

# 사출 성형공정 압력에 따른 PA6/GF 복합재료의 물리적 특성 및 성능 예측 시뮬레이션에 관한 연구

## A Study on the Mechanical Properties and Performance Prediction Simulation of PA6/GF Composite Materials with Injection Molding Pressure

### \*Corresponding author

Jee-hyun Sim  
(kmins0730@dyetec.or.kr)

유성훈, 김민성, 윤현성, 박종수<sup>1</sup>, 전성민<sup>1</sup>, 심지현\*  
다이텍연구원, <sup>1</sup>평화산업(주)

Seong-hun Yu, Min-seong Kim, Hyun-sung Yoon, Jong-soo Park<sup>1</sup>, Seong-min Jeon<sup>1</sup>, and Jee-hyun Sim\*

Korea Dyeing and Finishing Technology Institute(DYETEC), Daegu, Korea

<sup>1</sup>PYUNG HWA INDUSTRIALS CO., LTD., Daegu, Korea

Received\_March 04, 2022

Revised\_March 21, 2022

Accepted\_March 23, 2022

**Abstract** In this study, the relationship between fiber orientation and mechanical properties with the injection pressure of polyamide-6/glass fiber composite materials manufactured by the injection molding process was investigated. Also, an actual experimental data and finite element model-based simulation data were analyzed. Specimens were manufactured through the injection molding process setting the injection pressure differently to 700, 800, 900, and 1000 bar, respectively. A morphological analysis and orientation of the PA6/GF composite material were observed using Optical microscope. Through tensile and flexural strength tests, the mechanical properties of the PA6/GF composite materials with the injection pressure were studied. As a result, it was confirmed that the mechanical properties were the superior under the injection pressure of 900 bar molding conditions. In addition, the mechanical properties of the actually manufactured specimen (PA6/GF) and virtual engineering S/W((Digimat, Abaqus) were used to compare and analyze the analysis results for the mechanical properties, and based on the reliable DB, the physical properties of the PA6/GF composite characteristics were studied.

### Textile Coloration and Finishing

TCF 34-1/2022-03/46-57

© 2022 The Korean Society of Dyers and Finishers

**Keywords** polyamide-6/glass fiber composite material, injection molding process, injection pressure, fiber orientation, mechanical properties, virtual engineering s/w, simulation

## 1. 서 론

엔지니어링 열가소성 플라스틱(Engineering thermo-plastic)의 우수한 강도, 강성, 성형성 및 재활용성으로 인해 엔진마운트, 계기판, 라디에이터 팬 및 전동모듈과 같은 차량 부품으

로의 적용성이 높고있으며, 그로 인해 엔지니어링 열가소성 플라스틱 및 그 복합재료의 기계적 거동에 대한 관심이 증가하고 있다<sup>1-9)</sup>.

폴리아미드-6(Polyamide-6)는 강도, 강성 및 내화학성이 우수한 재료 중 하나이며, 이러한 폴리아미드-6를 유리섬유와 함께 혼합하여 제조한 유리섬유/폴리아미드-6(GF/PA-6) 열가소

성 복합재료는 내크리프성, 진동 감쇠 특성 및 높은 인성으로 인해 높은 하중이 요구되는 구조용 재료 분야에서 잠재적인 응용 소재로 주목 받고 있다<sup>10-13)</sup>.

유리섬유를 폴리아미드-6에 첨가함으로써 재료의 강성과 강도를 부여하며, 외부에서 하중이 가해져 재료가 파괴되는 동안에 폴리아미드-6 매트릭스 내부에 넓게 분포되어 유리섬유로 인해 크랙 전파(Crack propagation)을 방지하고, 파괴인성(Fracture toughness)를 극도로 향상시키는 역할을 수행한다. 이러한 유리섬유와 폴리아미드-6를 사용한 복합재료의 장점으로 인해 유리섬유로 강화된 폴리아미드(GF/PA) 복합재료의 기계적 거동에 관한 연구는 지난 수 십년동안 주목받는 연구 주제였다.

Lee 등<sup>14)</sup>은 사출 성형 시 폴리아미드-6의 흐름성을 개선하기 위하여 저분자량의 아미드계 활제를 합성하여 첨가함으로써, 흐름성 72% 및 인장강도 10%를 개선시켰고, Kim 등<sup>15)</sup>은 유리섬유 강화 폴리아미드 복합재료를 예비 치형 사출, 측면 사출 및 상부 사출 방법을 통해 유리섬유가 복합재료 내부에 분포되어 있는 방향에 따른 마모특성에 관하여 조사하였으며, 유리섬유가 분포되어 있는 방향에 따라 복합재료의 물리적 특성이 현저하게 달라진다는 것을 확인하였다. Kim 등<sup>16)</sup>은 폴리아미드/유리섬유 강화복합재료에서 유리섬유를 10%, 15%, 20%, 30%, 50%의 함량별로 폴리아미드에 첨가하였을 때, 50%의 유리섬유가 첨가된 복합재료의 마찰계수가 가장 우수한 것을 확인할 수 있었으며, 유리섬유의 수직 및 수평 배열에 따라 기계적 특성 차이가 크다는 것을 밝혀냈다. Tjong 등<sup>17)</sup>은 엘라스토머 입자로 강화된 유리 섬유 강화 폴리아미드의 충격 파괴 인성에 대해 조사하였고, Levay 등<sup>18)</sup>은 샤프피 충격 시험을 사용하여 GF/PA의 동적 파괴 인성에 대한 하중 속도의 영향을 조사했다. Pedrosa 등<sup>19)</sup>은 재생 유리 섬유 강화 폴리아미드의 특성에 대한 건조 공정 시간의 영향을 연구했다. 앞의 논문들에서 언급되었듯이, 유리섬유/폴리아미드-6 복합재료의 기계적 거동은 실험적 파라미터와 복합재료 제조 조건에 상당한 영향을 미친다.

사출 성형(Injection molding)은 플라스틱 부품을 만드는데 사용되는 가장 일반적인 가공방법으로 다른 성형 공법에 비해 제품 생산 속도와 제조 비용에서 높은 효율을 갖는다. 또한 고압에서 제품을 성형하기 때문에 비교적 복잡한 형상의 부품 설계가 가능하고, 이것을 통해 생산된 최종 제품의 기계적 성능이 우수하다.

최근 이러한 사출 성형의 장점으로 인해 구조용 재료로서 중요성이 강조되고 있으며, 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유와 같은 고강도, 고강성의 성질을 갖는 섬유들을 chopped fiber 형태로 폴리아미드 기지재 내부에 분산시켜 사출 성형된 복합재료의 기계적 특성을 향상시키는 것에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 생산 단가 절감을 위하여 폴리아미드/유리섬유 사출 성형 복합재료와 관련된 연구가 가장 많은 주목을 받고 있다<sup>20-26)</sup>.

하지만 이러한 많은 관심에도 불구하고 아직까지 사출 압력에 따른 섬유배향성, 물리적 특성과 시뮬레이션에 대한 DB구축과 그에 따른 상관관계와 관련해서는 보고된 바가 없으며, 상

기의 주제에 대해 깊은 연구가 필요하다.

본 연구에서는 폴리아미드-6/유리섬유 복합재료를 사출 성형을 통하여 제작하고, 사출 압력을 700~1000bar로 다르게 하였을 때, 섬유의 배향성과 인장강도, 굴곡강도 특성 간의 상관관계를 밝히고, 실험적 데이터와 유한요소모델 기반 시뮬레이션 데이터를 비교 분석하여 신뢰성 높은 DB를 기반으로 폴리아미드-6/유리섬유 복합재료에 대한 물리적 특성을 규명하고자 한다.

