

유리섬유 강화 플라스틱의 역학적 거동 구현을 위한 Digimat와의 연성해석 연구

김 영 만¹ · 김 용 환^{2*}

¹충남대학교 기계공학부 박사과정, ²충남대학교 기계공학부 교수

Coupled Analysis with Digimat for Realizing the Mechanical Behavior of Glass Fiber Reinforced Plastics

Young-Man Kim¹ and Yong-Hwan Kim^{2*}

¹Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Chungnam National Univ., Daejeon 34134, Korea

²Professor, Department of Mechanical Engineering, Chungnam National Univ., Daejeon 34134, Korea

Abstract

Finite element method (FEM) is utilized in the development of products to realistically analyze and predict the mechanical behavior of materials in various fields. However, the approach based on the numerical analysis of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composites, for which the fiber orientation and strain rate affect the mechanical properties, has proven to be challenging. The purpose of this study is to define and evaluate the mechanical properties of glass fiber reinforced plastic composites using the numerical analysis models of Digimat, a linear, nonlinear multi-scale modeling program for various composite materials such as polymers, rubber, metal, etc. In addition, the aim is to predict the behavior of realistic polymeric composites. In this regard, the tensile properties according to the fiber orientation and strain rate of polybutylene terephthalate (PBT) with short fiber weight fractions of 30wt% among various polymers were investigated using references. Information on the fiber orientation was calculated based on injection analysis using Moldflow software, and was utilized in the finite element model for tensile specimens via a mapping process. LS-Dyna, an explicit commercial finite element code, was used for coupled analysis using Digimat to study the tensile properties of composites according to the fiber orientation and strain rate of glass fibers. In addition, the drawbacks and advantages of LS-DYNA's various anisotropic material models were compared and evaluated for the analysis of glass fiber reinforced plastic composites.

Keywords : *gfrp, composite, fiber orientation, strain rate, coupled analysis, digimat*

1. 서 론

최근 자동차 산업에서는 연비 향상과 환경 문제를 개선하기 위한 목적으로 부품 경량화에 대한 요구조건을 강화하고 있으며 이를 실현하기 위해 다양한 연구가 진행 중이다. 전통적으로 금속 재료로 구성된 자동차 부품들은 경량화 요구사항을 충족시키기 위해 섬유 강화 플라스틱(fiber reinforced plastic, FRP)과 같은 고분자(polymer) 복합재료(composite)로 대체되고 있다. 고분자 복합재료는 열가소성(thermoplastic), 열경화성(thermoset) 고분자 기지재(matrix)와 유리섬유, 탄소

섬유 등과 같은 섬유 강화재(reinforcement)로 구성되어 있다. 이들 중 사출성형으로 제작되는 유리섬유 강화 플라스틱(glass fiber reinforced plastic, GFRP) 복합재료는 높은 역학적 강도, 전기에 대한 우수한 절연 효과, 쉬운 성형과 빠른 제작 과정 등과 같은 장점으로 자동차의 내·외장 부품들에 광범위하게 사용되고 있다(Brunbaer *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2015). 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 역학적 특성은 체적과 질량 비율에 따른 유리섬유 함량, 섬유 지름과 길이에 따른 기하학적 형상비(aspect ratio) 그리고 유리섬유의 배향에 따라 상당한 영향을 받는다. 역학적 특성 중 대표적인 인장강

* Corresponding author:

Tel: +82-42-821-6649; E-mail: yonghkim@cnu.ac.kr

Received June 25 2019; Revised August 29 2019;

Accepted October 8 2019

©2019 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

도는 유리섬유의 체적 혹은 질량 비율이 10, 15, 30%로 증가함에 따라 점진적으로 증가하며 이와 동시에 수지에 강화재로 첨가된 유리섬유의 높은 상호작용으로 인해 평균 섬유의 길이가 줄어들어 형상비에 영향을 미친다(Thomason, 1996; Güllü *et al.*, 2006). 또한 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 인장 특성에 영향을 주는 섬유배향(fiber orientation)은 사출성형 과정 동안 발생한다(Zhou *et al.*, 2005; Thomason *et al.*, 2006; Brunbaer *et al.*, 2014). 금형의 유선 방향(mold flow direction)에 대해 평행한 섬유배향(0°)은 수직인 섬유배향(90°)보다 온도 변화와 변형률 속도(strain rates)의 증가에 따라 높은 인장강도를 나타낸다(Thomason, 1999; Wang *et al.*, 2002). 이러한 영향은 시편의 두께 방향의 셸-코어-셸(shell-core-shell)의 형태학적인 구조의 결과이다. 셸 영역에서의 섬유는 금형의 유선 방향에 대해 정 배열되며 코어 영역에서의 섬유는 금형의 유선 방향에 대해 좀 더 횡 방향으로 배열된다. 이러한 현상은 주사 전자 현미경(scanning electron microscope, SEM)과 사출성형해석을 통해 확인할 수 있다(Bernasconi *et al.*, 2008; De Monte *et al.*, 2010; Tanaka *et al.*, 2014).

유한요소법(finite element method)은 다양한 분야에서 재료의 역학적 거동을 더욱더 현실적으로 해석하고 예측하는 방법으로 다양한 분야의 제품 개발에 적용되고 있다. 하지만 섬유배향과 변형률 속도가 역학적 특성에 영향을 미치는 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료에 관한 수치해석을 이용한 접근 방법은 현재까지 다소 어려움이 있다. 본 연구의 목적은 고분자, 고무, 금속 등과 같은 다양한 복합재료를 위한 선형, 비선형 다중스케일 재료 모델링 프로그램인 Digimat의 수치해석 재료 모델을 활용하여 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 역학적 특성을 정의하고 검증하는 것에 있다. 또한 이를 통해 좀 더 현실적으로 고분자 복합재료의 거동을 예측하고자 한다. 이를 위해 다양한 고분자 중 30wt%의 단섬유 질량 비율을 갖는 폴리부틸렌 테레프탈레이트(polybutylene terephthalate, PBT)의 섬유배향과 변형률 속도에 따른 인장 특성을 참고문헌을 통해 조사하였다. 또한 Moldflow 프로그램을 사용한 사출해석을 통해 섬유배향 정보를 계산하였으며 이를 매핑(mapping) 과정을 통해 유한요소 인장 시편 모델에 전달하였다. 대표적인 유한요소 상용프로그램 중 하나인 LS-DYNA는 섬유배향과 변형률 속도에 따른 복합재료의 인장 특성을 연구하기 위해 Digimat과의 연성해석(coupled analysis)에 활용되었다. 그리고 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료를 해석하기 위한 LS-DYNA의 다양한 비등방성(anisotropic) 재료 모델들의 장단점을 서로 비교하고 평가하였다.

