

단섬유 복합소재 사출 성형품의 기계적 거동 예측을 위한 2D Shell 기반 사출 성형-구조 연계 해석

김정민* · 이공현* · 설영훈* · 최정욱* · 곽윤기* · 한장우*[†]

2D Shell-Based Injection Molding-Structural Coupled Analysis for Predicting the Mechanical Behavior of Injection-Molded Short-Fiber Reinforced Composites

JeongMin Kim*, GeungHyeon Lee*, YeongHun Seol*, JeongUk Choe*,
Yunki Gwak*, Jang-Woo Han*[†]

ABSTRACT: This study proposes a 2D Shell-based injection molding-structural coupled analysis for efficiently predicting the structural behavior of injection-molded short-fiber reinforced composite structures. To this end, local short-fiber orientation during the manufacturing process were derived based on injection molding analysis, and the corresponding behaviors were considered in the process of the structural analysis. Furthermore, by applying a layered 2D Shell model, the 3D distribution of the local short-fiber orientation was approximately mapped onto the layer-wise orientation data of 2D Shell elements, enabling the in-plane and through-thickness distributions of orthotropic material properties to be efficiently considered within a dimension-reduced analysis model. As numerical examples, injection molding-structural coupled analysis was performed for tensile and bending specimens. The accuracy and computational efficiency of the proposed analysis model were verified by comparing obtained results with those of 3D Solid-based injection molding-structural coupled analysis.

초 록: 본 연구에서는 단섬유 복합소재 사출 성형품의 구조적 거동을 효율적으로 예측하기 위한 2D Shell 기반 사출 성형-구조 연계 해석 방안을 제안하였다. 이를 위해 사출 성형 해석을 바탕으로 복합소재 구조물 제작 과정에서 발생하는 국부적 단섬유 배향 특성을 도출하였으며, 그에 따른 거동 특성 변화를 구조 해석 과정에서 고려하였다. 나아가, 적층 2D Shell 모델 적용을 바탕으로 공간상에서 분포되는 단섬유 배향 특성을 2D Shell 요소의 layer 별 배향 정보로 근사 맵핑함으로써 단섬유 복합소재 사출 성형품의 면내/두께 방향 이방 물성 분포를 차원이 축소된 해석 모델에서 반영하였다. 수치 예제로써 인장 및 굽힘 시편에 대한 사출 성형-구조 연계 해석을 수행하였으며, 3D Solid 기반 사출 성형-구조 연계 해석 결과와의 비교/분석을 통해 제안된 해석 방안의 정확성 및 효율성을 검증하였다.

Key Words: 단섬유 강화 복합소재(Short-fiber reinforced composites), 섬유 배향 텐서(Fiber orientation tensor), 부위별 이방 물성(Local orthotropic material property), 사출 성형-구조 연계해석(Injection molding-structural coupled analysis)

1. 서 론

최근 미래 모빌리티 등과 같은 다양한 첨단산업 분야를 중심으로 고강도 경량 특성에 대한 요구가 지속적으로 증가되고 있으며, 이에 따라 비강도 및 비강성이 우수한 섬유 강화 복합소재 적용이 확대되고 있는 추세이다. 섬유 강화 복합소재는 강화재의 형태에 따라 연속섬유 및 단섬유 강화 복합소재로 구분된다. 이 중 연속섬유 강화 복합소재는 우수한 기계적 성능을 제공하지만, 성형 공정의 제약으로 인해 생산성이 낮으며 형상 자유도가 제한된다는 한계점을 가진다. 이에 반해, 사출 및 압축 성형 등과 같은 양산형 공정 적용이 가능한 단섬유 복합소재는 대량 생산에 적합하며, 복잡한 형상 구현이 가능하다는 장점으로 인해 다양한 산업 분야에서 양산형 복합소재로써 활용도가 증가되고 있는 상황이다.

단섬유 복합소재 구조물 제작을 위한 대표적 공법 중 하나인 사출 성형 공정은 금형 내부로 용융된 복합소재를 고온/고압 상태로 충전하는 방식으로써, 금형 형상 및 성형 공정 조건 등에 따라 최종 사출품의 품질 및 기계적 거동 특성이 상이해질 수 있다[1-3]. 특히, 단섬유 복합소재 사출품의 경우 성형 과정에서 발생하는 수지 유동장에 따라 단섬유의 배향 특성이 결정되며, 이로 인해 사출품 내부에서 부위별로 상이한 이방 물성이 형성될 수 있다. 나아가, 이러한 국부적 이방 물성은 강성, 강도 및 파손 등과 같은 최종 사출품의 기계적 거동 특성에 결정적인 영향을 미칠 수 있다. 이러한 배경으로 인해 단섬유 복합소재 사출품에 대한 구조 설계 과정에서 중요한 고려 사항 중 하나인 단섬유의 배향 특성을 분석하기 위한 다양한 선행 연구가 진행되어 왔다.

사출 성형 과정에서의 단섬유 배향 특성을 수치적으로 모사하기 위해 Jeffery는 뉴턴 유체 내 타원형입자(ellipsoid)의 회전 운동을 기술하는 모델을 제안하였으며[4], 이후 Folgar-Tucker는 섬유-섬유 간의 상호작용에 의한 확산(diffusion) 효과를 추가적으로 고려한 배향 모델을 제안하였다[5]. 또한, Advani-Tucker는 단섬유 배향 분포를 2차 배향 텐서의 형태로 표현함으로써, 3D 공간에서 분포되는 단섬유 배향 특성을 효과적으로 정의하고자 하였다[6].

상기 정의된 배향 텐서들은 사출 성형품 내부의 면내 배향 분포와 함께 두께 방향에 대한 단섬유 배향 특성 변화를 분석할 수 있다는 점에서 의미를 가진다. 통상적인 사출 유동의 경우 금형 인근 영역에서는 높은 전단 변형률의 영향으로 단섬유가 수지 유동 방향과 정렬되는 스킨층이 형성되며, 금형에서 멀어지는 내부 영역에서는 분수 유동(fountain-flow)에 의해 상대적으로 무작위적인 배향 특성을 갖는 코어층이 형성된다[7,8]. 이러한 [스킨-코어-스킨] 형태의 두께 방향 배향 분포는 2차 배향 텐서를 통해 정량적으로 분석될 수 있다. 나아가, 이러한 배향 텐서를 구조 해석 과정에서 반영함으로써 단섬유 복합소재 사출 성형품의 구조

적 거동 특성을 보다 정확하게 예측할 수 있게 된다[9-11].

한편, 단섬유 복합소재 사출 성형품의 구조적 거동을 보다 정확하게 예측하기 위한 방안으로써, 성형 공정 조건에 따른 국부적 이방 물성을 구조 해석 과정에서 반영하기 위한 연구들이 순차적으로 수행되었다[12-15]. Kim 등은 부위별 단섬유 배향 특성 반영 여부에 따른 복합소재 구조물의 거동 특성을 비교/분석함으로써 사출 성형-구조 연계 해석의 필요성을 확인하였다[16]. 또한, Lee 등은 사출 성형-구조 연계 해석을 바탕으로 단섬유 복합소재 적용 범위에 따른 배터리 팩 케이스 구조물의 내충격성 및 경량 특성을 비교/분석하였다[17]. 나아가, Kim 등은 인장 시험을 바탕으로 부위별 단섬유 배향 특성에 따른 이방 물성을 실험적으로 분석하였으며, 해당 배향 특성이 파손 거동 특성에 미치는 영향을 분석하였다[18].

상기 진행된 선행 연구들은 사출 성형 과정에서 도출되는 부위별 단섬유 배향 특성을 구조 해석에서 반영함으로써 해석 결과의 신뢰성 및 정확성이 개선된 솔루션을 제공한다. 하지만, 기존의 사출 성형-구조 연계 해석 방안들은 주로 3D 구조해석 요소를 바탕으로 부위별 단섬유 배향 텐서를 직접 맵핑하는 방식을 적용하고 있어, 이로 인해 설계 과정에서 과도한 전산자원이 요구되는 문제점이 발생할 수 있다. 특히, [스킨-코어-스킨] 형태의 두께 방향 배향 분포를 반영하기 위해서는 두께 방향으로 다수의 요소가 요구되며, 결과적으로 반복 설계 단계에서 급격한 해석 효율성 저하를 유발할 수 있다. 이에 따라, 단섬유 복합소재 사출품에 대한 성형-구조 연계 해석 과정에서 정확성 및 효율성을 동시에 만족시킬 수 있는 개선된 접근 방안이 요구되고 있는 상황이다.

