

선형과 비선형 다중 스케일 재료 모델링을 활용한 유리섬유 강화 플라스틱의 피로해석 연구

김 영 만¹·김 용 환^{2†}

¹충남대학교 기계공학부 박사과정, ²충남대학교 기계공학부 교수

A Study on the Fatigue Analysis of Glass Fiber Reinforced Plastics with Linear and Nonlinear Multi-Scale Material Modeling

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

The fatigue characteristics of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composites were studied under repeated loads using the finite element method (FEM). To realize the material characteristics of GFRP composites, Digimat, a mean-field homogenization tool, was employed. Additionally, the micro-structures and material models of GFRP composites were defined with it to predict the fatigue behavior of composites more realistically. Specifically, the fatigue characteristics of polybutylene terephthalate with short fiber fractions of 30wt% were investigated with respect to fiber orientation, stress ratio, and thickness. The injection analysis was conducted using Moldflow software to obtain the information on fiber orientations. It was mapped over FEM concerned with fatigue specimens. LS-DYNA, a typical finite element commercial software, was used in the coupled analysis of Digimat to calculate the stress amplitude of composites. FEMFAT software consisting of various numerical material models was used to predict the fatigue life. The results of coupled analysis of linear and nonlinear material models of Digimat were analyzed to identify the fatigue characteristics of GFRP composites using FEMFAT. Neuber's rule was applied to the linear material model to analyze the fatigue behavior in LCF regimen. Additionally, to evaluate the morphological and mechanical structure of GFRP composites, the coupled and fatigue analysis were conducted in terms of thickness.

Keywords : GFRP, fiber orientation, mean-field homogenization, fatigue life, coupled analysis, LCF

1. 서론

사출성형으로 제작되는 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료는 다양한 응용 분야에 적용할 수 있는 충분한 강도, 강성 그리고 내부식성 갖고 있으며, 복잡한 형상의 제품 제작에 쉽게 적용할 수 있다. 또한 적은 비용과 높은 생산율은 신제품의 개발 주기를 가장 효과적으로 줄일 수 있다. 특히, 자동차 산업에서 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료는 비용의 효율성과 쉬운 대량 생산의 이점으로 자동차 내·외장 부품들에 광범위하게 사용되고 있다. 이러한 이유로 이와 관련된 산업은 빠르게

꾸준한 성장을 하고 있다(Brunbauer and Mosenbacher, 2014; Park and Kim, 2015). 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료는 기지재(matrix)로 열가소성(Thermoplastic), 열경화성(Thermoset) 고분자와 강화재(reinforcement)로 단, 장 유리섬유를 사용한다. 열가소성과 열경화성 고분자를 나누는 주요한 특징은 분자 간의 결합 방식의 차이에 있다. 전자의 경우 화학적인 결합없이 분자 간에 작용하는 인력(intermolecular forces)에 의해 결합하여 2차 성형할 수 있으며 높은 충격강도, 연성 그리고 짧은 제작 시간의 장점이 있다. 후자의 경우 분자 간 화학적인 교차결합(cross-linking)으로 인해 2차 성형할 수 없으며, 높은 내열

[†]Corresponding author:

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

Received November 10 2019; Revised January 17 2020;

Accepted January 18 2020

© 2020 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.

성과 화학적 저항성의 장점이 있다. 하지만 긴 제작 시간과 낮은 연성은 단점이다(Mallick, 1993). 강화재로 사용되는 단, 유리섬유는 불연속적이며 주로 1mm이하의 단 섬유와 2cm이상의 장 섬유를 강화재로 사용한다(Biron, 2013). 주요한 역학적 특성 중 하나인 피로(fatigue)는 반복 하중(cycle loading)에 의해 국부적으로 구조적 결함(structural damage)을 발생시킨다. 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 피로 거동에는 미세 구조, 하중 조건 및 환경과 관련된 다양한 조건의 영향을 받는다. 특히 사출성형 과정에서 발생하는 섬유배향(fiber orientation)은 미세 구조를 형성한다. PA6 GF30을 이용한 피로시험에서 금형의 유선 방향(mold flow direction)에 평행한 섬유배향(0°)은 수직인 섬유배향(90°)보다 높은 피로강도(fatigue strength)를 나타내었다(Bernasconi *et al.*, 2007).

이러한 제작 과정을 통해 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료는 두께 방향으로 스킨-셸-코어(skin-shell-core)의 형태학적(morphologic) 구조를 형성하게 된다. 스킨 영역의 섬유는 표면에 아주 얇게 존재하며 고온으로 사출된 재료가 차가운 금형 표면과 만나면서 아무런 방향성없이 배열된다. 셸 영역에서의 섬유는 금형의 유선 방향에 대해 정 배열되며 코어 영역에서의 섬유는 금형의 유선 방향에 대해 횡 방향으로 배열된다(Bernasconi *et al.*, 2007; Bernasconi and Cosmi, 2008; De Monte and Moosbrugger, 2010; Rolland *et al.*, 2016). 미세 구조에 영향을 미치는 또 다른 인자는 체적과 질량 비율에 따른 유리섬유 함량, 섬유 지름과 길이에 따른 기하학적 형상비(aspect ratio)이다. 단보론(short boron) 섬유를 활용한 복합재료의 피로시험에서 피로강도는 섬유의 길이와 형상비가 증가함에 따라 일정하게 증가하여 약 200 형상비 이후부터는 완만하게 거동하였다(Lavengood and Gulbransen, 1969). 그리고 섬유 길이의 영향에 의한 피로 거동은 높은 응력 진폭에 의해 시편에 파손이 발생하는 LCF(Low Cycle Fatigue) 영역에서 주로 작용하였다(Grove and Kim, 1995).

본 연구를 통해 다양한 분야에서 재료의 역학적 거동을 해석하고 예측하는 유한요소법(Finite Element Method, FEM)을 활용하여 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 피로 특성을 분석하고자 한다. 이를 구현하기 위해 평균장 균질화(mean-field homogenization) 이론을 활용하여 고분자, 고무, 금속 등과 같은 다양한 복합재료를 위한 선형, 비선형 다중 스케일 재료 모델링 프로그램인 Digimat을 이용하였다. 이를 통해 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 미세 구조와 재료 모델을 정의하여 더욱 현실적으로 고분자 복합재료의 피로 거동을 예측하고자 한다. 참고문헌을 통해 시험 온도, 섬유배향, 응력비, 시편 두께 등 다양한 변수들을 사용하여 30wt%의 단섬유 질량 비율을 갖는 폴리부틸렌 테레프탈레이트(polybutylene terephthalate, PBT)의 고분자 복합재료의 피로 특성을 조사하

였다(Mortazavian and Fatemi, 2015). 섬유배향 정보를 계산하기 위한 사출해석은 Moldflow 소프트웨어를 활용하였으며, 이를 유한요소 피로시편 모델에 매핑하였다. 대표적인 유한요소 상용 소프트웨어인 LS-DYNA는 섬유배향에 따른 고분자 복합재료의 응력 진폭(stress amplitude)을 계산하기 위해 Digimat과의 연성해석(coupled analysis)에 활용하였다. 연성해석에 적용된 Digimat의 재료 모델은 섬유배향에 따른 비등방성을 구현하기 위해 선형 모델의 Linear Elasticity(LE)과 비선형 모델의 Elasto-Plasticity(EP)를 사용하였다. 그리고 수치해석을 활용한 피로수명(fatigue life) 해석을 위해 다양한 재료 모델들로 구성되어 있는 FEMFAT 소프트웨어를 사용하였다. 평균응력, 상대적 응력 구배, 섬유배향에 따른 재료의 거동 등은 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 피로 특성에 영향을 미치는 주요한 인자들이다. 이러한 인자들은 피로강도와 피로수명에 직접적인 영향을 미치게 하여 재료의 국부적인 부분에서 S-N (Stress-Life) 선도를 보정하게 된다. 선형 재료 모델의 연성해석 결과는 높은 응력 진폭에 의한 재료의 국부적 비선형이 발생하는 LCF 영역의 피로 특성을 연구하기 위해 Neuber 법칙을 사용하여 재료의 피로 거동을 분석하였다. 또한 비선형 재료 모델의 연성해석 결과 역시 FEMFAT을 활용한 피로수명 해석에 사용되었다. 연성해석과 피로해석의 결과는 섬유배향에 따라 유한요소 시편의 두께방향으로 분석하여 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 형태학적, 역학적 구조에 대해서 평가하였다.

2. 본 론

2.1 PBT GF30wt%의 피로 특성

GF30wt% 단 섬유(short glass fiber)를 포함하고 있는 PBT를 활용하여 Mortazavian은 반복 하중에 따른 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 피로시험을 수행하였다(Mortazavian and Fatemi, 2015).

