

PM500027

## 사출기와 CAE 의 데이터 전송 플랫폼 Engel Sim-link 를 활용한 Moldflow 정확성 개선 사례 연구

A case study on Moldflow reliability improvement using the data transmission platform  
Engel Sim-link of CAE to injection molding machine

황 순환 이사(peter.hwang@ednc.com)

(주)이디앤씨 Ph.D / Director / Moldflow Expert

### Learning Objectives

사출성형 CAE 정확성의 변수를 정의할 수 있습니다.

Autodesk Moldflow 와 Engel Sim link 의 데이터 전송 워크플로우를 이해할 수 있습니다.

사출성형기의 성능을 고려한 CAE 를 구현할 수 있습니다.

CAE 와 사출기의 압력 프로파일을 비교하고 평가하며 개선할 수 있습니다.

### Description

최근 사출기 제조사인 Engel 사에서는 Sim Link 라는 어플리케이션을 통해 사출기와 CAE 를 연결하는 시스템 출시를 앞두고 있다. 사출기의 공정 조건을 CAE 로 입력하거나, CAE 조건을 사출기로 입력하는 양방향 데이터 전송이 가능한 시스템이다. CAE 를 생산 공정과 연결함으로써 향후 전체 제품 수명주기에서 CAE 가 중심적인 역할을 할 것이며 최적화를 가속화하여 생산성을 크게 향상시킬 것으로 예상된다. 즉 CAE 를 통해 최적화된 매개 변수를 설정, 데이터 기록으로 변환하여 사출 성형기에서 직접 사용이 가능하며, CAE 에서 가져온 매개 변수는 생산 공정을 위한 사출 성형기에 맞게 계량, 사출속도, 보압, 쿠션, 석백 등이 자동 조정된다. 결과적으로 완전한 데이터 일관성을 보장하고 시간이 많이 걸리고 오류가 발생하기 쉬운 데이터를 기계에 수동으로 입력하지 않아도 된다. 시뮬레이션을 통해 바람직하지 않은 프로세스 설정을 심층 분석할 수 있어 빠르고 정확하게 적용할 수 있으며, 최적화된 공정 데이터를 사출기 제어 장치로 가져올 수 있다.

## Speakers

황순환은 (주)제이애플, (주)상아프론테크, Moldflow Korea, Autodesk Korea 에서 근무한 이력이 있으며, 현재를 기준으로 12 년 이상 (주)이디앤씨에서 Autodesk 기술지원팀에서 근무하고 있다. Moldflow Basic Course 를 동료들과 함께 집필하였으며, CAE 와 머신러닝을 활용한 사출성형 최적화에 관한 연구를 주제로 공학박사를 취득하였다.

## Introduction

일반적인 제조 프로세스는 아이디어-컨셉-설계-제조-판매로 이어진다. 이 프로세스를 더 빠르게 완료하고, 품질을 높일수록 더 많은 이익을 얻을 수 있다. 따라서 각 단계의 납기와 품질을 높이기 위한 혁신적인 프로세스 개발을 위해 시간과 자금을 투자하는 것으로 기업은 경쟁력을 강화하고 있다. 그러나 오늘날 빅데이터, 데이터 사이언스, 클라우드 컴퓨팅, 모바일 및 소셜 네트워크, 협업 경쟁력과 같은 기술 트렌드는 더 나은 의사결정 시스템과 최적화된 프로세스를 요구하고 있다. 컨셉은 개인의 취향에 맞추어야 더 많은 프리미엄을 받고, 설계는 협업을 통해 빠르고 정밀하며 혁신적인 제품을 만들어야 하며, 제조는 3D 프린터와 같이 유연한 생산 형태로 점차 변화하고 있고, 판매 후 모바일과 웹을 통해 사용자의 경험이 실시간으로 소통되면서 이후 판매에 직접적인 영향력으로 작용하고 있다. 그래서 품질 문제가 발생하면 기업은 제품 리콜로 인한 시간과 비용과 같은 단기적인 영향뿐 아니라 브랜드, 시장 점유율, 주가와 같은 장기적인 영향을 미친다. 이러한 품질 문제를 해소하기 위해 제조 전 설계를 검증하기 위한 방법론 즉, 설계와 제조를 융합하는 기술이 CAE(Computer Aided Engineering: 컴퓨터 응용 공학)이다. 제조를 고려한 설계는 제조 현장에서 발생하는 시행착오를 미리 시뮬레이션에서 검증하여 개선할 수 있어 높은 품질을 짧은 납기로 제조할 수 있다.

사출 성형 공정은 복잡한 구조 형상과 여러 기능을 구현할 수 있으며, 아름다운 외관 처리 및 대량생산까지 가능하기 때문에, 다양한 분야에서 활용되고 있다. 그러나 혁신적인 제품을 구현하기 위한 프로세스는 복잡하고 정밀성을 요구하고 있어 성형가능구간이 좁고, 변수가 많아 성형하기가 까다롭다. 또한 강도를 높이기 위해 플라스틱 소재에 탄소 섬유나 유리 섬유를 첨가제로 사용하면서 뒤틀림과 같은 휨 변형으로 인한 치수 불량 발생된다. 이러한 불량의 원인을 제조 전에 예측하고 개선하는 것이 CAE 의 목표이다.

과거의 CAE 는 제조 환경을 모사하는 소프트웨어의 많은 가정으로 인한 한계, 물성 측정 기술의 부족, 낮은 컴퓨터 성능으로 인한 메시(Mesh) 숫자와 실험 회수 부족으로 제한된 환경으로 정성적인 예측 즉, 경향성을 파악하는 수준에 머물러 왔다. 여기서 목표는 최소한의 실험으로 최대의 효과를 얻는 것이며, 정밀성에 필요한 정량적인 예측의 신뢰성에 문제가

제기되어 왔다. 그러나 2021 년을 기준으로 사출 성형 CAE 는 40 년 넘게 제조 환경을 모사할 수 있는 소프트웨어가 업그레이드되고 있으며, 다양한 상황을 고려한 플라스틱 유변 물성 측정 기술을 확보하였고, 매년 수많은 물성이 측정되고 있다. 급격히 성장한 컴퓨터 성능으로 인하여 메시 제한 수준이 확장되고 많은 실험을 통한 통계적 접근이 가능하며, CAE 적확성을 확보할 수 있는 기반 기술이 발전되었다.

본 연구는 실제 사출 성형 공정과 CAE 예측의 편차가 발생하는 원인을 제시하고, CAE 적확성을 향상하기 위한 방법론과 실제 적용 사례를 나타내었다.

수업 길이 : 30 분

세션 유형 : 업계 소식

숙련도 수준 : Professional (Intermediate level)

강의 중점 사항 : Thought leadership and innovation

관련 주제 : 분석, 디지털 전환, 일의 미래, 시뮬레이션, 스마트 제조

키워드 : Data Analytics, Digital Prototyping, Digital Twin, Engineering Services, Fluid Flow, Forecasting, Paper and Plastics, Product Engineering, Product Manufacturing, Thermal

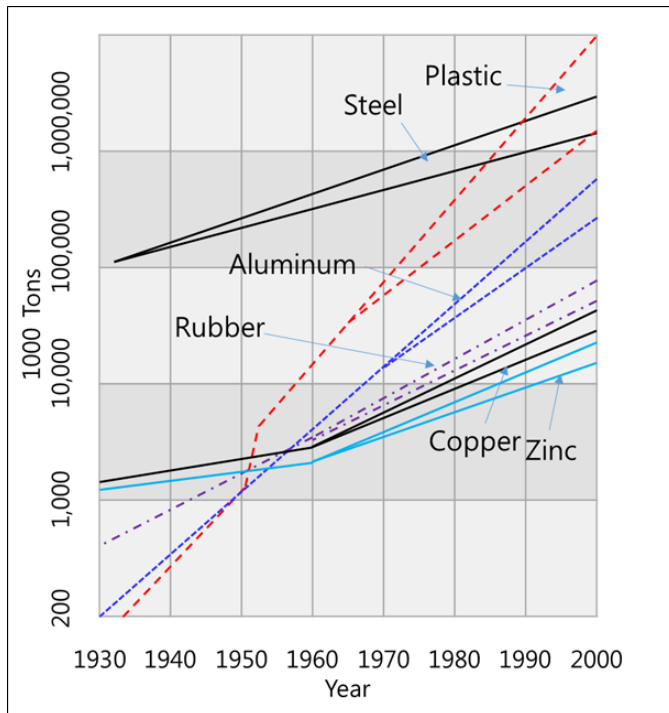
대상 청중 정의 : Product Users

대상 청중 직업 : CAE analyst/engineer, Industrial process engineer, Innovation Manager/Director, Manufacturing/production engineer, Molding specialist, Teacher/faculty

사전 요구사항 : 사출 성형 공정에 대한 일반적인 이해가 필요합니다. Autodesk Moldflow 의 기초 교육을 이수했거나 CAE 를 사용하는데 익숙해야 합니다.

## 제 1 절 연구 배경

최근 모든 자동차 회사들이 연비 향상을 위한 대책으로 경량화를 위해 노력하고 있다. 플라스틱은 기존의 철강 재료에 비해 가볍고, 생산성이 우수할 뿐만 아니라 첨가제의 종류, 형태 및 함유량에 따라 플라스틱 부품의 강성을 조절할 수 있어, 이미 수많은 자동차 부품들이 철강 재료에서 플라스틱 재료로 변경되었다. [그림 1-1]은 1930 년도부터 2000 년까지 세계의 재료별 소비량을 중량을 기준으로 나타내고 있다. 철강 재료는 1930 년대부터 지금까지 매우 많은 양을 소비하고 있지만, 최근 들어 플라스틱 재료가 사실상 철강 재료의 사용량을 앞질렀다(Rosato, D. V., et al., 2012).



[그림 1-1] 세계 재료 별 소비량(Rosato, D. V., et al., 2012).

사출 성형 공정은 복잡한 형상과 정밀한 부품을 대량 생산할 수 있는 장점으로 산업 분야에서 일상생활 제품까지 광범위하게 적용되고 있다. 최근에는 효율을 극대화하기 위해 여러 부품을 조립하여 하나의 제품을 만들던 공정을 한 번의 사출로 만드는 고기능 사출 성형품 제작을 하고 있다. 예를 들면 인서트 사출, 2 중 또는 3 중 사출, 복합재료를 이용한 고강도 제품 사출(이규세, 2015), 미세다공 사출(김주권, 2019), 가스 사출(강세호, 2017), 스택

사출(신장순 외, 2006), 다색 다층 사출 등이 있다. 이렇듯 많은 기능을 갖춘 성형품을 단기간에 정확하고 정밀한 제조를 하기 위해 실무에 적용할 과학적인 기술이 필요하다(신장순 외, 2008).

사출 성형 제품의 품질은 금형, 수지, 성형조건, 환경에 의해 영향을 받는다. 이러한 다양하고 복잡한 변수의 조합이 양품 범위를 벗어나면 불량 발생한다. 일반적으로 불량을 해결할 방법은 각 분야 및 사람마다 다르며, 각자의 과거 경험 즉, 노하우에 의존하는 경우가 많다. 문제 해결과 관련된 많은 변수 중 가장 효과적인 변수를 찾아 최적의 조건으로 변경하는 것은 누구나 원하는 바이지만 쉬운 일이 아니다. 모든 제품과 수지 물성, 금형을 경험할 수 없으며, 이미 경험한 제품이라도 다양하고 복잡한 상호 작용의 관계를 사람이 이해하는 것은 불가능하기 때문이다. 사출 불량 문제를 해결하기 위한 범용적인 방법은 이미 널리 알려졌지만, 하나의 문제를 해결하기 위해 공정 조건이나 제품 설계를 변경할 경우 다른 문제가 발생하기도 한다. 그 예는 아래와 같다.

★ 싱크마크를 개선하기 위해 보압 조건을 높이면 그 문제는 개선이 되지만, 변형 문제나 치수 문제가 발생할 수 있다.

★ 리브의 두께를 기본 살 두께의 50 ~ 75%로 설계하면 싱크마크는 개선되지만, 리브와 기본 살 두께의 편차로 인해 힘이 발생한다.

★ 미성형이 발생하여 수지의 용융 온도를 높이면 점도가 낮아져 성형은 될 수 있지만, 온도가 상승하면서 발생하는 가스로 인한 외관 불량이나 열화에 의한 탄화 현상이 발생할 수 있다.

이러한 불량을 개선하기 위해 제품 디자인 및 금형 구조를 변경하여 해결할 수도 있고, 사출 조건을 변경하여 개선할 수 있다. 제품 개발 초기 단계에서 변수 수정이 쉽게 가능한 제품 디자인에서 CAE를 활용하여 성형성 검증 및 불량 요인을 미리 제거하기 위해 다양한 설계 옵션을 평가해야 한다(Kennedy, P., et al., 2013).

그러나 CAE 결과를 얼마나 신뢰할 수 있을까? 그 대답은 때에 따라 다르다. 핵심 정보와 데이터를 확보하고 분석할 수 있는 경험을 가진 엔지니어가 있는가에 따라 결과물의 신뢰 수준은 달라질 수밖에 없다.

★ CAE를 위한 검증된 재료 물성은 확보했는가?

★ 우리가 적용하려는 공정이 CAE 가정에 어긋나거나 벗어나지는 않는가?

★ CAE와 실제 결과에 대한 비교 경험을 통해 상관관계를 파악하였는가?

★ CAE 범위와 불량 요인에 따른 주요한 변수를 이해하고 있는가?

★ 초기 제품 디자인에서 변경된 최종 수정 모델링을 확보하고 있는가?

★ 금형을 고려한 파팅라인 및 빼기 구배 모델링을 확보하고 있는가?

- ★ 사출 성형기의 성능 및 사출 환경과 조건을 이해하고 있는가?
- ★ 실물에 대해 정확한 측정 결과를 확보했는가?
- ★ CAE 절차는 결과 분석 전에 검증되었는가?
- ★ CAE 결과는 적절한 가시성 및 속성으로 표현되었는가?
- ★ CAE 는 선행 연구 단계, 양산 단계, 문제 해결을 위한 단계에 따라 다르게 접근하여 검증하고 있는가?

그러나 위의 정보가 모두 확보되면 실제와 CAE 를 그대로 일치할 수 있을까에 대한 대답을 쉽게 할 수 없다. 그래서 관련 업계 종사자들은 실제 사출 성형 공정과 CAE 편차를 최소화하기 위한 검증 방법론과 CAE 정확성 개선 사례에 대한 관심이 뜨겁다.

## 제 2 절 연구의 필요성

짧은 납기에 높은 품질의 제품을 생산하기 위해 기업들은 시간과 자금을 투자하고 있으며 더 나은 의사결정 시스템과 최적화된 프로세스를 위해 제조 전 설계를 검증하는 시스템 즉, 설계와 제조를 융합하는 CAE 기술이 주목받고 있다. 국내 CAE 의 초기 연구들은 단순 제품에 대하여 CAE 로 사출 성형 공정을 구현하는 데 집중 되었다. 4 각 캐비티를 충전단계를 예측하는 현상을 수치 모사 기법으로 해석하였다. 유체의 점탄성 거동을 예측하기 위해 저밀도 폴리에틸렌을 선정하여 시간 변화에 따른 충전 현상을 모사하였다(이기준 외, 1989). 인장 시편 형상의 사출 성형 과정에서 금형 온도, 수지 온도, 보압 시간의 변화에 따른 선형수축률과 중량의 변화를 연구하였으며 CAE 의 결과보다 실험값이 0.6% 크게 나타났다. 특히 수축은 30 일까지 진행되어 정밀성형에서는 경시 변화가 중요한 인자임을 확인하였다(유중학, 1995).

최근 연구들은 특정 제품이나 공정에 대하여 CAE 를 통해 예측하거나 최적화 방법론을 개발하였다. 최적화 연구 사례로는 자동차 내외장 제품인 범퍼와 대시보드 모델의 강건 설계를 위해 품질변동의 원인이 되는 잡음 인자에 둔감한 설계 조건을 찾는데 CAE 를 이용하여 다수 품질 특성 중 설계자의 의도를 고려한 선호함수를 유도하고 직교 배열에 기초한 설계공간축소법을 대화 식으로 개발하였고(김광호, 2009), 박육 제품을 성형하기 위해 금형의 급속가열 장치를 개발 및 두께 0.5 ~ 1mm 시편에 대한 사출 성형 CAE 를 통해 금형의 온도분포를 예측하여 캐비티 벽면의 유동 거동에 따른 Air-trap 불량을 관찰하였다(김옥래, 2010). 제품 표면의 미세 패턴에 대한 성형성 및 이형성을 수치 해석적 접근하였는데, 미세 패턴을 제외한 형상은 Shell 메시를 적용하여 Global 해석을 진행하여 해석 시간을

단축하였으며, 미세 패턴은 Global 해석 결과를 기반으로 경계조건 및 초기조건으로 사용하는 Local 해석을 진행하였다(박시환, 2011). 또한 API 를 활용하여 목적함수를 제품표면의 온도에 대한 평균편차로 설정하고, 두께가 균일한 경우 플라스틱 제품의 방출 열량을 일정한 크기로 구분하여 형상적응형 냉각회로에 대한 자동최적설계 방법을 개발하였으며(최재혁, 2015), 사출 성형 CAE 를 활용하여 가스사출제품의 내벽품질에 영향 도를 파악하기 위해 일반 사출과 비교하였다. 유동 과정에서 발생한 유동 선단의 온도 변화에 대한 기준과 사출 압력의 기준을 선정하여 예측하였다(강세호, 2017). 자동차 헤드램프 베젤 제품의 CAE 힘 예측 정확성을 개선하기 위해 수치 물성의 정확성이 CAE 개선에 가장 민감도가 높았으며, 기계적 물성 중 CTE 가 중요한 인자임을 확인하였고 사출기 노즐의 압력 강하, 냉각 시뮬레이션 순서로 민감도가 높음을 확인하였다(황순환, 2017). 그리고 응답속도 분석을 위해 스파이럴 성형품을 사출 후 충전 길이 변화를 CAE 를 통해 분석하여 충전에 미치는 영향을 확인하였다(홍청민, 2020). 위의 연구들은 CAE 가 현실과 일치한다는 가정이 필요하다. 그러나 2019 년 6 월 27 일에 개최된 한국금형비전포럼 컨퍼런스에서 국내 최고의 전자 회사 두 곳의 사장님과 부사장님의 발표에서 CAE 는 제조 Process 로 표준화되었지만 CAE 해석 정확도가 불일치하며, 이론과 실제의 결과 Data 의 정확도 향상이 목표라고 강연 중 설명하였다.

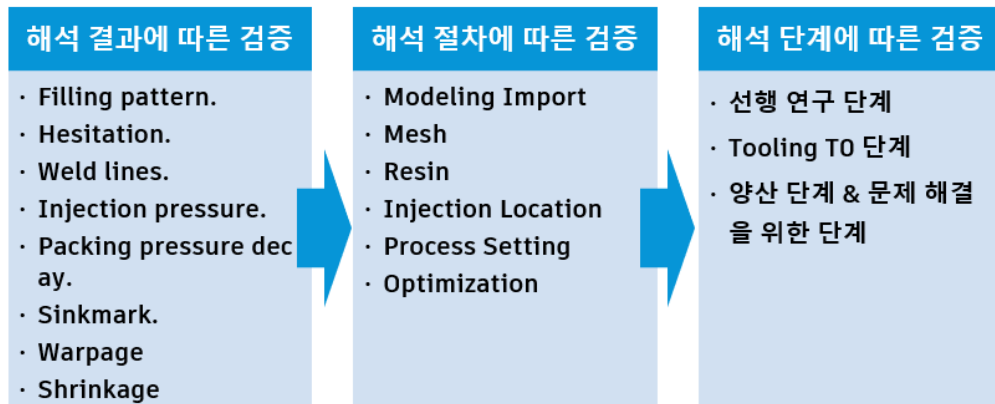
최근 사출 성형공정을 컴퓨터로 시뮬레이션하고 최적화하는 방법론이 업계의 표준으로 만들어지고 있다. 사출성형분야의 CAT 방법론으로 CAE 를 활용한 수치 해석이 주를 이루고 있는데 [표 1-1]은 사출 성형 CAE 의 다양한 변수들을 연꽃 기법으로 나타냈다. 이 변수들은 모두 사출성형의 변수이자 CAE 정확성과 연관되어 있다. 사출 성형 CAE 는 다양한 물성 정보와 사출기, 공정변수, 그리고 형상 정보를 유한요소로 나누어 가정 기반의 지배방정식을 이용하여 계산한다. 이러한 조건이 하나라도 맞지 않는다면 CAE 결과를 보장할 수 없다. 플라스틱 물성 정보는 Autodesk Moldflow 에 약 10,000 개 이상 저장되어 있지만(Autodesk Moldflow Help, 2021), 측정 품질은 물성마다 다른 수준을 이루고 있다.

Modification of part shape for mold	Gate Type Positioning Number of Gate	Eject System	Quality Indicator	Viscosity Property	pVT Property	Design change	Structural Integrity	Thickness Size Tolerance
Machining Error	<b>Mold Design</b>	Cold or Hot runner system	Thermal property	<b>Resin Property</b>	Mechanical Property	Insert Ribs & Boss Fasteners Snap-fit	<b>Part Design</b>	Creep Stress Strength fatigue
Vent system	Cooling Channel	Series Parallel Circuit	Transition Temperature	Ejection Temperature	Filled or unfilled	Resin Property	Quality and Cost	Cycle time
Mid plane Dual domain 3D mesh	Number of Meshes & Laminae Across thickness	Mold-melt Heat Transfer Coefficient	<b>Mold Design</b>	<b>Resin Property</b>	<b>Part Design</b>	Performance	Maximum Injection Speed	Maximum Injection Pressure
Isolate cause of warpage Consider Corner Effect	<b>CAE Parameter</b>	Inertia gravity wall slip Intermediate	<b>CAE Parameter</b>	<b>Injection Molding CAE Accuracy</b>	<b>Injection Machine</b>	Maximum Clamp Force	<b>Injection Machine</b>	Response Time
Convergence	Fiber Analysis Option	Venting Coreshift Analysis	<b>Data Management</b>	<b>Process Setting</b>	<b>Environment</b>	Screw(Ram) Diameter	Intensification Ratio	Screw(Ram) Diameter
Data Collection	Design Standard	CAE Standard	Filling control	V/P Switch over	Packing Time	Ambient Temperature	Coolant pump performance	Part management after ejection
Data Science	<b>Data Management</b>	Optimization Technology	Cooling time	<b>Process Setting</b>	Packing Pressure	Feed system cutting	<b>Environment</b>	Temperature controller system
Automated data collection using API	Machine Learning	Problem Solving Methodology	Starting Ram Position	Melt Temperature	Mold Temperature	Measurement	Aging effect	Eject System (Automated robot)

[표 1-1] 사출 성형 CAE 변수

사출 성형 CAE 결과를 검증하는 방법은 실제 사출과 CAE 결과를 직접 비교하는 것이 일반적이다. 그러나 복잡한 상관관계를 갖는 검증이 필요할 때, 검증 방법을 [그림 1-2]와 같이 세부적으로 나눌 필요가 있다. CAE 결과를 직접적으로 비교하는 검증은 충전 패턴이나 정체 현상, 웰드라인 위치, 사출 압력, 압력이력, 싱크마크, 변형 및 수축을 비교할 수 있다. 그러나 실험 결과와 같이 CAE 결과를 개선하고 싶다면, CAE 절차에 따른 검증을 진행해야 한다.





[그림 1-2] 해석 결과/절차/단계에 따른 다양한 검증 방법

절차에 따른 검증은 CAE 작업이 올바른 방법으로 적용되었는가를 검증하는 프로세스로 아래와 같은 항목을 검증해야 한다.

- ★ 모델링은 최종 모델링이 적용되었는가?
- ★ 금형을 고려한 모델링인가?
- ★ 메시의 경우 형상을 대표할 수 있는 개수를 갖추었는가?
- ★ 중횡비는 적절한가?
- ★ 메시 진단 후 문제는 없는가?
- ★ 듀얼 도메인 메시의 경우 두께 인식은 적절하게 되었는가?
- ★ 3D 메시의 경우 레이어는 적절한가?
- ★ 플라스틱 수지의 물성은 어느 범위로 측정되었는가?
- ★ 대푯값 범위는 어떠한가?
- ★ 힘 예측 시 기계적 물성은 측정되었는가?

해석 범위와 목표는 해석 단계에 따라 다르다. 선행 연구 단계의 경우 아직 정확한 금형 설계 정보를 확보하지 않은 상태로 정확한 예측보다 초기 결정 단계에서 주요한 의사결정을 내릴 수 있는 내용에 초점이 맞춰져 있어야 한다. 그러나 양산단계나 문제해결에서는 정량적인 예측 및 문제 해결을 할 수 있는 방법론을 확보해야 한다. 결과적으로 일정한 품질의 CAE 결과를 확보하기 어렵기 때문에 이전 프로젝트의 경험을 통계적인 분석으로 기대하는 결과 도출이 필요하다.

