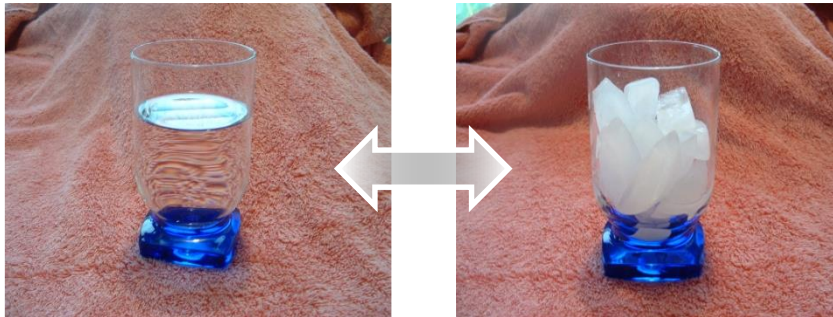
▶ 안정제(stabilizer): 열에 의해서 열화하는 성질을 향상시키는 것, 빛·산소·오존에 대해서 같은 작용을 하는 것으로서 내후성을 증가시키는 것, 산화방지제로서 특히 산소(공기)의 작용을 방지하는 것 등이 있다.



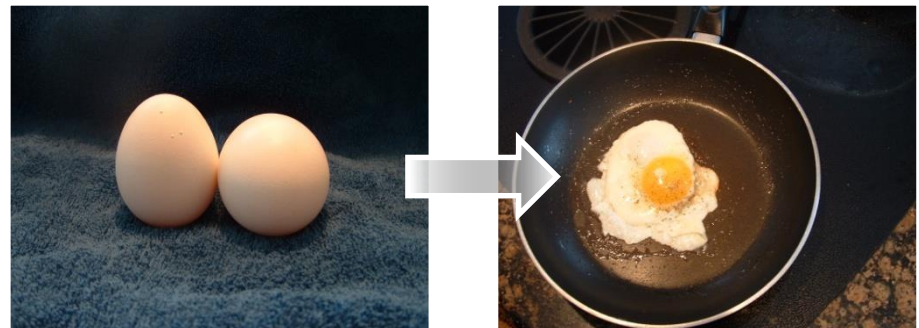
1-2) 플라스틱의 분류

(1) 열가소성 수지 vs. 열경화성 수지

플라스틱은 분자들간의 결합 구조에 따라 열가소성과 열경화성으로 나눈다. 열가소성은 화학적 반응 없이 형성된 선형 분자 결합(linear or branch) 구조를 가지며, 열분해를 일으키지 않는 온도 이하에서는 온도를 높이면 액체가 되고 그 반대의 경우는 고체가 되는 가역적반응을 한다. 열경화성은 화학적 반응을 통한 가교 분자 결합(cross-linking) 구조를 가지며, 열분해를 일으키는 온도 이하에서도 온도를 높이면 액체가 되지만 시간이 지나면 화학적 반응에 의한 강한 결합을 갖는 고체가 되므로 다시는 액체를 만들 수 없는 비가역적 반응을 한다.



*Water analogy: Thermoplastics, similar to water, can be heated and cooled repeatedly without any change in the material's basic properties.
(i.e., recyclable)*



Egg analogy: Thermosets, similar to eggs, can be processed only once with changes occurring in the material's basic properties.

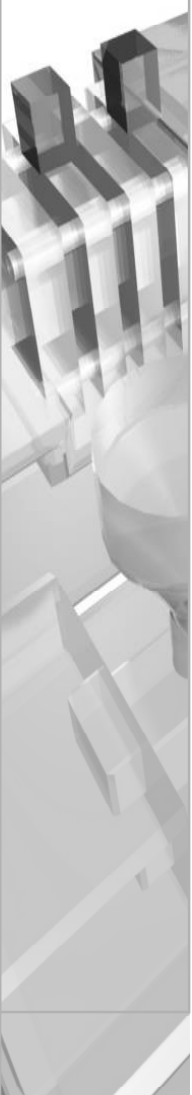
미세구조	열가소성 수지 (thermoplastics)	열경화성 수지 (thermosets)
열에 대한 반응	직선 또는 가지분자 구조 분자들 사이에 화학결합이 없음	화학변화 후 분자들 사이에 화학결합을 가진 가교 결합 구조
일반적인 물성	다시 용융될 수 있음(물리적 상변화) 높은 충격 강도 쉬운 가공공정 복잡한 설계에 적합	가교 후 분해 없이는 다시 용융될 수 없음 높은 기계적 강도 높은 치수 안정성 열과 수분에 대한 높은 저항성

일반적인 사출성형기를 사용하는 사출성형에서는 대부분 열가소성 수지가 사용된다. 열경화성 수지는 상온에서 액체이거나 대부분 저온에서 흐름성이 있는 액체로 변하고 고온으로 높이면 경화반응에 의하여 고체가 된다. 따라서 수지를 스크류의 회전운동으로 수지를 가소화하는 일반적인 사출성형기를 사용되지 않고 수지 마다 성형 장치가 조금씩 다르다. 또한 온도를 낮추어 고체를 만드는 금형 대신 온도를 높여 경화반응을 촉진 시킬 수 있는 히터가 장착된 금형이 주로 사용된다.

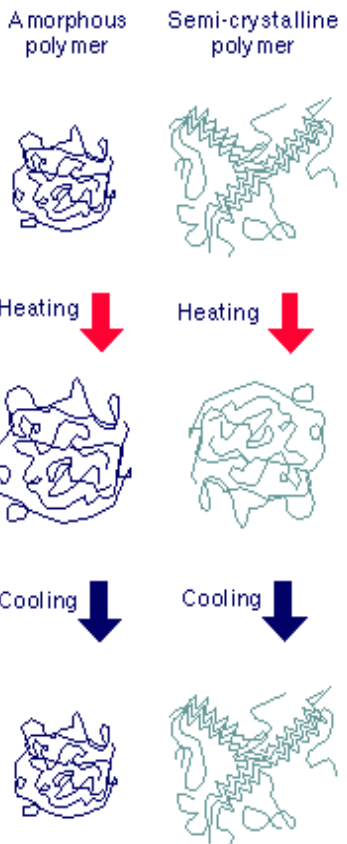
열가소성 플라스틱은 플라스틱 제품 전체의 70% 이상을 차지하고 있으며, 이들은 다시 범용수지와 엔지니어링 수지로 구분된다. 엔지니어링 플라스틱은 범용 수지에 비하여 강도, 내열성, 내충격성, 난연성, 내마찰성, 내약품성 등이 강화된 플라스틱을 말한다. 범용 수지(commodity resins): HDPE, LDPE, PP, PS,PVC 엔지니어링 수지 (engineering resins) : POM, PA, PC, ABS

(2) 비결정성 수지 vs. 결정성 수지

열가소성 플라스틱은 고체가 되는 과정에 형성되는 분자 배열에 따라 결정성(crystalline)과 비결정성(amorphous)으로 분류된다. 결정성이란 분자 배열이 규칙적으로 특정 방향으로 배열되는 것을 말한다. 물론 결정성 수지라 하여도 모든 분자가 결정을 형성하는 것이 아니라 냉각되는 조건에 따라서 결정의 양, 결정의 크기 결정의 수가 다르다. 따라서 정확히 표현하면 결정과 비결정이 혼합된 반결정성(semi-crystalline)이다



	비결정성 수지 (amorphous)	결정성 수지 (crystalline)
대표 재료	ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) PMMA (Acrylics) PC (Polycarbonate) PS (Polystyrene) PVC (Polyvinyl Chloride(PVC)) SAN (Styrene Acrylonitrile)	PA (Nylon, Polyamide) POM (Acetals) HDPE (Low Density Polyethylene) LDPE (High Density Polyethylene) PP (Polypropylene) PBT (Polybutylene Terephthalates)
미세 구조	액체 및 고체상태 모두 임의의 분자배향	액체상태에서는 임의의 분자배향을 가지지만, 고체상태에서는 뾰뾰이 채워진 결정이 생성됨
열에 대한 저항	명확한 녹는점이 없음.	명확한 녹는점이 존재, T_m
일반적인 물성	투명 낮은 화학적 저항 성형시 낮은 부피 수축 일반적으로 낮은 강도 일반적으로 높은 점성	불투명 또는 반투명 뛰어난 화학적 저항 성형시 높은 부피 수축 일반적으로 높은 강도 일반적으로 낮은 점성
PVT		



(3) 용융온도 (melting Temperature) vs. 유리전이 온도 (glass transition Temperature)

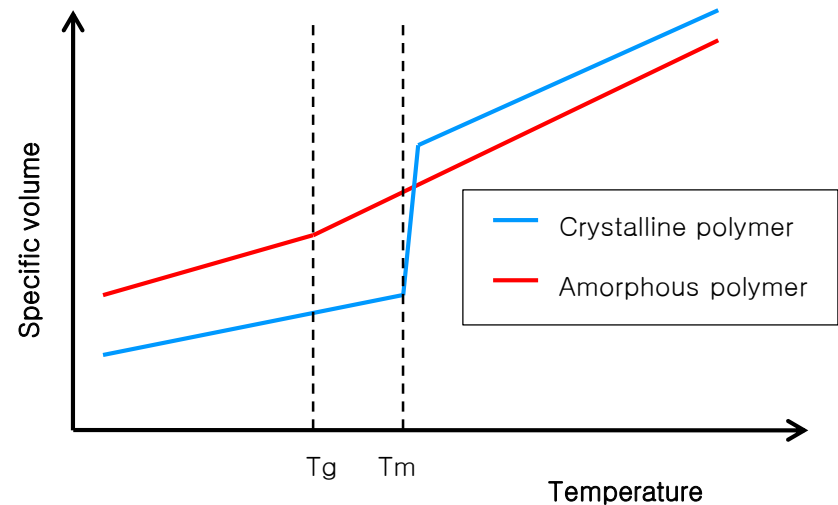
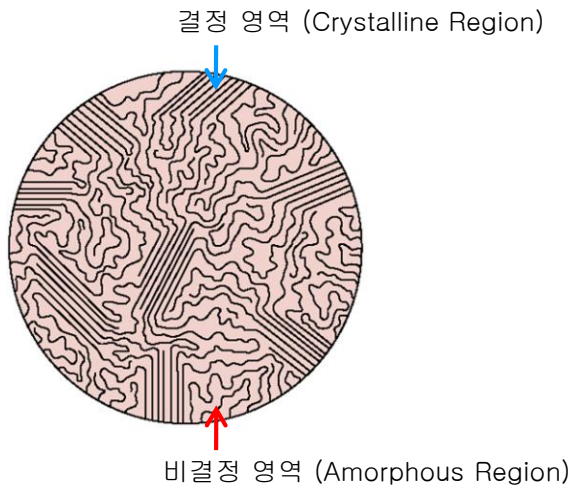
용융온도 (melting Temperature)

용융 온도는 고체 상태에서 유동성 액체 상태로 변화하는 온도로서, 결정성 수지의 결정부분의 유동이 시작되는 온도를 말한다. 가소성 수지는 온도상승에 따라 유연해지며 일정 온도 이상으로 온도를 올리면 유동이 시작되며 점도가 낮아진다. 이는 상승된 온도로 인하여 수지내의 분자들의 운동에너지가 증가하여 고분자 사슬간의 간격이 멀어짐으로 인하여 볼륨의 변화와 더불어 흐르게 된다.

유리전이 온도 (glass transition Temperature)

결정성 수지와는 비 결정성 수지는 용융온도 대신에 유리전이온도가 존재한다. 유리전이온도의 정의는 용융온도와 동일하며 유리 전이 온도 이하에서는 유리 같이 딱딱하고 깨지기 쉬운 거동(Brittle mode) 을 보이는 반면 유리전이온도 이상에서는 고무처럼 질긴 거동(Ductile mode) 를 보인다.

일반적으로 모든 고분자는 부분결정을 가지므로 원칙적으로는 용융 온도와 유리전이 온도를 동시에 가지고 있다. 그러나 그 양이 너무 미약하여 결정성고분자에서는 유리전이온도가 비결정성고분자는 용융온도의 영향이 없는 것처럼 보인다.



(4) 기타 고분자의 분류

액상 고분자 (liquid crystalline)

액정고분자(LCPs)는 용융상태와 고체상태 모두에서 규칙적인 분자배열을 보이는 강한 결정성이다. 이들 재료는 평행한 배열을 형성하는 강하고 막대모양의 분자에 의해 특징 지워진다. LCP는 낮은 점성, 낮은 수축, 높은 화학적 저항, 높은 강성을 보인다. 특히 고분자의 결정 배향 방향과 그 직각 방향에 따라 수축률과 기계적 물성에서 큰 차이를 보인다.

알로이와 블랜드 (alloys and blends)

고분자 알로이 및 블랜드는 둘 또는 그 이상의 완성된 고분자의 혼합시스템이다.

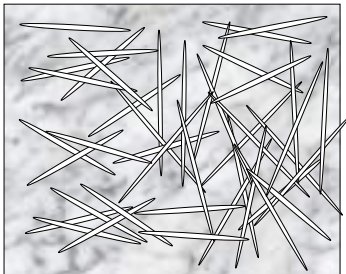
고분자들의 조합이 하나의 유리전이 온도를 가지며 시너지 효과(즉, 혼합의 물성이 각각 요소의 물성보다 낮음)를 나타내는 고분자를 알로이라 하고, 여러 개의 유리전이 온도를 가지고 그것의 물성이 각각 요소의 평균을 나타낼 때 이 고분자를 블랜드라 한다.

Ex) ABS, PC/ABS, PC/PBT

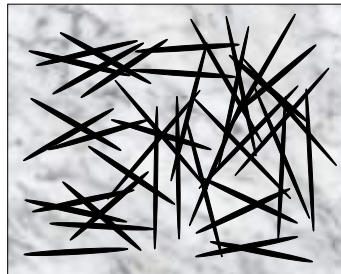
고분자 복합재료 (composites)

고분자 복합재료는 원하는 물성을 얻기 위하여 고분자에 고분자 또는 고분자가 아닌 충전제(filler)를 혼합한 재료이다. 충전제는 그 종류에 따라 플라스틱의 인장강도, 충격강도, 수축률, 열변형 등에 영향을 미친다. 충전제의 대표적인 것이 유리섬유(glass fiber), 탈크(talc), 미네랄(mineral), 고무(rubber)이다. 특히 유리 섬유와 같이 높은 중량비를 갖는 충전제는 충전제의 배향 방향에 따라 기계적 물성과 수축률에 큰 차이가 발생한다.

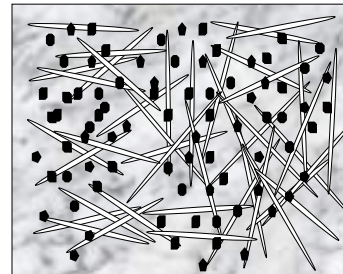
충전제(filler)의 종류: Glass Fiber, Carbon Fiber, Mineral, Talc, Rubber



Glass Fiber



Carbon Fiber



Glass Fiber + Talc

1-2) 플라스틱의 유동

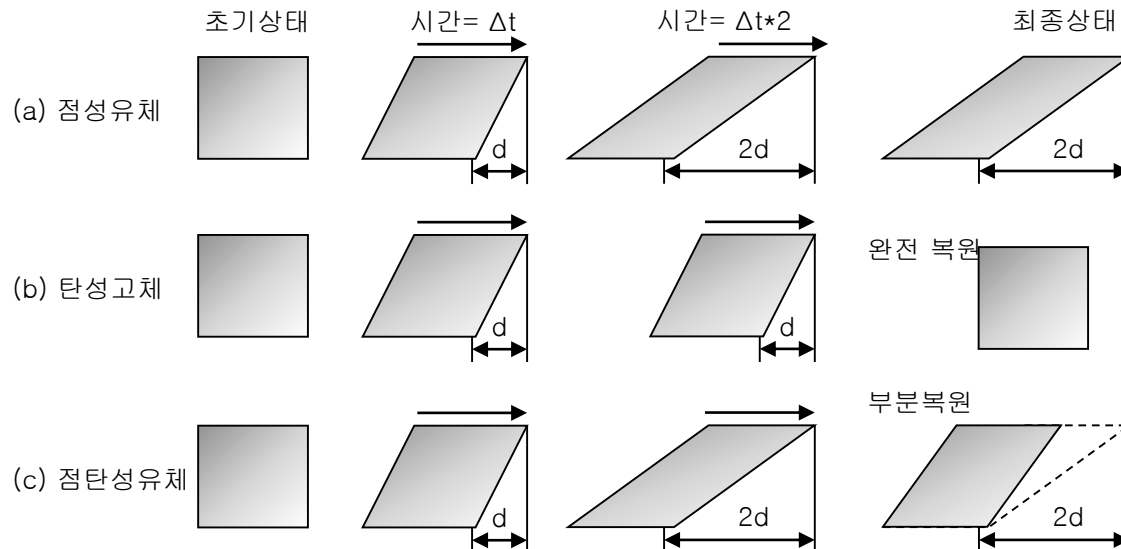
플라스틱 수지를 금형으로 충전하는 과정을 이해하기 위해서는 수지의 점도(viscosity), 전단률(shear rate)에 대한 개념을 먼저 이해하여야 한다.

플라스틱 수지는 액체의 점성 성질과 고체의 탄성 성질을 같이 갖는 점탄성(viscoelastic) 유체이며, 플라스틱의 점도는 온도, 압력, 전단률에 모두 영향을 받는 비뉴턴(non-Newtonian) 유체이다.

(1) 점탄성 거동 (viscoelastic behavior)

용융된 열가소성 수지는 점탄성 거동을 보이는데 이는 점성유체와 탄성고체 특성이 결합된 유동이다. 내부에 점성과 탄성을 갖는 점탄성 물질이다.

(a) 응력의 작용하에서는 이상적인 점성유체는 계속적으로 변형한다. (b) 응력의 작용하에서 이상적인 탄성고체는 즉각적으로 변형하지만, 응력이 제거되면 완전히 복원된다. (c) 응력의 작용하에서는 용융된 열가소성 수지는 계속적으로 변형하지만, 작용하던 응력이 제거되자마자 변형으로부터 부분 복원된다.



(2) 용융수지 점도(melt viscosity)

플라스틱의 온도가 높아지면 액상으로 변하고 힘을 받으면 흐를 수 있는 상태가 된다. 플라스틱 수지 마다 분자량의 크기 또는 첨가제 등에 따라 흐름에 저항하는 정도가 다르게 된다. 이와 같은 흐름에 저항하는 정도를 점성이라 하고, 점성을 단위 면적당의 힘의 크기로서 나눈 것을 점도라 한다.

일반적으로 용융된 고분자는 그들의 긴 분자사슬구조 때문에 매우 높은 점성을 가진다. 고분자의 점도는 약 2000~3000Pa·s (물: 0.1, 유리: 10²⁰ 정도) 이다.

(a) 점도의 정의

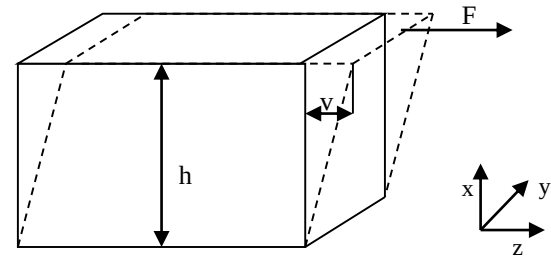
일정온도의 유체를 두 평판 사이에 놓고 하측 평판은 고정시키고 상측 평판을 F의 힘을 가하며 v의 일정속도로 이동시킬때 점도는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{점도(viscosity)} = \frac{\text{전단응력(shear stress)}}{\text{전단률(shear rate)}}$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

$$\text{여기서 전단응력} = \frac{\text{하중(F)}}{\text{면적(A)}}$$

$$\text{전단률} = \frac{\text{속도(v)}}{\text{높이(h)}}$$



전단응력과 전단률이 비례관계를 갖는 유체를 뉴턴유체(Newtonian fluids)라 하고 비례관계가 성립하지 않은 유체를 비뉴턴 유체(non-Newtonian fluids)라 한다.

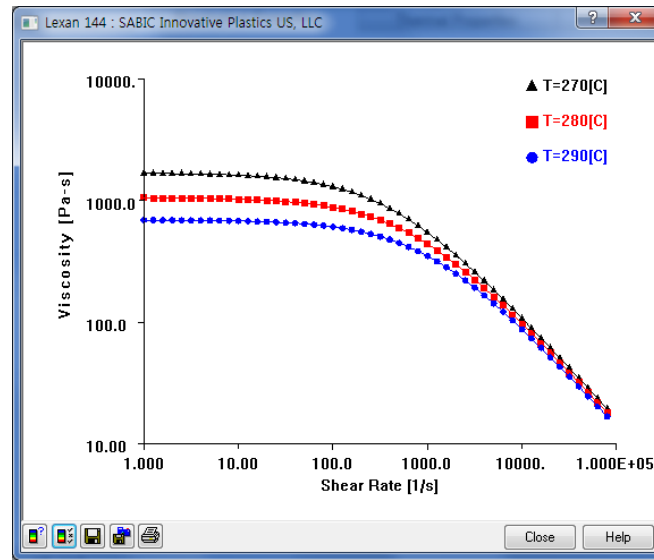
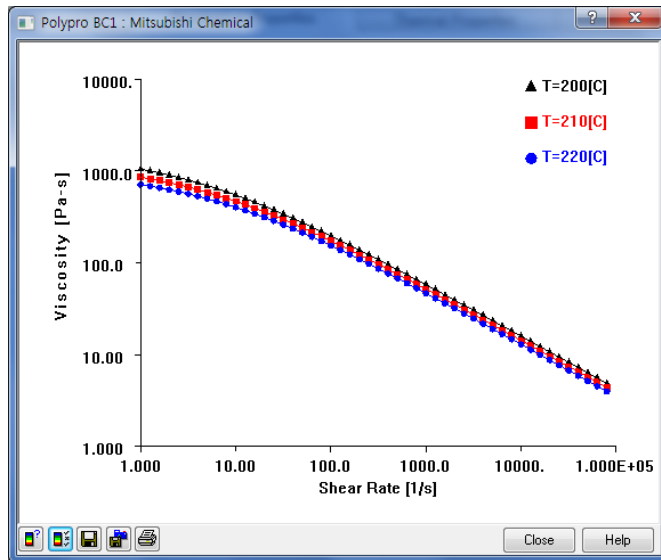
(b) 플라스틱 수지의 점도

일반적으로 물과 같은 Newtonian Fluid 유체의 점도는 온도에만 의존하지만, 플라스틱과 같은 Non-Newtonian Fluid의 점도는 온도(temperature), 압력 (pressure) 와 전단률(shear rate)에 의존한다.

$$\eta = f(T, P, \dot{\gamma})$$

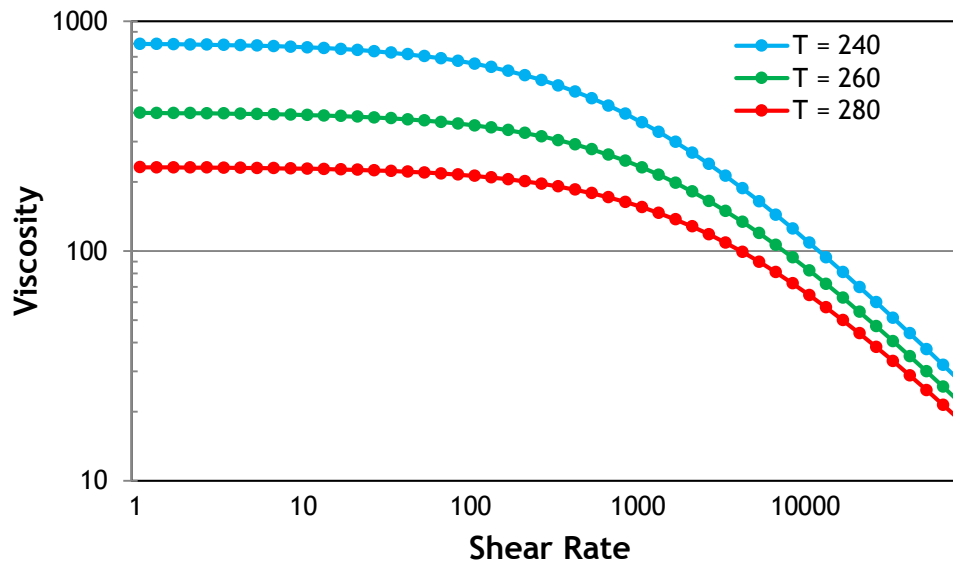
점도와 온도의 관계

플라스틱 수지의 점도는 다른 유체와 마찬가지로 온도에 의존한다. 온도가 높을수록 점도는 낮아지고 온도가 낮을수록 점도는 높아진다. 이것은 높은 온도로 인하여 고분자 상호간의 간격도 넓어지고, 상호 결합력도 낮아지기 때문에 흐름성이 좋아지기 때문이다. 플라스틱의 종류에 따라 점도의 온도 의존성이 다르다.



점도와 전단률과의 관계

플라스틱의 점도(viscosity)는 전단률(shear rate)에 영향을 받는다. 전단률이 높을수록 점도는 낮아지고 전단률이 낮을수록 점도는 높아진다. 이것은 고분자들이 전단률에 의하여 흐름 방향으로 배향되는 것이 그렇지 않은 경우에 비하여 흐름성이 좋아지기 때문이다. 이러한 전단률 증가에 따라서 수지의 점도가 낮아지는 현상을 전단박화(shear thinning)라 한다. 플라스틱의 종류에 따라 전단률 의존성이 다르다.



Viscosity dependency of Shear Rate

(a) 전단률이 낮은 경우 : 플라스틱의 점도가 전단률에 무관함 영역 (Newtonian region)

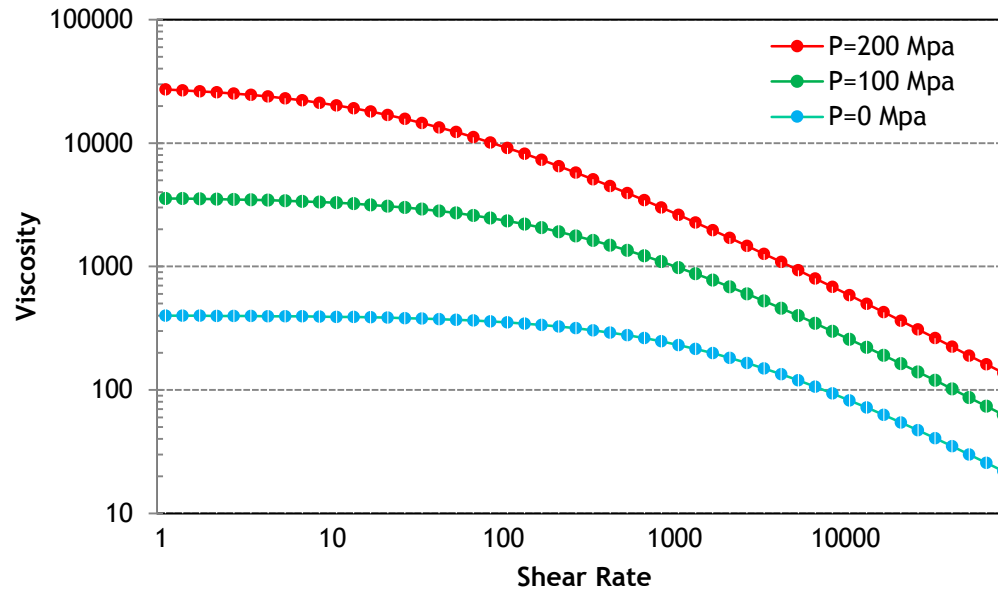
점도가 전단률 보다 온도에 민감한 영역

(b) 전단률이 높은 경우 : 플라스틱의 점도가 전단률에 영향이 큰 영역 (Power-Law region)

점도가 온도 보다 전단률에 민감한 영역

점도와 압력과의 관계

플라스틱의 점도(viscosity)는 압력(pressure)에 영향을 받는다. 압력이 높을수록 점도는 높아지고 압력이 낮을수록 점도는 낮아진다. 이것은 높은 압력으로 인하여 고분자 상호간의 간격이 좁아져서 흐름성이 나빠지기 때문이다. 일반적으로 플라스틱 수지의 점도는 낮은 압력 영역에서는 압력에 크게 영향을 받지 않지만 높은 압력 영역에서는 크게 영향을 받는다.



Viscosity dependency of Pressure

(c) 점도 모델 (viscosity model)

Moldflow가 열가소성 수지의 점도를 예측하기 위하여 사용하는 거동 모델은 Cross-WLF 이다. 수지의 점도를 모든 온도, 압력, 전단률 조건에서 측정할 수 없으므로 특정 조건에서의 점도를 필요한 개수 만큼 측정하고 그 측정값을 이용하여 아래 수식의 상수 값들을 계산하고 측정되지 않은 나머지 부분에 대해서는 완성된 Cross-WLF 점도 거동 모델을 이용하여 계산한다.

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}}$$

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[\frac{-A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right]$$

$$T^* = D_2 + D_3 P$$

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 P$$

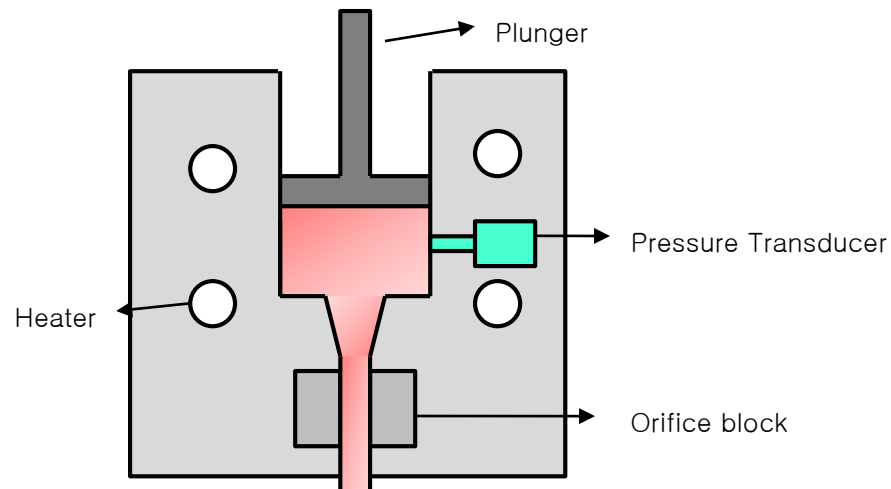
여기서 상수 값들 중 D3는 점도의 압력의존성과 관계있다. D3 값이 0인 경우는 점도의 압력 의존성이 측정되지 않은 경우이다. 일반적으로 사출압력이 낮은 경우에는 점도의 압력 의존성이 무시될 수도 있지만 그렇지 않은 경우에는 반드시 고려하여야 한다.

(d) 점도의 측정 (viscosity measurement)

열가소성 플라스틱 수지의 점도를 측정하는 여러 가지 방법이 있지만 Moldflow에서 사용하는 점도 측정 방법은 모세관 점도계(Capillary Rheometer)와 사출성형 점도계 (Injection Molding Rheometer)이다. 그러나 사출성형 점도계가 더 정확히 점도를 측정할 수 있는 것으로 평가되고 있다.

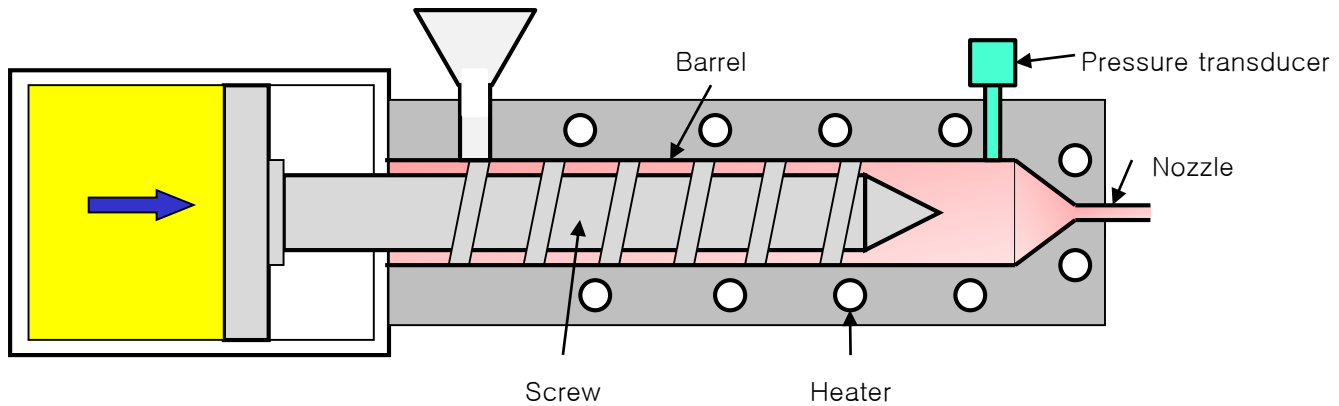
모세관 점도계 (Capillary Rheometer)

모세관 점도계는 용융된 플라스틱 수지를 플런저로 밀어 모세관을 통과시키면서 그 압력차이를 측정하여 점도를 계산한다. 구조도 간단하고 측정절차도 간단하지만 빠른 속도를 만들기 어려워 높은 전단률 구간에서의 점도 측정이 어렵다는 단점이 있다. 전단률이 대략 10~10001/s 구간에서 비교적 정확한 측정값을 제공한다.



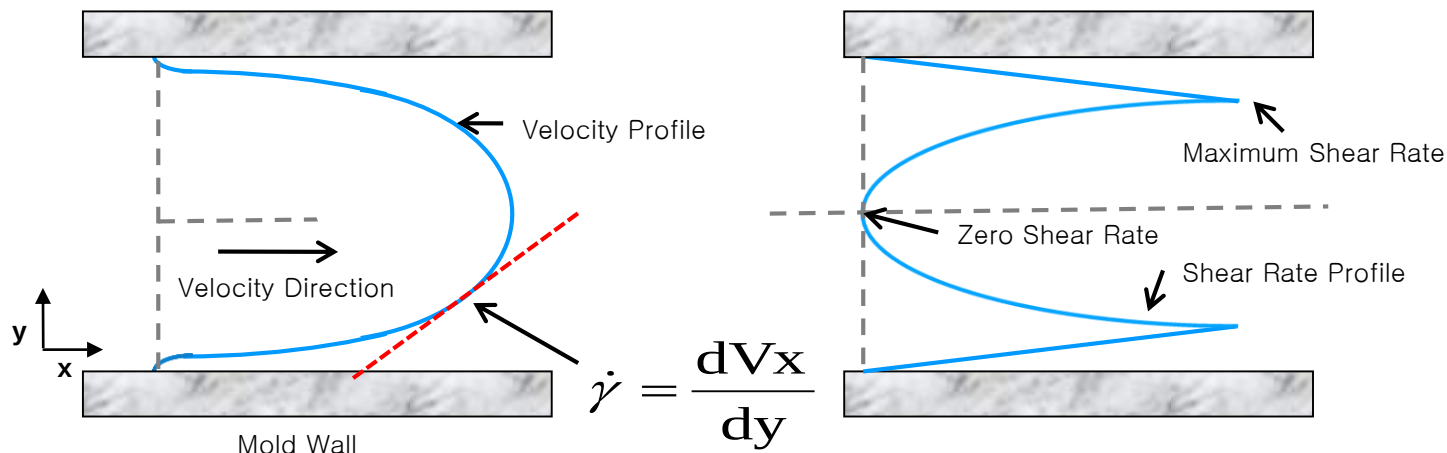
사출성형 점도계 (injection molding rheometer)

모세관 점도계와 점도를 측정하는 기본원리는 동일하지만 실제 사출성형 공정에서와 같이 높은 전단률 영역에서의 점도 측정이 정확하고, 보다 균일한 온도의 용융 수지를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 모세관 점도계에 비하여 시료의 사용량이 많고 장비도가 고가라는 단점들도 있다.



(3) 전단률 (Shear Rate)

금형내의 유동에서 전단률(shear rate)란 캐비티 두께 방향으로 수지 흐름 속도 차이에 의한 전단 변형(shear strain)의 정도를 말한다. 즉 전단변형은 캐비티 두께 방향의 속도구배 (dV_x/dy) 이다. 전단률의 물리적 의미는 두께 방향의 층 간의 속도 차이가 크면 그 고분자는 높은 전단 변형이 된다는 것이다.



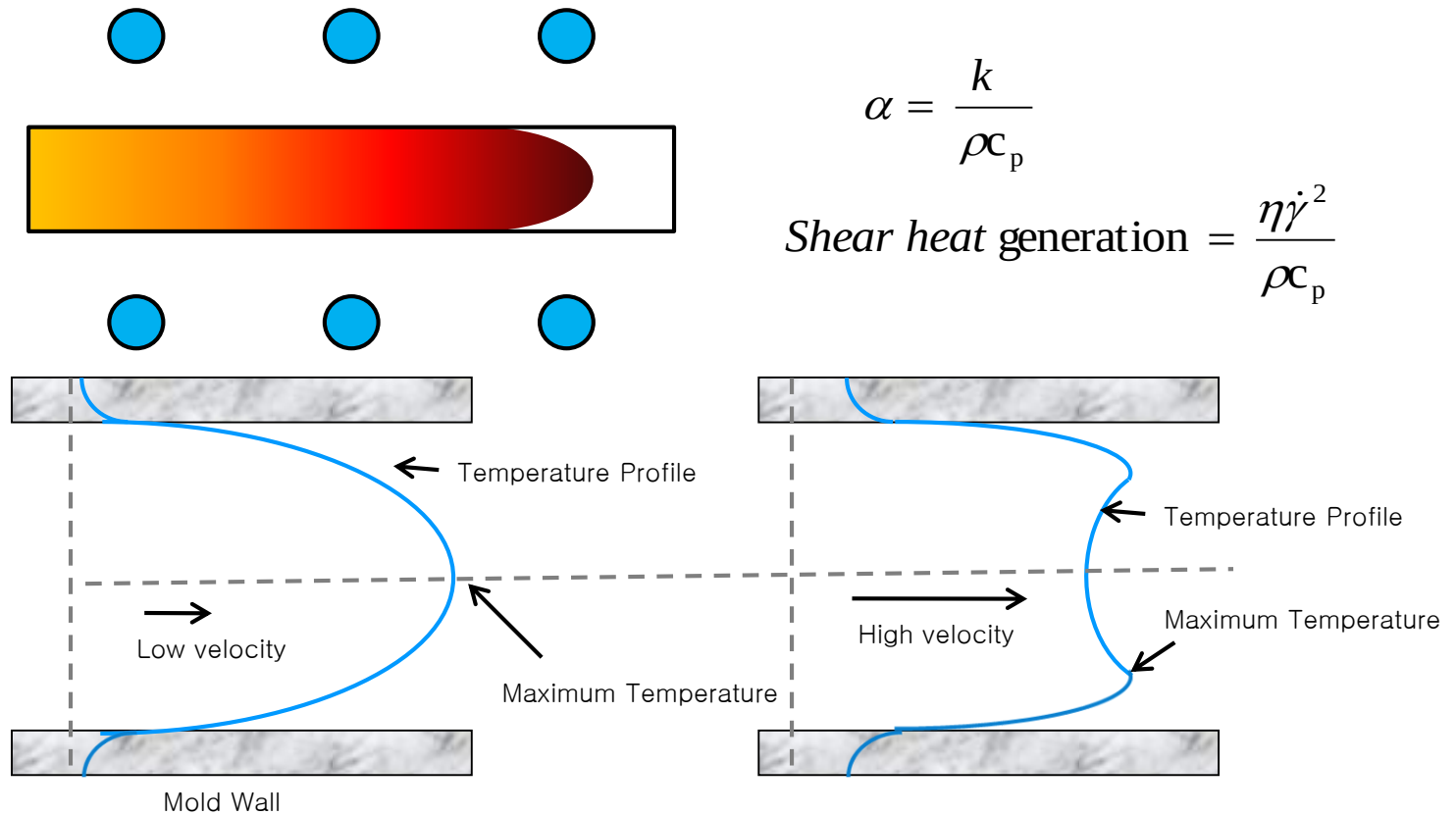
전단률의 크기는 두께 방향의 중앙은 0이고 고화층과 유동층 계면에서 가장 크다. 그리고 전단률의 크기는 플라스틱의 흐름속도가 빠를수록 그리고 두께가 작을수록 커진다. 즉 플라스틱 수지가 좁은 통로를 빠르게 지나갈 때 가장 크다. 그래서 일반적으로 금형에서 전단률이 가장 큰 부분은 바로 게이트 이다.

전단률은 플라스틱 수지의 점도에 영향을 미치는 것은 물론이고 플라스틱 수지의 온도와, 배향성 및 물성에 영향을 미친다.

전단률과 플라스틱 수지의 온도

일반적으로 플라스틱 수지가 차가운 금형으로 충전되면 흐르는 동안 금형으로의 열 손실(heat loss)로 인하여 플라스틱 수지의 온도가 점차 낮아지는 것으로 이해하고 있다. 그러나 실제로는 사출속도에 따라서 플라스틱 수지의 온도는 높아질 수도 있고 낮아질 수도 있다. 이것은 수지의 전단 흐름에 의하여 전단열 (shear heating) 발생을 고려하지 않았기 때문이다.

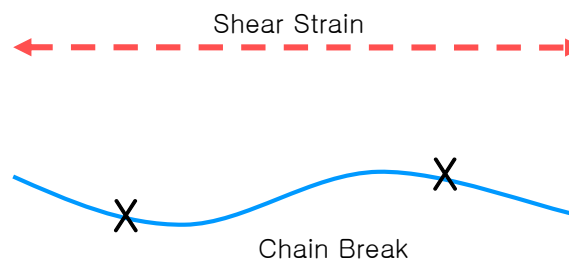
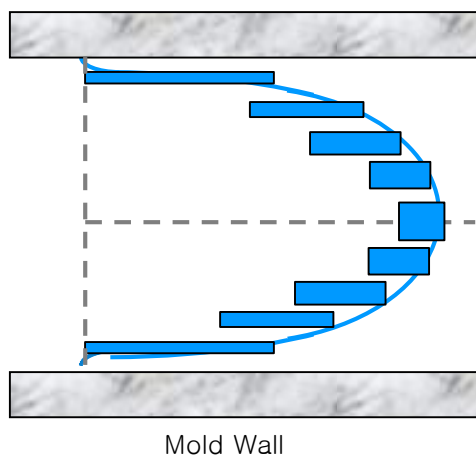
열 손실의 크기는 일반적으로 냉각수 온도, 플라스틱 수지 및 금형의 열전도에 비례하고, 전단열 발생의 크기는 수지의 점도와 전단률의 제곱에 비례한다. 따라서 동일 점도와 두께의 경우라면 수지의 흐름 속도에 따라 전단열 발생이 크게 달라진다. 따라서 사출속도가 느린 경우에는 플라스틱 수지가 금형과 접하는 시간이 길어서 열 손실이 많고 전단열 발생이 적어서 수지 온도는 점차 낮아지게 되고, 그 반대의 경우는 높아지게 된다.



전단률과 플라스틱 수지의 배향 및 물성

플라스틱 수지는 금형내에서 흐르는 동안 전단률에 의하여 배향이 된다. 전단률이 큰 표면에서 특히 배향이 강하게 되며 중심으로 갈수록 배향성은 낮아진다. 전단률이 큰 표면부는 강하게 배향된 상태로 빠르게 냉각되므로 고체가 된 후에도 배향성을 그대로 유지하지만, 전단률이 약한 중심부는 충전과정에서 약한 배향이 존재하기는 하지만 느린 냉각속도로 인하여 고체가 되는 과정에 배향성이 사라진다. 따라서 성형품의 표면부와 중심부는 형태학적으로 큰 차이가 있으며 기계적 물성에서도 상당한 차이를 보인다.

또한 기준치 이상의 높은 전단률을 받게 되면 플라스틱 수지의 고분자 사슬은 끊어져서 수지의 물성저하가 발생한다. 특히 게이트의 단면적이 성형품 볼륨에 비하여 상당히 작거나 충전을 아주 빠르게 하는 경우 게이트에서의 최대 전단률은 쉽게 그 수지가 견딜 수 있는 최대 허용 전단률을 넘게 된다. 이러한 경우 게이트를 통과하는 수지의 고분자사슬이 끊어져서 결국 성형품 전체의 물성이 저하된다. 따라서 적절한 게이트의 폭을 결정하는 중요한 변수가 바로 전단률이다.



(4) 전단 응력 (Shear Stress)

전단응력은 수지의 전단 흐름에 의한 점도와 전단률의 곱이다. 금형의 두께 방향으로 플라스틱 수지의 점도와 전단률이 다르므로 전단응력 역시 두께 방향으로 다르다. 전단응력은 전단률과 마찬가지로 고화층과 유동층 계면에서 가장 크고 중심부에서 0이다. 물론 수지의 흐름이 멈추면 전단응력은 0이 된다.

$$\tau = \eta \times \dot{\gamma}$$

수식으로부터 알 수 있듯이 전단응력은 플라스틱 수지의 온도가 낮은 상태에서 좁은 통로로 빠르게 충전되는 경우 높아지게 되며, 전단응력 역시 성형과정에서 플라스틱 수지의 허용 최대치를 넘는 경우 재료의 물성 저하가 발생하여 성형품의 취출 과정 또는 사용 중에 크랙이 발생하기 쉬워진다. 성형품에서 일반적으로 전단응력이 가장 큰 부분은 주로 게이트 주변의 두께가 얇은 부분이다. 또한 전단응력이 크면 고분자의 배향성을 증가시켜 배향 편차에 의한 잔류응력(residual stress)을 증가시킨다.

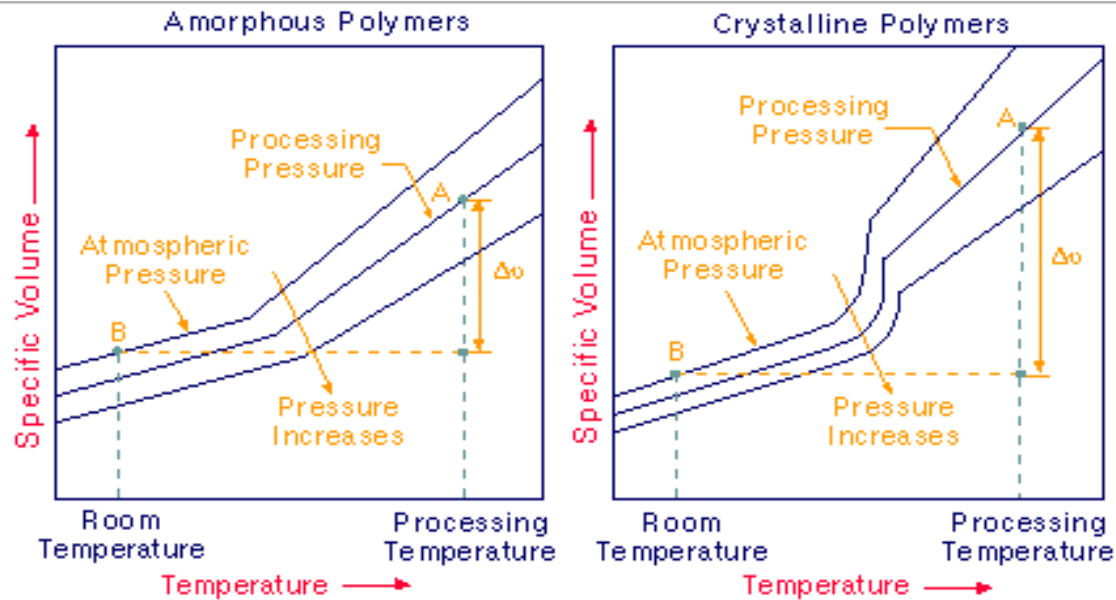
1-3) 수축률 (shrinkage)

금형으로 충전된 수지는 냉각과정에 수축을 한다. 그러나 성형품의 모든 부분이 동일하게 수축을 하는 것이 아니라 여러 가지 원인들에 의하여 수축률에 차이가 발생한다. 수축률 차이는 성형품의 치수문제, 싱크문제 그리고 변형문제들의 원인이 된다. 플라스틱의 수축에 영향을 미치는 인자들에는 pvT, 배향, 금형 구속 그리고 응력완화 등이 있다.

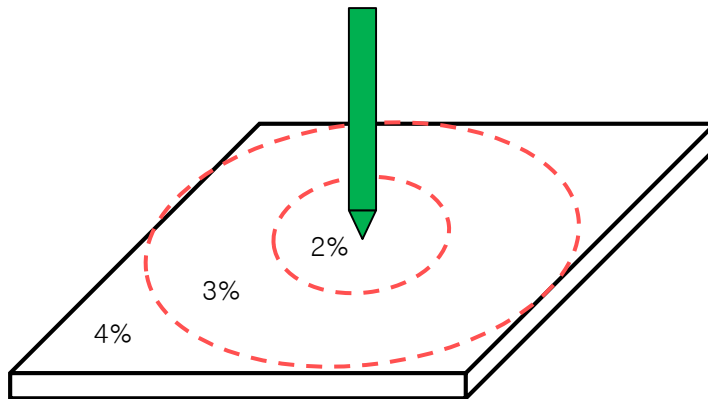
(1) 수축에 영향을 미치는 인자

(a) pvT

플라스틱 수지가 받는 압력에 따라 냉각될 때 수축률 변화를 비체적으로 표현한 그래프가 pvT이다. 기본적으로 동일 온도의 플라스틱 수지는 압력을 많이 받고 냉각될수록 수축률이 작고 압력을 작게 받고 냉각될수록 수축률이 크다. 또한 같은 압력을 받아도 성형품의 두께가 두꺼운 부분은 수축률이 크고, 두께가 얇은 부분은 수축률이 작다. 따라서 플라스틱 수지는 냉각되는 과정의 온도와 압력 이력에 의하여 최종 수축률이 결정된다 라고 할 수 있다.

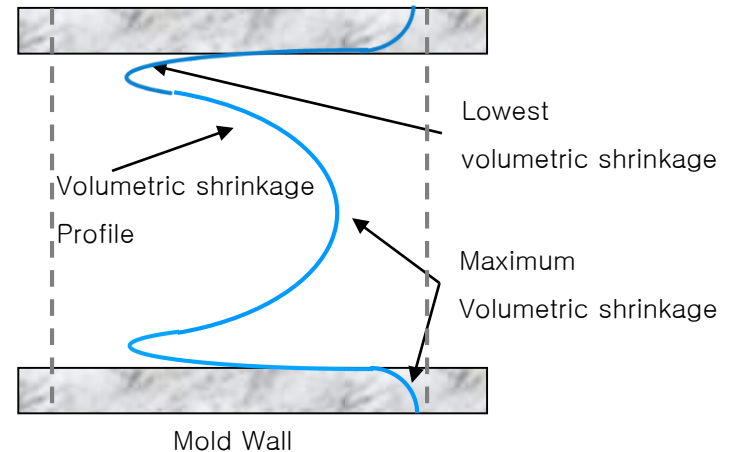
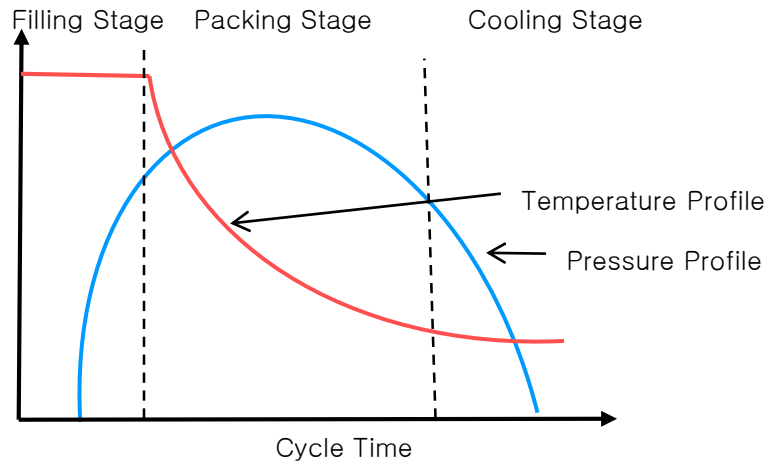


사출성형에서는 게이트에 가까운 부분은 높은 압력을 받고 먼 부분은 낮은 압력을 받는다. 물론 수지의 점도가 낮은 경우와 성형품의 두께가 두꺼운 경우에는 그 차이가 크지 않을 수 있다. 수축률 편차를 줄이기 위해서는 게이트 숫자를 증가시켜야 하지만 웰드라인, 비용 등의 이유로 게이트 숫자는 최소화 되어야 한다.



성형품의 두께가 일정하지 않으면 같은 압력을 받아도 수축률은 달라진다. 성형품의 두께는 기능상으로, 구조적으로 그리고 성형문제로 인하여 다르게 설정되는 경우가 많다. 특히 구조보강을 위해 사용되는 리브는 싱크 방지를 위하여 반드시 성형품의 기본두께의 최소 1/2 이하로 설정하여야 한다. 실제로 두께가 다른 부분의 체적 수축률 차이가 발생하는 이유는 두께 위치에 따라서 서로 다른 압력을 받으면서 고체가 되기 때문이다.

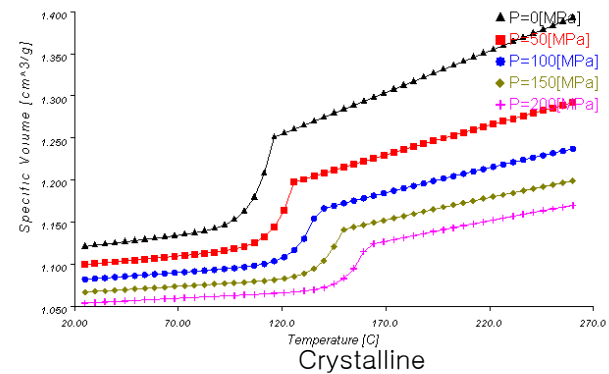
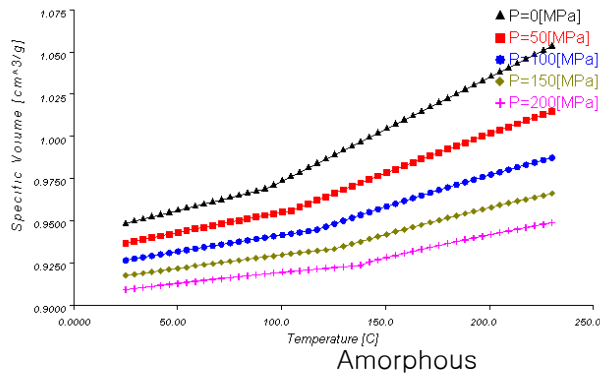
고화층의 경우 수지의 압력이 0인 유동선단에서 고체가 되므로 수축률이 그 수지의 최대 수축률을 가지며, 고화층의 바로 내측의 경우는 금형 내압이 최대인 시점에서 고체가 되므로 체적 수축률이 가장 작다. 마지막으로 중심부의 경우는 금형 내압이 다시 낮아진 이후에 고체가 되므로 체적 수축률이 다시 증가한다. 물론 두께가 상당히 두꺼운 경우 중심부는 금형 내압이 0이 된 이후에 고체가 되므로 수축률이 고화층과 같이 그 수지의 최대 수축률을 나타낸다. 일반적으로 체적 수축률은 두께 방향의 평균치 이다. 따라서 두께가 두꺼운 부분이 얇은 부분에 비하여 체적 수축률이 크다.



열가소성 플라스틱 수지의 pvT 그래프는 수지가 결정성이나 또는 비결정성에 따라 크게 다르다. 비결정성은 열적 수축에 의해서만 수축하지만, 결정성은 열적 수축과 결정화에 의한 수축 모두를 가진다.

열적 수축 : 수지의 온도 낮아짐에 따라서 고분자의 자연스러운 응축에 의하여 체적 수축이 일어나는 것을 열적 수축이라 한다. 열적 수축률은 상대적으로 성형품의 냉각 속도에 따라 큰 차이가 발생하지 않는다. 또한 냉각과정에서 액체 상태에서의 열적 수축률은 크지만 고체 상태에서의 그 수축률은 상당히 작다.

결정화에 의한 수축: 결정성 수지의 경우는 용융온도(T_m) 이하로 냉각되면 결정화를 시작하고, 이 결정화에 의하여 조밀한 조직을 형성함으로써 체적 수축률은 급격히 커진다. 결정의 크기와 결정의 수 등은 성형품의 냉각 속도에 따라 크게 달라진다. 냉각속도가 빠를수록 결정의 수는 많아지지만 결정의 크기는 줄어들어 체적 수축률은 감소한다. 따라서 결정화에 의한 체적 수축률은 냉각 속도에 크게 영향을 받는다. 이러한 냉각속도에 따른 수축률 변화는 현재 이론적으로 계산할 수 있긴 하지만, 결정화 관련 많은 추가적인 수지 물성이 필요하여 일반적으로 Moldflow에서는 실험적 방법으로 이를 해석에 반영하고 있다.

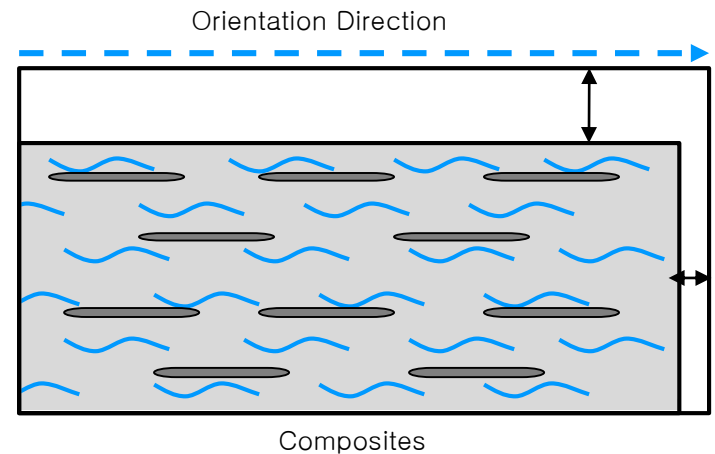
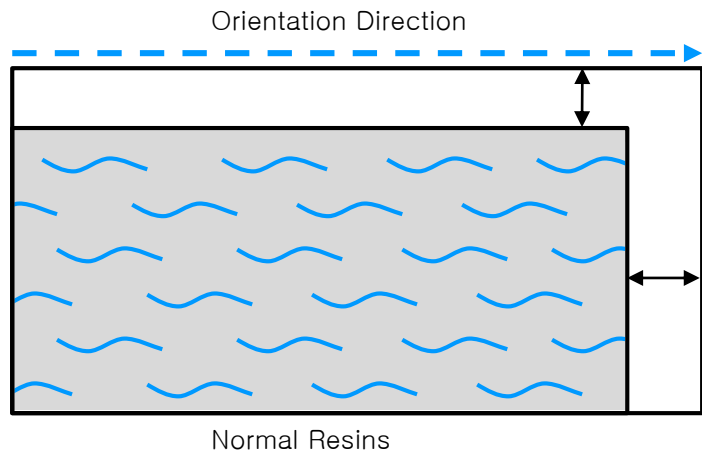


(b) 배향

플라스틱 수지는 전단흐름에 의하여 수지의 흐름 방향으로 고분자의 배향이 발생한다. 물론 전단률을 크게 받는 성형품의 표면은 강한 배향성을 나타내지만 중심부는 배향성이 거의 없다. 또한 유리섬유와 같이 방향성을 갖는 충전제가 포함된 복합재료의 경우는 고분자의 배향 뿐만 아니라 첨가제의 배향도 발생한다. 이러한 배향은 배향방향과 그 직각 방향으로의 수축률 편차를 유발시키고, 이러한 수축률 편차는 pvT와 함께 제품 변형을 일으키는 주요한 원인이 된다. 즉 pvT는 수축의 총량을 결정하고 배향은 그 분배에 영향을 미친다.

고분자의 배향과 수축편차: 일반적으로 충전과정에 배향된 고분자는 냉각과정에 배향성이 일부 완화되어 원래 상태로 되돌아 가려는 수축이 일어나 배향 방향의 수축이 그 직각방향에 비하여 더 큰 것으로 알려져 있으나 오히려 많은 경우에 여러 가지 원인에 의하여 배향의 직각방향 수축률이 배향 방향의 그것 보다 큰 것 경우가 더 많다. 그러나 그 차이는 일반적으로 크지 않아서 변형의 주요한 원인이 되는 경우가 많지 않다. 그러나 일부 수축률 편차가 큰 수지 또는 수축률 편차가 크지 않아도 전단응력을 크게 받아 배향이 강하게 되는 경우에는 고분자 배향에 의한 변형이 크게 발생할 수 있다. 이러한 고분자 배향에 의한 수축률은 이론적으로 계산할 수 없으며, Moldflow에서는 실험적 방법으로 이를 해석에 반영하고 있다.

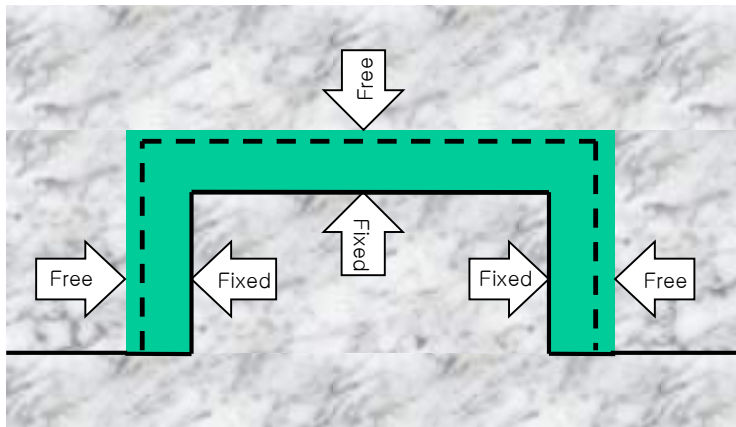
파이버의 배향과 수축편차 : 방향성을 가지는 파이버는 고분자의 배향과 마찬가지로 수지의 전단 흐름에 의하여 일반적으로 배향된다. 그러나 파이버의 배향 방향 그 강도는 고분자의 경우 보다 더욱 복잡하게 영향을 받는다. 또한 파이버 배향 방향으로의 수축률은 고분자의 배향의 경우와 다르게 항상 수축률이 그 직각 방향에 비하여 적고 그 편차도 상당히 크다. 이것은 강성이 강한 파이버의 배향에 의하여 고분자의 수축이 물리적으로 크게 제한 받기 때문이다. 따라서 파이버의 배향은 성형품의 변형에 큰 영향을 미친다. 이러한 파이버 배향에 따른 수축률 편차는 이론적으로 계산할 수 있다.



(c) 금형 구속

금형내에서는 플라스틱 수지가 냉각되는 동안 수축을 하여야 하지만 금형이라는 구속에 의하여 두께 방향 수축은 가능하지만 길이방향 수축은 제한된다. 길이 방향은 성형품이 금형으로부터 취출된 이후부터 가능하다. 따라서 성형품의 길이 방향은 두께 방향에 비하여 수축률이 작을 수 밖에 없다. 이러한 수축률 편차 역시 제품 치수와 변형에 영향을 미친다.

특히 금형 구속은 성형과정에 잔류응력을 발생시키는 원인이다. 즉 플라스틱 수지가 수축하려고 할 때 금형 구속이 없다면 잔류 응력 발생 없이 바로 수축으로 진행된다. 성형품이 금형으로 부터 취출 되면 이러한 잔류응력은 성형품의 수축과 변형 그리고 성형품 내의 최종 잔류응력으로 바뀐다.



(d) 응력 완화 (stress relaxation)

금형속에서 성형품의 수축에 의하여 발생한 잔류응력은 취출 후 응력이 완화되면서 수축과 변형으로 바뀐다. 그러나 이러한 응력완화는 재료 특성과 수지의 온도 및 시간 이력에 따라 달라지게 된다. 이것은 플라스틱의 점탄성 성질을 가지기 때문이다. 높은 온도에서는 성형품 내의 응력이 수축과 변형으로 쉽게 변화하지만 낮은 온도에서는 많은 응력이 성형품 속에 갇히게 되고 변형과 수축은 작아질 것이다. 즉 금형 온도가 낮고 냉각시간이 길어질 수록 이러한 응력완화는 어려워져서 성형품의 수축 및 변형은 줄어들고 내부에 갇히는 잔류응력은 증가한다. 이러한 응력 완화 거동에 수축률 영향은 이론적으로 계산할 수 없으며, Moldflow에서는 실험적 방법으로 이를 반영하고 있다.

(2) 금형 가공 수축률 (mold shrinkage)

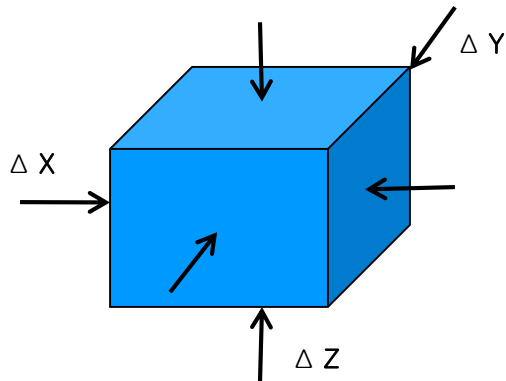
이와 같이 플라스틱 수지는 금형 속에서 냉각 되면서 수축을 한다. 따라서 실제 설계된 치수의 성형품을 얻기 위해서는 캐비티를 플라스틱 수지의 수축률을 고려하여 그 만큼 크게 만들어야 한다. 이것을 금형 가공 수축률이라 한다.

그런데 여기에는 두 가지 문제가 있다. 첫 번째는 플라스틱의 수축률이 위치에 따라서 방향에 따라서 다르다는 것이다. 게이트에 가까운 부분과 먼 부분, 두꺼운 부분과 얇은 부분 그리고 배향된 방향과 그 직각 방향으로 수축률이 모두 다르기 때문이다. 두 번째 문제는 체적 수축률로 선형 수축률을 예측할 수 없다는 것이다. 금형 구속으로 인하여 길이방향 수축과 두께 방향 수축이 다르기 때문이다.

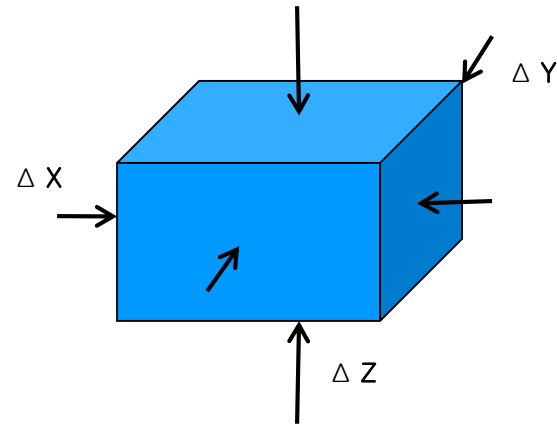
따라서 게이트의 수가 적을 수록, 성형품의 두께 편차가 클수록, 방향성을 갖는 충전제를 가지는 수지일수록 마지막으로 형상이 복잡할수록 금형 가공 수축률을 예측하기 힘들다.

체적수축률과 선형 수축률

일반적으로 모든 방향으로 동일한 조건이라면 선형 수축률은 이론적으로 체적 수축률의 $1/3$ 이다. 그러나 앞서서도 언급하였듯이 사출성형에서는 금형 구속으로 인하여 모든 방향이 동일 조건이 아니다. 두께 방향이 길이 방향에 비하여 수축이 보다 용이하기 때문에 실제로 선형 수축률과 체적 수축률의 비는 $1/3 \sim 1/5$ 정도 일 것으로 판단된다.



$$3\%(\Delta V) = 1\%(\Delta X) + 1\%(\Delta Y) + 1\%(\Delta Z)$$



$$3\%(\Delta V) = 0.75\%(\Delta X) + 0.75\%(\Delta Y) + 1.5\%(\Delta Z)$$

금형 가공수축률의 계산

앞에서 설명한 여러 가지 이유로 금형 가공 수축률은 캐비티 위치에 따라 달라야 하지만 실제로는 그렇게 금형을 가공할 수 없다. 다만 방향에 따라 다르게 설정하는 것은 가능하다. 따라서 금형가공 수축률을 적절하게 설정하여도 성형품의 치수가 큰 부분과 작은 부분이 존재할 수 밖에 없다는 것이다. 금형 가공 수축률의 절대적 크기에 가장 크게 기여하는 것은 바로 수지 자체의 수축률이다. 일반적으로 비결정성 수지는 5/1000, 결정성 수지는 15/1000 정도이다. 플라스틱 수지의 금형 가공 수축률의 상대적 크기를 비교하는 가장 좋은 방법은 PVT를 이용하는 것이다.

$$\text{금형 가공 수축률 (Mold Shrinkage)} = \frac{(\text{상온에서의 금형치수}) - (\text{상온에서의 성형품 치수})}{(\text{상온에서의 금형 치수})}$$

1-4) 열적 특성 (thermal properties)

사출성형 과정에서의 플라스틱 수지의 온도 변화를 예측하기 위해서는 플라스틱 수지의 열적인 물성 (비열, 열전도도, 밀도) 이 필요하다. 충전과정에서는 금형으로의 열손실과 전단률에 의한 열 발생이 비슷하여 플라스틱 수지의 온도가 보존되지만, 보압 냉각 과정에서는 열손실만 존재하여 플라스틱 수지의 온도가 내려간다. 플라스틱 수지의 온도가 특정 온도에 도달하면 더 이상 흐를 수 없는 상태가 되고, 더 내려가면 취출해도 문제 없을 만큼 충분히 단단한 고체가 된다. 이 온도를 각각 천이온도(transition temperature)와 취출온도(ejection temperature)라 한다.

따라서 플라스틱 수지의 열적인 특성은 사출성형 공정 전체에 영향을 미친다.

(1) 열 확산도 (thermal diffusivity)

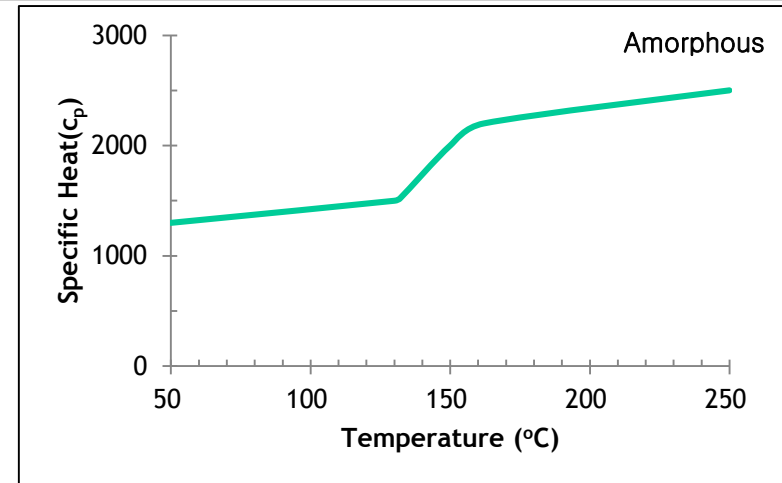
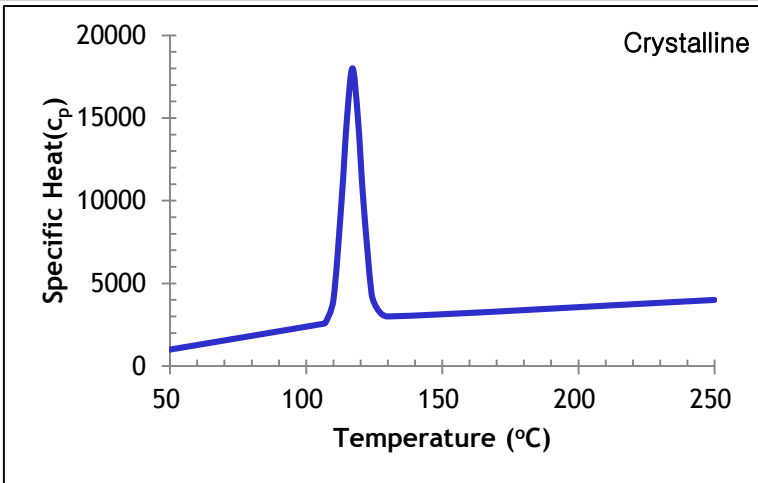
열 확산도는 열이 재료를 통하여 확산되는 속도를 말한다. 열확산도는 열전도도를 밀도와 비열로 나눈 값이다. 열확산도가 클 수록 플라스틱 수지의 냉각속도는 빨라진다.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad \alpha = \text{thermal diffusivity}(m^2 / s), \quad \kappa = \text{thermal conductivity}(W \cdot m^{-1}(^{\circ}C)^{-1})$$
$$\rho = \text{density}(kg \cdot m^{-3}), \quad c_p = \text{specific heat}(J \cdot kg(^{\circ}C)^{-1})$$

(1) 비열 (specific heat (Cp))

단위 질량의 수지의 온도를 단위온도 상승시키는데 필요로 하는 열량을 표시하는 것으로 물질의 열량을 나타내는 척도다. 이것은 결국 공급된 열량을 수지의 온도로 변화시키는 능력을 말한다. 비열이 클수록 플라스틱의 온도변화가 느리게 발생한다. 따라서 비열이 클수록 플라스틱 수지의 냉각속도가 느려 사이클 시간이 길어진다.

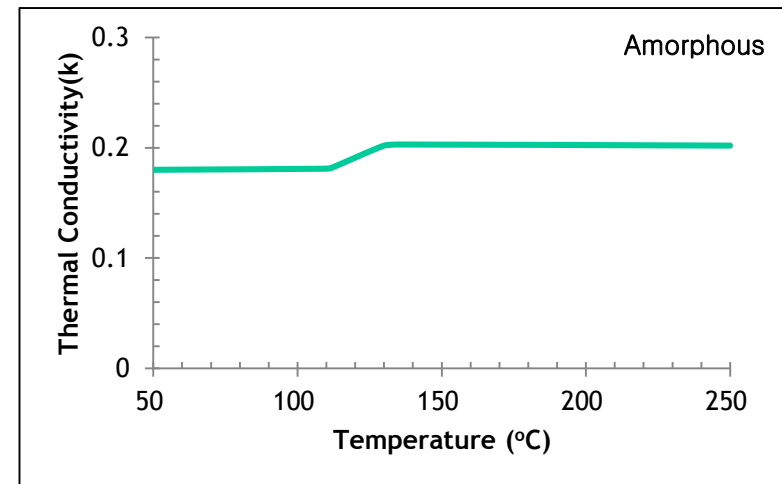
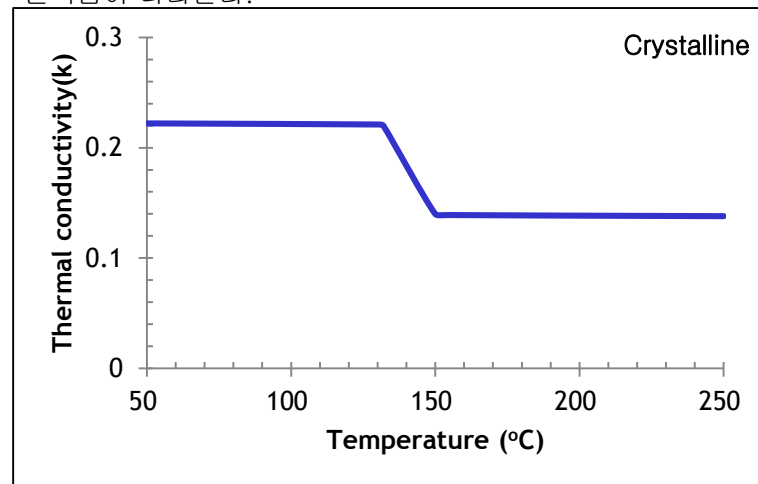
DSC(Differential Scanning Calorimeter)를 이용하여 온도에 따른 비열을 측정하여 보면 결정성과 비결정성 플라스틱 수지에 대하여 상당한 차이를 발견할 수 있다. 결정성의 경우는 용융온도(Tm) 영역에서 큰 변곡점이 나타나고, 비 결정성의 경우는 유리전이온도 (Tg) 영역에서 큰 변곡점이 나타난다.



(2) 열전도도 (thermal conductivity (k))

단위 길이만큼 열량을 전달하는 능력을 말한다. 즉 이것은 열을 얼마나 효과적으로 전달하느냐를 의미한다. 플라스틱은 열전도도가 금속보다 훨씬 작아서 단열적인 특성이 높다. 열전도도가 클수록 성형품의 냉각속도는 짧아 사이클 시간이 짧아진다.

열전도도도 결정성의 경우는 용융온도(T_m) 영역에서 큰 변곡점이 나타나고, 비 결정성의 경우는 유리전이온도 (T_g) 영역에서 큰 변곡점이 나타난다.



(3) 밀도 (density (ρ))

밀도는 고체밀도와 액체 밀도가 있다. 고체밀도는 상온에서의 밀도이고 액체 밀도는 성형온도에서의 밀도이다. 두 밀도의 차이가 플라스틱 수지의 수축률이 된다. 이러한 밀도는 PVT 측정을 통하여 그 값을 얻을 수 있다. 플라스틱 수지의 밀도가 높을수록 성형품의 냉각속도는 길어져 사이클 시간이 길어진다.

(4) 취출 온도 (ejection temperature)와 천이온도 (transition temperature)

취출 온도 (ejection temperature)

취출 온도는 성형품을 취출할 수 있는 플라스틱 수지의 기준 온도가 된다. 플라스틱 수지의 온도가 충분히 낮아지면 강성이 증가하여 금형 밀핀에 의하여 취출 되었을 때 심각한 밀핀 자국이 발생하지도 않고, 취출 과정에 의한 변형이 발생하지도 않는다. 이 온도를 취출 온도 또는 고화온도라 정의한다. 취출 온도는 성형 사이클 시간 계산에 중요한 역할을 한다. 두께 방향으로 제품이 80~90%가 취출 온도에 도달하고 러너가 50~60% 취출 온도에 도달하면 성형품의 취출이 가능하기 때문이다.

일반적인 PP와 ABS의 취출 온도는 80~110℃, PC는 110~130 ℃이다.

천이 온도 (transition temperature)

천이온도는 플라스틱 수지가 더 이상 흐를 수 없는 플라스틱 수지의 기준온도가 된다. 플라스틱 수지의 온도가 낮아지면 수지가 액상에서 고상으로 천이되어 점도가 크게 증가하여 압력에 의하여 더 이상 전진하기 어려운 상태가 된다. 이 온도를 천이온도라 정의한다. 천이온도는 일반적으로 취출 온도에 비하여 10~20 ℃ 정도 높다. 그러나 몇몇 결정성 수지 (ex, PA 또는 PBT)의 경우는 취출 온도와 천이온도의 편차가 70~100 ℃에 달한다. 이것은 이들 수지가 상당히 높은 온도에서 결정화를 하기 때문에 수지의 온도가 조금만 낮아져도 흐를 수 없는 상태에 도달하기 때문이다.

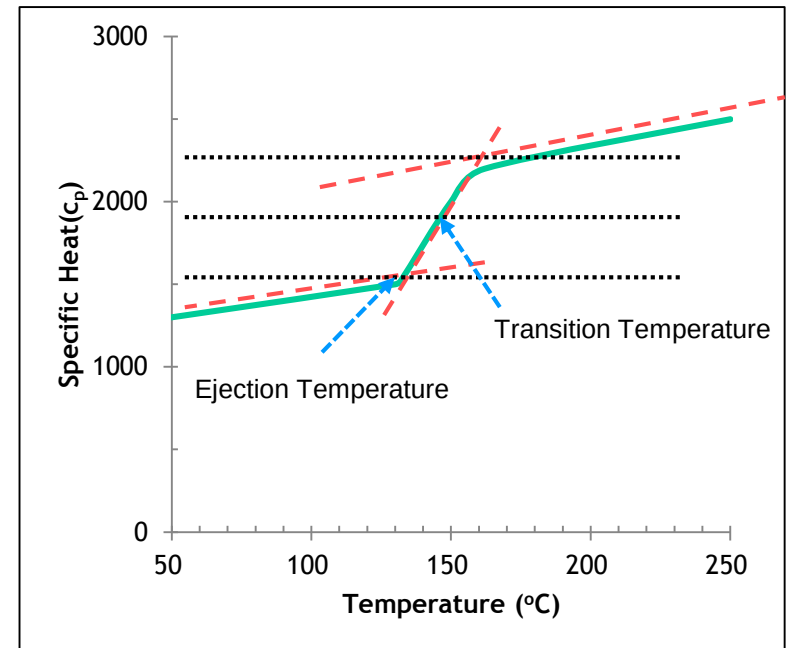
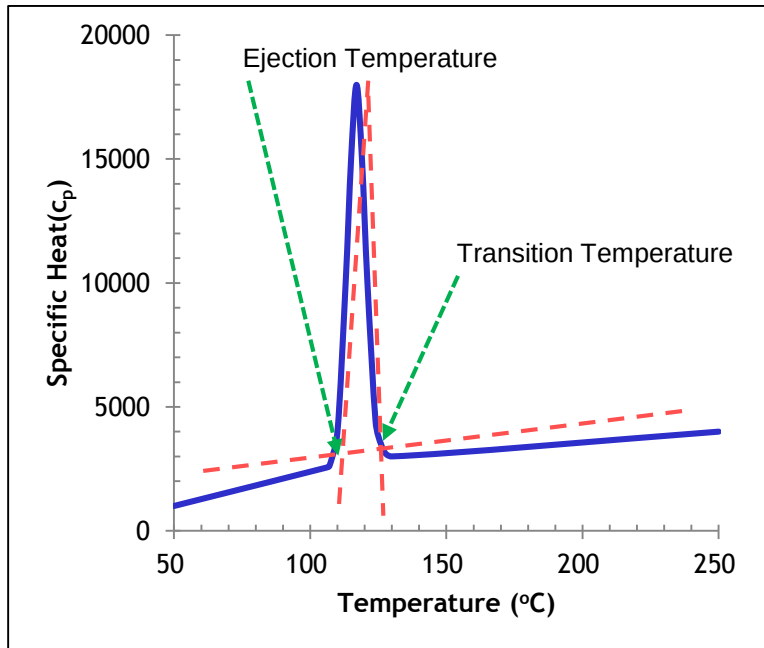
천이온도는 캐비티의 얇은 부분에서의 수지의 흐름 정체에 의한 미성형을 판단하거나, 보압의 적절한 시간 예측을 위한 게이트의 고화시간을 판단하는데 중요한 역할을 한다.

취출 온도 (ejection temperature)와 천이온도 (transition temperature) 측정

취출 온도와 천이 온도는 DSC를 이용하여 측정되는 비열 값을 이용하여 판단할 수 있다. 결정성과 비결정성 플라스틱 수지는 각각 판단 기준이 조금 상이하다. 결정성의 경우는 변곡점에서 3개의 외삽 선을 아래와 같이 그리고 좌측 만나는 점의 온도가 취출 온도, 우측 만나는 온도가 천이온도가 된다. 비 결정성의 경우는 3개의 외삽 선을 아래와 같이 그리고 좌측 만나는 점의 온도가 취출 온도, 좌측과 우측의 중간 위치 값의 온도가 천이온도가 된다.

Amorphous

Crystalline



1-5) 기계적 특성 (mechanical properties)

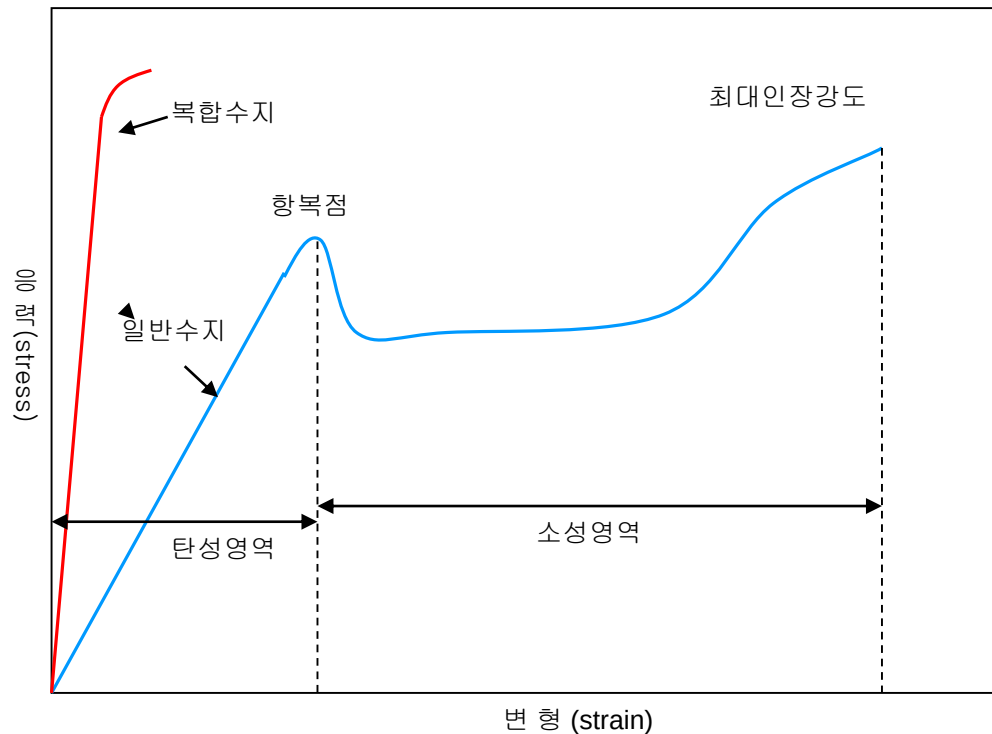
사출성형 과정에서 발생한 잔류응력을 이용하여 성형품의 변형을 계산하는 변형해석을 수행한다. 변형해석을 위해서는 플라스틱 수지의 기계적 물성을 필요로 한다.

변형해석을 위해 필요한 기계적 물성에는 탄성계수 (elastic modulus (E)), 전단계수 (shear modulus (G)), 푸아송 비 (poisson's ratio (v)), 열팽창 계수 (thermal expansion (CTE)) 등이 있다.

(1) 응력-변형 곡선 (Stress-Strain Curve)

탄성계수와 푸아송의 비는 인장시험을 통하여 확인할 수 있다. Hooke의 법칙(Hooke's Law)에 의하여 탄성영역에서의 응력과 변형의 기울기가 탄성계수가 되고 그 인장 방향의 길이 변화에 대한 그 수직 방향의 길이 변화가 푸아송의 비가 된다.

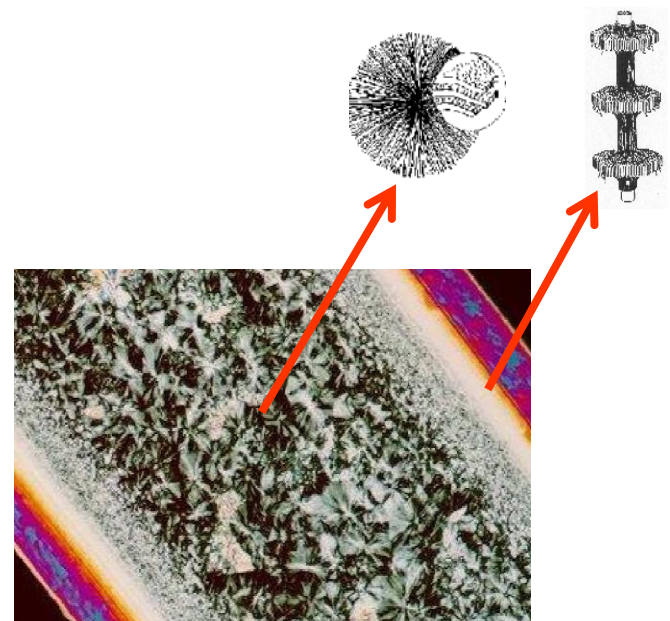
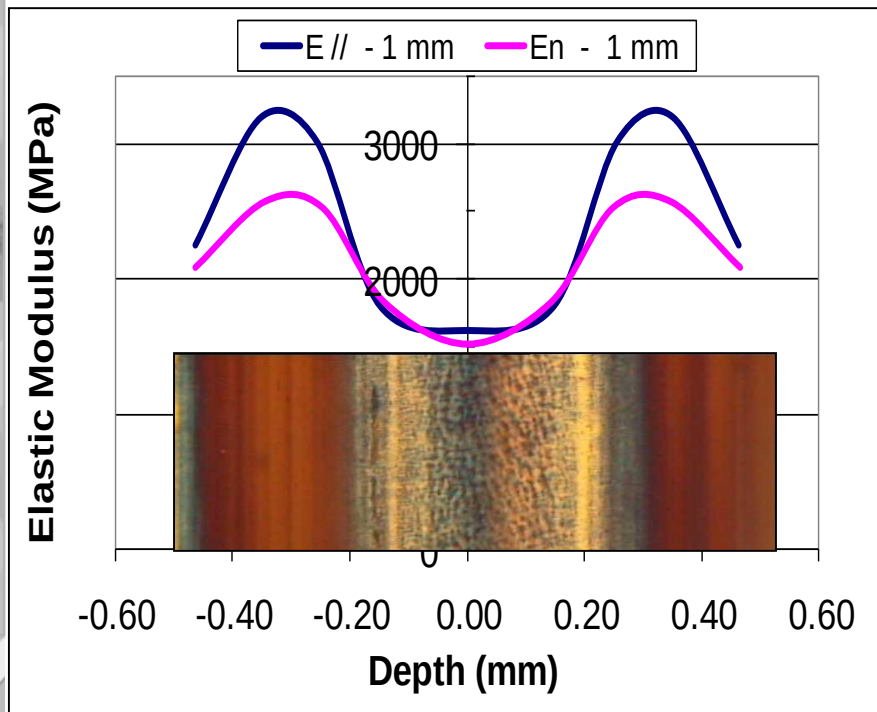
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$
$$\nu = -\frac{\epsilon_{trans}}{\epsilon_{long}}$$



일반적으로 플라스틱 수지는 금속에 비하여 약 1/10 정도의 상당히 낮은 탄성계수 값을 갖는다. 즉 동일 응력에 대하여 변형이 크다는 것이다. 그러나 유리섬유 또는 카본 섬유 등의 파이버가 포함된 복합수지의 경우는 금속의 약 1/4 ~1/2 까지로 높다. 그러나 파이버가 포함된 플라스틱 수지의 경우는 취성이 아주 커지고 기계적 물성이 이방성이 된다는 단점이 있다. 물론 파이버의 배향에 의한 잔류응력이 증가하는 것도 역시 단점이다.

(2) 기계적 물성의 이방성

물론 플라스틱 수지는 파이버가 포함되어 있지 않아도 기계적 물성의 이방성을 가진다. 충전과정의 전단 흐름에 의한 고분자 배향에 의하여 고분자의 배향 방향과 그 직각 방향이 이방성을 나타내며, 두께 방향으로 서로 냉각되는 속도가 달라서 조직이 서로 달라 이방성을 나타낸다. 아래 사진은 결정성 플라스틱 수지의 단면 조직과 그 두께 방향의 기계적 물성을 나타낸다.



좌측 그림은 고분자의 배향 방향과 그 직각 방향의 탄성계수를 나타낸 것인데, 성형품 표면에서는 강한 배향성으로 인하여 배향방향과 그 직각 방향의 탄성계수가 차이가 나고, 중심부에서는 배향성이 없으므로 배향 방향과 그 직각 방향의 차이가 없다. 그러나 전체적으로 표면 부분이 탄성계수가 크고 중심부는 작다. 이것은 표면과 중심부의 조직이 다르기 때문이다. 우측 그림은 결정성 수지의 두께 방향의 조직과 그 결정의 구조를 나타낸다. 표면은 배향 방향으로 작고 긴 막대 형상의 결정이 형성되고 중심은 큰 구형의 결정이 형성된다. 따라서 사출성형 플라스틱은 이방성의 기계적 물성을 가진다.

그러나 일반 플라스틱 수지의 기계적 물성의 이방성은 크지 않아서 평균값을 사용하여도 변형해석에서는 큰 문제가 없다. 그러나 파이버가 포함된 복합수지의 경우 기계적 물성의 이방성이 아주 커서 반드시 파이버 배향 해석을 통하여 배향방향과 그 직각 방향의 이방성을 변형해석에서 고려하여야 한다.

(3) 기계적 물성의 측정

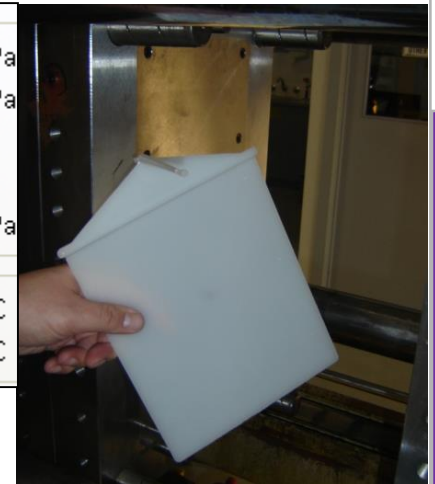
기계적 물성을 측정하기 위해서는 우선 규격에 아래 그림과 같은 샘플을 성형을 하여 배향 방향과 그 직각 방향으로 인장 절단하여 인장시편을 제작한다. 배향방향의 탄성 계수를 E1 그리고 그 직각 방향의 값을 E2라 한다. 일반적인 플라스틱 수지의 경우는 E1과 E2 값의 평균 값을 사용하고, 파이버가 포함된 복합 수지의 경우는 E1과 E2를 다르게 사용한다.

Mechanical properties data

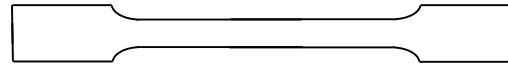
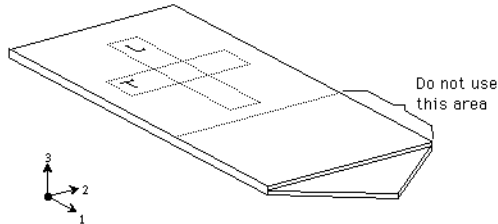
Elastic modulus, 1st principal direction (E1)	1278	MPa
Elastic modulus, 2nd principal direction (E2)	4081	MPa
Poissons ratio (v12)	0,41	
Poissons ratio (v23)	0,47	
Shear modulus (G12)	1573	MPa

Transversely isotropic coefficient of thermal expansion (CTE) data

Alpha1	2,3e-005	1/C
Alpha2	5,3e-005	1/C



(a) Experimental: E and v (ASTM D638 + ASTM E132)



11-Direction (L):

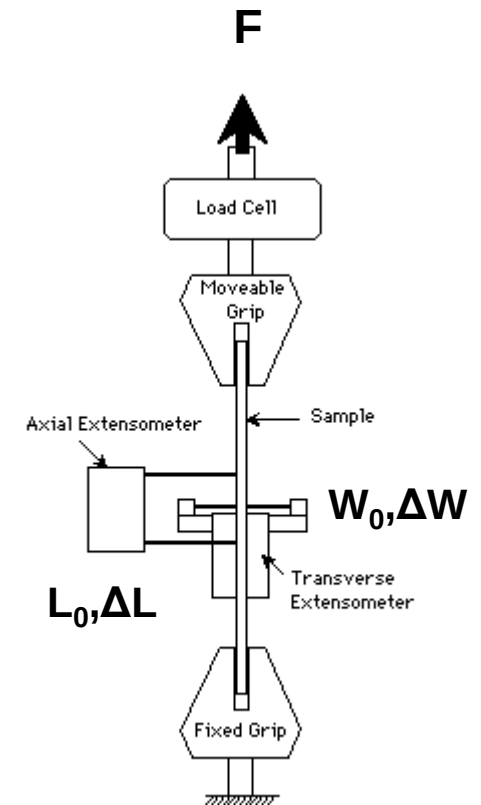
$$\sigma_{11} = \frac{F_{11}}{A_0} \quad \epsilon_{L11} = \frac{\Delta L_{11}}{L_0} \quad \epsilon_W = \frac{\Delta W}{W_0}$$

$$E_{11} = \frac{\sigma_{11}}{\epsilon_{L11}} \quad \nu_{12} = -\frac{\epsilon_W}{\epsilon_{L11}}$$

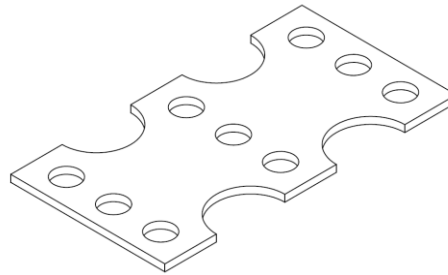
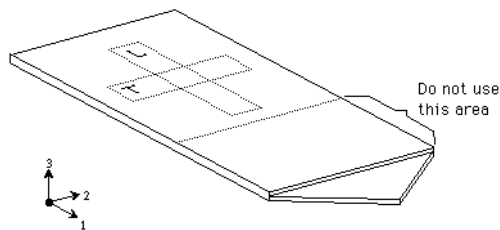
22-Direction (T):

$$\sigma_{22} = \frac{F_{22}}{A_0} \quad \epsilon_{L22} = \frac{\Delta L_{22}}{L_0} \quad \epsilon_t = \frac{\Delta t}{t_0}$$

$$E_{22} = \frac{\sigma_{22}}{\epsilon_{L22}} \quad \nu_{23} = -\frac{\epsilon_t}{\epsilon_{L22}}$$



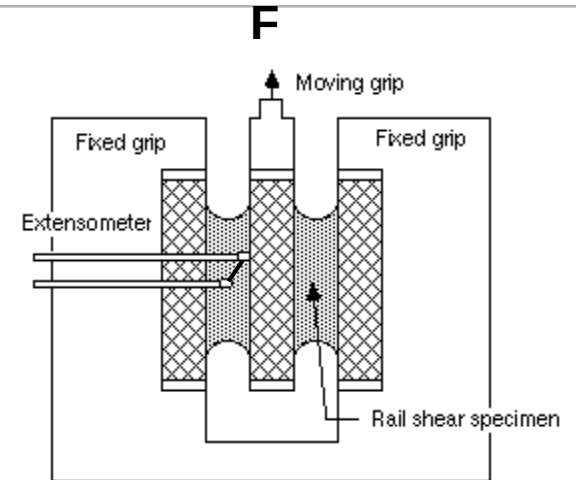
(b) Experimental: G (ASTM D4225 (modified))



Shear stress: $\tau = \frac{F}{2A_s}$

Shear strain: $\gamma = 2\varepsilon_{12}$

Shear modulus: $G_{12} = \frac{\tau}{\gamma}$

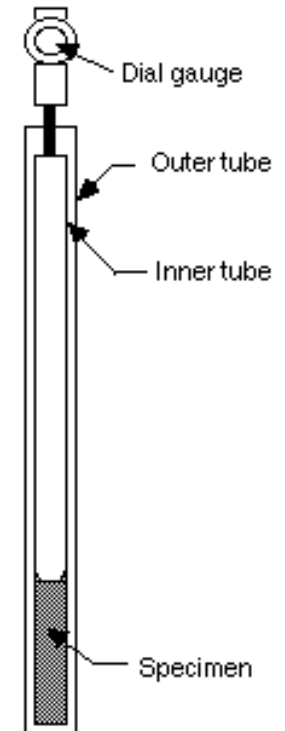


(c) Experimental: CTE (ASTM D696)

CTE:

$$\alpha_{11} = \left(\frac{\Delta L}{L_0 \Delta T} \right)_{11}$$

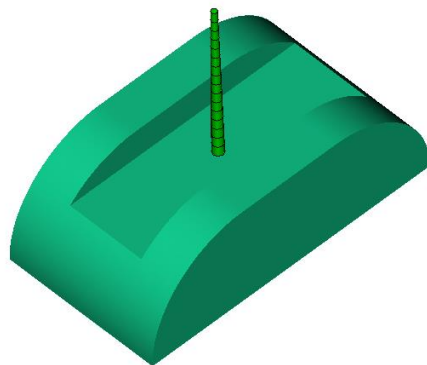
$$\alpha_{22} = \left(\frac{\Delta L}{L_0 \Delta T} \right)_{22}$$



2. 금형 (Mold)

사출성형 해석은 수지의 유동과 냉각 과정을 시뮬레이션 하는 것이다. 따라서 해석을 위하여 기본적으로 필요한 모델링의 요소는 수지의 유동해석을 위한 금형의 러너시스템과 캐비티(제품) 그리고 냉각해석을 위한 냉각시스템 이다. 사출성형 해석의 목적이 바로 이러한 제품 설계와 금형 설계를 최적화 하는 것이다. 따라서 금형 구조를 어느 정도 이해하고 있어야 해석을 통한 러너 및 냉각 설계 최적화가 가능하다.

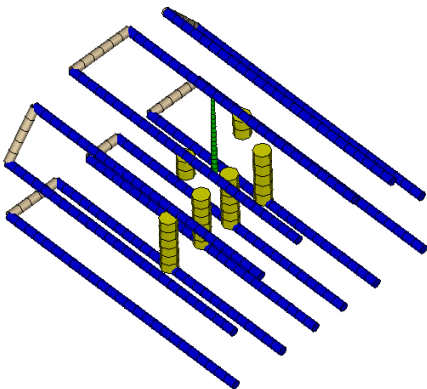
Runner System + Part : Flow Analysis + Warp Analysis



Scale [100 mm]



Cooling System

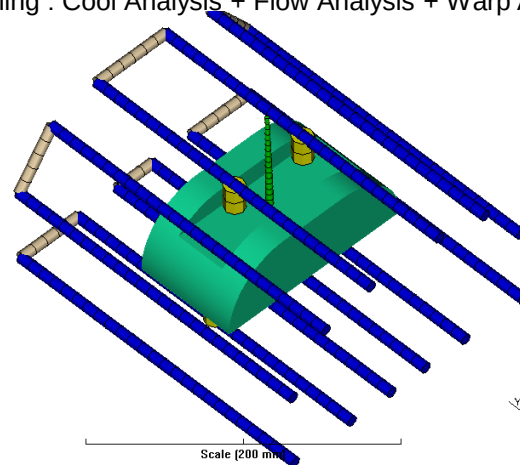


Scale [300 mm]



일반적으로 제품과 러너시스템만을 이용한 유동해석과 변형 해석을 통하여 제품 설계와 러너시스템을 최적화 하고, 나중에 냉각시스템을 포함하여 냉각 해석, 유동해석 그리고 변형해석을 통하여 냉각시스템을 최적화 한다.

Mold Modeling : Cool Analysis + Flow Analysis + Warp Analysis



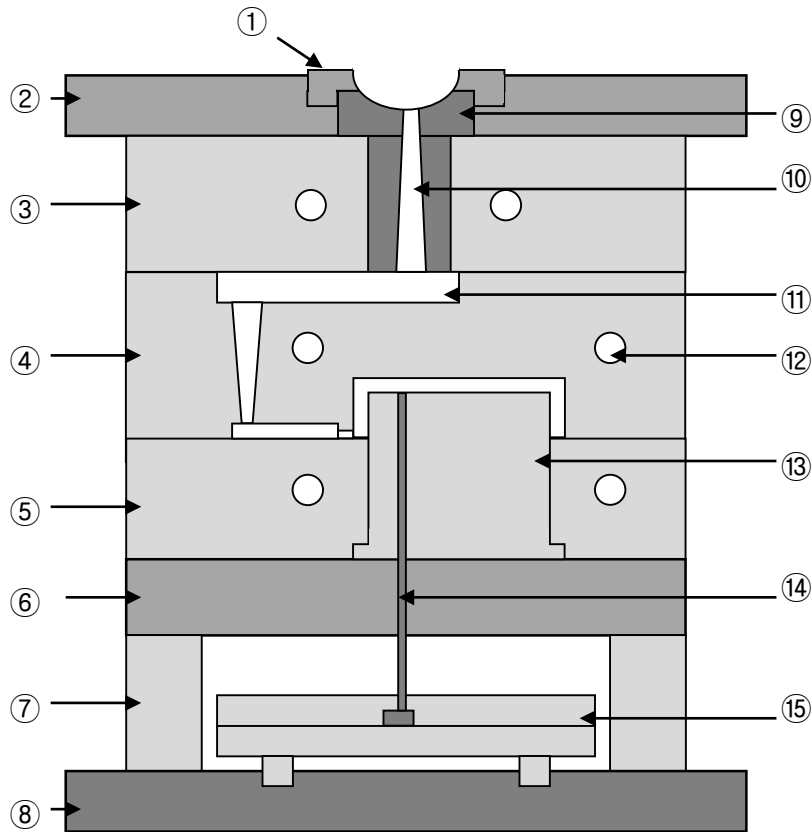
Scale [200 mm]



2-1) 금형 기본 구조 (mold base structure)

사출성형 해석에서 필요한 금형 요소는 러너시스템과 냉각시스템 뿐이다. 그러나 러너와 냉각시스템의 구조를 이해하기 위해서는 먼저 금형 구조를 이해하여야 한다.

금형은 러너시스템을 통하여 플라스틱 수지를 제품 캐비티에 주입하고, 냉각시스템에 의하여 냉각한 다음 취출하는 시스템이다.



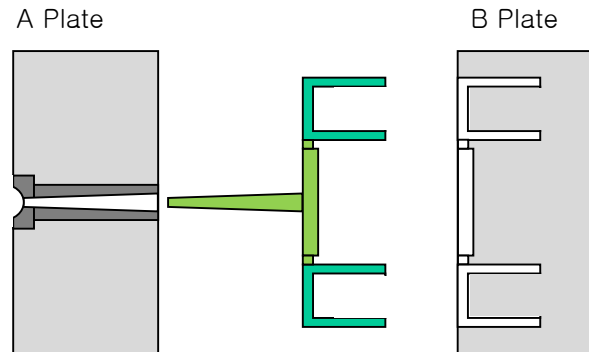
번호	명 칭	번호	명 칭
1	로케이트 링	9	스프루 부시
2	고정측 장치판	10	스프루
3	스트리퍼 판	11	러너
4	고정측 형판	12	냉각수채널
5	가동측 형판	13	코어
6	받침판	14	이젝터 핀
7	스페이서 블록	15	이젝터 판
8	가동측 장치판	16	

2-2) 금형의 분류 (mold types)

금형은 금형 구조상, 2단 금형, 3단 금형으로 크게 분류된다. 2단 금형을 사용하는 것이 비용적인 측면이나 성형적인 측면에서 유리하다. 그러나 금형 구조상 또는 제품 특성상 3단 금형을 사용하여야 하는 경우가 많다.

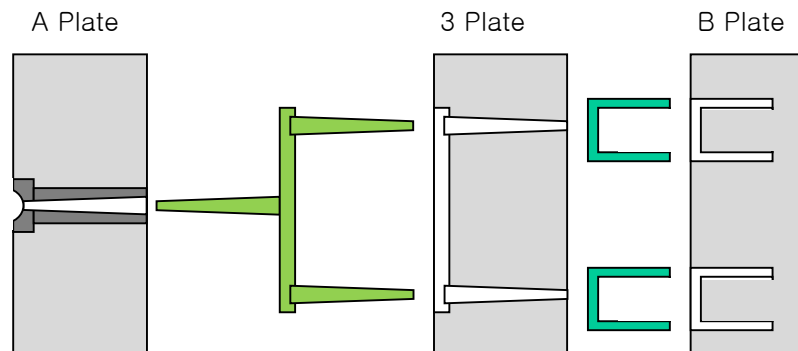
(1) 2 단 금형 (two-plate mold)

금형이 2개의 판으로 구성되어 있다. 캐비티와 같은 금형판에 러너와 게이트가 위치한다. 캐비티 취출시 러너와 같이 취출 된다.



(2) 3 단 금형 (three-plate mold)

금형은 3개의 판으로 구성되어 있다. 러너를 위한 별도의 스트리퍼 판이 존재한다. 캐비티와 러너는 각각 별도로 취출 된다.



2-3) 러너 시스템 (runner systems)

러너 시스템은 용융수지를 스프루에서 금형 캐비티로 이르게 한다. 러너는 크게 콜드 러너와 핫 러너로 분류된다.

(1) 콜드 러너 (cold runner)

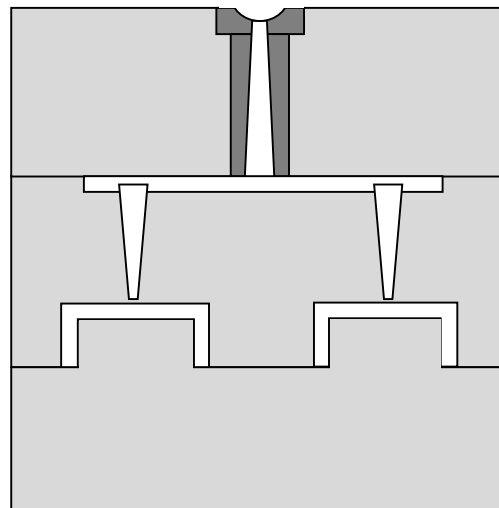
콜드 러너는 드릴로 가공된 수지 주입통로이다. 콜드 러너의 지름과 길이는 사출압력과 사이클 시간에 큰 영향을 준다. 러너가 작으면 사출압력은 상승하지만 사이클 시간은 줄어든다. 따라서 이들은 해석을 통해서 최적화 되어야 한다. 이들은 성형이 완료된 후에 취출되어야 함으로 적절한 빼기 구배를 주어야 한다.

- ▶ 설치 비용이 저렴하다.
- ▶ 설계 변경이 용이하다.

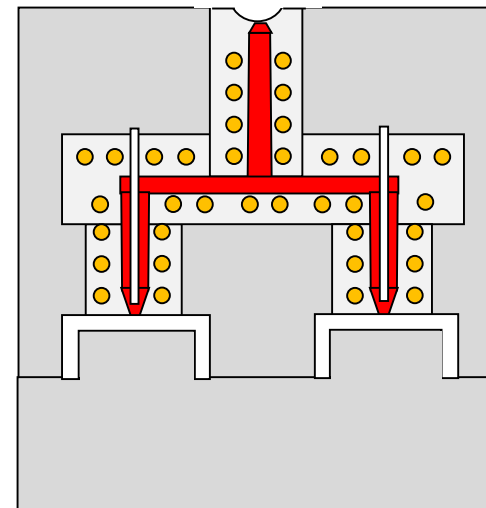
(2) 핫 러너 (hot runner)

핫 러너의 종류에는 몇 가지가 있으나 대표적인 형태가 플라스틱 수지 주입로 외곽에 코일이 감겨져서 온도가 관리되는 외부 가열러너 (external heated runner) 시스템이다. 충전 시작 이전에 수지가 핫 러너에 이미 주입되어 있으며, 이러한 핫 러너 시스템은 매니폴드 시스템으로 금형에 설치된다.

- ▶ 스크랩의 양이 줄어든다.
- ▶ 사출압력이 줄어든다.
- ▶ 밸브 컨트롤이 가능하다.
- ▶ 사이클 시간이 짧아진다.



Cold Runner System



Hot Runner System

2-4) 러너 시스템의 설정 (runner system sizing)

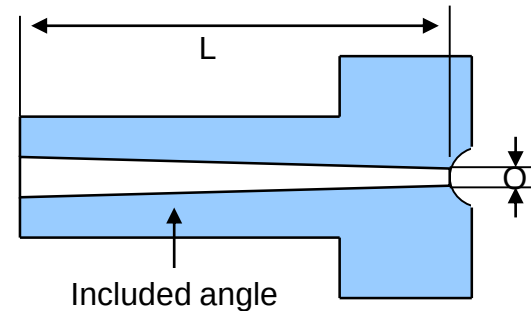
금형 구조와 수지의 유동을 고려하여 적절한 크기와 모양의 러너, 스프루, 게이트를 사용하여 한다.

(1) 스프루 치수 (sprue sizing)

스프루 상단의 크기는 사출기 노즐 크기에 의하여 결정되고, 스프루의 길이는 형판의 두께에 따라서 그리고 스프루 하단 직경은 러너의 크기를 고려하여야 한다.

orifice diameter, O : 일반적으로 3.0~5.5 mm

included angle : $1 \sim 3^\circ$



(2) 러너의 모양 및 치수 (runner shape and sizing)

러너는 일반적으로 원형이나 사다리꼴 모양을 사용한다. 압력강하나 열손실을 고려하면 원형이 유리하나 가공의 편의성은 사다리꼴 모양이 장점을 가진다. 또한 러너의 치수는 러너에서의 압력강하나 러너의 고화시간을 고려하여 적절한 크기로 정하여야 한다.

일반적으로 러너의 고화 시간은 제품의 고화시간의 2~3배가 적절하다.

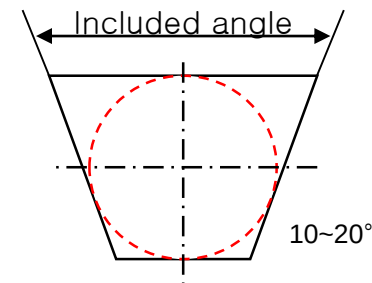
$$D_h = \frac{4A}{P}$$

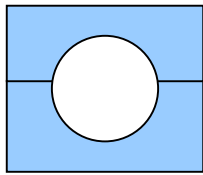
여기서

D_h = hydraulic diameter

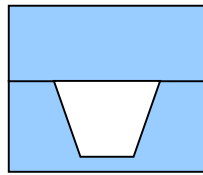
A = cross-sectional area

P = perimeter

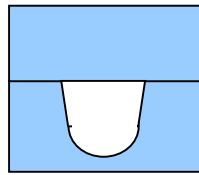




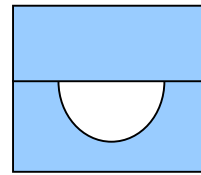
Full-round
runner



Trapezoidal
runner



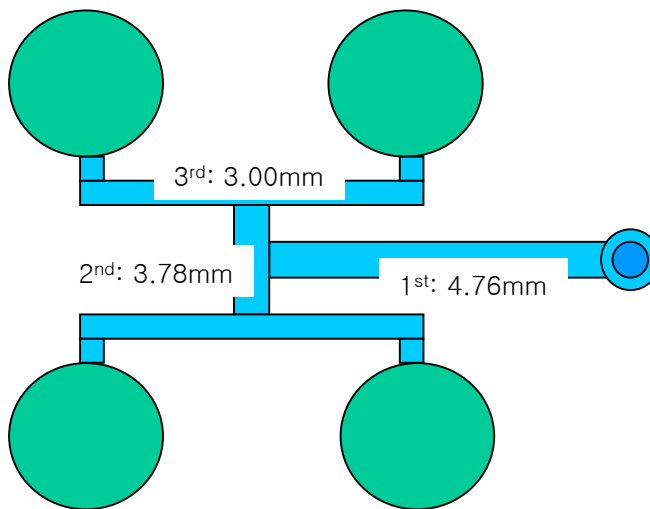
U-shape
runner



Half-round
runner

(3) 분기된 러너 (branched runner sizing)

주 러너가 여러 개의 러너로 분기되는 경우 일반적으로 더 작은 치수로 설계한다. 이것은 러너에서 압력강하가 일정하게 유지되도록 분기된 러너의 치수를 정하기 때문이다.



$$d_{feed} = d_{branch} \times N^{1/3}$$

여기서

d_{feed} = the diameter of the runner feeding the branch

d_{branch} = the diameter of the runner branch

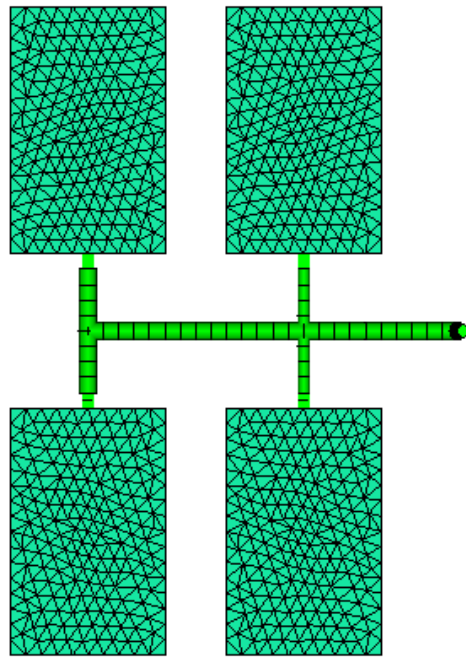
N = the number of branches

(4) 러너 밸런스 (runner balance)

사출성형에서 러너 밸런스는 상당히 중요하다. 러너 밸런스가 이루어지면 이때 최저의 사출 압력으로 성형이 가능하고 균일하게 압력이 가해져서 제품의 수축률이 균일해지고 따라서 제품의 변형을 일반적으로 최소화 할 수 있다.

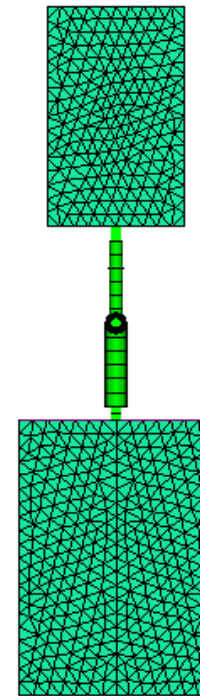
러너의 치수를 작게 하면 압력강하가 커지므로 수지의 흐름이 감소하고 그 반대의 경우는 수지의 흐름이 증가한다. 즉 러너 밸런스는 결국 충전 밸런스를 위한 조건이다.

Single 금형의 경우는 게이트 위치를 이동하여 주로 충전 밸런스를 달성하고, multi 또는 family 금형의 경우는 러너 치수를 조절하여 충전 밸런스를 이룬다.



Scale [100 mm]

moldflow
Moldflow PLASTICS INSIGHT



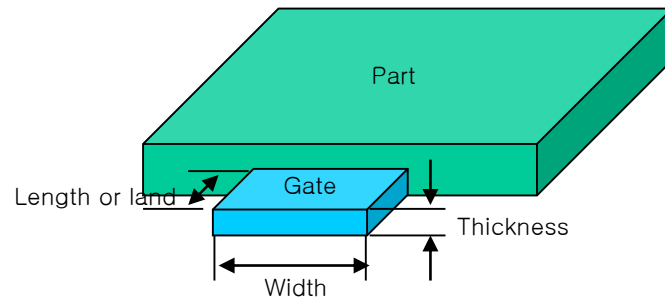
Scale [100 mm]

moldflow
Moldflow PLASTICS INSIGHT

(5) 게이트의 크기 (gate size)

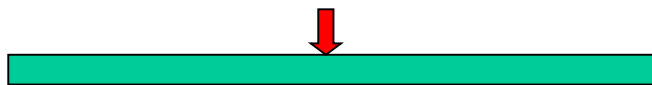
게이트의 크기는 게이트 자국을 최소화 하여 러너시스템을 제품에서 분리하기 쉽도록 제품의 두께나 러너 직경에 비하여 작다. 게이트는 일반적으로 제품 두께의 2/3정도 크기로 설계하는 것이 적당하나, 게이트에서의 전단 변형률이나 압력강하가 과도하지 않도록 적절한 크기로 설계하여야 한다. 또한 보압이 끝나는 순간에 게이트가 고화 되어서 수지의 역류가 나타나지 않게 조절하여야 한다.

게이트에서의 수지 흐름 속도를 줄여서 마찰열 발생을 억제하고, 압력강하를 줄이며, 치수 안정성과 외관 품질 향상을 위해서는 게이트 크기를 증가하는 것이 좋다.



(6) 게이트의 개수 (number of gates)

게이트의 개수는 정할 때는 우선 사출압력, 웰드라인 그리고 수축률 관점에서 결정하여야 한다. 러너를 제외하고 제품만 고려한다면 사출성형기 최대압의 1/2 정도로 성형이 가능한 게이트 개수 이상을 설계하여야 하며, 그 범위 내에서 제품 전체적인 균일한 수축률이 중요하다면 게이트를 증가시키고, 웰드라인이 중요하다면 게이트 개수를 감소시킨다.



(a) 사출압력 높음, 수축률 편차 큼, 웰드라인 없음

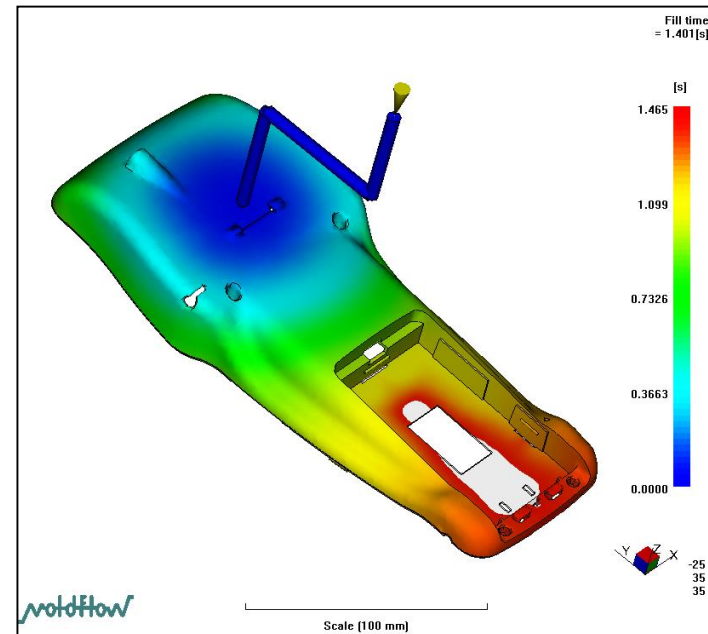
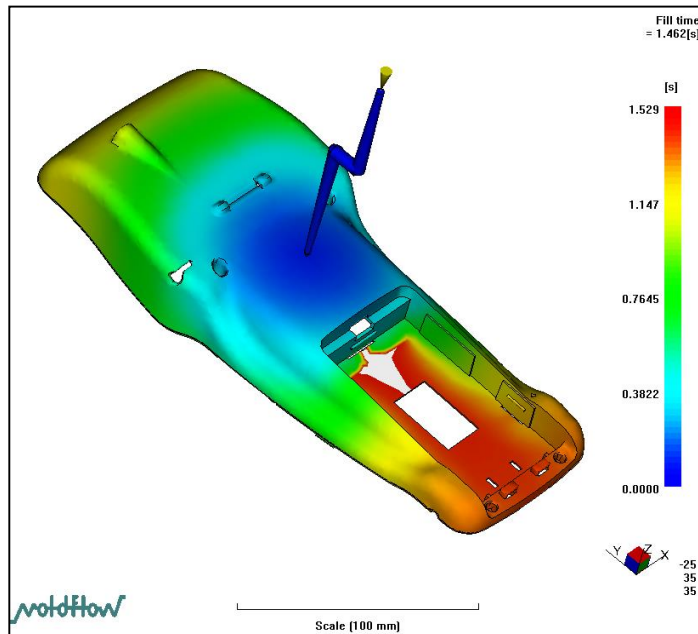


(b) 사출압력 낮음, 수축률 편차 작음, 웰드라인 있음

(7) 게이트의 위치 (gate position)

게이트의 위치는 아래 항목들을 고려하여 앞장에서 다룬 게이트의 크기와 게이트의 개수를 고려하여 정하여야 한다.

- ▶ 제품 외관 특성 - 제품의 외관 특성을 고려하여 제품 위 또는 사이드에 게이트를 설계한다.
- ▶ 유동 밸런스 - 낮은 사출압력과 균일한 수축률을 위하여 수지가 균일하게 충전될 수 있는 위치에 게이트를 설계한다.
- ▶ 수축률 밸런스 - 제품의 두꺼운 부분에 게이트를 위치하여 충분한 보압이 가해지도록 설계한다.
- ▶ 정체현상 - 게이트 주변에 얇은 부분은 정체현상에 의한 미성형 가능성이 높으므로 이를 고려하여 설계한다.
- ▶ 웰드라인 - 제품의 중요 부분에 웰드라인을 회피할 수 있도록 게이트를 설계한다.
- ▶ 에어트랩 - 제품 내에서 수지의 공기의 갇힘 현상을 회피할 수 있도록 게이트를 설계한다.
- ▶ 금형구조 - 금형 구조상 가능여부를 판단하여 게이트를 설계하여야 한다.

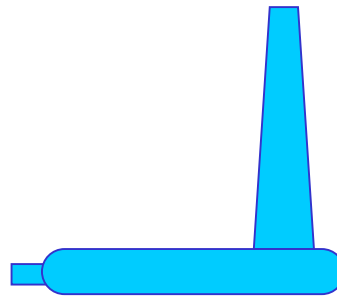


(8) 게이트의 종류 (gate types)

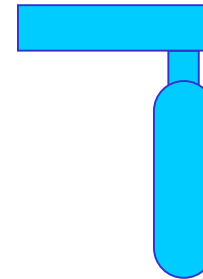
게이트의 종류는 크게 두 가지로 분류된다. 하나는 자동분리 게이트 (automatically trimmed gates)와 수동분리 게이트 (manually trimmed gates)로 나뉘어 지고, 그 형상과 크기는 제품의 특성, 금형 구조, 러너의 종류 등에 의하여 결정된다.

수동분리 게이트 (manually trimmed gates)

- ▶ Edge gate
- ▶ Tap gate
- ▶ Overlap gate
- ▶ Direct (sprue) gate
- ▶ Fan gate
- ▶ Film gate



(a) Edge gate



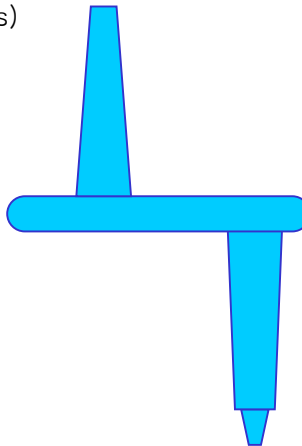
(b) Tap gate



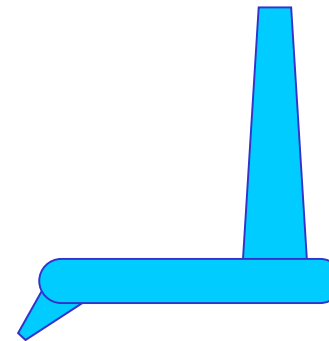
(c) Direct (sprue) gate

자동분리 게이트(automatically trimmed gates)

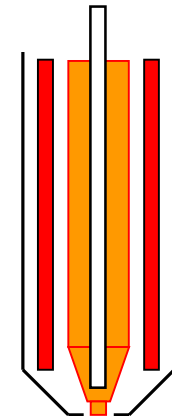
- ▶ Pin gate
- ▶ Submarine gate
- ▶ Hot gate
- ▶ Hot valve gate



(d) Pin gate



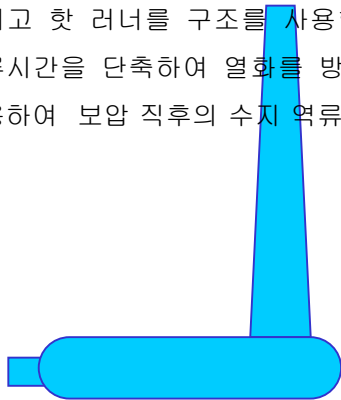
(e) Submarine gate



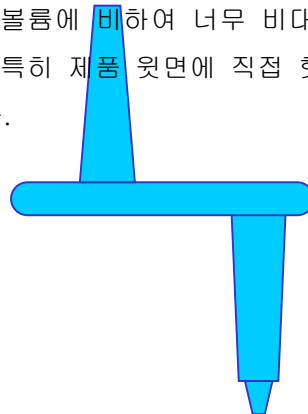
(f) Hot valve gate

(9) 다양한 러너 시스템 종류 (various runner system types)

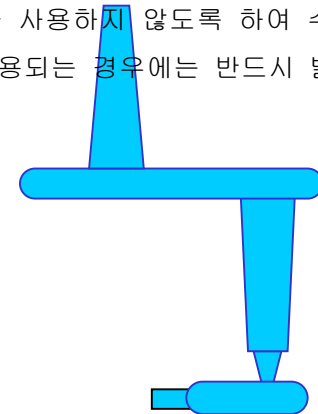
러너의 구조는 제품의 특성, 게이트 위치, 금형 비용, 사이클 시간 등을 고려하여 결정한다. 러너의 일반적인 구조는 아래와 같이 5가지의 형태로 구분된다. 콜드 러너 구조를 사용할 경우에는 러너의 직경을 적절히 하여 사이클 시간과 스크랩 양을 줄여야 한다. 그리고 핫 러너를 구조를 사용할 경우에도 제품 볼륨에 비하여 너무 비대한 러너 직경을 사용하지 않도록 하여 수지의 금형내 체류시간을 단축하여 열화를 방지하여야 한다. 특히 제품 윗면에 직접 핫 게이트가 사용되는 경우에는 반드시 밸브 시스템을 사용하여 보압 직후의 수지 역류를 방지하여야 한다.



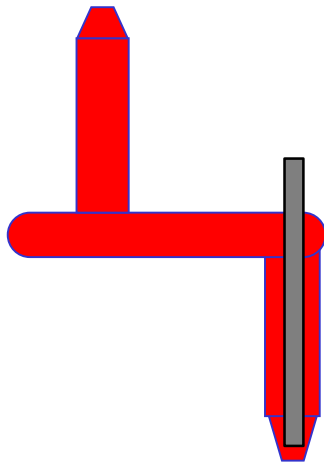
(a) 2 plate-mold, side-gate, runner system



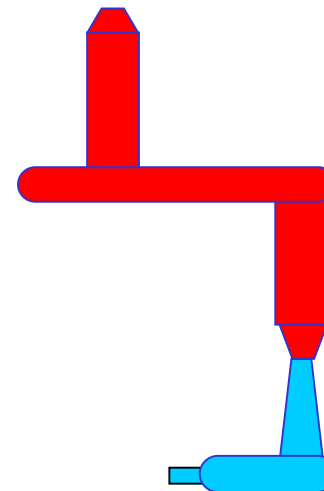
(b) 3 plate-mold, top-gate, runner system



(c) 3 plate-mold, side-gate, runner system



(d) 3 plate-mold, top-gate, hot runner system



(e) 3 plate-mold, top-gate, hot & cold runner system

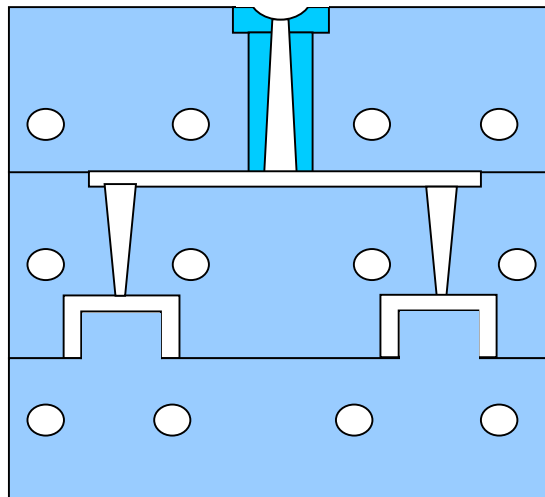
2-5) 냉각시스템 (cooling systems)

금형에 주입된 플라스틱 수지는 여러 가지 원인으로 냉각되는데, 그 중 가장 큰 역할을 하는 것이 냉각채널이다.

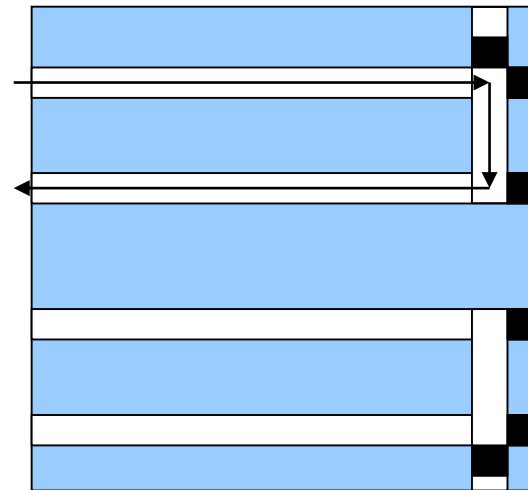
또한 냉각시스템과 그 냉각수의 조건은 금형 온도를 결정하며, 금형 온도는 사이클 시간, 제품의 광택도, 사출압력, 수축률, 변형 등에 큰 영향을 준다. 따라서 냉각시스템 설계 최적화가 필요하다.

냉각 채널의 구성은 Circuit, Hose, Baffle, Bubbler, Thermal Pin 등으로 구성되어 있으므로, 이들의 최적 설계를 통하여 성형품을 가능한 빠르고 균일하게 냉각할 수 있게 하여야 한다.

냉각에 관한 상세한 설명은 냉각해석 과정에서 배우기로 한다.



(a) Cooling System



(b) Cooling System Top View

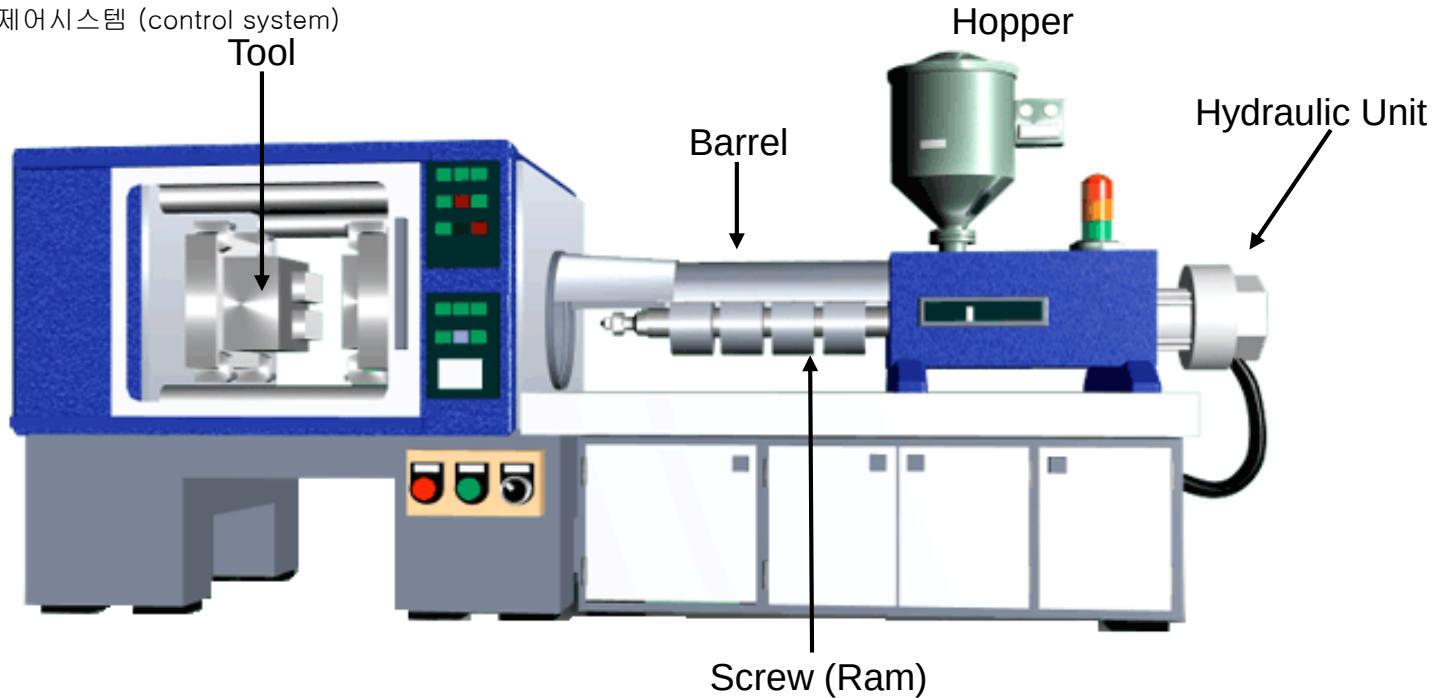
3. 사출성형기 (Injection Molding Machine)

사출성형 해석을 위한 성형 조건을 입력하거나 해석 결과를 분석할 때 사출 성형기의 성능을 고려하여야 한다. 즉 사출 성형기의 성능(최대 사출 속도)을 고려하여 사출 성형 조건을 입력하여야 하고 사출 성형기 성능(최대 사출압력, 최대 형체력)을 고려하여 성형 가능성을 판단하여야 한다는 것이다.

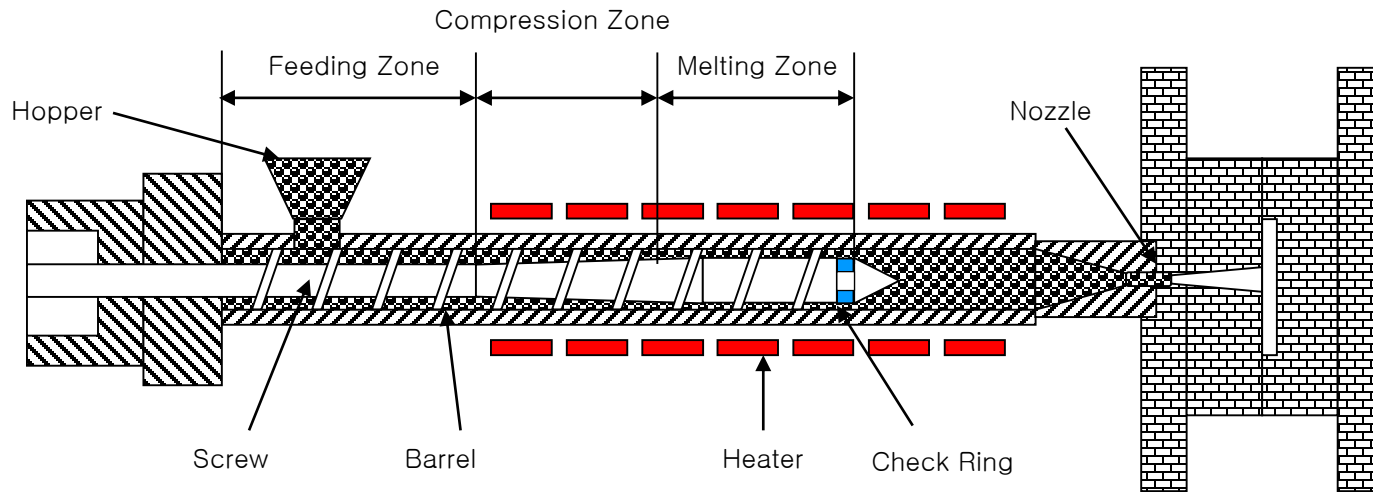
따라서 사출성형 해석을 위해서는 사전에 사출 성형기의 성능을 확인할 필요가 있다.

3-1) 사출 성형기 구성요소

- ▶ 사출시스템 (Injection system)
- ▶ 유압시스템 (hydraulic system)
- ▶ 금형시스템 (mold system)
- ▶ 형체시스템 (clamping system)
- ▶ 제어시스템 (control system)



3-2) 사출시스템 (injection system)



(1) 호퍼 (hopper)

열가소성 수지는 작은 펠릿 형태로 성형자에게 제공된다. 사출성형기의 호퍼는 이 펠릿을 담고 있다. 펠릿은 호퍼로 부터 호퍼 목을 통해 배럴과 스크루로 중력에 의하여 이송된다. 호퍼로 공급되는 플라스틱 수지는 반드시 적절한 온도에서 적절한 시간 동안 건조되어야 한다. 건조가 충분하지 못하면 친수성인 플라스틱 수지 내에는 수분이 많이 남아있게 되고, 이러한 수분은 가소화 동안 가스가 되어 금형으로 주입된다. 이 경우 가스에 의한 많은 성형 불량 발생할 수 있다. 이러한 가스에 의한 성형 불량들은 사출성형 해석으로 예측되지 않는다.

(2) 배럴 (barrel)

수지가 가소화되고 사출되는 곳으로 사출 성형기의 스크루를 지지하며, 이는 전기히터밴드에 의해 가열된다. 배럴 주위의 히터는 수지를 가소화하는 과정에서도 역할을 하지만 더 중요한 역할은 가소화된 수지의 온도를 일정하게 유지하는데 있다. 사출성형 해석에 사용되는 수지의 용융온도는 바로 배럴 속에 가소화되어 있는 수지의 온도가 된다.



