

# Moldflow를 활용한 복합소재 해석 프로세스

이왕화 선임컨설턴트

Senior Consultant | [wh.lee@delcam.co.kr](mailto:wh.lee@delcam.co.kr)



# AGENDA

- ..... 1. 회사 소개
- ..... 2. 복합소재의 개요
- ..... 3. FRP 사출 성형 해석
- ..... 4. 사출 - 구조 연성 해석
- ..... 5. SMC 압축 성형 해석

# 한국 델캠



최고의 기술력으로 CAD/CAM/CAE 분야를 선도



상 호 : 한국델캠 주식회사

주 소 : 서울시 구로구 구로동 한신IT타워 709호

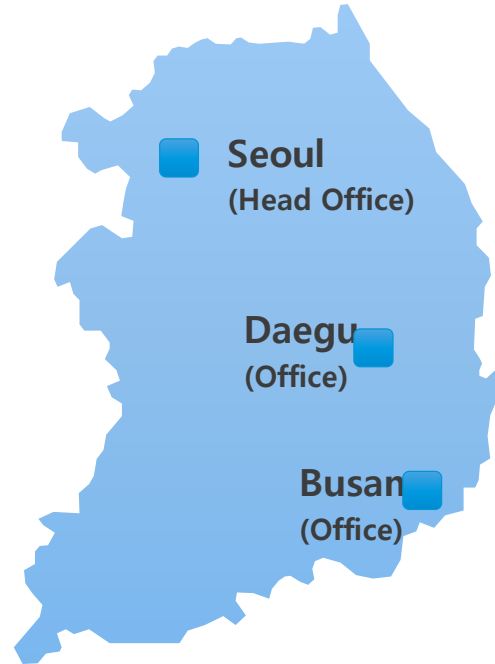
전 화 : 02-6918-3800

F A X : 02-6918-4525


대표이사 : 양 승 일


HOME PAGE : [www.delcam.co.kr](http://www.delcam.co.kr)

E-MAIL : [marketing@delcam.co.kr](mailto:marketing@delcam.co.kr)



## 해외 지사

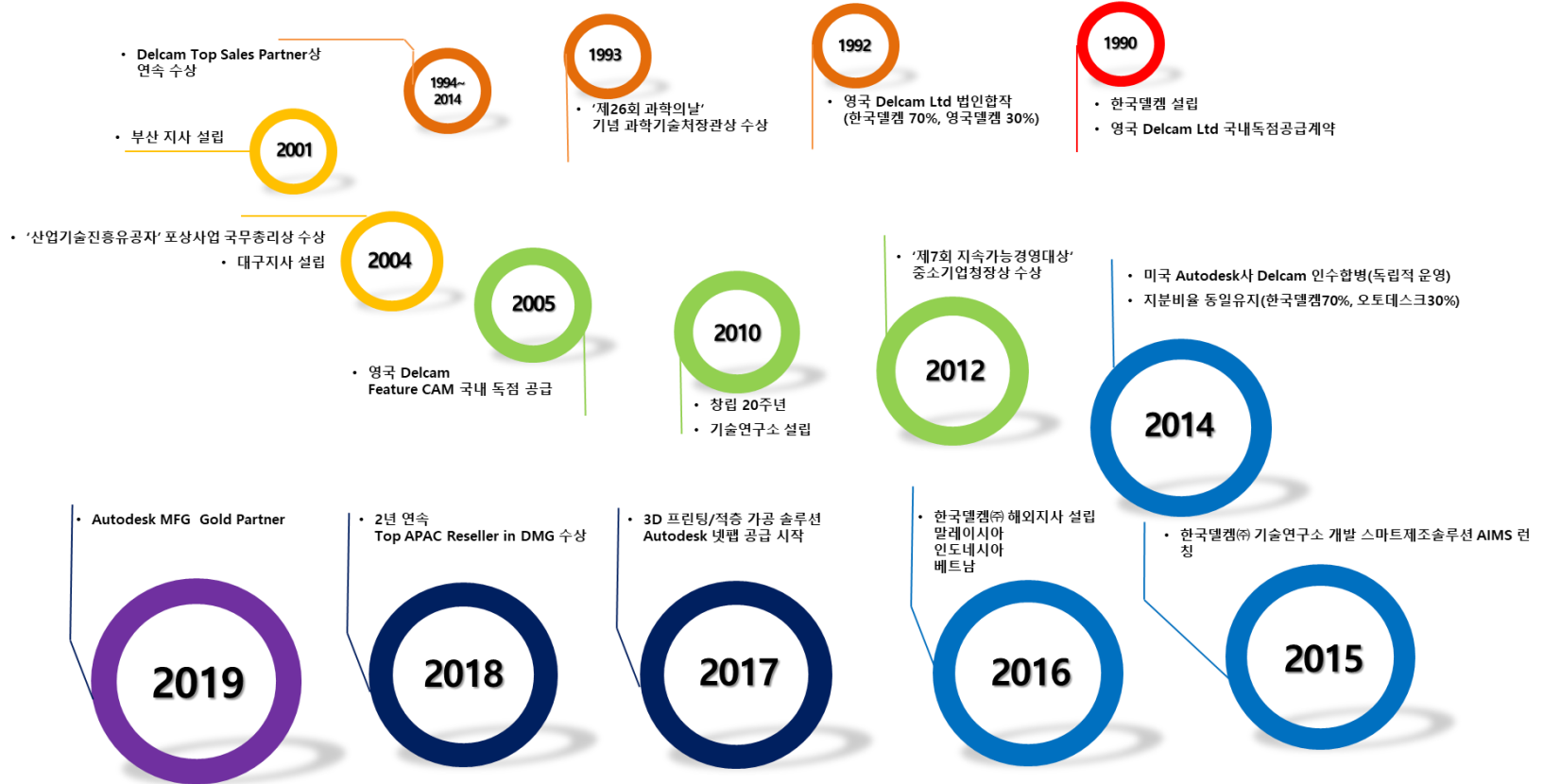
 인도네시아  
(Indonesia)

 베트남  
(Vietnam)

# 한국 델캠



## 최고의 기술력으로 CAD/CAM/CAE 분야를 선도

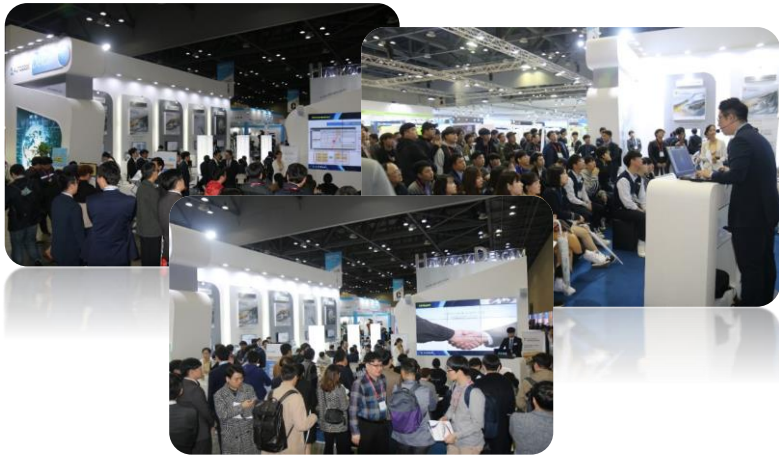


# 한국 델캠



## 주요 행사

### INTERMOLD KOREA, SIMTOS



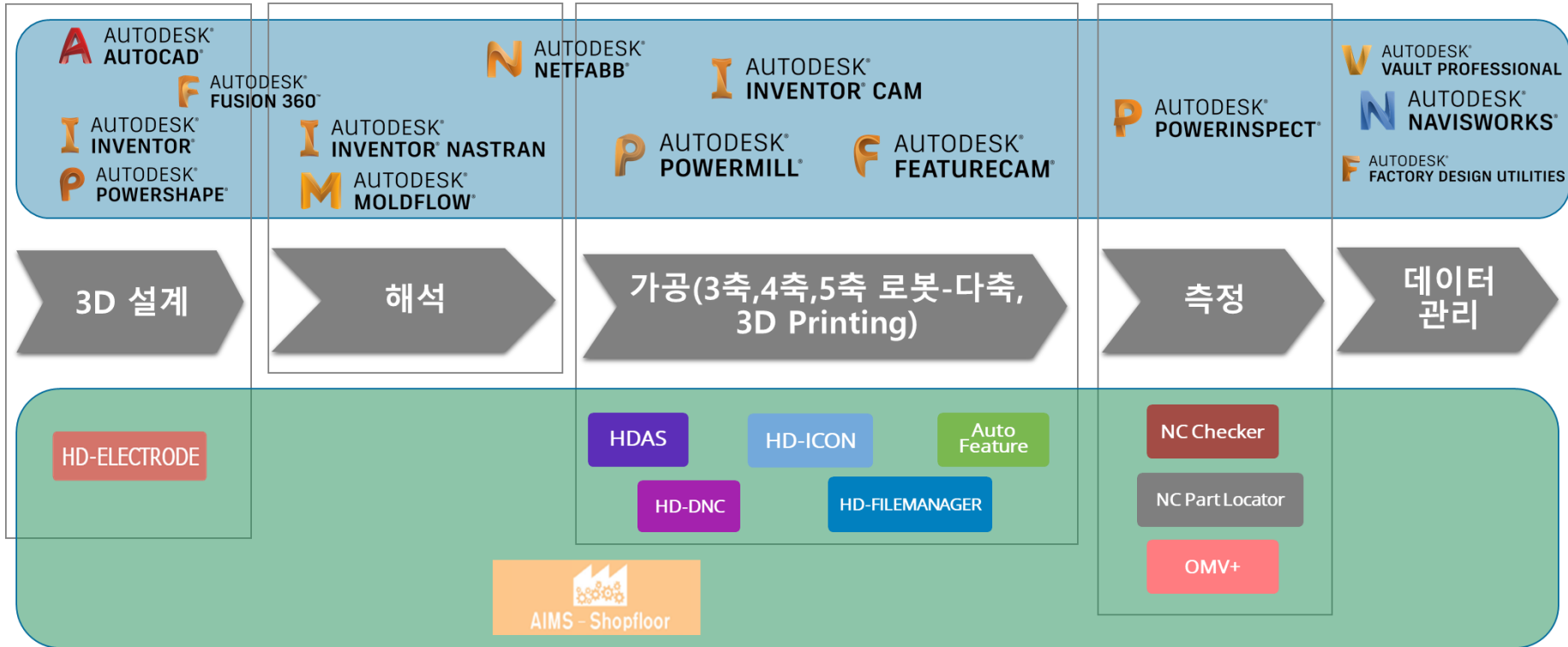
<서울 국제 제조기술 전, 국제 금형/기계 전 등 대규모 전시회에 동종 업계 최대규모 참가>