머신러닝이란 AI의 한 분야로 사람이 학습하는 것처럼 컴퓨터가 데이터를 통해 학습함으로써 기대하는 지식을 추출하는 것이다. 머신러닝은 1950년대 시작되었지만 최근

현저한 발전을 이루게 한 기술이 바로 딥러닝이다. 딥러닝 기술은 다층 구조의 인공 신경망 즉 은닉층과 은닉층에 존재하는 뉴런을 통하여 입력변수 및 출력변수의 관계를 파악한다. 입력된 데이터를 신경망을 통하여 예측된 값의 편차를 최소화하도록 각 레이어의 뉴런에 연결된 가중치와 편향을 반복적으로 훈련함으로써 우수한 신경망 모형을 완성한다. 이러한 모형은 과거의 사출 성형 CAE 에서 시뮬레이션 시간의 한계 때문에 고려할 수 없었던 많은 양의 변수를 처리하여 최적의 결과를 얻는 데 도움을 줄 수 있다. 특히 역설계와 같은 정량적인 해석을 진행하기 위해서는 보다 신중한 프로세스를 적용해야 한다. 과거에는 정량적 힘 예측임에도 사출 공정 조건은 사출 작업자에 의해 결정되었고, CAE 사출 조건 결과는 무시했다. 그러나 CAE 결과 신뢰성을 높이기 위해서는 공정 조건의 불확실성이 얼마나 CAE 결과에 영향력이 있는지 파악해야 한다. 또한 사출 성형 CAE 를 1 회 진행하는데 작게는 1 시간에서 많게는 수일이 소요된다. 다양한 변수를 고려하기 위해 매번 새로운 프로젝트마다 수많은 해석 Case 를 진행할 수는 없기 때문에 사전에 유사 제품에 대하여 머신러닝을 진행하고 최적화 기법을 활용하여 최적의 성형 조건 확보하는 것이 필요하다.

### 제 3 절 연구의 범위와 목적

본 연구의 첫 번째 목적은 사출 성형 CAE 예측 정확성 향상으로 정교한 데이터를 확보하는 방법과 사례를 만드는 것이고, 두 번째 목적은 CAE 데이터 기반 머신러닝을 통한 데이터 분석 및 예측 모델링을 구축하여, 사출 성형 최적화 프로세스를 구현하고자 한다.

CAE 는 제조 전 다양한 변수를 시뮬레이션으로 검증하고 최적의 값을 찾을 수 있어 사출 성형 제조 프로세스로 표준화 되었다. 그러나 정확도 불일치로 인하여 중요한 의사결정에서 신뢰를 얻지 못하고 있다. CAE 개발사는 쉽고 자동화된 소프트웨어 개발로 사용자의 진입 장벽 낮아졌지만, 오히려 제조 방법과 CAE 원리를 이해하지 못한 상태에서 연구가 확대되어 CAE 정확성에 대한 적신호가 켜진 상태다. 과거의 CAE 는 제조 환경에 대한 현상을 모사하는 소프트웨어의 제한된 한계, 여러 상황과 환경의 변화에 따른 물성을 평가하고 측정하는 기술의 부족, 컴퓨터 성능의 제한으로 인해 메시 숫자와 연구의 경우의 수를 충분히 적용할 수 없어 CAE 정확성에 대한 기대가 크지 않았다. 즉 최소한의 실험으로 최대의 효과를 얻기 위한 연구 및 예측에 집중되었다. 그러나 최근에는 현실의 제조 환경을 보다 폭넓게 모사할 수 있는 소프트웨어의 업그레이드와 다양한 상황을 고려한 물성 측정 기술, 급격히 성장한 컴퓨터 성능으로 인한 메시 증가와 많은 Case 연구로 정확성을 확보할 수 있는 기반 기술이 발전되었다. 그리고 인공지능(Artificial Intelligence)의 한 축인 머신러닝 기술이 발전하여 예측

성능이 높고, 결과에 대한 설명이 가능해짐에 따라 CAE 와 머신러닝을 융합하여 사용할 경우 상용 소프트웨어에서 전용 예측모델을 생성할 수 있어 보다 빠르고 정확한 예측이 가능하다. 이러한 전용 예측 모델을 기반으로 전역 최적화 모델을 적용할 경우 사출 성형 공정 최적화 프로세스가 구현될 것으로 사료된다.

본 논문의 2 장은 사출 성형 CAE 의 이론적 배경이 되는 선행 연구를 조사하여 정확성 저하의 원인이 되는 수지 물성 측정 방법 및 CAE 메커니즘을 설명하였다. 3 장은 CAE 정확성의 주요 인자를 설명하고, 정확성 향상을 위한 변수를 제시하였다. 그리고 CAE 정확성을 향상하기 위한 방법으로 CAE 에 적용하는 플라스틱 재료의 유변 물성을 평가하고 복제하기 위한 편집 방법, 제품 형상 및 금형 모델링을 현실에 맞게 복제할 방법, 실제 사출 성형 공정 조건을 그대로 복제하는 방법, 사출기의 입력 조건이 아닌 출력 조건과 성능을 복제하는 방법에 대하여 설명하였다. 사출 유동 해석을 검증하기 위해 사용되고 있는 스파이럴 금형의 형상 특성이 유동 거리를 대표할 수 있는가를 평가하기 위해, 스파이럴 형상의 폭의 변화와 막대 형상, 판 형상의 유동 거리를 비교하여 유동 해석에 미치는 영향을 확인하였다. 또한 PC+ABS 수지의 유변 물성 중 영점 점도와 압력의존성계수를 수정하여 유동 거리 예측 개선 방법을 제시하였다. 이러한 방법론을 활용하여 에어백 커버 제품을 실제 사출한 결과와 CAE 예측 결과를 비교하였으며 정확성 개선을 위해 어떠한 변수를 수정해야 하는지 사례를 제시하였다. 4 장에서는 복합재료의 사출 성형 공정조건 변화에 따른 사출압력, 형체력, 휨 결과에 대하여 사출 성형 CAE 소프트웨어 Autodesk 社의 Moldflow Insight 로 데이터를 확보하였다. 그리고 사출 성형 조건 최적화를 위해 PIDOTECH 社의 PIA<sub>n</sub>O 를 이용하여 ANN 으로 알려진 MLP 로 예측 모델링을 만들었으며(황순환 외, 2018), HMA 를 활용하여 MLP 기반 구속조건을 만족하는 최적의 사출 성형 조건을 도출하는 전 과정을 설명하였다. 그리고 설명 가능한 머신러닝 기법인 Decision-tree 모델을 RapidMiner 社의 RapidMiner Studio 를 활용하여 생성하였으며, 입력 변수인 사출 성형 조건과 목표함수인 휨 변형량과 구속조건인 형체력, 사출압력과의 관계를 분석하였다.

본 연구를 통해 CAE 정확성 향상을 위한 방법론과 머신러닝을 이용하여 CAE 작업자가 접근하기 힘들었던 사출 성형 조건 최적화 프로세스를 제안하였다.

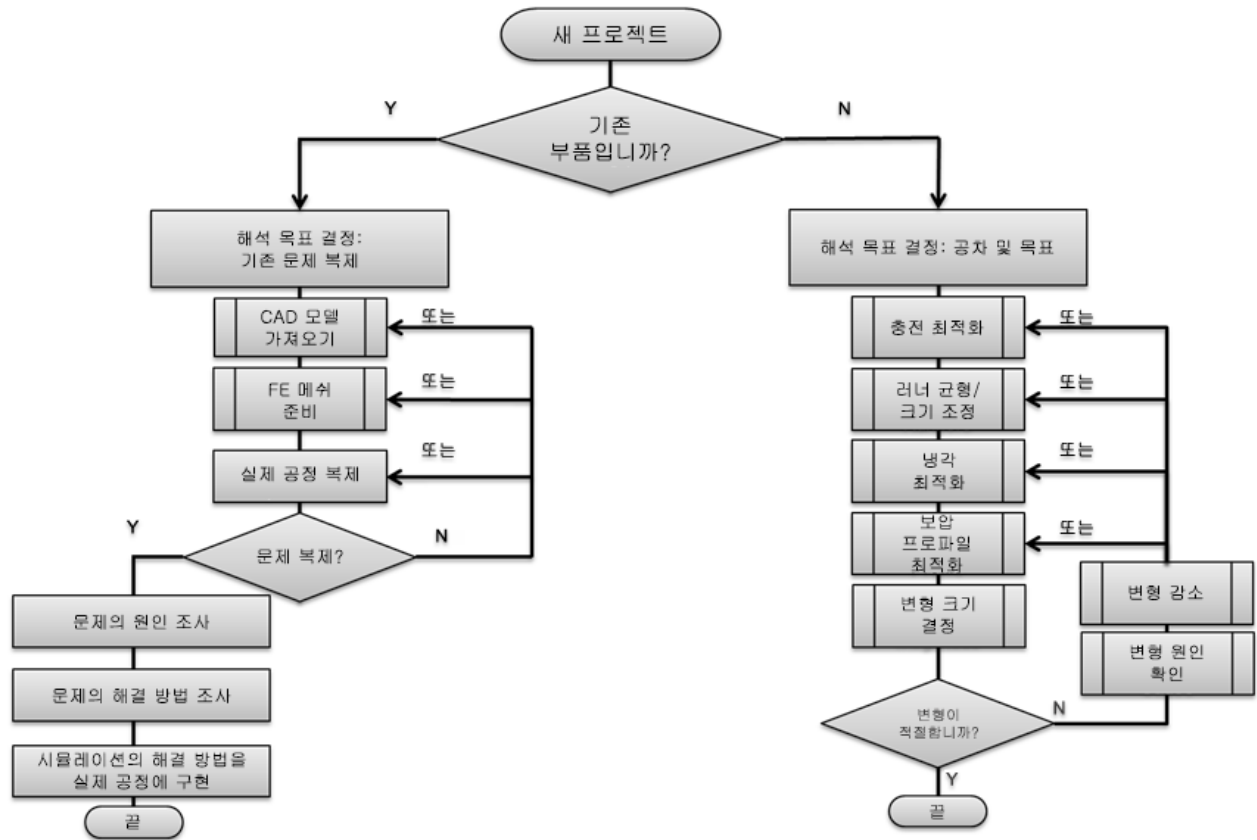
## 제 4 절 사출 성형 CAE 적확성 개선 연구

### 1) 적확성 정의

CAE 결과를 평가할 때 정확성, 신뢰성, 적확성 등 다양한 용어를 혼용해서 사용하고 있다. 적확성의 적(的)은 목표, 과녁을 의미하며 조금도 틀리거나 어긋남 없이 정확하고 확실하다는 뜻으로 CAE 결과를 평가할 때 적합한 용어이다. 정확성의 정(正)은 바르고 확실한 성질을 뜻하고 있어 '정확한 방법으로 CAE 를 운영한다.'고 사용하기에 적합하다. 신뢰성은 굳게 믿고 의지할 수 있는 성질을 뜻하기 때문에 'CAE 적확성을 향상하여 신뢰성을 높이자.'라고 사용하기에 적합하다. 대부분의 CAE 엔지니어들은 CAE 적확성 확보를 위한 방법론 즉, 벤치마킹에 대한 많은 고민을 하고 있다. 벤치마킹은 예측된 결과와 실제 결과를 비교하여, 품질 변수를 평가하는 것이다. 결과적으로 나중에 의사 결정을 할 때 실제와 해석이 달라서 발생할 수 있는 위험을 방지하고, 소프트웨어를 사용할 수 있는 자신감과 경험을 얻을 수 있다. Moldflow 社の 설립자인 Colin Austin 은 1970 년대 후반 일본 도쿄에서 도시바를 위해 최초로 문서화된 CAE 벤치마킹을 수행했다(Moldmakingtechnology, 2021)고 한다. 벤치마킹을 성공적으로 수행하기 위해서 주요한 변수를 정의하고 고려해야 한다. 즉, 생산 중인 성형품의 사출 현상을 그대로 복제할 수 있는지를 확인하는 것이다. 이것이 가능하다면 CAE 상태에서 변경 사항이 생산 부품에 적용될 경우에도 동일하게 복제될 것이라는 확신을 가질 수 있다.

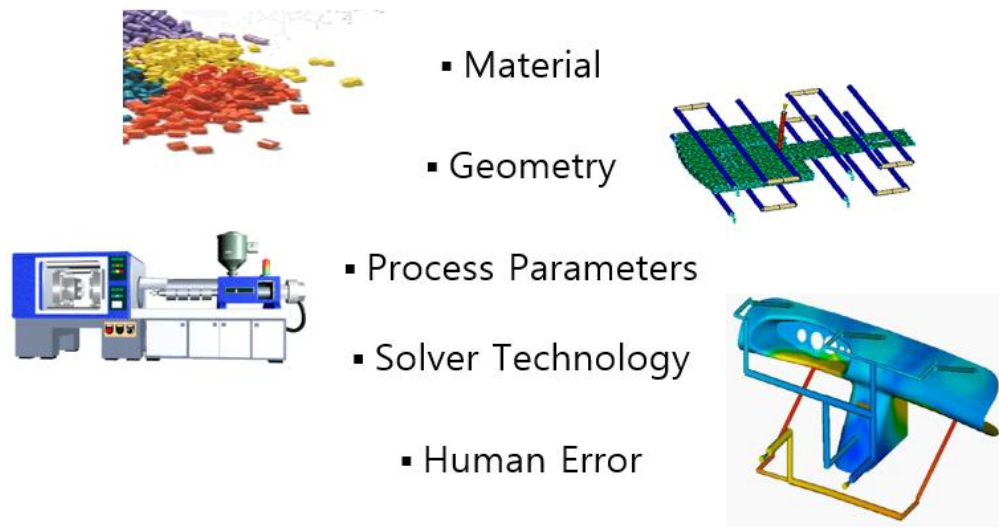
### 2) 사출 성형 CAE 작업 순서 및 주요 인자

사출 성형 CAE 를 시작할 때 기본 절차는 [그림 3-1]과 같다. CAE 목표는 기존 부품인지 새로운 부품인지에 따라 달라진다. 기존 부품이 아니면 성형 가능성을 예측하고 개선하는 것이다. 또한, 충전 최적화, 러너 균형을 위한 치수 결정, 냉각 최적화, 성형 조건 최적화를 통해 제품 변형을 예측하고 공차 범위를 벗어났을 때 변형의 원인을 파악하고 변형 감소를 위한 대책을 마련하는 것이다. 그러나 기존 부품의 경우 이미 결과물이 있어서 CAE 목표는 기존 결과물의 현상을 복제하는 것이다. 문제 현상을 구현하기 위해 진행되는 프로세스는 정확한 CAD 모델을 가져와서 적절한 메시를 준비하고 실제 공정을 구현해야 한다.



[그림 3-1] 사출 성형 CAE 해석 순서(Autodesk Moldflow Insight Advanced Cool and Warp, 2016)

사출 성형 필수 요소는 사출기, 사출 공정조건, 금형, 플라스틱 수지이며 옵션으로 주변 장치인 온도 조절 장치(냉각기, 가열기, 온조기, 냉각수 펌프), 핫러너 컨트롤러, 취출 장치 등이 있다. CAE 는 실제 사출 성형 공정의 필수장치 및 주변 장치에 대한 정보를 정확히 반영해야 한다. 그러나 CAE 실무를 할 때 아직 모든 조건이 결정되지 않은 상태이거나 정보를 확보하지 못한 상태에서 선행 연구 단계로 진행할 때가 많아서 어려움이 발생한다. 이때 주요 인자를 파악하고 과거의 경험을 토대로 적절한 값을 선정해야 할 때도 있다. 주요 인자 및 변수값이 CAE 에 어느 정도 영향력이 있는지를 파악하고 있다면 아직 결정되지 않은 변수를 조정하여 최적의 제품개발을 이뤄낼 수 있다.



[그림 3-2] 사출 성형 CAE 정확성 주요 인자

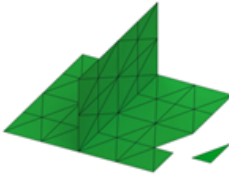
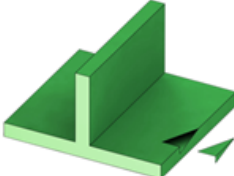
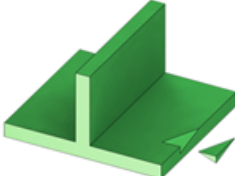






CAE의 주요 인자는 사출 성형의 필수 요소 조건과 CAE 변수 조건이 있다. 먼저 사출 성형의 필수 조건인 사출기 성능(최대사출 압력, 최대형체력, 최대유량, 증압비 등), 사출 공정조건(사출 속도, 보압력 및 보압 시간, 수지 온도 및 금형 온도 등), 금형 정보(피드 시스템, 냉각 시스템, 금형 재질 등), 플라스틱 수지 물성 정보(수지 사용 조건, 점도 특성, 열적 특성, 수축 특성(pvT), 기계적 특성)가 있다. CAE 변수 조건은 실제 형상 모델을 해석이 가능한 상태로 변경하는 메시 타입 선정 및 조밀도 결정, 솔버 옵션이 있으며, 이를 전체적으로 관장하는 해석자의 경험이나 준비된 데이터가 있다. 사출 성형 CAE의 주요한 목표는 아래와 같다.

- ★ 주어진 제품, 성형 조건, 수지 물성으로 성형 가능성 유무
- ★ 성형품의 품질 필요조건(평탄도, 성형압력, 전단응력, 온도분포)에 적합한 수지 결정
- ★ 최적의 사출 성형 조건(사출 속도, 보압 크기와 시간, 금형 온도, 수지 온도, 최대 사출 압력, 필요 형체력, 냉각수 온도) 결정
- ★ 성형품의 품질 필요조건을 만족하는 금형의 게이트 개수 및 위치 최적화
- ★ 웰드라인 위치 파악 및 원하는 위치로 변경하기 위한 제품 두께 최적화 또는 게이트 위치 변경 결정
- ★ 에어트랩 발생 여부 확인
- ★ 형상 변경, 두께 변경에 따른 품질 변화
- ★ 균형 충전을 위한 러너 크기 결정

- ★ 리브의 성형성 검토 및 리브 두께 변화에 따른 변형 가능성 검토
- ★ 금형의 온도 균일화를 위한 냉각라인 최적화
- ★ 스크랩 최소화를 위한 러너, 스프루 치수 결정
- ★ 외관 표면 불량(싱크마크, 플로우마크, 실버스트리크, 전사불량 등) 예측 및 개선
- ★ 사출 후 변형 예측 및 개선

### 3) 제품 형상 복제

CAE 를 위한 제품 형상 복제는 CAE 정확성 확보를 위한 필수 요소이다. 형상이 잘못된 경우 CAE 는 본질적으로 다른 제품을 분석하는 것이다. 형상 복제 품질은 CAE 를 진행한 모델링 형상과 실제 금형에 적용된 형상이 얼마나 유사한지를 나타낸다. CAE 는 형상을 메시로 정의하기 때문에 형상의 과도한 단순화 과정에서 잘못된 두께 인식이나 형상 오류, 금형 설계과정에서 파팅 라인을 결정하고 빼기 구배를 적용할 경우 두께 변경이 발생할 때 이러한 사항을 반영시키지 못할 때 형상 복제 품질은 낮아진다. 그래서 정확성 확보를 위해 메시 작업 후 각 영역의 형상 두께와 총 체적이 올바른지 확인해야 한다. [그림 3-3]은 CAE 상용 소프트웨어 Autodesk Moldflow Insight 에서 사용 가능한 메시 타입을 설명하고 있다. 메시 타입에 따라 가정이 다르기 때문에 CAE 결과는 달라진다. 미드플레인 메시로 적용할 경우 두께는 사용자가 직접 정의하기 때문에 정확하게 입력해야 한다. 그러나 듀얼 도메인 메시의 경우 자동으로 두께가 입력되어 두께 진단을 실행하여 확인한다. 3D 메시는 두께 방향으로 메시가 있어 두께를 잘못 인식하는 경우는 없으나 두께 방향으로 레이어를 어떻게 결정하는가에 따라 정확성은 달라진다. 형상 복제 품질을 높이기 위해서는 적절한 메시 타입, 조밀도, 중형비를 결정해야 한다.

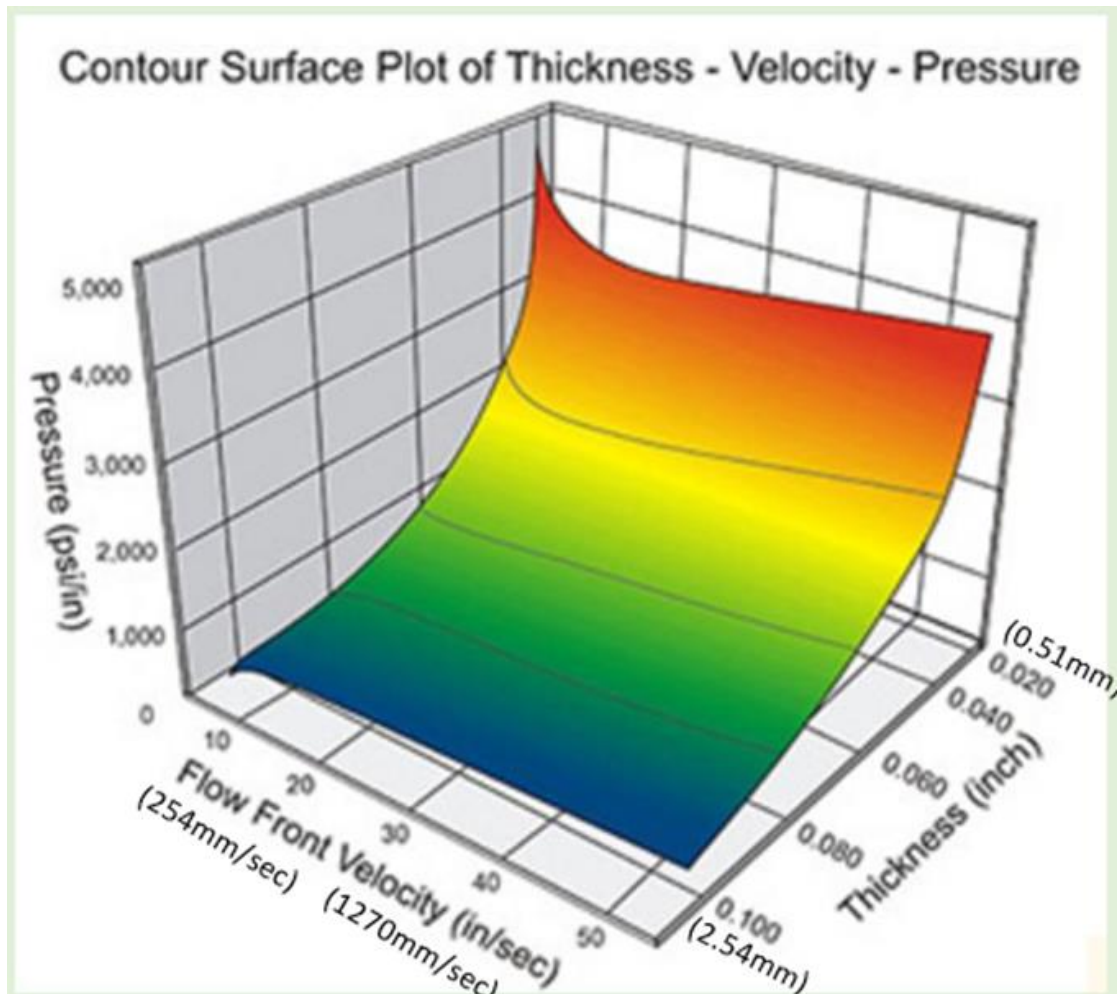
Midplane	Fusion Dual Domain™	Tetrahedral 3D Volume
		
		
Triangle 	Triangle 	Tetrahedral 

[그림 3-3] 메시 타입 설명(황순환 외, 2018)

#### 4) 사출 속도 복제

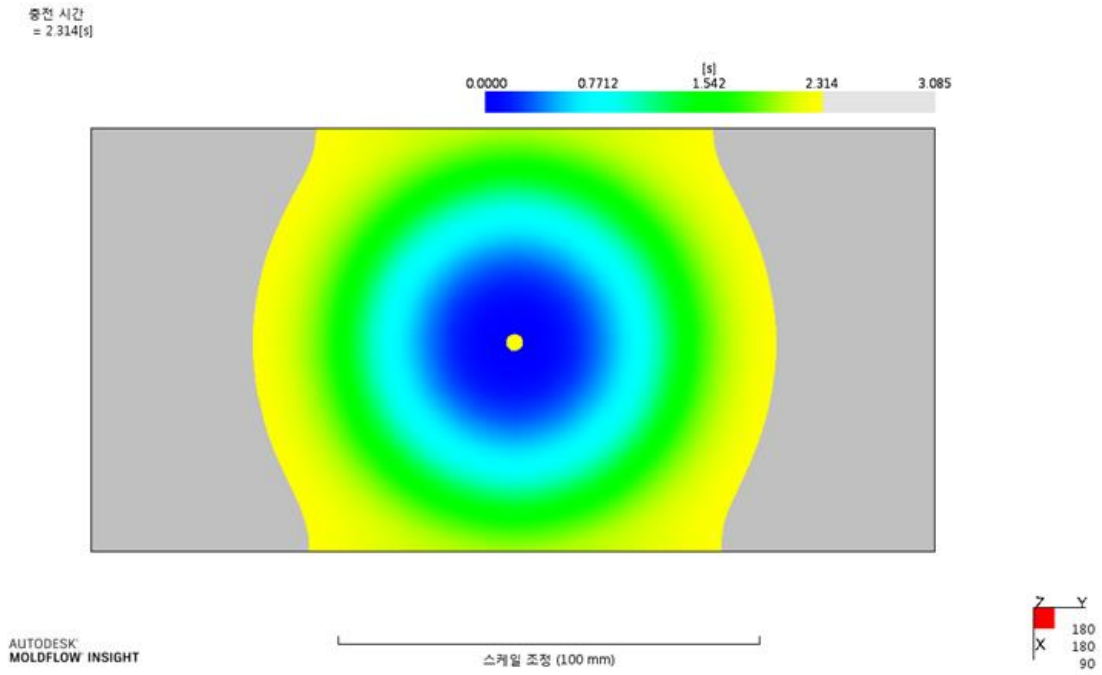
유동길이(L: Flow Length)와 두께(t: Wall Thickness)의 비를 유동비(L/t)라고 하는데, 사출 현장이나 금형 설계자들은 성형성을 쉽게 예측하기 위해 유동비를 이용한다. 과거에는 엔지니어가 유동비 표를 가지고 있다면 절대적으로 신뢰하기도 했다. 그러나 유동비는 일정하지 않으며 사출 속도에 따라 유동비는 달라진다. 일반적인 유동비(L/t) 표에는 사출 성형 공정의 충전 과정에 중요한 요소인 사출 속도가 빠져 있으며, 사출 속도 복제는 사출 성형 CAE 에서 유동 거동 예측의 핵심 요소이다.