상기 연구 배경에 따라 본 연구에서는 단섬유 복합소재 사출 성형품에 대한 설계 효율성을 향상시키기 위한 방안으로써, 2D Shell 기반 사출 성형-구조 연계 해석 방안을 제안하고자 하였다. 이를 위해 사출 성형에 따라 공간상에서 주어지는 3D 단섬유 배향 특성을 2D Shell 요소의 두께 방향 배향 정보로 변환하는 근사 맵핑 방안을 적용하고자 하였다. 또한, 상기 근사 맵핑을 바탕으로 [스킨-코어-스킨] 형태의 두께 방향 단섬유 배향 분포를 2D Shell 기반 해석 과정에서 고려함으로써, 계산 효율성이 개선된 설계를 제시하고자 하였다. 수치 예제로써 단섬유 복합소재로 제작된 인장 및 굽힘 시편에 대한 구조적 특성 분석을 수행하였으며, 3D 사출 성형-구조 연계 해석 결과와의 비교/분석을 통해 제안된 해석 방안의 타당성을 검증하고자 하였다.

2. 2D Shell 기반 사출 성형-구조 연계 해석

2.1 사출 성형 공정에 따른 단섬유 배향 특성

2.1.1 사출 성형 모델 및 재료

사출 성형 공정 과정에서 발생하는 부위별 단섬유 배향

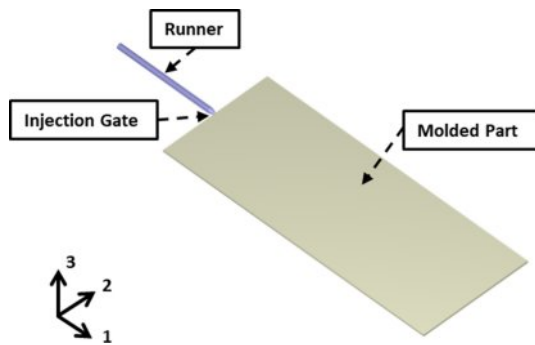


Fig. 1. Rectangular part geometry for injection molding

특성을 분석하기 위해 성형 해석 S/W인 Moldex3D를 활용하여 CAE 성형 해석을 수행하고자 하였다. 해석 모델로써 Fig. 1과 같이 평판의 길이 방향으로 복합소재가 주입되는 500mm*200mm*3mm 크기의 직사각형 평판을 가정하였다. 해당 모델은 소재 유동 방향으로 충분한 길이를 확보하고 있기 때문에 불규칙한 초기 사출 유동을 최소화할 수 있으며, 전단 변형률 구배에 따른 [스킨-코어-스킨] 형태의 두께 방향 단섬유 배향 특성을 보다 명확하게 확인할 수 있다. 또한, 사출 소재로써 Moldex 3D의 소재 D/B에서 제공되는 Solvay사의 PPS+GF(30wt%) 단섬유 복합소재를 고려하였으며, 사출 성형 공정에 따른 소재 유동 및 단섬유 배향 특성을 파악하고자 하였다.

상기 성형 해석 과정에서 면내/두께 방향 단섬유 배향 특성을 모사하기 위해 평균 체적이 1mm³인 요소를 고려하였다. 특히, 금형 벽면 인근에서의 국부적 단섬유 배향 특성을 보다 면밀하게 분석하기 위하여 3Layer BLM 기법이 적용된 이산화 모델을 고려하였다. 성형 해석 시간 및 결과의 수렴성 등을 종합적으로 고려하여 직사각형 평판(Fig. 1)을 총 2,166,971개의 요소로 구성하였으며, 3Layer BLM 기법이 적용된 금형 벽면 인근에서의 요소 분포는 Fig. 2과 같이 주어진다.

또한, 직사각형 평판 제작을 위한 사출 성형 조건으로써 소재 충전 시간은 2sec, 최대 사출 압력 및 용융 온도는 각

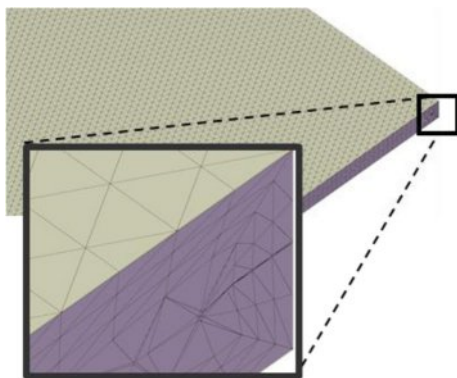


Fig. 2. Discretized model for rectangular part

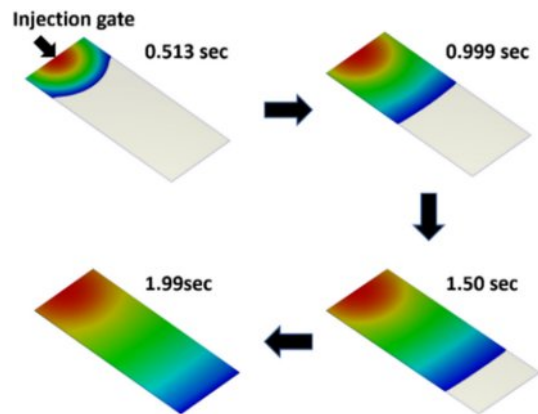


Fig. 3. Filling distribution in the injection molding process

각 150MPa, 324°C로 설정하였으며, 해당 성형 조건에 따른 PPS+GF(30wt%) 복합소재의 사출 유동 특성은 Fig. 3과 같이 주어진다. Fig. 3을 통해 사출 성형품의 형상 및 게이트 위치 등에 따라 소재 유동장이 결정됨을 확인할 수 있으며, 해당 유동장을 바탕으로 사출 성형에 따른 부위별 단섬유 배향 분포를 도출하고자 하였다.

2.1.2 소재 유동에 따른 단섬유 배향 특성

사출 성형 공정에 따른 부위별 단섬유 배향 특성을 수치적으로 모사하기 위한 방안으로써 단위 부피 당 단섬유의 존재 확률을 나타내는 배향 분포 함수가 일반적으로 고려된다. 해당 과정에서 단섬유는 길이 및 직경이 균일한 강체 원통으로 가정되며, 또한 단위 부피 당 단섬유의 개수가 일정하지만 배향 특성은 3차원 공간에서 임의로 주어진다고 가정된다. 상기 가정을 만족시키는 단섬유 배향 특성은 Fig. 4과 같은 구면 좌표계를 통해 정의되며, 이에 대한 수학적 관계식은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$P(\theta_1 < \theta < \theta_1 + d\theta, \phi_1 < \phi < \phi_1 + d\phi) = \psi(\theta_1, \phi_1) \sin\theta_1 d\theta d\phi \quad (1)$$

여기서 $\psi(p)$ 는 단섬유에 대한 확률 분포 함수를 나타낸다.

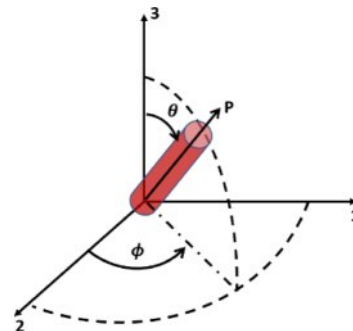


Fig. 4. Coordinate system of fiber distribution function

해당 확률 분포 함수는 식 (2)-(3)과 같은 물리적 대칭성 및 정규화 조건을 만족해야 하며, 식 (4)와 같이 주어지는 시간에 따른 연속 조건 또한 만족해야 하는 특징을 갖는다.

$$\psi(p) = \psi(-p) \quad (2)$$

$$\int_{\theta=0}^{\theta=\pi} \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \psi(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi = \oint \psi(p) dp = 1 \quad (3)$$

$$\frac{D\psi}{Dt} = -\frac{\alpha}{\alpha\theta} (\dot{\theta}\psi) - \frac{1}{\sin\theta} \frac{\alpha}{\alpha\phi} (\dot{\phi}\psi) = -\frac{\alpha}{\alpha p} \cdot (\dot{p}\psi) \quad (4)$$

또한, 상기 배향 분포 함수를 바탕으로 Advani-Tucker는 간소화된 형태의 2차 단섬유 배향 텐서를 제안하였으며, 해당 관계식은 식 (5)와 같이 주어진다[6].

$$a_{ij} = \oint p_i p_j \psi(p) dp \quad (5)$$

2차 단섬유 배향 텐서 a_{ij} 의 대각 성분들은 각 기준 축 방향에 대한 배향 정렬도를 나타내며, 정렬된 정도에 따라 0~1 사이의 값을 가지게 된다.