이 시험에서는 -40°C, 23°C, 125°C 온도, R=-1, 0.1, 0.3 응력비, 0°, 18°, 45°, 90° 섬유배향의 다양한 변수들을 사용하였으며 $10^3 \sim 10^6$ 파손수명(cycles to failure)의 범위에서 피로시험을 수행하였다. 또한 PBT GF30wt%의 피로 특성을 S-N 선도와 같은 다양한 수학적 관계식을 통하여 나타내었다. 시험에 사용된 사출 금형의 규격은 100mm×200mm×3.8mm(너비×길이×두께) 치수의 직사각형 평판이며, 3.0mm 두께를 포함하여 두께 변화에 따른 고분자 복합재료의 피로 특성에 대하여 평가하였다. 피로시편은 섬유배향을 충분히 고려하고자 사출 금형 상판 60mm부터 제작에 사용되었다. 본 연구에서는 다양한 변수 중 23°C 상온에서 R=-1 응력비와 0°, 18°, 45°, 90° 섬유배향

과 3.8mm 시편 두께에 대해서 수치해석을 통해 검증하였다. 피로시험에서 사용하는 반복 응력(cyclic stress)에 관한 정의와 관계식은 Fig. 1에 나타냈었다.

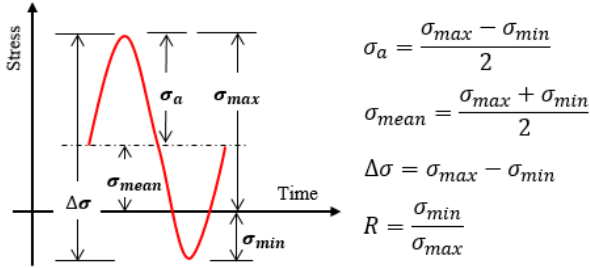


Fig. 1 Stress cycles in fatigue

σ_a 는 응력 진폭(stress amplitude), σ_{mean} 은 평균 응력(mean stress), $\Delta\sigma$ 는 응력 범위(stress range) 그리고 R은 응력비(stress ratio)이다.

응력 진폭(stress amplitude, σ_a)과 변형률 진폭(strain amplitude, ϵ_a)에 의한 이력 곡선(hysteresis loop)은 재료의 반복 하중(cyclic load)에 따른 피로 거동을 반복 응력-변형률(cyclic stress-strain) 선도로 나타낼 수 있다. 이를 Ramberg-Osgood 관계식이라 하며, 식 (2)와 같이 수학적으로 나타낼 수 있다(Ramberg and Osgood, 1943; Marohni *et al.*, 2015).

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_a}{E'} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{1/n'} \quad (1)$$

ϵ_a 는 변형률 진폭(strain amplitude), E' 은 반복 탄성계수(cyclic elastic modulus), K' 은 반복 강도 계수(cyclic strength coefficient) 그리고 n' 은 반복 가공 경화 지수(cyclic strain hardening exponent)를 나타낸다.

Table 1에는 섬유배향에 따른 R=-1 응력비 조건에서 반복 하중에 의한 이력 곡선을 나타내는 Ramberg-Osgood 관계식의 상수들을 나타내고 있다,

상온에서 0°, 90° 섬유배향에 대한 인장시험의 진 응력-변

Table 1 E', K', n' of cyclic deformation tests

Flow direction (°)	0	90
E' (MPa)	9,050	6,061
K' (MPa)	196.1	57.8
n'	0.190	0.061
0.2% σ_y' (MPa)	59	39.5
σ_u' (MPa)	84	45.5
Failure strain (%)	2.42	3.02

형율 선도와 R=-1 응력비의 이력 곡선에 의한 반복 응력-변형율 선도를 Fig. 2에 비교하였다. 두 섬유배향으로 반복 연화(cyclic softening)를 확인할 수 있다. 이러한 현상은 대부분의 고분자 재료에서 발생하며 연화의 정도는 분자 구조, 온도, 시간 등에 따라 달라진다(Cahn *et al.*, 1996).

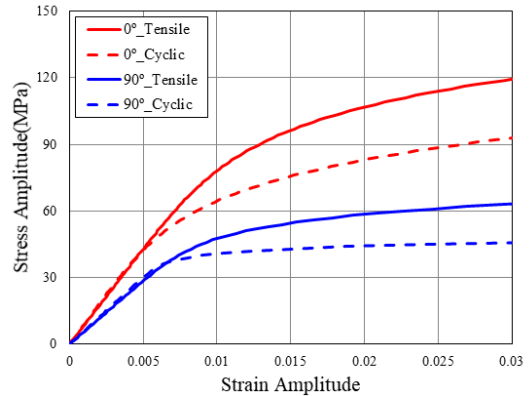


Fig. 2 Cyclic and tensile stress-strain curves

PBT GF30wt%의 피로 거동은 식 (2)에 있는 Basquin 관계식을 사용하여 S-N(Stress-Life) 선도로 나타내었다.

$$\sigma_a = A(N_f)^B \quad (2)$$

σ_a 는 응력 진폭, N_f 는 파손수명, A는 $N_f=1$ 의 y 절편, B는 S-N 선도의 기울기를 의미한다.

Table 2에는 R=-1 응력비 조건에서 PBT GF30wt%의 피로 시험 결과에 대한 S-N 선도를 구성하는 변수들을 나타내고 있다. Fig. 3은 R=-1 응력비 조건에서 PBT GF30wt%의 피로 특성을 S-N 선도로 나타내고 있다. 이를 통해 섬유배향은 유리섬유 강화플라스틱 복합재료의 피로 거동에 크게 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 10^6 사이클에서의 피로강도는 45° 섬유배향 이후부터 급격히 하락하고 있으며, 금형의 유선 방향에 평행한 0° 섬유배향이 금형의 유선 방향에 수직하는 90° 섬유배향 보다 약 34% 높게 나타나고 있다.

Table 2 Results of fatigue tests for PBT GF30wt%

Flow direction (°)	Stress Ratio (R)	Fatigue Strength Intercept(A) (MPa)	Fatigue Strength Slope(B)	Fatigue Strength (MPa) @ 10^6 cycles
0	-1	96.3	-0.072	35.5
18	-1	90.5	-0.074	32.6
45	-1	69.3	-0.077	23.9
90	-1	67.2	-0.078	22.9

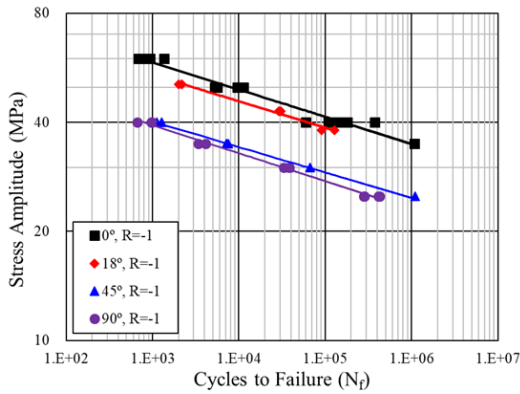


Fig. 3 Effect of fiber orientation under $R=-1$ for PBT GF30wt%

2.2 평균장 균질화 이론

2.2.1 이론적 배경

기존 유한요소해석 소프트웨어의 제한된 요소 방정식과 재료 모델의 한계는 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료 구조물에 관한 선형, 비선형 해석의 정확성 향상에 어려움이 있다. 기지재와 강화재의 서로 다른 두 가지 상(phase)의 결합은 고분자 복합재료의 구조적 특성이며 사출성형으로 인한 유리섬유의 배향은 재료의 미세 구조와 거동에 영향을 미쳐 다양한 역학적 특성을 나타낸다.

평균장 균질화(mean-field homogenization)는 이러한 고분자 복합재료의 특성을 역학적으로 설명하기 위한 효과적인 방법이다. 이는 RVE(Representative Volume Element)의 거시적 변형률, 응력은 RVE를 구성하고 있는 미세 구조들의 상대적인 평균 변형률, 응력과 상관관계를 갖고 있음을 의미한다. 미세 구조를 정의하기 위해 Digimat에서는 수도-그레인(pseudo-grain) 개념을 사용하고 있다.

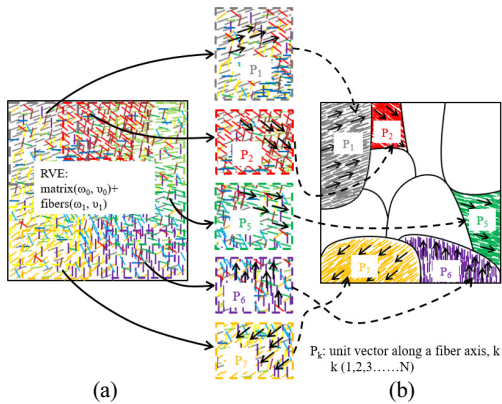


Fig. 4 Definition of pseudo-grain concept

Fig. 4(a)와 같이 RVE는 무작위로 분산된 섬유의 집합들을 포함하는 도메인 ω_0 와 체적비 ν_0 를 갖는 기지재로 구성되어

있으며, 강화재인 섬유의 집합들은 동일한 물성, 종횡비 그리고 섬유 이산 배향 P_k 에 따른 섬유 분포 함수 $\phi_i(P_k)$ 로 정의한다. Fig. 4(b)에서는 첫 번째 균질화를 목적으로 극소범위 (microdomain)를 수치상으로 단일 도메인 $\omega_0 P_k$ 으로 정의한다. 여기서, $\omega_0 P_k$ 를 수도-그레인이라 하며, 체적비 ν_0 를 갖는 기지재와 동일한 재료, 종횡비 그리고 섬유배향(P_k) 특성을 갖는 강화재인 섬유를 포함하고 있다(Kammouna *et al.*, 2015).