2. 본 론

2.1 PBT GF30wt%의 역학적 특성

Mortazavian는 GF30wt% 단섬유(short glass fiber)를 포함하는 PBT의 역학적 특성을 평가하기 위한 인장시험을 수행하였다(Mortazavian, 2015; Mortazavian *et al.*, 2017). 이 시험에서는 0°, 18°, 45°, 90° 섬유배향, $5 \times 10^{-5} s^{-1} \sim 5 \times 10^{-1} s^{-1}$ 변형률 속도, -40°C, 23°C, 85°C, 125°C 온도와 같은 다양한 변수들이 사용되었다. 또한 PBT GF30wt%의 인장 특성을 응력-변형률(stress-strain) 선도를 통하여 수학적 관계식으로 나타내었다. 이들 변수 중 18° 섬유배향은 수학적 관계식을 검증하기 위한 시험이었고 변형률 속도는 1, 10, 100, 1000mm/min 변위 속도(displacement rate)에 의해 측정되었다. 시험에 사용된 사출 금형의 규격은 100mm×200mm×3.8mm(너비×길이×두께) 치수의 직사각형 평판이며 3.0mm 두께를 포함하여 두께 변화에 따른 복합재료의 인장 특성에 대해서 역시 평가하였다. 섬유배향을 고려하여 인장 시편 제작 시 상판으로부터 60mm 지점까지는 사용하지 않았다.

본 연구에서는 다양한 변수 중 23°C 상온에서 1, 10, 100 mm/min 변위 속도와 0°, 18°, 45°, 90° 섬유배향과 3mm, 3.8mm 평판 두께에 대해서 수치해석 방법으로 검증하였다.

Fig. 1에는 ASTM D638과 ISO-527 기준에 따라 측정된 탄성계수(E), 항복강도(σ_y), 인장강도(σ_u), 인장강도에서 변형률(strain)에 관한 결과를 나타내고 있다. 섬유배향에 무

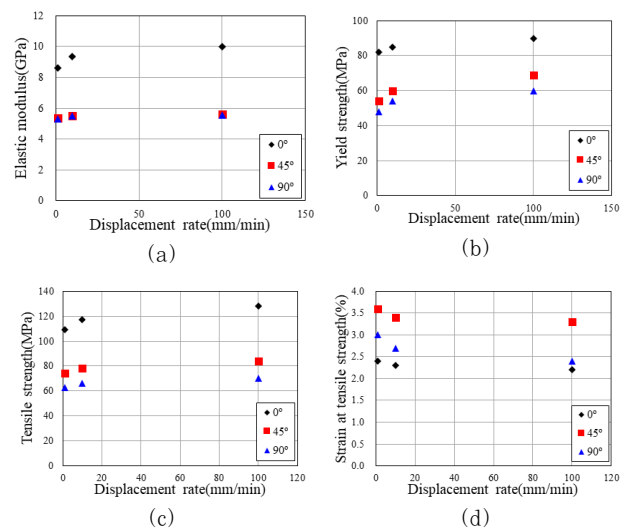


Fig. 1 Tensile properties for PBT GF30wt% at displacement rates (a) Elastic modulus, (b) Yield strength, (c) Tensile strength, (d) Strain at tensile strength

관하게 변위 속도가 증가함에 따라 탄성계수, 항복강도, 인장 강도가 증가하고 있으며 금형의 유선 방향에 평행한 섬유배향이 가장 높은 강도를 갖고 있다. 주사 전자 현미경(SEM)을 통해 촬영된 파손 단면을 관찰하면, 변위 속도가 증가함에 따라 섬유 끝단이 높은 각도로 뿔쳐 나가는 현상을 확인할 수 있다. 이는 섬유 끝단에서 응력 완화(stress relaxation)를 감소시켜 유리 섬유의 거동을 좀 더 강화하고 있는 것으로 확인되었다. 그러나 비교적 높은 강성을 갖는 PBT 고분자의 특성으로 인장강도에서 변형률은 변위 속도와 무관하게 거동을 하고 있다(Pierantoni *et al.*, 2011; Schaaf *et al.*, 2014).

인장시험 결과인 응력-변형률 선도는 일반적으로 비선형적인 거동을 보이며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 이를 Ramberg-Osgood 관계식이라 한다(Kim *et al.*, 2004; Kamaya, 2016).

$$\epsilon = \epsilon_E + \epsilon_P = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{1/n} \quad (1)$$

Table 1 Values of K and n

Flow direction(°)	Displacement rate (mm/min)	K (MPa)	n
0	1	221	0.149
0	10	282	0.186
0	100	281	0.165
45	1	118	0.123
45	10	120	0.110
45	100	113	0.074
90	1	101	0.118
90	10	96	0.09
90	100	99	0.078

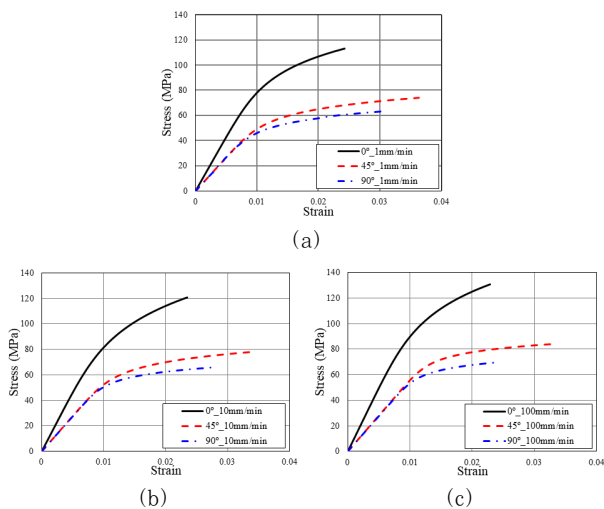


Fig. 2 Stress-strain curves by Ramberg-Osgood equation (a) 1mm/min displacement rate, (b) 10mm/min displacement rate, (c) 100mm/min displacement rate

K 는 강도 계수(strength coefficient), n 은 가공 경화 지수(strain hardening exponent)이며 로그 스케일 상의 진 응력-진소성변형률(true stress-true plastic strain)의 관계에서 계산된다. Table 1에는 섬유배향과 변위 속도에 따른 K 와 n 값들을 정리하였다.