한편, 소재 유동에 따른 단섬유 배향 특성을 정의하기 위해서는 식 (6)과 같은 2차 단섬유 배향 텐서의 시간적 변화율이 고려되어야 한다. Folgar-Tucker는 Jeffery가 제안한 단일 입자 운동방정식에 섬유-섬유 간의 상호 작용을 나타내는 C_l 계수를 추가적으로 도입함으로써 단일 섬유에 대한 시간적 변화율인 \dot{p} 를 정의하였으며, 해당 관계식은 식 (7)과 같이 주어진다[4,5].

$$\frac{Da_{ij}}{Dt} = \frac{D}{Dt} \oint p_i p_j \psi(p, t) dp \quad (6)$$

$$\dot{p}_i = -\frac{1}{2} \omega_{ij} p_j + \frac{1}{2} \left(\frac{r_e^2 - 1}{r_e^2 + 1} \right) (\dot{\gamma}_{ij} p_j - \dot{\gamma}_{kl} p_k p_l p_j) - C_l \frac{1}{\psi} \frac{\partial \psi}{\partial p} \quad (7)$$

여기서 r_e 는 외형비, $\dot{\gamma}$ 및 ω 은 각각 변형 속도 텐서와 와동 텐서를 의미한다. 또한, 식 (7)에서 첫번째 항은 유체의 강체 회전, 두번째 항은 유체 변형에 따른 단일 섬유의 정렬도, 마지막 항은 섬유-섬유 간의 상호 작용에 따른 단일 섬유의 정렬도를 나타낸다. 나아가, 상기와 같이 정의된 관계식들을 바탕으로 2차 단섬유 배향 텐서인 a_{ij} 의 시간적 변화율은 식 (8)과 같이 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{Da_{ij}}{Dt} &= \oint p_i p_j \left(\frac{\partial \psi}{\partial t} \right) dp = -\oint p_i p_j \left(\frac{\partial}{\partial p} \frac{\partial p_i \psi}{\partial p_i} \right) dp \\ &= \oint (\dot{p}_i p_j + p_i \dot{p}_j) \psi dp \\ &= -\frac{1}{2} (\omega_{ik} a_{kj} - a_{ik} \omega_{kj}) + \frac{1}{2} \left(\frac{r_e^2 - 1}{r_e^2 + 1} \right) (\dot{\gamma}_{ik} a_{kj} + a_{ik} \dot{\gamma}_{kj} \\ &\quad - 2a_{ijkl} \dot{\gamma}_{kl}) + 2C_l \dot{\gamma} (\delta_{ij} - \alpha a_{ij}) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서 α 는 배향 텐서의 차원에 따라 값이 결정된다. 또한, 식 (8)에서 포함되는 4차 배향 텐서(a_{ijkl})를 계산하기 위해 본 연구에서는 IBOF(Invariant Based Optimal Fitting)

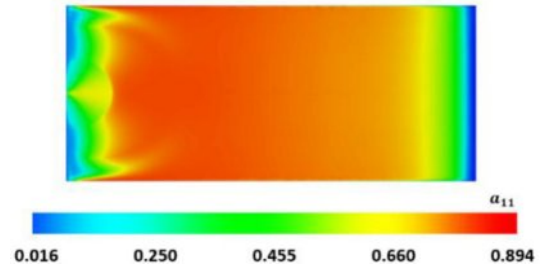


Fig. 5. Short-fiber orientation characteristics in longitudinal direction

기법을 활용하여 폐쇄 근사를 수행하였다. 상기와 같은 지 배방정식을 토대로 도출된 직사각형 평판의 부위별 면내 단섬유 배향 분포는 Fig. 5과 같이 주어진다. a_{11} 성분은 평판의 길이 방향으로의 단섬유 정렬도를 의미하며, 단섬유 배향도가 길이방향과 일치할 경우 1의 값을 가지게 된다. Fig. 5의 결과를 바탕으로 단섬유 복합소재 사출 성형품 내부의 부위별 배향 특성은 성형 과정에서의 복합소재 유동장(Fig. 3)에 의해 결정됨을 확인할 수 있다.

2.2 단섬유 배향 특성에 따른 부위별 이방 물성

사출 성형 공정에 따른 단섬유 복합소재 구조물의 부위별 이방 물성을 구조 설계 과정에서 반영하기 위한 물성 맵핑을 수행하고자 하였다. 이를 위해 멀티스케일 복합소재 물성 예측 프로그램인 Digimat S/W를 바탕으로 단섬유 배향 분포에 따른 부위별 이방 물성을 정의하고자 하였다. 나아가, 면내/두께 방향에 따른 단섬유 배향 특성을 고려함과 동시에 해석 효율성을 향상시키기 위한 방안으로써 3D 단섬유 배향 특성을 2D Shell 요소의 이방 물성으로 맵핑하고자 하였다.

2.2.1 면내/두께 방향 단섬유 배향 특성분석

단섬유 복합소재 사출 성형품에 대한 부위별 배향 특성을 분석하기 위해 사출 평판 내부에서의 ASTM-D638/D790 규격 인장 및 굽힘 시편 가공을 가정하였다. 또한, 평판의 중앙부를 시편 가공 위치로 고려함으로써 균일한 소재 유동이 면내/두께 방향 단섬유 배향 특성에 미치는 영향을 종합적으로 분석하고자 하였다. 평판의 중앙부에서 가공된 인장 및 굽힘 시편의 면내 단섬유 배향 분포는 Fig. 6과 같이 주어지며, 해당 가공 위치에서 각 시편들은 스킨층에서의 단섬유 배향 특성이 모두 길이 방향으로 주어짐을 확인할 수 있다.

나아가, 두께 방향에 대한 배향 특성 변화를 추가적으로 분석하고자 하였으며, 가공된 인장 시편의 면내 중앙 지점에서 두께 방향으로 분포되는 단섬유 배향 분포는 Fig. 7와 같이 주어진다. Fig. 7를 통해 사출 성형품 표면 부위에서는 단섬유 배향 분포가 소재 유동 방향과 정배열되는 경향성

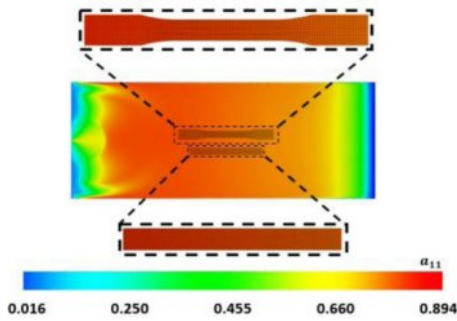


Fig. 6. In-plane short fiber orientation along the longitudinal direction of tensile/bending specimens

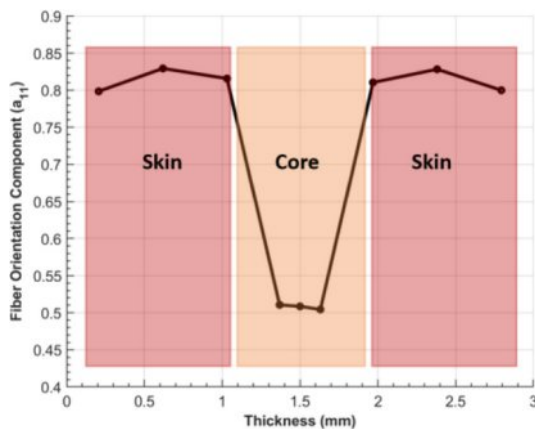


Fig. 7. Through-the-thickness fiber orientation at the center point of the tensile specimen

을 확인할 수 있으며, 이는 서론에서 언급된 금형 인근 영역에서의 높은 전단 변형률에 기인한 결과로 사료된다. 또한, 중립면 인근에서는 상대적으로 무작위 단섬유 배향 특성을 가지며, 결과적으로 [스킨-코어-스킨] 형태의 단섬유 배향 분포로 인해 두께 방향 위치에 따라 물성이 판이해질 수 있음을 확인할 수 있다.

