

## 막-굽힘 분리 모델을 적용한 열가소성 복합재의 유한요소법 기반 편향 인장 주름 해석

나희성<sup>\*,\*\*</sup> · 김솔미<sup>\*,\*\*,\*</sup> · 김동협<sup>\*\*\*</sup> · 김상우<sup>\*,\*\*,\*</sup>

### Finite Element Analysis of Wrinkling in a Bias-Extension Test of CF RTP using Membrane-Bending Decoupled Model

H. Na<sup>\*,\*\*</sup>, S. Kim<sup>\*,\*\*,\*</sup>, D.H. Kim<sup>\*\*\*</sup>, S.W. Kim<sup>\*,\*\*,\*</sup>

**ABSTRACT:** This paper numerically reproduces wrinkling of a plain-weave CF RTP laminate under a bias-extension test performed in the commercial finite element analysis (FEA) software, ABAQUS/Explicit, with user-defined material subroutine (VUMAT), implementing a shear angle based nonlinear shear law. Two finite element models of a coupled model where bending stiffness is derived from membrane stiffness, and a decoupled model that separates membrane and bending responses were compared. While both models showed similar shear-angle distributions and predicted wrinkle initiation in the same shear-concentrated regions, their wrinkle growth differed markedly: the coupled model exhibited abrupt, unstable out-of-plane growth, whereas the decoupled model showed earlier and more gradual accumulation. The results emphasize that decoupling the intrinsically low bending stiffness of woven fabrics is essential for accurate wrinkle prediction.

**초 록:** 본 논문에서는 유한요소해석을 기반으로 직조 탄소섬유 강화 열가소성 복합재(CF RTP)의 편향 인장시험 (bias extension)에서 발생하는 주름(wrinkling) 거동을 수치적으로 재현하고, 막-굽힘 거동의 결합 방식이 주름의 크기와 성장 양상에 미치는 영향을 정량적으로 규명한다. 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS와 사용자 재료 정의 부 프로그램(VUMAT)을 연계하여, 전단각에 따른 비선형 전단 구성식을 해석 중 실시간으로 갱신하여 반영하였다. 막-굽힘 결합의 영향을 평가하기 위해 굽힘 강성이 막 강성으로부터 산정되는 연계 모델과 막 거동과 굽힘 거동을 분리한 모델에 대하여 해석한 결과, 두 모델은 전단각 분포가 유사하여 주름 발생 위치가 전단 변형 집중 영역과 대응하였으나, 주름 형상과 성장 양상은 굽힘 거동의 분리 여부에 따라 유의미하게 달라졌다. 막-굽힘 연계 모델은 일정 시험 이후 주름 진폭이 급격히 증가하였다가 감소하는 불안정한 성장 거동을 보인 반면, 막-굽힘 분리 모델은 상대적으로 이른 시점부터 주름 진폭이 완만하게 누적되는 성장 거동을 보였다. 본 연구는 주름을 정밀하게 예측하기 위해서 실제 직물의 낮은 굽힘 강성과 막 강성 분리에 대한 필요성을 분석하며 주름 해석 기법 정립에 활용될 수 있다.

**Key Words:** 탄소섬유 강화 열가소성 복합재(Carbon fiber reinforced thermoplastic, CF RTP), 직조(Woven), 주름(Wrinkling), 유한요소 해석(Finite element analysis, FEA)

Received 17 February 2026, received in revised form 24 March 2026, accepted 6 April 2026

\*Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

\*\*Department of Smart Air Mobility, Korea Aerospace University

\*\*\*Research Institute for Aerospace Engineering and Technology, Korea Aerospace University

\*\*\*\*Department of Aeronautical and Astronautical Engineering, Korea Aerospace University

†Corresponding author (E-mail: [swkim@kau.ac.kr](mailto:swkim@kau.ac.kr))

## 1. 서 론

탄소섬유 강화 열가소성 복합재(carbon fiber reinforced thermoplastic, CFRTP)는 높은 비강도와 비강성을 가질 뿐만 아니라, 기존 열경화성 복합재 대비 우수한 충격 저항성, 재활용성, 그리고 짧은 성형 사이클 시간을 장점으로 갖는다[1,2]. 이러한 특성으로 인해 최근 자동차와 항공우주 산업에서는 경량화와 대량 생산성을 동시에 만족시킬 수 있는 핵심 소재로 CFRTP를 적극적으로 도입하고 있다[1]. 그러나 열성형(thermoforming) 공정 중 복잡한 형상을 구현할 때 섬유의 비신장성과 수지의 유동성 차이로 인해 주름(wrinkling)과 같은 성형 결함이 빈번하게 발생하는 한계가 있다[3]. 특히 직조 CFRTP는 열성형 공정 중 금형에 의한 인장으로 전단 변형이 발생하며, 이는 공정유도 변형을 발생시킨다[4]. 그중 주름(wrinkle)은 성형 중 직조 복합재의 면외(out-of-plane) 방향으로 발생하는 변형으로 섬유 다발이 압축되면서 발생하는 국부적인 직물의 두께 증가로 인해 형성된다[5-8]. 이는 최종 성형품의 구조적 성능과 형상 정밀도를 저하시킬 뿐만 아니라, 층간 박리, 수지 파괴, 섬유 좌굴 등과 같은 부가적인 결함을 초래한다[9,10]. 따라서 CFRTP의 주름 발생 메커니즘을 사전에 규명하여 공정 신뢰성을 확보하고, 이를 구조 설계에 반영해야 한다.