## 2. 실 험

### 2.1 재료

폴리아미드-6/유리섬유(PA6/GF) 복합소재 시편을 제조하기 위하여 chip형태의 PA6/GF(60%) 소재(Ultramid®, BASF, Co., Germany)를 사용하였다. PA6/GF chip의 길이는 약 3mm이며, chip 내부 유리섬유의 길이는 약 0.7~1mm였다. 또한 PA6/GF composite의 섬유 부피분율은 60%였다. 실험에는 열안정제(1.5wt.%), UV안정제(1.0wt.%), 산화방지제(0.5wt.%)를 첨가한 혼합 유체(PA6/GF/첨가제)를 사용하였고, 혼합 유체의 가공 장비 내에 In-situ 상태에서의 screw element와 RPM 설정에 따른 복합재료의 물성파악 및 최적 가공조건 파악을 위한 용도로 다이텍연구원에서 보유하고 있는 Lab. scale의 Twin Screw Extruder(HAAKE PolyLab QC, Thermo scientific, USA)를 사용하였다.

### 2.2 PA6/GF 복합재료 제조

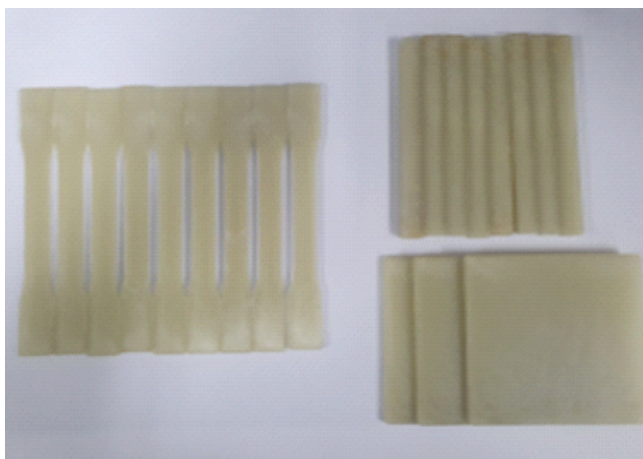
PA6/GF(60%) 복합소재의 사출 성형 작업용 twin screw의 element는 보급형 conventional element타입의 screw를 사용하였다. PA6소재의 경우 수분 흡수율이 크기 때문에 사출 성형 시, 수지에 함유된 수분의 영향으로 수지 분해가 일어나 물성 저하 및 성형 불량 원인이 될 수 있다. 그래서 성형 전에 수지의 예비 건조 공정을 진행하였다.

예비 건조 공정은 3시간 동안 수행하였으며, 그 후 PA6/GF 사출 성형 공정 조건에 따라 lab. scale로 제작하였다. 건조 공정 과정에서 제습형 건조기를 사용하여 50°C의 온도에서 16시간동안 실시시간으로 건조 과정을 수행하였으며, 샘플의 수분함유량이 약 0.2% 수준이 되도록 유지시켰다. PA6소재는 사출 성형기의 실린더 내에 히터에 의해 공급되는 스크류와 실린더 벽과 전단력에 의하여 용융되었고, 호퍼의 밑 부분은 원활한 고체 이송을 위하여 충분한 냉각을 실시하며 용융부는 수지가 충분히 용융될 수 있는 온도를 설정하였다. 노즐 부위는 용융부에 비하여 약 10°C 정도 낮게 설정하여 용융 수지의 흘러내림을 방지하였다. 용융된 수지는 사출압에 의하여 금형의 캐비티 내에 압입되며 스프루, 런너, 게이트 등의 좁은 유로를 통과하여 PA6/GF 복합소재 시편을 제조하였다. 사출 성형 공정 압력은 각각 700, 800, 900, 1000bar로 설정하여 시편을 제작하였다.

**Table 1.** Experimental condition of the injection molding process

Experimental condition	PA6/GF	
Cylinder temperature (°C)	Rear	240
	Middle	250
	Front	260
	Nozzle	250
Mould temperature (°C)	80	
Injection pressure (bar)	#1	700
	#2	800
	#3	900
	#4	1000
Back pressure (sec)	5	
Injection time (sec)	4	
Cooling time (sec)	20	

PA6/GF 소재의 성형 조건은 Table 1에 나타내었고, Figure 1에 사출 성형 모식도와 제조된 PA6/GF 복합소재 시편 사진을 나타냈다.



**Figure 1.** A photo of PA6/GF specimens fabricated by injection molding process.

## 2.3 PA6/GF 복합재료 특성 분석

### 2.3.1 광학 현미경(Optical microscope) 측정

사출 압력에 따른 PA6/GF 시편 내 섬유 배향 상태를 확인하기 위하여 Optical microscope(TS-100F, Nikon, Japan)분석을 통해 PA6/GF 복합소재의 단면을 콜드마운팅(cold mounting) 후 표면을 연마하고 50배율로 관찰하였다. 한 시험편 파단면당 3부분을 관찰하였다.

### 2.3.2 XRM(X-ray microtomography) 측정

사출 압력에 따른 PA6/GF 시편 내 유리섬유의 배향성을 고배율로 관찰하기 위하여 Micro-CT 분석을 수행하였다. CT 스캔은 전압 160kV, 전류 130IA로 설정된 X-ray CT system (TVX-IMT225, Techvalley Co., Korea)을 사용하여 수행하였다. CT 스캔의 해상도는 13.76 ~ 19.56 $\mu$ m이다.

### 2.3.3 복합재료의 인장 및 굴곡 강도 분석

제조된 PA6/GF 시편을 활용하여 가상공학 S/W 활용 시뮬레이션에 필요한 물성 DB를 구축하기 위하여 만능재료시험기 (AG-250kNX, SHIMADZU, Japan)를 이용하여 인장 및 굴곡 강도 실험을 진행하였다. 인장강도 시편은 Dogbone 형태로 제

작되었다. 시편의 전체 폭은 19mm이고, narrow section의 폭은 13mm이며, 전체 길이는 165mm으로 제작되었다. 시편의 Gage length는 50mm이며, crosshead speed는 5mm/min로 수행되었다. 인장 강도 시험은 ASTM D-638에 준하여 실험을 진행하였으며, 인장 강도( $F^{tu}$ )는 식(1)을 통해 계산하였다. 시험은 총 다섯번 진행하였다.

$$F^{tu} = P^{max} / A \tag{1}$$

where,

$P^{max}$  : Maximum load before failure [N]

A : Average cross-sectional area [mm<sup>2</sup>]

또한 굴곡 강도 시험의 crosshead speed는 2mm/min으로 ASTM D-790에 준하여 진행하였으며, 굴곡 강도( $\sigma_f$ )는 식(2)을 통해 계산하였다. 시험은 총 다섯번 진행하였다.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \tag{2}$$

where,

P : Load at a given point on the load-deflection curve [N]

L : Support span [mm]

b : Width of beam tested [mm]

d : Depth of beam tested [mm]

### 2.3.4 EP(Engineering Plastics)소재 시뮬레이션

실제 시편의 실험을 통한 인장, 굴곡 특성에 대한 값과 가상

공학 S/W를 활용한 인장, 굴곡 특성에 대한 결과 값을 비교하기 위하여 PA6/GF 복합소재의 3D 모델을 생성하기 위하여 Digimat(MSC Software Corp., USA)를 활용하였다. PA6/GF 복합소재 내에 GF 소재 함량에 따른 성능 예측을 위하여 RVE (Representative volume element) 이론을 활용하였으며, RVE 모델의 균질화를 위해 RVE 경계에 주기적 경계조건이 식(3)~식(5)와 같이 적용되었다.