2.2.2 3D 배향 정보 기반 2D Shell 요소 물성 맵핑

사출 성형-구조 연계 해석을 위해서는 성형 해석을 통해 도출된 단섬유 배향 정보를 구조 해석 모델에서 반영하기 위한 물성 맵핑 과정이 요구된다. 이를 위해 본 논문에서는 평균장 균질화 이론 및 역공학 기법을 바탕으로 PPS+GF (30wt%) 복합소재의 단섬유 배향 특성에 따른 등가 이방 물성을 정의하고자 하였으며, 임의 기준축(x축 방향) 방향으로 단섬유가 정렬된 경우에 대한 PPS+GF(30wt%) 복합소재의 평균장 균질화 기반 등가 이방 물성은 Table 1과 같이 주어진다.

또한, 단섬유 배향 특성에 따른 PPS+GF(30wt%) 복합소재의 응력-변형률 선도는 Fig. 8과 같이 주어진다. Fig. 8은 PPS+GF(30wt%) 복합소재에 대한 실험적 데이터에 역공학

Table 1. Equivalent orthotropic material properties of PPS+GF

Material properties		Value	Unit
Young's Modulus	E11	10426	MPa
	E22	4657.2	
	E33	4435.2	
Shear Modulus	G12	1931	
	G13	1568.8	
	G23	1478.8	
Poisson's Ratio	Nu12	0.38679	-
	Nu13	0.33258	
	Nu23	0.46452	
Density		1.5197	g/cm ³

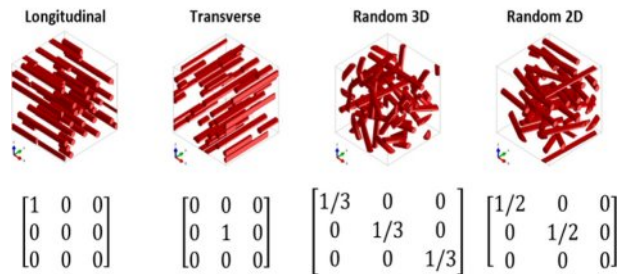
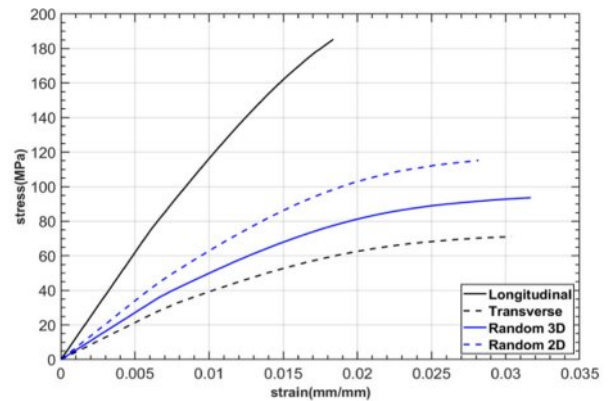


Fig. 8. Stress-Strain curves of PPS+GF with various fiber orientations

을 적용함으로써 도출된 응력-변형률 선도로써, PPS+GF (30wt%) 복합소재의 인장 강도는 단섬유 배향 각도에 따라 최대 2.5배까지 차이가 발생된다는 사실을 확인할 수 있다. 이는 단섬유 복합소재 구조물에 대한 정확한 구조 해석 및 설계를 위해서는 단섬유 배향 특성에 따른 부위별 물성 변화가 반드시 고려되어야 함을 의미하며, 이에 따라 물성 맵핑 과정을 바탕으로 단섬유 배향 특성에 따른 국부적 거동 특성을 구조 해석 과정에서 반영하고자 하였다.

단섬유 배향 특성에 따른 부위별 이방 물성 맵핑 과정은 Digimat Map을 바탕으로 수행되었다. 성형 해석 요소(Donor mesh)의 각 적분점에서 도출된 단섬유 배향 정보를 구조 해

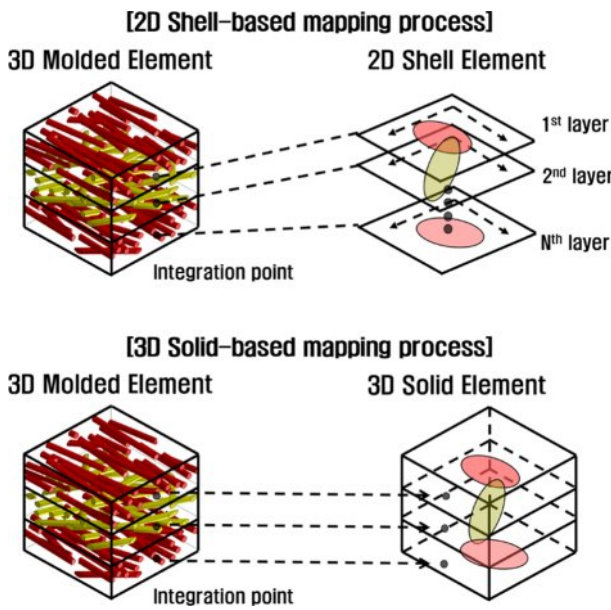


Fig. 9. Mapping of short fiber orientation in 2D/3D structural models

석 요소(Receive mesh)의 대응 위치로 공유함으로써 부위별 이방 물성 맵핑을 수행하고자 하였다. 기존의 사출 성형-구조 연계 해석 관련 선행 연구들은 3D Solid 구조해석 모델을 기반으로 단섬유 배향 텐서를 직접 맵핑하는 방식을 적용해 왔으며, Donor/Receive mesh 간의 동일 위치 적분점을 기준으로 배향 정보가 전달된다. 이러한 접근 방식은 3D 공간에서 분포되는 단섬유 배향 특성에 따른 부위별 이방 물성을 정확하게 반영할 수 있다는 장점이 있지만, Fig. 7과 같은 [스킨-코어-스킨] 형태의 두께 방향 배향 분포 특성을 반영하기 위해서는 요소 수 증가에 따른 과도한 계산 비용 증가를 초래할 수 있다는 한계점이 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 상기 계산 효율성의 한계를 극복하기 위한 방안으로써 2D Shell 기반 사출 성형-구조 연계 해석 방안을 제안하고자 하였다. 2D Shell 모델에 기반한 효율적인 배향 정보 맵핑을 위해 Fig. 9와 같은 layered 2D Shell 구조를 가정하였으며, 각 layer별로 두께 방향 위치가 반영된 배향 정보를 근사 맵핑함으로써 [스킨-코어-스킨] 형태의 두께 방향 배향 분포를 포함하는 3D 단섬유 배향 정보를 2D Shell 구조해석 모델에서 반영하고자 하였다.

또한, [스킨-코어-스킨] 형태의 두께 방향 단섬유 배향 분포를 수치적으로 반영하기 위해서는 최소 3개 이상으로 세분화된 적분점이 요구된다. 이에 따라 3D Solid 기반 사출 성형-구조 연계 해석 과정에서는 상기와 같은 두께 방향 단섬유 배향 분포 및 계산 과정의 효율성 등을 고려하여 두께 방향으로 6개의 요소가 적용된 이산화 모델을 가정하였다. 나아가, 2D Shell 기반 사출 성형-구조 연계 해석 과정에서 3D Solid 모델과의 동일 배향 맵핑 조건을 고려하기 위해 6개의

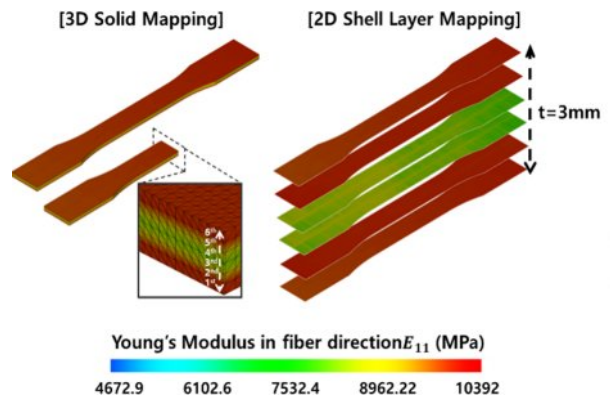


Fig. 10. Distribution of material property (E_{11}) for tensile specimen in 2D Shell and 3D Solid models

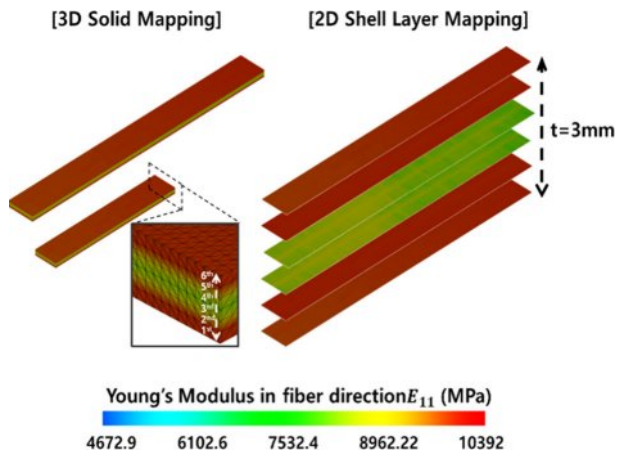


Fig. 11. Distribution of material property (E_{11}) for bending specimen in 2D Shell and 3D Solid models