Fig. 2에는 Ramberg-Osgood 관계식으로 계산된 진응력-진변형률 선도를 0°(종방향), 45°(전단방향), 90°(횡방향) 섬유 배향과 1mm/min, 10mm/min, 100mm/min 변형 속도에 따라 나타내었다. 이러한 인장시험 결과를 유한요소 해석에 적용하고 그 결과를 평가하였다.

2.2 복합재료를 위한 LS-DYNA의 재료 모델

유한요소 상용프로그램 코드인 LS-DYNA에서는 다양한 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료에 관한 비등방성 재료 모델들을 제공하고 있다. Table 2에는 이러한 재료 모델들을 서로 비교하고 있다(LS-DYNA, 2016).

MAT24(piecewise_linear_plasticity)는 일반적으로 플라스틱에 관한 탄성-소성 영역의 특성을 잘 반영하는 재료 모델로 잘 알려져 있다. 이 모델은 변형률 속도에 따른 가공 경화(strain hardening)를 나타낼 수 있으며 응력-변형률 관계에 의한 파손(failure) 기준을 정의할 수 있다.

하지만 MAT24 재료 모델은 섬유배향을 정의할 수 없으며 Fig. 3과 같이 변형률 속도에 따라 탄성계수와 항복강도가 변하는 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 역학적 특성을 적절히 반영할 수 없다(Hubert, 2007; Dobes *et al.*, 2017).

Table 1를 살펴보면 MAT24를 제외한 모든 재료에서 섬유 배향에 대한 특성을 적용할 수 있다. 이 재료 모델 중 소성

Table 2 Anisotropic material models for composites in LS-DYNA

Material model	Elasticity	Plasticity	Strain rate	Failure	Orientation dependency
2	Anisotropic/Orthotropic	No	No	Yes	Yes
22	Orthotropic	No	No	Yes	Yes
24	Isotropic	Yes	Plasticity	Yes	No
54	Orthotropic	No	No	Yes	Yes
58	Orthotropic	No	No	Yes	Yes
103_P	Isotropic	Yes	Plasticity	Yes	Yes
108	Orthotropic	Yes	No	Yes	Yes
157	Anisotropic/Orthotropic	Yes	Plasticity	Yes	Yes
158	Orthotropic	No	Elasticity	Yes	Yes

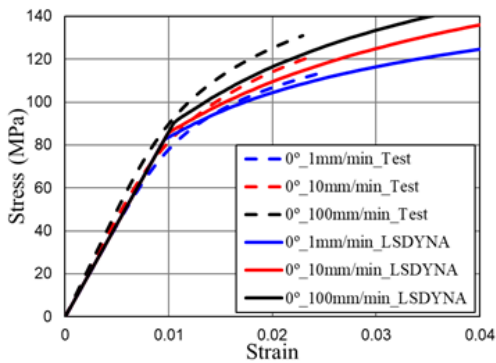


Fig. 3 Stress-strain curves concerning PBT GF30wt% and MAT24 in longitudinal direction

거동을 반영할 수 있는 모델은 MAT103_P(anisotropic plastic), MAT108(ortho_elastic_plastic) 그리고 MAT157(anisotropic_elastic_plastic)이다. 그리고 이 재료 모델 중 변형률 속도를 적용할 수 있는 모델은 MAT_108과 MAT157이다. MAT157은 비등방성 탄성 재료 모델인 MAT002(anisotropic_elastic)과 비등방성 소성 재료 모델인 MAT103_P 모델의 조합으로 이루어져 있다. MAT157은 비등방성 강성 매트릭스(anisotropic stiffness matrix), 비등방성 상수, 재료 방향과 응력-변형률 선도로 구성되어 있다. Table 3에는 LS-DYNA에서 구성하고 있는 MAT 157의 재료 카드를 나타내었다(Hatt, 2014).

Table 3 Material cards for MAT157 in LS-DYNA

Card1	MID	RO	SIGY	LCSS	QR1	CR1	QR2	CR2
Card2	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C22	C23
Card3	C24	C25	C26	C33	C34	C35	C36	C44
Card4	C45	C46	C55	C56	C66	F	G	H
Card5	L	M	N	Yes	AOPT	VP		MACF
Card6	XP	YP	ZP	A1	A2	A3		
Card7	V1	V2	V3	D1	D2	D3	BETA	IHIS

Table 3에서 비등방성 강성 매트릭스를 구성하고 있는 C_{ij} 는 탄성 강성 텐서를 의미하고 비등방성이면 총 21개 직교 이방성(orthotropic)이면 총 9개의 변수로 구성되어 있다. 식 (2)는 비등방성 상수들에 의해서 정의되는 힐 항복 기준(hill yield criteria)을 나타내고 있다.

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2}{+ 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2}} \quad (2)$$

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) \quad (3)$$

$$G = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right)$$

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right)$$

$$L = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{R_{23}^2} \right), M = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{R_{31}^2} \right), N = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{R_{12}^2} \right)$$

이 기준은 유리섬유나 탄소섬유로 이루어진 고분자 복합 재료에 폭넓게 사용되고 있다. 이 식에서 ij 는 각 방향에 따른 응력을 의미하고 있다(Korte, 2016). 하중이 작용하는 방향에 따라 실험을 통해 측정되는 상수인 F, G, H, L, M, N 은 식 (3)으로 표현되며 R_{ij} 는 방향별 항복 응력 비이다.