### 한국델캠(주) 유저그룹 컨퍼런스



< 매년 1,000명 이상의 고객이 참여하는 한국델캠 유저그룹컨퍼런스; 솔루션의 신기능 소개, 스마트공장 구축사례 등 다양한 내용으로 1박 2일간 진행되는 행사로 30주년을 맞이함 >

## Product Line-Up

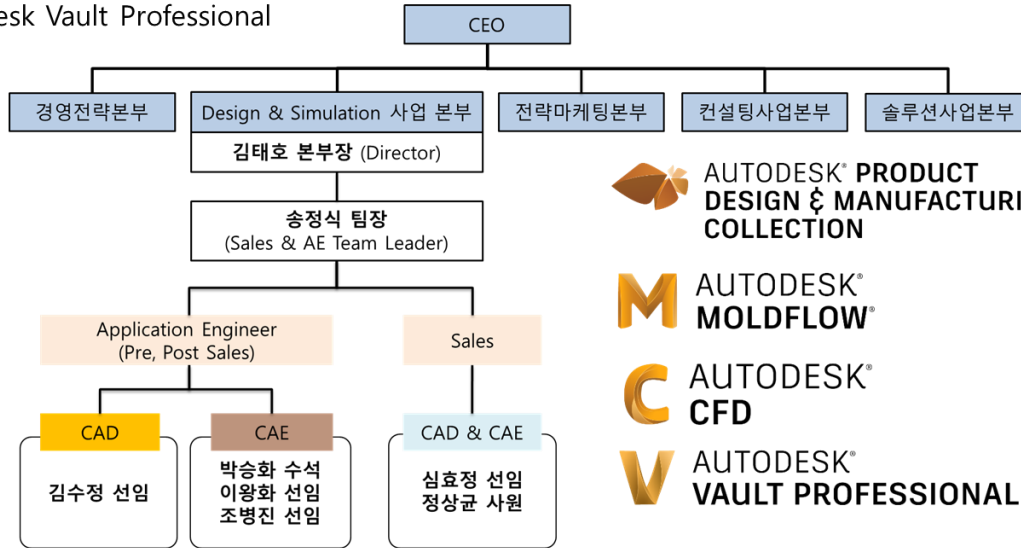


## Design & Simulation 사업부

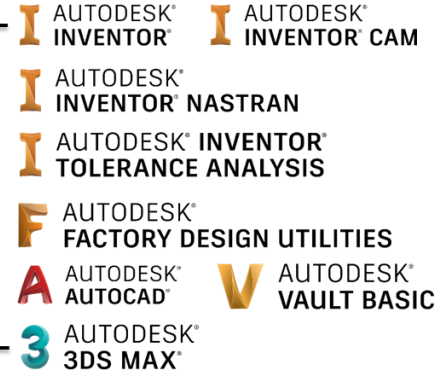
한국델캠의 **Design & Simulation** 사업부는 CAD/CAE를 담당하고 있는 부서입니다. 고도의 기술력을 바탕으로 용역 및 기술지원을 수행하고 있습니다.

### Software Line-Up

- Product Design & Manufacturing Collection (PDMC)
- Autodesk Moldflow
- Autodesk CFD
- Autodesk Vault Professional



영역	이름	연락처
기술	박승화 수석	010-4623-2374 <a href="mailto:sh.park@delcam.co.kr">sh.park@delcam.co.kr</a>
	이왕화 선임	010-4854-5530 <a href="mailto:wh.lee@delcam.co.kr">wh.lee@delcam.co.kr</a>
	조병진 선임	010-7471-8312 <a href="mailto:bj.jo@delcam.co.kr">bj.jo@delcam.co.kr</a>
	김수정 선임	010-7222-8375 <a href="mailto:sj.kim@delcam.co.kr">sj.kim@delcam.co.kr</a>
영업	심효정 선임	010-3545-5447 <a href="mailto:hj.sim@delcam.co.kr">hj.sim@delcam.co.kr</a>
	정상균 사원	010-4800-2391 <a href="mailto:sg.jeong@delcam.co.kr">sg.jeong@delcam.co.kr</a>

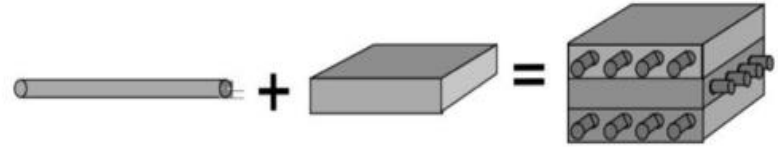




# 복합소재 (Composites)

## 복합소재 란?

- 두 종류 이상의 소재를 결합하여 약점을 보완하고 새로운 기능을 부여하여 각각의 물질보다 더 좋은 물성을 나타내는 소재
- 강화재 (Reinforced)와 모재 (Matrix)로 구성
- 강화재는 기계적 특성을 향상 시키고 모재는 원하는 형상을 유지하기 위해 사용
- 강화재와 모재의 함침 비율에 따라 복합소재의 기계적 특성이 달라짐



### Fiber/Filament Reinforcement

- High strength
- High stiffness
- Low density

### Matrix

- Good shear properties
- Low density

### Composite

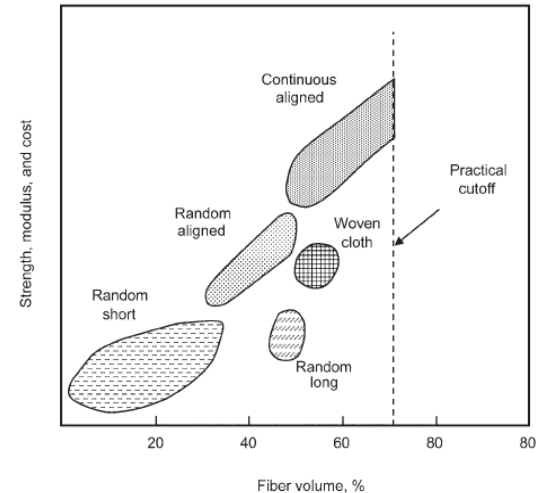
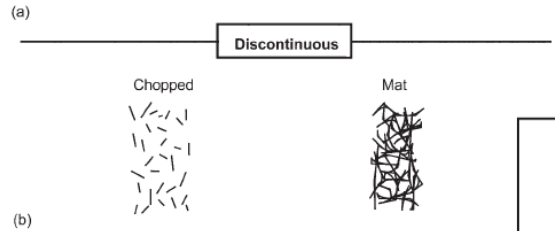
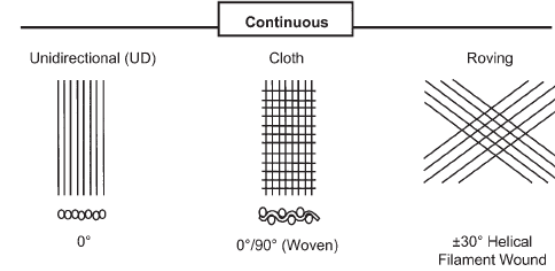
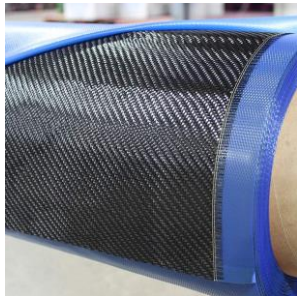
- High strength
- High stiffness
- Good shear properties
- Low density



# 복합소재 (Composites)

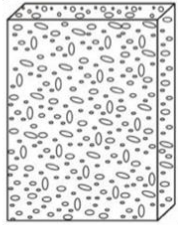
## 섬유의 형태

- 연속 섬유 (Continuous fiber)
  - UD / Woven / Roving
  - Prepreg
- 불연속 섬유 (Discontinuous fiber)
  - Short / Long fiber



# 복합소재 (Composites)

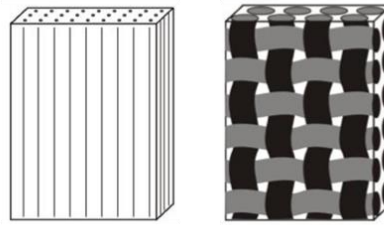
Concrete  
(cement/stone/steel)



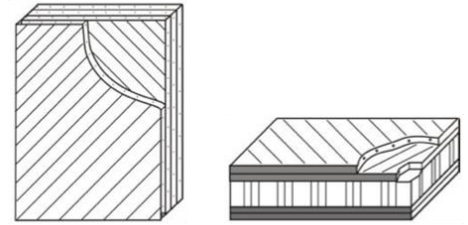
Short / Long fiber  
Reinforced plastics (Polymers)  
[Glass / PP / Carbon]



Continuous fiber reinforced  
Plastics (Polymers)  
[Glass / Carbon / PA / PP / EP]