(3) 스크루 (screw)

스크루는 재료를 압축하고, 녹이고, 이송하는데 사용된다. 스크루의 동작은 크게 2가지로 구분되는데, 첫 번째는 수지 충전을 위한 전진 직선운동이고, 두 번째는 가소화를 위한 후퇴 회전운동이다. 특히 수지 가소화를 위하여 스크루는 아래 세가지 영역으로 구성된다.

- ▶ 고체이송영역(Feeding Zone)
- ▶ 압축영역(Compression Zone)
- ▶ 유체이송영역(Melting Zone)

고체이송영역의 스크루 몸통은 가늘어서 호퍼로 부터 많은 양의 수지가 베럴에 공급되는데, 스크루가 가소화를 위해 후퇴 회전함에 따라 수지는 앞으로 이송되며, 스크루 몸통 크기가 점진적으로 증가하는 압축영역을 지나면서 수지는 마찰열에 의하여 가소화 된다. 가소화된 수지는 유체 이송영역을 지나 스크루 앞으로 계량된다.

사출성형 해석에서는 이러한 과정에 의하여 가소화 된 용융 수지의 온도가 특정 값으로 균일한 것으로 가정한다.

(4) 노즐 (nozzle)

노즐은 배럴을 스프루 부시에 연결하며, 배럴과 금형의 밀폐를 형성하고, 스크루에 의하여 주입되는 수지를 금형의 스프루로 전달한다. 노즐과 스프루의 위치가 일치하지 않거나, 노즐과 스프루의 직경이 적합하지 못하면 충전과정에서 용융 수지가 그 틈을 통해 누설될 수 있다.

또한 노즐은 금형 열림 직전에 금형 스프루에서 분리되고, 다시 금형 닫힘 직후에 금형 스프루에 연결되므로, 분리되어 있는 동안 용융 수지가 노즐을 통하여 외부로 흘러 내릴 수 있다. 이를 방지하기 위하여 노즐부의 히터 온도를 낮추거나, 밸브제어 형식의 노즐을 사용할 수도 있다.

3-3) 유압시스템 (hydraulic system)

사출 성형기의 기본 원리는 높은 압력을 생성하는데 있다. 용융 수지를 금형 속에 주입하기 위해서는 높은 압력이 필요하기 때문이다. 유압 사출기의 최대사출압력과 사출속도는 다음과 같은 관계식으로 계산된다.

$$F = \frac{\pi D^2}{4} \times P_{hy} = \frac{\pi d^2}{4} \times P_{in} \quad P_{in} = \frac{D^2}{d^2} \times P_{hy} \quad V_{\max} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

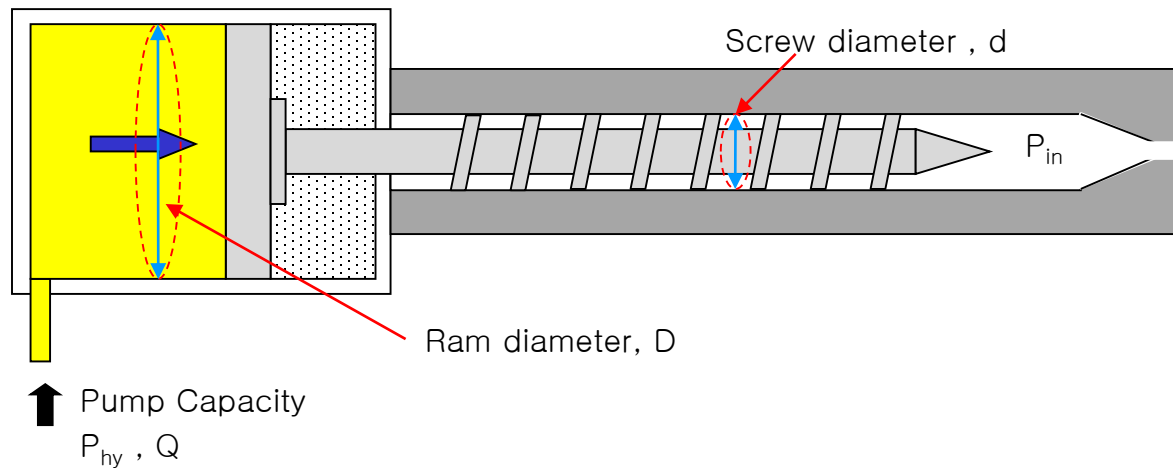
여기서 P_{hy} , Q 은 각각 유압펌프의 최대 압력 (MPa), 최대 유량 (cm^3/s)

D , d 는 각각 램의 직경, 스크루의 직경

P_{in} : 스크루 앞단에 가 할 수 있는 최대 사출압력

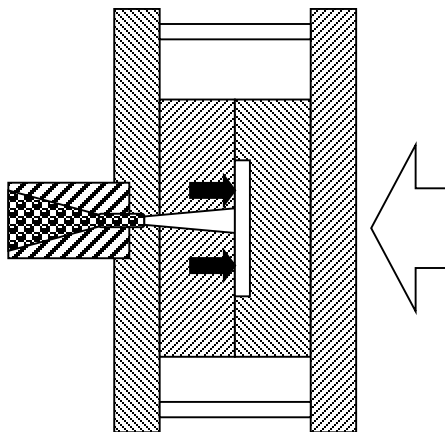
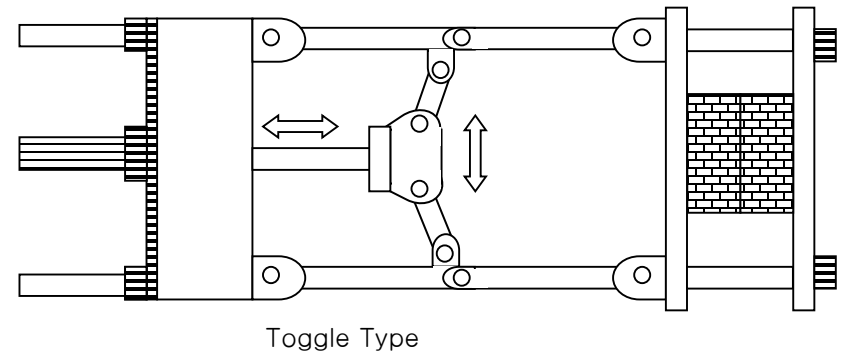
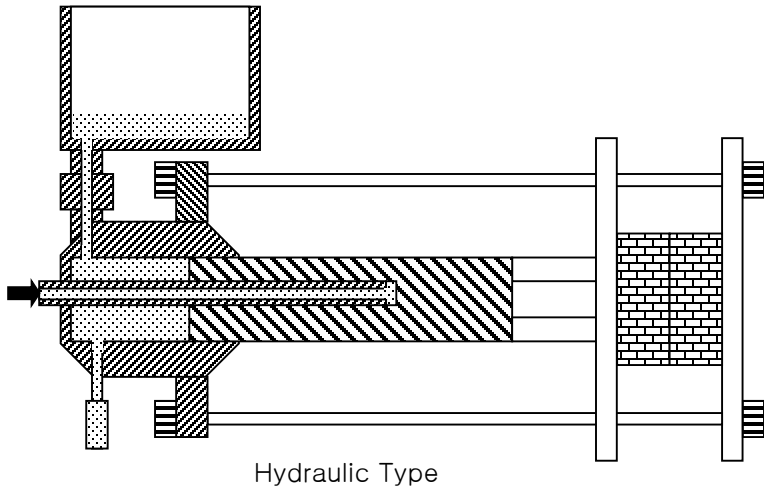
D^2 / d^2 : 사출압력 증압비 (Intensification ratio)

일반적으로 사출 성형기 증압비는 10~16 정도 이다. 따라서 유압 10 MPa 은 사출압력으로 환산하면 100~160 MPa 정도가 된다.



3-4) 형체 시스템 (clamping system)

사출성형기의 형체 기구는 금형의 개폐동작을 행하는 것 이외 금형내 사출된 용융수지의 높은 압력에 대항하여 금형이 열리지 않도록 충분한 힘으로 크램핑 하는 것이 주 목적이다. 형체기구의 종류에는 직압식과 토글식이 있다.



사출성형시의 최대 형체력은 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$F(\text{최대 형체력}) = A (\text{투영면적}) * P (\text{금형내의 최대 평균 내압})$$

사출 성형기의 형체력이 사출 성형시 발생하는 최대 형체력 보다 커야 한다. 그렇지 않으면, 금형 열림에 의하여 성형품의 두께가 증가하거나 플래시 (flash) 또는 미성형 (short shot)이 발생 할 수 있다.

4. 사출과정(Injection Process)

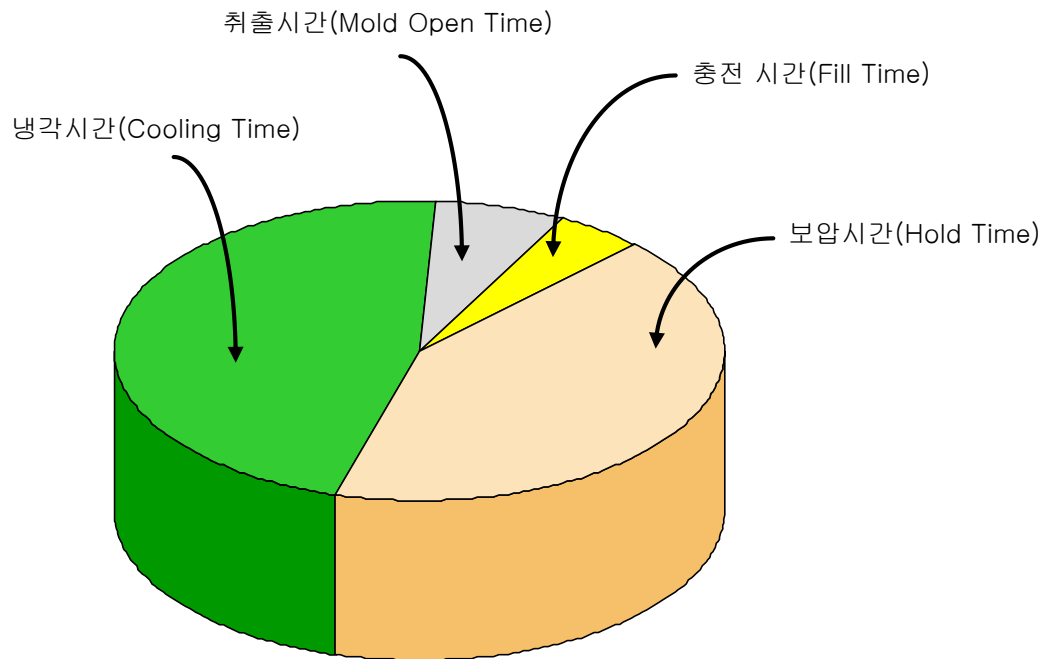
4-1) 사출성형 과정

사출성형은 사출 성형기에 계량된 플라스틱 수지를 금형 내부로 주입하는 충전과정, 충전된 수지가 냉각에 의하여 수축하는 동안 그 수축량을 보충해 주기 위한 보압 공정, 취출 가능 온도까지 대기하는 냉각과정, 성형품을 금형 밖으로 밀어내는 취출 공정으로 분류된다.

- ▶ 충전 과정 (filling)
- ▶ 보압 과정 (packing)
- ▶ 냉각 과정 (cooling)
- ▶ 취출 과정 (clamp Open)

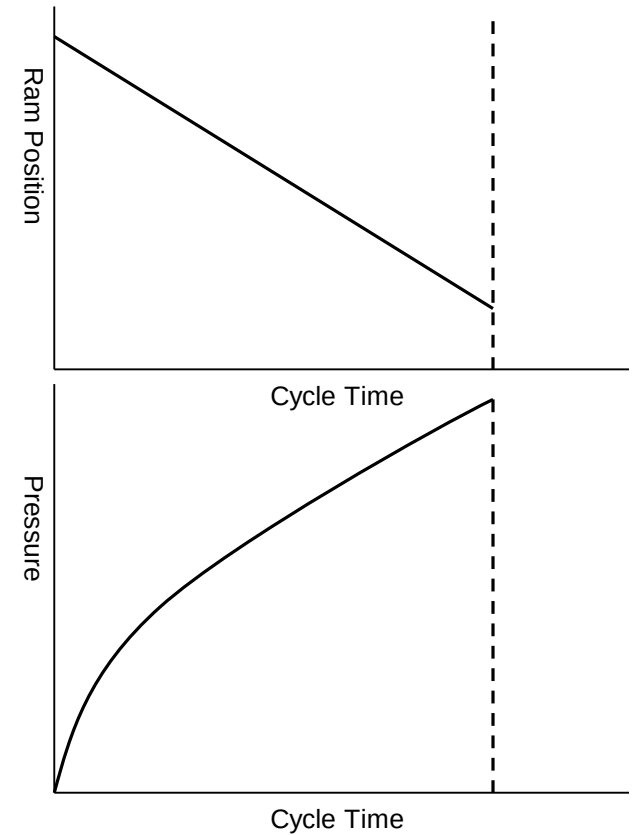
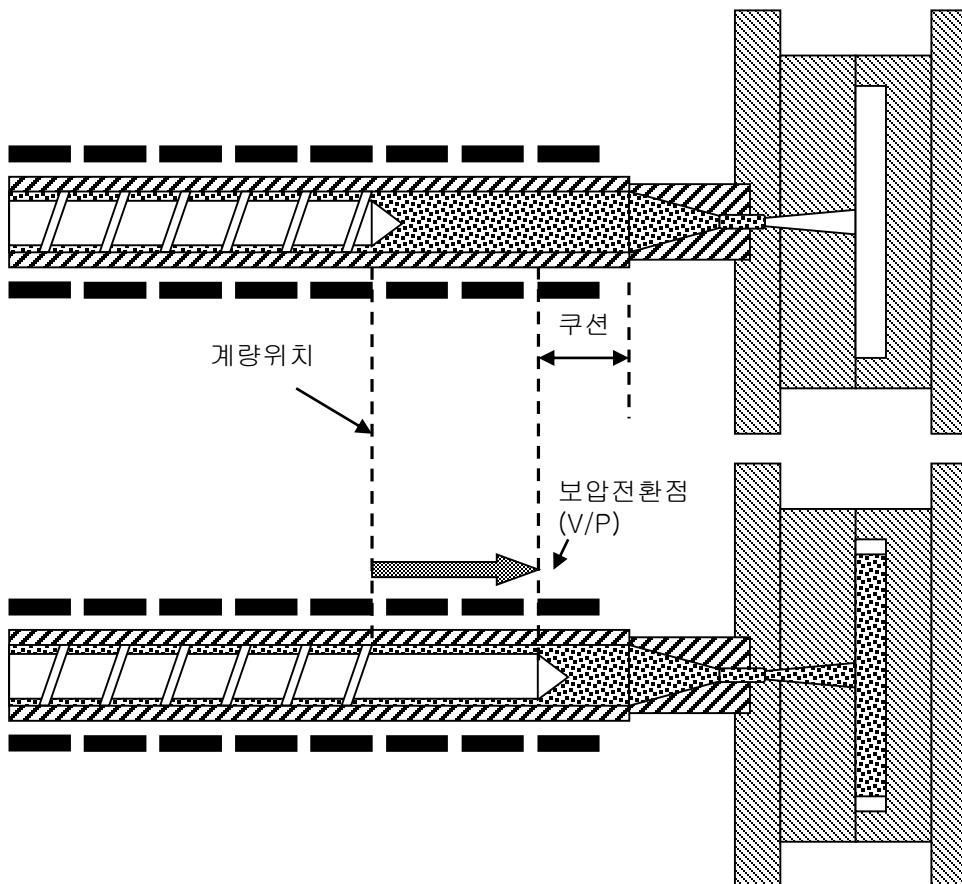
따라서 사이클 시간은(Cycle Time) = 충전시간 + 보압시간 + 냉각시간 + 취출시간 이다.

사출 성형해석에 설정되어야 하는 성형 조건을 적절히 입력하기 위해서는 사출 성형 각 단계의 의미와 그 제어 변수를 정확히 파악하여야 한다.



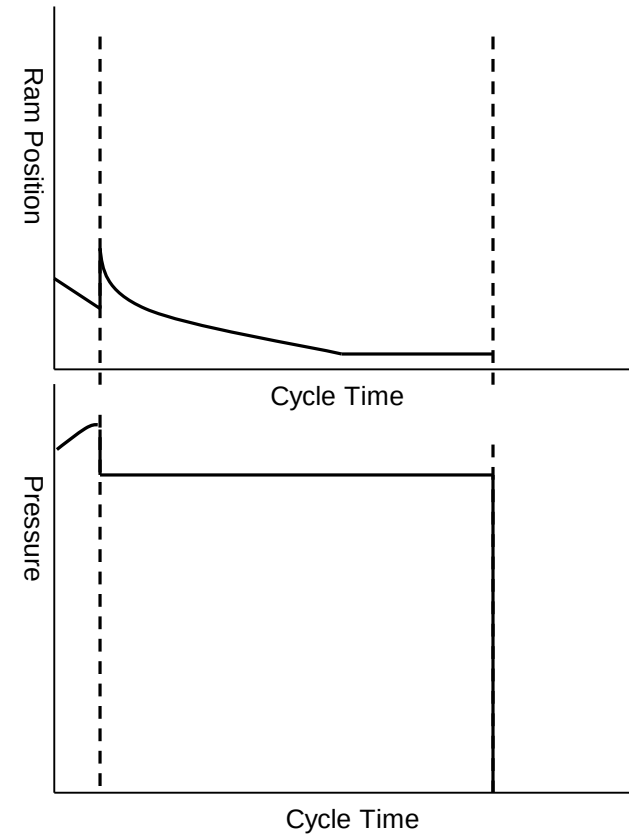
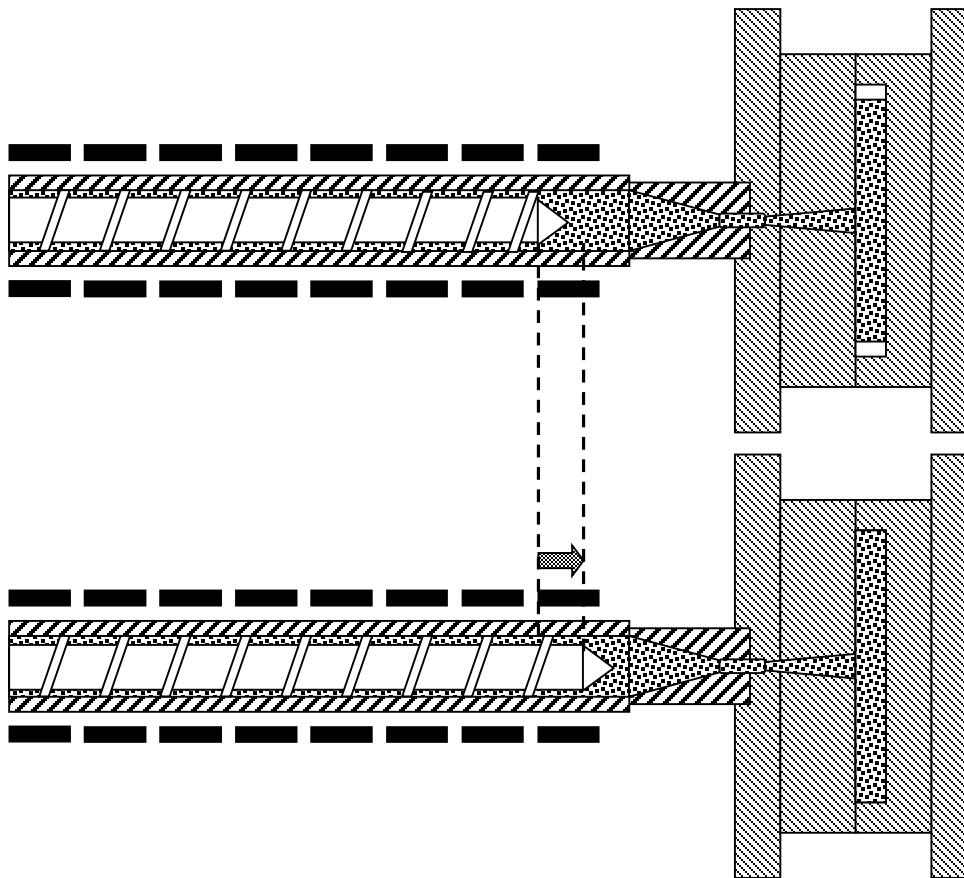
4-2) 충전 과정 (filling)

충전과정은 스크루의 전진 속도제어를 통하여 플라스틱 수지를 금형의 캐비티 내부로 충전하는 과정이다. 스크루가 보압 전환점에 도달하면 캐비티는 거의 충전이 완료된다. 충전과정은 속도 제어 과정으로 충전 속도 조건에 따라 스크루 앞단에 형성되는 사출압력은 달라진다. 충전 속도가 적절하지 않으면 사출압력이 크게 상승할 수 있다.



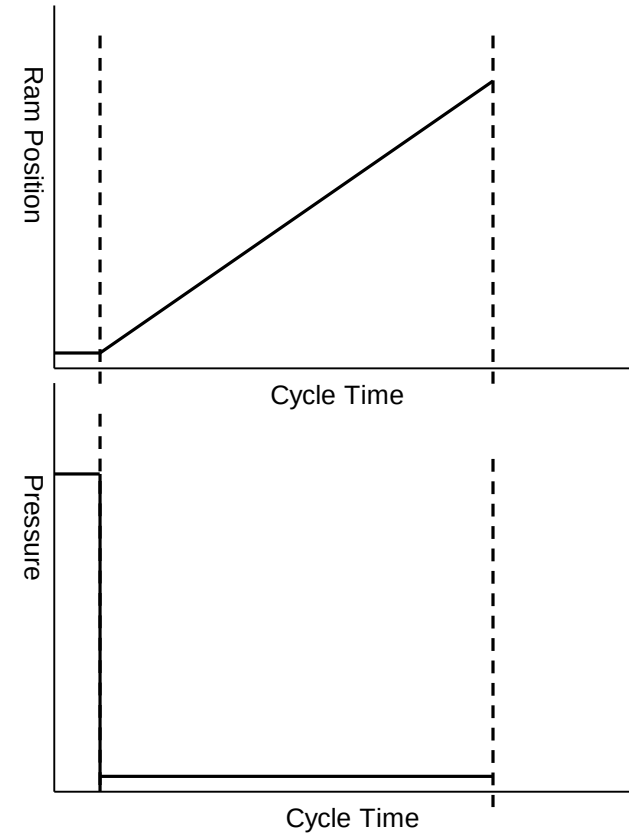
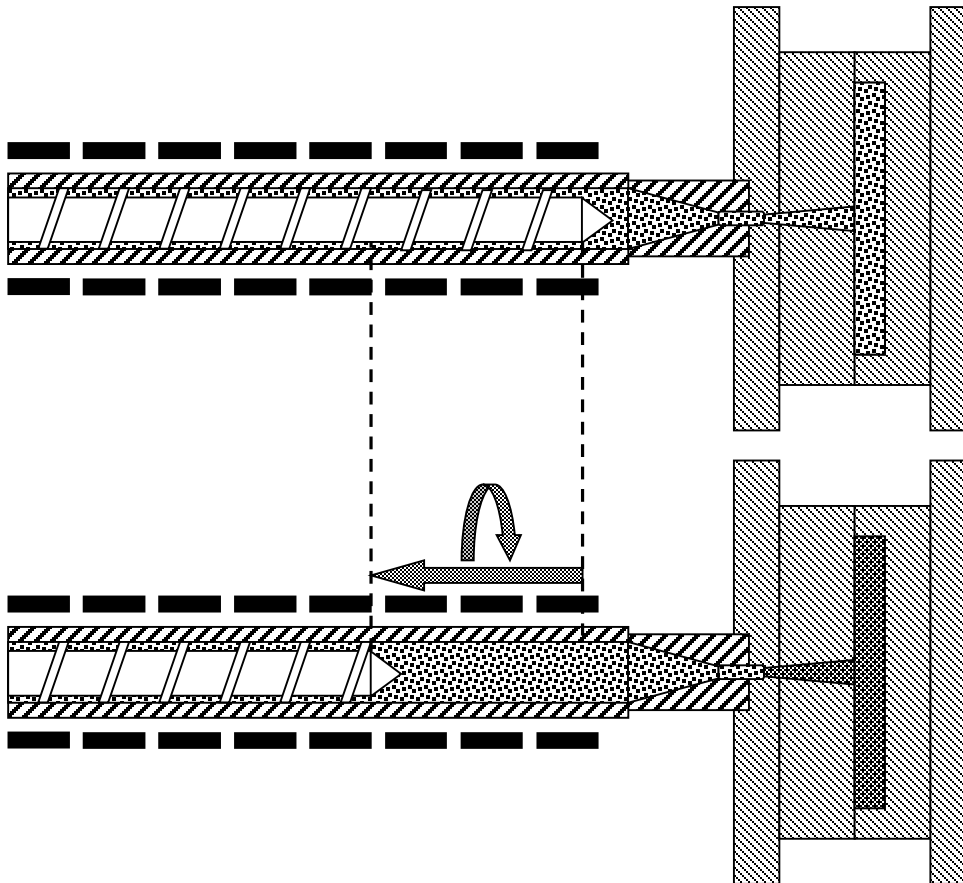
4-3) 보압 과정 (packing)

보압 과정은 충전된 수지가 차가운 금형에 의하여 냉각 수축되는 양을 보충하기 위하여 일정 시간 동안 스크루 앞단에 일정 압력이 형성되도록 스크루를 전진시키는 압력제어 구간이다. 일반적으로 보압은 게이트가 고화될 때 까지 설정하는데, 게이트가 고화되면 캐비티 내로 더 이상 수지 공급이 불가능하기 때문이다. 따라서 보압 과정은 제품 수축률과 밀접한 관계가 있다.



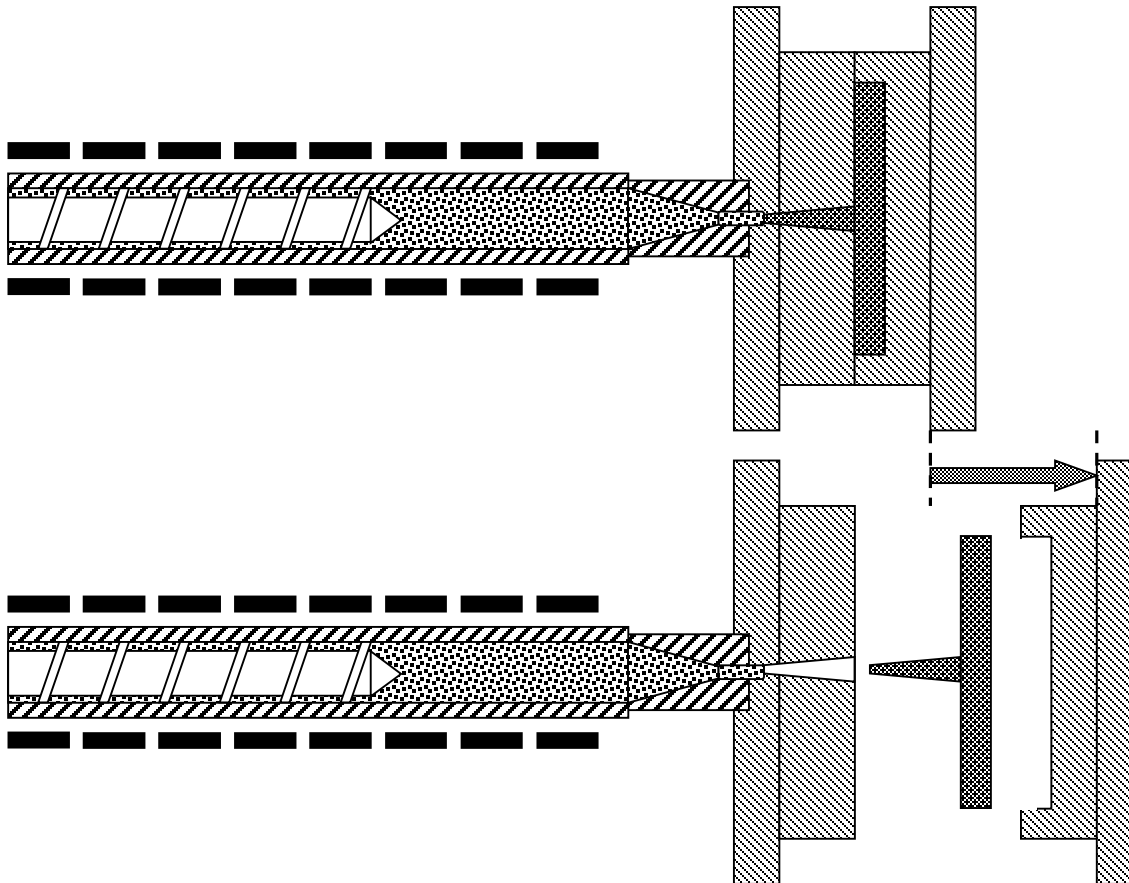
4-4) 냉각 과정 (cooling)

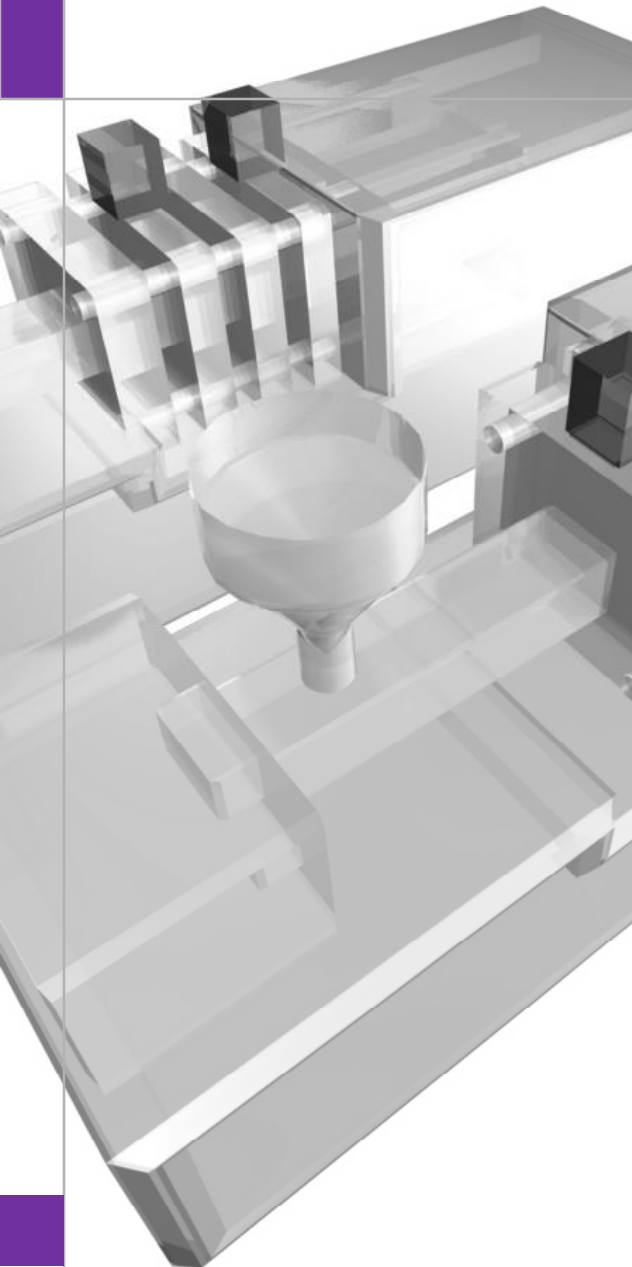
냉각 과정은 금형의 캐비티 내에 충전되고 압축된 수지가 취출 가능한 온도까지 대기하는 시간이다. 일반적으로 제품은 약 80%, 콜드 러너는 약 50% 고화가 진행되면 취출이 가능하다. 또한 이 구간 동안 스크루는 회전 후진하면서 다음 충전을 위한 수지를 가소화하면서 계량한다.



4-5) 취출 과정 (clamp open)

추출 과정은 취출 가능한 온도까지 냉각된 제품을 캐비티에서 분리하는 과정이다. 가동측 형판이 뒤로 후퇴하여 금형이 열리면 밀핀으로 쳐서 제품을 취출하고 다음 충전을 위하여 금형을 다시 닫는다.





III 유동해석

1. 유동해석 이론
2. 성형불량
3. 유동해석 실습
4. 유동해석 결과

1. 유동해석 이론

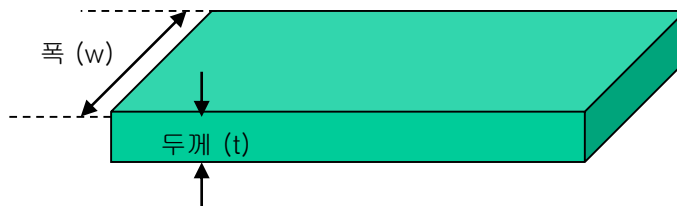
유동해석은 플라스틱 수지의 금형 내에서의 온도, 속도, 압력의 계산을 통하여, 수지의 충전패턴, 사출압력, 유동선단 온도, 고화시간, 웰드라인, 형체력, 수축률 등의 정보를 제공한다. 또한 수지의 유동과 열에 의하여 유도된 잔류응력을 계산하여, 변형해석의 입력값으로 제공한다.

1-1) 분수 흐름 (fountain flow)

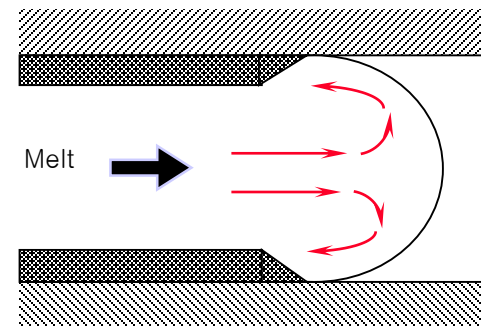
일반적인 대부분의 사출 성형품은 두께가 얇은 평판 제품이다. 평판 제품의 정의는 두께 3~4mm 이하의 두께에 비하여 폭이 5배 이상 큰 제품을 말한다. 이러한 두께가 얇은 캐비티 내로 수지가 흐를 때 금형 벽면에 고화층을 형성하면서 분수와 같은 모양으로 전진한다. 이러한 형태의 용융 수지의 흐름을 분수흐름이라 한다.

이러한 용융 수지의 흐름 방식으로 인하여 배럴 앞부분에 계량된 수지는 성형품 표면층을 형성하는데 사용되고, 뒤 부분에 계량된 수지는 제품 중앙부위를 채우게 된다. 여기서 표면층은 고화층이고, 고화층은 유동선단에 의하여 만들어지므로 유동선단의 흐름을 잘 관리하여야 성형품의 외관 품질을 높일 수 있다. 또한 수지 흐름의 충돌에 의하여 형성되는 웰드라인의 깊이는 그 고화층의 두께와 비례하는데, 고화층의 두께는 용융 수지의 온도와 금형 온도가 낮을 수록 증가하게 된다.

또한 전단률이 가장 큰 부분은 고화층의 바로 안쪽 유동층이 되고, 이 부분이 성형품의 두께 방향으로 배향이 가장 강하게 되는 부분이며, 전단열 발생이 가장 큰 부분이다.



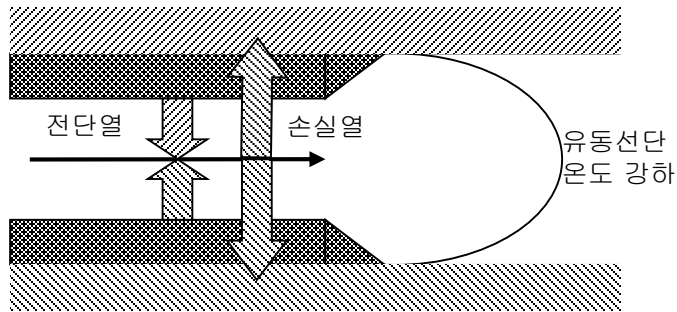
(a) 평판 모델



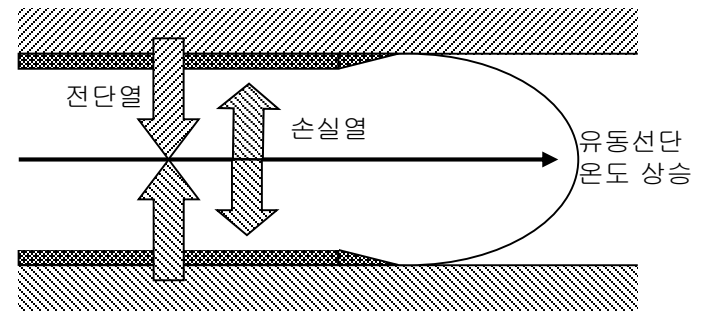
(b) 분수유동

1-2) 유동선단 온도

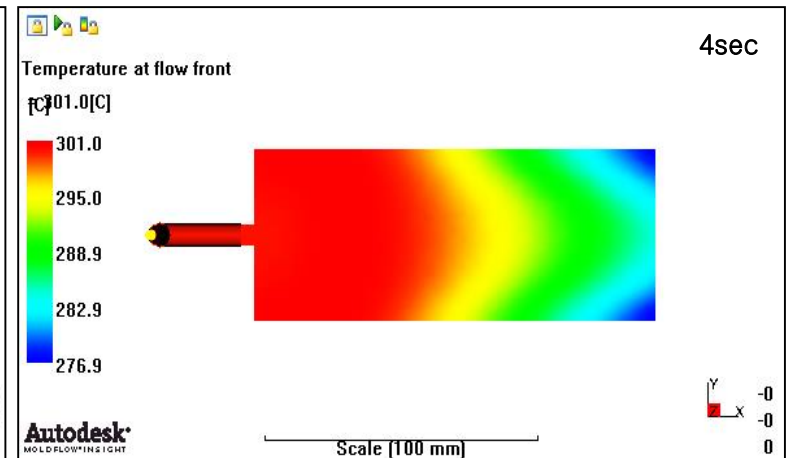
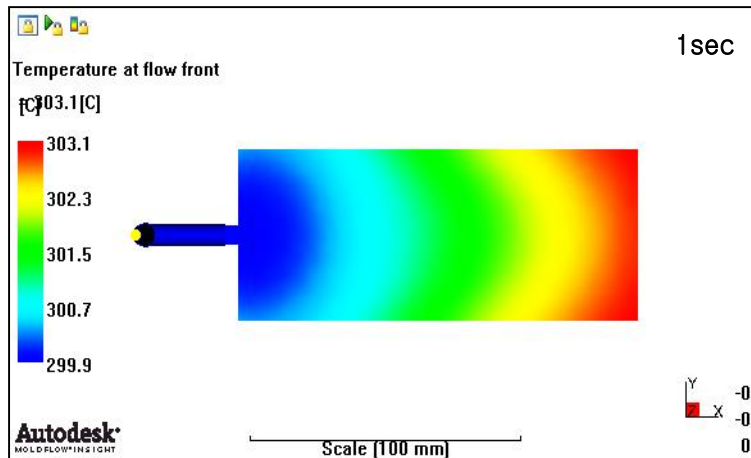
배럴 속 높은 온도의 용융수지가 낮은 온도의 금형 내로 흘러 들어가게 되면 수지의 온도는 점차 낮아지는 것이 일반적일 것이다. 그러나 실제로 수지의 유동선단 온도는 사출속도에 따라 높아질 수도 있다. 이것은 바로 앞에서 배운 전단열이 발생하기 때문이다. 전단열은 전단률의 크기에 의존한다. 사출속도가 빠를수록, 성형품의 두께가 얇을수록 전단률이 커지며, 두께 방향으로 고화층과 유동층 그 경계면에서 전단률이 가장 크다.



Slow filling



Fast filling



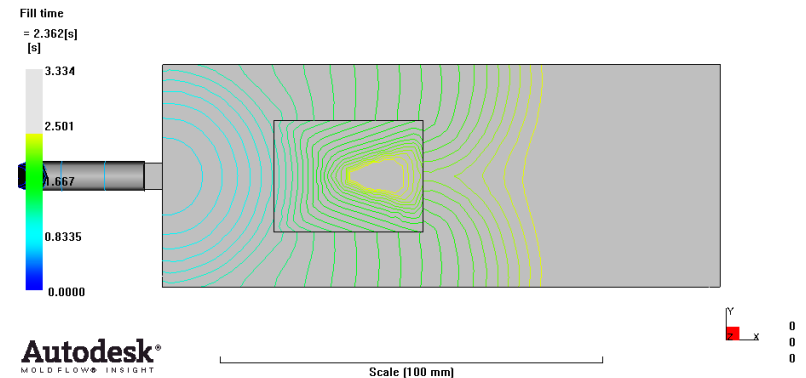
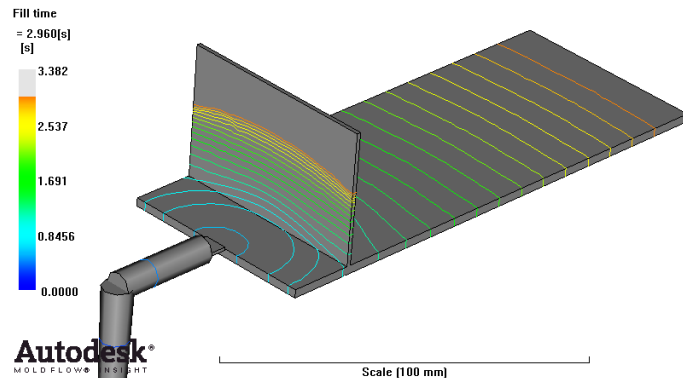
사출속도가 빠른 경우 수지의 유동선단이 차가운 금형과 접하는 시간은 짧아 열 손실은 감소하고 반면에 전달열 발생은 증가한다. 따라서 유동선단 온도는 점차 높아질 수 있다. 반대의 경우 차가운 금형과 접하는 시간이 길어지고 전달열 발생이 감소하여 유동선단 온도는 점차 낮아진다.

일반적으로 가장 적합한 사출속도는 수지의 종류에 따라 범위가 달라질 수 있지만, 수지의 유동선단 온도가 성형품 외관면을 흘러가는 동안 그 변화폭이 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 를 벗어나지 않는 것이 권장된다. 물론 얇은 리브와 보스는 상대적으로 두꺼운 외관면과는 달리 정체현상에 의하여 온도가 훨씬 쉽게 낮아진다.

외관면에서 유동선단 온도가 낮아지면 고화층의 두께도 증가하여 수지 흐름이 충돌에 의하여 발생하는 웰드라인이 선명해지며, 수지의 점도 증가에 의하여 사출압력도 높아진다.

1-3) 정체현상

성형품에서 상대적으로 두께가 두꺼운 부분은 저항이 적어 수지가 잘 흘러 가지만, 상대적으로 얇은 부분은 저항이 커서 수지가 잘 흘러가지 못한다. 따라서 두꺼운 부분은 유동선단 속도가 충분히 빨라서 유동선단 온도가 일정하게 유지될 수 있지만, 얇은 부분은 유동선단 온도가 점점 더 낮아짐과 동시에 유동선단 속도도 점점 더 느려지게 된다. 이러한 현상을 정체현상이라고 한다. 정체현상이 심한 경우 성형품의 얇은 리브와 보스에서 미성형이 발생할 수 있고, 외관 두께가 국부적으로 작은 경우에는 에어트랩 또는 에어트랩에 의한 미성형이 발생할 수도 있다.

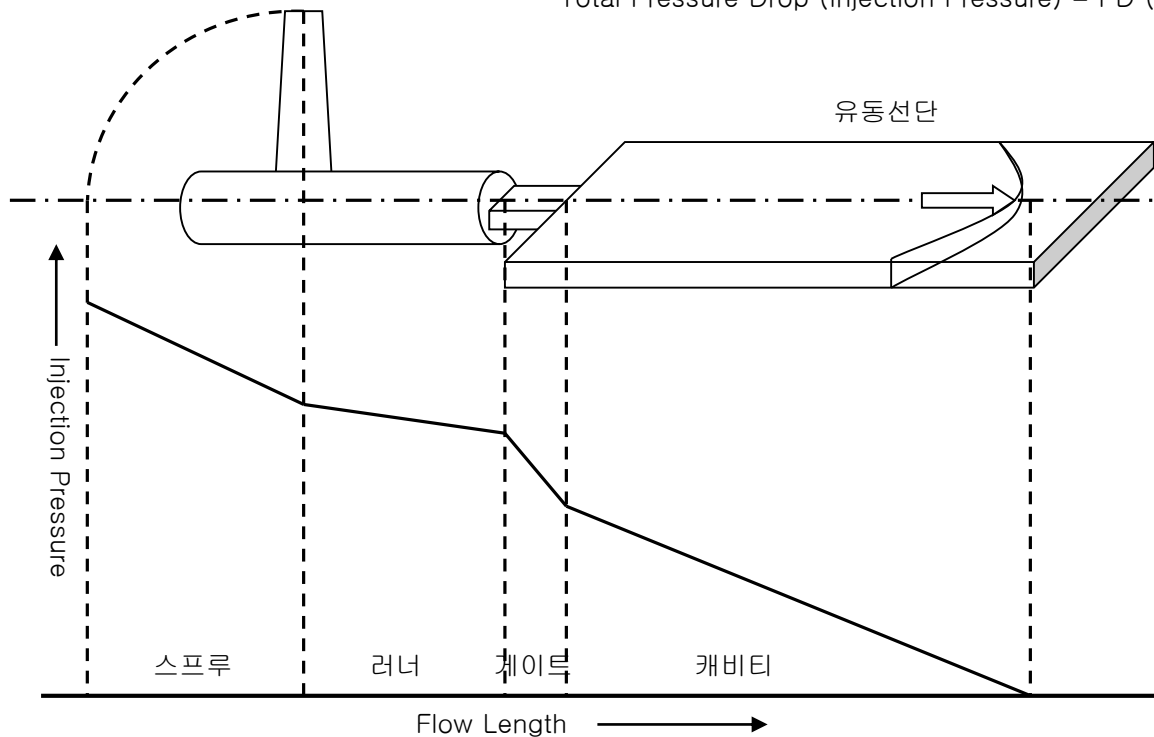


1-4) 사출압력

사출압력은 용융수지의 유동저항을 극복하게 하는 구동력이다. 즉 수지는 물이 낮은 곳으로 흐르는 것과 같이 높은 압력영역에서 낮은 압력 영역으로 흐른다. 따라서 수지를 금형 끝까지 충전 하기 위해서는 그 사이에서 발생하는 유동저항 즉 압력 강하를 극복하도록 더 높은 압력을 수지를 밀어야 한다. 수지가 보압 전환점에 도달하였을 때 스크루 앞 단의 압력을 최대 사출압력이라 한다. 이때 유동선단 끝 단의 압력은 0Mpa가 된다. 그런데 사출 성형기는 가용 가능한 최대 사출압력이 정해져 있다. 따라서 수지를 금형 끝까지 충전하는데 필요한 최대 사출압력이 기계가 제공하는 최대 사출압력 보다 충분히 낮아야 제품 성형이 가능하다. 그렇지 않으면 미성형이 발생할 수 있고, 이를 방지하기 위해서는 사출압력을 줄일 수 있는 방법을 찾아야 한다.

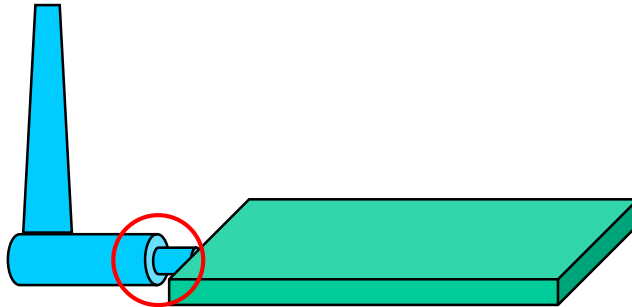
일반적으로 안전률을 고려하여, 성형 최대 사출압력이 사출 성형기의 최대 사출 압력의 80% 이하가 되도록 제품설계, 금형설계 사출성형 조건 그리고 수지 등이 설정되어야 한다.

$$\text{Total Pressure Drop (Injection Pressure)} = \text{PD (Runner System)} + \text{PD (Cavity)}$$



1-5) 압력 강하

제품 성형을 위한 사출압력이나 형체력을 정확히 계산하기 위해서는 기본적으로 수지가 금형내로 흘러가는 동안의 압력강하를 정확히 계산하여야 한다. 압력강하에는 러너 시스템과 제품을 통과할 때도 발생하지만 러너시스템에서 러너와 게이트의 경계와 같이 단면적이 갑자기 크게 변하는 경우 추가적인 압력손실(juncture loss)이 발생한다.



Juncture loss

$$\Delta p = \frac{\eta \cdot L \cdot Q^n}{r^{(3n+1)}} \quad : \text{a) 러너시스템을 통과할 때의 PD}$$

$$\Delta p = \frac{\eta \cdot L \cdot Q^n}{w \cdot t^{(2n+1)}} \quad : \text{b) 제품을 통과할 때의 PD}$$

n : 재료상수 (범위 : 플라스틱 수지 (0.15~0.36))

Juncture loss에 의한 추가적인 압력강하를 계산하기 위해서는 수지 DB에 아래 Juncture loss 계수 값들이 측정되어 있어야 한다. 계수 값들이 없는 경우에는 이러한 추가적인 압력강하는 계산되지 않는다.

$$\Delta p = \Delta p_e + 4 \frac{L}{D} \tau_w \quad : \text{c) Juncture Loss에 의한 추가적 PD}$$

$$\Delta p_e = C_1 \tau_w^{C_2}$$

C_1, C_2 : Juncture loss juncture loss coefficients

$C_1 = 1e-5$ to 10 (typically 0.0001)

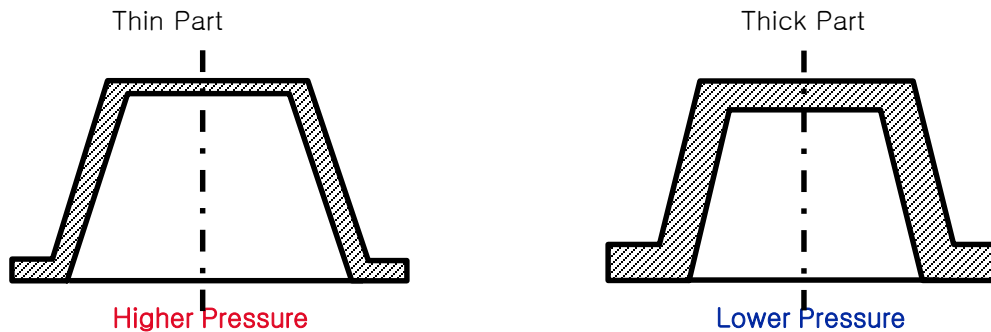
$C_2 = 2.5$ to 1 (typically 2)

1-6) 사출압력에의 영향을 미치는 인자

(1) 제품설계 (part design)

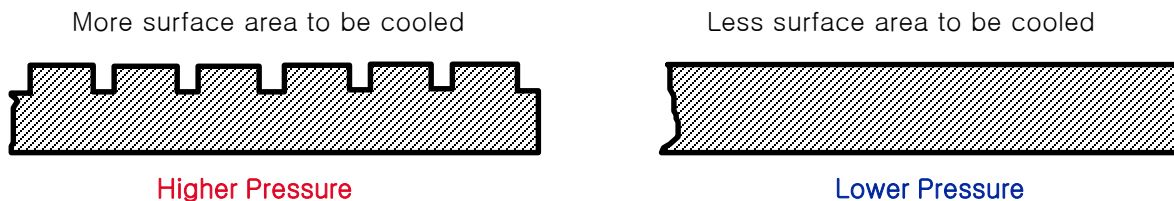
제품두께

제품두께가 얇을수록 캐비티 내의 유동저항이 증가하여 사출압력은 증가한다. 이러한 캐비티 내의 유동저항의 증가는 기본적으로 게이트 수를 증가하여야 함을 의미한다. 그렇지 않은 경우 수축률 편차에 의하여 제품 치수 문제와 싱크 문제가 발생한다. 따라서 게이트를 추가하지 않고 제품 두께만을 줄인다면 사출압력이 높아지는 것과 동시에 수지 충전에 필요한 형체력도 크게 증가한다.



제품 표면 면적

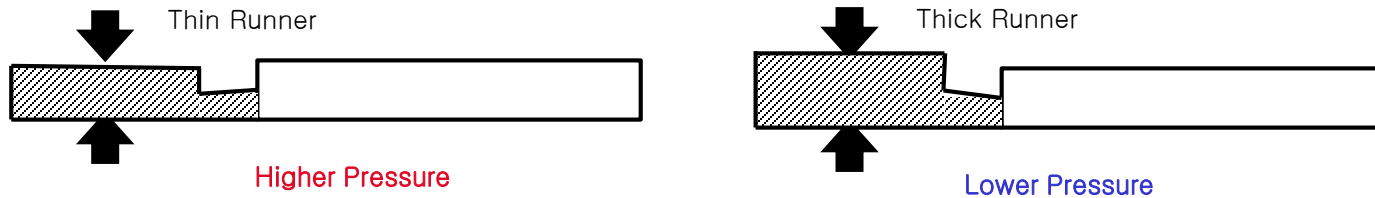
제품 면적이 증가할수록 동일한 조건에서 금형으로의 열손실이 증가하여, 수지의 유동선단 온도 강하와 고화층의 두께증가로 인한 실제 유동단면적 감소로 유동저항이 증가하여 사출압력이 증가한다. 일반적으로 다수의 미세한 홀이 존재하는 제품은 그렇지 않은 제품에 비하여 사출압력이 상승한다.



(2) 금형설계 (mold design)

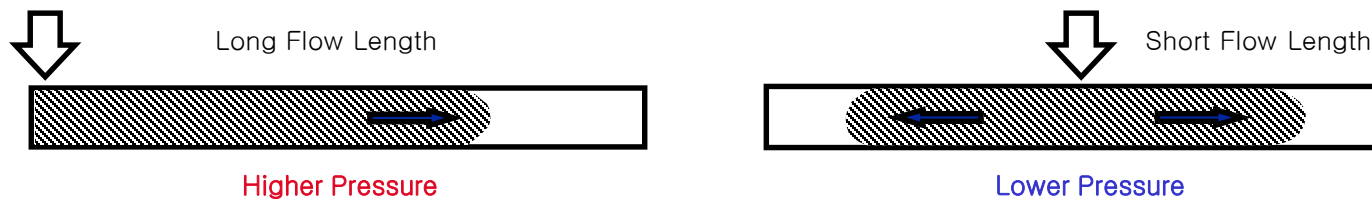
러너의 직경 (runner diameter)

러너의 직경을 줄이는 경우 제품 두께를 줄인 경우와 같은 이유로 동일한 이유로 러너에서의 유동저항 증가로 사출압력이 증가한다. 그러나 캐비티 내의 유동저항은 동일하므로 사출압력 증가에 따라 게이트를 추가할 필요도 없으며 충전에 필요한 형체력도 크게 변화가 없다. 다만 러너의 직경을 너무 작게 설계를 하면 러너의 빠른 고화시간으로 인하여 충분한 보압을 가할 수 없는 문제가 발생하고, 너무 크게 설계하면 사출압력은 낮아지지만 러너의 고화시간이 증가하여 전체 사출성형 사이클 시간이 증가한다.



유동길이 (flow length)

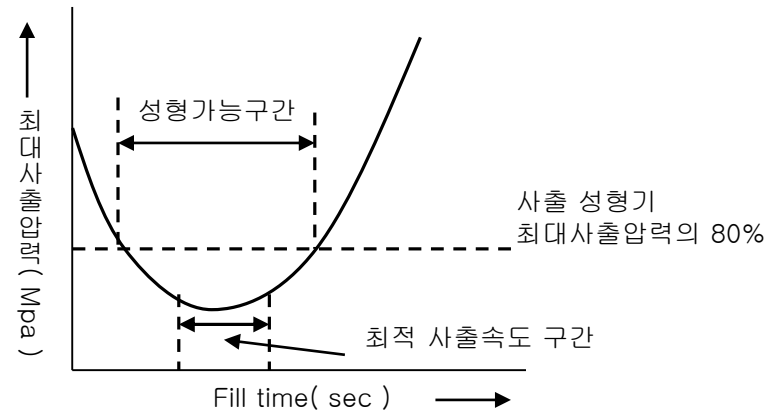
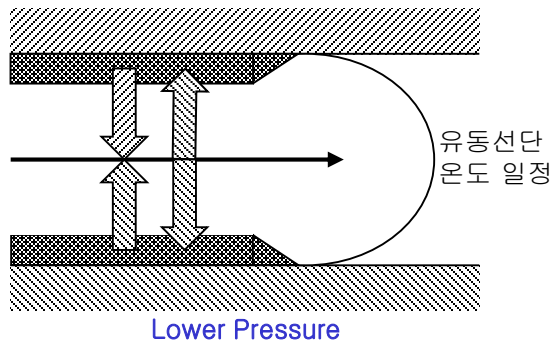
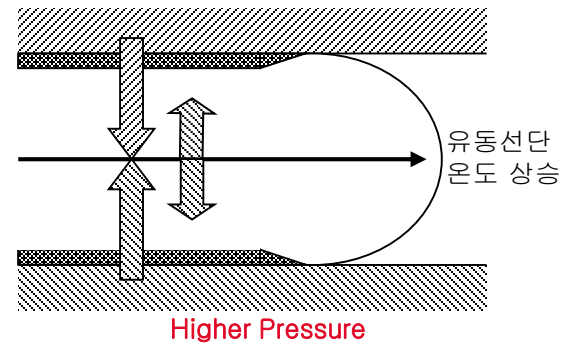
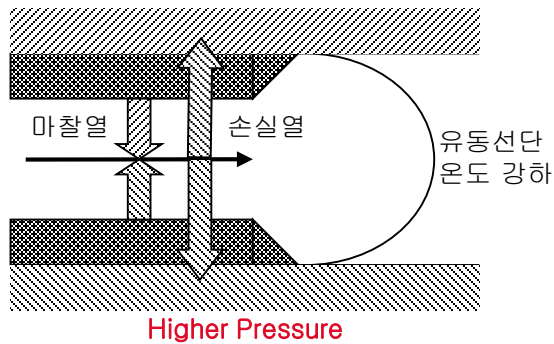
사출압력의 정의에서 알 수 있듯이 유동거리가 증가하면 사출압력은 증가한다. 따라서 유동길이를 줄이면 사출압력은 낮아진다. 유동길이를 줄이는 방법은 바로 게이트의 위와 수에 관련된다. 일반적으로 금형 설계에서 결정하여야 할 가장 중요한 항목이다. 또한 게이트는 유동 밸런스를 고려하여 설계하여야 한다. 한쪽이 아무리 빨리 충전 되어도 다른 한쪽이 충전 되지 않았다면 이 부분을 채우기 위하여 사출압력이 계속적으로 증가한다.



(3) 공정조건 (process settings)

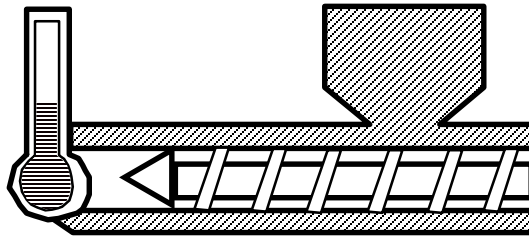
사출속도 (filling time)

사출속도에 대한 사출압력은 U커브를 보인다. 사출속도가 느리면, 열 발생보다 열 손실이 더 커서 유동선단 온도가 강하하여 점도가 증가하고 고화층의 두께가 증가하여 유동저항이 증가하여 사출압력이 상승한다. 반대로 사출속도가 빠르면 유동선단 온도는 상승하여 점도는 낮아지고 고화층의 두께는 줄어들지만, 고화층과 유동층 사이의 마찰저항이 크게 증가하여 오히려 사출압력이 증가한다. 따라서 캐비티 내에서 유동선단이 적절한 일정속도로 흐를 때 사출압력은 가장 낮아진다.

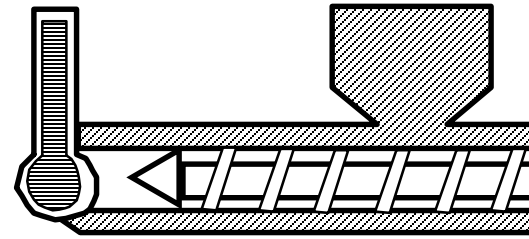


수지 온도 (melt temperature)

수지 온도란 가소화에 의하여 배럴에 계량되는 수지의 온도를 말한다. 수지 온도를 높이면 점도는 낮아지고, 고화층의 두께는 얇아진다. 따라서 사출압력은 낮아진다. 그러나 수지 온도가 높으면 냉각시간이 길어져 사이클시간이 길어진다.



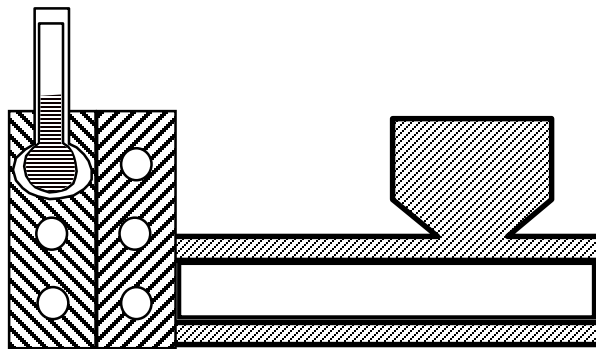
Higher Pressure



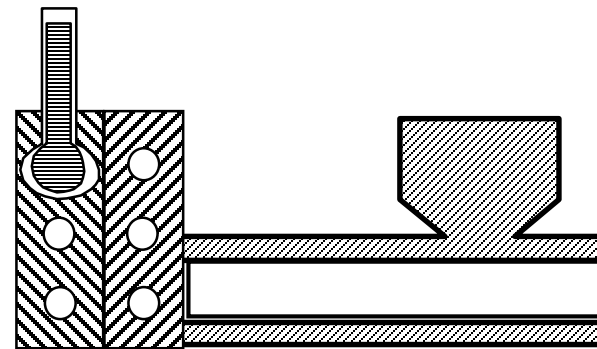
Lower Pressure

금형 온도 (mold temperature)

금형 온도란 캐비티 벽면 온도를 말한다. 일반적으로 금형 온도는 냉각 시스템과 냉각수의 온도 및 속도에 의하여 결정된다. 금형 온도가 높으면 고화층의 두께가 얇아져서 사출압력이 낮아진다. 그러나 마찬가지로 사이클시간을 증가시킨다.



Higher Pressure

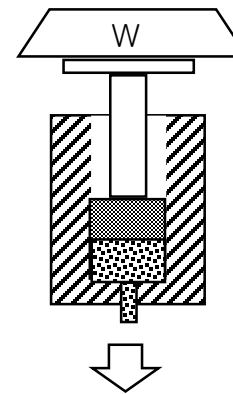
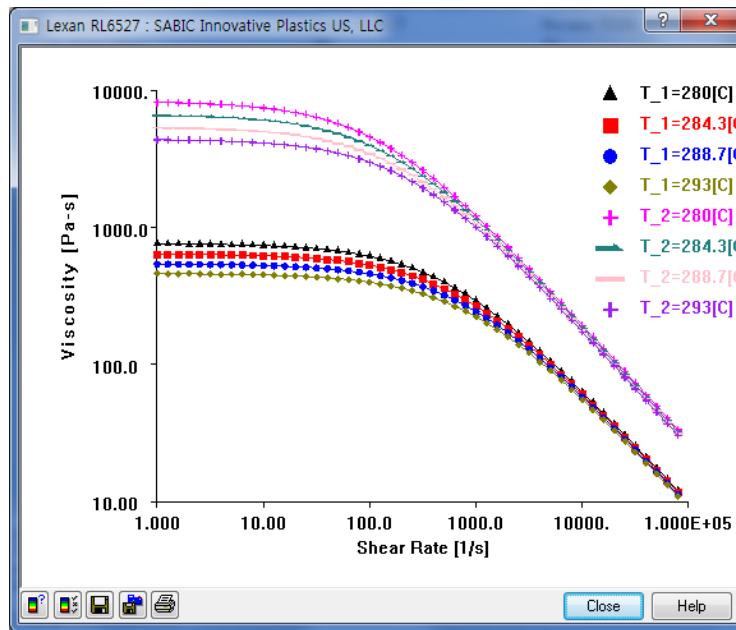


Lower Pressure

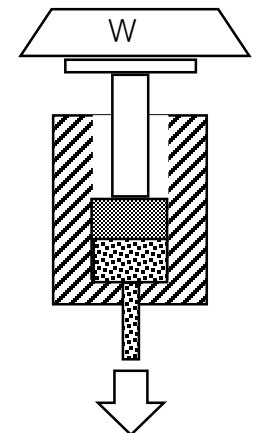
(4) 수지의 유동성 (material's flowability)

사출압력에 가장 큰 영향을 미치는 요소라고 판단된다. 제품 설계자는 수지를 선정하는데 있어서 수지의 유동성을 반드시 고려하여야 한다. 동일한 조건이라면 수지의 유동성이 높은 것이 사출압력을 줄인다. 또한 그 만큼 게이트의 수를 줄일 수 있다. 수지의 유동성을 비교하기 위해서는 앞에서 언급한 것과 같이 수지의 온도와 전단률에 따른 점도 커브를 비교하면 된다. 물론 점도 외에도 수지의 열적 물성들도 사출압력에 영향을 미칠 수 있다.

일반적으로 수지의 유동성을 측정하는 방법으로 MI (melt index)가 많이 사용된다. MI는 수지를 특정온도로 용융시키고 무게 추를 이용하여 수지에 압력을 가했을때 미세 홈으로 분당 얼마나 많은 수지가 흘러나오는가를 통해 수지의 유동성을 판단하는 방법이다. 그러나 이 방법은 전단률이 아주 작은 범위에서의 유동성을 비교하는 방법이다. 따라서 실제 사출에서와 같이 높은 전단률 범위에서 성형하는 경우 유동성이 서로 달라질 수 있다.



Higher Pressure



Lower Pressure

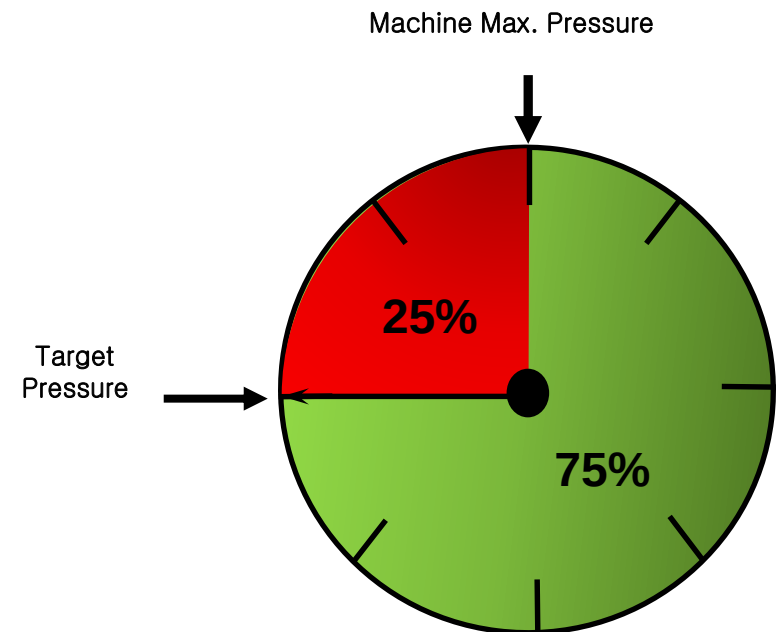
1-7) 사출압력의 허용 범위

제품의 성형을 위하여 가용한 사출 성형기의 최대사출압력의 75% 범위 이하에서 성형이 가능하도록 제품설계, 금형설계 그리고 공정조건 등이 조정되어야 한다. 이와 같이 높은 안전률을 적용하는 이유는 여러 가지가 있다.

첫 번째로 성형해석에서는 사출 성형기의 노즐을 포함하여 모델링을 하지 않기 때문이다. 노즐 부분에서 전체 사출 성형 압력의 10% 정도 압력손실이 추가적으로 발생한다. 두 번째는 사출 성형기의 노후화로 인한 사출 성형기 자체의 성능에 대한 신뢰성 문제이다.

마지막으로는 해석 solver 의 신뢰성과 해석에 입력되는 모델링과 수치 물성 등의 데이터에 대한 신뢰성 문제이다.

그러므로 해석결과로서의 사출압력이 사출 성형기 성능의 75%이상이라면 성형이 어려울 것으로 판단하여야 하며, 100%를 넘는 경우에는 절대적으로 성형이 불가능한 것으로 판단하여야 한다.

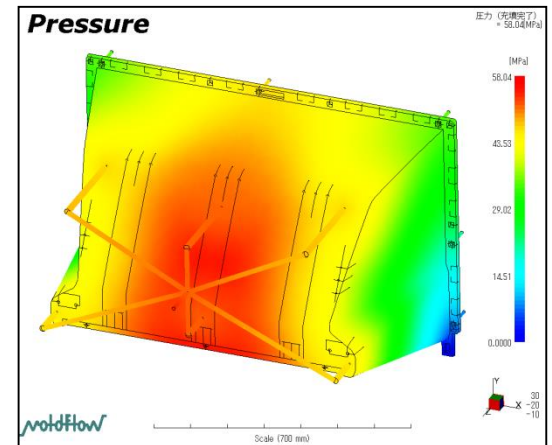
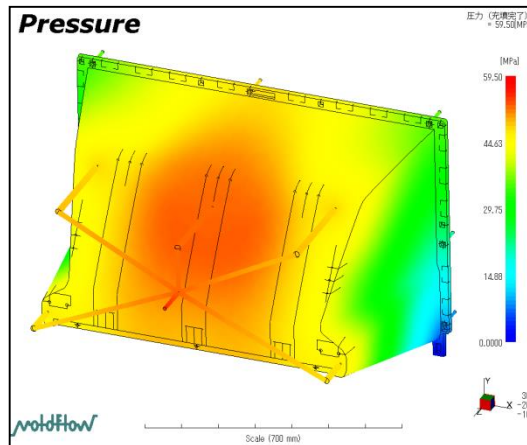
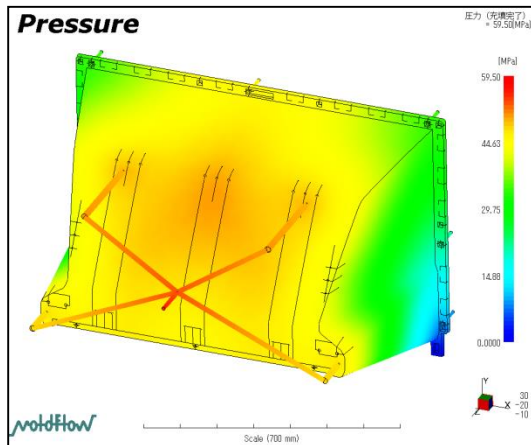
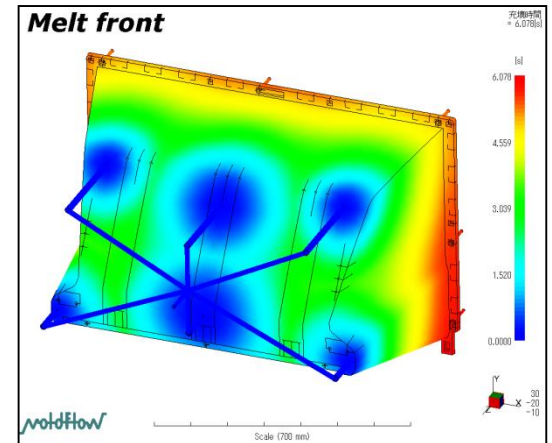
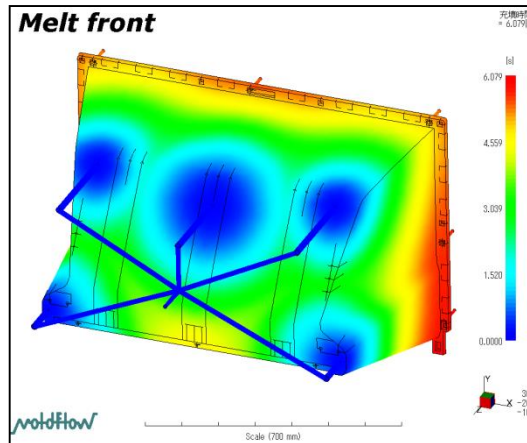
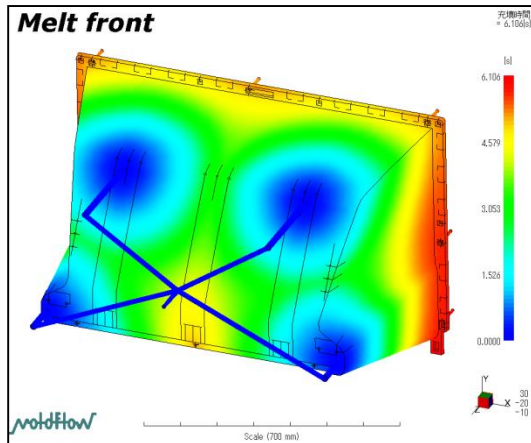


Target Pressure > Total pressure drop in the mold

$$DP_{\text{part}} + DP_{\text{runner}} = DP_{\text{total}} < \text{Target Pressure}$$

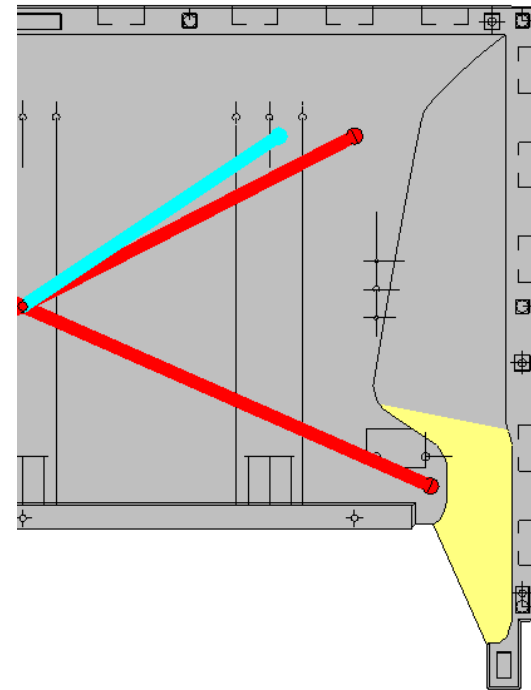
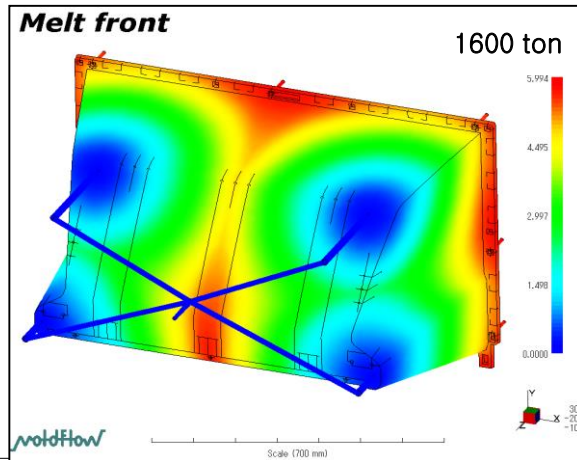
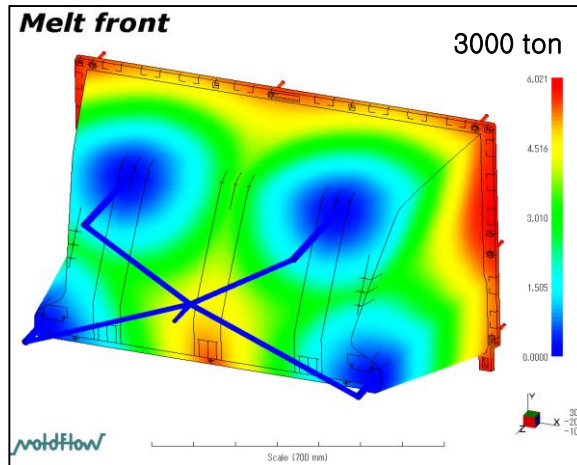
1-8) 충전 밸런스

게이트 위치가 부적절한 경우 플라스틱 수지는 균형되게 충전되지 못한다. 충전이 균형되지 못하는 경우 유동길이가 길어져 사출압력이 크게 증가하고, 먼저 충전된 부분은 필요 이상의 입력을 받게 되므로 형체력이 크게 증가한다. 또한 체적 수축률에 큰 차이가 발생하여 변형의 원인이 되기도 한다. 특히 제품 두께가 얇고 수지의 유동성이 좋지 못하여 사출압력이 크게 높을 것으로 판단되거나 면적이 넓어서 형체력이 크게 증가할 것으로 판단되는 경우에는 반드시 충전 밸런스를 고려하여 게이트 위치를 정하여야 한다.



위의 그림과 같이 게이트 수는 각각 4개, 5개, 6개 이지만 사출압력은 모두 거의 동일하다. 이것은 추가된 게이트가 유동길이가 가장 긴 부분에는 전혀 영향을 주지 못하였기 때문이다. 오히려 추가된 게이트들이 캐비티 중심부의 내압만을 크게 상승시켜 형체력을 증가시키는 원인이 되었다. 따라서 이 경우 게이트가 많을 수록 형체력은 높아진다.

여기서 게이트가 4개인 경우가 다른 경우에 비하여 형체력은 가장 낮지만 여전히 충전 밸런스가 좋지 못하여 형체력이 필요 이상으로 높다. 따라서 아래와 같이 게이트 위치를 적절히 옮기고 캐비티의 일부 구간의 두께를 증가시켜 유동밸런스가 되도록 설계 변경을 한다면 충전을 위한 형체력은 크게 낮아질 수 있다.



게이트 위치 이동 및 캐비티 두께 일부 증가

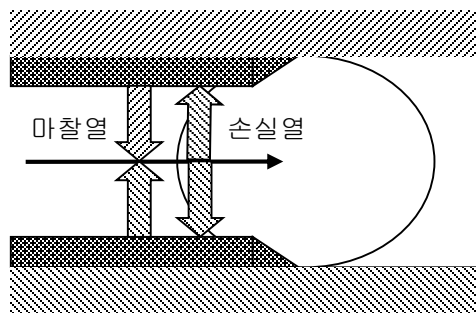
1-9) 사출 속도

(1) 최적 사출속도

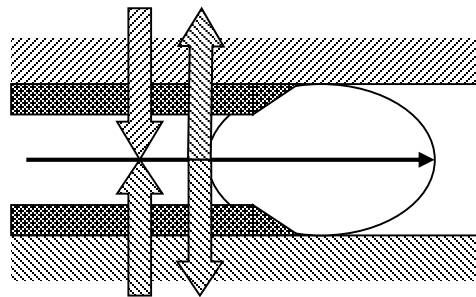
일반적으로 최적의 사출속도는 주어진 조건에서 사출압력이 최소가 되게 하는 것이다.

캐비티의 두께에 따라서도 사출속도는 달라져야 한다. 두께가 얇은 경우가 두꺼운 경우보다 금형에 의한 냉각으로 열 손실이 훨씬 크기 때문에 사출속도를 증가하여 전단을 높여 마찰열을 증가시켜야 유동전단의 온도는 일정하게 유지되고 사출압력도 낮아진다.

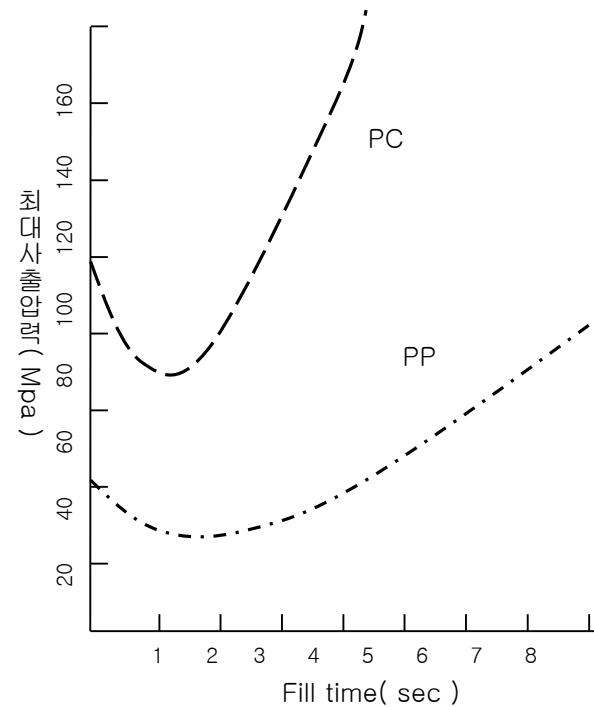
플라스틱 수지에 따라서 비열, 열전도율, 점도 등이 상당히 다르다. 온도변화에 따라서 점도 변화가 심한 재료 (PC, PMMA)는 가파른 U커브를 가지지만 그렇지 않은 재료 (PP, ABS)는 완만한 U 커브를 가진다. 따라서 수지에 따라서 사출압력이 사출속도에 민감하게 변하는 것이 있고 그렇지 않은 것이 있다.



(a) 두꺼운 캐비티



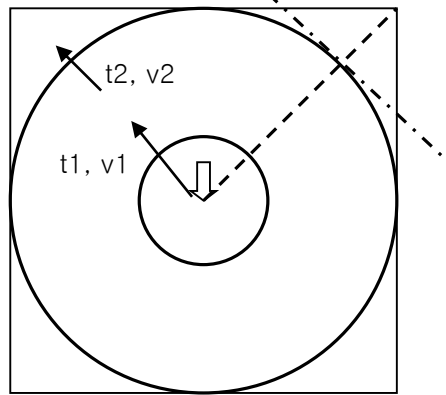
(b) 얇은 캐비티



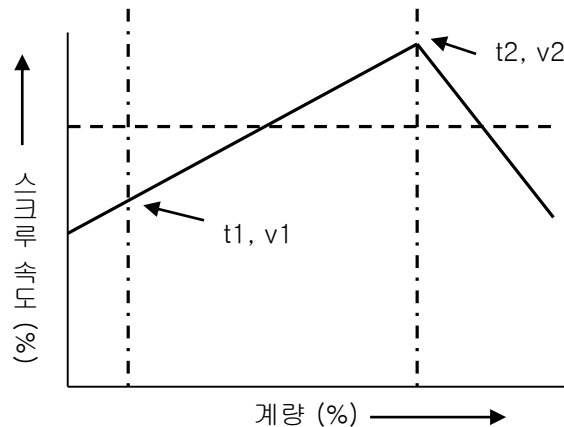
(c) 사출속도에 따른 사출압력

(2) 유동선단 속도

스크루 전진 속도가 일정하여도 캐비티 내에서의 유동선단 면적이 캐비티 형상에 따라서 크게 다르기 때문에 유동선단 속도도 크게 달라진다. 가장 최적의 사출은 수지를 유동선단 온도 변화가 없이 캐비티 끝부분 까지 충전하는 것이다. 따라서 유동선단 온도를 일정하게 유지하려면 유동선단 속도가 일정하여야 한다. 즉 유동선단 면적이 넓은 곳은 사출속도를 증가시키고 유동선단 면적이 좁은 곳은 사출속도를 줄인다. 따라서 동일한 속도로 스크루 전진하여 사출한다면 유동선단 온도가 유동선단 면적에 따라 상승 또는 하강하게 되어 U 커브를 생각할 때 결국 사출압력을 증가시킨다.



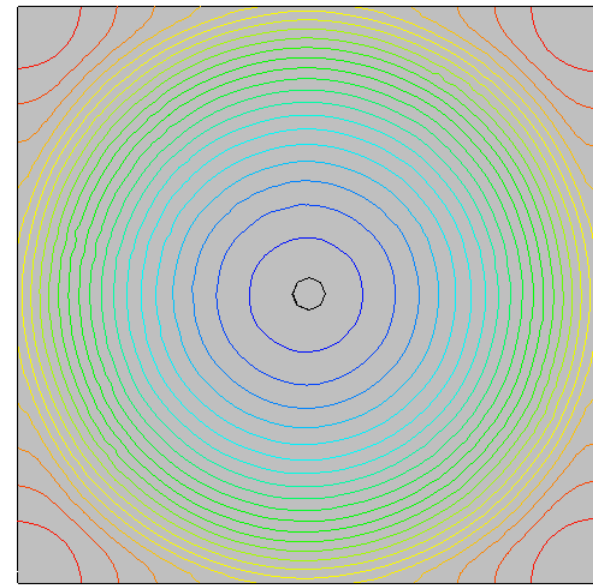
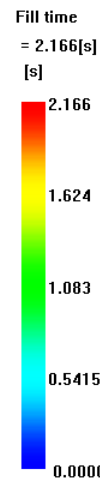
(a) 유동 선단 속도



(b) 적정 다단 사출속도

$$\text{유동선단속도 (cm/s)} = \frac{\text{유량 (cm}^3/\text{s)}}{\text{유동선단 면적 (cm}^2\text{)}}$$

$$\text{유동선단 면적 (cm}^2\text{)} = \text{유동선단 둘레(cm)} \times \text{캐비티 두께 (cm)}$$



Autodesk®
MOLD FLOW® INSIGHT

Scale (100 mm)

(c) 유동 패턴

1-10) 보압

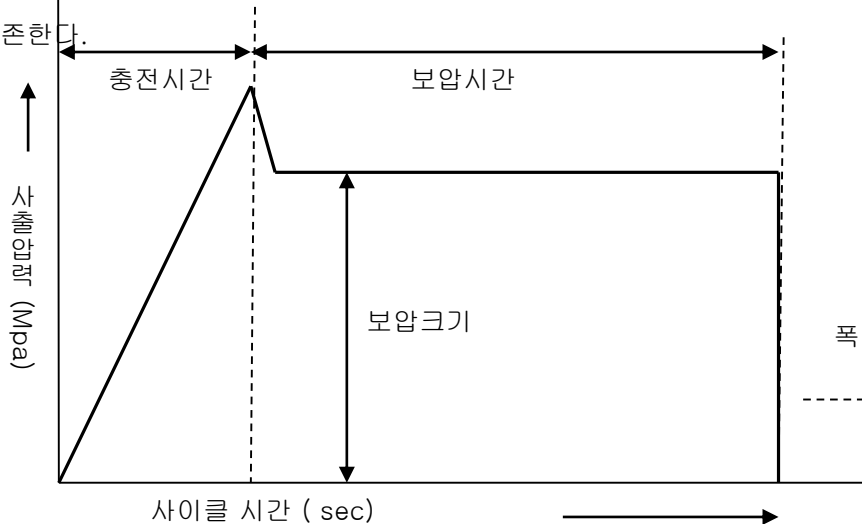
(1) 보압의 의미

보압은 충전 공정 이후에 캐비티 내에서의 수지 냉각에 따른 수축률을 보정해 주기 위하여 적정 압력으로 적정시간 동안 스크루를 전진시켜 수지를 캐비티 내로 계속 공급하는 공정이다. 따라서 성형품의 수축률에 가장 큰 영향을 준다.

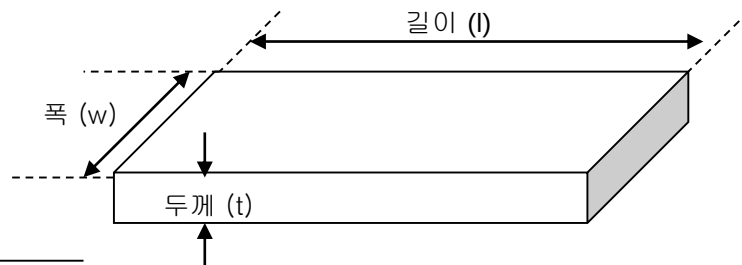
(2) 보압의 크기와 그 시간의 결정

보압의 크기 : 수축률이 크기를 좌우한다. 따라서 보압을 높이면 성형품 치수는 커지고 싱크 마크는 억제된다. 그 반대의 경우는 제품 치수는 작아지고 싱크 마크가 발생한다. 또한 너무 높은 보압은 형체력을 증가시키고 잔류응력을 증가시켜 제품 변형의 원인이 된다. 일반적인 경우(최대 사출압력이 50~100 Mpa) 적정 보압은 최대 사출압력의 70~80% 이다. 그러나 더 중요한 것은 충전 말단부의 패킹상태 즉 내압을 고려하여 적절한 보압을 가하여야 한다.

보압의 시간 : 보압시간은 캐비티의 두께에 관련된다. 제품이 두꺼워서 천천히 냉각되는 경우는 수축이 긴 시간 이루어지므로 그 만큼 긴 시간 동안 수지가 계속적으로 공급되어야 한다. 그러나 게이트가 고화된 이후에는 캐비티 내로 수지의 출입이 막히게 되므로 결국 보압시간은 게이트의 고화시간이다. 따라서 성형품의 두께에 따라 적정 크기의 게이트를 설계하여야 한다. 제품이 두꺼운 경우는 게이트 고화시간이 길게, 제품이 얇은 경우는 짧게 되도록 게이트 설계를 하여야 한다. 게이트의 고화시간은 게이트의 두께와 길이에 크게 의존한다.



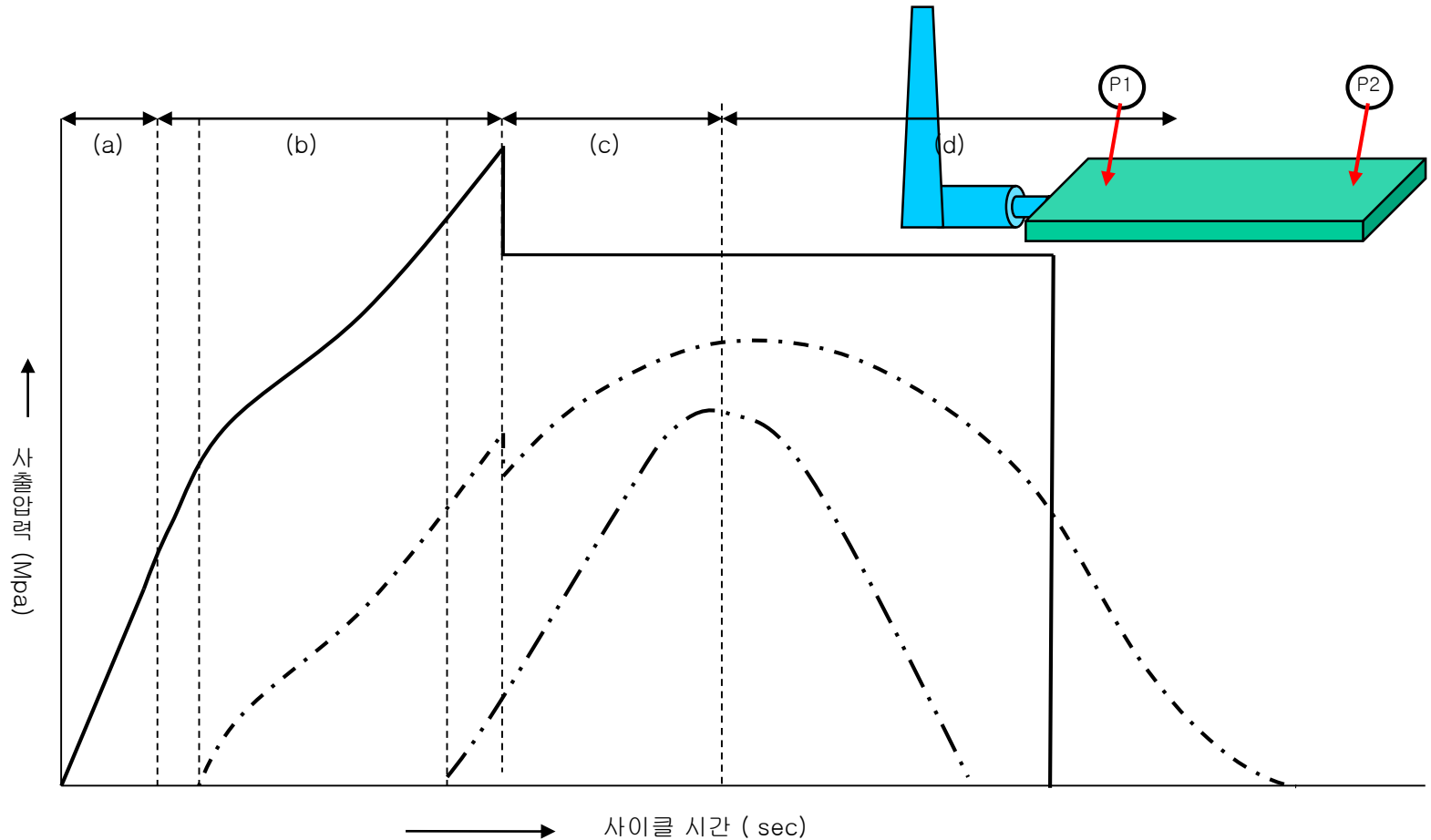
(a) 보압 크기와 시간



(b) 게이트 크기

(3) 캐비티 내압 변화

(a) 구간은 러너 시스템에서의 압력강하에 의하여 사출압력이 증가하는 단계, (b) 구간은 특정 위치의 캐비티 내부 압력이 수지가 그 부분을 지나가는 순간부터 보압 전환점 까지 압력강하 만큼 압력 상승하는 단계, (c) 구간은 보압 초기에 고화층을 제외하고 모두 액상 상태이므로 수지가 제품 끝에 도달하고 나면 수지 압축에 의한 급격한 내압 상승이 이루어지는 단계, (d) 구간은 고화가 점차 진행됨에 보압에 의한 수지 공급 보다는 냉각에 의한 수축이 현저히 증가하는 단계로서, 충전 끝 부분에 가까워 질수록 보압에 의한 수지 공급이 어려워져서 수축에 의하여 내압이 급격히 낮아지고 결국 0에 도달하는 단계이다.

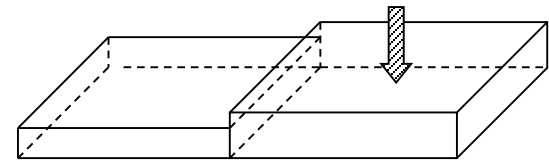


(4) 최적 보압 설정

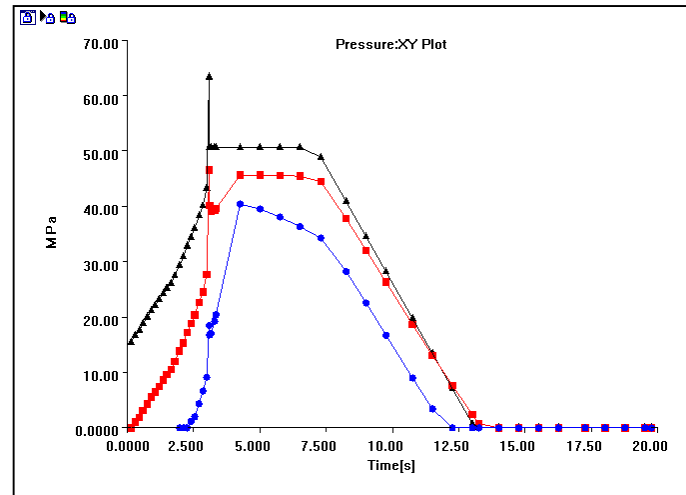
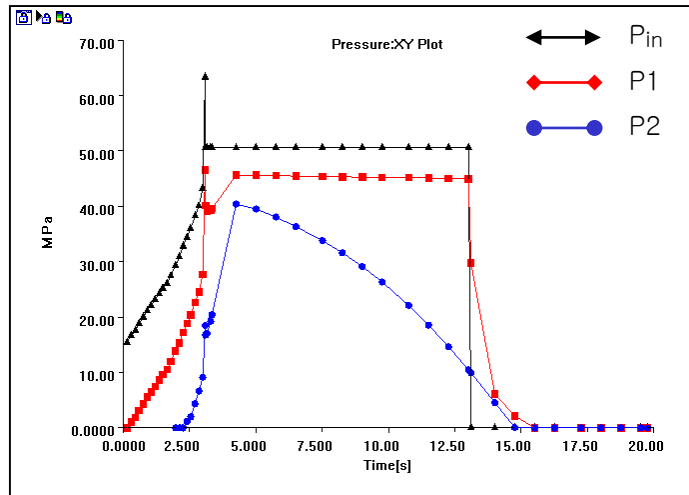
일반적으로 보압을 일정 압력으로 균일하게 가하면 게이트에 근접한 곳은 보압을 크게 받아 수축률이 적고 충전 마지막 부위는 상대적으로 압력을 충분히 받지 못하여 수축률이 큰 수축 불균형이 발생한다. 이러한 불균형은 잔류응력을 증가시켜 변형을 일으키는 중요한 원인이 된다. 따라서 균일한 압력으로 보압을 설정하는 것이 아니라 보압의 크기를 점점 줄여주는 다단 보압 설정을 통하여 캐비티 내압의 위치에 따른 편차를 줄여 줄 수 있다.

또한 게이트는 제품의 두꺼운 곳에 위치한다. 일반적으로 수축률은 압력과 고화속도에 의존한다. 따라서 고화속도가 느려 수축률이 큰 곳에 게이트를 위치하여 충분한 압력을 공급함으로써 수축률 균형을 이룰 수 있다.

그리고 보압시간은 게이트 고화 시간 이상으로 설정하여야 한다. 보압을 게이트 고화 시간 이하로 설정하면 스크루가 가소화를 위하여 후퇴하는 동안 게이트 앞 단에 압축되어 있는 수지가 뒤로 흘러나간다. 따라서 비정상적으로 게이트 주위의 수축률이 커질 수 있다.

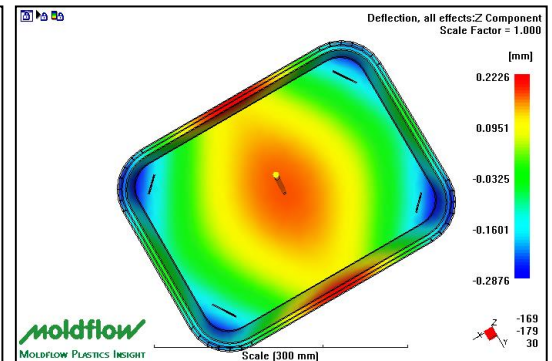
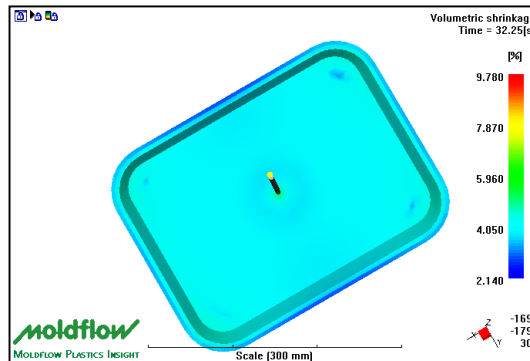
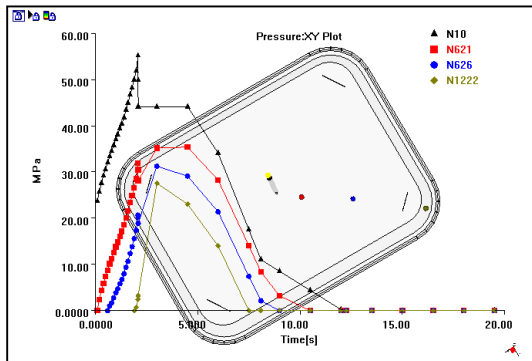
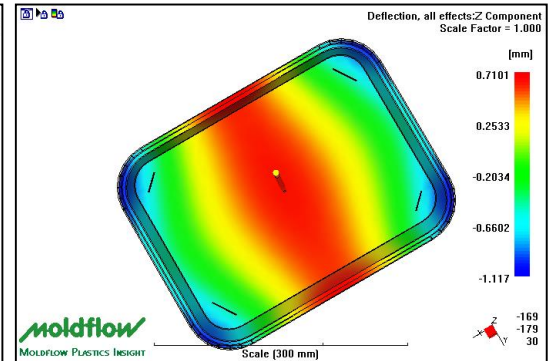
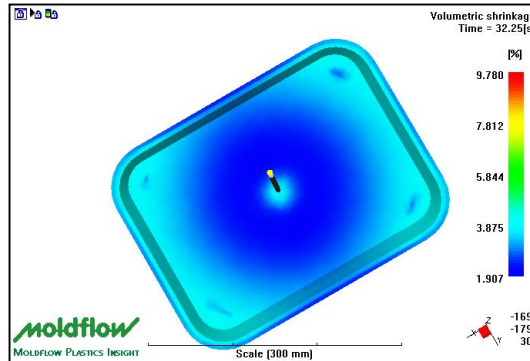
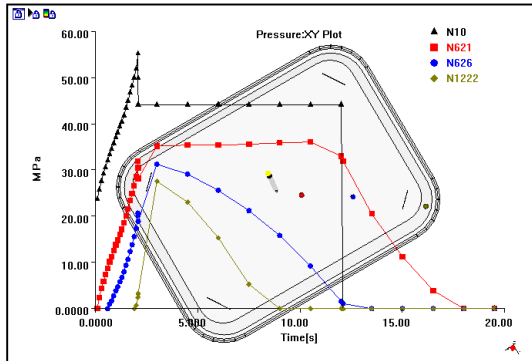


(c) 게이트 위치



(5) 보압과 수축률의 관계

아래 그림은 보압 설정 차이에 따른 제품의 수축률 분포와 변형량을 나타낸다. 첫 번째는 동일 압력으로 보압을 가하였을 경우이고 두 번째는 성형품의 형상을 고려하여 적절한 다단 보압을 가한 경우이다. 일정 압력의 보압의 경우는 게이트에서 가까운 부분과 먼 부분 사이에 내압차이가 크게 나서 체적 수축률 편차가 증가하여 변형이 크게 발생한다. 그러나 적절한 다단 보압의 경우는 그 내압차이가 상당히 개선되어 체적 수축률 편차가 감소하여 변형이 크게 개선된다.

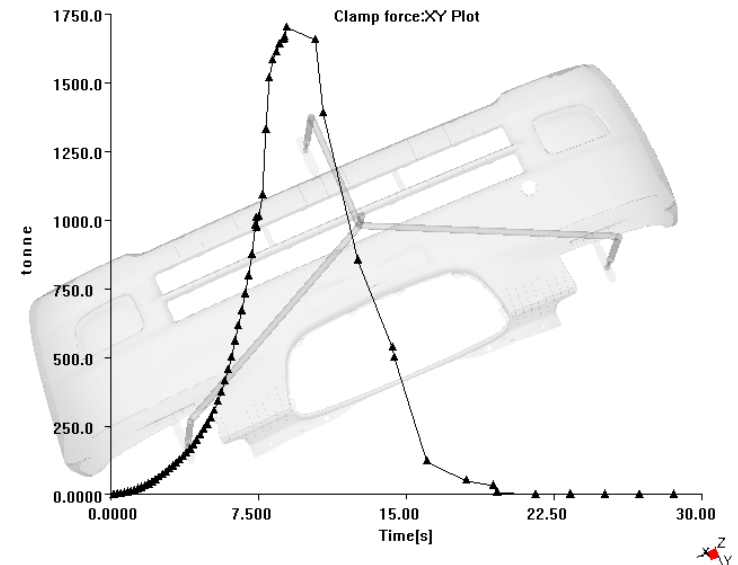
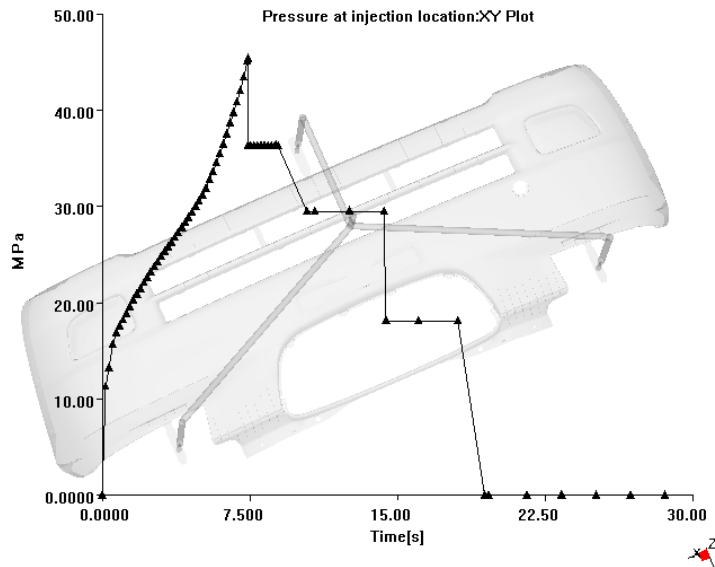


1-11) 형체력

형체력은 금형 내부에 작용하는 압력에 의하여 금형을 가동측 방향으로 미는 힘을 말한다. 따라서 형체력은 사출압력과 밀접한 관계를 가지고 있다. 그러나 정확히 표현하면 사출압력 보다는 캐비티 내압이다. 형체력의 계산은 캐비티 내압과 투영면적의 곱으로 계산되기 때문이다. 따라서 형체력을 줄이는 방법은 캐비티 내압을 줄이는 방법과 동일하다. 사출압력에 영향을 주는 인자 중에서 형체력에도 크게 영향을 미치는 인자를 정리하면 아래와 같다.

- ▶ 제품 두께
- ▶ 유동길이
- ▶ 사출속도
- ▶ 수지 및 금형온도
- ▶ 수지의 유동성

이외에 형체력에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 보압의 크기와 보압의 시간이다.



일반적으로 밸브 제어 게이트를 사용하지 않는 경우라면 사출압력은 충전 끝 부분에서 가장 높고, 캐비티 내압은 보압을 현저히 낮게 설정하지 않는 경우라면 보압 초기에 가장 높다. 형체력의 부족은 많은 성형문제를 동반한다. 충전 과정에서 형체력이 이미 사출 성형기의 최대 형체력을 초과한다면 금형이 벌어져 게이트 주변에는 수지가 금형 밖으로 누설이 될 것이고, 캐비티가 얇은 부분 또는 충전 끝단 부분은 수지가 충전되지 못하여 미성형이 발생한다. 또한 보압 과정에서만 사출 성형기의 최대 형체력을 초과하는 경우에는 성형품의 두께가 증가하고, 싱크 마크가 발생하며 성형품 치수가 적합하지 못하는 경우가 발생할 수 있다.

따라서 해석을 통하여 계산된 최대 형체력은 사출기 최대 형체력의 90%를 넘지 않도록 하여야 한다.

또한 잘못된 설계로 인하여 성형에 필요한 형체력이 크게 높게 되면 제조비용이 크게 증가할 수 있다. 사출 성형기가 대형이 될수록 구매 가격도 크게 증가하고, 공간도 많이 차지하며 운용비도 크게 증가한다. 따라서 항상 주어진 조건하에서 형체력이 최소화 될 수 있도록 금형 설계를 최적화하여야 한다.

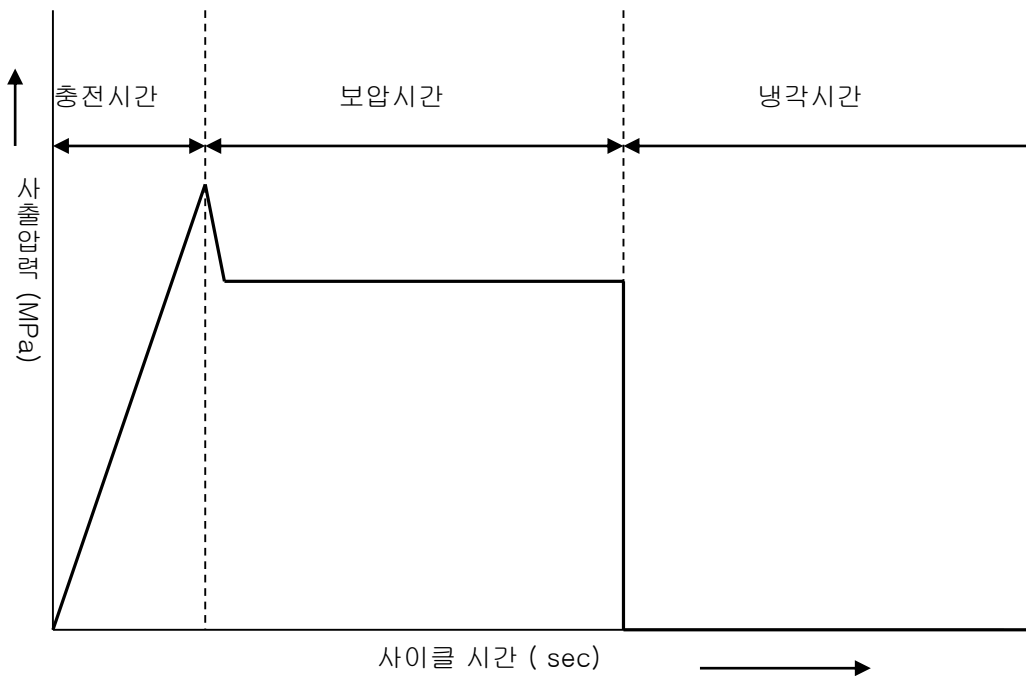


1-12) 냉각

(1) 냉각 시간의 의미

성형품을 취출 가능한 온도까지 고화시키는 시간이다. 성형품 뿐만 아니라 러너 시스템도 취출에 문제가 없을 정도로 고화되어야 한다. 물론 수지의 가소화하는 시간도 고려 되어야 한다. 따라서 성형품의 고화시간, 러너의 고화시간, 가소화 시간 중에서 가장 긴 시간이 바로 냉각시간이 된다.

여기서 취출 온도(ejection temperature)란 취출 시스템에 의하여 응력을 받아도 변형되지 않고 충분히 극복할 수 있는 온도를 말한다. 일반적으로 PP와 ABS 는 약 80~120 °C ,PC는 110~130°C 정도이다.

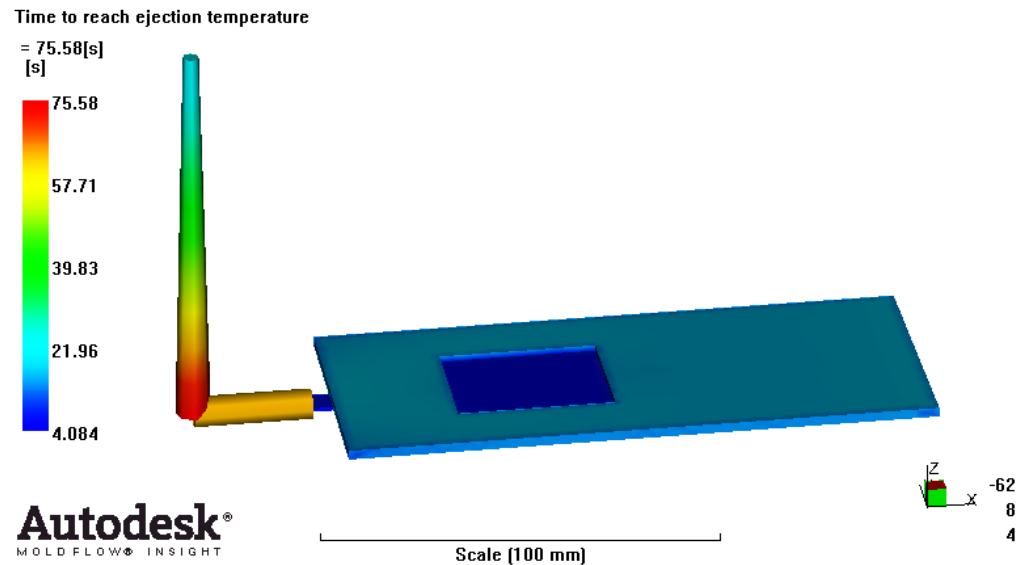


(2) 냉각시간의 설정

성형품을 취출 하기 위해서는 일반적으로 고화 정도가 80% 이상이어야 하고 러너는 약 50% 정도 고화되면 취출 가능하다. 일반적으로 대부분의 성형품은 두께가 얇아 고화가 빠르게 진행되므로 냉각시간을 증가시키는 요인은 아니다. 그러나 콜드 러너의 경우는 상당한 시간을 필요로 한다.

따라서 최근 사이클 시간 단축과 스크랩을 감소시키기 위하여 핫 러너를 많이 사용하고 있다. 콜드 러너를 사용하는 경우에도 그 직경을 충분히 줄여 성형품의 고화 시간의 2~3배를 넘지 않도록 하여야 한다. 그렇다고 러너 직경을 너무 작게 설계하면 유동저항이 증가하여 사출압력이 크게 상승하고 고화시간이 너무 빨라 보압을 충분히 제공하지 못하는 문제가 발생한다.

성형품 및 러너의 고화 시간은 성형품의 두께 러너의 직경에 가장 크게 의존하지만 및 금형 온도와 플라스틱 수지의 열적인 물성에도 크게 영향을 받는다.



1-13) 파이버 배향 (fiber orientation)

일반적으로 고분자 자체도 수지의 전단흐름에 의하여 수지흐름 방향으로 배향된다. 또한 방향성을 가지는 파이버와 같은 첨가제도 수지흐름과 제품 지오메트리에의 영향으로 특정 방향으로 배향된다.

이러한 파이버의 특정 방향 배향은 제품의 수축과 기계적 물성의 이방성을 초래하며, 이러한 이방성은 제품의 치수와 변형에 지대한 영향을 미친다. 고분자 자체의 배향도 제품의 이방성을 초래하지만 상대적으로 파이버 첨가된 수지에 비하면 크지 않다.

따라서 이러한 파이버의 배향을 정확히 계산하여야 파이버 배향에 의한 정확한 제품의 변형을 계산할 수 있다.

(1) 파이버 배향의 계산 (calculation of fiber orientation)

첫 번째로 성형 과정에서 수지유동에 의한 3차원적인 파이버 배향을 정확히 예측하기 위해서는 아래 두 가지 항목을 고려하여야 한다.

a) 유체역학 (hydrodynamic term)

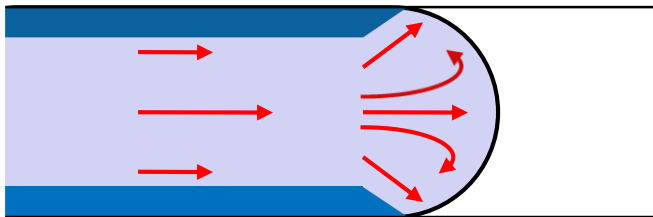
b) 상호작용 (interaction term)

즉 파이버의 배향 계산에서 유체역학적 영향(Jeffery's equation)만을 고려한다면 수지의 흐름에 상당히 크게 영향을 받아 강한 배향이 형성된다. 그러나 파이버 입자들간의 상호작용 영향(Folgar-Tucker)을 같이 고려하면 이러한 배향은 상당히 억제 된다.

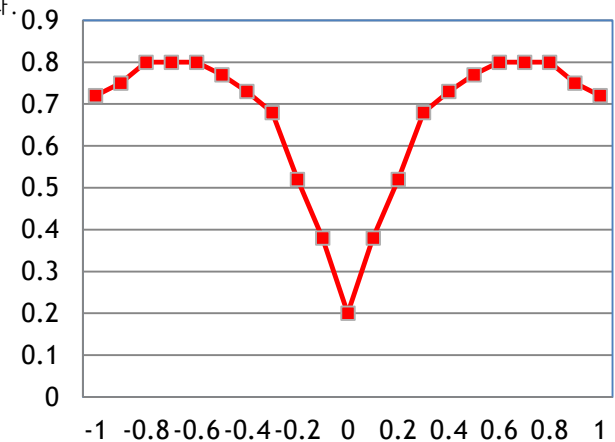
두 번째로 파이버의 배향은 제품의 위치 뿐만 아니라 두께 위치에 따라 다르다.

a) 표면 고화층 - 분수 흐름에 의하여 파이버 배향 결정

b) 내부 유동층 - 수지의 전단 흐름에 의하여 파이버 배향 결정



a) 제품 표면 고화층과 그 내부 유동층의 파이버 배향



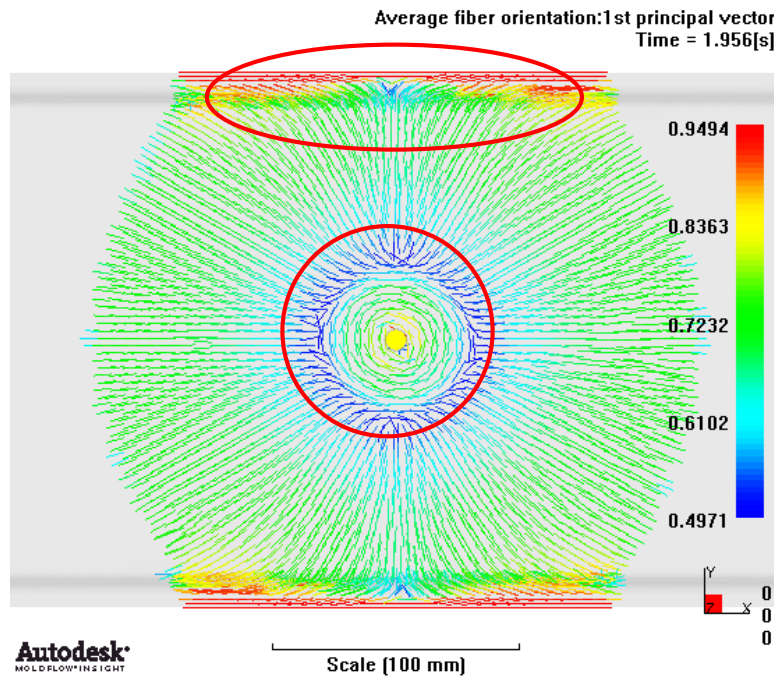
b) 제품 두께 방향의 주 배향 방향 배향 강도

제품 표면의 고화층은 유동선단에 의하여 생성되기 때문에 유동선단의 분수 흐름에 의하여 파이버 배향이 결정되며, 그 내부의 유동층은 수지의 전단 흐름에 의하여 파이버 배향이 결정된다.

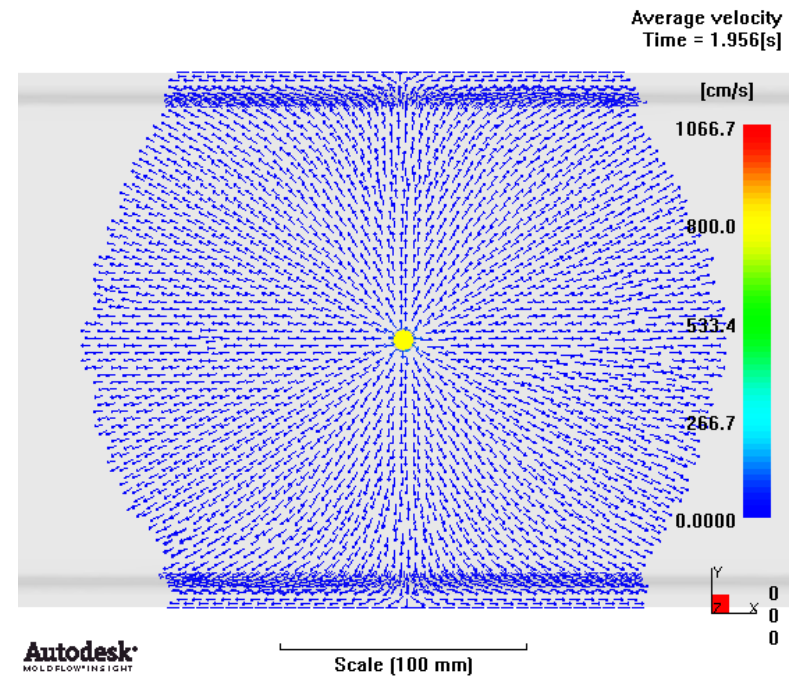
세 번째로 파이버의 배향은 제품 지오메트리에 영향을 받는다.

- a) 확산유동 (stretching flow) – 수지가 좁은 영역을 지나 넓은 영역으로 확산되어 가는 경우
- b) 회전 유동 (rounding flow) – 수지가 제품 벽에 접하는 경우 또는 웰드라인에서 수지가 만나는 경우

수지가 게이트와 같은 좁은 영역에서 제품의 넓은 영역을 지나는 경우 수지는 확산 유동이 되고 이때 파이버의 배향은 수지의 배향 방향과 일치하지 않고 일반적으로 수지흐름의 직각 방향으로 파이버가 배향된다. 또한 수지가 제품의 벽을 타고 회전하는 경우 또는 웰드라인에서 수지가 충돌하여 회전하는 경우 파이버의 배향 방향은 수지의 배향 방향과 일치하나 그 배향 강도는 아주 커진다.



a) 파이버 배향

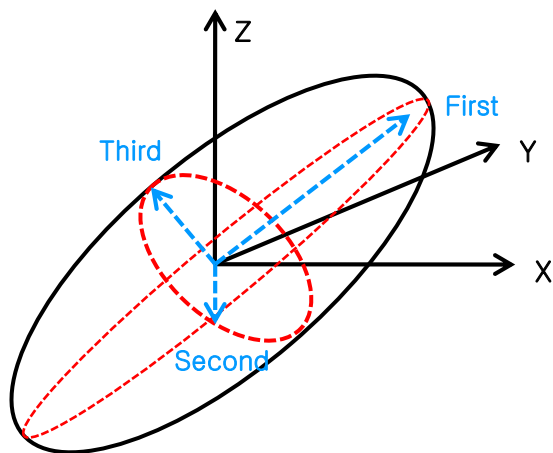


b) 고분자 배향

따라서 파이버 배향의 계산에서는 사출속도, 공정조건, 수지 특성, 제품 지오메트리, 파이버 L/D, 파이버 함량, 파이버 길이 등이 영향을 미친다.

(2) 파이버의 배향의 결과 (results of fiber orientation)

파이버의 배향 방향과 강도 계산 결과를 요소마다의 3차원 타원형으로 표현하게 되는데, Midplane과 Dual-domain과 같은 mesh 형식에서는 layer에 따른 그리고 3D mesh 형식에서는 노드와 요소에 따른 파이버의 3차원적 배향 방향과 강도가 글로벌 좌표계 기준으로 6개의 텐서로 표현된다.



$$T_{ij} = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yx} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & T_{zz} \end{bmatrix}$$

여기서 텐서가 9개가 아니고 6개 인 것은 T_{ij} 와 T_{ji} 는 대칭으로서 동일하기 때문이다.

또한 $T_{xx} + T_{yy} + T_{zz} = 1$ 이다.

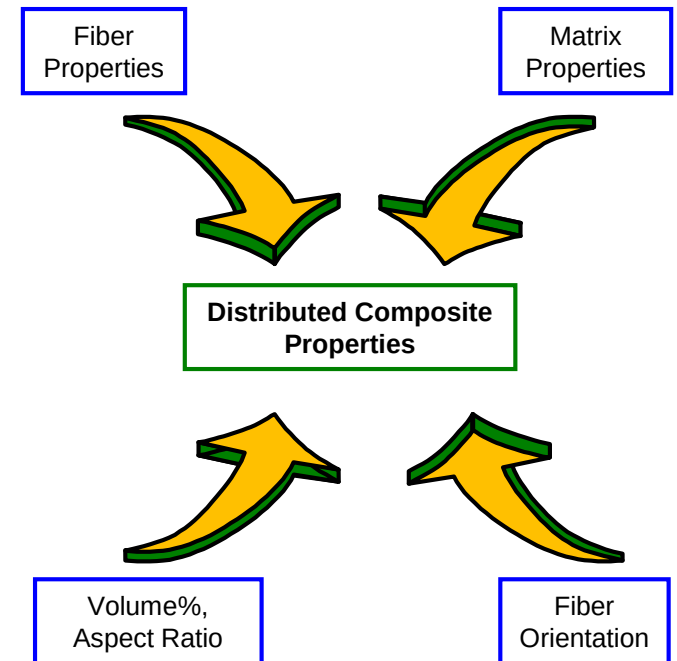
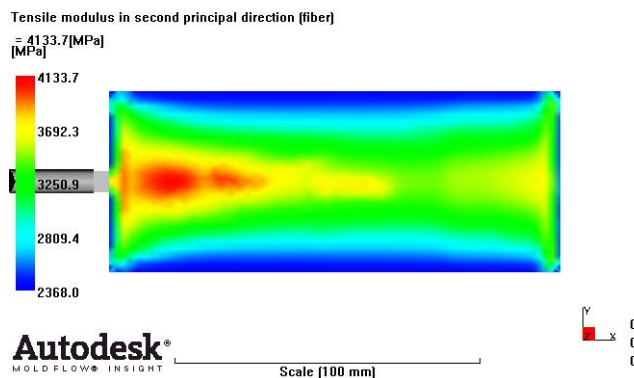
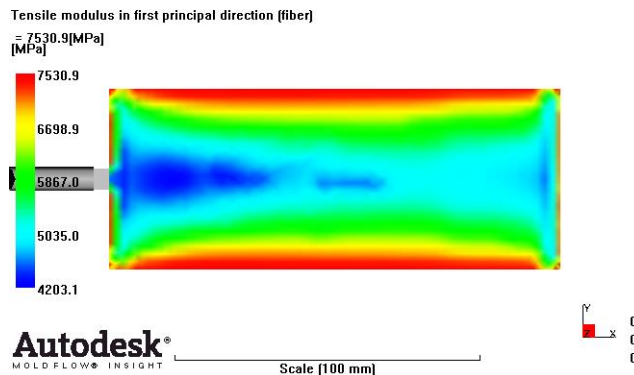
그리고 파이버의 배향을 글로벌 좌표계를 기준으로 나타내는 것이 아니라, 파이버의 주 배향 방향을 기준으로 나타내는 방법이 있다. 여기서 3차원 타원형의 1차 주 배향 방향을 “First”, 2차 주 배향 방향을 “Second” 그리고 3차 주 배향 방향을 “Third”로 표현한다.

(3) 기계적 물성의 이방성 (anisotropic mechanical properties)

파이버의 배향으로 인하여 제품의 기계적 물성은 제품 위치에 따라 그리고 두께 위치에 따라 달라지는 이방성이 된다. 일반적으로 파이버의 배향 방향의 탄성계수가 그 직각방향의 탄성계수에 비하여 상당히 크고, 이것은 배향의 강도에 따라 달라진다.

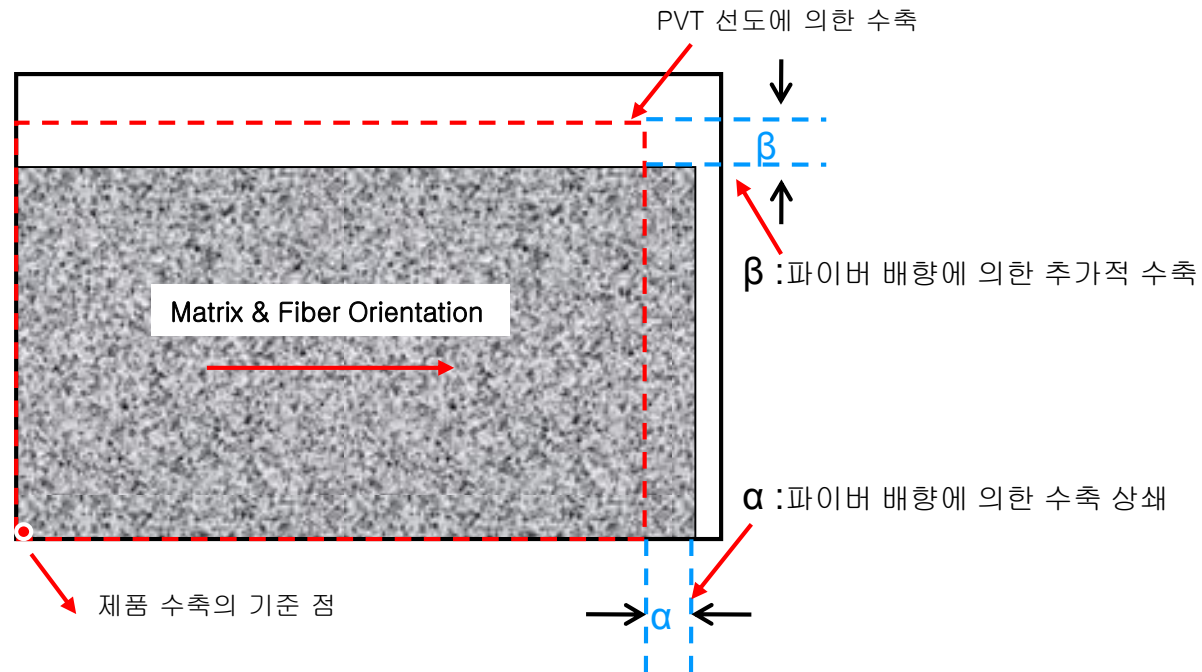
제품 변형해석을 위해서는 이러한 기계적 물성, 즉 탄성계수, 전단 계수 푸아송 비, 열팽창 계수 등을 제품 위치 또는 두께 위치에 따라서 정확히 계산하여야 한다.

파이버 배향에 따른 기계적 물성을 계산하기 위해서는 파이버의 기계적 물성, 기저 수지의 기계적 물성, 파이버 함량, 파이버 L/D, 파이버 배향 등을 고려하여야 한다.



(4) 수축의 이방성 (anisotropic shrinkage)

파이버 배향에 의하여 기계적 물성 뿐만 아니라 제품 수축에도 이방성을 유발한다. 일반적으로 수지는 냉각과정에서 온도와 압력 이력에 따라, 즉 PVT 선도에 따라 일정량이 방향성 없이 수축한다. 그러나 파이버들의 배향이 이러한 수축에 물리적으로 영향을 미친다. 파이버가 배향된 방향으로 PVT 선도에 따른 수축이 상당히 억제되고, 그 직각방향으로는 상대적으로 수축이 더 커진다. 따라서 파이버 첨가된 수지(filled material)의 경우는 이러한 수축률 편차가 제품 변형에 큰 영향을 미친다. 물론 파이버가 첨가되지 않은 수지(unfilled material)의 경우에도 수지 자체의 배향에 따른 수축의 이방성이 발생한다. 그러나 그 편차가 크지 않아서 일반적으로 제품 변형에 큰 영향을 주지 못한다.



2. 성형 불량

사출성형 해석을 통하여 모든 성형 불량 문제를 해결할 수는 없다. 그러나 해석을 통하여 많은 성형 문제들을 설계과정에서 미리 파악하여 설계 개선을 통하여 해결할 수 있다. 여기서는 사출성형 유동 해석을 통하여 직접적으로 또는 간접적으로 해결할 수 있는 성형 불량에 대하여 알아보자.

- ▶ 미성형(short shot)
- ▶ 웰드라인(weld line)
- ▶ 에어트랩(air trap)
- ▶ 플로우마크(flow mark)
- ▶ 싱크 마크(sink mark)

Short shot +
Weld line



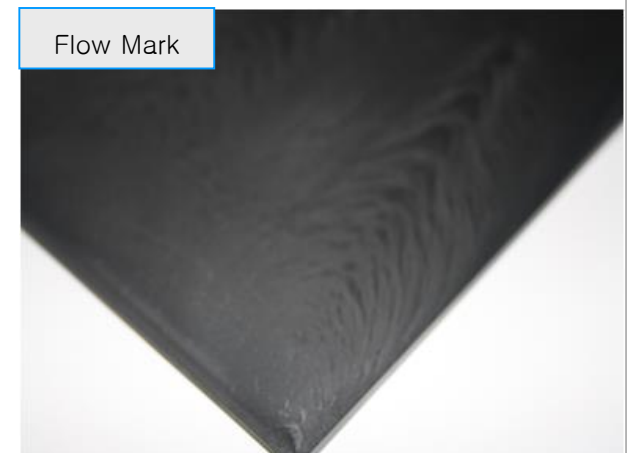
Sink Mark



Bun Mark



Flow Mark



2-1) 미성형 (short shot)

(1) 미성형이란 ?

미성형이란 사출성형 과정에서 캐비티에 플라스틱 수지가 완전히 충전되지 않은 것을 말한다. 미성형이 발생하는 부분은 주로 두께가 얇은 부분 또는 충전 끝단 부분이 된다. 어떠한 경우에도 미성형이 발생하게 되면 성형품으로써의 가치가 없다.

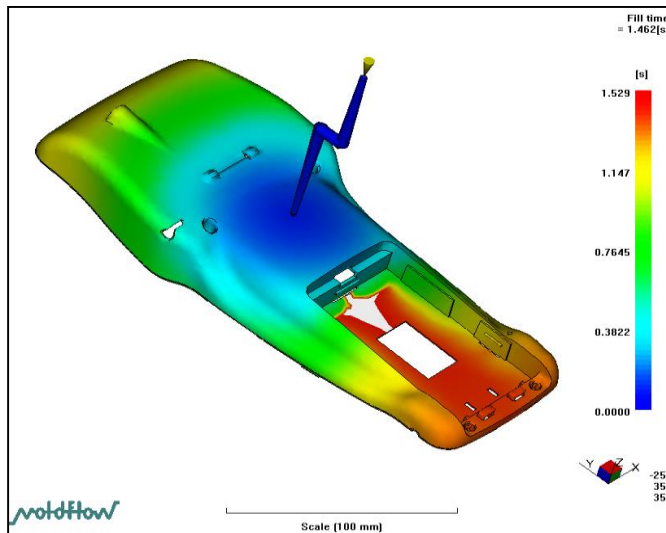
미성형은 다양한 원인에 의하여 발생하지만, 사출성형 해석을 통하여 대부분의 미성형 원인을 설계단계에서 정확히 판단할 수 있다.

미성형의 원인에 대한 적합한 조치를 사전에 취한다면 시사출 과정에서 미성형에 대한 우려는 하지 않아도 된다.

미성형이 발생하는 유형은 다음과 같다.

- ▶ 사출압력이 크게 높은 경우
- ▶ 형체력이 크게 높은 경우
- ▶ 정체현상이 심한 경우

이 외에도 에어트랩에 의하여 미성형이 발생할 수고 있다. 특히 수지 흐름에 의하여 리브나 보스에 갇히는 공기가 적절히 제거 되지 못하는 경우와 성형품의 두께 편차에 의하여 에어트랩이 발생하여 갇히는 공기가 적절히 제거되지 못하는 경우 미성형이 발생할 수도 있다. 이 경우 갇히는 공기의 양에 따라 미성형, 뿐만 아니라 변색 또는 탄화 현상이 발생할 수도 있다.



(2) 미성형의 제거

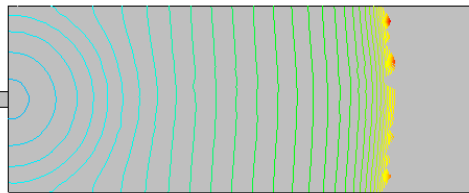
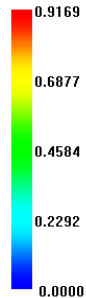
사출압력이 크게 높은 경우

캐비티를 채우기 위해 요구되는 사출 압력이 사출 성형기의 성능에 비하여 과도하게 높으면 수지를 캐비티 끝 부분까지 충전할 수 없다. 사출압력에 영향을 미치는 인자에 대해서는 앞에서 이미 배워서 알고 있다. 일반적으로 사출압력이 과도하게 높아지는 경우는 성형품의 두께가 과도하게 얇으면서도 유동성 좋지 않은 수지를 사용하는 경우이다. 물론 게이트를 추가한다면 사출압력을 낮출 수 있지만 성형품의 특성상 웰드라인 문제가 중요한 경우에는 게이트를 추가할 수 도 없다.

해석을 통하여 계산된 사출압력이 사출기 최대 압력의 80%를 넘는 경우 미성형이 발생할 것으로 판단하여야 한다.

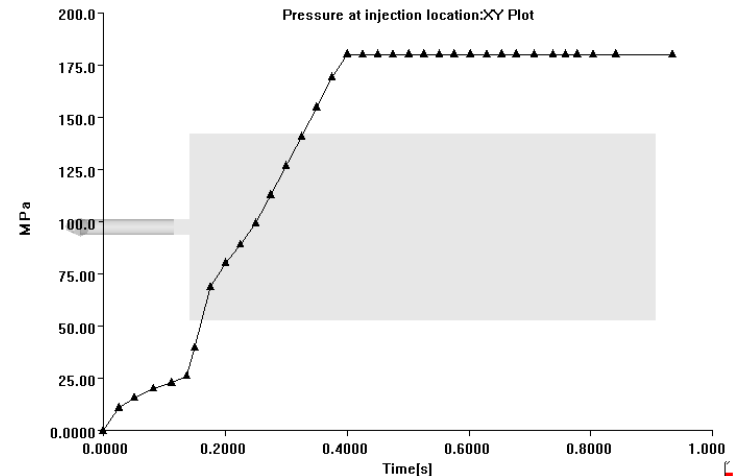
사출압력이 충분히 공급되는 구간에서는 수지의 유동선단이 적정 속도로 일정온도를 유지하면서 흘러가지만 사출압력 공급이 부족하게 되는 순간부터 유동선단의 전진 속도와 온도가 급격히 낮아져 수지의 천이온도에 도달하게 되면 더 이상 전진하지 못하고 미성형이 발생하게 된다.

Fill time
= 0.9169[s]
[s]



Autodesk®
MOLD FLOW® INSIGHT

Scale (100 mm)





형체력이 크게 높은 경우

캐비티를 채우기 위해 요구되는 형체력이 사출 성형기의 성능에 비하여 과도하게 높으면 수지를 캐비티 끝 부분까지 충전할 수 없는 경우가 발생한다. 형체력에 영향을 미치는 인자에 대해서는 앞에서 이미 배워서 알고 있다. 일반적으로 형체력이 과도하게 높아지는 경우는 성형품의 두께가 얇으면서도 성형품의 투영면적이 큰 경우이다.

해석을 통하여 계산된 최대 형체력이 충전 공정에서 이미 사출기 최대 형체력의 90%를 넘는 경우 미성형이 발생할 것으로 판단 하여야 한다.

정체현상의 심한 경우

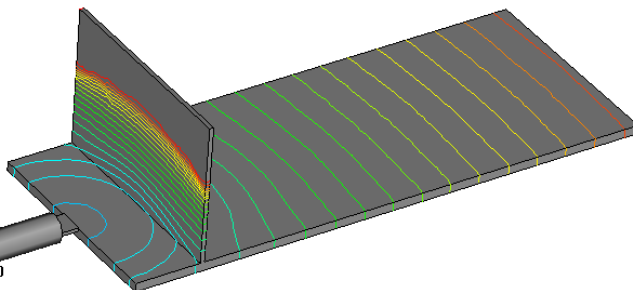
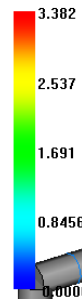
두께가 얇은 리브 또는 보스 등에서 정체현상이 심한 경우 캐비티 충전이 끝나기 전에 이미 수지의 유동선단이 이들 부분에서 더 이상 흐를 수 없는 온도 즉 천이온도에 도달하여 굳어버리는 경우이다. 일반적으로 정체현상이 심한 경우는 게이트 주변에 얇고 긴 리브와 보스가 존재하는 경우이다. 게이트 위치에서 오히려 멀리 있는 부분은 정체현상이 발생하지 않는다. 따라서 정체현상에 의하여 미성형이 발생하는 경우는 미성형이 예상되는 부분에서 가능한 멀어지도록 게이트 위치를 변경하는 것이 크게 도움이 된다. 그 외에 리브 또는 보스의 두께를 증가하거나, 사출속도를 증가시키고, 수지 온도와 금형 온도를 높이는 것이 도움이 된다.

사출압력과 형체력이 부족한 경우에는 주로 충전 말단 부분에서 미성형이 발생하지만 정체현상에 의한 미성형은 게이트 주변에서 발생한다.

해석을 통하여 게이트 주변의 얇은 리브 또는 보스에서 수지의 유동선단 온도가 천이온도에 도달한다면 미성형이 발생할 것으로 판단하여야 한다.