섬유배향을 정의하기 위해 LS-DYNA에서는 2차원 요소에 대해 element_shell_beta, 3차원 요소에 대해 element_solid_ortho를 정의하여야 한다. 이를 위해 사출해석 결과를 자체 코드(in-house code) 혹은 상용 프로그램 코드를 이용하여 섬유배향에 관한 텐서 정보를 추출하여야 한다. 응력-변형률 선도는 변형률 속도에 따른 유효 응력(effective stress)과 유효 소성변형률(effective plastic strain)로 나타낸다. 이처럼 LS-DYNA에서는 섬유 강화 플라스틱 복합재료의 변형 거동을 구현하기 위한 다양한 변수들로 구성된 재료 모델을 제시하고 있다. 그러나 이 변수들을 정의하기 위해선 광범위한 시험과 교정(calibration), 수정(correlation) 등의 작업이 필요하며 섬유배향을 정의하고 적용하는 방법에서 역시 어려움이 있다.

2.3 섬유배향을 위한 사출해석과 매핑

유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 강성에 영향을 미치는 주요한 인자인 섬유배향에 대한 사출해석을 위해 Moldflow 프로그램을 사용하였다. 사출해석에 사용한 모델은 Mortazavzian의 시험과 같은 규격인 100mm×200mm×3.0mm, 3.8mm(너비×길이×두께) 치수의 직사각형 평판 형태의 금형이다. 본 연구에서 사용한 고분자는 SABIC Innovative Plastics의 PBT이며 역학적 특성을 향상하기 위한 강화재로 0.25mm 평균길이, 10μm 평균직경 그리고 30%wt 중량비를 갖는 유리섬유가 첨가되었다. 사출해석 조건은 260℃ 사출 온도, 82℃ 금형 온도이며 보압 후 냉각시간을 30초로 하였으며 사출해석에 사용된 PBT와 유리섬유의 물성 정보는 Table 4와 같다.

Table 4 Material properties of PBT and glass fiber

	Weight fraction (%)	Young's modulus (GPa)	Density (g/cm ³)	Poisson ratio	Aspect ratio (l/d)
PBT	70	10.7	1.6	0.35	
Glass fiber	30	72	2.56	0.22	25

Moldflow는 Folgar-Tucker 배향 방정식을 사용하여 섬유 배향 모델을 정의한다. 식 (4)는 3차원 요소의 섬유배향을 계산하기 위한 Folgar-Tucker 배향 방정식이다(Linn, 2005).

$$\frac{Da_{ij}}{Dt} = -\frac{1}{2}(w_{ik}a_{kj} - a_{ik}w_{kj}) + \frac{1}{2}\lambda(\dot{\gamma}_{ik}a_{kj} + a_{ik}\dot{\gamma}_{kj} - 2a_{ijkl}\dot{\gamma}_{kl}) + 2C_i[\dot{\gamma}_{ij} - (2 + D_Z)a_{ij}] \quad (4)$$

a_{ij} 는 섬유배향 텐서(fiber orientation tensor), $1/2w_{ij}$ 는 와동 텐서(vorticity tensor), $1/2\dot{\gamma}_{ij}$ 는 변형속도 텐서(deformation rate tensor) 그리고 C_i 는 섬유 상호 작용계수(fiber interaction coefficient)이다. 이러한 방정식을 통해 Fig. 4에서는 인장시험에서 사용한 3.0mm와 3.8mm 두께에 따른 평판 시편 규격의 Moldflow 사출해석 결과를 금형의 유선 방향(yy)에 따른 섬유배향 텐서(tensor, T)의 분포로 나타내고 있다. 섬유배향 텐서는 매핑 과정에서 유리섬유의 방향을 정의하는 중요한 입력 데이터이다. 사출해석에 사용한 평판 금형의 유한요소 모델은 사면체(tetrahedron) 3차원 요소이며 3.0mm 두께 모델의 총 요소와 절점 수는 747,147개와 137,225개이고 3.8mm 두께 모델의 총 요소와 절점 수는 774,671개와 142,366개이다. 두 모델의 두께 방향 층수는 10이다.

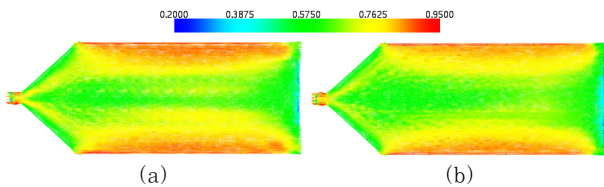


Fig. 4 Fiber orientation for PBT GF30wt% in Moldflow analysis (a) 3.0mm thickness in T_{yy} , (b) 3.8mm thickness in T_{yy}

3차원 매핑 작업은 Digimat MAP에서 수행하였으며 평판 시편의 상단으로부터 60mm 떨어진 곳에 인장시편을 위치시켜 평판 시편의 Moldflow 사출해석 결과인 섬유배향에 관한 텐서 정보를 유한요소 인장시편 모델로 Fig. 5와 같이 전달하였다. Fig. 5(a)에서는 섬유배향에 따른 인장시험 조건을 충족시키기 위해 사출이 시작되는 금형의 유선 방향을 기준으로 유한요소 인장시편 모델을 0°, 18°, 45°, 90°로 위치시켰다.

Fig. 5(b)에서는 매핑 과정의 정확성을 확인하기 위한 0°, 18°, 45°, 90° 방향에 따른 유한요소 인장시편 모델의 섬유배향 텐서를 확인하였다. 섬유배향 텐서는 1.0에 근접할수록 각 축에 수평하다.