$$u^+ - u^- = \bar{\epsilon}(x^+ - x^-) \tag{3}$$

$$\bar{\sigma} = \bar{C} : \bar{\epsilon} \tag{4}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{V} \int_V \sigma dV \tag{5}$$

where,

$u$  : Displacement on a microscopic scale

$+, -$  : Nodes opposite the RVE boundary

$\bar{\epsilon}$  : Strain on a macroscopic scale

$\bar{\sigma}$  : Stress on the macroscopic scale

$\bar{C}$  : Constitutive tensor on the macroscopic scale

$V$  : Volume of RVE model

$\bar{C}$ 를 계산하기 위해 6개의 단위 변형률이 식(3)에 독립적으로 적용되어 RVE 해석이 수행된다. 미시적 스케일의 응력을 사용한 거시적 스케일의 응력은 식(5)으로 계산된다. 계산된 구성텐

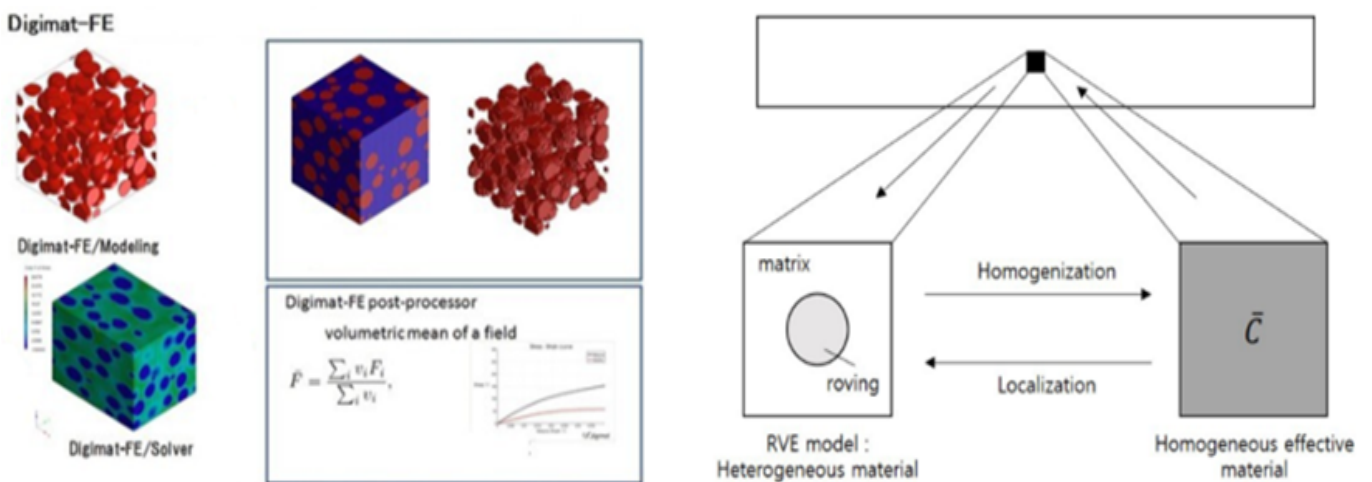


Figure 2. RVE(Representative volume element) theory for simulation of PA6/GF composite materials.

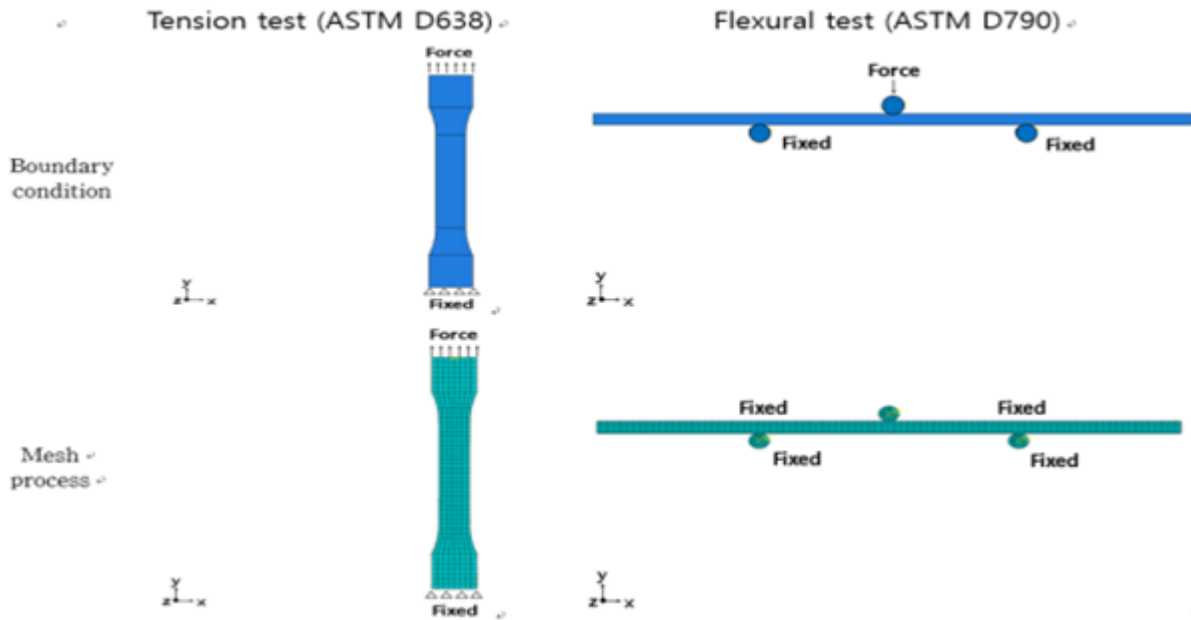


Figure 3. A boundary conditions for simulation of PA6/GF composite materials.

서가 거시적 스케일의 재료물성으로 사용되고 변형을 결과는 다시 미시적 스케일로 전달되어 RVE모델에서 응력 후처리 계산이 수행됨으로써 멀티스케일 해석이 완료된다.

Figure 2은 RVE 이론 해석의 개념도를 나타낸다. PA6/GF 시편의 3D 모델링을 위하여 8절점 유한요소법을 적용하기 위하여 SOLID70요소를 사용하여 유한요소모델을 생성하였다. 생성된 유한요소 모델을 바탕으로 시뮬레이션은 Abaqus(Simulia, Dassault Systemes, France) S/W를 활용하여 진행하였으며, Figure 3에 경계조건에 대한 모식도를 나타냈다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 PA6/GF 복합소재의 형태분석

용융 수지가 사출압에 의하여 금형의 캐비티 내에 압입되어 좁은 유로를 통하여 흐르면서 상당량의 압력이 손실되며, 통상 캐비티 내에 전달되는 압력은 700~1000bar 정도가 요구된다. 이때 사출압이 너무 높으면 과충진에 의하여 잔류응력이 증가하며, 배향도에 따른 가로방향 강도취하의 주요인이 되고, 반대로 너무 낮으면 미충진, 수축 및 기포의 원인이 되기 때문에 용융 상태의 수지가 냉각되면서 발생하는 15~25%의 체적 감소를 보상해 주기 위하여 1차 사출압의 30~80% 정도의 보정 압력이 필요하다. 사출압에 따른 PA6/GF 복합소재 시편을 제조하여, 사출 성형 압력 조건에 따른 PA6 수지내에 GF 소재의 배향도를 분석하였다. 이때 PA6/GF 복합소재를 사용하여 분석을 진행하였다.

사출 압력에 따라 PA6/GF 복합소재 시편을 제작한 결과 사출 압력이 700bar의 경우 토출량이 일정하게 나오지 않는 현상을 나타냈다. 이때 전부, 중부, 후부, Nozzle 구간의 설정 온도를 약 10°C 상승시켜 수지의 점도를 내려야 압출량이 일정할 것으로 사료된다. 사출압을 800bar로 설정한 경우 시편 두께 부분에서 일부분 미충진 부분과 이로 인해 한쪽으로 버(burr)가 발생하였다. 사출압을 900bar로 설정하였을 때, 육안상 시편의 불량률 2% 이내로 거의 검출되지 않은 것을 확인하였다. 사출압이 1000bar의 경우에는 처음 부분 또는 피드 존(feed zone)에서 녹기 시작해서 이 수지가 스크류(screw)에 부착하여 흑소가 발생한 것으로 확인되었다. 고압으로 인해 빠른 속도로 사출되는 시편의 경우 흑소현상이 발생한다<sup>27)</sup>.