Fill time
= 3.382[s]
[s]

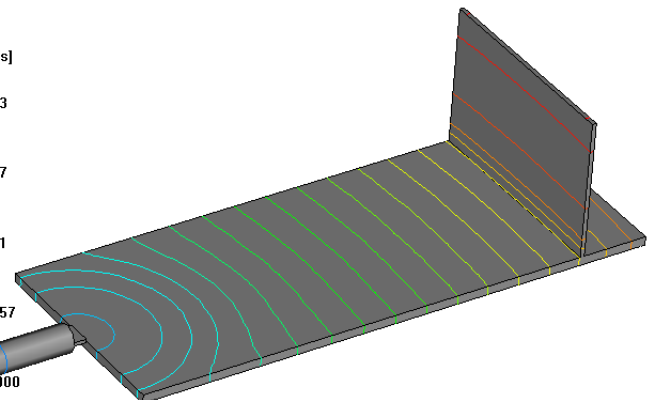


Autodesk®
MOLD FLOW® INSIGHT

Scale (100 mm)



Fill time
= 3.383[s]
[s]



Autodesk®
MOLD FLOW® INSIGHT

Scale (100 mm)

129
29
17

2-2) 웰드라인 (weld line)

(1) 웰드라인이란?

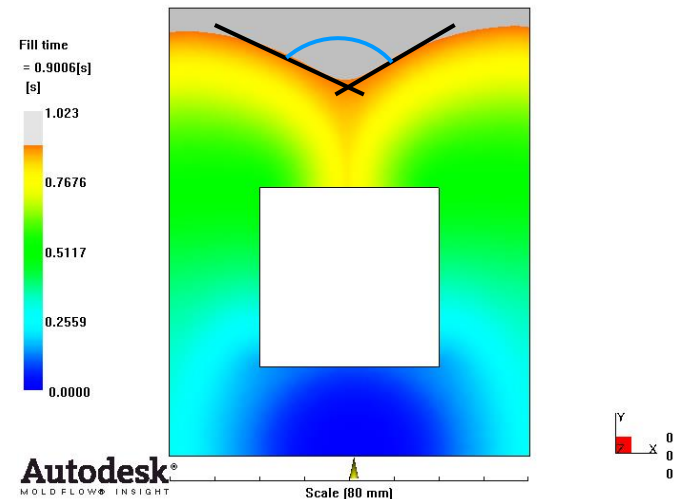
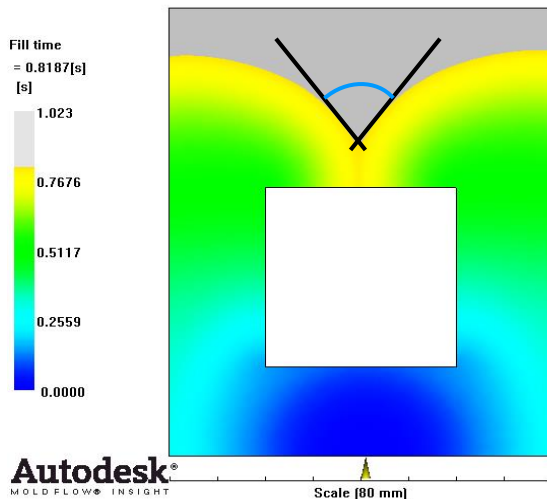
웰드라인은 두개의 또는 그 이상의 유동이 충돌하여 형성하는 라인과 같은 자국을 말한다. 수지의 유동선단은 고화층과 유동층을 가지고 있으며 유동층은 서로 충돌하여도 잘 융합하지만 고화층은 충돌하여 V 형태의 자국을 형성하게 된다. 게이트가 여러 개 존재하는 경우에 당연히 웰드라인이 형성되고 게이트가 한 개인 경우라 하여도 제품에 홀이 존재하는 경우에 필연적으로 웰드라인이 형성된다. 웰드라인은 성형품의 외관 품질 뿐만 아니라 구조적으로 취약한 부분이 된다. 따라서 응력을 많이 받는 부분에 웰드라인이 형성되지 않도록 하여야 한다.

(2) 웰드라인의 선명도

웰드라인의 선명도는 수지의 유동선단 충돌 당시의 고화층의 두께와 충돌 각도(접촉각)가 가장 중요하다.

고화층의 두께는 유동선단 수지의 온도와 금형 온도에 반비례한다. 즉 유동선단 온도와 금형 온도가 높을 수록 V자 홈의 깊이가 얕아진다. 따라서 사출속도를 증가시키고, 수지 온도와 금형 온도를 높이면 웰드라인은 양호해진다.

접촉각은 두 유동이 만나는 각도로 정의된다. 정면충돌의 경우 접촉각은 0° 이며 이때 웰드라인은 가장 선명하다. 접촉각이 일반적으로 135° 를 넘는 경우에 웰드라인이 소멸하는 것으로 보고 되고 있으나 사실 수지의 종류 및 성형조건에 따라 달라질 수 있다.

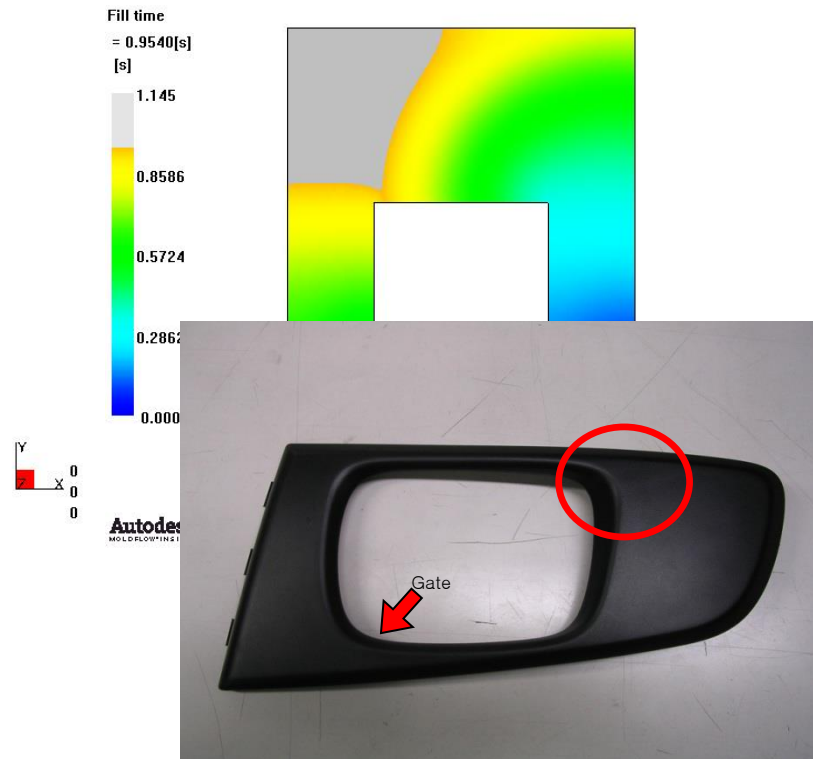
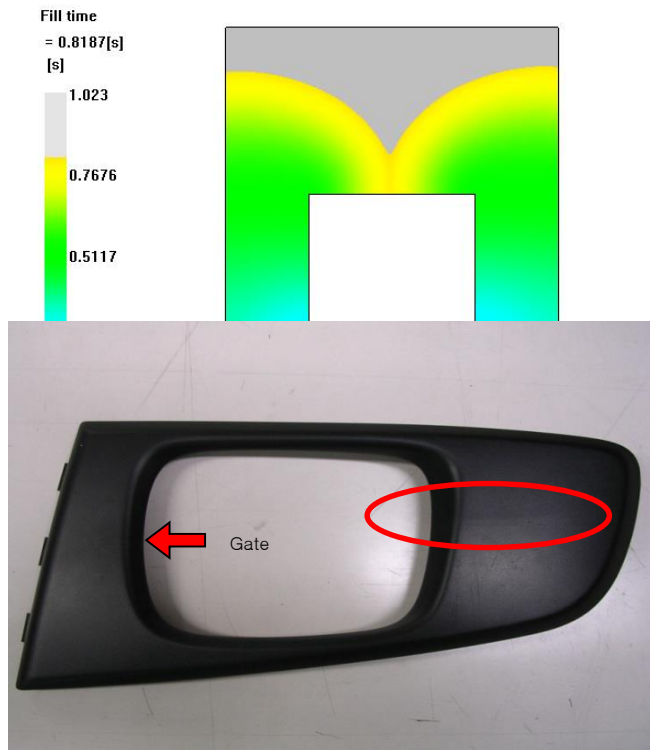


(3) 웰드라인 의 제거

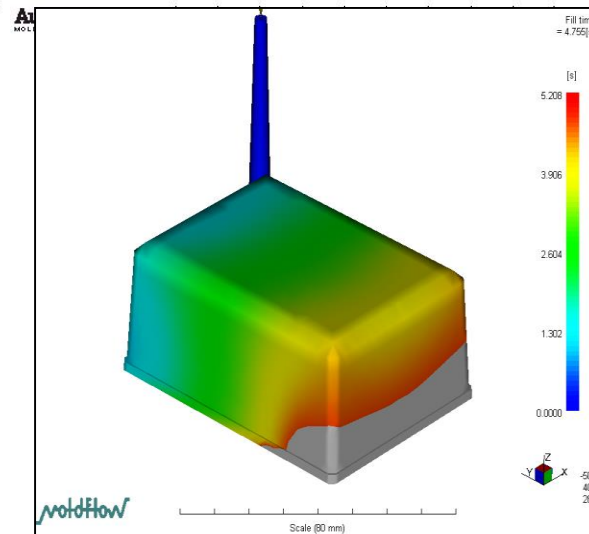
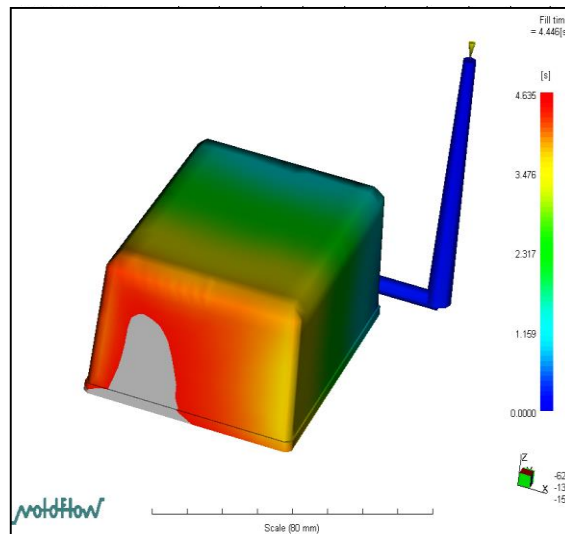
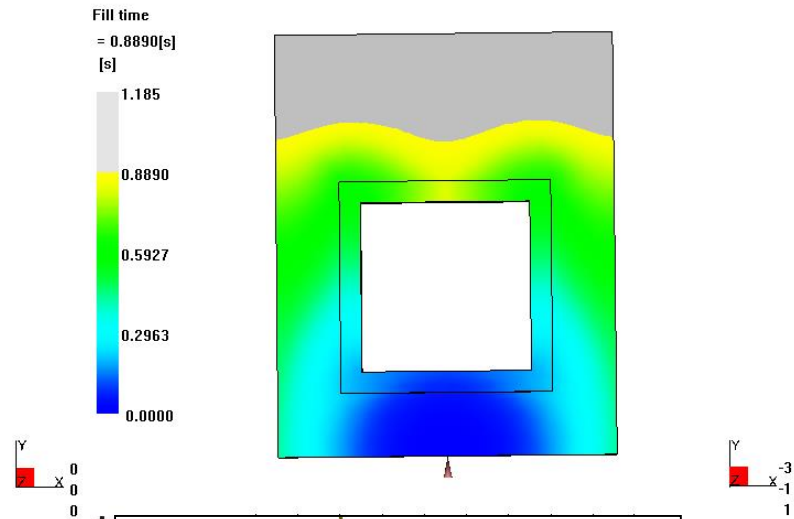
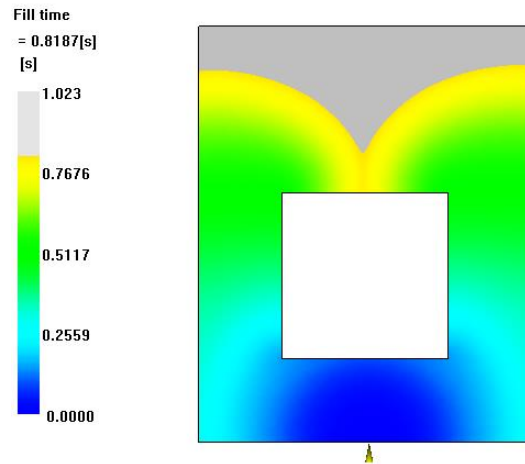
웰드라인을 제거하기 위해서는 온도를 높여서 고화층을 줄이거나 없애는 방법이 있고, 접촉각이 커지도록 하는 방법과 충돌자체를 없애는 방법이 있다.

고화층을 줄이거나 없애는 가장 효과적인 방법은 금형 온도를 높이는 방법이다. 금형 온도를 높여서 웰드라인을 완전히 제거하는 대표적 방법이 금속가열냉각 금형이다. 금속 가열냉각 금형이란 충전 직전에 금형 온도가 수지의 천이온도 이상이 되도록 스팀등을 이용해 온도를 높인 다음 수지를 충전하고 다시 금형 온도를 정상 온도로 급격히 낮추어 성형할 수 있도록 하는 금형이다.

접촉각이 커지도록 하는 방법에는 게이트 위치를 변경하거나 제품의 두께를 변경하는 방법이 있다. 게이트 위치를 옮겨서 홀 주변의 유동선단의 충돌 위치를 홀의 모서리로 이동시키면 접촉각이 커져서 웰드라인이 크게 개선된다.



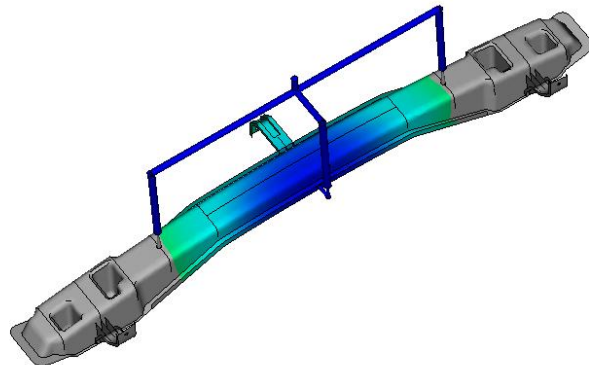
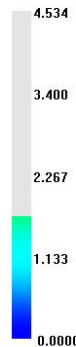
제품의 일부 두께를 변경하여 수지흐름의 속도를 조절하여 접촉각의 크기를 줄이는 방법이 있다. 충전 밸런스를 고려하여 게이트 위치를 옮기는 것이 용이하지 않은 많은 경우에 국부적인 제품 두께 변경으로 웰드라인을 크게 개선할 수 있다.



또한 충돌 자체를 없애는 방법으로는 밸브 제어 시스템을 사용하는 것이다. 게이트가 여러 점 있는 경우 모든 게이트를 동시에 열면 각각의 게이트로부터의 수지 유동이 충돌하여 웰드라인이 형성될 수 밖에 없다. 그러나 게이트를 순차적으로 제어하면 유동선단의 충돌을 방지할 수 있다. 단 핫 런너 시스템에서만 가능하다.

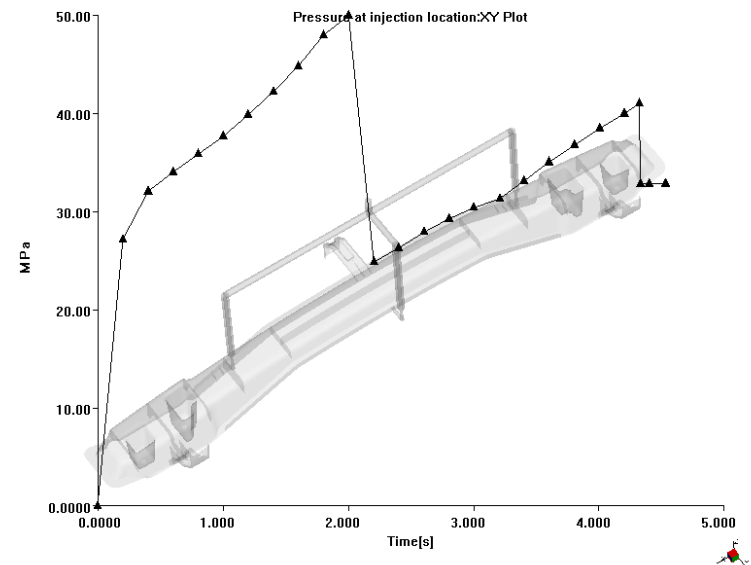
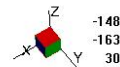
그러나 첫 번째 게이트로부터의 유동이 두 번째 게이트를 지나가는 순간 두 번째 게이트의 밸브가 열리면 유동선단의 충돌은 없지만 두 번째 게이트로부터의 수지 유입이 급격히 증가하여 수지 유동선단 전진 속도가 갑자기 빨라지면서 여러 가지 성형문제를 유발 할 수 있다.

Fill time
= 1.700[s]
[s]



Autodesk®
MOLD FLOW® INSIGHT

Scale [800 mm]



2-3) 에어트랩(air trap)

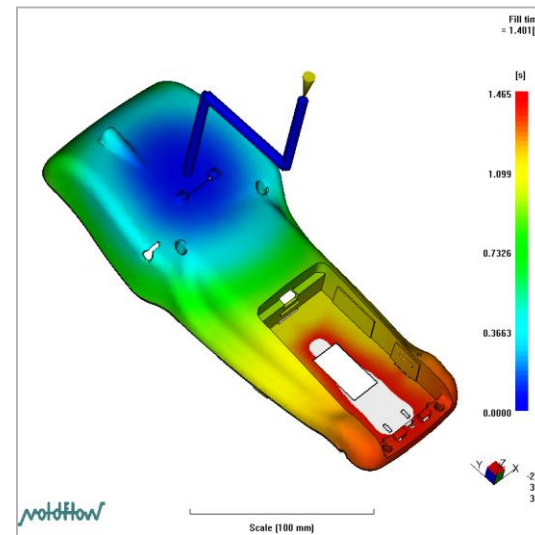
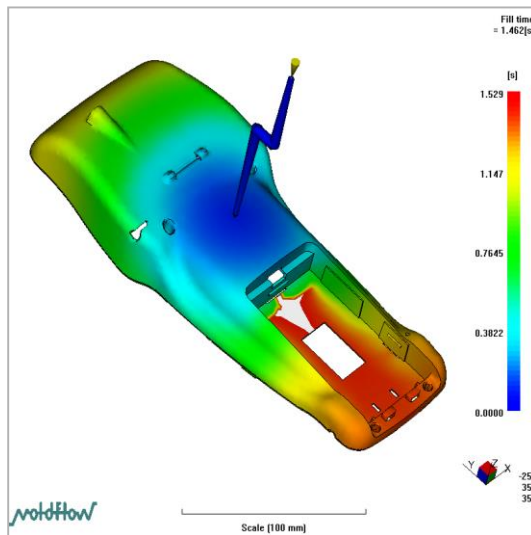
(1) 에어트랩이란?

에어트랩은 캐비티내에 공기가 외부로 빠져나가지 못해 갇히는 현상이다. 일반적인 경우에는 캐비티 속의 모든 공기는 금형 파팅면에 설계되어 있는 에어벤트를 통하여 외부로 빠져나가야 한다. 그러나 공기가 갇히는 곳이 파팅면이 아닌 경우에는 공기가 외부로 빠져나갈 수 없게 되고 수지 성형 압력에 의하여 공기가 압축되면서 온도가 높아져 수지의 일부가 변색 또는 탄화하는 현상이 발생할 수 있다. 물론 갇히는 공기의 양에 따라 미성형이 발생할 수도 있다.

문제가 되는 에어트랩은 주로 깊은 리브와 보스 그리고 두께가 기본 두께에 비하여 크게 얇은 부분에서 정체현상에 의하여 발생한다.

(2) 에어트랩의 제거

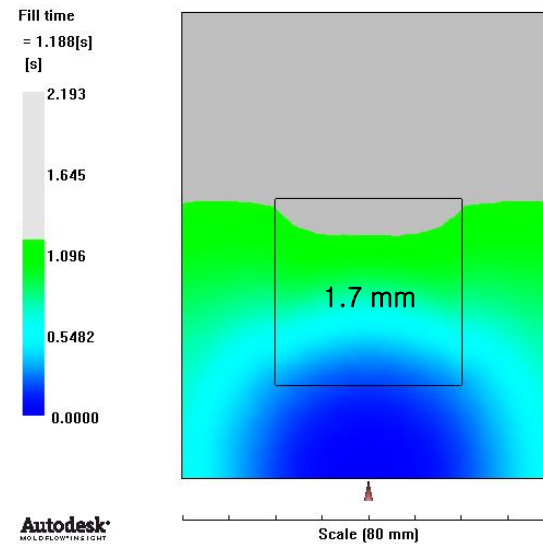
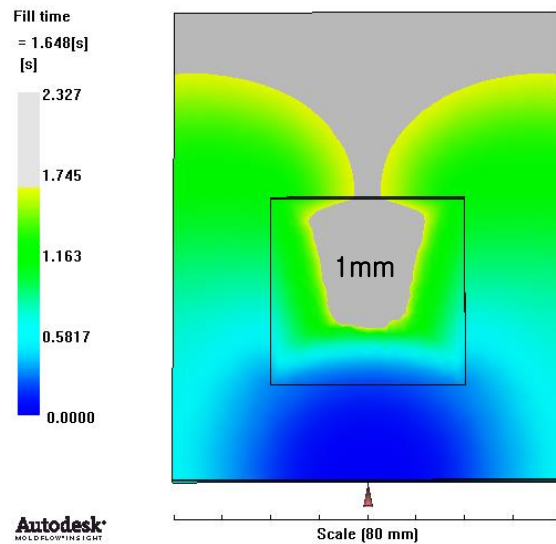
캐비티 내에 에어트랩이 발생한 경우 추가적인 에어벤트를 설치하여 에어트랩을 제거할 수 있다. 일반적인 파팅면이 아닌 경우라 하여도 금형 분할면, 이젝터 핀 그리고 슬라이드 면 등에 에어벤트를 추가 할 수 있다.



물론 에어벤트를 추가하는 것 보다는 파팅라인을 제외한 캐비티 내에 에어트랩 그 자체가 발생하지 않도록 하는 것이 더 현명할 것이다.

제품의 특정 얇은 부분에서의 정체 현상에 의한 에어트랩이 발생한 경우에는 게이트 이동으로 개선시킬 수 있는데, 게이트 위치는 정체현상이 발생하는 곳에서 보다 멀리 위치시키는 것이 더 유리하다.

또한 얇은 부분의 두께를 적정 두께로 증가시키면 에어트랩을 크게 개선할 수 있다. 이러한 에어트랩들은 항상 웰드라인을 같이 동반한다.



2-4) 플로우 마크 (flow mark)

(1) 플로우 마크란?

플로우 마크는 게이트 주변 또는 제품의 특정 위치에서 수지의 흐름 자국을 형성하는 것을 말한다. 일반적으로 수지의 유동선단 고화층이 성형품의 외관표면을 형성한다. 이러한 유동선단이 정상적으로 전진할 수 없거나 속도가 급격하게 변하게 되면 유동선단이 불안정하게 떨리게 되어 균일한 고화층이 생성되지 못하여 발생한다.

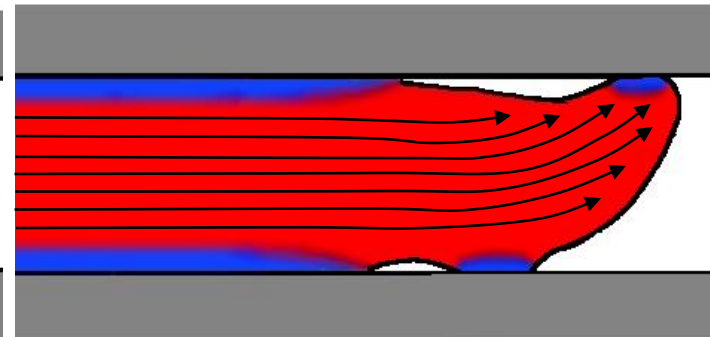
게이트 주변에서의 플로우마크는 주로 사출 성형기의 노즐 에 있는 상대적으로 저온의 수지가 캐비티 속으로 먼저 유입되고 뒤따라 오는 고온의 수지의 유동을 방해하여 발생하는 것으로 알려져 있다.

또한 제품의 특정 위치에서의 플로우 마크는 유동선단의 속도가 급격하게 증가하는 경우에 나타나는 것으로 알려져 있다.

Stable Flow front



Unstable Flow front



(2) 플로우 마크의 제거

노즐 부분의 상대적으로 저온의 수지 유입에 의한 게이트 주변에서 발생하는 플로우 마크를 제거하기 위해서는 콜드 슬러그 웰 (cold slug well)을 러너 시스템에 추가하는 것이다. 콜드 슬러그 웰의 역할은 노즐 부분의 차가운 수지가 캐비티로 바로 유입되지 않도록 걸러는 역할을 한다.

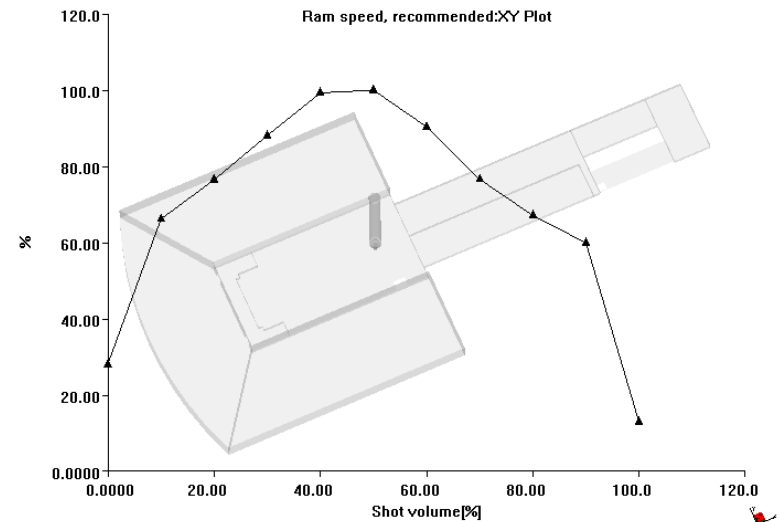
제품의 특정 부분에서 수지의 흐름속도의 급격한 변화에 의하여 발생하는 플로우 마크를 제거하기 위해서는 사출속도를 적절히 제어하여야 한다. 일반적으로 게이트 주변과 충전 마지막 부분에서 수지의 흐름 속도가 상당히 빠르게 증감하며, 캐비티의 폭 변화에 따라 수지의 유동선단 면적이 급격히 변화하는 영역에서 속도가 크게 변화한다. 따라서 다단 사출속도 제어를 통하여 수지의 유동선단이 항상 일정한 속도로 전진할 수 있도록 게이트 주변을 통과하는 시점과 충전 말단 부분에 도달하였을 때 그리고 캐비티의 폭이 좁은 영역을 통과할 때 사출속도를 적절히 낮추어야 한다.

Fill time
= 3.304[s]
[s]
3.304
2.478
1.652
0.8261
0.0000

Autodesk®
MOLD FLOW® INSIGHT

Scale (300 mm)

V X -18
7
23



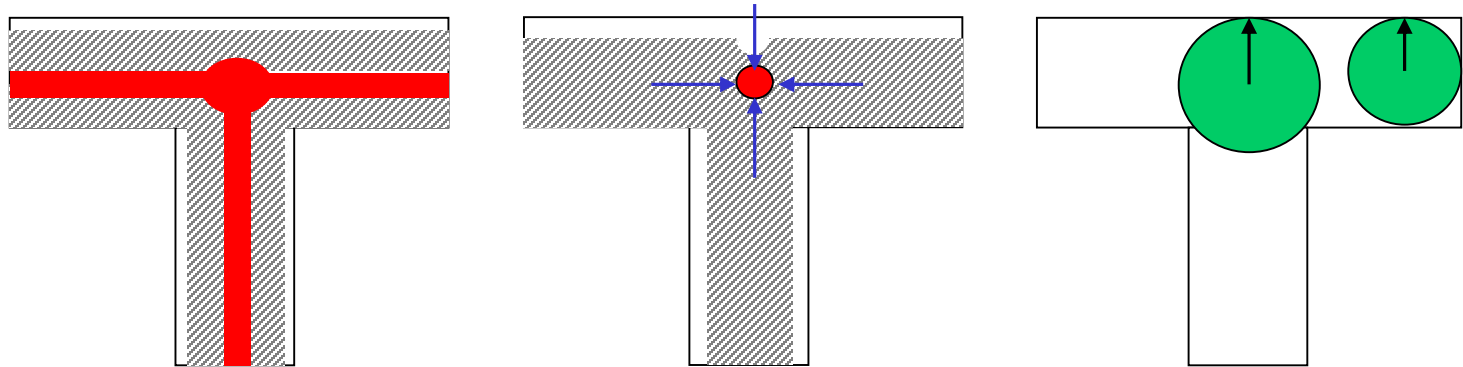
2-5) 싱크 마크 (sink mark)

(1) 싱크 마크란 ?

싱크 마크는 제품의 두꺼운 부분에 또는 리브, 보스 등의 존재하는 경우 그 맞은편 표면에 외관이 국부적인 수축을 편차에 의하여 함몰되는 현상이다. 제품 두께가 상당히 두꺼운 경우에는 넓은 영역이 함몰되는 싱크 마크가 발생하고 리브와 보스의 경우는 폭이 좁은 U자 형상의 싱크가 일반적으로 발생한다.

특히 리브와 보스의 맞은 편에 형성되는 싱크 마크의 생성 메커니즘은 아래와 같다. 충전과정에서는 고화층을 제외하고 거의 액체 상태이지만 보압 과정에서 표면부터 점차 냉각이 진행되기 시작하여 최종적으로 중앙 부분만 액체로 남는다. 또한 내압은 이들이 수축할 때쯤에는 상당히 낮아져서 체적 수축률이 클 수 밖에 없다. 이런 환경에서 중앙 부분이 수축을 하면서 외부 고화층을 안쪽으로 끌어 당기게 된다. 당연히 구조적으로 가장 약한 방향이 함몰되게 된다.

또한 싱크 마크는 게이트에서 먼 거리에 있는 리브와 보스에서 발생하는 경우가 많은데 이것은 게이트에 가까울 수록 충분한 압력을 받아서 체적 수축률이 충분히 작기 때문이다. 같은 구조의 리브라도 체적 수축률이 작을 수록 싱크 마크의 깊이는 작아지기 때문이다. 물론 유동성이 좋은 수지의 경우에는 게이트 인근 부근의 두꺼운 영역이나 리브 또는 보스 맞은편에 싱크 마크가 발생하는 경우가 많이 있는데, 이것은 게이트 부분이 냉각 속도가 느리고 보압이 끝나는 시점에 게이트가 고화되지 않으면 게이트를 통하여 수지가 역류하기 때문이다.



(2) 싱크 마크의 제거

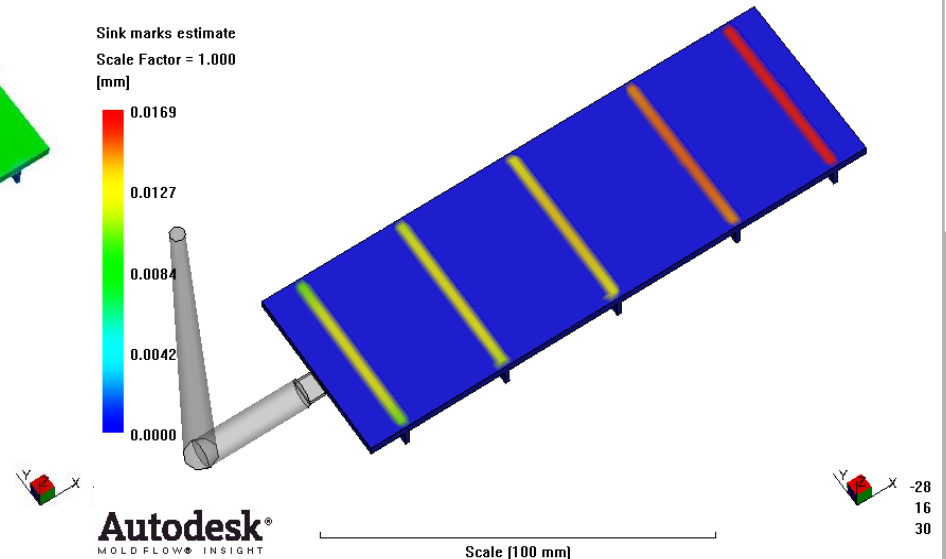
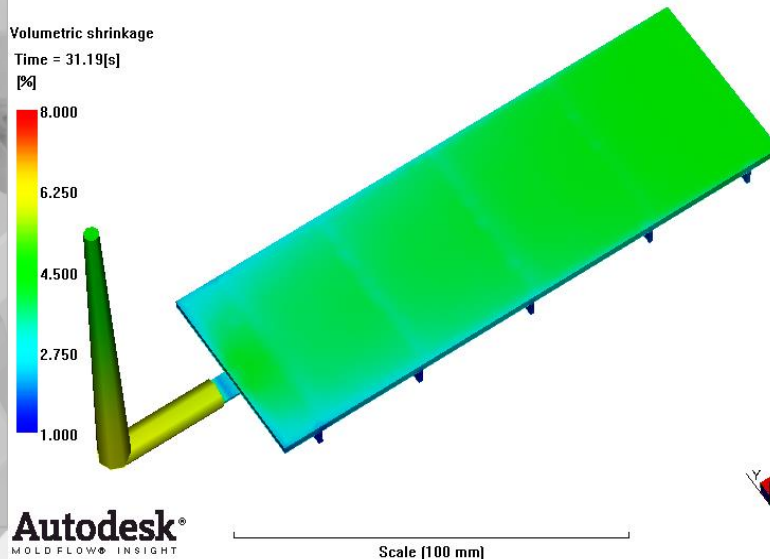
싱크 마크를 제거하기 위해서는 압력을 충분히 가하는 방법과 제품 두께 또는 리브의 두께를 변경하는 방법이 있다.

먼저 압력을 충분히 가하는 방법은 보압을 높고 길게 주는 방법이 있는데, 이것은 제품 전체의 치수와 관련되므로 지나치게 높고 긴 보압을 가할 수는 없다.

또한 충분한 보압을 가하였는데도 게이트에서 멀리 있는 리브에 싱크 마크가 발생하였다면 멀리 있는 리브에 보다 많은 압력이 전달될 수 있도록 하여야 한다. 압력이 더 잘 전달되게 하기 위해서는 새로운 게이트를 추가하여 유동거리를 짧게 하는 방법이 있고, 제품 두께를 증가시켜 보압이 더 많이 전달하게 하는 방법이 있다.

물론 가능하다면 리브나 보스의 두께를 줄이는 방법도 있다. 리브나 보스의 두께를 줄이면 그 만큼 국부적인 수축률 편차가 줄어들기 때문에 싱크 마크의 깊이는 작아질 것이다.

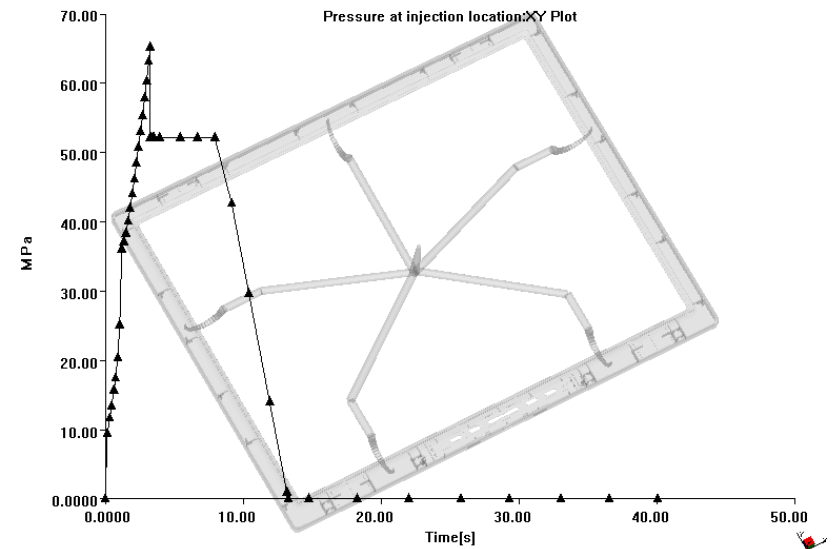
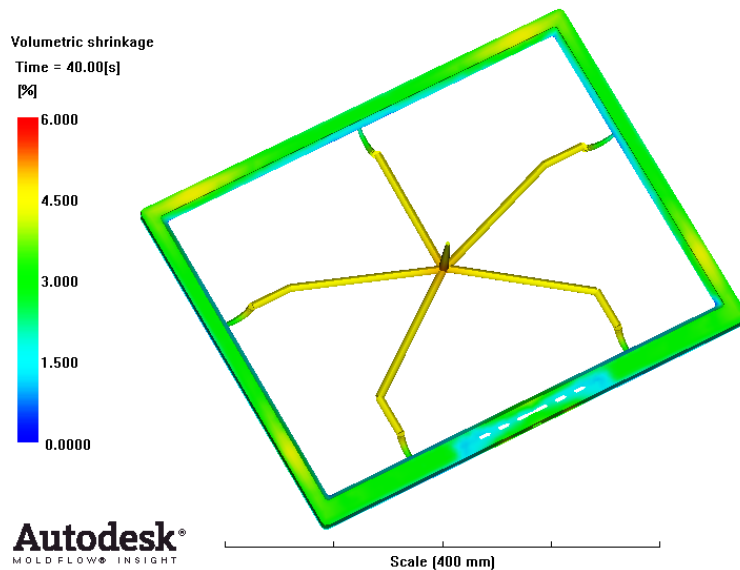
게이트에 가까운 부분에 싱크 마크가 발생하는 경우에는 냉각 설계를 보강하여 게이트 부분이 냉각이 잘 될 수 있게 하고, 보압이 끝날 때 까지 게이트가 고화 될 수 있도록 게이트의 두께와 길이를 적절히 설계하여야 한다.



해석에서 싱크 마크의 깊이를 제품 두께, 리브 두께 그리고 체적 수축률 등을 고려하여 이론적으로 계산하여 준다.

싱크 마크는 게이트 숫자를 정하는데 상당한 역할을 한다. 성형에 필요한 최소의 게이트 수는 미성형을 고려하여 판단하면 된다.

아래 그림과 같은 제품의 경우 사출압력은 상당히 낮다. 따라서 성형만을 생각한다면 게이트 수는 지금 보다 많은 수를 줄일 수 있을 것이다. 그러나 게이트 수를 줄이게 되면 유동거리가 길어져서 사출 압력이 크게 높아지게 되고, 압력이 높아지게 되면 게이트 부분은 더 높은 압력이 가해져서 체적 수축률이 더 작아질 것이고, 충전 말단 부분은 보압 전달이 더 어려워져 체적 수축률이 더 커질 것이다. 따라서 체적 수축률이 작아지는 것은 큰 문제가 되지 않을 수 있지만 충전 말단 부분에 존재하는 리브 또는 보스의 맞으면에는 싱크 마크가 발생할 가능성이 더 증가할 것이다.



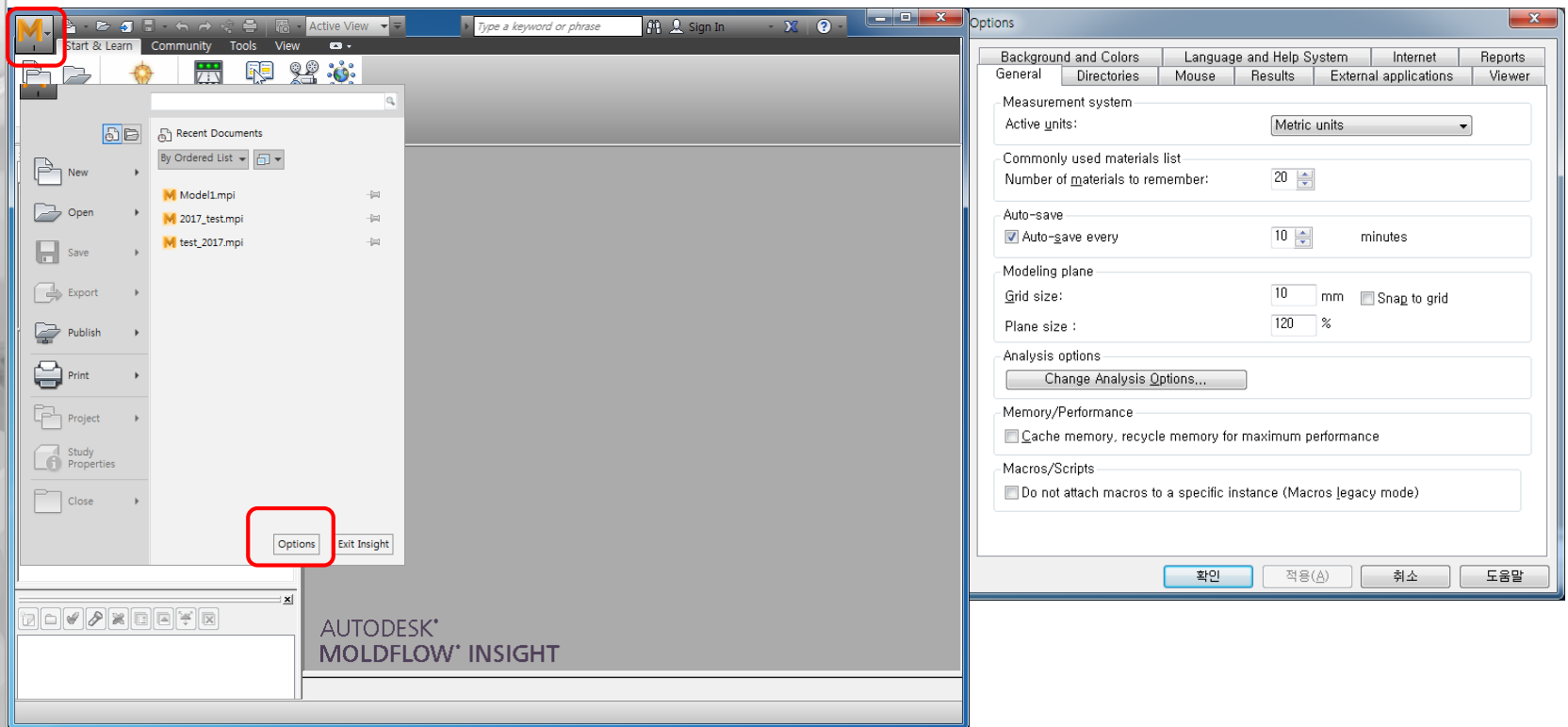
3. 유동해석 실습

3-1) Synergy 실행

바탕화면에 있는 AMI2017 아이콘을 실행한다. 아래와 같은 화면이 나타나는데 이를 “Synergy”라 부르며, 여기에서 모든 해석을 위한 Pre-process와 Post-process가 수행된다. 물론 해석 모델의 전처리 또는 변환은 AMCD 와 AMDL을 이용하여 수행한다.

AMI2013부터는 Ribbon 방식의 UI를 있다.

옵션에서는 Synergy의 기본적인 환경을 설정하는 곳이다. 단위, 자동저장 옵션, 화면 색상, 작업 폴더 지정, 마우스 옵션 그리고 외부 프로그램 경로지정 등을 변경할 수 있다.



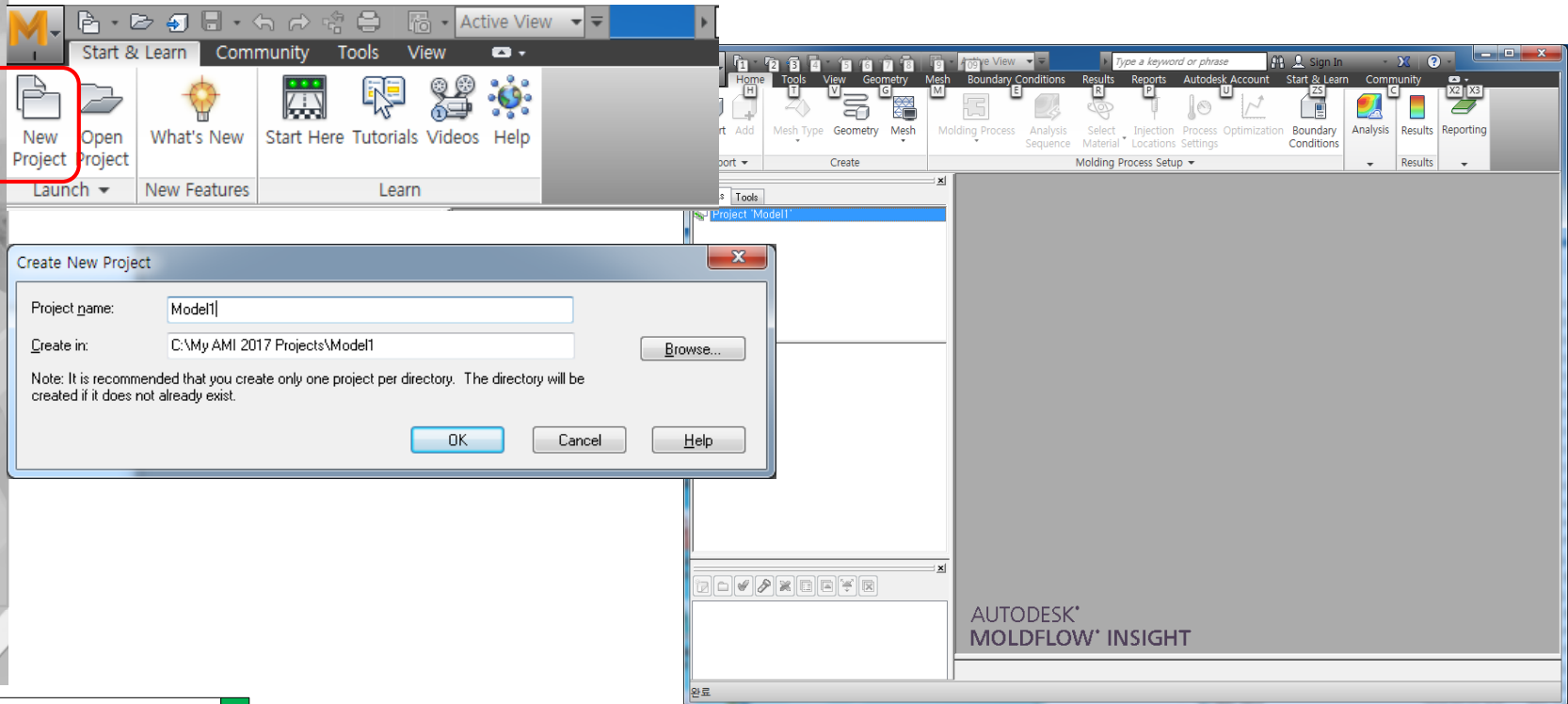
3-2) New Project 만들기

먼저 새로운 해석 프로젝트 수행을 위하여 New Project 파일을 만든다. 메뉴 아이콘에서 New Project를 클릭하면 아래와 같이 Project Name과 Create in 항목을 입력하도록 창이 나타난다.

우선 Create in의 Browse를 클릭하여 해석 프로젝트 폴더가 생성될 경로를 지정한다. 디폴트 경로는 프로그램 설치 시에 지정하게 되며 프로그램 옵션에서 변경할 수 있다.

Project name에 해석 프로젝트 명을 입력하면 프로젝트 폴더가 그 경로에 생성되고, 그 폴더 내부에 “프로젝트 명.mpi”의 프로젝트 파일이 생성된다. 또한 Synergy 창에는 아래와 같이 그림과 같이 메뉴에 Home 탭이 추가로 생성되고 Task에는 프로젝트 명이 나타난다.

프로젝트 파일은 지금부터 해석을 위해 생성되는 모든 해석 파일을 관리한다. 즉 AMI2017을 새로 실행할 경우 관련 프로젝트 파일을 열면 모든 관련된 해석 모델 또는 해석 결과들이 열리게 된다.



3-3) New Study 만들기

해석을 수행하기 위해서는 3D CAD에서 설계된 모델 파일이 필요하다. 이들 모델 파일을 Synergy에 Import를 하면 자동적으로 새로운 Study파일로 만들어진다. 이렇게 만들어지는 Study파일은 확장자가 .sdy 이며, 이 파일은 해석을 위한 모든 Pre-process 정보를 보유한다(.element, node, injection location, material, process settings 등). 또한 이 Study 파일은 앞에서 설정한 프로젝트에 귀속된다.

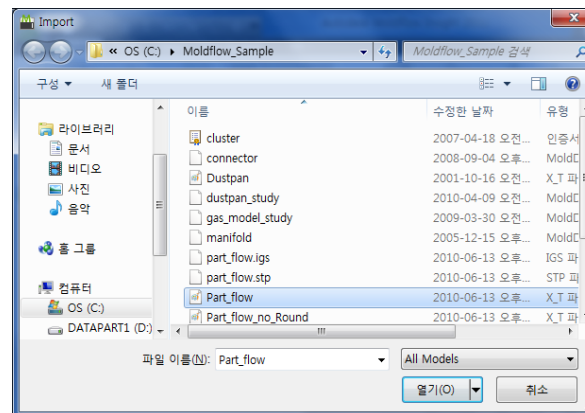
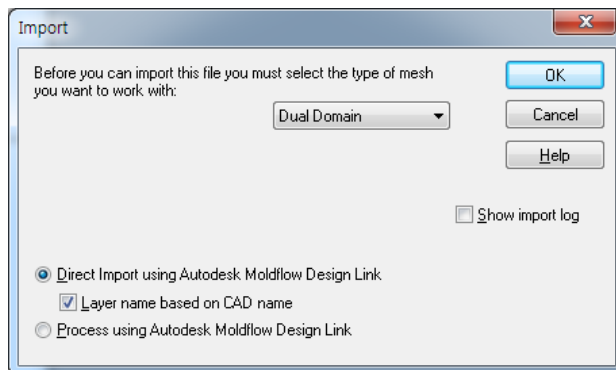
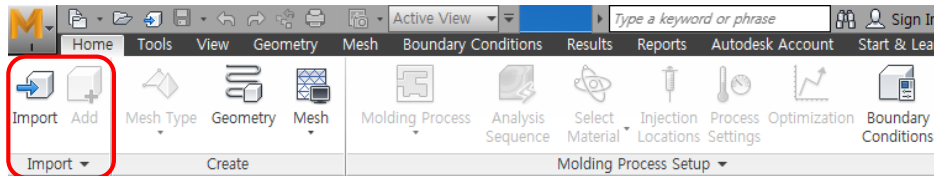
모델을 외부에서 Import 하지 않고 직접 Synergy에서 설계 하고자 한다면 New Study를 클릭하여 새롭게 생성되는 Study 파일에 Modeling 도구를 이용하여 직접 해석 모델을 설계할 수도 있다.

3-3-1) 모델 Import 방법

Import 를 클릭하여 실습 폴더에서 part_flow.x_t 파일을 선택하고 열기를 클릭하면 Import 옵션 창이 나타난다.

일단 해석에 사용할 Mesh Type 중에서 Dual-domain을 선택하고 OK를 클릭한다.

Mesh Type의 선택과 Import 가능한 CAD 파일형식 그리고 상세한 Import 옵션 등에 대해서는 나중에 설명된다.

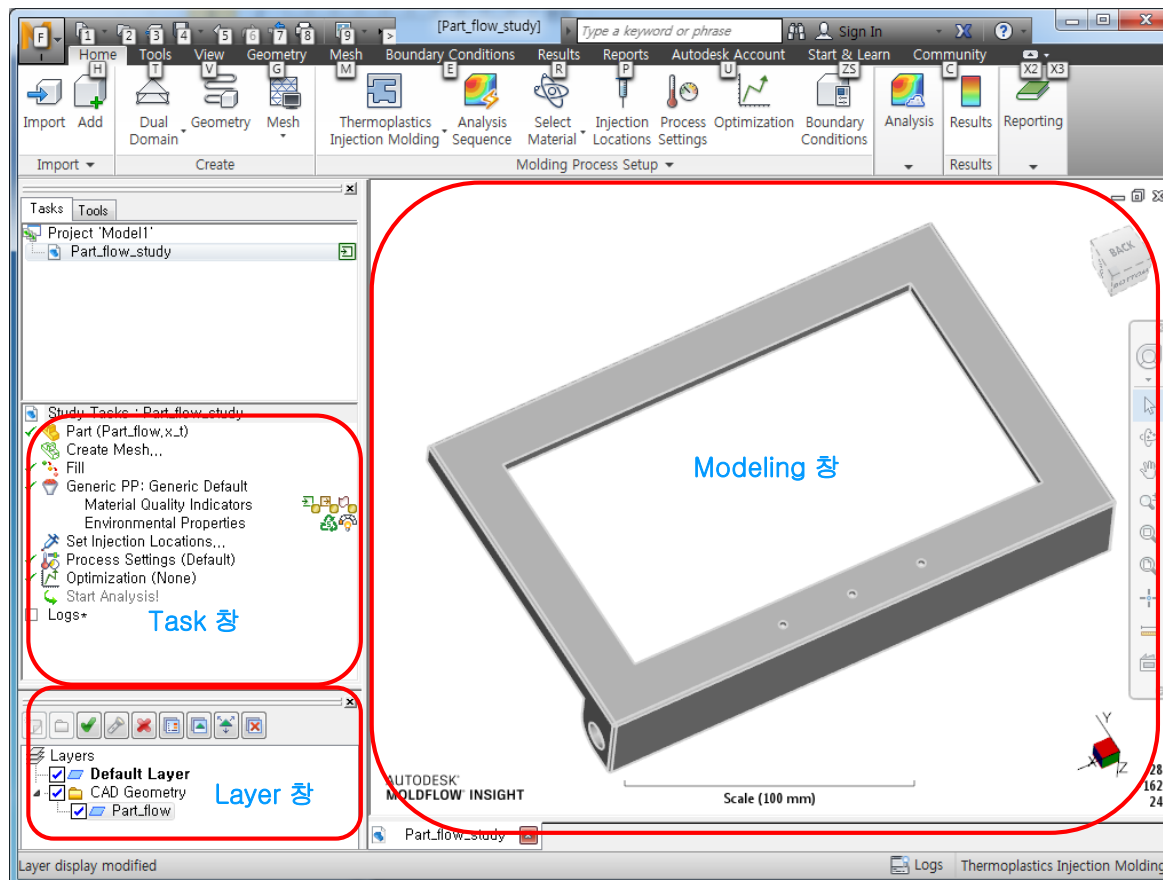


Import가 완료되면 아래 Synergy의 3개의 창에 Import 모델에 대한 정보가 각각의 창에 표시가 된다. Task 창에는 Import 된 모델명과 해석을 위해 수행해야 할 작업 목록이 나타나며, Layer 창에는 Import 된 항목들을 구분 보관하기 위한 여러 개의 Layer 이름이 나타나고, 마지막으로 Modeling 창에는 Import 된 모델이 나타난다.

특히 이렇게 Import된 모델은 Filename_Study.sdy 파일 형태로 Project 폴더에 저장된다.

Task 창의 작업리스트에 모드 체크 마크가 나타나면 해석 수행을 위한 준비가 완료된 상태라 할 수 있다. 현재 모델 Import만 수행하였지만 일부 항목에는 디폴트 값들이 이미 지정되어 있어서 체크 마크가 표시되어 있다.

또한 모델의 뷰 상태를 제어하기 위해서는 Modeling 우측에 있는 View Cube와 기타 일반적인 뷰 제어 도구를 이용할 수 있다.



3-3-2) Mesh Type

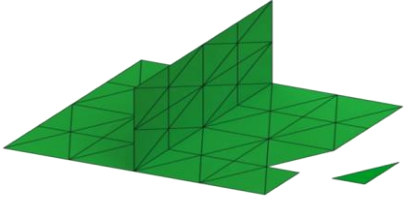
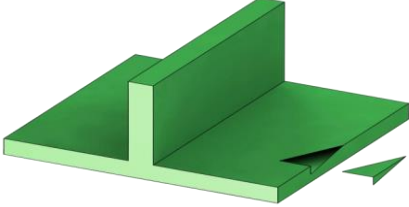
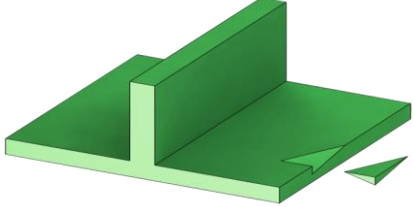
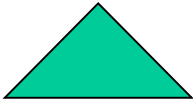
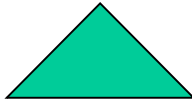
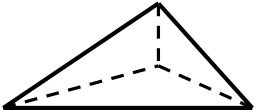
3D CAD에서 설계된 모델을 AMI를 통해 해석할 때 아래 3가지 방법(Midplane, Dual-domain, 3D)의 Mesh Type을 사용할 수 있다. Mesh Type에 따라서 서로 다른 해석 Solver들이 사용되므로 해석 수행 전에 해석 모델의 형상과 해석의 범위를 고려하여 적합한 Mesh Type을 선택하여야 한다. 잘못된 Mesh Type을 선택하면 해석의 결과 신뢰성이 크게 훼손된다.

여기서 Midplane과 Dual-domain은 같은 평판 유동해석 Solver를 사용하고, 3D는 3차원 유동 Solver를 사용한다.

현재 Moldflow 사용자의 70%가 Dual-domain을 그리고 25%가 3D를 사용하고 있다.

따라서 기본 교육과정에서는 먼저 Dual-domain을 이용한 해석 절차를 학습하고 나중에 3D는 별도로 교육한다.

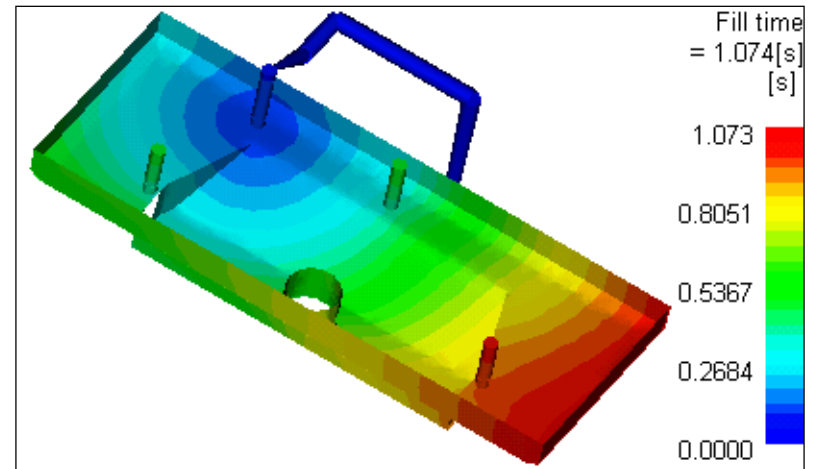
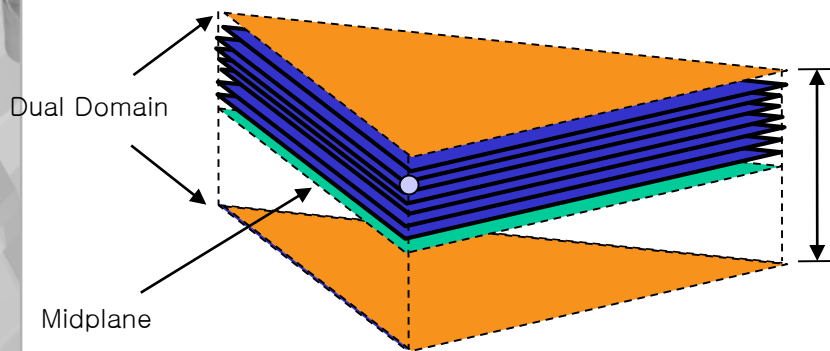
Mesh Type의 장단점을 간단히 정리하면 아래와 같다. Mesh Type에 대한 상세 정보는 3D 교육과정을 참조하기 바란다.

Midplane	Fusion Dual Domain™	Tetrahedral 3D Volume
		
		
Triangle 	Triangle 	Tetrahedral 

▶ **Midplane, Dual-domain** : 평판 모델의 유동해석을 위한 형식이다. Triangle 요소를 사용하며, 두께 방향으로서는 가상의 layer를 8~20개 생성하여 해석한다. 평판모델이란 두께가 3~4mm이하이고 두께에 비하여 폭이 5배 이상인 모델을 말한다. 또한 수지의 유동은 두께 방향으로 계산하지 않고 평판 방향으로만 계산하며, 수지의 열 손실도 제품의 벽면으로는 계산되지 않고 평판 방향으로만 계산된다. 그러나 3D에 비하여 두께 방향의 속도, 온도, 전단률, 수축률 계산이 정확하고, 변형해석에서 CRIMS 모델을 사용할 수 있다는 장점이 있다.

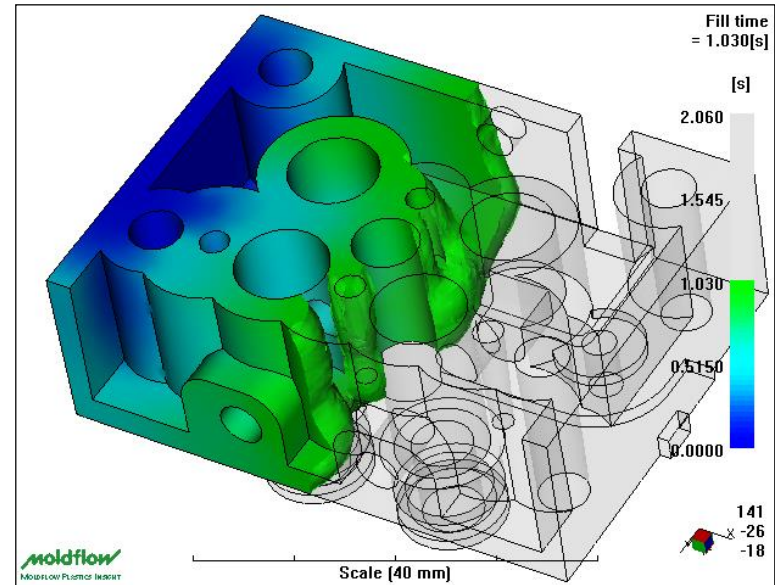
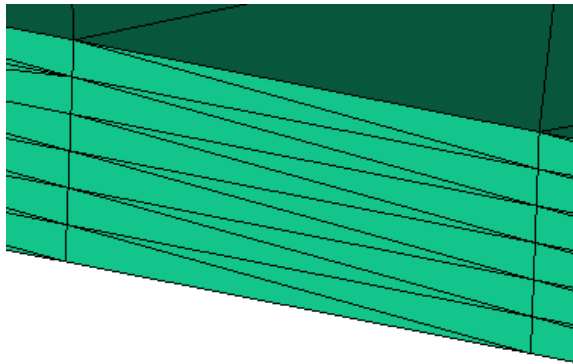
Midplane : 3D CAD모델을 Midplane 형태로 바꾸는데 상당한 노력과 시간을 필요로 하며 정확한 형상을 표현하기 힘들다. 또한 모든 요소들의 두께를 각각 입력하여야 한다. 그러나 일단 Midplane mesh가 완성된 후에는 두께 변경과 형상변경이 용이하다는 장점이 있다.

Dual-domain : 3D CAD모델을 그대로 사용하므로 해석을 위한 형상 변경이 전혀 필요 없고, Mesh를 생성하면 자동으로 모든 요소의 두께가 자동으로 계산되어 설정된다는 장점이 있다. 또한 필요한 경우에는 Midplane과 같이 일부 요소들에 대해서만 인위적으로 두께를 변경할 수 있다는 장점이 있다. Dual-domain을 이용할 경우 해석 준비 과정에 필요한 시간은 Midplane에 비하여 1/5~1/10정도이다.



▶ **3D** : 평판 모델의 범주를 벗어난 두터운 제품에 대한 3차원 유동해석을 위한 형식이다. Tetrahedral 요소를 사용하며, 두께 방향으로 실제 3D mesh를 최소 6layer 이상 생성하여 해석한다. 평판모델이 아닌 범주란 두께가 상당히 두꺼운 모델의 경우, 두께편차가 상당한 모델의 경우, 두께와 폭의 구분이 힘든 모델 등이다. 두께방향을 포함한 3차원 유동해석을 수행하며, 수지의 열 손실도 평판 방향 뿐만 아니라 벽면 방향도 함께 계산한다. 또한 관성과 중력을 고려한 해석이 가능하다.

Insert Molding 해석, Two-shot sequential overmolding 해석과 같은 특수 성형해석은 3D로만 수행 가능하다. 그러나 3D의 경우 Mesh 수의 증가로 대형 모델의 해석에는 적용하기 어렵고, 해석 수행 시간도 증가하며, 해석 결과의 분석이 유리하지 않다. 특히 변형해석에서 CRIMS 모델을 사용할 수 없다는 단점이 있다.



3-3-3) Import 가능한 CAD 모델

AMI에서는 다양한 형태의 3D CAD 모델을 사용할 수 있다. AMI Synergy를 이용하여 stl 또는 igs 파일의 변환이 가능하고, AMDL (Autodesk Moldflow Design Link)을 사용하는 경우는 다양한 형태의 모델을 추가적으로 변환할 수 있다.

일반적으로 해석을 위하여 사용하는 CAD 모델의 형태를 크게 세 가지로 나눌 수 있는데 mesh로 구성된 .stl 과 surface로 구성된 igs, solid로 구성된 .ipt(Inventor) .prt(Pro-E, UG), .x_t, .catpart(CATIA)로 구분된다. 이들 세 가지 모델 형태에는 장단점이 서로 있지만 일반적으로 stl 보다는 surface 모델, surface 모델 보다는 solid 모델을 이용하여 mesh를 생성하였을 때 mesh의 품질이 우수하다. 또한 CAD 또는 mesh 전문 소프트웨어에서 mesh를 생성시킨 후 AMI로 import하는 경우에는 일반적으로 .pat 또는 .unv 파일 형식들을 사용하는 경우가 많다.

❖ In Synergy

- Stereo-lithography (.stl)
- IGES (.igs, .iges)

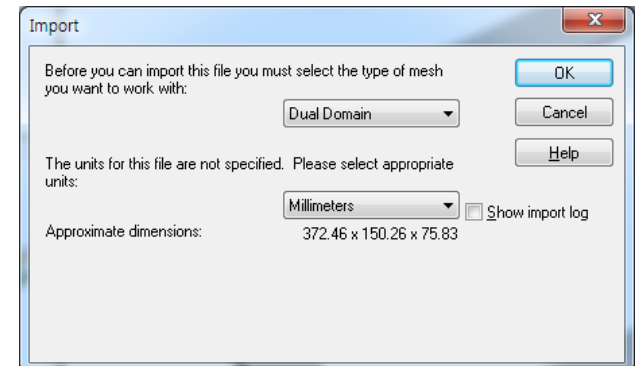
❖ In AMDL

- STEP (.stp, .step)
- Parasolid (.x_t, .x_b, .xmt_xmb, .xmb, .xmt)
- IGES (.igs, .iges)
- Pro-E (.prt, .asm)
- CATIA (.catpart, .catproduct)
- Solidworks (.sldprt, .sldasm)
- Inventor(.ipt, .iam)
- NX(.prt)
- Rhino(.3dm)
- Moldflow (.mfl)
- IDEAS Universal (.unv)
- Ansys Prep 7 (.ans)
- Nastran (.nas)
- Nastran Bulk Data (.bdf)
- Patran (.pat)
- Fem (.fem)

▶ .stl

.stl 파일은 3D CAD에서 mesh 구조로 생성된 면 모델로써 RP(rapid prototyping)과 CAM 용도로 널리 사용되는 파일 형식이다. .stl 의 장점은 import 시 형상 손실이 거의 없는 장점이 있지만, mesh 품질이 좋지 못한 단점이 있다. 특히 round 부분의 mesh 수를 줄이기 위해서는 CAD에서 .stl 변환 시 적절한 chord height를 사용하여야 한다.

- Synergy Translator 사용
- Synergy Mesher 사용



▶ .igs

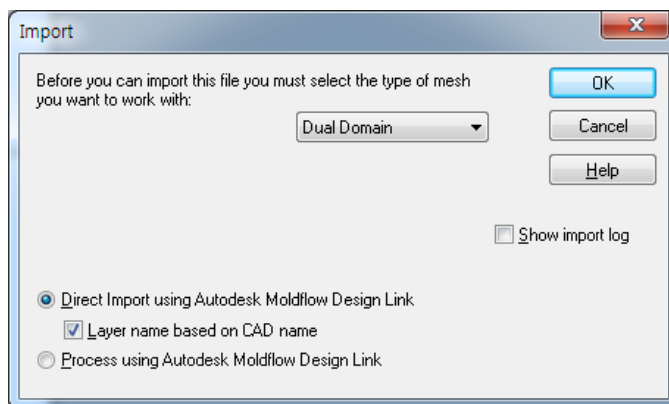
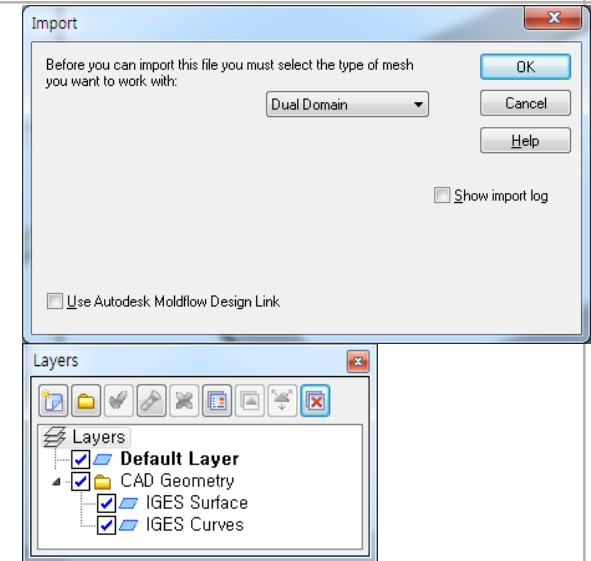
.igs 파일은 대부분의 2D, 3D CAD에서 선과 면을 주고 받기 위한 국제적으로 통용되는 파일 형식이다. 러너와 냉각채널을 CAD에서 선으로 설계하고 이를 Moldflow로 import 하려고 한다면 반드시 .igs 포맷을 사용하여야 한다. .igs 파일의 변환은 Synergy Translator와 AMDL Translator 모두 사용 가능하다. 또한 .igs 파일의 경우 면과 면 사이가 일정 공차 범위에서 분리되어 있어서 import 시에 적절한 공차를 설정하여 면들을 stitch 하여야 한다.

- Synergy Translator 또는 AMDL Translator 사용 - NURBS Surface
- Synergy Mesher 사용 또는 AMDL Mesher 사용

▶ .ipt(Inventor) .prt(Pro-E, UG), .x_t(Parasolid), .catpart(CATIA)

다양한 3D CAD의 파일을 AMDL을 이용하여 NURBS로 변환하여 “Surface”을 import 하거나 native CAD로 “Body”를 direct import 할 수 있다. 특히 각각의 CAD 어셈블리 파일 형식을 “Direct import”를 사용하여 import하는 경우 각 부품의 mesh를 동시에 생성을 할 수 있으며, 각 부품의 접촉면의 mesh가 완벽하게 일치하여 보다 신뢰성 높은 mesh를 만들 수 있다.

- Synergy Translator 또는 AMDL Translator 사용 - NURBS Surface 또는 native CAD Body
- Synergy Mesher 사용 또는 AMDL Mesher 사용



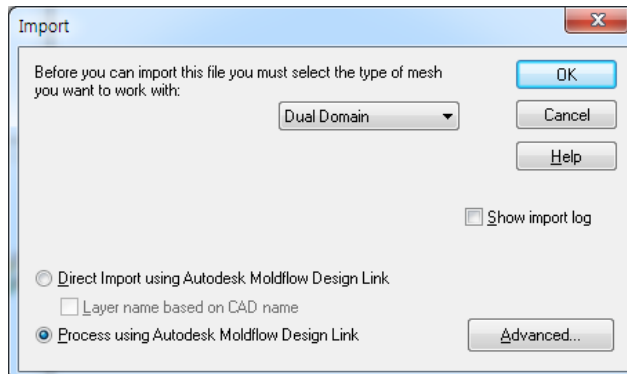
3-3-4) Autodesk Moldflow Design Link (AMD)

AMD는 다양한 CAD에서 설계된 모델을 Moldflow 소프트웨어로 Import 할 때 사용하는 모델 변환 소프트웨어이다. 기본적으로 CAD 모델을 NURBS Surface(Process)로 변환하지만, 모델이 .stp .ipt .prt(Pro-E, NX), .x_t, .catpart 와 같은 파일 형식인 경우에는 Direct 옵션을 이용하여 native-CAD Body(Direct Import)를 그대로 받아들일 수 있다.

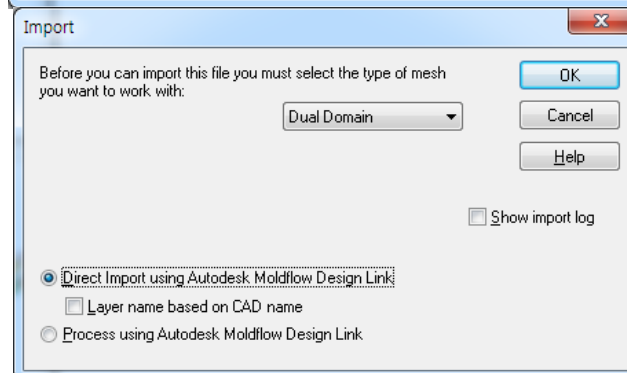
두 가지 방법을 사용하여 변환 후 Mesh를 생성하면 서로 장단점이 있다. NURBS surface의 경우는 변환과정에서 Surface가 소실되는 경우가 발생하며, “Direct import”의 경우는 변환과정에서 Surface가 소실되지도 않지만 Round 형상 부분의 Mesh가 너무 조밀해져 전체 Mesh수가 크게 증가한다는 단점이 있다. 이것은 서로 다른 Mesher를 사용하기 때문이다.

또한 NURBS Surface로 변환하는 경우에는 반드시 Advance옵션에서 “Translate surface” 선택하고 “Generate mesh” 옵션을 취소하여야 한다. 이것인 기본 옵션이 변환과 동시에 AMDL Mesher를 이용하여 Mesh를 생성하게 되어 있기 때문이다. 일반적으로는 AMDL은 모델 변환 용으로만 사용하고 Synergy Mesher를 이용하여 Mesh를 생성한다.

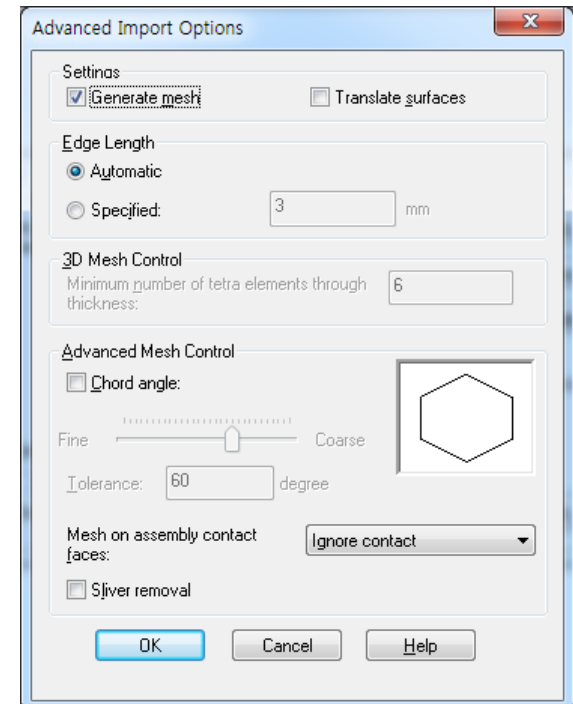
NURBS



Direct



NURBS Options



3-3-5) 해석 모델의 단순화

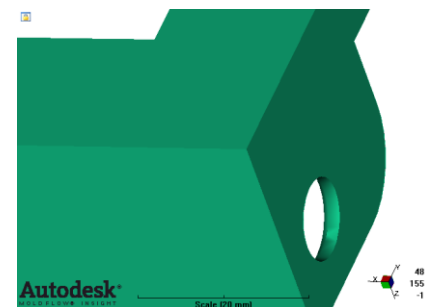
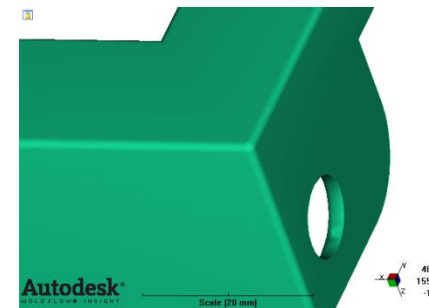
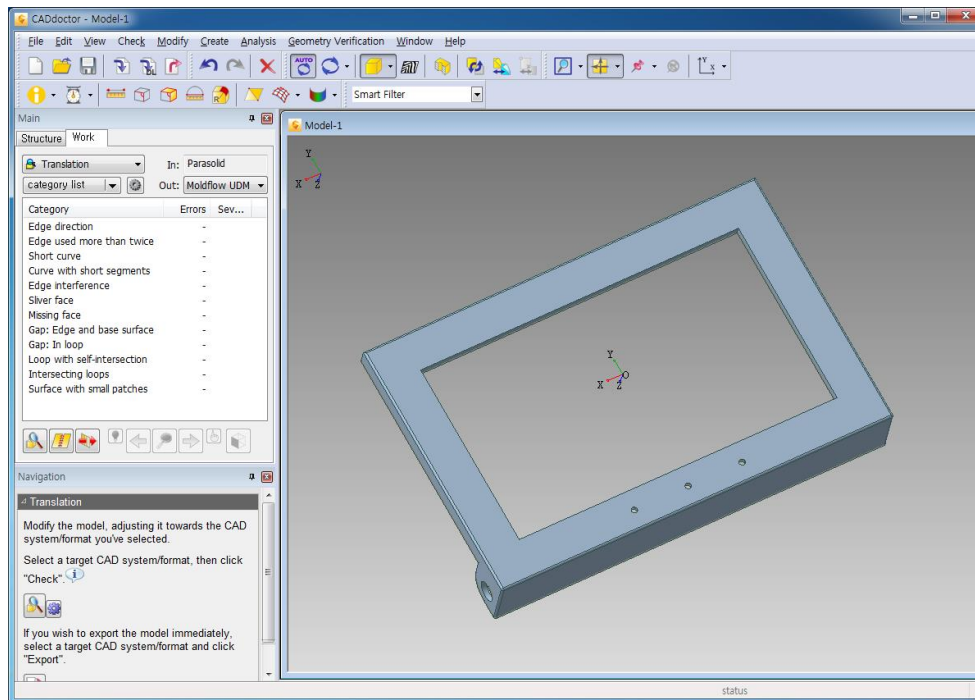
AMI 해석을 위하여 3D CAD 모델을 Import하기 전에 모델 전처리를 통하여 모델에 존재하는 작은 fillet 또는 chamfer들은 제거하는 것이 권장된다 . 또한 해석 결과에 영향을 미치지 않을 것으로 판단되는 작은 hole, boss 등도 제거하는 것이 권장된다. 이러한 전처리는 궁극적으로 생성되는 mesh의 숫자는 줄이고 품질을 높여서, 해석 속도를 빠르게 하고, 해석 결과의 신뢰성을 높이게 된다.

▶ Autodesk Moldflow CAD Doctor (AMCD)

AMCD는 해석 모델을 Moldflow 소프트웨어로 Import 전에 변환 모델의 품질 향상 및 모델의 단순화를 위한 소프트웨어 이다.

.igs 또는 기타 surface 모델(.stp, .prt, x_t, .catpart)을 AMDL을 통하여 불러들여 자동으로 수정하고, 단순화 도구를 이용하여 fillet, chamfer, hole, boss 등 불필요 부분을 제거하는 작업을 간단하게 수행 할 수 있다. 또한 Assembly 또는 Multi 모델을 불러들여 단품만 남기고 삭제할 수 있는 기능을 제공한다.

AMI Synergy로 import 하기 위해서는 CAD Doctor에서 .udm 또는 .sdy 파일로 export 한다.



3-3-6) Synergy 사용 환경 최적화

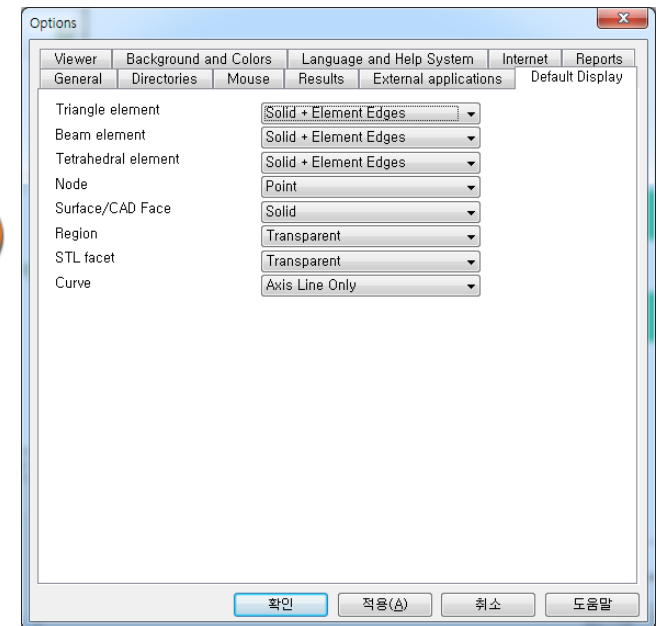
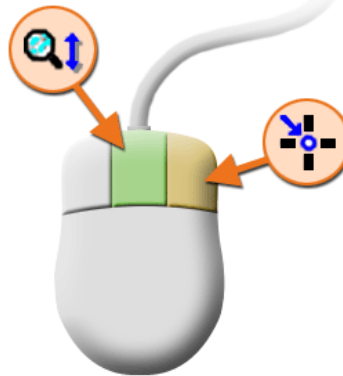
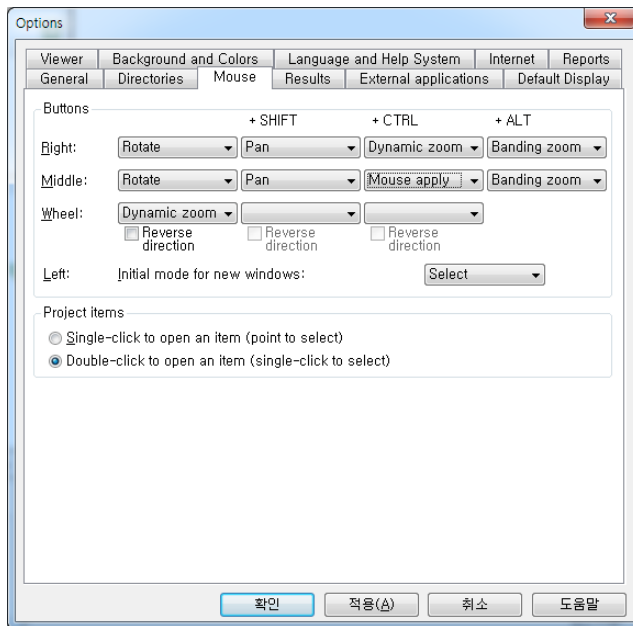
Synergy 좌측 상단 아이콘 클릭한 후 옵션을 선택하면 하단의 그림과 같이 다양한 설정들을 본인의 의사에 따라 변경할 수 있다.

특히 모델 동작 제어를 위한 Mouse 옵션과 모델링요소들의 디스플레이 방법 선택을 위한 Default Display를 확인한다.

▶ Mouse: 마우스의 각 버튼의 역할을 지정한다. 필요한 경우 SHIFT, CTRL, ALT 등과 함께 동작할 경우에도 별도의 역할을 지정할 수 있다. 특히 “Mouse Apply” 기능을 특정 버튼에 부여하면 모델링 작업에서 상당히 편리하다.

▶ Default Display: 모델링 요소들이 modeling 창에 디스플레이 될 때 디스플레이 속성을 “Transparent”, “Solid” 등 기타 여러 가지로 옵션으로 모델의 디스플레이 상태를 바꿀 수 있다. 특히 Beam element의 경우 curve처럼 line으로만 표시되게 하는 “Axis line only”이 상당히 유용하다.

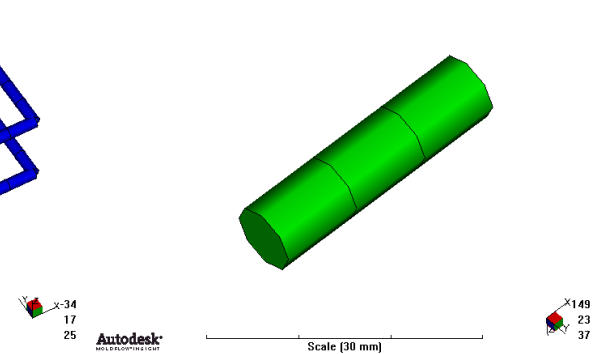
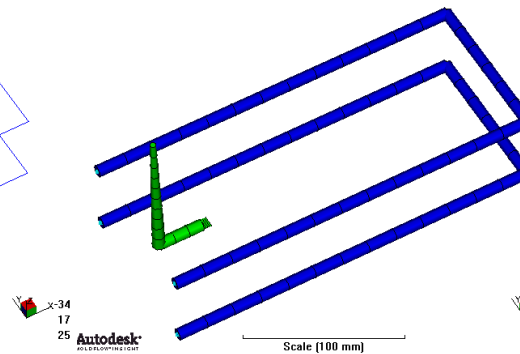
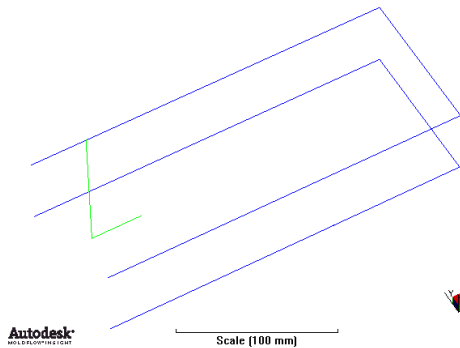
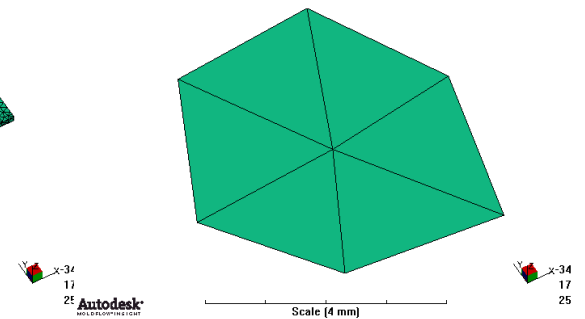
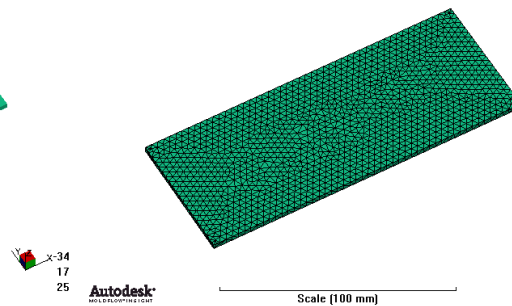
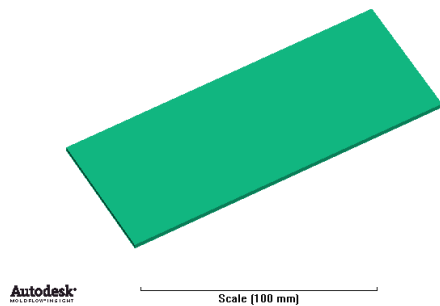
▶ External applications: AMDL이 정상적으로 설치가 완료되었는지 또는 사용하고 있는 AMDL의 version을 확인할 수 있다.



3-4) Mesh 만들기

해석에 필요한 계산 포인트를 생성하기 위하여 요소를 생성하는 과정을 meshing이라 한다. AMI에서 사용되는 요소의 형상은 아래와 같다. Triangle과 Tetrahedral 요소는 CAD Face 또는 surface를 이용하여 생성하고, Beam 요소는 Curve를 이용하여 생성한다.

- ▶ Triangles Element : Midplane, Dual-domain 해석 Model
- ▶ Tetrahedral Element : 3D 해석 Model
- ▶ Beam Element : Runner System, Cooling System



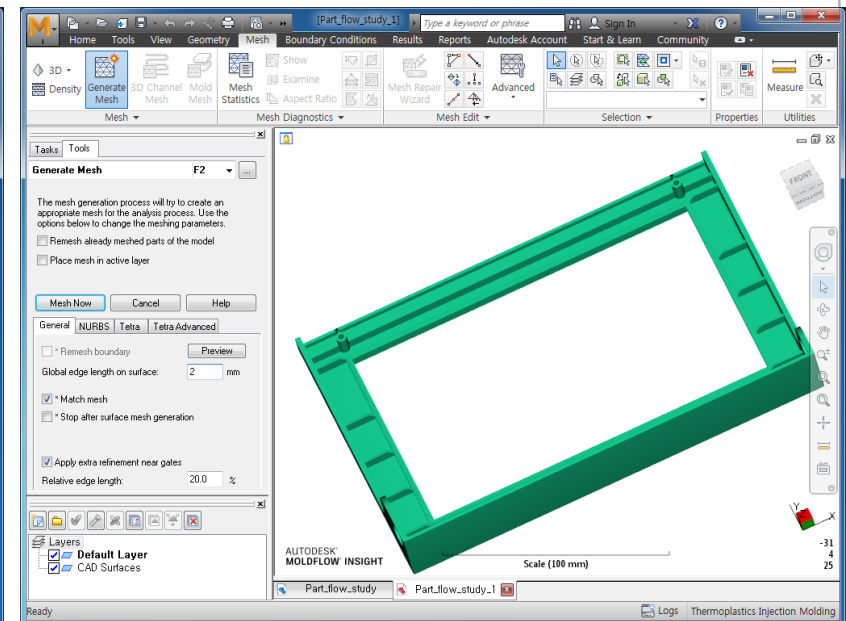
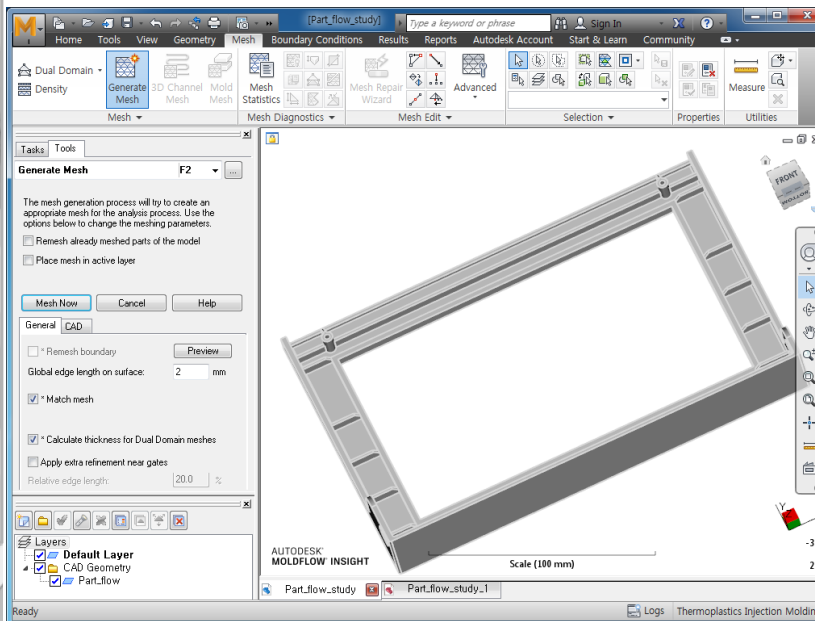
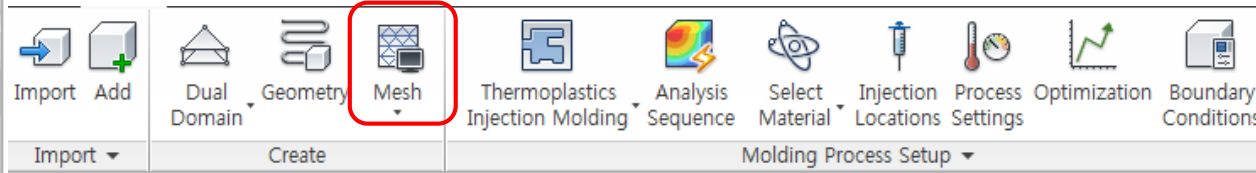
3-4-1) Dual-domain Mesh 만들기

Mesh를 생성하기 위해서는 모델이 .stl 또는 NURBS surface인 경우는 Synergy Mesher 사용한다. 그리고 native CAD인 경우와 NURBS Surface 옵션이라도 “Advanced” 옵션에서 “Generate Mesh” 옵션이 사용되었다면 AMDL Mesher를 사용한다. Mesher에 따라서 Mesh생성 옵션이 조금 다르다.

▶ Synergy Mesher

▶ AMDL Mesher

일단 실습 예제 폴더에서 part_flow.x_t 모델을 각각 Direct와 NURBS 옵션으로 Import 한 다음, 각각의 파일에 대하여 Mesh 생성 옵션을 확인한다. 홈 메뉴에서 Mesh를 클릭하고 Mesh메뉴에서 다시 Generate Mesh 메뉴를 클릭하면 Mesh 생성 옵션이 나타난다.

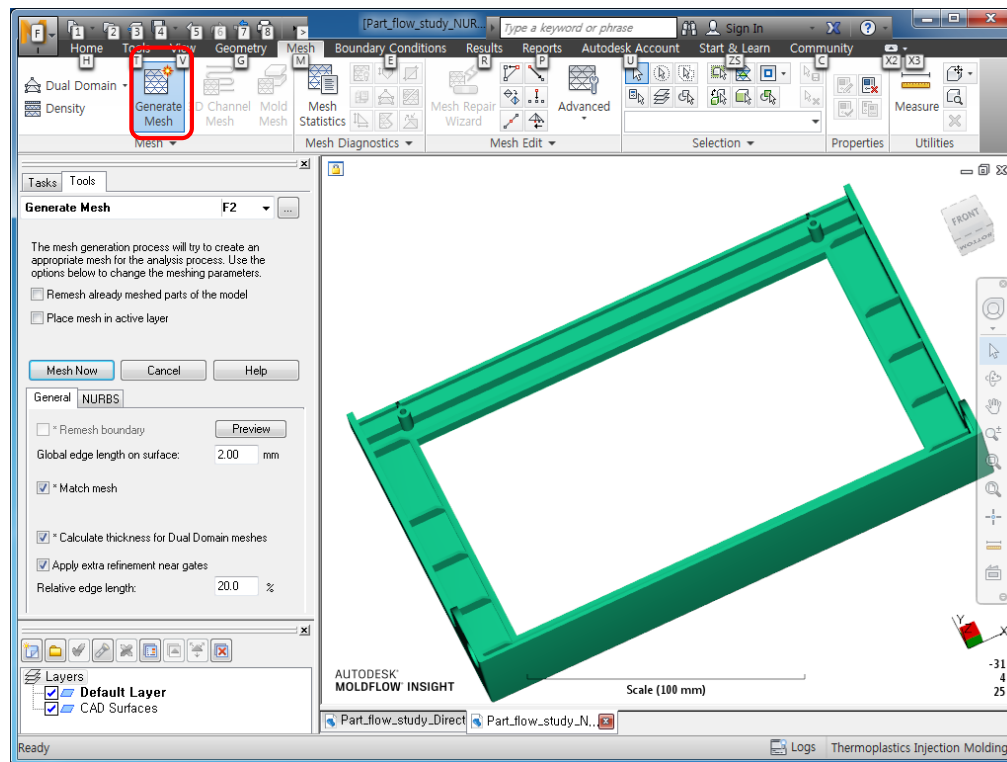


3-4-2) Mesh Control 옵션

(1) General 옵션

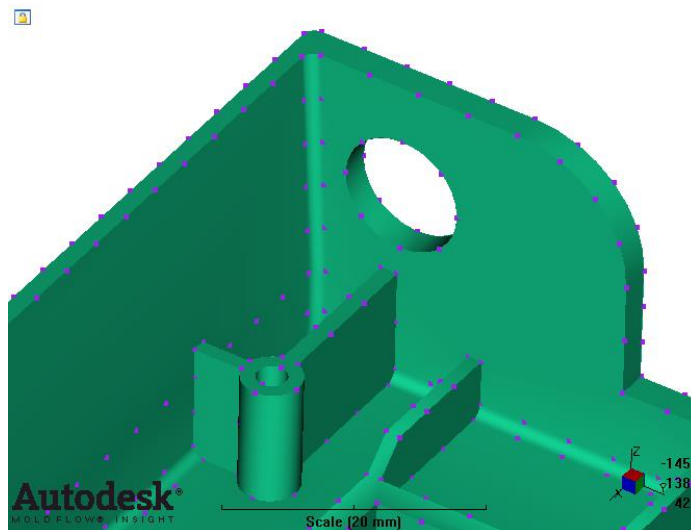
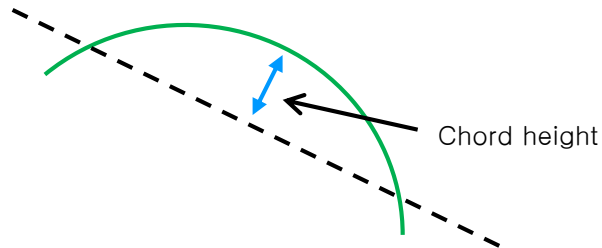
General 옵션은 두 Mesher 에 공통으로 사용되는 옵션이다.

- ▶ Remesh already meshed parts of the model : Mesh가 이미 생성된 모델에 대해서 새로운 mesh 를 생성할 때 사용한다.
- ▶ Place mesh in active layer : “Mesh Now”에 의하여 생성된 mesh를 active layer로 할당한다.
- ▶ Preview: Mesh 생성 이전에 미리 설정된 값에 의한 생성될 mesh 간격을 보여준다.
- ▶ Global edge length: 목표 mesh의 길이를 설정한다.
- ▶ Match mesh: Dual-domain mesh 형식을 생성할 때 사용하며, 상하 면에 일치하는 mesh를 생성한다.

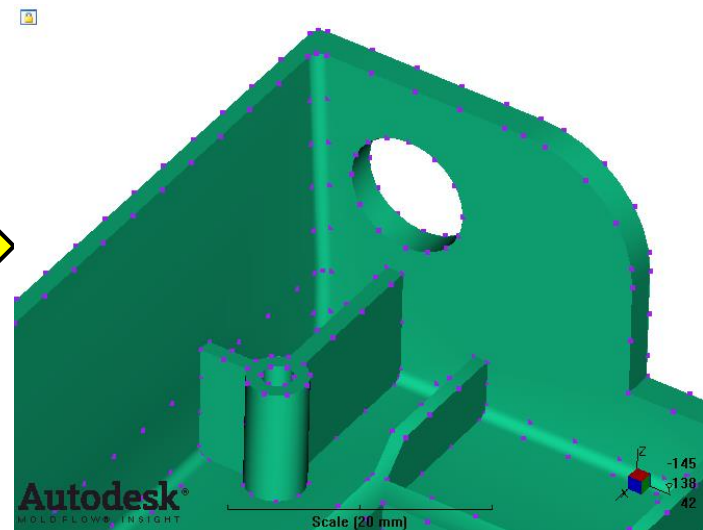


(2) NURBS 옵션

- NURBS surface로 import된 모델의 meshing을 위한 옵션이다.
- ▶ NURBS Surface Mesher : NURBS 면에 생성할 meshing 기술을 선택한다.
- ▶ Merge tolerance: 생성되는 node들 사이의 최소거리를 지정한다.
- ▶ Enable chord height : 곡면 부분의 mesh를 조밀하게 생성하기 위한 옵션이다. Chord height가 작을 수록 곡면부분의 mesh는 조밀해진다.

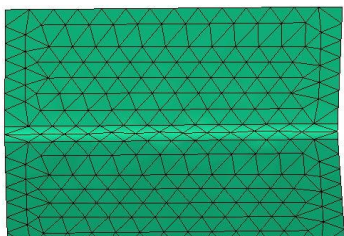


a) Chord height 적용 전

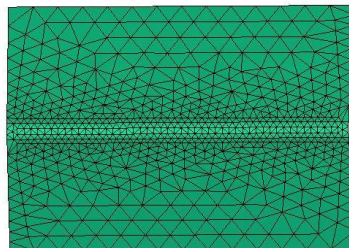


b) Chord height 적용 후(0.2mm)

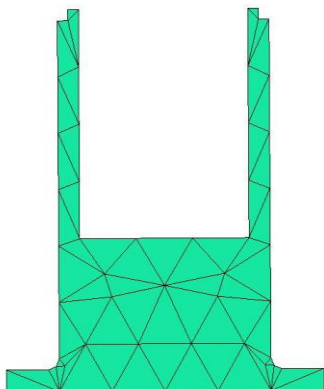
- ▶ Optimize aspect ratio by Curvature Control : 곡면 부분의 mesh를 자동적으로 조밀하게 되도록 mesh 사이즈를 조절한다.
- ▶ Optimize aspect ratio by Proximity Control : 경계선들을 에 가까운 부분을 자동적으로 찾아내어 mesh를 조밀하게 생성한다.



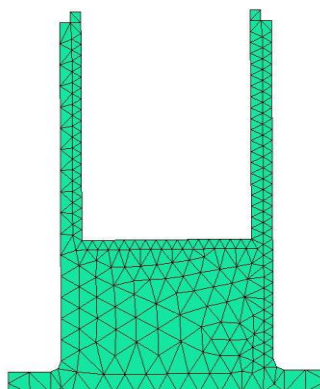
(a) Mesh without curvature size function



(b) Mesh with curvature size function



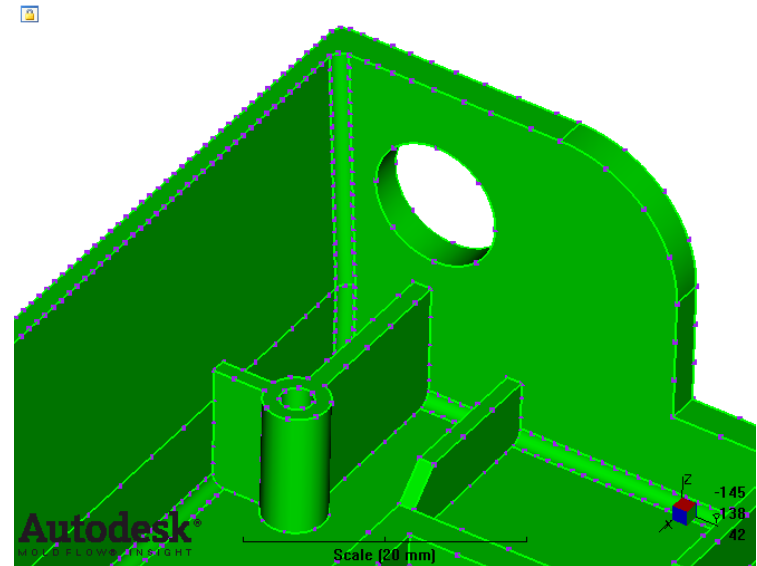
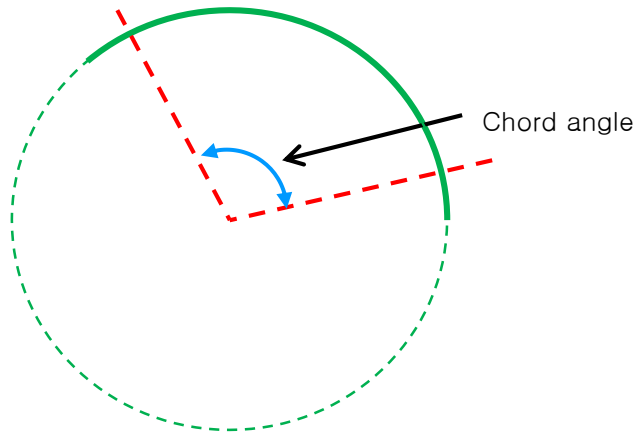
(c) Mesh without proximity size function



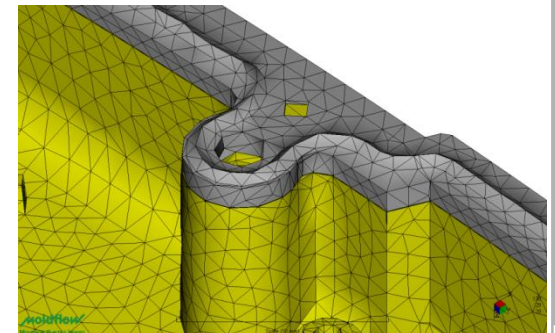
(d) Mesh with proximity size function

(3) CAD 옵션

- Native CAD body로 import된 모델의 meshing을 위한 옵션이다.
 - 어셈블리 모델의 meshing을 지원한다.
- ▶ Chord angle : 곡면 부분의 mesh를 조밀하게 생성하기 위한 옵션이다. Chord angle이 작을수록 곡면부분의 mesh는 조밀해진다.



- ▶ Mesh on assembly contact faces: 어셈블리 모델을 meshing하는 경우에 두 모델의 접하는 면의 mesh를 일치시킬 것인가를 선택하는 옵션이다.
- ▶ Silver removal: 생성되는 mesh로부터 높은 aspect ration을 가지는 작은 element들을 제거한다.

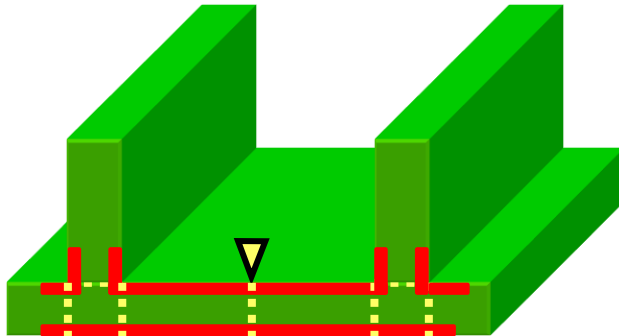


3-4-3) Dual-domain (Dual Domain™ Mesh)이란 ?

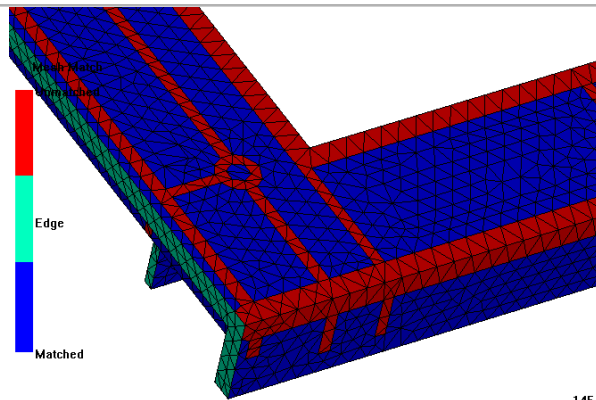
Dual-domain 이란 3D CAD 모델의 표면 Surface에 Triangle element를 생성하여 해석하는 Moldflow 고유의 해석 방식이다. 즉 3D CAD 모델을 변경하지 않고 그대로 사용하여, 모델의 표면에만 mesh matching 기법으로 Mesh를 생성하여 그 두께를 자동적으로 인식하게 하는 것이다. 따라서 해석을 위한 모델링 과정이 아주 단순하고 쉽다.

▶ 두께 인식 메커니즘

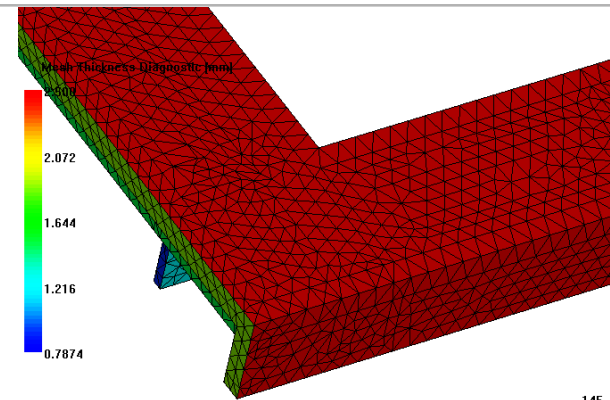
먼저 생성된 Mesh를 3개의 영역으로 구분하여 서로 다른 방법으로 두께를 인식한다. 3개의 영역은 Matched, Unmatched 그리고 Edge이다.



Matched (Blue)	모델의 평면 영역 Element 의 중심에서 두께 방향에 있는 Element 까지의 수직 방향 거리를 두께로 인식
Edge(Green)	모델의 테두리 또는 리브와 보스의 상단과 같이 Matched 방법으로 두께를 인식하면 문제가 되는 영역 인접한 Matched 영역의 Element 두께의 75% 값을 두께로 인식
Unmatched (Red)	실제로 Edge와 Match되는 영역 이웃하는 Matched 영역의 Element의 두께를 상속



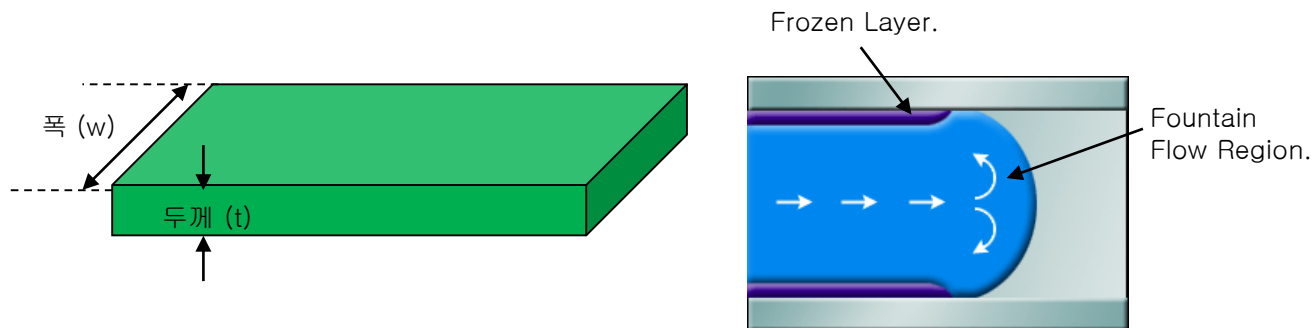
Autodesk®
MOLD FLOW® INSIGHT
Scale [30 mm]



Autodesk®
MOLD FLOW® INSIGHT
Scale [30 mm]

▶ 해석 가능한 모델 형태 (1)

평판 모델로 가정하고 해석을 진행한다. 즉 유동은 평판 방향으로만 계산하고, 열 손실은 제품 벽면 방향으로 무시된다. 따라서 해석 가능한 제품의 형태는 두께가 얇고(3~4mm 이하), 폭이 두께에 비하여 5배 이상 되는 평판 모델이어야 한다.



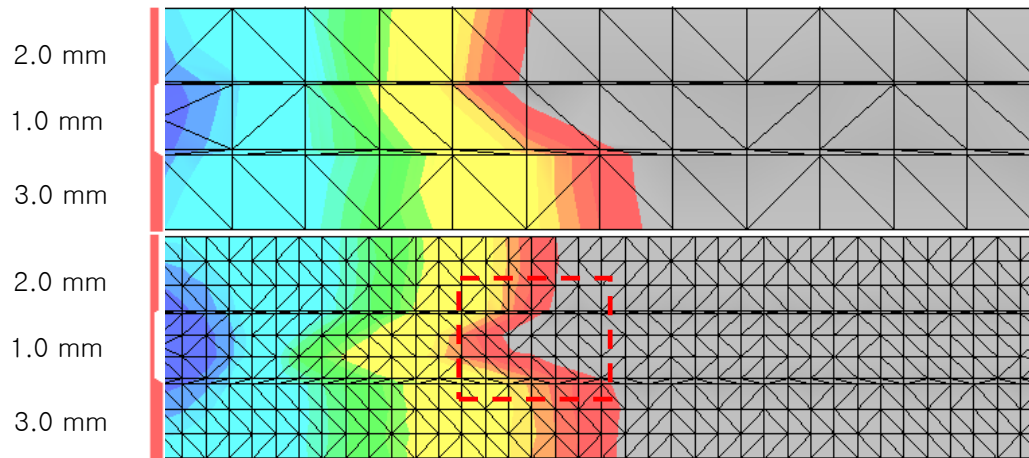
▶ 해석 가능한 모델 형태 (2)

Dual-domain에서 제품의 두께는 element 중심에서 수직선을 내렸을 경우 그 맞은 편에 있는 Element 까지의 거리를 두께로 자동 인식한다. 따라서 모델이 봉상이거나 렌즈와 같이 상 하측 면의 곡률이 반대이거나 큰 차이가 날 경우에는 두께 인식이 정확하지 않아서 해석이 힘들다. 구형의 러너를 Surface로 Import하여 Triangle 요소를 생성하여 해석에 사용하지 못하는 이유이다.

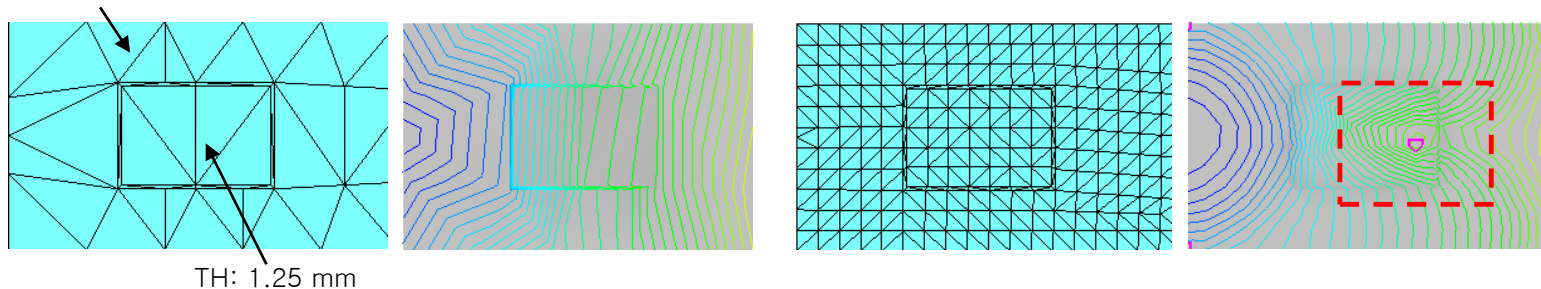
3-4-4) Global edge length

Mesh의 길이는 제품의 형상이 충분히 표현되도록 충분히 작게 설정하여야 하며, 특히 아래 그림과 같이 특별한 문제가 예상되는 경우에는 더욱 mesh 길이 설정에 신중하여야 한다. 또한 해석의 시간은 mesh수에 비례한다.

즉 아래 그림에서 볼 수 있듯이 바로 인접한 node와 node 사이에는 계산 포인트가 없으므로 그 사이는 모든 결과 값은 선형으로 표현된다. 따라서 제품의 두께 편차가 심하거나 정체현상, 에어트랩 등의 문제가 예상되는 경우에는 그러한 부분에 충분한 수의 node가 생성될 수 있도록 mesh 길이를 설정하여야 한다.

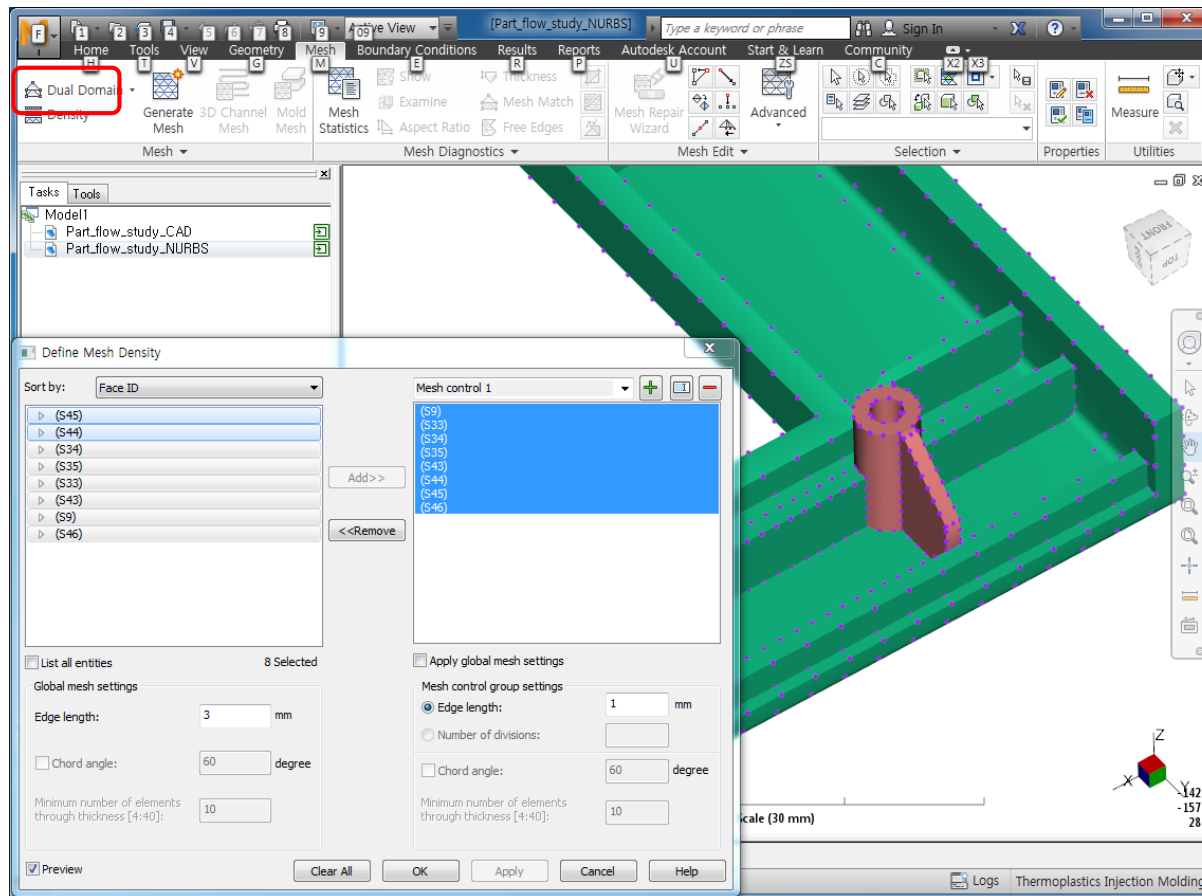


TH: 2.5 mm



3-4-5) Define Mesh Density

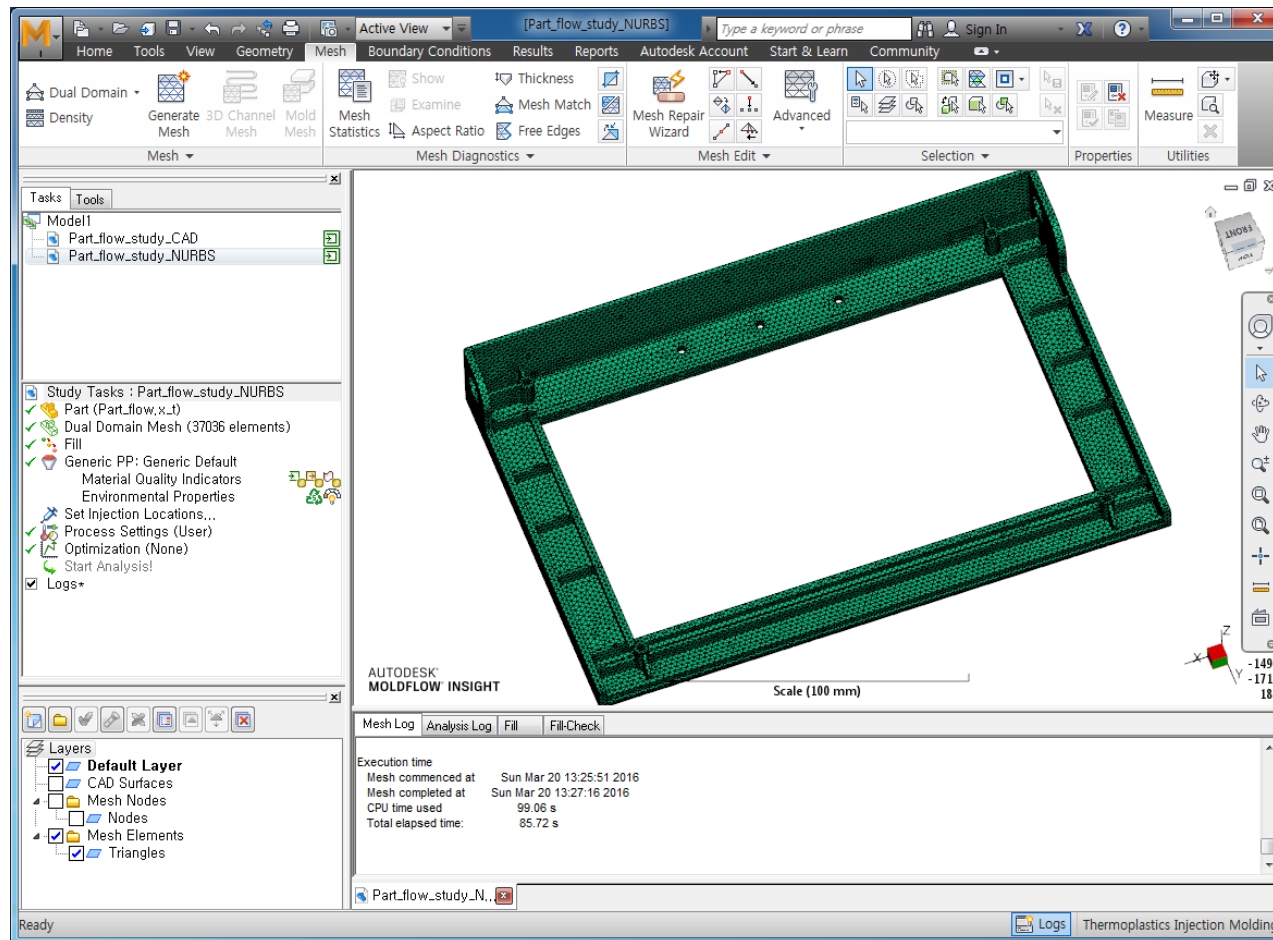
Mesh의 길이를 경우에 따라서는 부분별로 다르게 설정할 경우가 있다. 이 경우에 사용하는 명령어가 “Define Mesh Density”이다. Mesh 생성 전에 Mesh 메뉴에서 “Density”를 클릭하고 모델링 창에서 mesh 길이를 다르게 설정하고자 하는 NURBS surface 또는 CAD body들을 선택하면 “Define Mesh Density” 창에 선택된 surface 또는 body들의 리스트가 나타난다. 이때 Mesh Control Group을 확인하고 “Add” 버튼을 이용하여 그 그룹으로 할당하고 희망하는 Target edge length를 입력하고 “Apply”를 클릭하면 된다. 추가로 다른 mesh 길이를 사용하고자 하는 NURBS surface 또는 CAD body가 있다면 새로운 그룹을 만들어 동일한 방법으로 진행할 수 있다. 이 후 “Generate Mesh”를 수행한다.



3-4-6) Mesh Generation 결과

Mesh 생성 후에 Synergy에 몇 가지의 변화가 발생한다. 여기서 Global edge length: 2mm, Chord height: 0.1mm를 사용하였다.

- ▶ Study Tasks : Dual-domain mesh 앞에 체크 마크가 나타나고, 뒤에는 생성된 총 element의 수가 나타난다.
- ▶ Layers : 기존의 3개의 layer에 추가적으로 “New Triangles”와 “New Nodes”가 생성되고 여기에 각각 element와 node가 할당된다.
- ▶ Task Window : 생성된 element 와 node들을 기존의 surface 와 함께 보여준다.

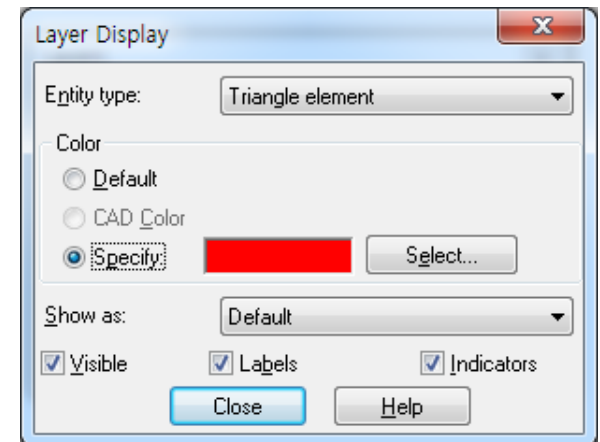
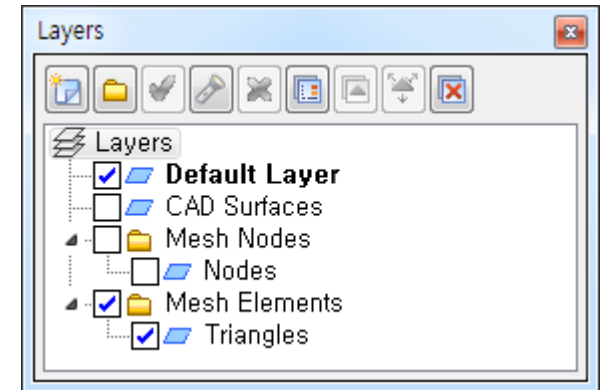


3-4-7) Layers 기능

기본적으로 CAD 변환 파일을 Import 하면 layer에 기본적으로 “Default Layer”가 생겨나고 그 import 되는 파일의 종류에 따라 “CAD Surfaces” 같은 layer가 추가적으로 만들어진다. igs 파일인 경우는 IGES Surface, IGES Curves 그리고 stl인 경우에는 Stl Representation Layer 가 생성된다.

그리고 mesh를 생성하면 “Triangles”와 “Nodes”가 나타난다. 그 이외에는 직접 New, Delete 기타 기능들을 사용하여 편집한다.

- ▶ **New Layer**: 새로운 layer를 생성한다.
- ▶ **New Folder**: 새로운 folder를 생성한다.
- ▶ **Make Active**: Active 한 Layer란 굵은 글씨로 된 layer를 말하고, 새로 모델링 창에 생성되는 entity들은 모두 이 layer에 자동 할당된다.
- ▶ **Highlight Layer**: Entity의 위치를 쉽게 파악할 수 있다. Highlight를 활성화한 후 Layer를 선택하면 Layer에 포함된 Entity들이 Highlight 되고 그 반대도 가능하다.
- ▶ **Delete**: 기존 layer를 제거한다. 단 layer에 내용물(Entity)이 있는 상황에서 제거를 하면 선택 옵션이 주어진다. 여기서 Y를 선택하면 entity 들을 Active한 layer로 옮겨지고 layer 자체만 제거된다. 그 반대의 경우는 layer 내의 모든 entity 들과 함께 제거된다.
- ▶ **Display**: 선택된 layer 내의 entity (ex. Element, Node, Surface, etc.)들의 Display 상태를 바꾸어 준다. Color 또는 Display type을 바꿀 수 있다.
- ▶ **Assign**: Entity 선택 도구를 이용하여 모델링 창에서 선택한 특정 entity들을 지정한 Layer로 이동 즉 할당한다.
- ▶ **Expand**: 선택한 layer의 element 주위로 지정한 레벨 영역내의 element와 node 들을 선택한 layer로 옮긴다.
- ▶ **Clean**: Layer들 중에 어떠한 entity도 가지고 있지 않은 빈 layer들을 제거한다.



3-5) Mesh 점검 리스트

Mesh를 생성하고 나면 먼저 만들어진 mesh의 크기는 적절한가? 또 불량 mesh의 수는 많지 않은가? 등을 먼저 확인한다. Mesh의 크기가 적절하지 않을 경우에는 Undo를 실행하거나 Import 부터 다시 수행한다. 생성된 mesh의 불량이 수정하기 너무 많을 경우에는 여러 가지 형태의 CAD 파일(igs, stp, x_b, prt)을 import하여 각각을 Mesh Generation 하고 이들을 비교하여 가장 수정하기에 적합한 모델을 선택한다.

Mesh의 상태를 확인하고 불량 mesh 수정하는 순서는 다음과 같다.

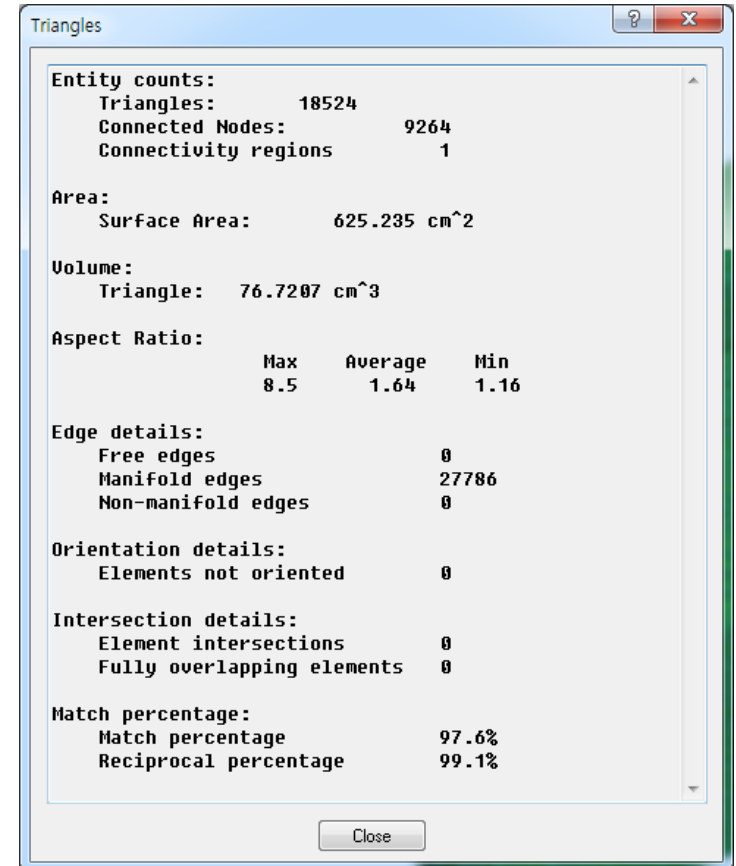
- ▶ Mesh Statistics을 통하여 불량 mesh 정보를 확인한다.
- ▶ Free Edge & Non-Manifold Edge들을 수정한다.
- ▶ Element Intersection & Overlapping Element들을 수정한다.
- ▶ Aspect Ratio 가 큰 Element들을 수정한다.
- ▶ Orientation을 수정한다.
- ▶ Dual-domain Mesh Matching 정보와 Thickness 정보를 확인한다.

2-5-1) Mesh Statistics

Mesh 메뉴에서 Mesh Statistics을 클릭하면 모델링 창에 생성된 mesh의 일반적인 정보와 수정되어야 할 element의 개수를 확인할 수 있다.

- ▶ Entity Counts : Mesh에 대한 기본적인 정보 제공
- ▶ Edge Details : Free edges(0), Non-manifold edges(0)
- ▶ Orientation Details : 0
- ▶ Intersection Details : 0
- ▶ Surface Aspect ratio : 0
- ▶ Match Ratio : 85+

위의 항목들 중에서 0으로 표시한 항목이 0보다 큰 숫자를 가진다면, 그 숫자 만큼의 불량 mesh 가 존재하는 것을 의미한다. 이들은 Mesh Diagnostics 도구를 이용하여 확인 하고 Mesh Repair 도구를 이용하여 수정하여야 한다.

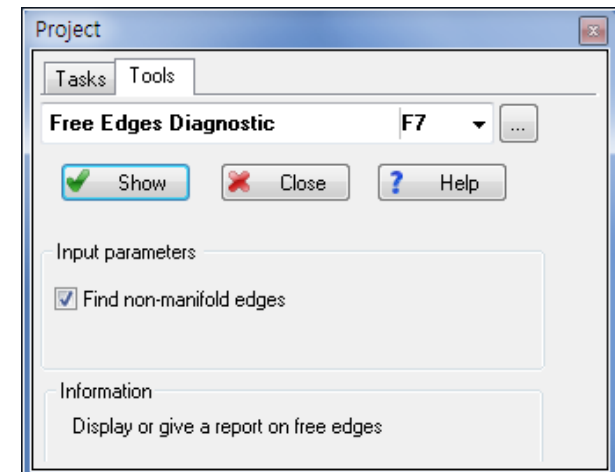
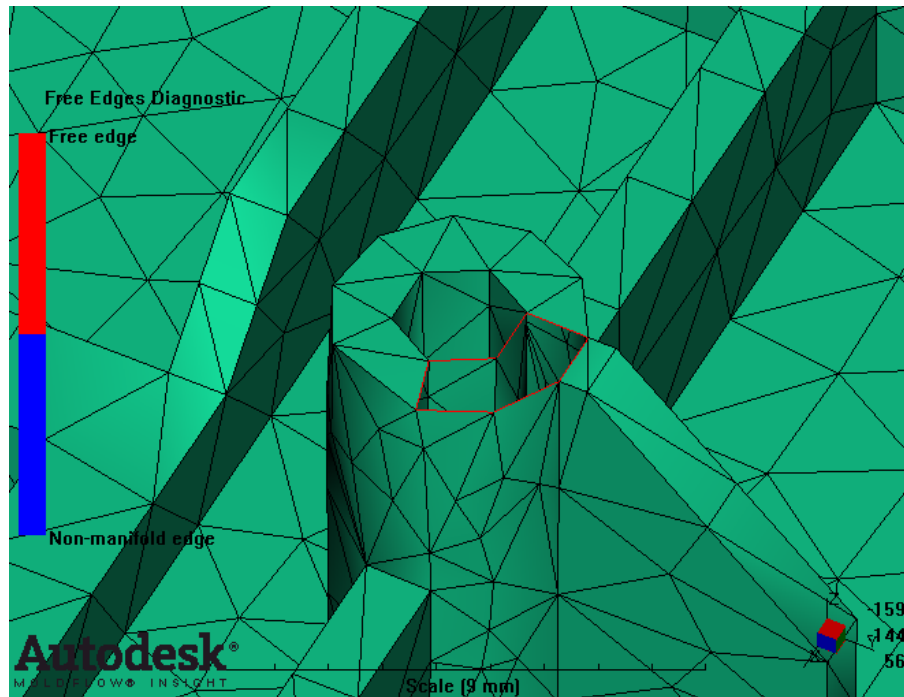


3-5-2) Free Edge & Non-Manifold Edge들을 제거

- ▶ Free edge: Element edge에 연결된 Element의 개수가 1개 인 경우
- ▶ Manifold edge: Element edge에 연결된 Element의 개수가 2개 인 경우
- ▶ Non-Manifold edge: Element edge에 연결된 Element의 개수가 3개 이상인 경우

일반적으로 Dual-domain의 경우는 Mesh 특성상 Free edge와 Non-Manifold 는 없어야 한다. 그러나 Midplane의 경우는 모두가 공존할 수 있다.

따라서 Dual-domain 모델의 경우 이러한 Free edge와 Non-Manifold edge가 존재하는 경우 이들만을 Mesh Tools를 이용하여 수정하면 된다. 그러나 Midplane 모델의 경우 모든 edge형태가 존재 가능하므로 Free edge diagnostics 도구를 이용하여 모델의 모든 부분을 확인하여 이상이 없는지를 점검하여야 한다. << Mesh -> Free edge diagnostics >>

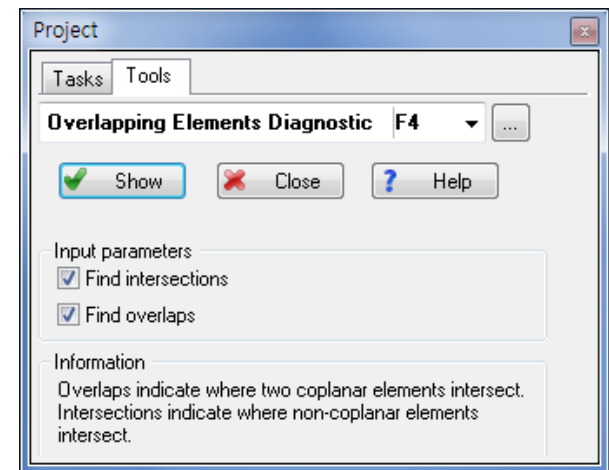
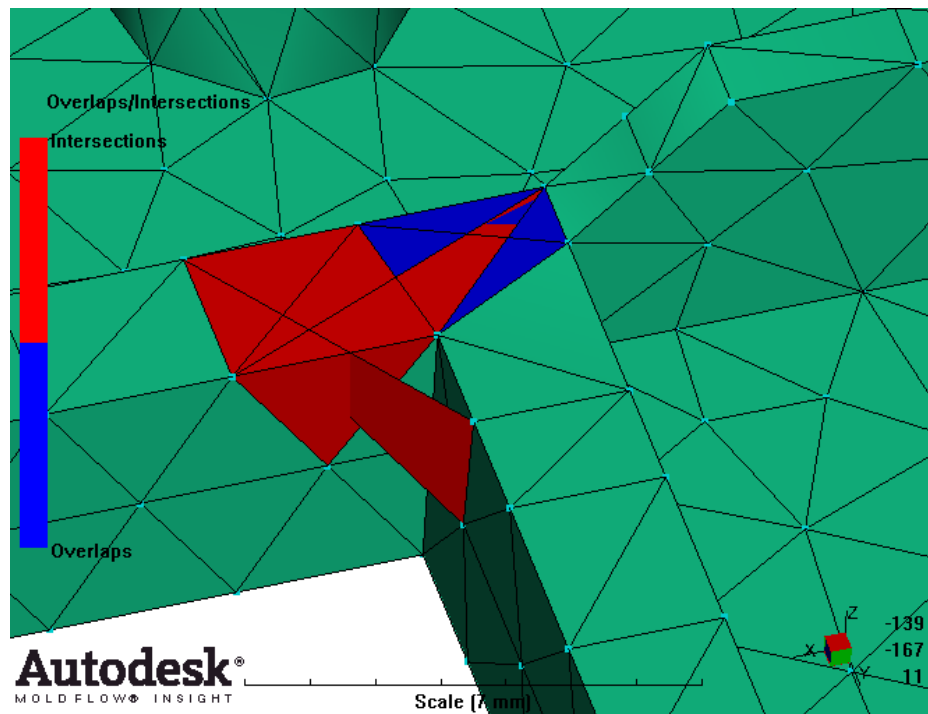


3-5-3) Element Intersection & Overlapping Element들을 수정

- ▶ Intersection: 2개 이상의 Element가 서로 교차하는 경우
- ▶ Overlapping: 동일 평면상의 2개 이상의 Element가 서로 겹쳐 있는 경우

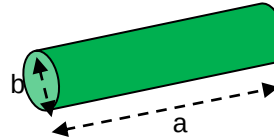
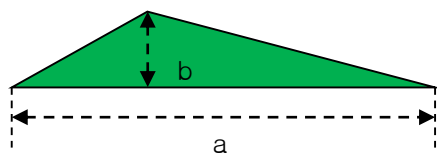
이러한 Intersection 과 Overlapping Element들은 Mesh Repair 도구를 이용하여 제거하여야 한다. Midplane과 Dual-domain Mesh에는 동일하게 적용된다.

Intersection 과 Overlapping Element들이 어디에 존재하는가를 확인하기 위해서는 << Mesh -> Overlapping Element >> 를 실행한다.



3-5-4) Aspect Ratio 가 큰 Element들을 수정

▶ Aspect Ratio : 삼각형 element의 최장변과 그 높이 비를 말한다.