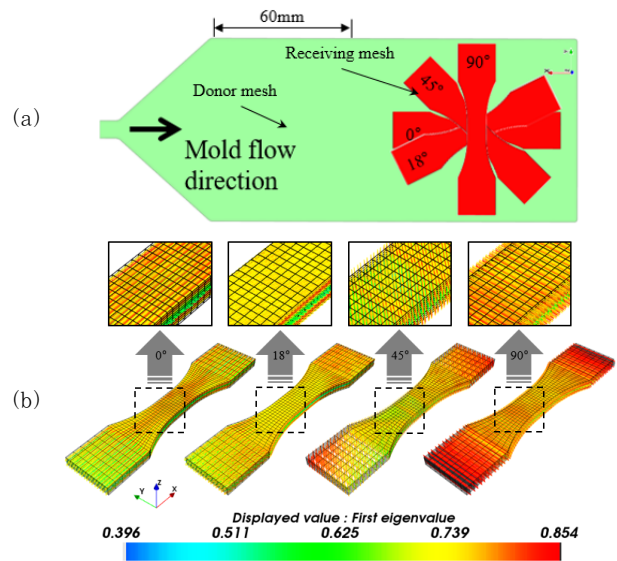


Fig. 5 Mapping process of fiber orientation (a) Defining fiber orientation in FE plate model, (b) Checking for fiber orientation in FE tensile model

2.4 복합재료를 위한 Digimat의 재료 모델

유리섬유 강화 플라스틱 복합재료는 고분자 기지재와 강화재인 유리섬유의 서로 다른 두 가지 상(phase)이 혼합되어 있는 구조적 특성이 있다. 이러한 구조적 특성을 구현하기 위해 Digimat에서는 거시적 변형률과 응력은 이를 구성하고 있는 미세 구조들의 상대적인 평균 변형률과 평균 응력으로 정의할 수 있는 평균장 균질화(mean-field homogenization) 방법을 사용하고 있다. 그래서 Digimat에서는 이 두 가지 재료를 동시에 적용한다. 유리섬유는 Table 4에서 나타낸 선형 탄성(linear elastic) 재료 모델로 정의한다. 고분자 기지재는 각각의 역학적 특성을 고려하여 Elasto-Plasticity(EP), Elasto-Visco Plasticity(EVP), ViscoElasto-Visco Plasticity(VEVP) 등과 같은 다양한 재료 모델들이 있다.

본 연구에서는 PBT GF30%wt의 변형 거동과 유사한 EP 재료 모델에 관해서 다루고자 한다. EP 재료 모델은 식 (5)와 같이 J_2 -plasticity 모델로 표현된다(Digimat, 2018). J_2 는 폰 미세스 응력(von Mises stress)를 표현하기 위한 상수이고 σ_y 는 물체의 항복강도를 의미한다.

$$f(\sigma, R) = \sqrt{J_2(\sigma)} - \sigma_y - R(p) \quad (5)$$

$$= \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij}S_{ij}} - \sigma_y - R(p) \leq 0$$

함수 $f(\sigma, R)$ 은 0에 가까워지면 폰 미세스 항복 기준에 따라 탄성 거동을 하며 0보다 작으면 $R(p)$ 에 의해서 비선형 소성

거동을 한다.

$$R(p) = kp + R_{\infty} [1 - \exp(-mp)] \quad (6)$$

$R(p)$ 는 경화 응력(hardening stress)이고 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. k 는 선형경화율(linear hardening modulus), R_{∞} 은 경화율(hardening modulus), m 은 경화 지수(hardening exponent)이다. p 는 시간에 따라 누적된 소성 변형률(\dot{p})이다.

이처럼 EP 재료 모델은 탄성 영역을 정의하기 위한 변수인 탄성계수, 포아송비(poisson's ratio)로 이루어진 구성방정식(constitutive equation)과 항복강도 그리고 소성 영역을 정의하기 위한 변수인 선형경화율, 경화율과 경화 지수로 구성된 경화 응력으로 정의한다. 이러한 재료 모델의 변수들을 Digimat에서는 인장시험의 응력-변형률 선도와 서로 반복적으로 비교하는 작업인 역설계(reverse engineering) 과정을 거쳐 섬유배향에 대한 변수들의 최적화된 값을 도출한다. 역설계를 통한 최적화 방법은 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료를 위한 LS-DYNA의 재료 모델을 구성하는 강성 매트릭스의 변수들과 힐 항복 기준의 변수들을 정의하기 위한 엔지니어의 노력과 시간 그리고 큰 비용을 줄일 수 있다.

탄소섬유로 구성된 복합재료와 같이 소성 영역이 없는 취성 거동을 하는 복합재료 해석에서는 일반적으로 응력 기반의 파손지표를 사용한다. 하지만 섬유배향에 따라 뚜렷한 소성 거동을 확인할 수 있는 유리섬유가 포함된 고분자 복합재료 해석에서는 응력 기반의 파손지표를 사용할 경우 재료가 충분히 최대 변형률에 도달하지 못한 채 파손이 발생하는 경우가 있다. 그래서 본 연구에서는 식 (7)에 나타난 변형률 기반의 Tsai-Hill 3D 횡등방성(transversely isotropic) 모델을 이용하여 파손지표(failure indicator)를 정의하였다.

$$f_a = \sqrt{F_A(\epsilon)} \quad (7)$$

$$F_A(\epsilon) = \frac{\epsilon_{11}^2}{X^2} - \frac{\epsilon_{11}^2(\epsilon_{22} + \epsilon_{33})}{X^2} - \frac{\epsilon_{22}^2 + \epsilon_{33}^2}{Y^2} + \left(\frac{1}{X^2} - \frac{2}{Y^2}\right)\epsilon_{22}\epsilon_{33} + \frac{(2\epsilon_{12})^2 + (2\epsilon_{13})^2}{S^2} + \left(\frac{1}{Y^2} - \frac{1}{4X^2}\right)(2\epsilon_{23})^2$$

파손지표는 작용하는 하중 방향에 따라 정의하며 그 값이 1을 초과하면 파손이 발생한다. X 는 종방향(longitudinal direction)의 최대 변형률, Y 는 횡방향(transverse direction)의 최대 변형률이며 S 는 최대 전단변형률을 나타낸다. ϵ_{ij} 는 각 방향에 대한 종방향과 횡방향의 변형률을 의미한다. 파손지표의 변수는 종방향, 횡방향 그리고 전단방향에 대한

최대 변형률이며 재료 모델의 변수들을 찾는 방법과 같이 정의한다. 이러한 파손지표는 각 절점을 기준으로 섬유배향의 평균을 계산하여 동일한 방향 텐서를 갖게 되는 미세 구조에 적용된다(Digmat, 2018).