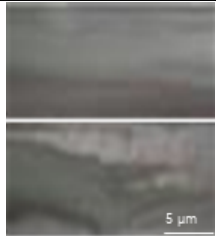
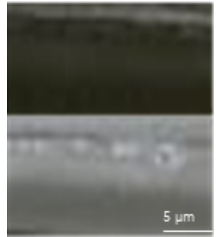

따라서 사출압을 900bar로 설정하여 시편을 제작하였을 때 가장 불량률이 적은 적합한 조건인 것을 확인하였다. 사출 압력에 따른 형태학적 분석을 Table 2에 나타냈다.

#### 3.2 PA6/GF 복합소재의 배향도

PA6/GF 복합소재 시편 제조 시, 사출 압력(700~1000bar)에 따른 PA6 수지내에 GF 소재의 배향도를 분석하였다. 사출 압력을 각각 700, 800, 900, 1000bar로 설정하여 PA6/GF 시편을 제작한 결과 GF의 길이는 212.9, 207.2, 202.5, 195.2μm를 나타냈다. 사출 압력이 높을수록 강화재 섬유 길이 짧아진 반면에 물성은 약간 상승함을 확인하였다. 일반적으로 섬유 길이가 짧아지면 보강 효과가 저하되어 물성이 떨어지지만, 사출 압력 증가에 의한 전단력 상승으로 인해 섬유 배향도가 증가한 것으로 사료된다.

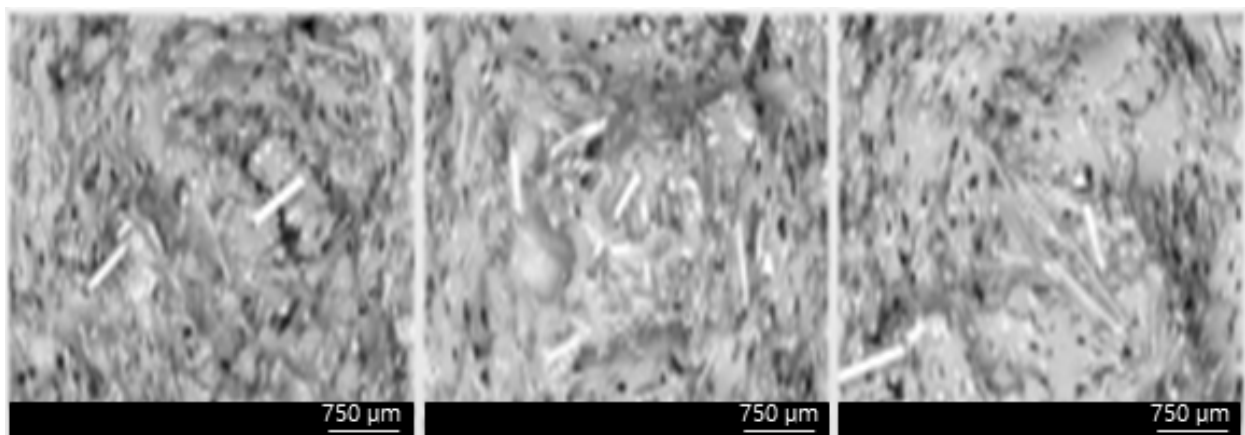
Figure 4는 시편 내 섬유 배향 상태를 확인하고자 PA6/GF

**Table 2.** Experimental parameters of PA6/GF composite materials

Experimental parameters				
	Injection pressure (bar)	Back pressure (sec)	Injection time (sec)	Morphology
#1	700	5	4	Discharge volume is non-uniform 
#2	800	5	4	Unfilling occurs in the thickness of the specimen 
#3	900	5	4	Clear -
#4	1000	5	4	Black specks in the resin flow direction 

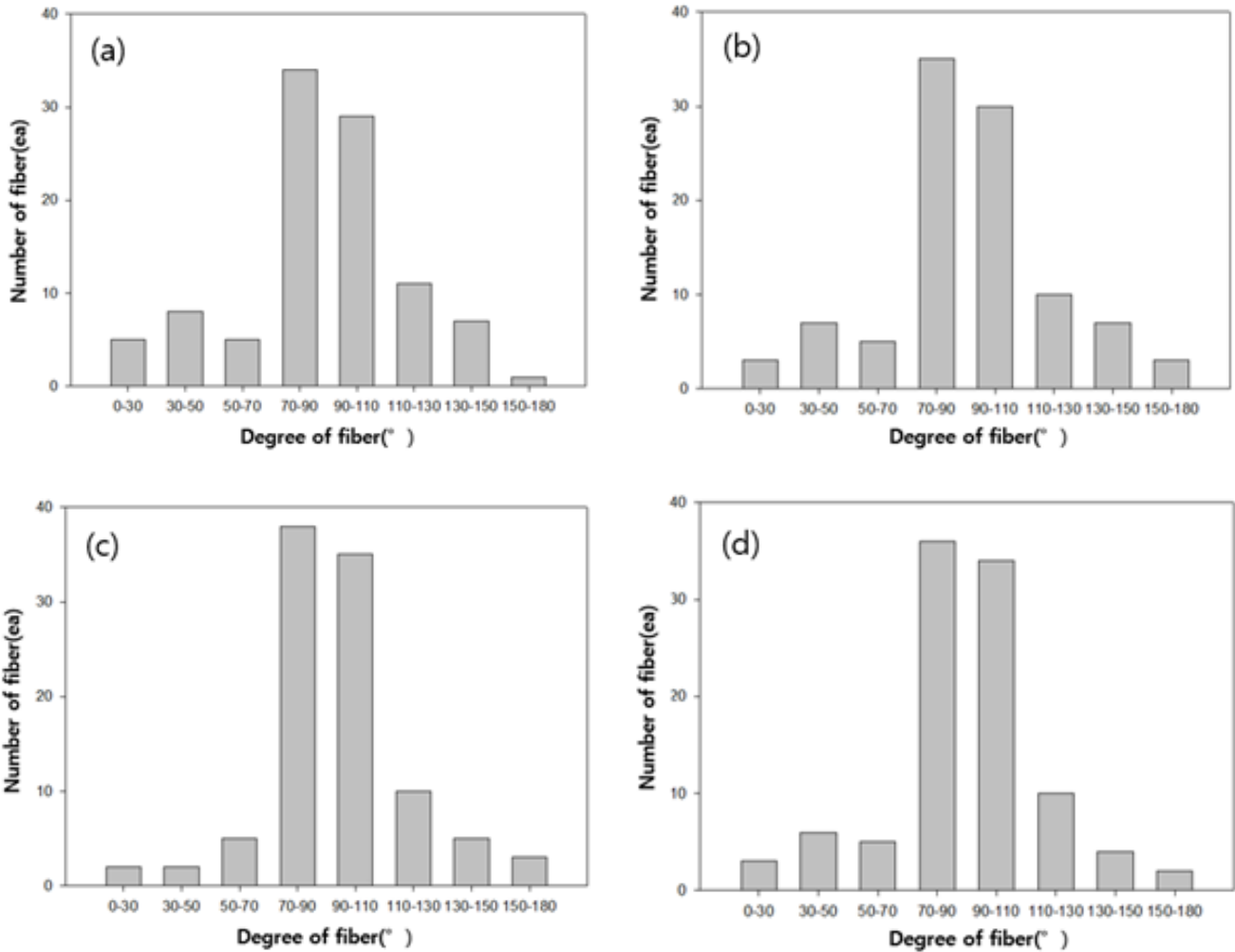
시편의 단면을 Optical microscope 분석을 통해 확인한 결과를 보여준다. 또한 PA6/GF 복합소재 내 약 200개 유리섬유의

각도를 측정하여 배향 분포를 확인하였다. 사출 압력이 증가할 수록 flow direction(70° ~ 90°, 90° ~ 100°)에 가까운 방향으로



**Figure 4.** Optical microscope images of the cross-section of PA6/GF composite materials.





**Figure 5.** Fiber orientation distribution graph of PA6/GF composite materials fabricated with various injection pressure levels; (a) 700bar, (b) 800bar, (c) 900bar, (d) 1000bar.