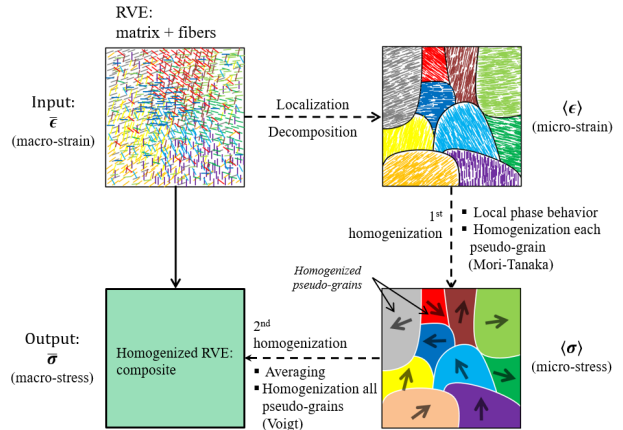


Fig. 5 Two-step mean-field homogenization of a two-phase composite containing the matrix and glass fiber

Fig. 5는 평균장 균질화의 2단계 순서를 설명하고 있다. 첫 번째 균질화는 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 섬유 분포를 정의하기 위해 동일한 섬유의 특성(재료, 종횡비, 섬유배향)을 갖는 수도-그레인 수준으로 분해하여 정의한다. 이러한 과정은 거시적 변형률 텐서(strain tensor)를 각 수도-그레인에 국부적으로 적용하여 미시적 응력 텐서(stress tensor)를 계산한다. 두 번째 균질화는 거시적인 재료의 특성을 구현하기 위해 전체 수도-그레인에 적용되며 각 수도-그레인의 평균 응력 텐서를 계산하여 RVE의 거시적 거동을 예측할 수 있다(Adam *et al.*, 2008; Kammouna *et al.*, 2011; Krairi *et al.*, 2016).

2.2.2 두 가지 상(phase)으로 구성된 복합재료의 균질화 도메인 ω 와 체적 V RVE는 도메인 ω_0 와 체적 V_0 기지재와 도메인 ω_1 와 체적 V_1 강화재로 서로 다른 두 가지 상(phase)으로 복합재료를 구성한다. 기지재의 체적비(volume fraction)는 $\nu_0 = V_0/V = 1 - \nu_1$, 강화재의 체적비는 $\nu_1 = V_1/V$, 전체 체적은 $V = V_0 + V_1$ 이다.

RVE의 평균 체적 $\langle f \rangle_\omega$, 기지재의 평균 체적 $\langle f \rangle_{\omega_0}$, 강화재의 평균 체적 $\langle f \rangle_{\omega_1}$ 에 대해서 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\langle f \rangle_\omega = \frac{1}{V} \int_\omega f(x) dV, \langle f \rangle_{\omega_i} = \frac{1}{V_i} \int_{\omega_i} f(x) dV_i \text{ with } i=0, 1 \quad (3)$$

적분은 RVE의 미세(micro) 좌표에서 계산되며 $f(x)$ 는 RVE에 대한 미세(micro) 응력과 변형률 텐서를 의미한다. 2가지 상으로 구성된 복합재료의 평균 체적은 식 (4)의 관계식으로 정의한다.

$$\langle f \rangle_{\omega} = v_0 \langle f \rangle_{\omega_0} + v_1 \langle f \rangle_{\omega_1} = (1 - v_1) \langle f \rangle_{\omega_0} + v_1 \langle f \rangle_{\omega_1} \quad (4)$$

평균 체적에 관한 2가지 상으로 구성된 복합재료의 관계를 통해 RVE의 거시 변형률 $\bar{\epsilon}$ 은 RVE의 평균 변형률 $\langle \epsilon \rangle_{\omega}$ 과 동일하다. 기지재의 평균 변형률 $\langle \epsilon \rangle_{\omega_0}$ 과 강화재의 평균 변형률 $\langle \epsilon \rangle_{\omega_1}$ 의 관계는 변형률 집중 텐서 B^{ϵ} (strain concentration tensor)와 함께 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\langle \epsilon \rangle_{\omega_1} = B^{\epsilon} : \langle \epsilon \rangle_{\omega_0} \quad (5)$$

강화재의 평균 변형률 $\langle \epsilon \rangle_{\omega_1}$ 과 RVE의 평균 변형률 $\langle \epsilon \rangle_{\omega}$ 의 관계는 변형률 집중 텐서 A^{ϵ} 와 함께 식 (6)으로 정의한다.

$$\langle \epsilon \rangle_{\omega_1} = A^{\epsilon} : \langle \epsilon \rangle_{\omega}, \quad A^{\epsilon} = B^{\epsilon} : [\nu_1 B^{\epsilon} + (1 - \nu_1) I]^{-1} \quad (6)$$

기지재의 평균 변형률 $\langle \epsilon \rangle_{\omega_0}$ 와 RVE의 평균 변형률 $\langle \epsilon \rangle_{\omega}$ 의 관계는 식 (5)와 식 (6)을 통해 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$\langle \epsilon \rangle_{\omega_0} = [\nu_1 B^{\epsilon} + (1 - \nu_1) I]^{-1} : \langle \epsilon \rangle_{\omega} \quad (7)$$

B^{ϵ} 는 기지재의 평균 변형률에 대한 강화재의 평균 변형률에 관한 변수이며, A^{ϵ} 는 거시적 평균 변형률에 대한 강화재의 평균 변형률에 관한 변수이다. 또한 변형률 집중 텐서 B^{ϵ} 를 통해 균질화된 RVE의 강성 텐서 C_{ω} 를 식 (8)로 표현할 수 있다.

$$\langle \sigma \rangle_{\omega} = C_{\omega} : \langle \epsilon \rangle_{\omega} \quad (8)$$

$$C_{\omega} = [\nu_1 C_{\omega_1} : B^{\epsilon} + (1 - \nu_1) C_{\omega_0}] : [\nu_1 B^{\epsilon} + (1 - \nu_1) I]^{-1}$$

첫 번째 균질화 모델은 Eshelby 이론을 기초로 하고 있다. 하나의 타원체 강화재의 변형률 집중 텐서 H^{ϵ} 는 식 (9)에서 기지재의 강성(C), 강화재의 강성(C_I) 그리고 기지재의 포아송비와 강화재의 형상에 관한 Eshelby 텐서(S) 함수로 표현한다 (Eshelby, 1957).

$$H^{\epsilon} = [I + S : (C^{-1} : C_I - I)]^{-1} \quad (9)$$

Mori-Tanaka 모델은 RVE를 여러 타원형 강화재인 EIP (Equivalent Inclusion Problem)의 조합으로 정의하였으며 식 (10)과 같이 나타내었다(Mori and Tanaka, 1973).

$$\langle \epsilon \rangle_{\omega_1} = H^{\epsilon} : \langle \epsilon \rangle_{\omega_0} \quad (10)$$

$$B^{\epsilon} = H^{\epsilon} = [I + S : (C_{\omega_0}^{-1} : C_{\omega_1} - I)]^{-1}$$

따라서, 변형률 집중 텐서 B^{ϵ} 는 EIP의 변형률 집중 텐서 H^{ϵ} 과 동일하다.

두 번째 균질화 모델에 사용되는 Voigt 모델은 두 상에서 균일한 변형률($B^{\epsilon} = I$)이 존재함을 가정하여 식 (11)과 같이 변형률 집중 텐서를 정리하여 새롭게 균질화된 강성 텐서로 나타낼 수 있다(Doghri and Ouair, 2003).

$$C_{\omega} = [\nu_1 C_{\omega_1} + (1 - \nu_1) C_{\omega_0}] \quad (11)$$

2.3 사출해석과 섬유배향 매핑

Moldflow 소프트웨어를 사용하여 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 강성에 영향을 미치는 섬유배향에 관한 사출해석을 수행하였다. Table 3에는 본 연구에서 사용한 PBT 고분자와 유리섬유의 기본 물성을 나타내었다. 역학적 특성을 향상시키기 위해 첨가된 유리섬유는 0.25mm 평균길이, 10 μ m 평균직경 그리고 30%wt 중량비를 갖는 강화재이다. 260°C 사출 온도, 82°C 금형 온도 그리고 보압 후 냉각시간을 30초로 정의하여 사출해석 조건을 정의하였다.