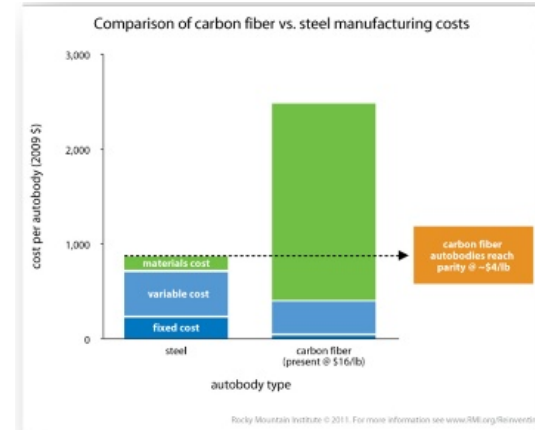
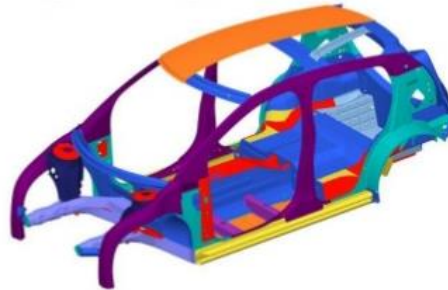


Sandwich / Laminates  
(polymer / glass / carbon)



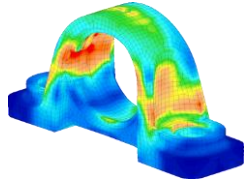
# 경량화 (Lightweight)

Lightweighting Material	Material Replaced	Mass Reduction (%)
Magnesium	Steel, Cast Iron	60 – 75
<b>Carbon Fiber Composites</b>	<b>Steel, Aluminum, Cast Iron</b>	<b>50 – 60</b>
Aluminum Matrix Composites	Steel, Cast Iron	40 – 60
Aluminum	Steel, Cast Iron	40 – 60
Titanium	Alloy Steel	40 – 55
Glass Fiber Composites	Steel	25 – 35
Advanced High Strength Steel	Mild Steel, Carbon Steel	15 – 25
High Strength Steel	Mild Steel	10 – 15



# Autodesk Simulation Portfolio

## Structural Mechanics

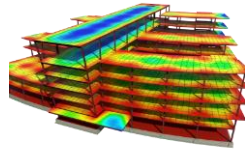


**N** AUTODESK  
NASTRAN IN-CAD

**N** AUTODESK NASTRAN

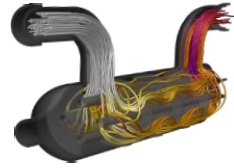
**F** AUTODESK FUSION 360

## Structural Architecture



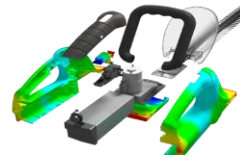
**R** AUTODESK ROBOT  
STRUCTURAL ANALYSIS  
PROFESSIONAL

## Flow & Thermal Analysis



**C** AUTODESK CFD

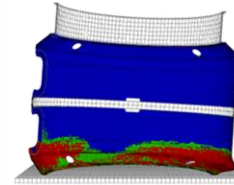
## Molding Processes



**M** AUTODESK  
MOLDFLOW ADVISER

**M** AUTODESK  
MOLDFLOW INSIGHT

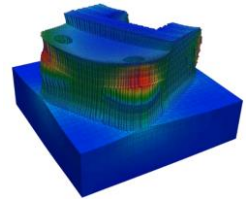
## Composite Materials



**H** AUTODESK  
HELIUS PFA

**H** AUTODESK  
HELIUS COMPOSITE

## Additive MFG Optimization



**N** AUTODESK NETFABB

# AUTODESK 해석 솔루션 (Moldflow)



플라스틱 사출  
압축 성형  
표준



최대  
DATA BASE



MESH



Advanced 고급  
사출 성형 공정

# MOLDFLOW

# AUTODESK 해석 솔루션 (Helius)

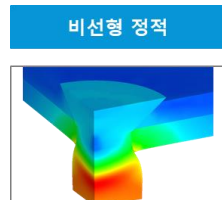
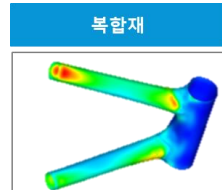
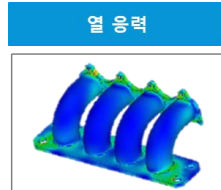
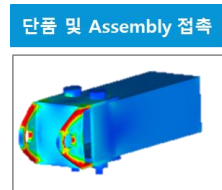
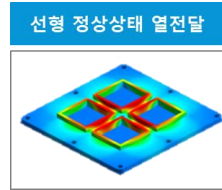
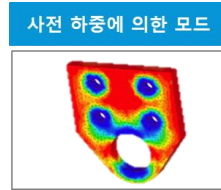
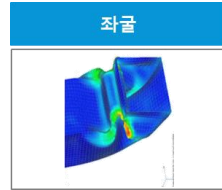
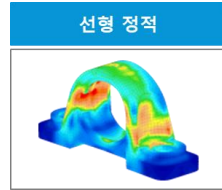


Material Analysis	Laminate Analysis	Simple Structural Analysis	Utilities																																
<p>Material Library</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>My Data</li> <li>Thickness/Angle Templates</li> <li>Fibers</li> <li>Matrices</li> <li>9501-6 Epoxy</li> <li>S250-4 RTH</li> <li>5505 Epoxy</li> <li>8501-7 Epoxy</li> <li>BSL814C Epoxy</li> <li>LY558 Epoxy</li> </ul> <p>Lamina from Micromechanics</p> <p>Input Fiber/Matrix, Lamina and/or Laminate data</p>	<p>Equivalent Laminate Props</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Prop</th> <th>Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>E1 (psi)</td><td>1.325E+07</td></tr> <tr><td>E2 (psi)</td><td>1.763E+07</td></tr> <tr><td>E3 (psi)</td><td>1.628E+06</td></tr> <tr><td>Gxy (psi)</td><td>2.209E+06</td></tr> <tr><td>Gyz (psi)</td><td>1.172E+06</td></tr> <tr><td>Gxz (psi)</td><td>2.219E+06</td></tr> <tr><td>NUxy</td><td>1.980E-01</td></tr> <tr><td>NUyz</td><td>2.196E-01</td></tr> <tr><td>NUxz</td><td>3.974E-01</td></tr> <tr><td>NUxy</td><td>2.718E-01</td></tr> <tr><td>NUyz</td><td>1.476E-01</td></tr> </tbody> </table> <p>Lamina Response Factor of Safety</p> <p>Composite Factor Criteria</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Max. Stress</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Max. Strain</td></tr> <tr><td>Max. Wp</td></tr> <tr><td>Max. Hill</td></tr> <tr><td>Max. Hashin</td></tr> <tr><td>Max. Chaboche</td></tr> <tr><td>Max. Puck</td></tr> <tr><td>Max. MCT</td></tr> </tbody> </table>	Prop	Value	E1 (psi)	1.325E+07	E2 (psi)	1.763E+07	E3 (psi)	1.628E+06	Gxy (psi)	2.209E+06	Gyz (psi)	1.172E+06	Gxz (psi)	2.219E+06	NUxy	1.980E-01	NUyz	2.196E-01	NUxz	3.974E-01	NUxy	2.718E-01	NUyz	1.476E-01	Max. Stress	Max. Strain	Max. Wp	Max. Hill	Max. Hashin	Max. Chaboche	Max. Puck	Max. MCT	<p>Plate Analysis</p> <p>Sandwich Analysis</p> <p>Beam/Tube Analysis</p>	<p>Export Lamina / Laminate to FEA</p> <p>Autodesk Nastran In-CAD</p> <p>Abaqus MSC Simulia ANSYS</p> <p>Fabric Builder</p>
Prop	Value																																		
E1 (psi)	1.325E+07																																		
E2 (psi)	1.763E+07																																		
E3 (psi)	1.628E+06																																		
Gxy (psi)	2.209E+06																																		
Gyz (psi)	1.172E+06																																		
Gxz (psi)	2.219E+06																																		
NUxy	1.980E-01																																		
NUyz	2.196E-01																																		
NUxz	3.974E-01																																		
NUxy	2.718E-01																																		
NUyz	1.476E-01																																		
Max. Stress																																			
Max. Strain																																			
Max. Wp																																			
Max. Hill																																			
Max. Hashin																																			
Max. Chaboche																																			
Max. Puck																																			
Max. MCT																																			



Reduce material characterization tests	Shorten the learning curve for composite design and analysis	Risk reduction with physics-based damage simulations	Improve designs earlier in the development cycle

# AUTODESK 해석 솔루션 (Nastran)



소재

재료 선택	단위	비율
이름: 탄소 섬유 강화 플라스틱	$\rho$ 7e-10	$X_c$ 35000
ID: 2	$G_E$ 0	$X_y$ 30000
유형: 최고 이형성 20	$\nu_{xy}$	$Y_c$ 15000
이름: Neo-Hookean	구조	$Y_c$ 10000
이상화: 1	$E_1$ 40000	$S$ 2000
새 재료 저장	$E_2$ 4000	
비선형	$G_{12}$ 8e+5	
피로	$G_{13}$ 8e+5	
PPFA	$G_{23}$ 8e+5	
	$\nu_{12}$ 0.2	
	$\alpha_1$ 1e-5	
	$\alpha_2$ 1e-5	

레이아웃

이름	레이아웃 1	미리보기	작업
레이아웃 옵션	재료	뒤로	대형
추가	공공용 플라이	다래로	삭제
	공공용 플라이 2	다시 설정	붙여넣기
	공공용 플라이 3	삭제	내보내기
	공공용 플라이 4	다시 설정	
	공공용 플라이 5	삭제	
	공공용 플라이 6	다시 설정	
	공공용 플라이 7	삭제	
	공공용 플라이 8	다시 설정	
	공공용 플라이 9	삭제	
	공공용 플라이 10	다시 설정	