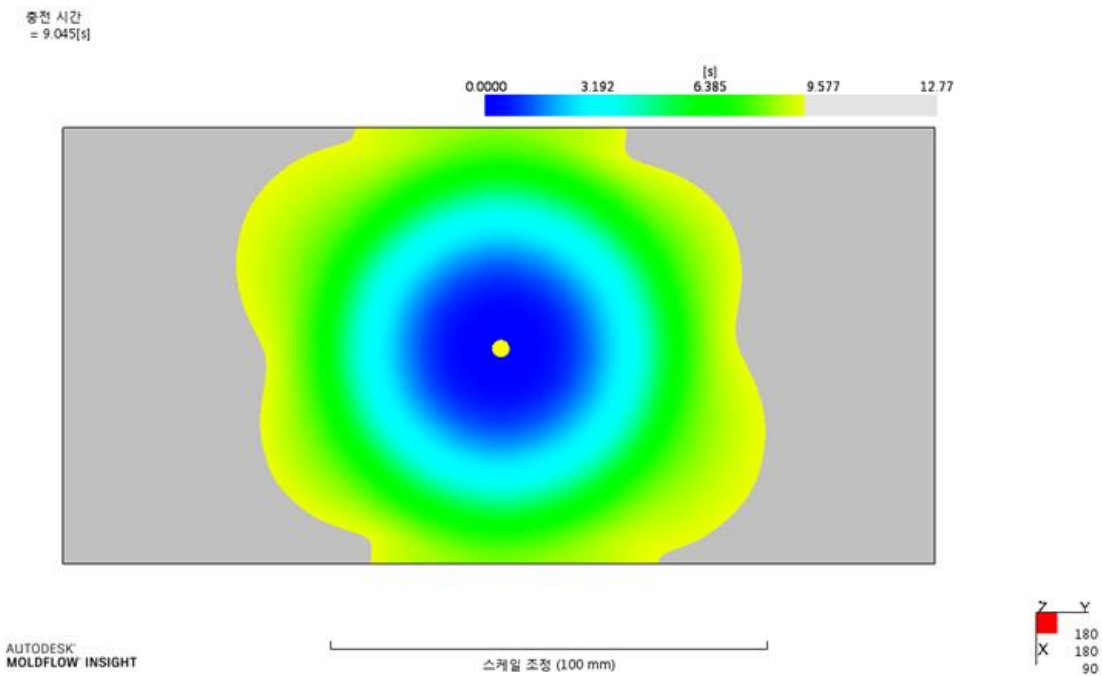


[그림 3-4] 두께 - 속도 - 압력 유동비 반응 표면 결과(Beaumont Advanced Processing, 2021)

[그림 3-4]는 버몬트테크놀러지에서 속도 인자를 고려한 유동비 특허 Therma-flo™ 결과이다. 사출 속도에 따라 유동 거리가 비선형적으로 변화되고 있는 것을 확인할 수 있다. 즉 유동 해석 정확성을 확보하기 위해서는 사출 성형공정에서 실제 사용하고 있는 사출 속도를 입력해야 한다.

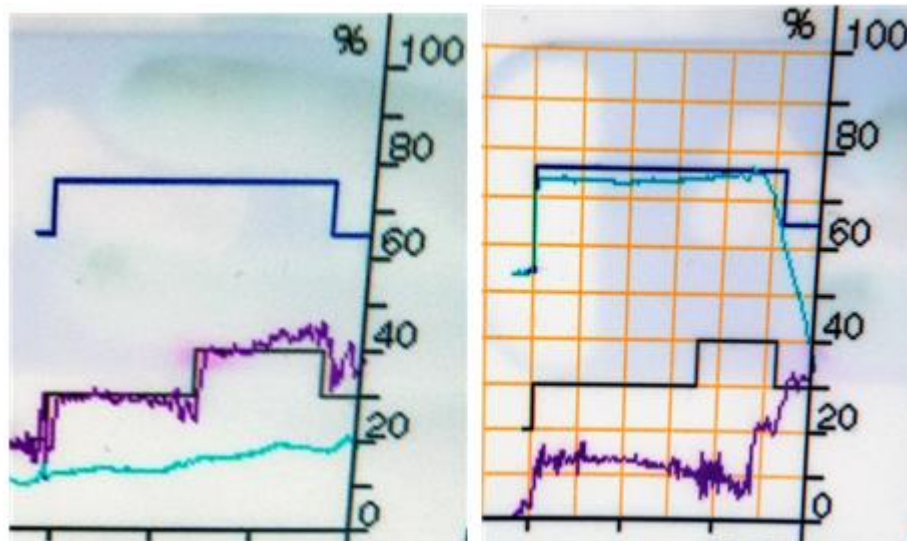


[그림 3-5] 초기 유동 해석 결과



[그림 3-6] 정확성 개선한 유사한 해석 결과

[그림 3-5]와 [그림 3-6]은 두께가 2.5mm 인 판 제품에 사출 게이트가 중심에 있을 때의 유동 해석 결과를 나타내고 있다. 같은 형상에 같은 수지를 사용했지만, 유동 해석 결과가 매우 상이한 것을 확인할 수 있다. 사출 제품을 3sec 에 충전할 때에는 웰드라인이 형성되지 않고, 12sec 에 충전할 때에는 웰드라인이 중심에 발생한다. 실제 사출 현장에서 [그림 3-7]의 왼쪽 그림과 같이 금형의 상·하측을 열고 사출할 때 설정 속도(검은색)를 따라 실제 속도(보라색)가 유지되며, 설정 압력(파란색)보다 실제 압력(하늘색)은 낮게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. [그림 3-7] 오른쪽 그림과 같이 금형을 닫고 사출을 진행하면 설정 제한 압력에 실제 압력이 도달하고, 실제 속도는 설정 속도 보다 낮게 되는 것을 확인할 수 있다.



[그림 3-7] 사출기 공정 설정 및 출력 그래프 결과 비교 금형을 열고 사출할 때(좌), 금형 닫고 사출할 때(우)

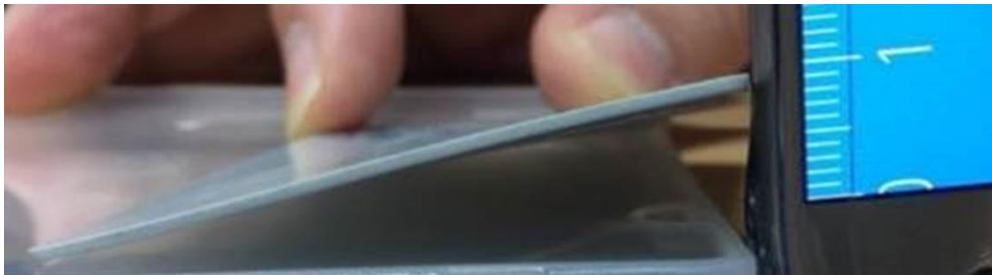
충전 과정은 플랜지(또는 램이나 스크류)를 유 압력 또는 전동력을 이용하여 주사기의 피스톤과 같이 전진하며 플라스틱 수지를 금형에 주입한다. 이 주입 속도를 사출 속도라고 한다. 최적의 사출 속도는 유동 선단의 온도가 변함없이 일정하게 충전하는 것이다. 유동 선단의 속도를 일정하게 유지하기 위해서는 속도 제어해야 한다. [그림 3-7]의 오른쪽 그림과 같이 사출 성형 압력이 부족한 경우 속도는 떨어지고, 제어되지 않은 속도는 미성형이나 정체 현상으로 이어져 불량률의 요인이 된다. 유동 거리 예측은 주어진 성형 조건(수지 온도, 금형 온도, 사출 속도)과 수지 정보(점도, 비열, 열전도도,  $p_vT$ ) 그리고 형상 정보(유동길이, 두께)를 유동 지배 방정식(Flow Governing Equations)을 통해 계산한다. 정리하면 유동 거리는 유동하는데 저항하는 압력 즉, 압력강하와 유리전이온도 와 깊은 상관관계가 있다. 제품을 사출하는데

필요한 압력이 사출기 최대 허용 압력보다 부족하여 정체 현상이 심하게 발생하거나, 유동 선단의 온도가 천이온도에 도달하면 미성형이 발생한다. 먼저 저항하는 압력은 충전에 필요한 피드 시스템과 캐비티 형상 그리고 제품 두께의 함수이다.

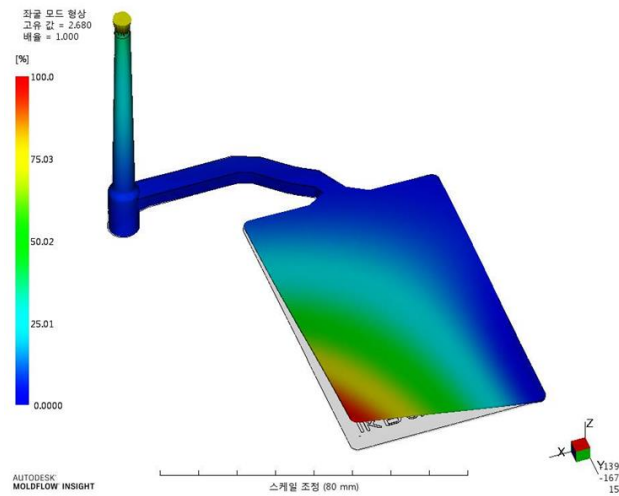
유동길이는 형상 정보와 수지 물성(점도, 비열, 열전도도 등) 그리고 사출 속도가 중요한 인자이다. 사출 속도는 점도에 영향을 주고, 체적유량과 사출 압력에도 상관관계가 있다. 또한 두께 방향과 위치 지역별로 속도 뿐 아니라 온도와 점도가 다양한 값을 가지기 때문에 CAE 없이 예측하는 것은 불가능에 가까운 일이다.

#### 5) 보압 복제

보압은 용융상태의 수지가 고화되는 과정에서 발생하는 수축을 보상하기 위해 일정한 압력으로 유지하는 공정이다. 이러한 보압은 형체력과 힘 변형에 중요한 인자이다. [그림 3-8]은 카드 시편이 사출 과정에서 힘이 발생하여 측정한 사진이다. 약 10mm 의 들림 현상이 발생하였다. 카드 시편은 구조적 안정성이 약해 쉽게 좌굴이 발생할 수 있다. CAE 로 좌굴 옵션을 적용하여 변형을 예측하면 [그림 3-9]와 같이 유사한 힘을 예측한 것처럼 보인다.

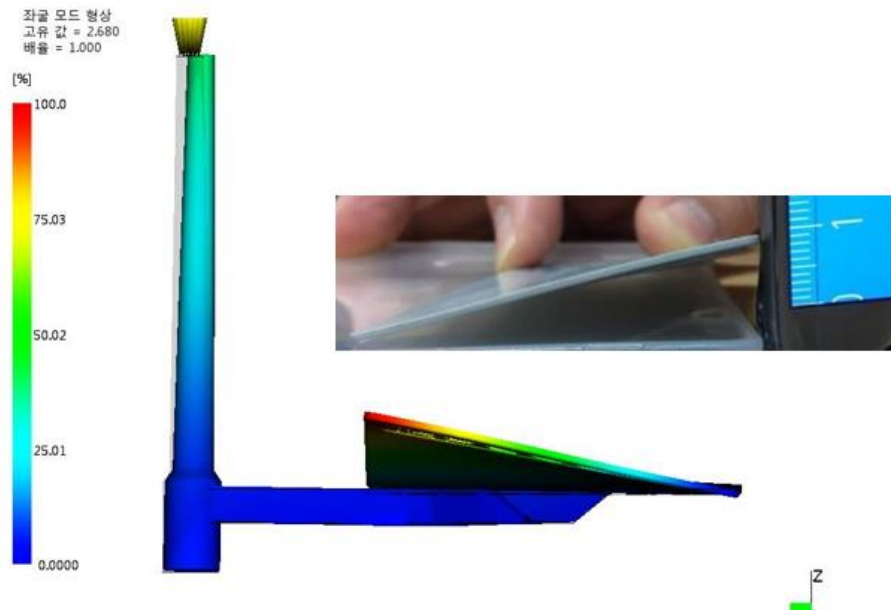


[그림 3-8] 카드 시편 힘 측정 결과



[그림 3-9] 사출 성형 CAE 좌굴 모드 형상 결과

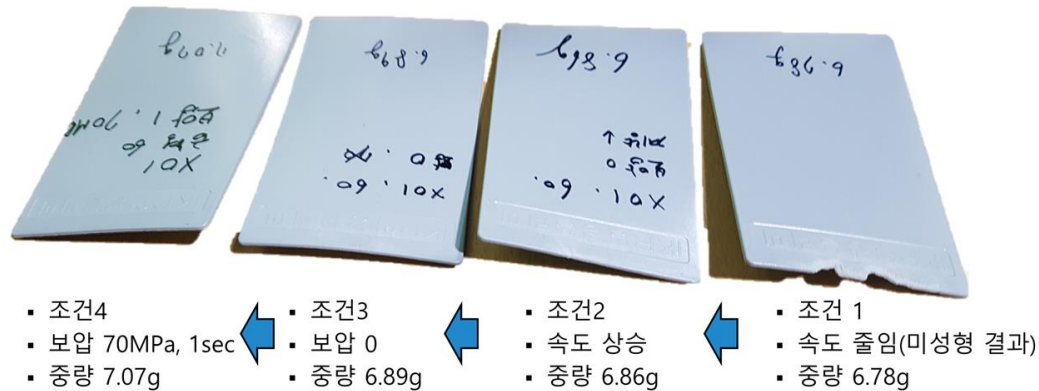
그러나 자세히 보면 CAE 예측 결과는 실제 변형과 방향이 반대로 예측된 것을 확인할 수 있다. 실험 결과는 오른쪽이 상측 방향으로 들렸지만, CAE 결과는 왼쪽이 들렸다.



[그림 3-10] 초기 사출 성형 CAE 결과와 실제 휨 방향 비교

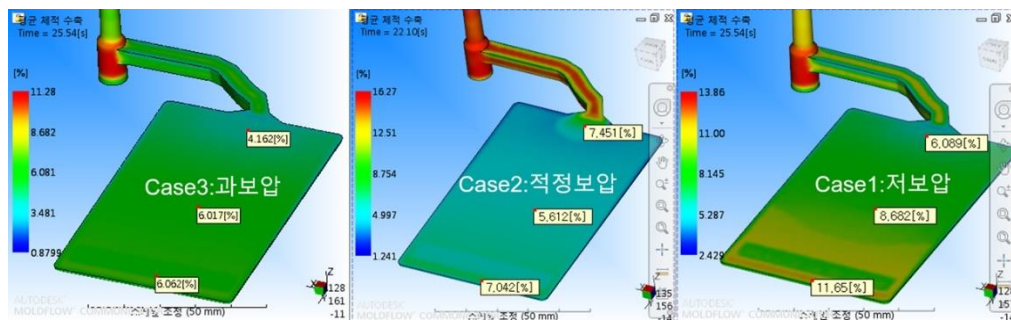
이러한 현상이 발생하는 원인을 파악하기 위해 [그림 3-11]과 같이 미성형부터 과보압까지 변경하면서 사출을 진행하였다. 공정 조건에 따라 변형 패턴이 달라지는 것을 확인할 수 있다.

조건 1·2 와 같이 미성형이나 충전 초기에는 왼쪽 들림이 발생하고, 적정 보압이 적용될 때 변형량이 가장 낮으며(조건 3), 과보압이 적용되면 반대 방향으로 힘이 발생했다(조건 4).



[그림 3-11] 공정 조건 1(미성형), 2(저보압), 3(적정보압), 4(과보압)

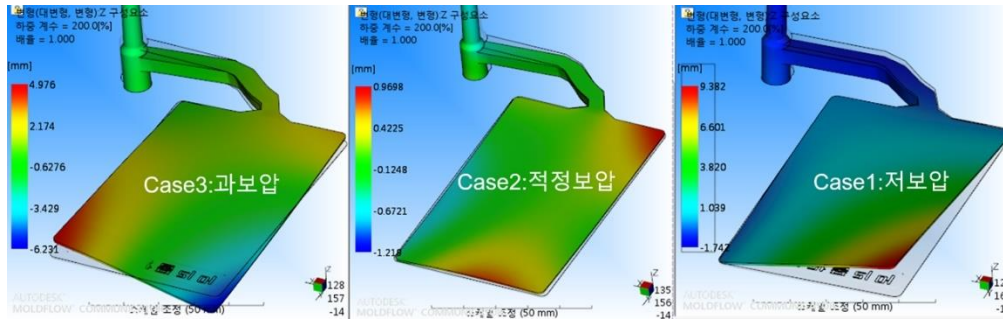
이 현상을 CAE 에서 복제하기 위해 Case1 과 같이 매우 낮은 보압을 적용하였고, Case2 는 적정 보압, Case3 은 과보압을 적용하였다. 보압 조건에 따라 [그림 3-12]와 같이 평균 체적 수축의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. Case1 은 게이트 근처에서 6.09%, 유동 말단부위에서 11.65%, Case2 는 게이트 근처와 유동 말단에서 약 7.04%, Case3 은 게이트 근처에서 4.16%, 유동 말단부위에서 6.06%가 나타났다.



[그림 3-12] 보압 변화에 따른 평균 체적 수축 결과 비교

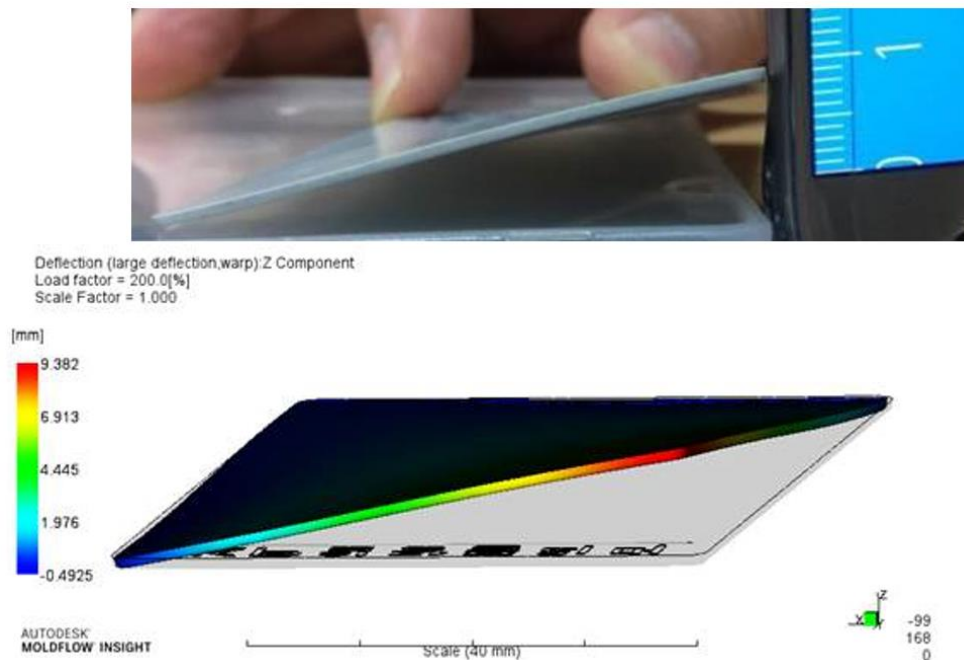
[그림 3-13]과 같이 보압 변화에 따른 힘 변형이 달라지는 것을 확인할 수 있다.





[그림 3-13] 보압 변화에 따른 힘 변형 결과 비교

[그림 3-14]와 같이 최종적으로 힘 방향 및 크기를 예측할 수 있게 되었다.

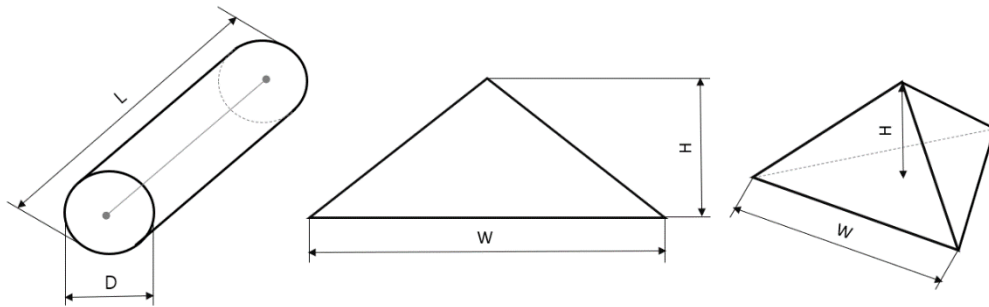


[그림 3-14] 개선된 사출 성형 CAE 결과와 실제 힘 방향 비교

#### 6) 종횡비에 따른 해석 속도 및 유동 해석 결과 비교

종횡비는 메시의 너비와 높이의 비인데, CAE 해석 정확성 및 속도에도 영향을 미친다. 메시 타입에 따라 종횡비 계산은 다르며, [그림 3-15]는 메시 타입 별 종횡비를 나타내고 있다. 빔 메시의 종횡비는  $L(\text{길이})$  와  $D(\text{직경})$  의 비( $L/D$ )로 정의된다. 빔 메시는 주로 스프루, 러너, 게이트, 카트리지 히터, 냉각 채널, 버블러, 펌프 등에 사용하며 때에 따라 제품 형상으로도

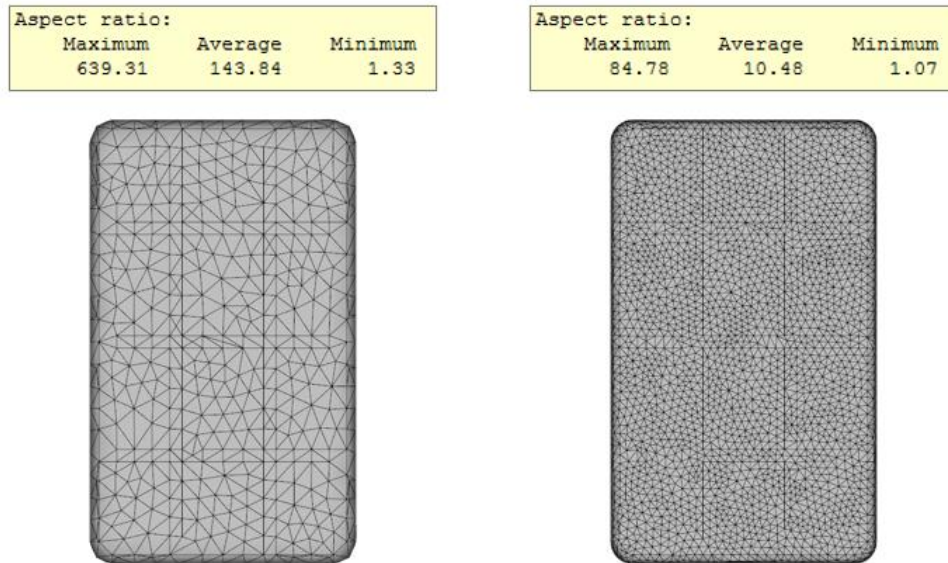
사용된다. 종횡비 기준은 2.5~3 을 권장하며 최대 5 이하로 적용한다. 권장기준을 벗어날 경우 경고 메시지를 로그에서 확인할 수 있으며, 온도 및 시간 계산 문제가 발생할 수 있다. 삼각형 메시의 종횡비는 W(가장 긴 모서리)와 H(W의 수직 높이)의 비( $W/H$ )로 정의된다.