Mortazavzian의 피로시험에서 사용한 규격인 100mm×200mm×3.8mm(너비×길이×두께) 치수의 직사각형 평판 형태의 금형은 사출해석을 위한 유한요소 모델에 동일하게 적용하였다. 774,671개와 142,366개의 요소와 절점 수를 갖는 3차원 Tetrahedron 사면체 요소의 유한요소 모델이 사출해석에 사용되었으며 모델의 두께 방향 층수는 10이다.

Table 3 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

섬유배향을 계산하기 위해 Moldflow 소프트웨어에서는 Folgar-Tucker 배향 방정식을 사용하고 있다. 3차원 요소의 섬유

유배향을 정의하기 위한 Folgar-Tucker 배향 방정식은 식 (12)와 같다(Linn, 2005).

$$\frac{Da_{ij}}{Dt} = -\frac{1}{2}(w_{ik}a_{kj} - a_{ik}w_{kj}) + \frac{1}{2}\lambda(\dot{\gamma}_{ik}a_{kj} + a_{ik}\dot{\gamma}_{kj} - 2a_{ijkl}\dot{\gamma}_{kl}) + 2C_i[\dot{\gamma}_{ij} - (2 + D_Z)a_{ij}] \quad (12)$$

a_{ij} 는 섬유배향 텐서(fiber orientation tensor), $w_{ij}/2$ 는 와동 텐서(vorticity tensor), $\dot{\gamma}_{ij}/2$ 는 변형속도 텐서(deformation rate tensor) 그리고 C_i 는 섬유 상호 작용계수(fiber interaction coefficient)이다.

피로시험에 사용한 직사각형 평판시편의 Moldflow 사출해석 결과는 Fig. 6과 같이 각 유선 방향(xx, yy, zz)에 따른 섬유배향 텐서(tensor, a)의 분포로 나타낼 수 있다. 매핑(mapping) 과정에서 유리섬유의 방향을 정의하는 섬유배향 텐서는 중요한 입력 데이터이다.

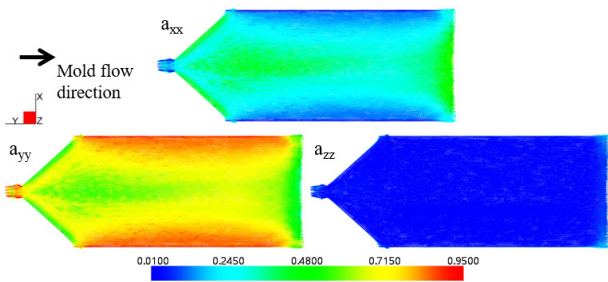
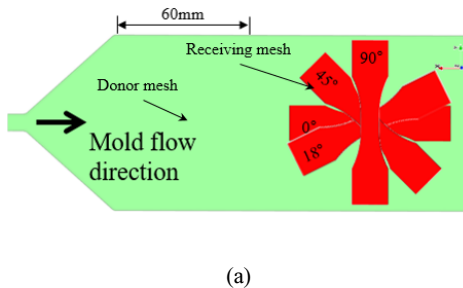


Fig. 6 Fiber orientation tensor in Moldflow analysis (a) a_{xx} direction, (b) a_{yy} direction, (c) a_{zz} direction

Digmat MAP은 3차원 매핑 작업을 위해 사용하였다. 피로시편은 피로시험에 사용된 시편 제작 과정과 같이 평판시편의 상단으로부터 60mm 떨어진 지점에 위치시켰다. 평판시편의 Moldflow 사출해석 결과로부터 Fig. 7과 같이 섬유배향에 관한 텐서 정보를 유한요소 피로시편 모델로 매핑하였다. 섬유배향에 따른 피로시험 조건을 만족하기 위해 Fig. 7(a)에서는



금형의 유선 방향을 기준으로 0°, 18°, 45°, 90° 유한요소 피로시편 모델의 위치를 설명하고 있다.

축 방향의 섬유배향 텐서는 a_{xx}, a_{yy}, a_{zz} 로 나타내며, 총합은 1.0이고, 1.0에 근접할수록 각 축 방향에 평행하다. 유한요소 피로시편 모델의 0°, 18°, 45°, 90° 방향에 따른 섬유배향 텐서는 Fig. 7(b)의 매핑 과정을 통해 진행되며 결과를 확인할 수 있다.

2.4 Digimat에서의 복합재료 물성 모델

평균장 균질화(mean-field homogenization)는 RVE의 거시적 응력과 거시적 변형률을 미세 구조의 상대적인 평균 응력과 평균 변형률로 정의하는 방법이다. 고분자 기지재와 강화재인 유리섬유의 두 가지 상(phase)이 혼합된 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 역학적 특성을 구현하기 위해 Digimat에서는 평균장 균질화 방법을 사용하고 있다.

이러한 이유로 Digimat에서는 고분자 기지재와 강화재인 유리섬유 두 가지 재료를 동시에 적용하여 재료 모델을 구성한다. Table 3에 정리한 유리섬유는 선형 탄성(linear elastic) 재료 모델로 정의한다. 그리고 고분자 기지재는 Linear-Elasticity(LE), Elasto-Plasticity(EP), Elasto-ViscoPlasticity(EVP), ViscoElasto-ViscoPlasticity(VE VP) 등 역학적 특성을 고려한 다양한 재료 모델이 있다(Digmat, 2018).

본 연구에서는 선형과 비선형에 대한 PBT GF30wt%의 피로 거동을 구현하기 위해 LE, EP 재료 모델에 관해서 다루고자 한다. LE 재료 모델은 하중이 작용하는 섬유배향에 따라 독립적으로 등방성(isotropic) 거동을 하는 탄성 재료 모델이다. LE 재료 모델은 식 (13)과 같이 Hooke의 법칙으로 표현한다.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\epsilon_{kl} \quad (13)$$

σ_{ij} 는 응력 텐서, ϵ_{ij} 는 변형률 텐서 그리고 C 는 Hooke 연산자(operator)이다.

Hooke 연산자의 등방성 거동에 대한 강성 매트릭스(stiffness

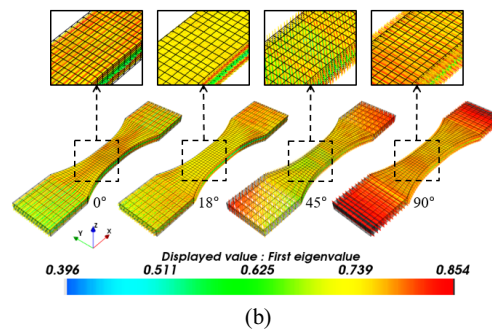


Fig. 7 Mapping process of fiber orientation tensors (a) Defining fiber orientation tensors in FE plate model, (b) Checking fiber orientation tensors in FE fatigue model

matrix, C)를 식 (14)에 나타내었다.

$$C = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \quad (14)$$

E 는 탄성계수이고, ν 는 포아송비(poisson's ratio)이다.

유리섬유 강화 플라스틱 복합재료와 가장 유사한 변형 거동을 보이는 EP 재료 모델은 식 (15)와 같이 J_2 -plasticity 모델로 표현한다.

$$f(\sigma, R) = \sqrt{J_2(\sigma)} - \sigma_y - R(p) \quad (15)$$

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

J_2 는 폰 미세스 응력(von Mises stress)를 나타내는 상수이고 σ_y 는 재료의 항복 강도를 의미한다. 폰 미세스 항복 기준 이하에서 함수 $f(\sigma, R)$ 은 0에 근접할 때까지 탄성 거동을 하며 폰 미세스 항복 기준 이상에서 함수 $f(\sigma, R)$ 은 0보다 작아져 $R(p)$ 에 의해서 비선형 소성 거동을 한다.

$$R(p) = kp + R_\infty [1 - \exp(-mp)] \quad (16)$$

경화 응력(hardening stress)을 의미하는 $R(p)$ 는 식 (6)으로 나타낸다. k 는 선형경화율(linear hardening modulus), R_∞ 은 경화율(hardening modulus), m 은 경화 지수(hardening exponent)이고 p 는 시간에 따라 누적된 소성변형률(\dot{p})이다.

선형-탄성 재료 모델 LE는 탄성 구간을 정의하기 위해 탄성 계수, 포아송비(poisson's ratio)를 변수로 하는 구성방정식(constitutive equation)을 정의하여야 한다. 그리고 탄성-소성 재료 모델 EP는 탄성 구간을 정의하는 구성방정식의 변수와 항복 강도 그리고 소성 구간을 정의하기 위한 선형경화율, 경화율과 경화 지수로 구성된 경화 응력의 변수를 정의하여야 한다. 역설계(reverse engineering) 과정은 Digimat 재료 모델을 구성하는 변수를 반복 인장시험의 응력-변형률 선도와의 반복적인 비교 작업을 수행하여 섬유배향에 대한 최적화된 값을 도출한다(Digimat, 2018).