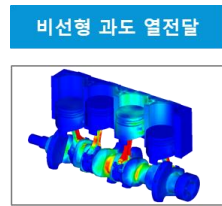
플라이 ID	공공용 플라이	재료	두께 (mm)	각도 (deg)	층의 순환
1	공공용 플라이 1	탄소 섬유 강화 플라스틱	0.05	90	설정
2	공공용 플라이 2	탄소 섬유 강화 플라스틱	0.05	0	설정
3	공공용 플라이 3	탄소 섬유 강화 플라스틱	0.05	-45	설정
4	공공용 플라이 4	탄소 섬유 강화 플라스틱	0.05	90	설정
5	공공용 플라이 5	탄소 섬유 강화 플라스틱	0.05	45	설정
6	공공용 플라이 6	탄소 섬유 강화 플라스틱	0.05	0	설정

레이아웃 관련 특성(ABC)	플라이 수 = 6	층 두께 = 0.3	소용돌이
B. 매트릭스:	8.556E+04	-7.889E+04	-8.823E-12
	1.973E+03	-1.838E+03	45.18
	45.18	45.18	1.973E+03
D. 매트릭스:	2.106E+03	1.973E+02	-2.259E+00
	-2.815E+02	308.3	-2.259E+00
	-2.259E+00	-2.259E+00	1.537E+03

- CAD UI에 내장된 장점
- 폭넓은 해석 영역 수행 가능
- 정확하고 신뢰도 높은 검증된 Autodesk® Nastran® solver

5000+ test problems per release

Verified with NAFEMS benchmarks

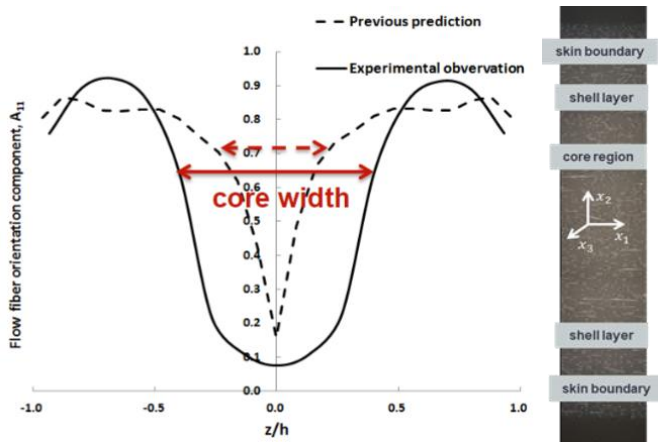
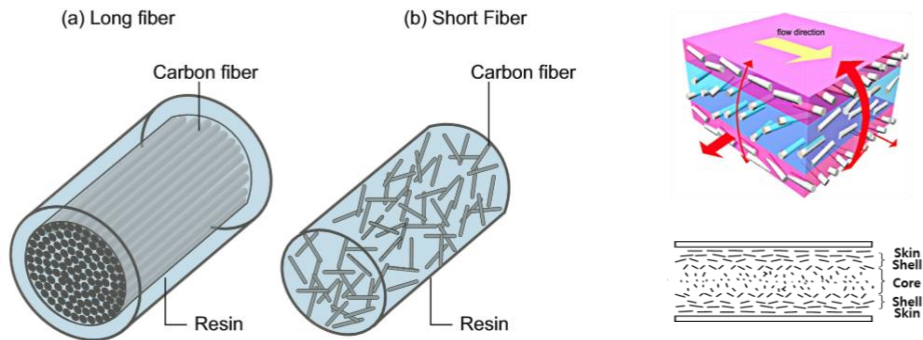




# FRP 사출 해석

## 복합소재 배향

- FRP 제품의 기계적 특성
  - 섬유 유형 (GF/ CF)
  - 섬유 길이 (Long / Short)
  - 섬유 함량 (20 – 50 wt%)
  - 섬유 방향
- 섬유는 성형 중에 파손이 발생하여 길이가 줄어 들 수 있다.
- 섬유 배향은 재료의 이방성 (Anisotropic) 특성을 결정



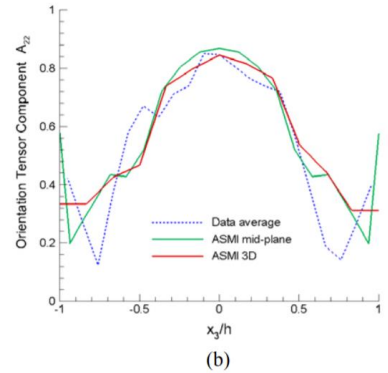
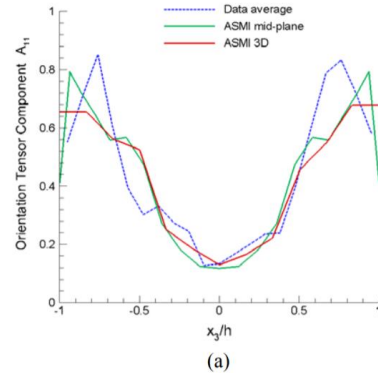
# FRP 사출 해석

## 섬유 배향 예측

- 섬유 충전 재료 해석에 고려해야할 3가지 요소
  - 용융 폴리머(Molten polymer)의 일반적인 유체역학
  - 섬유에 대한 용융 폴리머의 영향
  - 섬유 사이의 상호작용 (inter-fiber interactions)
- 섬유 배향 계산 모델 (Midplane and Dual Domain)

Fiber orientation calculation (Midplane and Dual Domain) by

- Moldflow model with auto-calculated  $C_i$  and  $D_z$  values
- Moldflow model with auto-calculated  $C_i$  and  $D_z$  values**
- Moldflow model with auto-calculated  $D_z$  and specified  $C_i$
- Moldflow model with specified  $C_i$  and  $D_z$  values
- RSC or ARD-RSC model (determined by length)
- RSC model with specified  $C_i$
- ARD-RSC model for long fibers



- 섬유 배향 계산 모델 (3D Model)

Fiber orientation calculation (3D) by

- Moldflow Rotational Diffusion model**
- Folgar-Tucker model with auto-calculated  $C_i$
- Folgar-Tucker model with specified  $C_i$
- RSC or ARD-RSC model (determined by length)
- RSC model with specified  $C_i$
- ARD-RSC model for long fibers
- Moldflow Rotational Diffusion model

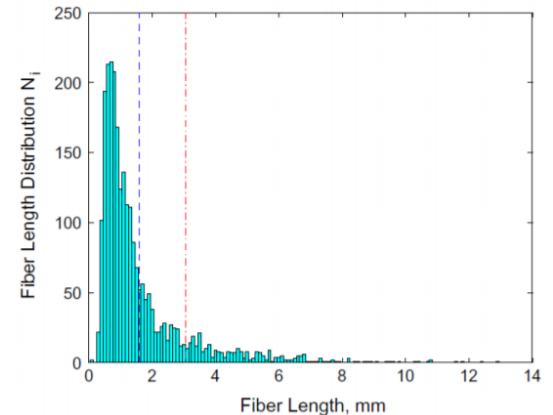
# FRP 사출 해석

## Fiber Breakage

- 사출 해석에서의 섬유 파손
  - Fiber – Fiber Interaction
  - Fiber – Wall Interaction
  - Fiber – Matrix Interaction



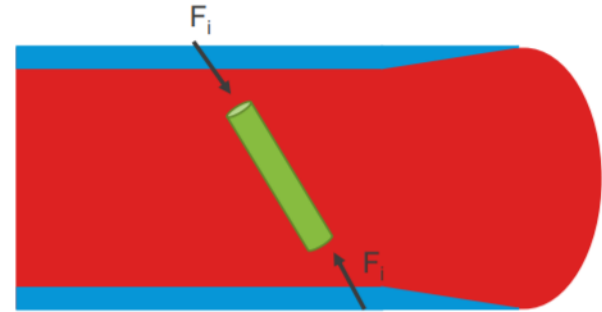
- 성형 부품의 섬유 길이 분포는 짧은 섬유 비율이 높은 와이בל 분포를 나타냅니다.



# FRP 사출 해석

## Fiber Breakage Model

- Autodesk Moldflow는 섬유의 유체 역학적 하중 (Fiber - Matrix Interaction)을 기반으로 섬유 파손 모델을 구현
- 속도 차이로 인한 좌굴 하중으로 인한 섬유 파손 계산
  - 유체 역학적 힘이 임계 좌굴 하중을 초과하면 섬유가 파손



$$\frac{F_i}{F_{crit}} = \frac{8\zeta\eta_m l_i^4}{\pi^3 E_f d_f^4} (-\hat{D} : \hat{A})$$