[그림 3-15] 메시 타입에 따른 종횡비

삼각형 메시는 미드플레인 및 듀얼 도메인 메시 타입에서 사용되며 주로 제품, 게이트, 금형, 인서트에서 사용된다. 종횡비 기준은 Moldflow Insight 2016 버전 이하는 최대 권장 종횡비는 6 이하를 권장했으나 Moldflow Insight 2017 버전부터 20 이하로 변경되었다. 평균 권장 종횡비는 3 이하, 3D 메시 변환 전 최대 종횡비는 30~50 이하로 적용하는 것을 권장한다. 종횡비 기준은 해석 종류에 따라 민감성이 다른데 유동 해석은 비교적 둔감하여 높은 종횡비로도 해석은 진행되지만, 냉각 해석과 변형 해석은 민감하여 해석 실행 자체가 되지 않은 경우도 발생할 수 있다. 사면체 메시의 종횡비는 W(가장 긴 모서리)와 H(W의 수직 높이)의 1.5의 제곱근으로 계산( $W/(H \cdot \sqrt{1.5})$ )된다. 사면체 메시는 3D 메시 타입으로 제품 및 게이트, 러너 형상 등 다양하게 사용된다. 최대 권장 종횡비 기준은 100 이하이며 평균 종횡비는 10 이하 이다. 전역 메시 사이즈는 제품 두께의 2 배미만을 추천하며, 해석을 실행하기 위해 종횡비 기준을 꼭 만족해야 하는 것은 아니지만 기준을 초과할 경우 정확성 저하 및 해석을 진행하는데 걸리는 시간이 기하급수적으로 증가한다. 삼각형 메시와 마찬가지로 종횡비 기준은 유동 해석에서 둔감하여 종횡비가 높아도 해석이 실행되는데 문제가 없는 경우가 많지만, 냉각 해석이나 변형 해석의 경우 해석 자체가 되지 않을 수 있다. [그림 3-16]은 메시 조밀도에 따른 종횡비를 비교한 결과이다.





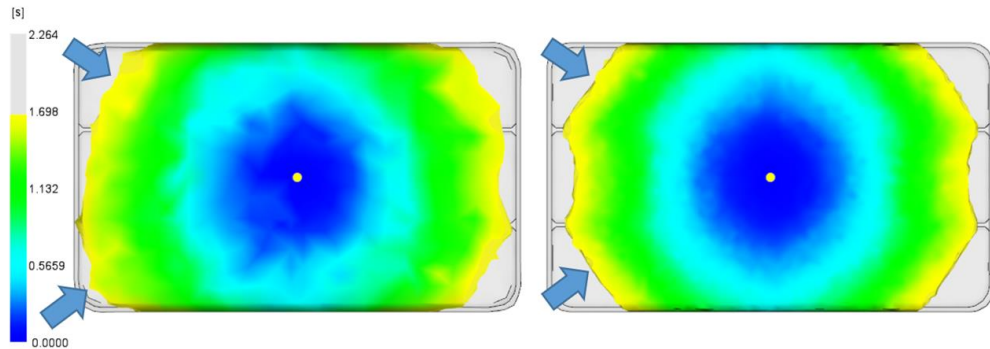
[그림 3-16] 메시 조밀도에 따른 종횡비 비교 Case1(좌), Case2(우)

일반적으로 메시의 숫자가 많을수록 해석 시간이 오래 걸린다고 알려져 있다. 그러나 종횡비에 따라 결과는 다르게 나타난다. 본 해석은 3D 메시를 이용하였고, 메시 개수는 Case1 은 144,829, Case2 는 149,737 로 Case2 가 약간 많다. 그러나 [표 3-1]과 같이 종횡비가 낮은 Case2 는 메시 개수가 많지만 13 분, Case1 은 77 분의 해석 시간이 소요되었다.

[표 3-1] 메시 개수와 종횡비에 따른 해석 시간 비교

구분	변수		해석 시간(min)			
	메시 개수	종횡비	충전	충전+보압	변형	합계
Case1	144,829	639.31	53	59	18	77
Case2	149,737	84.78	6	10	3	13

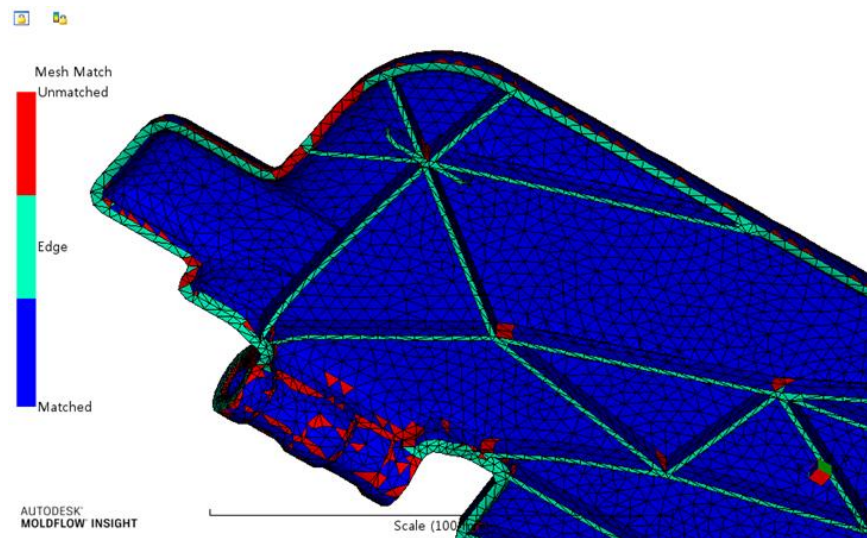
종횡비는 해석 시간 뿐 아니라 CAE 정확성에도 영향을 미친다. [그림 3-17]과 같이 Case1 은 화살표에 표시된 것처럼 상·하측의 유동 결과가 균형을 이루지 못하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Case2 는 균형을 이루는 것을 확인할 수 있다.



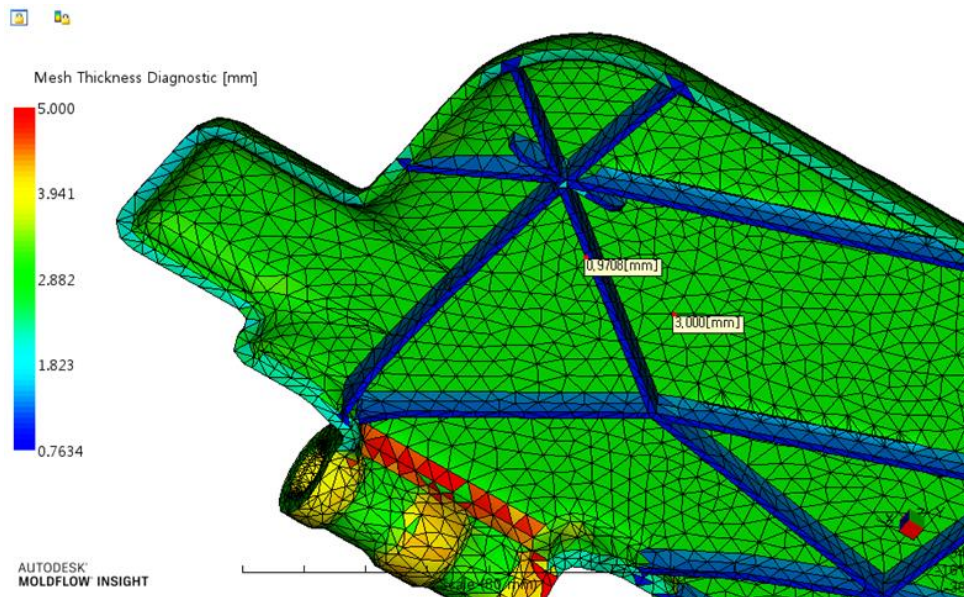
[그림 3-17] 종횡비에 따른 충전해석 결과 비교, Case1(좌), Case2(우)

## 7) 메시 타입에 따른 CAE 결과 비교

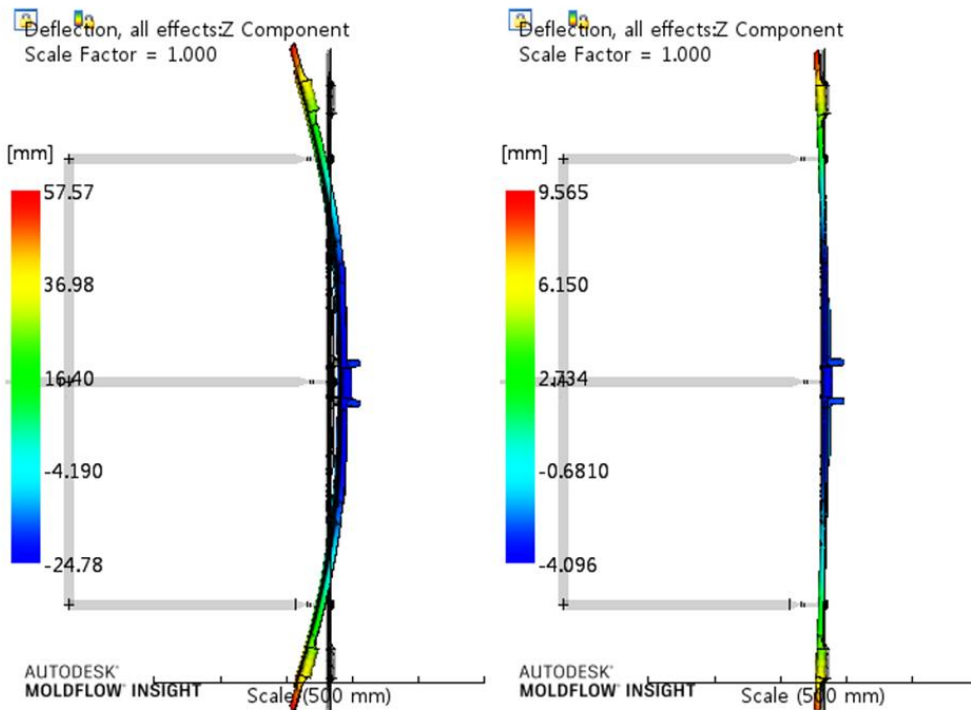
메시 타입의 가정에 따라 CAE 결과는 달라진다. 예를 들면 듀얼 도메인 메시는 모서리(Edge)로 인식한 메시에 대하여 인접한 요소 두께의 75%로 인식한다고 가정하고 있다. [그림 3-18]과 같이 바닥에 짧은 리브가 다수 설치된 제품의 경우 듀얼 도메인 메시로 적용했을 때 실제 리브의 두께보다 얇게 인식하여 변형 시뮬레이션 결과가 과장되게 결과를 도출할 수 있다. [그림 3-19]는 듀얼 도메인 메시 타입에서 두께 인식 결과를 나타내고 있다. [그림 3-20]과 같이 듀얼 도메인 메시로 적용할 때 변형 예측 결과는 82.53mm 이며 3D 메시로 적용할 경우 13.66mm 로 예측되었다. 실제 결과는 3D 메시의 결과가 더 유사했다.



[그림 3-18] 바닥에 짧은 리브가 다수 설치된 제품



[그림 3-19] 듀얼 도메인 메시 적용 시 두께 인식 결과



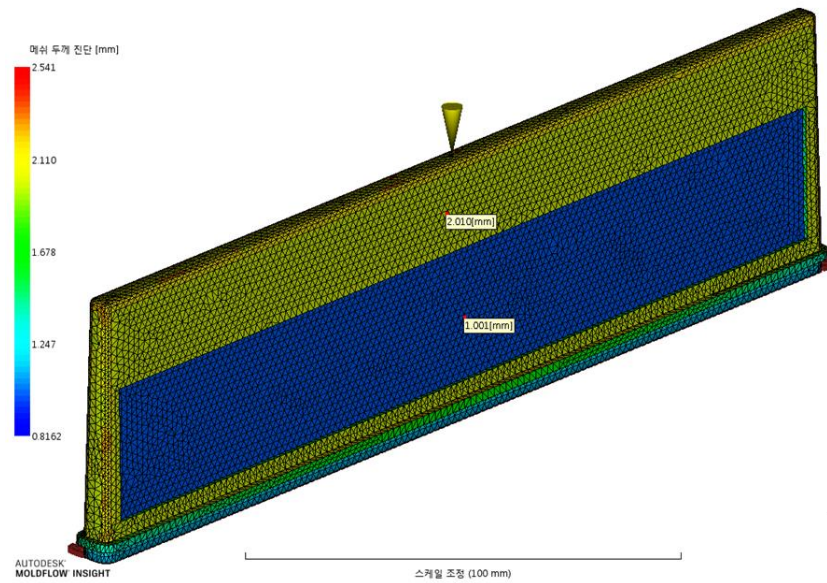
[그림 3-20] 메시 타입에 따른 변형 결과 비교, Dual(좌), 3D(우)

## 8) 금형 형상 복제

사출 금형은 2 단 금형과 3 단 금형과 같은 콜드러너와 스크랩이 없는 핫러너로 분류할 수 있으며, 슬라이드 코어 금형, 나사 금형, 스택 금형과 같은 특수 금형으로도 분류할 수 있다. 2 단 금형은 금형 분할 면으로 스프루 및 러너가 제품과 함께 취출되며, 3 단 금형은 러너 스트리퍼 플레이트에서 취출되는 것이 다르다. [그림 3-21]은 2 단 금형의 대표적인 피드 시스템 구조인 사이드 게이트이며, [그림 3-22]는 3 단 금형의 대표적인 구조인 핀 포인트 게이트 구조이다. [그림 3-25]는 핫러너 구조이다. 그림의 노란 영역은 용융 수지가 흐르는 길로 용융 상태를 유지할 수 있는 히터가 설치되어 스크랩이 발생하지 않는다. 정확성 있는 CAE 결과를 얻기 위해서는 금형의 모든 구조를 정확히 복제해야 한다. [그림 3-26]은 냉각 채널 메시를 3D로 적용하는 형상적응형 냉각 기능을 이용한 사례이다. 빔 메시로는 구현할 수 없는 넓은 판 냉각 구조를 정확히 표현하기 위해서는 이러한 기능을 이용해야 한다. 또한 핫러너 구조를 단순히 빔 메시로 적용하지 않고 핫러너 매니폴드를 메시로 적용할 경우 히터에 의한 금형 열전달을 보다 정확하게 계산할 수 있다. [그림 3-27]은 핫러너 매니폴드와 금형이 만나는 위치의 열전달 결과를 나타내고 있다.

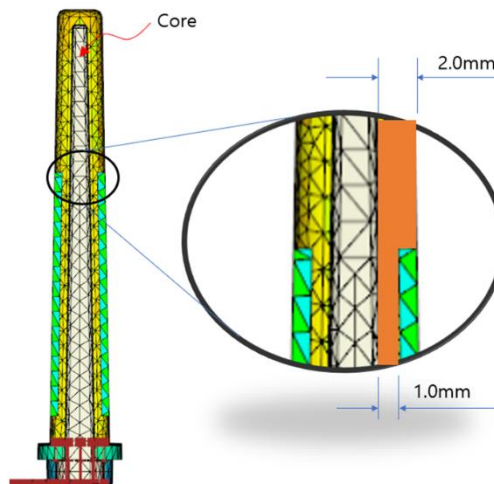
## 9) 코어 쉬프트에 따른 충전 결과 비교

금형이나 인서트가 사출 압력에 의해 처짐이 발생할 때도 제품 형상 두께가 달라질 수 있다. 이럴 경우 코어 쉬프트 해석을 이용하여 금형이나 인서트의 처짐을 예측하고, 제품 두께의 변화를 고려해야 한다(이종원 외, 2015). 그러나 그렇게 가정하지 않았을 때 CAE 정확성은 낮아지게 된다. [그림 3-28]은 중심 부분의 두께가 얇고 코어가 깊은 제품이다. [그림 3-29]와 같이 사출 성형품의 두께는 2mm에서 1mm로 변화되고 있다. 사출 압력에 의해 코어에 힘이 발생한다면 1mm 구간의 두께가 얇아질 수 있다.



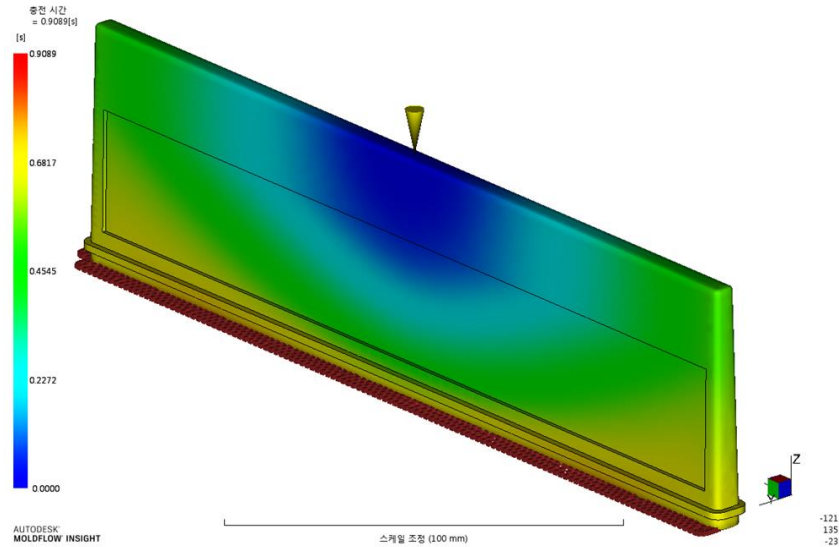
[그림 3-28] 중심 부분의 두께가 얇고 코어가 깊은 제품

[그림 3-30], [그림 3-31]과 같이 코어 쉬프트 고려 여부에 따라 충전 패턴이 다른 것을 확인할 수 있다. 코어 쉬프트를 고려하지 않은 [그림 3-30]의 결과는 정체 현상이 발생하지 않고 잘 충전되지만 [그림 3-31]과 같이 코어 쉬프트를 고려하면 사출 압력에 의해 깊은 코어가 옆으로 넘어가 사출 성형품의 두께를 얇게 만들고 극심한 정체현상이 발생한다.



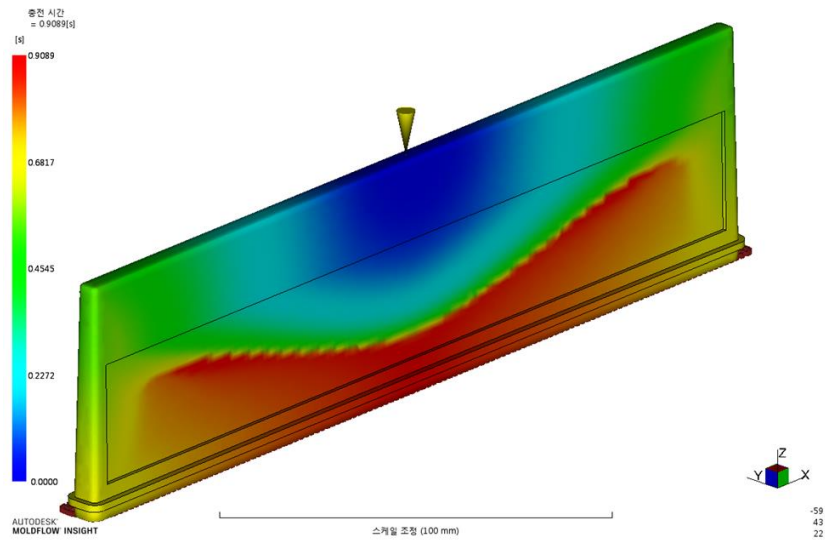
[그림 3-29] 중심 부분의 두께가 얇고 코어가 깊은 제품



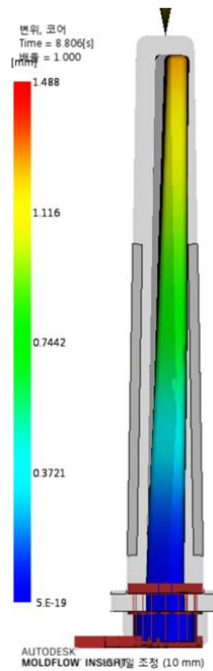


[그림 3-30] 코어 쉬프트를 고려하지 않은 유동 해석 결과

[그림 3-32]와 같이 사출 압력에 의해 코어가 휘는 것을 관측할 수 있다. 이러한 현상이 실제 사출 현장에서도 발생하였다. 이렇게 코어의 휨이 발생하면 취출 과정에서 코어에 응력이 작용하여 몇 회 사출하지 못하고 코어가 부러진다. 이러한 문제를 초기 제품 개발 단계에서 예측하였다면, 두께 변경이나 형상 변경을 통해 금형 제작 전 또는 양산 전에 문제를 해결할 수 있다.



[그림 3-31] 코어 쉬프트를 고려한 유동 해석 결과



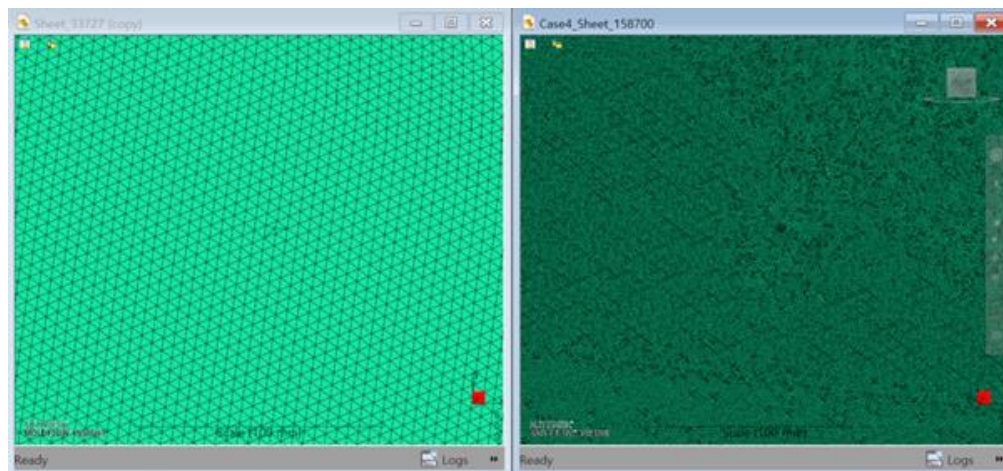
[그림 3-32] 코어 쉬프트에 의한 코어 휨 결과

#### 10) 미성형 예측을 위한 메시 크기 결정

미성형 상황을 재현하기 위해서 주의해야 할 부분은 바로 비선형성을 예측하기 위한 CAE 프로세스이다. 미성형 예측을 위한 프로세스는 일반 유동 해석과 차별적인 프로세스를 진행해야 한다. 일반 유동 해석은 성형성 검토나 사출기 선정의 경우 선행 검토에 대한 안전율을 고려하기 때문이고, Case Study 목적으로 진행하는 해석은 Case 중 비교하여 우월한 Case 를 선정하기 때문에 1:1 매칭을 할 필요가 없다. 그러나 미성형 예측은 1:1 매칭을 해야 하므로 CAE 와 실제 실험한 결과가 일치하지 않으면, 틀린 답이 된다. 유동 해석과 관련된 변수 중 표준화 요소로 메시 / 수지 물성 / 공정조건 / 금형구조 / 성형기 / 솔버 파라메타 중 중요한 변수를 잘못 설정하면, 미성형 결과는 실험 결과와 일치하지 않을 수 있다. 미성형 예측을 위해 메시는 더욱 조밀해야 한다. 미성형 과정에서 유동 선단의 온도는 급격하게 변하는데, 메시 조밀도에 따라 결과는 극명하게 달라진다.

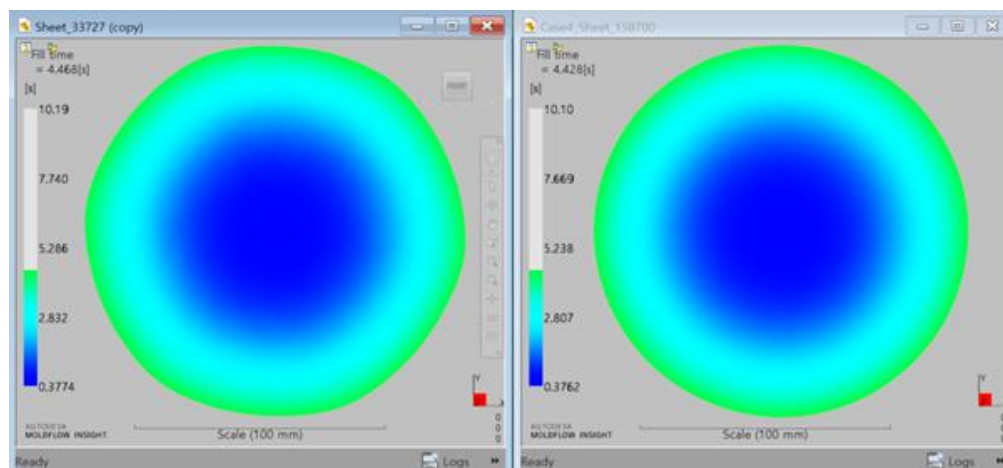
일반적으로 사용하는 수지 온도보다 낮게 설정했을 때 사출 성형 압력 결과를 실험과 비교할 때, 게이트의 메시를 3 등분하면 표준화된 일반 사출 유동 해석 프로세스에는 잘 적용했다고 판단할 수 있지만, 수지의 온도가 낮고 저속으로 사출하는 경우 점도가 매우 급격하게 높아지면서, 미성형을 예측하기 위해 10 개 이상 메시를 적용해야 유사하게 압력을 예측할 수

있다. 또한 Juncture loss 와 D3 물성까지 적용해야 실험값과 시뮬레이션 값이 일치하는 경우도 존재한다. [그림 3-33]과 같이 왼쪽은 매우 거친 메시(33,727 개), 오른쪽은 매우 조밀한 메시(158,700 개) 이다.