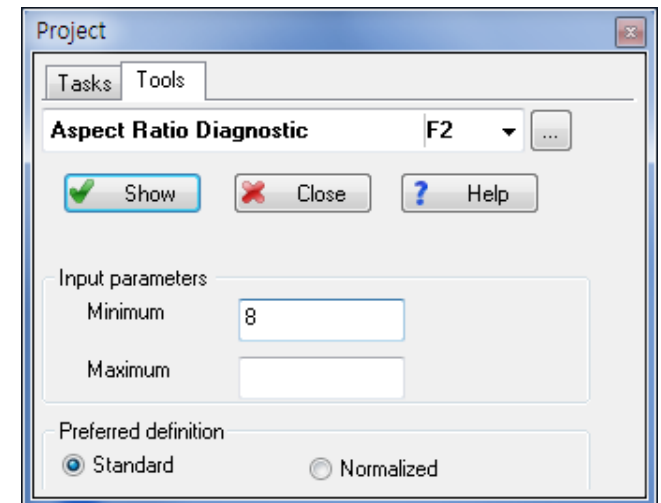
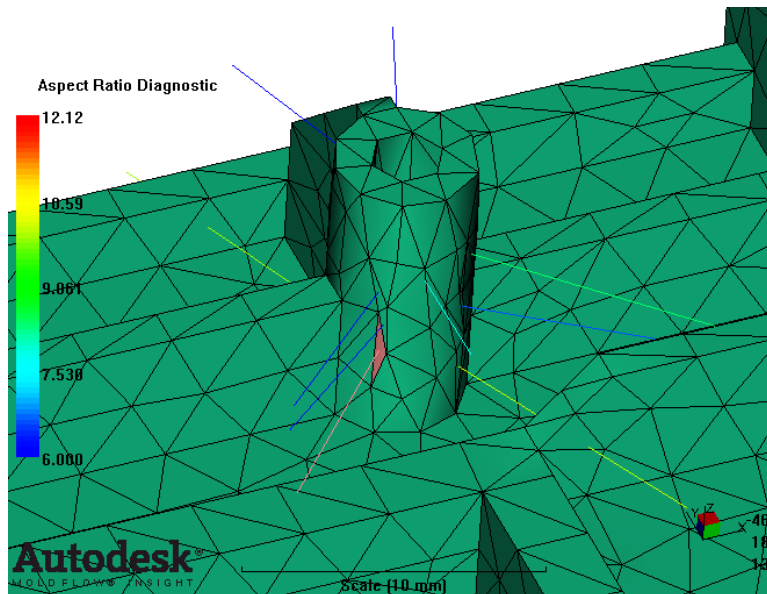


$$\text{Aspect Ratio} = \frac{a}{b}$$

Aspect ratio는 해석의 정확도와 해석 시간에 크게 영향을 준다. 따라서 가능한 그 크기를 줄여서 비가 6:1이하가 되도록 하여야 한다. 그러나 복잡한 모델의 형상을 이용하여 Mesh를 생성하였을 때 이러한 조건을 만족시키는 mesh를 만드는 것은 힘들며, Mesh Tools를 이용하여 수정을 한다고 하여도 시간이 상당히 많이 소요된다. 따라서 권장되는 mesh의 Aspect Ratio 조건은 아래와 같다.

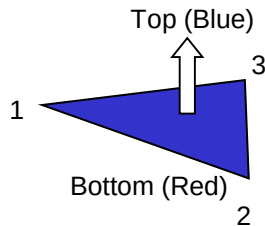
- ▶ Moldflow 권장 기준 : 6
- ▶ 최대 허용치: 50 (경우에 따라서는 해석 error 발생)
- ▶ 일반적 기준 : 20~30 (해석의 정확성과 해석 프로젝트의 기간 등을 고려하여 판단)

Aspect Ratio가 지정한 크기보다 큰 부분을 확인하기 위해서는 << Mesh -> Aspect Ratio >> 를 실행한다.

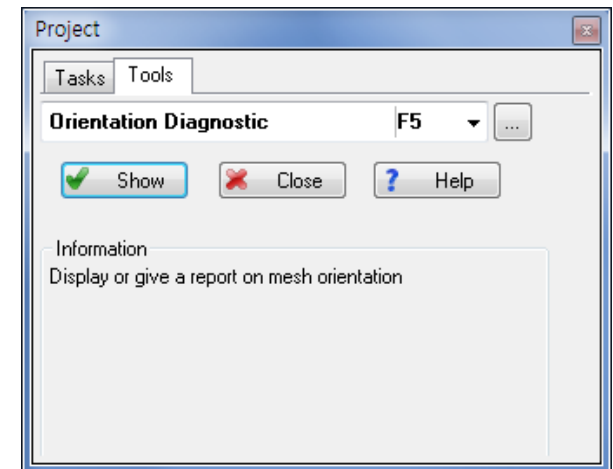
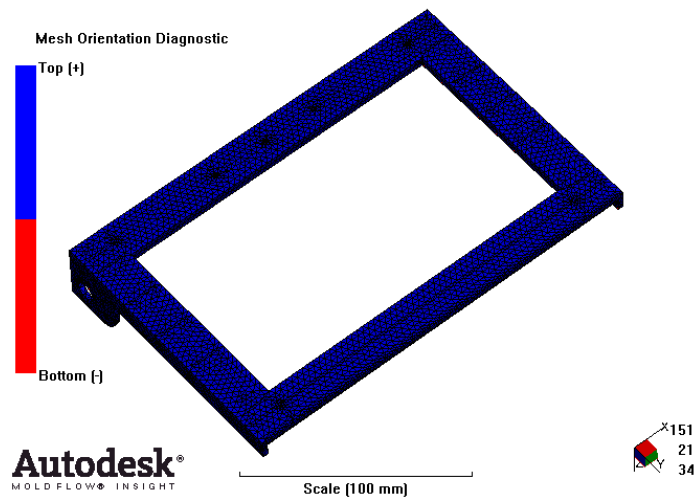


3-5-5) Orientation 수정

▶ Orientation : 삼각형 Element의 Normal Direction을 정의한다. Normal Direction 은 Element Node 번호를 이용한 오른손 법칙에 의하여 결정되는데 Top은 Blue, Bottom은 Red로 표시된다.

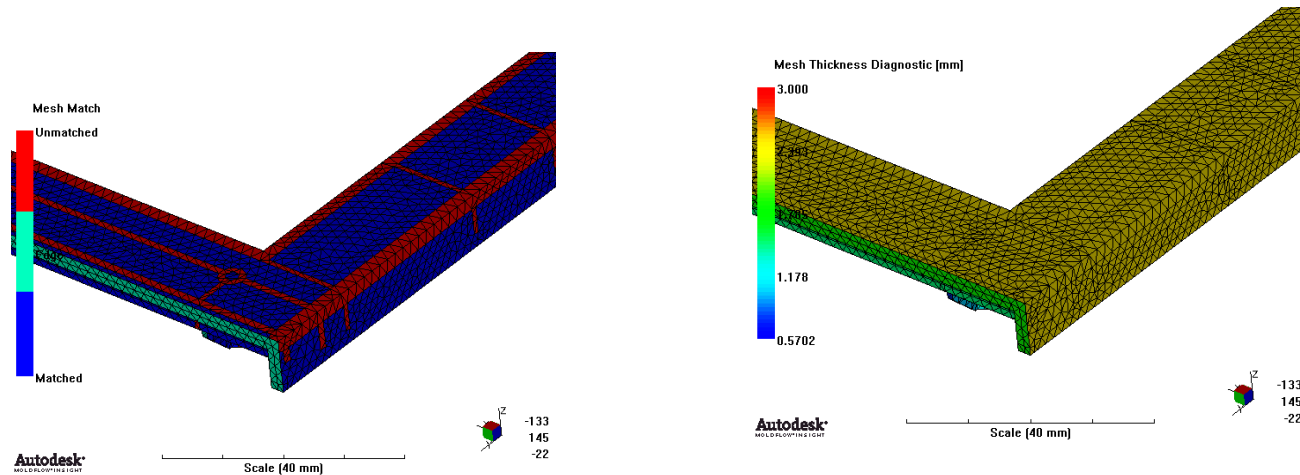


Orientation은 일관성 있는 해석 결과를 얻기 위하여 반드시 수정되어야 한다. Midplane의 경우는 제품의 외측이 Top 그리고 제품의 내측이 Bottom이 되도록 Orientation을 Orientation Diagnostics를 이용하여 확인한 후 Mesh Tools 의 Orient 도구를 이용하여 수정한다. Rib의 경우는 무시할 수 있다. 그러나 Dual-domain의 경우는 외관 전체가 Top이 되게 하여야 한다. 이 경우 Mesh 메뉴의 “Orient All” 명령을 이용하여 한번에 모든 수정이 가능하다. (단 Free Edge가 존재하지 않을 경우는 예외). Mesh orientation 상태를 확인하기 위해서는 << Mesh -> Orientation >>를 실행한다.

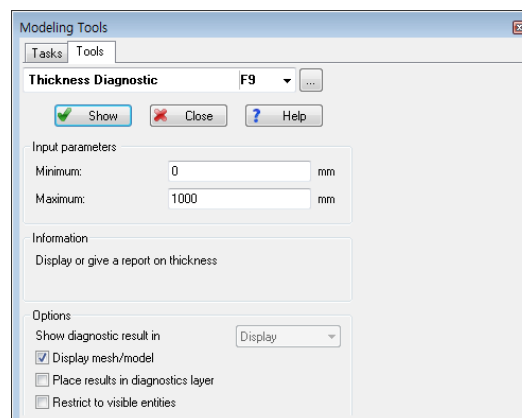
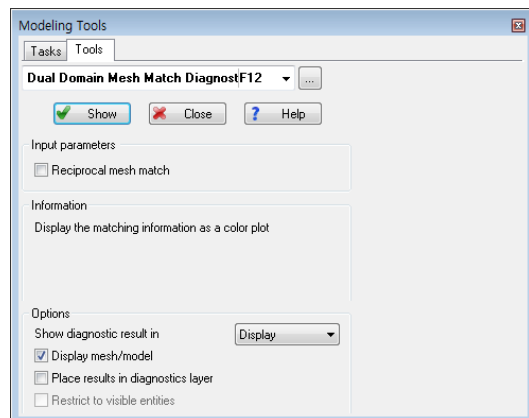


3-5-6) Dual-domain Mesh Matching 과 Thickness 확인

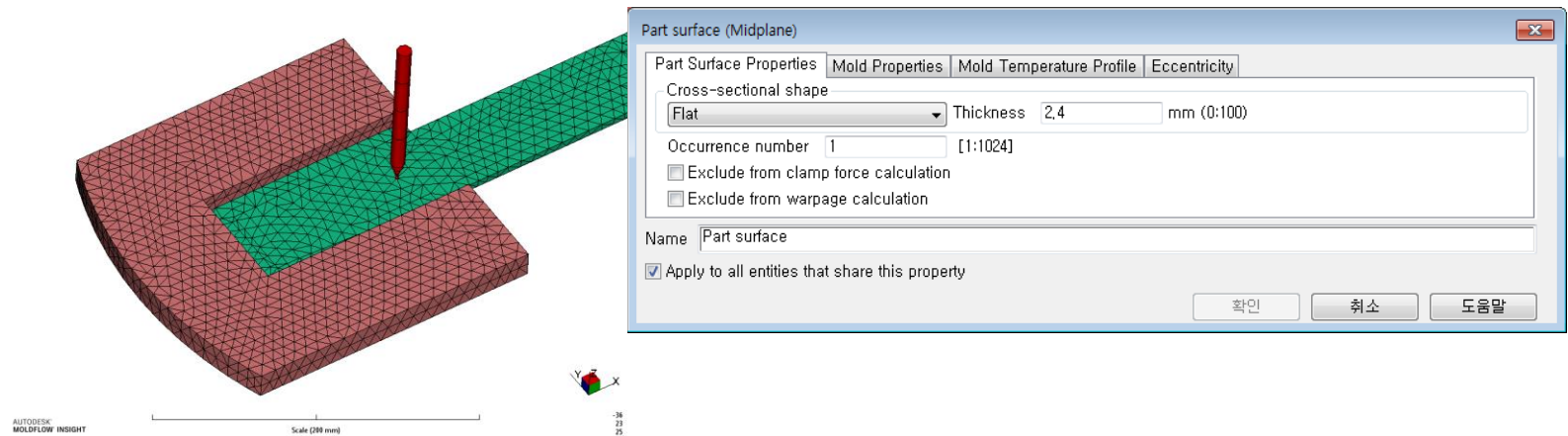
▶ Dual-domain Mesh Match : Dual-domain mesh의 mesh matching 상태를 표시한다.



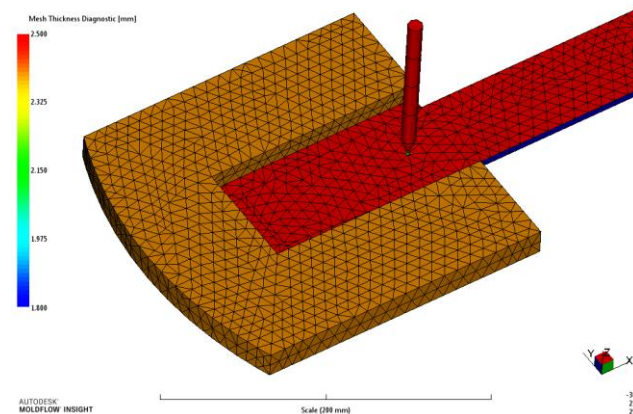
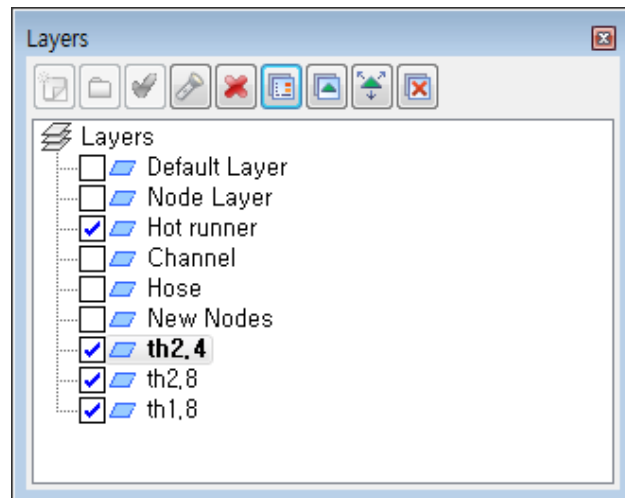
Dual-domain mesh 형식을 이용하여 해석을 수행하기 위해서는 Mesh Match율이 일반적으로 85%를 이상이어야 한다. 85% 이상이라도 해석적으로 중요 부분의 두께가 잘못 인식되는 경우에는 Dual-domain mesh 형식을 사용할 수 없다. 특히 Fiber 배향 해석의 경우 mesh matching율이 낮으면 변형해석 결과의 신뢰성이 낮아진다. 따라서 mesh matching율이 낮은 경우에는 Dual-domain 보다는 3D mesh 형식으로 해석하는 것이 바람직하다. Mesh matching 상태와 Mesh 두께를 확인하기 위해서는 << Mesh -> Dual-domain Mesh Match >>와 << Mesh -> Thickness >> 를 실행한다.



Midplane의 경우 Element 의 두께는 일반적으로 직접 입력하여야 한다. 두께를 입력하기 위해서는 우선 같은 두께를 가지는 element를 동시에 선택하고 <<Mesh -> Assign -> New -> Part Surface (midplane) >>을 실행하고 나타나는 창에 두께를 입력하고 확인을 클릭한다. 두께를 달리하는 모든 element에도 동일한 작업을 한다.

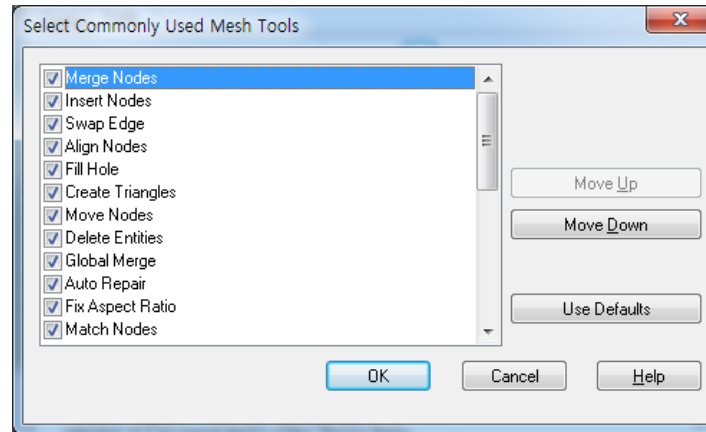
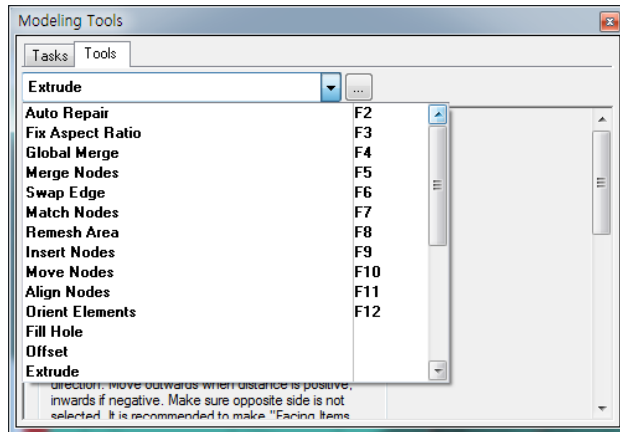


Midplane의 경우 특히 두께에 따른 layer를 각각 만들고 그 두께에 해당하는 element 들을 할당한 후에 위의 절차에 따라 각각 두께를 layer별로 설정하면 편리하다.



3-5-7) Mesh Tools 사용하기

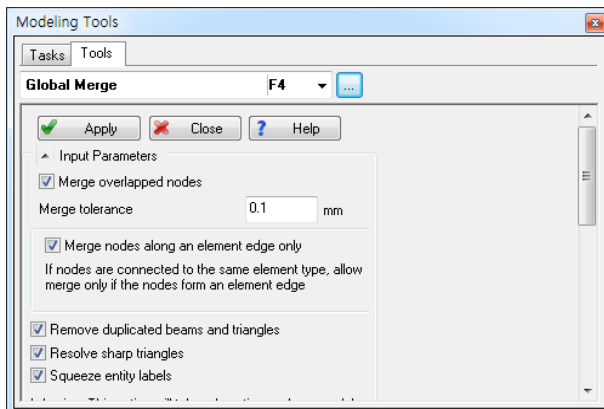
Mesh Tools의 기능들을 충분히 활용할 수 있어야 앞의 mesh 점검사항들을 수정할 수 있다.



Mesh Tools의 각각의 명령들은 F단축키를 이용하여 사용할 수 있다. F2~F12를 각각 눌러보면 위쪽부터 차례로 명령 창이 활성화된다. 이들의 순서를 바꾸려면 Mesh Tools의 More키를 눌러 Move Up 또는 Move Down키로 순서를 배정한 다음 OK를 클릭하면 명령의 순서가 바뀐다.

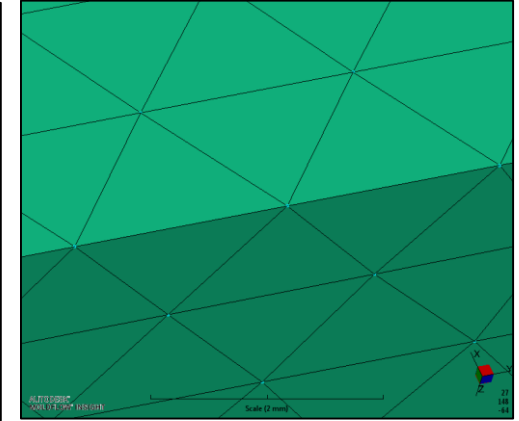
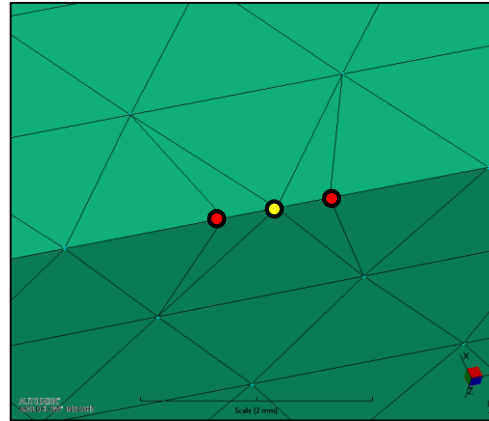
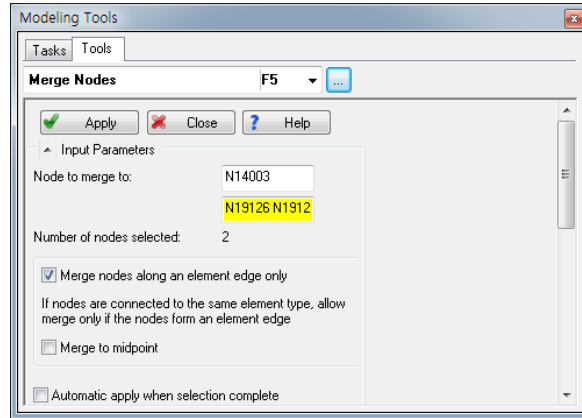
아래에 중요한 명령들의 기능을 나열하였다.

▶ **Global Merge** : Merge Tolerance 범위 내에 있는 모든 node들을 하나로 합친다. 단 “Merge nodes along an element only” 이 선택되어 있으면 Element edge로 연결되어 있지 않은, 즉 동일한 위치에 존재하여도 node들은 합쳐지지 않는다.

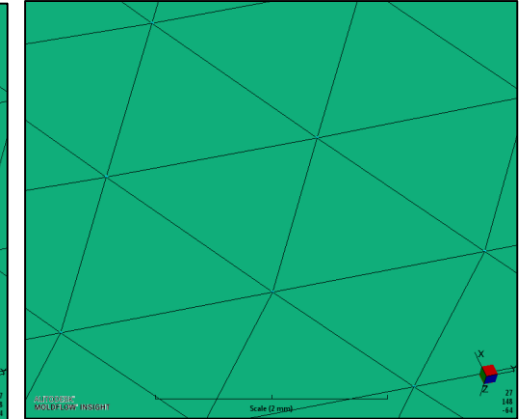
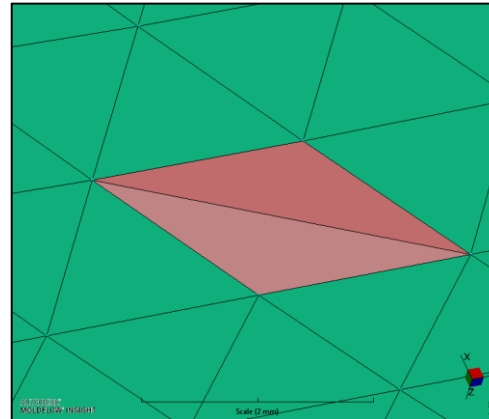
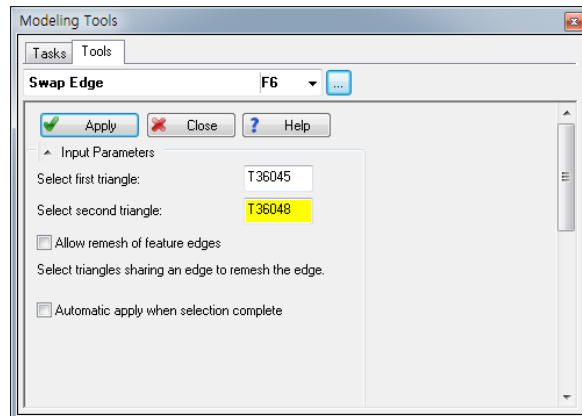


“Remove duplicated beams & triangles” 옵션은 특히 배플과 같이 겹쳐있는 beam이 존재하는 경우 사용에 주의하여야 한다.”

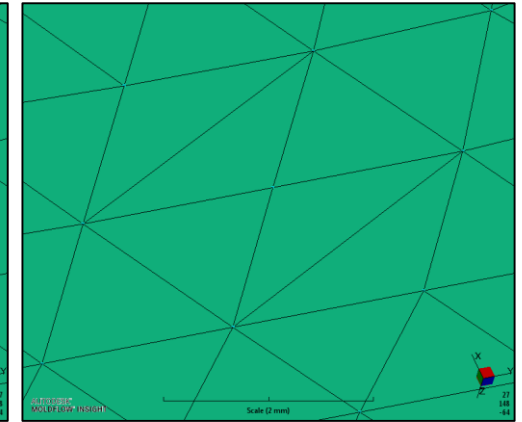
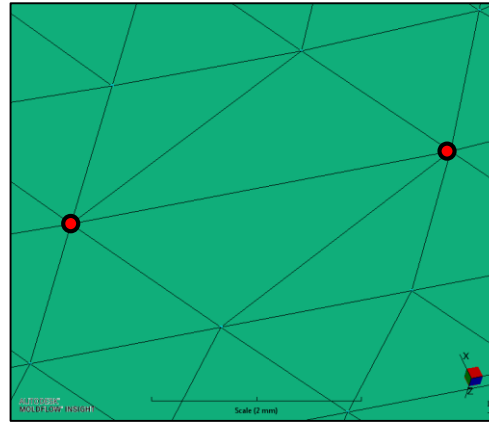
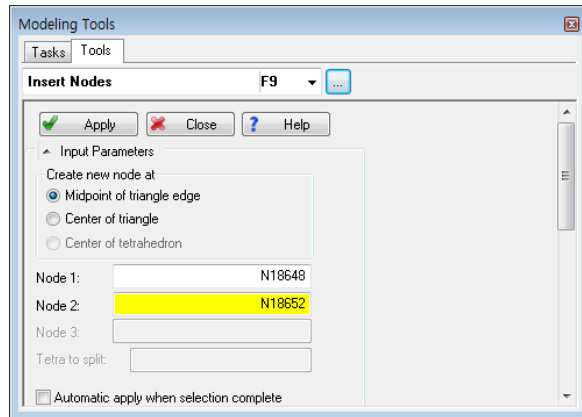
► **Merge Nodes** : Merge to에 선택된 node로 Merge from에 선택된 node들을 합친다. 단 “Merge nodes along an element only” 이 선택되어 있으면 Element edge로 연결되어 있지 않은, 즉 동일한 위치에 존재하여도 node들은 합쳐지지 않는다.



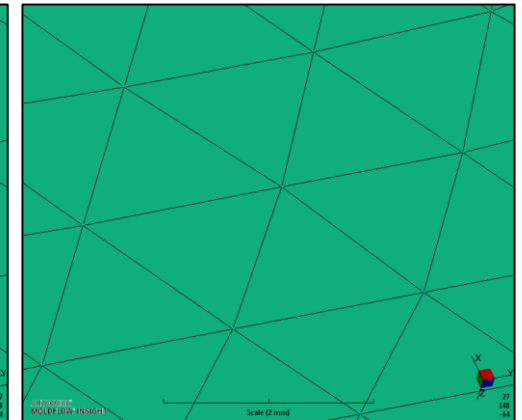
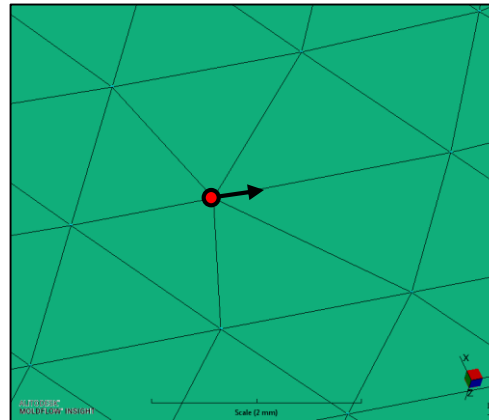
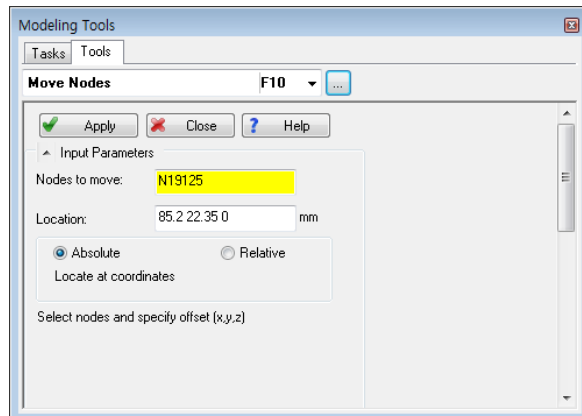
► **Swap Edge** : 선택한 2개의 element 방향을 바꾸어 준다. 동일 평면상에 존재하는 element들은 관계 없으나 그렇지 않는 경우는 실행 되지 않는다. 단 강제로 실행을 원하면 “Allow Remesh” 옵션을 선택한다.



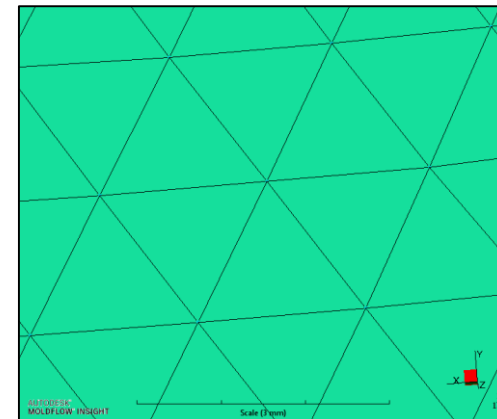
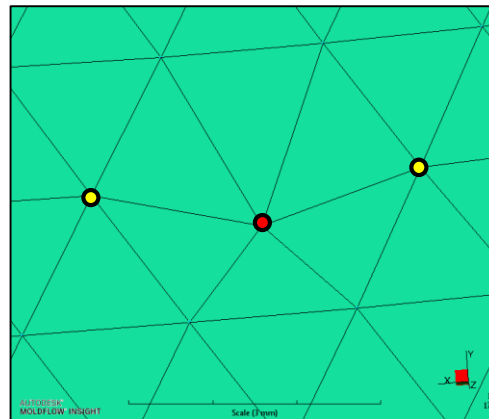
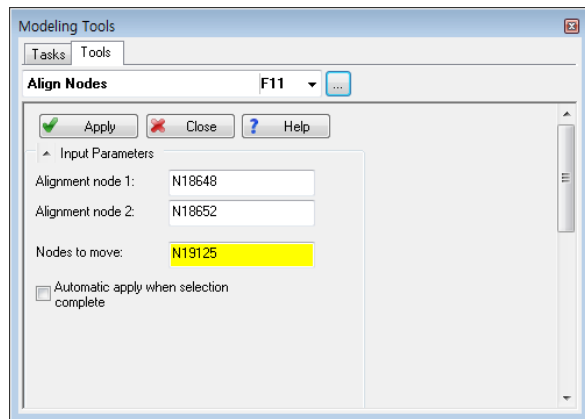
► **Insert Nodes** : 선택한 node와 node 사이의 edge 중앙에 node를 생성하여 그 edge를 분할한다.



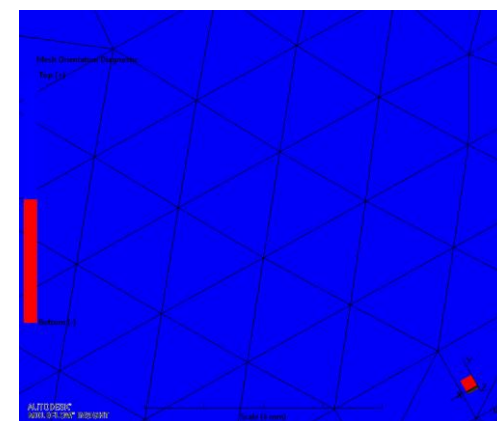
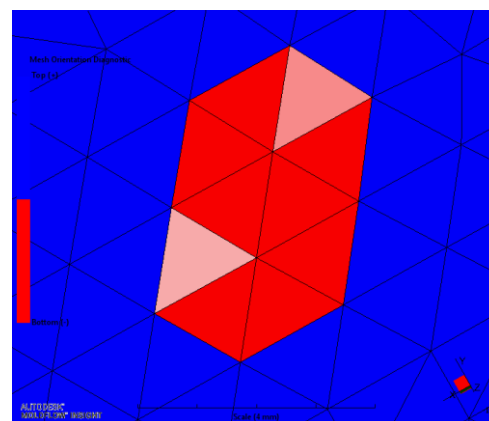
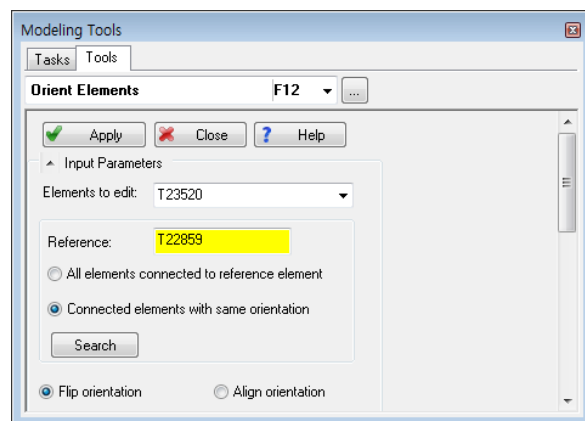
► **Move Node** : 선택한 node를 마우스로 이동하고자 하는 위치까지 drag하여 “Apply”를 클릭하거나 Location에 이동하고자 하는 좌표 값을 입력하여 Apply를 클릭하면 그곳으로 이동된다. 단 첫 번째 방법은 node를 동일 평면상으로 이동할 때만 가능하다.



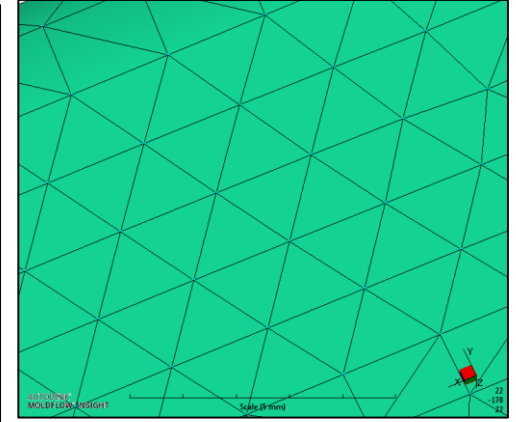
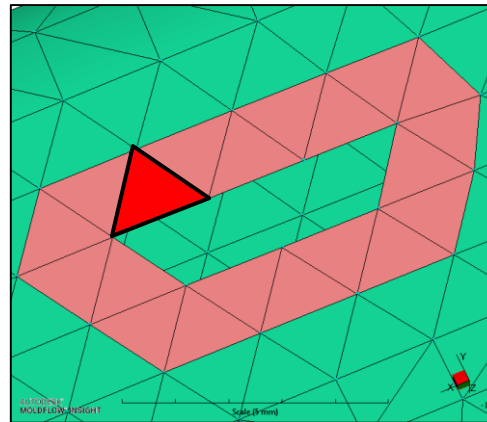
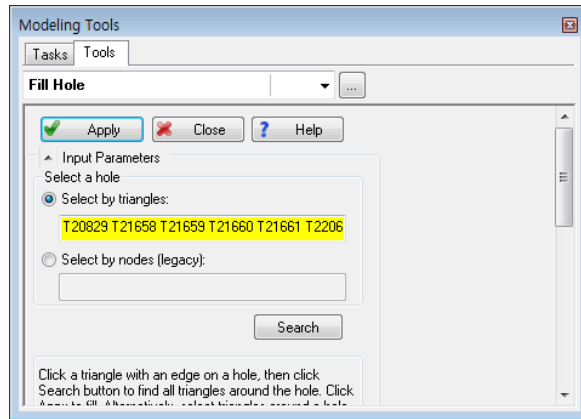
► **Align Nodes** : 세 번째 빈칸에 선택된 node들을 첫 번째와 두 번째 빈칸에 선택된 node들의 공간상 동일선상으로 이동시킨다.



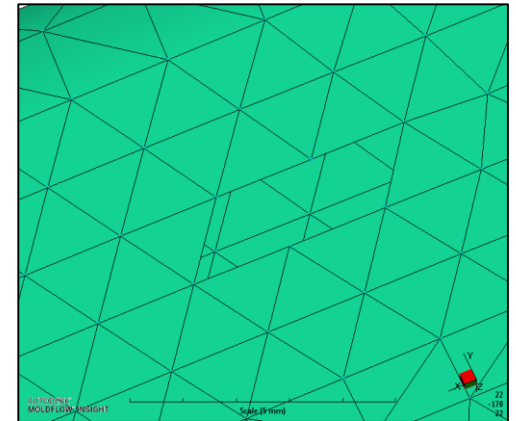
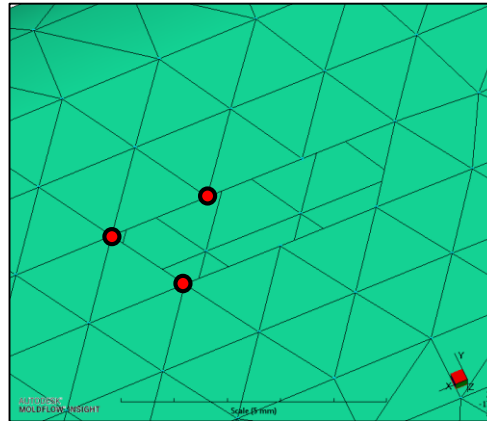
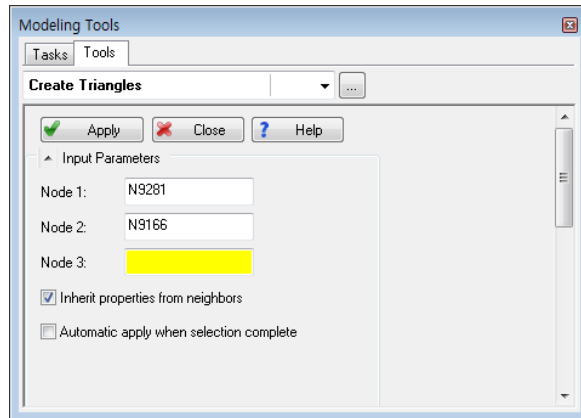
► **Orient Elements** : 선택된 element들의 Normal Direction을 뒤집는다. Midplane Mesh 형식의 경우 이 도구를 이용하여 직접 수정하여야 한다. 첫 번째 칸에 뒤집고자 하는 element들의 영역중의 하나의 Element를 선택하고 두 번째 빈칸에 다시 그 중 하나를 선택하고 “Search”를 클릭하면 그 모든 element가 선택되고 이때 “Apply”를 클릭하면 element들의 orientation이 바뀐다.



► **Fill Holes** : Free edge 로 구성된 영역을 Triangle Element를 이용하여 채운다. 먼저 빈칸에 채울 영역 주위의 한 node를 선택한 후 “Search”를 선택하면 Free edge 영역의 모든 node들이 선택되고 “Apply”를 클릭하면 빈 공간이 채워진다.



► **Create Triangles** : 각각의 빈칸에 선택된 3개의 node들로 이루어져 있는 Triangle Element를 생성한다.



► **Delete** : 선택된 모든 Entity를 삭제한다.

► **Purge** : 어떠한 Element (Triangle, Beam)에 연결되어 있지 않은 모든 node들을 삭제한다. 일반적으로 Element는 지웠는데 node를 삭제하지 않은 경우에 사용된다.

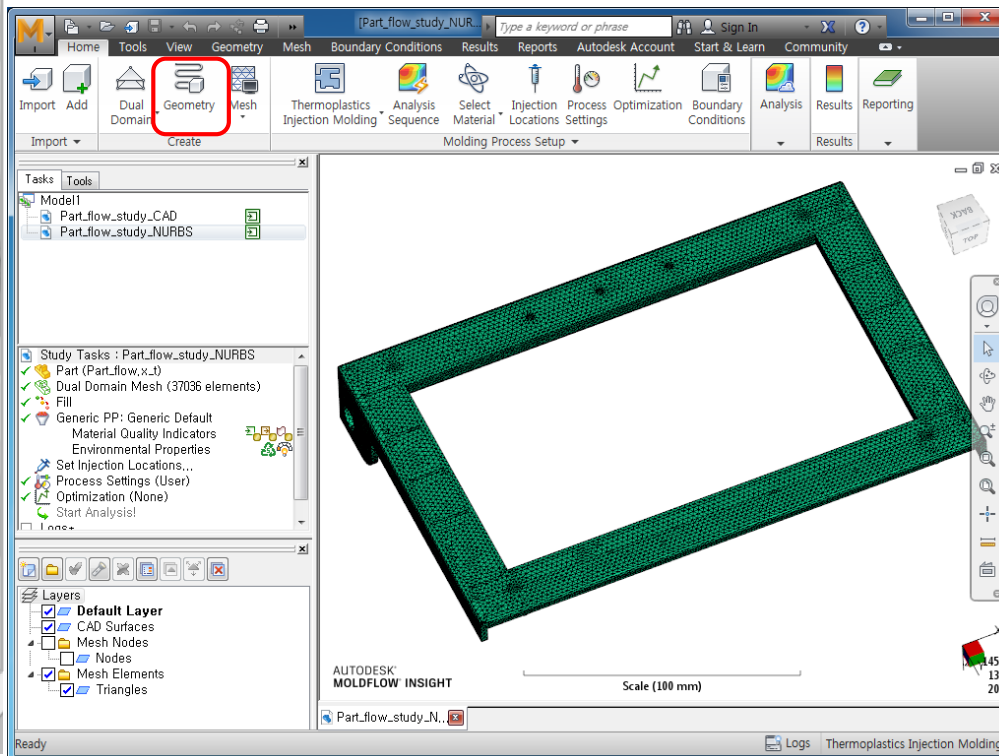
3-6) Runner System 설계하기

Mesh의 수정이 끝나면 Geometry 메뉴에 모델링 도구를 이용하여 Runner, Sprue, Gate를 설계한다. 일반적으로 Runner System은 curve를 생성하고 속성을 주고 mesh를 생성하여 Beam Element로 설계한다. 그러나 gate의 경우는 형상에 따라서 Triangle Element로 설계하여야 하는 경우가 있다.

Runner System을 설계하는 절차는 아래와 같다.

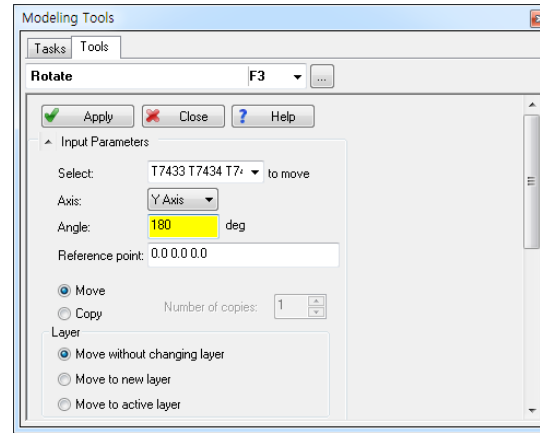
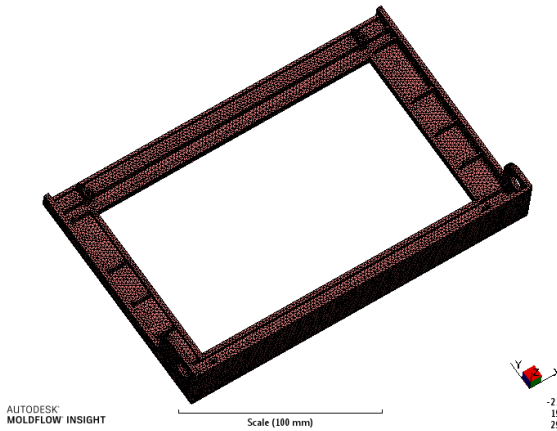
- ▶ Gate, Runner, Sprue Curve 생성하기
- ▶ Property 설정하기
- ▶ Beam Mesh 생성하기

Runner System을 설계하기 위해서는 Geometry의 Create Node, Create Curve, Move / Copy 기능들을 잘 활용할 수 있어야 한다. 실습에서는 아래와 같이 사이드 게이트가 2개인 2단 금형 구조로 러너를 설계한다.



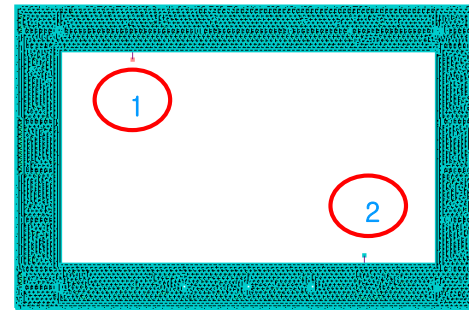
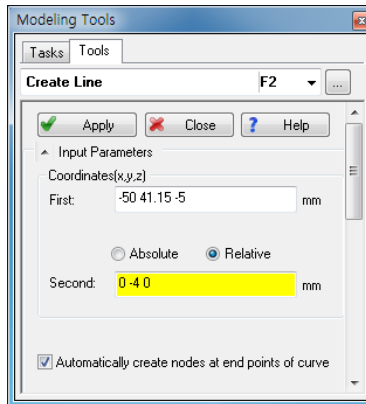
3-6-1) 모델 방향 회전

가장 먼저 모델의 방향을 점검한다. Sprue 방향이 항상 +Z 방향이 되도록 한다. 이것은 형체력을 계산에 사용되는 투영면적이 제품의 XY 평면의 넓이로 정해지기 때문이다. 전체 Mesh를 선택하고 <<Utilities -> Rotate>> Y축 방향으로 180도 회전한다.



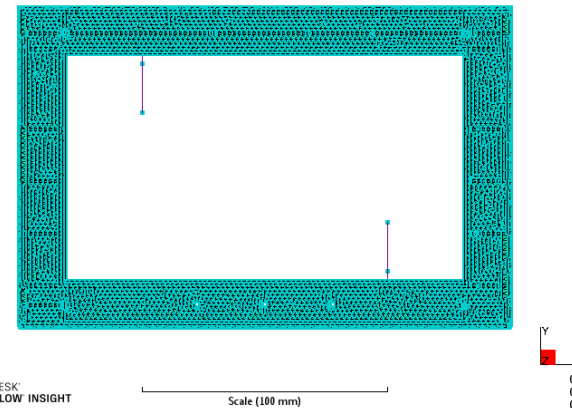
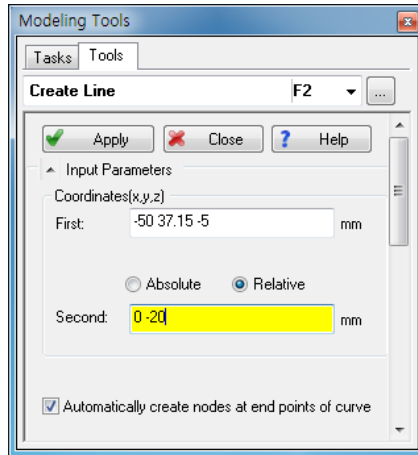
3-6-1) Gate Curve 설계하기

먼저 금형이 2단인지 3단인지 그리고 Hot Runner System 인지 Cold Runner System 인지를 결정하여야 한다. 그 다음은 게이트로 설정하고자 하는 node들을 결정한다. << Create -> Curve >>에서 line을 선택하고 첫 번째 빈칸에는 1번 gate node를 선택하고 두 번째 빈 칸에는 Relative로 아래와 같은 좌표(0 -4)를 입력하고 “Apply”를 클릭한다. 그러면 gate curve가 설계된다. 2번 게이트에 대해서도 동일하게 작업한다. 단 좌표는 (0 4)를 입력한다. Gate node의 위치는 curve 설계 전에 미리 “Move”, “Merge” 그리고 “Insert”를 이용하여 조정한다.

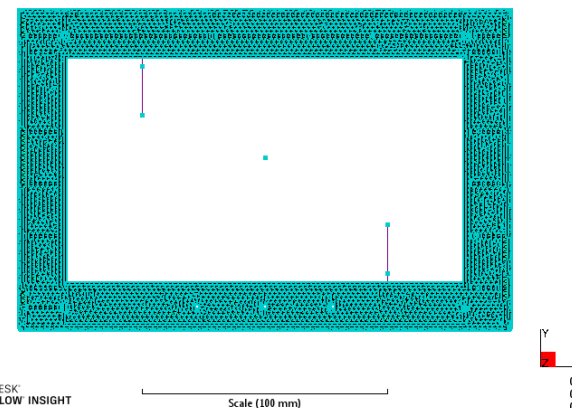
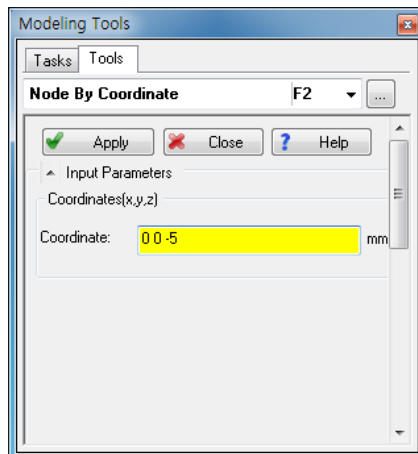


3-6-3) Runner, Sprue Curve 설계하기

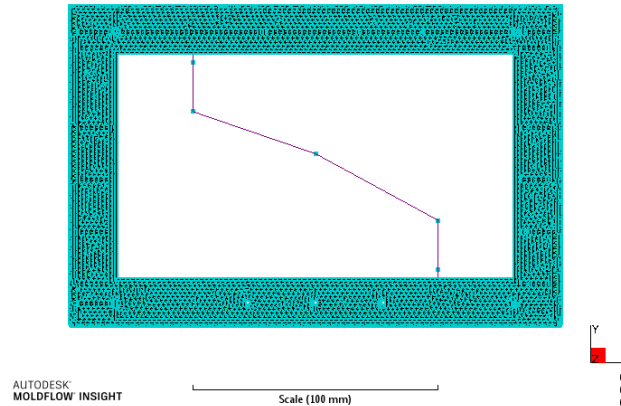
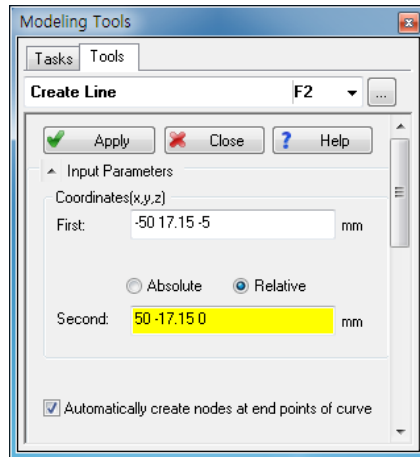
Runner Curve를 그림과 같이 설계하기 위하여 << Create -> Curve >>의 Line 도구를 이용하여 1번 게이트 끝 단 node들을 선택하고 Relative에 아래 좌표 (0 -20)을 입력하고 “Apply”를 클릭한다. 2번 게이트에 대해서도 동일하게 작업한다. 단 좌표는 (0 20)을 입력한다.



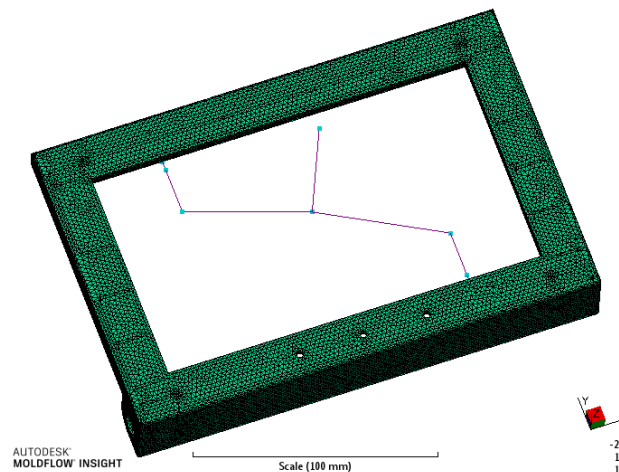
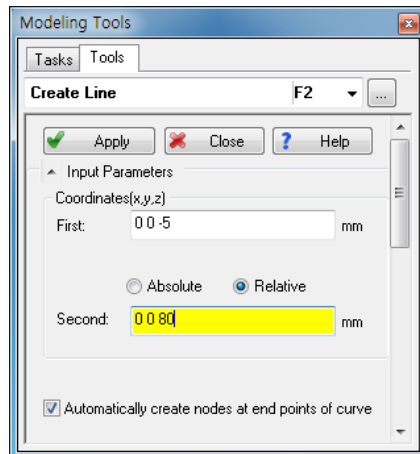
다음은 sprue 위치에 node를 생성하기 위하여 <<create -> node>>의 Node by Coordinate 도구를 이용하여 좌표 (0 0 -5) 을 입력하고 “Apply”를 클릭한다.



다음은 다시 << Create -> Curve >>의 Line 도구를 이용하여 첫 번째 빈칸 기존에 생성된 러너의 끝 단 node를 선택하고 두 번째 빈칸에는 sprue node를 선택하고 “Apply”를 클릭한다. 2번 러너도 같은 방법으로 작업한다.



다음은 Sprue curve를 생성하기 위하여 << Create -> Curve >>의 Line 도구를 이용하여 첫 번째 빈칸 기존에 sprue node를 선택하고 두 번째 빈칸에는 Relative로 좌표 (0 0 80)을 입력하고 “Apply”를 클릭한다.



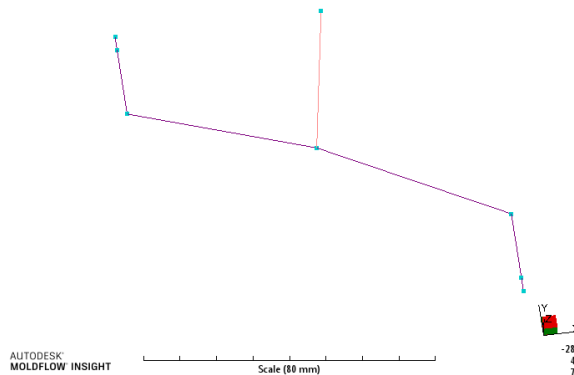
3-6-4) Runner System 속성 설정하기

속성을 설정하는 방법은 먼저 동일한 속성을 가지는 curve들을 동시에 선택하고, << Properties -> Assign >>를 클릭한 후 나타나는 창에서 New를 선택한다. 다음은 New 리스트 중에서 sprue, runner, gate 중에서 해당하는 것을 선택하고, 그 단면 모양과 치수를 입력하면 된다.

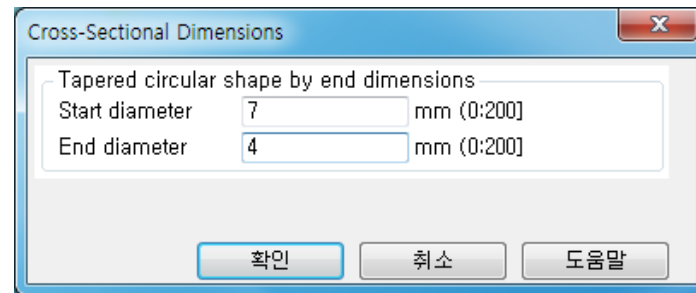
여기서 치수에는 Non-Tapered, Tapered(by end dimensions), Tapered(by angle)가 있는데 특히 Tapered(by end dimensions)에서 Tapered는 형상의 직경이 점차적으로 증가하거나 감소하는 것을 말하며, 그리고 Start와 End의 의미는 curve를 설계할 때 첫 번째 빈칸에 선택된 과 그 반대쪽의 의미이다.

Property가 지정되면 Cold는 curve의 색이 green으로, Hot의 경우는 red로 바뀐다. 또한 Property가 지정되지 않은 curve는 Beam Mesh 생성시 mesh가 생성되지 않는다.

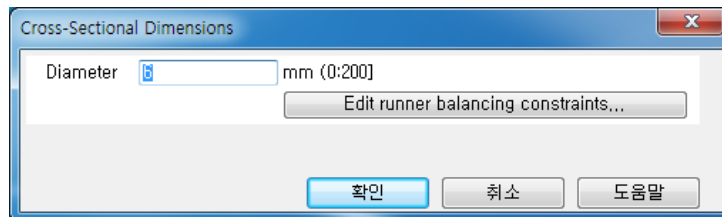
▶ Cold Sprue Property 설정하기



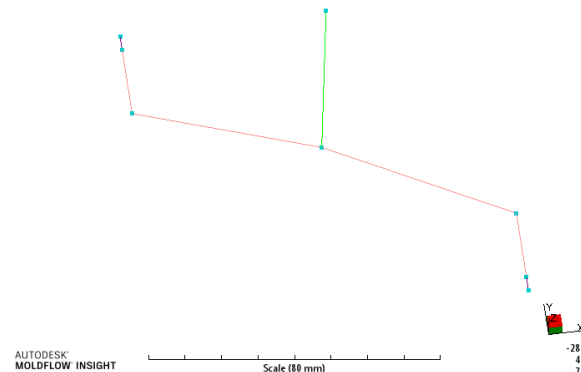
Cold Sprue >> Taped



▶ Cold Runner Property 설정하기

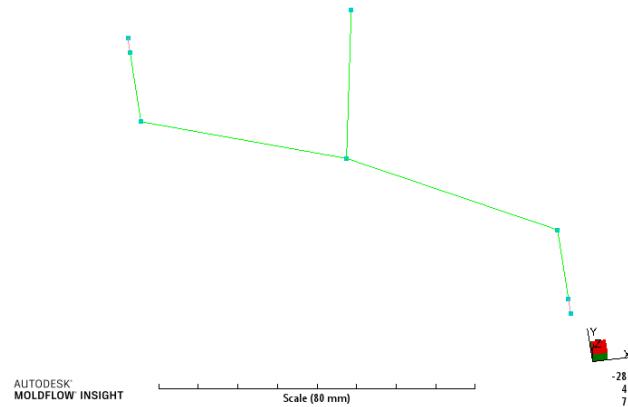
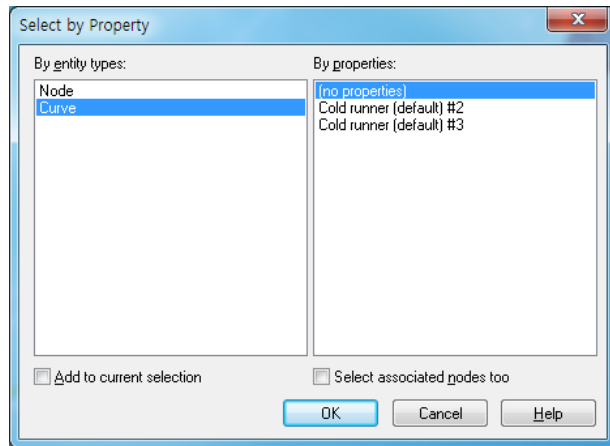


Cold Runner >> Circular >> Non-Taped

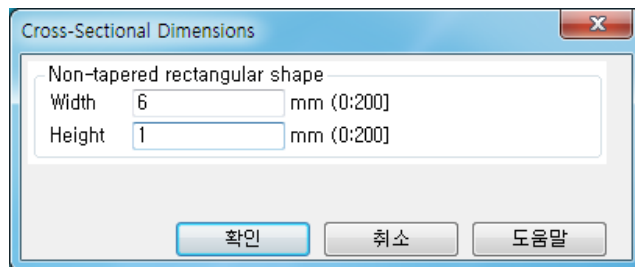


▶ Cold Gate Property 설정하기

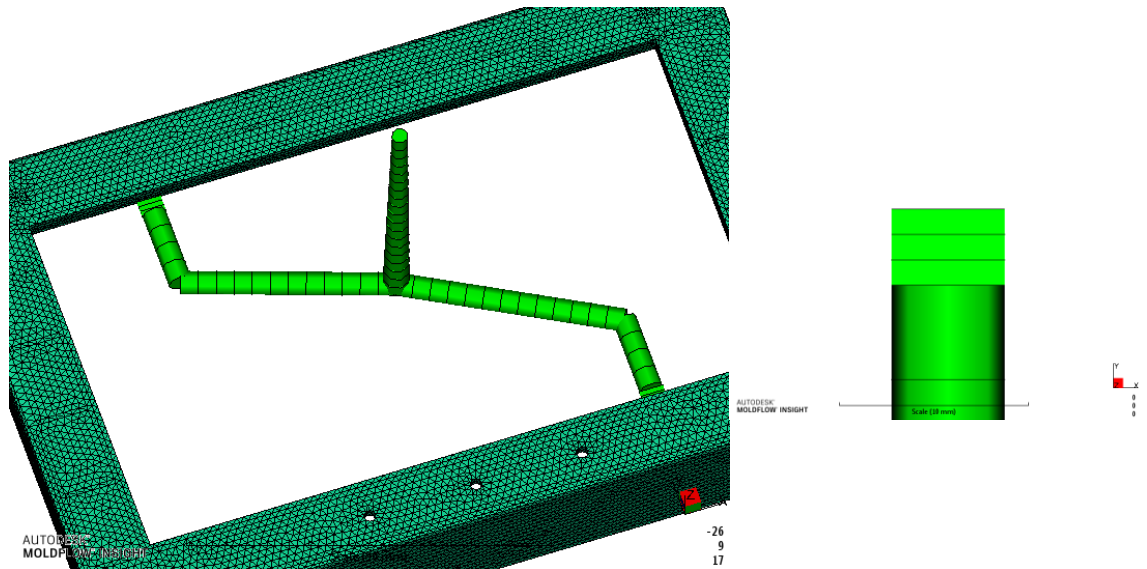
여기서 Gate Curve와 같이 작은 것들을 선택할 때는 마우스로 직접 선택하는 것 보다는 속성을 이용하여 선택하는 것이 편리하다. 여기서는 << Selection -> Properties >>에서 Curve를 선택하고 다시 no properties를 선택하면 gate curve를 쉽게 선택할 수 있다.



Cold Gate >> Rectangular >> Non-Taped

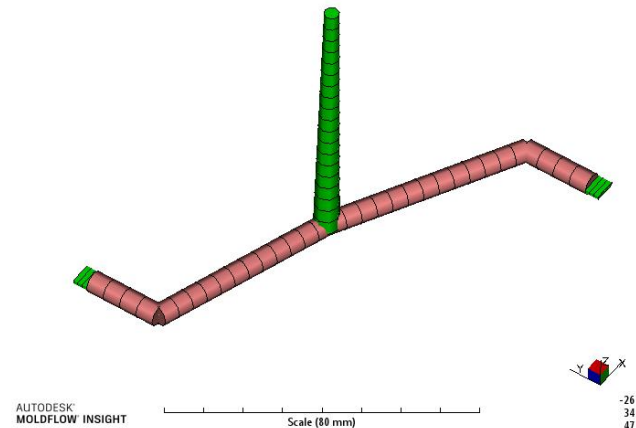
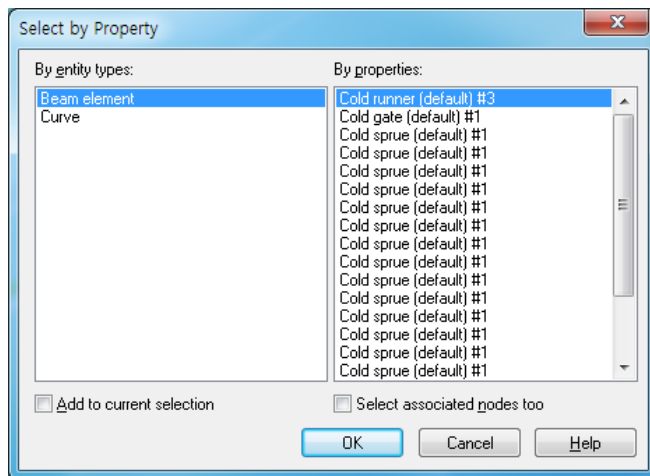


Beam Mesh를 생성하기 위해서는 Triangle Mesh와 같이 << Mesh -> Mesh Generation >>을 선택하고 “curve” 탭으로 이동하면 아래와 같이 Curve의 종류에 따라 적합한 Mesh 사이즈가 입력되어 있다. 여기서 “Ratio of edge length to diameter for feed System”은 0.5~1.0 범위가 적합하고, “Minimum number of elements on each curve for Gate는 3~5가 적합하다. 여기에서는 각각 0.75와 3을 입력한다.



▶ Beam Mesh 다시 생성하기 (선택)

Beam Mesh의 사이즈 또는 Gate Beam Mesh 수가 적합하지 못하다고 판단되는 경우에는 “Undo”를 이용하여 되돌리고 다시 적합한 Mesh 옵션으로 Beam Mesh를 생성하면 된다. 하지만 이미 되돌리기를 할 수 없는 상태라면 Beam Mesh를 삭제하고 기존 curve를 이용하여 다시 Beam Mesh 생성이 가능하다. 물론 삭제를 위하여 Beam Mesh만을 정확히 선택하기 위해서는 << Selection -> Properties >> 를 이용하는 것이 편리하다. 아래와 같이 좌측 창에서 “Beam element”를 먼저선택하고 우측 창에서 다시 “Cold runner”속성만 선택하면 Runner Beam Mesh만 선택된다.



▶ Layer 정리하기 (선택)

위의 속성을 이용한 선택기능을 이용하면 Layer 정리를 쉽게 할 수 있다. 여러 가지 작업을 하다 보면 Triangle Element, Beam Element, Curve 그리고 Node들이 여러 Layer에 섞여서 존재할 수 있다. 이 경우 모든 Layer를 활성화하고 << Selection -> Properties >> 에서 정리하고자 하는 Entity를 선택하고 Layer의 “Assign Layer” 기능을 이용하여 각각의 Entity를 적합한 Layer로 이동하여 정리한다.

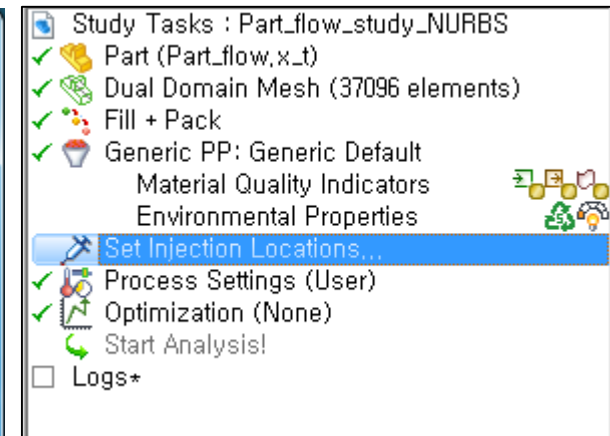
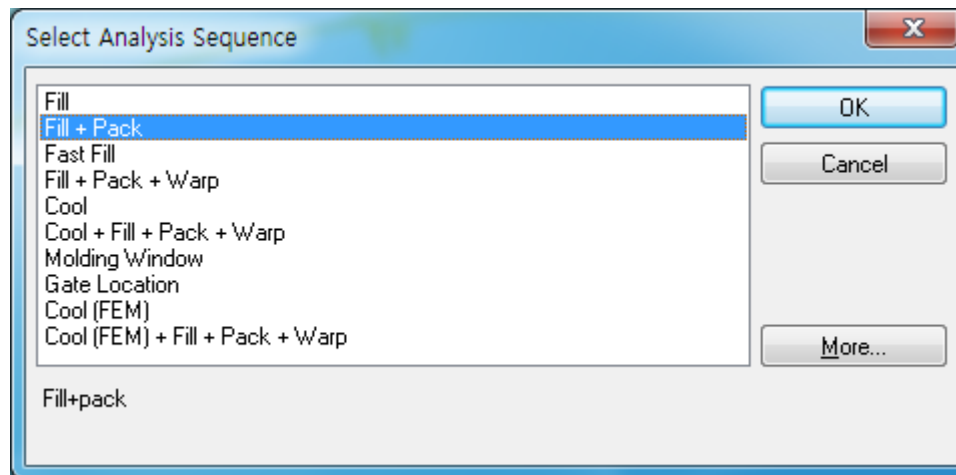
3-7) 해석 순서 정의 하기

가장 일반적인 해석의 순서는 “Cool + Fill + Pack + Warp”이다. 즉 냉각해석을 통해 금형 온도를 계산하여 유동에 넘겨 주고 유동해석에서 내부 잔류응력을 계산해서 변형해석에 넘겨준다. 실제 사출 성형에서는 냉각과 유동은 동시에 진행되는 상황이지만 이들을 수학적인 방법으로 동시에 고려하여 계산하는 것은 복잡하다. 따라서 해석에서는 이들을 분리하여 냉각해석을 먼저 진행하고 유동해석을 나중에 진행한다. 그 다음 제품이 금형에서 취출되었을 때 제품 내부에 축적된 잔류응력에 의하여 변형이 어떻게 진행될 것인가를 계산하는 변형해석을 수행한다.

따라서 유동해석만 진행한다면 금형 온도는 계산이 안 된다. 이 경우에는 제품의 모든 부분 금형 온도는 해석 시에 지정하는 값으로 균일한 것으로 가정하고 해석을 수행하게 된다.

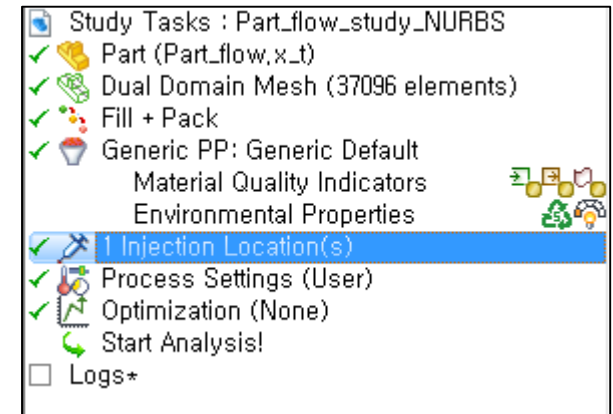
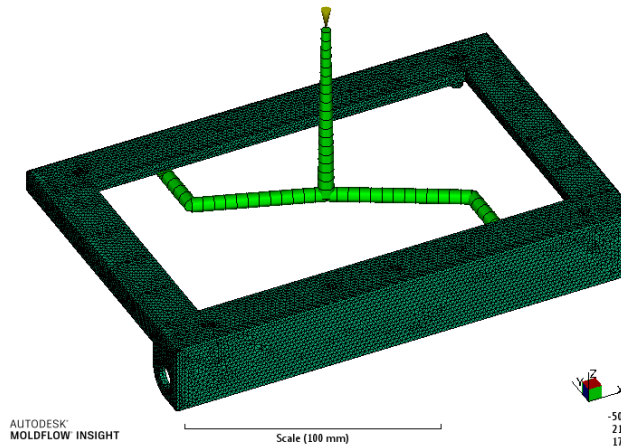
또한 유동해석의 “Fill” 과 “Fill+Pack”의 차이는 해석의 범위이다. Fill은 수지가 금형을 100% 충전하는 시점까지만 해석한다. 그러나 “Fill+Pack”은 충전 + 보압 + 냉각 구간까지 해석을 진행한다.

이 경우는 냉각해석을 위한 준비가 아직 되어 있지 않았으므로 “Fill+Pack”를 선택하고 Ok를 클릭한다.



3-8) Injection Location 설정하기

“Injection Location”은 수지가 주입되는 위치를 말한다. Runner System을 완성하였다면 그 위치는 sprue 상단이 된다. Study Tasks에서 “Set Injection Locations”를 더블 클릭하고 모델링 창에서 sprue 상단에 클릭한다. 그러면 Injection Cone이 sprue 상단에 생성된다.



Injection Cone의 이동을 원할 경우 삭제하고 다시 지정하거나, Study Tasks에 “Set Injection Locations”를 더블 클릭한 후 그 Injection Cone 을 마우스로 drag하여 원하는 위치에 옮기면 된다.

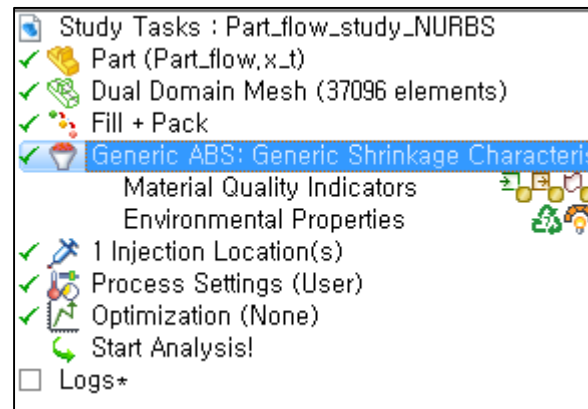
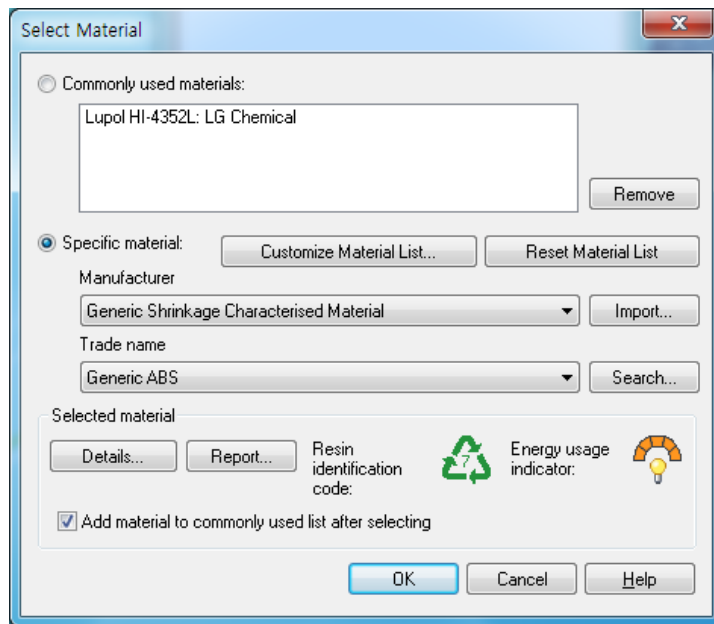
3-9) Material 선택하기

Moldflow 수지 DB에는 약 9500개의 수지가 측정되어 있으며, 이들의 측정은 대부분 Moldflow 호주 연구소와 미국의 이타카 연구소에서 측정된다. 물론 수지회사의 자체의 측정 장비를 보유하고 있다면 필요한 데이터를 측정하여 Fitting 절차를 거쳐 Moldflow 수지 DB List에 등록 할 수 있다.

▶ 수지 선택하기

Study Tasks에서 수지 이름 부분을 더블 클릭하면 Moldflow 수지 DB가 나타난다. “Manufacturer”에서 수지 회사명을 선택하고 그리고 “Trade name”에서 수지명을 선택한다. 그리고 OK를 클릭하면 선택한 수지가 해석을 위한 수지로 선정된다.

해석의 정확성에 큰 영향을 주는 중요한 하나의 요소는 정확한 수지 데이터다. 따라서 정확한 수지를 선정하여야 하며, 동일한 수지가 DB에 없다면 수지업체에 문의하여 유사한 수지를 추천 받아서 사용한다.



▶ 수지 데이터의 물성 품질 등급, 재활용 분류등급 및 에너지 등급

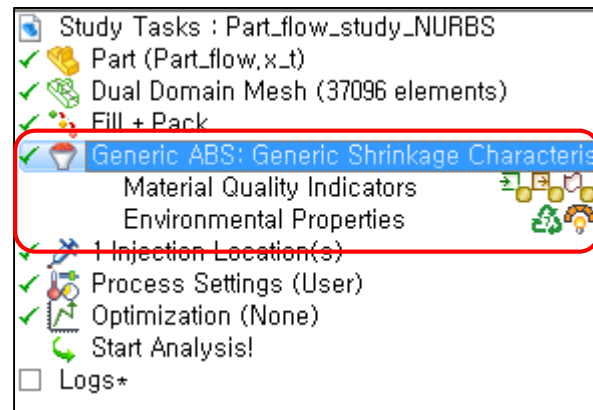
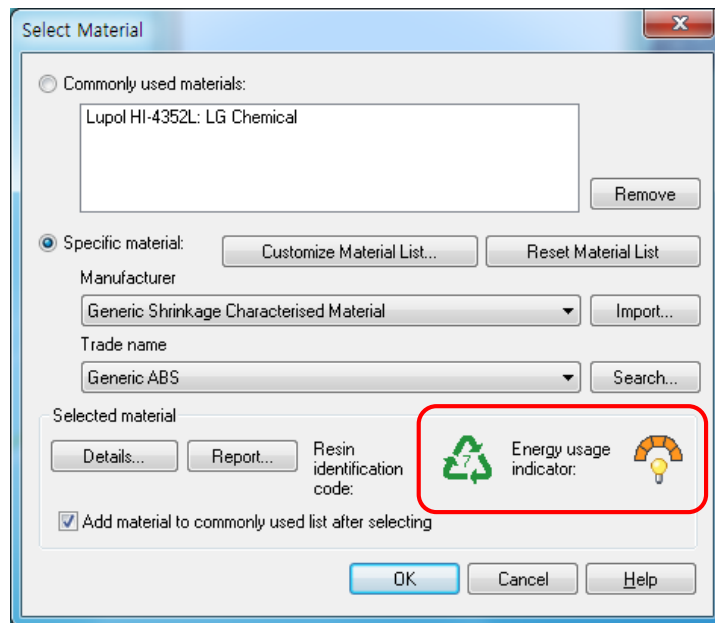
수지 데이터의 정확성은 해석 결과의 신뢰성과 직결된다. 그러나 사실 Moldflow DB내의 많은 수지들이 해석을 위한 최상의 물성 데이터들을 갖고 있지 못한 경우가 있다. 직접 측정된 데이터가 아닌 경우, 측정 방법이 적합하지 않거나 정보가 없는 경우, 측정 된지 오래된 경우 등이 그러하다.

이러한 기준으로 Fill, Pack, Warp 해석에 대한 등급을 Gold, Silver, Bronze 로 부여하였다.

각 해석 단계의 수지 물성 품질 판정의 판단 대상이 되는 물성데이터는 아래와 같다.

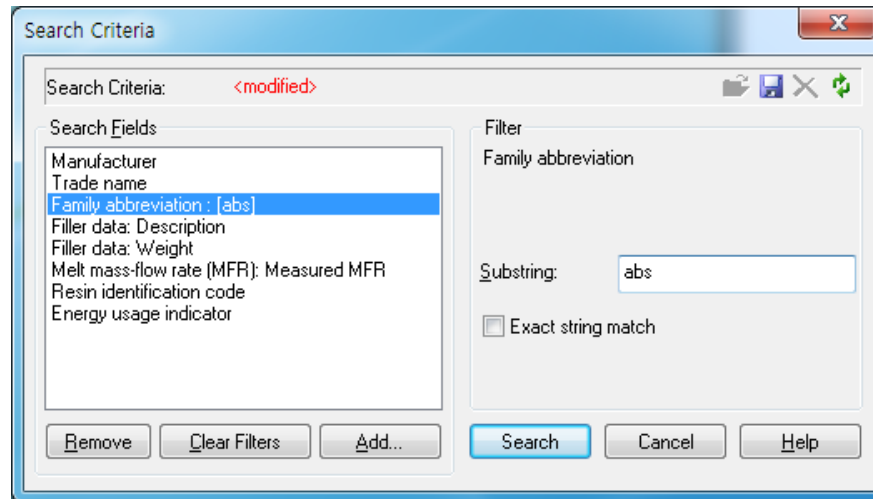
- Fill : viscosity, cp, thermal conductivity
- Pack : PVT
- Warp : CRIMS or residual strain, mechanical properties

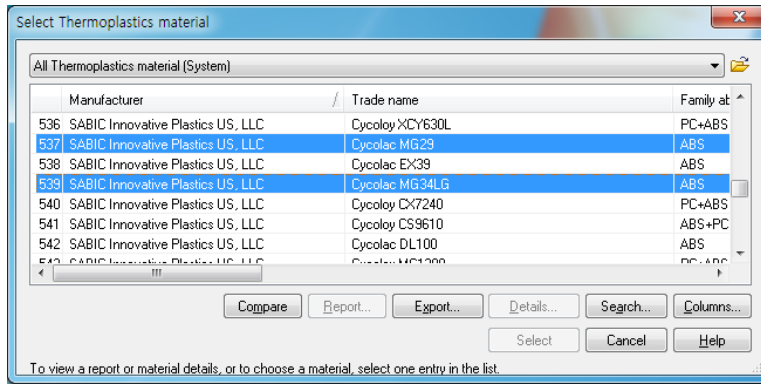
또한 환경적 측면에서 선택된 수지가 재활용 될 경우에 사용될 수 있는 분류 번호가 표기되어 있으며, 선택된 수지를 이용하여 제조되는 과정에 예상 에너지 소모량을 가지고 에너지 등급이 표기 되었다.



▶ 수지 찾기

수지를 정확히 알 수 없는 경우에는 “Search” 기능을 이용하여 여러 가지 선정기준으로 희망하는 수지를 DB에서 찾을 수 있다. 또한 이러한 Search 도구에 의하여 나열된 수지들의 데이터를 비교하고 싶다면 Ctrl 키를 이용하여 2개 이상의 수지를 선택한 다음 “Compare” 버튼을 클릭하면 수지 데이터 비교 List가 나타난다.

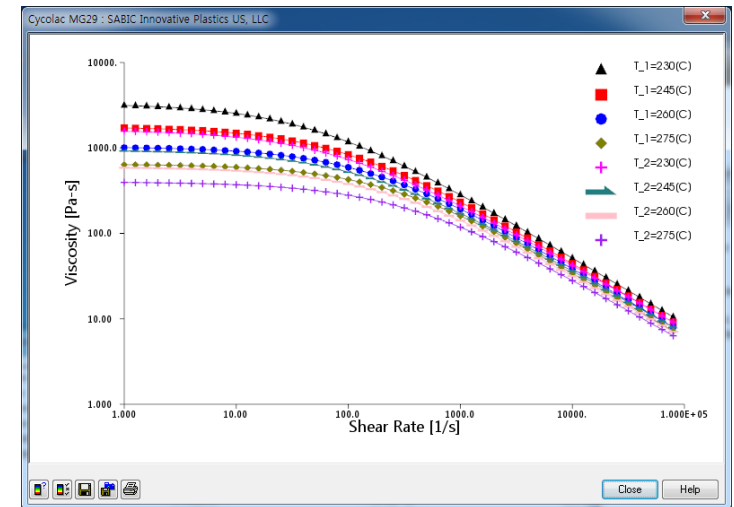
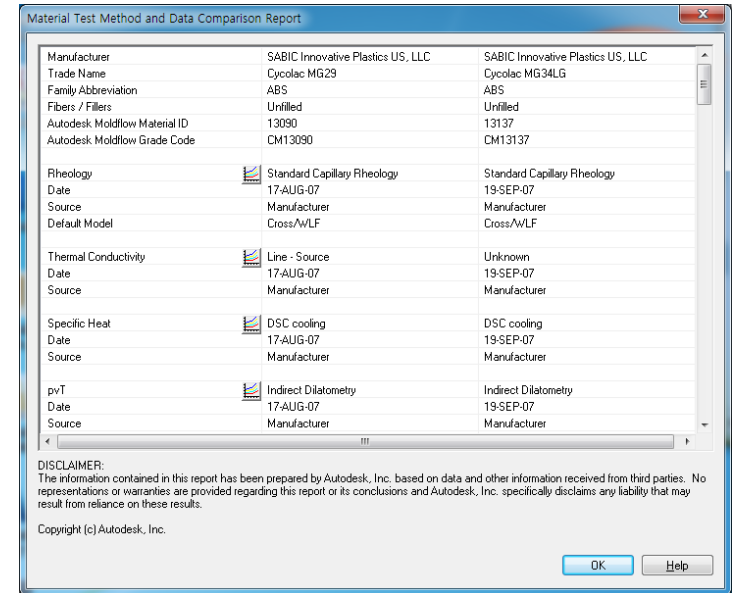
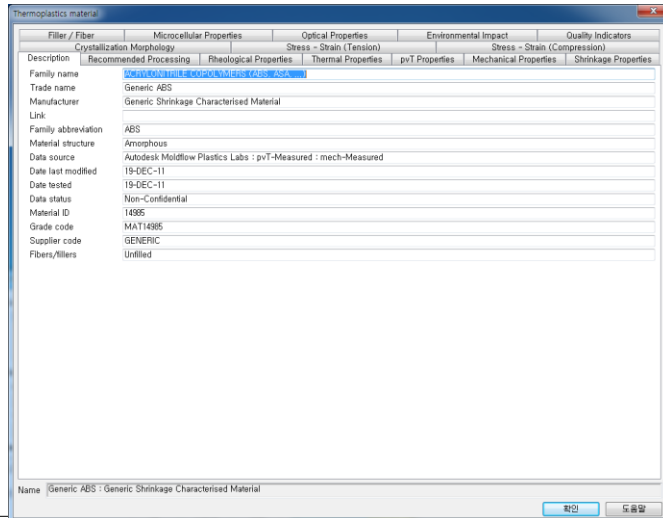




▶ 기타 기능

Details : 각각의 수지들의 상세한 정보를 볼 수 있다. Rheological properties, Thermal properties, PVT, Mechanical properties 등의 정보를 얻을 수 있다.

Reports : 각각의 수지의 데이터의 측정 이력이다. 언제 어디서 누가 어떻게 측정하였는가를 알 수 있다.



3-10) 공정조건 설정하기

유동해석 이론 부분에 대부분의 설정 값에 대한 설명을 하였으므로 상세한 설명은 생략합니다.

Mold Temp. : 수지 DB에서 추천되는 값이 default로 나타난다.

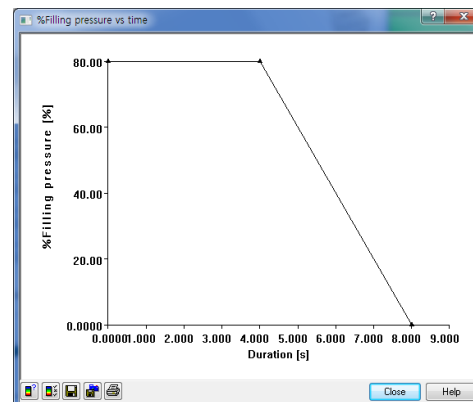
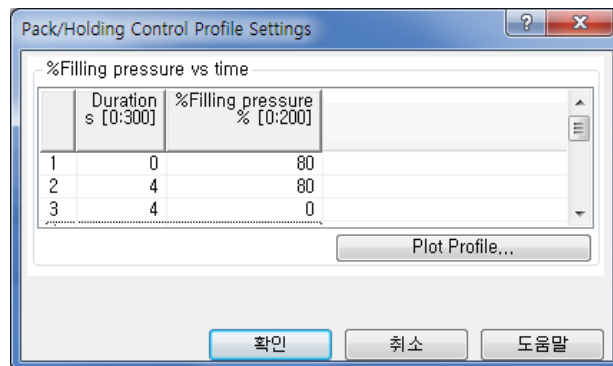
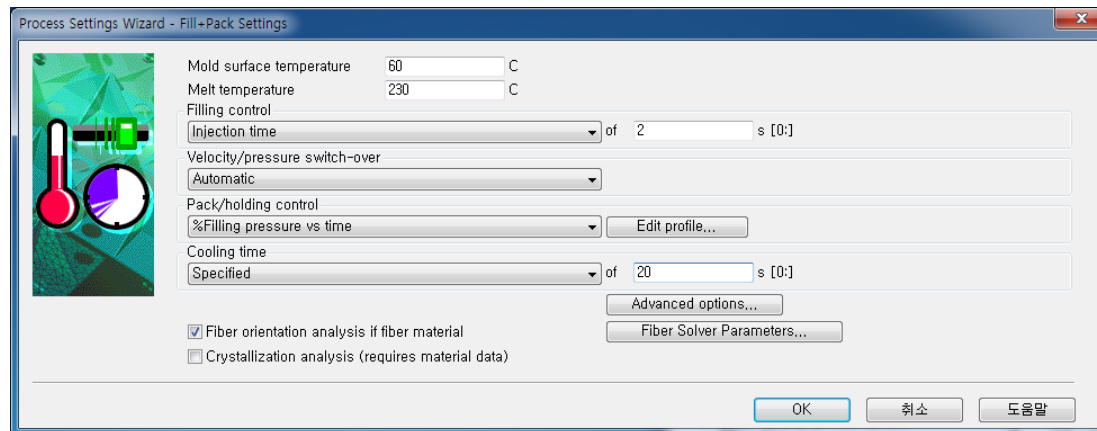
Melt Temp. : 수지 DB에서 추천되는 값이 default로 나타난다.

Filling Control : Injection Time 을 설정한다.

Velocity/Pressure switch-over : 보압 전환 위치이다.

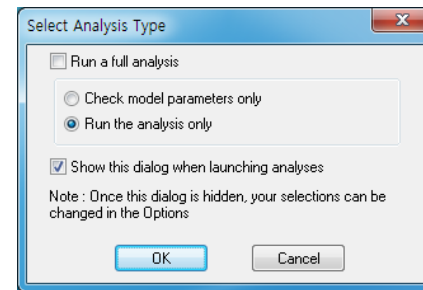
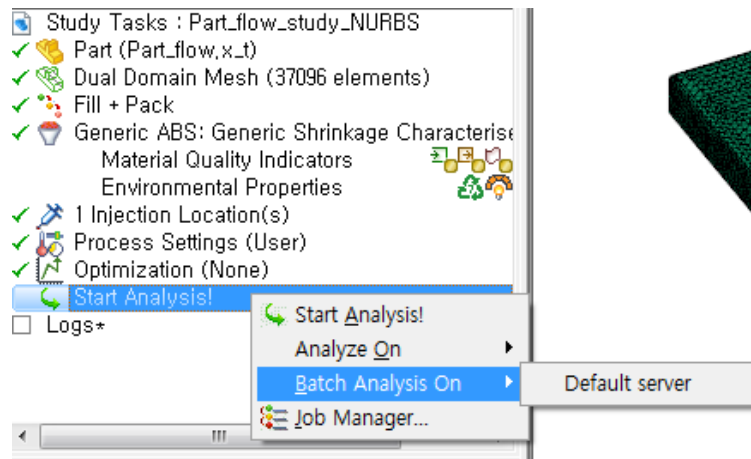
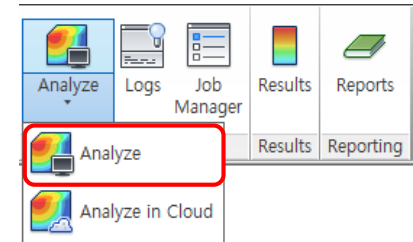
Packing /holding Control :보압 구간의 시간과 크기를 입력하는 곳이다.

Cooling Time : 냉각 구간의 시간을 설정한다.



3-11) 해석 실행하기

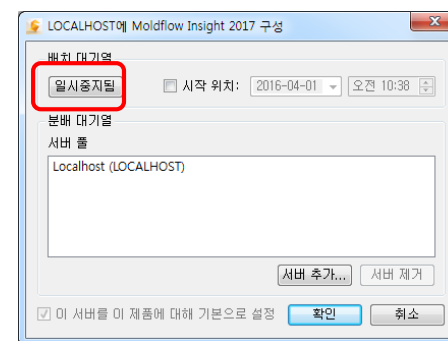
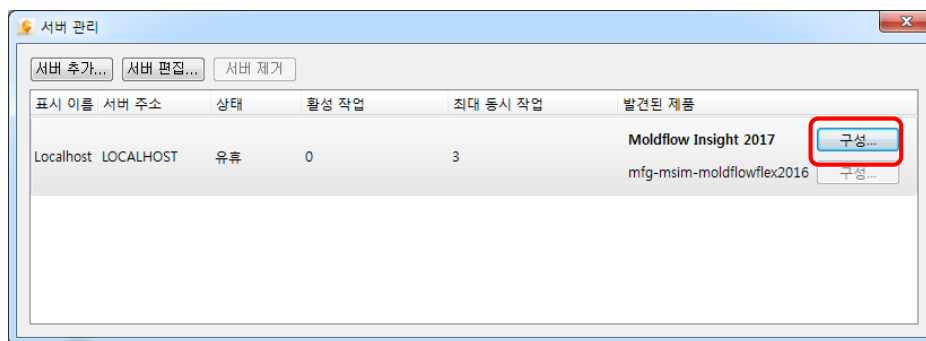
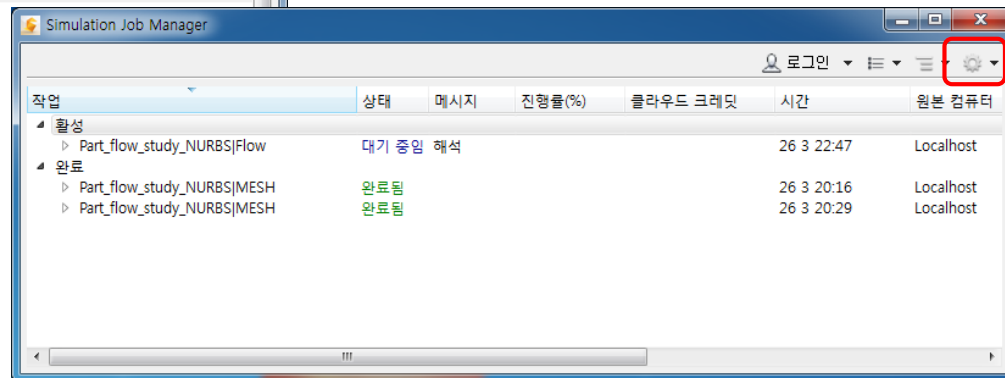
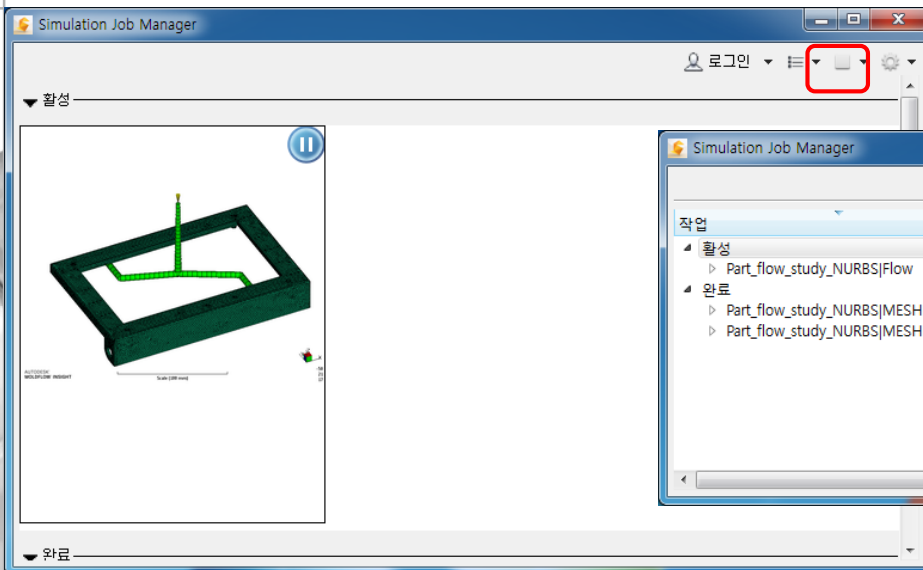
Study Tasks에 모든 항목들의 설정이 완료되면 “Analysis”가 활성화되는데 이를 “Simulation Job Manager”에 넘겨서 해석을 진행하게 하여야 한다. Job Manager를 실행하기 전에 해석을 Local장비에서 진행할 것인지 아니면 Cloud에서 진행할 것인지를 먼저 선택하여야 한다. 실습에서는 “Analyze in Local”를 선택한다. Cloud를 이용하여 해석을 진행하기 위해서는 Autodesk 계정으로 먼저 Login하고 Credit를 구매하여야 한다. 해석의 범위에 따라 필요한 Credit의 수량은 달라진다.



“Start Analysis”를 마우스로 선택하고 오른쪽 버튼을 눌러서 “Batch Analysis On”을 실행시키거나 << Analysis -> Job Manager >>를 통해 실행시킬 수도 있다.

해석을 수행시키는 방법은 2가지가 있는데 “Analysis On”와 “Batch Analysis On”이다. “Analysis On”은 해석을 즉시 수행하게 할 때 사용하며, “Batch Analysis On”의 경우는 해석을 순차적으로 진행하고자 할 때 사용한다. “Analysis On”을 이용하여 동시에 너무 많은 해석을 수행하게 되면 라이선스 부족에 의하여 해석이 중단되거나 해석장비에 부하가 증가하여 해석이 느려지게 된다. 항상 “Batch Analysis On”을 이용하여 동시에 해석할 수 있는 해석 수를 지정하여 순차적으로 해석이 진행되게 하는 것이 바람직하다.

“Batch Analysis On”를 클릭 후 “Default server”를 클릭하면 “Select Analysis Type”창이 나타난다. 여기서 “Run a full analysis”를 선택하면 해석 전에 해석모델의 이상 유무를 확인한 다음 해석을 진행하고, 선택 해제하면 확인절차 없이 해석을 수행하게 된다.

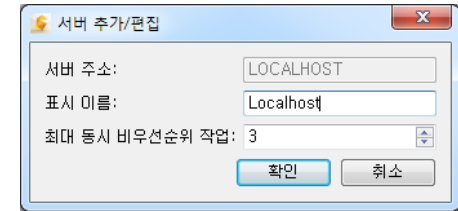


Job Manager 창에서 Job의 뷰를 “큰 아이콘”에서 “리스트”로 변경하였으며, “Batch”를 실행하기 위해서는 먼저 Job Manager 창의 우측 상단에서 “서버 관리”를 클릭한다. 다시 서버 관리 창에서 해석에 사용하고자 하는 Moldflow 버전의 “구성”을 클릭한다. 마지막으로 구성 창에서 “일시 중지됨”을 클릭하면 Batch 작업들이 실행된다. 또한 해석을 중단하기 위해서는 Job Manager 기본 창에서 study 이미지 또는 이름 위에서 마우스 우측 클릭을 하여 “취소”를 실행하면 된다.

▶ 서버 편집

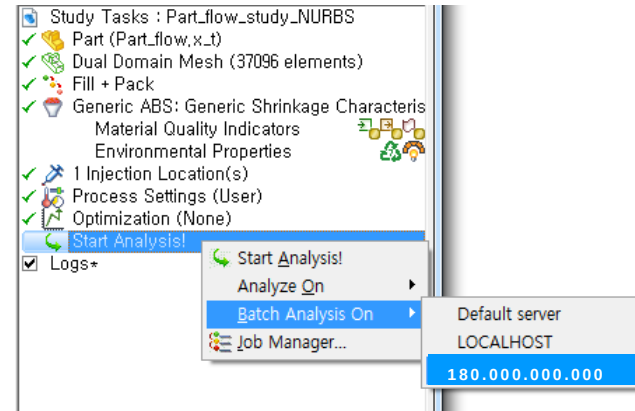
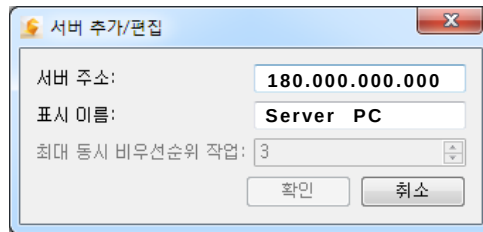
Batch로 해석 잡을 을 수행하는 경우 동시 최대해석 가능 수가 3개로 고정되어 있다. 이것은 1개의 Solver 라이선스로 해석 가능한 최대 수이기 때문이다. 하지만 라이선스가 충분하고 해석 장비의 성능이 충분한 경우에는 동시 최대해석 가능 수를 증가할 수 있다.

이 경우 서버관리 창에서 “서버편집”을 클릭하여 변경할 수 있다.



▶ 서버 추가

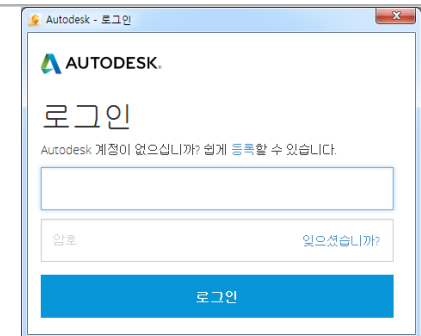
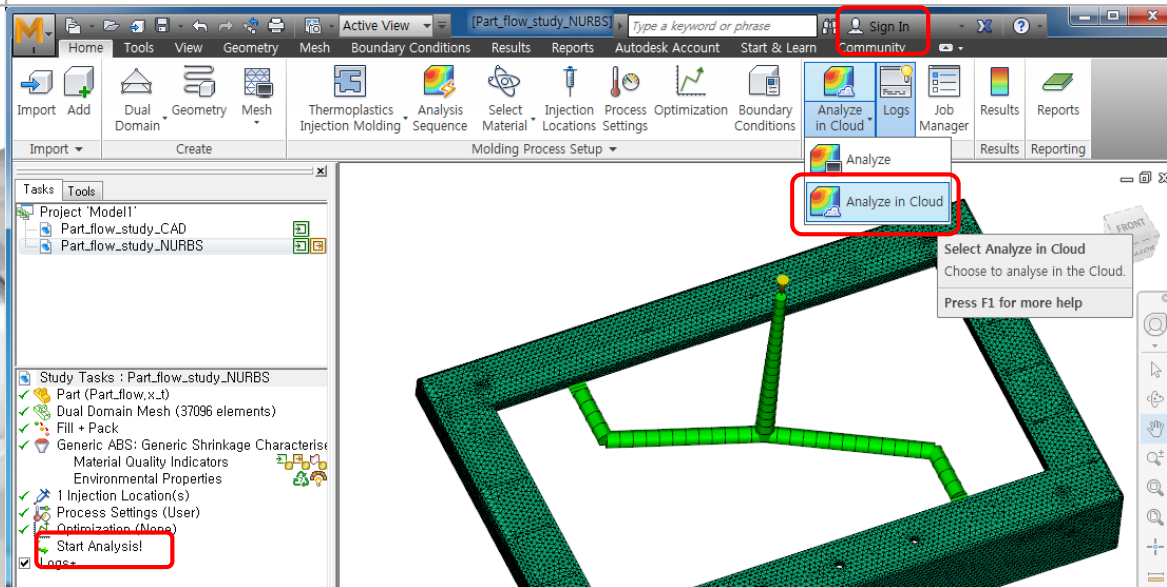
Moldflow는 Local에서도 해석이 가능하지만 Server를 이용한 해석도 가능하다. Server를 이용하여 해석을 수행하고자 하는 경우 서버관리 창에서 “서버 추가 ” 를 클릭하여 서버IP와 표시 이름을 입력한 후 “확인”을 클릭하면 새로운 서버가 서버관리 창에 나타난다. 새로운 서버를 이용하여 해석을 진행하기 위해서는 Task창에서 <<Start Analysis-> Batch Analysis On-> 서버 주소>> 를 클릭하면 된다.



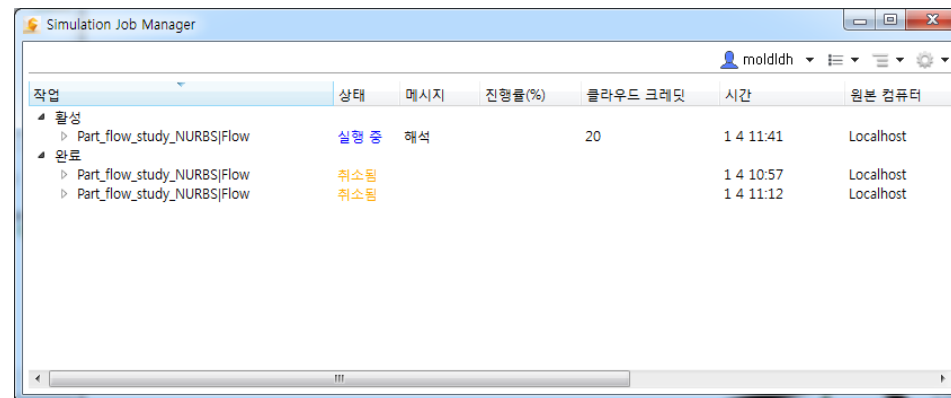
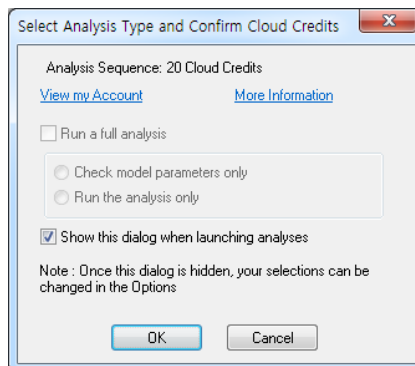
▶ Cloud를 이용하여 해석하기

Moldflow는 Local, Server 그리고 Cloud를 이용한 해석을 모두 지원한다. 물론 Cloud를 이용하기 위해서는 Autodesk Account를 가지고 있어야 한다. 그리고 Cloud Credit를 구매하여야 한다. 해석에 필요한 기본 Credit은 20개 이다. 예를 들어 “Flow”를 수행하면 20 Credit이 사용되고, “Cool + Flow +Warp”을 수행하면 60 Credit이 사용된다.

Cloud를 이용한 해석을 수행하기 위해서는 Synergy창에서 Analysis 형태를 “Analyze in Cloud”를 선택하고 “Sign In”을 이용하여 Autodesk Account에 로그인 하여야 한다.



마지막으로 “Start Analysis”를 더블 클릭하면 Select Analysis Type창에서 해석에 사용되는 Credit을 확인하게 한다. 다시 “OK”를 클릭하면 해석 모델이 Cloud로 업로드 되고 해석이 진행된다. 해석이 완료되면 모든 해석 결과는 로컬 장비로 복사된다.



4. 유동해석 결과

4-1) 해석의 완료

해석이 이상 없이 완료되면 몇 가지 변화가 나타난다.

▶ Project View

해석이 완료되면 우측 그림과 같이 Fill과 Pack 아이콘이 각각의 색상으로 표시된다..

▶ Study Tasks

해석 결과 목록이 우측 그림과 같이 Study Tasks에 나타난다.

▶ Project Fold

해석 결과는 완료 되기 전이라도 중간 결과를 계속 Study Tasks에서 관찰 할 수 있다. 이는 해석 진행시 temp fold의 중간 결과 파일들을 계속적으로 project fold로 복사해주는 때문이다.

해석 결과의 중요한 파일 목록을 아래에 나타내었다.

.of1: Air Trap과 Weld Line 을 제외한 일반 충전 해석 결과

.of2: Air Trap과 Weld Line 충전 해석 결과

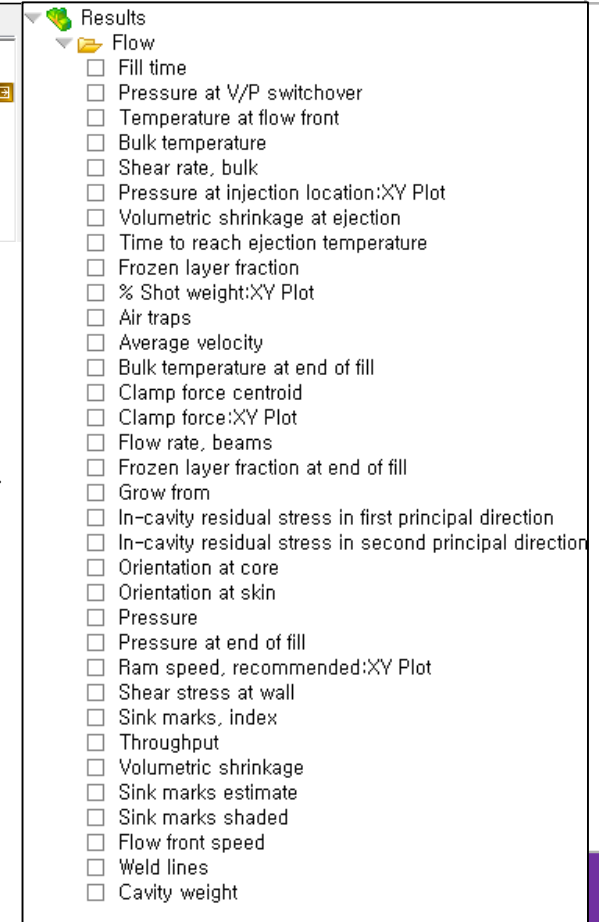
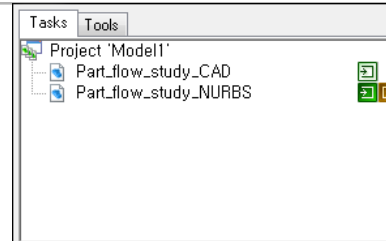
.op2: 보압 해석 결과

.oc1: 냉각 해석 결과

.ow3: 변형 해석 결과

.rsp : 재 시작 파일

.rsp 의 경우는 해석이 완전히 끝난 이후에는 삭제해도 된다. 그러나 이 파일이 없는 경우는 해석 조건이 일부만 변경되어도 항상 해석 순서의 처음부터 다시 해석이 진행된다. 일반적으로 이 파일은 용량이 상당히 크므로 해석이 끝난 이후에 직접 fold에서 삭제 하던지 아니면 <<Project -> Compact >>를 클릭하여 삭제하면 HDD공간을 절약할 수 있다.



4-2) 해석 결과의 종류

여러 가지 형태의 해석 결과들이 제공된다.

▶ Screen Output

해석 진행 과정의 모든 자료를 제공한다. 수지물성, 사출조건, 제품체적, 충전, 보압 진행상황, 해석에 필요한 시간 그리고 해석에 문제가 있을 때는 그 이유를 보여준다. 해석이 도중에 중단되었다면 그 이유를 Screen Output을 통하여 찾아내고 이를 수정한 다음 다시 해석을 진행하여야 한다.

▶ Regular Results

해석 결과들을 사이클 진행 시간에 따른 결과로 나타낸다. 즉 두께 방향으로의 결과는 동일하거나 평균값을 사용하는 경우이다. 이들은 시간에 따른 Animation 또는 X축을 시간으로 하는 XY Plot로 나타낼 수 있다.

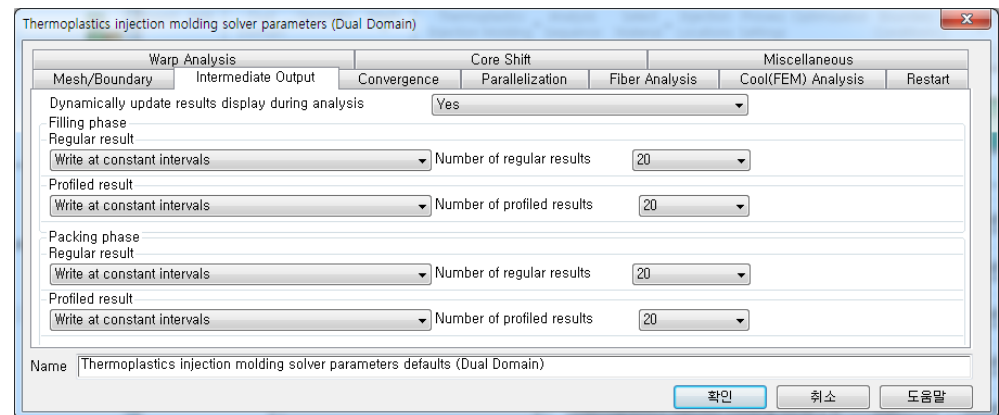
Ex) Fill Time, Bulk Temperature, Pressure, Injection Pressure

▶ Profiled Results

해석 결과들을 사이클 진행 시간 뿐만 아니라 두께 방향의 Normalized Thickness에 따른 Animation 결과로 나타낸다. 즉 두께 방향으로 다른 값들을 가지는 해석 결과들을 시간과 두께에 따른 Animation 또는 X축을 시간 또는 Normalized Thickness로 하는 XY Plot로 나타낼 수 있다.

Ex) Temperature, Velocity, Shear Rate

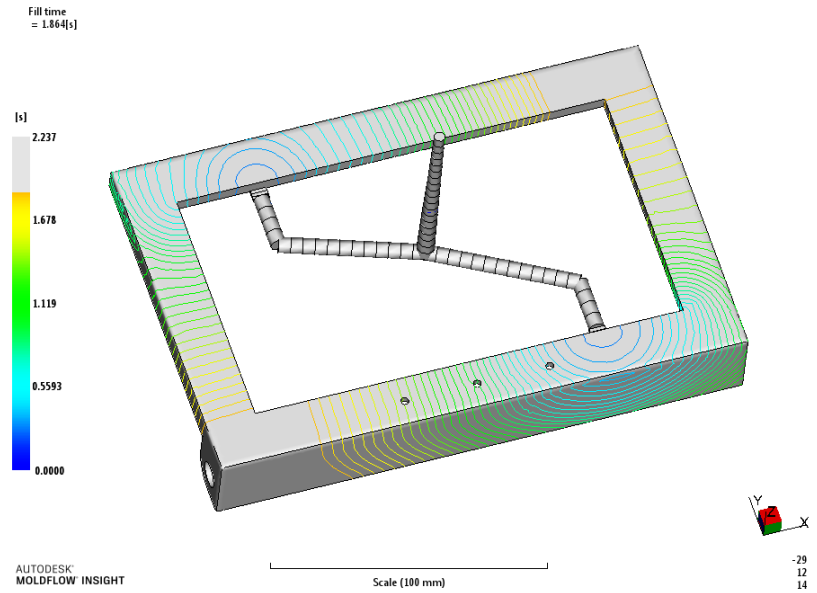
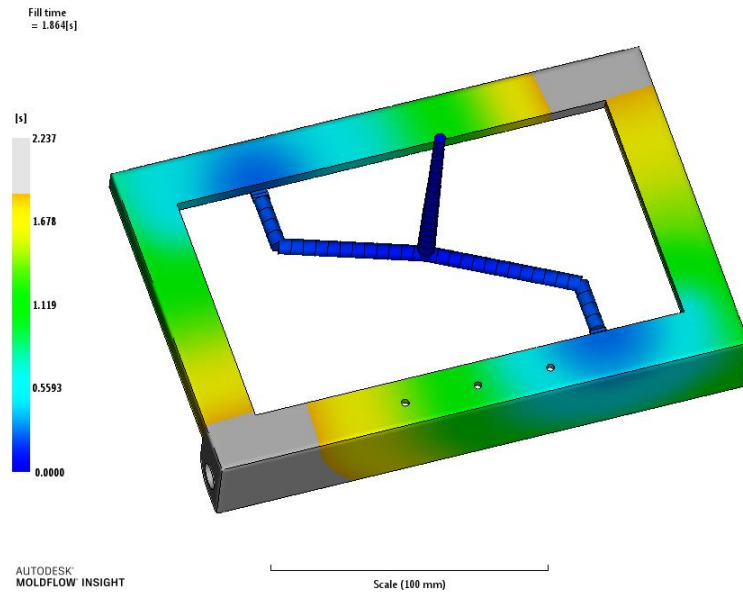
Regular Result 와 Profiled Result 의 Time Step 설정은 << Process Settings-> Flow Advanced Options -> Solver Parameter -> Intermediate Output>>을 클릭하여 설정을 변경할 수 있다.



4-3) 해석결과

► Fill Time

Fill time result는 시간에 따른 수지의 충전 패턴을 등고선을 이용하여 나타낸다. 같은 등고선상에 있는 부분은 같은 시간에 충전된 부분이며, 등고선은 실제 충전시간을 일정 등분으로 나눈 것이다. 따라서 등고선 간격이 좁은 영역은 넓은 영역에 비하여 수지 흐름 속도가 느린 곳이고 그렇지 않은 곳은 상대적으로 빠른 부분이다. 등고선 간격이 좁은 영역은 유동선단의 전진속도가 느리므로 유동선단 온도가 급격히 낮아진다. 심할 경우 정체현상에 의하여 미성형이 발생할 수도 있다. 그리고 이러한 유동선단이 서로 만나서 웰드라인을 형성하면 두꺼워진 고화층으로 인하여 웰드라인의 깊이가 증가한다. 또 유동패턴을 통하여 웰드라인의 위치와 접촉각 등을 확인 할 수 있다. 수지의 충전 과정은 Animation 도구를 이용하여 자세히 관찰 할 수 있으며, 상세한 관찰을 원한다면 << Properties-> Animation >>에서 Number of frame 수를 증가시킨다. Fill Time 결과는 Weld Line, Air Trap, Hesitation, Overpacking, Racetrack Effect, Underflow, Unbalanced Flow 등을 예측하거나 방지하는데 도움이 된다.



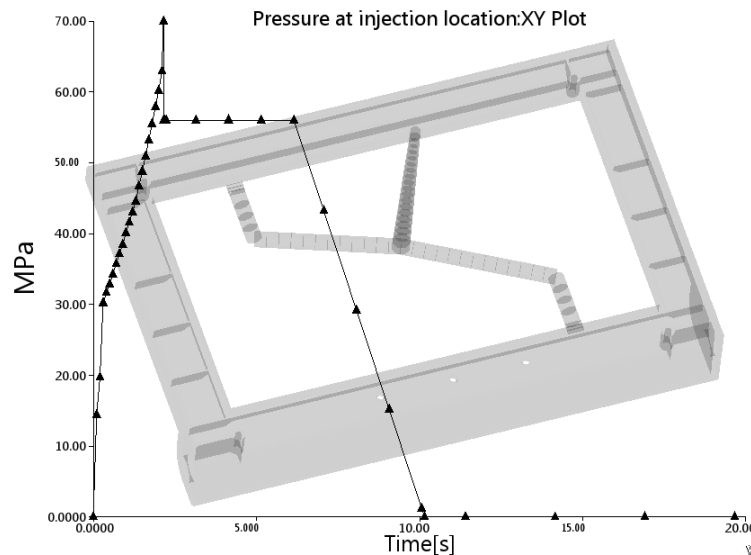
▶ Injection Pressure

Injection Pressure Result는 제품 성형시 요구되는 최대 사출압력이다. 사출성형은 충전+보압+냉각+취출의 사이클을 가지는데 충전 공정은 속도제어 구간이다. 따라서 충전 공정의 사출압력은 주어진 사출속도로 수지를 캐비티 끝까지 충전하는데 요구되는 압력이다. 만약 사출압력이 충분히 주어지지 않는다면 설정된 사출 속도로 수지를 제품 내부로 충전하지 못하고 미성형이 발생할 수 있다.

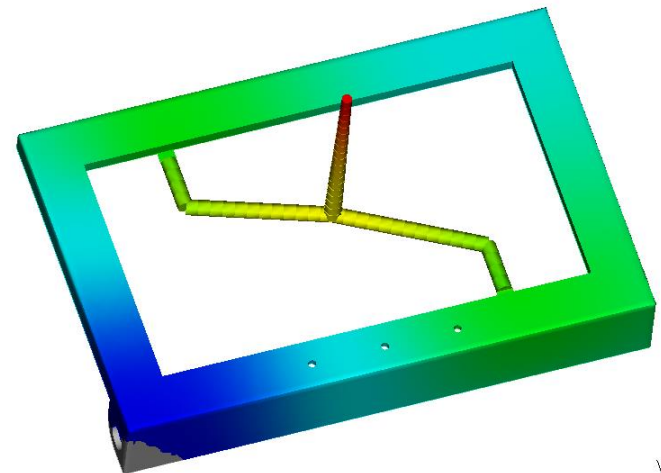
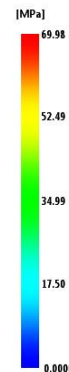
사출압력에 가장 큰 영향을 주는 변수는 수지의 유동성, 사출속도, 유동거리 그리고 제품두께이다. 사출속도에 따른 사출압력 변화는 일반적으로 U 커브를 가지며, 유동거리를 줄이는 방법은 게이트를 증가시키거나 유동 균형이 이루어지도록 게이트 위치를 조정하는 것이다.

여기서 사출압력의 단위는 MPa 인데 실제 현장에서는 Bar, Kg/cm², 또는 %압력(사출기 최대 사출압력에 대한) 사용하므로 주의하여야 한다. 그리고 일반적으로 성형은 사출기 최대 사출압력의 80% 이내에서 성형이 완료되도록 하여야 한다.

또한 사출압력은 러너시스템에서의 압력 강하와 캐비티 내의 압력 강하의 합으로 표현할 수 있다. 여기서 캐비티 내의 압력 강하가 크게 되면 게이트 부분에는 높은 압력이 가해지고 충전 말단 부분은 충분한 압력이 가해지지 못하게 된다. 이 경우 수축률 편차에 의한 치수문제, 싱크 문제 그리고 변형문제 등이 발생할 수 있다. 따라서 캐비티 내압이 높은 경우 게이트를 더 추가하여 유동 거리를 줄여야 한다.



Pressure at V/P switchover
= 69.98[MPa]



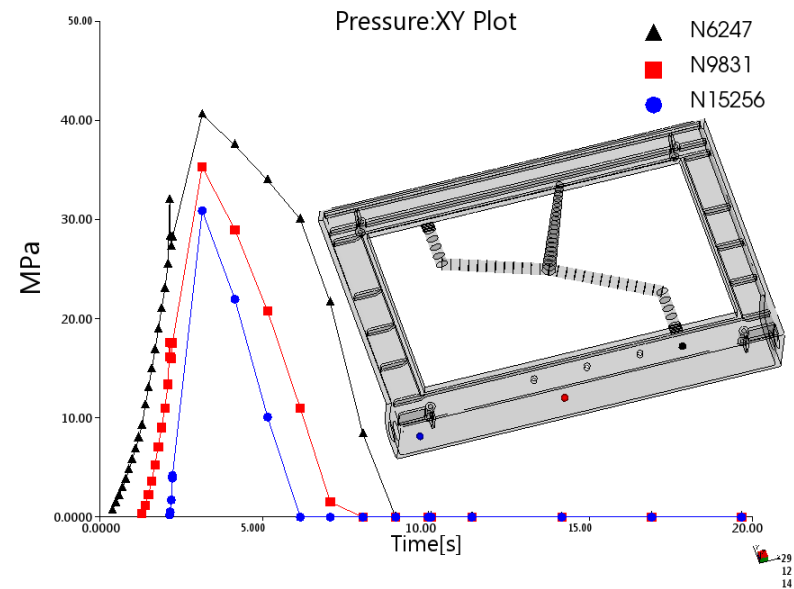
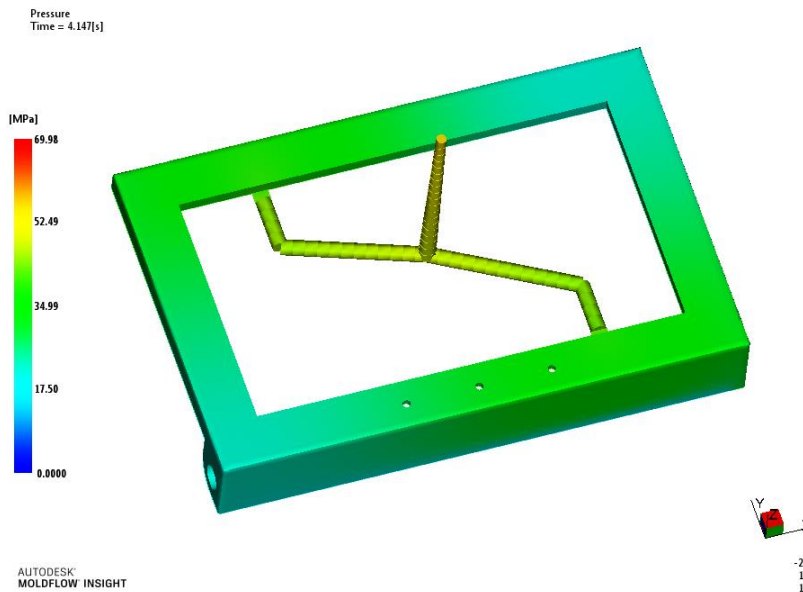
► Pressure

Pressure Result는 제품 성형시 캐비티 내부에 형성되는 압력을 시간에 따른 Animation 나타낸 것이다. 물론 Study Tasks창의 Result에서 New Plot를 선택하고 Pressure 결과를 XY Plot으로 나타낼 수도 있다.

압력은 모든 부분에 균일하게 전달 될 수록 수축률이 일정하여 치수 안정성이 높고 변형 발생 가능성이 감소 한다. 그러나 Pressure XY Plot에서 알 수 있듯이 일반적으로 게이트에 가까운 곳은 높은 압력 가해지고 그 반대의 경우는 충분한 압력을 받지 못한다. 따라서 수축률 편차가 발생한다. 이를 최소화 하기 위해서는 다단 보압을 적절히 활용하여야 한다. 또한 일반적으로 제품의 두꺼운 부분이 냉각속도가 느려 수축률이 크므로 이를 보충하기 위하여 게이트의 위치는 가능한 제품의 두꺼운 부분에 설치하여야 한다.

그리고 일반적으로 모든 부분은 보압의 끝난 직후에 cavity 내부 압력이 0 MPa에 도달하는데, 이는 수지 고화에 따른 수축으로 금형 벽면에 작용하던 압력이 없어졌기 때문이다.

또한 cavity의 Pressure XY Plot 결과로 부터 평균 캐비티 압력은 보압 초기에 가장 큰 것을 알 수 있으며 따라서 형체력(=투영면적 * Cavity 평균 내압)이 이 시점에서 최대가 될 것으로 예상된다.



▶ Clamp Force

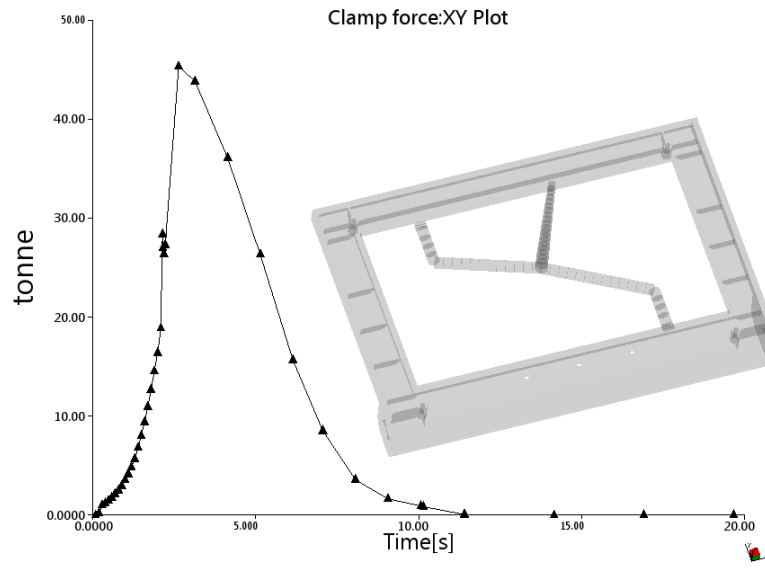
Clamp Force result는 사출성형 사이클 동안에 변화하는 cavity 내부의 평균 압력에 의하여 금형을 가동축으로 밀어내는 힘을 말한다. 형체력의 크기 F는 아래와 같은 수식에 의하여 계산된다.

$$F(\text{Clamp Force}) = \text{Cavity 내부평균압력} * \text{제품의 투영면적(XY 평면 면적)}$$

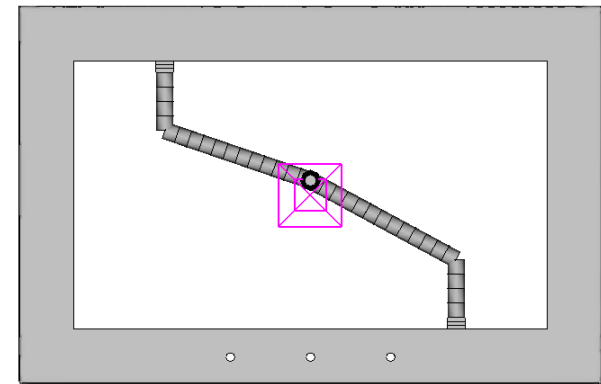
여기서 제품의 투영면적이 해석에서 정확히 반영되지 않으면 형체력 값이 상당히 다르게 계산될 수 있다. 정확한 투영면적 계산을 위해서는 반드시 제품을 XY평면상에 두고 sprue를 +Z축을 향하게 두고 해석을 진행하여야 한다.

일반적으로 형체력이 최고 값을 가지는 시점은 보압 초기이다. 이때가 캐비티 평균 내압이 최고이기 때문이다. 따라서 과도히 높은 보압은 대형제품(투영면적이 큰 제품)에서는 형체력을 크게 상승시킬 수 있으므로 적절한 초기 보압을 설정하여야 한다. Cavity의 내부 형체력은 안전률을 고려하여 사출 성형기의 최대 형체력의 80%를 초과하여서는 아니 되며, 초과할 경우 게이트 주위는 플래시(Flash)가 발생할 가능성 있고 유동 끝단 부분은 미성형이 발생할 수 있다.

또한 Clamp Force Centroid result는 최대 캐비티 내부 형체력시의 형체 압력 중심을 나타낸다. 이 중심이 금형 중심에 근접할 수록 금형의 편 마모현상이 줄어든다.



Clamp force centroid

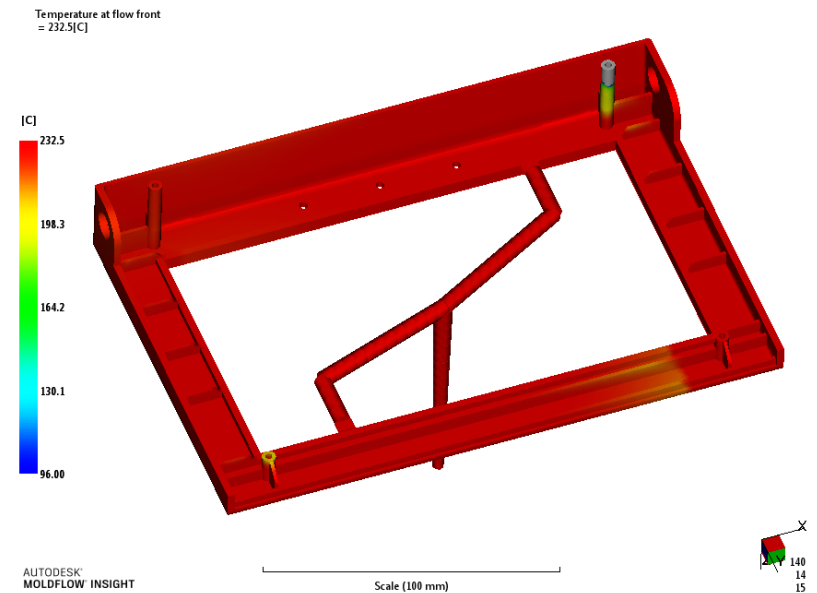
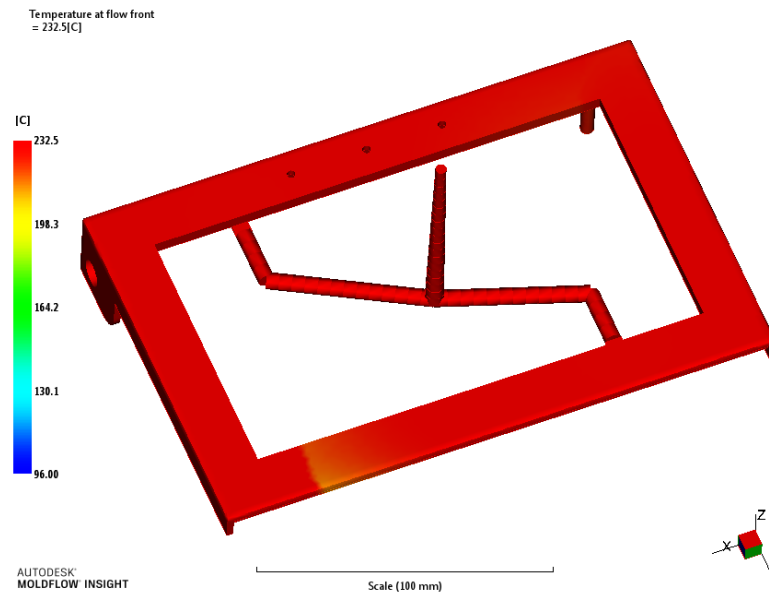


► Temperature at Flow Front

Temperature at Flow Front result는 수지가 제품 내부로 흘러갈 때 수지의 그 유동선단의 온도이다. 유동선단의 온도는 유동선단의 속도에 크게 영향을 받는데, 유동속도가 느려지면 수지의 유동선단이 금형과 접하는 시간이 길어져 열손실이 크고 전단열 발생이 적어지기 때문에 수지의 유동선단 온도가 크게 낮아진다. 따라서 적절한 충전 속도를 사용하여 유동선단 온도가 높아지거나 크게 낮아지지 않도록 하여야 한다. 그러나 유동 선단의 수지 흐름 속도는 제품의 형상과 두께에 크게 영향을 받기 때문에 다단사출을 적용한다고 하여도 유동선단 온도를 일정하게 유지하기는 쉽지 않다.

특히 두께가 주변에 비하여 상당히 얇은 부분의 경우 정체 현상에 의하여 유동선단 온도가 급격히 낮아져서 미성형이 발생할 수 있다. 또한 웰드라인이 형성되는 부분의 유동선단 온도가 낮게 되면 고화층 두께 증가로 인하여 웰드라인의 깊이가 증가한다.

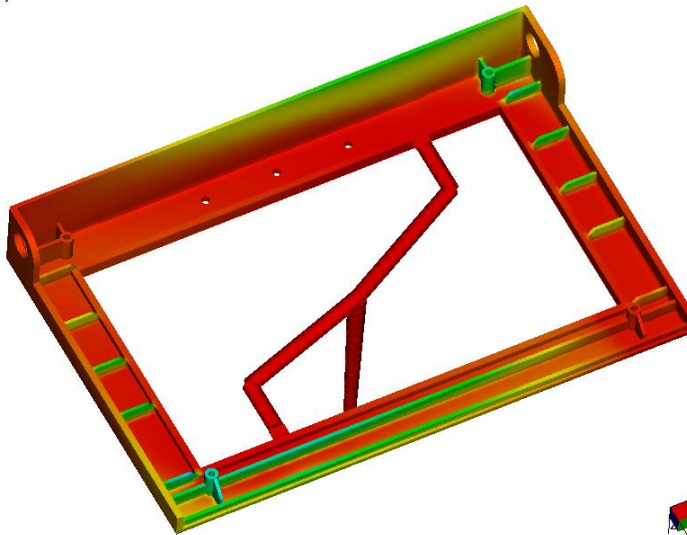
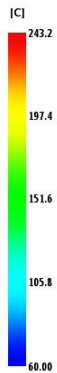
일반적으로 사출 성형시 수지 유동선단의 온도 범위는 수지DB 내에 정의 되어 있는 수지 Melt Temp. 구간 내에 존재하는 것이 좋고 그렇지 않다면 최소한 수지가 더 이상 흐르지 않는 온도 Transition Temp. 보다는 높아야 미성형이 발생하지 않는다. 특정 부분의 과도한 정체현상에 의하여 유동선단 온도가 급강하한다면 이 경우는 사출압력이 충분하여도 미성형이 발생하는 경우가 된다.



► Bulk Temperature

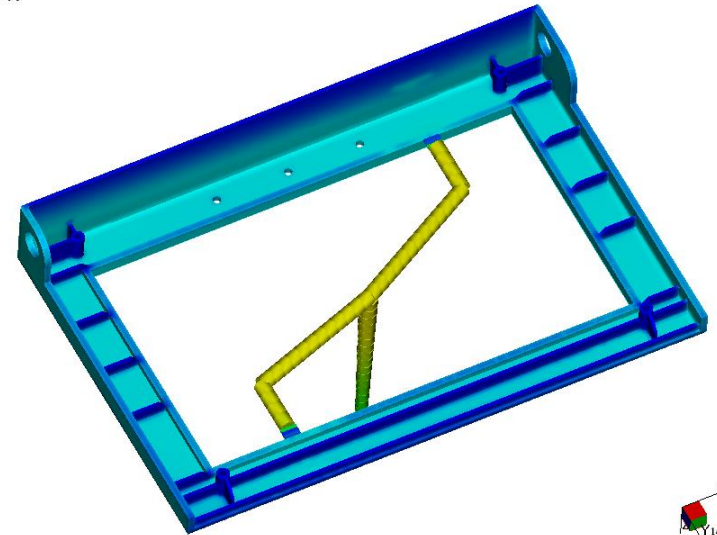
Bulk Temperature Result는 시간에 따른 제품 두께 방향의 수지 평균 온도이다. 평균 온도는 제품의 두께 뿐만 아니라 유동선단 속도에 따라서 크게 차이가 난다. 일반적으로 충전 구간에서는 두께가 얇아서 정체현상이 발생하는 일부 영역을 제외하고는 상당히 평균 온도가 높지만, 보압 구간에서는 수지 흐름에 의한 전단열 발생이 없고 열 손실만 존재하므로 평균 온도가 급격히 낮아진다. 따라서 평균 온도가 낮으면 정체현상과 미성형의 발생 가능성이 크고 평균 온도가 너무 높으면 수지가 열화될 수 있다. 또한 평균 온도가 영역에 따라 큰 차이를 보이게 되면 수축편차에 의한 변형이 발생할 가능성이 커진다.

Bulk temperature
Time = 2.237[s]



AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT

Bulk temperature
Time = 9.066[s]



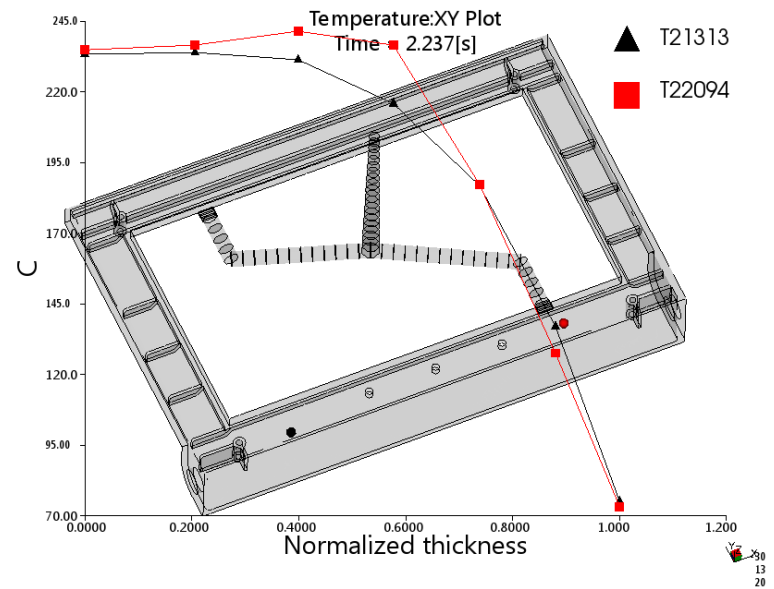
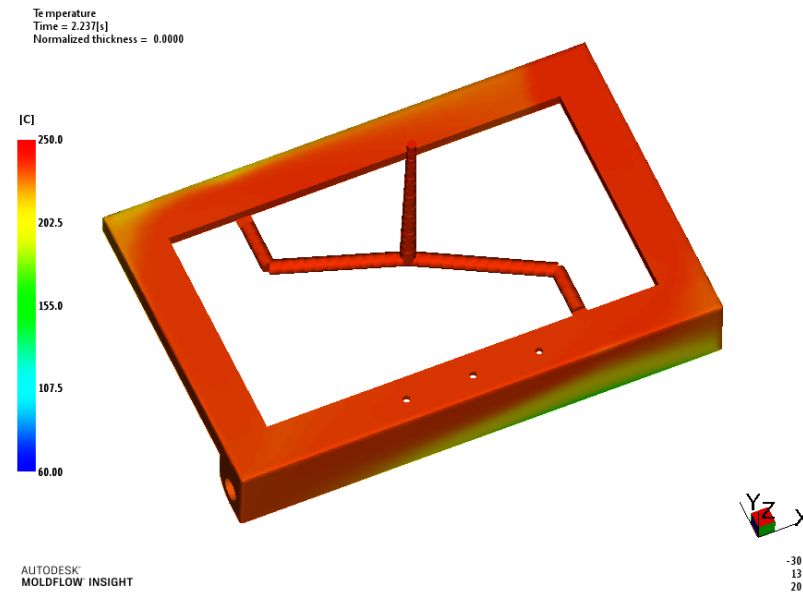
AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT

► Temperature

Temperature Result는 시간에 따른 제품 특정 두께 위치의 수지 온도를 Animation으로 나타내는 Profiled 결과이다. 그 특정 두께 위치는 Property에서 수정이 가능하다. 여기서 두께 위치를 나타내는 Normalized Thickness는 0에서 1 까지 범위인데 제품 중앙은 0이고 제품 외곽은 1이다.

또한 Study Tasks의 Results에서 New Plot을 선택하여 온도 결과를 XY Plot 나타낼 수도 있다. 이때도 마찬가지로 Normalized Thickness를 확인하여야 한다.