$F_i$  = Hydrodynamic Compression Force

$F_{crit}$  = Critical Buckling Force

$\zeta$  = Drag Factor

$\eta_m$  = Viscosity

$l_i$  = Fiber Length

$E_f$  = Fiber Elastic Modulus

$d_f$  = Fiber Diameter

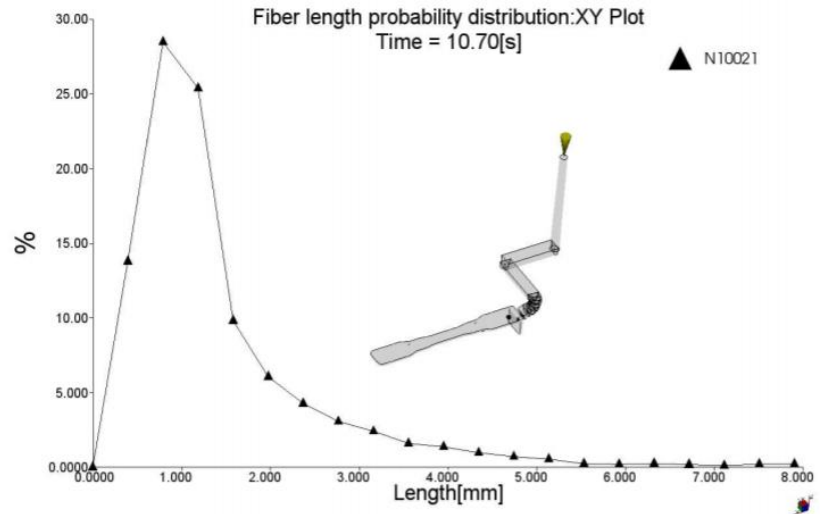
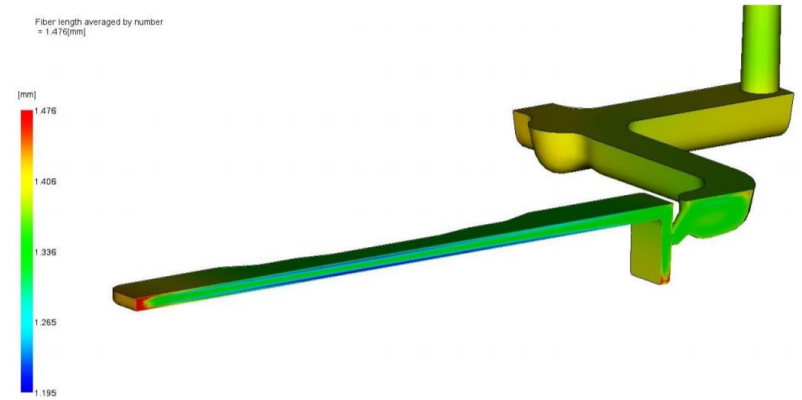
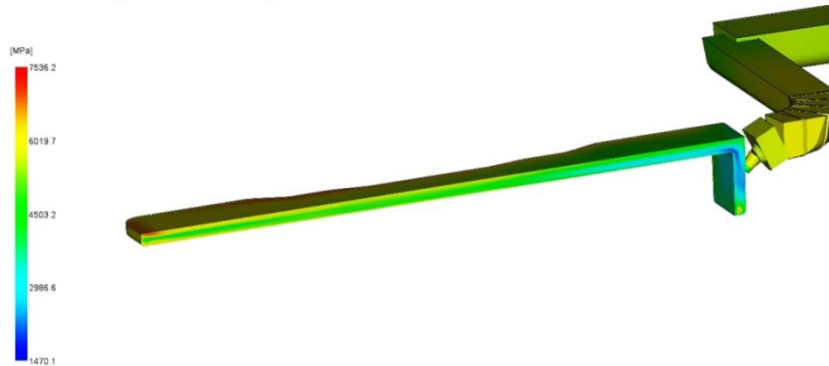
$\hat{D}$  = Deformation Rate Tensor

$\hat{A}$  = Fiber Orientation Tensor

# FRP 사출 해석

## Fiber Breakage Model : Results

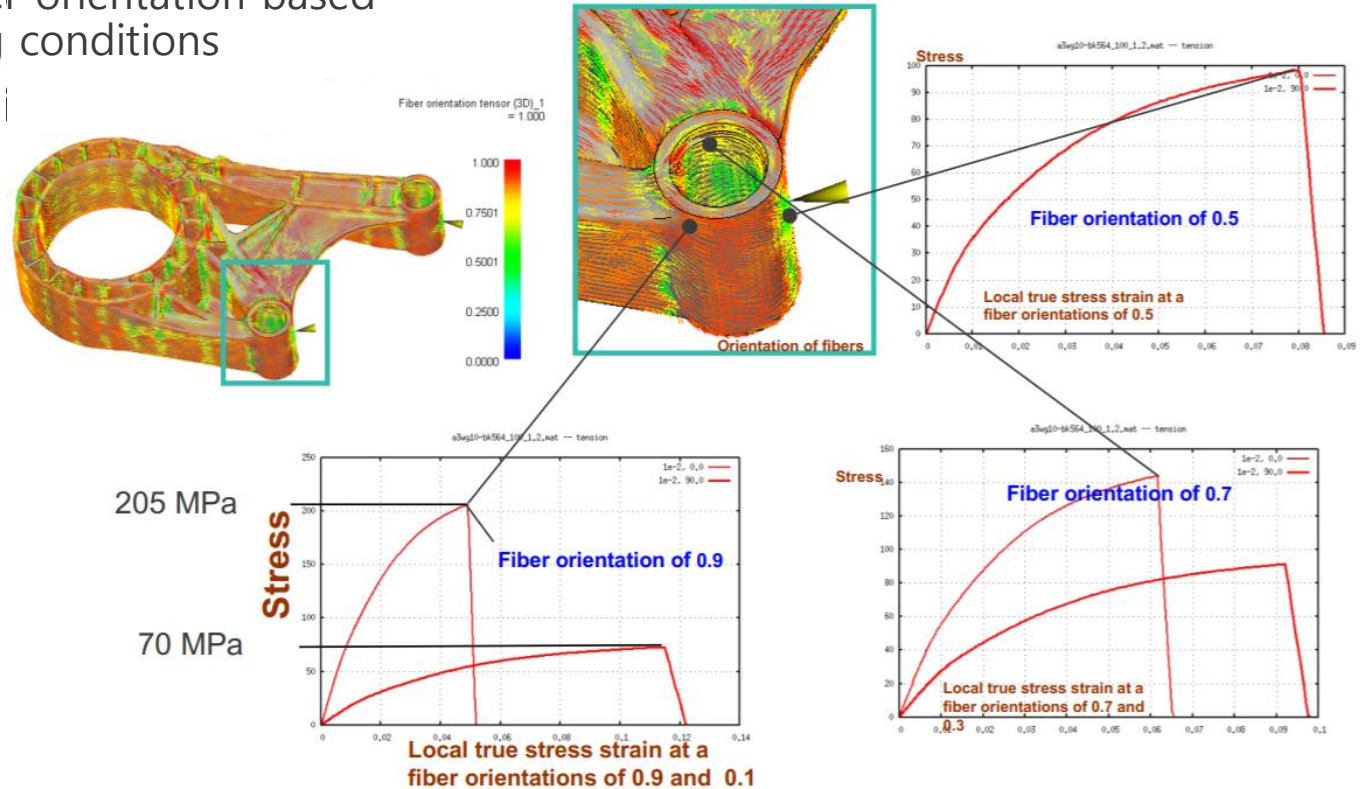
- Number Average 또는 Weight Average Fiber Length
- Fiber Length Probability Distribution
- Linear Elastic Composite Properties



# FRP 사출 해석

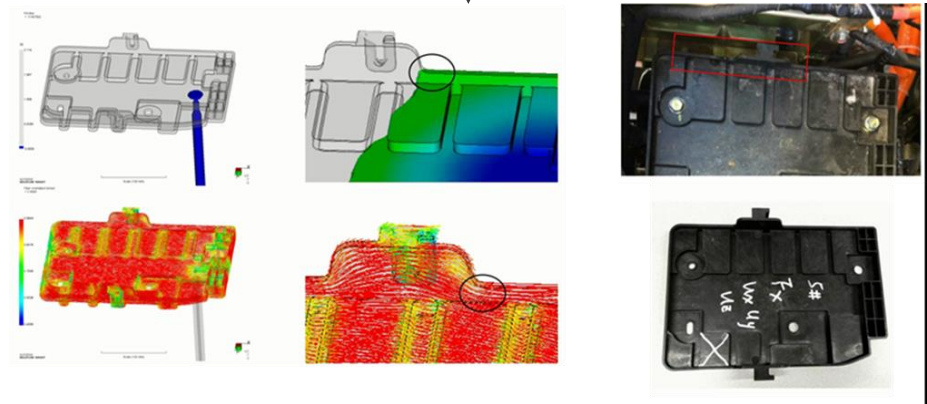
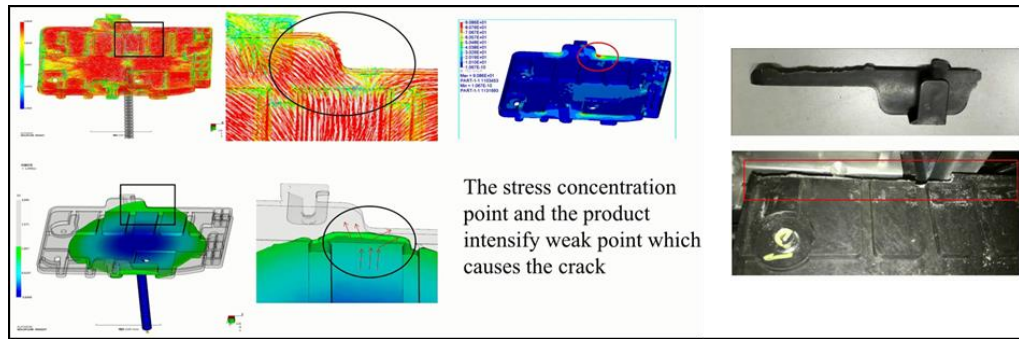
## ULTRASIM Engine Mount : BASF