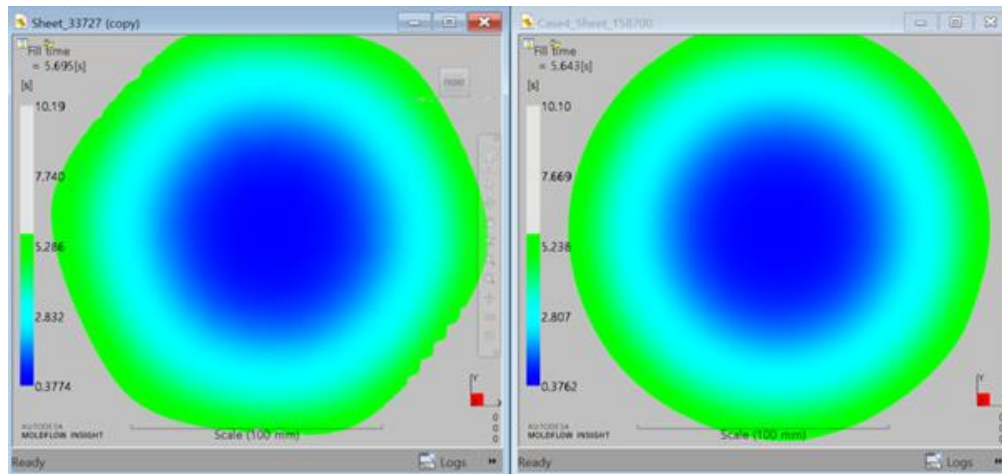
[그림 3-33] 33,727 개 메시(좌), 158,700 개 메시(우)

[그림 3-34]의 충전 결과를 보면 비교적 유사한 패턴을 보인다. 성형 가능 영역에서는 결과의 차이가 크게 존재하지 않는다. 약간 왼쪽 유동 패턴이 일그러지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 [그림 3-35]와 같이 미성형이 일어나기 시작하는 지점에서는 거친 메시는 심하게 일그러진 유동 패턴을 확인할 수 있다. 그러나 조밀한 메시는 원형을 유지하는 것을 확인할 수 있다.



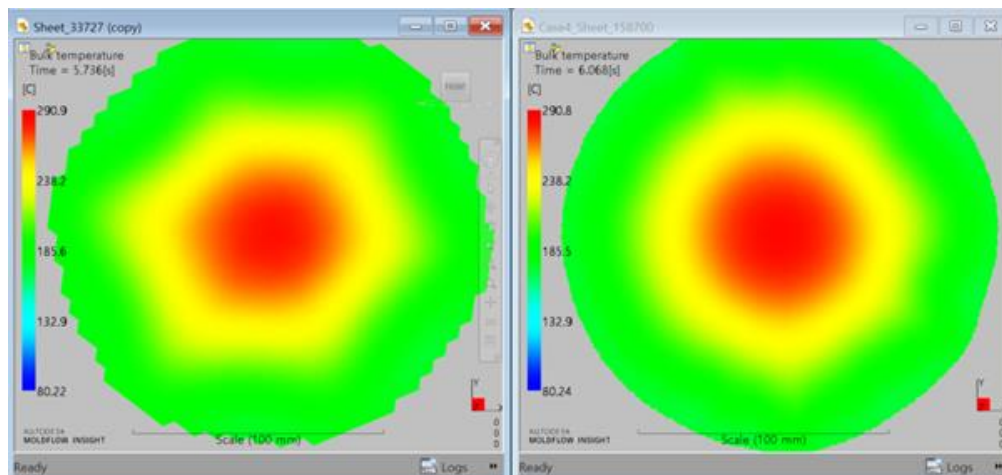
[그림 3-34] 메시 변화에 따른 충전 결과 비교(4.4 초일 때)



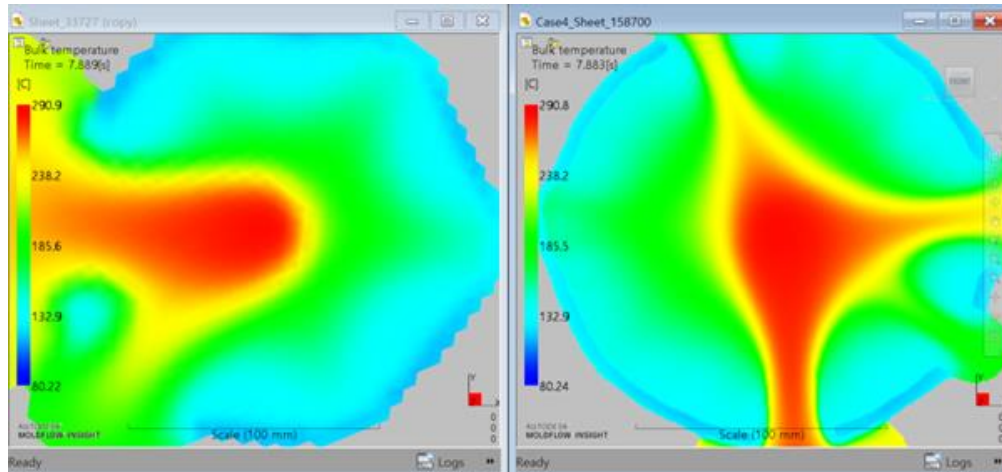


[그림 3-35] 메시 변화에 따른 충전 결과 비교(5.6 초일 때)

두께 방향으로 평균 온도를 나타내는 Bulk temperature(벌크 온도) 결과에서 거친 메시의 경우 중심 부분에 6 각형의 패턴이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 조밀한 메시의 경우 원에 가까운 것을 확인할 수 있다.



[그림 3-36] 메시 변화에 따른 평균온도 결과 비교(약 6 초일 때)



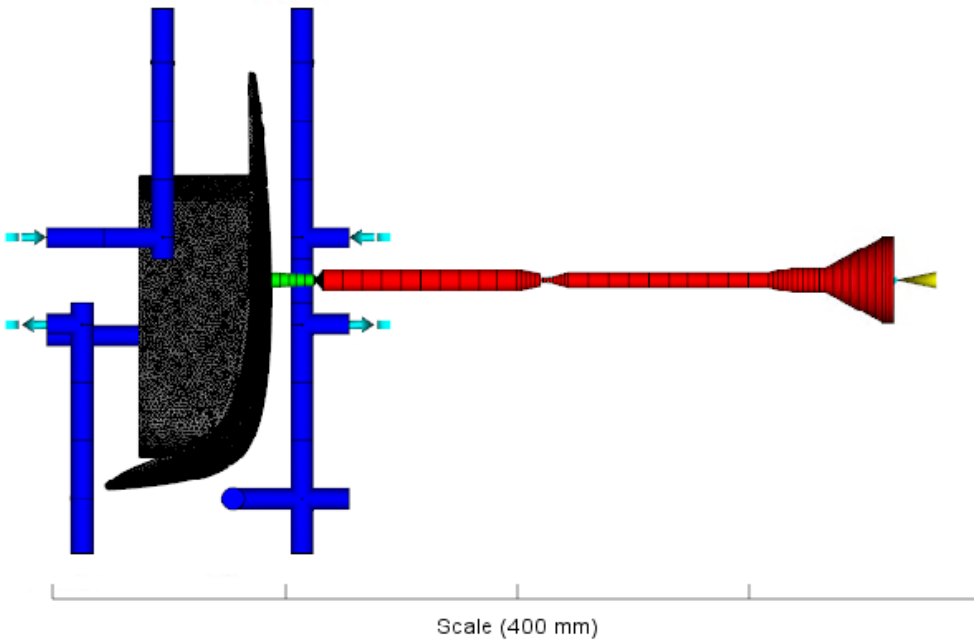
[그림 3-37] 메시 변화에 따른 평균온도 결과 비교(약 7.9 초일 때)

시간을 더 진행해보면, [그림 3-36], [그림 3-37]과 같이 일부는 천이온도 이하로 떨어지면서 유동은 멈추고, 일부는 흐를 수 있는 공간이 좁아지면서 높은 압력(사출기 최대 압력)을 받으면서 열리고 추가 유동이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 같은 사출 속도라도 유동 선단 면적이 달라지면, 제품을 충전하는 속도가 달라지고, 열전달, 전단 발열 효과가 달리 계산되어 성형성은 달라진다. 유동비는 사출 속도와 형상에 따른 유동 선단 면적을 고려하지 않는 것이기에 성형성을 대표할 수 없다.

## 제 5 절 Sim-link 를 활용한 Moldflow 적확성 개선에 관한 연구

### 1) 사출 압력 예측 검증 개요

사출 압력 예측은 제품 디자인 및 두께 결정, 소재 결정, 금형 설계 결정, 사출 조건 최적화 등 광범위하게 요구되는 품질 요소이다. CAE 를 통한 압력 예측은 기본적으로 도출되는 결과지만, 실제 사출 결과와 비교해보면 상이하게 예측될 때가 많다. 본 연구에서는 초기 해석 결과와 실제 압력을 비교하고 차이가 나는 원인을 파악 및 개선하는 연구를 하고자 한다. 또한 압력 비교 시 사출 전 과정에서 압력의 변화를 관측하고 패턴을 개선하였다.



[그림 3-71] 에어백 커버 제품 메시 및 금형 메시

[그림 3-71]은 에어백 커버 제품 메시 및 금형 메시를 나타내고 있으며, [표 3-8]은 메시 및 모델링 정보를 나타내고 있다.

[표 3-8] 에어백 커버 제품 메시 및 모델링 정보

Index	Mesh & Modeling Information
Mesh Type	DD / 3D
Part Volume	120.9289 / 120.929cm <sup>3</sup>
Number of Elements	88,200 / 1,380,750
Number of Nodes	44,181 / 252,496
Total Project Area	237.3628 /237.3621cm <sup>2</sup>

에어백 커버 제품 사출에 적용한 플라스틱 물성은 [그림 3-72]와 같이 저점도 수지로 ASA LI912 와 고점도 수지 ASA LI941 을 적용하였다.

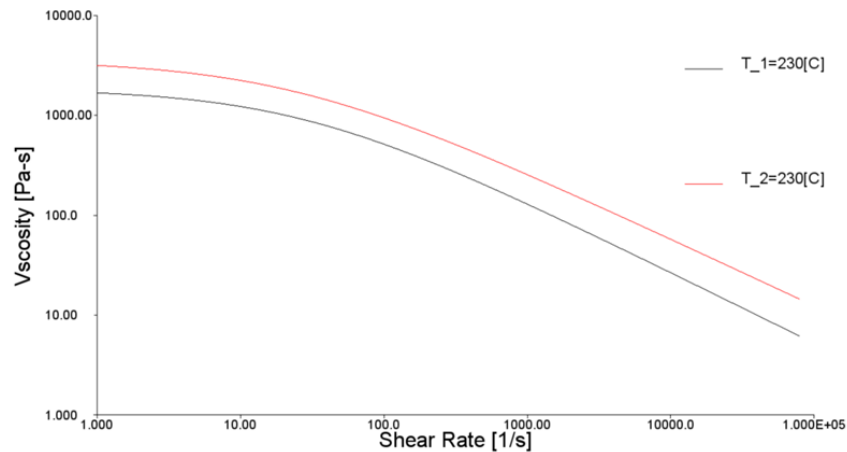
#### □ ASA (ASA LI912)

- Specific Heat : 1888 J/kg-C(245°C)
- Melt Density : 0.9415 g/cm<sup>3</sup>
- Solid Density : 1.0729 g/cm<sup>3</sup>
- Thermal Conductivity : 0.14 W/m-C(245 °C)
- Transition Temp. : 93 °C
- Ejection Temp. : 86 °C
- Melt Temperature : 210 ~ 250 °C
- Mold temperature : 40 ~ 80 °C
- Filler : UnFilled

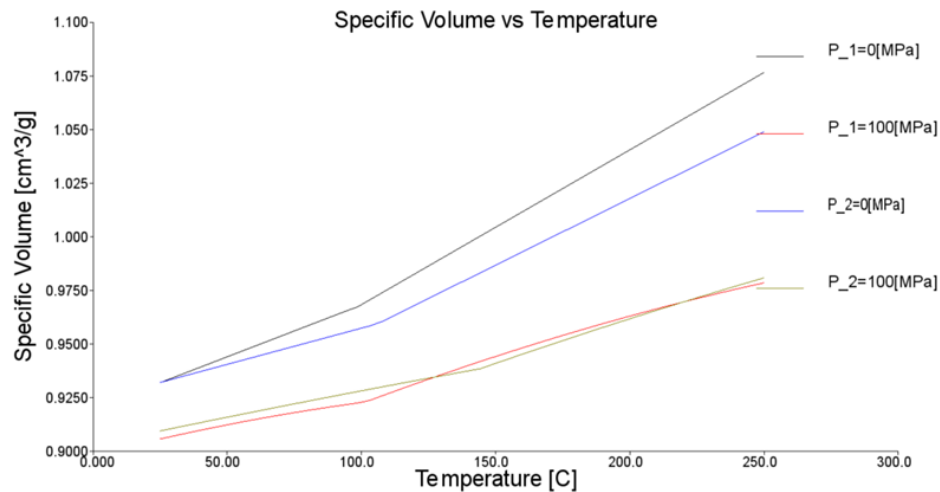
#### □ ASA (ASA LI941)

- Specific Heat : 2342.9 J/kg-C(245°C)
- Melt Density : 0.96479 g/cm<sup>3</sup>
- Solid Density : 1.0728 g/cm<sup>3</sup>
- Thermal Conductivity : 0.184 W/m-C(249 °C)
- Transition Temp. : 99 °C
- Ejection Temp. : 92 °C
- Melt Temperature : 210 ~ 250 °C
- Mold temperature : 60 ~ 80 °C
- Filler : UnFilled

[그림 3-72] 저점도 ASA LI912 와 고점도 ASA LI941 기본 물성

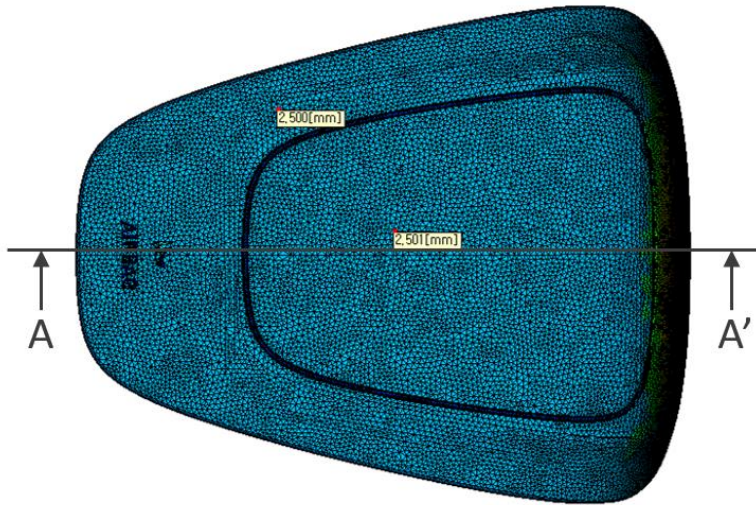


[그림 3-73] ASA LI912(T\_1)와 ASA LI941(T\_2) 점도 물성 비교



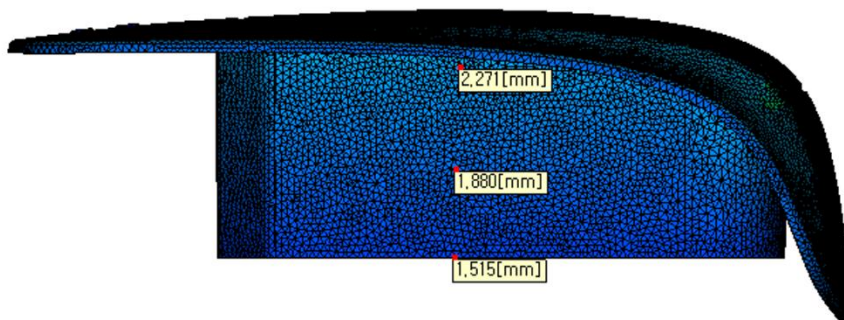
[그림 3-74] ASA LI912(P\_1)와 ASA LI941(P\_2) pvT 물성 비교

[그림 3-73]은 ASA LI912 와 ASA LI941 의 점도 물성을 비교하였다. 전체적으로 ASA LI941 수지의 점도가 높았다. [그림 3-74]는 ASA LI912 와 ASA LI941 의 pvT 물성을 비교하였다. 압력이 0MPa 일 때에는 ASA LI912 수지의 수축이 크지만, 100MPa 일 때에는 수축 차이가 줄어들어 두 수지 모두 유사한 것을 확인할 수 있다.



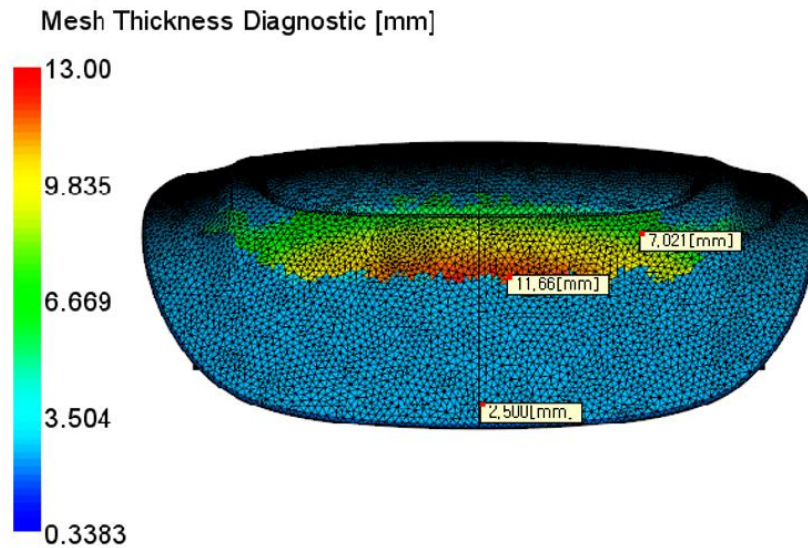
[그림 3-75] 에어백 커버 제품 메시 평면도

[그림 3-75]는 제품 메시의 평면도를 나타내고 있으며, 확인한 결과 두께는 2.5mm 로 균일하였다. 그러나 [그림 3-76]과 같이 측면도에서 확인한 결과 하측부 조립 구간의 두께가 2.271 ~ 1.515mm 가변되는 것을 확인할 수 있다. 또한 [그림 3-77]과 같이 정면도에서는 하측 조립부와 연결된 부분에서 두께가 약 11.66mm 까지 증가하는 것을 확인할 수 있다.

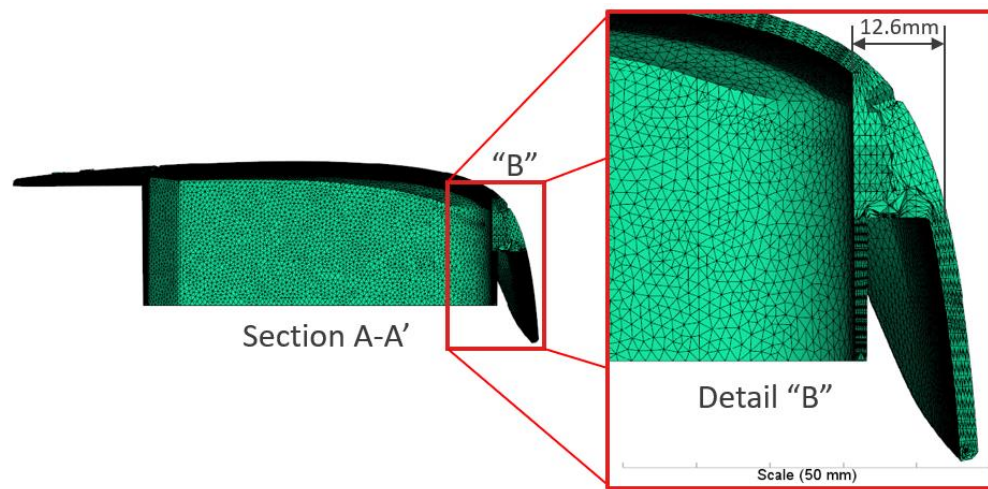


[그림 3-76] 에어백 커버 제품 메시 측면도



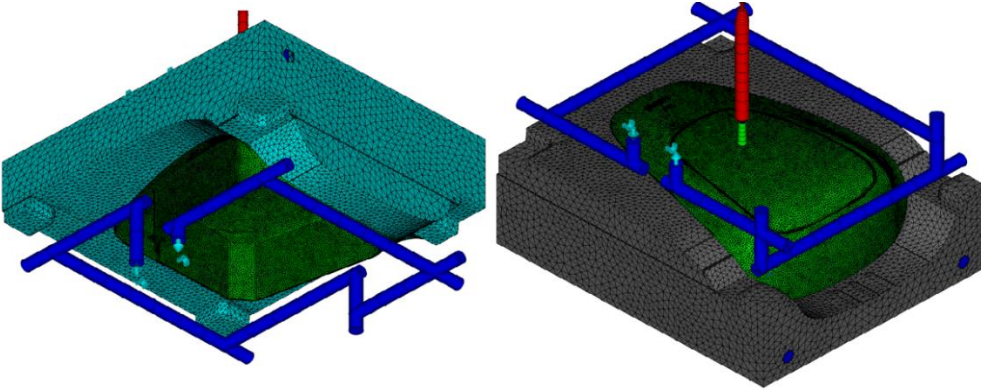


[그림 3-77] 에어백 커버 제품 메시 정면도



[그림 3-78] 에어백 커버 제품 메시 단면도

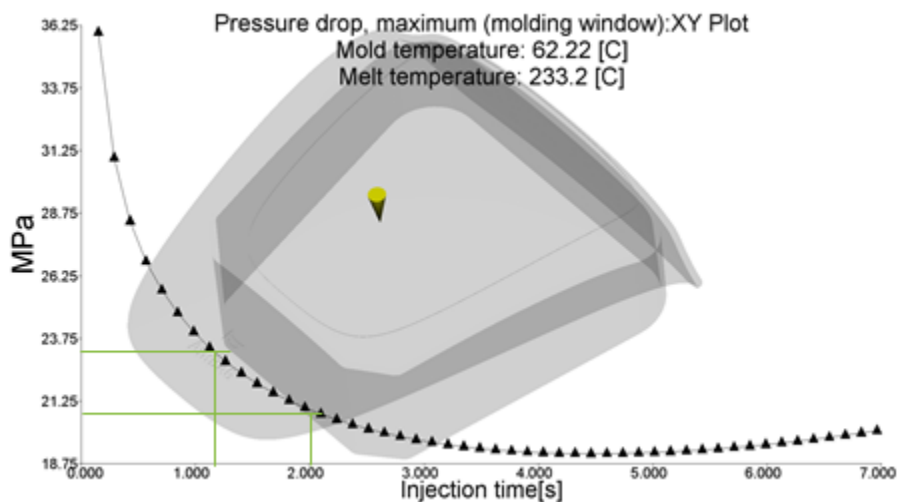
[그림 3-78]과 같이 에어백 커버 제품 메시 단면도를 확인한 결과 상세도 "B"에서와 같이 두께가 12.6mm 까지 증가하는 것을 확인하였다. [그림 3-79]는 에어백 커버 제품의 금형 메시 및 냉각 구조를 나타내고 있다. 하측 코어 외곽에는 냉각라인이 설계되어 있지만 중심 부분의 입자 코어에는 냉각라인 설계가 되어 있지 않아 열 집중이 발생할 것으로 예측된다.



[그림 3-79] 에어백 커버 제품 금형 메시 및 냉각 구조

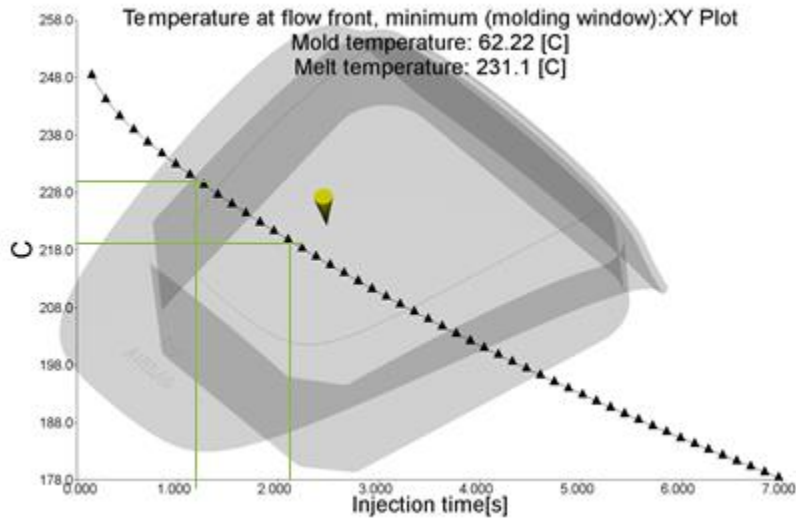
## 2) 성형구간 해석(Molding Window)

성형구간해석은 해석 전 적절한 공정설정의 시작 범위를 빠른 시간에 검토할 수 있다. 유동 해석 전 수지 온도, 금형 온도, 사출 속도(사출 시간)를 신속하게 검토할 수 있다. 사출 속도는 성형 가능 구간이 넓도록 결정해야 한다. 성형 최적 조건은 재료 물성, 제품 형상, 게이트 위치, 최대사출 압력을 기반으로 사출 압력, 유동 선단 온도, 전단응력, 전단율, 미성형 여부에 따라 사출 속도와 금형 온도, 수지 온도를 추천한다.