2.5 연성해석 결과

본 연구에서의 섬유배향 텐서를 계산하기 위해 Moldflow 소프트웨어를 사용하여 사출해석을 하였으며, 이를 Digimat

MAP를 활용하여 유한요소 모델에 섬유배향에 따른 텐서 정보를 매핑하였다. 섬유배향에 따른 유리섬유를 함유한 고분자 복합재료의 인장 특성을 수치해석으로 구현하기 위해 Digimat의 다양한 재료 모델 중 LE, EP 재료 모델을 선정하였으며, 역설계 과정을 통해 이를 구성하고 있는 변수들의 최적화된 값을 도출하였다. 이와 같은 방법으로 정의된 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 재료 물성은 데이터베이스(data base)로 관리되어 많은 사용자가 손쉽게 접근하여 사용할 수 있다.

Digimat과의 연성해석에 사용된 LS-DYNA의 피로시험 모델을 Fig. 8에 나타내고 있다. 3차원 Hexahedron 육면체 요소의 피로시험 모델은 충분한 적분점(fully integration)을 갖는 LS-DYNA 요소 방정식(element formulation, -1)으로 구성하였다. 해석 시간을 고려한 요소의 크기는 지그(jig)로 고정된 부분은 1.25mm, 변형이 발생하는 부분은 0.625mm로 구분하였다. 총 요소와 절점 수는 16,640개와 19,636개이며, 두께 방향의 층수는 사출해석 모델과 같은 10이다. Fig. 8에서는 연성해석에 사용된 모델의 경계 조건(boundary condition)을 나타내고 있다.

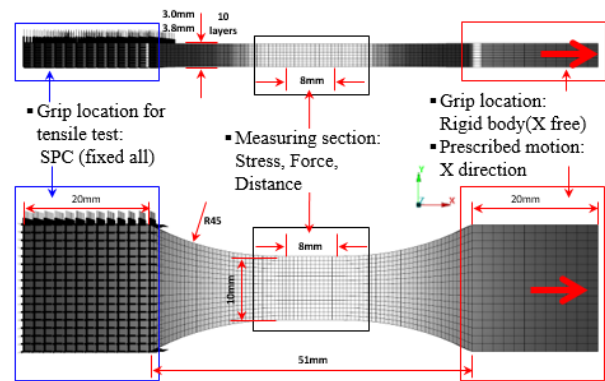


Fig. 8 FEM model of the fatigue specimen and boundary condition

파란색 사각형의 지그 고정 부분은 모든 절점의 변위와 회전 자유도를 고정하였다. 빨간색 사각형의 다른 지그 고정 부분은 모든 절점을 강체요소(rigidbody element)로 구속하였으며 X 방향의 변위 자유도를 제외한 모든 자유도를 고정하였다. 그리고 LS-DYNA의 implicit 코드를 사용하여 강체요소의 무게 중심점(center of gravity)의 X방향으로 PRESCRIBED MOTION으로 정의한 외력을 적용하여 피로시험 모델의 인장에 관한 연성해석을 수행하였다.

Fig. 9에서는 소성변형률 분포를 통해 각 연성해석에 적용된 섬유배향을 확인할 수 있다. 0° 섬유배향은 다른 세 방향보다 더 넓은 영역에서 하중을 지지하고 있으며, 90° 섬유배향은

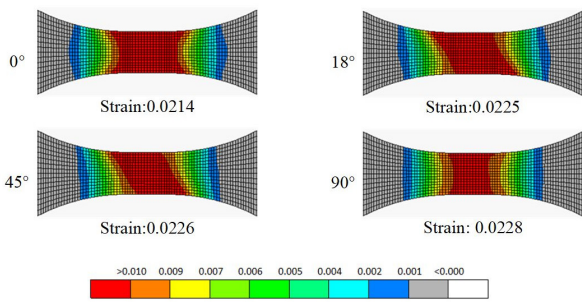


Fig. 9 Cyclic tensile behaviors of the coupled analysis under plastic strain distributions on 0°, 18°, 45°, 90° fiber orientation

데이터를 측정하는 시편의 중앙부에 소성변형률 분포가 집중되어 있다. 또한 18°와 45° 전단방향의 섬유배향에 관한 소성변형률 분포는 다른 두 방향 보다 섬유배향의 정도를 좀 더 명확히 확인할 수 있다. 이처럼 섬유배향은 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 역학적 거동을 규정할 수 있는 중요한 인자이다.

두께 방향으로 응력 분포와 응력-변형률 선도에 따른 LE와 EP 재료 모델의 연성해석 결과를 Fig. 10에 나타내고 있다. Fig. 10(a)는 두께 방향의 응력 분포 단면과 응력-변형률 선도를 계산하기 위한 1st~10th층까지의 요소를 설명하고 있다. Fig. 10(b)는 두께 방향의 응력 분포에 대한 0° 섬유배향과 EP 재료 모델의 연성해석 결과의 단면과 90° 섬유배향과 LE 재료 모델의 연

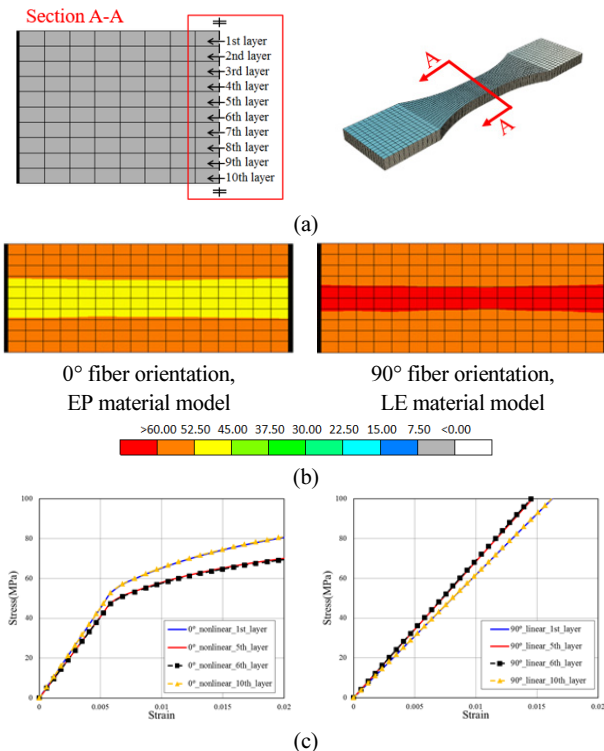


Fig. 10 Cyclic tensile behaviors of the coupled analysis on 0°, 90° fiber orientation and material models across the thickness of FE model (a) Layers by a cross section, (b) Stress distributions, (c) Symmetrical stress-strain curves

성해석 결과의 단면을 나타내고 있으며 5th와 6th층을 기준으로 1st~4th층과 7th~10th층의 응력 분포가 서로 대칭을 이루고 있다. Fig. 10(c)는 0°, 90° 섬유배향과 LE, EP 재료 모델의 연성해석 결과의 응력-변형률 선도를 나타내고 있으며, 5th와 6th층과 1st와 10th층의 응력-변형률 선도가 서로 동일하다.

두께 방향의 0°, 90° 섬유배향과 LE, EP 재료 모델의 연성해석 결과와 반복 인장시험의 응력-변형률 선도를 Fig. 11에 서로 비교하였다. 역학적 거동에 관한 연성해석과 시험결과가 탄성과 소성 영역의 전반에서 상당한 상관관계를 보인다. 연성해석 결과는 Fig. 10으로부터 5th와 6th층을 기준으로 상, 하층이 대칭적 거동임 확인하여 1st~5th층의 응력-변형률 선도만 사용하였다.

두께 방향의 0° 섬유배향과 LE, EP 재료 모델의 연성해석 결과를 응력-변형률 선도로 나타내고 있는 Fig. 11(a)는 2nd와 3rd층에서 가장 높은 응력을 보이며 다음으로는 1st, 4th 그리고 5th층의 순서로 높은 응력을 나타내고 있다. 이와는 반대로 90° 섬유배향과 LE, EP재료 모델의 연성해석 결과를 응력-변형률 선도로 나타내고 있는 Fig. 11(b)는 0° 섬유배향과 LE, EP재료 모델의 연성해석 결과와 정반대의 응력 순서를 나타내고 있다. 사출성형 과정을 통해 발생하는 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 섬유배향은 균형의 우선 방향뿐 아니라 두께 방향으로 서로 다르게 분포하여 두께 방향의 역학적 특성에도 차이를 보인다. 형태학적 구조 측면에서는 1st층을 스킨, 2nd~4th층을 셸 그리고 5th층을 코어로 구분한다. Fig. 10(b)의 두께 방향에 따른 응력 분포의 연성해석 결과와 Fig. 11의 응력-변형률 선도에 대한 역학적 특성 측면에서는 1st~4th층을 셸, 5th층을 코어로 구분할 수 있다.