- Calculated glass fiber orientation based optimum processing conditions



# FRP 사출 해석

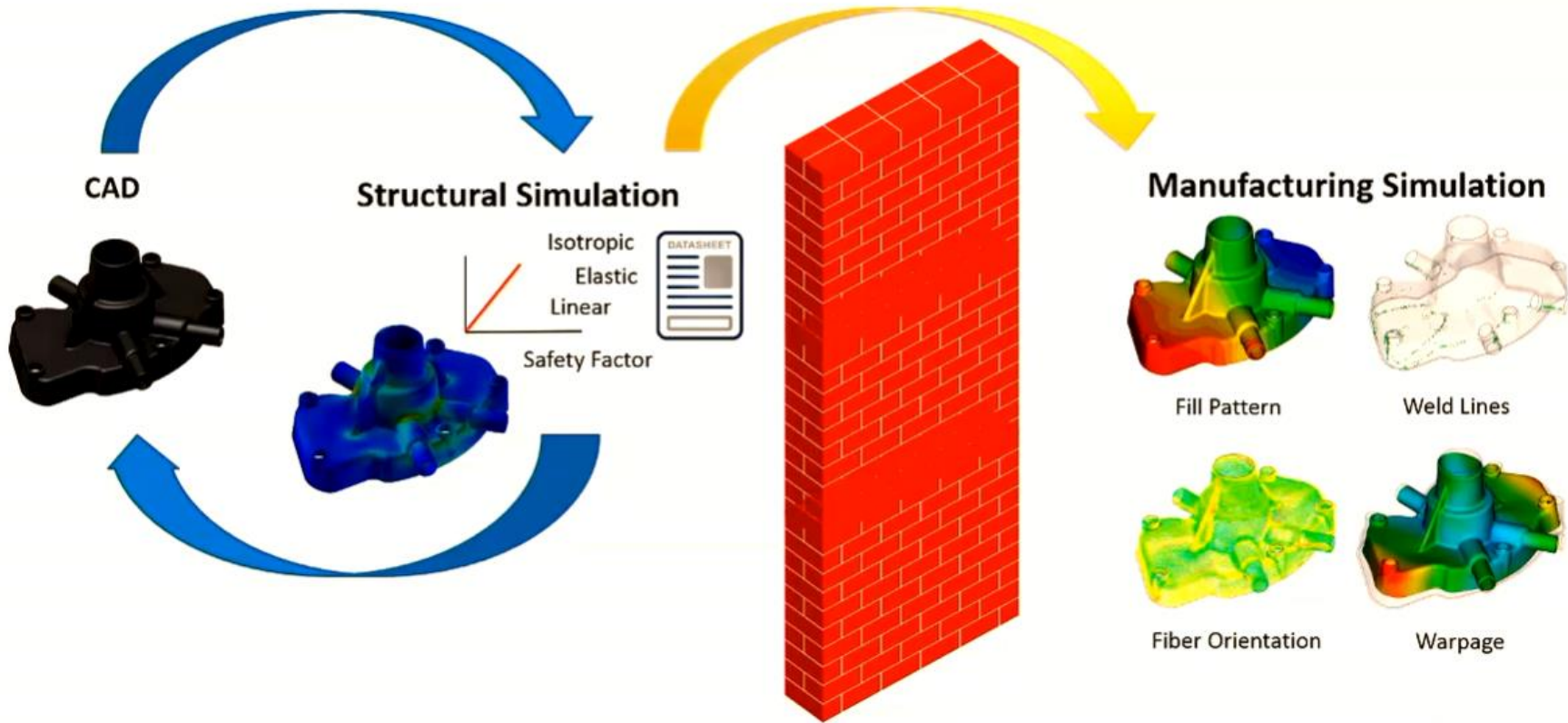
섬유 배향으로 인한 제품 결함을 예방할 수 있는 Gate 위치 분석





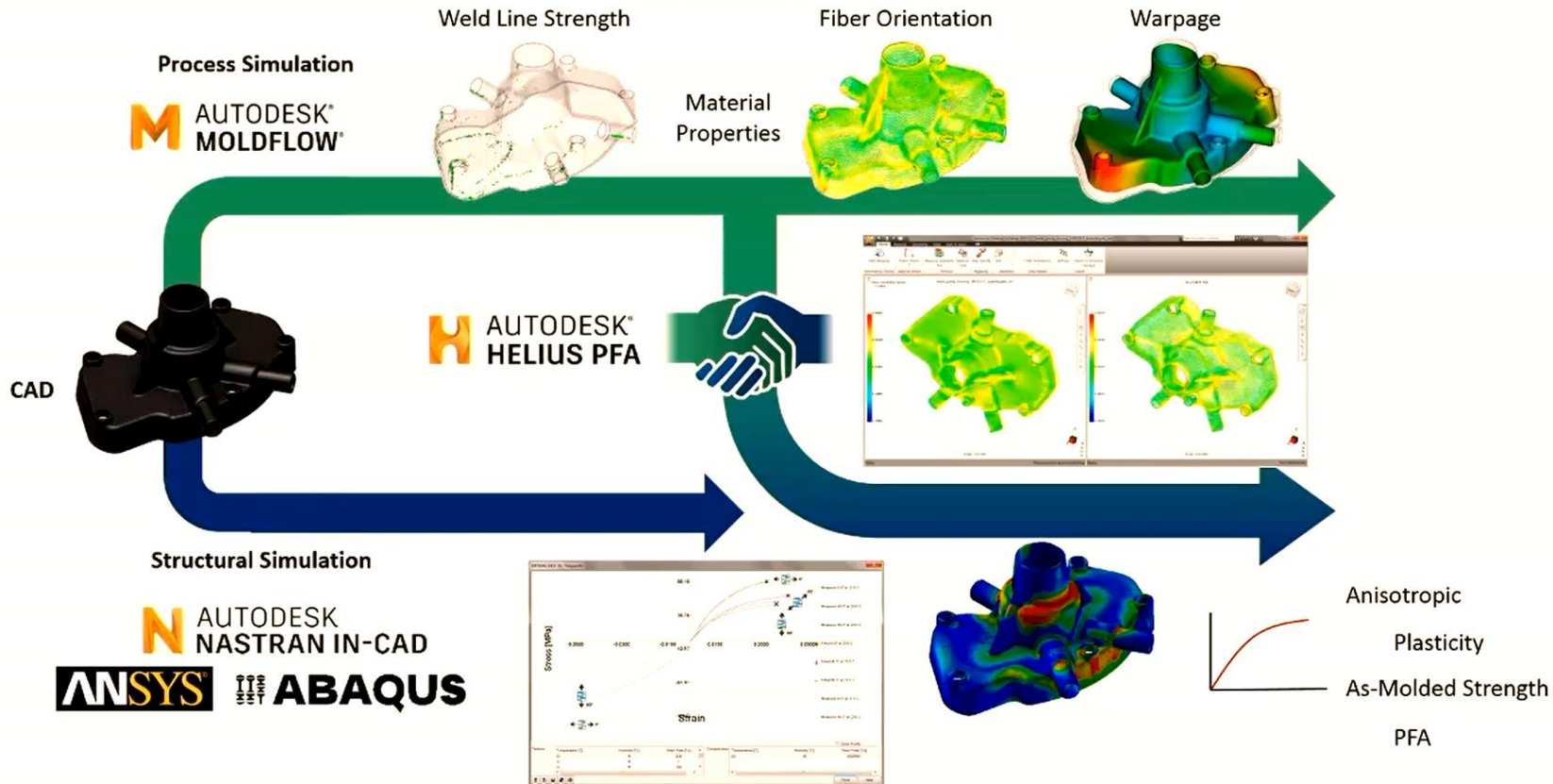
# 사출 - 구조 연계 해석

Traditional Simulation Workflow



# 사출 - 구조 연계 해석

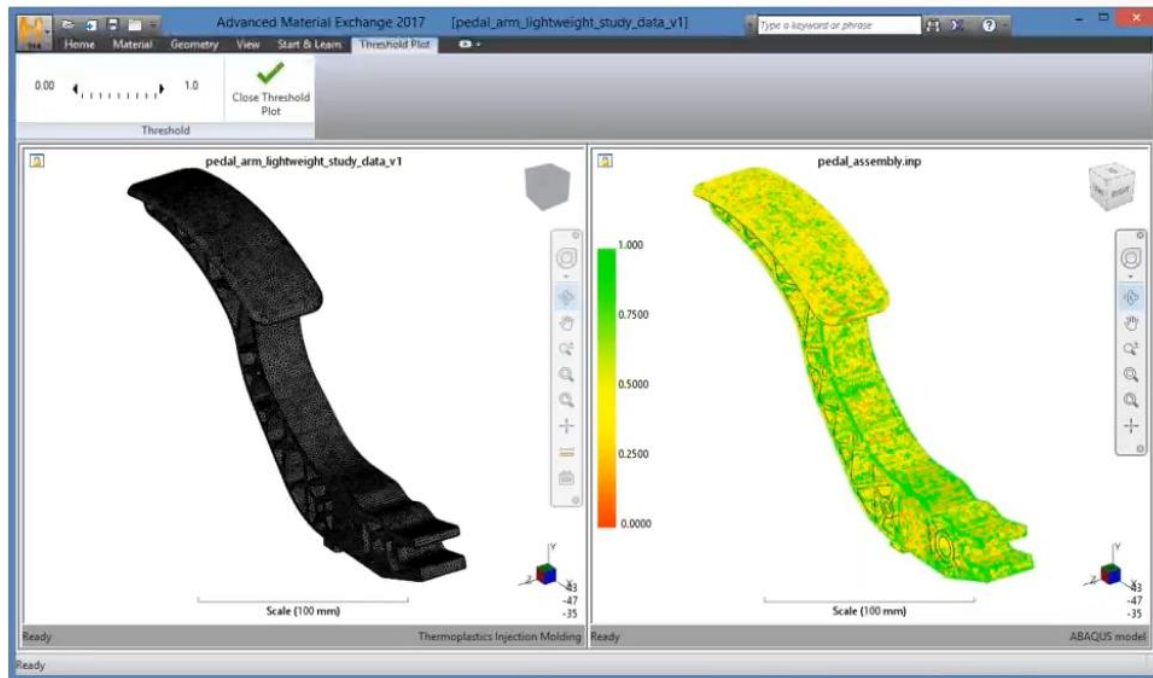
## As-Manufactured Simulation Workflow



# 사출 - 구조 연계 해석

## Helius PFA Preview

- Dissimilar model support
  - Geometry
  - Mesh
  - Position
- Mapping
  - Solid to Solid
  - Shell to Shell
  - Mapping suitability
  - Assemblies