[그림 3-80] Pressure drop, maximum 결과

[그림 3-80]은 금형 온도 62.22°C, 수지 온도가 233.2°C일 때 사출 시간 변화에 따른 압력강하 결과를 나타내고 있다. 사출 시간은 1.3 초 미만일 때 기울기가 가파르다. [그림 3-81]은 용융 수지가 231.1°C일 때 사출 시간 변화에 따른 유동 선단 온도를 나타내고 있다. 유동 선단 온도는 용융 수지 온도를 그대로 유지할 때 외관 불량을 최소화할 수 있으며, 최대 10°C 이하로 떨어지는 것을 추천한다. 추천하는 사출 시간은 1.3~2.3sec 이다.



[그림 3-81] Temperature at flow front, minimum 결과

Process Settings Wizard - Fill+Pack Settings - Page 1 of 2

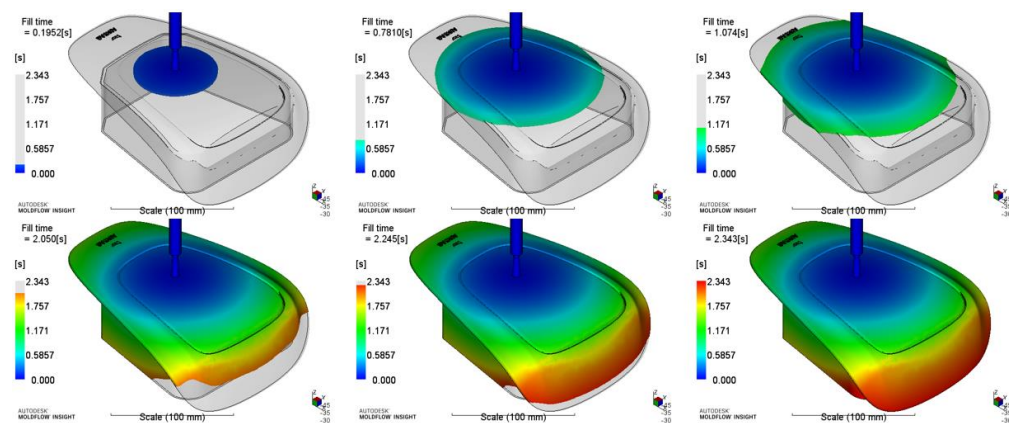
[그림 3-82] 초기 해석 조건



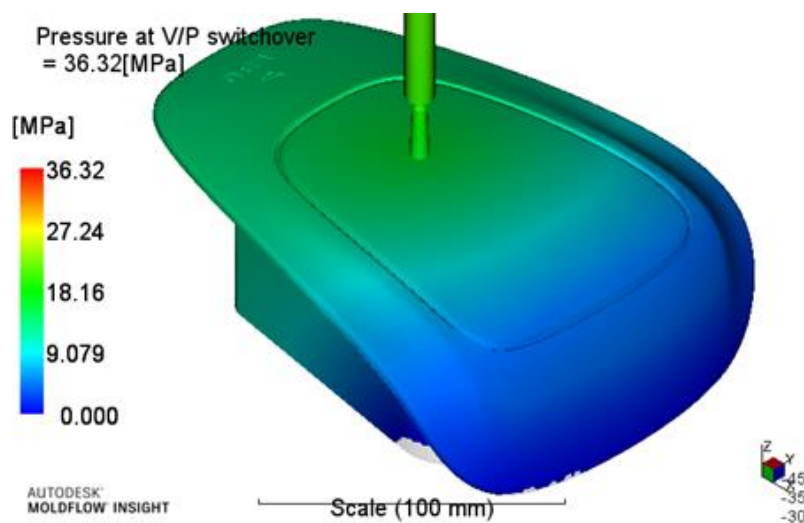
[그림 3-82]와 같이 속도 제어를 자동으로 적용할 경우 Molding Window(성형 구간)의 추천 값이 적용된다. 보압 절환 위치(V/P Switch Over)와 보압 제어(Pack/Holding Control)를 자동으로 적용한 후 초기 CAE 를 진행하였다.

### 3) 유동 해석 파라메트릭 연구

[그림 3-83]는 충전 시간 변화에 따라 충전 영역을 나타내고 있다. 충전이 시작하고 2.34sec 가 지난 시점에서 미성형 없이 충전이 완료되었다. [그림 3-84]는 보압 절환 시점의 압력으로 약 36.32MPa 로 예측되었다.



[그림 3-83] Fill time 결과



[그림 3-84] Pressure at V/P switchover 결과

[표 3-9], [표 3-10]과 같이 저점도(LI912)와 고점도(LI941) 수지의 사출 시간의 변화에 따라 사출 압력 및 형체력 등 유동 해석 결과의 변화를 확인하기 위해 파라메트릭 연구를 진행하였다.

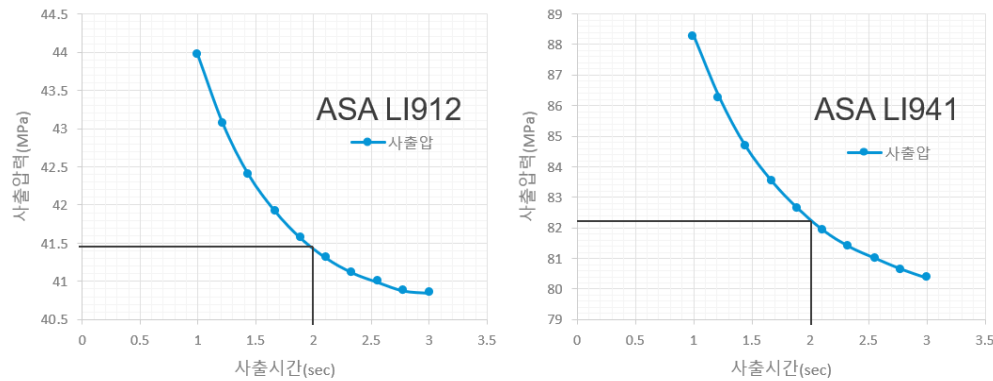
[표 3-9] ASA LI912 사출 시간 변화에 따른 유동 해석 결과 비교

	Injection time (sec)	Bulk temperature (°C)	Clamp force (ton)	V/P Pressure (MPa)	Shear Stress (MPa)	Flow front Temperature (°C)	Ejection Temperature (°C)
1	1	231.69	37.46	43.97	0.495	230.73	57.8
2	1.22	230.44	37.64	43.06	0.474	230.75	57.79
3	1.44	229.17	37.89	42.4	0.458	230.7	57.78
4	1.67	227.86	38.22	41.92	0.444	230.66	57.51
5	1.89	226.53	38.61	41.57	0.433	230.67	57.5
6	2.11	225.16	38.97	41.31	0.423	230.67	57.49
7	2.33	223.78	39.38	41.12	0.415	230.66	57.48
8	2.56	222.37	39.74	40.99	0.408	230.64	57.47
9	2.78	220.95	40.04	40.88	0.402	230.62	57.46
10	3	219.53	40.45	40.85	0.397	230.6	57.44

[표 3-10] ASA LI941 사출 시간 변화에 따른 유동 해석 결과 비교

	Injection time (sec)	Bulk temperature (°C)	Clamp force (ton)	V/P Pressure (MPa)	Shear Stress (MPa)	Flow front Temperature (°C)	Ejection Temperature (°C)
1	1	232.45	58.81	88.25	0.943	230.13	58.78
2	1.22	231.56	59.41	86.24	0.906	230.42	58.77
3	1.44	230.56	60.01	84.68	0.876	230.45	58.5
4	1.67	229.49	60.75	83.51	0.854	230.47	58.49
5	1.89	228.38	61.56	82.63	0.835	230.47	58.48
6	2.11	227.2	62.24	81.91	0.819	230.54	58.21
7	2.33	225.96	63.11	81.38	0.806	230.61	58.2
8	2.56	224.69	64.22	80.99	0.796	230.63	58.19
9	2.78	223.41	65.18	80.64	0.787	230.66	58.18
10	3	222.1	66.04	80.35	0.778	230.67	58.16

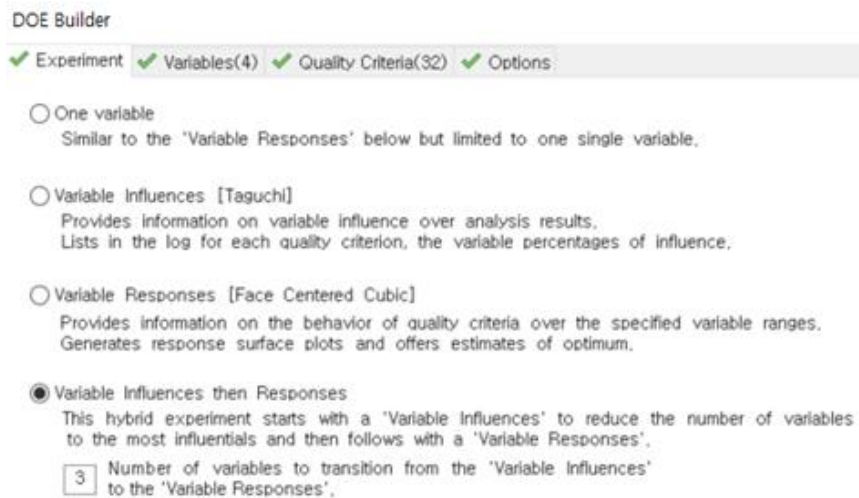
사출 시간 변화에 따른 사출 압력 결과를 [그림 3-85]와 같이 그래프로 적용한 결과 충전 시간이 2sec 일 때 ASA LI912 는 약 41.5MPa, ASA LI941 은 약 82.2MPa 로 예측되었다.



[그림 3-85] 사출 시간 변화에 따른 사출 압력 CAE 예측 결과

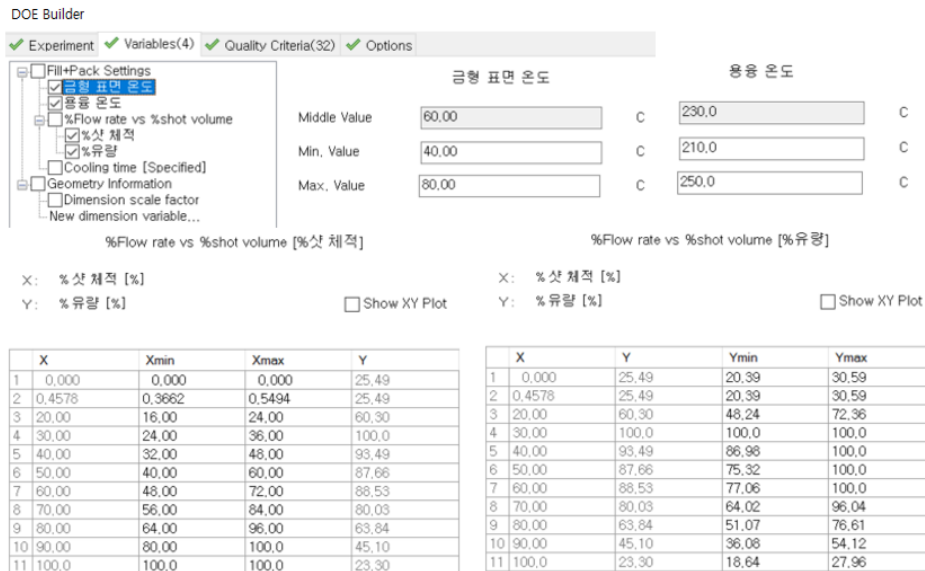
#### 4) 유동 해석 DOE

DOE Builder 를 활용하여 변수 영향 분석 후 반응표면 모델을 활용하여 사출 압력, 형체력, 취출온도에 도달하는 시간을 분석하였다. 실험 영역은 [그림 3-86]과 같이 Variable Influences then Responses 를 선택하였다.



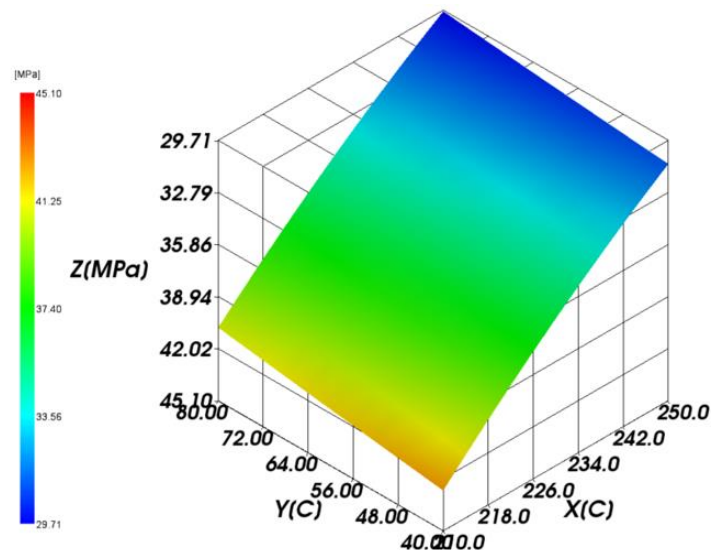
[그림 3-86] DOE Builder 의 실험 선택

변수 영향에서 변수 응답의 천이는 3 개의 변수로 선정했다. [그림 3-87]과 같이 변수는 금형 온도, 수지의 용융 온도, 사출 유량 및 체적 총 4 가지를 선택하였고, 최솟값과 최댓값은 수지 제조사에서 권장하는 온도 및 유동 선단의 면적을 고려한 추천 사출 유량 및 체적을 이용하였다.



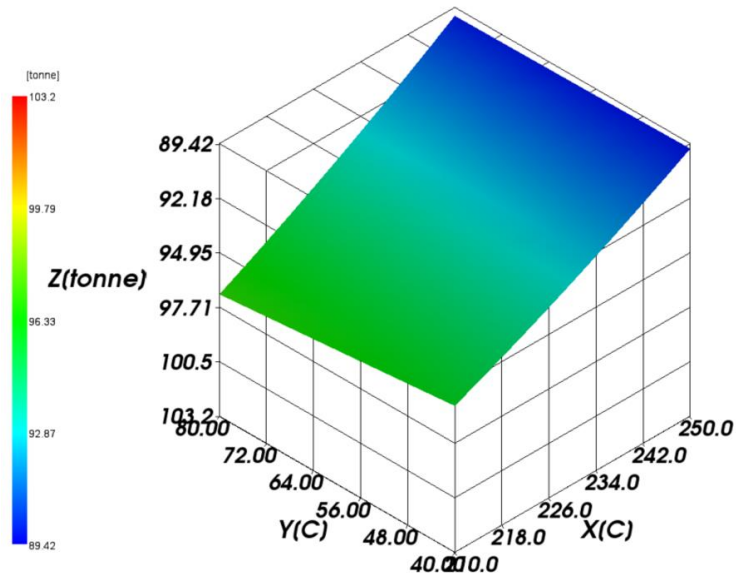
[그림 3-87] DOE Builder 의 변수 선택

ASA LI912, ASA LI941 수지의 DOE 결과는 [그림 3-88] ~ [그림 3-91]과 같이 반응표면 모델로 변수(X, Y)에 따른 최대 사출 압력(MPa), 형체력(ton)을 나타낼 수 있다. 총 4 개의 변수 중 영향력이 큰 수지의 온도 변화와 금형 온도 변화를 선정하였다. ASA LI912 수지는 사출 속도 변화에 따라 최대 사출 압력은 29.7 ~ 43.0MPa, ASA LI941 수지는 59 ~ 93MPa 로 예측되었다. 형체력은 ASA LI912 수지의 경우 90ton ~ 97ton, ASA LI941 수지는 115ton ~ 127ton 으로 예측되었다.

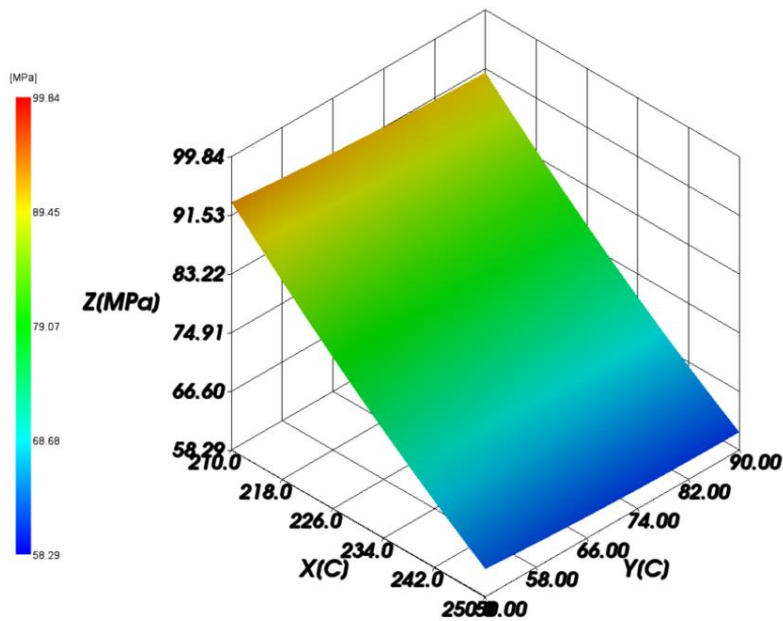


[그림 3-88] ASA LI912 수지의 변수(X, Y)에 따른 최대 사출 압력,

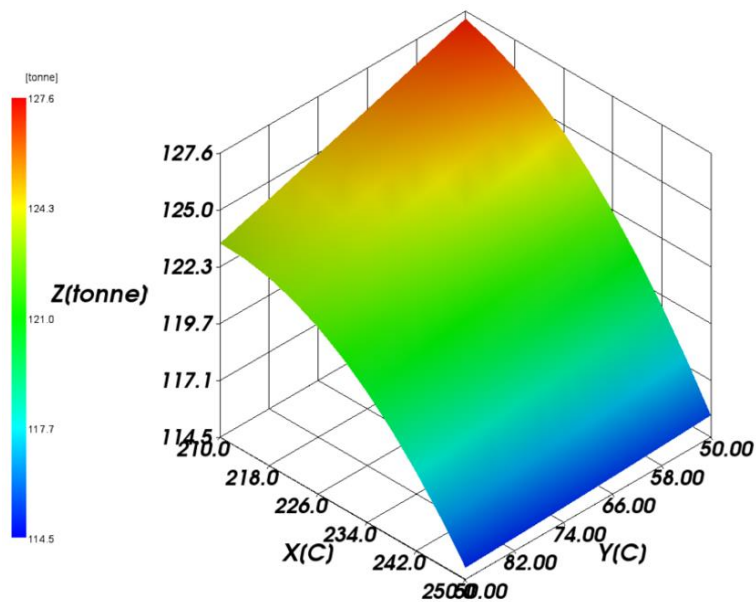
X : 수지 온도(°C), Y : 금형 온도(°C), Z : 사출 최대압력(MPa)



[그림 3-89] ASA LI912 수지의 변수(X, Y)에 따른 필요 형체력,  
X : 수지 온도(°C), Y : 금형 온도(°C), Z : 필요 형체력(ton)



[그림 3-90] ASA LI941 수지의 변수(X, Y)에 따른 최대 사출 압력,  
X : 수지 온도(°C), Y : 금형 온도(°C), Z : 사출 최대압력(MPa)

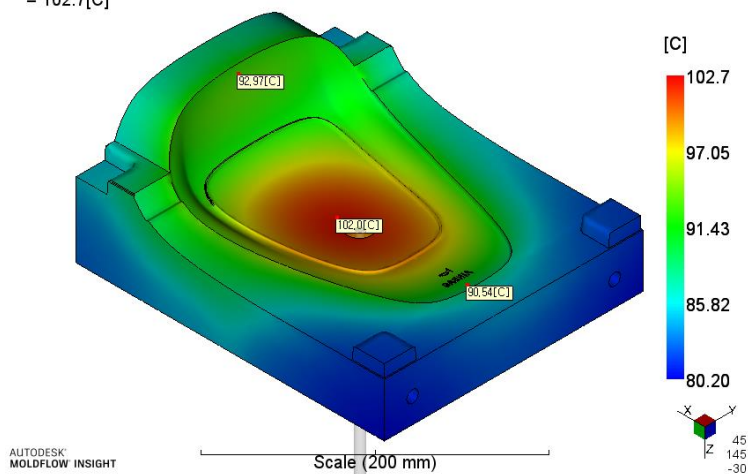


[그림 3-91] ASA LI941 수지의 변수(X, Y)에 따른 필요 형체력,  
 X : 수지 온도(°C), Y : 금형 온도(°C), Z : 필요 형체력(ton)

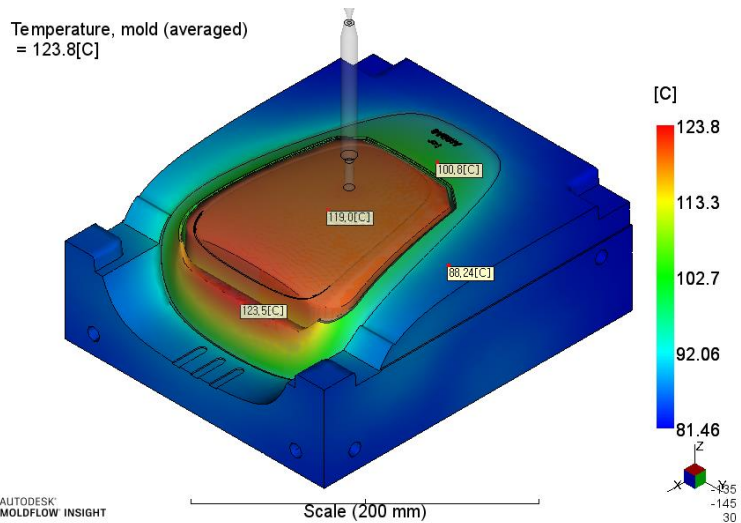
##### 5) 냉각 해석

[그림 3-92], [그림 3-93]은 상·하측 금형의 온도를 예측하였다. 상측은 80.2 ~ 102.7°C, 하측은 80.46 ~ 123.8°C로 예측되었다. 상측보다 하측의 온도가 약 21.1 도 높았다.

Temperature, mold (averaged)  
 = 102.7[C]

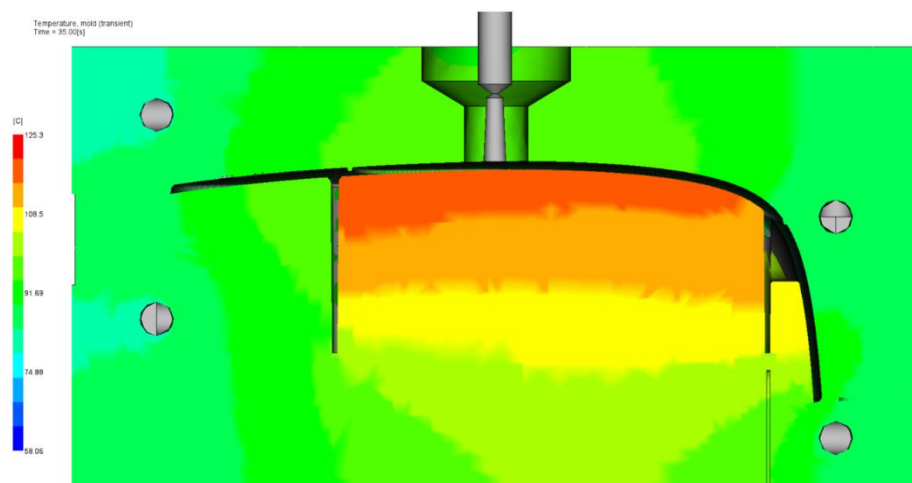


[그림 3-92] 상측 Temperature, mold(average) 결과



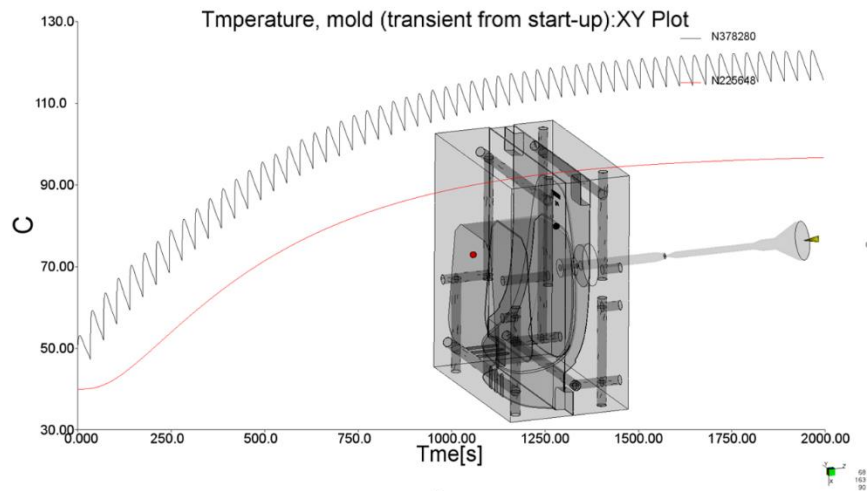
[그림 3-93] 하측 Temperature, mold(average) 결과

[그림 3-94]와 같이 금형의 단면을 확인한 결과 하측 입자 코어에 냉각 채널이 없어 열 집중이 발생하여 입자 코어에 열 집중이 발생하였다. [그림 3-95]는 생산 초기부터 약 50 사이클 후에 온도가 정상 상태로 유지되어 초기 시험 사출 온도와 양산 사출 온도는 약 60 도 이상 차이가 발생할 것을 확인하였다.