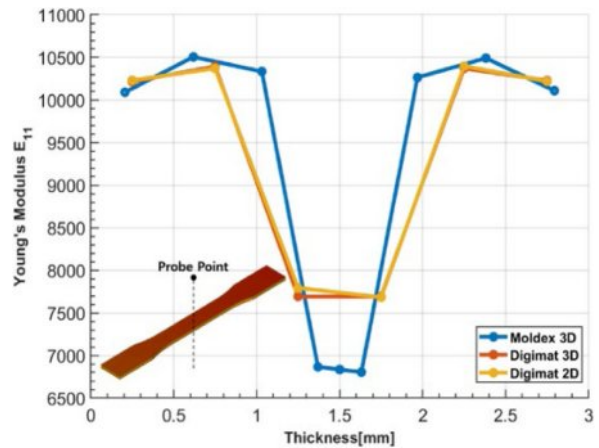


Fig. 12. Distribution of through-the-thickness material properties at the center point of the tensile specimen

layer를 가지는 layered 2D Shell 모델을 가정하였다. Layered 2D Shell 및 3D Solid 모델 적용에 따른 부위별 이방 물성 맵

평 과정의 신뢰성을 검증하기 위해 Fig. 6에서 고려된 인장 및 굽힘 시편에 대한 물성 맵핑을 수행하였으며, 각 시편에 대한 면내 이방 물성 맵핑 결과는 Fig. 10-11과 같이 주어진다. Fig. 10-11에서 도출된 물성은 각 시편의 길이 방향에 대한 강성인 E_{11} 를 나타내며, 해당 결과를 통해 인장 및 굽힘 시편 모두 이방 물성 맵핑 과정에서 Figs. 6-7에서 주어지는 부위별 단섬유 배향 특성이 타당하게 반영되었음을 확인할 수 있다. 또한, layered 2D Shell 모델은 3D Solid 모델과 비교하여 타당한 면내 이방 물성을 도출함을 확인할 수 있다. 나아가, Fig. 10-11의 결과를 바탕으로 각 시편의 국부적 물성이 두께 방향에 따라 변화된다는 사실을 확인하였으며, Fig. 12를 통해 인장 시편 중앙부에서의 두께 방향 위치에 따른 물성 변화 양상을 추가적으로 분석하고자 하였다. 해당 결과를 바탕으로 layered 2D Shell 모델은 [스킨-코어-스킨] 형태로 분포되는 두께 방향 이방 물성을 3D Solid 모델과 동등한 수준으로 반영 가능함을 확인할 수 있다.

2.3 사출 성형-구조 연계 해석

상기 진행된 물성 맵핑 과정을 바탕으로 사출 성형-구조 연계 해석을 수행하고자 하였다. 본 논문에서 수치 예제로써 고려하고 있는 ASTM-D638/D790 규격 인장 및 굽힘 시편의 형상은 Fig. 13과 같으며, 상용 구조 해석 S/W인 ABAQUS를 활용하여 각 시편 가공 위치에서의 단섬유 배향 정보 및 그에 따른 부위별 이방 물성이 반영된 구조적 거동 특성을 분석하였다.

사출 성형-구조 연계 해석 과정에서 해석 결과의 수렴성 등을 확보하기 위한 이산화 모델을 고려하였으며, 2D Shell 및 3D Solid 이산화 모델에 대한 요소 정보는 Table 2와 같이 주어진다. 또한, 해당 이산화 모델에서 면내/두께 방향 배향 분포에 따른 이방 물성을 정확하게 반영하기 위해 두께 방향으로 6개의 요소가 적용된 3D Solid 모델 및 6-layered

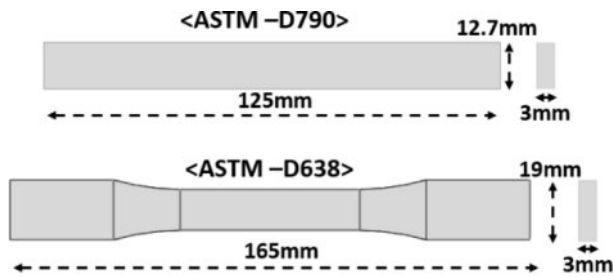


Fig. 13. Geometry of the tensile and bending specimens

Table 2. Type/number of element of the 2D/3D discretized model

Analysis type	# of 2D Elements (Element Type)	# of 3D Elements (Element Type)
Tensile Analysis	10956(S4R)	65736(C3D8R)
Bending Analysis	6250(S4R)	37500(C3D8R)

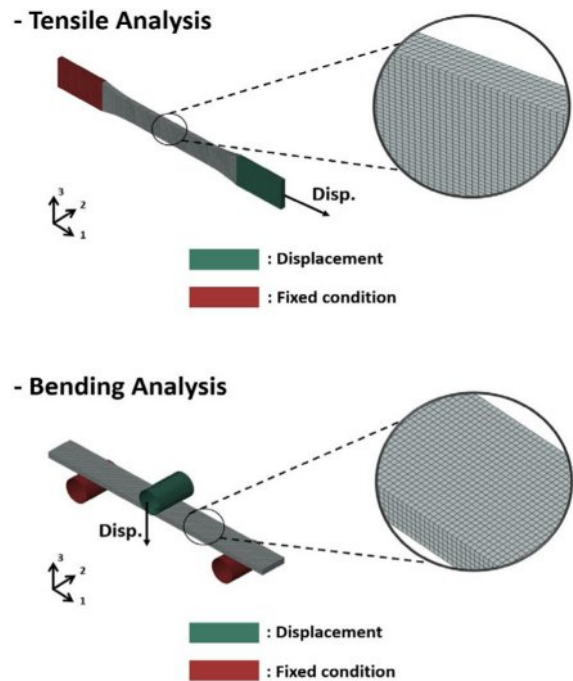


Fig. 14. Boundary conditions of the tensile and bending specimens

2D Shell 모델을 고려하였다.

또한, 인장 및 굽힘 시편의 시험적 환경을 반영하여 대변형 거동 특성을 분석하고자 하였으며, 해석 과정에서의 수렴 안정성을 고려하여 Fig. 14와 같은 경계/하중 조건을 바탕으로 각 시편에 대한 동적 구조해석(explicit dynamic analysis)을 수행하였다. 인장 및 굽힘 시편에서 각각 5mm, 10mm의 변위 경계 조건을 고려하였으며, Mass scaling 기법을 적용함으로써 효율적인 동적 거동 예측을 수행하고자 하였다.

3. 2D/3D 사출 성형-구조 연계 해석 결과

각 시편에 대한 면내/두께 방향 응력 분포 및 반력 특성 등을 종합적으로 비교/분석함으로써 2D Shell 기반 사출 성형-구조 연계 해석 방안의 타당성을 검증하고자 하였다. 먼저 동적 구조해석 과정에서 고려된 Mass scaling 기법의 타당성을 검증하기 위해, Figs. 15-16와 같이 각 해석 과정에서 발생하는 내부 변형 에너지에 대한 운동 에너지의 비율을 비교/분석하고자 하였다. 또한, 각 해석 과정에서 발생하는 총 에너지 중 내부 변형 에너지의 비율은 Table 3과 같이 주어진다. Table 3의 결과를 통해 본 논문에서 고려되는 수치 예제는 준정적 상태로 가정될 수 있으며, 이에 따라 Mass scaling 기법을 타당하게 적용할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 17 및 Fig. 18은 3D Solid 기반 사출 성형-구조 연계 해석을 통해 도출된 인장 및 굽힘 시편의 von-Mises 응력 분