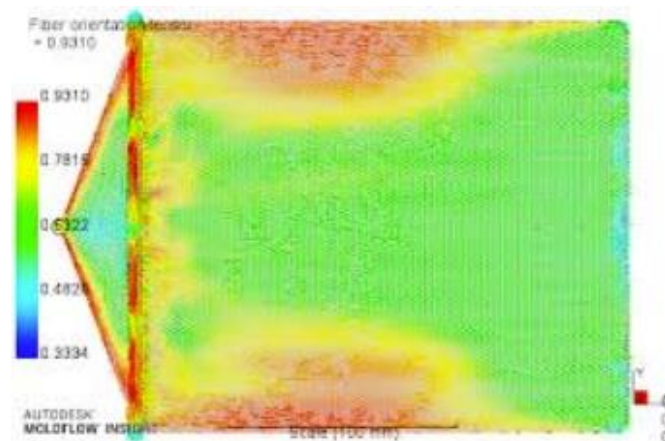
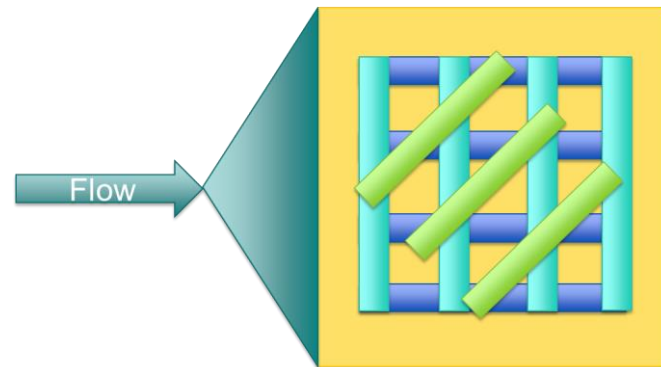
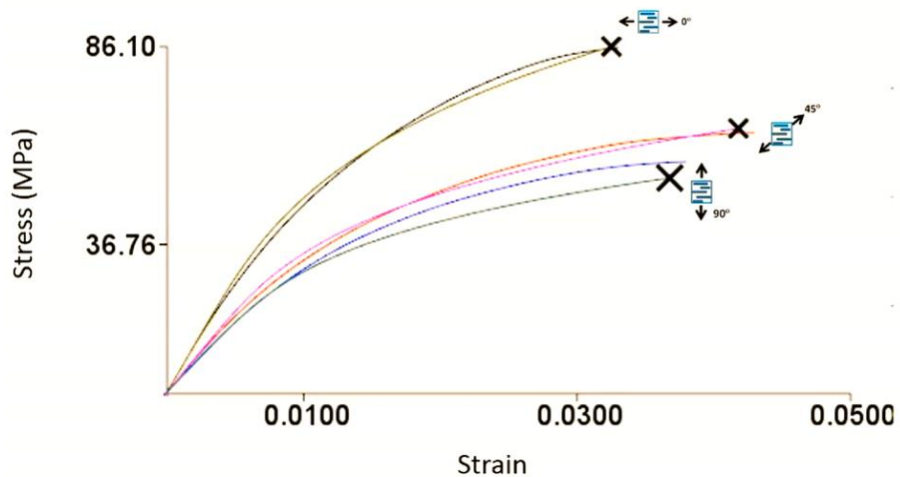


# 사출 - 구조 연계 해석

## Fiber Orientation Effect

- Non-linear Data

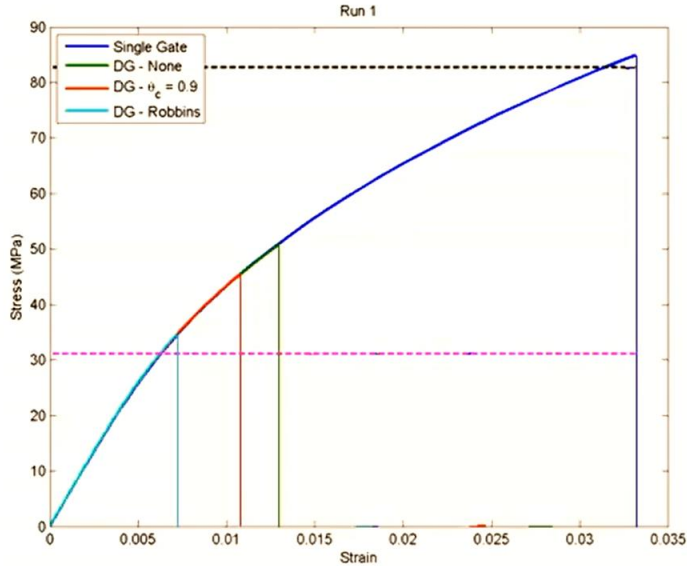
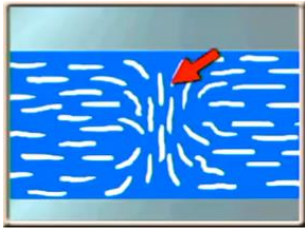
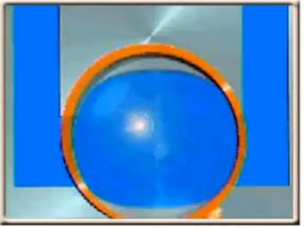
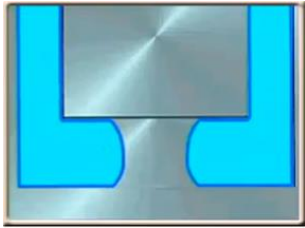
- PP : GF30



# 사출 - 구조 연계 해석

## Process Effect

### Weld Line Strength



$$d\beta = \beta_{(t)}(c_T(T_{(t)} - T_g) + c_P P_{(t)})dt$$



AUTODESK  
HELIUS PFA

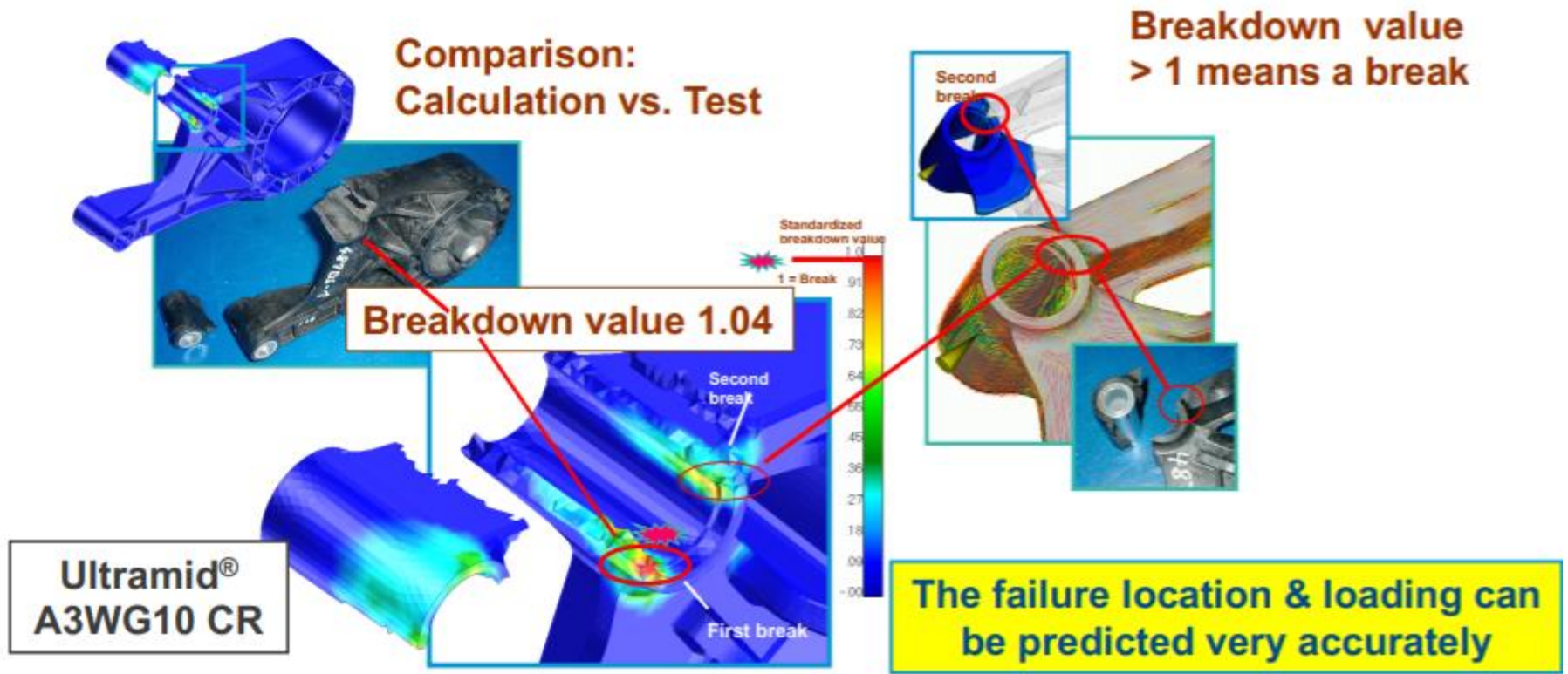


AUTODESK  
HELIUS PFA



# 사출 - 구조 연계 해석

Engine Mount - Testing at 125°C



# 복합소재 압축 성형

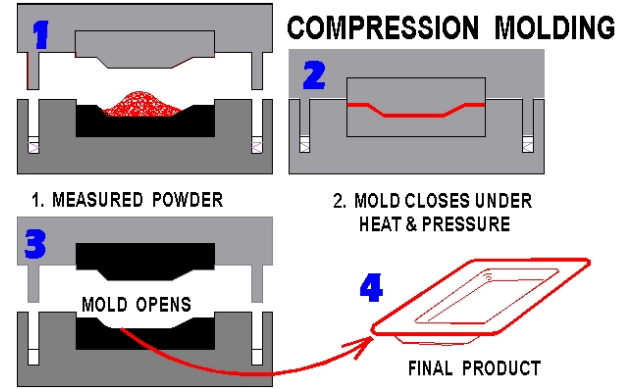
## 압축 성형

### ■ 압축 성형

- 고분자 충전제 (Charge)를 가열된 캐비티에 배치하고 금형을 닫아 강제로 캐비티를 채우도록 압축하여 제품을 만드는 공정
- 대부분 열경화성 (Thermoset) 수지 재료를 사용