유동해석에서는 Normalized Thickness가 0에서 1까지 나타나지만 냉각해석 이후에 유동해석이 진행되었다면 그 범위는 -1에서 1이다. 이것은 냉각해석에 의하여 제품 양쪽의 금형 온도가 다르기 때문에 비대칭해석을 하기 때문이다.

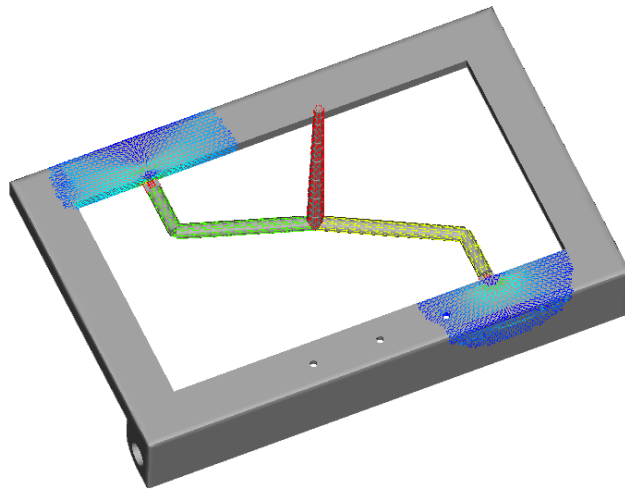


▶ Average Velocity

Average Velocity Result는 시간에 따른 수지의 흐름 방향과 그 속도를 수지가 완전히 고화될 때 까지 나타낸다. 일반적으로 충전을 동일한 속도로 하였을 경우 유동선단 면적이 좁은 게이트에서는 수지흐름 속도가 빨라 전단률(shear rate)가 상당히 크게 되며, 제품 내에서는 유동선단 면적에 반비례하여 속도가 변화한다. 이 결과를 통하여 실제 제품 내의 위치에 따라 수지의 흐름 속도가 어떻게 변하는지를 알 수 있으며, 시간에 따라 수지의 흐름 방향이 어떻게 변하는지 알 수 있다. 특히 2차 웰드라인을 예측하거나, 게이트에서 역류현상들을 파악하는데 사용된다. 또한 제품내의 일정하지 못한 유동 속도는 플로우 마크, 은줄 그리고 기타 가스 등에 의한 성형 불량을 유발할 수 있다.

Average velocity
Time = 0.600[s]

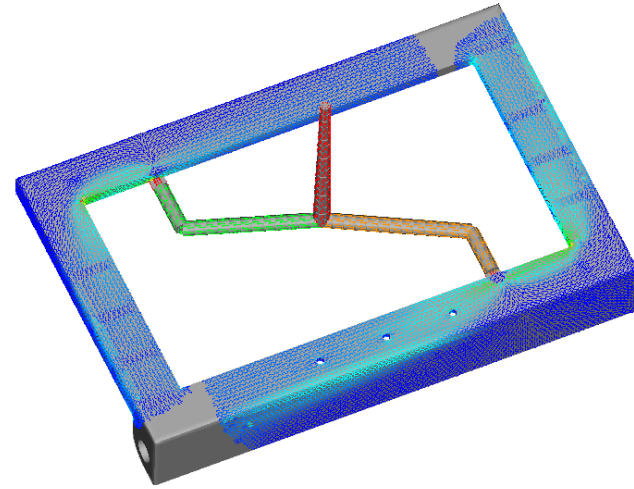
[cm/s]
80.00
60.00
40.00
20.00
0.0000



AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT

Average velocity
Time = 2.003[s]

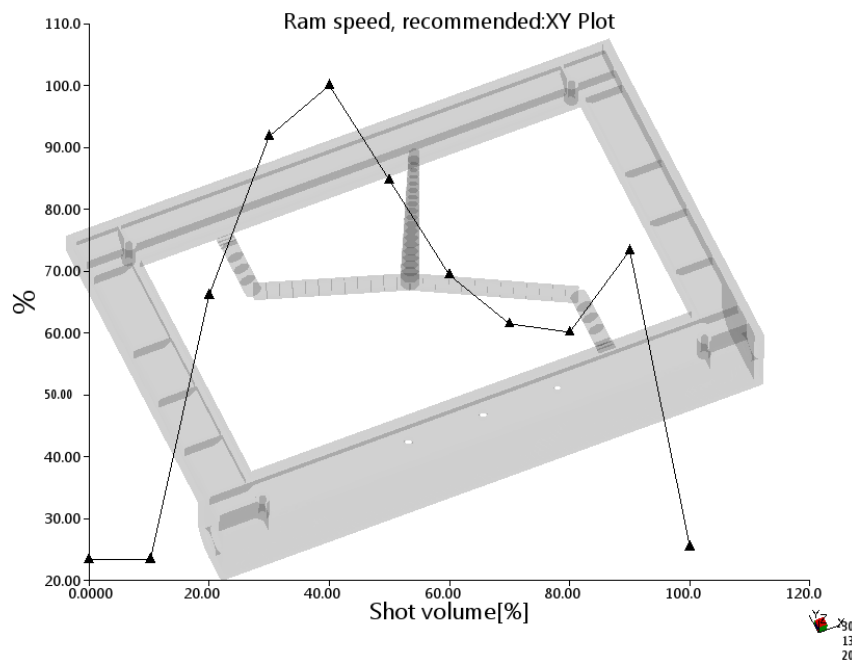
[cm/s]
80.00
60.00
40.00
20.00
0.0000



AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT

► Recommended Ram Speed Profile

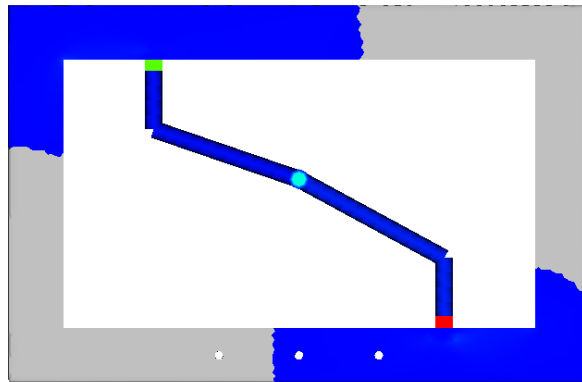
Recommended Ram Speed Result는 유동선단 면적을 고려하여 유동선단의 전진 속도를 일정하게 하기 위한 최적의 충전 Profile을 제공한다. 일반적으로 충전을 동일한 속도로 하였을 경우 유동선단 면적이 좁은 게이트에서는 수지흐름 속도가 빨라 전단률(shear rate)이 상당히 크게 되며, 제품 내에서는 유동선단 면적에 반비례하여 속도가 변화한다. 제품 내에서의 수지의 유동속도가 일정할 경우 수지의 유동선단 온도가 일정하게 관리되어 사출압력이 낮아지고, 플로우 마크, 은줄 그리고 기타 가스 등에 의한 성형 불량이 감소한다.



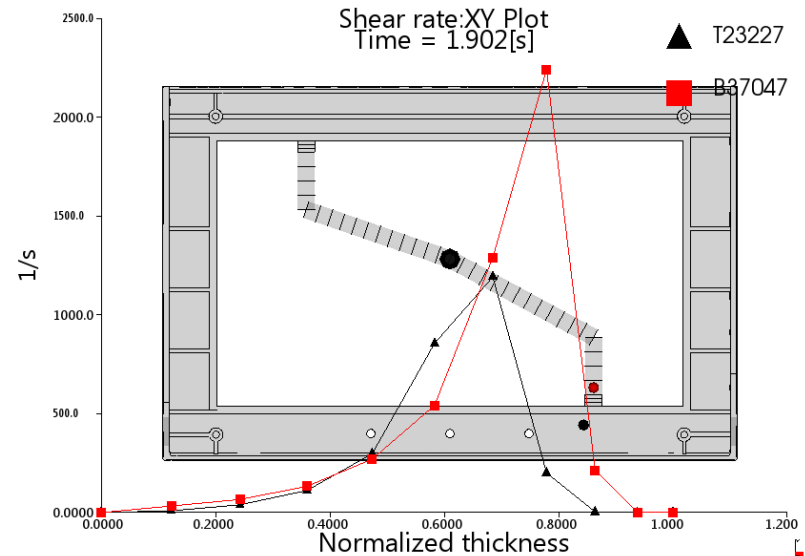
► Shear Rate, Bulk

Shear Rate, Bulk Result는 고화층과 유동층의 계면에서 수지의 흐름에 의하여 발생하는 전단률을 시간에 따라 나타낸다. 전단률의 크기는 수지의 흐름 속도와 제품 두께에 크게 의존한다. 따라서 일반적으로 유동선단 면적이 좁아서 속도가 가장 빠르고 두께도 얇은 게이트에서 전단률이 가장 크다. 그리고 전단률을 두께 방향으로 나타내면 수지의 유동층과 고화층 계면에서 가장 높음을 알 수 있다. 이러한 높은 전단률은 수지를 흐름 방향으로 배향되게 하고, 큰 전단열을 발생시켜 수지의 유동선단 온도를 상승시킨다. 또한 전단률은 온도와 더불어 수지의 점도에 큰 영향을 미친다. 일반적인 수지의 허용 최대 전단률은 수지 DB에 정의 되어 있는데 그 범위가 약 30000~50000 1/s 이다. 최대 허용치를 넘게 되면 고분자 체인 파손에 의한 물성저하가 발생하므로 게이트 형식 및 단면적 결정시 참고하여야 한다.

Shear rate, bulk
Time = 1.102[s]

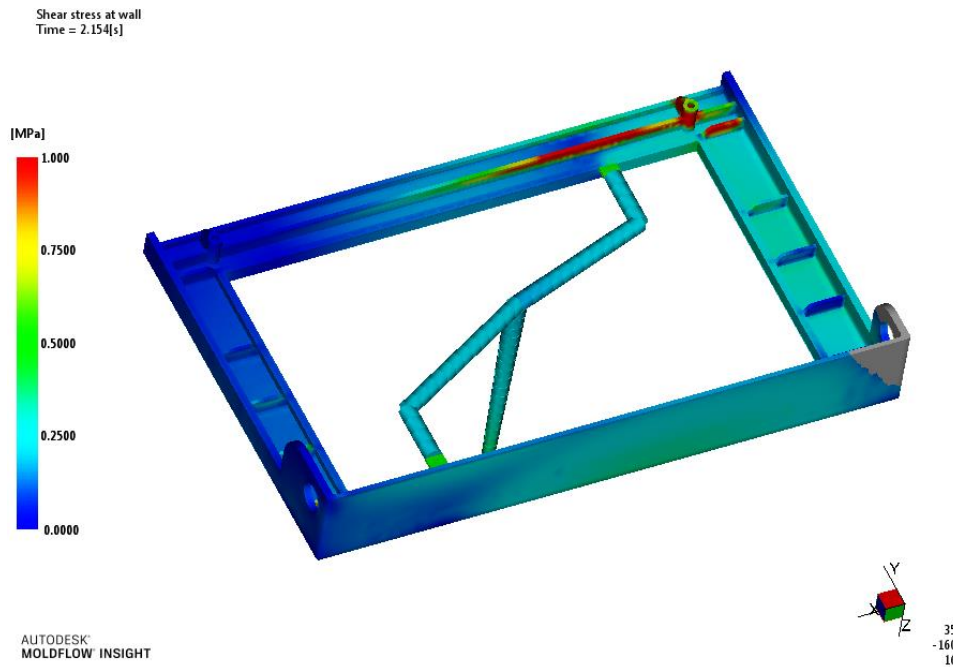


AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT



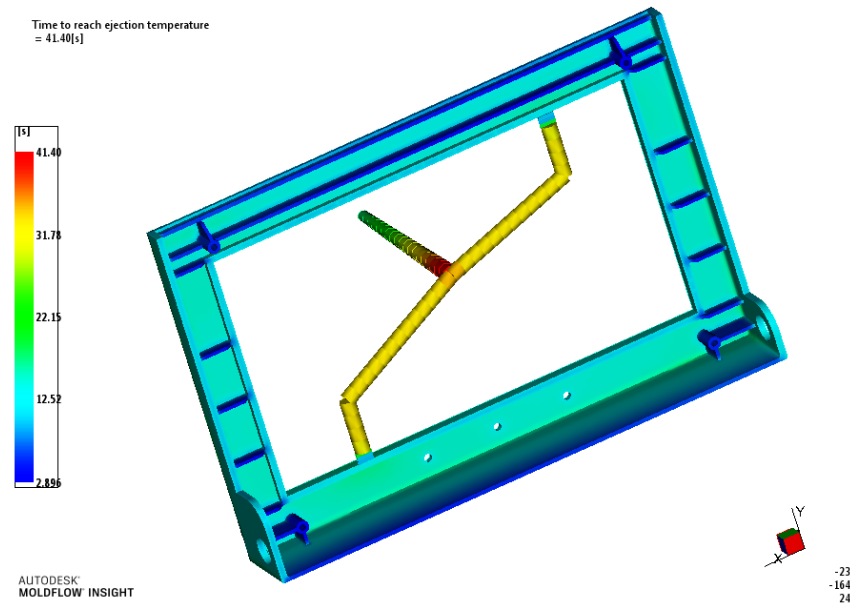
► Shear Stress at wall

Shear Stress at wall Result는 수지의 흐름에 의하여 발생하는 전단응력의 수지의 고화층과 유동층 계면의 값을 시간에 따라 나타낸다. 전단응력은 수지의 전단률과 점도에 비례한다. 즉 전단응력이 가장 큰 부분은 정체현상에 의하여 수지의 유동선단의 온도가 상당히 낮아진 상태에서 제품의 얇은 부분으로 빠른 속도로 밀려들어 갈 때 가장 크다. 따라서 일반적으로 전단응력이 가장 큰 부분은 게이트 주변의 두께가 얇은 부분이 된다. 일반적인 수지의 허용 최대 전단응력은 수지 DB에 정의 되어 있는데 그 범위가 약 0.3~0.5 Mpa 이다. 최대 허용치를 넘게 되면 수지의 물성저하가 발생하여 추출과정 또는 사용 중에 작은 충격에 의해서도 크랙이 발생하기 쉽다. 따라서 수지의 유동선단의 온도가 크게 낮아지지 않도록 제품 두께, 사출조건 또는 게이트 위치 선정에 유의 하여야 한다.



▶ Time to reach ejection temperature

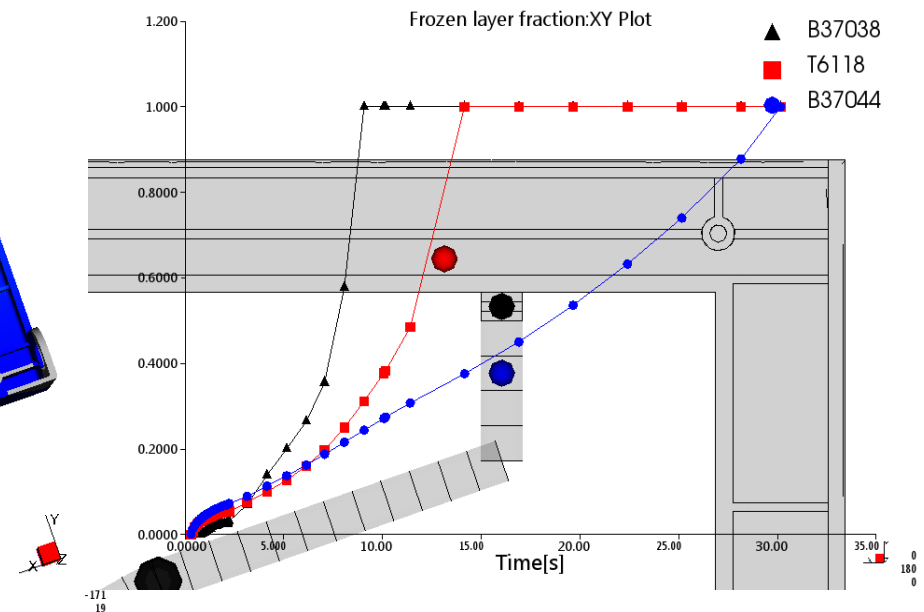
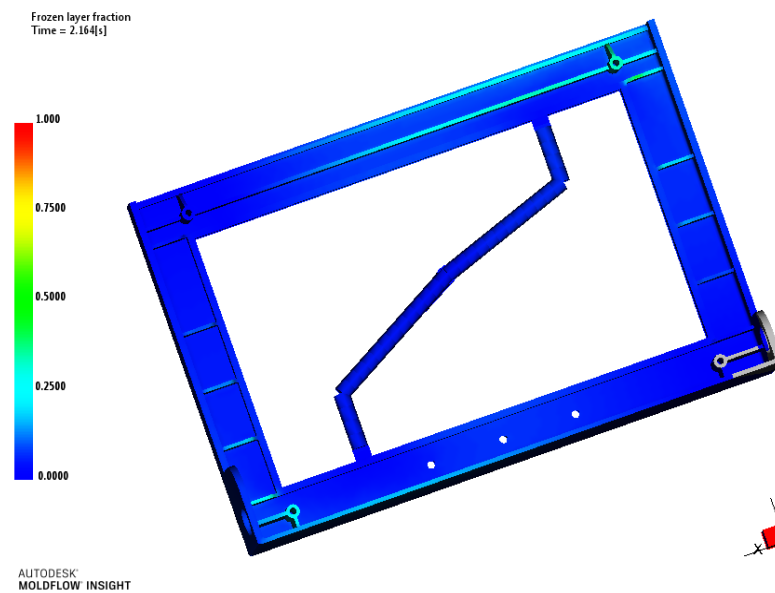
Time to reach ejection temperature Result는 수지의 충전 시작 직후부터 수지가 취출 온도까지 냉각되는데 요구되는 나타낸다. 여기서 취출 온도는 수지 DB에 정의되어 있는 Ejection Temp.이다. 이 결과는 성형 사이클 시간을 예측하는데 가장 유용한 결과인데, 일반적으로 제품은 80~90%, 러너는 50~60% 냉각이 이루어지면 취출이 가능하다고 한다. 따라서 전체 사이클 시간은 제품과 러너의 추출 가능 시간 중 긴 것과 금형 개폐 시간을 합한 것이 된다. 대부분의 경우 상대적으로 얇은 제품은 빠르게 고화되지만 상대적으로 직경이 큰 러너의 고화시간은 너무 길어서 사이클 시간이 증가하는 경우가 많다. 따라서 적절한 직경의 cold runner를 사용하여야 하며, 필요 시 hot runner로 변경하는 것도 고려하여야 한다. 또한 제품의 특정 영역에서 고화시간이 너무 길다면 싱크 마크 또는 수축을 편차에 의한 변형 가능성이 크게 되므로 적절한 두께로 설계 변경을 하여야 한다.



▶ Frozen Layer Fraction

Frozen Layer Fraction Result는 시간에 따른 제품 두께 방향의 고화 정도를 나타낸다. 여기서 1의 의미는 두께 방향 100%의 수지가 모두 Transition Temperature에 도달하여 고화된 것을 나타내고 0은 그 반대이다. 일반적으로 충전 구간에서는 두께가 얇아서 정체현상이 발생하는 일부 영역을 제외하고는 상당히 고화 정도가 작지만, 보압 구간에서는 수지 흐름에 의한 전단열 발생이 없고 열손실만 존재하므로 고화가 급격히 증가한다. 따라서 충전 과정에서 고화 정도가 크다는 것은 유동 정체에 의하여 유동선단 온도가 급격히 강하한 부분을 의미한다. 또한 Frozen Layer Fraction이 영역에 따라 큰 차이를 보이게 되면 수축편차에 의한 변형이 발생할 가능성이 커진다.

또한 Frozen Layer Fraction 결과를 XY Plot로 나타내면 시간에 따른 정확한 고화 진행 상황을 알 수 있는데, 특히 보압 시간 설정을 위한 게이트 고화시간, 사이클 시간 판단을 위한 러너와 제품의 고화시간 등의 예측에 사용될 수 있다.

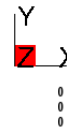
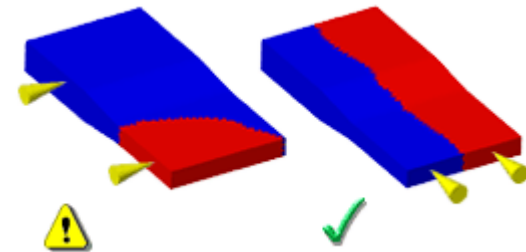
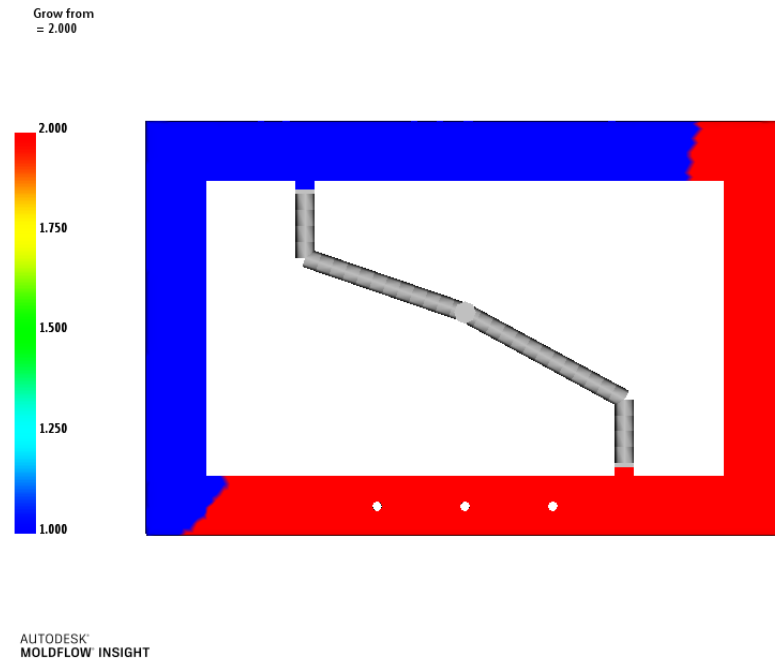


▶ Grow From

Grow From Result는 여러 개의 게이트가 있을 경우 각 gate에 의하여 충전된 영역을 각각 다른 색으로 나타낸다.

이 결과는 수지의 유동이 균형되게 충전 되었는가를 판단하는데 사용된다. 충전 균형이 이루어 지지 않으면 사출압력이 상승하고, 제품 영역에 따라 보압 전달에 큰 차이가 나고 결국 수축률 편차에 의한 변형이 발생할 수 있다.

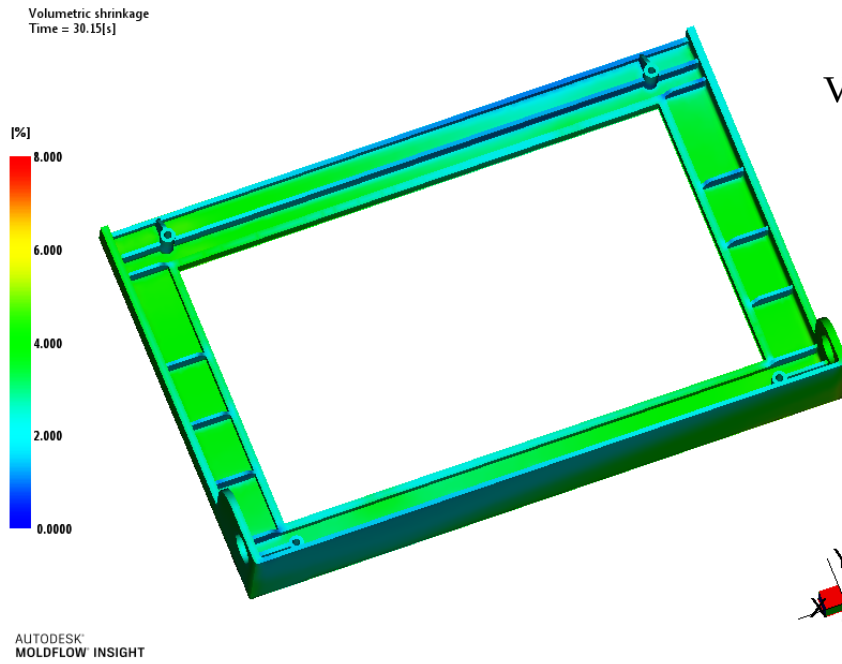
영역의 크기에 큰 차이가 있다면, 게이트 위치를 변경하거나 제품 두께를 일부 개선하여야 한다.



▶ Volumetric Shrinkage

Volumetric Shrinkage Result는 수지가 상온까지 냉각될때 예상되는 제품 체적 수축률을 나타낸다. 체적 수축률은 보압, 냉각 공정에서의 각 부분의 온도 이력과 압력 이력에 의하여 결정된다. 일반적으로 냉각속도가 빠를 수록 그리고 압력을 높고 길게 받을수록 체적 수축률은 작아진다. 체적 수축률의 +값은 수축을 의미하고 - 값은 팽창을 의미한다. 얇은 부분에 과도하게 높은 압력이 가해지면 성형품이 금형 보다 커질 수 있다는 의미이다.

체적 수축률은 제품의 변형, 싱크 마크, 제품 치수 등에도 큰 영향을 미친다. 특히 제품의 영역에 따른 체적 수축률 편차는 제품 변형을 일으키는 가장 큰 원인 중의 하나이다. 즉 변형해석 결과 그 변형의 원인이 수축률 편차 (differential shrinkage)로 평가 되었다면 이 결과를 확인하고 수축률 편차를 줄일 수 있는 방법으로 제품 설계, 금형 설계 및 공정조건을 개선하여야 한다.

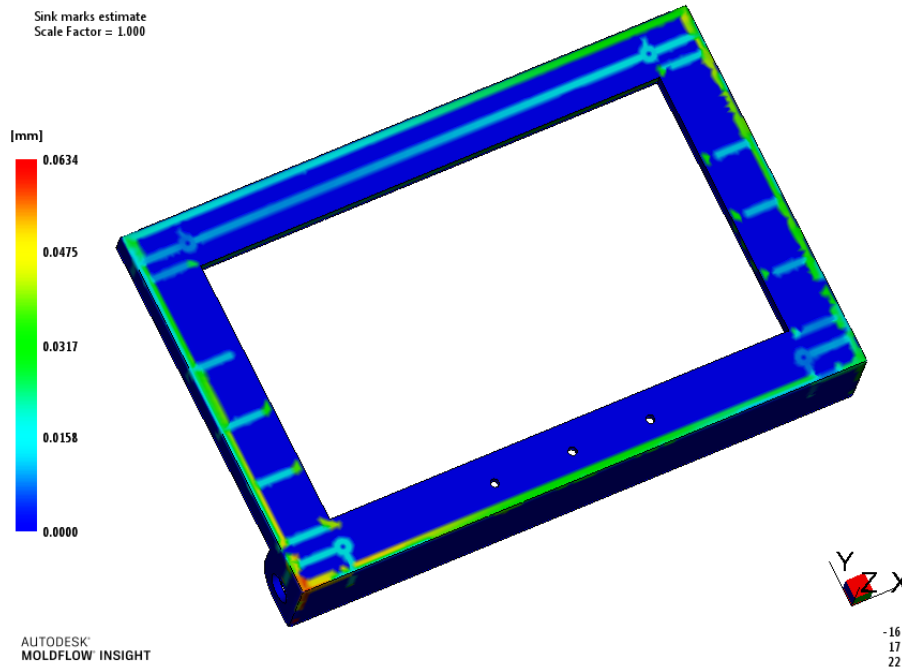


$$\text{Volumetric Shrinkage} = \left(1 - \frac{\bar{\rho}}{\rho(T_{\text{room}} \times P_{1\text{atm}})}\right) \times 100$$

▶ Sink mark estimate

Sink mark estimate Result는 리브 또는 보스 등의 맞은편에 예상되는 싱크 마크의 깊이를 계산하여 나타낸다. 그러나 제품 두께가 두꺼워서 발생하는 경우는 계산되지 않는다. 싱크 마크의 예상 깊이 계산에는 제품 두께, 리브 두께, 체적 수축률, 압력, 온도 등을 고려된다. 싱크 마크의 예상 깊이는 일반적으로 게이트에서 너무 멀리 있어서 충분한 보압이 전달되지 않는 리브 또는 보스 맞은편이나, 제품 두께에 비하여 두께가 너무 큰 리브 또는 보스의 맞은편에 크게 계산된다. 따라서 예상 싱크 마크의 깊이가 너무 크다면 게이트 추가하거나 또는 제품 두께를 증가시키고 리브 또는 보스의 두께를 줄여야 한다.

예상 싱크 마크의 깊이가 얼마 이상이어야 실제 성형문제로 판단될 것이냐에 대한 기준은 여러 가지 환경에 따라 달리질 수 있다. 따라서 가장 좋은 방법은 실물과 해석 결과의 지속적인 비교 분석을 통하여 제품에 적합한 기준을 정하는 것이 필요하다.



▶ Weld Line & Air Trap

Weld Line & Air Trap Result는 각각 수지의 유동선단 충돌에 의하여 예상되는 웰드라인의 길이와 수지의 흐름에 의하여 금형 내에서 공기가 갇히는 예상위치를 나타낸다.

기본적으로 웰드라인 길이는 충돌하는 유동선단의 접촉각 135°를 기준으로 표시하며, 그 색상은 접촉각의 크기를 나타낸다. 접촉각이 작을수록 그리고 유동선단 온도가 낮을수록 웰드라인은 선명할 것으로 예상된다. 수지와 금형 온도, 게이트 위치, 제품 두께 그리고 밸브 제어 등으로 웰드라인을 제어할 수 있다.

에어트랩의 위치가 파팅라인인 경우에는 통상적인 에어벤트를 통하여 공기를 제거할 수 있다. 그러나 깊은 리브나 보스에 공기가 갇히는 경우나, 심각한 정체현상에 의하여 제품내에 공기가 갇히는 경우에는 금형 분할면 또는 밀핀 등에 에어 벤트를 추가하여야 한다. 물론 게이트 위치와 제품 두께 변경으로 심각한 금형내 에어트랩은 방지할 수 있다.

Weld lines
= 135.0[deg]

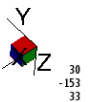


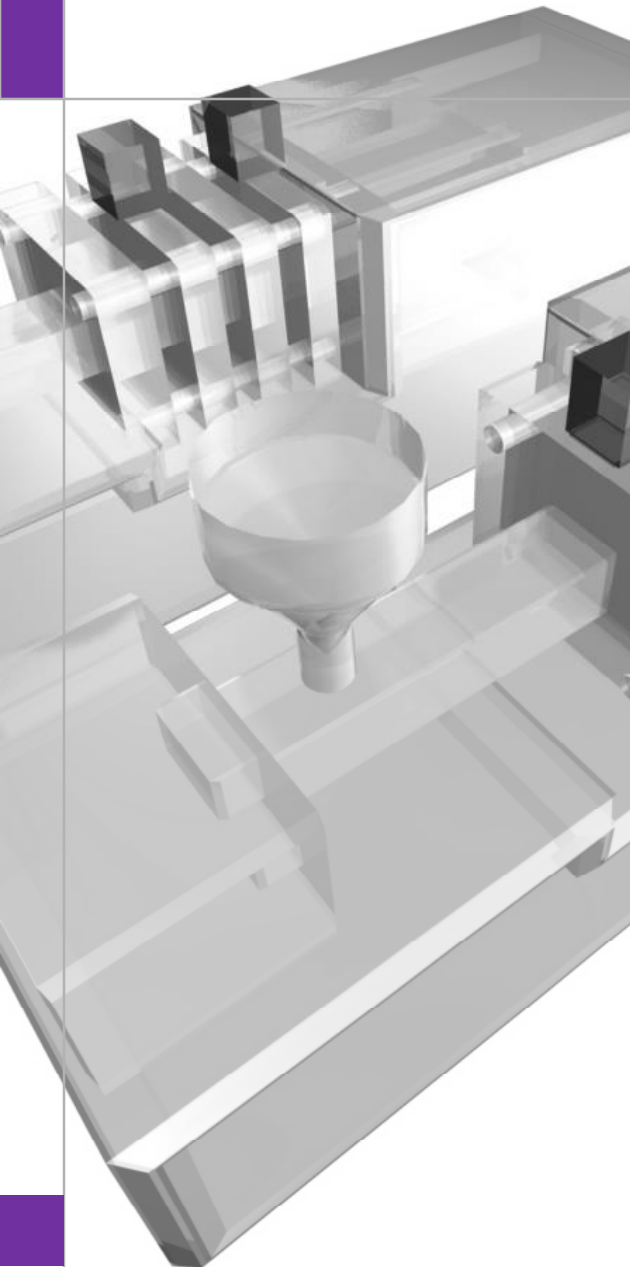
AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT

Air traps



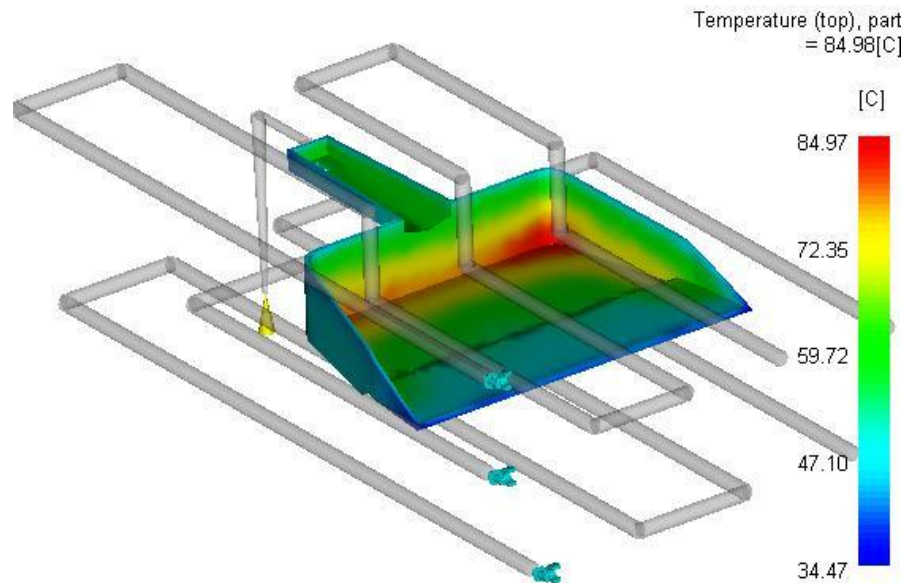
AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT





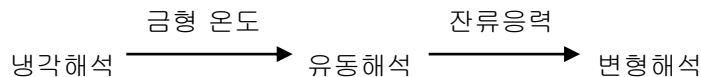
IV 냉각해석

1. 냉각해석 이론
2. 냉각해석 실습
3. 냉각해석 결과



1. 냉각해석 이론

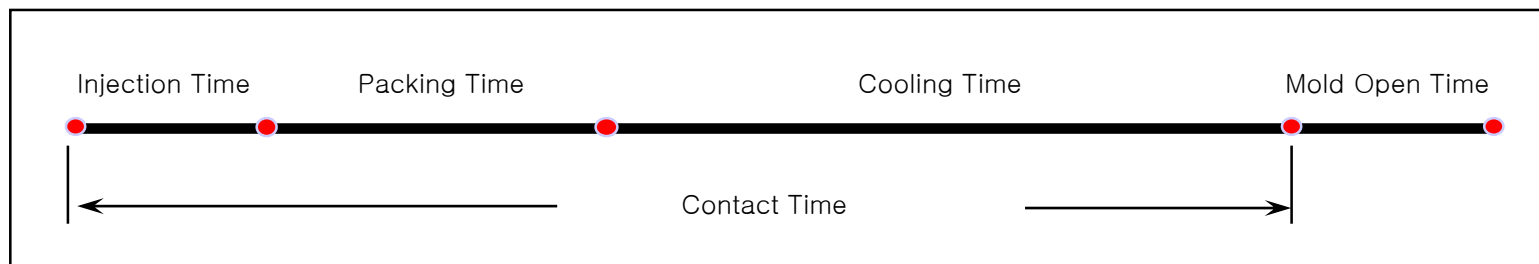
냉각해석은 주어진 냉각 설계와 냉각수 설정조건에 따라서 예상되는 금형 온도를 계산하는 열 해석이다. 유동해석에서는 금형 온도가 설정된 값으로 일정한 것으로 가정하고 해석하지만 실제에서는 냉각 설계와 냉각수의 설정조건에 따라 금형 온도는 달라지며, 이것이 유동해석과 변형해석에 반영되어야 한다.



1-1) 금형 온도

금형 온도는 표면 광택도, 수축률, 잔류응력 등에 영향을 준다. 특히 캐비티와 코어의 금형 온도 편차는 제품의 열에 의하여 유도된 잔류응력을 증가시켜 변형을 일으키는 주요한 요소이다. 또한 금형 온도는 사이클시간에 큰 영향을 준다. 따라서 냉각 시스템 설계와 냉각수 조건설정의 방향은 제품을 균일하고도 빠르게 냉각하여 제품 품질과 생산성을 동시에 향상시키는 것이다.

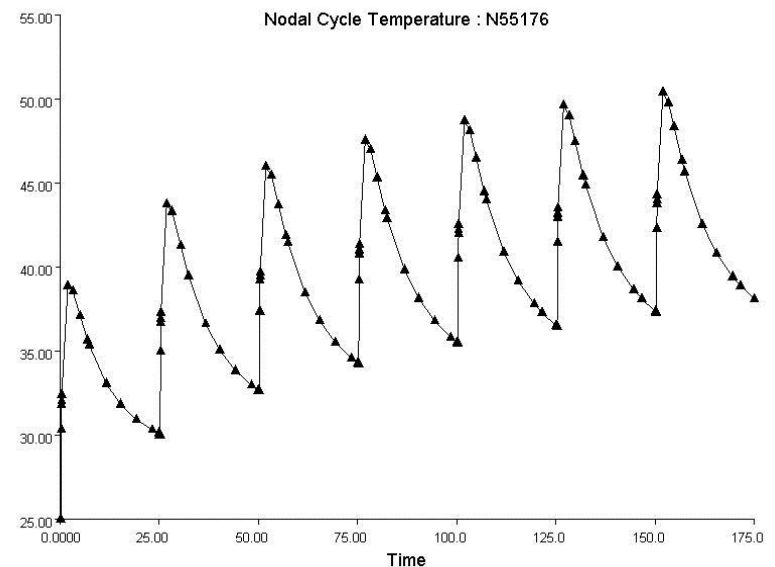
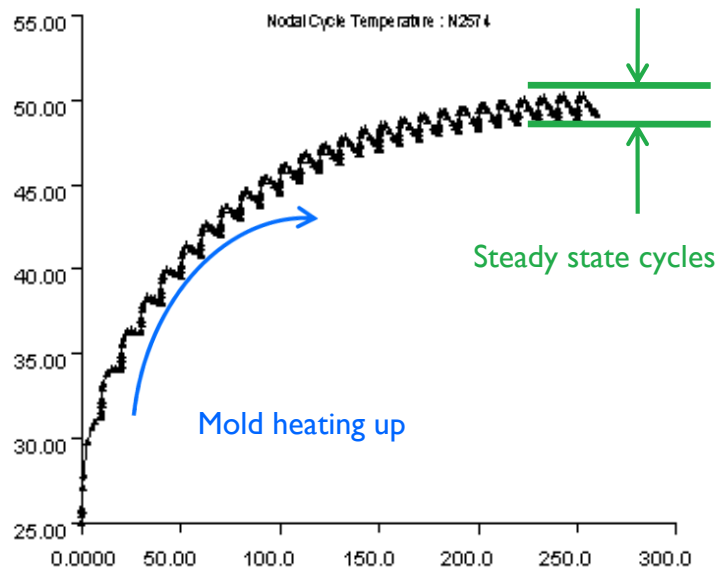
충전 시작에 의하여 플라스틱 수지는 냉각시스템에 의하여 냉각되고 있는 금형 내로 충전되어 금형 표면하고 접하여 금형으로 열을 잃는다.



금형 온도는 성형을 막 시작하는 순간에는 차가운 금형으로 인하여 상당히 낮지만 성형을 지속적으로 수행하게 되면 점차 높아지게 된다. 어느 정도 사이클이 경과하게 되면 금형 온도는 일정온도가 유지하는 정상상태(steady-state)에 도달한다.

또한 한 사이클 내에서도 금형 온도는 변한다. 초기에 높은 온도의 수지가 유입되면 금형 온도가 상당히 높아지지만 냉각에 의하여 고화가 진행되면 점차 금형 온도는 내려간다. 물론 사이클 시간이 길어질 수록 금형 온도는 더 많이 내려가게 된다.

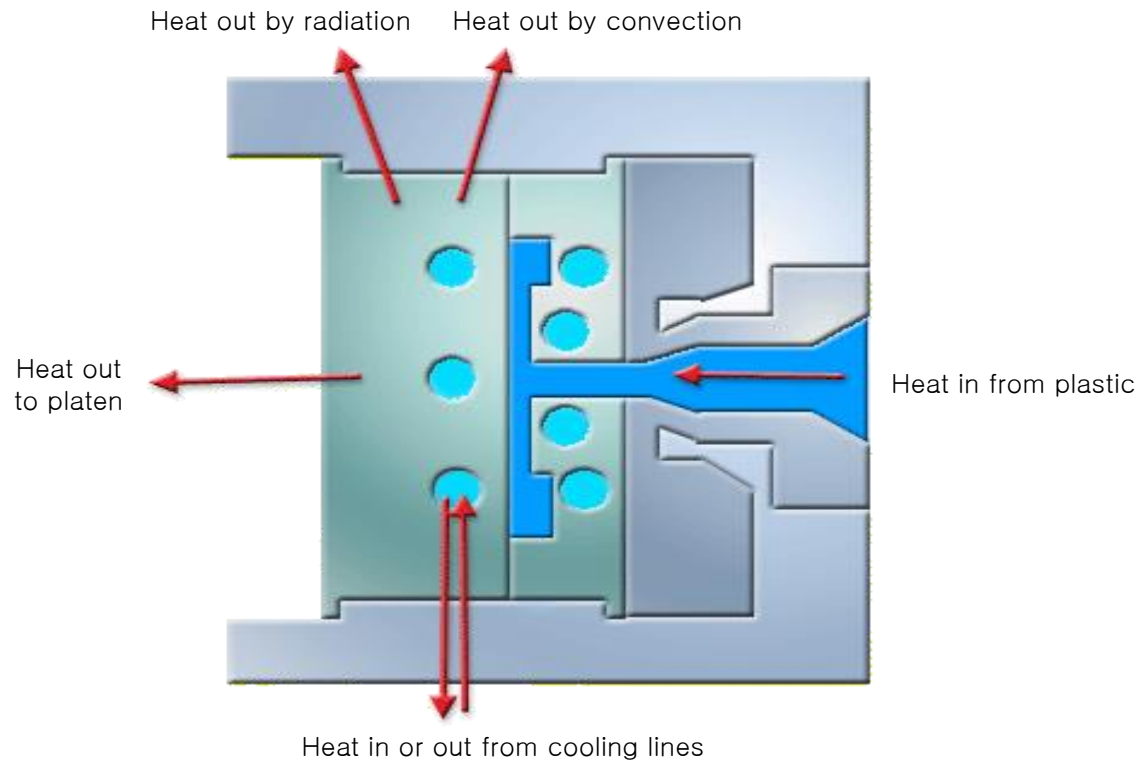
Moldflow 해석에서는 이러한 금형 온도의 변화를 모두 해석에 반영하지 않는다. 다만 금형 온도가 정상상태(steady-state)에 도달하였을 때 한사이클의 평균 온도를 계산하여 해석에 반영한다.



1-2) 금형의 열전달

(1) 열전달 경로

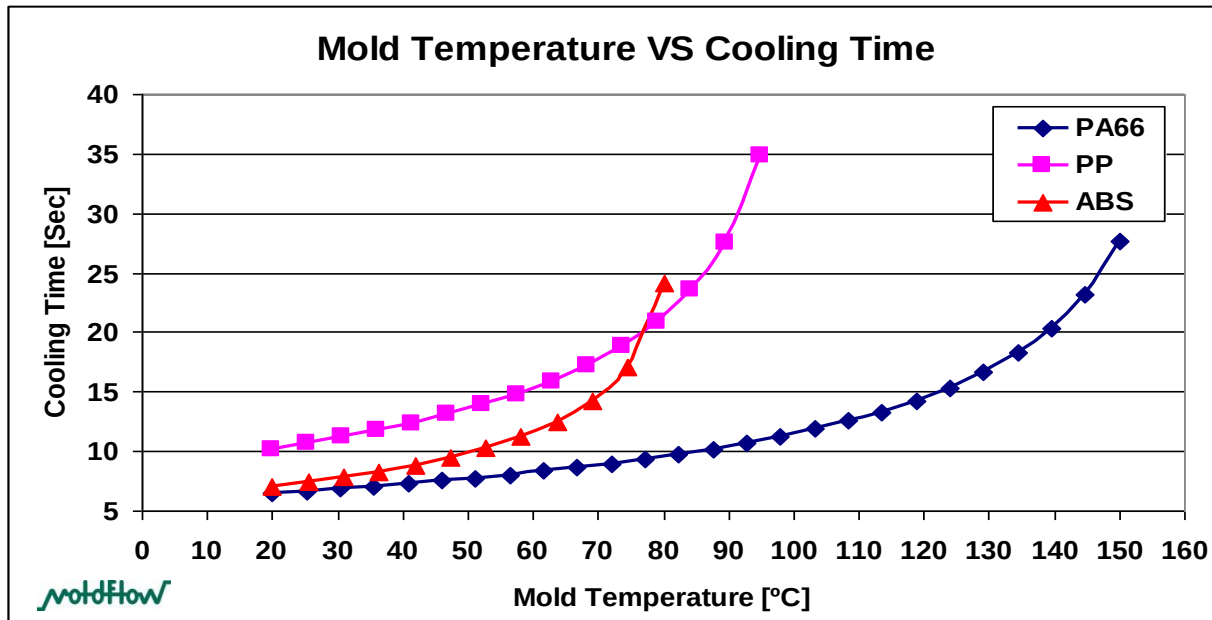
사출에 의하여 유입된 플라스틱 수지의 열량은 금형 내에서 다양한 방법으로 열전달이 이루어진다.(냉각수를 통한 열전달, 전도, 대류 복사 등에 의한 열전달) 그러나 대부분 열은 가장 인접한 냉각시스템에 의하여 열이 전달된다.



(2) 열전달 효율

플라스틱 수지의 열이 냉각채널에 의하여 금형 밖으로 이송되는 경로와 그 전달 효율에 영향을 미치는 요소들을 나타내었다. 플라스틱 수지의 냉각속도는 수지의 열적 물성, 금형의 열적 물성 그리고 냉각수의 온도 및 유속 그리고 그 열적 물성에 크게 영향을 받는다.

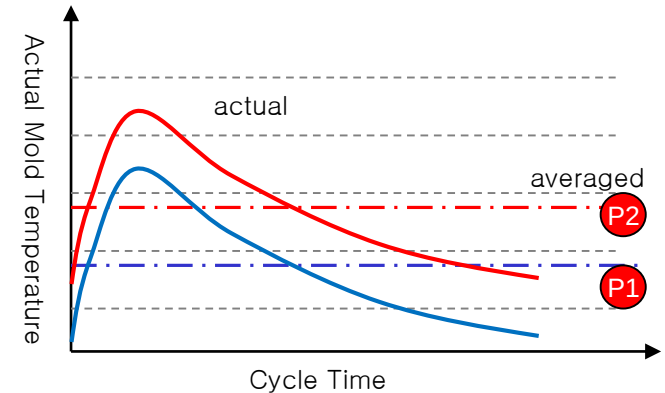
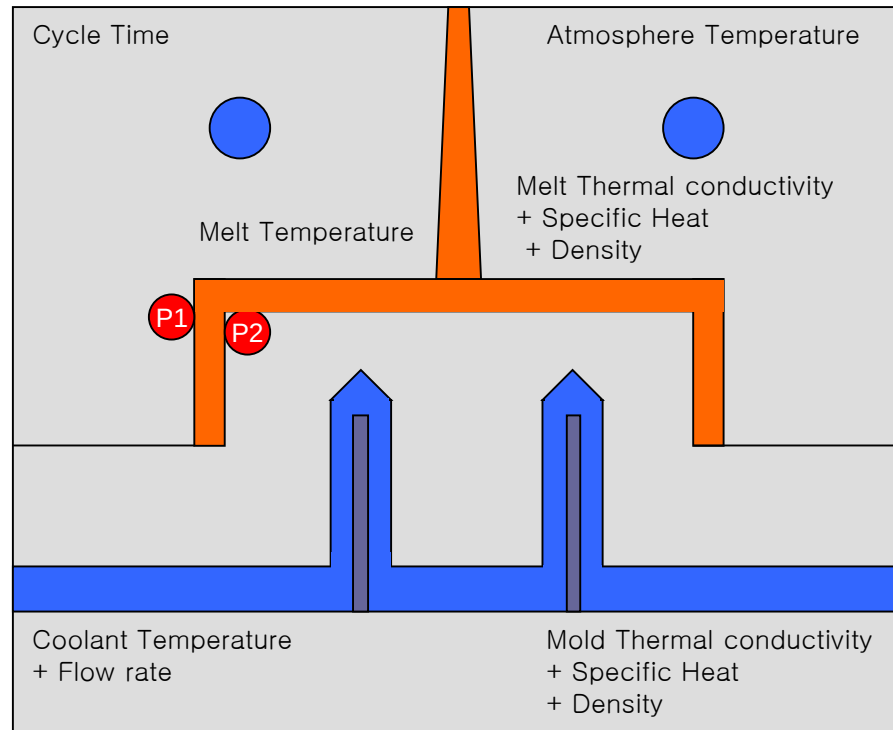
- ▶ Plastic to the mold wall
 - 수지의 물성(비열, 열전도도, 밀도)
- ▶ Through the mold (Plastic/metal interface to the coolant/metal interface)
 - 금형의 물성 (비열, 열전도도, 밀도)
- ▶ Coolant/metal interface to the coolant
 - 냉각수 온도, 유속 및 물성 (비열, 열전도도, 밀도, 점도)



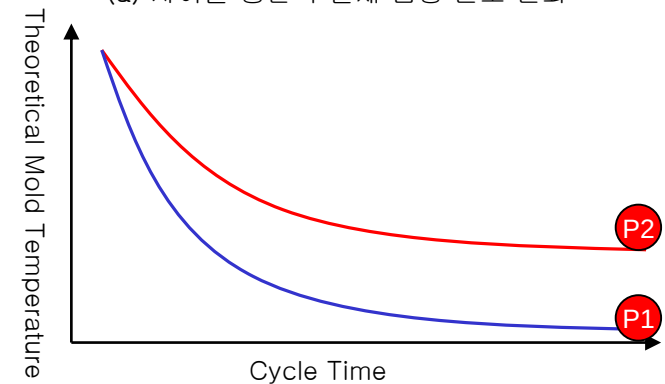
(3) 금형 온도의 계산, BEM 방법 (boundary element method)

냉각 해석은 BEM 방법으로 예상 금형 온도를 계산 한다. BEM이란 모든 요소의 경계를 통하여 열의 이동을 계산하여 일정 시간 후의 각 요소 경계의 온도 변화를 계산하는 방법이다. 그러나 이러한 BEM은 충전과정의 수지의 흐름의 영향을 고려하지 못하는 단점이 있다. 특히 게이트 주변과 같은 부분은 실제 보다 금형 온도가 낮게 계산된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 FEM 방법을 사용하여야 한다. FEM 방법을 이용한 냉각해석은 교재의 “3D 해석의 응용” 부분에 기술하였다.

BEM 냉각 해석에서는 주어진 제품과 냉각 채널 배치 상태에서 플라스틱 수지가 균일 온도로 캐비티에 순간적으로 충전된 상태라 가정하고, 수지의 열적 물성, 금형의 열적 물성, 냉각수 조건 및 열적 물성 그리고 대기 온도를 이용하여 일정 사이클 후의 위치에 따라 최종적으로 형성되는 온도를 계산한다. 이것이 바로 냉각 해석에 의하여 계산되는 금형 온도이며, 이 값은 실제 금형에서 정상상태에서의 한 사이클 평균 금형 온도에 해당한다.



(a) 사이클 동안의 실제 금형 온도 변화

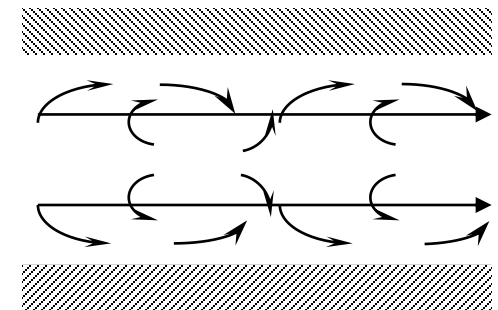
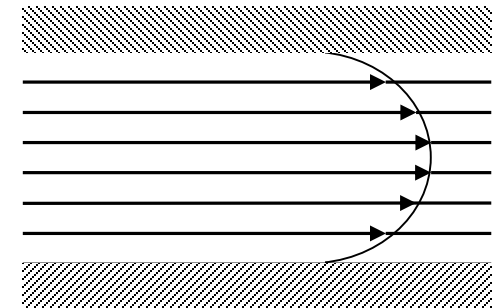
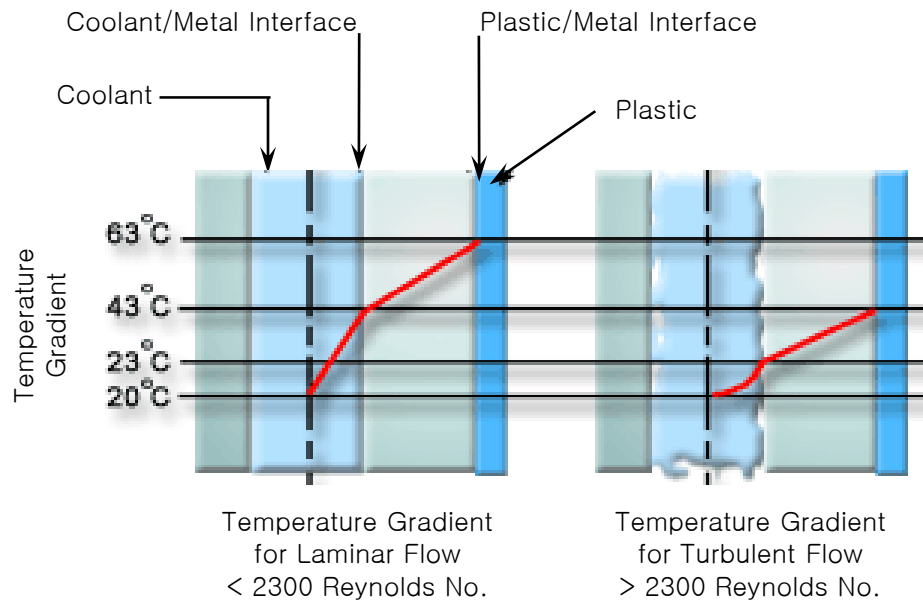


(b) 사이클 동안의 이론적 금형 온도 변화

1-3) 냉각수 유속

(1) 유량과 금형 온도

주어진 냉각시스템에서 금형 온도를 결정하는 중요한 요소는 냉각수의 온도와 유속이다. 일반적으로 냉각수의 온도를 높이면 금형 온도도 높아지고, 낮추면 금형 온도도 낮아진다. 그러나 동일 냉각수 온도를 사용하여도 냉각수 유속에 따라 금형 온도는 크게 달라질 수 있다. 냉각수의 흐름 속도가 느리면 냉각수는 층류를 형성하고 냉각수 내의 열은 층간의 전도에 의해서만 전달되어 결국 흐름이 진행됨에 따라 냉각수 중심에 비하여 가장자리의 온도는 금형과의 접촉시간이 길어짐에 따라 점차 상승한다. 이러한 경우 냉각수의 온도는 냉각수의 가장자리 온도가 되며 결국 금형 온도도 점차 상승한다. 반대로 냉각수의 흐름 속도가 빠를 경우 난류가 형성되고 열은 전도와 대류 모두에 의하여 전달되어 냉각수 중심 온도와 가장자리의 온도는 큰 차이가 없고 결국 금형 온도는 낮게 일정하게 유지된다. 따라서 금형 온도는 냉각수 온도 뿐만 아니라 유속에도 크게 영향을 받는다.



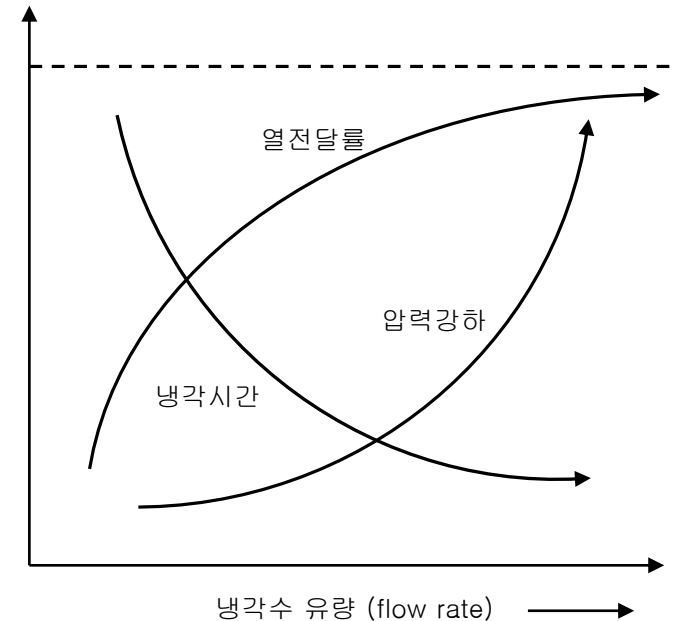
(2) 최적의 냉각수 유속

냉각수 유속에 따른 열전달률은 층류에서 난류로 되면서 점차 증가하다가 레이놀즈수가 10,000을 넘어서면서 증가율이 크게 둔화된다. 따라서 적절한 냉각수의 유량은 레이놀즈수가 10,000이 되게 설정하는 것이고 그 이상에서는 열전달의 작은 개선은 있지만 냉각수의 압력강하가 크게 증가하여 냉각수 펌프의 용량만을 증가시키는 결과를 만든다.

여기서 레이놀즈수(Reynolds No.)는 유체의 층류와 난류를 구분하는 기준으로 다음과 같이 정의 된다.

$$\text{Reynolds No.} = \frac{\text{Channel Diameter}(D) \times \text{Flow rate}(V)}{\text{Dynamic viscosity}(\nu)}$$

레이놀즈수(Re)	유동 형태
10,000 < Re	난류유동 (turbulent flow)
2,300 < Re < 10,000	과도유동 (transition flow)
100 < Re < 2,300	층류유동 (laminar flow)
Re < 100	정체유동 (stagnated flow)



(3) 냉각수의 관리

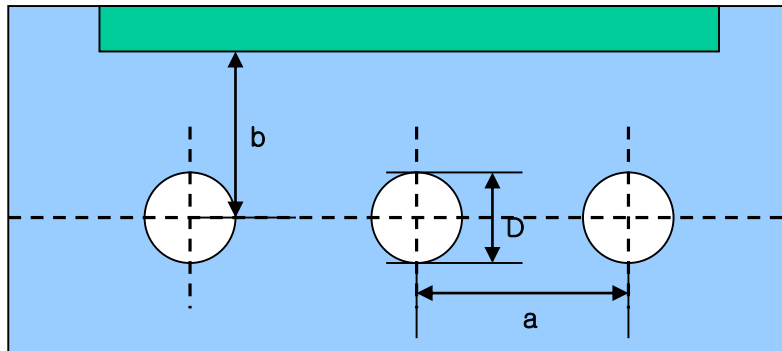
냉각수가 금형에서 빠져나가는 출수온도가 입수온도 보다 **2~3 ℃** 이상 상승하면 안 된다. 또한 냉각수 중심과 가장자리 온도편차가 **5℃** 이하가 되게 하여야 한다. 이것은 냉각수의 유속을 충분히 빠르게 하여 난류를 형성하고, 냉각 채널의 길이가 너무 길지 않도록 적절히 단절하여 설계하면 해결이 가능하다. 온도차이가 심할 경우 제품 영역에 따라 금형 온도 편차가 커지고 결국 수축률 편차를 유발한다.

1-4) 냉각수의 온도

냉각수 온도는 목표로 하는 금형 온도에 준하여 설정되며, 채널과 캐비티의 거리와 금형의 열전도도에 따라 다르지만 일반적으로 목표로 하는 금형 온도의 **10~30℃** 이하로 설정한다.

일반 수돗물을 냉각수로 사용할 경우 계절에 따라 온도 변화가 심하므로 주의 하여야 한다. 온도 변화가 생기면 제품의 수축률이 달라지며, 심할 경우 미성형이 발생할 수도 있다. 따라서 온도제어장치 등을 이용하여 냉각수의 온도가 일정하게 공급되도록 관리하여야 한다. 그리고 냉각수가 80 ℃ 이하인 경우에는 냉각수로 물을 사용하지만 그 이상이 되면 오일을 사용하여야 한다.

또한 냉각채널은 주기적으로 관리 및 정비하여야 하는데 냉각채널에 미네랄 퇴적물 또는 녹이 생기면 이는 열전달을 방해하여 금형 온도를 크게 상승시킨다. 일반적으로 1mm 정도의 이물질이 냉각 채널에 쌓이면 냉각관이 캐비티로부터 50mm 이상 멀어지는 효과를 보이는 것으로 알려져 있다.



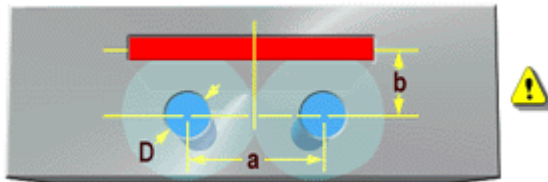
Part thickness	W	Channel diameter	D
	< 2mm		8mm-10mm
	< 4mm		10mm-12mm
	< 6mm		12mm-15mm
Spacing	b	= 2-3 X channel diameter (D)	
Spacing	a	= max 3 X channel diameter (D)	

1-5) 금형 온도 관리

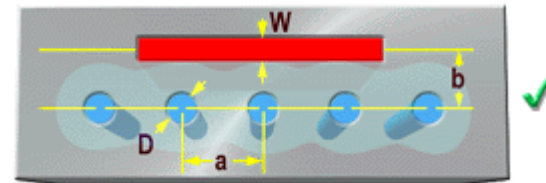
균일한 금형 온도를 유지하는 것이 냉각 설계에서 있어서 가장 중요한 부분이다. 제품 상.하측의 균일하지 않은 금형 온도는 불균일 냉각에 의한 내부 잔류응력을 증가시켜 제품의 변형을 일으키는 주요한 원인 중의 하나가 된다.

따라서 냉각 해석 결과 금형 온도가 상당히 높은 부분은 냉각채널을 보강하고, 오히려 금형 온도가 상당히 낮은 부분은 냉각채널을 멀리하거나 제거하여 균일 금형 온도가 되도록 하여야 한다.

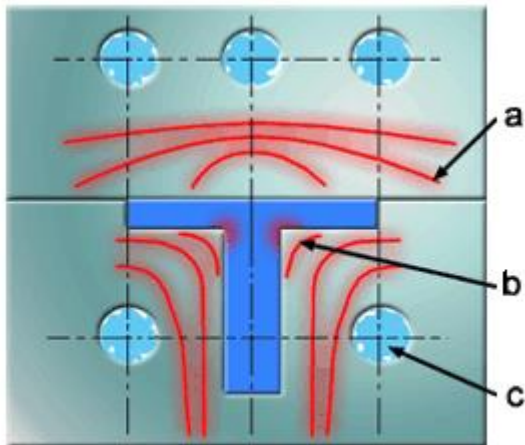
냉각 채널은 직경을 크게 해서 넓은 간격으로 설계하는 것 보다 작은 직경으로 조밀하게 설계하는 것이 유리하며, 평면 부분 보다 코너 부분의 냉각에 더 많은 관심을 기울려야 한다. 금형 온도는 캐비티 상하에서 5°C 이상의 편차가 발생하지 않도록 관리되어야 하지만 많은 경우에 복잡한 캐비티 형상과 금형 구조로 인하여 금형 온도 편차가 큰 경우가 많다.



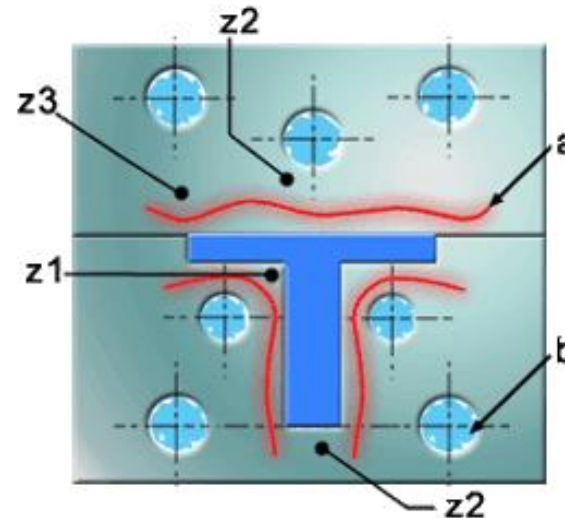
(a) Large Spacing – NON UNIFORM HEAT REMOVAL



(b) Small Spacing – UNIFORM HEAT REMOVAL



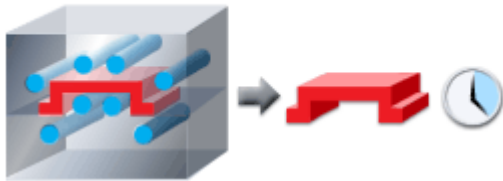
(c) T-shaped molding – NON UNIFORM HEAT REMOVAL



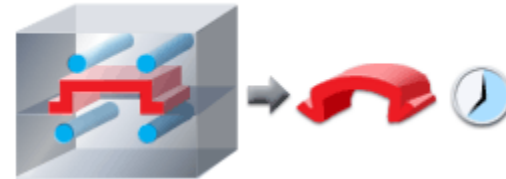
(d) T-shaped molding – UNIFORM HEAT REMOVAL

1-6) 냉각시스템 설계

사출 성형에 의한 열가소성 플라스틱 제품 생산에 있어서 냉각 시간은 전체 사이클 시간의 2/3 이상을 차지하고 있다. 따라서 균일한 금형 온도가 되도록 적절한 냉각회로 설계는 냉각시간을 줄여서 전체적인 생산성을 증가시킨다. 또한 균일한 냉각은 잔류 응력을 줄이고 치수정확도 및 안정성을 유지함으로써 품질을 향상시킨다.



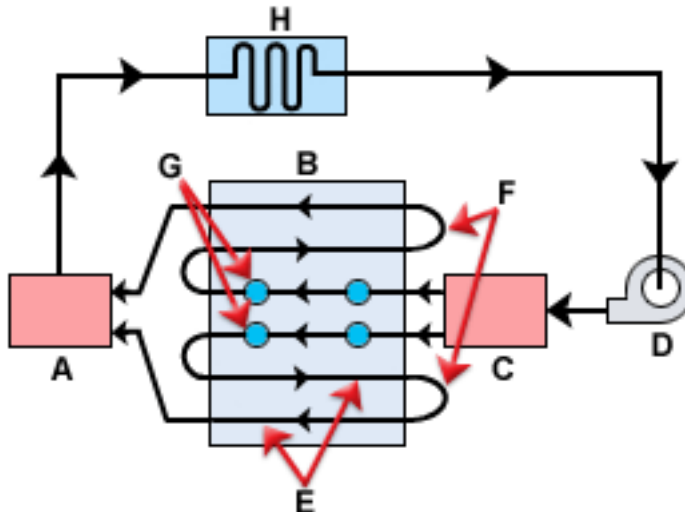
(a) Proper cooling – Better part in shorter time



(b) Poor cooling – Poor part in longer time

(1) 금형 냉각 시스템 요소

전형적인 금형냉각 시스템은 온도 제어부, 펌프, 냉각수 공급 매니폴드, 호스, 금형 내의 냉각채널 및 냉각수 배수 매니폴드로 이루어진다.



- A – 냉각수 배수 매니폴드 (collection manifold)
- B – 금형 (mold)
- C – 냉각수 공급 매니폴드 (supply manifold)
- D – 펌프 (pump)
- E – 냉각채널 (cooling channels in mold)
- F – 호스 (hose)
- G – 배플 (baffle)
- H – 온도 제어부 (temperature controlling unit)

(2) 냉각 채널의 종류

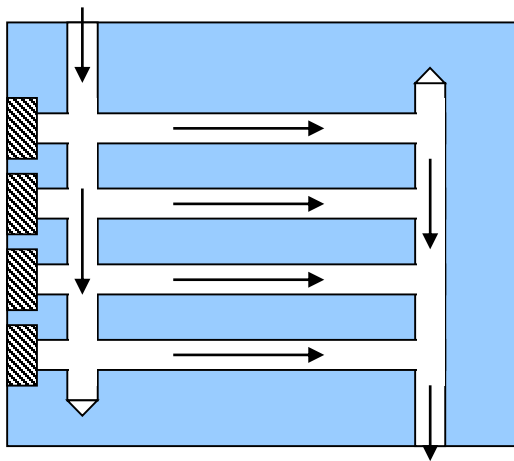
냉각채널은 병렬 또는 직렬로 설계할 수 있다.

병렬 냉각 채널

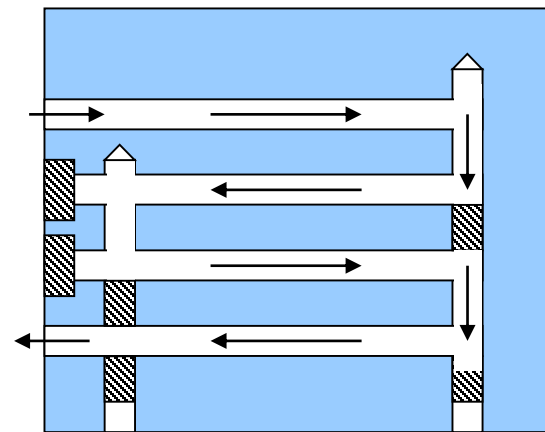
병렬 냉각 채널은 하나의 냉각수 입수부와 출수부를 가지지만 금형 내에서 냉각채널이 여러 경로로 나뉘어 가공된 것을 말한다. 병렬채널의 경우 각각의 냉각채널 경로마다 채널 길이가 서로 달라 유동 저항에 차이가 발생한다. 따라서 각각의 냉각 채널마다 냉각수 유속이 달라지고, 열전달 효율도 달라져 금형 온도가 불균일 하게 된다. 결론적으로 병렬 냉각채널로는 균일 냉각을 실현하기 힘들다.

직렬 냉각 채널

직렬 냉각 채널은 냉각수 입수부로부터 출수부 까지 하나의 냉각관으로 가공된 것을 말한다. 병렬 냉각 채널과는 달리 냉각수가 일정한 속도로 흐를 수 있어서 냉각수 길이와 유속이 적절하다면 금형 온도가 균일해질 수 있다. 따라서 병렬 보다는 직렬 냉각 채널이 많이 사용된다. 그러나 직렬 냉각 채널은 병렬에 비하여 채널 길이가 길어서 유동저항이 훨씬 커지게 된다. 따라서 냉각수를 적절한 속도로 흐르게 하기 위해서는 보다 대 용량의 냉각펌프가 요구 된다.



(a) 병렬 냉각채널



(b) 직렬 냉각채널

(3) 대체 냉각 장치

금형 구조상 직선 냉각 채널 설계가 불가능한 부분은 배플, 버블러 그리고 열핀 등과 같은 대체 냉각 장치를 사용하여 금형 온도를 균일하게 할 수 있다.

배플 (baffle)

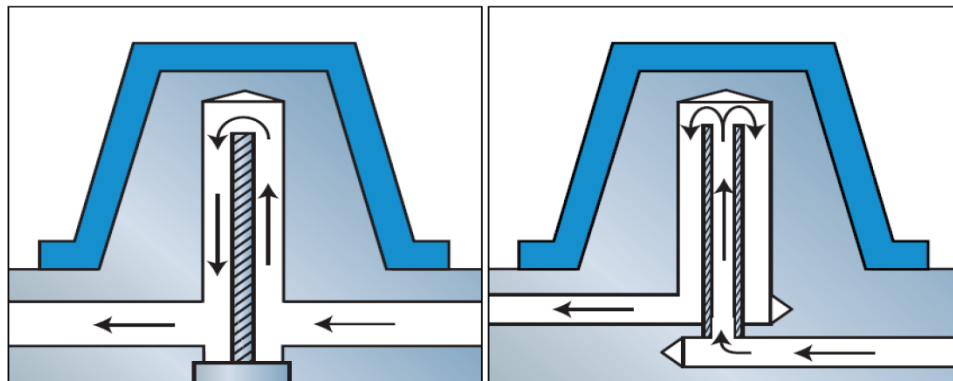
배플은 실제로 냉각채널에 수직으로 가공되어 중간판을 이용하여 냉각채널을 2개의 반원으로 나눈다. 냉각수는 냉각채널로 부터 배플의 한쪽 반원으로 흘러 들어가 반대쪽 반원으로 흘러나온다.

버블러 (bubbler)

버블러는 중간판을 관으로 대체한 것 외에는 배플과 동일하다. 냉각수는 냉각채널에서 버블러의 중앙관으로 흘러 들어가 바깥 관으로 흘러 나온다.

열핀 (thermal pin)

열핀은 높은 열전도율을 가진 액체로 채워진 실린더이다. 이 액체는 금형으로부터 열을 받아서 기화되고 냉각채널에 열을 잃어 액화된다.



(a) Baffle

(b) Bubbler

2. 냉각해석 실습

2-1) 냉각시스템 설계 요소

냉각해석을 위해서는 기본적으로 유동해석을 위한 모델링이 먼저 완성되어야 한다. 냉각해석을 위한 모델링 필수요소와 선택 요소 그리고 기본 입력 조건들을 아래에 정리하였다. 냉각해석을 위해서는 최소한 하나 이상의 냉각채널을 설계하여 그 채널의 입수부 지정과 함께 냉각수 입력 조건을 설정하여야 한다.

▶ 냉각라인 (cooling line) 설계 - 필수요건

- 채널 (channel)
- 배플 (baffle)
- 버블러 (bubbler)
- 호스 (hose)

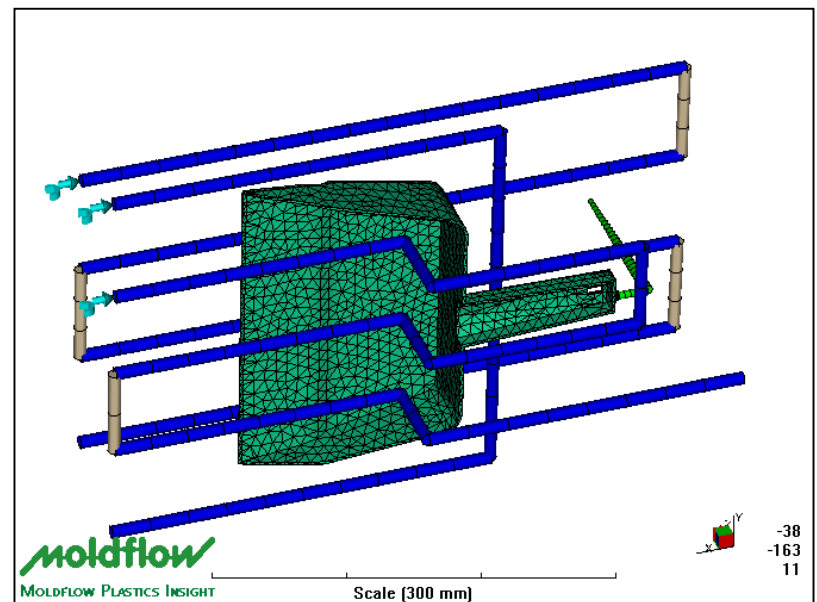
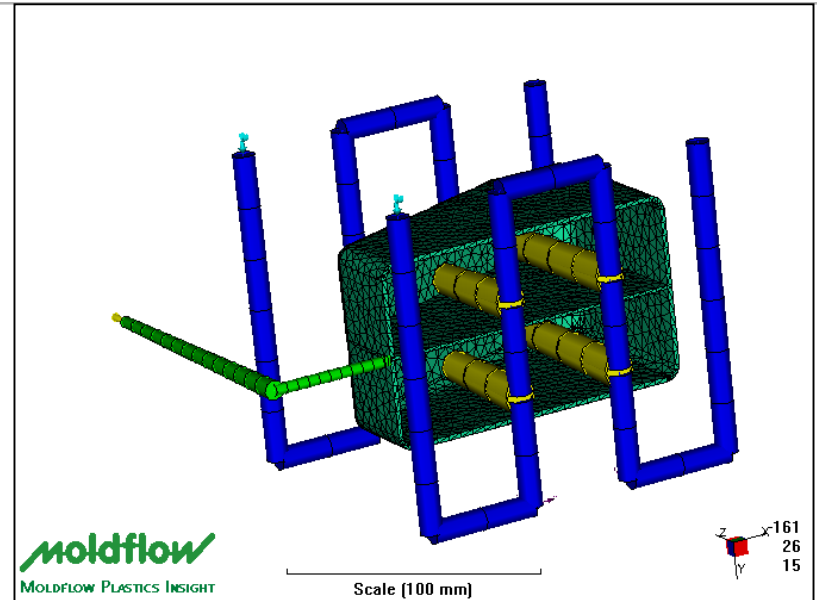
▶ 금형 인서트 (mold insert) 설계 - 선택요건

▶ 금형 영역 (mold boundary) 설계 - 선택요건(권장사항)

▶ 냉각수 입수부 (coolant inlet) 지정 - 필수요건

- 냉각수 선택
- 냉각수 제어방법 설정
- 냉각수 온도 설정

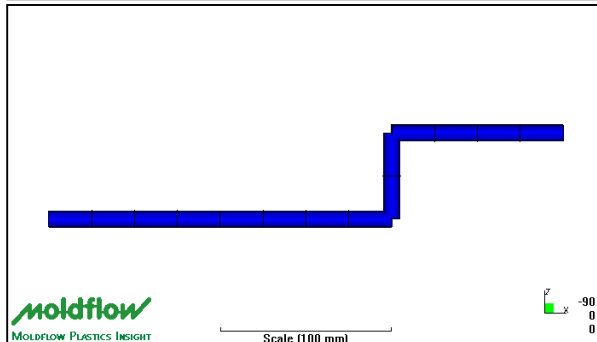
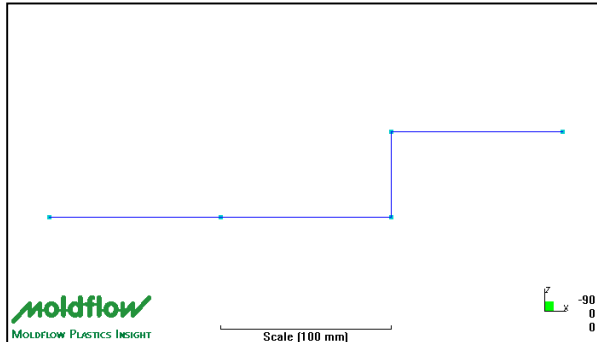
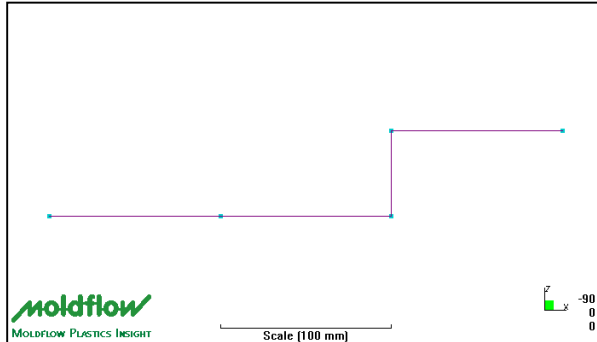
▶ 금형 재질 (mold material) 변경



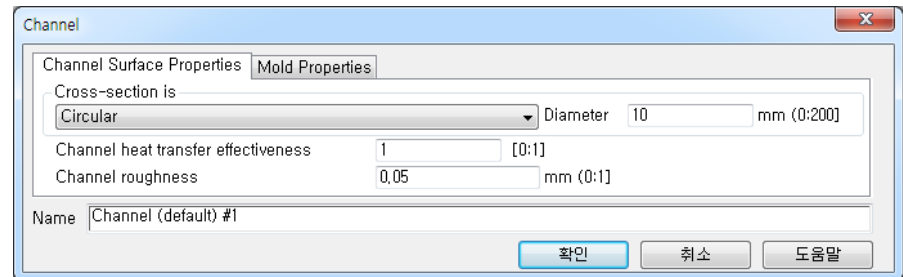
(1) 냉각라인 설계

▶ 채널 (channel)

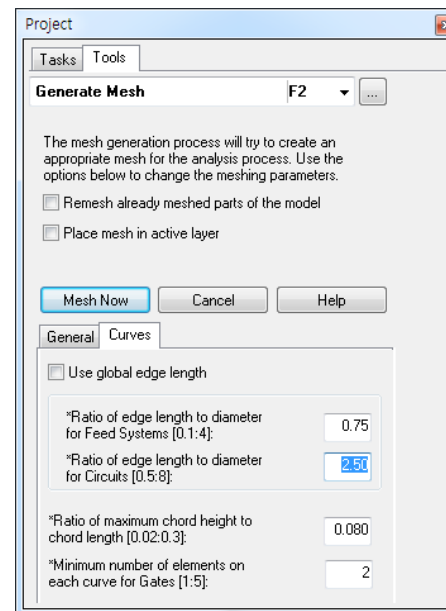
채널을 설계하기 위해서는 먼저 냉각라인을 curve로 설계하고 속성을 channel로 지정한 후 beam mesh를 생성한다. 이때 beam mesh의 L/D는 2.5가 적절한데, 이미 mesh 옵션에 디폴트 값이 2.5로 설정되어 있다.



<< Properties → Assign → New → Channel >>

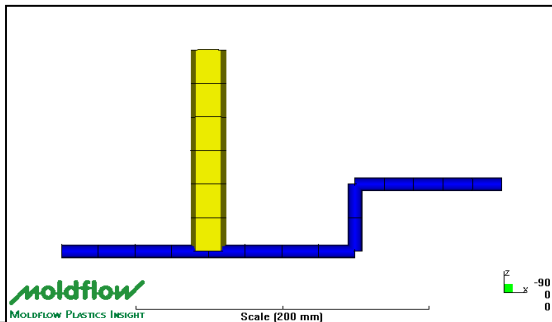
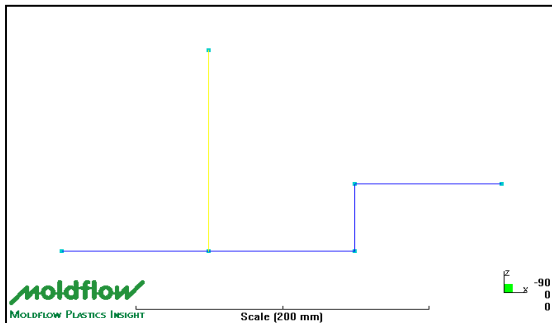
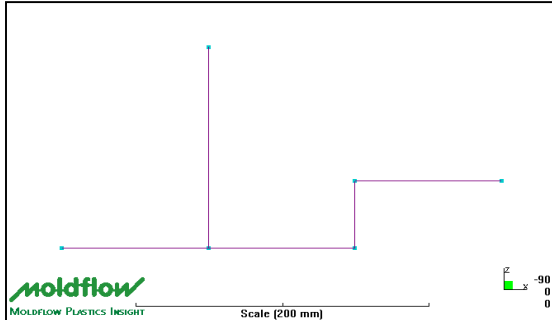


<< Mesh → Generate Mesh → Curves >>



▶ 배플 (baffle)

배플을 설계할 때는 curve가 두 개 필요하다. 이때 설계 방법에는 두 가지가 있는데, 먼저 curve 두 개를 겹쳐서 설계를 하는 방법과 curve 두 개를 삿갓 모양으로 설계하는 방법이 있다. 그리고 냉각 채널 curve는 배플과의 연결 부분에서 반드시 분리 되어야 한다. 채널과 마찬가지로 속성을 부여하고 같은 기준으로 Mesh를 생성한다. 이때 배플의 모양은 반원이 되고 그 직경은 냉각수의 유동저항을 고려하여 채널의 두 배 내외로 설정한다.



<< Edit → Assign Properties → New → Baffle >>

Baffle

Baffle Surface Properties

Mold Properties

Diameter20mm (0:800)
Heat transfer effectiveness0.5[0:1]
Channel roughness0.05mm (0:1)

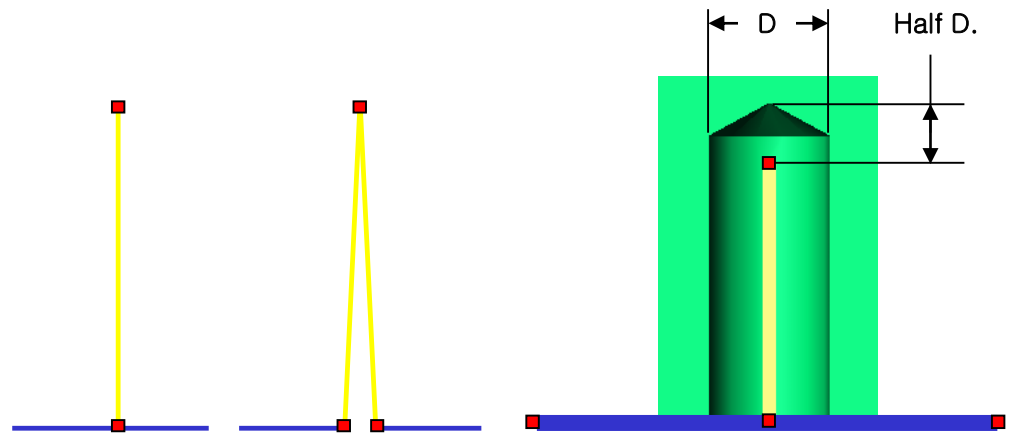
NameBaffle (default) #1

확인

취소

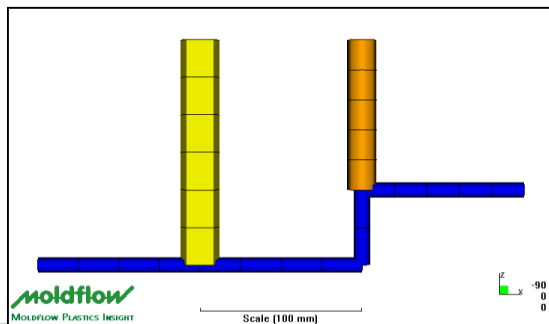
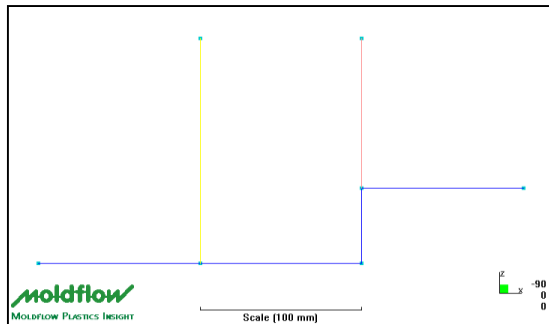
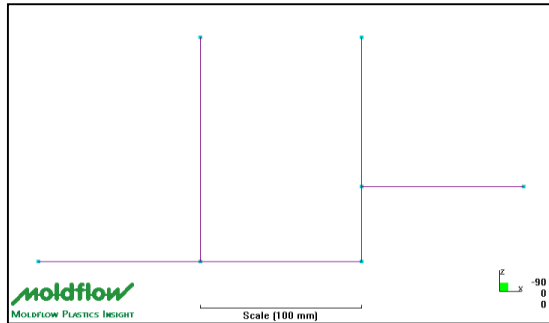
도움말

12mm < Diameter (baffle) < 30mm

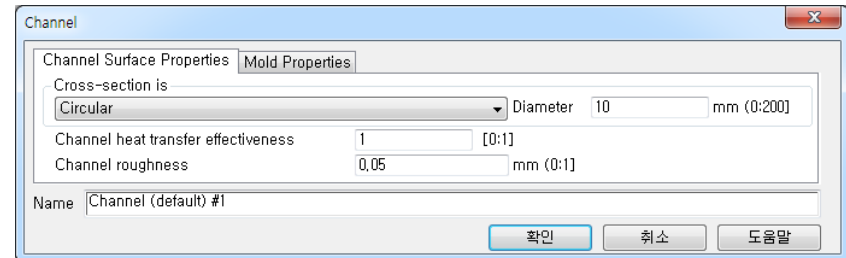


▶ 버블러 (bubbler)

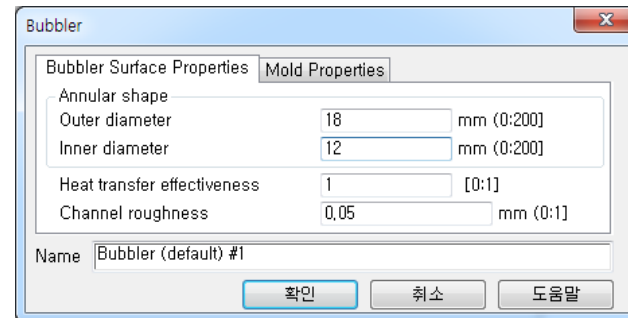
버블러를 설계할 때도 curve가 두 개 필요하다. 설계방법은 배플과 동일하지만 속성을 지정하는 방법이 다르다. 먼저 curve 두 개 중에 한 개를 선택한 다음 속성을 일반 채널로 지정하는데, 이것은 버블러 내에 들어가는 관으로 열전달의 역할이 전혀 없으므로 HTE=0으로 입력한다. 나머지 한 개는 속성을 배플로 지정하고 그 내경과 외경을 입력한다.



<< Edit → Assign Properties → New → Channel → HTE=0 >>



<< Edit → Assign Properties → New → Bubbler >>

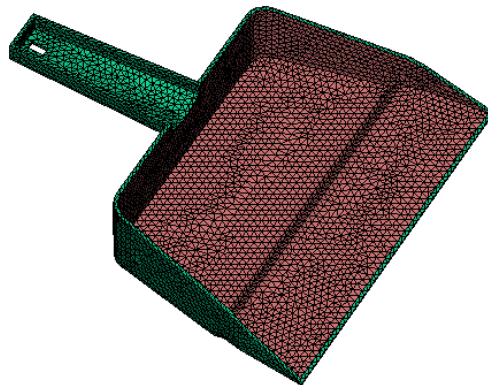
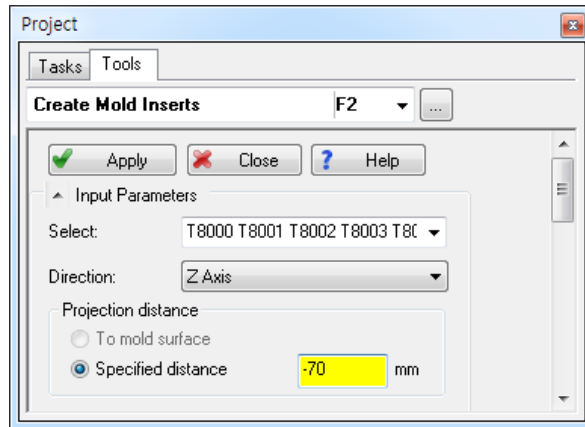


$$\frac{\text{Inner Diameter}}{\text{Outer Diameter}} = 0.707$$

(2) 금형 인서트 설계

금형 인서는 금형의 일부로써 냉각라인으로 충분한 냉각이 어려운 부분의 금형 온도를 낮추기 위하여 열전도도가 높은 다른 재료로서 일부의 금형을 대체하는 것을 말한다. 제품의 일부인 제품 인서트와는 구별되어야 한다. 여기서 제품과 금형 인서는 제품과 금형처럼 완전히 접촉되어 있는 것으로 인식되어야 하기 때문에 인서트와 접하는 영역의 제품 mesh를 이용하여 인서트를 설계하여야 한다. 따라서 인서트 생성 도구를 사용하여 인서트와 접촉하는 제품의 mesh를 선택한 다음 그 인서트의 생성 방향과 크기를 지정하고 “Apply”를 클릭하면 인서트가 자동 생성된다.

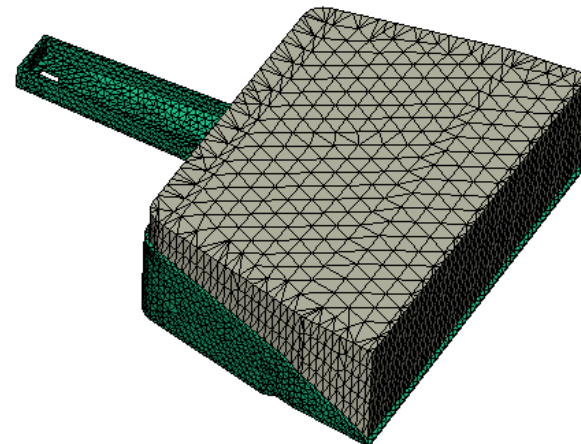
<< Geometry → Inserts >>



Scale [200 mm]

147
x-17
-25

Autodesk
MOLD FLOW INSIGHT

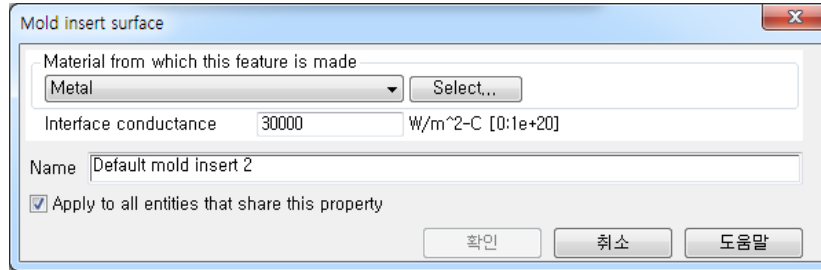


Scale [200 mm]

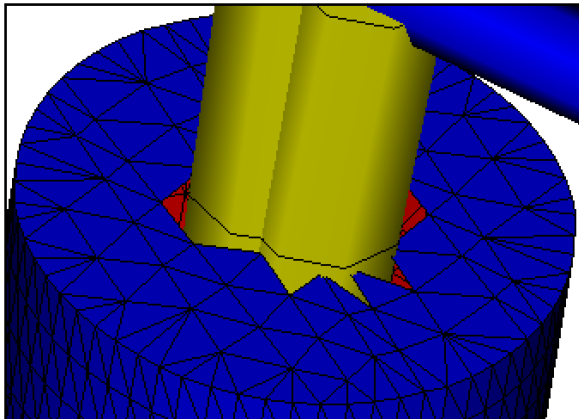
138
x-18
-23

AUTODESK

만들어진 금형 인서트의 속성을 지정하여야 한다. 먼저 인서트 요소를 선택하고 마우스 오른쪽 버튼을 누르고 속성을 선택하면 인서트의 재질을 선택할 수 있다. 여기서 금형과 인서트의 접촉 정도에 따른 계면 열전도도를 입력하여야 한다. 우측의 도표를 보고 적절한 값을 선택하면 된다.



또한 냉각채널이 인서트를 관통하는 경우에는 아래 그림과 같이 인서트 주위의 일부 요소를 삭제하면 된다.

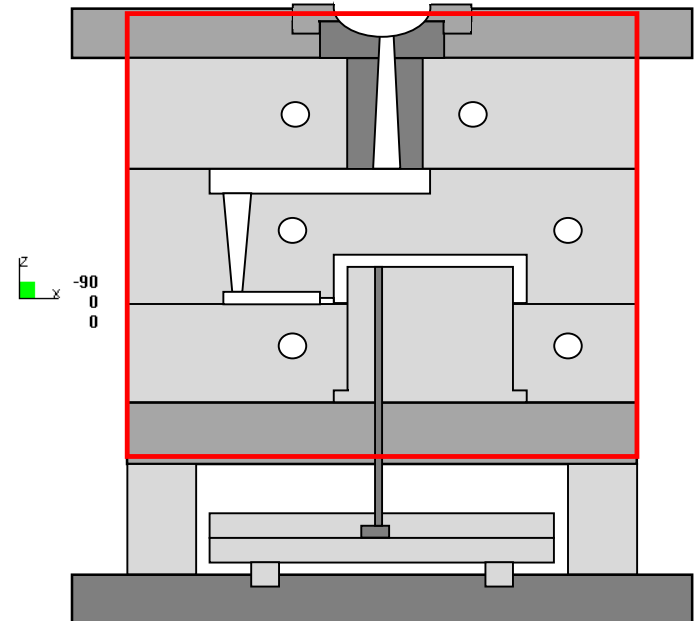
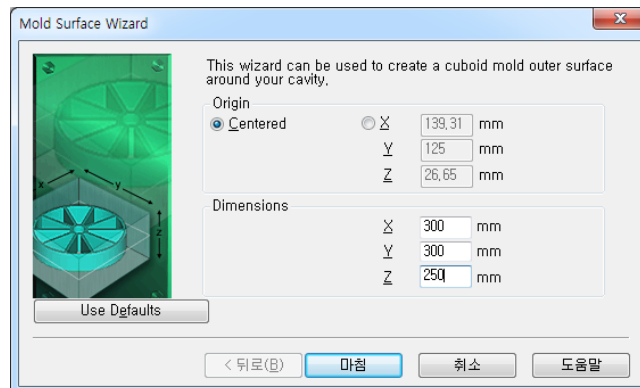
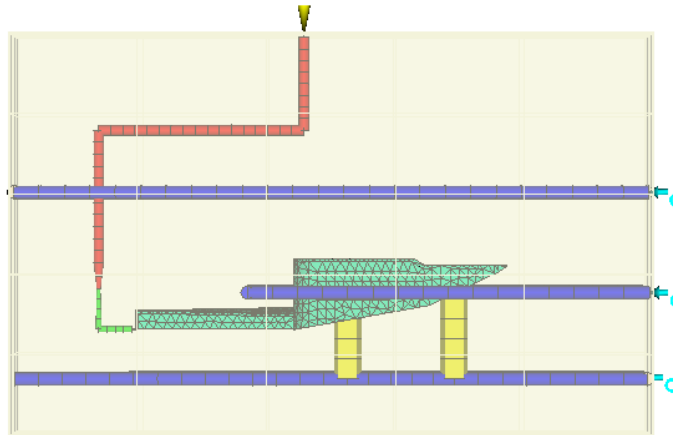


Contact Type	Contact pressure [MPa]	Surface finish [<i>m</i>]	Thermal conductance [W/m ² K] +/- 10%
Steel/Air/Steel (no gap)	0	Normal grinding	2500
Steel/Air/Steel (no gap)	7	Normal grinding	21000
Steel/Air/Steel (no gap)	15	Normal grinding	38000
Steel/Air/Steel (0.5 mm gap)	N/A	N/A	50
Steel/Air/Steel (1.0 mm gap)	N/A	N/A	25
Steel/Grease/Steel (Ejector pin or sliding core)	0	Lapped 2 <i>m</i> radial gap	75000
Steel/Grease/Steel (Ejector pin or sliding core)	0	Lapped 5 <i>m</i> radial gap	30000
BeCu/Air/Steel (T/C = 130 W/mK)	330	Normal grinding	3700000

(3) 금형 영역 설계

금형 영역은 해석에서는 반드시 요구되는 항목이지만 선택옵션이다. 영역을 사용자가 정의하지 않으면 제품 최외각 길이의 두 배 크기로 자동 설정하기 때문이다. 하지만 보다 정확한 해석을 위해서는 영역을 직접 정의하는 것이 좋다. 금형 영역 마법사를 클릭하여 크기를 입력하고 마침을 클릭하면 두 개의 새로운 layer가 자동으로 만들어지고 각각에는 금형 영역 region과 mesh가 만들어져 할당된다. 그 영역의 크기는 Z방향으로는 일반적으로 스프루 상단에서 받침판 하단 까지 이고 X와 Y는 실제 금형 크기와 동일하게 설정하면 된다. 일단 크기만 고려하여 설계한 다음 Move도구를 이용하여 이들을 적합한 위치로 이동하면 편리하게 설계가 가능하다.

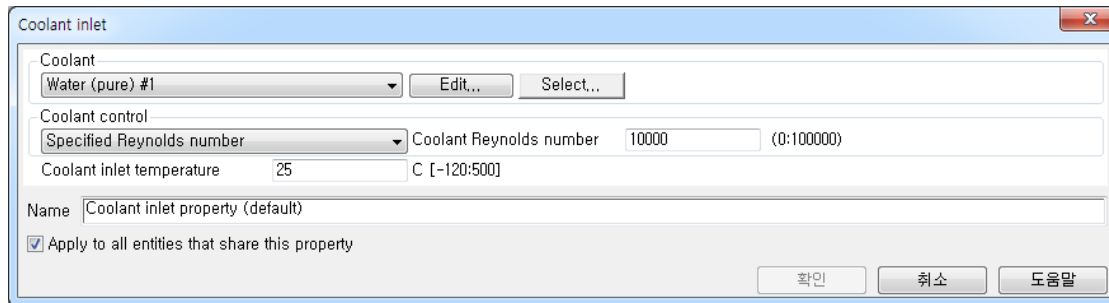
<< Geometry → Mold Surface >>



(4) 냉각수 입수부 (coolant inlet) 지정

냉각수가 유입되는 위치를 지정하여야 하는데 우선 냉각수 입수부 지정 도구를 클릭하여 “Edit”를 클릭하여 냉각수의 종류를 지정하고 냉각수 제어 방법을 지정하고 이어서 냉각수의 온도를 지정한다. 물론 다른 조건으로 냉각수를 지정하려면 “New”를 클릭하고 동일하게 설정한 다음 확인을 클릭하면 된다. 이렇게 만들어진 조건으로 냉각수 입수부 위치를 지정하기 위해서는 먼저 해당하는 조건을 선택한 후 각각의 입수부 node들을 클릭하면 화살표 모양의 입수부가 정의 된다. 다른 조건으로 입력할 경우도 마찬가지 이다.

<< Boundary Conditions → Coolant Inlet >>



Coolant inlet

Coolant: Water (pure) #1 [Edit... Select...]

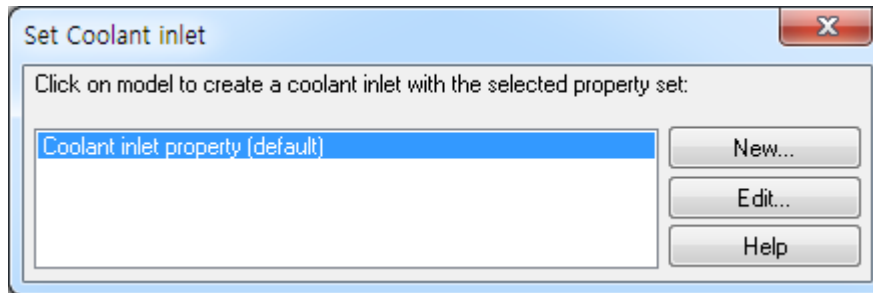
Coolant control: Specified Reynolds number [Coolant Reynolds number: 10000 (0:100000)]

Coolant inlet temperature: 25 C [-120:500]

Name: Coolant inlet property (default)

☒ Apply to all entities that share this property

[확인] [취소] [도움말]

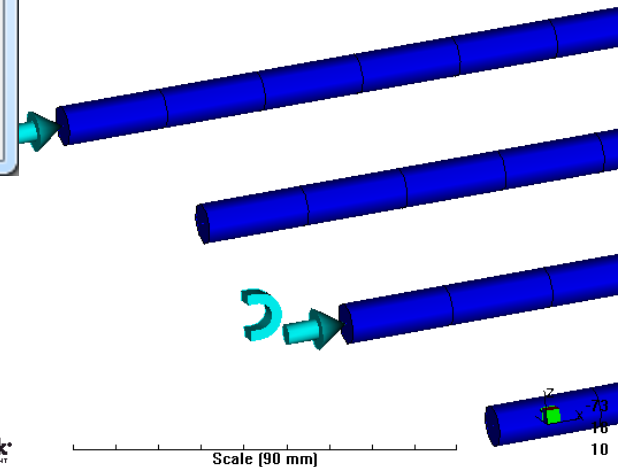


Set Coolant inlet

Click on model to create a coolant inlet with the selected property set:

Coolant inlet property (default)

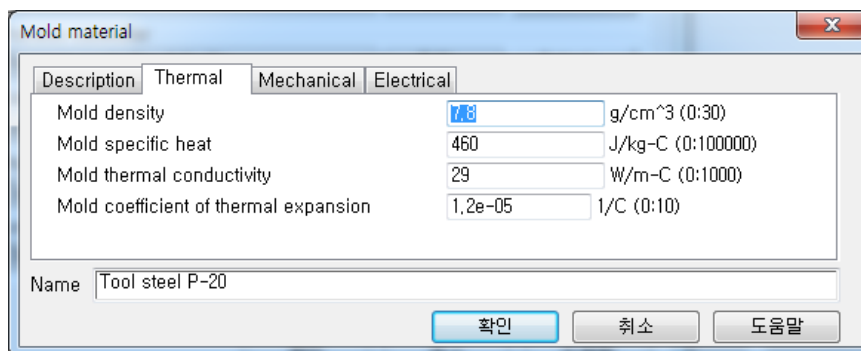
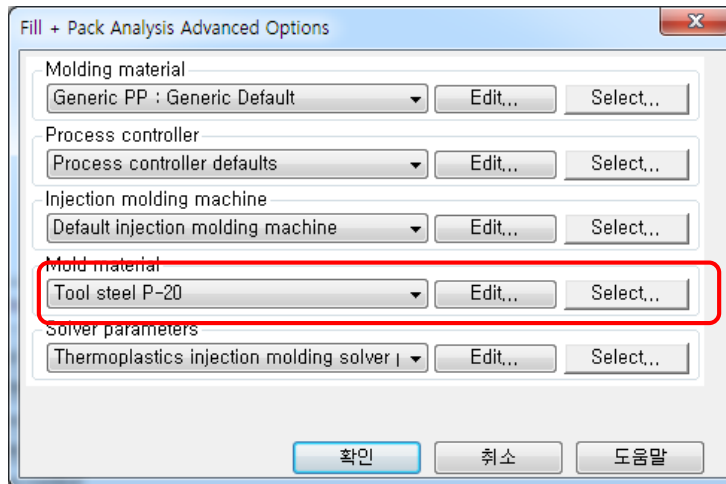
[New... Edit... Help]



(5) 금형 재질 (mold material) 변경

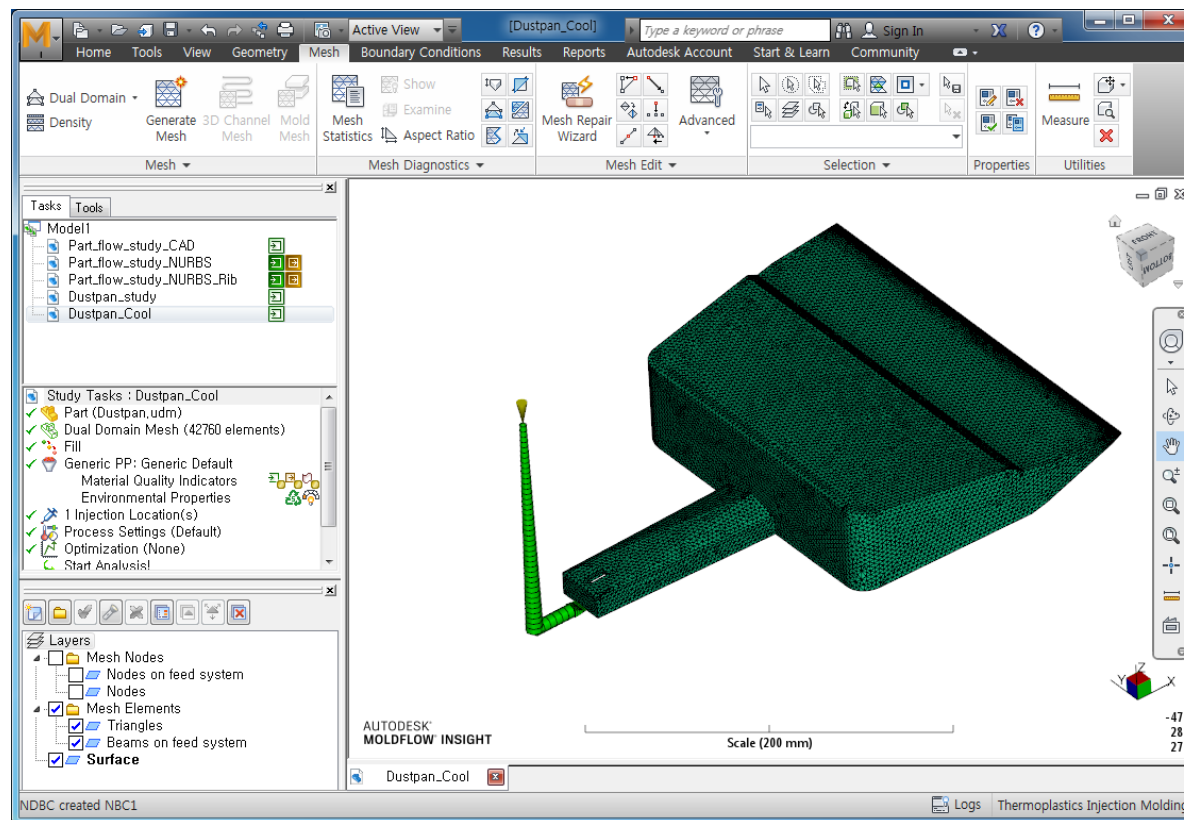
금형의 열적 물성은 냉각해석 결과에 큰 영향을 미친다. 물론 이점에서는 금형 인서트도 같다. 따라서 아래와 같이 정확한 금형의 재질을 금형 재질 DB에서 선택하여야 한다. 동일한 물성이 존재하지 않는다면 새로운 금형 물성 파일을 만들어서 입력 할 수도 있다.

<< Process Setting → Flow Setting → Advanced Options >>



2-2) 냉각 해석 실습 모델 불러오기

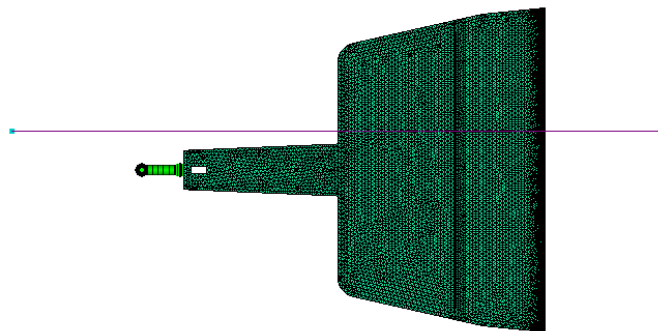
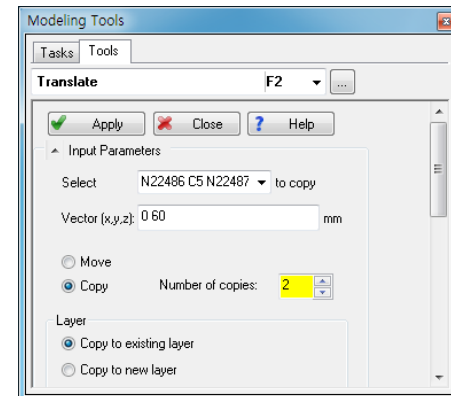
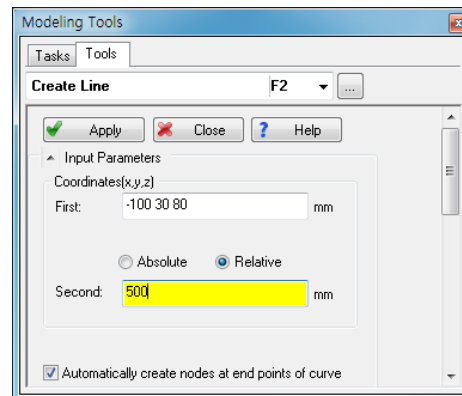
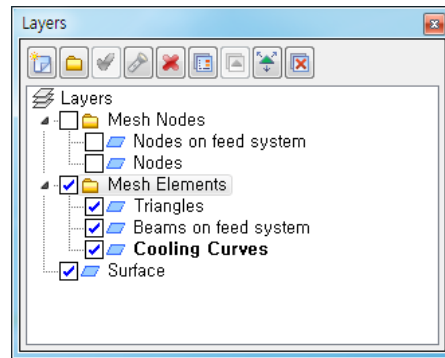
유동해석 실습 “Project”를 열고 실습 예제 모델 중 dustpan_cool.sdy 파일을 import 한다. 본 예제는 2 단 2 캐비티 금형이지만 실습에서는 1 캐비티 금형으로 가정하고 전체 냉각 채널의 1/2 만 설계하도록 하겠다. 물론 실제 해석에서는 전체 2 캐비티를 전부 모델링 하거나 각각의 mesh에 “Occurrence Number”를 설정하여 2 캐비티가 있는 것으로 인식되게 하여야 한다. 본 예제를 통하여 냉각 해석을 위한 모델링, 공정 조건 설정 그리고 냉각해석 결과 분석 방법을 배우도록 하겠다.



2-3) 냉각 채널 설계 하기

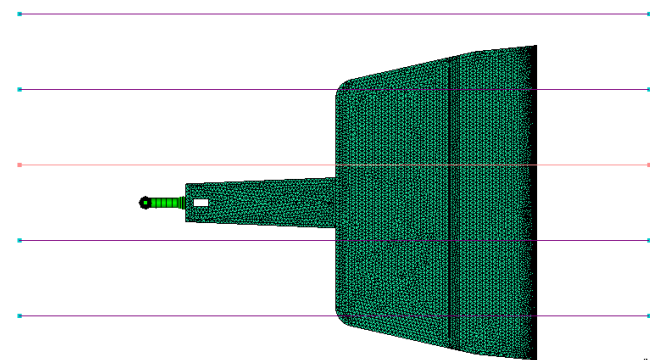
(1) Curve 그리기

먼저 Layer에서 New Layer를 생성하고 생성된 Layer의 이름을 “cooling Curves”로 변경한다. 새로 생성된 Layer는 Active Layer가 되므로 앞으로 생성하는 냉각라인이 자동으로 할당된다. “Geometry”의 “Curves”에서 “Create Line”을 이용하여 아래와 같이 제품 상단에 1개의 curve를 설계한다. “Utilities”의 “Move”에서 “Translate”를 이용하여 그 curve를 그림과 같이 +Y, -Y방향으로 각각 2개, 3개를 60mm 간격으로 복사한다. 이렇게 함으로써 제품 상측 냉각 channel curve는 완성되었다.



AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT

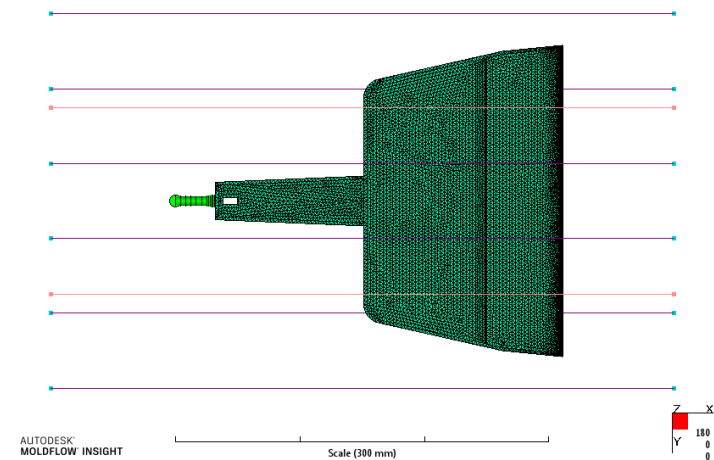
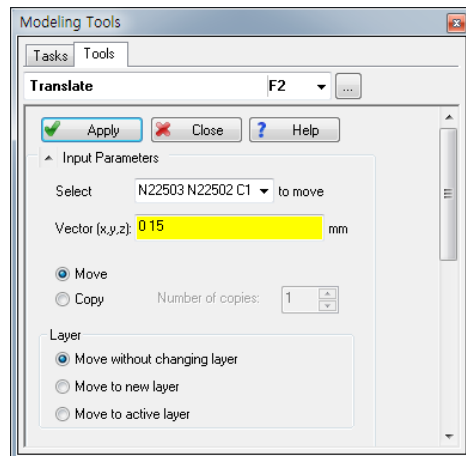
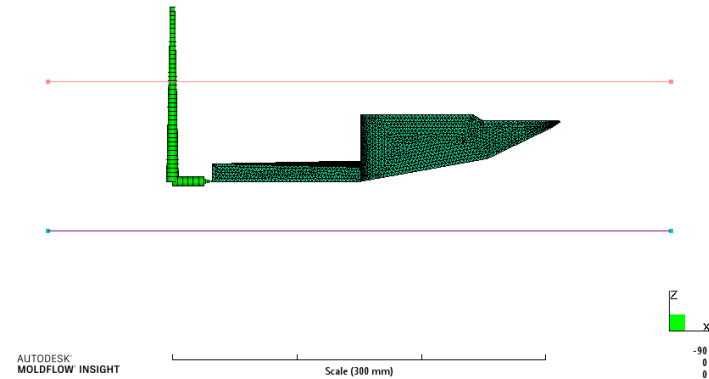
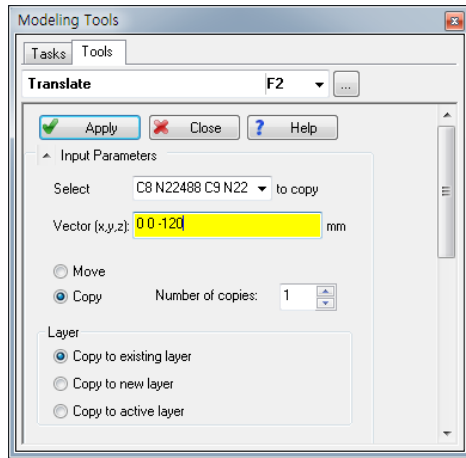
Scale (300 mm)



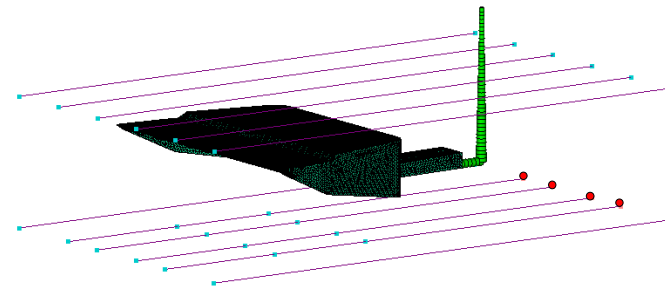
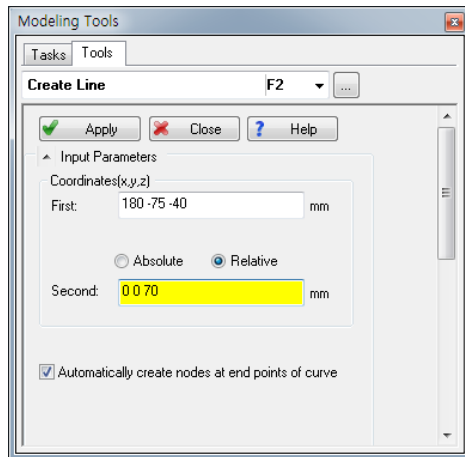
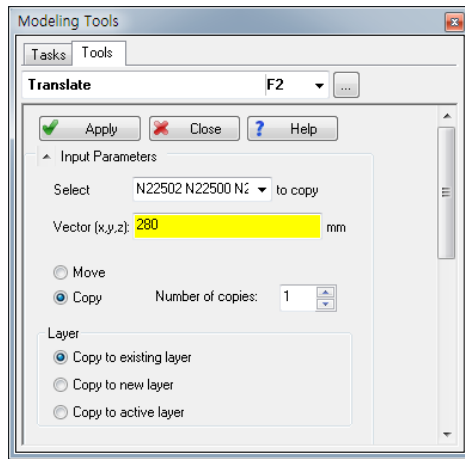
AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT

Scale (300 mm)

제품 하측 냉각 channel curve를 설계하기 편의상 상측 channel curve를 복사하여 활용한다. 먼저 상측 curve 모두를 선택하여 “Translate”를 이용하여 -Z축 방향으로 -120mm 복사한다. 그리고 제품 하측 채널 중앙에 baffle과 bubbler를 적절한 위치에 설계하기 위하여 하측 2번과 5번 2개의 curve를 “Translate”를 이용하여 +Y, -Y 방향으로 각각 15mm 중심방향으로 이동한다.



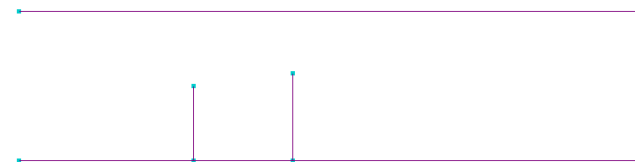
하측 중앙 4개 curve에 baffle을 설치하기 위하여 각각의 curve의 우측 끝단 node를 “Translate”를 이용하여 +X 방향으로 280mm와 360mm 위치에 각각 복사한다. 다시 복사된 Node 위치에 baffle을 설계하기 위하여 “Create Line”을 이용하여 +Z 방향으로 curve 설계한다. 여기서 우측은 70mm 이고 좌측은 60mm 이다.



AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT

Scale (300 mm)

Z
Y
X
-104
-145
8

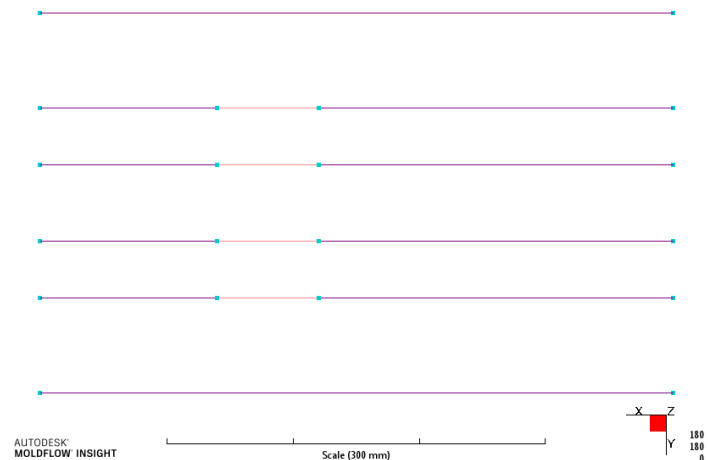
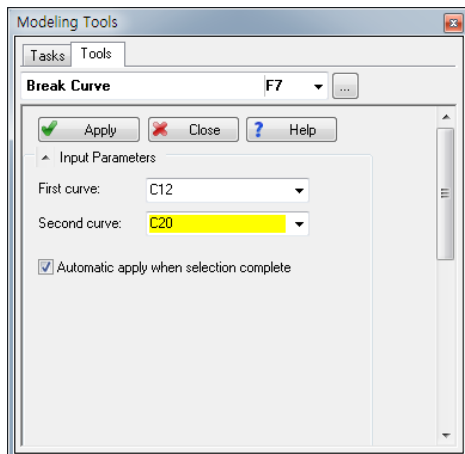
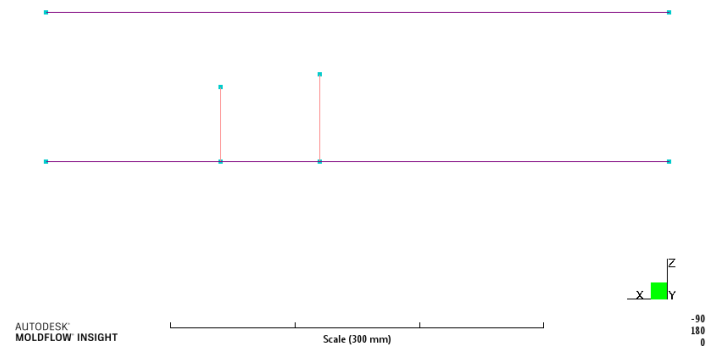
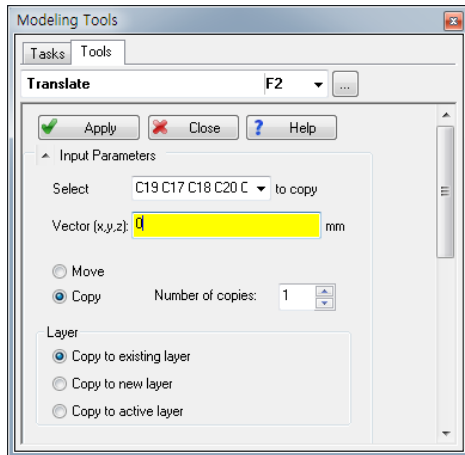


AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT

Scale (300 mm)

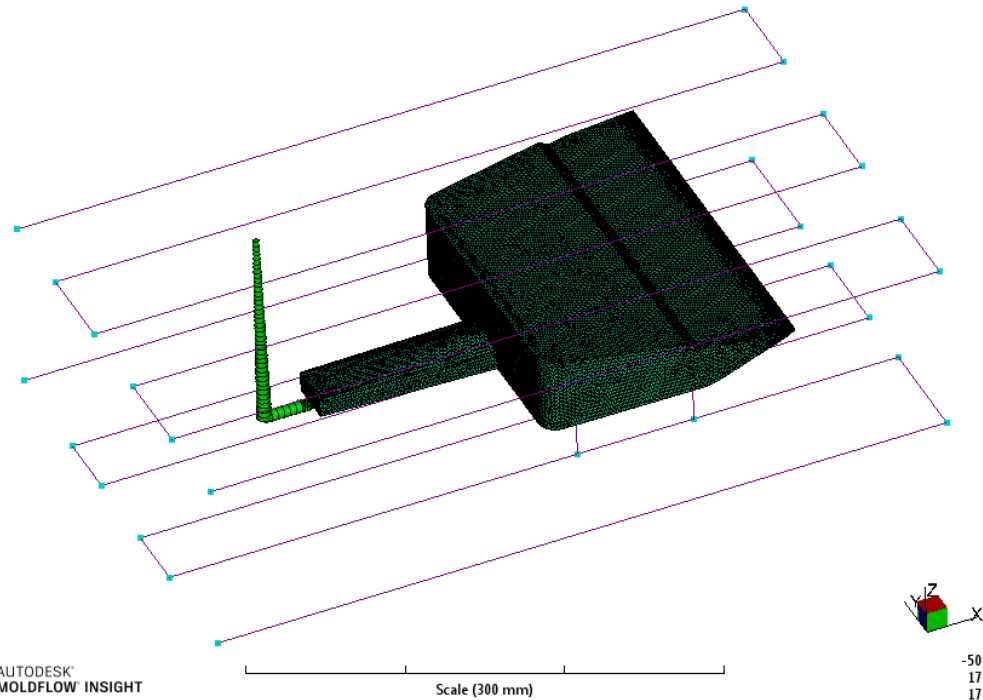
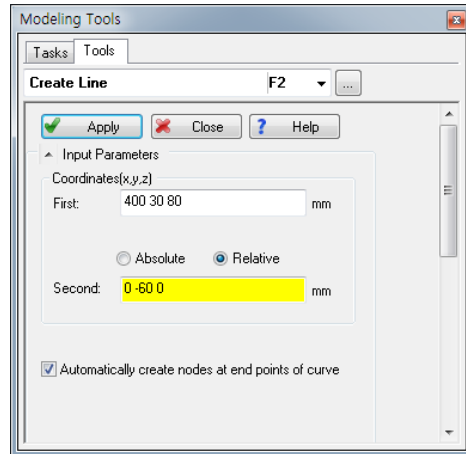
Z
Y
X
-90
100
0

Baffle curve는 2개를 겹쳐서 설계 하여야 함으로 8개의 baffle curve를 모두 선택한 다음 “Translate”를 이용하여 제자리에 복사한다. 또한 channel curve와 baffle curve가 만나는 부분에서는 channel curve가 단절되어야 하므로 “Create”의 “Curves”에 “Break Curve”를 이용하여 각각의 baffle curve와 연결된 channel curve 를 선택하여 모두 단절 시킨다. 단절되지 않은 부분은 나중에 beam mesh 생성시 경계 부분에서 연결이 되지 않아서 냉각수가 baffle로 흐를 수 없게 된다.



마지막으로 각각의 channel curve를 금형 외부의 호스로 연결하기 위하여 금형 상하의 channel curve들을 2개씩 “Create Line”을 이용하여 아래 그림과 같이 연결한다.

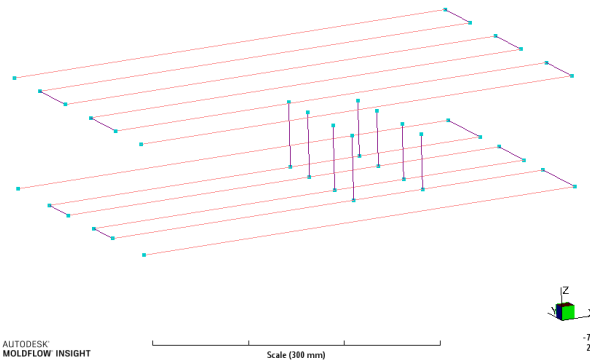
이것으로써 냉각해석을 위한 모든 curve의 설계가 완료되었다.



(2) Cooling Circuit 속성 설정하기

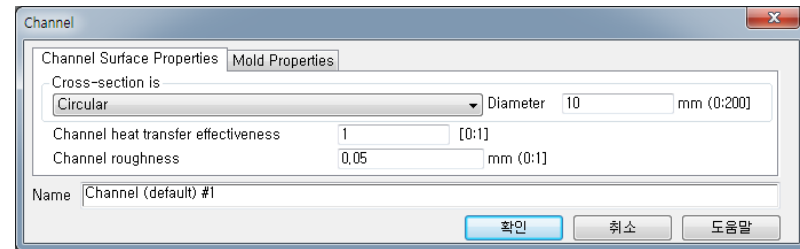
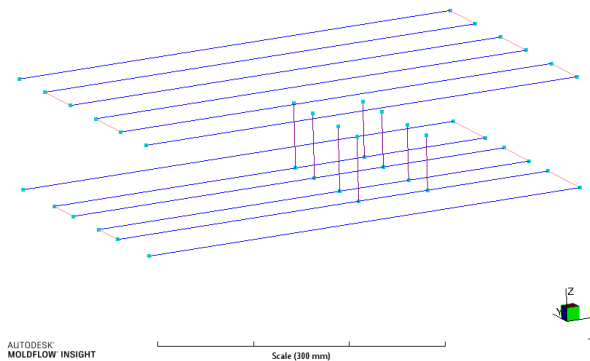
▶ Channel 속성 설정

먼저 channel 로 설계된 모든 curve를 선택하고 << Properties -> Assign ->New-> Channel>>을 클릭하여 아래와 같이 입력하고 확인을 클릭한다. 그러면 channel 속성이 설정된 curve들은 파란색으로 나타난다.

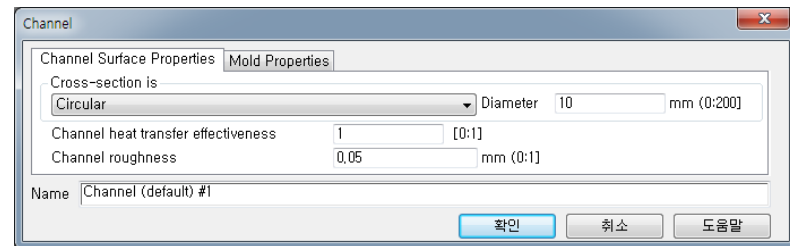


▶ Hose 속성 설정

Hose로 설계된 모든 Curve를 선택하고 << Properties -> Assign ->New-> Hose>>을 클릭하여 아래와 같이 입력하고 확인을 클릭한다.



여기서 일반 채널은 열전도 효율 THE(Heat Transfer Effectiveness) 값이 “1”이다.

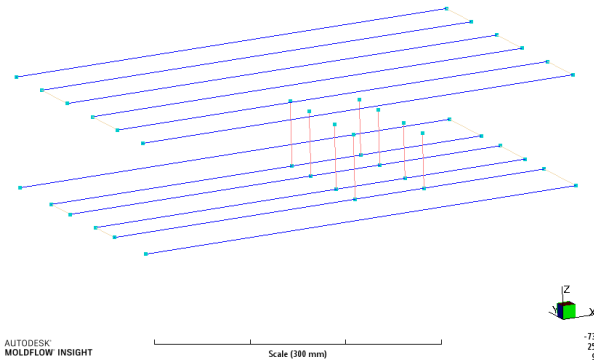


여기서 호스의 열전도 효율 THE(Heat Transfer Effectiveness) 값이 “0”이다.

호스는 금형 밖에서 채널과 채널을 연결해주는 역할을 하기 때문에 금형 온도에는 영향을 미치지 않는다.

▶ Baffle 속성 설정

Baffle로 설계된 모든 curve를 선택하고 << Properties -> Assign -> New-> Baffle>> 을 클릭하여 아래와 같이 입력하고 확인을 클릭한다. Baffle Curve는 노란색으로 변한다.



Baffle

Baffle Surface Properties **Mold Properties**

Diameter	18	mm (0:800)
Heat transfer effectiveness	0.5	[0:1]
Channel roughness	0.05	mm (0:1)

Name Baffle (default) #1

확인 **취소** **도움말**

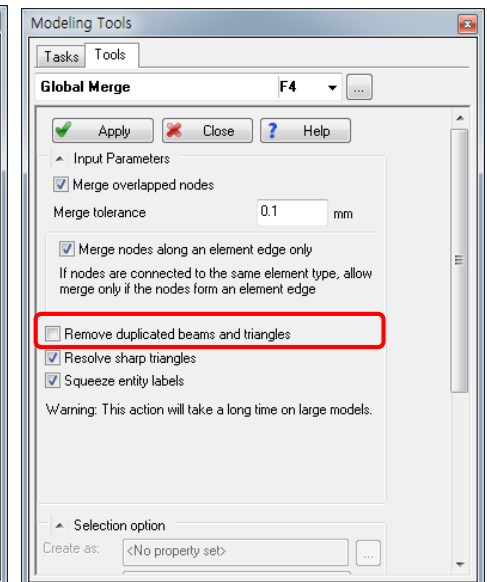
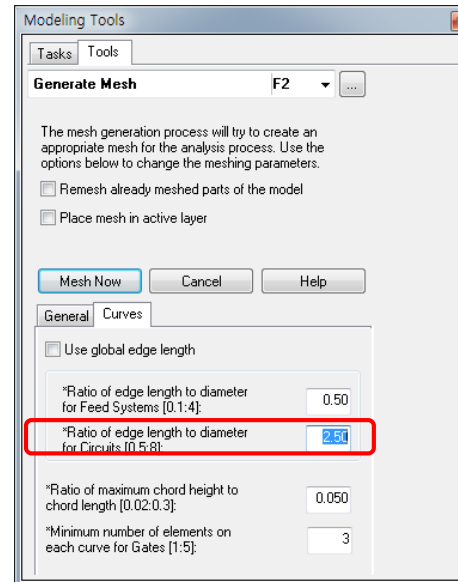
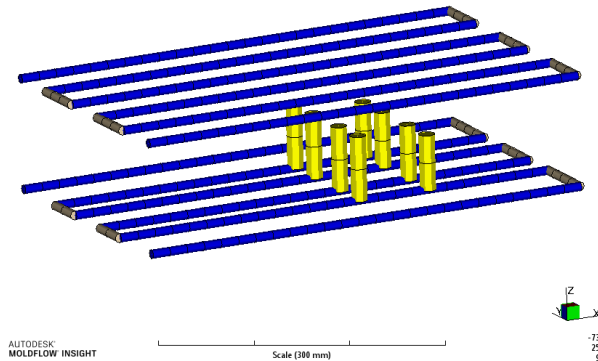
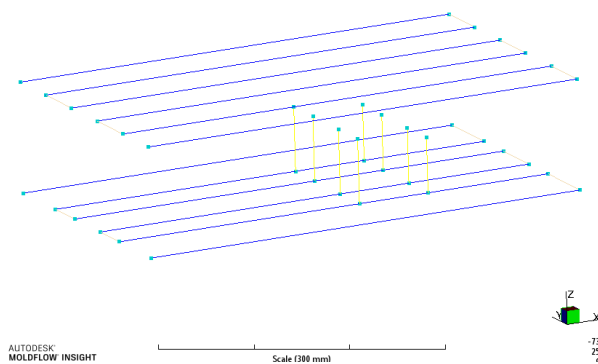
여기서 배플의 열전도 효율 THE(Heat Transfer Effectiveness) 값은 0.5 이다.

이것은 배플 형상이 반원이기 때문이다. 그리고 Baffle의 직경은 일반적으로 채널 직경의 2배 이상이다.

(3) 냉각 채널 Mesh 생성하기

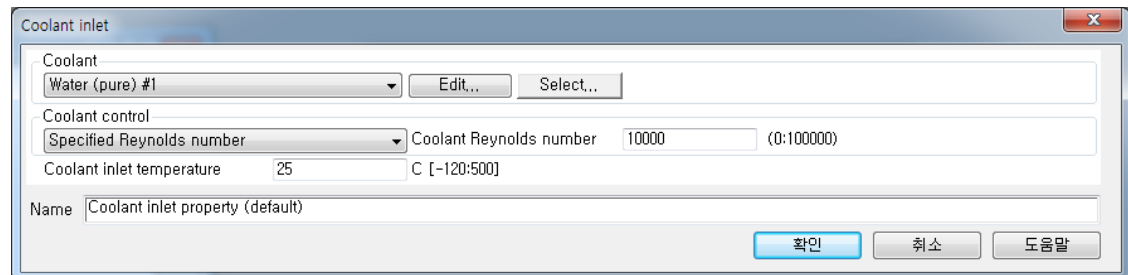
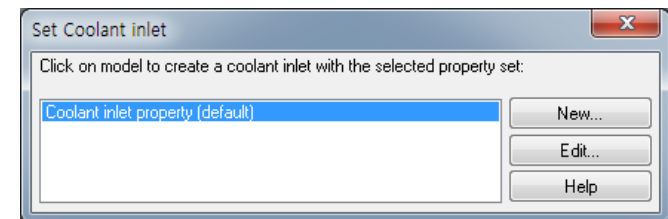
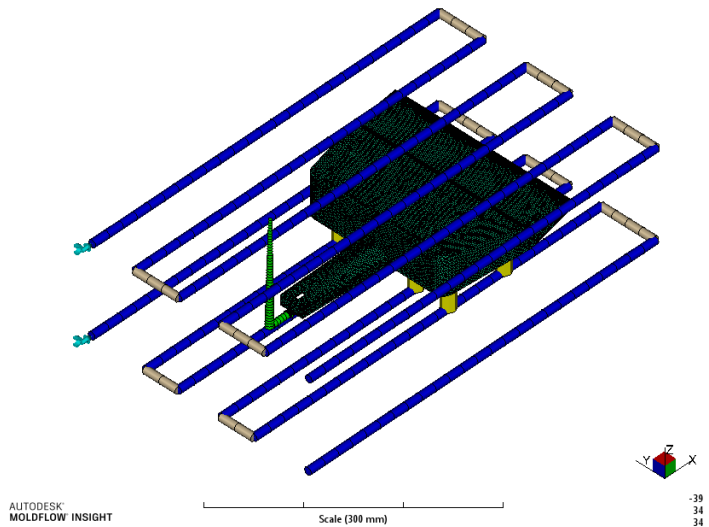
모든 냉각 curve들의 속성이 설정되면 <<Mesh-> Generation Mesh>>를 클릭하고 Curves 탭의 “Ratio of edge length to diameter for circuit”를 값을 2.5로 입력하고 mesh를 생성한다. 여기서 주의 할 점은 냉각채널의 beam element 길이는 냉각채널의 직경의 2.5~ 3배 이어야 한다.

Baffle과 bubbler의 경우는 beam element가 두 개씩 완전히 겹쳐져 있다. 따라서 baffle과 bubbler의 mesh를 생성한 이후에는 “Mesh Repair”의 “Global Merge” 기능을 사용할 때 “Remove duplicated beams and triangles” 옵션을 사용하지 않아야 한다.