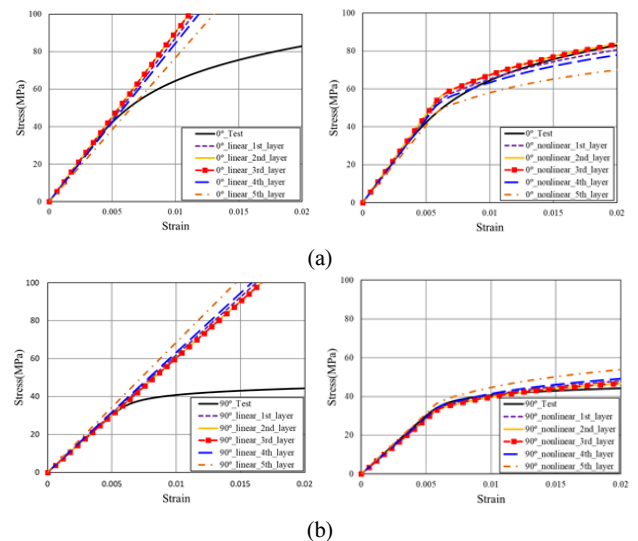


Fig. 11 Stress-strain curves about cyclic tensile behaviors across the thickness (a) 0° fiber orientation and material models (b) 90° fiber orientation and material models

2.6 피로해석 결과

수치해석을 이용하여 피로수명을 예측하고 평가하기 위해서는 정적(static)과 반복(cyclic) 하중에 대한 재료 거동을 유한 요소 모델로 설명하여야 한다. 정적 하중에 의한 LS-DYNA와 Digimat의 연성해석은 선형과 비선형 재료 모델을 활용하여 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 유선과 두께 방향의 섬유 배향에 따른 재료의 비등방성 거동을 구현하였다. 응력에 관한 연성해석 결과는 반복 하중에 의한 재료의 피로 거동을 평가하기 위해 FEMFAT을 사용한 피로수명 해석에 활용되었다. 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 피로수명 평가를 위한 FEMFAT의 재료 모델을 구성하기 위해서는 Table 1에서의 0°, 90° 섬유배향에 따른 반복 하중에 의한 재료의 기본 특성인 반복 탄성계수(E'), 강도 계수(K'), 가공 경화 지수(n'), 항복 강도(σ_y'), 인장 강도(σ_u'), 파손 변형률(failure strain) 등과 같은 매개변수와 Table 2에서의 $R=-1$ 응력비 조건에서 0°, 90° 섬유배향에 따른 S-N 선도를 구성하는 기울기(b), 피로강도, 피로수명 등과 같은 매개변수를 사용한다.

FEMFAT에서는 임계 절단 평면(critical cutting plane)을 기준으로 섬유배향에 따른 재료의 비등방성 매개변수(W_i) 사이를 Fig 12와 같은 관계로 나타낸다. 3차원 공간에서 섬유 배향에 따라 W_1, W_2, W_3 로 정의되는 재료의 비등방성 매개변수는 0°~90° 사이에 존재하는 섬유배향 텐서(λ_i)와 선형 보간법(linear interpolation)으로 결정한다. 그리고 특정 임계 평면의 법선 벡터(normal vector)와 3차원 평면의 교차점을 계산하여 로컬 재료 매개변수(W_i)를 정의한다(Gaier *et al.*, 2007; FEMFAT, 2007).

S-N 선도를 기반으로 하는 FEMFAT은 낮은 파손 주기의 소성변형을 하는 저주기 피로(Low Cycle Fatigue, LCF) 구간을 해석하기 위해 Neuber 법칙을 사용한다. Fig. 13은 노치부의 국부적인 탄성-소성 응력을 평가하기 위한 선형-탄성 응력 기반의 Neuber 법칙을 나타내고 있다.

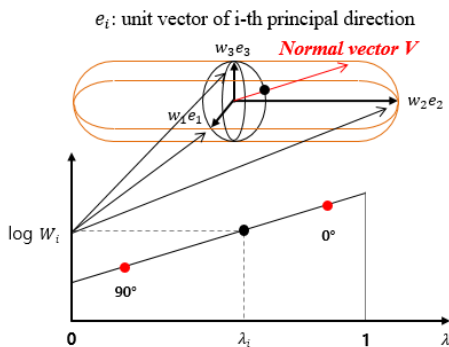


Fig. 12 Interpolation method of material parameters according to fiber orientation in FEMFAT

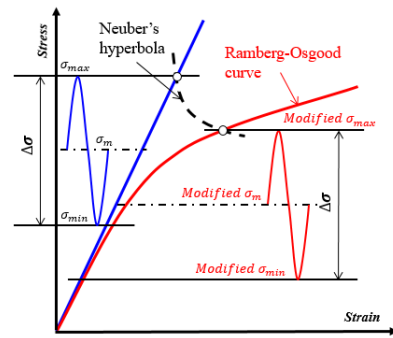


Fig. 13 Neuber's rule and Ramberg-Osgood equation for cyclic loading

일반적으로 노치 효과는 하중 유형, 재료의 특성, 노치의 기하학적 구조에 따른 응력 집중의 형태에 따라 응력집중계수(stress concentration factor, kt)와 피로노치계수(fatigue notch factor)로 설명한다. 하지만 유한요소를 이용한 수치해석에서는 기하학적으로 복잡한 구성 요소의 노치 효과를 특정 계수로 정의하는 대신 식 (17)에 나타낸 Neuber 법칙의 선형과 비선형 응력-변형률에 대한 관계식으로 정의할 수 있다(Kujawski and Teo, 2017; FEMFAT, 2007).

$$\sigma_{plast} \times \epsilon_{plast} = \frac{\sigma_{elast}^2}{E} \tag{17}$$

식 (18)은 식 (1)의 반복 응력-변형률 선도를 나타내는 Ramberg-Osgood 방정식과 식 (17)을 사용하여 비선형 응력을 계산할 수 있는 새로운 방정식으로 정의하였다.

$$\sigma_a^2 + E' \sigma_a \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{1/n'} = (\sigma_{a-elast})^2 \tag{18}$$

이러한 과정을 통해 새롭게 정의된 응력은 섬유배향에 따라 평균응력(mean stress)과 상대적 응력 구배(relative stress gradient)와 같은 주요한 인자에 영향을 미치게 된다. 재료의 피로 거동에 영향을 미치는 인자의 변화는 로컬 영역에서 S-N(Stress-Life) 선도를 수정하여 재료의 피로강도와 피로수명에 영향을 미친다.

본 연구에서는 식 (19)에 있는 Miner가 제안한 선형 손상 누적(linear damage accumulation) 모델을 적용하여 반복 하중에 의한 재료의 손상을 계산하였다(Miner, 1945).

$$D = \sum_{i=1}^I d_i = \sum_{i=1}^I \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \tag{19}$$

n_i 는 해당 하중 성분의 반복 회수이고, N_i 는 하중 성분에 의한 재료의 피로수명이다. n_i/N_i 으로 계산된 피로 손상율 d_i 의 총

합을 Damage(손상)라 하고 1을 초과할 경우 파손이 발생한다. 1회의 반복 회수에 의한 Damage 역수는 재료의 피로수명을 계산할 수 있다.

Fig. 14(a)는 0°, 90° 섬유배향에 따른 Digimat의 LE 재료 모델과 LS-DYNA의 연성해석을 통한 응력 결과가 FEMFAT의 Neuber 법칙에 의해 재배치된 응력 결과를 보여주고 있다. 새롭게 정의된 응력은 Fig. 14(b)와 같이 R=-1 응력비 상태의 낮은 파손 주기의 소성변형을 하는 LCF 영역의 피로해석에서 Neuber 법칙이 적용된 결과가 선형 해석의 결과보다 낮은 응력 증폭과 길어진 피로수명을 갖게 된다. 그리고 LCF 영역에서 Neuber 법칙의 피로해석 결과가 선형 해석의 피로해석 결과보다 실제 피로시험의 결과와 더 유사함을 확인할 수 있다.