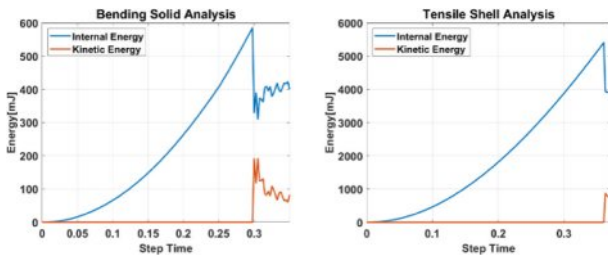


Fig. 15. 3D Solid Bending/Tensile Internal Energy and Kinetic Energy

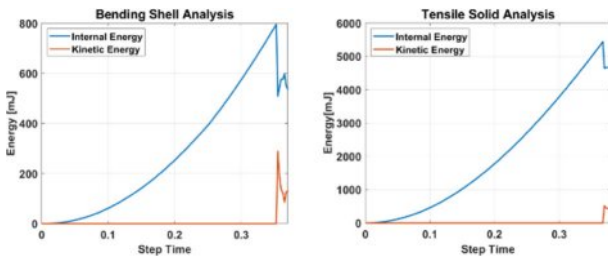


Fig. 16. 2D Shell Bending/Tensile Internal Energy and Kinetic Energy

Table 3. Proportion of internal energy in each analysis model

Analysis type	2D Shell Tensile	3D Solid Tensile	2D Shell Bending	3DSolid Bending
Proportion of Internal energy(%)	99.98	99.98	99.54	99.53

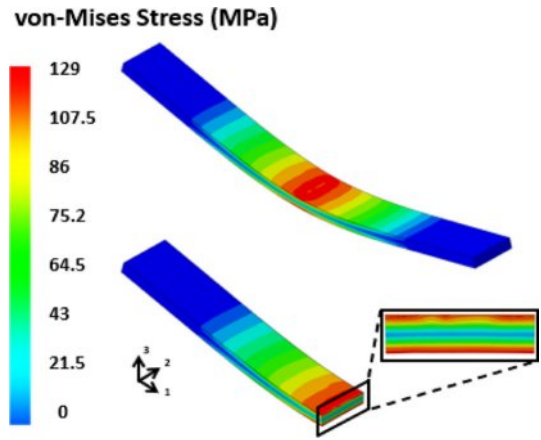


Fig. 18. Distribution of von-Mises stress: 3D bending analysis

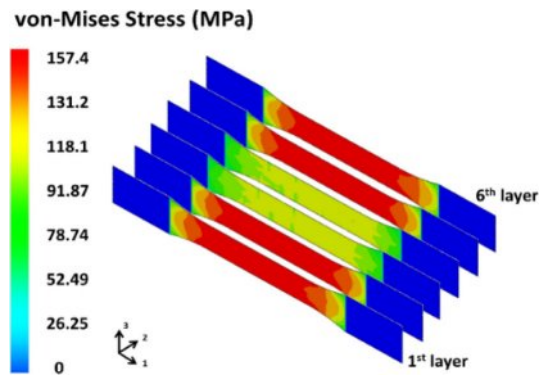


Fig. 19. Layered distribution of von-Mises stress: 2D tensile analysis

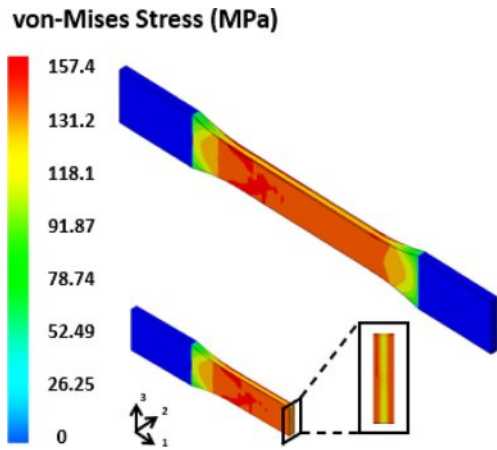


Fig. 17. Distribution of von-Mises stress: 3D tensile analysis

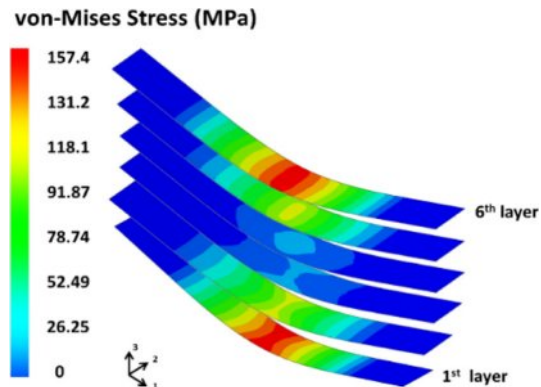


Fig. 20. Layered distribution of von-Mises stress: 2D bending analysis

포를 나타낸다. 해당 결과들을 통해 인장/굽힘 시편 내부의 단섬유 배향 특성에 따른 부위별 이방 물성이 3D Solid 구조해석 모델에서 효과적으로 반영됨을 확인할 수 있다. 특히, 단섬유 배향 특성이 시편의 길이 방향과 일치하는 스킨층에서는 상대적으로 높은 응력값이 발생하는 반면, 단섬유가 무작위로 배향되는 코어층에서는 낮은 응력 분포

가 발생됨을 확인할 수 있다. 이는 사출 성형 공정에 따라 발생되는 [스킨-코어-스킨] 형태의 두께 방향 이방 물성이 구조 해석 과정에서 명확하게 고려될 수 있으며, 결과적으로 3D Solid 기반 사출 성형-구조 연계 해석 방안이 단섬유 복합소재 구조물에 대한 설계 과정에서 보다 정확한 솔루션을 제공함을 의미한다.

또한, Fig. 19 및 Fig. 20은 2D Shell 기반 사출 성형-구조 연계 해석을 바탕으로 도출된 von-Mises 응력 분포를 나타내며, 두께 방향 위치에 따라 분할된 각 layer에서의 응력 분포 변화 양상을 분석하고자 하였다. 해당 결과들을 바탕으로 2D Shell 기반 사출 성형-구조 연계 해석 방안 또한 단섬유 배향 특성에 따른 부위별 이방 물성을 구조 해석 과정에서 효과적으로 반영할 수 있으며, 3D Solid 기반 사출 성형-구조 연계 해석 결과와 비교하여 타당한 면내 응력 분포 결과를 제공한다는 사실을 확인할 수 있다. 나아가, layered 2D Shell 모델 적용을 바탕으로 두께 방향 위치 정보에 따른 layer별 이방 물성을 맵핑함으로써, 2D Shell 구조해석 모델에서 [스킨-코어-스킨] 형태의 두께 방향 이방 물성 분포를 효과적으로 반영할 수 있음을 확인하였다.

상기와 같이 언급된 [스킨-코어-스킨] 형태의 두께 방향 이방 물성 반영 여부를 추가적으로 검증하기 위해 각 시편의 특정 지점에서의 두께 방향 응력 분포를 비교/분석하고

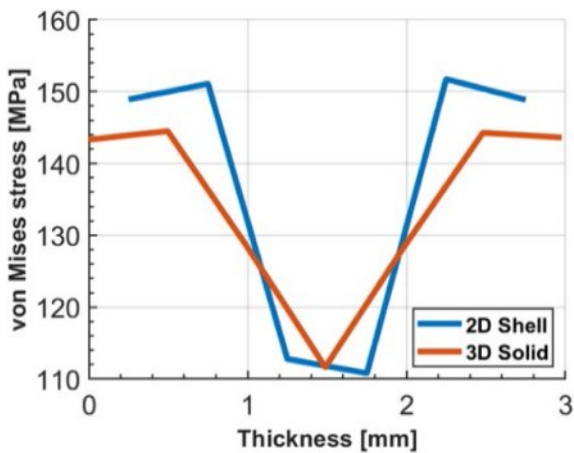


Fig. 21. Distribution of through-the-thickness von-Mises stresses at the center point of the tensile specimen

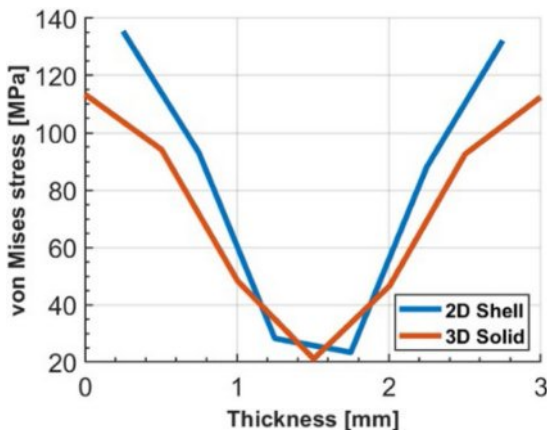


Fig. 22. Distribution of through-the-thickness von-Mises stresses at the center point of the bending specimen

자 하였다. Fig. 21 및 Fig. 22은 인장 및 굽힘 시편의 중앙부를 기준으로 도출된 두께 방향 응력 분포 결과를 나타낸다. 인장 거동의 경우 시편 전체에 균일한 면내 변형이 작용하며, 이에 따라 동일 면내 위치에서의 두께 방향 응력 분포는 국부 강성에 비례한다. 따라서 하중 방향으로 단섬유가 정렬된 스킨층에서 상대적으로 강한 응력이 발생되며, 무작위 배향을 갖는 코어층에서는 낮은 응력이 분포되는 특성을 확인할 수 있다. 반면, 굽힘 거동에서는 중립면에서 멀어질수록 응력이 증가한다는 특성과 함께 스킨층에서의 고강성의 영향으로 인해 스킨에 응력이 집중되며, 또한 인장 거동과 비교하여 스킨/코어 층간의 응력 차이가 증가함을 확인할 수 있다.