### ■ 고려 사항

- 캐비티가 충전되도록 하는 적절한 재료의 양
- 재료가 완전히 성형 되기 위해 필요한 압축 힘



Material Type	Filler content	Simulation challenges
Bulk type	Pure polymer	탄소성 거동 예측
	Polymer + Chopped fiber	복합재 배향 또는 집중으로 인한 이방성 충전 거동 예측
Sheet type	Pure polymer	대변형으로 인한 넥킹 또는 벌크 거동
	Polymer + Chopped fiber	복합재 배향 또는 집중으로 인한 이방성 충전 거동 예측
Continuous Sheet type	Polymer + Continuous fiber	복합재 매트 의 이방성 투과성계수

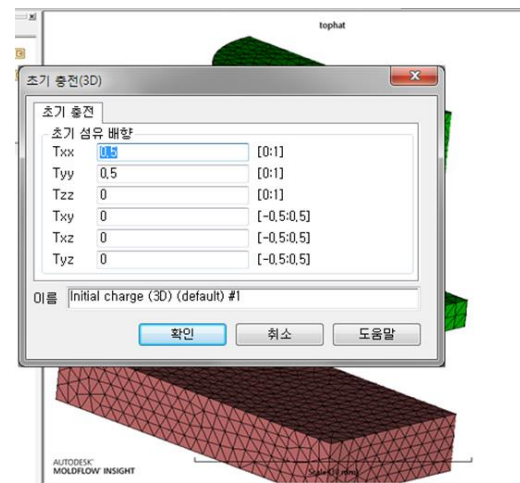
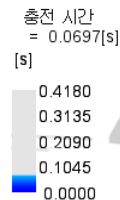
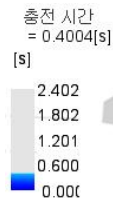


# 복합소재 압축 성형

## 압축 성형 해석

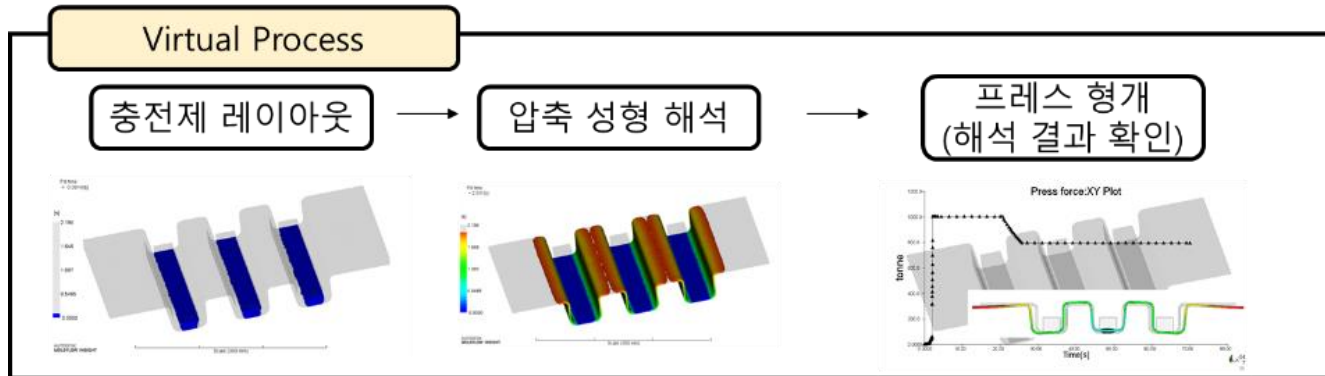
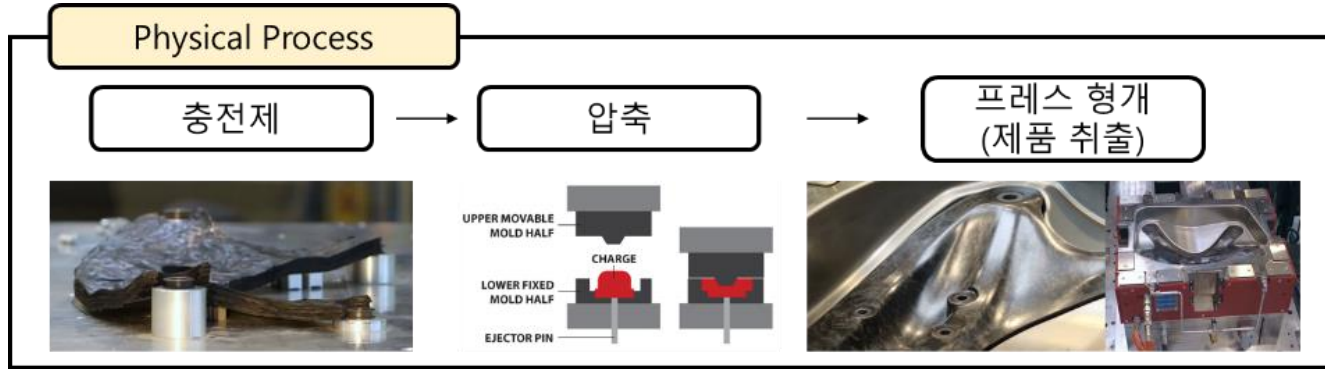
### ■ 초기 고분자 충전제 정보

- Moldflow에서는 3D Mesh로 압축성형 해석 지원
- 해석을 시작하면 솔버가 자동으로 초기 충전제의 위치를 제품의 표면 위로 배치
- 변형에 따라 로컬 표면 배향을 따르도록 초기 섬유 배향이 자동으로 변경
- 초기 배향이 Planar Random (평면 랜덤, SMC) 이면, 2차 배향 텐서는 (0.5, 0.5, 0)



# 복합소재 압축 성형

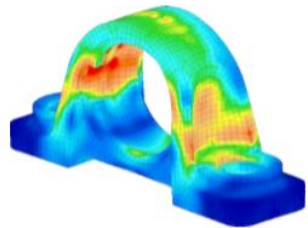
## 압축 성형 해석 프로세스



# 한국델캠 기술지원 및 교육

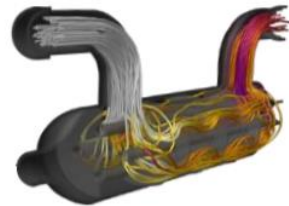


Structural Mechanics



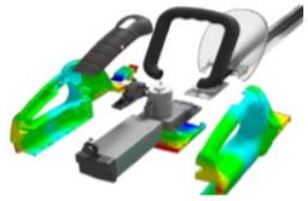
**N** AUTODESK NASTRAN IN-CAD  
**N** AUTODESK NASTRAN  
**F** AUTODESK FUSION 360™

Flow & Thermal Analysis



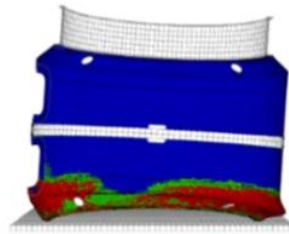
**C** AUTODESK CFD

Molding Processes



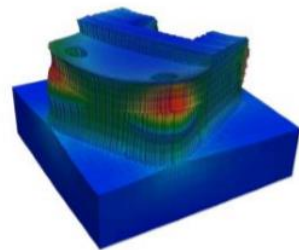
**M** AUTODESK MOLDFLOW ADVISER  
**M** AUTODESK MOLDFLOW INSIGHT

Composite Materials



**H** AUTODESK HELIUS PFA  
**H** AUTODESK HELIUS COMPOSITE

Additive MFG Optimization



**N** AUTODESK NETFABB™

# Moldflow 복합소재 해석 교육



## Moldflow Insight 복합소재 해석 교육

- 교육기간 : 2일
- 교육인원 : 8명
- 교육장소 : 한국델캠(주) 교육장
  - 서울 : 서울특별시 구로구 디지털로 272 한신 IT타워 1316호
  - 대구 : 대구광역시 달서구 성서공단로 217 성서비즈니스센터 904호
  - 부산 : 부산광역시 사상구 대동로 303 벽산디지털밸리 919호
- 교육내용 : Moldflow Insight for Composite
  - FRP 사출, 복합재 압축 성형, 수지 데이터, Mucell 해석, 사출 - 구조 연계 해석
- 교육신청 : <http://delcam.kr>
  - 교육 콘텐츠 → 교육신청
  - 고객사는 영업/기술 담당자에게 문의해 주시면 교육 무료 등록 코드를 드립니다.

교육 시간	교육 내용	
	1일차	2일차
1교시 (10:00 ~ 10:50)	복합소재 개요	SMC 압축 성형 해석 (제품 해석 절차 소개)
2교시 (11:00 ~ 11:40)	FRP 사출 해석을 위한 복합재 기초 교육	SMC 압축 성형 해석 (Moldflow 실습)
점심시간 (11:50 ~ 13:00)		
3교시 (13:00 ~ 13:50)	섬유 배향 모델 이론 (FT, ARD, RSC, MRD)	미세다공사출성형 (Mucell) (관련 이론 및 해석 방안)
4교시 (14:00 ~ 14:50)	열 가소성, 열 경화성 수지 (물성 특징, 시험법)	미세다공사출성형 (Mucell) (Moldflow 실습)
5교시 (15:00 ~ 15:50)	FRP 사출 해석 (제품 해석 절차 소개)	사출 - 구조 연계해석 (관련 이론 및 해석 방안)
6교시 (16:00 ~ 17:00)	FRP 사출 해석 (Moldflow 실습)	사출 - 구조 연계 해석 (Moldflow-Helius-Nastran 실습)



한국델캠(주) Moldflow 고객인 경우 사용자에게 대한 교육이 무료로 진행 됩니다.  
특히, 복합재 사출 해석 관련 이론 및 실습에 대한 심도 있는 교육이 진행됩니다.

# Moldflow 복합소재 해석 교육



- 한국델캠 공식 홈페이지 : <https://delcam.kr/>
- 교육 신청 방법 : 교육 콘텐츠 → 교육 신청
- 상황에 따라서 교육 할인 코드 제공
  - 문의 : [wh.lee@delcam.co.kr](mailto:wh.lee@delcam.co.kr) (이왕화 선임컨설턴트)



**AUTODESK®**

Make anything™