2.5 연성해석 결과

본 연구에서의 연성해석 과정은 Moldflow를 사용한 사출해석을 통해 섬유배향 텐서를 계산하여 이를 Digimat MAP를 활용한 매핑 과정을 거쳐 섬유배향에 따른 텐서 정보를 유한요소 모델에 전달하였다. 유리섬유를 함유한 고분자 복합재료의 섬유배향에 따른 인장 특성을 구현하기 위해 Digimat의 다양한 재료 모델 중 EP 재료 모델을 선정하였으며 이를 구성하고 있는 변수들은 역설계 과정을 통해 최적화된 값을 도출하였다. 이러한 방법으로 정의된 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 재료 물성은 하나의 데이터베이스(data base)로 관리되어 손쉽게 사용할 수 있다. 또한 변형률 속도에 대한 유한요소 인장시험의 거동을 해석하기 위해 LS-DYNA는 Digimat의 재료 모델과 섬유배향을 고려한 연성해석에 활용되었다.

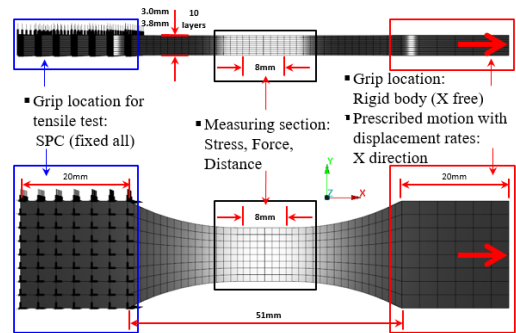


Fig. 6 FEM model of the tensile specimen and boundary condition

연성해석에 사용한 LS-DYNA의 유한요소 인장시험 모델은 Fig. 6에 나타내었다. 이 모델은 충분한 적분점(fully integration)의 LS-DYNA 요소 방정식(element formulation, -1)을 갖는 육면체(hexahedron)의 3차원 요소들로 구성되어 있다. 요소의 크기는 지그(jig)로 고정되는 부분은 2.5mm, 그 외 변형이 발생하는 부분은 1.25mm로 구분하였다. 3.0mm, 3.8mm 두께 모델의 총 요소와 절점 수는 4,160개와 5,248개로 동일하며 두께 방향의 층수는 사출해석 모델과 같은 10이다.

본 해석의 경계 조건(boundary condition)은 Fig. 6에서와 같이 지그가 고정되는 왼쪽 부분(파란색 사각형)의 모든 절점의 변위와 회전 자유도를 고정하였다. 지그가 고정되는 오른쪽

쪽 부분(빨간색 사각형)의 모든 절점을 강체요소(rigid body element)로 구속하여 X 방향의 변위에 관한 자유도를 제외한 모든 자유도를 고정하였다. 그리고 강체요소의 무게 중심점(center of gravity)에 변위 속도를 적용하여 연성해석을 수행하였다.

Fig. 7은 LS-DYNA와 Digimat의 연성해석에 사용된 3.8mm 두께의 유한요소 인장시편 모델의 해석 결과를 변위 속도에 따라 나타내고 있다. Fig. 7(a)에서는 소성변형을 분포를 통해 종방향의 섬유배향은 다른 두 방향보다 더 넓은 영역에서 하중을 지지하고 있으며 단면에서 일정하게 파손이 발생하지 않는다. 전단방향의 섬유배향에 관한 소성변형을 분포는 다른 두 방향 보다 섬유배향의 정도를 명확히 확인할 수 있다. 횡방향의 섬유배향은 데이터를 측정하는 시편의 중앙부에 소성변형을 분포가 집중되어 단면 전체에서 일정하게 파손이 발생한다. 또한 변위 속도가 증가함에 따라 섬유배향에 따른 영향도 같이 증가하여 소성변형률은 더 국부적인 영역에서 발생하고 있다.

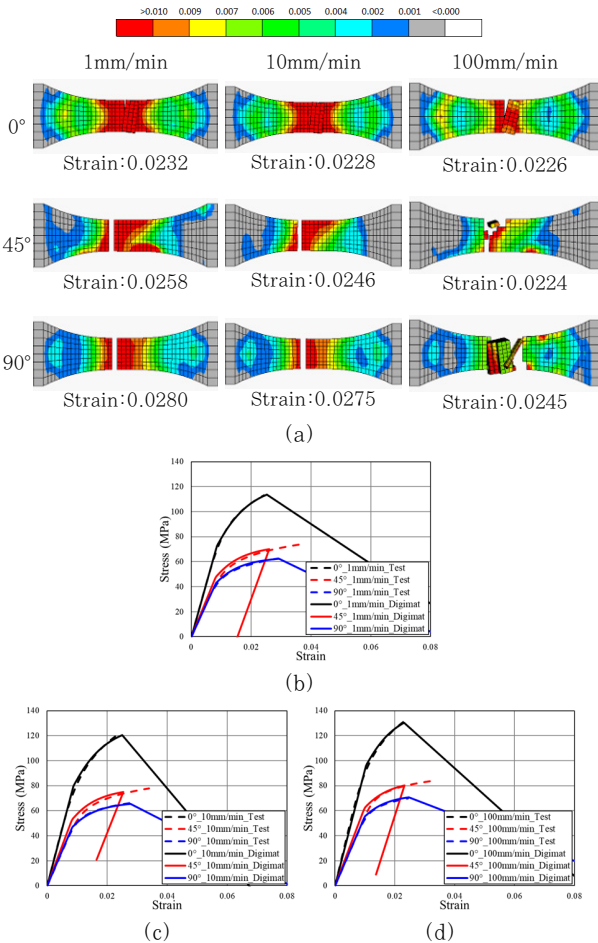


Fig. 7 Tensile behaviors with the failure indicator of Digimat (a) Tensile behaviors at the failure, (b) 1mm/min displacement rate, (c) 10mm/min displacement rate, (d) 100mm/min displacement rate

Fig. 7(b)~(d)에서는 섬유배향과 변위 속도에 관한 응력-변형률 선도는 종방향과 횡방향의 연성해석과 인장시험이 상당히 유사함을 확인할 수 있다. 하지만 종방향과 횡방향의 섬유배향 변형률이 주요한 인자로 작용하는 변형률 기반의 Tsai-Hill 3D 횡등방성 파손모델의 전단방향 연성해석은 인장시험보다 먼저 파손되고 있다.