또한, Fig. 21 및 Fig. 22의 결과들을 통해 2D Shell 기반 사출 성형-구조 연계 해석 방안은 3D 공간상에서 분포되는 단섬유 배향 특성의 영향이 타당하게 반영되었으며, 단섬유 복합소재 구조물에 대한 보다 효율적인 설계방안이 될 수 있음을 확인하였다.

나아가, 2D Shell 및 3D Solid 기반 사출 성형-구조 연계 해석 방안을 통해 도출된 변위-반력 선도를 바탕으로 각 시편에 대한 거시적 거동 특성을 비교/분석하고자 하였다. 해당 해석 과정에서 식 (9)와 같이 주어지는 Tsai-Hill 3D transversely isotropic strain을 파손 지표로써 적용하였다. 인장 시편에 대한 변위-반력 선도는 Fig. 23과 같이 주어지며, 각 해석 방안들이 매우 유사한 거시적 거동 특성을 나타냄을 확인할 수 있다. 또한, 식 (9)와 같은 파손 지표를 기준으로 도출된 인장 시편 파단 시점에서의 최대 반력은 각각 약 5200N(3D Solid) 및 5300N(2D Shell)이며, 제안된 2D Shell 기반 해석 방안은 3D Solid 모델과 비교하여 약 1.9%의 반력 수치 오차가 발생됨을 확인하였다. 이는 인장 시편의 경우 변형 측정 영역에서 별도의 외부 접촉이 없는 순수 면내 응력이 지배적으로 작용하며, 이에 따라 평면 응력이 가정되는 2D Shell 해석 모델 또한 높은 정확도를 제공하는 것으로 판단된다. 반면, Fig. 24과 같이 주어지는 3점 굽힘 시

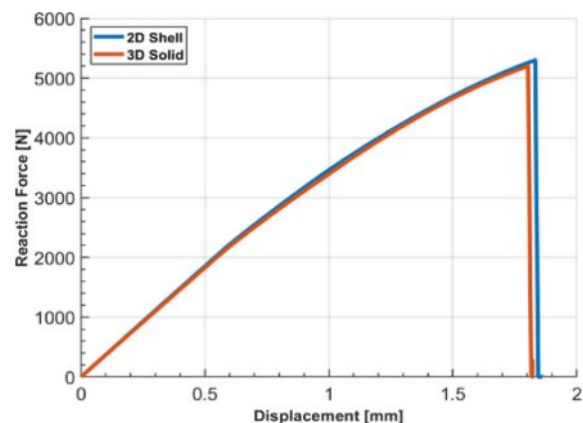


Fig. 23. Displacement-reaction force curve of the tensile specimen

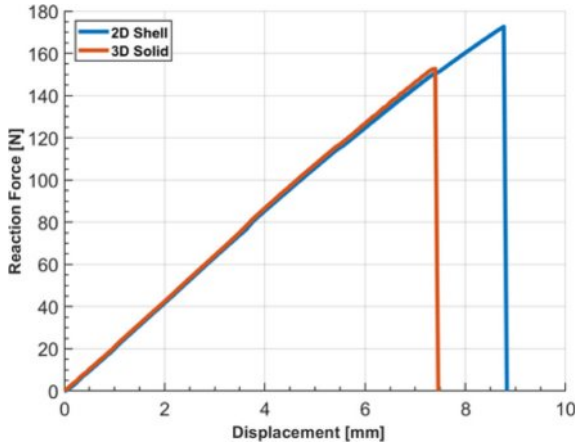


Fig. 24. Displacement-reaction force curve of the bending specimen

편에 대한 변위-반력 선도의 경우 반력 증가 양상은 매우 유사하지만, 2D Shell 및 3D Solid 기반 해석 방안을 통해 도출된 굽힘 시편의 최대 반력은 각각 약 172.7N 및 152.7N로써 약 13%의 반력 수치 오차를 나타냄을 확인할 수 있다. 해당 오차의 원인은 3점 굽힘 해석 시 지그와 굽힘 시편의 접촉부에서 발생하는 국부적인 횡방향 수직 변형률에 의한 것으로 사료된다. 3D Solid 기반 해석의 경우 3차원 구성 방정식을 가정함에 따라 지그 접촉 부위에서 발생하는 횡방향 수직 변형률이 파손 지표에 직접적으로 반영된다. 반면, 2D Shell 기반 해석은 평면 응력 가정을 바탕으로 지그 접촉 부위에서의 국부적인 횡방향 수직 변형률이 간접적으로 반영되며, 이로 인해 3D Solid 기반 해석 대비 지연 파손이 발생하는 것으로 판단된다.

$$FI = \sqrt{F_A(\varepsilon)}$$

$$F_A(\varepsilon) = \frac{\varepsilon_{11}^2}{X^2} - \frac{\varepsilon(\varepsilon + \varepsilon)}{X^2} + \frac{\varepsilon_{22}^2 + \varepsilon_{33}^2}{Y^2} + \left(\frac{1}{X^2} - \frac{2}{Y^2}\right)\varepsilon_{22}\varepsilon_{33} + \frac{(2\varepsilon_{12})^2 + (2\varepsilon_{13})^2}{S^2} + \left(\frac{1}{Y^2} - \frac{1}{4X^2}\right)(2\varepsilon_{23})^2 \quad (9)$$

이에 대한 수치적 분석을 위해 Fig. 25를 통해 3D Solid 및 2D Shell 기반 해석 시 지그 접촉 부위에서 발생하는 횡방향 수직 변형률을 비교/분석하고자 하였다. 이를 통해 2D Shell 기반 해석 방안에서는 지그 접촉에 의해 굽힘 시편 내부에 발생하는 국부적 횡방향 수직 변형률이 과소 평가됨을 확인할 수 있다. 또한, 이러한 국부적 횡방향 수직 변형률 분포의 차이는 파손 지수에 직접적인 영향을 미칠 수 있으며(Fig. 26), 결과적으로 2D Shell 기반 해석 방안의 지연 파손을 유발하는 것으로 판단된다.

나아가, 제안된 2D Shell 기반 해석 방안의 계산 효율성을 검증하기 위해 각 해석 방안에 따른 계산 소요 시간을 Table 4를 통해 비교/분석하고자 하였다. Table 4의 결과를 바탕으로 2D Shell 기반 해석 방안은 인장 해석의 경우 약 34.5%,

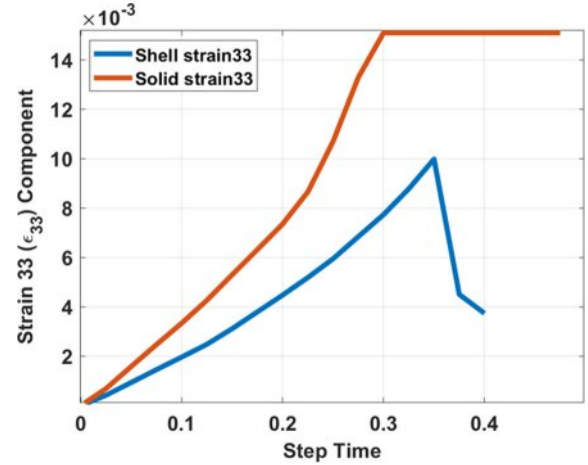


Fig. 25. Comparison of transverse normal strain (ε_{33}) at the Jig contact area

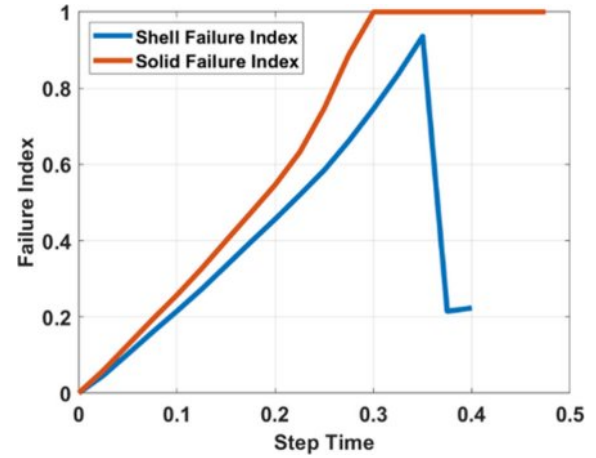


Fig. 26. Comparison of failure index at the Jig contact area

Table 4. Computational efficiency of each analysis model

Analysis type	2D Shell model	3D Solid model	Computational Reduction rate (%)
Tensile Analysis	10h 10min	15h 32min	34.5
Bending Analysis	15h 40min	19h 40min	20.3