(4) 냉각 채널 Inlet 지정하기

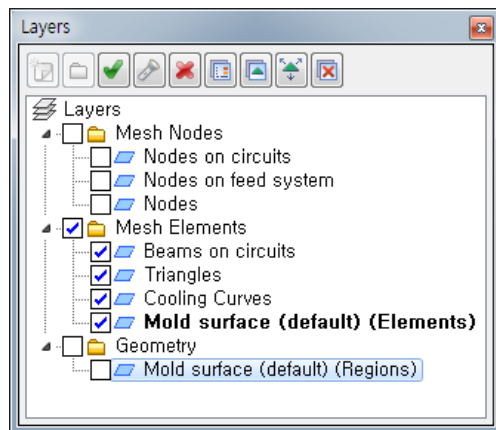
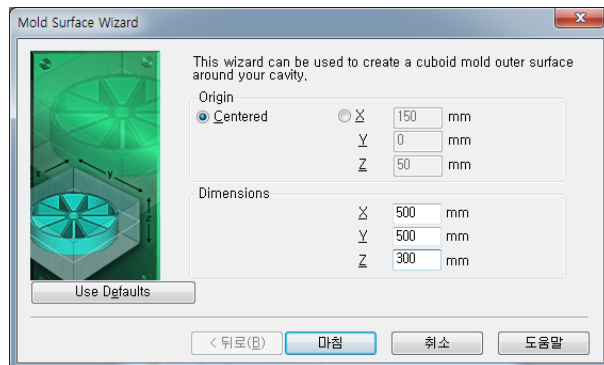
냉각수가 입수되는 부분에 냉각수의 종류와 냉각수의 유속 및 온도를 입력하여야 한다. 먼저 채널 냉각수 Inlet을 설정하기 위하여 << Boundary Conditions-> Coolants Inlet>>를 클릭하여 Default Inlet을 선택하고 “Edit”를 클릭하여 아래와 같이 입력하고 확인을 클릭한 후 Inlet 위치에 해당하는 node들을 클릭하면 아래와 같은 Inlet 마크가 생성된다. Channel에 따라서 다른 온도의 냉각수를 사용하고자 하는 경우에는 “New”를 이용하여 냉각 채널 Inlet 속성을 추가로 만들고 다른 온도 값을 입력한 후 동일한 방법으로 Inlet을 설정하면 된다 .



2-4) Mold Surface 설계하기

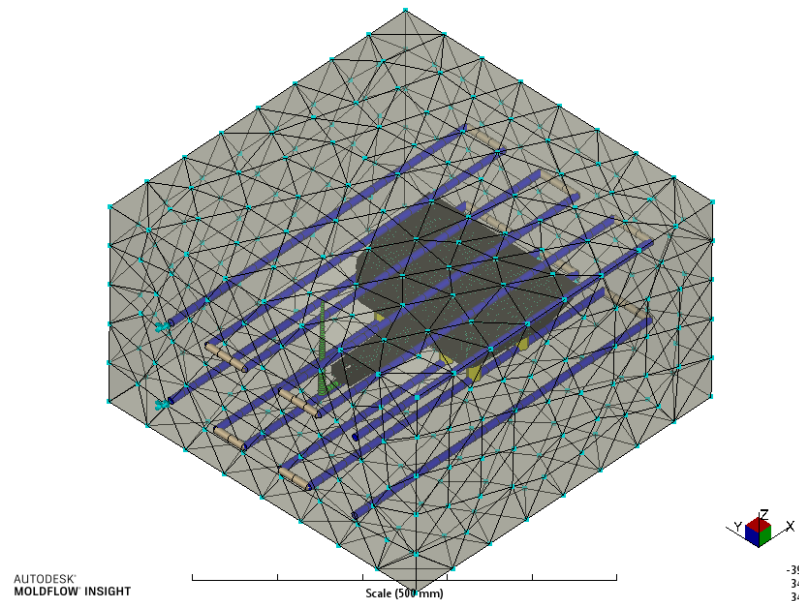
냉각 해석을 위해서는 냉각해석 영역을 설정하여야 한다. 즉 금형의 외곽 surface를 설정한다. 일반적으로 mold surface는 냉각해석의 필수요건이 아니라 선택 요건이긴 하지만 권장되는 부분이다. Mold Surface가 설계되지 않았을 경우에 해석에서는 모델 최외각 크기의 2배 정도의 크기로 mold surface가 존재한다고 가정하고 해석이 진행된다.

Mold surface는 Geometry”의 “Mold Surface”를 이용하여 금형 크기로 육면체로 설계하면 된다. 먼저 mold의 위치에 관계 없이 크기만을 고려하여 설계하고, 설계가 끝난 이후 “Utilities”의 “Translate”를 이용하여 적합한 위치로 이동하면 된다. Mold Surface의 Z 방향 크기는 sprue 끝에서 금형 받침판 하단까지의 크기이고, XY 크기는 금형의 실제 크기이다.



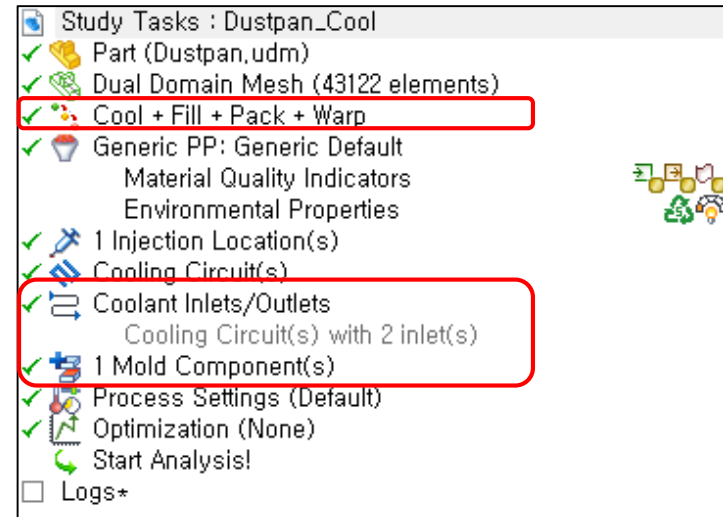
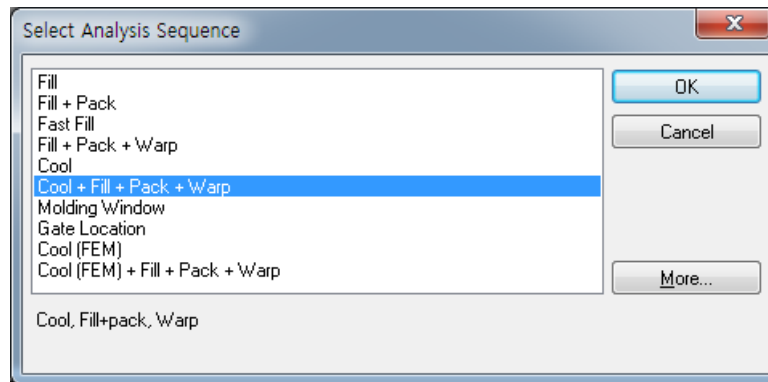
마침을 클릭 하면 Layer에 “Mold surface (Regions)”와 “Mold surface (Elements)”가 각각 생성된다.

생성된 Mold surface는 기존 모델링과의 배치를 고려하여 “Translate” 도구를 이용하여 이동할 수 있다.



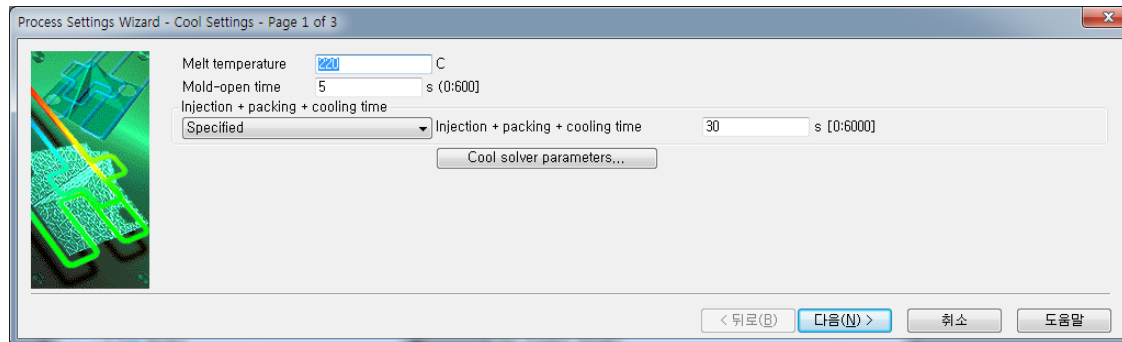
2-5) Analysis Sequence 변경하기

냉각 해석을 진행하기 위하여 작업 목록의 Analysis Sequence를 아래와 같이 “Fill -> Cool + Fill + Pack” 으로 변경한다. 이렇게 변경하면 작업 목록에 Cooling Circuit 항목이 표시되고 그 냉각 Inlet 수가 표시된다.

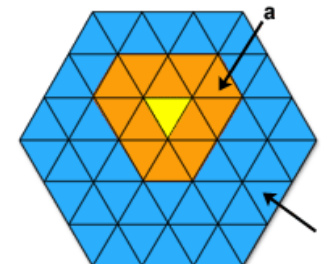
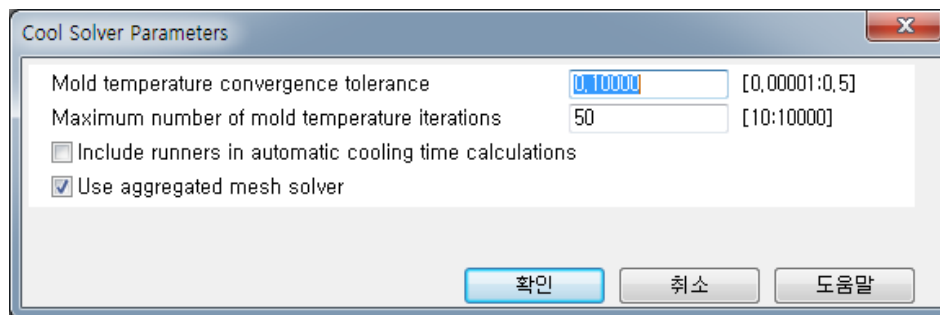


2-6) 냉각해석 공정조건 설정

냉각 해석에서 금형 온도를 정확히 예측하기 위해서는 Cool Settings에서 “Melt Temperature”와 “Injection+Packing+Cooling” 시간 그리고 “Mold-open” 시간을 가능한 정확히 입력하여야 한다. “Melt Temperature”이 높을 수록, 그리고 “Injection+Packing+Cooling” 시간과 “Mold-open” 시간의 합이 짧을 수록 계산되는 금형 온도는 높아질 것이다.



Cool Solver parameters에는 아래와 같은 설정 값들이 하는데, 여기서 “use aggregated mesh solver” 옵션은 냉각해석에서 각각의 element의 온도 계산에 영향을 미치는 주위의 element의 처리 방법에 대한 것이다. 모든 element의 영향을 각각 계산하기에는 냉각 해석에 필요한 memory가 크게 증가하여 해석 시간이 크게 증가한다. 따라서 “use aggregated mesh solver” 옵션은 주위의 일정 영역의 유사 Element들을 군집으로 처리하여 해석 시간을 단축 시키기 위한 옵션이다. 보다 신뢰성 높은 결과를 원한다면 이 옵션을 사용하지 않아야 한다.



a = Automatic
b = Ideal

Flow Setting은 유동해석 부분을 참조하여 설정한다. 이것으로 냉각, 유동해석을 위한 모든 조건이 만족되었다.

3. 냉각해석 결과

3-1) 냉각 해석의 완료

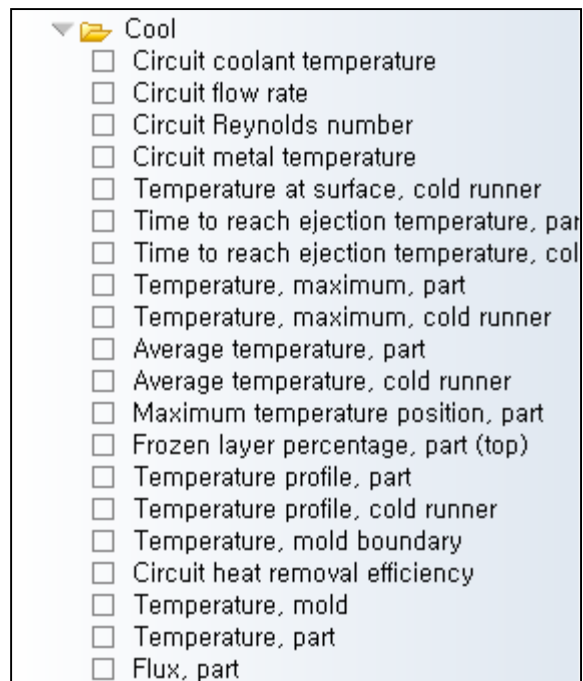
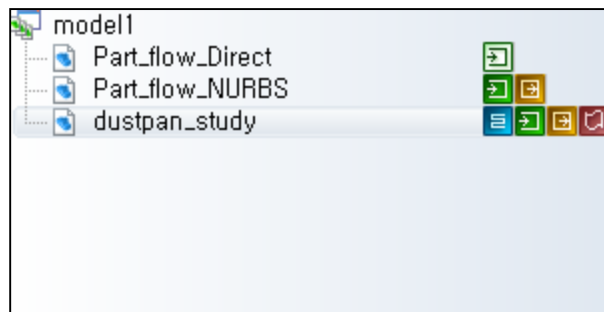
냉각 해석이 이상 없이 완료되면 몇 가지 변화가 나타난다.

▶ Project View

해석이 완료되면 우측 그림과 같이 Cool과 Fill+Pack 아이콘이 각각의 색상으로 표시된다.

▶ Study Tasks

해석 결과 목록이 그림과 같이 Study Tasks에 나타난다.



3-2) Screen Output

냉각 해석 결과의 Screen output은 유동해석결과와 마찬가지로 중요한 정보를 제공한다.

▶ Cooling Network Analysis

냉각 해석 설정에서 지정된 Reynolds No. 값을 얻기 위한 각각 채널의 적합한 유속과 각각 채널의 유속을 위한 냉각수 펌프의 Pumping Power가 계산된다.

▶ Solution of equilibrium TMP field

Cool Setting의 Cool Solver Parameter에 지정된 Tolerance와 Iteration을 이용하여 금형 평균온도를 계산하는 과정이다. 정상적으로 해석이 종료되었을 경우에는 우측 그림과 같이 Iteration 범위 내에서 Tolerance 내에 수렴하는 값을 찾아내어 정상적으로 해석이 종료된다. 그러나 그렇지 않을 경우에는 “Cooling analysis has not converged” 라는 error message가 나타나고 해석 결과가 비정상적이다. 이 경우 Iteration Number와 tolerance 를 증가시켜서 수렴이 되게 할 수는 있지만 해석 신뢰도는 낮아질 수 밖에 없다.

또한 많은 경우에 Intersection과 Overlapping 되는 불량 mesh와 적절하지 못한 냉각 채널 설계로 인하여 수렴이 되지 못하는 경우가 발생하므로 전체적인 모델링을 재점검하여야 한다.

Inlet node	Flowrate in/out (lit/min)	Reynolds No. range	Press. drop over circuit (MPa)	Pumping power over circuit (kW)
7056	4.23	10000.0 - 10000.0	0.0030	2.148e-04
7074	4.23	10000.0 - 10000.0	0.0030	2.148e-04
7111	6.92	10000.0 - 16355.2	0.0128	0.001
7167	6.92	10000.0 - 16355.2	0.0128	0.001

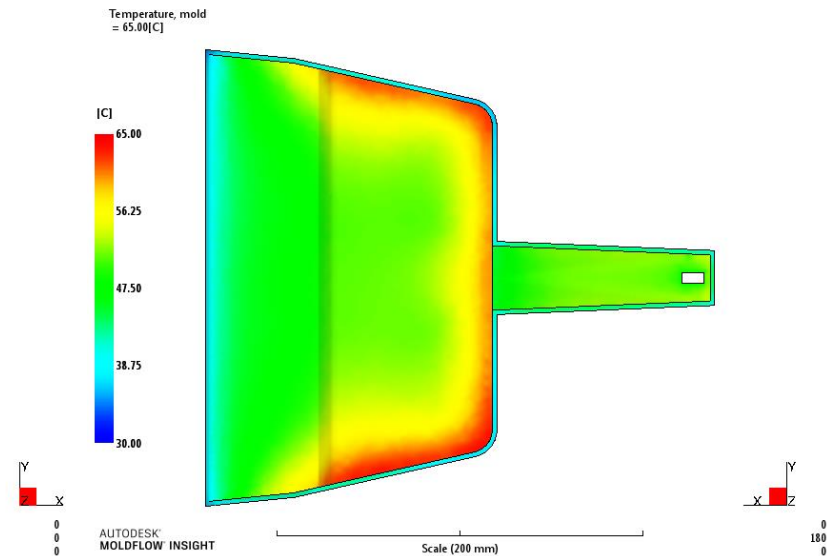
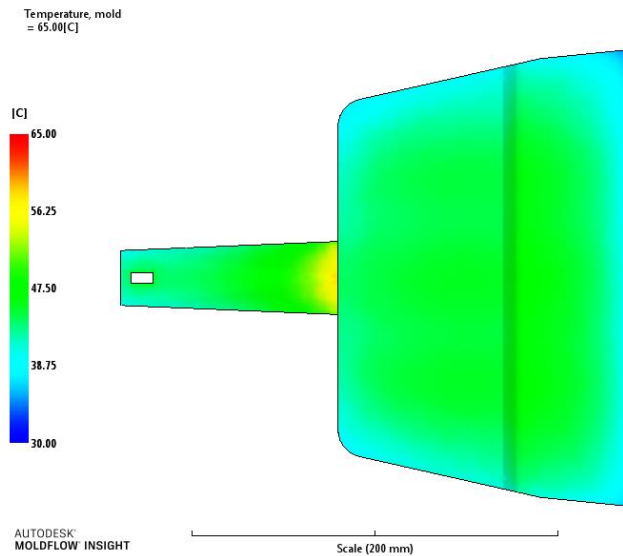
External iteration	Cycle time (s)	Avg temp iteration	Avg temp deviation	Dif temp iteration	Dif temp deviation	Circ residual
1	35.000	11	25.069008	0	0.000000	1.000000
1	35.000	8	3.750000	0	0.000000	1.000000
1	35.000	15	2.812289	0	0.000000	1.000000
1	35.000	9	29.192928	0	0.000000	1.000000
1	35.000	6	5.453575	0	0.000000	1.000000
1	35.000	3	2.678432	0	0.000000	1.000000
1	35.000	2	0.726118	0	0.000000	1.000000
1	35.000	0	0.003325	0	0.000000	1.000000
1	35.000	4	0.007084	0	0.000000	1.000000
2	35.000	44	1.467687	0	0.000000	1.000000
2	35.000	1	0.011252	0	0.000000	1.000000
2	35.000	6	0.019300	0	0.000000	1.000000
3	35.000	30	0.199286	0	0.000000	0.004448
3	35.000	1	0.007294	0	0.000000	0.004448
3	35.000	5	0.014461	0	0.000000	0.004448
4	35.000	6	0.024717	0	0.000000	0.000667
4	35.000	1	0.004587	0	0.000000	0.000667
4	35.000	0	0.001677	0	0.000000	0.000667
5	35.000	5	0.002589	0	0.000000	0.000091
5	35.000	0	0.000823	0	0.000000	0.000091
5	35.000	0	0.000827	0	0.000000	0.000091

3-3) 해석 결과

► Temperature, mold

Temperature, mold Result는 주어진 냉각시스템과 냉각수 조건에 의하여 예상되는 금형 온도를 나타낸다. 금형 온도의 계산은 냉각 해석의 가장 큰 목적이라고 할 수 있다. 유동해석에서는 이 결과를 받아들여 충전과 보압 해석을 진행한다. 여기서 Dual-domain 모델의 냉각 해석의 경우는 Temperature [Top] 해석 결과만이 존재하지만, Midplane 해석에서는 Temperature [Top]과 [Bottom]이 존재하는데, 이것은 mesh의 orientation 정의와 관련된다.

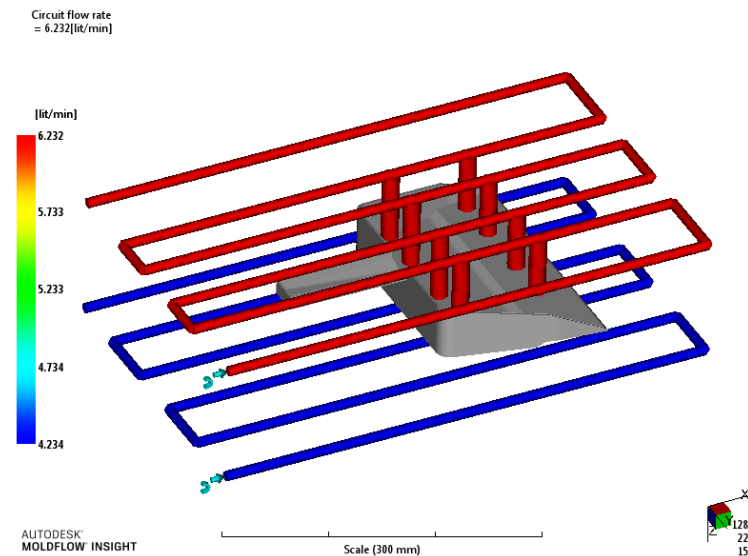
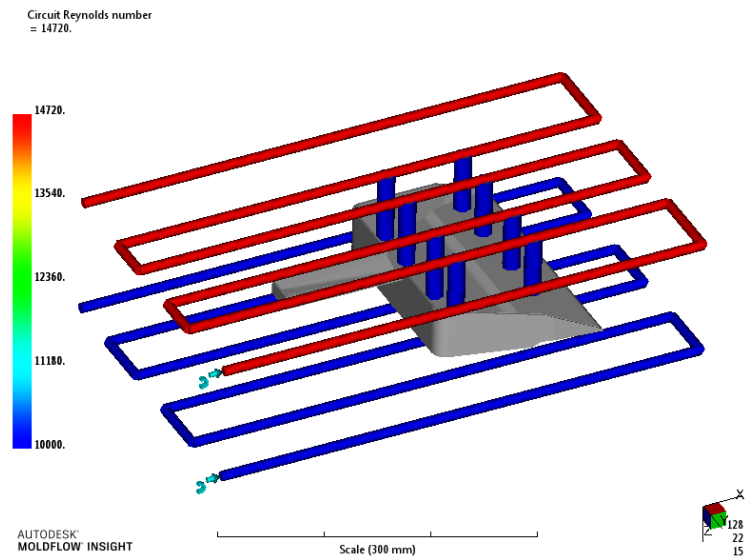
금형 온도는 수지의 사출압력, 형체력, 웰드라인, 사이클 시간 및 변형에 크게 영향을 준다. 전체 평균 금형 온도가 높으면 수지의 유동성이 증가하여 사출압력과 형체력을 감소시키고, 고화층의 두께를 감소시켜 웰드라인의 선명도를 감소시킨다. 그러나 제품의 냉각시간이 증가하여 사이클 시간이 증가한다. 또한 금형 온도가 제품의 상하 또는 지역에 따라 균일하지 않으면 수축률 편차에 의한 변형이 발생할 수 있다. 따라서 금형 온도가 가능한 모든 부분에서 균일하도록 냉각 설계 변경하여 hot spot과 cold spot들을 제거하여야 한다. 또한 계산된 금형 온도가 목표 금형 온도와 차이가 발생할 경우에는 냉각시스템과 냉각수 조건을 변경하여 개선하여야 한다.



► Circuit Reynolds Number & Circuit Flow Rate

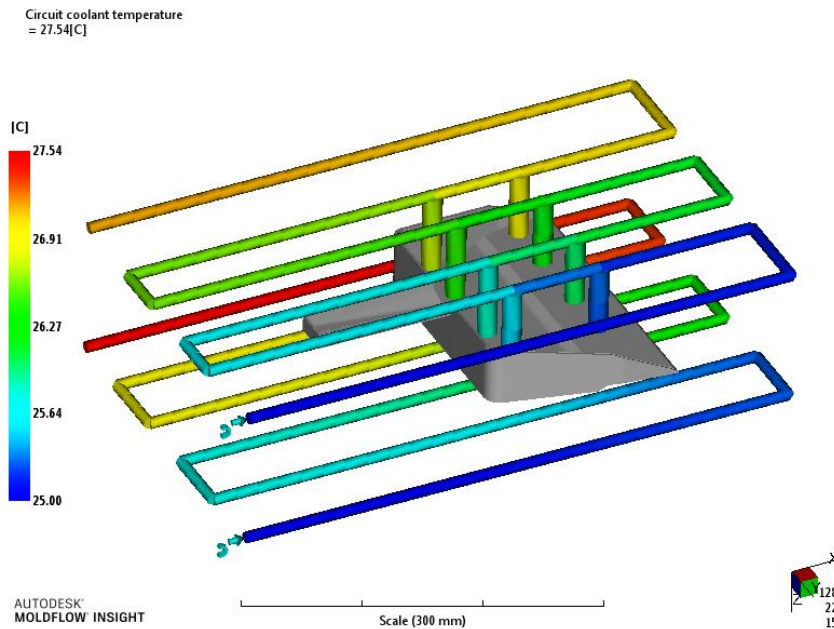
Circuit Reynolds Number Result는 냉각채널 각 부분별 Reynolds Number를 나타내는데, Reynolds Number는 입수부의 냉각수 flow rate과 냉각채널 직경에 비례하고 냉각수의 동점도에 반비례한다. Reynolds Number는 냉각수 냉각 효율을 판단하는 기준이 되며, Reynolds Number가 10,000에 가까워 질수록 냉각효율은 커진다. 즉 냉각수 유속이 증가하여 냉각수의 흐름이 층류에서 난류가 될수록 냉각 효율은 커진다. 그러나 더 빠른 유속에 의하여 Reynolds Number가 10,000 이상으로 높아져도 냉각 효율은 더 이상 증가하지 않는다. 따라서 Reynolds Number가 10,000에 가까워 지도록 냉각수의 flow rate를 조절할 필요가 있다.

냉각해석에서는 냉각수 유속 제어 방법을 Reynolds Number 또는 Flow Rate로 설정할 수 있는데, Flow rate로 설정하면 설정한 유속에 의한 Reynolds Number 가 계산되어 표시되고, Reynolds Number로 설정하면 설정한 Reynolds Number 를 달성하기 위한 적합한 유속이 계산되어 표시된다.



▶ Circuit Coolant Temperature

Circuit Coolant Temperature Result는 냉각수의 온도 변화를 나타낸다. 일반적으로 냉각수는 입수부를 통과하여 금형 밖으로 나올 때까지 캐비티로부터 열을 얻게 되어 온도가 상승하지만, 경우에 따라서는 금형 외곽으로 열 손실이 더 많아서 온도가 내려갈 수도 있다. 그리고 냉각수의 입수부와 출수부 사이의 온도편차는 2℃이하가 되어야 한다. 냉각수의 온도가 그 이상으로 증가하는 경우에는 냉각채널을 분리하여 설계를 하여야 한다. 그렇지 않으면 금형 온도 편차에 의한 제품 변형이 발생할 수도 있다.

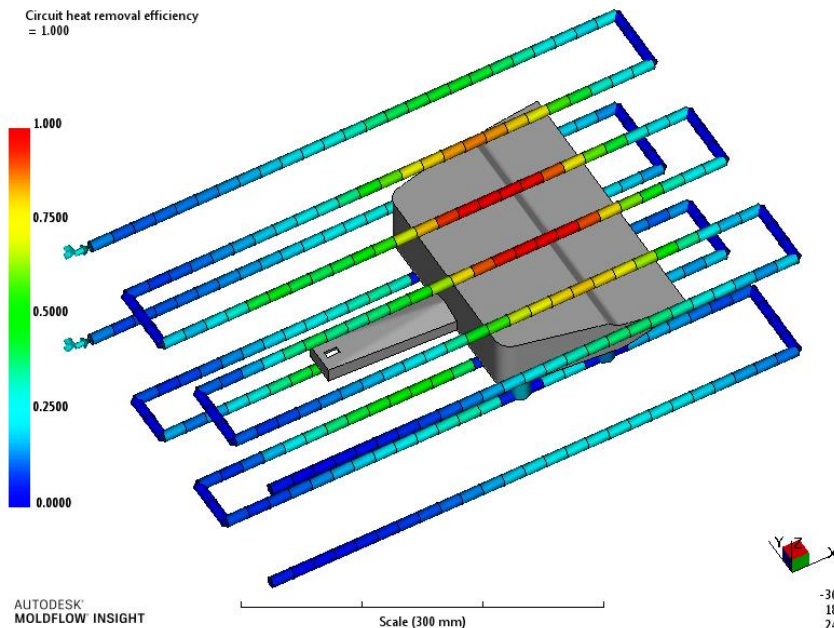


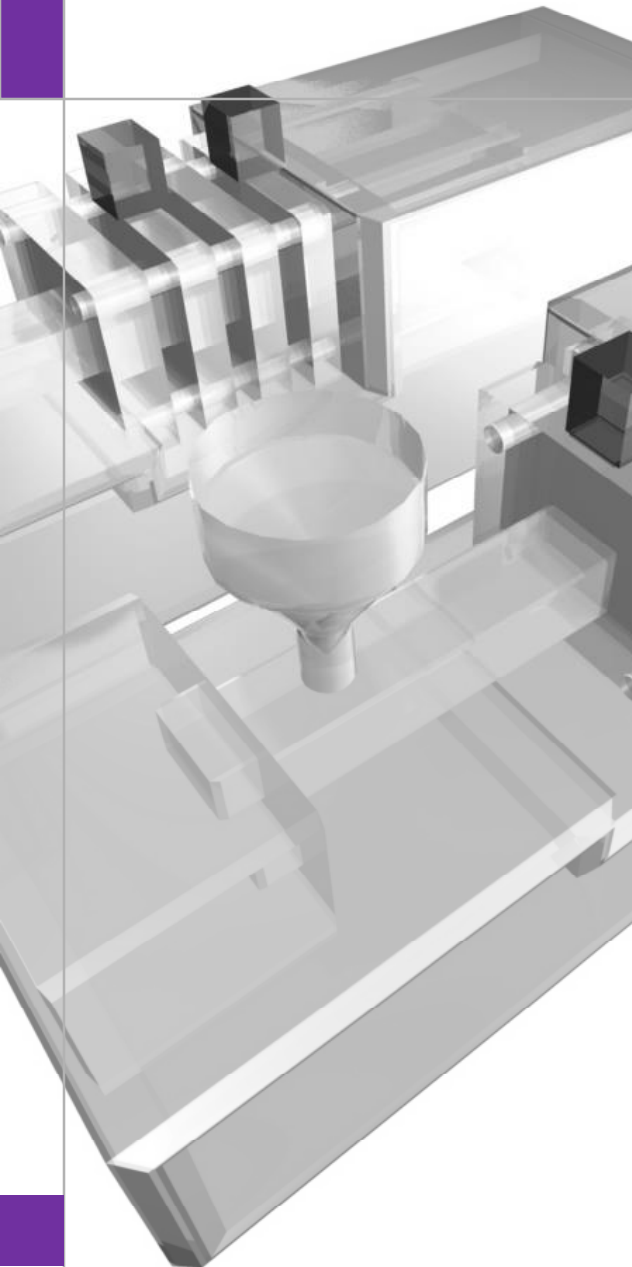
▶ Circuit Heat Removal efficiency

Circuit Heat Removal efficiency 결과는 제품으로부터의 열을 냉각채널의 각각의 냉각 beam element가 얼마나 효과적으로 열을 제거하는지에 대한 상대적 비를 나타낸다. Circuit Heat Removal efficiency 는 + 값을 가지는 경우는 냉각 채널이 금형으로 부터 열을 제거하였다는 것이고, -값을 가지는 경우는 냉각 채널이 금형에 열을 공급하였다는 의미이다.

일반적으로는 + 값을 가지게 되며, 제품과 냉각채널과의 거리가 가까울 수록, 냉각채널의 Reynolds No가 클수록, 제품과 냉각수의 온도편차가 클수록 Circuit Heat Removal efficiency는 증가한다.

따라서 이 결과는 어느 채널의 다른 채널들에 비하여 제품으로부터 열을 더 많이 제거하는가를 나타낸다. 만약 냉각 채널의 Circuit Heat Removal efficiency가 0에 가까운 경우라면 그 냉각 채널은 제품의 냉각에 전혀 기여를 못하는 것이므로, 필요에 따라서는 제거되어도 된다. 그러나 열이 집중되는 지역인데도 채널의 Circuit Heat Removal efficiency가 0에 가깝다면 그 냉각 채널은 제품으로 부터 너무 멀리 설계되었다는 것이므로, 이 경우는 채널을 그 지역에 추가 또는 근접 이동하여 열을 제품으로부터 효과적으로 제거하여야 한다.



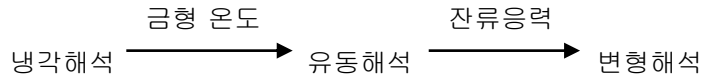


V 변형해석

1. 변형해석 이론
2. 변형해석 실습
3. 변형해석 결과

1. 변형 해석 이론

변형해석은 유동해석에서 계산된 잔류응력을 이용하여 성형 후에 예상되는 제품의 변형 형태와 그 크기를 계산하는 구조 해석이다.



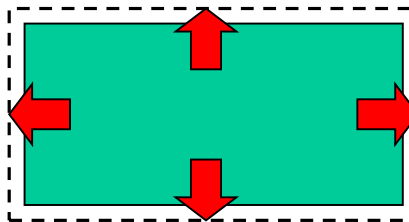
1-1) 잔류응력 (residual stress)

유동해석 과정에서 발생한 잔류응력을 이용하여 변형해석을 수행하게 되면 제품은 수축 및 변형이 발생하고 그 내부에는 일부 잔류응력이 남게 된다. 여기서 유동해석에서 계산된 잔류응력을 전체 잔류응력(total residual stress)이라 하고 수축 및 변형 후에 제품에 남는 잔류응력을 최종 잔류응력(final residual stress)이라 한다.

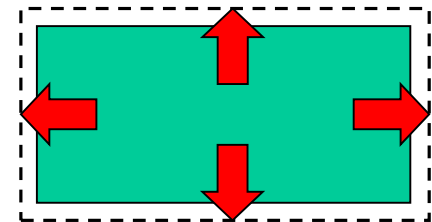
유동해석에서 계산되는 전체 잔류응력은 제품의 수축과 금형 구속에 의하여 발생한다. 즉 플라스틱 수지는 금형내에서 냉각에 따라 수축하려고 하지만 금형 구속으로 인하여 수축에 방해를 받게 되어 응력으로 변하게 된다. 물론 취출 후 상온 까지 냉각되면서도 추가적인 수축이 일어난다. 유동해석에서는 추출 후에도 금형에 의하여 지속적으로 구속이 되어 있다고 가정하고 잔류응력을 계산한다. 즉 유동해석에서 계산되는 잔류응력은 플라스틱 수지가 금형내에서 액체에서 고체로 변하는 취출전의 잔류응력과 고온의 고체에서 상온의 고체로 변하는 취출 후의 잔류응력을 모두 합한 것이 된다. 따라서 이러한 유동해석 과정에서 계산된 잔류응력은 단지 변형해석의 입력 값으로 사용하기 위한 가상의 응력이 된다. 이러한 잔류응력을 이용하여 변형해석을 수행하게 되면 제품이 상온까지 냉각되었을 경우의 제품의 최종 수축과 변형이 계산된다.



(a) 제품 (추출 직후)



(b) 제품 (취출 직후)



(c) 제품 (상온)

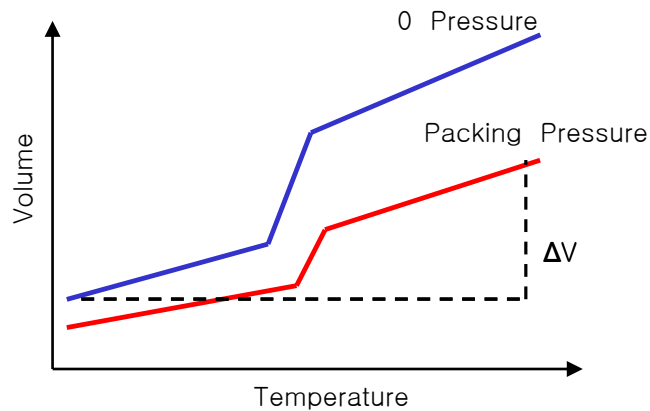
$$\text{전체 잔류응력(Total RS)} = \text{잔류응력 1 (충전 + 보압 + 냉각)} + \text{잔류응력 2 (취출 후 ~ 상온)}$$

1-2) 수축(shrinkage)

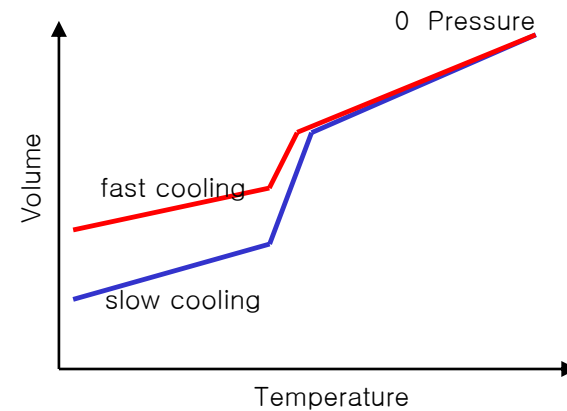
따라서 잔류응력의 발생원인은 제품의 수축이라 할 수 있다. 이러한 제품의 수축은 수지의 PVT에 의한 수축과 분자 또는 첨가제의 배향에 의한 수축으로 요약할 수 있다.

제품의 수축에 영향을 미치는 요소들을 나열하면 아래와 같다.

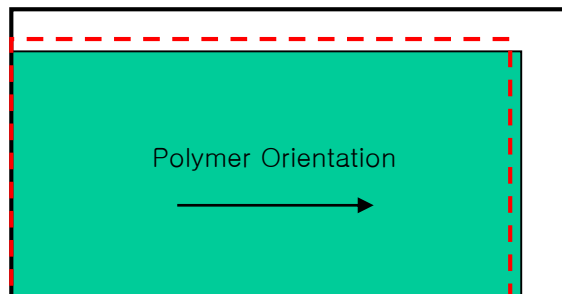
(1) 체적 수축률 (volumetric shrinkage) – PVT 이력에 의하여 수축률이 다르다.



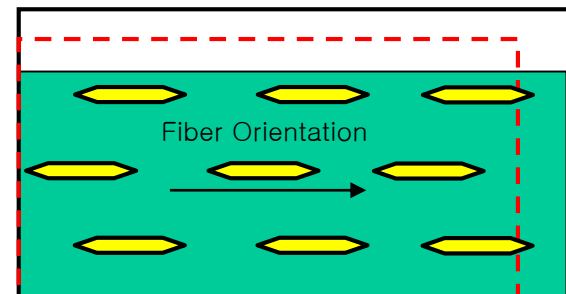
(2) 냉각속도 (cooling rates) – 냉각속도에 따라 PVT 곡선이 달라져서 수축률이 다르다.



(3) 고분자와 파이버 배향 (molecular & fiber orientation) – 배향 방향과 그 직각 방향의 수축률이 다르다.

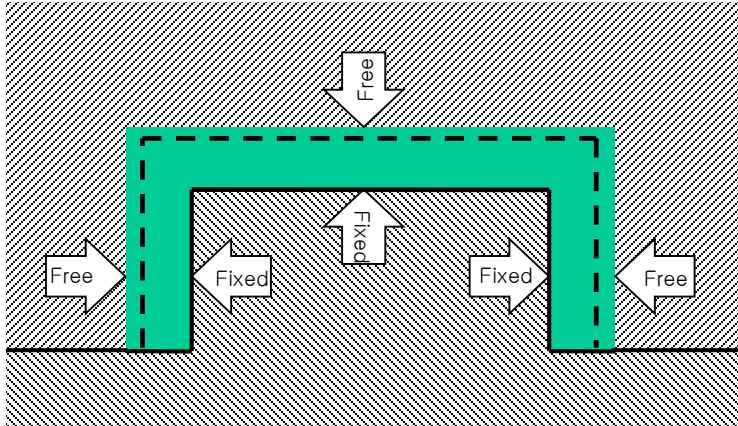


(a) 고분자의 배향에 의한 수축편차



(b) 파이버 배향에 의한 수축편차

(4) 금형 구속 (mold restraint) - 수지는 금형 속에서 냉각에 의하여 수축하지만 금형 구속에 의하여 두께 방향 수축은 가능하나 길이방향 수축이 불가하다.



(5) 응력 완화 (stress relaxation)

금형속에서 성형품의 수축에 의하여 발생한 잔류응력은 취출 후 응력이 완화되면서 수축과 변형으로 바뀐다. 그러나 이러한 응력완화는 재료 특성과 수지의 온도 및 시간 이력에 따라 달라지게 된다. 이것은 플라스틱의 점탄성 성질을 가지기 때문이다. 높은 온도에서는 성형품 내의 응력이 수축과 변형으로 쉽게 변화하지만 낮은 온도에서는 많은 응력이 성형품 속에 갇히게 되고 변형과 수축은 작아질 것이다. 즉 금형 온도가 낮고 냉각시간이 길어질 수록 이러한 응력완화는 어려워져서 성형품의 수축 및 변형은 줄어들고 내부에 갇히는 잔류응력은 증가한다.

$$\text{Total RS} = \text{Shrinkage \& Warpage} + \text{Final RS}$$



(a) short cooling time



(b) long cooling time



1-3) 불 균일 수축 (uneven shrinkage)

제품의 균일한 수축은 균일한 응력으로 나타나고, 변형해석으로 예측되는 제품의 변형 모양도 뒤틀림이 아니라 단순한 길이 수축으로 나타난다. 이러한 경우에는 금형가공 수축률을 적용하여 적절한 크기로 금형을 가공한다면 충분히 해소할 수 있는 문제다.

그렇지만 제품에서 불 균일 수축이 발생하면, 제품의 위치에 따라 불 균일 응력이 가해지고, 결국 이것은 변형해석에서 제품의 뒤틀림으로 나타나게 된다. 이러한 제품의 뒤틀림은 변형 해석을 통하여 해결하여야 하는 주요한 성형 불량이다.

1-4) 제품 변형 원인과 개선 (cause of warpage & reducing warpage)

따라서 제품의 변형 즉 뒤틀림은 수축률 편차에 의하여 발생한다 라고 할 수 있다. 따라서 제품의 변형을 줄이기 위해서는 수축률 편차를 일으키는 원인을 파악하고 그것을 해결하기 위하여 제품설계, 금형설계, 공정조건 등을 적절히 개선하여야 한다 .

불 균일 수축을 다음의 4가지로 구분할 수 있다.

- ▶ 제품의 두께 방향으로의 불 균일 냉각 (differential cooling)
- ▶ 제품의 영역에 따른 불 균일 수축 (differential shrinkage)
- ▶ 재료의 배향방향과 그 직각 방향의 불 균일 수축 (differential orientation)
- ▶ 코너 효과(corner effect)

변형을 개선하기 위해서는 불 균일 수축을 유발하는 원인을 제거하여 변형을 유발하는 잔류응력을 제거하는 것이 가장 이상적이다. 물론 이러한 변형 원인 자체를 제거하는 것이 힘든 경우에는 제품 형상 변경 또는 추가에 의한 구조 보강을 통하여 그 잔류응력을 견디게 하는 것이다. 그러나 이 경우 제품 변형은 개선될 수 있지만 제품내에 최종 잔류 응력으로 남아 있게 된다.

(1) 제품의 두께 방향으로의 불 균일 냉각 (differential cooling)

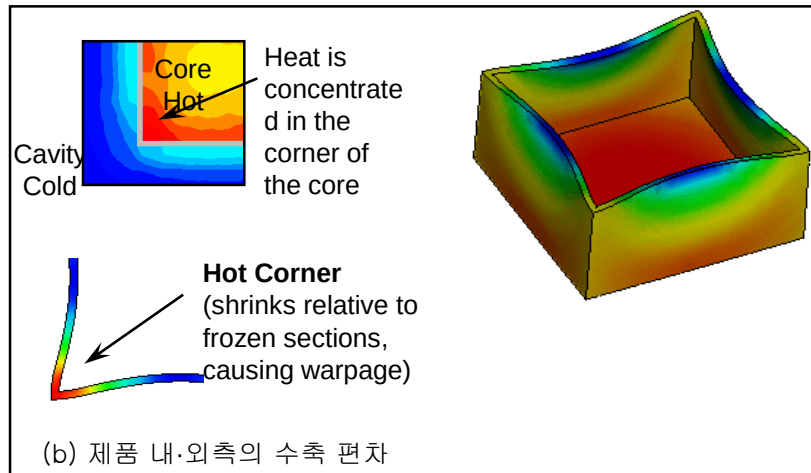
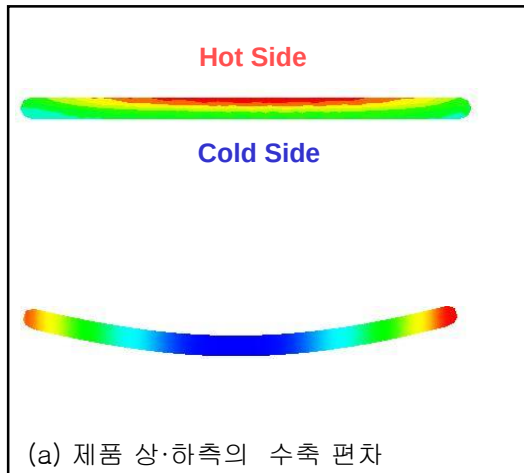
변형의 원인

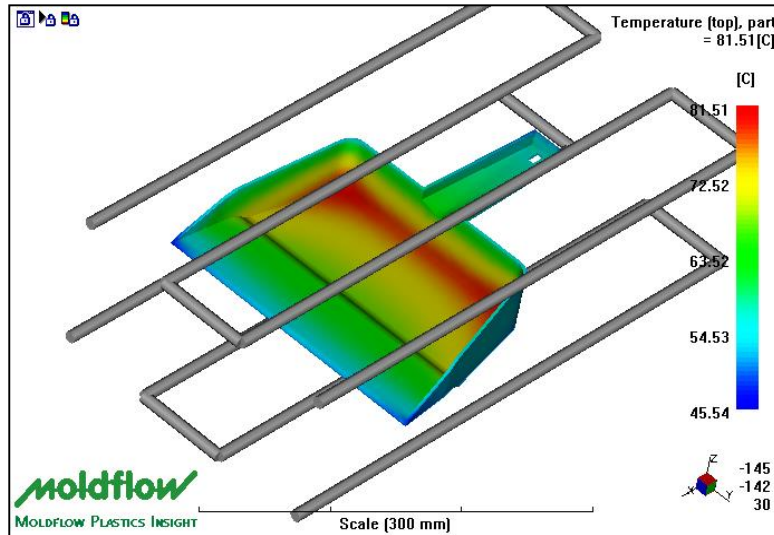
제품이 금형 내에서 캐비티와 코어의 비대칭적인 냉각을 받게 되면 제품 두께 방향으로 수축을 편차가 발생한다. 즉 금형 온도가 높은 쪽은 서서히 냉각이 되어 수축률이 상대적으로 크고, 금형 온도가 낮은 쪽은 빠르게 냉각되어 수축률이 상대적으로 적다. 이러한 제품 상하의 수축률 편차에 의하여 발생하는 변형을 불 균일 냉각에 의한 변형 또는 열 변형(thermal bending) 이라 한다.

특히 박스 형상의 제품은 불균 일 냉각에 의한 변형에 취약한데, 이것은 일반적으로 열 집중이 일어나는 박스 코너 부분의 냉각을 위한 냉각설계가 쉽지 않기 때문이다. 따라서 박스 형상의 제품은 대부분 아래 그림과 같이 제품 내측으로 열 변형이 발생한다.

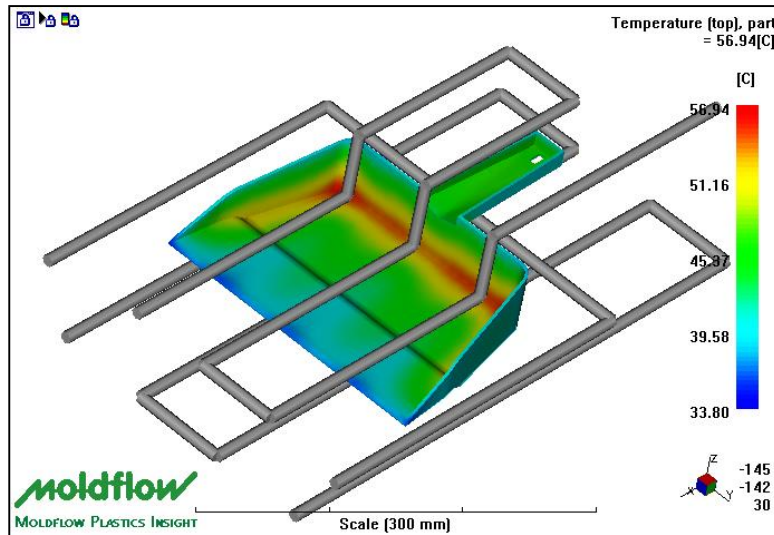
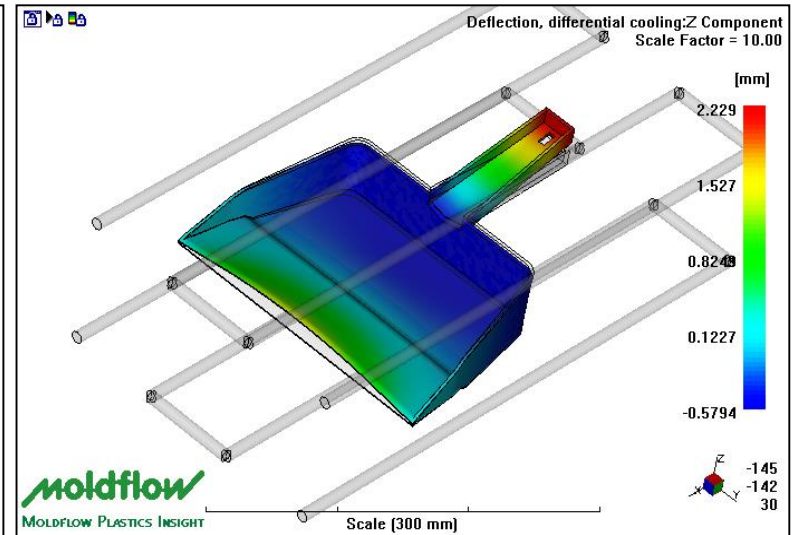
변형의 해결방법

불 균일 냉각에 의하여 발생한 변형을 줄이기 위해서는 냉각해석의 결과로 제공되는 금형 온도 결과(Temperature, mold)를 참조하여 금형 온도 편차를 줄이는 방향으로 냉각시스템 설계를 개선하여야 한다. 금형 온도가 높은 부분은 냉각 설계를 보강하여 금형 온도를 낮추고, 금형 온도가 너무 낮은 부분은 오히려 냉각 설계 제거하여 금형 온도를 낮추어 균일한 금형 온도가 되도록 하여야 한다. 이러한 금형 온도 편차에 의한 변형은 여러 가지 변형의 원인 중 가장 이해하기 쉽고 제어가 용이하다. 또한 다른 원인에 의하여 변형이 발생하여도 이 원리를 이용하여 실제 성형에서 금형의 상·하측 온도를 적절히 조절함으로써 어느 정도 변형량을 개선할 수 있다.

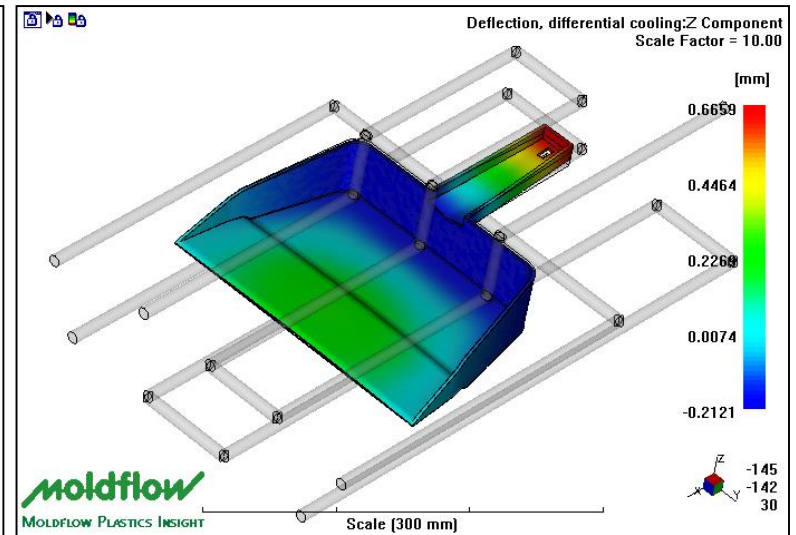




(a) 금형 온도 편차 큼 (변형량 증가)



(b) 금형 온도 편차 작음 (변형량 감소)



(2) 제품의 평판 방향으로의 불 균일 수축 (differential shrinkage)

변형의 원인

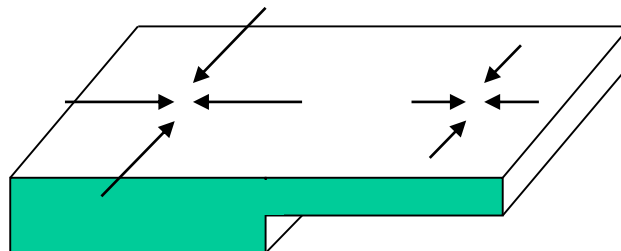
제품 설계에서 제품의 두께가 두꺼운 부분과 얇은 부분 그리고 금형 설계에서 게이트 인접한 부분과 먼 부분은 수축편차가 발생한다. 즉 같은 압력을 받는 조건이라도 제품이 두꺼운 부분은 얇은 부분 보다 냉각속도가 느려서 상대적으로 수축률이 크며, 같은 두께 인 경우에도 게이트에서 먼 부분은 인접한 부분보다 압력을 적게 받아서 수축률이 크다. 이러한 지역에 따른 수축률 편차에 의하여 발생하는 변형을 불 균일 수축에 의한 변형이라 한다. 따라서 불 균일 수축에 의한 변형은 제품 설계 그리고 러너 시스템 설계와 밀접한 관계를 갖고 있다.

특히 두께 편차가 큰 제품은 불 균일 수축 편차에 의한 변형에 취약한데, 이것은 제품 두께에 따라서 수축률 편차가 아주 크게 발생하기 때문이다. 따라서 불 균일 수축에 의한 변형은 제품 설계와 아주 밀접한 관련이 있기 때문에 제품 설계자가 사출성형 해석을 수행하여야 하는 아주 큰 이유가 된다. 파이버가 포함되지 않은 수지를 사용하여 성형하는 경우 불 균일 수축에 의한 변형이 제품 변형의 주 원인이 되는 경우가 상당히 많다.

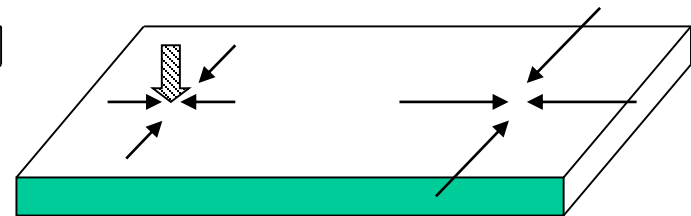
변형의 해결방법

불 균일 수축에 의한 변형이 발생하였을 경우 유동해석 결과로 제공되는 체적 수축률 (Volumetric shrinkage) 결과를 참조하여 그 수축률 편차를 줄이는 방향으로 제품설계, 금형 설계 그리고 공정조건설정을 개선하여야 한다.

제품의 두께 편차에 의한 수축률 편차가 변형의 주 원인인 경우에는 제품 두께 편차를 줄여서 수축률 편차를 줄여야 하며, 게이트에 가까운 부분과 먼 부분의 수축률 편차가 변형의 주 원인인 경우에는 게이트 수와 제품 두께 증가시키고, 다단 보압을 적절히 적용하여 제품 전체의 수축률 편차를 줄여야 한다.

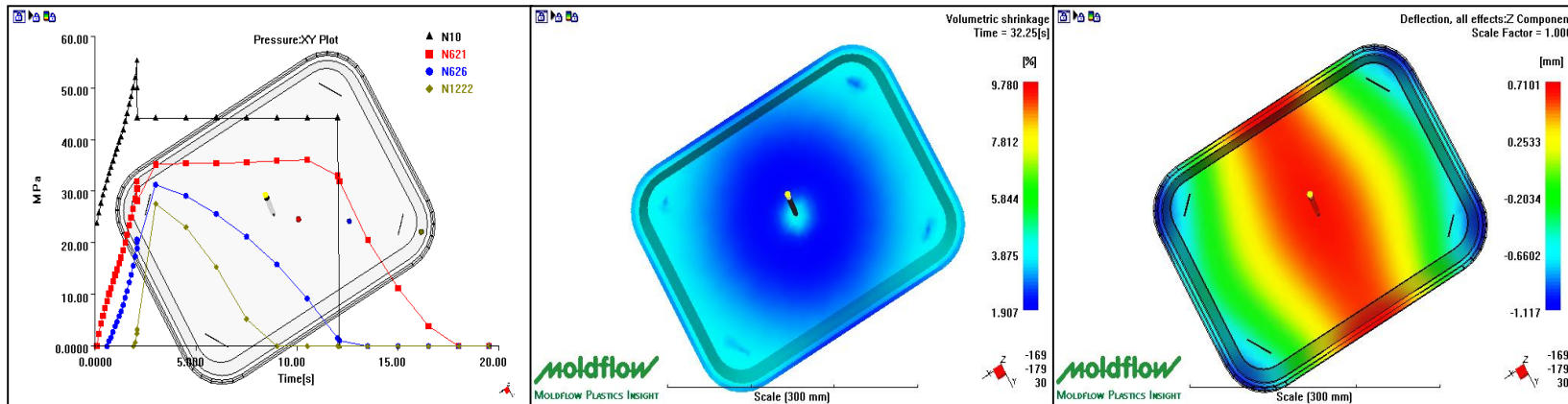


(a) 제품 두께에 의한 수축 편차

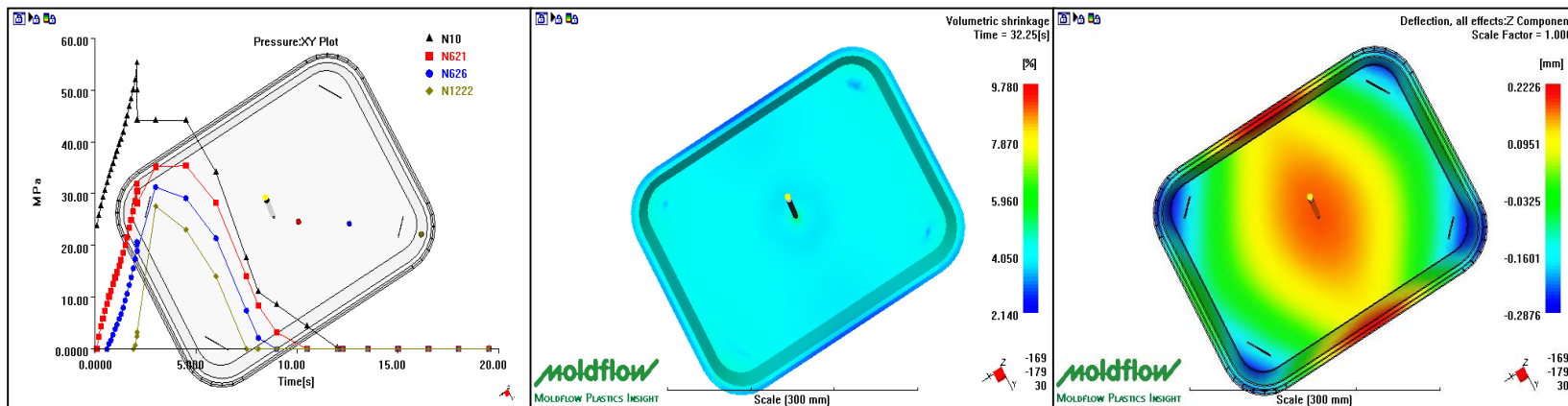


(b) 게이트 위치에 의한 수축 편차

▶ 보압 설정이 Differential Shrinkage 변형량에 미치는 영향

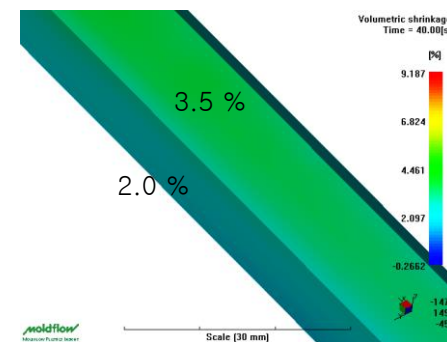
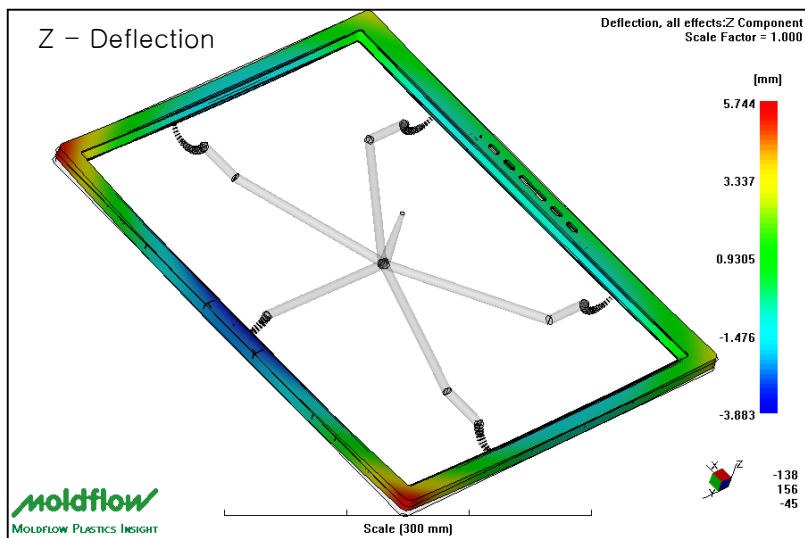
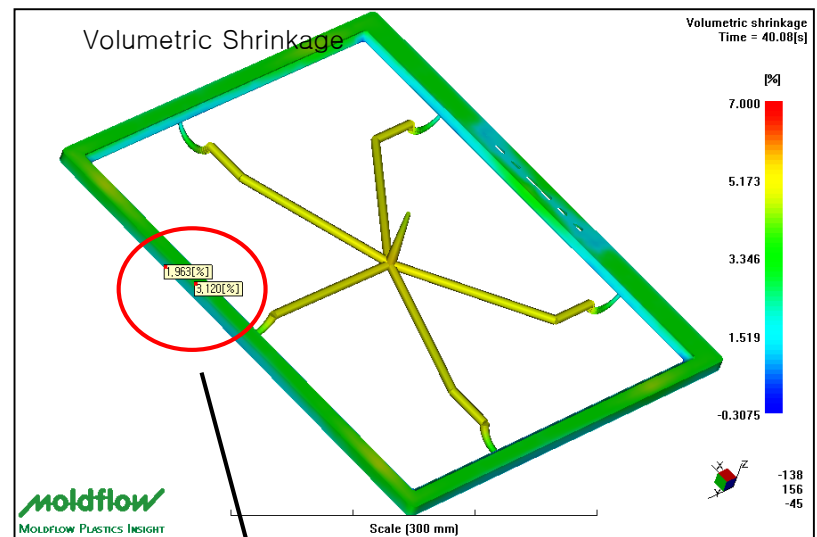


(a) 일정 보압 (불균일한 수축률-변형 증가)



(b) 다단 보압 (균일한 수축률-변형 감소)

▶ 제품 두께 편차가 Differential Shrinkage 변형량에 미치는 영향



(3) 재료의 배향방향과 그 직각 방향의 불 균일 배향 (differential orientation)

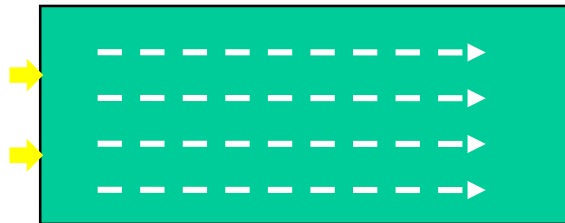
변형의 원인

수지 유동에 의하여 발생한 제품 내부의 고분자 또는 파이버의 배향에 의하여 배향 방향과 그 배향의 직각방향 사이에 수축편차가 발생한다. 이러한 배향 방향과 그 직각 방향의 수축률 편차에 의한 변형을 불 균일 배향에 의한 변형이라 한다. 그러나 파이버가 포함되지 않은 일반 수지의 경우는 그 수축률 편차가 크지 않아서 유동길이가 긴 대형 제품을 제외하고는 변형의 주요한 원인이 되는 경우가 많지 않다. 그러나 파이버 보강된 수지의 경우는 그 수축률 편차가 상당히 커서 제품 변형의 주요한 원인이 되는 경우가 많다. 특히 고분자 또는 파이버의 배향이 제품 내에서 한 방향이 된다면 제품 길이방향과 폭 방향의 선형 수축률 차이만 발생하여 변형에 큰 영향을 미치지 못한다. 그러나 많은 경우에 게이트 위치로 인하여 한 방향 유동을 실현하기 힘들어, 제품 위치에 따라 배향 방향과 강도가 달라져 변형이 발생하게 된다.

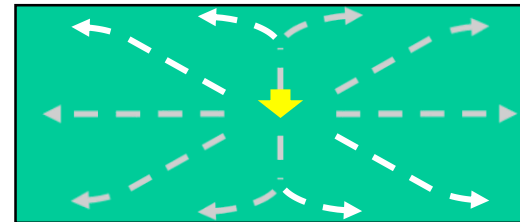
변형의 해결방법

고분자 또는 파이버의 배향에 의한 변형이 발생하였을 경우 유동해석 결과로 제공되는 수지의 배향 결과(Orientation at skin)와 파이버의 배향 결과(Average fiber orientation)를 참고하여야 한다. 배향에 의한 변형은 배향의 방향과 그 강도에 의하여 변형의 방향과 크기가 결정된다고 볼 수 있다. 즉 변형의 방향은 제품 내에서 배향의 방향이 어떻게 형성되는가가 중요하고, 그 변형의 크기는 배향 강도에 영향을 받는다.

배향의 강도를 줄이는 방법은 수지 유동에 의해 발생하는 전단응력(= 전단률 × 점도)을 줄이는 것이다. 따라서 제품두께를 크게 하고 사출속도를 낮추고 수지온도와 금형 온도를 높여 전단응력을 낮게 하면 배향 편차가 감소하여 변형을 줄일 수 있다. 또한 배향의 방향을 바꾸는 방법은 게이트를 위치를 변경하는 것이다. 따라서 게이트의 위치를 다양하게 적용하여 배향의 방향에 따른 변형을 검토하여야 하며, 가능하다면 한 방향 배향이 되도록 유도하여야 한다.

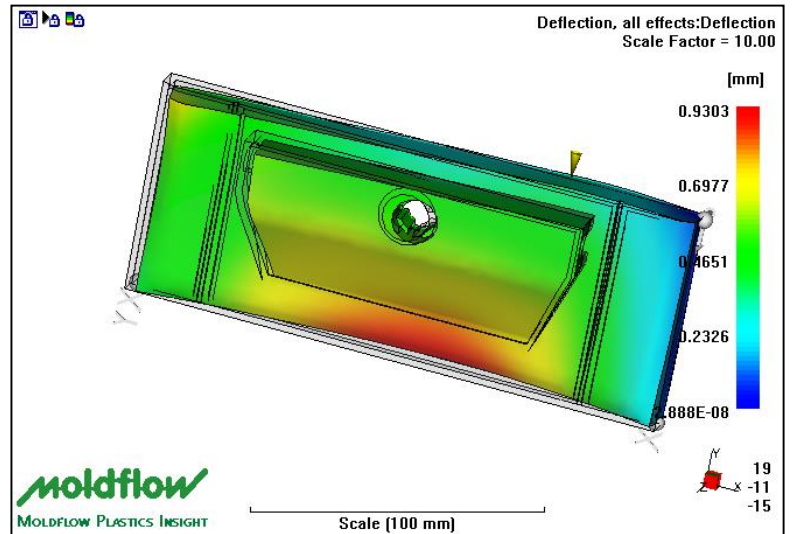
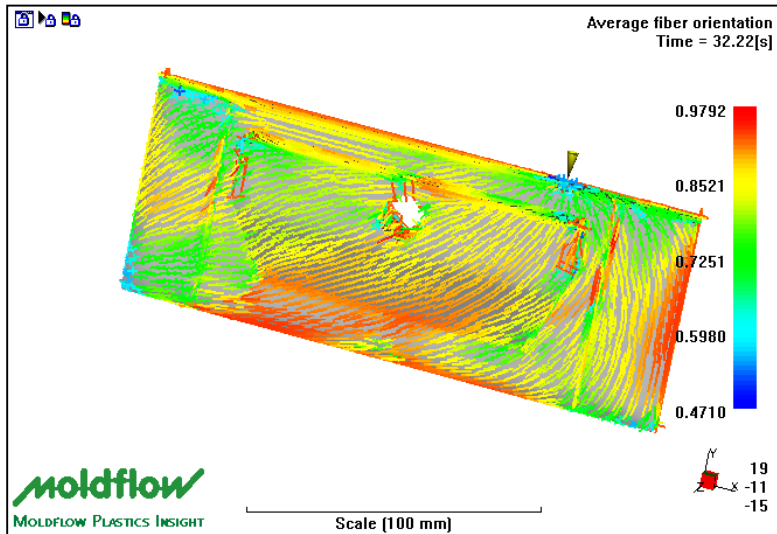
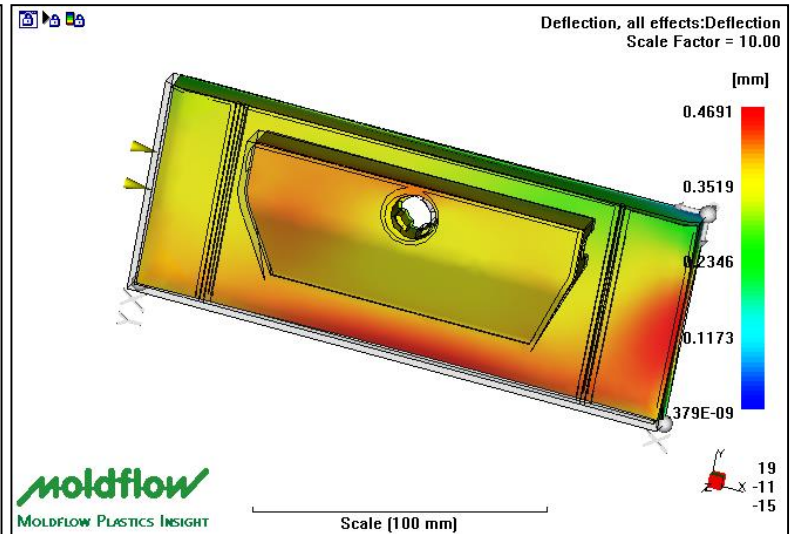
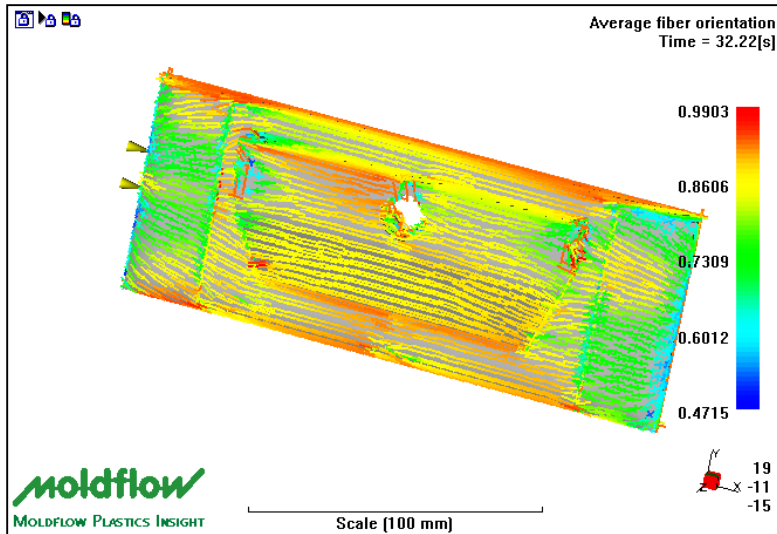


(a) 한 방향 유동 - 균일배향

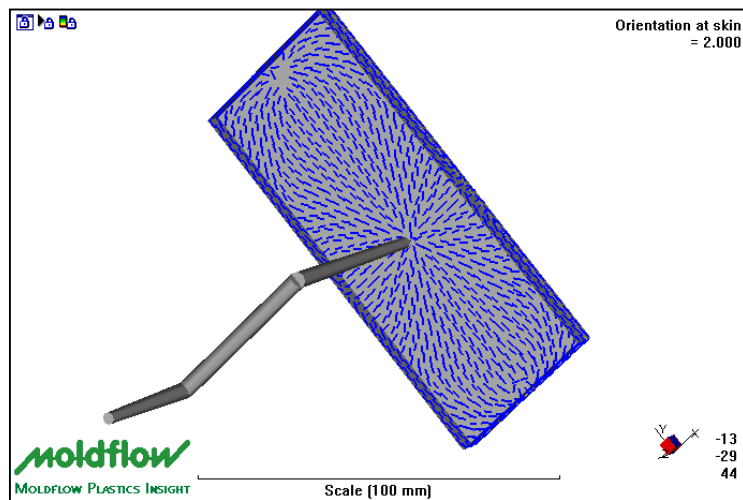


(b) 방사형 유동 - 상하: 강한 배향, 중앙: 약한 배향

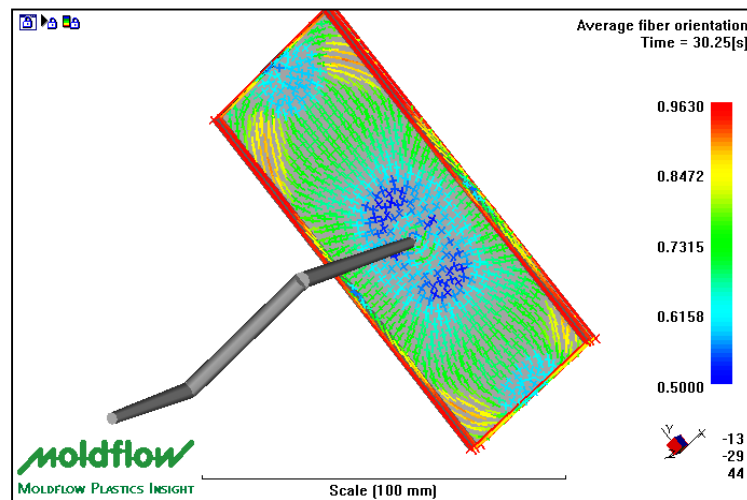
▶ 게이트 위치에 따른 fiber 배향 및 변형



► Fiber 배향에 따른 Tensile modulus의 변화



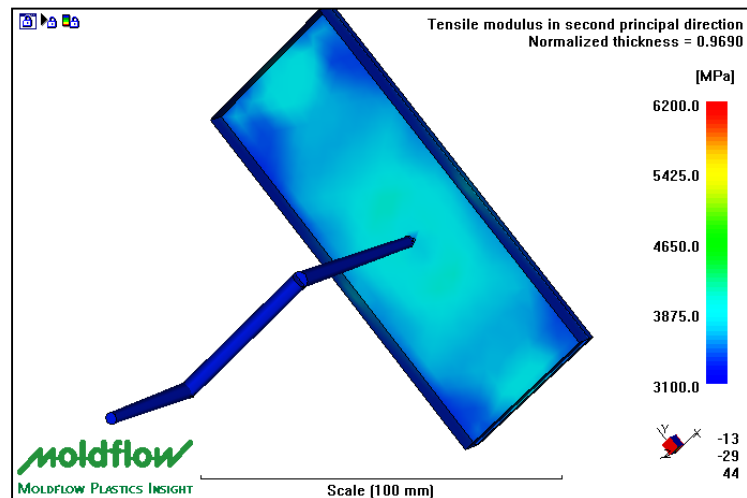
(a) 고분자 배향 방향



(b) Fiber 배향 방향

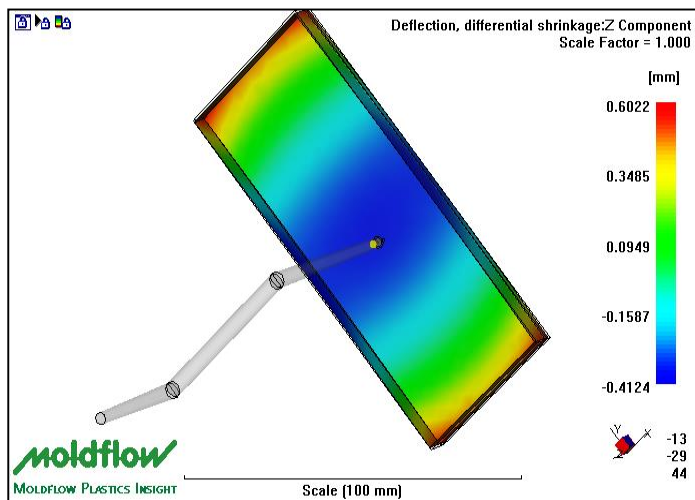


(c) Fiber 배향 방향의 Tensile Modulus

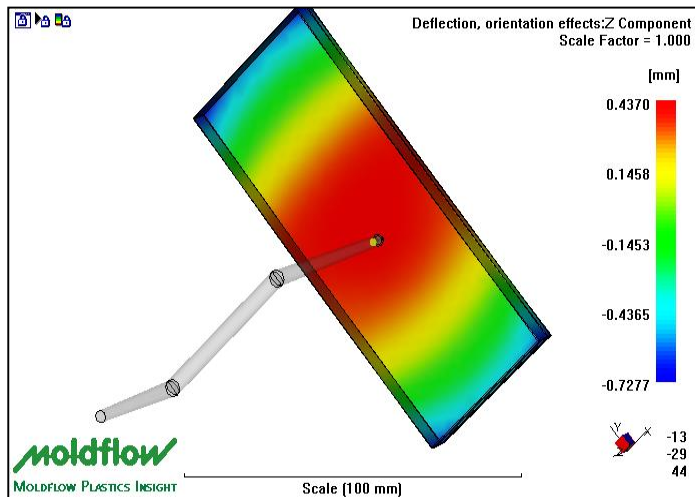


(d) Fiber 배향 직각 방향의 Tensile Modulus

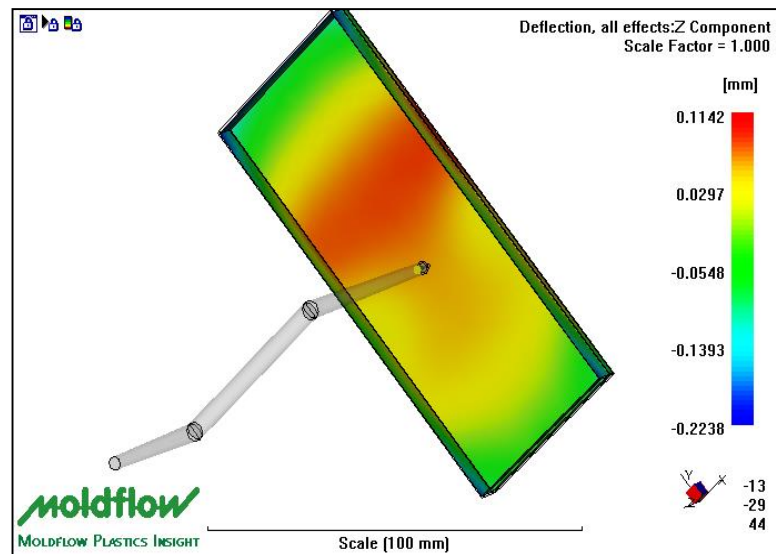
▶ Fiber 해석이 전체 변형량에 미치는 영향



(a) Differential Shrinkage에 의한 변형량



(b) Orientation Effect에 의한 변형량

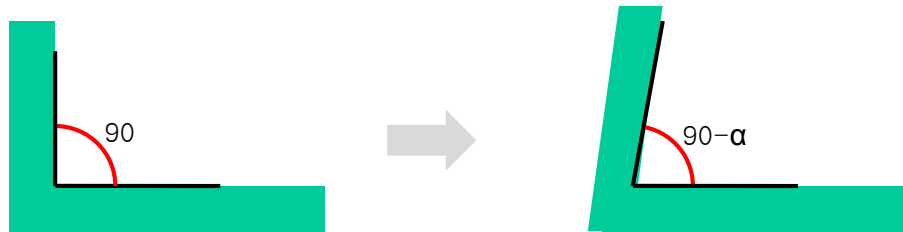


(c) 전체 변형량

(4) 코너 효과 (corner effect)

변형의 원인

박스형상의 제품에서 성형과정에 제품 코너가 내측으로 변형되는 현상을 통칭한다. 그러나 코너 효과의 원인은 두 가지로 구분해볼 수 있다. 그 하나는 코너의 열 집중(heat build-up)이고 다른 하나는 코너의 수축편차(differential shrinkage)이다.

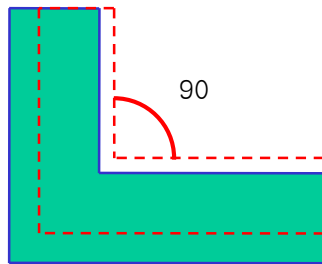


코너의 열집중 (heat build-up) : 냉각채널에 의한 코너 안쪽의 열 방출 속도보다 코너 바깥쪽의 열 방출 속도가 빨라서 코너 두께 위치에 따라 냉각속도 차이에 의한 체적 수축률 편차가 발생한다. 즉 코너 두께 방향으로 내측이 외측에 비하여 상대적으로 수축률이 커서 코너가 내측으로 변형되는 현상이 발생한다.

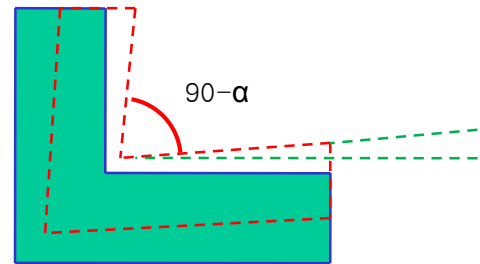
이러한 현상은 이미 AMI 냉각(Cool)해석을 통하여 이미 반영된 항목이다. 따라서 변형해석의 원인으로 구분하자면 이것은 냉각에 의한 변형이고, 그 해결방법도 코너 안쪽과 바깥쪽의 금형 온도를 개선하는 방향으로 냉각설계를 변경하면 개선할 수 있다.

코너의 수축률 편차(differential shrinkage) : 코너는 제품의 다른 부분과 다르게 금형 구속이 상당히 강하게 되어 있는 부분이다. 그래서 코너 부분은 다른 부분에 비하여 두께 방향 수축이 길이 방향 수축에 비하여 상당히 커서 코너가 내측으로 변형되는 현상을 말한다.

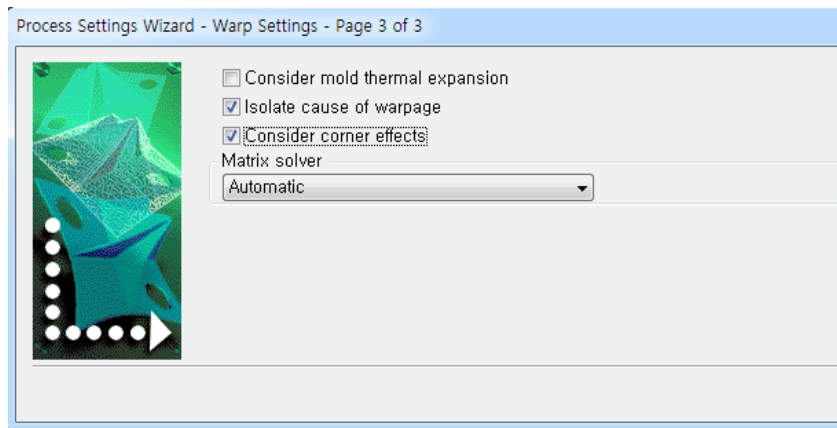
이러한 현상을 해석에 반영해 주기 위해서는 변형해석 옵션에서 “Corner Effect” 옵션을 선택하여야만 반영이 된다. 그 이유는 코너 효과가 아직 확정된 이론으로써 정립되지 못하였기 때문이다. 따라서 사용자들은 이 옵션을 사용할 것인지를 제품 형상을 고려하여 자의적으로 판단하여야 한다. 또한 이 옵션은 아직 3D mesh 형식에서는 지원되지 않는다.



a) 두께 방향의 수축과 길이 방향의 수축이 같은 경우



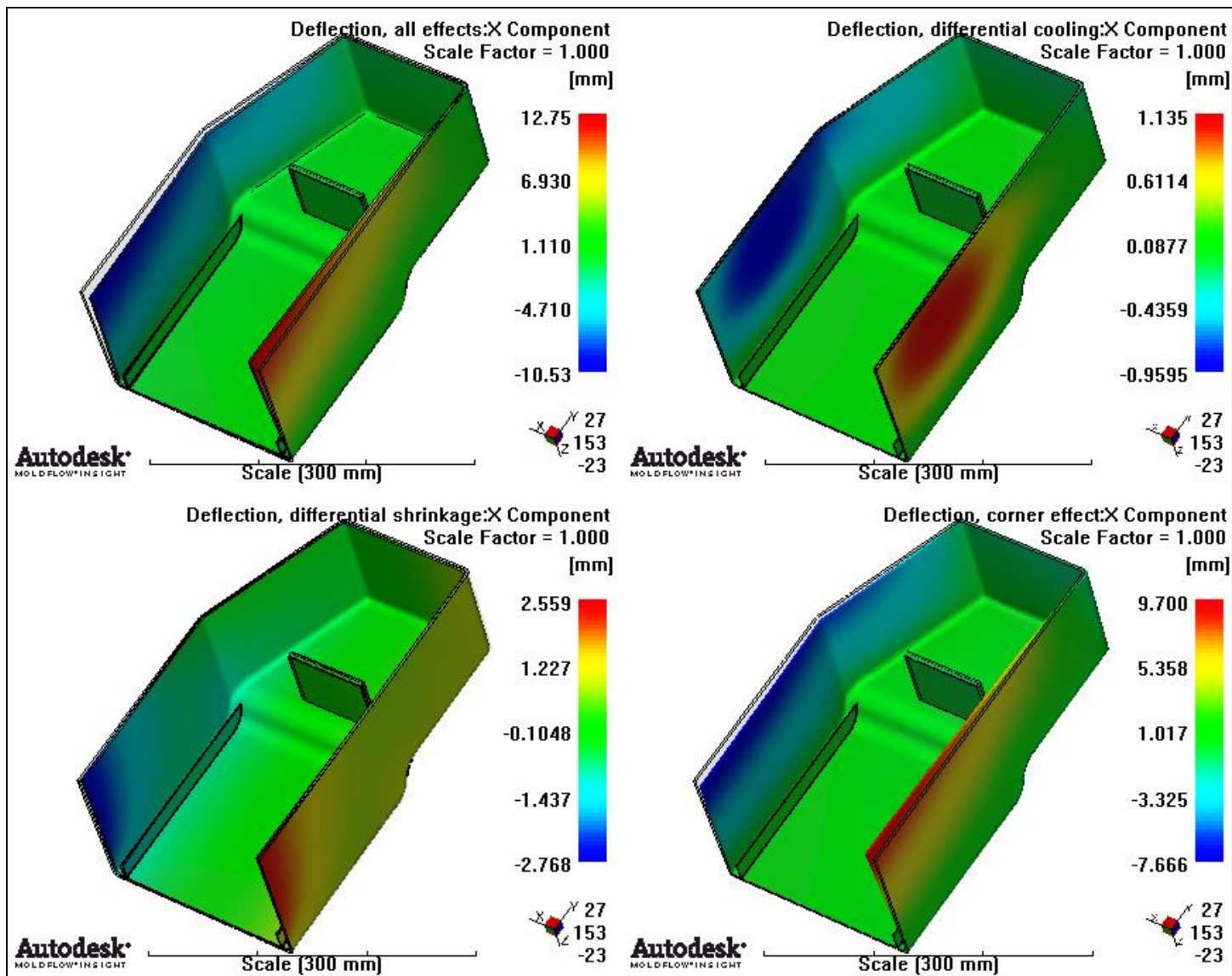
b) 두께 방향의 수축이 길이 방향의 수축 보다 큰 경우



변형의 해결방법

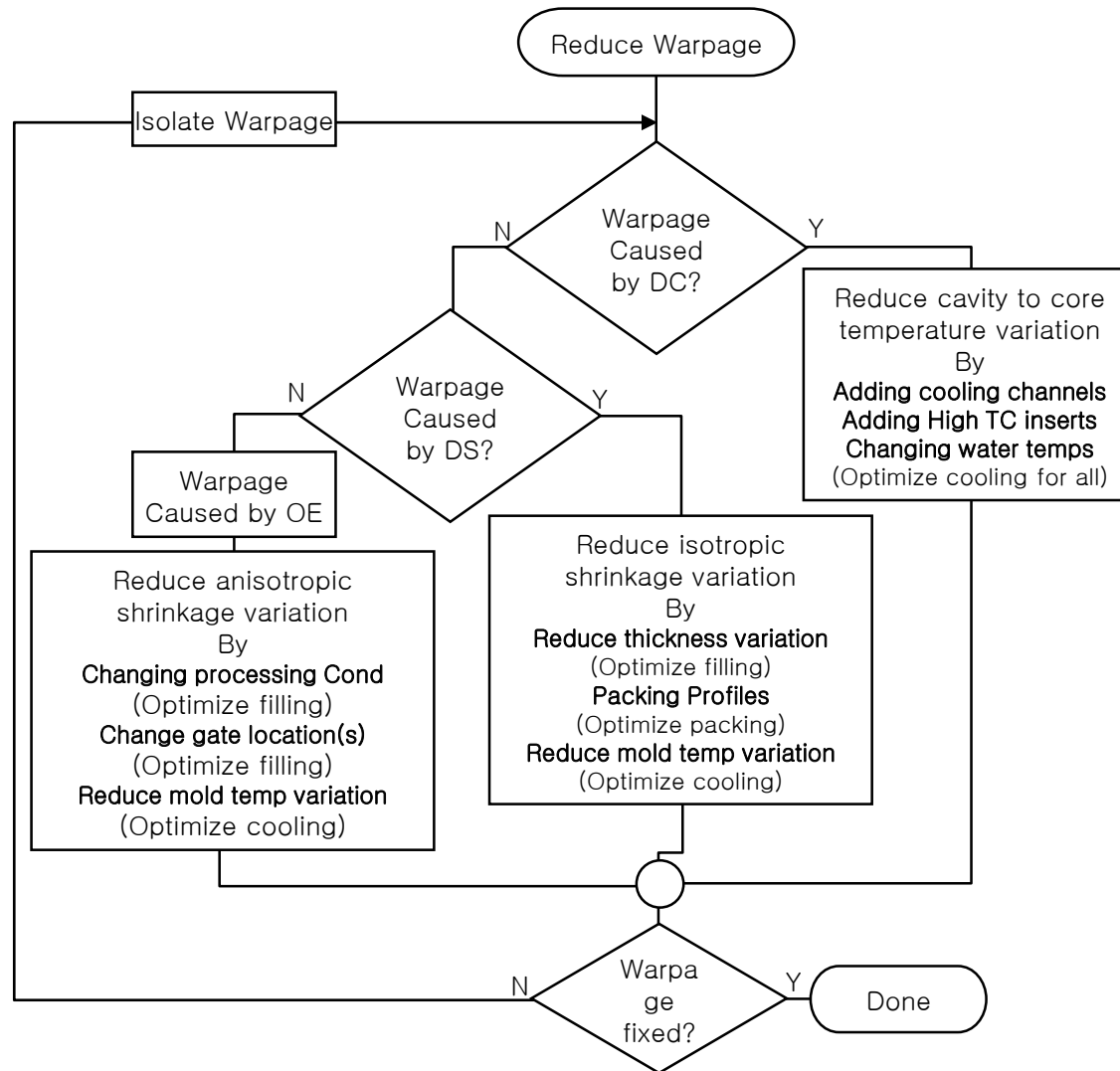
다른 변형의 해결방법과 다르게 코너효과에 의한 변형은 제품의 구조에서 유발되므로 제품 구조를 변경하지 않고는 해결하기 힘들다. 따라서 코너가 내측으로 변형하게 하는 응력은 줄일 수 없지만 제품의 구조보강을 통하여 그 응력을 견디게 하면 변형을 줄일 수 있다. 구조 보강의 가장일반적인 방법은 제품 코너에 리브를 추가하는 것이데, 그 이외에도 여러 가지 방법이 있을 수 있다.

▶ 박스 제품의 corner effect에 의한 변형



(5) 변형의 개선 절차 (reducing warpage procedures)

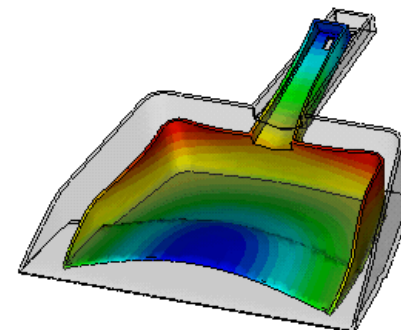
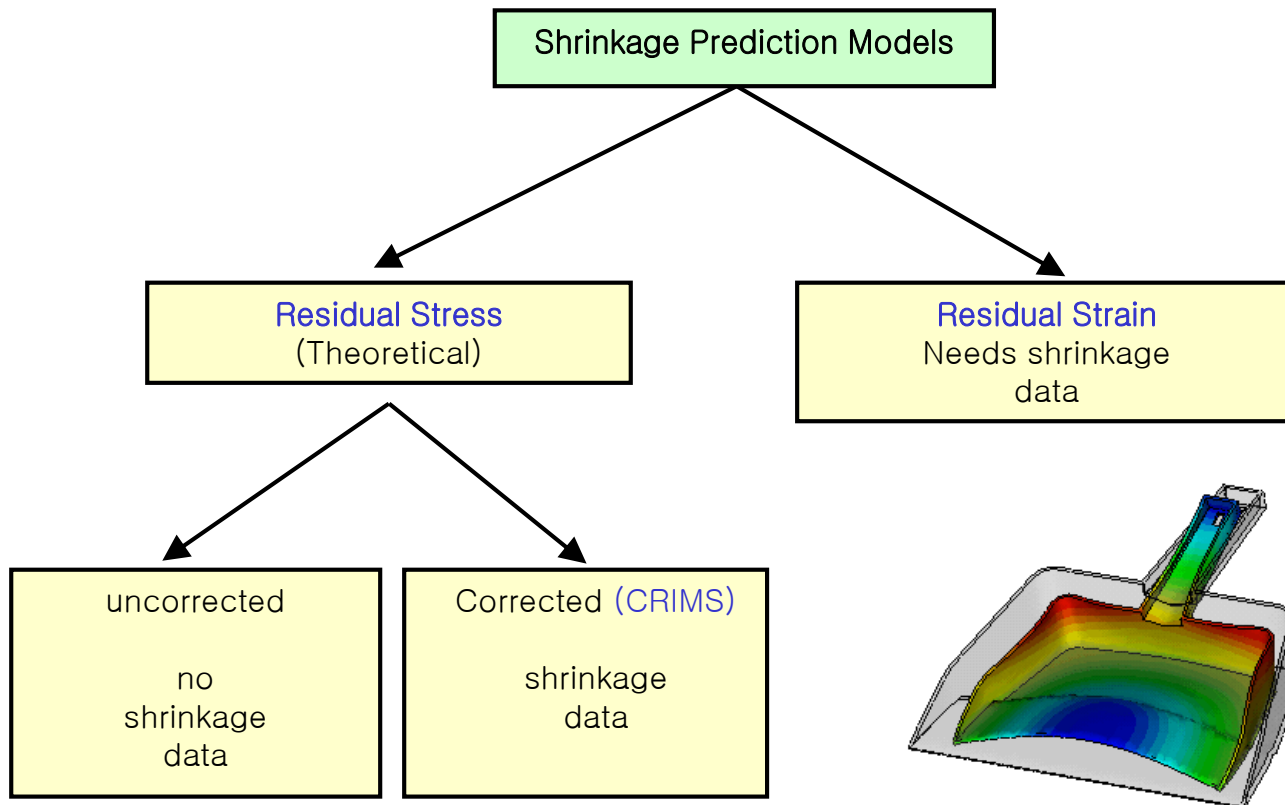
변형의 원인에 따라서 이를 개선하기 위한 절차를 표시하였다.



1-5) 수축률 예측 모델 (shrinkage prediction models)

Midplane과 Dual-domain 모델의 해석에서 수축률을 예측하는 방법은 크게 두 가지로 분류된다. 여기에는 Residual Stress와 Residual Strain가 있다. 그리고 Residual Stress방법은 다시 Uncorrected와 Corrected(CRIMS)로 분류된다.

Moldflow는 CRIMS 모델을 표준으로 사용하고 있다.



(1) Residual Stress Model – Uncorrected

Residual Stress Model은 모든 요소에 대해서 수지의 배향 방향과 직각방향으로 두께방향에 따른 이론적 응력 값을 아래 수식에 의하여 직접 구해서 이를 Stress 해석 프로그램에 제공하여 변형을 계산하는 방법이다.

$$\sigma_{ij} = \int_0^t c_{ijkl} \left(\xi(t) - \xi(t') \right) \left(\frac{\partial \varepsilon_{kl}}{\partial t'} - \alpha_{kl} \frac{\partial T}{\partial t'} \right) dt'$$

(2) Residual Stress Model – Corrected (CRIMS)

CRIMS는 Corrected Residual In Mold Stress의 약자이며, Residual Stress Model의 이론적 응력으로만 계산한 변형량은 실제 제품의 그것과 차이를 보이는 경우가 많이 있다. 이것은 위의 이론적 응력을 계산하는 수식으로는 아래 항목들의 영향을 계산할 수 없기 때문이다.

- ▶ 냉각 속도에 따른 PVT 커브 변화에 의한 수축률 변화 (특히 결정화도의 차이에 의한 수축률 변화)
- ▶ 고분자의 배향에 의한 배향 방향과 그 직각 방향의 수축률 변화
- ▶ 점탄성 수지의 응력 완화에 의한 수축률 변화

이론적인 응력 계산 수식에서 고려 되지 않은 이러한 항목들을 추가적으로 고려해 주기 위하여 실험적인 방법으로 shrinkage data를 측정하여 이를 수정하여 Stress해석 프로그램에 제공하여 변형을 계산하는 방법이 CRIMS이다. 따라서 CRIMS 모델을 사용하지 않으면 결정성 수지나 배향 방향과 그 직각 방향의 수축률 편차가 큰 수지의 경우는 변형해석 결과 신뢰성이 크게 낮아질 수 있다.

(3) Residual Strain Model

Residual Strain Model은 모든 요소에서 그 수지의 유동 방향과 직각방향의 요소 상,하의 수축률 값을 구해서 이를 Stress 해석 프로그램에 제공한다. 이 방법은 Moldflow의 예전 Warpage solver가 사용한 방법이다.

$$S'' = a_1 M_V + a_2 M_c + a_3 M_o'' + a_4 M_r + a_5$$

$$S^\perp = a_6 M_V + a_7 M_c + a_8 M_o^\perp + a_9 M_r + a_{10}$$

M_V - 체적수축률 - 보압과 온도 이력에 의한 Equilibrium PVT 따른 요소들이 체적 수축률

M_c - 결정화도 - 금형 온도에 따라서 Equilibrium PVT에서 벗어나는 결정화도에 의한 수축률

M_o - 유동의 흐름방향과 그 직각 방향의 고분자 배향 - 전단응력과 냉각속도에 의한 배향 정도에 의한 수축률

M_r - 금형 구속

여기서 $a_1 \sim a_{10}$ 은 shrinkage data를 실험적 방법으로 측정하여 구한 상수들이다.

1-6) 수축률 데이터 (shrinkage data) 측정

CRIMS 방법 또는 Residual strain 방법을 사용하여 변형해석을 하기 위해서는 모두 shrinkage data를 필요로 한다.

그러나 shrinkage data는 Moldflow 수치 연구소에서만 측정이 가능하므로 해석시 수치 데이터를 확인하여 이들 변형해석 옵션이 가능한가를 확인하여야 한다. Shrinkage data가 없다면 Uncorrected 방법으로만 변형해석이 가능하다.

<< Process settings → Flow setting → Advanced options → Material properties → Shrinkage properties >>

Thermoplastics material

Shrinkage model: Corrected residual in-mold stress (CRIMS) [View model coefficients...]

Observed nominal shrinkage

Parallel	0.462	%
Perpendicular	0.491	%

Observed shrinkage

Minimum Parallel	0.2154	%
Maximum Parallel	0.769	%
Minimum Perpendicular	0.233	%
Maximum Perpendicular	0.7957	%

[View test information...]

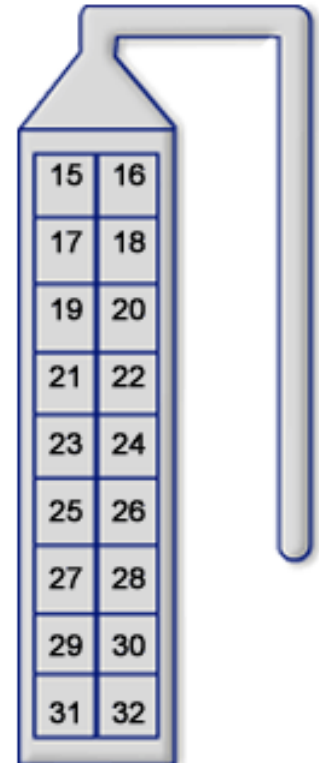
Shrinkage Molding Summary

	Melt Temperature C	Mold Temperature C	Flow Rate (R) cm ³ /s	Flow Rate (F) cm ³ /s	Ram Diameter mm	Ram Displacement mm	Thickness mm	Packing Pressure MPa	Packing Time s	Cooling Time s	Parallel S
1	233.6	46.9	53.9	45	45	47.7	2	50.6	15	20	
2	232.9	48.7	75.8	60.5	45	46.1	2	51.3	15	20	
3	232.7	48.5	99.2	80.6	45	46	2	51.4	15	20	
4	234.5	48.9	36.3	31	45	47.7	2	51.6	15	20	
5	235.4	49	15.6	11.7	45	48.1	2	51.8	15	20	
6	233.6	49.3	54.9	40.2	45	45	2	51.4	15	30	
7	231.8	48	60.8	43.7	45	48.2	2	51.4	15	40	
8	233.6	49.9	55.8	40.7	45	47.5	2	74.7	15	20	

Name: Generic ABS (Stylac ABS 121) : Generic Shrinkage Characterised Material

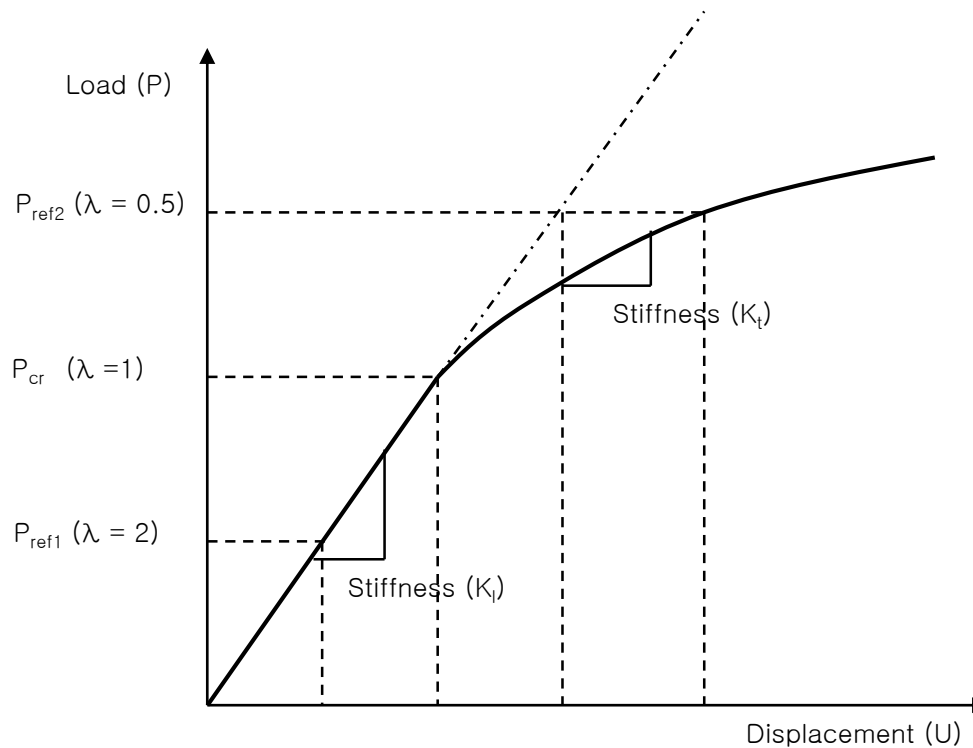
[확인] [도움말]

Shrinkage data 측정을 위해서는 우측의 테스트 금형을 약 28 가지 다른 성형조건으로 성형하여 각각의 표시된 영역에서의 온도, 압력, 수축률 등을 측정하여 CRIMS와 Residual strain 방법에서 필요한 상수 값들을 계산한다.



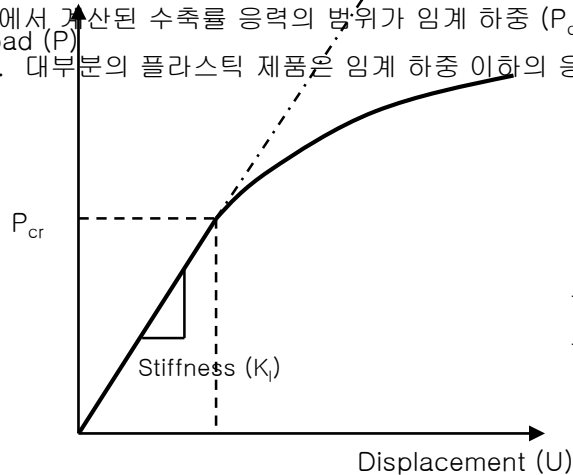
1-7) 변형의 계산 방법

Residual Stress 또는 Residual Strain 방법에 의하여 계산된 수축률 응력(shrinkage stress) 값은 Stress 프로그램에서 변형을 계산하는데 사용된다. 변형을 계산하는 방법에는 선형(linear) 또는 소변형(small deflection) 해석과 비선형(non-linear) 또는 대변형(large deflection) 해석이 있다. 요소의 특성상 Midplane 모델은 선형과 비선형 해석 모두를 지원하고, Dual-domain 모델의 경우는 선형 해석만 지원한다. 여기서 비선형이라 함은 기하학적 비선형 (geometric non-linear) 을 말하고 재료적 비선형 (material non-linear)은 고려하지 않는다.



(1) 선형(linear) 또는 소변형(small deflection) 해석

유동해석에서 계산된 수축률 응력의 범위가 임계 하중 (P_{cr}) 이하인 경우는 선형해석이 가능하다. 이때 강성 (K)은 일정한 값을 가지는 상수이다. 대부분의 플라스틱 제품은 임계 하중 이하의 응력을 받기 때문에 선형해석으로 충분하다.



$$[K] \{U\} = \{P\}$$

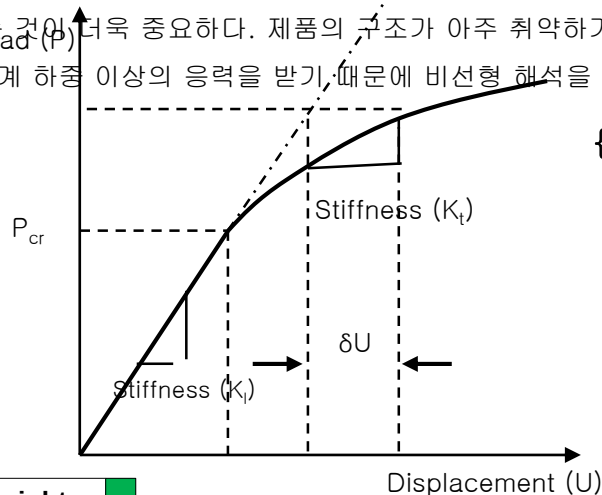
$[K]$ - 강성행렬 (stiffness matrix)

$\{U\}$ - 절점변위 벡터 (nodal displacement vector)

$\{P\}$ - 등가절점하중 벡터 (equivalent nodal force vector).

(2) 비선형(non-linear) 또는 대변형(large deflection) 해석

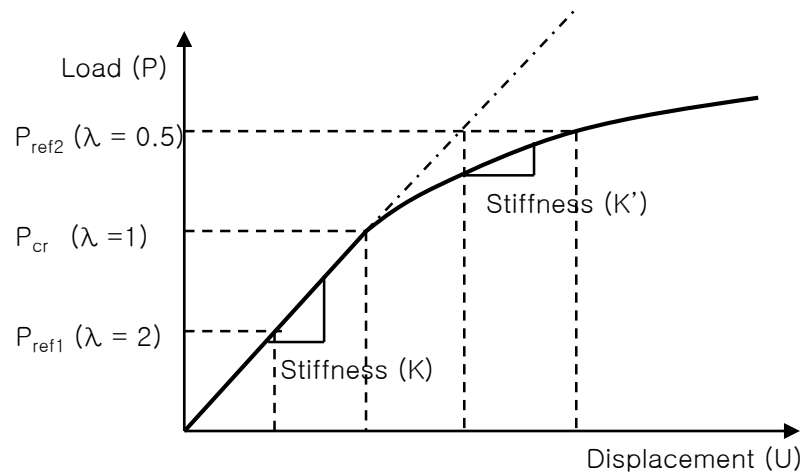
유동해석에서 계산된 수축률 응력의 범위가 임계 하중 (P_{cr}) 이상인 경우는 비선형 해석을 진행하여야 한다. 이때 강성 (K)은 하중의 증가에 따라 일반적으로 작아지므로 선형에서 보다 변형량이 커진다. 만약 선형 해석으로 이러한 모델을 해석한다면 잘못된 변형 값을 계산하게 된다. 비선형 거동을 나타내는 모델의 경우는 그 변형량을 파악하는 것도 중요하지만 선형 거동이 되도록 제품 설계를 변경하는 것이 더욱 중요하다. 제품의 구조가 아주 취약하거나 설계가 부적합하여 성형 과정에 높은 응력을 받는 일부 플라스틱 제품의 경우 임계 하중 이상의 응력을 받기 때문에 비선형 해석을 진행하여야 한다.



$$\{U_{total}\} = \{U\} + \{\delta U\}$$

(3) 좌굴 (buckling) 해석

좌굴 해석이란 어느 정도의 응력이 추가적으로 가해져야 제품에 좌굴이 발생할 것인가를 계산하는 것이다. 좌굴이 발생하는 응력보다 낮은 수축응력이 제품에 가해진다면 선형해석이 가능하며, 그렇지 않다면 비선형 해석으로 변형량을 계산하여야 한다. 따라서 변형 해석 이전에 좌굴 해석을 선행하여 선형 또는 비선형을 결정하여야 한다.



$$\{P\}_{cr} \lambda_{cr} = \{P\}_{ref}$$

$\{P\}_{cr}$ - 임계응력 (critical force vector)

λ_{cr} - Eigenvalue

$\{P\}_{ref}$ - 참조 응력 (reference force vector)

Lowest 2 eigenvalue(s) and corresponding eigenvector(s):

Eigenvalue lambda 1 = -4.26048011e-01

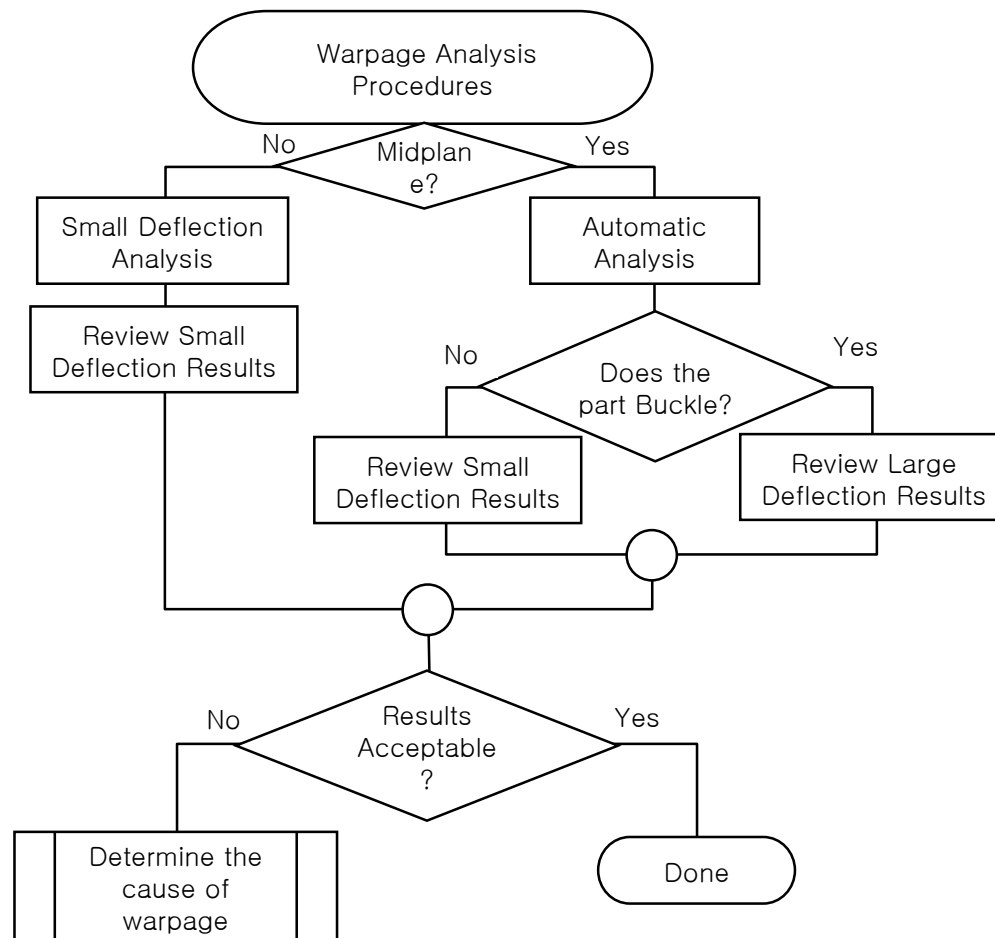
Eigenvalue lambda 2 = 6.32694006e-01

Switching to large deflection solution...

계산 값으로 구해지는 두 개의 Eigenvalue 값 중에서 양수이고 작은 값이 1보다 크면 선형으로 1보다 작으면 비선형으로 해석하여야 한다. Eigenvalue 값이 크면 클수록 그 구조는 안정적이라는 의미이다.

(4) 변형해석의 절차 (warping analysis procedures)

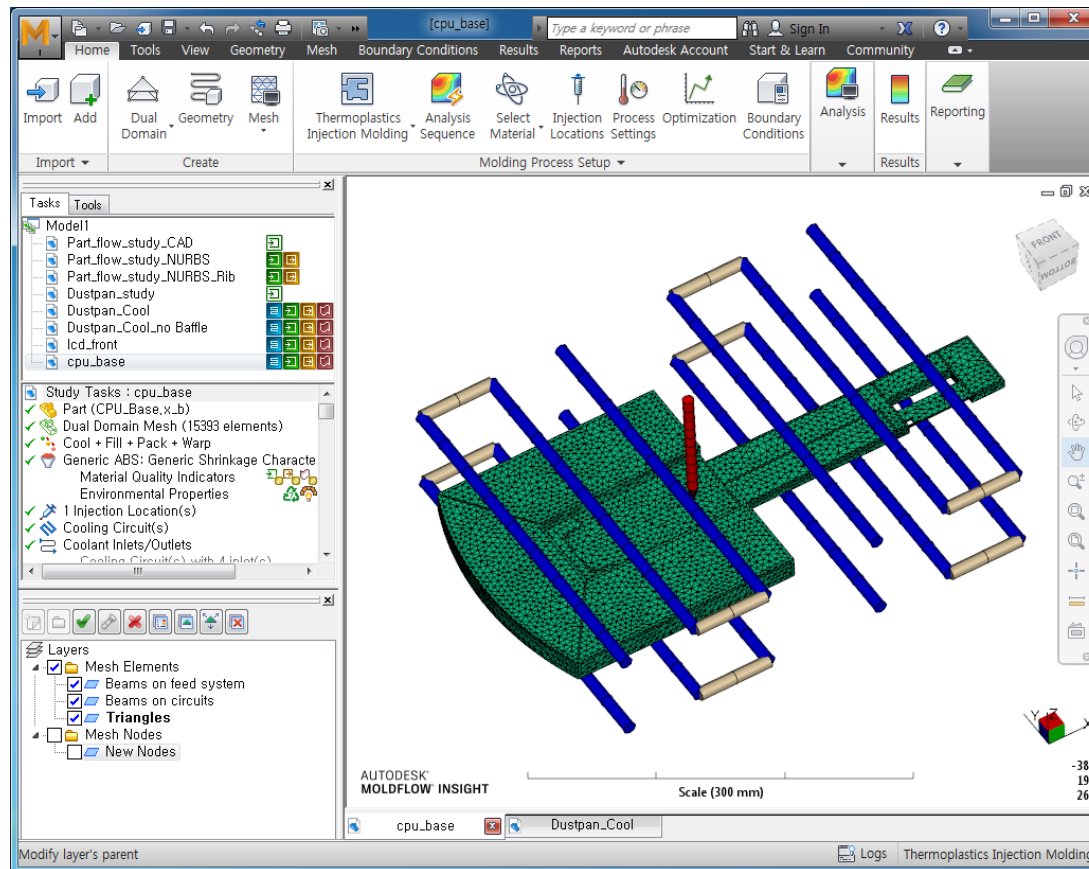
Midplane 모델의 경우는 Buckling, Small Deflection 그리고 Large Deflection 해석이 모두 가능하다. 그러나 Dual-domain 모델의 경우는 Small Deflection 해석 만이 가능하다.



2. 변형해석 실습

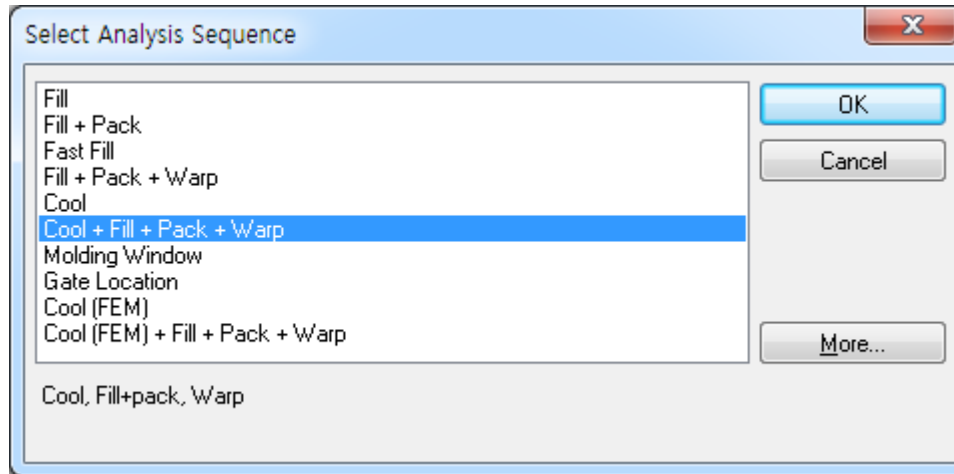
2-1) 변형 해석 실습 모델 불러오기

유동해석 실습 Project를 열고 실습 예제 폴더에서 “cpu_base.sdy”를 불러온다. 본 모델은 러너 시스템과 냉각 시스템의 설계가 완료된 Dual-domain mesh 형식의 변형해석 예제 모델이다. 본 예제를 통하여 변형해석을 위한 조건 설정과 변형 해석 결과 분석 방법을 배우도록 하겠다.



2-2) Analysis Sequence 변경하기

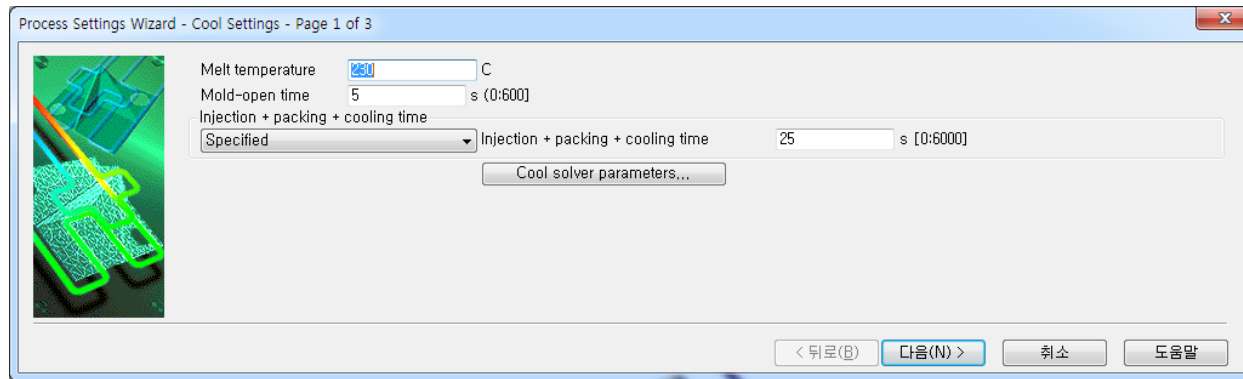
변형 해석을 진행하기 위하여 Study Tasks의 Analysis Sequence를 아래와 같이 Cool + Fill+Pack + Warp 또는 Fill + Pack + Warp 으로 변경한다.



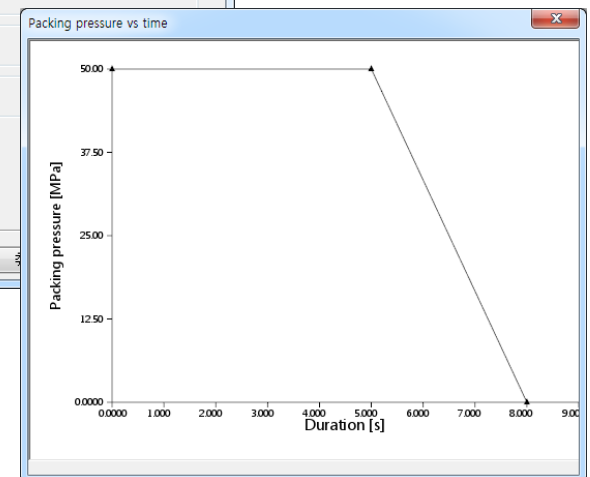
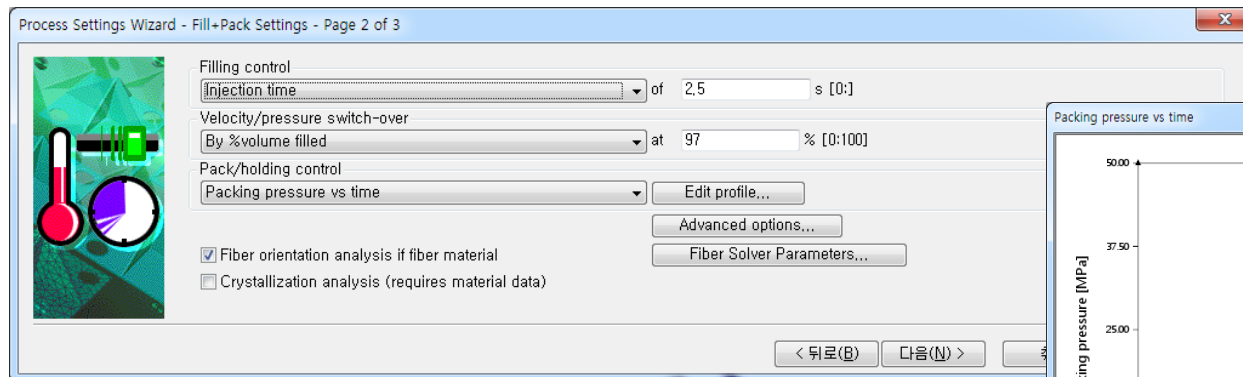
2-3) 공정조건 설정하기

냉각해석과 유동해석의 공정조건은 아래 그림과 같은 조건으로 설정한다.

1) Cool Settings

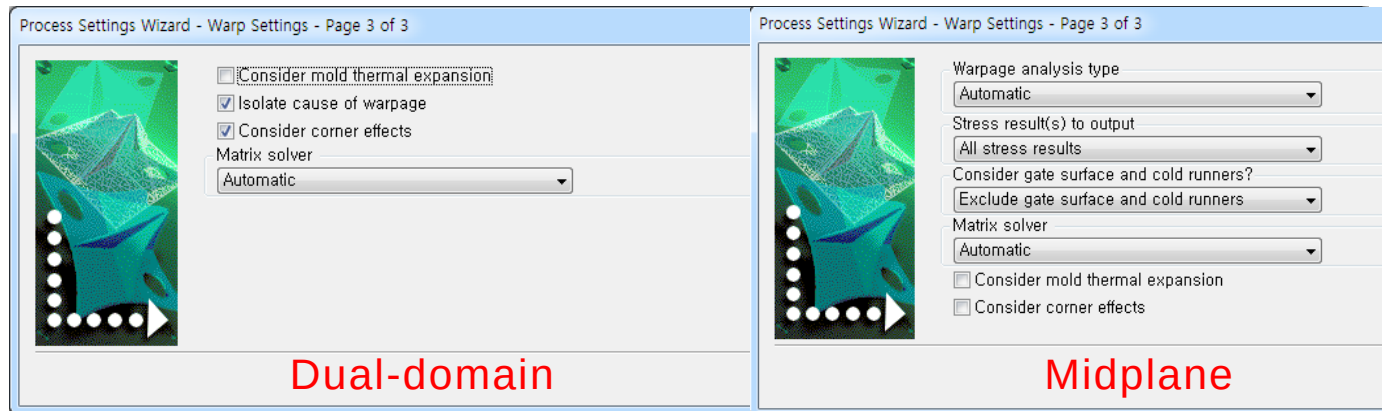


2) Flow Settings



3) Warp Settings

변형해석은 mesh 형식에 따라 설정 옵션이 다르다. Dual-domain의 경우는 선형해석(small deflection)만 가능하지만, Midplane의 경우는 선형해석, 비선형해석(large deflection), Buckling 해석 모두 가능하고, 변형된 이후의 잔류응력 값도 계산할 수 있다.



▶ Warpage analysis type: Midplane mesh 형식의 변형해석 옵션이다.

Buckling – 제품이 계산된 잔류응력 범위내에서 Linear Stress-Strain 또는 Nonlinear Stress-Strain 거동을 보이는지를 결정하여 준다. Linear Stress-Strain 거동으로 판단되었다면 그 변형 결과를 신뢰할 수 있다. 그러나 Nonlinear Stress-Strain 거동으로 판단하였다면 Warpage analysis type를 Large deflection으로 변경하고 다시 해석을 진행하여야 한다.

Linear와 Nonlinear의 판단 기준은 Critical load factor이며 이 값이 1보다 크면 Linear 이고 1보다 작으면 Nonlinear 이다.

Small deflection – 제품이 변형이 Linear Stress-Strain 거동을 보인다고 가정하고 해석을 진행한다.

사출성형품의 대부분이 이러한 변형 거동을 보인다. 따라서 Midplane 모델에서는 두 가지 옵션(Small deflection, Large deflection)을 모두 사용할 수 있으나 Dual-domain 모델의 경우는 Small deflection 해석만이 가능하다.

Large deflection – 제품이 변형이 Nonlinear Stress-Strain 거동을 보인다고 가정하고 해석을 진행한다.

Automatic – 제품의 변형이 Linear Stress-Strain 또는 Nonlinear Stress-Strain 거동인가를 판단하고 자동으로 Small deflection 또는 Large deflection 해석을 진행한다.

▶ Stress results to output

수지의 유동과 냉각 과정에서 발생한 전체 잔류응력은 제품을 수축 변형시키는데 일부 사용되고 나머지 즉 구조가 지탱할 수 있는 응력은 수축 변형 후 내부에 잔류하게 된다. 이러한 최종 잔존 응력 값의 분포와 크기를 결과로 나타내고 싶다면 None -> All Stress Results를 선택한다. 최종 잔류응력 결과는 Midplane 모델만 지원한다.

▶ Consider gate surfaces and cold runner?

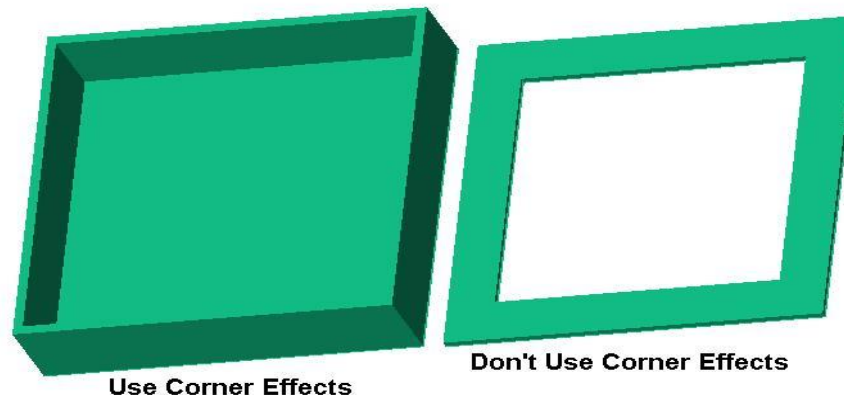
변형해석에서 gate surface와 runner system을 고려할 것인가 선택하게 한다. 일반적으로 이러한 부분의 변형량은 고려대상이 아니므로 제외한다.

▶ Consider mold thermal expansion

변형해석에 금형의 열 팽창을 고려할 것인가를 선택하게 한다.

▶ Consider corner effects

박스 형상의 제품에 있어서 코너 부분은 코너의 외측과 내측의 온도차이가 크다. 이러한 이유로 냉각편차에 의한 변형량이 냉각해석과 변형해석을 통하여 고려된다. 그러나 여기에 더하여 코너 부분은 제품의 다른 부분보다 금형의 강한 구속에 의하여 제품의 두께 방향의 수축이 평판방향의 수축에 비하여 상당히 커서 추가적인 변형이 발생한다. 이러한 원인으로 인한 변형을 계산하기 위해서는 “Corner Effect” 옵션을 선택하여야 한다. 박스 형상인 경우에는 이 옵션을 사용하고 그렇지 않은 경우에는 이 옵션을 사용하지 않아도 된다. 기본적으로 박스 형상이란 벽면의 높이가 제품 기본두께의 5배를 넘는 경우이다. 그러나 실제로 코너효과에 의한 변형이 큰 경우를 살펴보면 벽면의 높이가 제품 크기에 비하여 상당히 큰 경우에만 코너효과에 의한 변형이 발생한다. “Corner Effect”에 대한 자세한 내용은 변형해석 이론을 참조하기 바란다.



3. 변형 해석 결과

3-1) 변형 해석의 완료

변형 해석이 이상 없이 완료되면 몇 가지 변화가 나타난다.

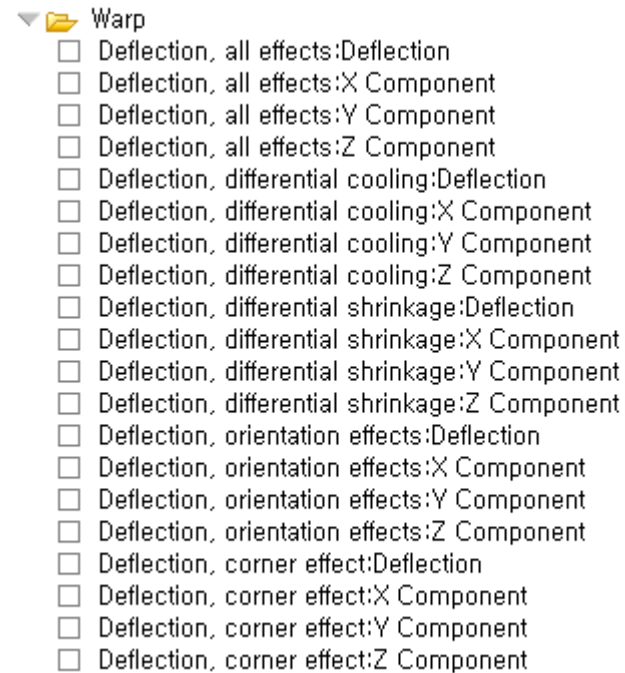
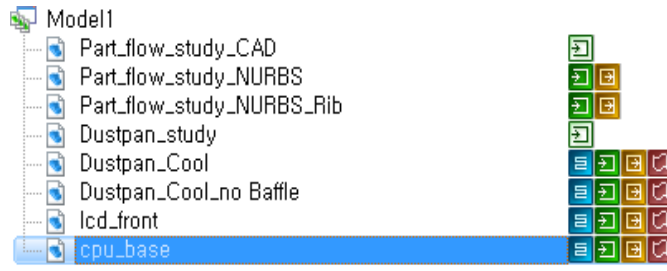
▶ Project View

해석이 완료되면 우측 그림과 같이 Cool과 Fill+Pack 그리고 Warp 아이콘이 각각의 색상으로 표시된다.

▶ Study Tasks

해석 결과 목록이 그림과 같이 Study Tasks에 나타난다.

변형의 전체 크기를 먼저 X, Y, Z 방향으로 구분하여 나타내고 그 변형량을 다시 변형의 원인에 따라 구분하여 나타낸다.



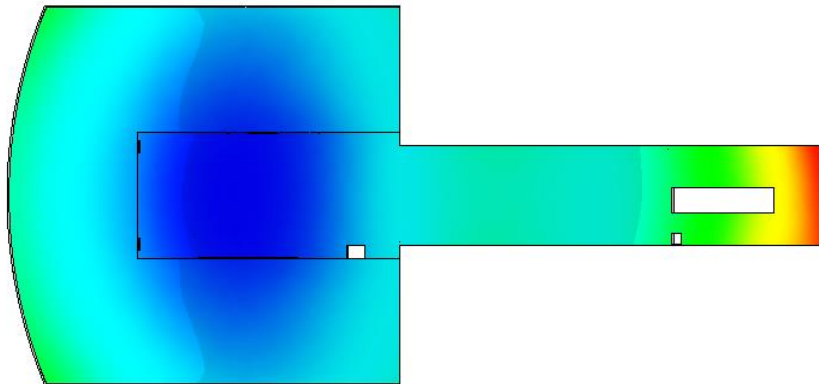
3-2) 해석 결과

▶ Deflection, all effects:Deflection

Deflection, all effects:Deflection Result는 제품의 변형 형상과 그 크기를 나타낸다. 여기서 크기는 Node의 X, Y, Z 변형의 토털 합이다. 각각의 방향의 변형량을 구분하여 변형량을 나타내고 싶다면 X-Deflection, Y-Deflection, Z-Deflection 결과들을 통하여 나타낼 수 있다. 여기서 X, Y, Z는 Global 좌표계를 나타내며, 이러한 좌표계를 수정하거나 변형의 기준점의 위치를 옮기려면 <<Results -> Visualization -> Anchors>>를 이용하여 변형의 Local 좌표계를 만들 수 있으며 그 좌표계의 원점이 변형의 기준점이 된다.

Deflection, all effects:Deflection
Scale Factor = 1.000

[mm]
3.048
2.357
1.667
0.9763
0.2858



AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT

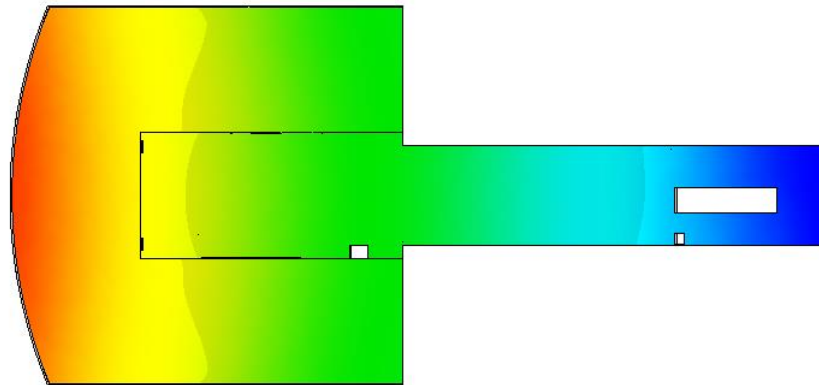


► Deflection, all effects:X Component

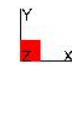
제품 전체 변형 형상과 X축 방향의 변형의 크기를 나타낸다. 변형되기 전 같은 X 좌표를 갖는 부분이 같은 색상을 가진다면 이것은 X 축 방향으로 변형이 아닌 x축 방향으로의 수축을 의미한다.

Deflection, all effects:X Component
Scale Factor = 1.000

[mm]



AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT

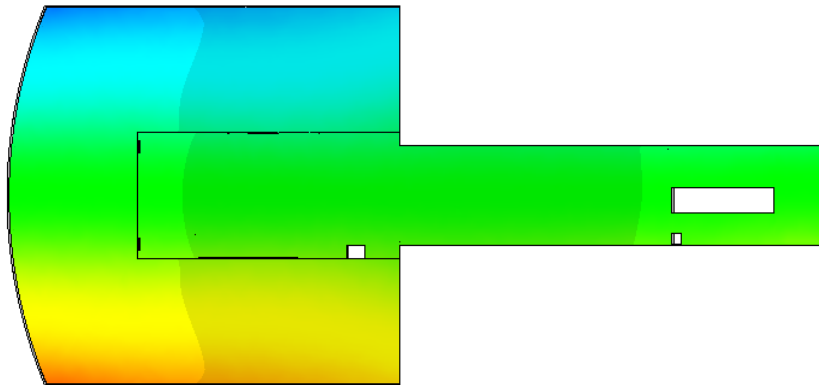


► Deflection, all effects:Y Component

제품 전체 변형 형상과 Y축 방향의 변형의 크기를 나타낸다. 변형되기 전 같은 Y 좌표를 갖는 부분이 같은 색상을 가진다면 이것은 Y 축 방향으로 변형이 아닌 선형 수축을 의미한다.

Deflection, all effects:Y Component
Scale Factor = 1.000

[mm]
1.025
0.5112
-0.0024
-0.5160
-1.030



AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT

► Deflection, all effects:Z Component

제품 전체 변형 형상과 Z축 방향의 변형의 크기를 나타낸다. 변형되기 전 같은 Z 좌표를 갖는 부분이 같은 색상을 가진다면 이것은 Z 축 방향으로 변형이 아닌 선형 수축을 의미한다.

이 제품의 경우 X, Y 축은 선형수축이나 Z 축은 변형이 크게 나타났음을 알 수 있다.