[그림 3-94] Temperature, mold(transient) 결과

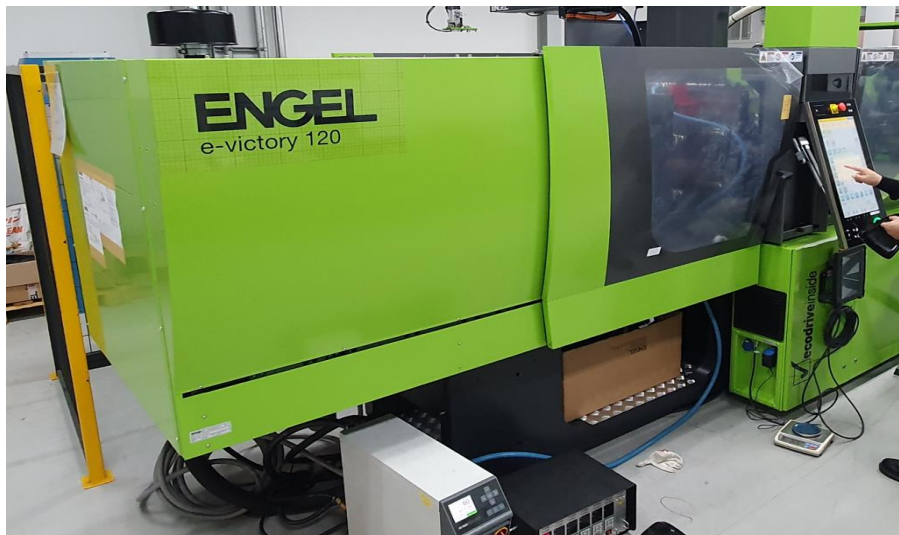




[그림 3-95] Temperature, mold(transient from start-up) 결과

#### 6) 시험 사출 후 초기 CAE 결과와 사출 압력 비교

시험 사출 성형기는 Engel 社の e-victory 120(기종 이름, 형체력 120ton, 스크류 직경 40mm) 기종 사용, 용융 수지의 설정 온도는 230°C, 프로브 타입 온도계로 측정한 결과 226.5°C로 측정되었다.

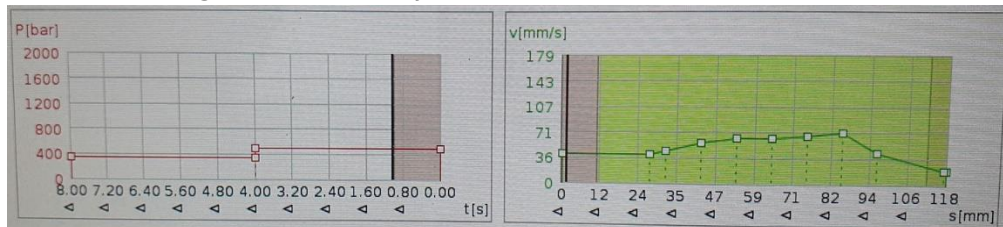


[그림 3-96] Engel 社の e-victory 120 사출 성형기



<b>Plasticizing 1:</b>		
Screw diameter	mm	40
Screw diameter	mm	35   40   45
Screw stroke	mm	175
Maximum injection capacity	cm <sup>3</sup>	220
Screw speed	min <sup>-1</sup>	420
Screw torque	Nm	605
Recovery rate (3-zone screw) <sup>1,2,3</sup>	g/s	33,3
Recovery rate (barrier screw) <sup>3,4</sup>	g/s	40,2
<b>Injection 1:</b>		
Version:		Standard, Standard-Cl
Injection rate	cm <sup>3</sup> /s	224,40
Injection pressure (regenerative)	bar	2000,0
<b>Nozzle 1:</b>		
Nozzle stroke	mm	290
Nozzle contact pressure	kN	41,0
<b>Material cylinder 1:</b>		
L/D ratio		20,0
Heating zones incl. nozzle 1)		4
Heating wattage 1)	kW <sub>el</sub>	9,4

[그림 3-97] Engel 社의 e-victory 120 사출장치 사양

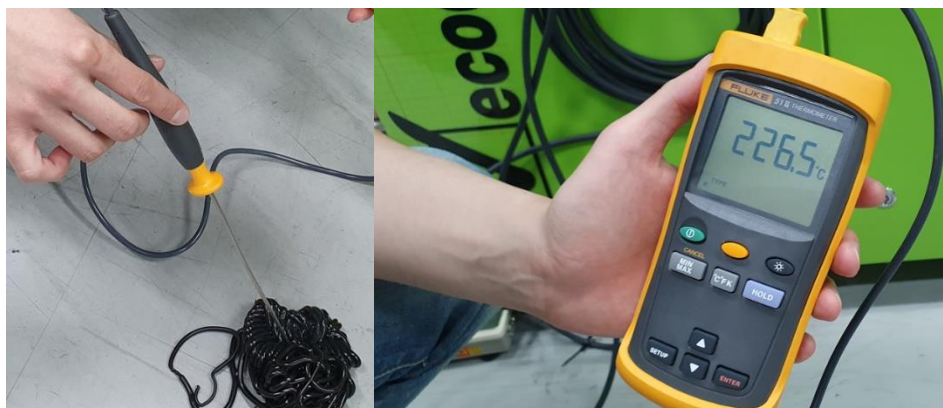


[그림 3-98] 시험 사출 성형기 보압조건(좌), 사출 조건(우)



[그림 3-99] 핫러너 설정온도 230℃, 냉각수 설정 온도 60℃

사출 성형기에서 사출 후 에어백 커버 금형을 열고 취출 전 이미지를 [그림 3-101]과 같이 촬영하였고, 보압 절환 시 제품 중량과 보압 적용 후 제품 중량을 [그림 3-102]와 같이 촬영하였다.



[그림 3-100] 용융 수지 온도측정

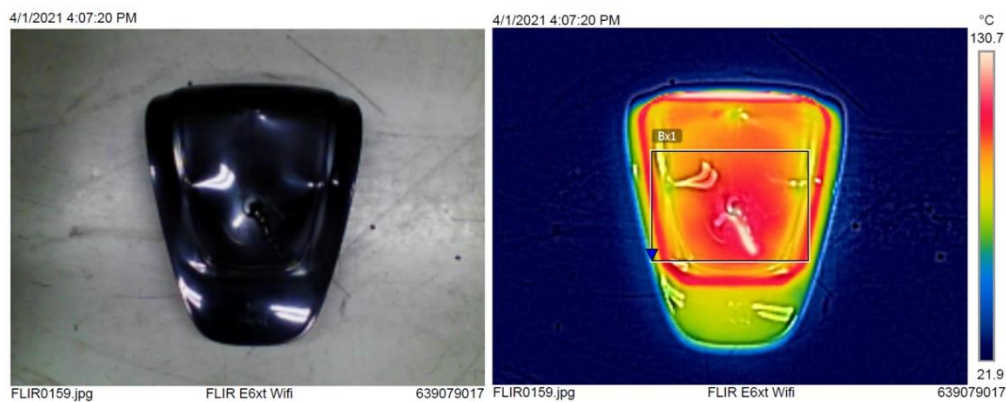


[그림 3-101] 사출 성형기에서 사출 후 에어백 커버 금형 열림

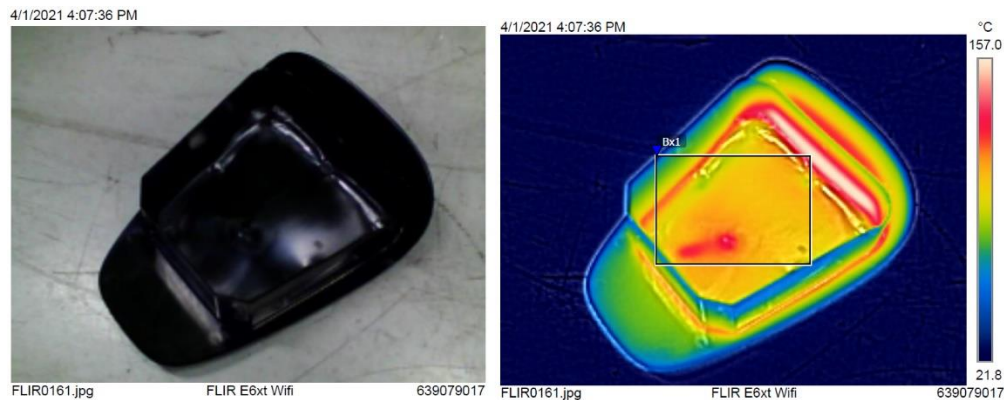


[그림 3-102] 보압 절환 시 제품 중량(좌), 보압적용 후 제품중량(우)

[그림 3-103]은 ASA LI912-V 수지로 에어백 커버 사출 후 열화상 카메라(FLIR E6xt)를 이용한 온도측정 결과이다. 두께가 두꺼운 부위 및 러너부위는 약 130.7℃까지 높아져 있었고, 하측 리브와 연결된 부분이 빨간 띠를 이루며 뜨거운 것을 확인할 수 있다. [그림 3-104]는 시험 사출 후 취출된 제품의 하측 온도측정 결과이다. 제품두께가 가장 두꺼운 부위의 온도가 약 157℃로 측정되었다. 상측보다 하측의 제품 온도가 약 26.3℃ 높은 것을 확인하였다.

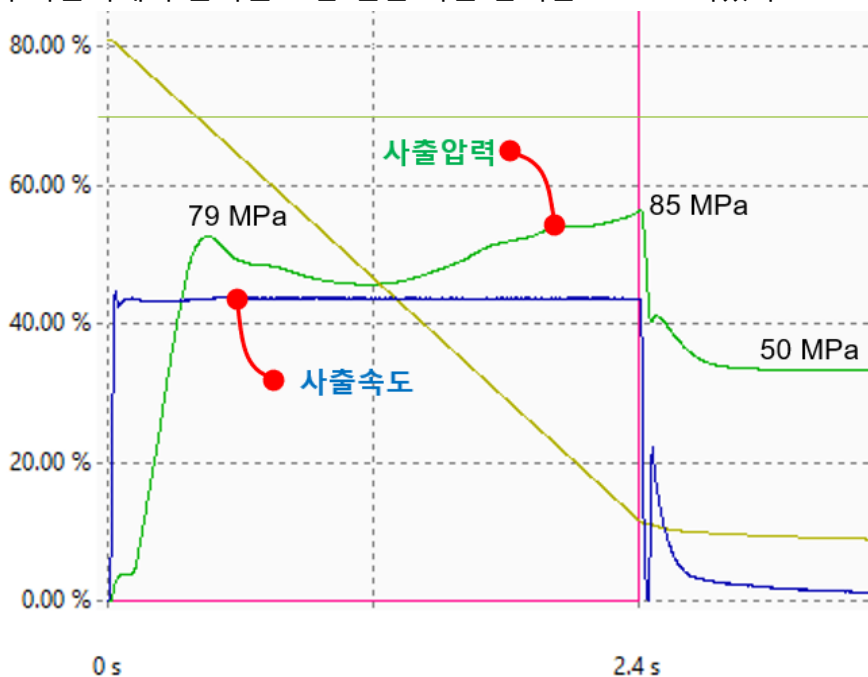


[그림 3-103] 시험 사출 후 취출된 제품의 상측 온도측정 결과

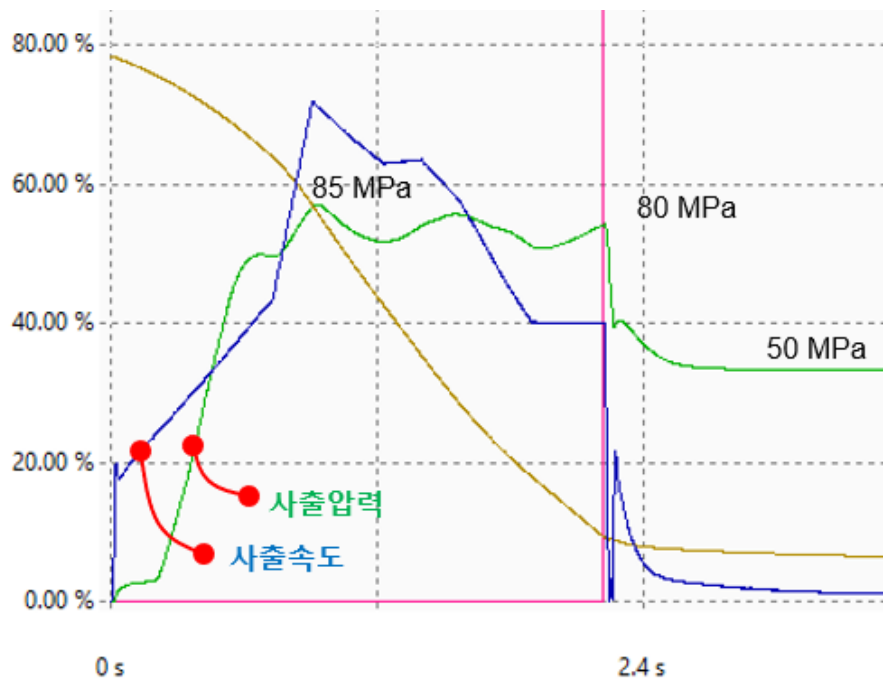


[그림 3-104] 시험 사출 후 취출된 제품의 하측 온도측정 결과

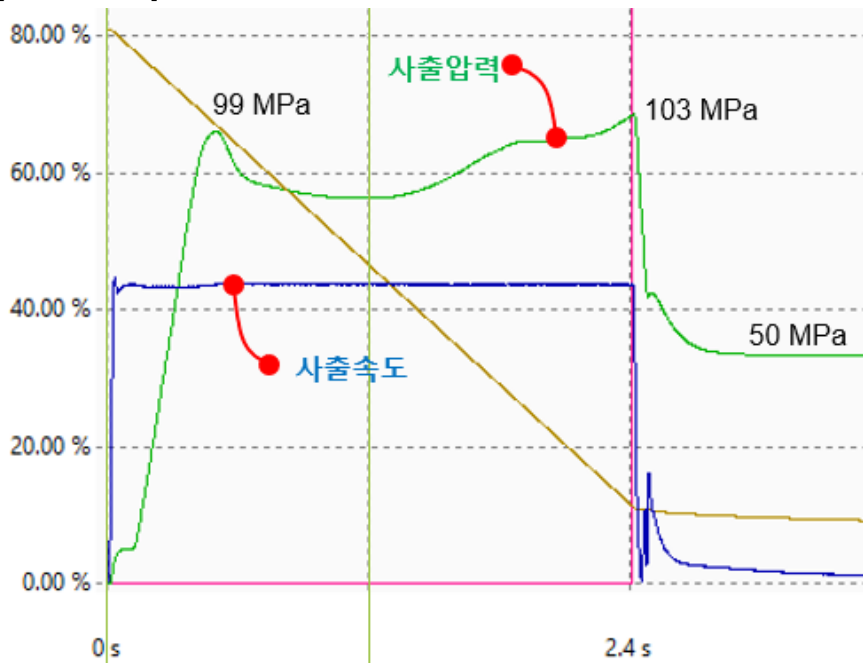
[그림 3-105]는 LI921 1 단 속도제어 시 사출기에서 출력된 사출 속도(파란색) 및 사출 압력(녹색) 그래프로 보압 절한 사출 압력은 85MPa 이었다. [그림 3-106]은 다단 속도제어 시 사출기에서 출력된 보압 절한 사출 압력은 80MPa 이었다. [그림 3-107]은 LI941 1 단 속도제어 시 사출기에서 출력된 보압 절한 사출 압력은 103MPa 이었다. [그림 3-108]은 다단 속도제어 시 사출기에서 출력된 보압 절한 사출 압력은 99MPa 이었다.



[그림 3-105] LI921 1 단 속도제어 사출기 출력 속도 및 압력

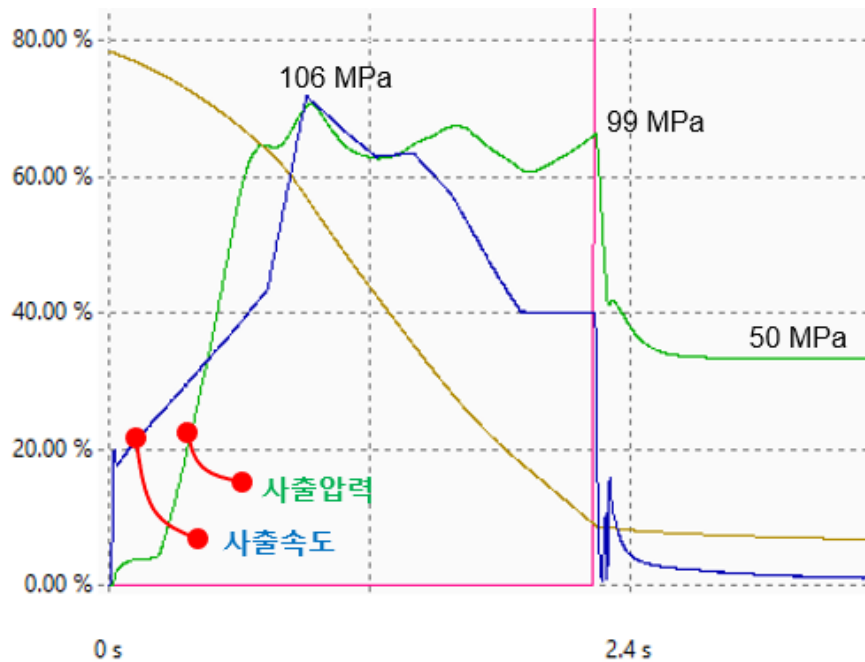


[그림 3-106] Li921 다단 속도제어 사출기 출력 속도 및 압력



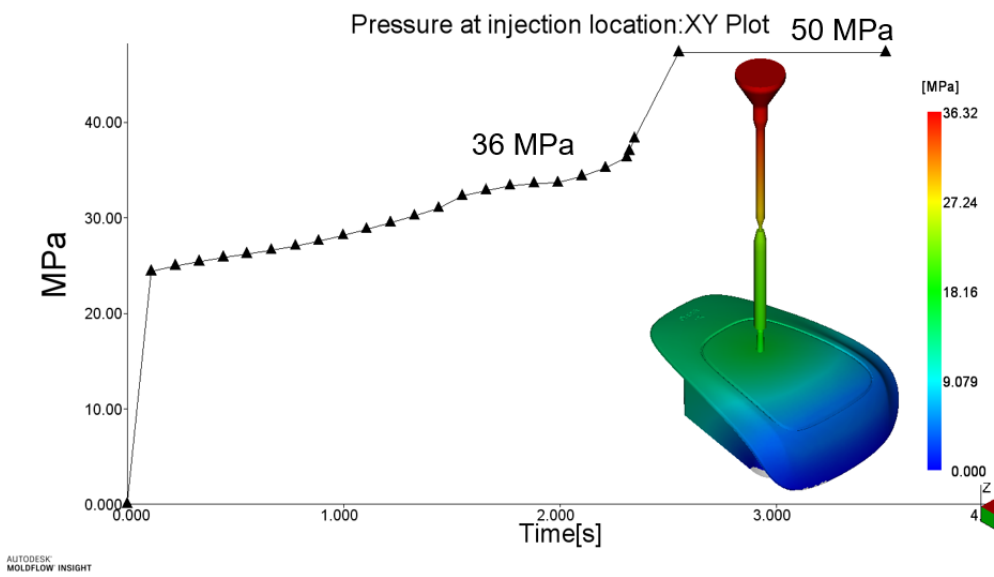
[그림 3-107] Li941 1 단 속도제어 사출기 출력 속도 및 압력



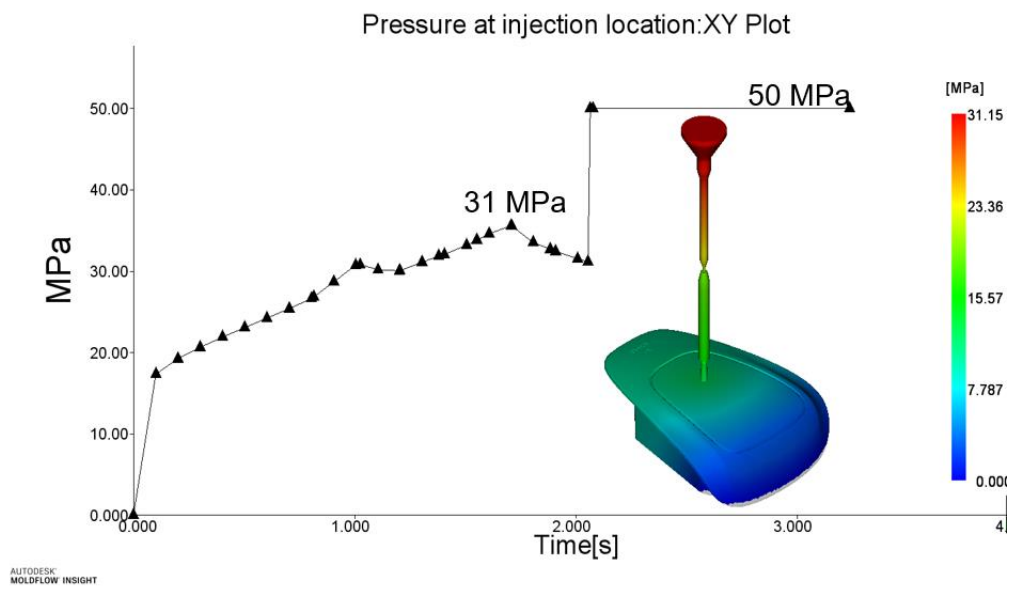


[그림 3-108] LI941 다단 속도제어 사출기 출력 속도 및 압력

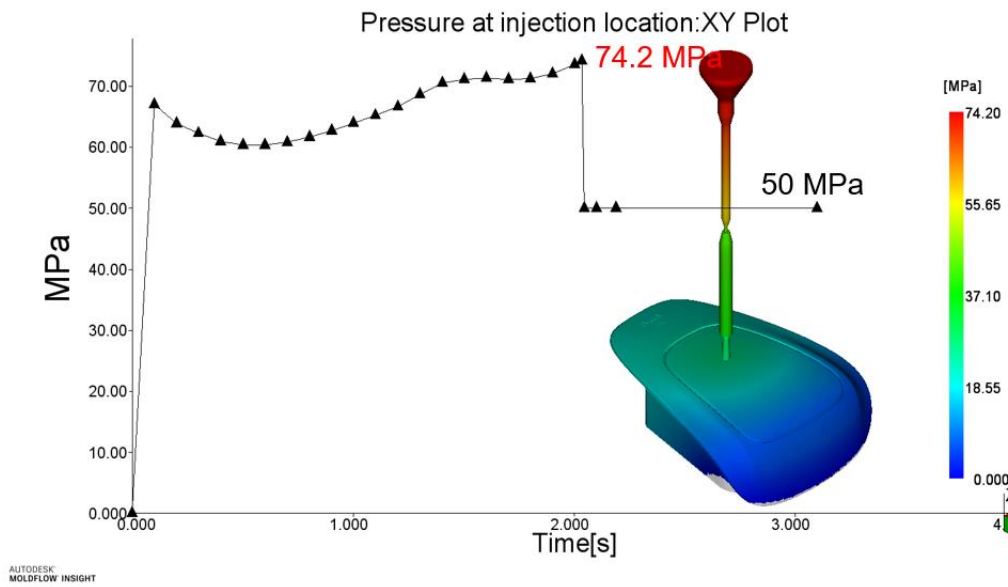
CAE 에서 초기 예측한 보압 절환 사출 압력은 [그림 3-109] ~ [그림 3-112] 같이 LI921 수지에 1 단 속도제어일 때 36MPa, 다단 속도제어일 때 31MPa 로 예측되었다. 이는 실제 사출 실험 결과 대비 38.8 ~ 42.4% 수준으로 오차율은 57.6 ~ 61.3% 수준이다. LI941 수지에 1 단 속도제어일 때 74.2MPa, 다단 속도제어일 때 64.27MPa 로 예측되었다. 이는 실제 사출 실험 결과 대비 64.9 ~ 72.0% 수준으로 오차율은 28.0 ~ 35.1% 수준이다. 실제 사출은 보압 절환 사출 압력보다 보압 압력이 모두 낮았지만, CAE 결과는 LI921 일 때 보압 절환 사출 압력보다 보압 압력이 모두 높았다. 실제와 매우 다른 패턴이 발생하였다. 이러한 현상을 극복하기 위해 수지의 점도, 사출 조건 등 정확성 개선 인자를 파악해보고자 한다.