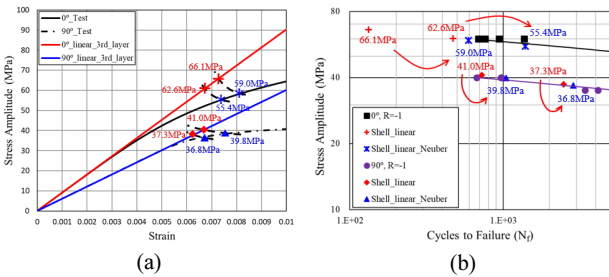


Fig. 14 Fatigue analysis using FEMFAT in LCF regimen (a) Stress rearrangement using Neuber's rule, (b) Fatigue analysis under R=-1 stress ratio

Fig. 15는 0°, 18°, 45°, 90° 섬유배향 그리고 Digimat의 LE, EP 재료 모델과 LS-DYNA 연성해석의 응력 결과를 사용한 R=-1 응력비 조건의 피로해석과 피로시험 결과를 비교하여 정

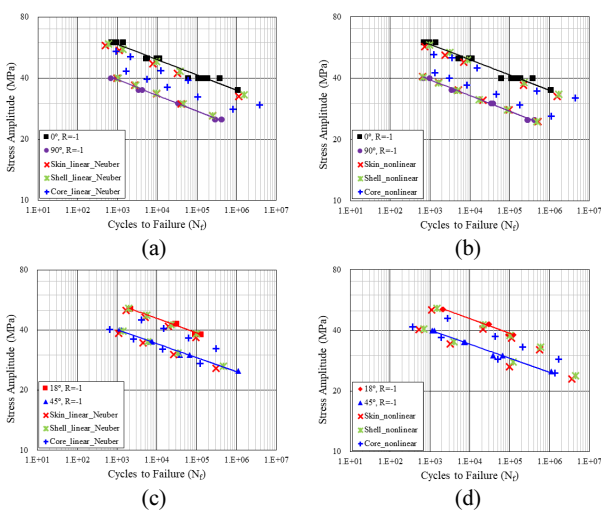


Fig. 15 Comparison of the results in fatigue analysis and fatigue tests under R=-1 stress ratio (a) 0°, 90° fiber orientation and LE material model, (b) 0°, 90° fiber orientation and EP material, (c) 18°, 45° fiber orientation and LE material, (d) 18°, 45° fiber orientation and EP material model

리하였다. 또한 선형 연성해석의 피로해석은 Neuber 법칙을 적용해 응력을 재배치하였으며, 비선형 연성해석의 응력을 활용한 피로해석 결과와 비교하였다.

섬유배향에 따라 선형과 비선형 연성해석의 결과는 역학적 측면에서 쉘과 코어로 나눌 수 있었다. 그리고 0° 섬유배향의 연성해석 결과에서 두께 방향의 응력은 0° 섬유배향에 평행한 스킨과 셸이 코어의 응력보다 높게 나타났다. 이와는 반대로 90° 섬유배향의 연성해석 결과에서는 0° 섬유배향에 평행한 코어가 스킨과 셸의 응력보다 높게 나타났다.

이러한 결과는 Fig. 15(a), (b)와 같이 0°, 90° 섬유배향과

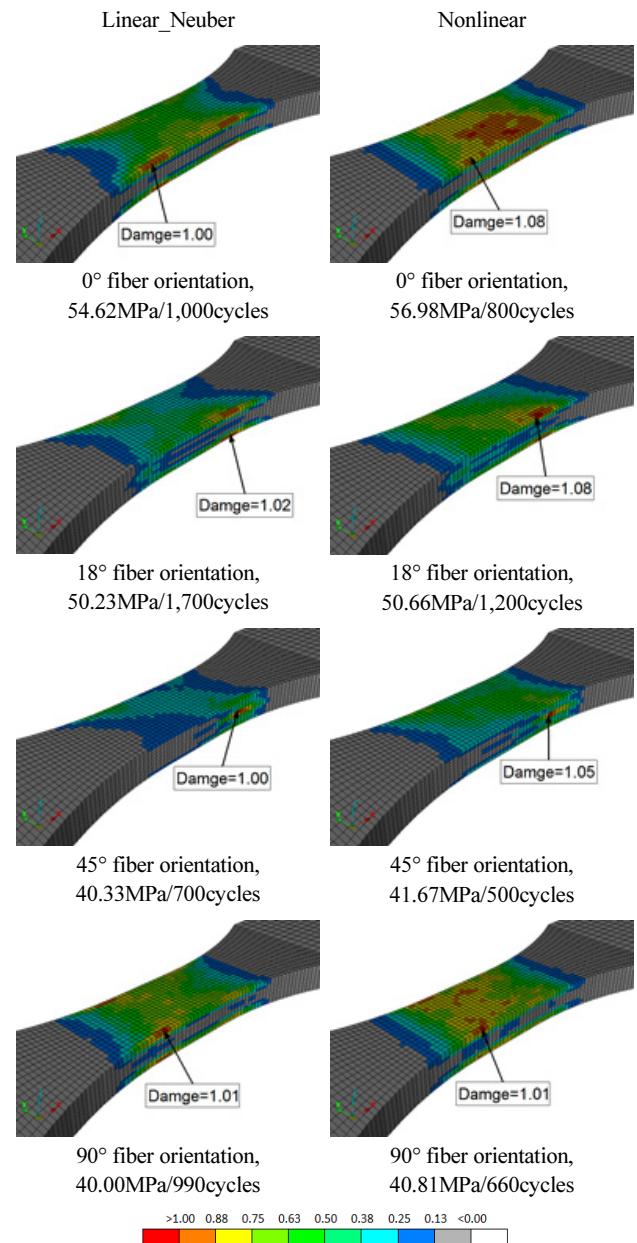


Fig. 16 Fatigue behaviors regarding fiber orientation with damage in LCF regimen

$R=1$ 응력비 조건의 피로해석에도 영향을 미쳐 0° 섬유배향의 피로해석에서 스킨과 셸은 유사한 응력 진폭과 피로수명을 갖게 되며 코어는 다른 두 층보다 응력 진폭이 더 낮고 긴 피로수명을 나타내고 있다. 90° 섬유배향의 피로해석에서도 스킨과 셸은 유사한 응력 진폭과 피로수명을 갖지만, 코어는 다른 두 층보다 응력 진폭이 더 높고 긴 피로수명을 보인다. 두 경우에서 스킨과 셸이 코어 보다 크랙(crack)이 먼저 발생하고 있다.

Fig. 15(c), (d)는 18° , 45° 섬유배향과 $R=1$ 응력비 조건의 피로해석 결과를 나타내고 있다. 18° 섬유배향의 피로해석은 0° 섬유배향의 피로해석과 유사한 피로 거동을 보인다. 45° 섬유배향의 피로해석은 스킨, 셸, 코어에서 유사한 응력 진폭을 보이나 다른 섬유배향과 달리 코어에서 가장 짧은 피로수명을 보여 코어가 스킨과 셸 보다 크랙이 먼저 발생하고 있다.

LCF 영역에서 $R=1$ 응력비 조건의 피로해석 결과를 Damage 분포에 따라 Fig. 16과 같이 나타내었다. 두 가지 재료 모델의 피로해석 결과는 0° , 18° , 90° 섬유배향과 45° 섬유배향에 따라 스킨의 모서리와 코어의 모서리에서 1 이상의 Damage를 보인다. 유사한 응력 진폭에서 Damage 분포에 따른 피로해석을 수행하기 위해 노력하였으며, 그 결과 Neuber 법칙을 사용한 선형 연성해석의 피로수명이 비선형 연성해석의 피로수명 보다 다소 길게 나타난다. 이러한 이유는 LCF 영역에서 비선형 연성해석은 실제 재료 거동과 유사하게 국부적인 소성변형의 응력을 계산하고 있으나 Neuber 법칙이 적용된 선형 연성해석은 국부적인 소성변형을 제외한 응력만을 재배치하기 때문이다.

3. 결론

본 연구는 다양한 분야에서 재료의 역학적 거동을 해석하고 예측하는 방법인 유한요소법(Finite Element Method, FEM)을 활용하여 반복 하중에 의한 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 피로 특성을 구현하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 사출성형 과정에서 발생하는 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 섬유배향은 금형의 유선 방향뿐만 아니라 두께 방향으로도 다르게 분포하여 역학적 특성에 차이를 보였다. 섬유배향에 따른 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 비등방성은 피로 거동에 영향을 미쳐 금형의 유선 방향에 평행한 섬유배향이 수직인 섬유배향보다 높은 피로강도를 나타내었다. 인장에 관한 연성해석 결과에서 두께 방향의 응력 분포와 응력-변형률 선도는 코어를 기준으로 상·하층이 대칭을 이루고 있었다. 이를 통해 두께 방향의 구조를 형태학적으로 스킨-셸-코어로 역학적으로 셸-코어로 구분할 수 있었다.

- 2) 서로 다른 두 가지 상의 결합인 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 구조적 특성은 평균장 균질화 방법을 사용하는 Digimat의 다양한 선형, 비선형 다중스케일 재료 모델로 표현할 수 있었다. 섬유배향을 고려한 Digimat의 선형과 비선형 재료 모델과 LS-DYNA의 연성해석에 대한 응력 결과는 FEMFAT을 활용한 재료의 피로 거동을 평가하기 위한 피로수명 해석에 사용되었다. FEMFAT에서 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 재료 모델을 구성하기 위해서는 0° , 90° 섬유배향에 대한 재료의 반복탄성계수(E'), 강도 계수(K'), 가공 경화 지수(n'), 항복강도(σ_y') 등의 매개변수와 $R=1$ 응력비와 0° , 90° 섬유배향에 따른 S-N 선도의 기울기(b), 피로강도, 피로수명 등의 매개변수를 정의하여야 한다.