Fig. 8은 3.0mm 시편 두께와 3.8mm 시편 두께의 18° 섬유배향의 1mm/min 변위 속도의 연성해석 결과이다. Fig. 8(a), (b)에서는 소성변형을 분포를 통해 줄어든 시편의 두께 변화로 종방향의 섬유배향은 기존 모델보다 단면의 파손 정도가 더욱 크게 발생하고 있다. 그러나 횡방향의 섬유배향은 기존 모델과 같이 단면 전체에서 일정하게 파손이 발생한다. 18° 섬유배향은 기존 전단방향의 해석과 동일하게 섬유배향의 정도를 명확히 확인할 수 있으나 파손이 시편의 모서리에서 발생하고 있어 단면에서 일정하게 파손이 발생하지 않고 있다.

Fig. 8(c), (d)에서는 응력-변형률 선도에 관한 세 가지 연성해석 결과 역시 기존 종방향과 횡방향의 경우와 같이 인장시험과 상당한 상관관계를 보인다. 특히 18° 섬유배향에 대한 연성해석을 통해 섬유배향의 파손변형률이 종방향과 횡방향 섬유배향의 파손변형률 안에 존재할 경우 본 연구에서 사용한 파손지표는 상당히 효과적임을 확인할 수 있다.

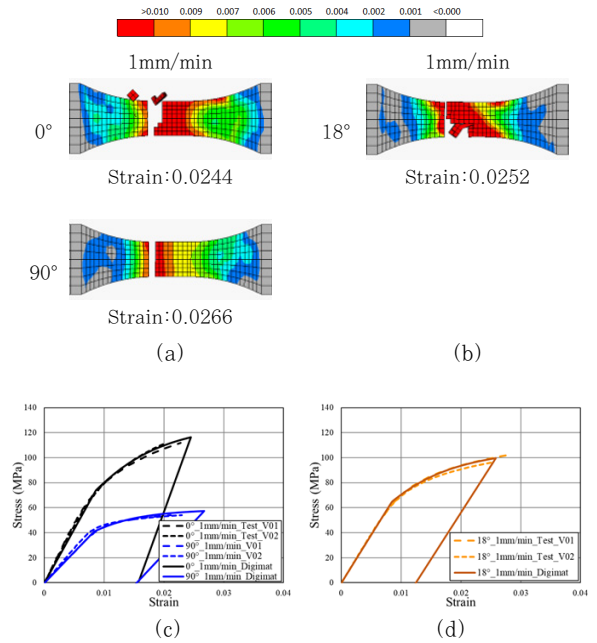


Fig. 8 Tensile behaviors in 3.0mm of thickness, 18° and 3.8mm of thickness with the failure indicator of Digimat (a) Tensile behaviors in 3.0mm of thickness at the failure, (b) Tensile behaviors in 18° and 3.8mm of thickness at the failure, (c) 1mm/min displacement rate in 3.0mm of thickness, (d) 1mm/min displacement rate in 18°, 3.8mm of thickness

3. 결 론

본 연구에서 다양한 분야의 제품 개발에 사용되고 있는 유한 요소법을 활용하여 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 역학적 특성을 구현하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연비 향상과 환경 문제로 인한 부품 경량화가 요구되는 자동차 산업에서 사용빈도가 늘어나고 있는 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 인장 특성은 섬유배향과 변형률 속도에 의해 정의할 수 있으며 이에 따른 복합재료는 비등방성 거동을 하였다.
- 2) 대표적인 유한요소 사용프로그램인 LS-DYNA에서는 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 비등방성 거동을 구현하기 위해 다양한 변수들로 구성된 재료 모델을 제시하고 있으나 강성 매트릭스와 힐 항복 기준 등을 구성하는 변수들을 정의하기 위한 엔지니어의 노력과 시간 그리고 큰 비용이 필요하였다. 또한 섬유배향을 정의하고 적용하는 방법에서도 어려움이 있었다.
- 3) 다양한 복합재료를 위한 선형, 비선형 다중스케일 재료 모델링 프로그램인 Digimat은 평균장 균질화 방법을 통해 다양한 재료 모델로 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 구조적 특성인 기지재와 강화재의 서로 다른 두 가지 상을 결합할 수 있었다. Digimat MAP를 사용해 사출해석 결과의 섬유배향 텐서를 쉽게 유한요소 모델에 매핑할 수 있었으며 파손지표는 각 절점을 기준으로 섬유배향의 평균을 계산하여 동일한 방향 텐서를 갖게 되는 미세 구조에 적용하여 거시 구조의 등가 물성을 예측하였다.
- 4) LS-DYNA와 Digimat의 연성해석은 소성변형률 분포를 통해 섬유배향의 영향을 확인할 수 있었으며 변위 속도가 증가함에 따라 섬유배향에 따른 영향도 같이 증가하여 소성변형률은 더 국부적인 영역에서 발생하고 있었다.
- 5) 섬유배향, 변위 속도 그리고 시편 두께에 관한 응력-변형률 선도의 인장시험과 연성해석 결과는 상당한 상관관계를 보였으며 18° 섬유배향의 해석 결과와 같이 파손 변형률이 종방향과 횡방향 섬유배향의 파손변형률 안에 존재할 경우 변형률 기반의 Tsai-Hill 3D 횡등방성 파손 모델은 효과적으로 작용하였다.

References

Bernasconi, A., Cosmi, F. (2008) Local Anisotropy Analysis of Injection Moulded Fibre Reinforced

Polymer Composites, *Compos. Sci. Technol.*, 68, pp.2574~2581.

Brunbaer, J., Mosenbacher, A. (2014) Fundamental Influences on Quasistatic and Cyclic Material Behavior of Short Glass Fiber Reinforced Polyamide Illustrated on Microscopic Scale, *J. Appli. Polym. Sci.*, 131(19).

De Monte, M., Moosbrugger, E. (2010) Influence of Temperature and Thickness on the Off-axis Behaviour of Short Glass Fibre Reinforced Polyamide 6.6-Quasi-static Loading, *Compos. Part A: Appl. Sci. & Manuf.*, 41(7), pp.859~871.

Digmat (2018) *User's Manual*, Ex-stream Engineering, pp.259~457.