배향된 섬유가 많이 분포하였다. 모든 시편에서 90°로 분포하는 섬유의 개수가 가장 많았지만, 사출 압력 700bar 시편의 경우 1°~30°사이에 분포한 섬유가 많았고, 사출 압력 800bar 시편에서는 30°~50°에 가장 많이 분포된 것을 확인하였다.

Figure 5은 섬유의 사출 압력 별 복합소재 내 유리섬유의 분포된 배향 정도를 그래프로 나타내고, 유리섬유 배향 분포를 분석한 사진을 Figure 6에 나타낸 것이다.

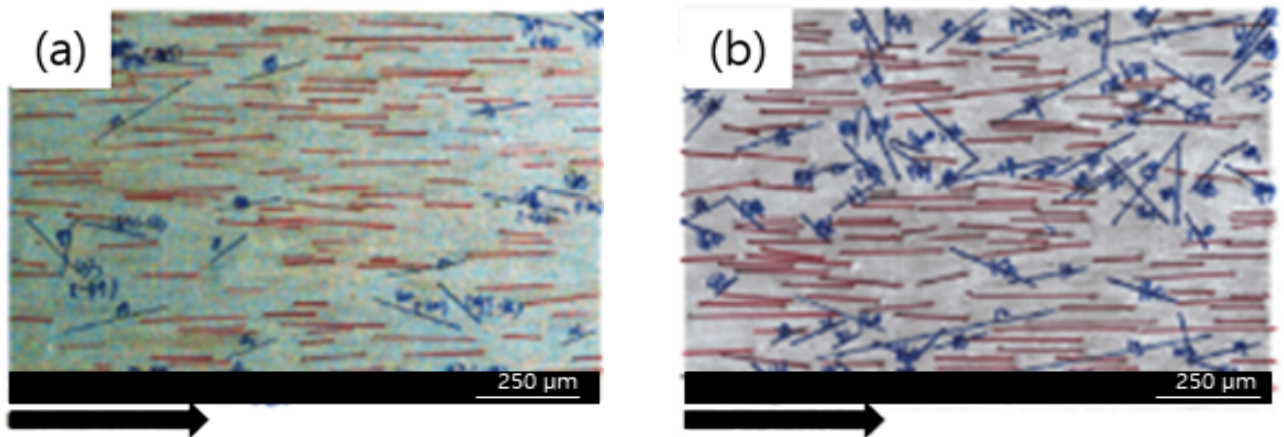
Figure 7은 PA6/GF 시편 내 유리섬유의 배향 상태를 고배율로 확인하고자 Micro-CT 분석을 통해 측정된 결과를 보여준다. 700bar 시편(Figure 7(a))의 경우 보강재로 작용하는 유리섬유가 대체로 1°~30°사이에 분포하고 있고, 800bar의 압력에서 성형한 시편(Figure 7(b))의 경우 유리섬유가 대부분 30°~50° 방향으로 배향되었다. 또한 900bar의 압력에서 성형한 시편(Figure 7(c))의 경우 70°~90°, 90°~100°의 배향성을, 1000bar의 압력에서 성형한 시편(Figure 7(d))의 경우 고압과 높은

용융 온도로 인해 흑조현상이 발생한 것을 관찰하였다.

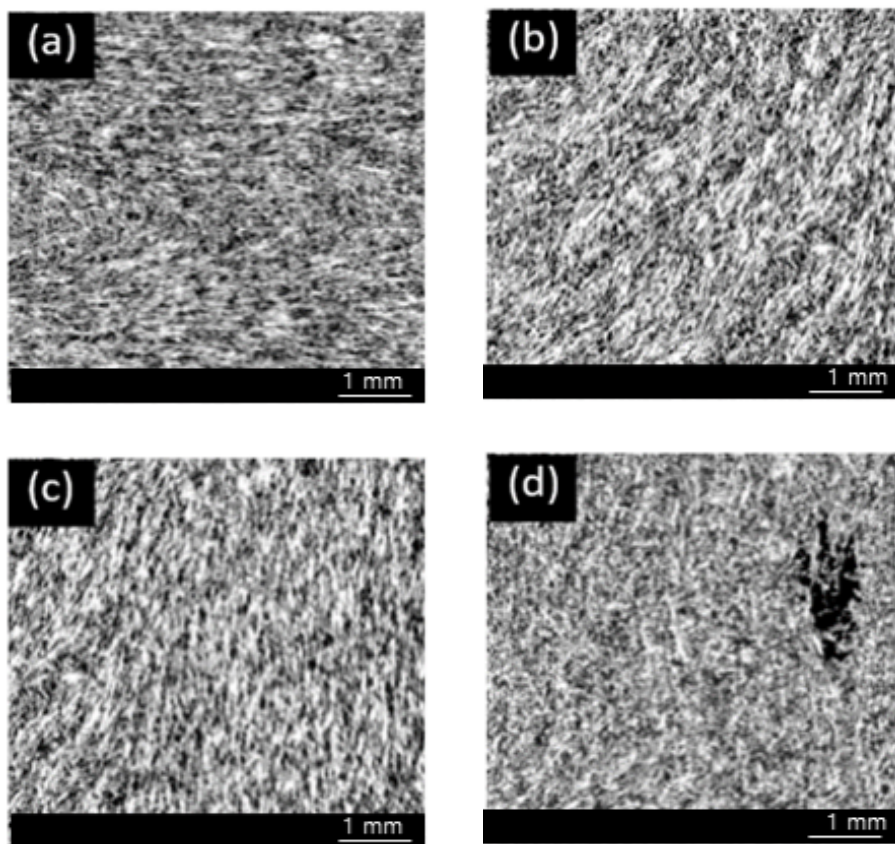
따라서 사출 압력이 증가함에 따라 유리섬유의 배향성이 flow direction(70°~90°, 90°~100°)과 유사한 방향으로 배열된다는 것을 확인하였다. 또한 PA6/GF 복합재료를 사출하는 과정에서 노즐과 사출 다이 사이에서의 전단력으로 인해 전체 공정에서 속도구배가 발생하여 노즐과 닿는 성형품의 외벽 부분에는 섬유의 배향성이 향상된 것을 확인할 수 있었고, 성형품의 중심 부분에는 비교적 배향성이 낮은 것을 확인할 수 있었다. 그러나 900bar 이상에서 성형한 복합재료의 경우 높은 압력에 의해 속도구배가 현저히 낮아졌으며, 성형품의 내부도 섬유의 배향성이 증가하여 물성을 향상시키는데 기여한 것으로 판단된다.

### 3.3 PA6/GF 복합소재의 기계적 물성

제조된 시편(PA6/GF)을 활용하여 가상공학 S/W활용 시뮬레이션에 필요한 물성 DB를 구축하기 위하여 인장 및 굴곡 시험



**Figure 6.** Optical microscope images of the PA6/GF composite materials fabricated by injection pressure of 700bar and 800bar; (a) 700bar, (b) 800bar.