- 3) 모든 피로해석은 $R=1$ 응력비 조건에서 수행하였으며 피로시험과 피로해석의 결과는 상당한 상관관계를 나타내었다. 0° , 90° 섬유배향의 피로해석에서 스킨과 셸은 유사한 응력 진폭과 피로수명을 보이며 코어는 두 층과 다른 응력 진폭과 피로수명을 나타내었다. 그리고 18° 섬유배향의 피로해석은 0° 섬유배향의 피로해석과 유사한 피로 거동을 보였으며 45° 섬유배향의 피로해석에서는 스킨, 셸 그리고 코어에서 유사한 응력 진폭을 보였으나 다른 섬유배향과 달리 코어에서 가장 짧은 피로수명을 보였다. 이는 두께 방향으로 다른 섬유배향에 따른 응력 분포로 인하여 발생하며 피로수명 역시 두께 방향으로 차이를 보임을 확인하였다.

- 4) Neuber 법칙은 낮은 파손 주기의 소성변형을 하는 LCF 영역을 해석하기 위해 사용하였다. 이를 통해 재배치된 응력은 섬유배향에 따라 평균응력과 상대적 응력 구배와 같은 주요한 인자에 영향을 미치고 로컬 영역에서 S-N(Stress-Life) 선도를 수정하여 재료의 피로강도와 피로수명에 영향을 미쳤다. LCF 영역의 피로해석에서 Neuber 법칙을 적용한 결과가 선형 연성해석의 결과보다 낮은 응력 증폭과 길어진 피로수명을 갖게 되어 실제 피로시험의 결과와 더 유사함을 확인할 수 있었다. 그리고 유사한 응력 진폭에서 Damage 분포에 따른 피로해석 결과를 통해 LCF 영역에서 비선형 연성해석은 실제 재료 거동과 유사하게 국부적인 소성변형의 응력을 계산하고 있으나 선형 연성해석의 Neuber 법칙은 국부적인 소성변형을 제외한 응력만을 재배치하기 때문에 비선형 연성해석의 피로수명 보다 다소 길게 나타났다.

References

- Adam, L., Depouhon, A., Assaker, R. (2008) Multi-scale Modeling of Crash & Failure of Reinforced Plastics Parts with Digimat to LS-DYNA Interface, *7th European LS-DYNA Conference*.
- Bernasconi, A., Cosmi, F. (2008) Local Anisotropy Analysis of Injection Moulded Fibre Reinforced Polymer Composites, *Compos. Sci. Technol.*, 68, pp.2574~2581.
- Bernasconi, A., Davoli, P., Basile, A. (2007) Effect of Fibre Orientation on the Fatigue behaviour of a Short Glass Fibre Reinforced Polyamide-6, *Int. J. Fatigue*, 29(2), pp.199~208.
- Biron, M. (2013) *Thermoplastics and Thermoplastic Composites 2nd Edition*, William Andrew, Massachusetts, p.1164.
- Brunbauer, J., Mosenbacher, A. (2014) Fundamental Influences on Quasistatic and Cyclic Material Behavior of Short Glass Fiber Reinforced Polyamide Illustrated on Microscopic Scale, *J. Appl. Polym. Sci.*, 131(19), 40842(1-14).
- Cahn, R.W., Haasen, P., Kramer, E.J. (1996) *Materials Science and Technology: Plastic Deformation and Fracture of Aaterials: A Comprehensive Treatment Volume 6*, Wiley-VCH Weinheim, p.710.
- 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 Engine ering.
- Doghri, I., Ouaar, A. (2003) Homogenization of Two-Phase Elasto-Plastic Composite Materials and Structures-Study of Tangent Operators, Cyclic Plasticity and Numerical Algorithms, *Int. J. Solids Struct.*, 40, pp.1681~1712.
- Eshelby, J. (1957) The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion and Related Problems, *Proc. Roy. Soc. London Ser. A*, 241, pp.376~396.
- FEMFAT 4.7 (2007) *Theory Manual*. St. Valentin.
- Gaier, C., Dannbauer, H., Werkhausen, A. (2007) Fatigue Life Prediction of Short Fiber Reinforced Plastic Components, *NAFEMS Seminar Simulating Composite Materials and Structures*.
- Grove, D., Kim, H. (1995) Fatigue Behavior of Long and Short Glass Reinforced Thermoplastics, *J. Mater. & Manuf.*, 104(5), pp.450~456.
- Kammouna, S., Doghri, I., Adam, L., Robert, G., Delannay, L. (2011) First Pseudo-Grain Failure Model for Inelastic Composites with Misaligned Short Fibers, *Compos.: Part A*, 42, pp.1892~1902.
- Kammouna, S., Doghri, I., Adam, L., Robert, G., Delannay, L. (2015) Micromechanical Modeling of the Progressive Failure in Short Glass-Fiber Reinforced Thermoplastics-First Pseudo-Grain Damage Model, *Compos.: Part A*, 73, pp.166~175.
- Krairi, A., Doghri, I., Robert, G. (2016) Multiscale High Cycle Fatigue Models for Neat and Short Fiber Reinforced Thermoplastic Polymers, *Int. J. Fatigue*, 92, pp.179~192.
- Kujawski, D., Teo, J.L.K. (2017) A Generalization of Neuber's Rule for Numerical Applications, *2nd Int. Conf. Struct. Integr.*
- Lavengood, R.E., Gulbransen, L. (1969) The Effect of Aspect Ratio on the Fatigue Life of Short Boron Fiber Reinforced Composites, *Polym. Eng. Sci.*, 9, pp.365~369.
- Linn, J. (2005) The Folgar-Tucker Model as a Differential Algebraic System for Fiber Orientation Calculation, *ITWM*, 75, pp.2~4.
- Marohni, T., Basanb, R., Franulovic, M. (2015) Evaluation of the Possibility of Estimating Cyclic Stress-Strain Parameters and Curves from Monotonic Properties of Steels, *Pro. Eng.*, 101, pp.277~284.
- Mallick, P.K. (1993) *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design 3rd Edition*, CRC Press, Florida, p.638.
- Miner, M.A. (1945) Cumulative Damage in Fatigue. *J. Appl. Mech-Trans. ASME*, 12(3), A159-64.
- Mori, T., Tanaka, K. (1973) Average Stress in Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions, *Acta. Metall.*, 21(5), pp.571~574.
- Mortazavian, S., Fatemi, A. (2015) Fatigue Behavior and Modeling of Short Fiber Reinforced Polymer Composites Including Anisotropy and Temperature Effects, *Int. J. Fatigue*, 77, pp.12~27.
- 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.
- Ramberg, W., Osgood, W. (1943) Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters, Technical Note No. 902.
- Rolland, H., Saintier, N., Gobert, G. (2016) Fatigue Mechanisms Description in Short Glass Fibre Reinforced Thermoplastic by Microtomographic Observations, *Proc. Struct. Integr.*, 2, pp.301~308.

요 지

본 연구를 통해 다양한 분야에서 재료의 역학적 거동을 해석하고 예측하는 방법인 유한요소법(Finite Element Method, FEM)을 활용하여 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 피로 특성을 분석하였다. 이를 구현하기 위해 평균장 균질화(mean-field homogenization) 이론을 활용하여 고분자, 고무, 금속 등과 같은 다양한 복합재료를 위한 선형, 비선형 다중스케일 재료 모델링 프로그램인 Digimat을 이용하였다. 이를 통해 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 미세 구조와 재료 모델을 정의하여 더욱 현실적으로 고분자 복합재료의 피로 거동을 예측하고자 한다. 참고문헌을 통해 시험 온도, 섬유배향, 응력비, 시편의 두께 등 다양한 변수들을 사용하여 30wt%의 단 섬유 질량 비율을 갖는 폴리부틸렌 테레프탈레이트(polybutylene terephthalate, PBT)의 고분자 복합재료의 피로 특성을 조사하였다. 섬유배향 정보를 계산하기 위한 사출해석은 Moldflow 소프트웨어를 활용하였으며, 이를 유한요소 피로시편 모델에 매핑하였다. 대표적인 유한요소 상용 소프트웨어인 LS-DYNA는 섬유배향에 따른 고분자 복합재료의 응력 진폭을 계산하기 위해 Digimat과의 연성 해석에 활용하였다. 그리고 수치해석을 활용한 피로수명 해석을 위해 다양한 재료 모델들로 구성된 FEMFAT 소프트웨어를 사용하였다. 선형 재료 모델의 연성해석 결과는 높은 응력 진폭에 의한 재료의 국부적 비선형이 발생하는 LCF 영역의 피로 특성을 연구하기 위해 Neuber 법칙을 사용하여 재료의 피로 거동을 분석하였으며, 비선형 재료 모델의 연성해석 결과 역시 FEMFAT을 활용한 피로수명 해석에 사용되었다. 연성해석과 피로해석의 결과는 섬유배향에 따라 유한요소 시편의 두께 방향으로 분석하여 유리섬유 강화 플라스틱 복합재료의 형태학적, 역학적 구조에 대해서 평가하였다.

핵심용어 : 유리섬유 강화 플라스틱, 섬유배향, 평균장 균질화, 피로수명, 연성해석, 피로, 연성해석, 저주기 피로