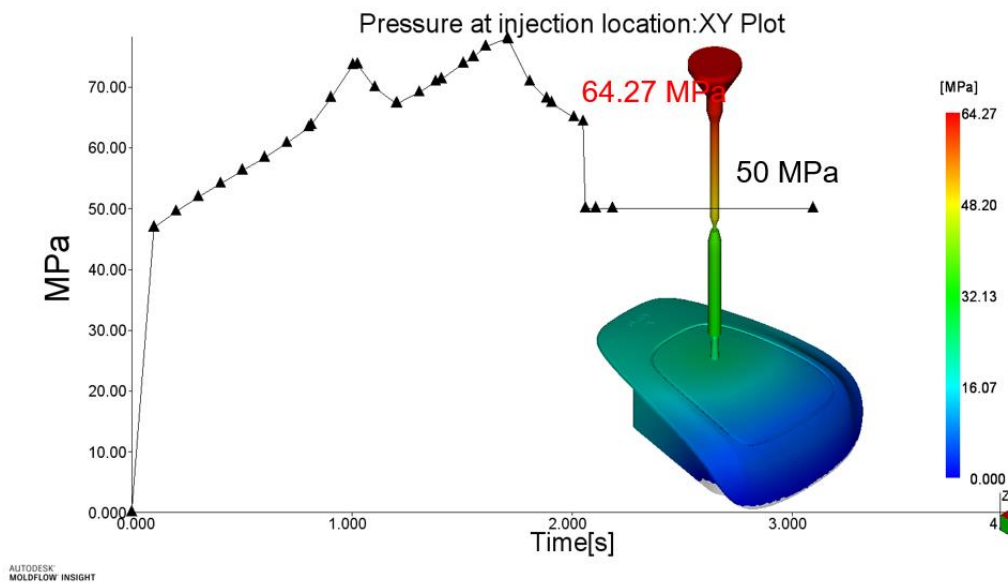
[그림 3-109] LI921 1 단 속도제어 1st CAE 결과



[그림 3-110] LI921 다단 속도제어 1st CAE 결과



[그림 3-111] LI941 1 단 속도제어 1st CAE 결과



[그림 3-112] LI941 다단 속도제어 1st CAE 결과

7) CAE 정확성 개선을 위한 수지 물성 및 사출 조건 검토

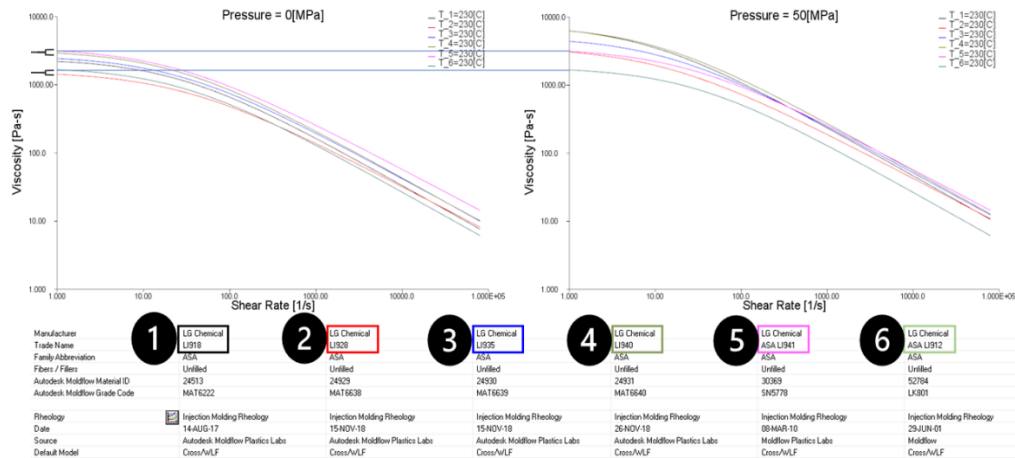


같은 제조사에서 ASA 수지 물성을 측정한 Autodesk Moldflow 데이터베이스에서 확인한 결과 [그림 3-113]과 같이 총 6 가지이다.

	1	2	3	4	5	6
Manufacturer	LG Chemical	LG Chemical	LG Chemical	LG Chemical	LG Chemical	LG Chemical
Trade Name	LI918	LI928	LI935	LI940	ASA LI941	ASA LI912
Family Abbreviation	ASA	ASA	ASA	ASA	ASA	ASA
Fiber / Filler	Unfilled	Unfilled	Unfilled	Unfilled	Unfilled	Unfilled
Autodesk Moldflow Material ID	24513	24529	24530	24531	30363	52794
Autodesk Moldflow Grade Code	MAT6222	MAT6638	MAT6639	MAT6640	SN5778	LK901
Rheology	Injection Molding Rheology	Injection Molding Rheology	Injection Molding Rheology	Injection Molding Rheology	Injection Molding Rheology	Injection Molding Rheology
Date	14-AUG-17	15-NOV-18	15-NOV-18	26-NOV-18	08-MAR-10	29-JUN-01
Source	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Moldflow Plastics Labs	Moldflow
Default Model	Cross/WLF	Cross/WLF	Cross/WLF	Cross/WLF	Cross/WLF	Cross/WLF
Thermal Conductivity	Line Source	Transient Plane Source	Transient Plane Source	Transient Plane Source	Line Source	TC200
Date	14-AUG-17	19-NOV-18	19-NOV-18	26-NOV-18	19-FEB-10	01-OCT-98
Source	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Moldflow Plastics Labs	Moldflow
Specific Heat	DSC cooling	DSC cooling	DSC cooling	DSC cooling	DSC cooling	DSC cooling
Date	14-AUG-17	15-NOV-18	15-NOV-18	22-NOV-18	08-MAR-10	01-OCT-98
Source	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Other	Moldflow
p-T	Indirect Dilatometry	Indirect Dilatometry	Indirect Dilatometry	Indirect Dilatometry	Indirect Dilatometry	Indirect Dilatometry
Date	14-AUG-17	21-NOV-18	22-NOV-18	27-NOV-18	19-FEB-10	01-OCT-98
Source	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Moldflow Plastics Labs	Moldflow
Shrinkage	CRHS	CRHS	CRHS	CRHS	CRHS	CRHS
Date	12-AUG-20	12-AUG-20	12-AUG-20	12-AUG-20	12-AUG-20	12-AUG-20
Source	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Autodesk Moldflow Plastics Labs	Moldflow
Resin identification code	7	7	7	7	7	7
Energy usage indicator	5	3	4	5	5	4
Fill Quality Indicator	Gold	Gold	Gold	Gold	Gold	Bronze
Pack Quality Indicator	Gold	Gold	Gold	Gold	Gold	Bronze
Warp Quality Indicator	Gold	Gold	Gold	Gold	Gold	Bronze

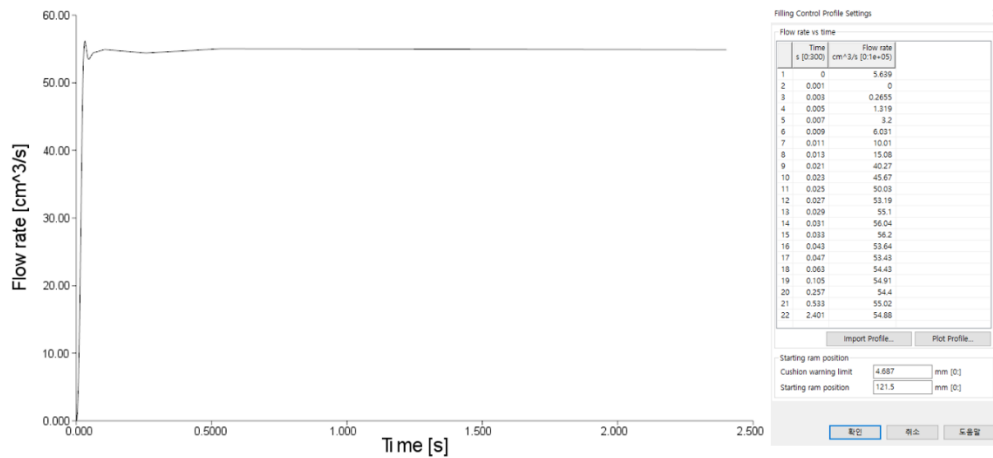
[그림 3-113] Autodesk Moldflow 데이터베이스 중 ASA 물성 검색 결과

본 실험에서 초기 해석에서 사용한 수지는 [그림 3-114]의 5 번, 6 번 수지로 빨간 화살표와 같이 수지를 측정할 시점은 오차율이 높았던 LI912 소재의 경우, 1998 년 10 월로 현시점과 비교하면 약 23 년이 지났으며, LI941 소재의 경우 측정할 시점은 2010 년 2 월로 약 11 년이 되었다. [그림 3-113]의 맨 아래 화살표와 같이 Moldflow 社의 수지 물성 평가도 LI912 는 모든 영역에서 가장 낮은 단계였고, LI941 의 경우 최고 등급 이다. 사출 압력은 온도, 전단율, 압력에 의해 영향을 받는데, 물성 검토 결과 0MPa 일 때 점도와 50MPa 일 때의 점도의 차이가 없었다. [그림 3-114]와 같이 본 실험에 사용한 물성인 5 번(LI941), 6 번(LI921) 수지에서 왼쪽 점도 그래프(압력이 0MPa 일 때)와 오른쪽 점도 그래프(압력이 50MPa 일 때)에 선을 이어서 비교한 결과 변화가 없었다. Cross-WLF 모델상 압력의존성계수인 D3 값이 0 으로 작성되었다. 그래서 기존 스파이럴 테스트와 같이 D3 값을 임의로 작성하는 것보다, 같은 제조사에서 측정할 물성 중 0MPa 일 때 점도는 유사하지만 D3 가 측정된 물성을 대체 그레이드로 선정 후 물성을 편집하여 해석을 수행하였다.

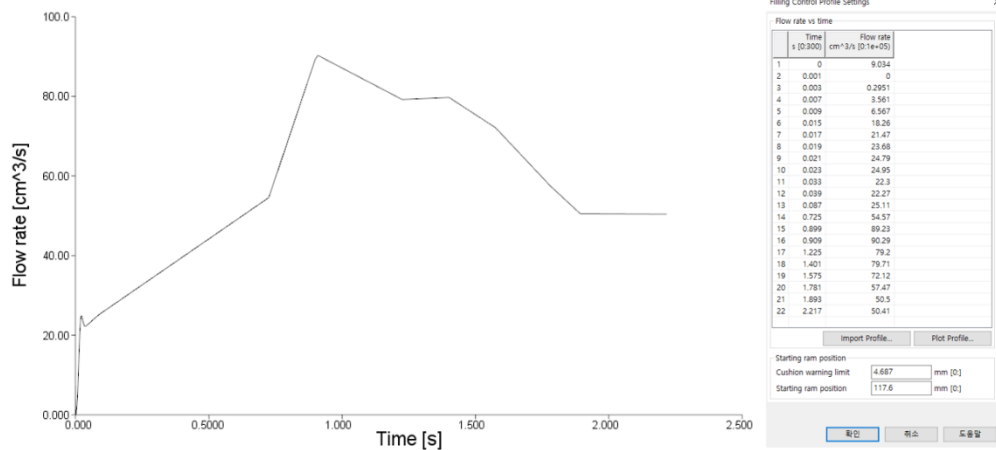


[그림 3-114] Autodesk Moldflow 데이터베이스 중 점도 물성 비교

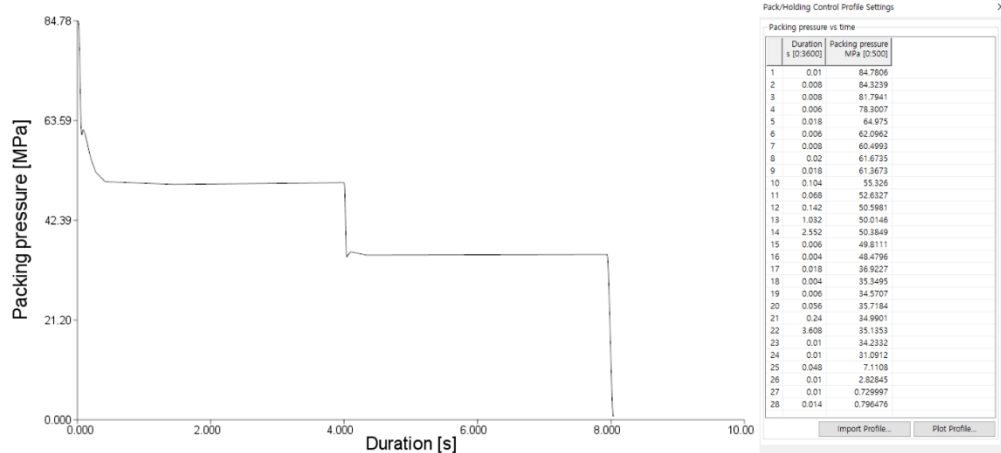
또한 CAE 에 사출 조건 입력 시 사출기의 출력 성능을 고려하기 위해 플랜지(스크류 또는 램)의 실제 이동 속도를 반영하였다. 설정 속도를 맞추기 위해 실제 이동 속도는 일정 시간이 지연된다. 또한 설정 압력을 맞추기 위해 실제 압력은 지연된다. 이러한 지연을 CAE 에 고려하기 위해 사출 속도 제어를 1 단 제어일 때 [그림 3-115] 적용하였으며, 다단계제어일 때 [그림 3-116]과 같이 적용하였다. 또한 보압 조건은 [그림 3-117]과 같이 적용하였다.



[그림 3-115] 1 단 속도제어 2nd CAE 입력결과



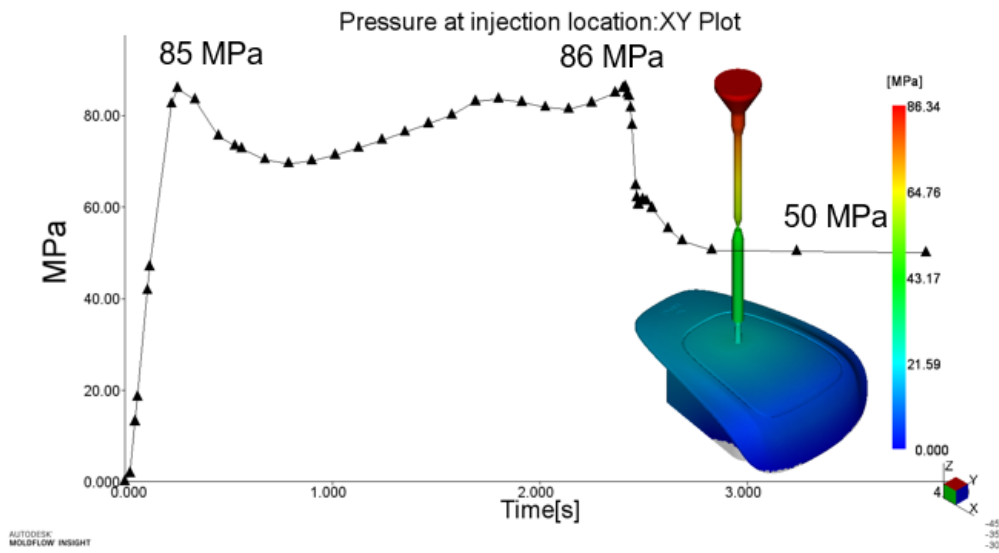
[그림 3-116] 다단 속도제어 2nd CAE 입력결과



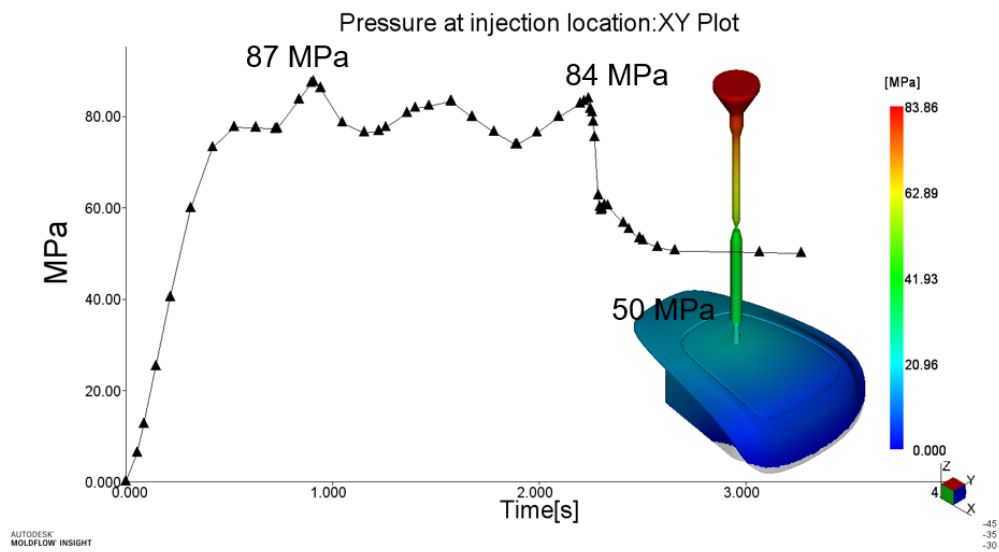
[그림 3-117] 보압제어 2nd CAE 입력결과

## 8) 개선된 CAE 사출 압력 결과

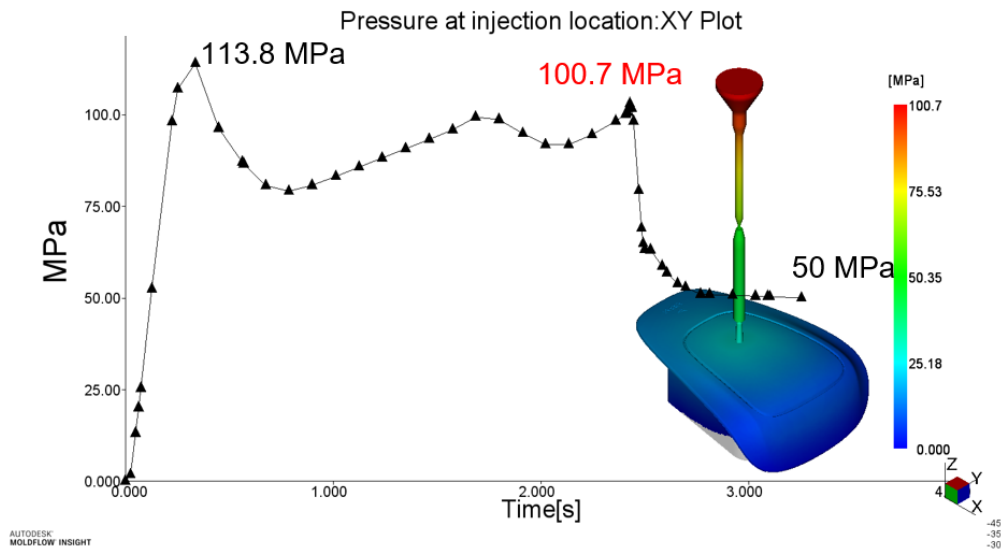
수지 물성 변경과 사출 속도 및 보압 조건을 개선하여 CAE 를 진행한 결과 [그림 3-118] ~ [그림 3-121]로 개선되었다.



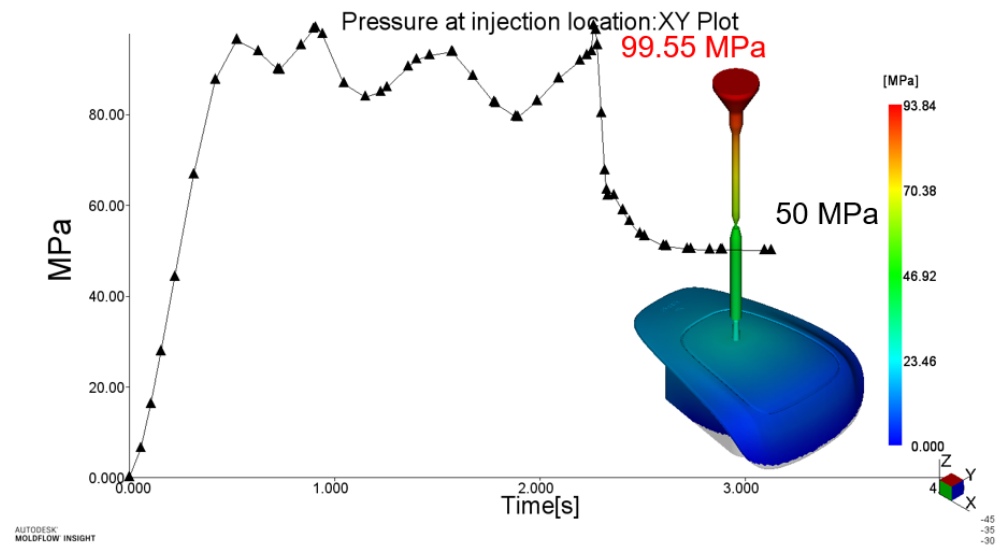
[그림 3-118] LI921 1 단 속도제어 2nd CAE 결과



[그림 3-119] LI921 다단 속도제어 2nd CAE 결과



[그림 3-120] LI941 1 단 속도제어 2nd CAE 결과



[그림 3-121] LI941 다단 속도제어 2nd CAE 결과

[그림 3-122]와 같이 초기 CAE(1st)와 개선된 CAE(2nd)의 오차율 비교 결과, LI912 소재의 경우 사출 속도 변화에 따라 오차율이 57.6 ~ 61.3%이었으나, 개선된 CAE(2nd CAE)는 5% 이내로

감소하였다. 또한 LI941 소재의 경우 사출 속도 변화에 따라 오차율이 28.0 ~ 35.1%였으나, 개선된 CAE(2nd CAE)는 2.2% 이내로 감소하였다.

	Resin	Ram speed	CAE	Trial	Ratio
1st CAE	912	Single	36	85	57.6%
	912	Multi	31	80	61.3%
	941	Single	74.2	103	28.0%
	941	Multi	64.27	99	35.1%
2nd CAE	928M	Single	86	85	-1.2%
	928M	Multi	84	80	-5.0%
	940M	Single	100.7	103	2.2%
	940M	Multi	99.55	99	-0.6%

[그림 3-122] 1st CAE 와 2nd CAE 의 오차율 비교 결과

## 제 6 절 결 론

빅데이터, 데이터 사이언스, 클라우드 컴퓨팅, 모바일 및 소셜 네트워크, 협업 경쟁력과 같은 기술 트렌드는 더 나은 의사결정 시스템과 최적화된 프로세스를 가능하도록 돕는다. 사출 성형 분야도 시행착오를 최소화하고 혁신적인 제품 개발을 위해 설계와 제조를 융합하는 기술로 CAE 는 제조 프로세스에 깊이 안착하였다. CAE 는 제조 환경을 가상현실로 설계, 가공, 제작하여 검증할 수 있어 제조 프로세스를 가속할 수 있고 품질을 향상할 수 있다. 이러한 CAE 역할을 수행하기 위해서 필요한 기술은 CAE 예측의 정확성과 머신러닝을 활용한 최적화이다. 본 연구는 실제 사출 성형 공정과 CAE 예측의 편차가 발생하는 원인과 CAE 정확성 향상을 위한 방법에 대하여 연구하였으며, 아래와 같은 성과를 얻어냈다.

- 사출 실험 결과와 Moldflow 예측결과를 어긋남 없이 정확하게 예측하기 위한 다양한 변수를 언급하였으며, 상황에 맞게 주요 변수를 선정하여 분석이 필요함을 확인하였다.
- SIM-LINK 는 Engel 사 사출기(컨트롤러 버전 CC200 이상)와 Autodesk Moldflow 를 양방향 데이터 전송 자동화가 가능함을 확인하였다.
- SIM-LINK 를 활용하여 AIRBAG COVER 제품의 성형 조건을 IMPORT 하여 CAE 와 사출기의 출력 결과를 비교하였으며, 정확도 개선 인자를 파악하였다.

- Moldflow DOE 를 활용하여 사출 조건 변화 범위에 따라 폭 넓은 예측이 가능하였다.
- Moldflow 2021 버전에 출시된 Automatic Packing Pressure Profile 검증 결과 합리적인 보압 시간 값이 도출 되었다.
- 본 실험 결과 사출압력의 최대치 뿐만 아니라 이력에 대하여 실험과 매우 유사한 패턴을 찾았으며, Moldflow Lab 에서 최근에 측정한 데이터가 일관성 있는 압력을 예측하였다.
- 플라스틱 재료의 유변 물성 복제, 제품 형상 및 금형 모델링 복제, 사출 성형 조건 복제, 사출기 성능 복제 방법을 제시하였고 에어백 커버 제품을 실제 사출한 결과와 CAE 의 사출 압력 예측 결과를 비교하였으며 기존의 오차율이 28.0 ~ 61.3%에서 5% 이내로 개선이 가능함을 확인하였다.

본 연구의 성과로 CAE 를 위한 플라스틱의 유변 물성 측정 범위에 따른 CAE 결과의 신뢰수준 및 구체적인 측정 방법에 대하여 접근할 수 있는 기회가 마련되었다. 또한 사출 성형 CAE 의 유동 및 변형 예측 메커니즘은 유체역학, 열전달, 열역학과 미세 역학에 기반을 두며, 변형의 원인으로 냉각 편차, 수축 편차, 배향 편차, 코너 효과임을 알 수 있었다. 사출 성형 CAE 적확성 개선을 위한 주요 인자로, 제품 형상을 복제하기 위한 방법, 사출 속도와 보압과 같은 공정 조건의 복제, 메시 타입 및 조밀도와 종횡비, 금형 형상 복제, 코어 쉬프트를 통해 금형의 힘까지 고려해야 했다.

CAE 를 사용하지 않는 연구자는 본 연구를 통해 플라스틱 유동 및 힘 거동의 특징을 확인할 수 있다. 즉, 사출 성형 조건의 변화에 따른 사출 압력과 힘의 변화 사례를 확인할 수 있다. 향후 다양한 수지와 형상의 CAE 적확성 향상 및 머신러닝을 활용한 예측 모델을 확장한다면 사출 성형 최적화의 완성도가 더욱 높아질 것으로 기대된다.

- END -