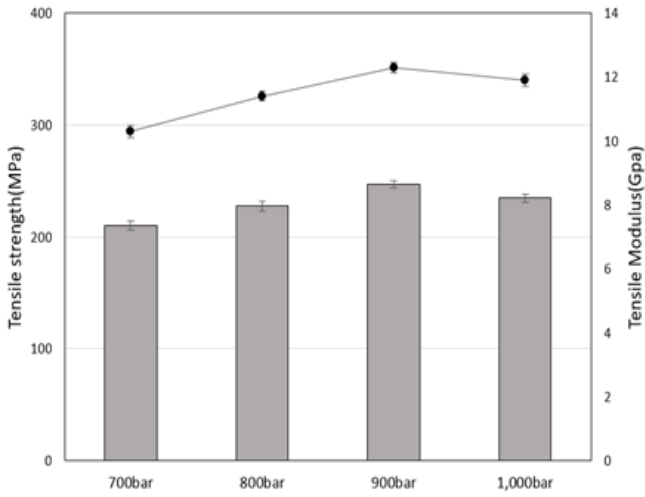
**Figure 7.** X-ray microtomography images of the PA6/GF composite materials fabricated by injection pressure of 700, 800, 900 and 1000bar; (a) 700bar, (b) 800bar, (c) 900bar, (d) 1000bar.

을 진행하였다.

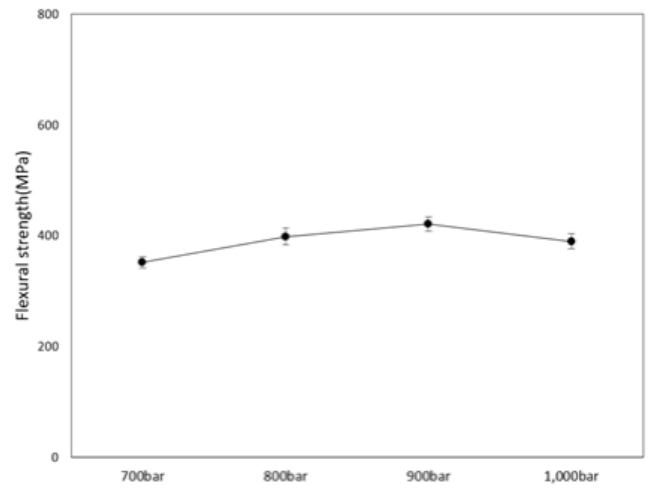
Figure 8과 Figure 9는 사출 압력별 PA6/GF 복합소재의 인장강도와 굽힘강도를 보여준다. 사출 압력이 각각 700, 800,

900, 1000bar로 설정함에 따라 인장강도 값은 각각 210.4, 227.6, 247.3, 234.7MPa로 나타났으며, 굽힘강도 값은 각각 351.2, 398.3, 420.4, 389.7MPa로 나타났다. PA6/GF 복합재





**Figure 8.** Tensile strength and modulus of PA6/GF composite materials with various injection pressure levels.

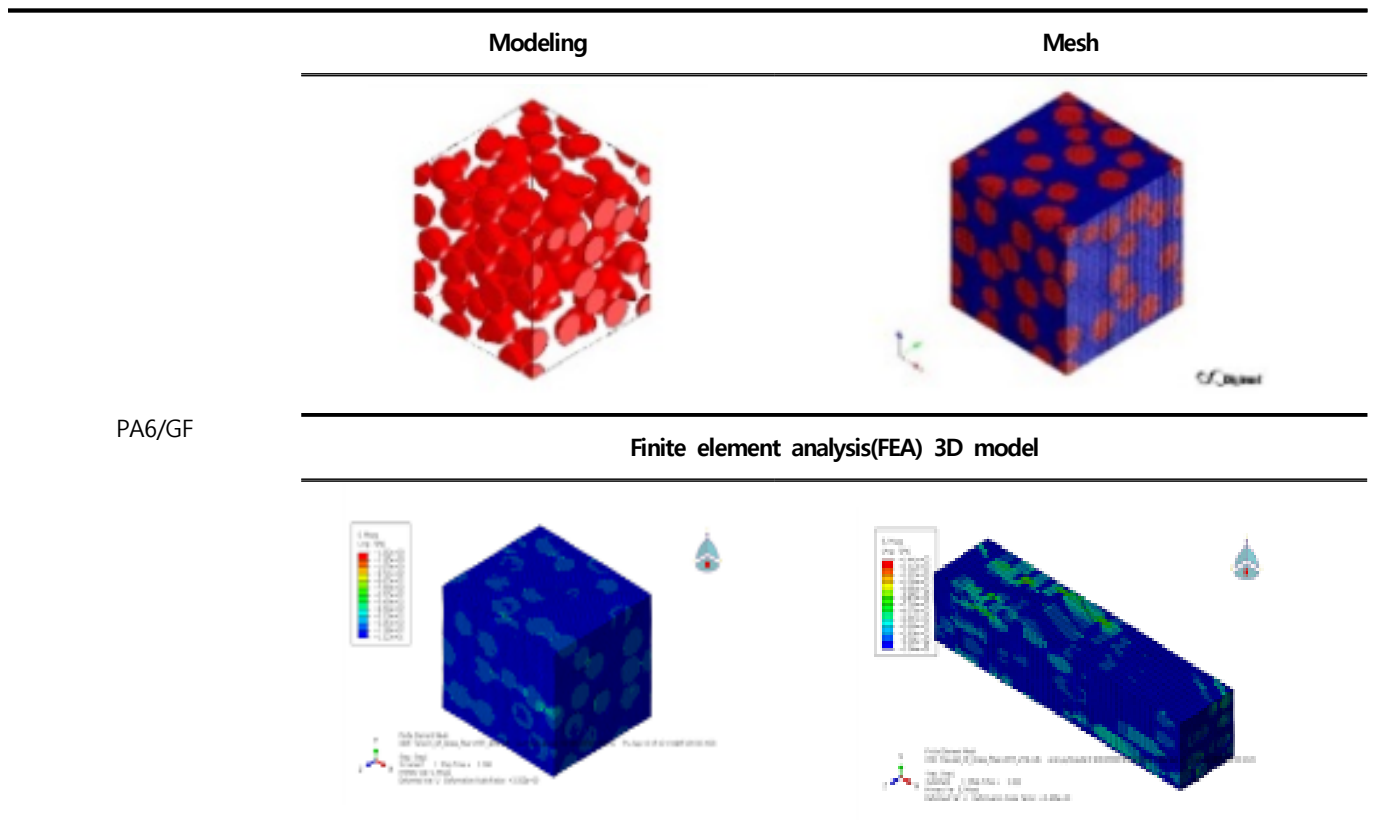


**Figure 9.** Flexural strength of PA6/GF composite materials with various injection pressure levels.

료의 사출 성형 공정 조건에서 사출 압력이 900bar일 경우에 인장강도, 굴곡강도 값이 가장 우수한 것을 확인하였으며, 이는 사출 성형 시 캐비티 내에 적절한 압력이 전달되어 섬유 배

향성 향상에 기인한 것이다.