Dobes, M., Navratil, J. (2017) Computational Material Models for TSCP Plastics Comparison of the Deformation behavior with *MAT_24 and *MAT_SAMP-1 with DIEM, *11th European LS-DYNA Conference*.

Esmaillelou, B., Ferreira, P. (2012) Fatigue Behavior of Polyamide 66/Glass Fiber under Various Kinds of Applied Load, *Polymer Compos.*, 33(4), pp.540~547.

Güllü, A., Özdemir, A. (2006) Experimental Investigation of the Effect of Glass Fibers on the Mechanical Properties of Polypropylene(PP) and Polyamide 6(PA6) Plastics, *Mater. & Des.*, 27(4), pp.316~323.

Hatt, A. (2014) Anisotropic Modeling of Short Fibers Reinforced Thermoplastics Material with LS-DYNA, *13th LS-DYNA German Forum, Bamberg*.

Hubert, L. (2007) Methodology for Selection of Material Material for Plastics Impact Simulation, *6th European LS-DYNA Conference*.

Kamaya, M. (2016) Ramberge Osgood Type Stresse Strain Curve Estimation using Yield and Ultimate Strengths for Failure Assessments, *Int. J. Press. Vessel. & Pip.*, 137, pp.1~12.

Kim, Y.J., Huh, N.S. (2004) On Relevant Ramberg-Osgood Fit to Engineering Nonlinear Fracture Mechanics Analysis, *J. Press. Vessel. Technol.*, 126(3), pp.277~283.

Korte, W., Pazour, S. (2016) Potential of MAT15 7 for Short Fiber-reinforced Injection Molded Plastic Components, *LS-DYNA Forum*.

Linn, J. (2005) The Folgar-Tucker Model as a Differential Algebraic System for Fiber Orientation Calculation, *ITWM*, 75, pp.2~4.

- LS-DYNA** (2016) *R9.0 KEYWORD USER'S MANUAL-Material Models*, LSTC, 2-79~2-807.
- Mortazavian, S.** (2015) Fatigue Behavior and Modeling of Short Fiber Reinforced Polymer Composites, Eng.D., University of Toledo, p.409.
- Mortazavian, S., Fatemi, A.** (2017) Tensile behavior and Modeling of Short Fiber-reinforced Polymer Composites including Temperature and Strain Rate Effects, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 30(10), pp.1414~1437.
- Park, J.M., Kim, H.D.** (2015) Properties of Randomly Oriented Chopped E-glass Reinforced Unsaturated Polyester based Resin Composite, *Korean Soc. Dyers & Finish.*, 9, pp.165~174.
- Pierantoni, M., De Monte, M.** (2011) Viscoelastic Material behaviour of PBT-GF30 under Thermo-Mechanical Cyclic Loading, *Proced. Eng.*, 10, pp.2141~2146.
- Schaaf, A., De Monte, M.** (2014) Life Estimation Methodology for Short Fiber Reinforced Polymers under Thermo-Mechanical Loading in Automotive Applications, *Mater. Sci. & Eng. Technol.*, 46(2), pp.214~228.
- Tanaka, K., Kitano, T.** (2014) Effect of Fiber Orientation on Fatigue Crack Propagation in Short-fiber Reinforced Plastics, *Eng. Fract. Mech.*, 123, pp.44~58.
- Thomason, J.L.** (1996) The Influence of Fibre Length and Concentration on the Properties of Glass Fibre Reinforced Polypropylene, *Compos. Part A: Appl. Sci. & Manuf.*, 27(6), pp.447~484.
- Thomason, J.L.** (1999) The Influence of Fibre Properties of the Performance of Glass Fibre Reinforced Polyamide 6,6, *Compos. Sci. Technol.*, 59, pp.2315~2328.
- Thomason, J.L.** (2006) Structure-Property Relationships in Glass-reinforced Polyamide, Part 1: The Effects of Fiber Content, *Polym. Compos.*, 27, pp.552~562.
- Wang, Z., Zhou, Y.** (2002) Effects of Temperature and Strain Rate on the Tensile behavior of Short Fiber Reinforced Polyamide-6, *Polym. Compos.*, 23(5), pp.858~871.
- Zhou, Y., Mallick, P.K.** (2005) A Non-linear Damage Model for the Tensile behavior of an Injection Molded Short E-glass Fiber Reinforced Polyamide-6,6, *Mater. Sci. & Eng.: A*, 393(1), pp.303~309.

요 지

유한요소법(finite element method)은 다양한 분야에서 재료의 역학적 거동을 더욱더 현실적으로 해석하고 예측하는 방법으로 다양한 분야의 제품 개발에 적용되고 있다. 하지만 섬유배향과 변형률 속도가 역학적 특성에 영향을 미치는 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료에 관한 수치해석을 이용한 접근 방법은 현재까지 다소 어려움이 있다. 본 연구의 목적은 고분자, 고무, 금속 등과 같은 다양한 복합재료를 위한 선형, 비선형 다중스케일 재료 모델링 프로그램인 Digimat의 수치해석 재료 모델을 활용하여 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 역학적 특성을 정의하고 검증하는 것에 있다. 또한 이를 통해 좀더 현실적으로 고분자 복합재료의 거동을 예측하고자 한다. 이를 위해 다양한 고분자 중 30wt%의 단섬유 질량 비율을 갖는 폴리부틸렌 테레프탈레이트(polybutylene terephthalate, PBT)의 섬유배향과 변형률 속도에 따른 인장 특성을 참고문헌을 통해 조사하였다. 또한 Moldflow 프로그램을 사용한 사출해석을 통해 유리섬유 배향 정보를 계산하였으며 이를 매핑(mapping) 과정을 통해 유한요소 인장 시편 모델에 전달하였다. 대표적인 유한요소 상용 프로그램 중 하나인 LS-DYNA는 유리섬유 배향과 변형률 속도에 따른 복합재료의 인장 특성을 연구하기 위해 Digimat과의 연성해석(coupled analysis)에 활용되었다. 그리고 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료를 해석하기 위한 LS-DYNA의 다양한 비등방성(anisotropic) 재료 모델들의 장단점을 서로 비교하고 평가하였다.

핵심용어 : 유리섬유 강화 플라스틱, 복합재료, 섬유배향, 변형률 속도, 연성해석, digimat