Deflection, all effects:Z Component
Scale Factor = 1.000

[mm]



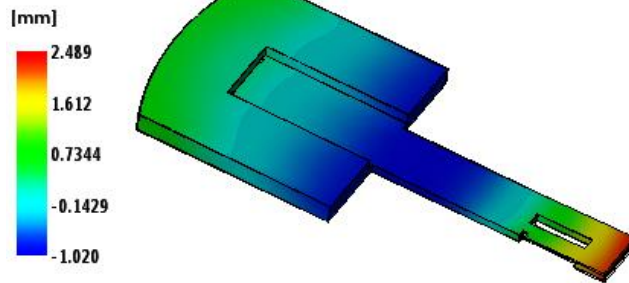
AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT



► Deflection, all effects:Z Component & cooling, shrinkage, orientation Z Components

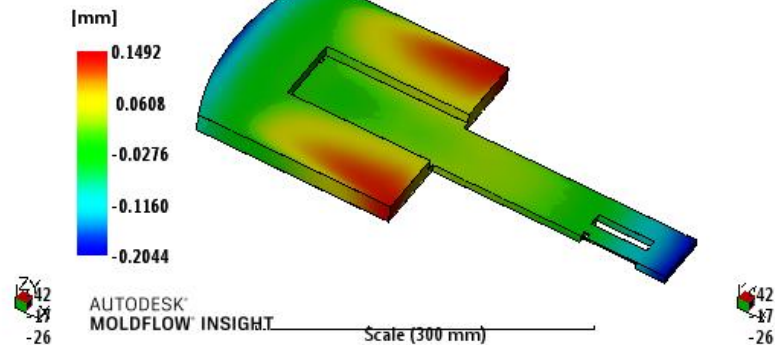
변형의 원인을 분석하기 위해서는 Warp setting에서 “Cause of warpage”를 선택하고 해석을 진행하여야 한다. 이 제품과 같이 Z축이 주 변형 방향인 경우에 전체 원인에 의한 Z축 변형 형태와 크기 그리고 각각의 원인들에 의한 변형의 형태와 크기들을 각각 비교하여 Z축 변형의 주 원인을 찾아야 한다. 이 제품의 경우 수축률 편차가 Z축 변형의 주 원인이 된다. 따라서 변형량을 줄이기 위해서는 수축률 편차를 줄일 수 있는 방법을 찾아야 한다.

Deflection, all effects:Z Component
Scale Factor = 1.000

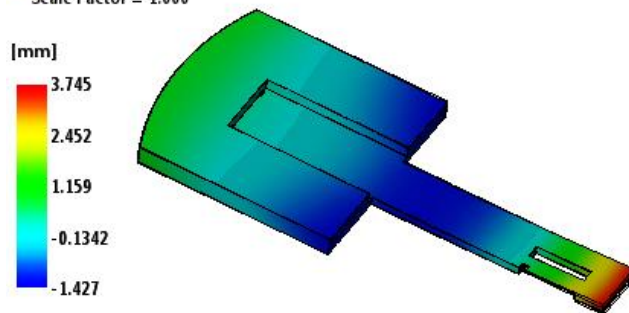


AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT

Deflection, differential cooling:Z Component
Scale Factor = 1.000



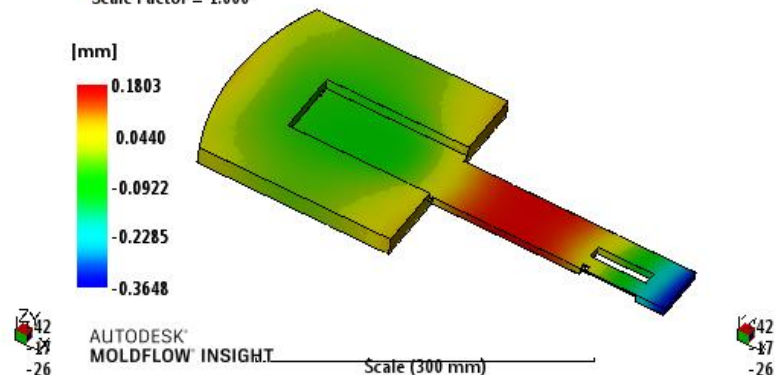
Deflection, differential shrinkage:Z Component
Scale Factor = 1.000



AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT

Scale (300 mm)

Deflection, orientation effects:Z Component
Scale Factor = 1.000

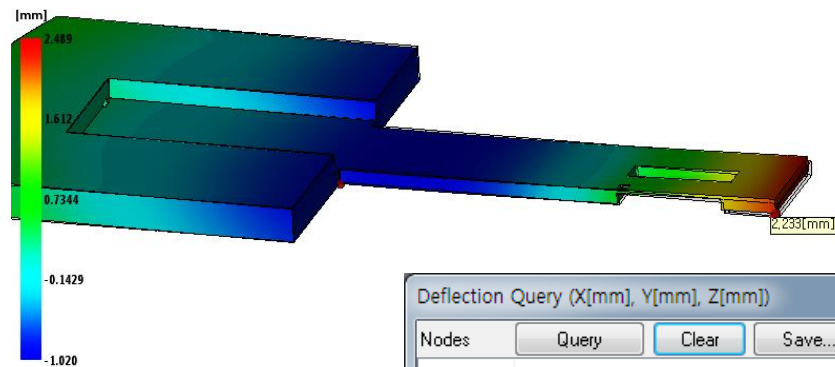


3-3) 해석 결과의 표시

▶ Deflection Query

변형의 정량적인 분석을 위해서는 “Examine” 을 이용한다. 먼저 변형해석 결과를 표시하고 Examine 버튼을 클릭한 후 제품의 특정 node 위치에 클릭하면 그 변형의 크기가 나타난다. 또한 “Deflection Query” 창에 변형의 상세 정보가 나타난다. 두 점을 순차적으로 선택하면 각 node의 변형 전 위치, 변형 후 위치, 그리고 그 편차가 나타나고, 옵션에 따라서는 두 점간의 전체 수축률과 X, Y, Z 방향의 수축률도 각각 표시된다.

Deflection, all effects:Z Component
Scale Factor = 1.000



AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT

Deflection Query (X[mm], Y[mm], Z[mm])

Nodes

Query

Clear

Save...

Location	Study/Node(s)	Data
1	cpu_base N126	Before deformation: global (1.47,-27.62,-17.58) After deformation: global (1.04,-27.45,-18.41) Deflection: 0.95[mm], global (-0.44,0.17,-0.83)
2	cpu_base N121	Before deformation: global (240.11,-27.62,-17.58) After deformation: global (238.40,-27.38,-15.32) Deflection: 2.84[mm], global (-1.70,0.25,2.26)
1 & 2	cpu_base N126 & N121	Distance before deformation 238.63[mm], global (238.63,0.00,0.00) Distance after deformation 237.39[mm], global (237.37,0.07,3.09) Shrinkage: 1.25[mm], (0.52%)

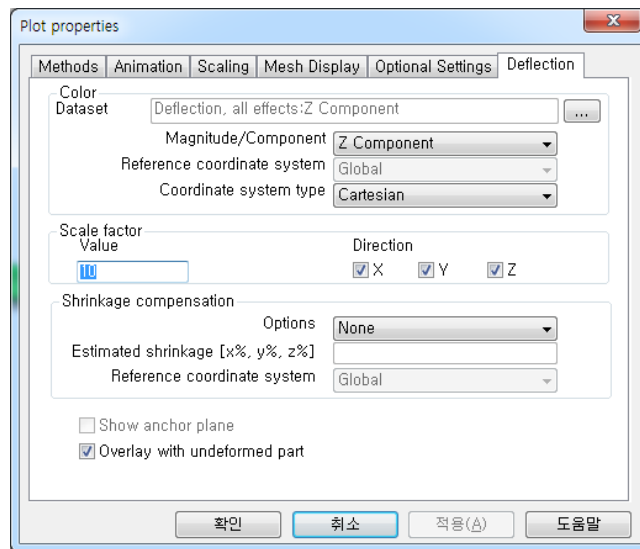
Coordinates+Deflection+Distance+Shrinkage

Global

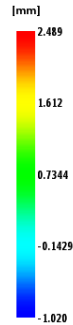
Cartesian

► Scale factor

변형의 크기가 크지 않을 때는 변형의 패턴을 정확히 확인할 수 없다. 이 경우 변형해석 결과의 Properties 에서 Deflection 탭을 선택하면 Scale factor가 나타난다. 여기에 Value를 증가시키면 그 만큼 변형 형상이 증폭되어 표시된다. 물론 X, Y, Z 방향 중에서 특정 방향만 선택할 수도 있다. 그러나 변형량 그 자체는 변화 없이 표시된다.



Deflection, all effects:Z Component
Scale Factor = 1.000

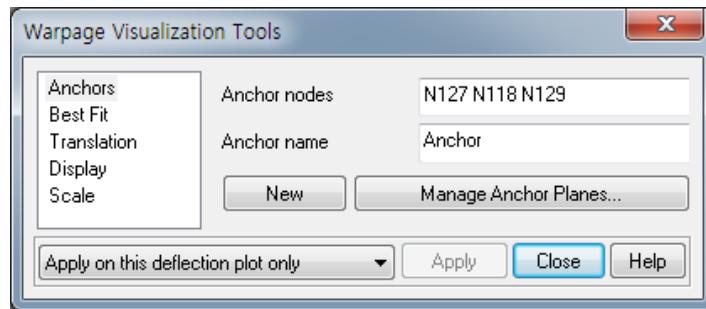


Deflection, all effects:Z Component
Scale Factor = 10.00



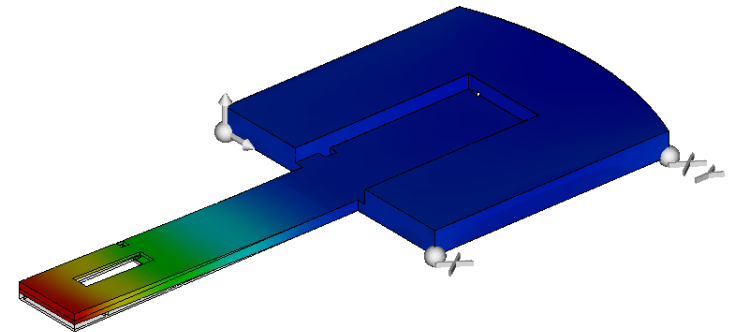
▶ Anchor Plane

일반적으로 변형의 기준은 제품의 중심이 되고, 그 변형량은 Global 좌표계의 X, Y, Z 방향으로 나타낸다. 그러나 경우에 따라서는 변형의 기준점을 변경하거나 새로운 기준면으로 변형을 나타내는 것이 편리한 경우가 있다. 이러한 경우에 Anchor Plane을 사용한다. Anchor Plane 은 Results의 “Visualize”를 클릭하면 활성화 할 수 있다. 여기서 하나의 node 만을 선택하면 변형의 기준점만 선택된 node로 변경되지만, 3 개의 node를 선택하면 새로운 Local 좌표계가 생성되어 그 기준면으로 변형량을 다시 나타낸다. 물론 변형 형상 자체가 변경되는 것이 아니라 변형을 보는 관점만 변하는 것이다.



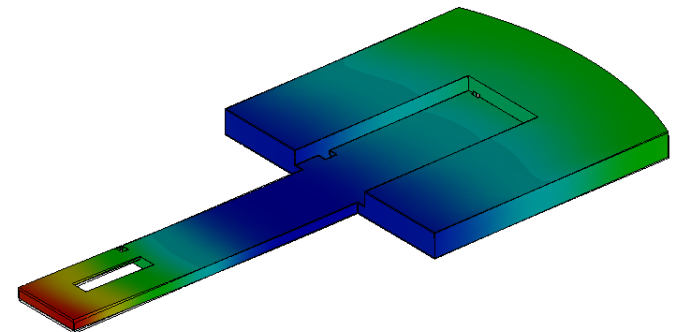
Deflection, all effects:Z Component
Shrinkage compensation(G) = (0.652, 0.668, 0.576)[%]
Scale Factor = 1.000

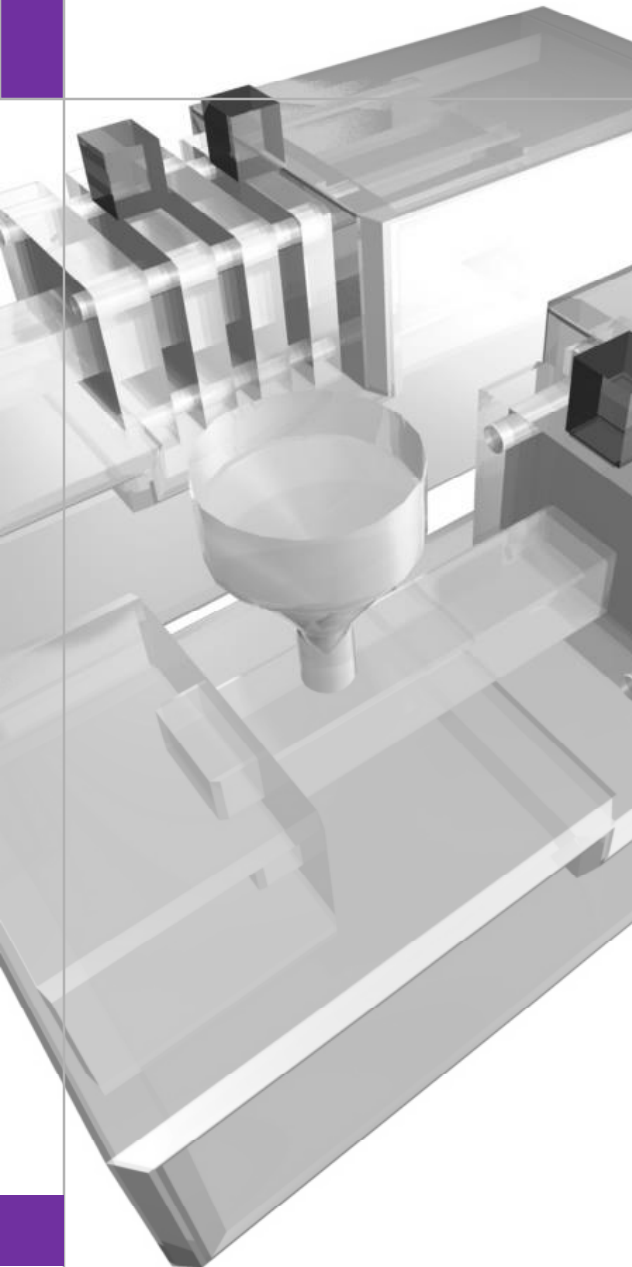
[mm]
5.306
3.855
2.404
0.9538
-0.4968



Deflection, all effects:Z Component
Shrinkage compensation(G) = (0.652, 0.668, 0.576)[%]
Scale Factor = 1.000

[mm]
2.489
1.620
0.7509
-0.1182
-0.9872





VI 3D 해석

1. 3D 해석이란?
2. 2D와 3D 해석의 차이점
3. 3D 해석의 범위
4. 3D 해석의 방법

1. 3D 해석이란?

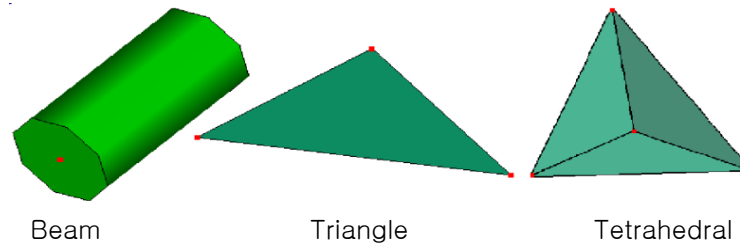
Moldflow에서는 플라스틱 제품 해석을 위하여 3가지 mesh 형태 와 3가지 형태 mesh 형상 을 사용할 수 있다.

Mesh Type

- Midplane
- Dual-domain
- 3D

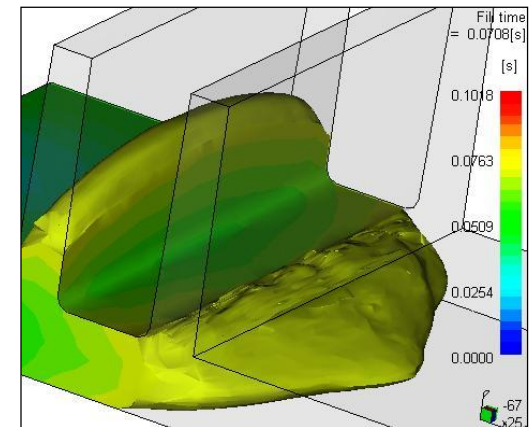
Mesh Shape

- 3-node Triangle
- 4-node Tetrahedral
- 2-node Beam



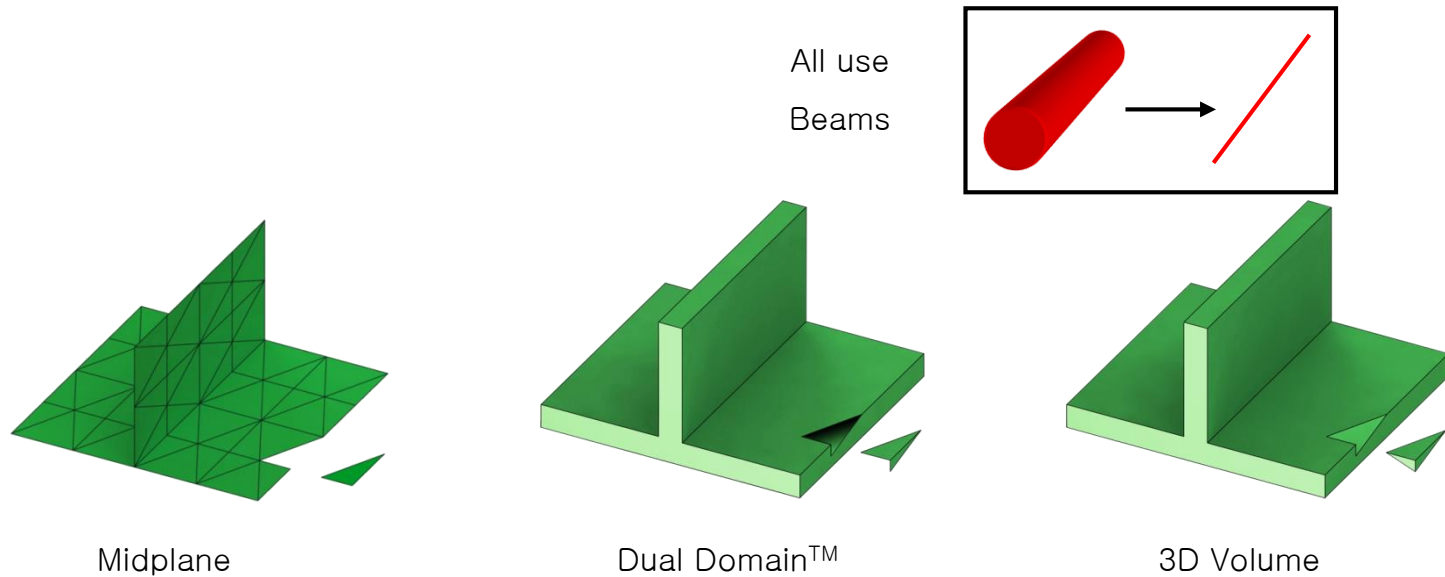
Midplane과 Dual-domain은 Triangle mesh를 사용하고, 3D는 Tetrahedral mesh를 사용한다.
그리고 러너와 냉각채널을 위해서는 Beam mesh를 일반적으로 사용한다.

일반적으로 제품의 두께가 두꺼워서 3차원 유동해석이 필요한 경우에 3D 해석을 하지만, 그 이외에도 제품에 홀이 많거나 폭이 좁은 경우, 러너 shear-heating 해석이 필요한 경우, 3D로만 지원되는 특수 해석의 경우 등에도 3D 해석을 진행하여야 한다.



1-1) Mesh 형태

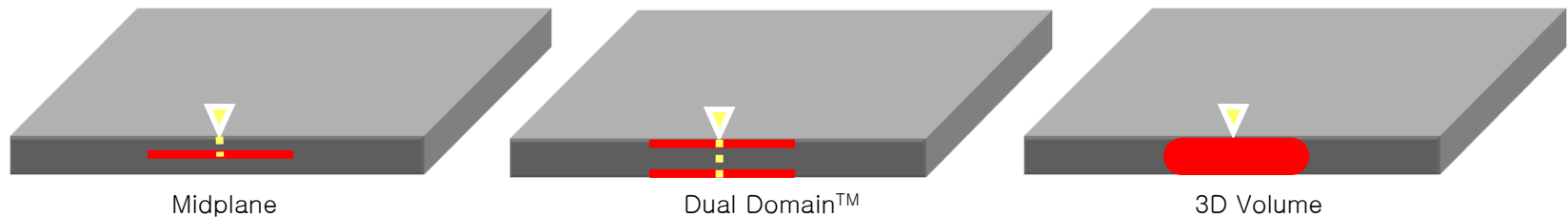
단순한 샘플 모델에 대한 Moldflow 해석을 위한 각각의 mesh 형태를 나타내었다.



1-2) Mesh 형태의 개념적 도식

Moldflow에서 사용하는 mesh 형태의 두께 방향 유동 계산에 대한 개념적 도식이다.

Midplane과 Dual-domain은 평면 방향만 계산하는 2차원 유동해석이고, 3D는 두께 방향도 고려한 3차원 유동해석이다.



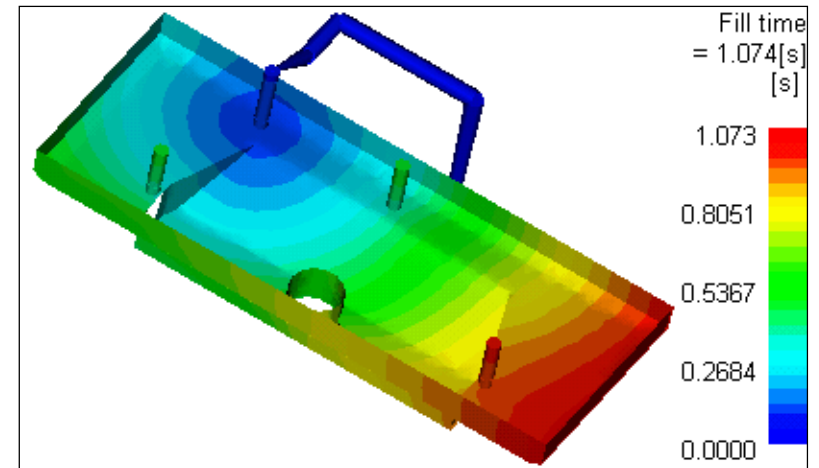
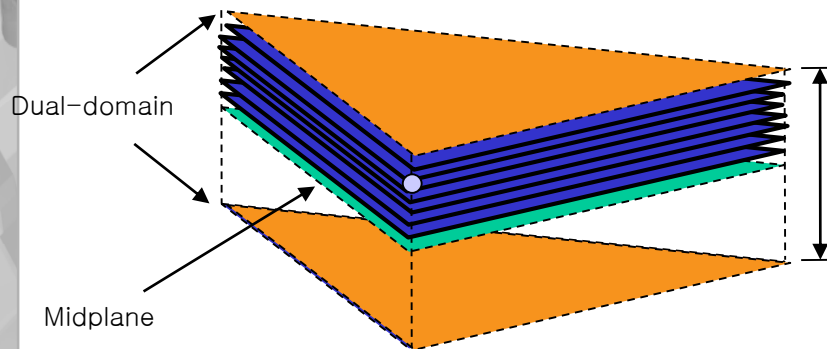
2. 2D와 3D 해석의 장단점

Midplane, Dual-domain과 같은 2D 해석과 3D 해석은 여러 가지 장단점을 가지고 있다. 따라서 사용자들은 해석 초기에 어떤 형태의 해석 모델을 사용할 것인가를 각 Solver들의 장단점을 고려하여 적절하게 결정하여야 한다.

2-1) 2D Solver 의 특징

제품 폭 대비 두께 비가 5배 이상인 얇은 판상 제품의 해석에 사용된다.

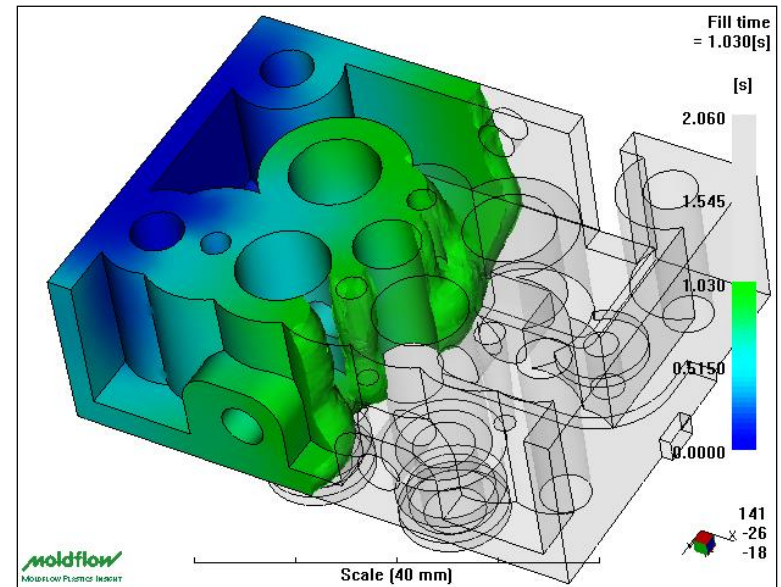
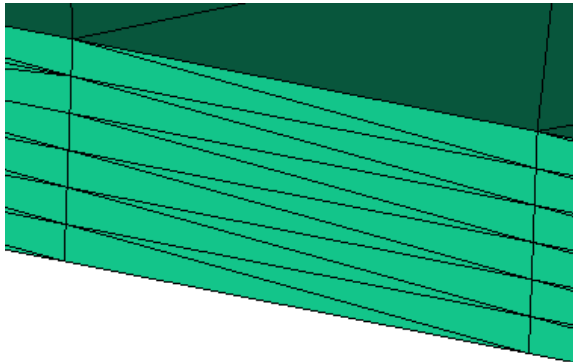
- Triangle 요소를 사용한다.
- 일반화된 Hele-Shaw 모델을 사용한 2차원 유동 해석을 진행한다.
- Midplane의 경우 벽면 방향의 열손실 계산이 무시된다.
- 평면방향의 열전도 계산이 무시된다.
- 중력과 관성을 고려하지 않는다.
- 두께 방향의 해석은 8~ 20 범위의 가상의 laminate를 만들어 사용한다.
- 변형해석에서 CRIMS 모델을 사용한다.



2-2) 3D Solver의 특징

제품의 형상이 두껍거나 판상이라고 보기 어려운 제품들의 해석에 사용된다.

- Tetrahedral 요소를 사용한다.
- 3D Navier-Stoke 모델을 사용한 3차원 유동해석을 진행한다.
- 관성과 중력을 고려한 해석이 가능하다.
- 벽면 방향의 열전달 계산한다.
- 평면 방향의 열전도를 계산한다.
- 두께 방향의 해석은 최소 6 layer 이상의 3D mesh를 만들어 사용한다.
- 변형해석에서 Generic Shrinkage 모델을 사용한다.



3. 3D 해석의 범위

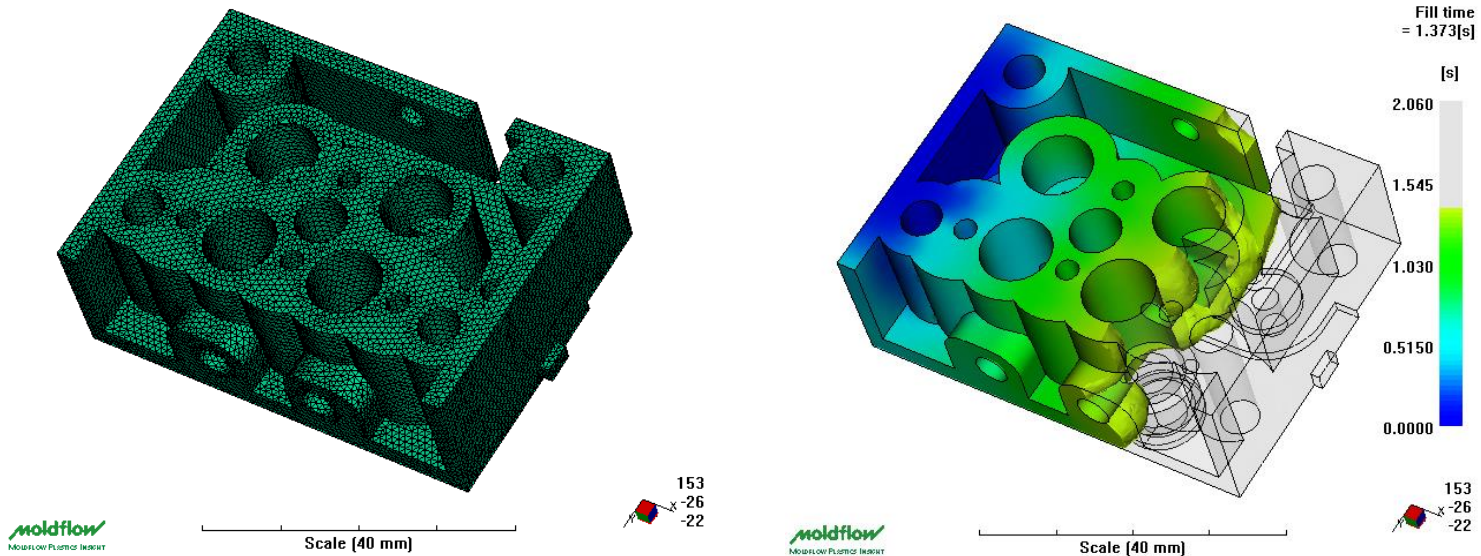
해석 초기에 2D와 3D solver의 특성을 고려하여 어떤 mesh 형식으로 해석을 진행할 것인가를 결정하여야 한다. 적절하지 못한 mesh 형식을 사용할 경우 해석의 신뢰도에 큰 문제가 발생하게 된다.

따라서 아래 나열된 항목에 해당한다면 반드시 3D로 해석을 진행하는 것이 적합하다.

- 제품의 두께가 두꺼운 경우
- 제품의 폭이 좁거나 홀이 많은 경우
- 러너의 shear heating을 고려하여야 하는 경우 또는 러너의 비대칭 분기의 경우
- 특수 공정 해석 또는 금형 변형 해석의 경우 (Insert molding, 2-shot overmolding, 3D gas molding, Core-shift)

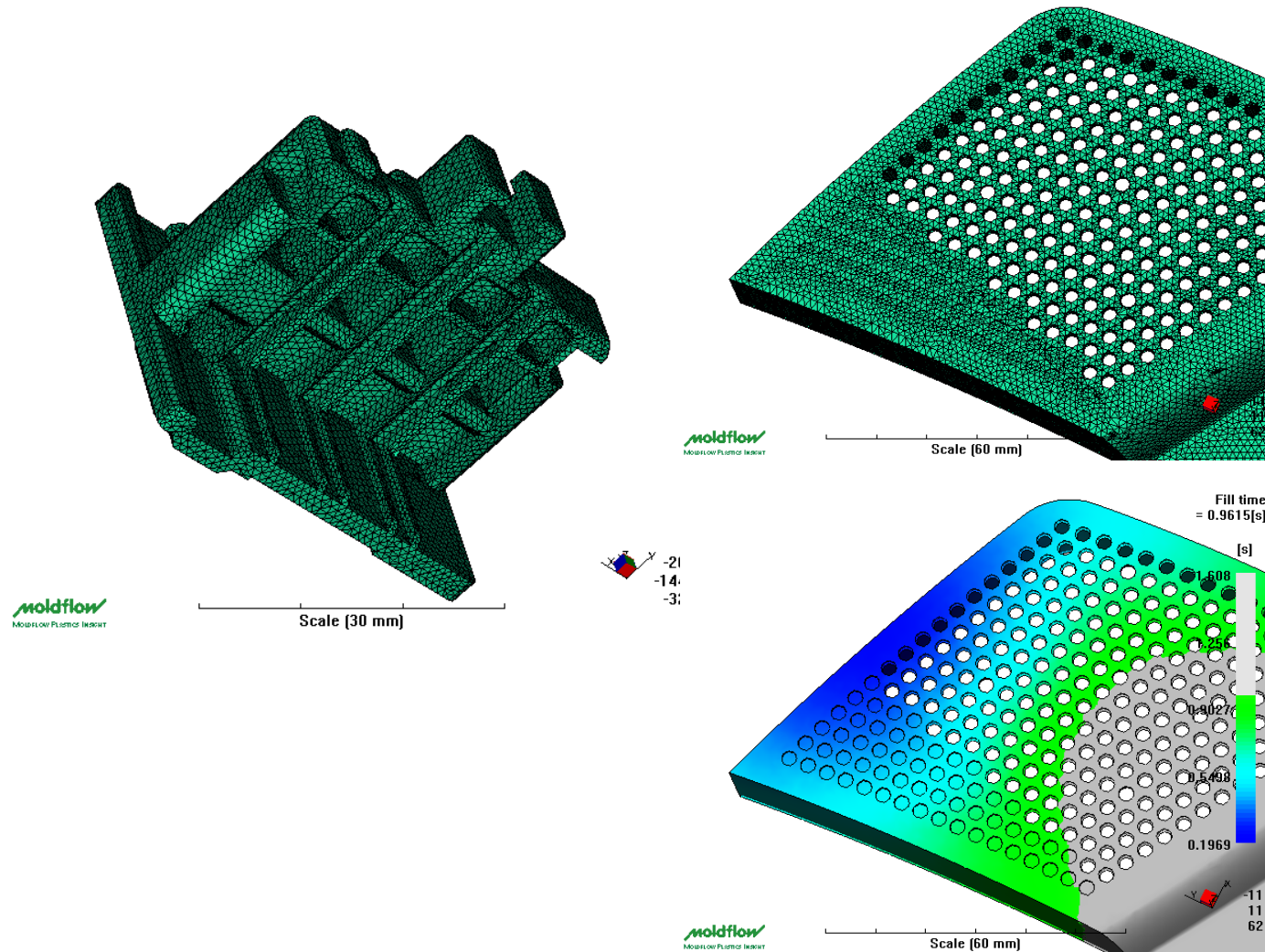
3-1) 제품의 두께가 두꺼운 경우

제품의 두께가 두꺼운 경우는 수지의 흐름을 3차원적으로 계산하여야 한다. 따라서 이 경우는 반드시 3D 형식으로 해석을 진행하여야 한다.



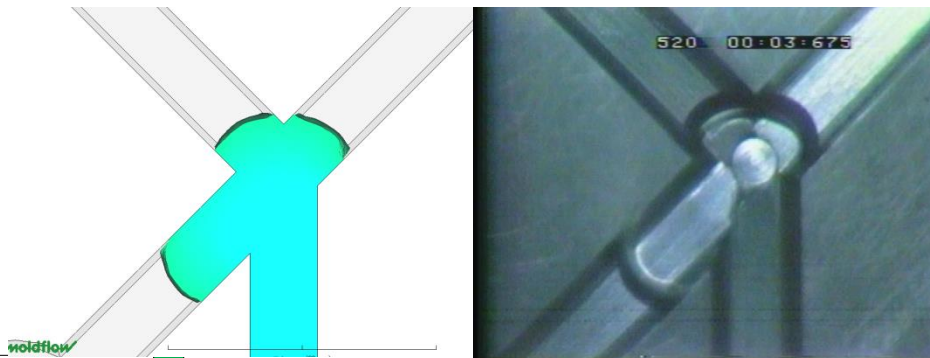
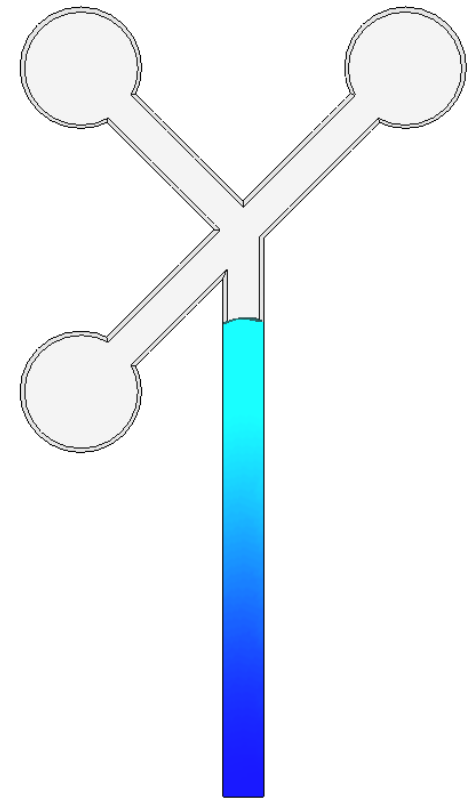
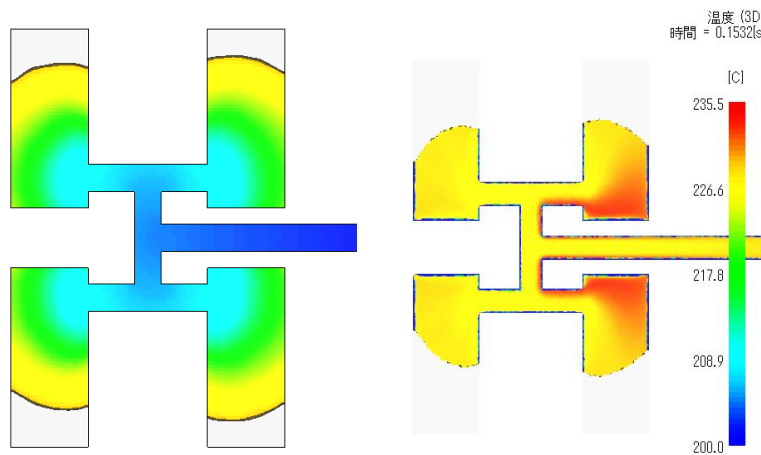
3-2) 제품의 폭이 좁거나 홀이 많은 경우

2D의 경우는 제품 벽면 방향의 열전달을 계산하지 않기 때문에 제품의 폭이 좁아서 벽면 면적이 많거나 홀이 많아서 벽면이 많은 경우에는 수지의 온도 계산에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 이러한 경우에는 3D 형식으로 해석을 진행하여야 한다.



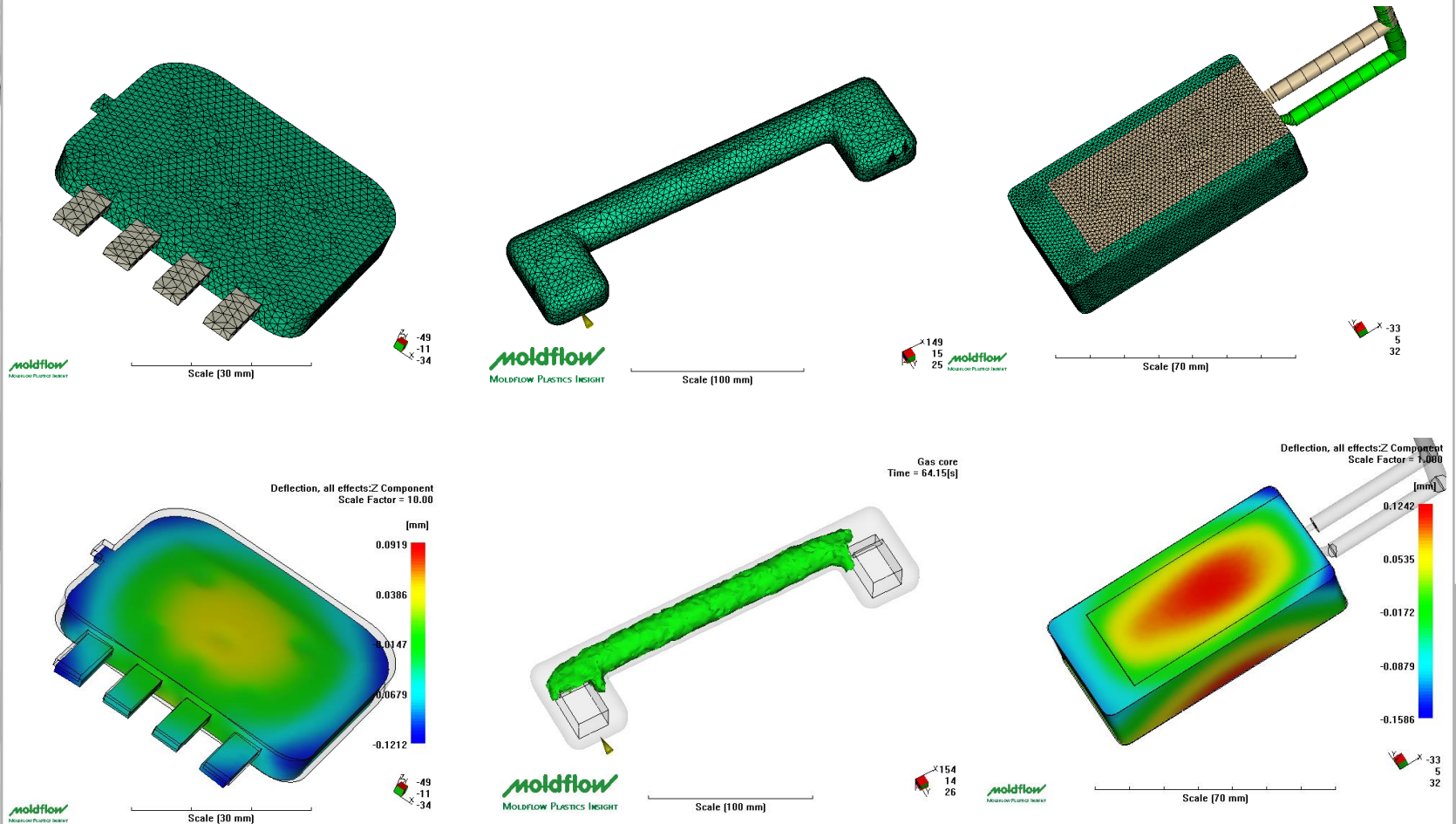
3-3) 러너 shear heating에 의한 비대칭 충전을 고려하여야 하는 경우 또는 러너의 비대칭 분기의 경우

일반적으로 러너에서의 수지 shear-heating에 의하여 러너 단면 위치에 따른 온도 변화에 영향을 미친다. 특히 8 캐비티 이상의 금형에서는 이러한 shear-heating 영향에 의하여 충전 비대칭이 발생하는 경우가 많이 있다. 또한 러너가 분기되는 구조에 따라서도 충전에 영향을 미치는 경우가 있다. 이와 같이 러너에서의 shear-heating 영향과 러너의 분기 구조에 의한 충전영향을 해석하려면 러너를 포함한 제품 전체를 반드시 3D 형식으로 해석을 진행하여야 한다.



3-4) 특수 공정 해석 또는 금형 변형 해석의 경우(Insert molding, 2-shot overmolding, 3D gas molding, Core-shift)

일반적인 사출성형 공정을 단순 해석하는 것이 아니라, 특수한 공정을 해석 하는 경우 또는 금형의 변형을 고려한 해석을 할 경우에는 이중 모델 사이의 경계조건 설정문제 또는 제품의 구조상 3D로 해석을 진행하여야 한다.



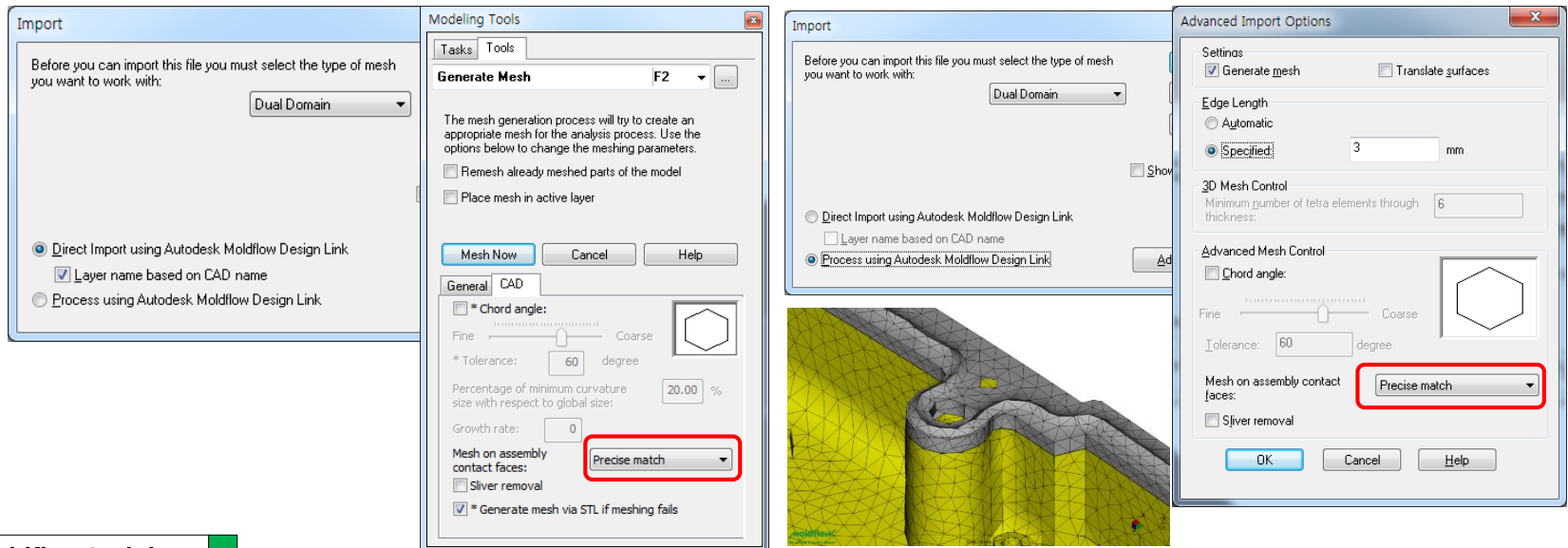
4. 3D 해석의 방법

4-1) 모델 불러오기와 3D Mesh 생성

4-1-1) 모델 불러오기

모델을 불러오는 방법과 불러오기 가능한 모델의 형식은 Dual-domain과 기본적으로 동일하므로 다시 설명하지 않는다. 3D 해석을 위하여 처음부터 3D mesh 옵션으로 모델을 불러 올 수도 있지만 Dual-domain으로 먼저 불러와서 Dual-domain 메쉬를 수정하고 3D 메쉬를 만드는 방법이 일반적이다. 바로 3D mesh를 생성하는 경우 오류가 발생할 수도 있고, mesh 품질도 좋지 않을 수 있다.

Overmolding 또는 Core-shift 해석을 위하여 Assembly 모델을 이용하여 메쉬를 생성하는 경우 2종의 파트 경계에 메쉬가 일치하게 생성되는 것이 필수는 아니지만 유리하다. 경계를 일치하게 만들지 않을 경우는 각각의 모델을 불러와서 Dual-domain mesh를 생성하고, 수정 후 각각 3D mesh를 생성하여 “Add” 이용하여 두 개의 3D mesh를 하나의 study파일에 모두 불러들이면 된다. 하지만 경계를 일치되게 mesh를 생성하기 원한다면 아래 그림과 같이 “Direct Import”을 이용하여 불러들이고 Synergy에서 mesh 생성시에 “Precise match” 옵션을 사용한다. 물론 “Process” 옵션이지만 Design Link를 이용하여 mesh를 바로 생성하는 경우에도 “Precise match” 옵션을 사용할 수 있다. 그렇지만 이 경우에도 Dual-domain mesh를 먼저 수정 후 3D mesh를 생성한다.



4-1-2) 3D Mesh 생성 방법

앞에서 설명한 것과 같이 2D mesh를 먼저 생성하고 나중에 이를 기반으로 3D mesh를 생성하는 것이 일반적 방법이다.

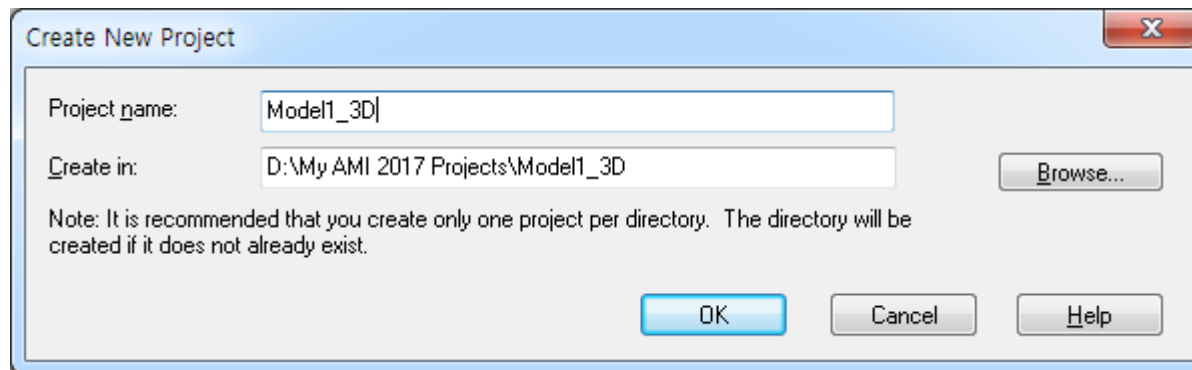
(1) 2D mesh 생성 후 3D Meshing 절차

2D mesh 생성 방법과 수정 방법은 기존 Dual-domain 방법과 기본적으로 동일하다. Synergy 또는 AMDL을 이용하여 모델을 우선 import 한 후에 mesh 수정을 하고 이를 바탕으로 3D mesh를 생성한다.

- Model import (Synergy, AMDL) -> 2D Meshing (Synergy) -> 2D Mesh editing -> 3D Meshing (Synergy)
- Model import + 2D meshing (AMDL) -> 2D Mesh editing -> 3D Meshing (Synergy)

▶ New Project 생성

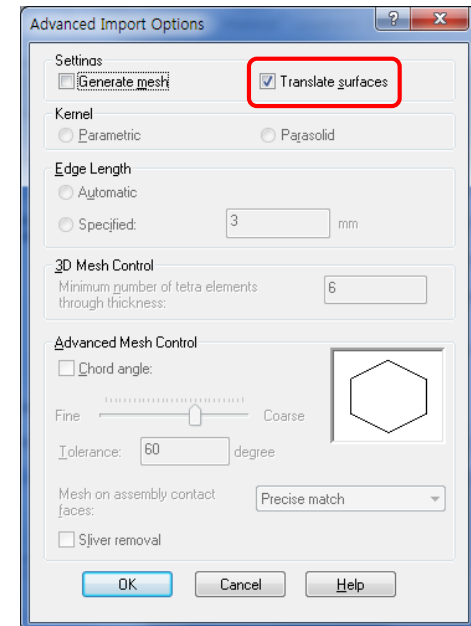
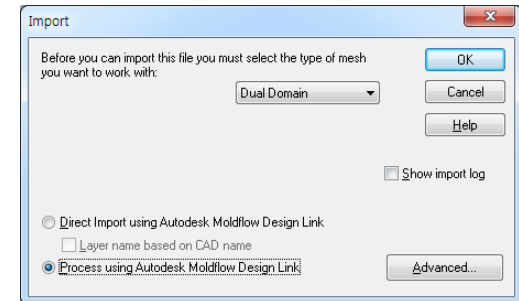
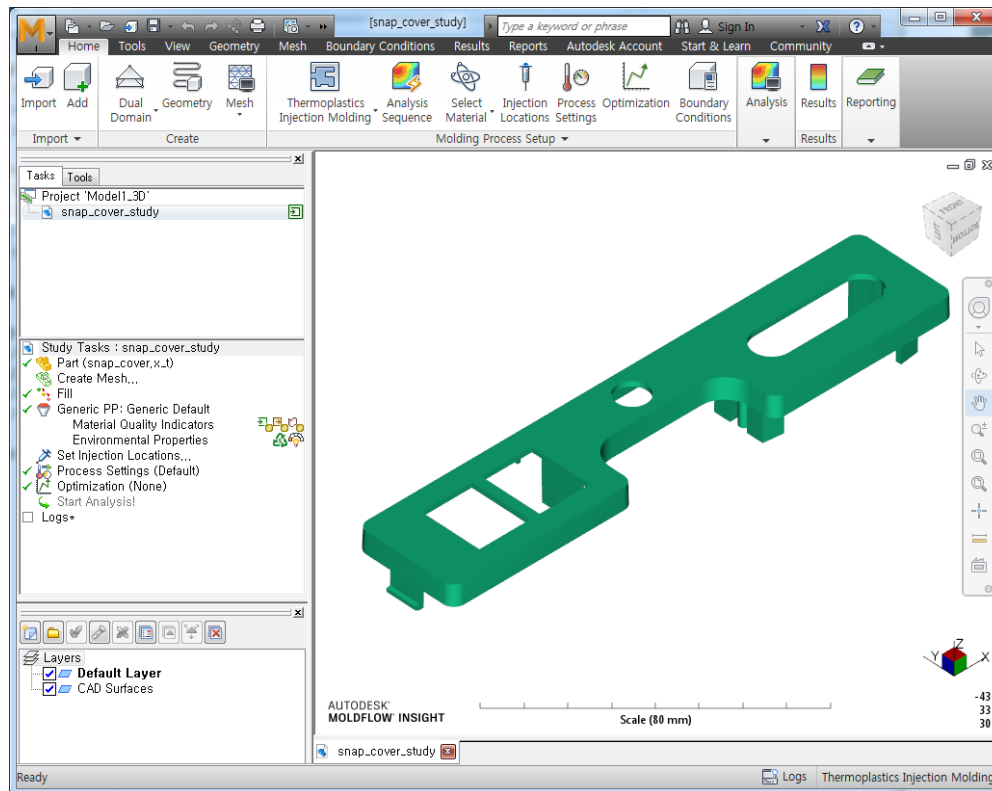
“Model1_3D” 프로젝터 파일을 새로 생성한다.



▶ Model 불러오기

실습 예제 폴더에서 “snap_cover.x_t”를 NURBS로 변환하는 옵션을 사용하여 불러온다. 본 예제를 통하여 3D 생성 절차를 알아보자. 파일명이 .stl 또는 .igs 인 경우에는 Synergy 변환기를 이용하여 모델을 변환하고, 그 이외의 파일들은 AMDL을 통하여 변환하여야 한다. AMDL을 사용하는 경우에는 다양한 3D CAD 모델을 NURBS surface(Process) 또는 native CAD body(Direct Import)로 불러들일 수 있다.

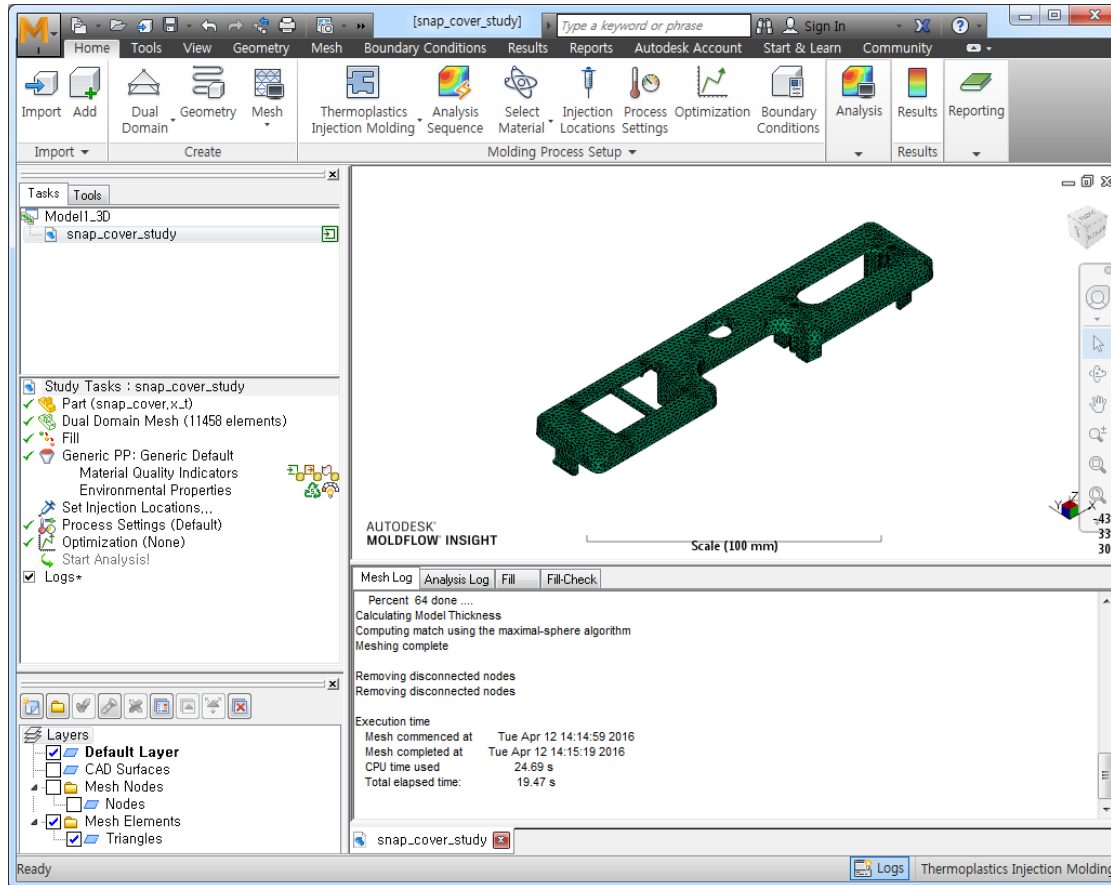
모델을 mesh 생성 없이 NURBS 로 변환하기 위해서는 “Advanced” 옵션에서 “Translate surface” 만을 선택하여야 한다. 물론 mesh의 형식은 Dual-domain을 사용하여야 한다.



▶ Mesh 생성

Generate mesh 옵션에서 Global edge length:2, Chord height:0.2mm 값을 입력하고 mesh를 생성한다.

3D mesh 생성을 위한 Global edge length를 결정할 때는 Dual-domain과 달리 두께 방향의 mesh 구조를 고려하여야 한다. 일반적으로 두께 방향으로 8 layer 이상의 3D mesh를 생성하기 때문에 표면 mesh 길이는 제품 두께의 1.0배를 넘지 않는 것이 좋다.



► Mesh의 진단 및 수정

Mesh 생성 후에 “Mesh Statistics”와 “Mesh Diagnostics”을 통하여 불량 요소를 찾아내고, “Mesh Repair” 도구를 이용하여 이들을 수정한다. Dual-domain mesh에 “Overlaps”, “Intersections”, “Free edges” 또는 “High aspect ratio elements”와 같은 문제가 있을 때는 3D mesh 생성시 에러가 발생할 수 있다. 따라서 2D 해석 보다 더 철저한 mesh 점검이 요구된다.

Triangles

Entity counts:

Triangles 11458
Connected nodes 5723
Connectivity regions 1

Invisible triangles 0

Area:

(Mold blocks and cooling channels are not included)
Surface Area: 148.839 cm²

Volume by element types:

Triangle: 10.0463 cm³

Aspect Ratio:

Maximum	Average	Minimum
7.68	1.62	1.16

Edge details:

Free edges	0
Manifold edges	17187
Non-manifold edges	0

Orientation details:

Elements not oriented	0
-----------------------	---

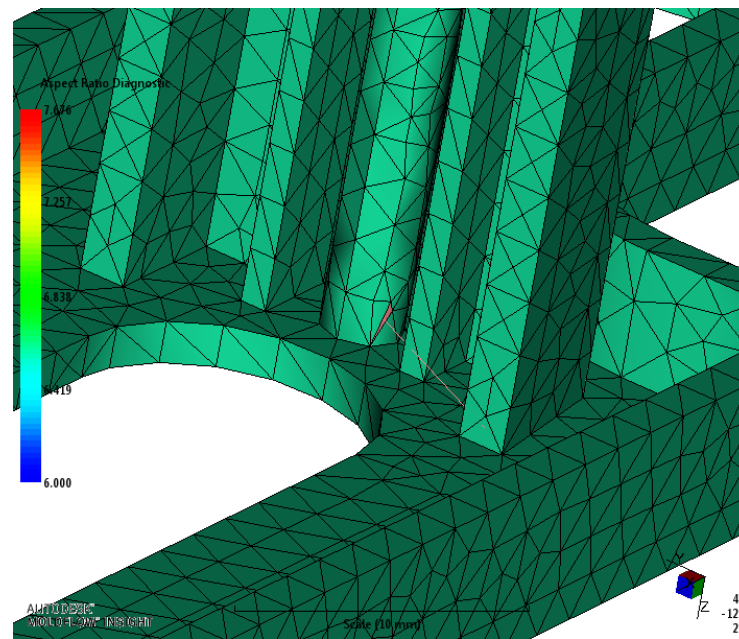
Intersection details:

Element intersections	0
Fully overlapping elements	0

Match percentage:

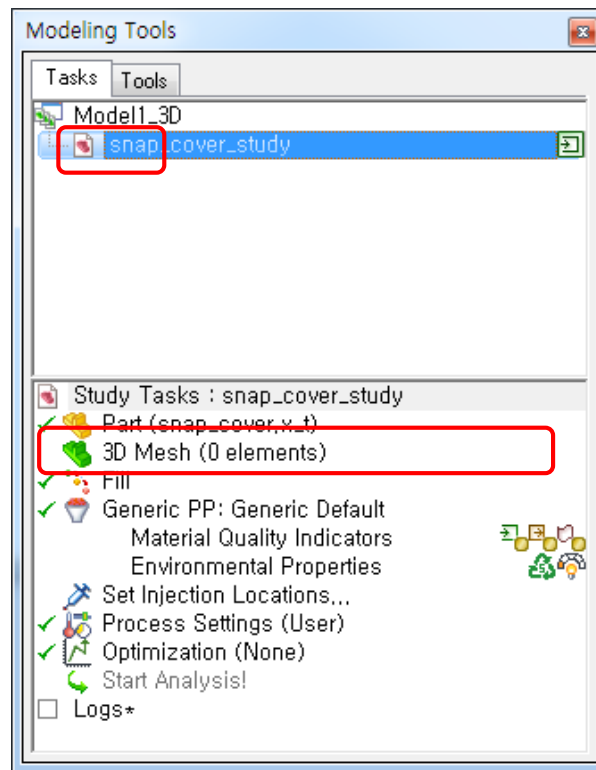
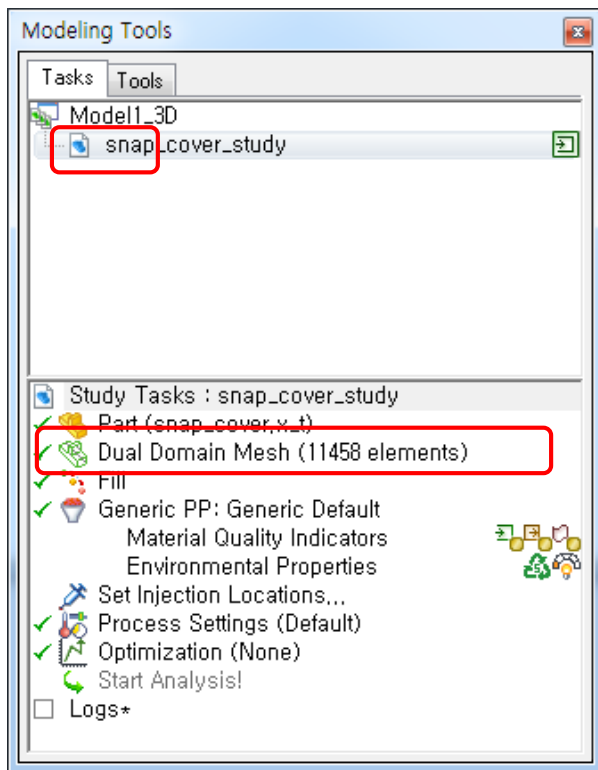
Match percentage	94.7%
Reciprocal percentage	96.3%

Suitable for Dual Domain analysis.



► Mesh Type 변경

Mesh 형식을 Dual-domain에서 3D로 변경하면 “Study Task” 에서 Dual-domain mesh의 아이콘 모양이 바뀌고 체크 마크가 사라진다. 이것은 해석을 위한 3D mesh가 아직 생성되지 않았기 때문이다.



▶ 3D Mesh 생성

Generate Mesh에서 Tetra 탭을 클릭하고 Minimum number of elements through thickness: 6 그리고 Maximum allowed edge length: 1을 입력하고 “Mesh Now”를 클릭한다.

▪ Minimum number of elements through thickness

: 두께 방향으로 3D mesh layer 수를 말한다. 최소 가능한 layer 수는 4이지만 보통 6 이상의 layer를 사용한다. Layer 수가 많으면 두께 방향의 해석 결과의 신뢰성은 높아지지만 해석 시간은 길어진다.

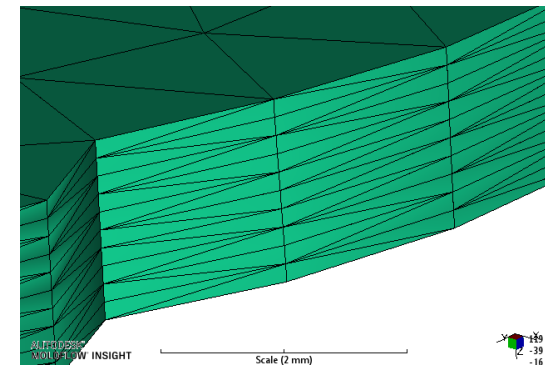
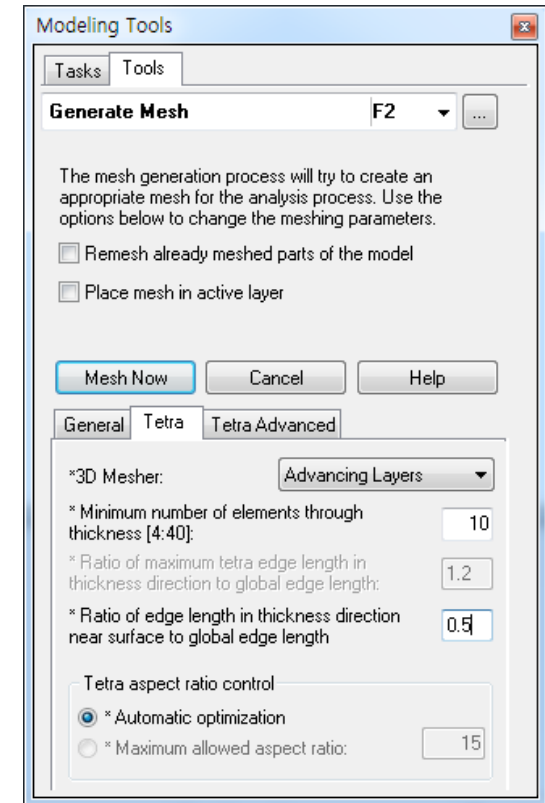
물론 3D Gas 해석이나 광학 해석을 위해서는 최소 layer 수가 각각 8과 10 이상이어야 한다.

따라서 layer 수를 결정할 때는 제품 두께, Dual-domain mesh 수, 생성될 전체 mesh 수, 해석의 종류 등을 고려하여 결정하여야 한다.

참고로 Dual-domain mesh를 6 layer 3D mesh로 변경하면 약 10배 정도 mesh수가 증가한다.

▪ Minimum allowed edge length through thickness

: 두께가 상대적으로 두꺼운 부분이나 코너 부분은 상대적으로 각 layer의 높이가 클수 밖에 없다. 이러한 경우 각 layer의 최대 허용 두께를 설정하면 이러한 부분에는 설정된 layer 수 보다 더 많은 layer가 만들어져서 전체 mesh의 품질이 개선된다.



- Use surface mesh optimization

: Dual-domain mesh가 3D mesh를 위하여 적절하지 못할 경우에는 너무 가까운 node들을 자동으로 합하여 3D mesh의 품질을 향상하기 위한 옵션이다. 특히 “High aspect ratio” 요소들을 개선하는데 도움이 된다.

기본적으로 이 옵션을 사용하며, 대부분 경우에 이 옵션을 유지하여야 한다.

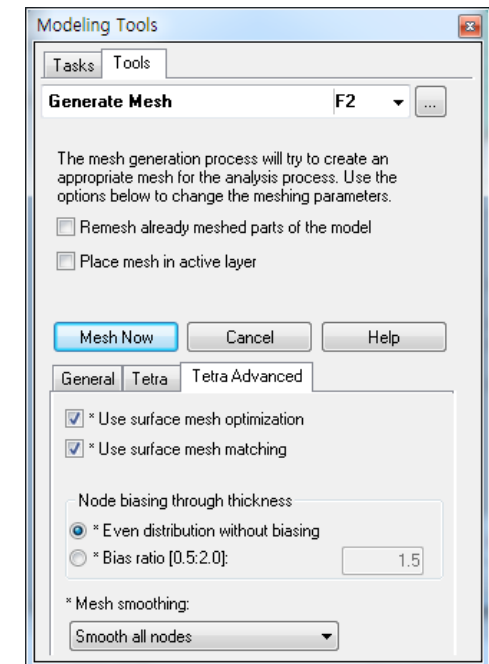
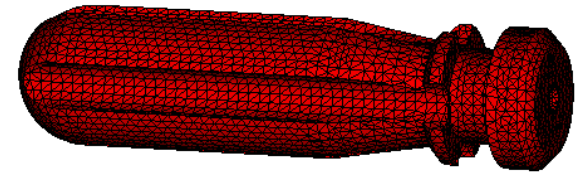
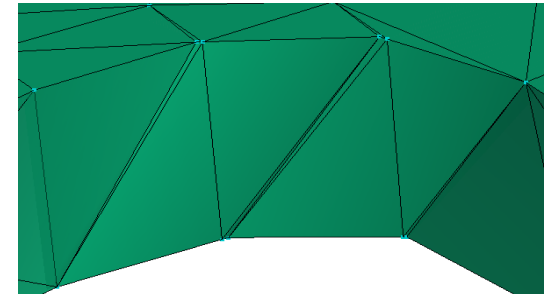
- Use surface mesh matching

: 3D mesh 생성의 첫 번째 단계는 두께 방향으로 node들을 생성하는 것이고, 이러한 node들을 생성하기 위해서는 Dual-domain mesh에서 서로 matching 되는 요소를 찾아 두께 방향을 결정한다. 그러나 우측과 같은 판상 형상이 아닌 제품들은 matching 되는 요소들이 없기 때문에 이 옵션을 사용하지 않는 것이 mesh 품질 개선에 도움이 된다.

- Tetra aspect ratio control

: 3D mesh는 여러 단계를 거쳐서 만들어지게 된다. Automatic optimization의 경우는 중간 단계에서 일시적으로 high aspect ratio는 허용되며, 최종 단계에서 aspect ratio를 줄이기 위하여 node들을 재배치하여 최적의 mesh를 생성한다. 이 옵션을 사용하면 mesh 수를 최소화 할 수 있다.

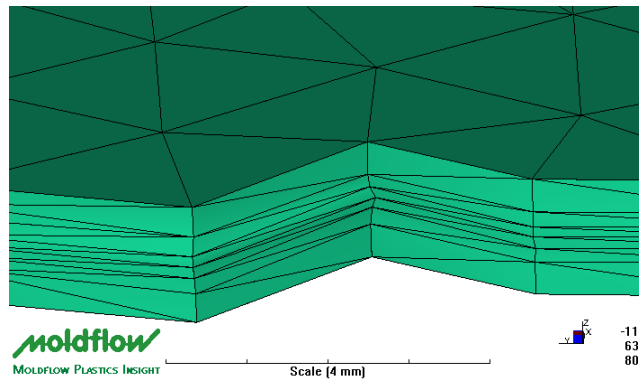
Maximum allowed aspect ratio 옵션은 이와 다르게 모든 중간단계에서 지정한 aspect ratio를 관리하기 때문에 최종 aspect ratio는 개선될 수 있지만 mesh 수가 크게 증가하는 경향을 보인다.



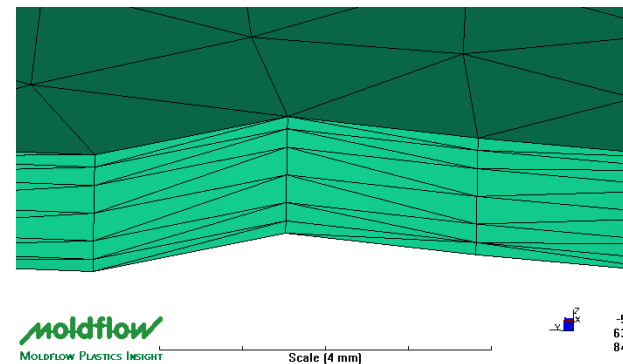
- Node biasing through thickness

: 두께 방향으로 균일한 간격의 mesh를 생성하는 것이 아니라 경우에 따라서는 제품 표면 또는 중앙에 보다 조밀한 mesh를 생성하는 것이 요구되는 경우가 있다. 이런 경우에 이 옵션을 사용하여 아래 그림과 같이 두께 방향으로 mesh의 조밀도를 다르게 할 수 있다.

3D Gas 해석의 경우는 제품 중앙부에 Gas가 침투하기 때문에 제품 중앙 부분의 조밀한 mesh가 요구되고, 러너 shear-heating의 경우는 제품 표면의 mesh가 조밀한 것이 중요할 수 있다.



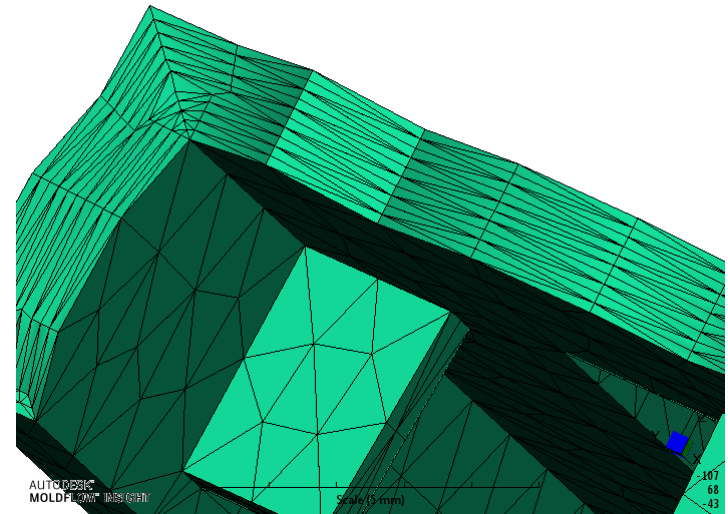
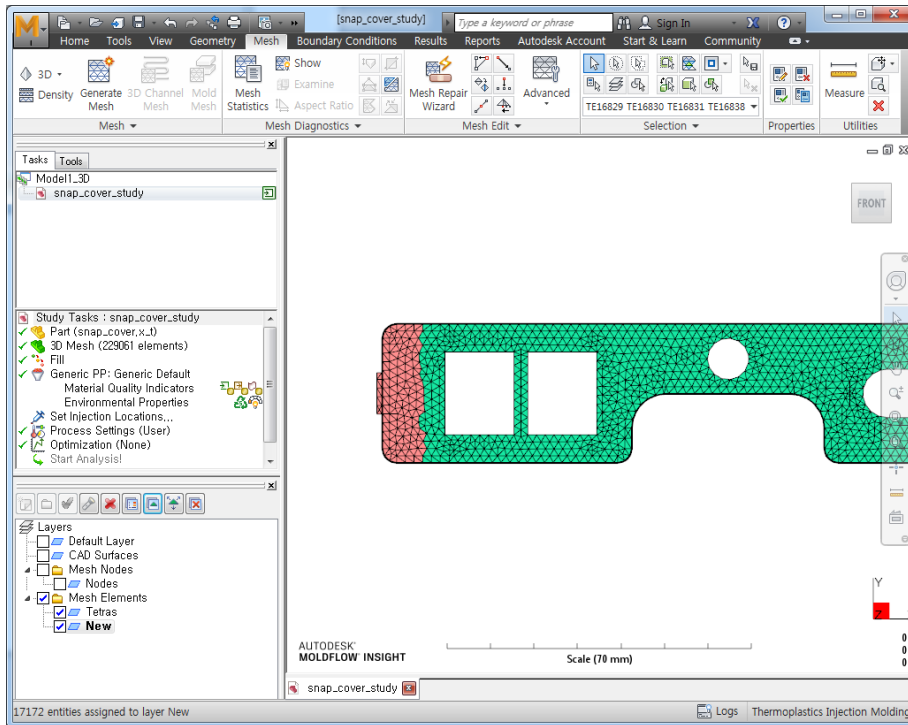
<0.5>



<1.5>

▶ 3D Mesh의 확인

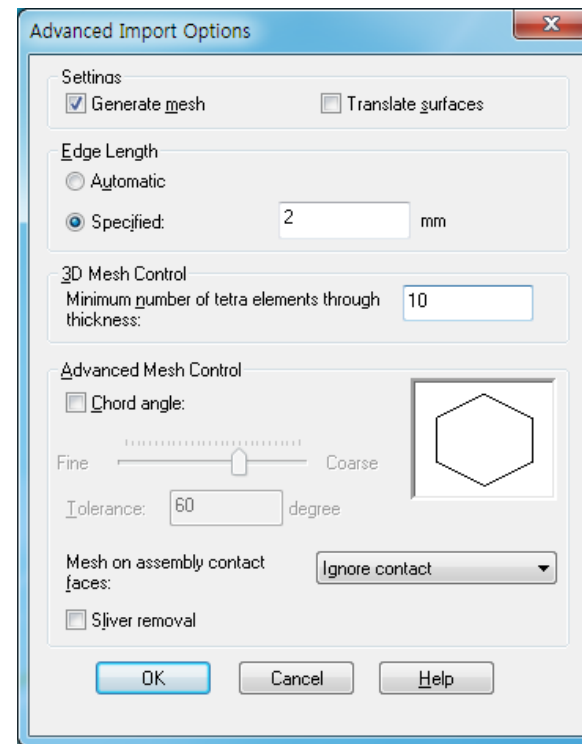
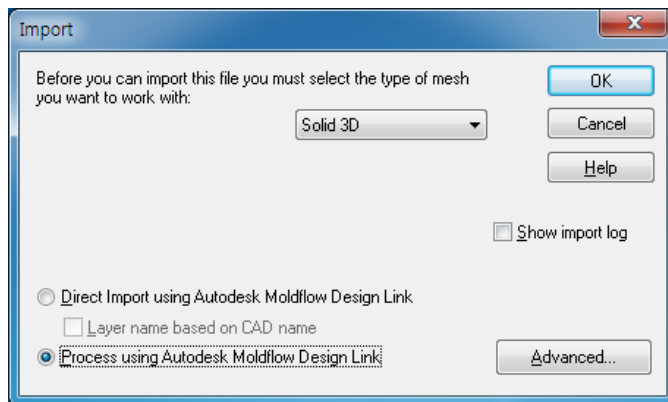
생성된 3D mesh의 형상을 확인을 위해서는 제품 내부를 확인하여야 한다. 이러한 경우에 가장 편리한 방법은, 먼저 layer에서 “New layer”를 생성하고, 그 layer의 체크 마크를 제거한 다음, 마지막으로 일부 요소들을 선택하여 새롭게 생성된 layer로 “Assign”하면 선택된 요소들이 표시되지 않게 되어 제품 내부를 확인할 수 있다.



(2) 다이렉트 3D Meshing 절차

AMD를 이용하여 모델 불러오기와 동시에 3D meshing이 가능하다. 다이렉트 3D meshing이 가능하려면 설계된 모델의 완성도가 상당히 중요하다. 그렇지 않은 경우에는 mesh 생성시 에러가 발생하며, 이러한 경우에는 “2D를 이용한 3D Meshing” 방법을 이용하여야 한다.

먼저 import에서 “solid(3D)”를 선택하고, “AMD Options”를 클릭하면 “Edge Length”와 “3D Mesh Control”에서 최소 layer 수를 입력할 수 있다. 모든 입력을 마친 후 “OK”를 클릭하면 MDL을 이용한 다이렉트 3D mesh가 생성된다.



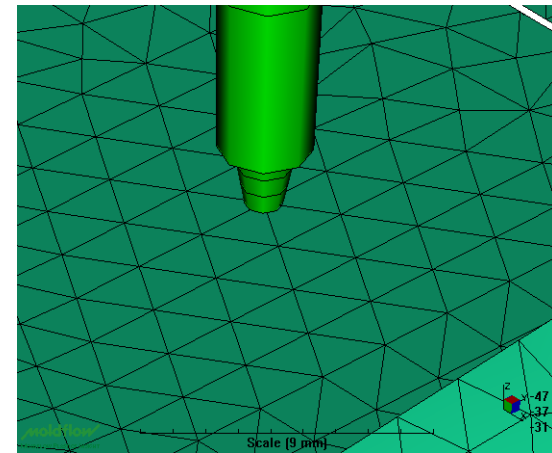
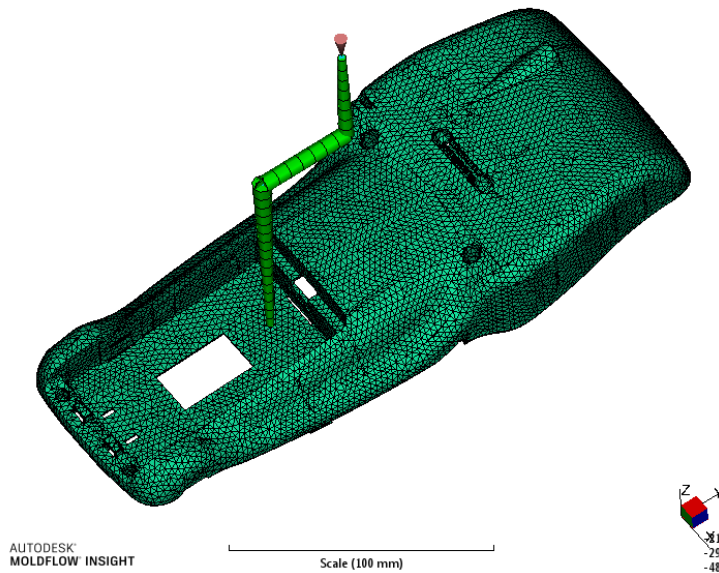
4-2) Runner & Cooling 설계

4-2-1) 러너의 설계

(1) 1D 러너의 설계

기본적으로 runner는 curve를 이용한 1D beam 요소로 형상화한다. 3D 해석을 위한 러너는 일반적으로 Dual-domain mesh 단계에서 모두 끝마치는 것이 편리하다. 이것은 3D mesh 생성 후 제품 표면 node를 게이트 위치로 이동하면 3D mesh에 에러가 발생하는 경우가 발생할 수 있기 때문이다. 물론 node의 이동이 필요 없는 경우에는 3D mesh에 1D 러너 시스템을 설계해도 무방하다.

따라서 항상 Dual-domain 모델의 복사본을 보관하는 것이 편리하며, 없는 경우에는 3D mesh를 다시 Dual-domain mesh로 변환 가능하다.

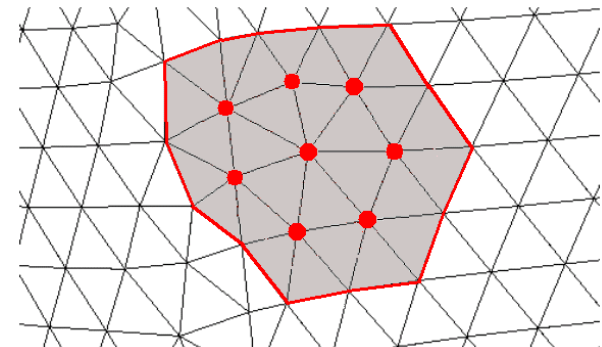
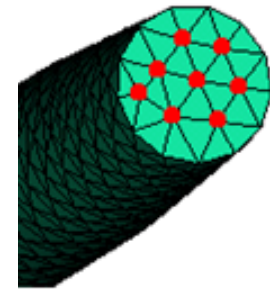
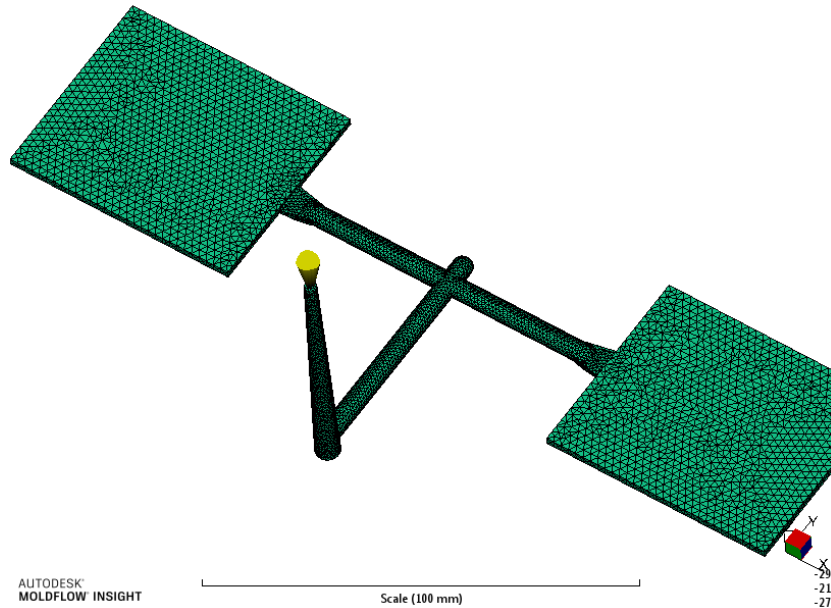


(2) 3D Runner의 설계

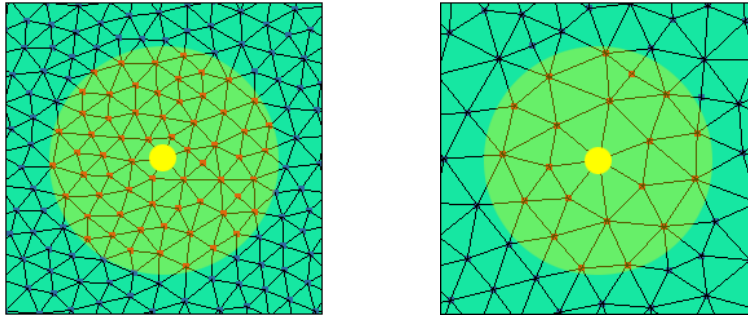
러너를 3D 요소로 생성하여야 하는 경우가 있다. 특히 러너 shear heating에 의한 비대칭 충전을 고려하여야 하는 경우와 러너의 비대칭 분기의 경우이다.

이 경우 러너의 3D mesh 생성은 제품 모델과 함께 단일 모델로 설계하고 앞에서 설명한 두 가지 방법으로 meshing을 하는 것이다.

또한 “Injection location” 설정은 아래 그림과 같이 edge node를 제외한 스프루 상단의 모든 node에 설정하여야 한다. 이렇게 함으로써 solver는 스프루 상단 전면으로 수지가 유입되는 것으로 계산한다. 러너 시스템 중에서 게이트만 3D로 설계한 경우에도 동일하다.

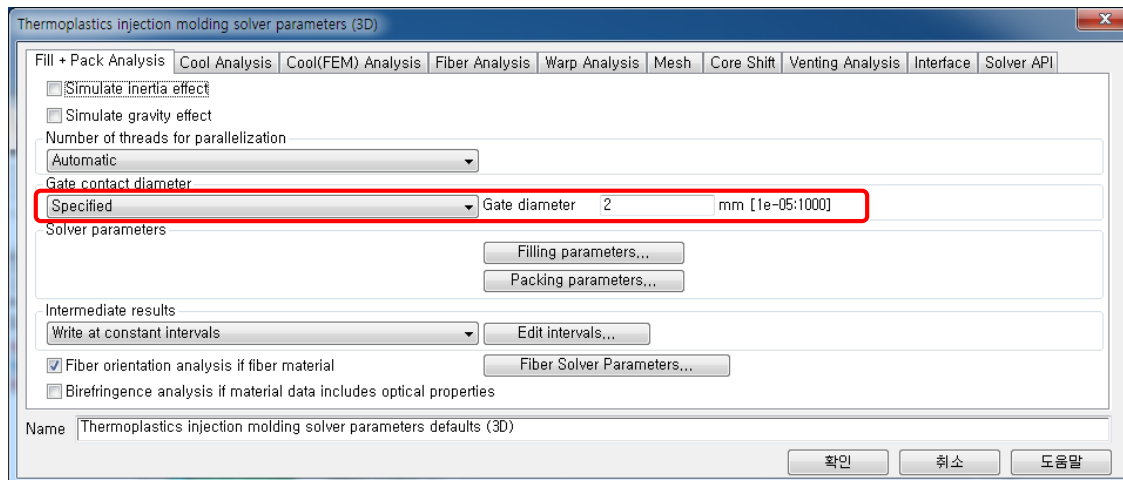


러너 없이 제품 모델에 하나의 “Injection location”만 지정하는 경우에는 제품의 형상을 고려하여 적절한 크기의 게이트를 자동으로 설정한다. 그러나 이 경우에 mesh의 조밀도에 따라서 Solver가 인식하는 게이트의 크기는 달라질 수 있으므로 유의 하여야 한다. 실제 해석에 사용되는 게이트의 크기는 자동으로 설정된 게이트 크기의 영역에 포함되는 Node들의 연결영역이다. 따라서 mesh가 조밀하지 못 할 경우에는 그 반대의 경우 보다 실제 게이트의 크기는 더 작게 인식된다.



게이트의 크기를 자동으로 설정하는 것이 아니라 “Solver Parameters”에 게이트 크기를 미리 정의하는 옵션도 있다.

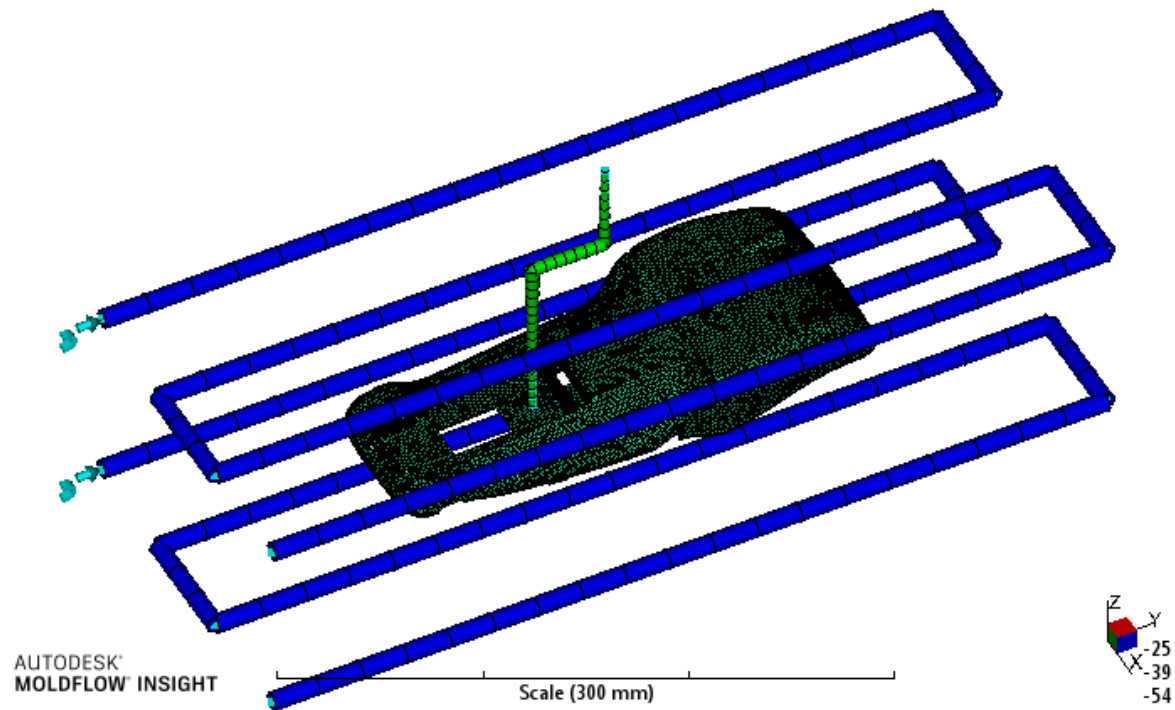
<< Tasks -> Process Settings -> Flow Settings -> Advanced Options -> Solver Parameters >>



4-2-2) 냉각의 설계

기본적으로 냉각 시스템은 Dual-domain과 같이 curve를 이용한 1D beam 요소로 형상화한다. 3D 해석을 위한 냉각 설계는 Dual-domain mesh 또는 3D mesh 생성 단계에 관계없이 수행하여도 무방하다. 이것은 냉각 시스템이 제품 모델과 물리적으로 연결되지 않기 때문이다.

냉각 시스템 설계 방법의 상세한 방법은 Dual-domain 매뉴얼을 참조하면 된다.



4-3) 공정조건 설정

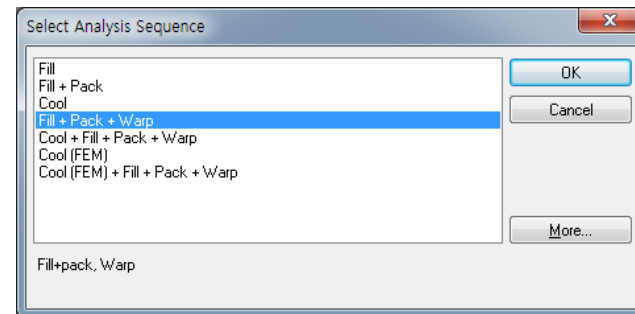
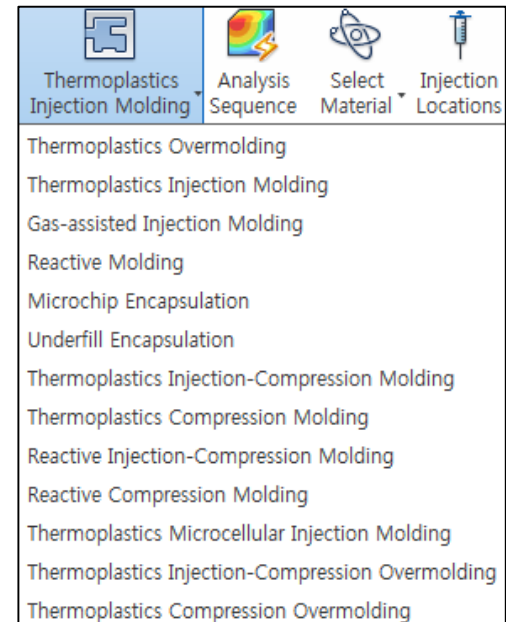
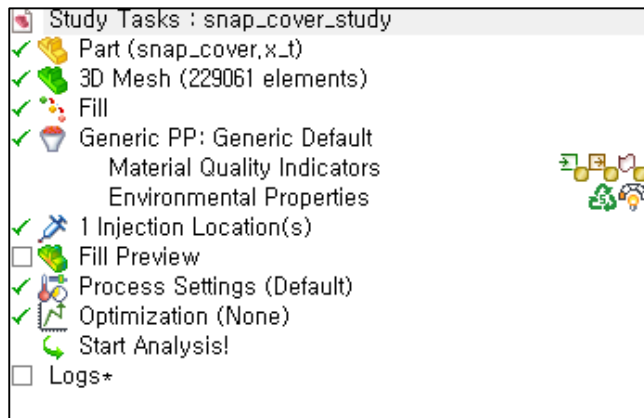
(1) 해석 공정 및 해석 순서 선택

Mesh 형식에 따라서 지원하지 않는 해석 공정들이 있다. 따라서 해석 준비를 시작하기 전에 미리 3D mesh 형식에서 지원하는 해석 공정인가를 점검하여야 한다. 이것은 Mold Process Setup에서 확인 가능하다.

3D 모델이 지원하는 성형 공정은 아래와 같다.

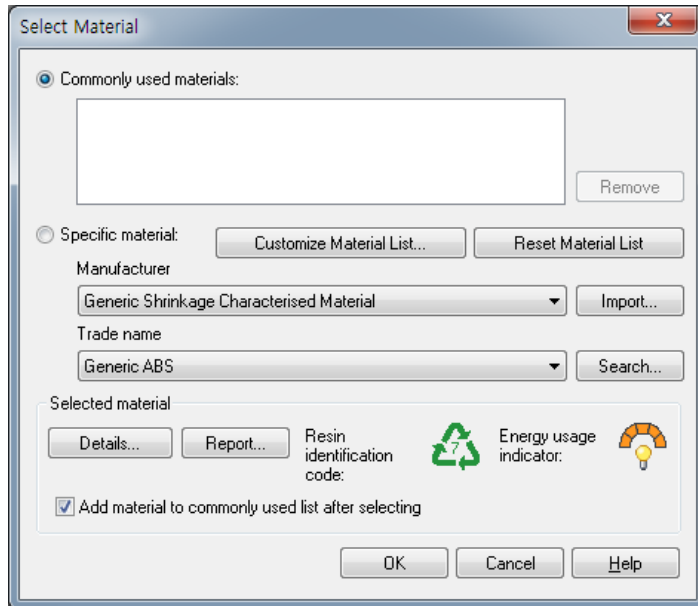
- Thermoplastics Overmolding
- Thermoplastics Injection Molding
- Gas-assisted Injection Molding
- Reactive Molding
- Microchip Encapsulation
- Underfill Encapsulation
- Injection Compression Molding
- Compression Molding
- Thermoplastics Microcellular Injection Molding

해석 공정을 선택한 후에는 “Tasks”에서 해석 순서를 선택하여야 한다.



(2) 해석 수지 선택

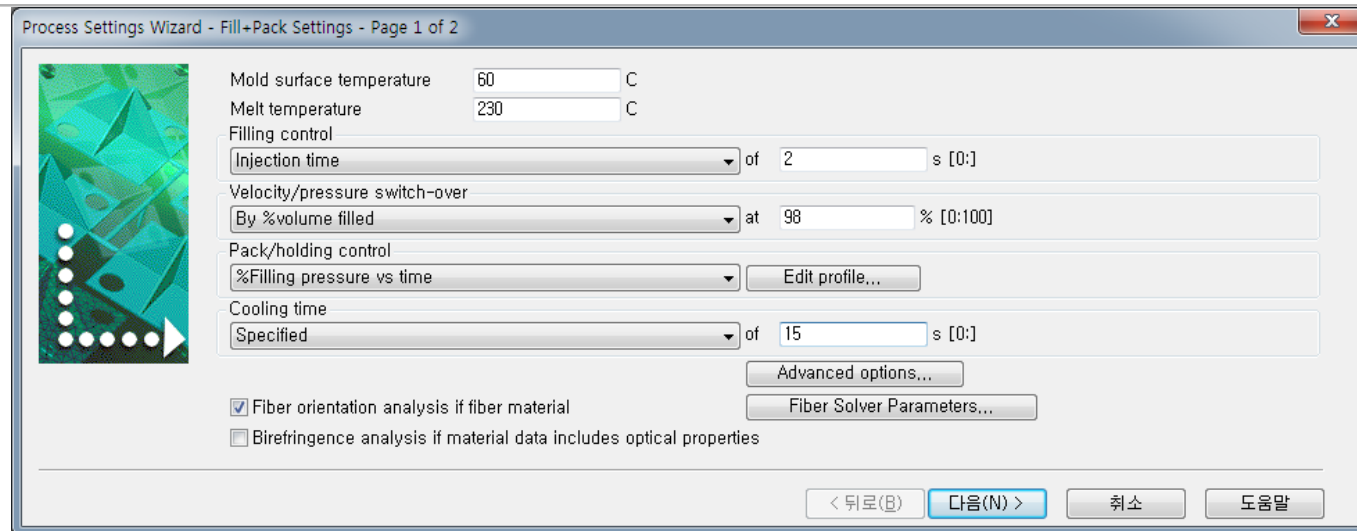
해석 수지의 선택 방법은 Dual-domain과 동일하다.



(3) 해석 공정조건 설정

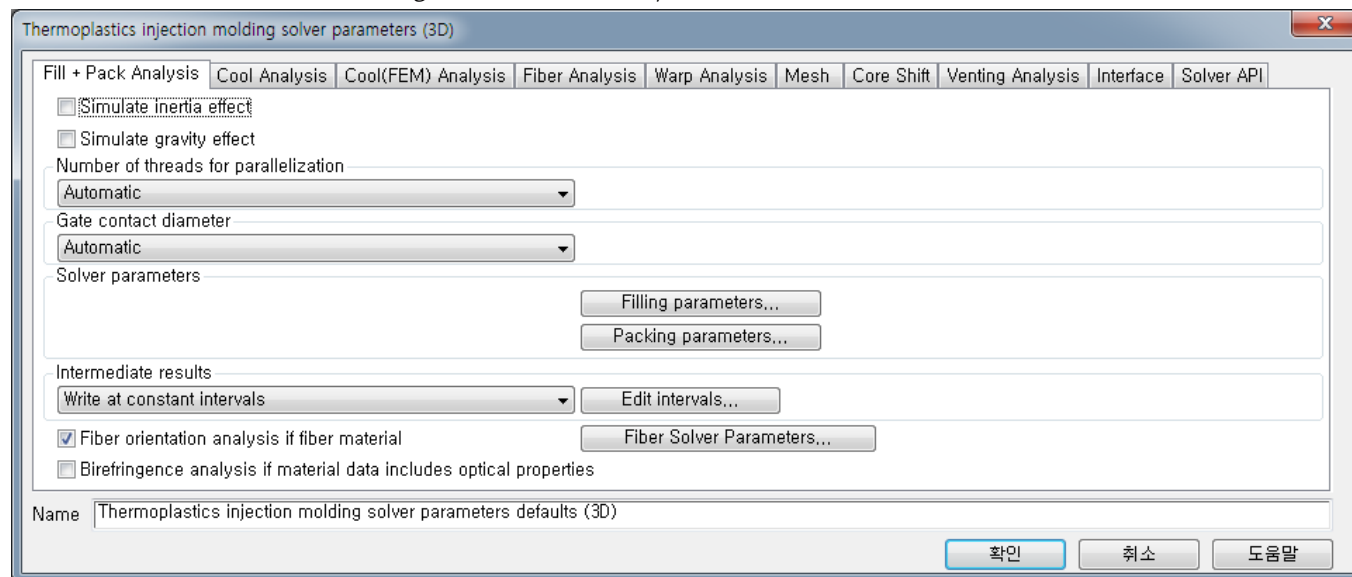
3D의 해석 공정 조건 설정은 대체로 Dual-domain과 유사하다. 기본 공정조건 설정 방법은 Dual-domain 매뉴얼을 참조하면 된다.

<< Tasks-> Process Settings >>



그러나 3D mesh의 특성과 3D solver의 특성으로 인하여 몇가지 설정하여야 할 “Advanced options” 들이 존재한다.

<< Tasks-> Process Settings -> Advanced Options -> Solver Parameters -> Edit >>



특히 3D는 관성(Inertia)과 중력(Gravity)을 고려하여 해석을 수행 할 수 있는데, 아래 위치에서 그 옵션들을 선택할 수 있다.

<< Tasks-> Process Settings -> Advanced Options -> Solver Parameters -> Edit -> Solver Parameters >>

■ 관성 효과 (Inertia effect)

: 일반적으로 제품이 얇고 수지의 점도가 높은 경우에는 관성에 의한 수지 유동의 영향은 미약하다. 그러나 제품의 두께가 상당하고 수지의 흐름이 빠른 경우는 그 영향을 무시 할 수 없다.

■ 중력 효과(Gravity effect)

: 일반적으로 제품이 얇고 수지의 점도가 높은 경우에는 중력의 의한 수지 유동의 영향은 미비하다. 그러나 제품의 두께가 상당하고 수지의 흐름이 느린 경우는 그 영향을 무시 할 수 없다.

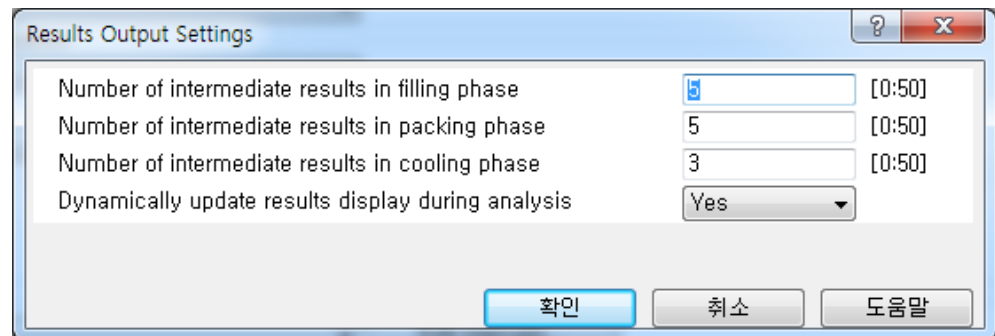
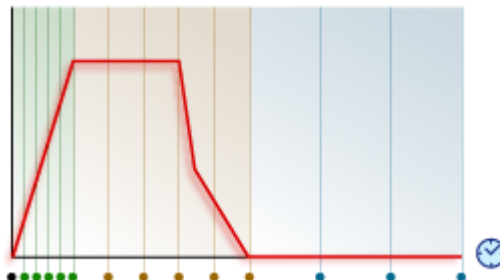
■ 병렬처리(Parallelization)

: CPU와 CPU의 코어가 여러 개 있는 경우 이들을 동시에 사용하여 해석을 수행하는 것을 병렬처리라 한다. 일반적으로 8 thread 를 사용하여 해석하면 Single thread를 사용하는 것에 비하여 해석 시간이 약 50% 단축된다. 일반적으로 Automatic 옵션을 사용하는데, 이것은 프로그램이 CPU 사용량을 확인하여 자동으로 해석에 사용할 Core 수를 결정하고, 매 time step 마다 재확인하여 설정을 변경한다.

■ 중간 결과(Intermediate Results)

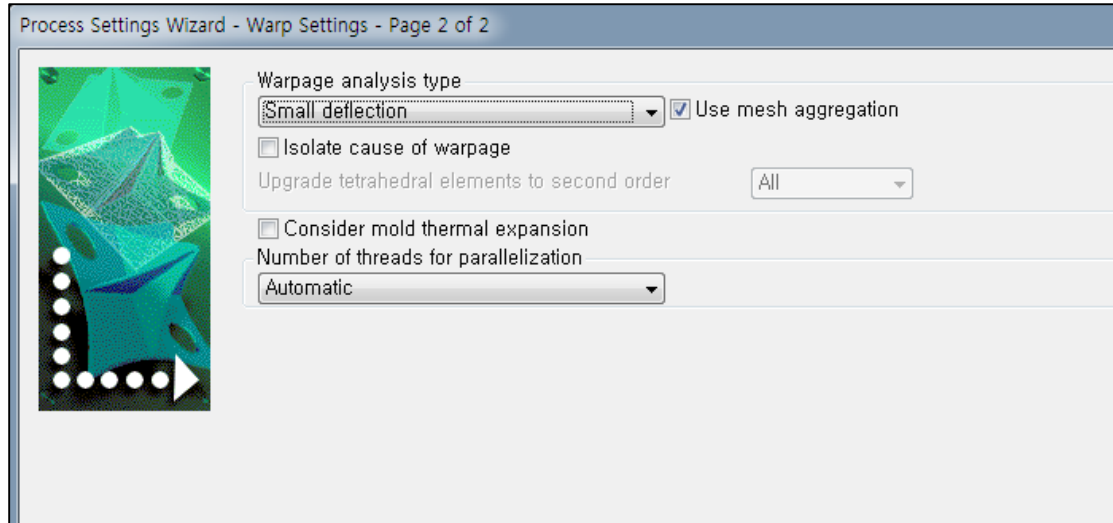
: 중간 결과를 증대하면 더욱 상세한 중간 과정의 결과를 관찰할 수 있다. 하지만 중간 결과 수를 증대하면 해석 결과파일의 용량도 같이 증대한다. 3D mesh 형식의 경우 기본적으로 설정된 수는 충전 공정 5개, 보압 공정 5개,그리고 냉각 공정 3개이다. 참고로 Dual-domain 또는 Midplane의 경우는 그 수가 충전 공정과 보압&냉각 공정이 각각 20으로 설정되어 있다.

<< Tasks-> Process Settings -> Advanced Options -> Solver Parameters -> Edit -> Edit Intervals >>



변형해석 옵션은 아래 그림과 같다.

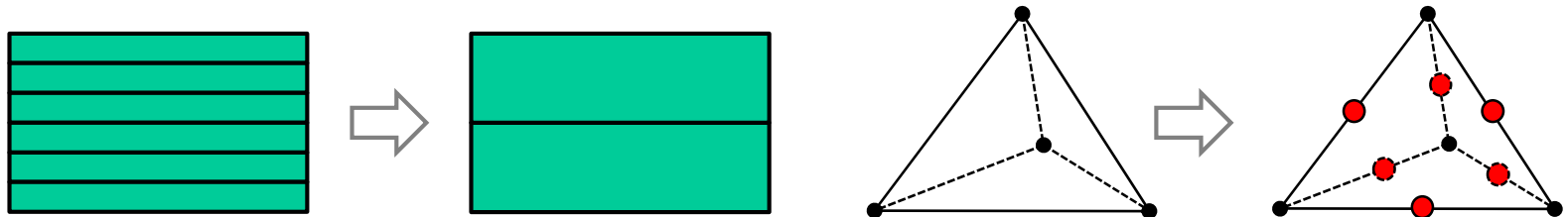
<< Tasks-> Process Settings -> Warp Settings >>



Use mesh aggregation and upgrade tetrahedral elements to second order 옵션

:유동해석을 위하여 생성된 6-layer 이상의 3D mesh를 2-layer로 변경하고 또한 4-node tetrahedral 요소를 10-node로 업그레이드하여 변형 해석을 진행 한다는 옵션이다. 단 판상형상의 제품에만 사용하여야 한다.

2D 해석과 다르게 3D 해석은 변형해석에 상당한 시간이 소요되기 때문에 유동 해석에 사용된 mesh를 2-layer의 mesh로 변경하여 해석하는 것이 해석 속도 측면에서 상당히 유리하다. 그러나 동시에 4-node Tetra mesh를 10-node Tetra mesh로 변경하지 않으면 두께 방향으로 줄어든 node 수에 의하여 유동해석 결과를 mapping에 의하여 충분히 전달 받지 못하게 된다.

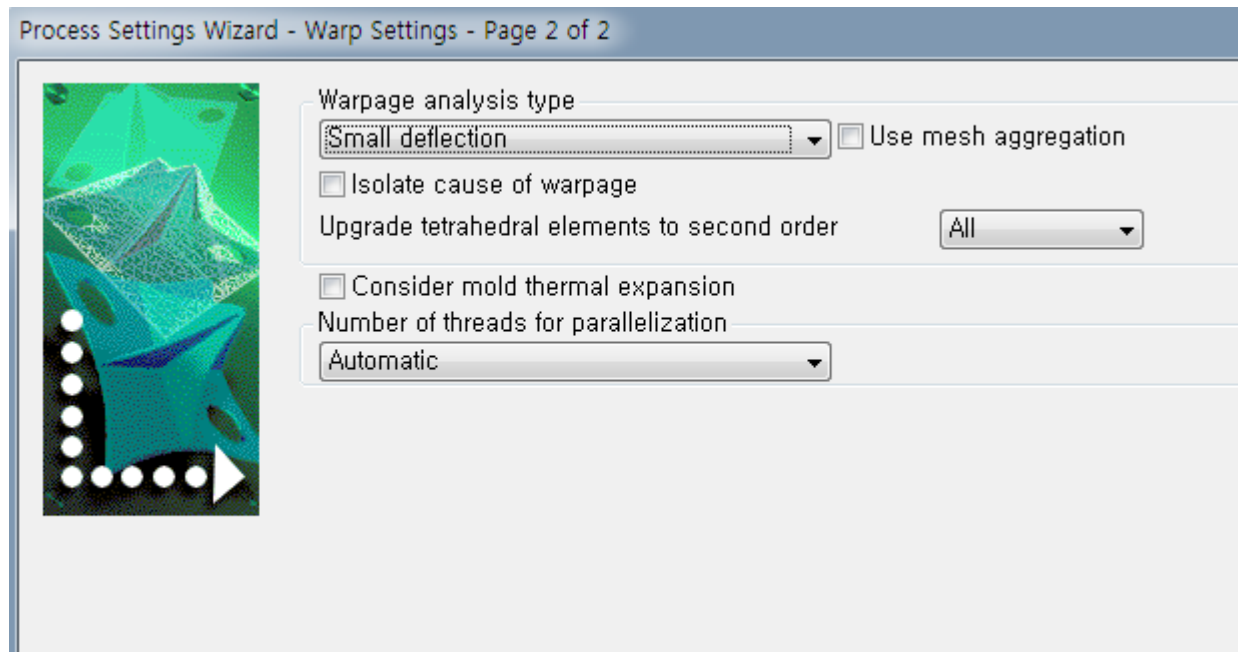


Use mesh aggregation 옵션을 사용하지 않을 경우에는 유동해석에 사용된 mesh를 그대로 사용한다. 이 경우 변형 해석에 소요되는 시간은 약 3배 이상 증가한다.

이 옵션을 사용하지 않을 경우에는 10-node로의 업그레이드를 선택할 수 있는 옵션도 제공된다. 보다 정확한 해석을 위해서는 6 layer를 그대로 사용하면서 10-node Tetra로 업그레이드 하는 것이 유리하다.

또한 “warpage analysis type”이나 “Isolate cause of warpage”는 Dual-domain과 Midplane 과정에서 이미 설명된 부분과 동일한 옵션으로 교재 앞부분을 참조하기 바란다.

<< Tasks-> Process Settings -> Warp Settings -> Advanced options >>



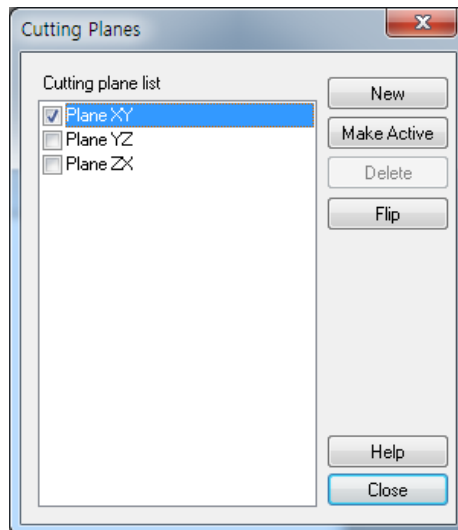
4-3) 3D 해석 결과

3D 해석 결과들의 의미는 Dual-domain과 동일하다. 그러나 해석 결과를 분석하는 방법에서는 많은 차이점이 있다. 2D는 두께 방향이 존재하기 때문에 유동해석 결과 중 “Average velocity”, “Bulk Temperature”, “Volumetric shrinkage” 등의 결과에서와 같이 두께 방향의 평균값을 표시해 줄 수 있다. 그러나 3D의 경우에는 두께 방향이 정의 되지 않으며, 그 3D mesh와 node 들이 각각의 위치에서 이러한 해석 결과들을 나타낸다.

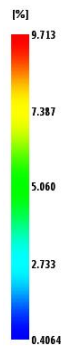
따라서 3D 해석 결과의 분석을 위해서는 “Cutting Planes” 도구를 이용하여 단면 결과를 확인하여야 한다.

(1) Cutting Planes 도구를 이용한 제품 단면 해석 결과 나타내기

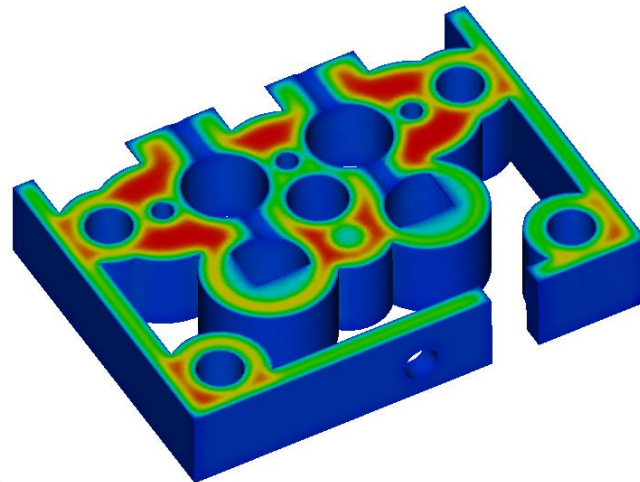
“Cutting Plane” 도구를 실행하여 단면 방향을 선택한다. 그리고 절단된 부분의 반대쪽 결과를 나타내기 위해서는 “Flip” 기능을 사용한다.



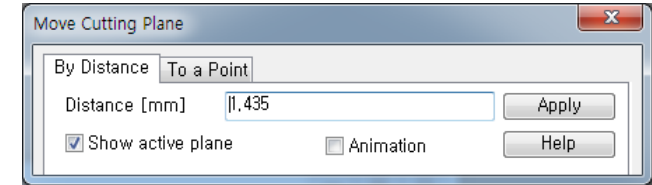
Volumetric shrinkage
Time = 67.0[s]



AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT

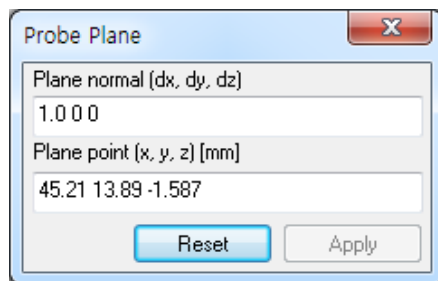
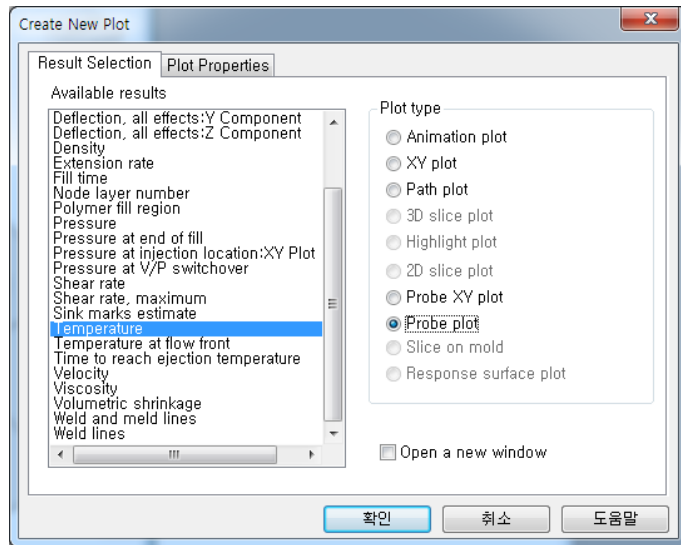


또한 단면의 위치를 변경하기 위해서는 “Move Cutting Plane” 도구를 이용한다. 또한 “Show active plane”와 “Animation” 옵션을 제공한다.

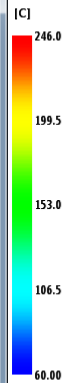


(2) Probe plot 결과

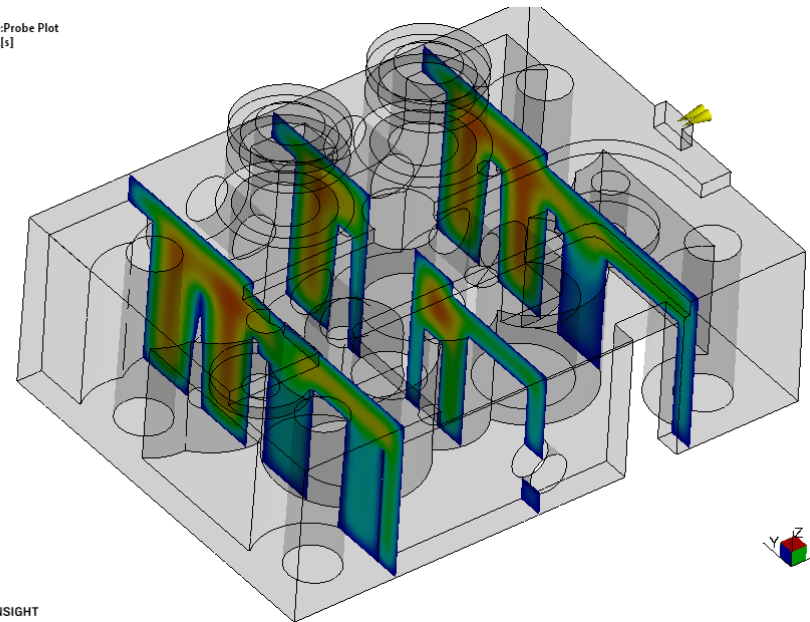
“Cutting Planes” 도구를 이용해서는 여러 단면에 대한 해석 결과를 동시에 표시 할 수 없다. 그러나 “New Plot”에서 “Probe plot” 옵션을 선택하면 해석 결과에서 마우스로 클릭하는 모든 단면에서의 결과를 확인할 수 있다. 또한 단면의 방향을 변경하고 위치를 직접 입력하기 위해서는 “Probe Plane”창을 활용한다.



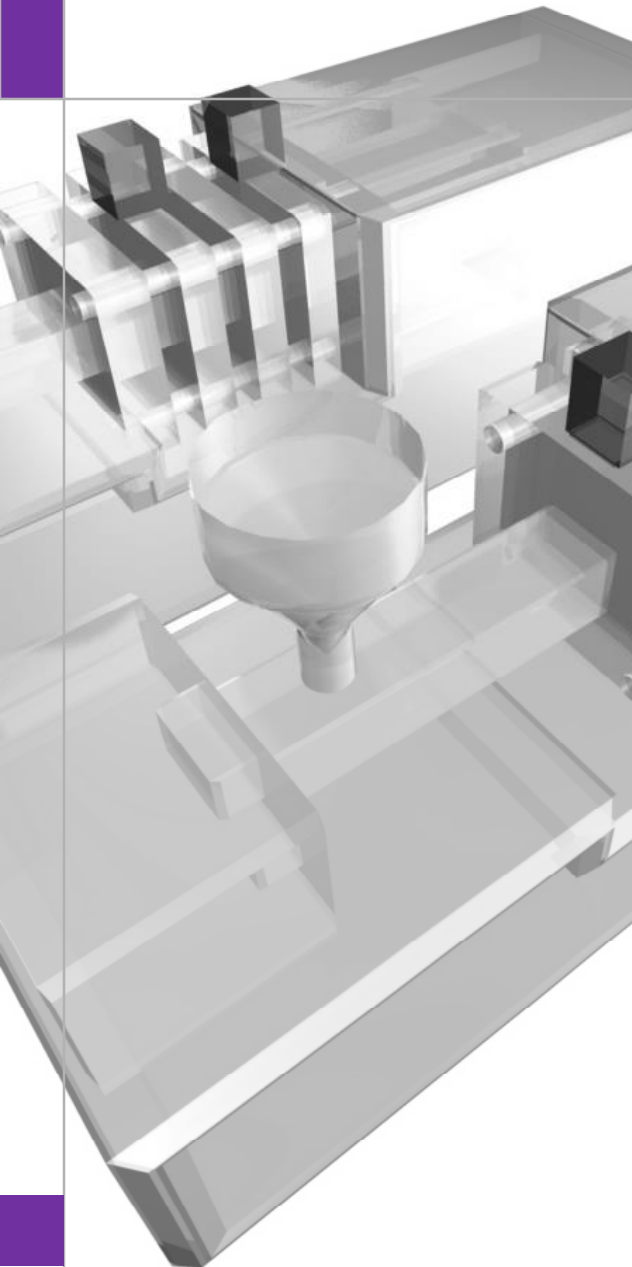
Temperature:Probe Plot
Time = 15.31[s]



AUTODESK
MOLDFLOW INSIGHT



-44
30
24



VI 3D 해석의 응용

1. Runner shear-heating 고려한 해석
2. Insert Molding 해석
3. 2-shot sequential Overmolding
4. Core-shift 해석
5. 3D Gas 해석
6. FEM 냉각해석

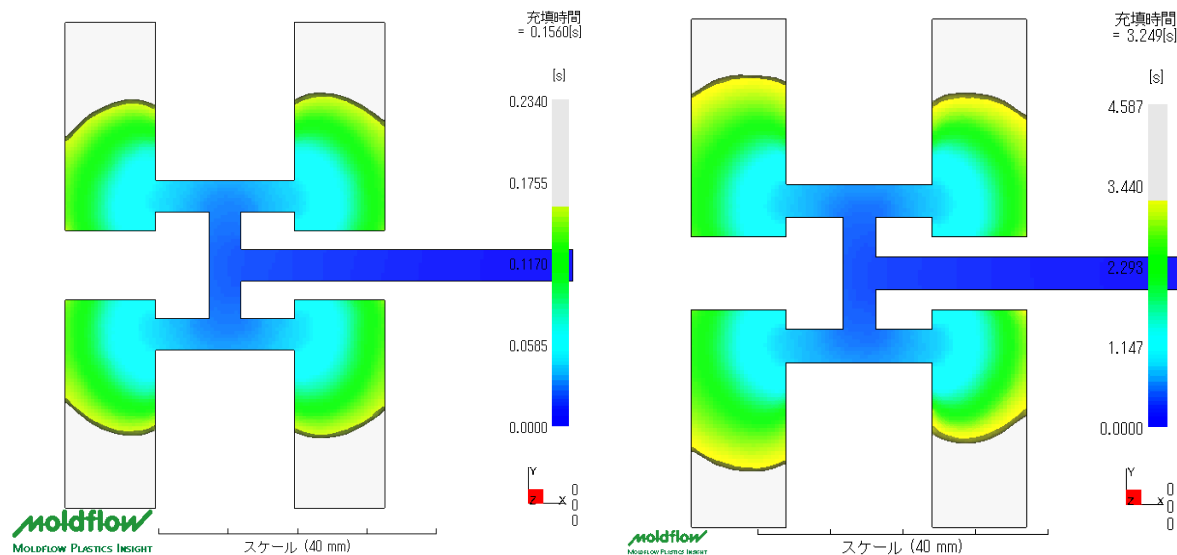
1. Runner shear-heating 고려한 해석

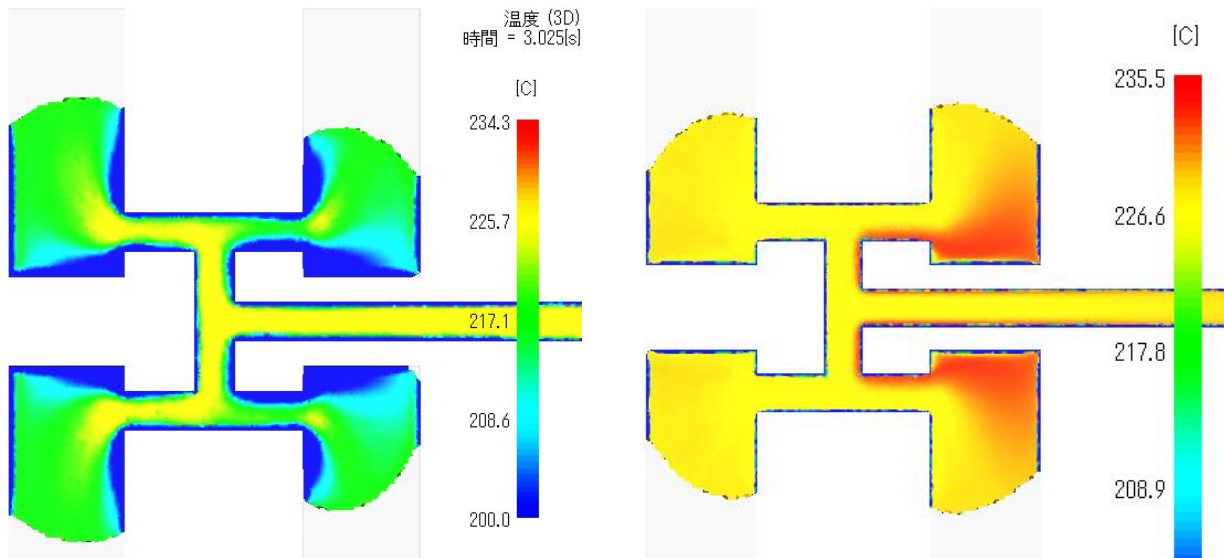
Runner에서의 수지 온도 변화가 제품 충전 양상에 영향을 미치는 경우가 많이 있다. 일반적으로 고속 성형의 경우는 runner shear-heating에 의하여 러너 표면 수지 온도가 중심에 비하여 높아지게 되고, 그 반대의 경우는 오히려 금형으로의 열 손실에 의하여 수지 온도가 낮아지게 된다.

이러한 러너에서의 수지 온도 불균일은 8 캐비티 이상에서는 캐비티 위치에 따른 충전 불균형을 유발하고, 그 이하의 캐비티 수에서는 게이트 구조에 따라 캐비티 내에서의 충전 불균형을 유발할 수 있다.

1-1) Runner shear heating 에 따른 불균형 충전 사례

(1) 8 캐비티 이상에서의 충전 속도에 따른 불균형 충전



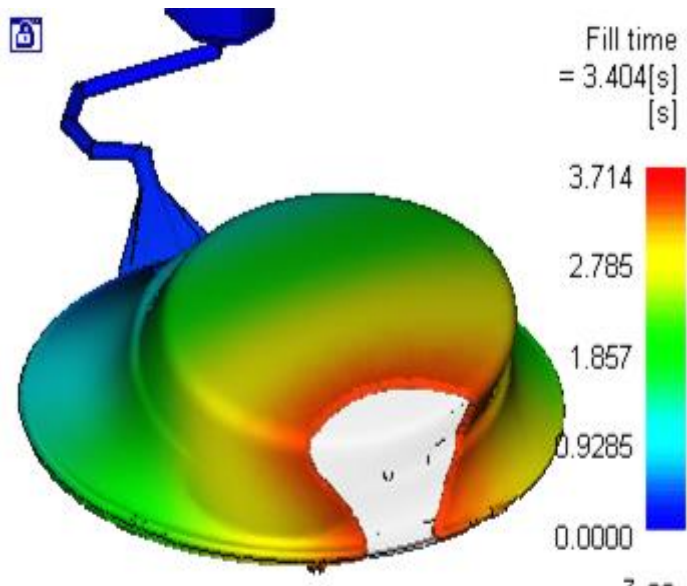
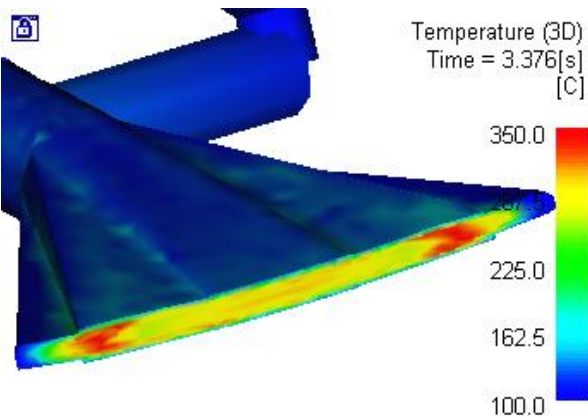
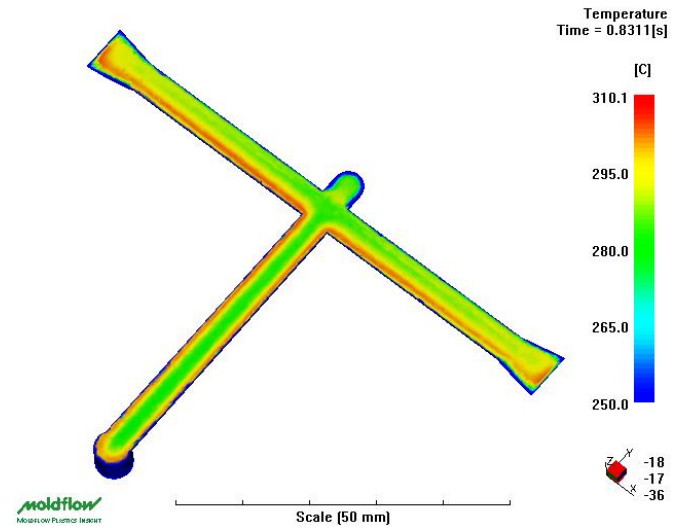
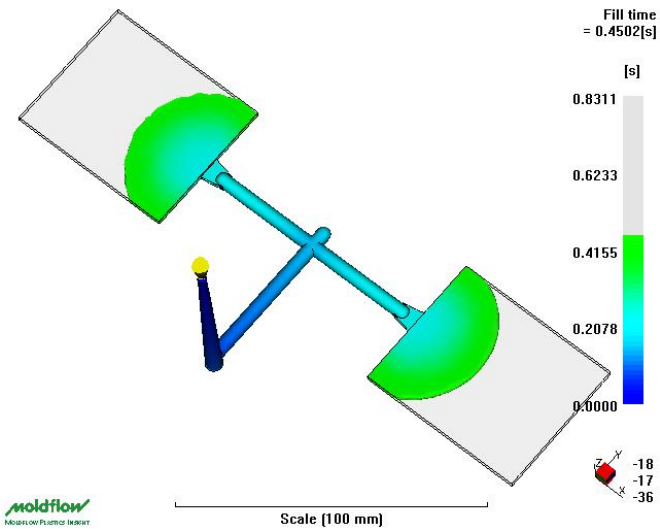


충전속도가 빠른 경우에는 러너 표면 전단발열에 의하여 금형 중심의 4 캐비티가 먼저 충전되고, 충전 속도가 느린 경우에는 러너 표면 열 손실에 의하여 금형 외곽의 4 캐비티가 먼저 충전된다.

이러한 충전 불균형은 많은 경우 러너의 적절한 설계 변경을 통하여 극복할 수 있다.

(2) 8 캐비티 이하에서의 캐비티 내부의 불균형 충전

게이트 구조가 점 형태인 경우에는 큰 문제가 없다. 그러나 게이트가 폭이 넓은 경우에는 러너에서의 온도 불균형을 그대로 상속하게 된다. 이 경우 4 캐비티에서는 위의 그림과 같이 게이트를 중심으로 한쪽 방향의 충전 속도가 빨라지게 되고, 그 이하 캐비티 수에서는 게이트를 중심으로 게이트 외곽 방향의 유동이 게이트 중앙 방향의 유동에 비하여 빨라져서 예상치 못한 에어트랩이 발생할 수 있다.

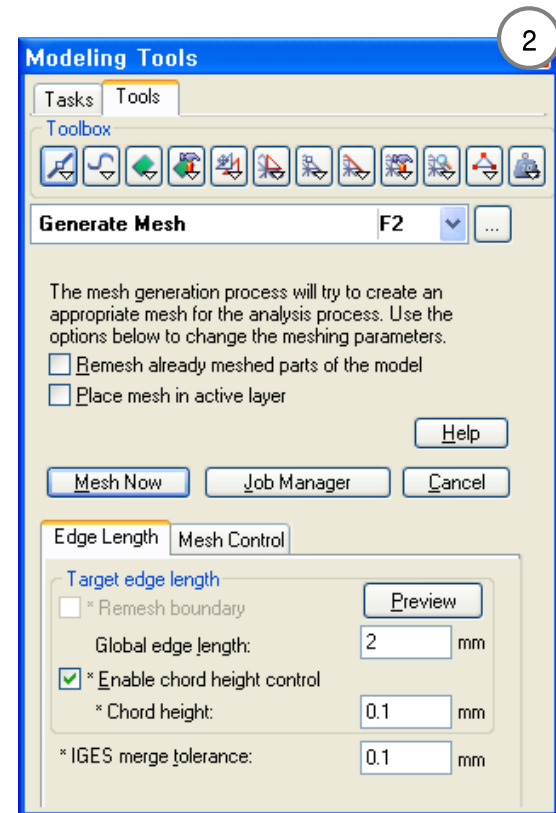
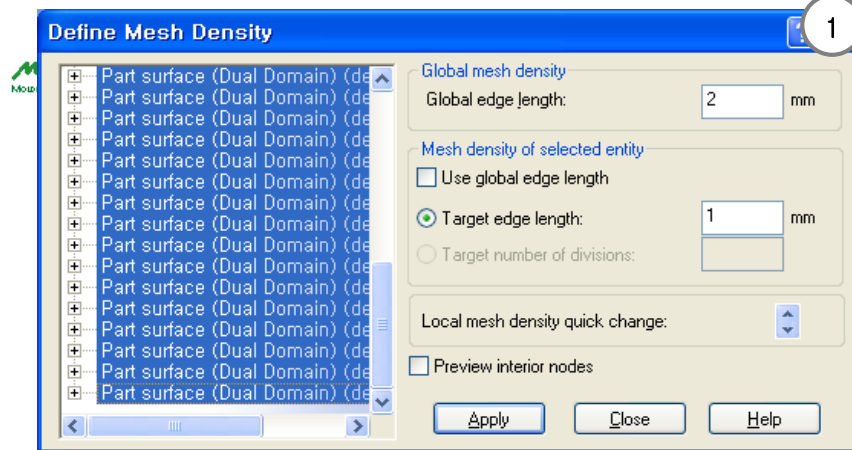
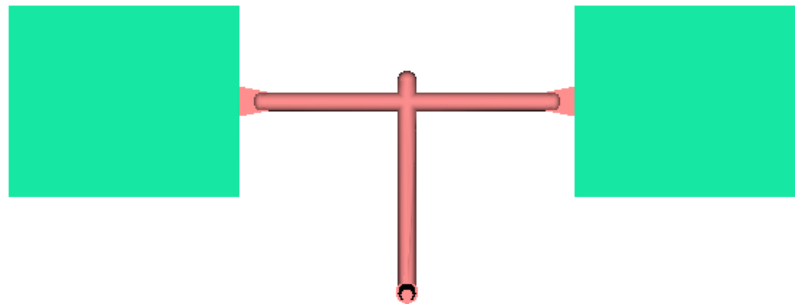


1-2) 해석 절차

(1) 2D mesh 생성

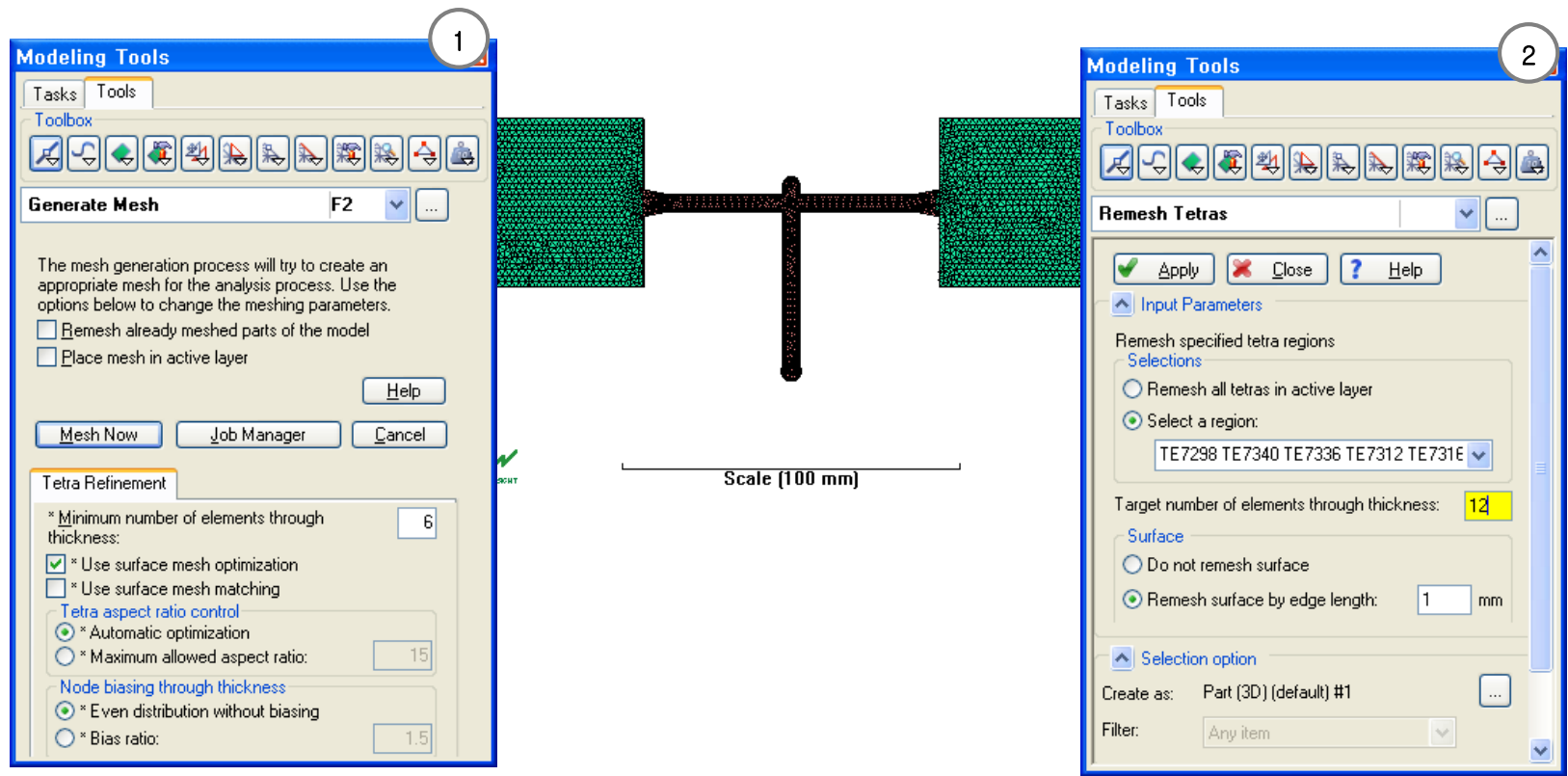
러너에서의 두께 위치에 따른 온도를 정확히 계산하기 위해서는 러너의 두께 방향 3D mesh 수를 제품에 비하여 증가시켜야 한다. 따라서 조밀한 3D mesh를 위해서는 우선 2D mesh의 에지 길이를 적절히 조절할 필요가 있다.