반면에 사출 압력이 700bar일 경우에 현저히 낮은 인장강도, 굴곡강도 특성을 보였는데, 이는 사출 성형 공정 중에 일어난



**Figure 10.** 3-dimensional finite element model(FEM) analysis results of PA6/GF composite materials.

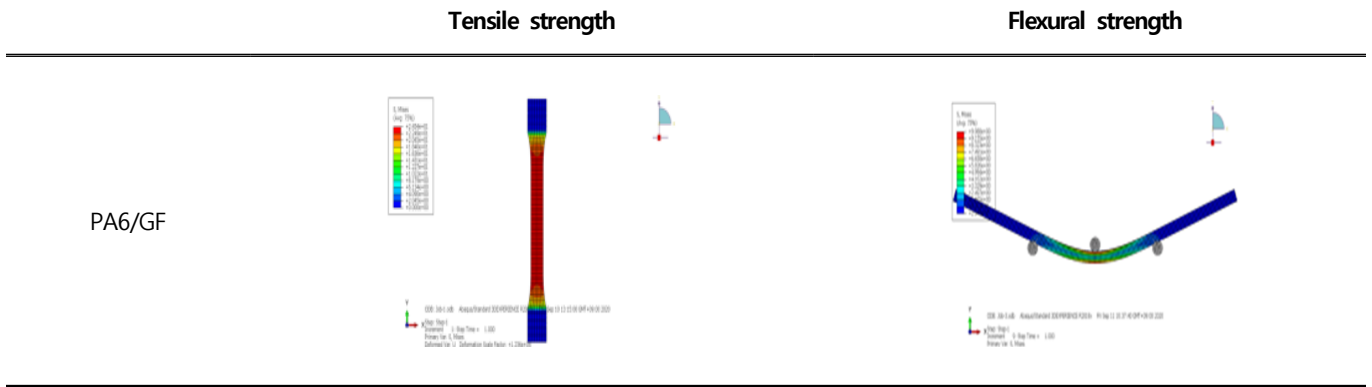


Figure 11. Finite element model(FEM) analysis of PA6/GF composite materials.

수지 일부 미함침 및 미충전 부분이 발생하고 그로 인해 PA6/GF 복합재료 내부에 응력 집중을 수반할 수 있는 공극이 생성되었기 때문이라 사료된다. 사출 압력이 1000bar일 경우, 사출 압력이 700bar일 경우에 비해 인장강도와 굴곡강도 값이 약 10.5% 이상 향상된 수치를 나타냈다.

하지만 900bar 성형 압력 하에서 제조한 샘플보다 인장 및 굴곡 특성이 약 5% 정도 하락하는 현상을 관찰하였는데, 이는 고압의 1000bar 성형 압력 하에서 높은 용융온도에 의한 재료의 국부적인 과열 분해, 재료 자체의 열화 현상, 코크스화 및 덩어리로의 탄화현상에 의해 수반되는 흑조 현상에 기인한 것으로 사료된다.

흑조현상은 복합재료 내부에 국부적인 불순물 층(직경 약 0.5~2mm)을 형성하고, 그로 인해 성형품의 irregularity를 야기시키며 복합재료의 물성을 저하시키는 원인이라 판단된다. 또한 흑조 현상에 의해 생성된 쉽게 부서지는 성질을 갖는 다공성 불순물들은 복합재료 내부에 무작위로 흩어져 있어 재료의 특성을 예측하는데 부정적인 요소로 작용한다는 것을 확인하였다.

따라서 실험적 관찰을 통해 우리는 1000bar 이상의 압력 하에서 사출 성형을 수행하면 흑조 현상에 의한 재료의 물리적 특성 감소가 현저히 증가할 수 있다는 것을 제시한다.

### 3.4 EP소재 시뮬레이션을 통한 PA6/GF 복합소재의 성능 예측

실제 제조된 시편(PA6/GF)의 실험을 통한 인장특성, 굴곡특성에 대한 값과 가상공학 S/W(Digimat, Abaqus)를 활용한 인장특성, 굴곡특성에 대한 해석 결과값을 비교하여 가상공학 S/W를 활용한 시뮬레이션 결과치와 실제 결과값에 대한 상관성을 분석하였다. 각 복합소재의 포아송비(poisson's ratio), 밀도(density)값 및 탄성계수(modulus) 값을 분석하였고, 그 결과 포아송비 0.3, 평균밀도 1.47g/cc, 탄성계수 7.10GPa 값을 나타냈다. 해당 DB를 적용한 가상공학 S/W를 활용한 시뮬레이션을 진행하였다. Digimat S/W를 활용하여 PA6/GF 복합소재의 인장, 굴곡 특성에 대한 시뮬레이션을 진행하였으며, 복합

소재 시편의 3D 모델링을 위하여 SOLID70요소를 사용하여 유한요소 모델을 생성하였다.

Figure 10은 복합소재의 생성된 3D 유한요소 모델을 나타낸다. 생성된 유한요소 모델에 경계조건을 적용하여 Abaqus S/W를 활용하여 시뮬레이션을 진행하였으며, Figure 11은 인장특성과 굴곡특성의 시뮬레이션 해석 결과를 나타낸다.

Figure 12는 PA6/GF 복합소재의 실험값과 해석값에 대해 비교한 그래프를 나타낸다. 실제 인장강도, 굴곡강도의 실험 수치값과 해석 결과치를 비교해 보았을 때, 근사치(오차율 5% 이내)의 값을 나타내었으나, 실제 PA6/GF 복합소재의 사출 성형 공정 상에서 발생한 버(burr)나 일부 흑조현상으로 인하여 오차가 발생한 것으로 사료된다<sup>27)</sup>.

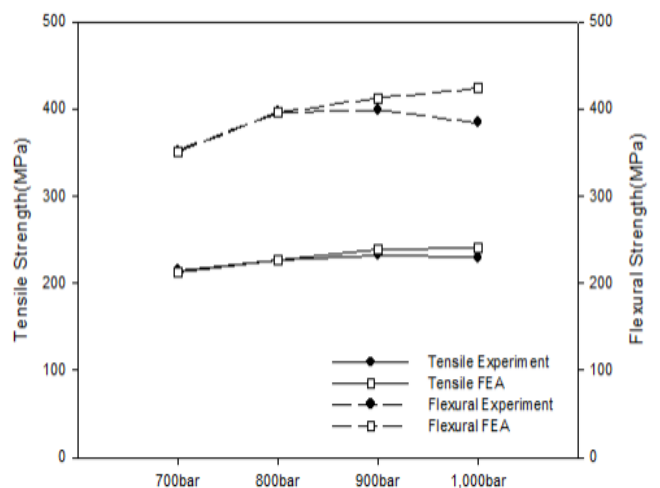


Figure 12. Comparison of theoretical values through finite element model analysis and actual values through experimental analysis for the tensile and flexural properties of PA6/GF composite materials.

## 4. 결 론

본 연구에서는 폴리아미드-6/유리섬유 복합재료를 사출 성형을 통하여 제작하고, 사출 압력에 따른 기계적 물성을 조사하였다. 사출 압력을 700, 800, 900, 1000bar로 각각 달리 제작하였고, 압력별 시편의 형태분석 및 배향도를 광학 현미경(Optical microscope) 분석 및 XRM(X-ray microtomography)을 통해 확인하였다. 그 결과 사출압을 900bar로 설정하였을 때, 육안상 시편의 불량률이 2% 이내로 거의 검출되지 않았으며 형태학적으로 최적의 조건임을 확인하였다. 또한 사출 압력이 증가할수록 flow direction(70° ~ 90°, 90° ~ 100°)에 가까운 방향으로 배향된 섬유가 많이 분포하는 것을 확인하였다.

PA6/GF 복합소재의 기계적 특성을 인장시험, 굴곡시험을 통해 분석하였고, 그 결과 사출압이 900bar인 복합소재의 인장강도, 굴곡강도 값이 234.6MPa, 391.4MPa로 가장 높은 기계적 물성값을 나타내었다. 반면에 사출 압력이 700bar인 복합소재의 경우 사출 성형 공정 중에 일어난 수지 일부 미함침 및 미충전 부분이 발생하여 인장강도, 굴곡강도 값이 210.4MPa, 351.2MPa로 가장 낮은 물성값을 나타내며, 사출 압력이 1000bar인 복합소재의 경우는 사출 압력이 너무 높을 경우 생기는 흑조현상으로 인해 물성값이 하락한 것으로 사료된다.