굽힘 해석의 경우 약 20.3% 수준으로 향상된 계산 효율성을 제공함을 확인할 수 있다. 특히, 보다 복잡한 형상을 가지는 단섬유 복합소재 구조물이 고려되는 경우, 전산 자원의 측면에서 2D Shell 기반 해석 방안의 장점이 더욱 명확해질 것으로 판단된다. 상기와 같은 수치예제 결과를 바탕으로 2D Shell 기반 사출 성형-구조 연계 해석 방안은 단섬유 복합소재 적용 구조물의 거시적 거동 예측 과정에서 높은 정확도를 유지함과 동시에 차원 축소 모델을 바탕으로 향상된 계산 효율성을 제공함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 사출 성형 과정에서 도출되는 3D 단섬유 배향 특성을 구조 해석 과정에서 반영함과 동시에 계산 효율성을 향상시키기 위한 방안으로써, 차원이 축소된 2D Shell 기반 사출 성형-구조 연계 해석 방안을 제안하였다. layered 2D Shell 모델 도입을 통해 각 layer별 두께 방향 위치 정보가 반영된 배향 특성을 근사 맵핑함으로써, 단섬유 복합소재 사출 성형품 내부에서의 [스킨-코어-스킨] 형태의 두께 방향 이방 물성을 2D Shell 모델에서 효과적으로 고려하고자 하였다.

제안된 해석 방안의 타당성을 검증하기 위한 수치 예제로써 ASTM-D638/D790 규격 인장 및 굽힘 시편에 대한 성형-구조 연계 해석을 수행하였다. 관련 수치 예제 결과 분석을 바탕으로 2D Shell 기반 사출 성형-구조 연계 해석 방안은 면내 및 두께 방향 단섬유 배향 특성에 따른 구조물의 국부적 거동 특성을 효과적으로 예측할 수 있으며, 동시에 2D Shell 모델을 활용함으로써 계산 비용을 절감할 수 있다는 사실을 확인하였다. 특히, 상대적으로 두께가 얇은 단섬유 복합소재 사출 성형품에 대한 반복 설계 과정에서 유용한 해석 방안으로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 향후 추가 연구로써 보다 복잡한 형상을 가진 단섬유 복합소재 구조물에 대한 해석적 분석을 바탕으로 제안된 해석 방안의 적용 범위를 확대시킬 수 있을 것으로 판단된다. 나아가, 사출 성형품 내부에서 연속적으로 변화하는 두께 방향 단섬유 배향 특성을 FGM(Functionally Graded Material) 모델로 근사화한다면 성형-구조 연계 해석 방안의 효율성을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 판단되며, 이를 바탕으로 향후 다양한 단섬유 복합소재 구조물에 대한 최적 두께 및 배향 분포 역설계 등과 같은 다양한 설계 솔루션을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2022-NR072163, RS-2024-00356107). 또한, 이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구이며(P0024166, 2025년 지역혁신클러스터육성사업), 2025년도 교육부 및 경상북도의 재원으로 경북RISE 센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)-(지역성장 혁신LAB)의 결과임 (2025-rise-15-105).

REFERENCES

1. Papathanasiou, T.D., and Guell, D.C., "Flow-Induced Alignment in Composite Materials," Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 1997, pp. 112-120.
2. Lee, M.H., and Lee, K.J., "Numerical Prediction of Short Fiber Orientation in Injection Molding Process," *The Korea Journal of Rheology*, Vol. 4, No. 2, 1992, pp. 138-147.
3. Park, S.S., Yoon, S.U., Jo, S.H., and Kim, E.G., "A Study on Fiber Content Distribution of Injection Molded Fiber-Reinforced Polymeric Composites," *Composites Research*, Vol. 10, No. 1, 1997, pp. 83-89.
4. Jeffery, G.B., "The Motion of Ellipsoidal Particles Immersed in a Viscous Fluid," *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 102, No. 715, 1922, pp. 161-179.
5. Folgar, F., and Tucker, C.L., "Orientation Behavior of Fibers in Concentrated Suspensions," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 3, No. 2, 1984, pp. 98-119.
6. Advani, S.G., and Tucker III, C.L., "The Use of Tensor to Describe and Predict Fiber Orientation in Short Fiber Composites," *Journal of Rheology*, Vol. 31, No. 8, 1987, pp. 751-784.
7. Bay, R.S., and Tucker III, C.L., "Fiber Orientation in Simple Injection Moldings. Part I: Theory and Numerical Results," *Polymer Composites*, Vol. 13, No. 4, 1992, pp. 317-331.
8. Bay, R.S., and Tucker III, C.L., "Fiber Orientation in Simple Injection Moldings. Part II: Experimental Results," *Polymer Composites*, Vol. 13, No. 4, 1992, pp. 332-341.
9. Tseng, H.C., Chang, R.Y., and Hsu, C.H., "The use of shear-rate-dependent parameters to improve fiber orientation predictions for injection molded fiber composites," *Composites Part A*, Vol. 104, 2018, pp. 81-88.
10. Gupta, M., and Wang, K.K., "Fiber Orientation and Mechanical Properties of Short-Fiber-Reinforced Injection-Molded Composites: Simulated and Experimental Results," *Polymer Composites*, Vol. 14, No. 5, 1993, pp. 367-382.
11. Lee, S.W., and Youn, J.R., "Effects of Compressibility of Polymer Melt on Fiber Orientation and Mechanical Properties of Short Fiber Reinforced Composites," *Composites Research*, Vol. 11, No. 4, 1998, pp. 43-54.
12. Kang, T.Y., An, H.S., Chun, H.J., and Park, J.C., "Fatigue Behavior of Composites with Different Fiber Orientation," *Composites Research*, Vol. 34, No. 2, 2021, pp. 77-81.
13. Mortazavian, S., and Fatemi, A., "Effects of Fiber Orientation and Anisotropy on Tensile Strength and Elastic Modulus of Short Fiber Reinforced Polymer Composites," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 72, 2015, pp. 116-129.
14. Bernasconi, A., Davoli, P., Basile, A., and Filippis, A., "Effect of Fiber Orientation on the Fatigue Behavior of a Short Glass Fiber Reinforced Polyamide-6," *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, No. 2, 2007, pp. 199-208.
15. Park, Y.B., Yang, H.J., Kweon, J.H., Choi, J.H., and Cho, H.I., "Failure of Composite Sandwich Joints under Pull-out Loading," *Composites Research*, Vol. 24, No. 1, 2011, pp. 17-23.
16. Kim, Y.M., and Kim, Y.H., "Coupled Analysis with Digimat for Realizing the Mechanical Behavior of Glass Fiber Reinforced Plastics," *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 32, No. 6, 2019, pp. 349-357.
17. Lee, G.H., Kim, H.W., Kim, D.H., Chae, B.M., Kim, J.M., Seol, Y.H., Jang, D.Y., Kim, Y.I., Lee, H.Y., Moon, K.H., Ko, K.U., Lee,

Y.M., and Han, J.W., "Injection Molding-Structural Coupled Analysis for High-strength/Lightweight Design of EV Battery Pack Case made by Short-fiber Reinforced Composites," *Composites Research*, Vol. 38, No. 4, 2025, pp. 448-457.

18. Kim, Y.M., and Kim, Y.H., "A Study on the Fatigue Analysis of

Glass Fiber Reinforced Plastics with Linear and Nonlinear Multi-Scale Material Modeling," *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 33, No. 2, 2020, pp. 81-93.