따라서 “Define Mesh Density” 옵션을 이용하여 runner 부분의 mesh edge length를 적절히 미리 지정하고, 그 이후에 전체 모델에 대한 edge length를 지정하고 meshing을 하는 것이 필요하다.



(2) 3D mesh 생성

먼저 “Mesh Type”을 3D 변경하고, “Mesh Generation” 옵션에서 제품을 고려한 적절한 layer 수를 지정하고, 러너 형상을 고려하여 “Use surface mesh matching” 옵션을 사용하지 않고 3D mesh를 생성한다. 그 이후에 “Mesh Tools”의 “Remesh Tetras” 도구를 이용하여 러너 부분의 layer수를 증가 시킨다. 러너의 layer 수는 최소 10 이상으로 하여야 runner shear-heating 효과를 확인 할 수 있다.

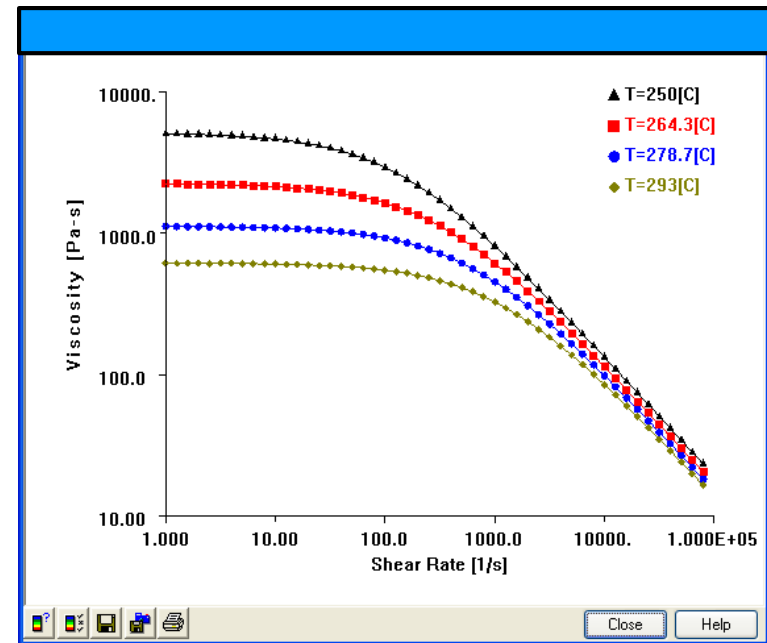
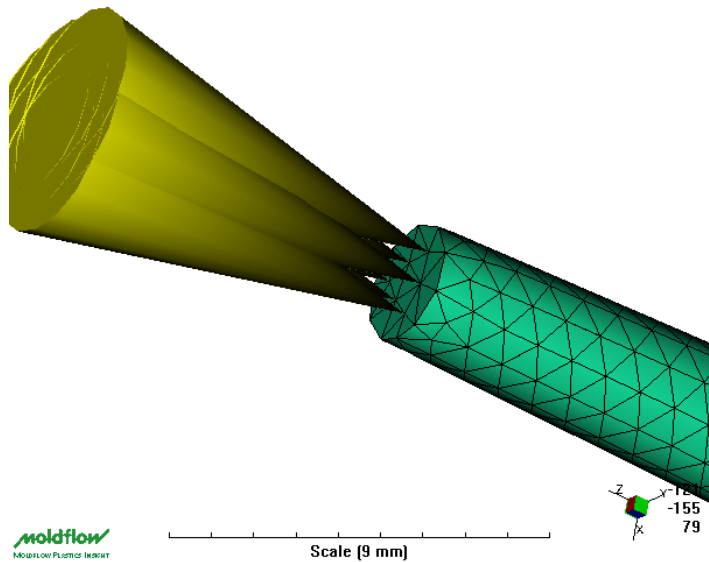


(3) Injection location 설정, 수지 선택 및 공정조건 입력

Injection location은 아래 그림과 같이 스프루 상단의 모든 node에 설정하여야 한다.

그리고 수지는 온도에 따라서 점도가 민감하게 변하는 것일 수로 shear-heating 효과가 강하게 나타난다.

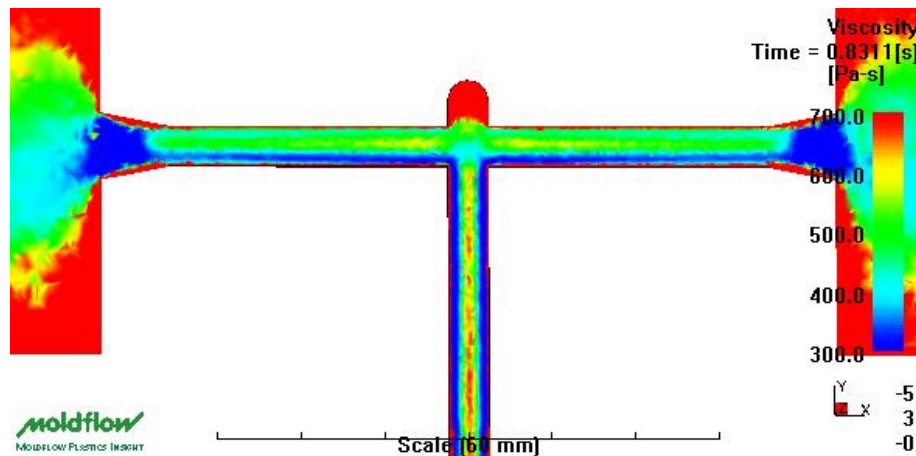
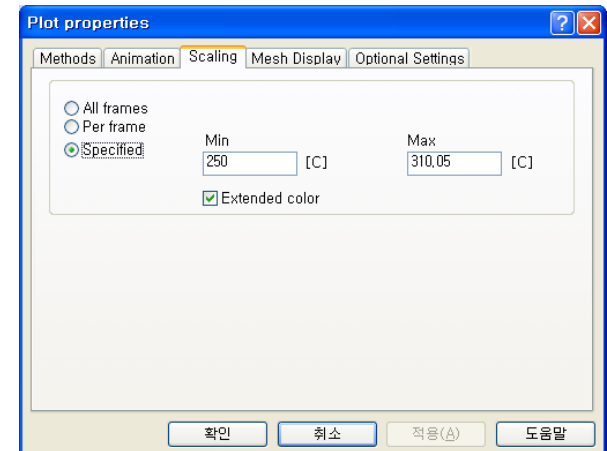
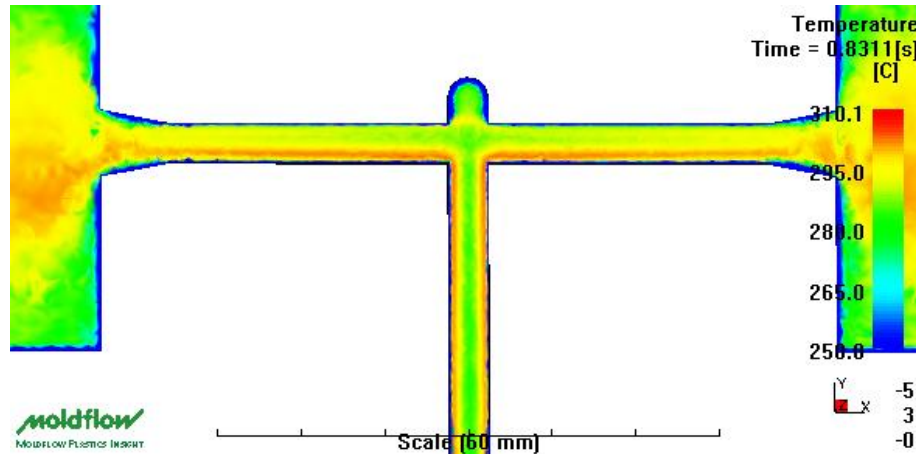
또한 공정 조건은 설정에서 사출속도가 빠를 수록 shear-heating 효과가 크게 나타난다.



(4) Runner 단면 해석 결과 분석

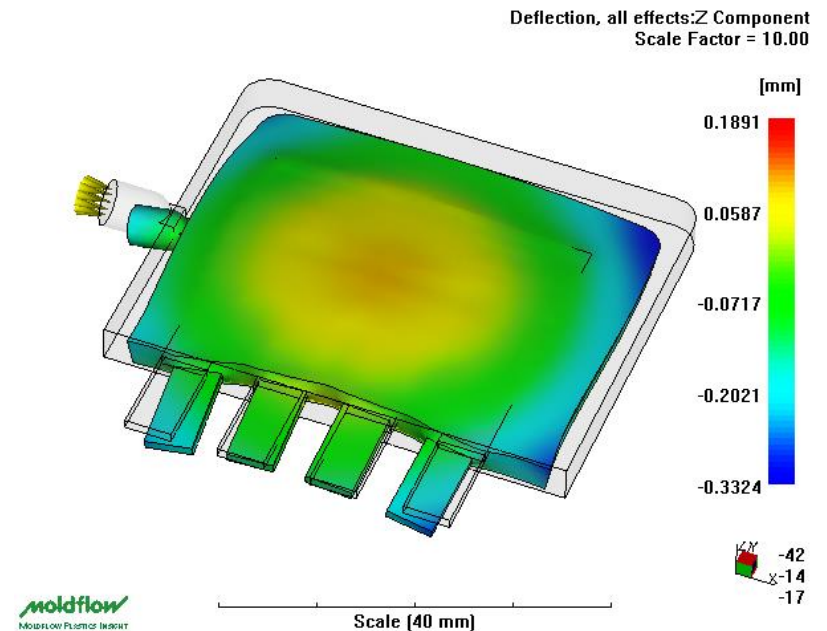
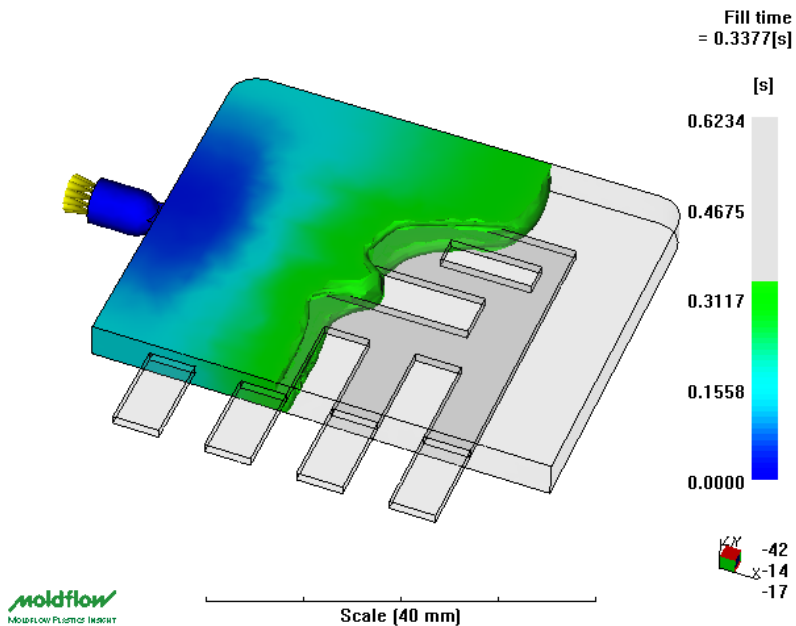
“Cutting Planes” 도구를 이용하여 러너 중앙의 위치를 절단하여 “Temperature” 결과 또는 “Viscosity” 결과를 확인한다.

단 결과를 표시할 때 “Plot Properties”에서 “Scaling” 탭을 선택하여 그 표시 범위를 한정하는 것이 효과적이다.



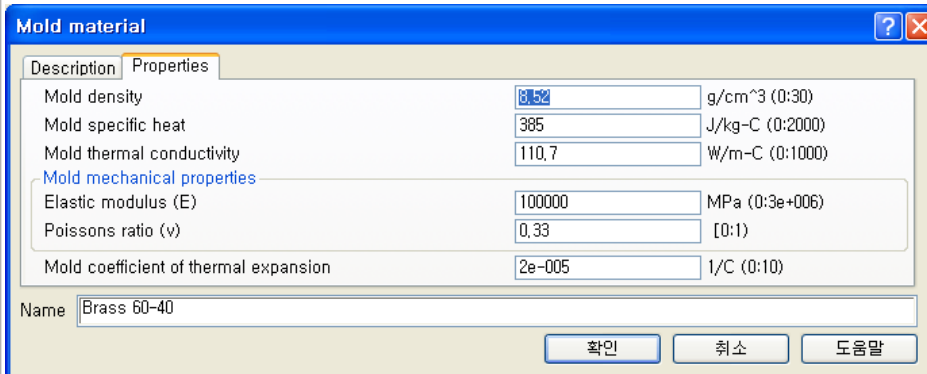
2. Insert Molding 해석

기능적인 측면과 구조적인 측면에서 금형 내부에 인서트를 삽입하고 성형하는 경우가 점차 많아지고 있다. 인서트의 종류는 금속, 플라스틱, 유리 등으로 다양한데, 이러한 인서트 성형에서 문제가 되는 점은 크게 두 가지로 볼 수 있다. 첫 번째는 수축하는 제품과 수축하지 않는 인서트의 수축률 편차에 의한 변형이고, 두 번째는 수지 유동에 의하여 인서트에 균일한 압력이 가해지지 않아서 생기는 인서트의 변형이다. 첫 번째 경우는 “Insert Molding 해석”을 통하여, 두 번째 경우는 “Core-Shift 해석”을 통하여 해결 가능하다.



2-1) 인서트의 물성

인서트는 성형시 열적, 구조적으로 해석 결과에 영향을 미치기 때문에 이러한 인서트의 영향을 고려한 해석을 위해서는 인서트의 열적 물성과 기계적 물성이 요구된다. 기본적으로 AMI에서는 수지물성 BD와 금형물성 DB를 가지고 있으므로 이것을 이용하여 플라스틱과 금속의 인서트 물성으로 사용할 수 있다. 또한 DB에 존재하지 않는 재질을 인서트로 사용할 경우에는 “New Database” 도구를 이용하여 사용자 물성을 생성 할 수도 있다.



Mold material

Description Properties

Mold density 8.5 g/cm³ (0:30)

Mold specific heat 385 J/kg-C (0:2000)

Mold thermal conductivity 110.7 W/m-C (0:1000)

Mold mechanical properties

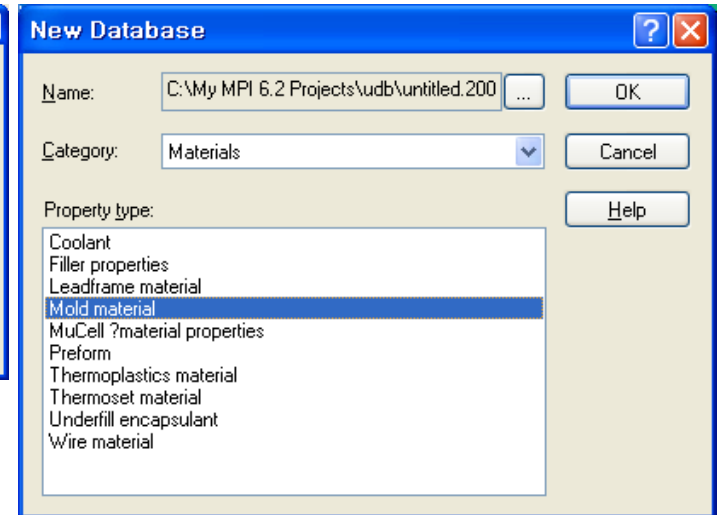
Elastic modulus (E) 100000 MPa (0:3e+006)

Poissons ratio (ν) 0.33 [0:1]

Mold coefficient of thermal expansion 2e-005 1/C (0:10)

Name Brass 60-40

확인 취소 도움말



New Database

Name: C:\My MPI 6.2 Projects\udb\untitled.200 ... OK

Category: Materials Cancel

Property type: Help

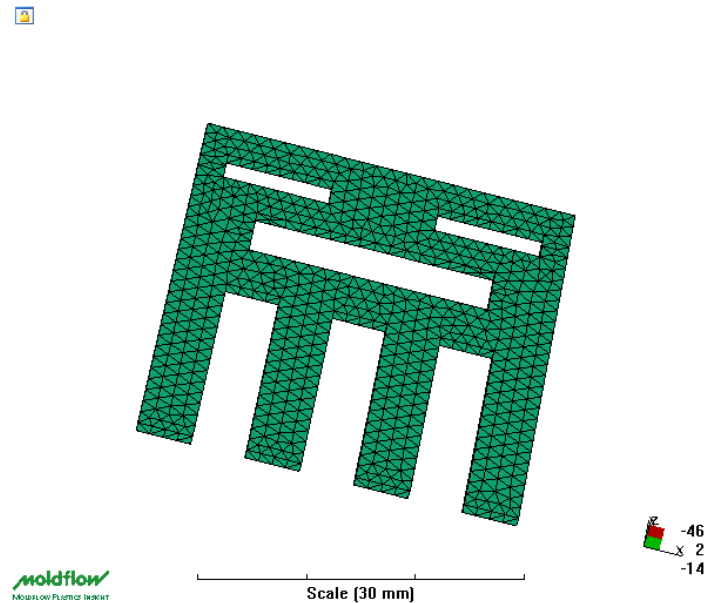
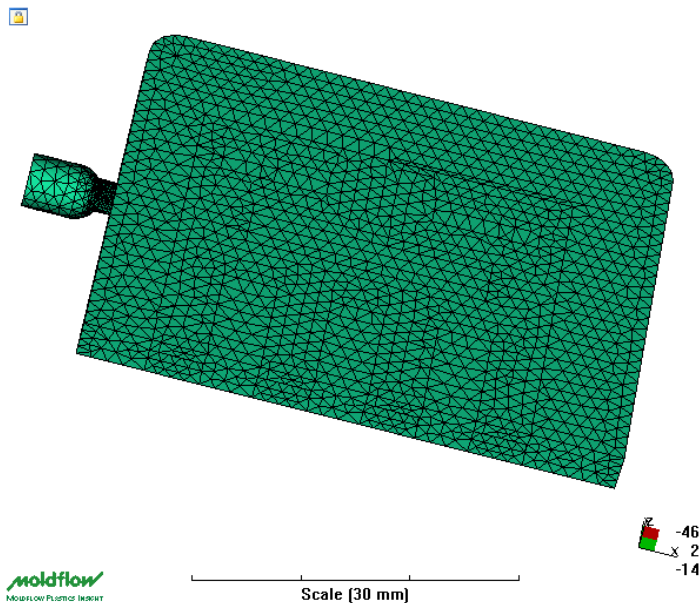
- Coolant
- Filler properties
- Leadframe material
- Mold material**
- MuCell ?material properties
- Preform
- Thermoplastics material
- Thermoset material
- Underfill encapsulant
- Wire material

2-2) 해석 절차

(1) 2D mesh 생성

제품과 인서트 각각에 대하여 2D mesh를 먼저 생성하고, 다시 각각에 대하여 3D mesh를 생성 한다. 그리고 마지막에 이 두 모델의 mesh를 합하여 Insert molding 해석을 수행하게 된다.

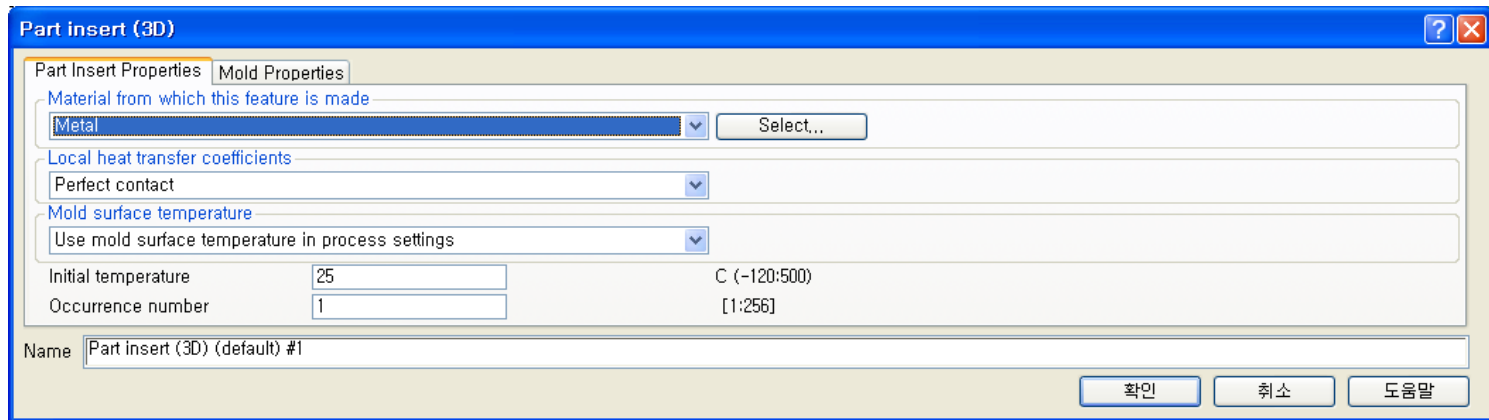
그런데 문제는 두 mesh 사이의 경계 처리 부분이 문제가 되는 경우가 발생한다. 즉 두 모델의 mesh가 각각 처리가 되면 mesh 처리가 되면 일정 부분에서는 서로의 mesh가 겹치는 문제가 발생할 수 있고 그 정도에 따라서 변형해석 수행이 불가능한 경우도 발생한다. 이러한 경우 해결 방법으로는 서로 접하는 부분의 mesh를 공유하는 방법이 있으며, 다른 방법으로는 제품과 인서트를 어셈블리로 만들고, 이를 MDL을 통하여 meshing을 하게 되면 완벽히 경계가 일치하는 mesh를 얻을 수 있다.



(2) 3D mesh 생성 및 속성 변경

제품과 인서트 각각에 대하여 3D mesh를 생성한다. 물론 모델이 어셈블리인 경우에는 2D meshing 없이 MDL을 통하여 제품과 인서트에 대한 다이렉트 3D meshing도 가능하다.

그리고 인서트의 경우는 3D mesh 생성시 인서트 두께에 따라 다르지만 모델이 얇은 경우에는 4-layer로 설정하여도 충분하다. 또한 3D mesh 생성 후에는 속성을 “Part Insert”로 변경하고, 다시 그 인서트의 물성을 선택하고 기타 옵션을 지정하여야 한다.



– Material from which this feature is made:

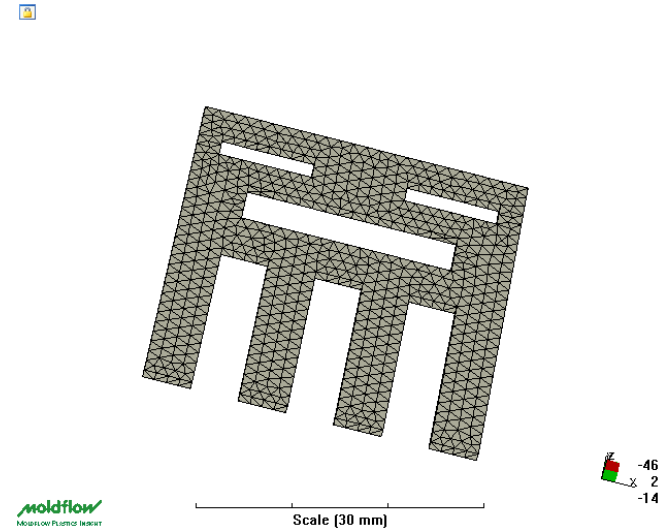
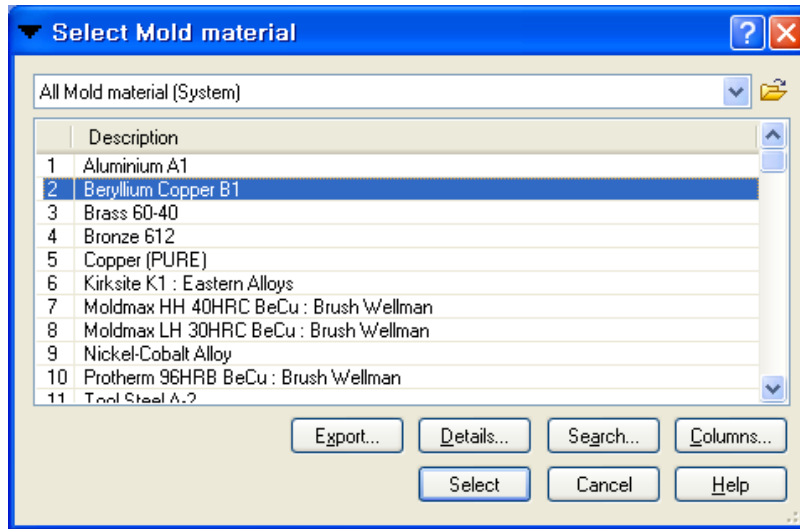
인서트의 재질을 선택하는 곳으로 “Metal”을 선택하면 금형물성 DB가 열리고 “Polymer”를 선택하면 수지물성 DB가 열린다. 인서트에 해당하는 물성을 선택한다.

– Local heat transfer coefficients:

인서트와 금형 계면이 접하는 부분의 열전도 계수를 정의하기 위한 옵션이다. 여기서 제품과 접하는 부분은 예외이다.

- Initial temperature:

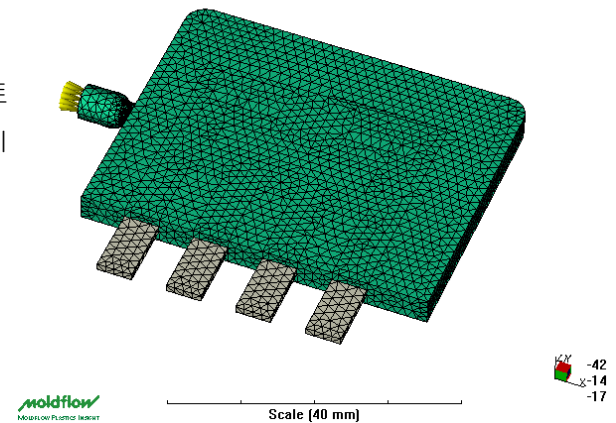
인서트의 초기 온도를 입력한다. 인서트는 성형시에 외부에서 삽입되기 때문에 금형 온도와는 차이가 있고, 이것은 수지 온도 계산에 영향을 미친다.



(3) 제품 모델과 인서트 모델 결합

제품 3D 모델을 열고 “Add” 명령어를 이용하여 저장된 3D 인서트 모델의 .sdy 파일을 불러드리면 우측 그림과 같이 완성된 해석모델이 만들어진다.

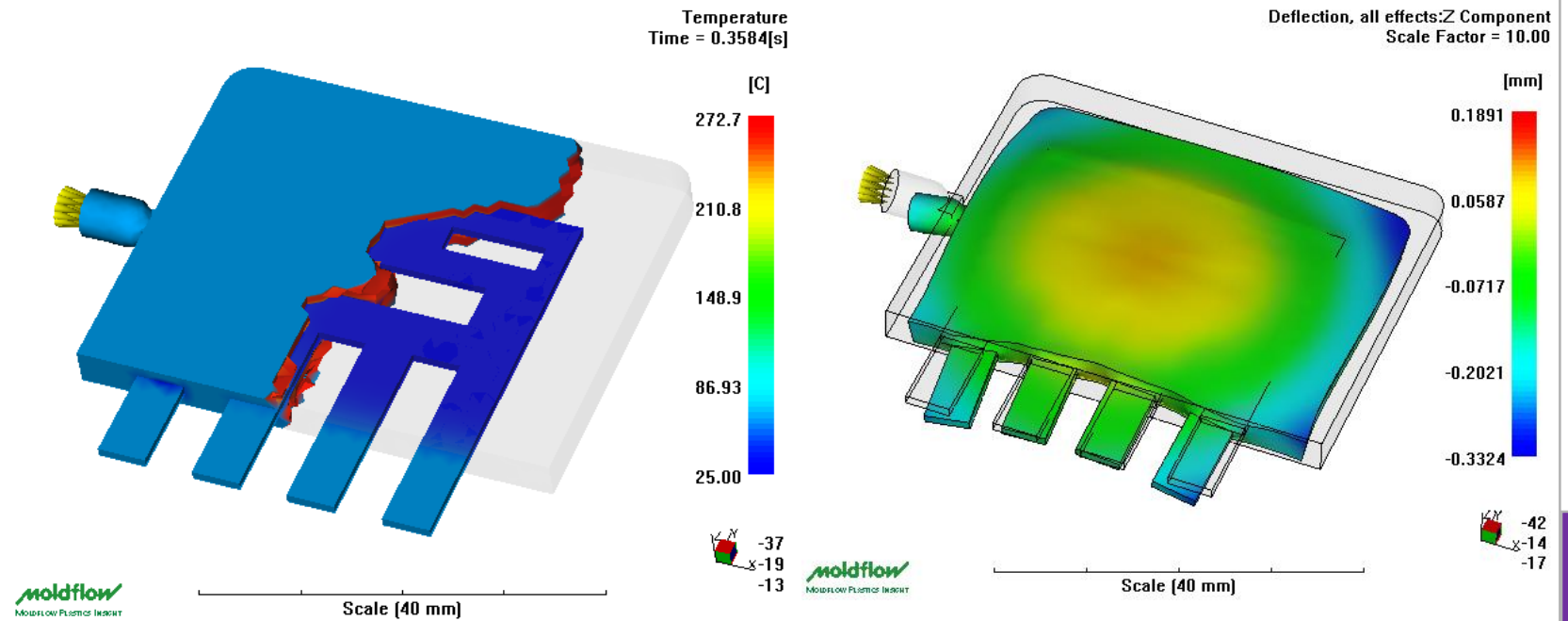
나머지 해석 입력 조건들은 일반적인 3D 해석과 동일하다.



2-3) 해석 결과

Insert Molding 해석은 인서트에 의한 수지의 온도 결과와 변형 결과 등에 영향을 미친다.

수지의 온도는 설정된 금형 온도와 인서트의 초기 온도 등에 영향을 받는다. 또한 제품의 변형은 수축하지 않는 인서트와 수축 편차가 큰 제품 사이의 역학 관계에 의하여 제품 전체의 변형이 결정된다.



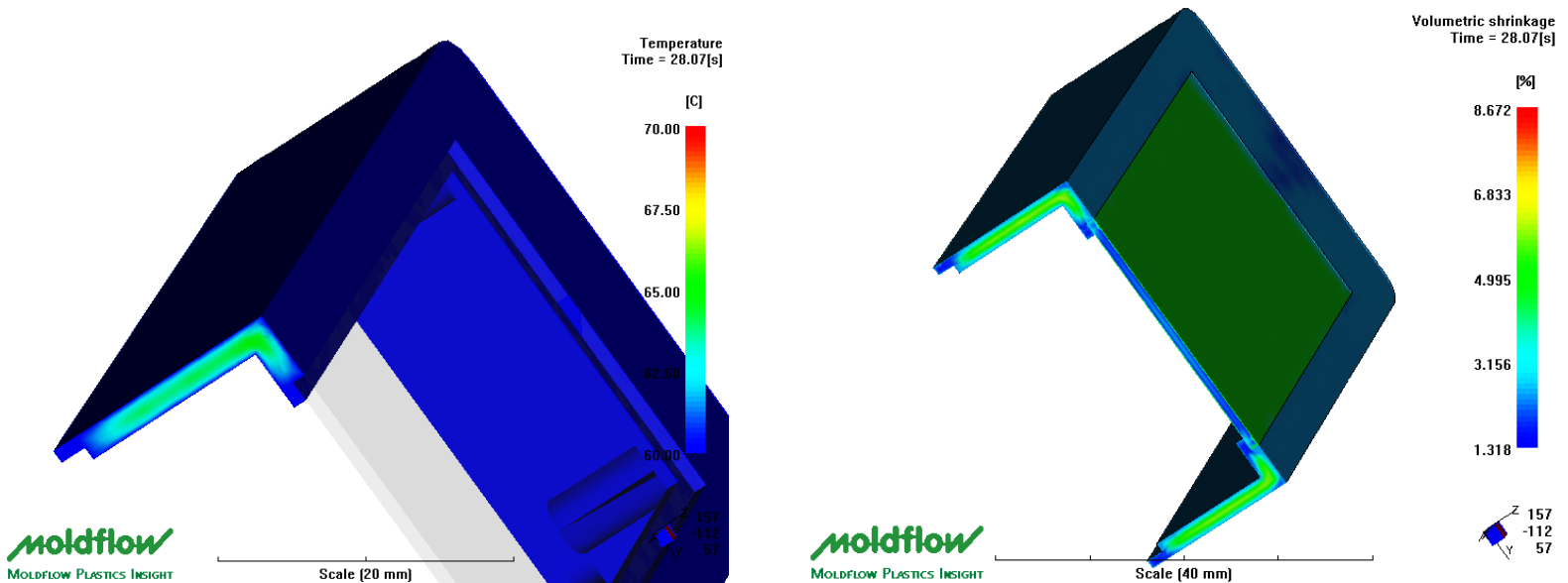
3. 2-shot sequential Overmolding

2-shot sequential overmolding 해석은 베럴이 두 개인 회전금형 사출성형기를 이용하여 성형할 때 나타내는 문제점들을 해결하기 위하여 수행한다. 1차 성형은 일반 성형과 동일한 조건이지만 2차 성형은 1차 성형품이 인서트로 삽입된 상태에서 진행되기 때문에 1차 성형품의 결과가 2차 성형품의 해석 결과에 영향을 미친다.

3-1) 1차 성형품의 영향

1차 성형품은 완전히 상온까지 냉각된 상태가 아니라 사이클이 종료된 시점 이므로, 2차 성형의 인서트로 삽입될 때 상당한 온도를 유지한다. 따라서 2차 수지 온도는 금형과 접하는 부분과 인서트와 접하는 부분에 상당한 차이를 나타낸다. 특히 인서트와 접하는 부분은 금형 온도가 균일하여도 낮은 인서트의 열전도도에 의하여 두께 방향의 큰 수축률 편차를 유발한다.

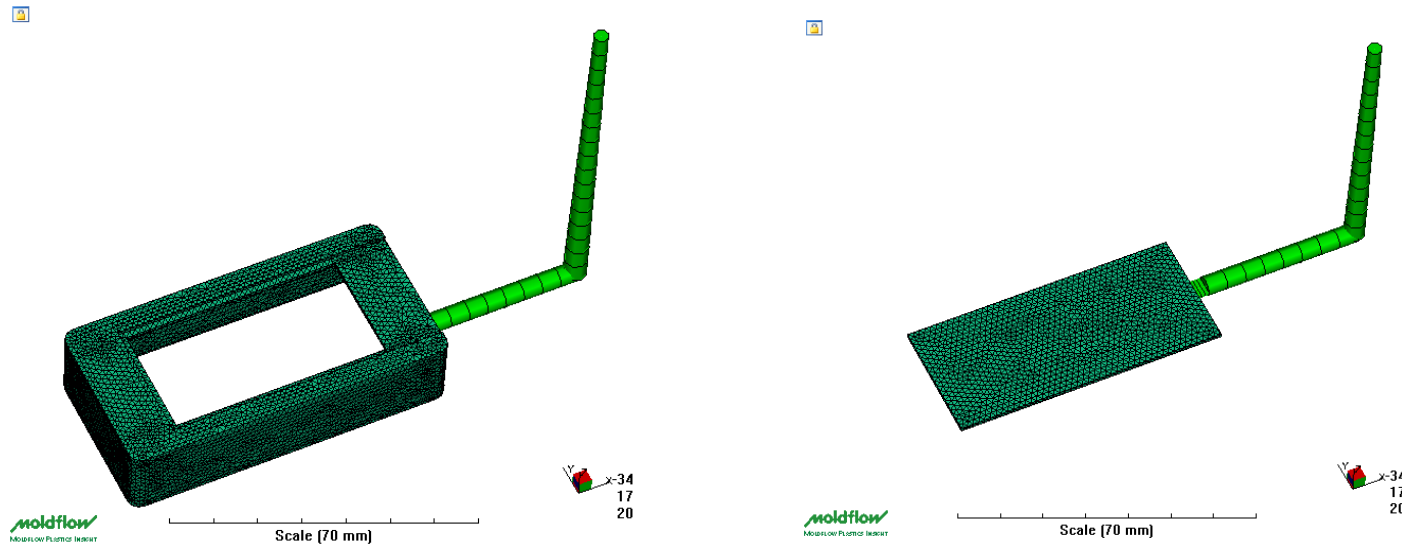
또한 1차 성형품과 2차 성형품이 하나의 제품으로 만들어 지기 때문에 각각 성형품의 수축률이 제품 전체의 변형에 영향을 미친다.



3-2) 해석 절차

(1) 2D mesh 생성

1차 성형품 모델과 2차 성형품 모델에 대하여 각각 2D mesh를 생성한다. 물론 러너설계는 2D 단계에서 진행하는 것이 편리하다. 그 이후에 각각의 모델에 대하여 3D mesh를 생성하고 두 모델을 결합하여 최종 해석 모델을 완성한다. 따라서 두 모델의 좌표는 일치하도록 관리하여야 한다.



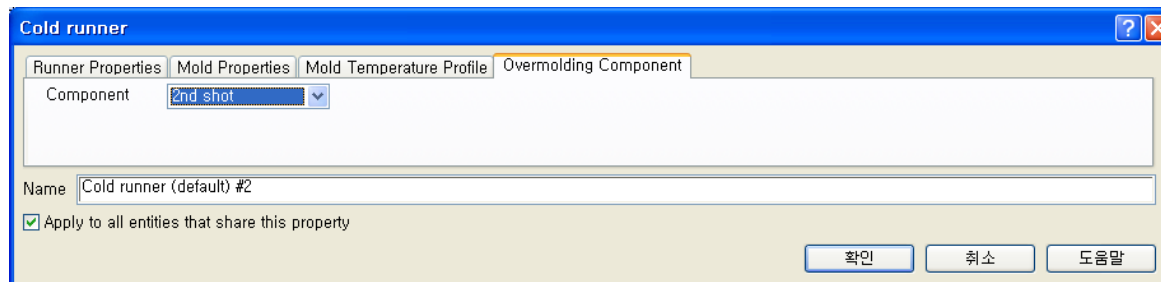
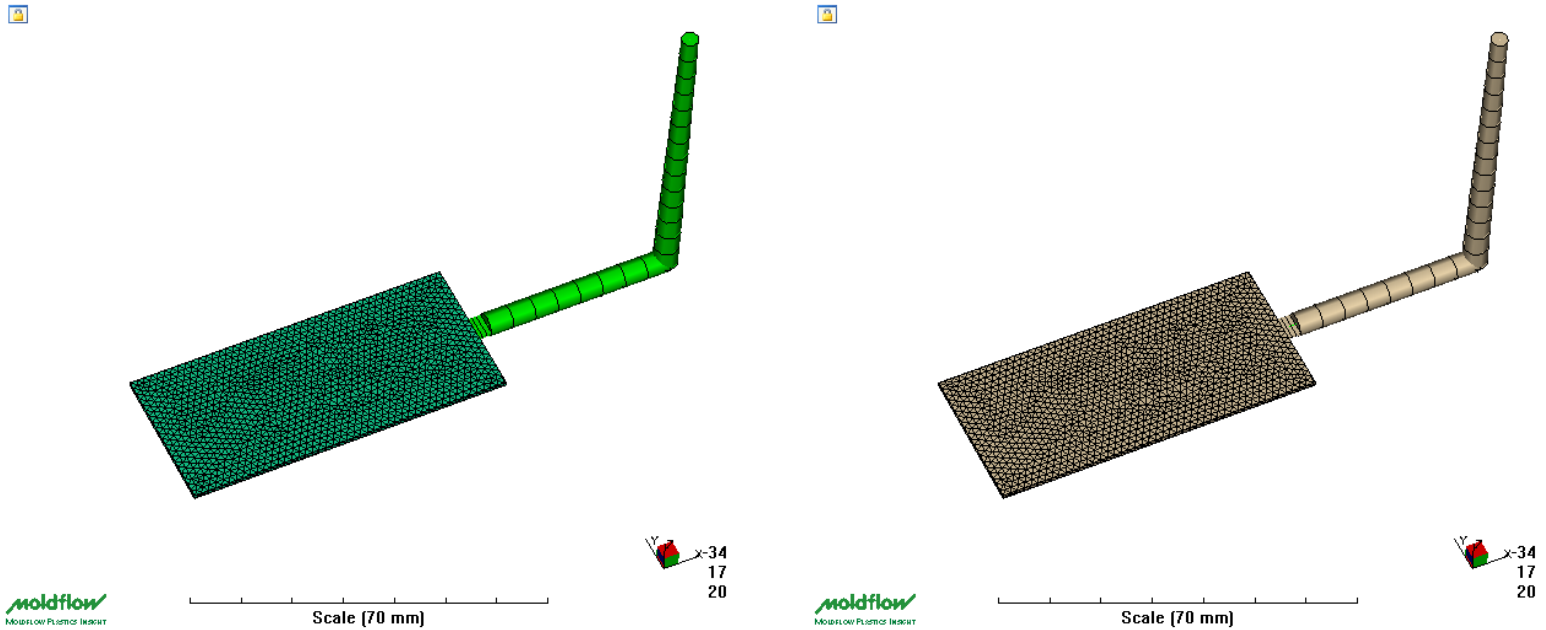
(2) 3D mesh 생성 해석 공정 변경

1차 성형품 모델과 2차 성형품 모델에 대하여 각각 다시 3D mesh를 생성한다. 2-shot sequential overmolding 해석을 위한 성형 공정을 각각 “Thermoplastic Overmolding”으로 변경한다. 반드시 변경하여야 2차 성형에 대한 수지 선택, Injection location 지정 그리고 공정조건 설정 등이 가능하다.

<< Analysis -> Set Molding Process -> Thermoplastic Overmolding >>

(3) 2차 성형 모델 속성 변경

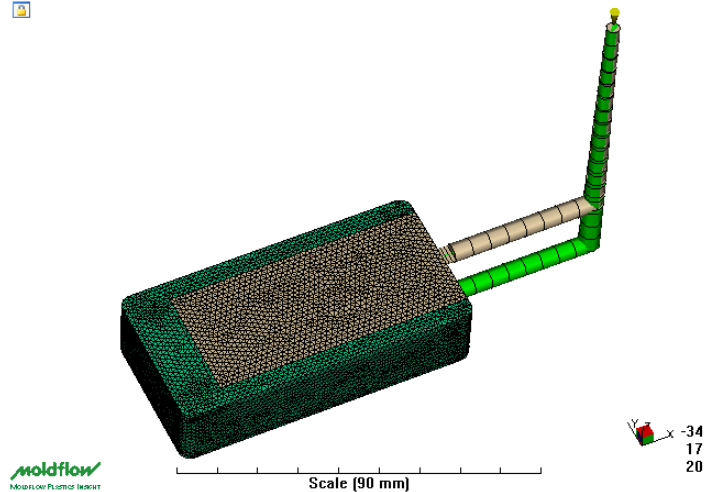
2차 성형 모델의 제품 3D mesh는 “Overmolding second component(3D)”로 속성을 변경하고 러너 시스템은 속성의 “Overmolding Component” 탭에서 각각 “2nd Shot”로 변경한다.



(4) 모델의 합병 및 해석 조건 설정

1차 성형 모델에서 “Add” 명령어를 이용하여 2차 성형 모델의 .sdy 파일을 합병한다. 러너 시스템이 겹치는 경우가 발생하지만 해석에는 문제가 없다.

“Analysis sequence”는 “Fill + Pack + Overmolding Fill + Pack + Warp”로 변경하고, 1차 성형 2차 성형을 위한 각각의 수지 선택, Injection Location 지정 그리고 공정 조건 설정을 수행한다.



- Study Tasks : box_model_3d_2shot
- ✓ Part (box_model.udm)
 - ✓ 3DMesh (225361 elements)
 - ✓ Fill + Pack + Overmolding Fill + Overmolding Pack + Warp
 - ✓ Generic ABS (Stylac ABS 121): Generic Shrinkage Characterised Material
 - ✓ Generic PC (Lexan): Generic Shrinkage Characterised Material
 - ✓ 1 Injection Location(s)
 - ✓ 1 Overmolding Injection Location(s)
 - ✓ Process Settings (User)
 - ✓ Analysis Complete!

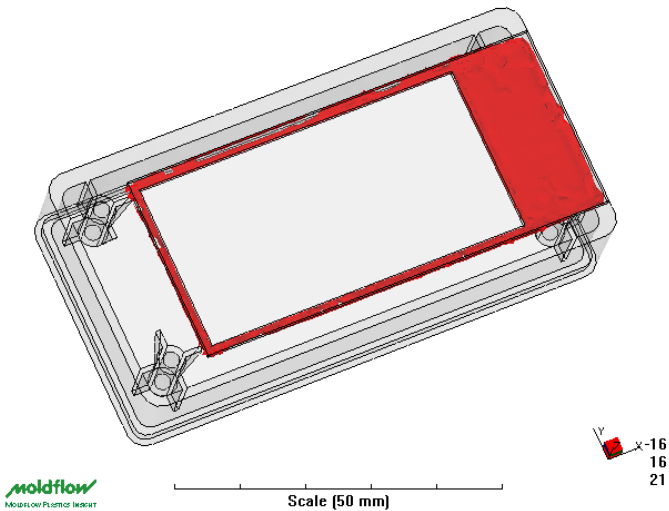
3-3) 해석 결과

2-shot sequential overmolding 해석은 수지의 re-melt zone과 변형 등의 결과를 제공한다.

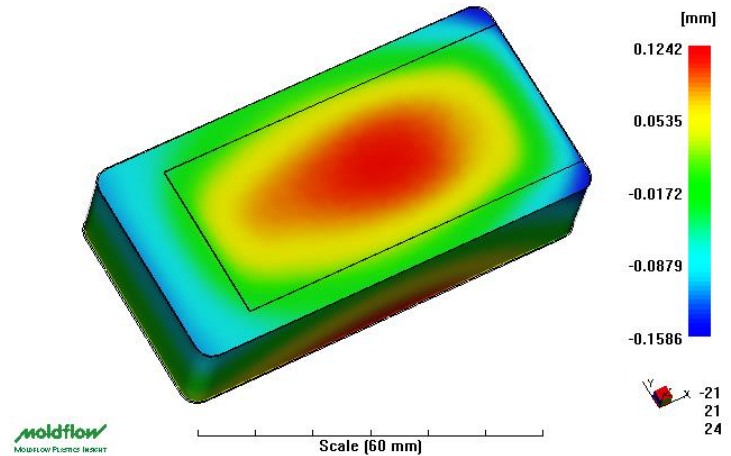
2차 유동에 의하여 1차 성형품의 표면이 re-melt 되는 경우가 발생한다. Re-melt는 두 제품의 결합력을 증가시키는 긍정적인 요인이 있지만, 1차 성형품의 외관이 변형되거나 2차 성형품 표면에 re-melt된 1차 수지에 의한 착색이 발생할 수 있다.

또한 각각의 성형품 자체의 수축률 편차와 두 제품 결합에 의한 수축률 편차가 합해져서 더 큰 제품 변형이 유발될 수 있다. 이것은 두 성형품의 수지 PVT 특성, 제품 두께, 게이트 위치 등이 다르기 때문이다.

Re-melt zone, overmolded components (overmolding)



Deflection, all effects:Z Component
Scale Factor = 1.000



4. Core-shift 해석

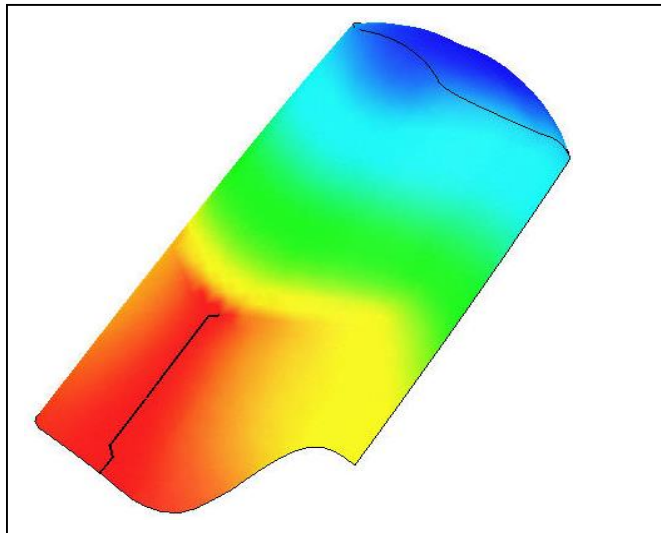
금형의 일부 또는 전체가 수지 압력에 의하여 변형이 되고, 이러한 변형은 제품 두께를 불균일하게 하여 제품 미성형과 코어 파손 등을 유발한다. 따라서 성형시의 예상되는 코어의 변형을 미리 예측하여 해결 방안을 수립하여야 한다.

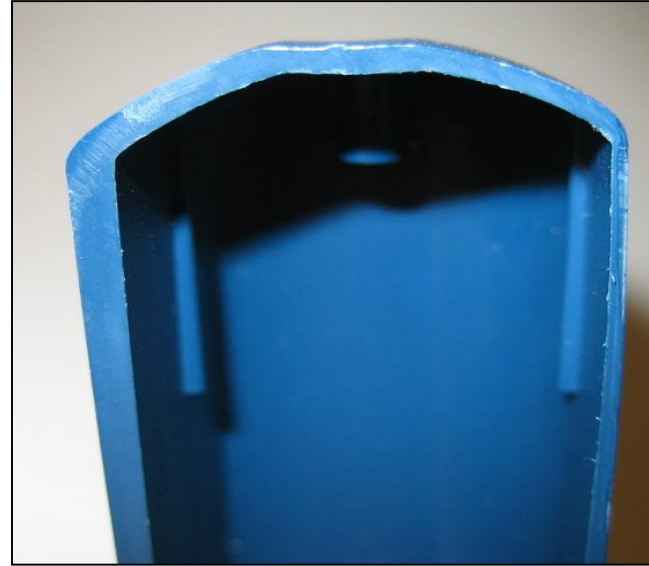
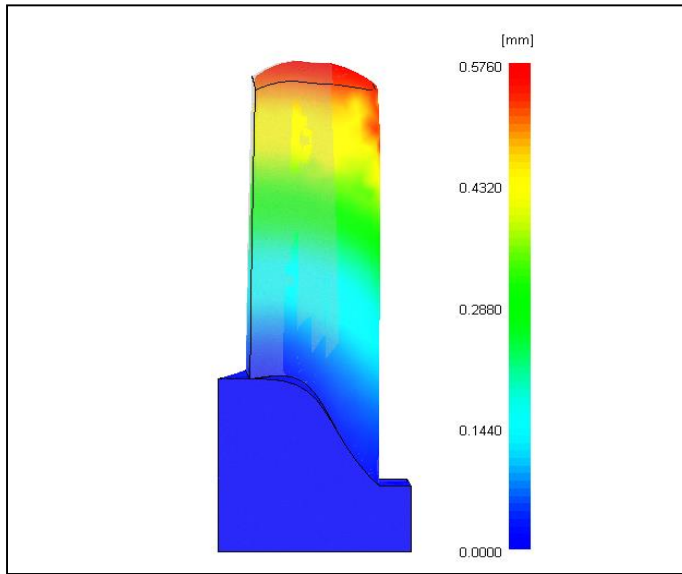
일반적으로 코어의 변형은 코어의 길이가 길고 두께가 얇은 경우 그리고 사출압력이 높게 나타날수록 흔히 발생한다. 이러한 경우에 코어 변형을 최소화하려면 강성이 높은 코어재질 사용, 고유동 수지 사용, 제품 설계 변경, 그리고 적절한 게이트 위치 설정 등의 방법이 있다.

코어변형의 크기는 충전과정에 가장 크게 나타나고 보압 과정에 줄어들며, 수지가 고화되면 코어의 이동이 멈추어 최종 변형량이 확정된다.

4-1) Core-shift 해석 사례

금형 코어 변형에 의한 예상치 못한 웰드라인이 형성된 경우이다. 상단의 게이트에서 동일 조건으로 수지가 흘러내려왔다면 아래 그림처럼 제품 중앙에 웰드라인이 형성되기는 어려웠다. 그러나 코어가 변형이 되어 한쪽 유동은 느려지고 다른 한쪽 유동은 빨라진다면 이와 같은 결과가 나타날 수 있다.





4-2) 코어 변형해석이 필요한 경우

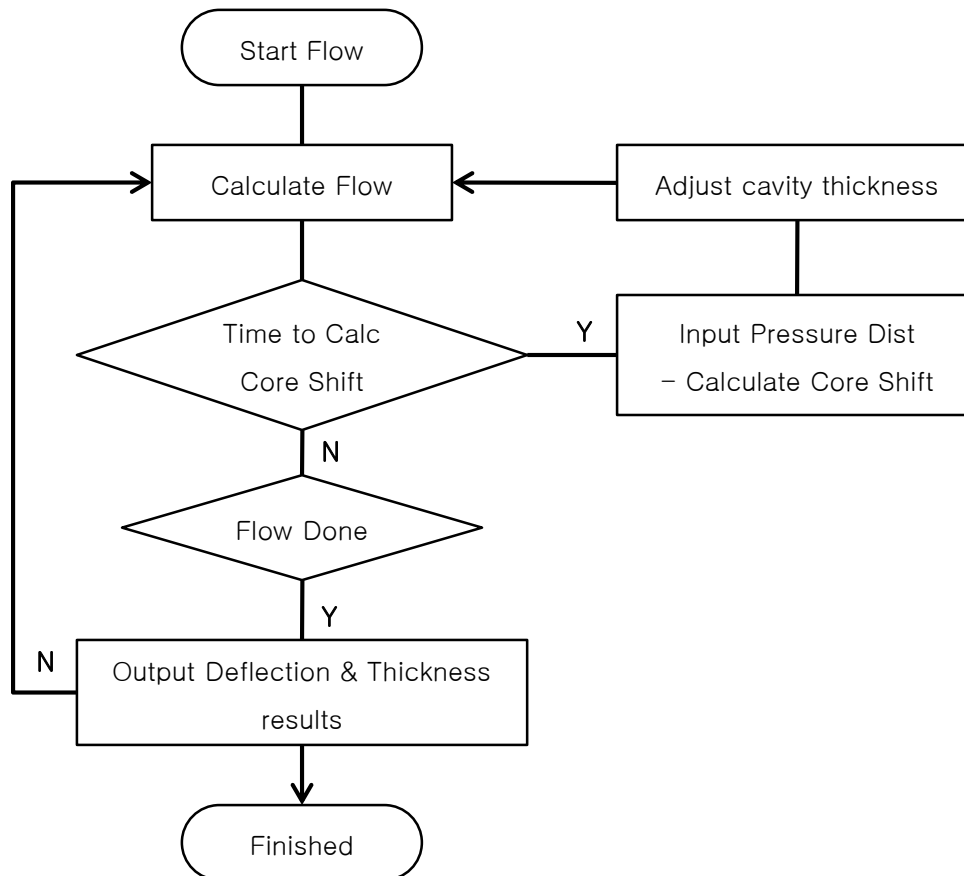
코어 변형 해석은 다양한 경우에 응용될 수 있다. 특히 제품 인서트가 수지 흐름에 의하여 변형되거나, 2차 성형에서 1차 성형물의 변형이 발생하는 경우이다.

- 금형 부분적 코어 변형해석
- 금형 전체의 변형해석
- Insert molding에서 수지 유동에 의한 제품 인서트 변형해석
- 2-shot overmolding에서 2차 유동에 의한 1차 성형물 변형해석
- Microchip encapsulation에서 수지 유동에 의한 paddle의 변형해석

4-3) Core-shift의 해석 방법

코어 변형해석은 유동해석과 구조해석의 반복수행 과정이다. 일정 간격으로 유동해석에서 계산된 각 Node의 압력 값이 구조해석에 입력되어 코어의 변형이 계산되고, 변형된 코어로 인하여 제품두께가 변경되어 다시 유동해석에 반영된다.

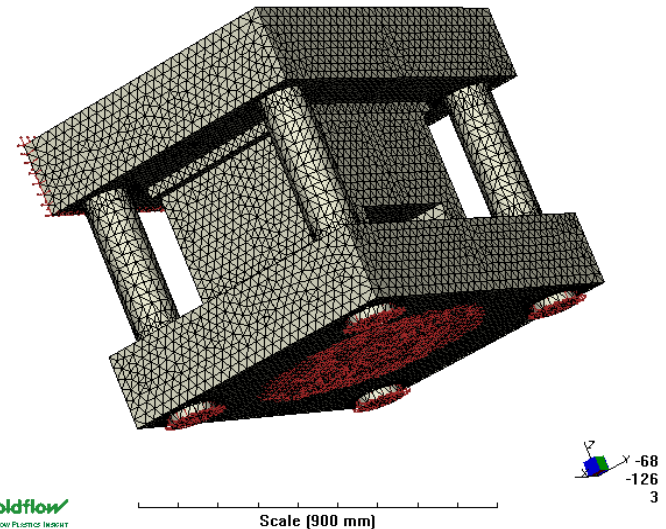
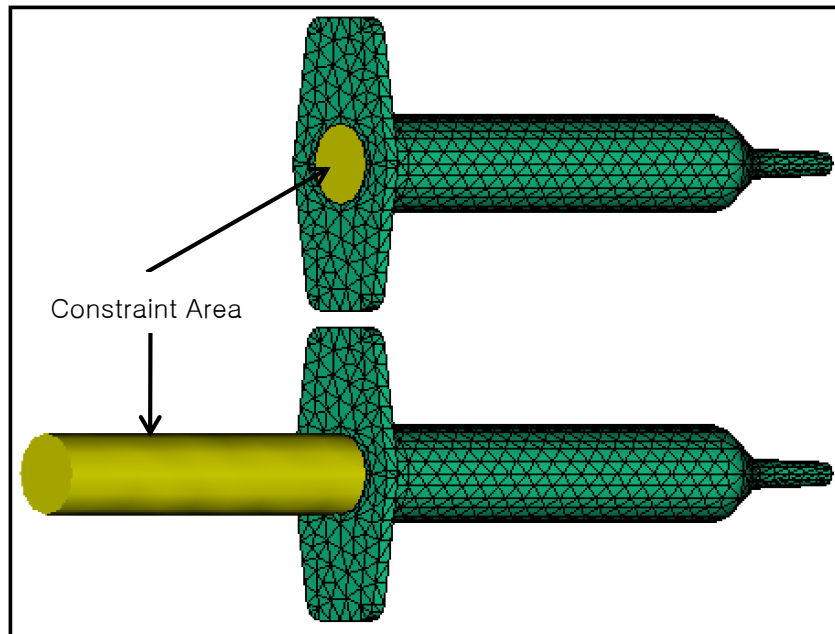
이러한 과정을 통하여 시간에 따른 Dynamic한 코어 변형 결과와 최종 제품 두께를 확인할 수 있다.



4-4) 코어의 모델링 및 구속

코어의 모델링은 일반적으로 변형이 예상되는 국부적인 영역의 모델링으로 충분하다. 그러나 금형 전체의 변형을 고려하고 싶은 경우에는 금형 전체를 코어로 모델링 한다. 물론 이런 경우에는 mesh 수가 크게 증가하여 해석 시간이 상당히 길어질 수 있다. 또한 코어는 금형의 일부로써 금형과 접하는 부분은 고정 구속을 설정하여야 한다. 금형의 구속이 적절히 설정되지 않은 경우에는 해석 결과의 신뢰성에 큰 영향을 미칠 수 있다.

그리고 코어는 반드시 3D mesh로 생성하고, 속성을 코어로 지정한 다음, 그 코어의 재질을 금형 재질 DB에서 선택하여야 한다. 제품의 경우에는 Dual-domain과 3D 모두 사용 가능하다. 금형 코어와 제품의 모델을 각각의 .sdy로 생성한 이후에 두 모델을 합하여 해석 모델을 완성한다.

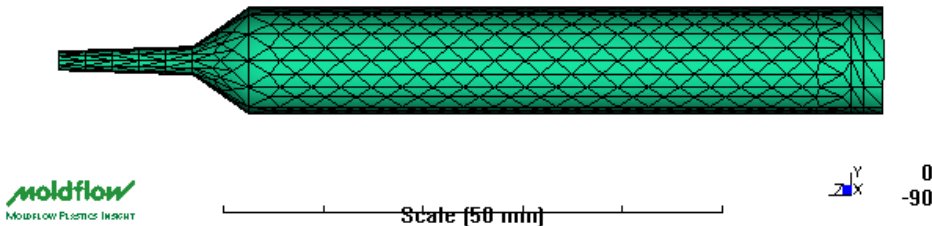
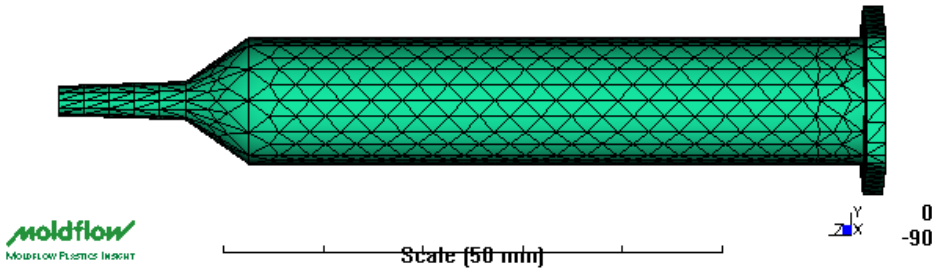


4-5) 해석의 절차

(1) 2D mesh 생성

제품 모델과 코어 모델에 대하여 각각 2D mesh를 먼저 생성하고, 제품은 선택적으로 3D mesh를 생성하고, 코어는 반드시 3D mesh를 생성하여야 한다. 그리고 마지막으로 이 두 모델의 mesh를 합하여 Core Shift 해석을 수행하게 된다.

그런데 문제는 두 mesh 사이의 경계 처리 부분이 문제가 되는 경우가 발생한다. 즉 두 모델의 mesh가 각각 처리가 되면 mesh 처리가 되면 일정 부분에서는 서로의 mesh가 겹치는 문제가 발생할 수 있고, 그 정도에 따라서 코어 변형 해석 수행이 불가능한 경우도 발생한다. 이러한 경우 해결 방법으로는 서로 접하는 부분의 mesh를 공유하는 방법이 있으며, 다른 방법으로는 제품과 코어를 어셈블리로 만들고, 이를 MDL을 통하여 meshing을 하게 되면 완벽히 경계가 일치하는 mesh를 얻을 수 있다.

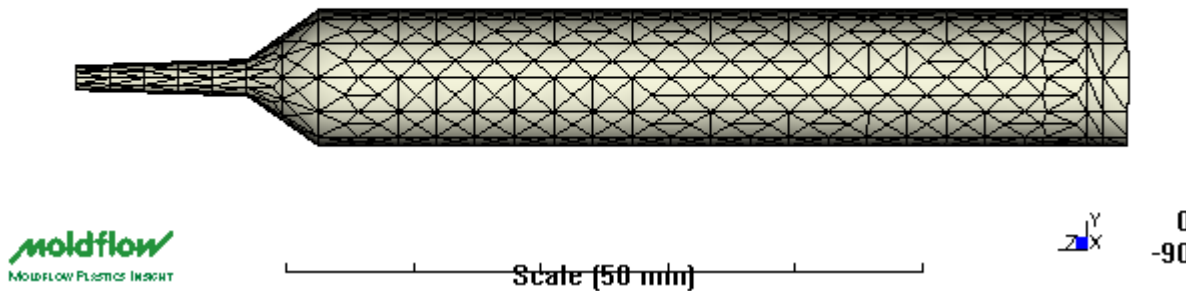


(2) 3D mesh 생성 및 속성 변경

제품은 2D 또는 3D 그리고 코어는 3D mesh를 생성한다. 물론 모델이 어셈블리인 경우에는 2D meshing 없이 MDL을 통하여 제품과 코어에 대한 Direct 3D meshing도 가능하다.

코어는 3D mesh 생성 후에는 속성을 “Core”로 변경하고, 그 코어의 물성을 선택하고 기타 옵션을 지정하여야 한다.

코어의 재질은 일반적으로 금형의 재질과 일치하지만, 제품 인서트의 코어 변형 해석에서는 인서트의 재질을 선택한다.



Core (3D)

Part Insert Properties | Mold Properties

Material from which this feature is made
Metal [Select...]

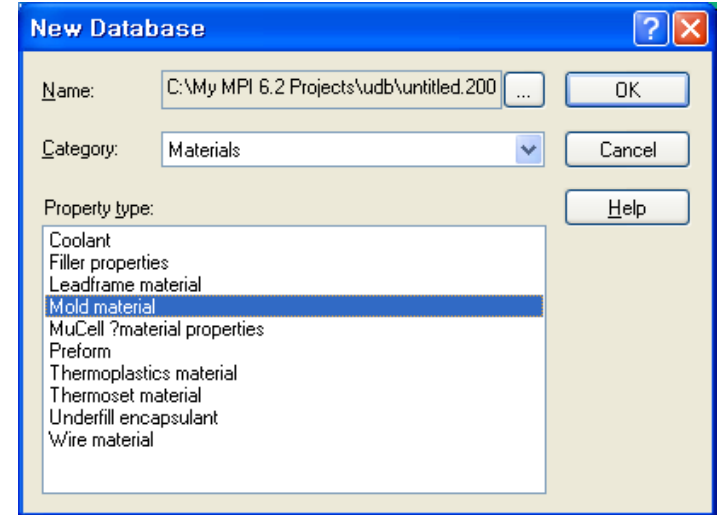
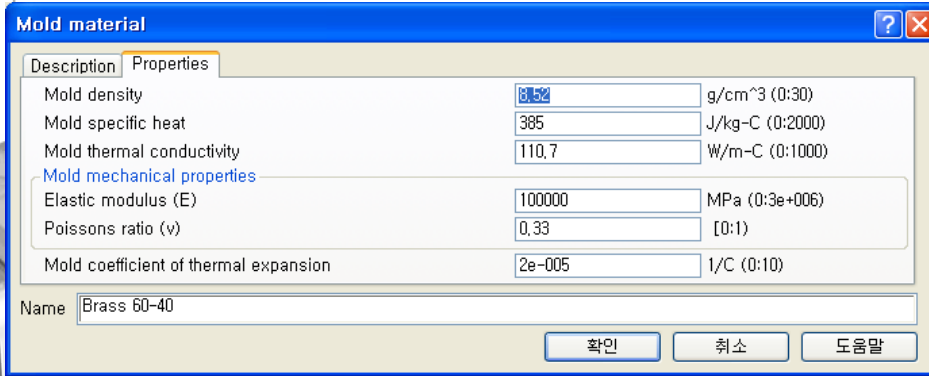
Local heat transfer coefficients
Use global setting in advanced options [v]

Mold surface temperature
Use mold surface temperature in process settings [v]

Name: Core (3D) (default) #3

☒ Apply to all entities that share this property

확인 취소 도움말



– Local heat transfer coefficients:

코어와 금형이 접하는 계면에서의 열전도 계수를 정의하기 위한 옵션이다. 여기서 제품과 접하는 부분은 예외이다.

– Mold surface temperature:

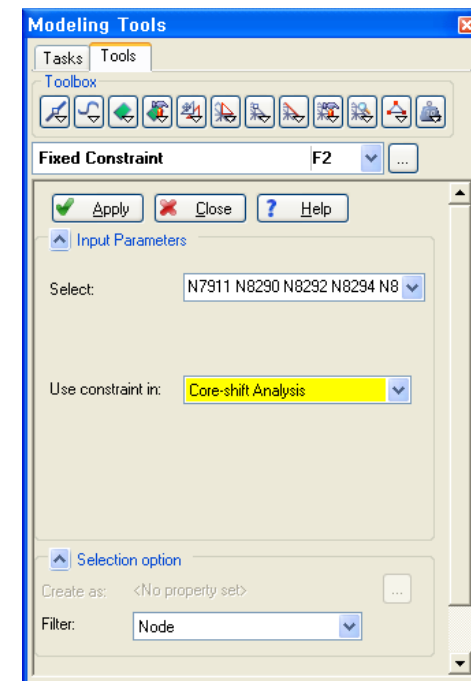
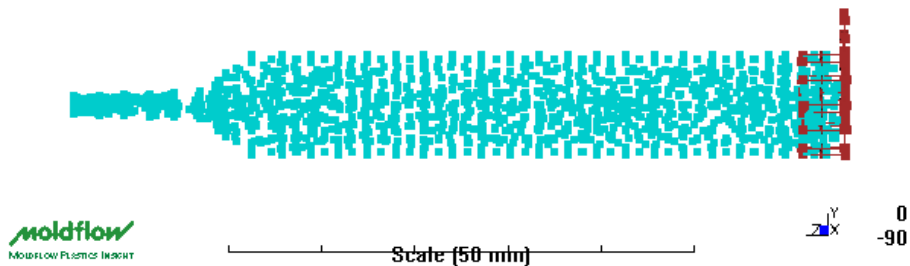
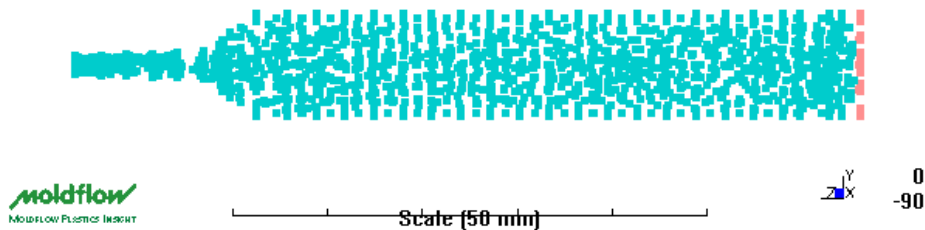
코어의 금형 온도를 지정한다. 일반적으로 전체 공정 조건 설정에서 사용하는 온도와 일치하므로 “ Use mold surface temperature in process settings”를 선택한다.

코어는 금형과 다르게 열적 뿐만 아니라 구조적으로 해석 결과에 영향을 미치기 때문에 코어의 기계적 물성이 요구된다. 기본적으로 AMI에서는 수지물성 BD와 금형물성 DB를 가지고 있으므로 이것을 이용하여 코어와 제품 인서트 물성으로 사용할 수 있다. 또한 DB에 존재하지 않는 재질을 코어 또는 인서트로 사용할 경우에는 “New Database” 도구를 이용하여 사용자 물성을 생성 할 수도 있다.

(3) 코어의 구속 설정

구속 설정을 위하여 구속 되어야 하는 Node들을 먼저 선택하고, “Fixed Constraint”로 지정한 다음 “Use constraint in” 옵션을 “Core-shift Analysis”로 지정한다. 그러면 선택된 Node들에 구속 마크가 생성된다.

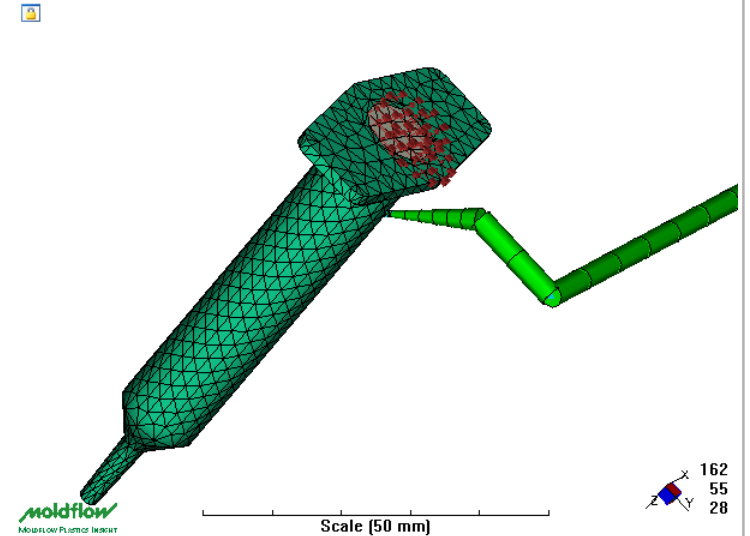
<< Analysis -> Set constraints -> Fixed constraints >>



(3) 제품 모델과 인서트 모델 결합

제품 2D 또는 3D 모델을 열고 “Add” 명령어를 이용하여 저장된 3D 코어 모델의 .sdy 파일을 불러드리면 우측 그림과 같이 완성된 해석모델이 만들어진다.

나머지 해석 입력 조건들은 일반적인 3D 해석과 동일하지만 추가적인 코어 변형해석을 위한 옵션들을 설정하여야 한다.



Thermoplastics injection molding solver parameters (Dual Domain)

Mesh/Boundary Intermediate Output Convergence Fiber Analysis Restart Core Shift

☒ Perform core shift analysis

Frequency of core shift analysis

Maximum volume increment between analyses 5,00 % (0:100)

Maximum time step between analyses 1,00 s (0:10000)

Analyze core using 10-noded tetrahedra (most accurate)

Perform core shift analysis during pressure iteration During filling and packing

Surface matching tolerance 0,2 mm [0,001:100]

Percentage frozen layer that makes node constrained 90,00 % (0:99)

Use AMG matrix solver Yes

Name Thermoplastics injection molding solver parameters defaults (Fusion)

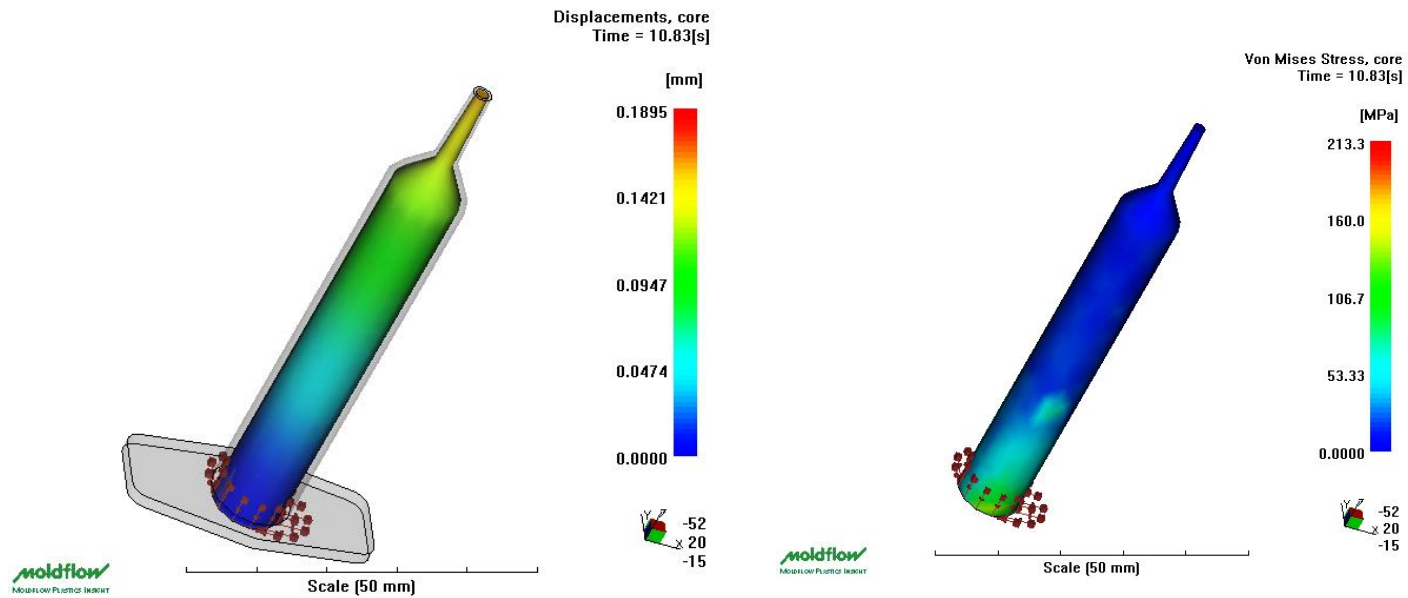
확인 취소 도움말



- Perform core shift analysis:
항상 “On” 상태이며, 해석 모델에 코어가 존재하고 구속이 설정되어 있으면 코어 변형해석이 진행된다.
- Frequency of core shift analysis:
코어 변형 해석의 빈도를 결정한다. 볼륨과 시간으로 설정 가능하다.
- Analyze core using:
코어의 4-node 3D mesh를 10-node로 mesh로 업그레이드 할 것인가에 대한 옵션이다. 10-node로 업그레이드 하는 것이 더 정확한 결과를 제공한다.
- Perform core shift analysis during pressure iteration:
코어의 변형은 수지의 점성 저항에 영향을 받는다. 따라서 수지의 점성 저항을 어떤 범위에서 고려할 것인가를 결정한다.
- Surface matching tolerance:
제품 모델 mesh와 코어 모델 mesh 사이에 틈이 존재할 수 있으므로 그 허용범위를 지정한다.
- Percentage frozen layer that make node constrained :
수지가 충분히 고화되면 코어는 수지 점성 저항에 의하여 더 이상 움직일 수 없게 된다. 그것을 결정하기 위한 수지의 고화 정도를 입력한다.

4-6) 해석 결과

Core shift 해석을 통하여 코어의 변형량, 제품의 최종 두께, 코어에 가해진 응력 등이 결과로 나타난다. 이러한 결과를 바탕으로 현재의 금형 재질 및 수지가 적합한 것인지, 게이트 위치 및 코어의 형상 및 구속이 적절한 것인지, 마지막으로 성형 공정 조건에 문제가 있는지를 판단할 수 있다.

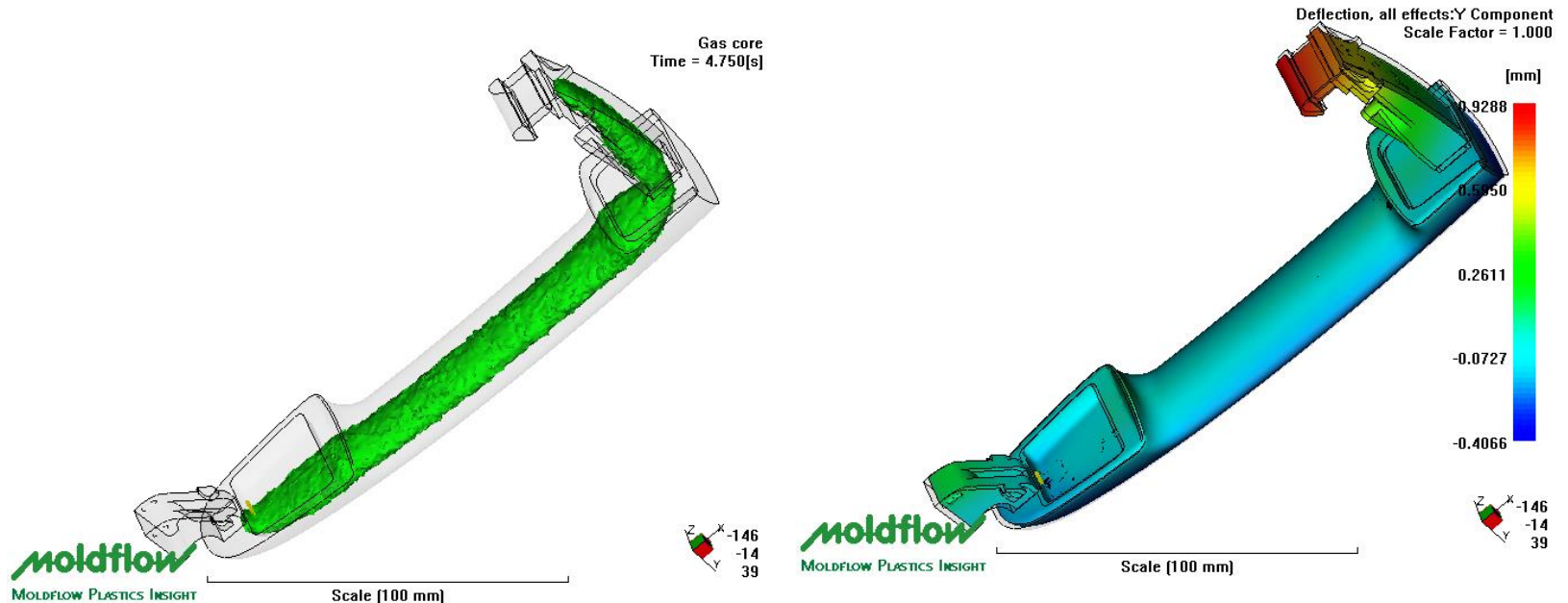


5. 3D Gas-assisted injection molding 해석

제품의 형상의 일부 또는 전체가 두꺼운 경우에 Gas-assisted Injection Molding(GIM) 공법을 이용하여 가스를 주입하여 제품 중앙에 중공을 형성하면 사이클 단축, 수지절감, 공정 단축 등의 생산원가 절감 효과를 얻을 수 있다.

Gas 성형법은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 첫 번째는 “Short shot” 방법이고, 두 번째는 “Full shot” 방법이다. “Short shot” 방법은 주로 제품의 전체 체적의 일부만 충전하고 가스를 주입하여 이미 충전된 부분의 코어를 밀어서 중공을 만듦과 동시에 나머지 미충전 부분을 충전하는 방법으로써 제품이 전체적으로 두꺼운 경우에 주로 사용 가능하다. “Full shot” 방법은 제품의 전체를 충전하고 가스를 주입하여 중공을 형성하는 방법으로 제품의 두께가 일부 얇은 경우 주로 사용한다. 그러나 “Full shot” 방법에서는 수지 저항에 의하여 가스 압력으로 충분한 중공을 형성할 수 없는 경우가 발생하고, 이때는 “Gas Overflow Well” 설계를 통하여 잉여 수지를 제품 밖으로 밀어내어 중공을 형성한다.

GIM 해석의 주요한 결과로는 가스 주입에 의해서 형성된 중공의 형상 및 제품의 변형 결과이다.



5-1) Gas 주입 위치

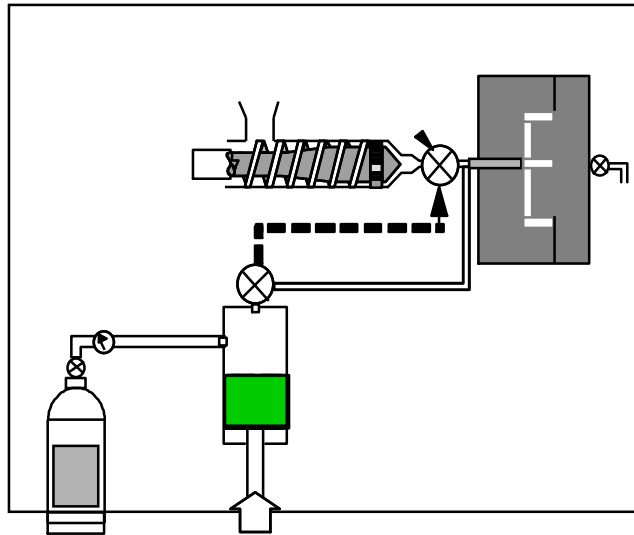
Gas는 사출기 노즐을 통하여 주입하는 방법과 러너 또는 제품에 직접 Gas inlet를 설치하여 주입하는 방법이 있다.

(1) 노즐을 통하여 주입하는 방법

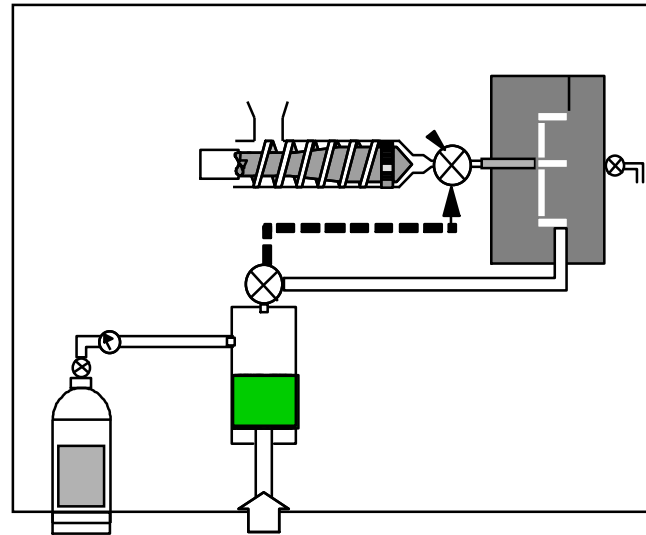
수지의 충전이 끝난 직후에 동일한 노즐을 통하여 Gas를 주입하는 방법이다. 장점으로는 금형의 특별한 수정을 요구하지 않는다는 것이다. 그러나 멀티 캐비티 금형에서는 불균일 충전을 유발하기 때문에 사용할 수 없고 또한 핫 러너를 통해서는 Gas 주입을 할 수 없으므로 사용 할 수 없다는 단점들이 있다.

(2) 러너 또는 제품에 직접 주입하는 경우

수지의 충전이 끝난 직후에 Gas inlet을 통하여 금형의 여러 위치에서 직접 주입하는 방법이다. 장점으로는 사출 성형기 종류에 상관 없이 동일한 Gas 장비를 사용할 수 있으며, 핫 러너 금형에도 사용할 수 있으며, 또한 Gas Inlet 마다 다른 설정으로 Gas를 주입 할 수 있다는 것이다. 유일한 단점은 금형 가공비의 상승이다.



(a) 노즐을 통하여 주입하는 방법



(b) 러너 또는 제품에 직접 주입하는 경우

5-2) Gas 주입 제어 방법

Gas 제어 장치에 의하여 가압된 가스(일반적으로 질소)를 수지로 공급하는 방법에는 일정 볼륨 제어 방법(constant volume process)와 일정 압력 제어 방법 (constant pressure process)으로 구분된다.

(1) Constant volume process

실린더에 가압된 일정량의 가스 볼륨을 피스톤을 이용하여 금형속으로 주입하는 방법이다. 보압 구간에서 가스의 압력은 주입된 가스가 수지 내로 확산됨에 따라 점차 낮아진다. 가스 주입이 끝나면 수지의 냉각 동안 압력이 가해지도록 일정 시간 동안 유지한다.

(2) Constant pressure process

가스를 보압과 같이 압력 제어 방식으로 금형속으로 주입하는 방법이다. 가스와 수지 유동선단의 이동은 주입된 압력에 의하여 결정되므로 Constant volume control 방법에 비하여 공정상의 가스 제어가 용이하여 많이 사용되는 방법이다. 주입되는 가스는 보압 설정과 같이 계단식 또는 선형적으로 제어될 수 있다.

Gas Volume Controller Settings

Gas injection time: 6 s [0:1200]
Maximum gas pressure: 50 MPa (0:500)

Gas volume control

Plunger travel time: 12 s (0:1200)
Initial pressure: 0.1 MPa (0:500)
Piston volume: 2.1 cm³ (0:1e+004)
Gas-line volume: 2.2 cm³ (0:1000)

%Gas volume vs %time

%time % [0:100]	%Gas volume % [0:100]
1 0	50
2 100	50
3	
4	
5	

확인 취소 도움말

Gas Pressure Controller Settings

Gas pressure vs time

Time s [0:1200]	Gas pressure MPa [0:500]
1 0	1
2 2	5
3 2	5
4 5	5
5 20	10
6 20	10
7	
8	

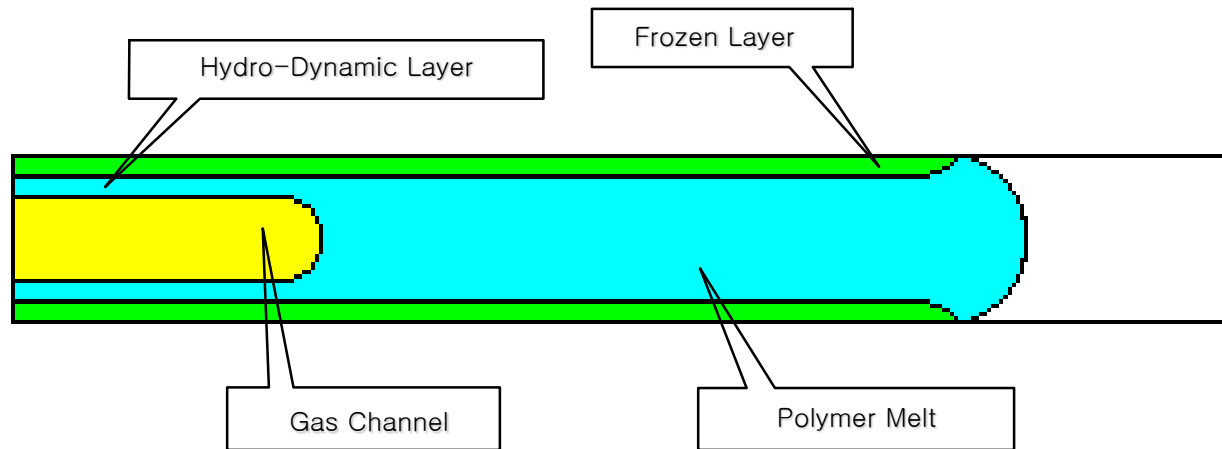
확인 취소 도움말

5-3) Gas-assisted Injection Molding 단계

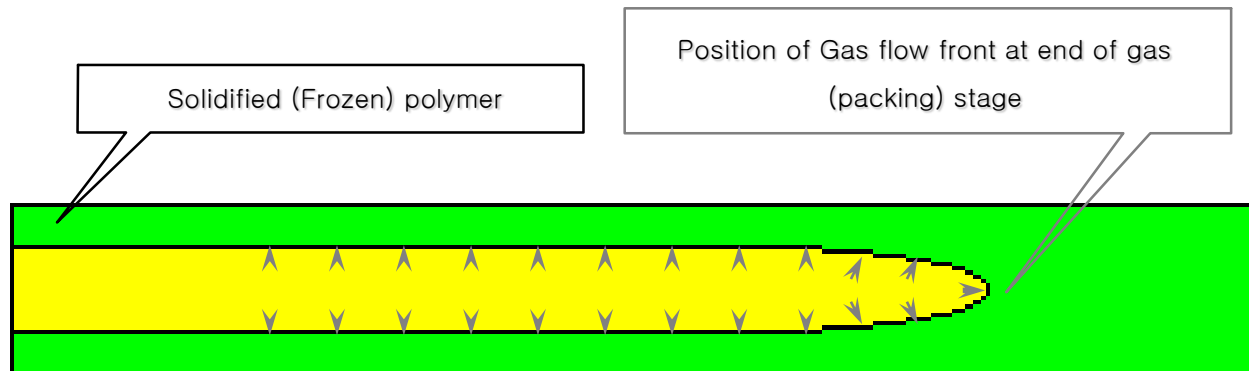
(1) 수지 충전

(2) 가스 주입

가스를 주입하여 용융상태의 수지 코어를 밀어서 금형의 충전되지 않은 부분을 완충시킨다.



보압 또는 냉각 공정 동안 가스를 지속적으로 주입하여 냉각에 의한 체적 수축을 보충하고 외부 형상을 유지하게 한다.



(3) 가스 제거

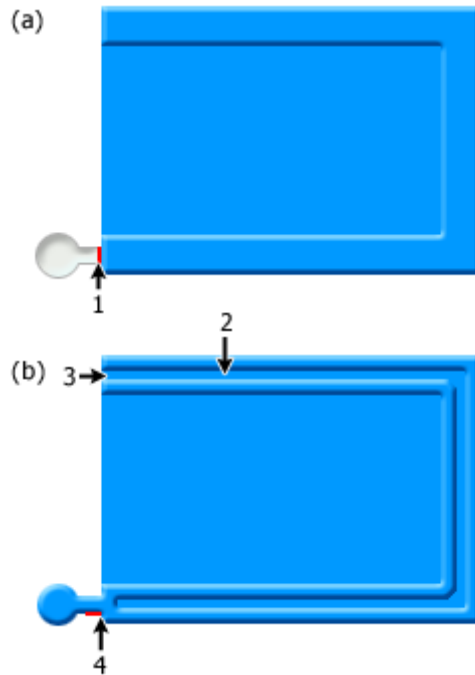
(4) 제품 취출

5-4) Overflow Well

(1) Overflow Well 이란?

Overflow well은 가스 주입에 따른 잉여 수지가 많이 발생하는 경우에 이러한 여분의 수지를 금형 밖으로 밀어내기 위한 2차적 캐비티이다. 따라서 Overflow well은 가스의 침투를 용이하게 하며, 가스의 침투 방향에 영향을 미친다.

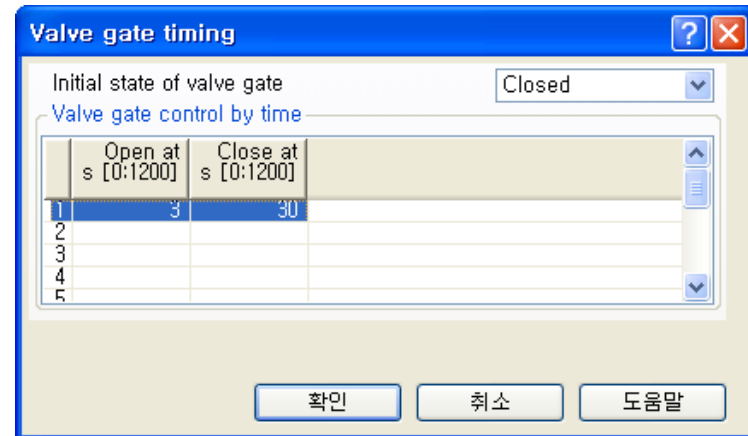
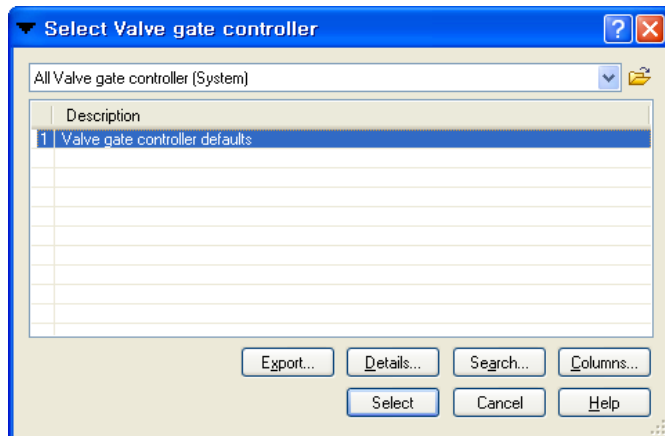
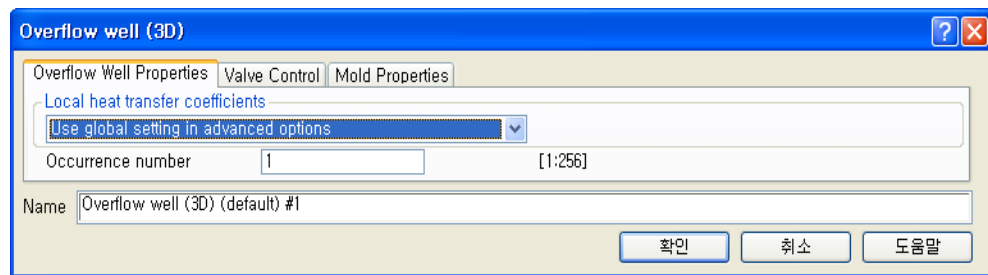
또한 Overflow well과 제품 캐비티가 연결되는 부분은 밸브를 설치하여 제어를 하여야 한다. 수지를 충전하는 동안은 밸브를 닫고, 가스를 주입하는 동안은 밸브를 열어 여분의 수지가 Overflow well로 흘러갈 수 있게 한다.



- 1) Control valve closed during polymer injection.
- 2) Gas penetration.
- 3) Gas entrance.
- 4) Control valve open during gas injection

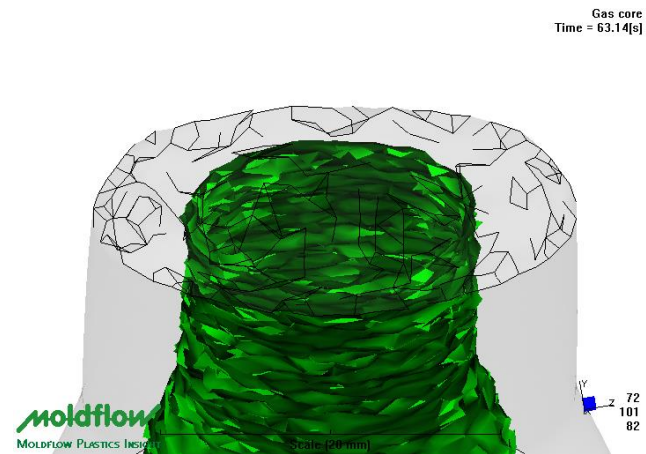
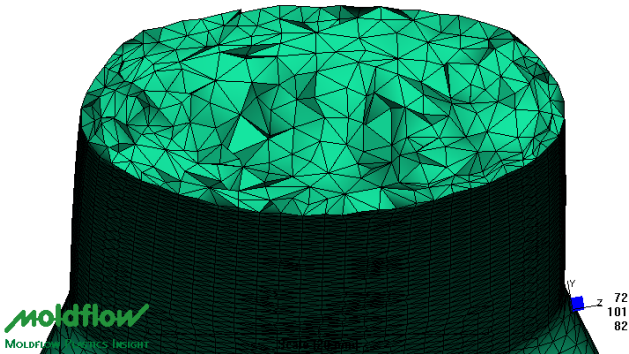
(2) Overflow Well 속성 지정

Overflow well은 전체를 3D 또는 3D + Beam 으로 설계 가능하다. Overflow well이 3D인 경우에는 전체를 선택하고 속성을 “Overflow well (3D)”로 변경한다. 또한 “Valve Control” 탭에서 “Select”를 이용하여 밸브 컨트롤러를 선택하고 밸브의 “Open”과 “Close”의 시간 설정을 한다. 이러한 밸브 설정은 전체 Overflow well 3D mesh중에서 제품 3D mesh와 접하는 부분만 제어한다.



5-5) GIM을 위한 3D Mesh

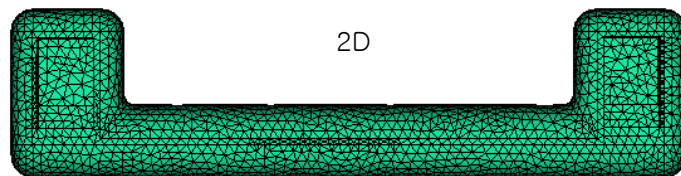
GIM 해석에서는 3D mesh 생성시에 일반적인 성형 해석에 비하여 두께 방향으로 보다 미세한 요소의 생성이 요구된다. 이것은 수지 충전 이후에 가스에 의하여 생성되는 중공의 크기를 정확히 예측하기 위함이다. 따라서 2D mesh를 미세하게 생성함과 동시에 3D mesh 생성시의 layer수를 최소한 8 이상으로 지정하는 것이 유리하다. 또한 Bias 옵션을 사용하여 제품 표면 보다는 제품 중앙에 미세한 mesh가 만들어지도록 1 이하의 값을 지정하는 것도 도움이 된다.



5-6) 해석의 절차

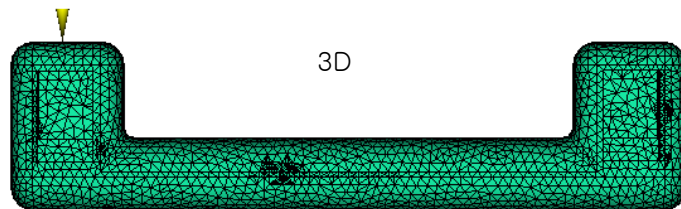
(1) 2D mesh 생성

제품 중앙에 가스 주입에 의하여 형성되는 중공을 정확히 예측하기 위해서는 조밀한 3D mesh가 필요하고, 이러한 3D mesh를 위해서는 우선 2D mesh의 에지 길이를 적절히 조절할 필요가 있다. 또한 필요한 경우 러너 설계는 2D mesh 생성 후에 beam mesh로 설계하고, injection location도 설정한다.



2D

moldflow
MOLDFLOW PLASTICS INSIGHT



3D

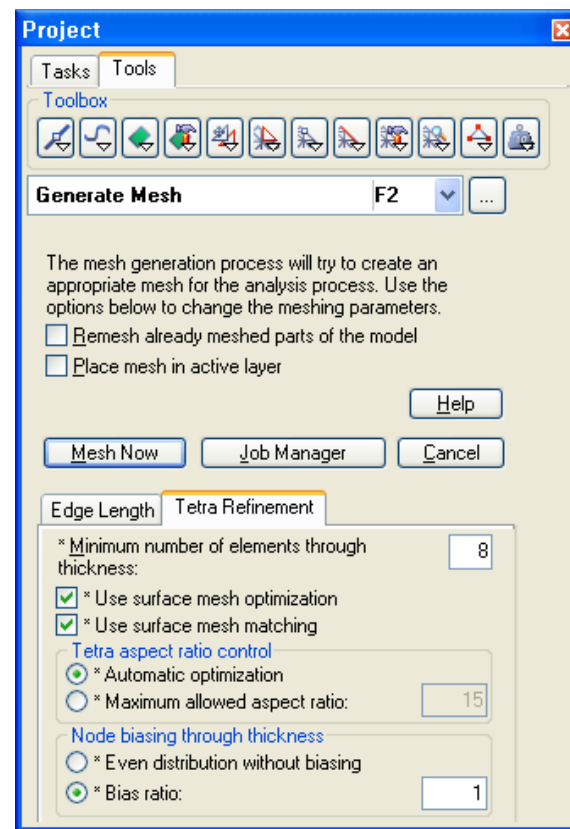
moldflow
MOLDFLOW PLASTICS INSIGHT

Scale [100 mm]

Y
0
0
0

Scale [100 mm]

Y
0
0
0



(2) 3D mesh 생성 및 해석 공정 변경

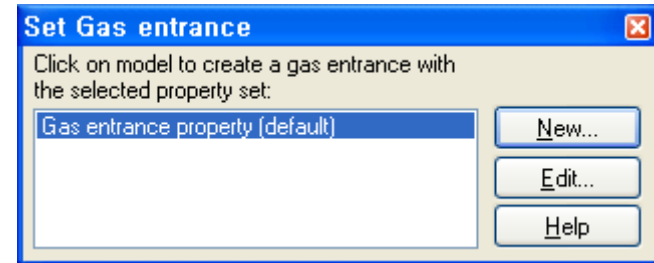
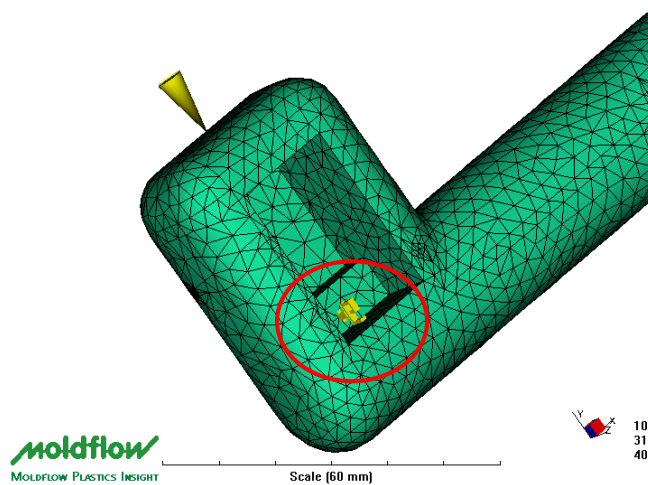
제품의 형상을 고려하여 두께 방향으로 최소 8 layer 이상의 3D mesh를 생성하는 것이 유리하며, 필요한 경우 Bias 옵션을 사용하는 것도 도움이 된다. 또한 해석을 위한 성형공정을 “Gas-assisted Injection Molding”으로 변경한다. 반드시 변경하여야 “Gas Entrance”의 설정이 가능해진다.

<< Analysis -> Set Molding Process -> Gas-assisted Injection Molding >>

(3) Gas Entrance의 지정 및 조건 설정

가스를 스프루를 통하여 주입하는 경우에는 injection location 위치에, 그리고 러너 또는 제품에 직접 주입하는 경우에는 그 해당 node에 gas entrance를 설정한다.

<< Analysis -> Set Gas Entrances >>



Gas entrance가 여러 개인 경우에는 각각의 node에 entrance를 설정하면 되고, 각각의 entrance 마다 가스 주입 조건이 다른 경우에는 “Set Gas Entrance”에서 “New”를 이용하여 새로운 entrance 속성을 만들고, 새로 만들어진 속성을 선택하여 다시 원하는 위치의 node에 entrance를 설정하면 된다.

또한 각각의 entrance 속성을 변경하기 위해서는 “Set Gas Entrance”에서 변경하고자 하는 entrance 속성을 선택하고 “Edit”를 클릭하여 속성을 변경한다.

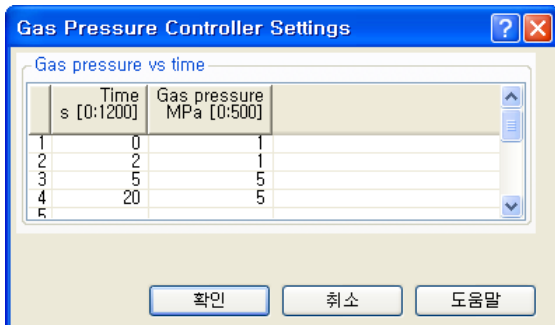
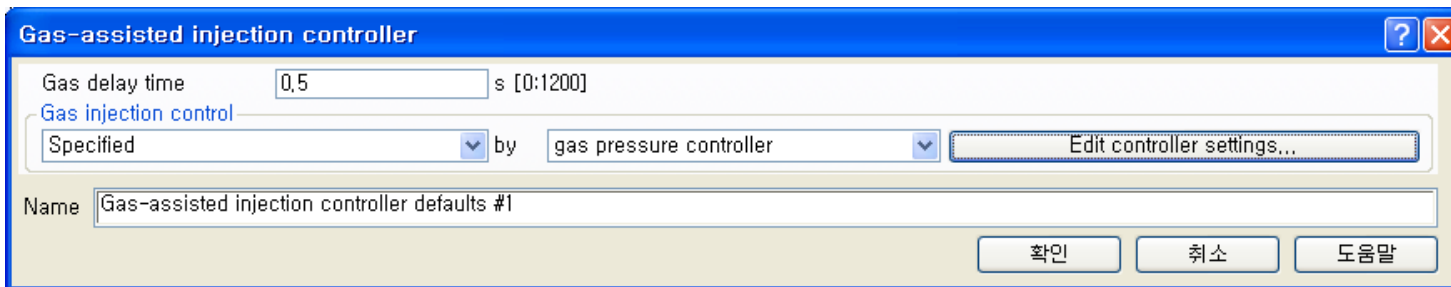
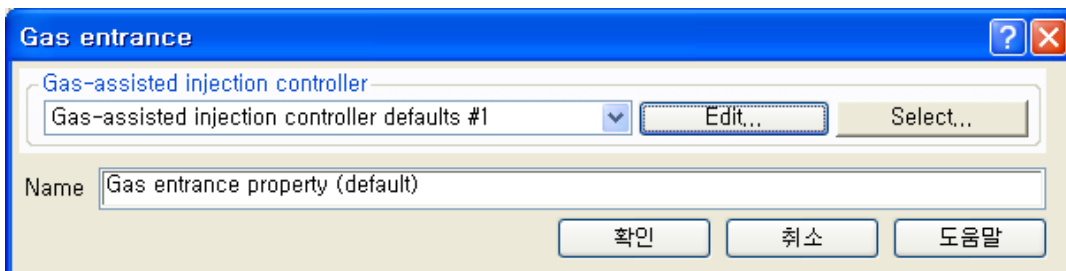
“Edit”를 클릭하면 나타나는 “Gas Entrance”에서 다시 “Edit”를 클릭하여 필요한 입력 값들을 입력한다.

– Gas delay time:

충전 끝난 후부터 가스 주입 시작 시점까지의 지연시간

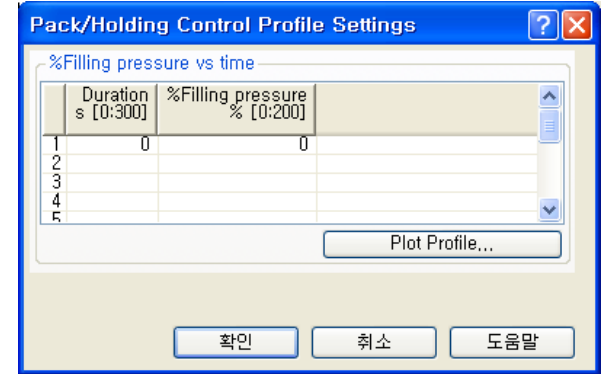
– Gas injection control:

일반적으로 “gas pressure controller”를 사용하며, 가스의 주입 시간과 압력을 계단식 또는 선형으로 설정한다.



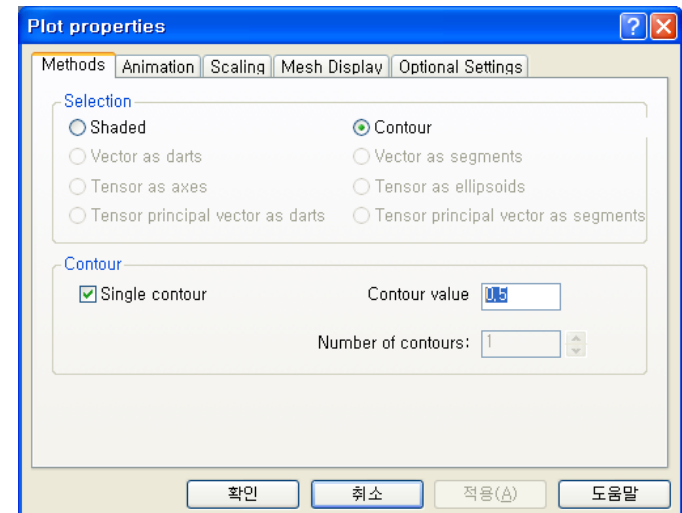
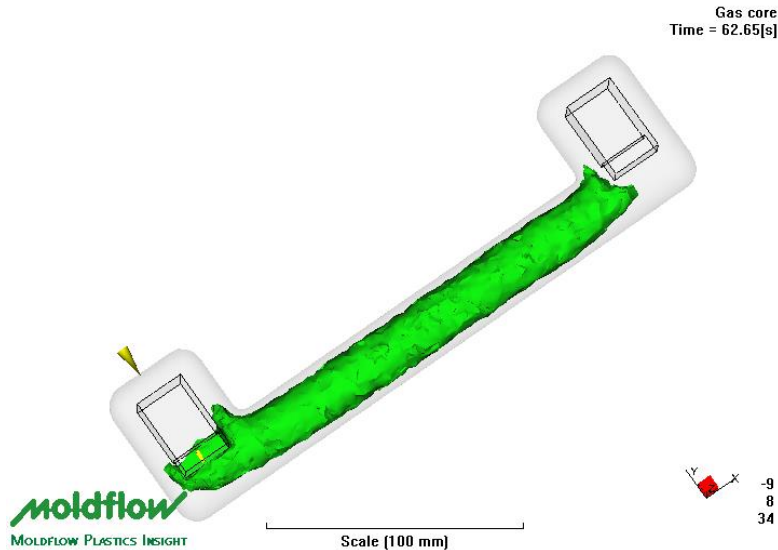
(4) 공정 조건 설정

Short shot 방법의 경우는 보압 전환점의 위치를 제품의 형상과 가스 주입 조건을 고려하여 적절히 설정하며(60% ~ 80%), Full shot 방법의 경우는 보압 전환점을 100%로 설정하고 필요한 경우 gas overflow well을 설정하여야 한다. 또한 보압은 가스의 압력에 의하여 대체하기 때문에 설정에서는 보압의 시간과 크기는 각각 0로 입력한다.



5-7) 해석 결과

가스 해석 결과 중에서 가장 중요한 의미를 가지는 “Gas core” 결과의 의미는 가스 침투에 의하여 형성된 중공의 형상을 나타낸다. 이 결과의 속성에서 “Contour value”를 옵션으로 변경할 수 있는데, 여기서 1의 의미는 가스로 100% 침투된 mesh들의 영역만 표시하고, 0.5의 의미는 가스로 50% 이상이 침투된 mesh들의 영역만 표시한다.



6. Cool FEM 해석

Cool(FEM) 해석이 Cool(BEM) 해석과 크게 다른 점은 수치 유동을 고려한 냉각해석을 할 수 있다는 것과 시간에 따른 금형 온도 변화를 계산할 수 있다는 것이다. 또한 Cool(BEM)에서 수행할 수 없었던 RHCM(Rapid Heating and Cooling Mold)의 공정도 실제와 유사한 공정조건으로 해석이 가능하게 되었다.

물론 Cool(FEM) 해석수행을 위해서는 Cool(BEM)과 달리 금형 외곽을 반드시 모델링하고 러너시스템, 냉각시스템 그리고 캐비티를 제외한 금형 전체 영역을 3D 메쉬로 채워야 한다는 것이다.

6-1) Cool(FEM) 해석의 금형 온도 계산 옵션

Cool(FEM) 해석에서 금형 온도를 계산하는 3가지 옵션을 제공한다.

- Averaged with cycle
- Transient with cycle
- Transient from Production start-up

(1) Averaged with cycle

Cool(BEM)과 동일하게 금형이 충분히 예열되어 금형 온도가 정상상태(steady-state)에 도달하였을 경우의 한 사이클 평균 금형 온도(averaged with cycle)를 계산한다.

(2) Transient with cycle

Cool(BEM)과 달리 금형이 충분히 예열되어 금형 온도가 정상상태(steady-state)에 도달하였을 경우의 사이클 시간의 변화에 따른 금형 온도 변화(transient with cycle)를 계산한다.

(3) Transient from Production start-up

Cool(BEM)과 달리 금형 설치 초기부터 제품 생산 진행에 따른 금형 온도 변화(transient from production start-up)와 각 사이클의 시간 변화에 따른 금형 온도 변화(transient with cycle)를 계산한다. 그러나 이 옵션은 해석 시간이 상당히 오래 걸릴 수 있어서 대형 모델에서 수행하기는 아직 어렵다.

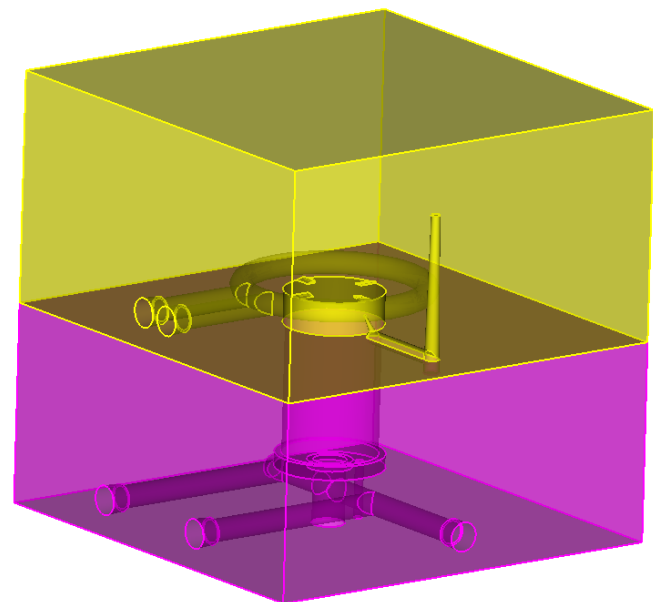
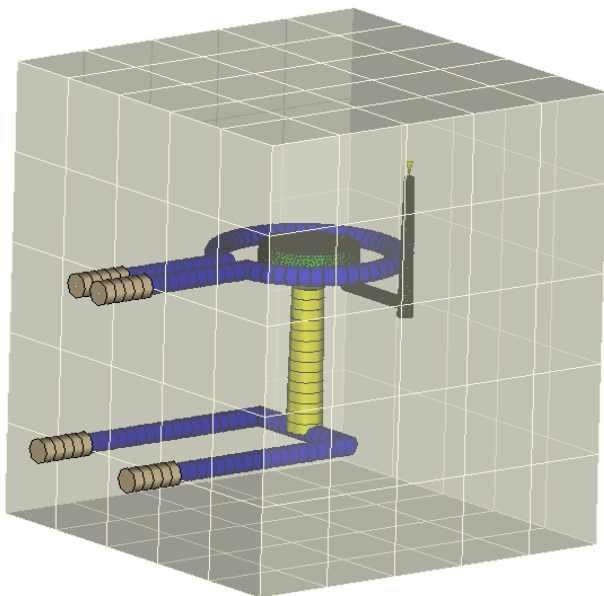
6-2) 해석 절차

Cool(FEM) 해석을 위하여 금형 3D mesh를 생성하는 방법에는 두 가지가 있다.

첫 번째 방법은 “Mold Surface Wizard”로 생성된 금형 외곽과 제품, 러너 및 냉각시스템의 경계를 이용하여 금형 3D mesh를 만드는 방법이다.

두 번째 방법은 금형 형상을 3D로 설계하고 이를 이용하여 금형 3D mesh를 만드는 방법이다. 이 경우 제품(캐비티)과 경계면 일치성을 위하여 제품 모델과 금형 모델을 어셈블리로 만들어 synergy로 불러오는 것이 좋다. 또한 3D 금형 모델과 일치하는 러너와 냉각시스템을 설계하여야 한다.

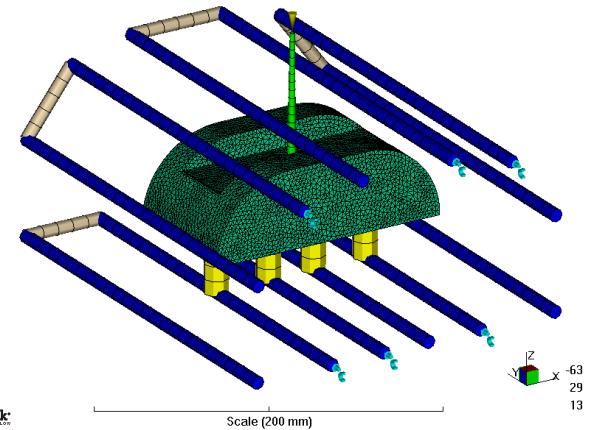
제품 인서트가 존재하는 경우는 위의 두 가지 방법 모두 가능하지만 금형 인서트가 존재하는 경우에는 금형 3D mesh 생성을 위하여 두 번째 방법을 사용하여야 한다. 특히 RHCM과 같은 공정에서는 금형 캐비티와 코어 부분의 금형 온도가 상당히 차이가 발생하게 되어 두 블록 사이의 열전도를 고려하기 위해서는 두 번째 방법을 사용하는 것이 유리하다. 그러나 두 번째 방법은 금형 모델을 만드는데 상당한 시간이 소요되고, 제품과 러너 및 냉각시스템의 경계에서 이들 mesh와 일치된 금형 3D mesh를 생성하기 어렵다는 단점이 있다.



(1) 제품 2D 또는 3D mesh 생성

Cool(FEM) 해석에서는 제품은 2D 또는 3D 메쉬 모두 가능하다. 그러나 2D(dual-domain)의 경우 해석 시간은 빠르지만 수지의 유동을 고려한 냉각해석이 지원되지 않는다는 단점이 있다. 또한 제품 인서트와 금형 인서트가 존재하는 경우에도 3D 메쉬로 해석을 진행하여야 한다.

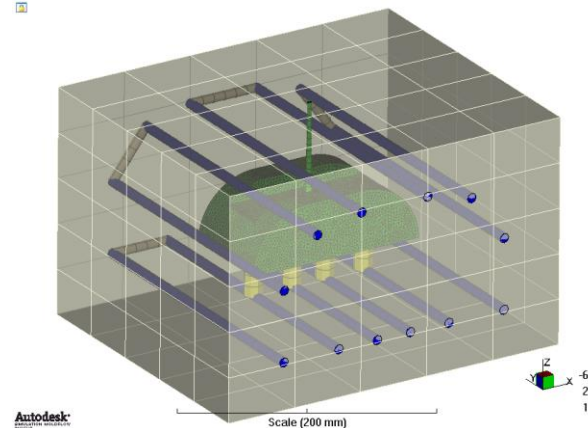
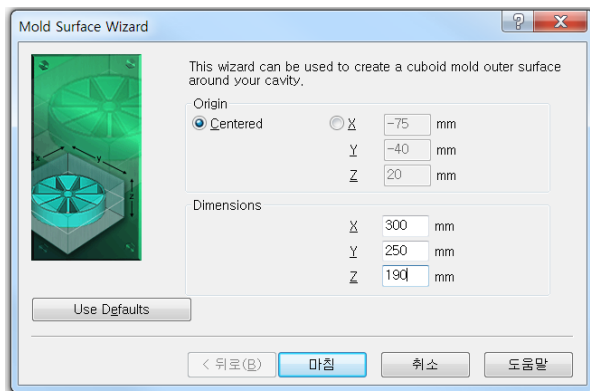
러너시스템과 냉각 시스템은 Cool(BEM) 해석에서와 동일한 방법으로 설계하면 되고, 제품 인서트의 경우도 마찬가지이다.



(2) 금형 외곽 면 설계

금형 전체에 3D 메쉬 생성을 위해서는 먼저 금형의 외곽면(mold surface)을 설계하여야 한다. 금형의 외곽면은 “Geometry” 도구에서 “Mold Surface Wizard”를 이용하여 쉽게 설계할 수 있다. 그러나 이때 반드시 선행적으로 해석 절차를 “Cool(FEM)”로 변경한다. 그렇지 않은 경우 “Mold Surface Wizard”는 금형 외곽면 생성과 동시에 그 표면에 Cool(BEM)을 위한 mesh도 동시에 생성하기 때문이다.

금형 외곽면은 “Mold Surface Wizard”로 생성할 수 있지만 정확한 금형 형상을 반영하기는 어렵다. 따라서 보다 정확한 금형 형상을 반영하고 싶다면 CAD에서 금형을 3D로 설계하고 이를 ASMDL을 이용하여 synergy로 불러오면 된다. 또한 금형 인서트가 존재하는 경우에는 반드시 CAD에서 제품, 금형 그리고 금형 인서트 3D 형상을 어셈블리로 설계하여 synergy로 불러와야 한다.



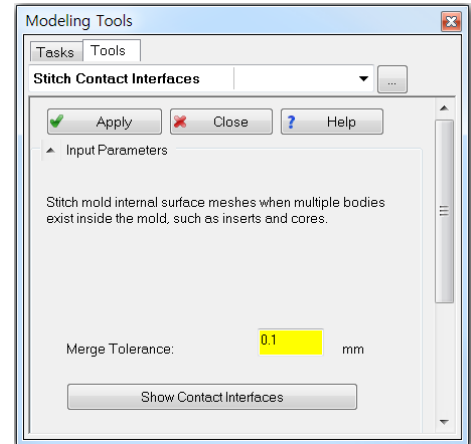
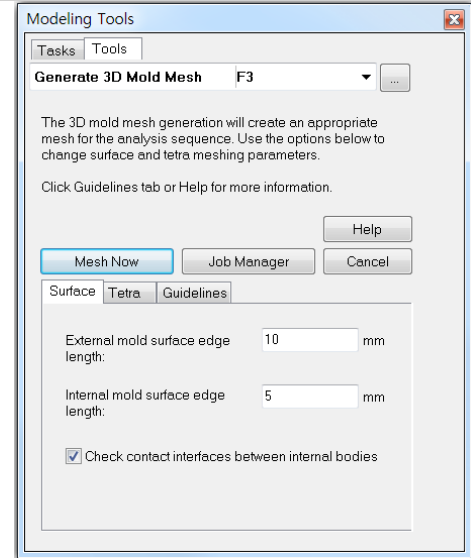
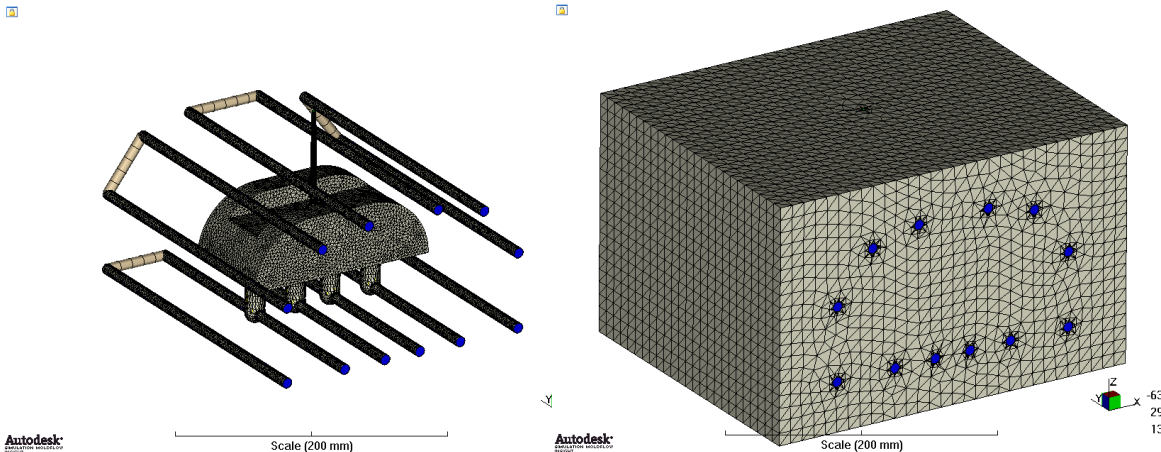
(3) 금형 2D mesh 생성

금형 3D mesh는 두 단계로 나누어 진행된다. 먼저 금형 외곽면 및 캐비티, 러너, 냉각라인 주변에 금형 2D mesh를 생성하고, 다시 이를 바탕으로 금형 3D mesh를 생성한다.

금형 2D mesh는 “Create 3D mold Mesh” 에서 “External mold surface edge”와 “Internal mold surface edge” 크기를 적절히 설정하고 “Mesh Now”를 클릭하면 2D mesh가 생성된다. 여기서 적절한 “Internal mold surface edge”는 제품 mesh 크기의 1~2배가 적절하고 “External mold surface edge”는 “Internal mold surface edge”의 2~3배 정도가 적합하다.

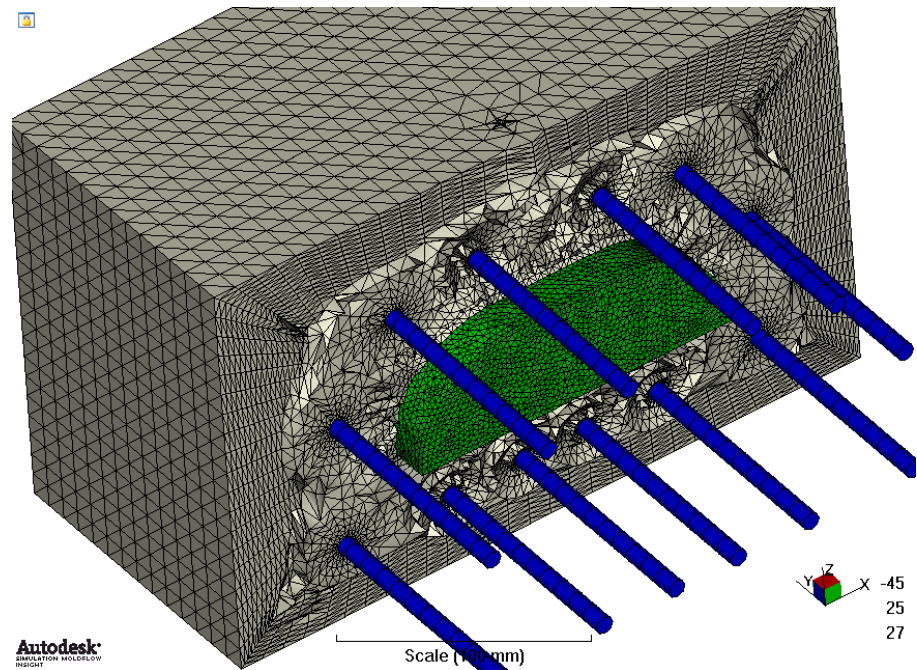
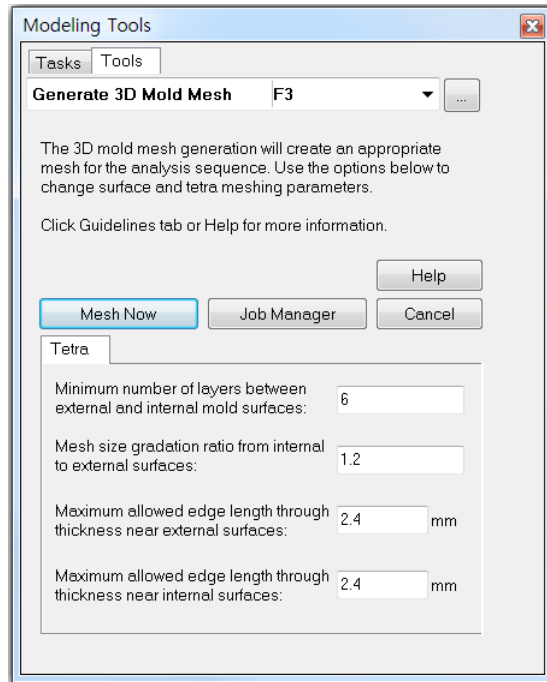
“Mesh Now”를 클릭하게 되면 Mold Internal Triangle와 Mold External Triangles로 분리되어 메시가 생성된다.

제품 인서트 가 존재하는 경우에는 금형 2D mesh 생성 이전에 제품과 제품 인서트의 외곽을 하나의 Internal Triangle로 만들기 위하여 “Mesh” 도구의 “Stitch Contact Interface”를 먼저 실행하여야 한다.



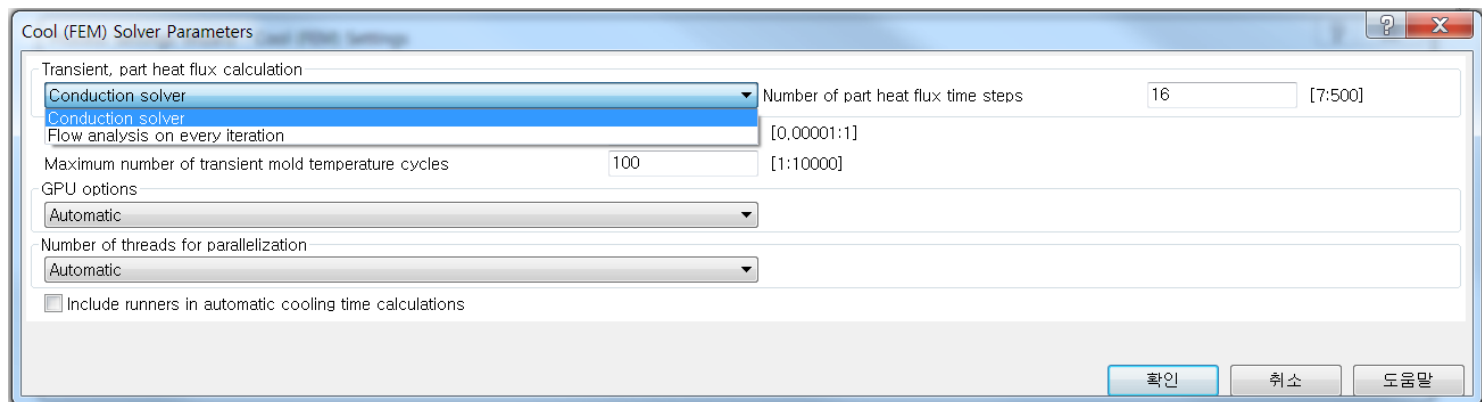
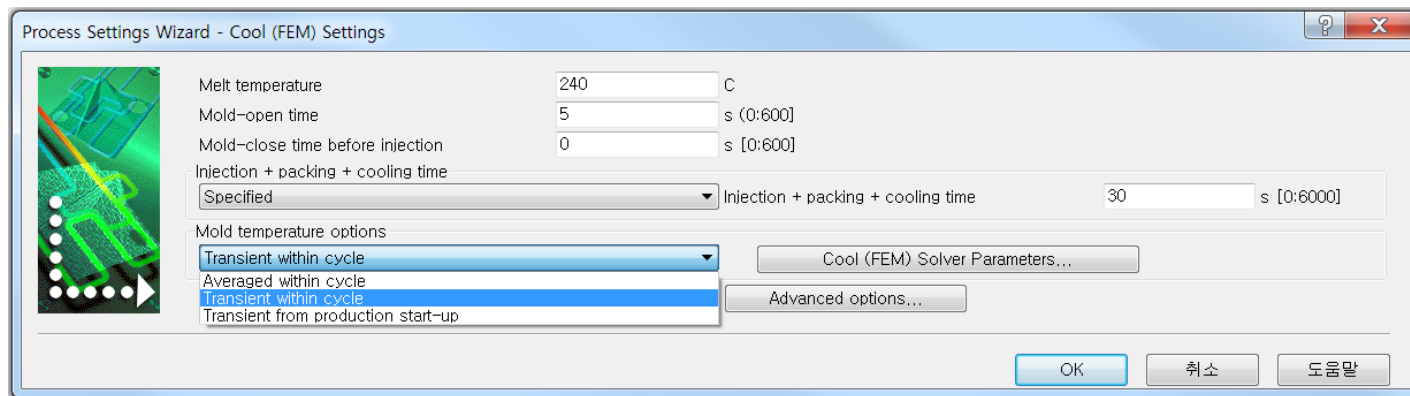
(4) 금형 3D mesh 생성

금형 3D mesh는 2D mesh 생성 완료 후에 “Create 3D mold Mesh” 의 “Tetra” 에 각각의 항목에 적합한 크기를 입력하고 “Mesh Now”를 클릭하면 생성된다. 여기서 아래와 같은 각 항목의 크기는 해석의 정확성과 해석 시간을 고려하여 적절한 값을 입력한다.



(5) 공정 조건 입력

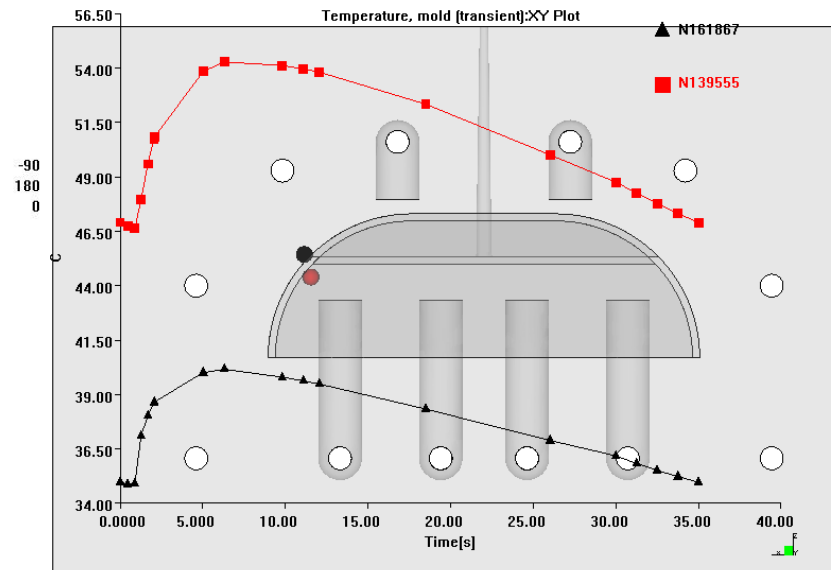
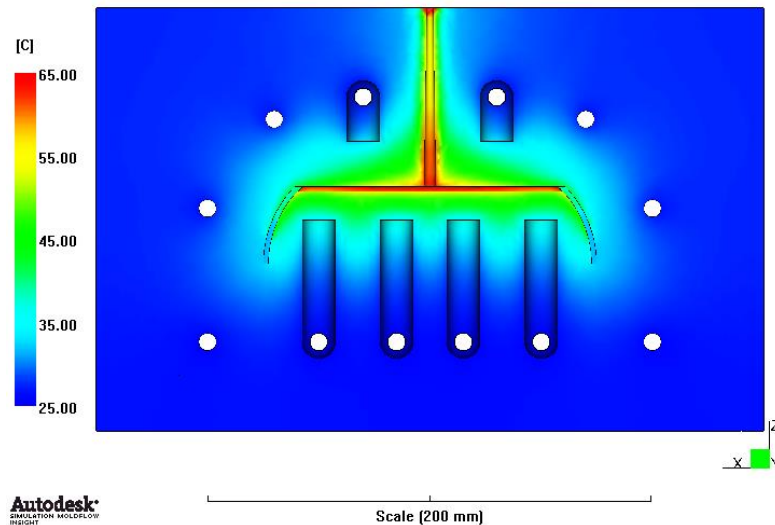
Cool(BEM)과 같이 냉각해석을 위하여 필요한 기본적인 수지온도와 사이클 시간을 입력하여야 한다. 그리고 Cool(BEM)과 달리 계산할 “mold temperature options”를 선택할 수 있다. “Advance options”에서는 수지 유동을 고려한 냉각해석을 고려하고 싶다면 “Part heat flux calculation”을 “Conduction solver” 대신 “Flow analysis on every iteration”을 선택할 수 있다. 이 경우 금형 온도 계산에 수지의 유동에 의한 heat flux 계산을 위하여 냉각과 유동이 동시에 병렬로 진행된다. 그러나 냉각해석에 필요한 시간은 “Conduction solver”에 비하여 상당히 오래 걸린다.

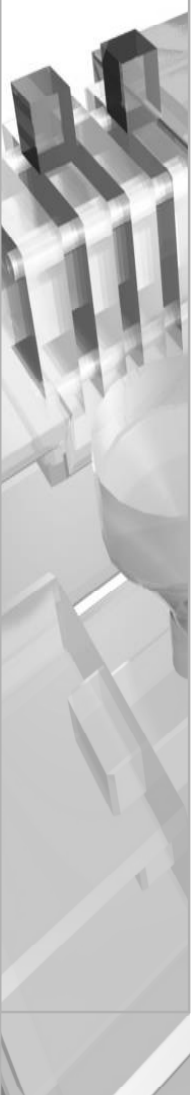


6-3) 해석 결과

Cool(FEM)의 주요 해석 결과는 금형 온도 계산 옵션에 따라 다르지만 “Transient”를 선택하였다면 금형 표면과 금형 단면의 사이클 시간에 따른 금형 온도이다. 특히 “Advance options”에서 “Conduction solver” 대신 “Flow analysis on every iteration”을 선택하였다면 게이트 주변과 같이 수지가 성형 과장에 지속적으로 유입되는 부분은 실제 금형과 같이 다른 동일 냉각 조건 영역에 비하여 금형 온도가 상당히 높게 계산된다.

Temperature, mold (transient)
Time = 1.679[s]



A detailed 3D CAD model of a mechanical component, possibly a mold or a bracket, shown in a light gray color. It features several vertical pillars and a complex base structure.

Autodesk®