실제 제조된 시편(PA6/GF)의 기계적 물성 값과 가상공학 S/W를 활용한 기계적 물성 값에 대한 해석 결과값을 비교하여 상관성을 분석한 결과 사출 성형 공정 상에서 발생한 버(burr)나 일부 흑조현상으로 인하여 5% 이내의 오차율이 발생한 것으로 나타난다.

## 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 글로벌주력산업품질대응 뿌리기술 개발사업(20016443)에 의해 수행되었으며, 지원에 대해 감사드립니다.

## References

1. A. Das, C. Chatham, J. Fallon, E. Zawaski, L. Gilmer, B. Williams, and J. Bortner, Current Understanding and Challenges in High Temperature Additive Manufacturing of Engineering Thermoplastic Polymers, *Additive Manufacturing*, **34**, 101218(2020).
2. A. Harsha, An Investigation on Low Stress Abrasive Wear Characteristics of High Performance Engineering Thermoplastic Polymers, *Wear*, **271**(5), 942(2011).
3. H. Unal, A. Mimaroglu, and T. Arda, Friction and Wear Performance of Some Thermoplastic Polymers and Polymer Composites Against Unsaturated Polyester, *Applied Surface Science*, **252**(23), 8139(2006).
4. A. Mountasir, G. Hoffmann, C. Cherif, M. Löser, and K. Gro mann, Competitive Manufacturing of 3D Thermoplastic Composite Panels Based on Multi-layered Woven Structures for Lightweight Engineering, *Composite Structures*, **133**, 415(2015).
5. J. Gao, J. Dong, S. Zhang, L. Yu, H. Jin, J. Zhang, and Y. Shen, Study of Friction Stir Spot Welding for Thermotolerant Engineering Thermoplastic Polyimide Joints, *Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **235**(11), 1810(2021).
6. T. Aminabhavi, H. Phayde, and J. Ortego, Resistivity and Dimensional Stability of High-performance Engineering Thermoplastic Blend of Ethylene-propylene Random Copolymer and Isotactic Polypropylene Membrane in the Presence of Hazardous Haloalkanes, *Journal of Hazardous Materials*, **46**(1), 71(1996).
7. S. Park, J. Sim, S. Yu, J. Lee, G. Kim, and J. Chon, Study on Thermal and Mechanical Properties of Epoxy Resin Nanocomposites with the Graphene Oxide, *Textile Coloration and Finishing*, **30**(2), 98(2018).
8. J. Sim, S. Yu, and J. Lee, Characterization of PETG Thermoplastic Composites Enhanced TiO<sub>2</sub>, Carbon Black, and POE, *Textile Coloration and Finishing*, **31**(4), 354(2019).
9. J. Gu, H. Yoon, and N. Choi, Acoustic Emission Characterization of a Notched Aluminum Plate Repaired with a Fiber Composite Patch, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **43**(12), 2211(2012).
10. Y. Zhou and P. Mallick, A Non-linear Damage Model for the Tensile Behavior of an Injection Molded Short E-glass Fiber Reinforced Polyamide-6,6, *Materials Science and Engineering A*, **393**(1-2), 303(2005).
11. J. P. Davim, L. Silva, A. Festas, and A. Abrão, Machinability Study on Precision Turning of PA66 Polyamide With and Without Glass Fiber Reinforcing, *Materials and Design*, **30**(2), 228(2009).
12. A. Hassan, R. Yahya, A. Yahaya, and A. Tahir, Tensile, Impact and Fiber Length Properties of Injection-molded Short and Long Glass Fiber-reinforced Polyamide 6,6 Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **23**(9), 969(2004).
13. J. Chaichanawong, C. Thongchuea, and S. Areerat, Effect of Moisture on the Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyamide Composites, *Advanced Powder Technology*, **27**(3), 898(2016).
14. P. Lee, J. Ha, B. Kim, S. Jeoung, W. Jungm, D. Shin, J. Han, and Y. Bang, Melt Flow Improvement of Polyamide 6/Glass Fiber Composite Using Amide-type Lubricant, *Polymer(Korea)*, **42**(4), 568(2018).
15. S. Kim, H. Ahn, M. Shin, and H. Jang, Wear of Glass Fiber Reinforced Polyamide Worm Gear According to the

- Direction of the Glass Fiber, *The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, **6**, 108(2009).
16. S. Kim, H. Ahn, M. Shin, and H. Jang, Wear of Polyamide 12 Resin with Glass Fiber: The Effect of the Fiber Orientation and Content, *Korean Tribology Society*, **11**, 191(2009).
  17. S. Tjong, S. Xu, and Y. Mai, Impact Fracture Toughness of Short Glass Fiber-reinforced Polyamide 6,6 Hybrid Composites Containing Eastomer Particles using Essential Work of Fracture Concept, *Materials Science and Engineering A*, **347**(1-2), 338(2003).
  18. I. Lévy, G. Lenkey, L. Tóth, and Z. Major, The Effect of the Testing Conditions on the Fracture Mechanics Characteristics of Short Glass Fibre Reinforced Polyamide, *Journal of Materials Processing Technology*, **133**(1-2), 143(2003).
  19. A. Pedroso, L. Mei, J. Agnelli, and D. Rosa, The Influence of the Drying Process Time on the Final Properties of Recycled Glass Fiber Reinforced Polyamide 6, *Polymer Testing*, **21**(2), 229(2002).
  20. Y. Ryu, J. Sohn, C. Yun, and S. Cha, Shrinkage and Warpage Minimization of Glass-Fiber-Reinforced Polyamide 6 Parts by Microcellular Foam Injection Molding, *Polymers*, **12**(4), 889(2020).
  21. A. Hassan, N. Rahman, and R. Yahya, Moisture Absorption Effect on Thermal, Dynamic Mechanical and Mechanical Properties of Injection-molded Short Glass-fiber/polyamide 6,6 Composites, *Fibers and Polymers*, **13**(7), 889(2012).
  22. E. Kuram, Micro-machinability of Injection Molded Polyamide 6 Polymer and Glass-fiber Reinforced Polyamide 6 Composite, *Composites Part B: Engineering*, **88**, 85(2016).
  23. M. Arif, N. Saintier, F. Meraghni, J. Fitoussi, Y. Chemisky, and G. Robert, Multiscale Fatigue Damage Characterization in Short Glass Fiber Reinforced Polyamide-66, *Composites Part B: Engineering*, **61**, 55(2014).
  24. X. Wang, G. Wu, P. Xie, X. Gao, and W. Yang, Microstructure and Properties of Glass Fiber-reinforced Polyamide/nylon Microcellular Foamed Composites, *Polymers*, **12**(10), 1(2020).
  25. S. Tjong, S. Xu, R. K. Y. Li, and Y. Mai, Short Glass Fiber-reinforced Polyamide 6,6 Composites Toughened with Maleated SEBS, *Composites Science and Technology*, **62**(15), 2017(2002).
  26. G. Kim, J. Lee, and T. Seo, Durability Characteristics Analysis of Plastic Worm Wheel with Glass Fiber Reinforced Polyamide, *Materials*, **6**(5), 1873(2013).
  27. B. Muangwaeng, S. Rojananan, and S. Rojananan, The Effect of Injection Parameters on Morphology in Metal Injection Moulding, *Advanced Materials Research*, **802**, 174(2013).

## Authors

- 유성훈** 다이텍연구원 전임연구원  
**김민성** 다이텍연구원 연구원  
**윤현성** 다이텍연구원 전임연구원  
**박종수** 평화산업(주) 부장  
**전성민** 평화산업(주) 팀장  
**심지현** 다이텍연구원 센터장