직조 복합재 성형 해석의 초기 연구들은 섬유의 높은 인장 강성을 고려하여 직물의 굽힘 저항을 무시하는 막(membrane) 이론을 적용하거나, 주로 면내(in-plane) 전단 거동을 중심으로 변형을 예측하였다[11,12]. 이러한 접근은 전단 각도 분포를 기반으로 주름이 발생할 가능성이 높은 위치(wrinkling onset)를 추정하는 데에는 유효하다[12]. 그러나 실제 직물은 섬유 간의 상대적 미끄러짐 등으로 인해 굽힘 강성이 인장 강성에 비해 매우 낮고 독립적인 특성을 가지기 때문에 굽힘 거동을 인장 특성에 종속된 값으로 가정할 경우 주름 형상의 크기와 성장 양상을 정량적으로 구현하는 데에는 한계가 있다[13,14]. 특히 실제 CFRTP 성형 공정에서는 면내 막 거동과 면외 굽힘 거동이 복합적으로 나타나지만, 열가소성 프리프레그의 굽힘강성은 섬유 슬립, 토우 좌굴 등의 영향으로 섬유의 막 강성과 직접적으로 연계되지 않는다. 인장 물성으로부터 고전 쉘/빔 이론을 적용해 굽힘 강성을 평가할 경우, 실험 대비 굽힘 응답이 비현실적으로 평가될 수 있다. 따라서 주름의 위치뿐만 아니라 형상과 성장 양상을 정밀하게 예측하기 위해서는 막과 굽힘 거동을 동시에 고려하되, 두 기여를 독립적으로 제어할 수 있는 해석 기법이 요구된다[13,15].

본 논문은 직조(woven) CFRTP의 열성형 공정 중 발생하는 주름을 예측하기 위한 기초 연구로서 편향 인장시험(bias extension test) 해석을 통해 주름 발생 거동을 분석한다. 이를 위해 유한요소해석(finite element analysis, FEA)과 사용자 서브루틴을 연계하여 재료의 면내 전단과 면외 굽힘 거

동을 고려한 해석 모델을 구축한다. 또한 막 거동과 굽힘 거동의 분리 모델링 기법을 적용하고, 굽힘 강성의 정의 방식에 따른 비교 해석을 수행함으로써 제안된 접근법의 타당성을 검증한다. 이를 통해 굽힘 거동의 분리가 주름 예측 정밀도에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

## 2. 주름 해석

### 2.1 재료 거동

직조 복합재에 편향 인장 하중 작용 시 섬유의 길이 변화는 거의 발생하지 않으며, 섬유 다발이 회전하면서 경사(warp)와 위사(weft) 사이 각도가 감소함에 따라 전단각(shear angle)이 증가한다. Fig. 1은 직조 복합재의 편향 인장시험에서 전단각의 변화와 이에 따른 영역별 주요 변형 거동을 보여준다[16].

Fig. 1과 같이, 편향 인장으로 인해 변형된 직조 복합재는 변형 특성에 따라 크게 세 영역(A, B, C)으로 구분하여 정의할 수 있다[17].

- A: 섬유 방향의 순수 인장이 지배적인 영역
- B: 인장과 전단이 복합적으로 작용하는 영역
- C: 전단 변형이 지배적인 영역

식 (1)은 직조 복합재의 변형 전후 경사와 위사 섬유 다발 간 교차각의 변화를 기반으로 전단각( $\gamma$ )을 정의한 식이다.

$$\gamma = \theta_i - \theta_f \quad (1)$$

여기서  $\theta_i$ 는 경사와 위사 섬유 다발 사이의 초기 교차각,  $\theta_f$ 는 변형 후 교차각을 의미하며, 직조 복합재에서 경사와 위사는 초기에 직교하므로  $\theta_i$ 는  $90^\circ$ 이다. 전단 변형률은 전단각의 변화로 표현되며, 이를 통해 CFRTP의 면내 전단 거동을 나타낼 수 있다. Fig. 2는 편향 인장시험을 통해 도출되는 전단력-전단각 곡선을 보여준다.

전단 잠김각은 직물 구조에서 전단 변형이 기하학적으

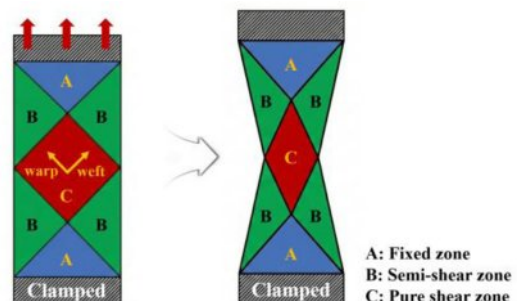


Fig. 1. Shear angle evolution and deformation behavior in bias tensile test of woven composites [16]

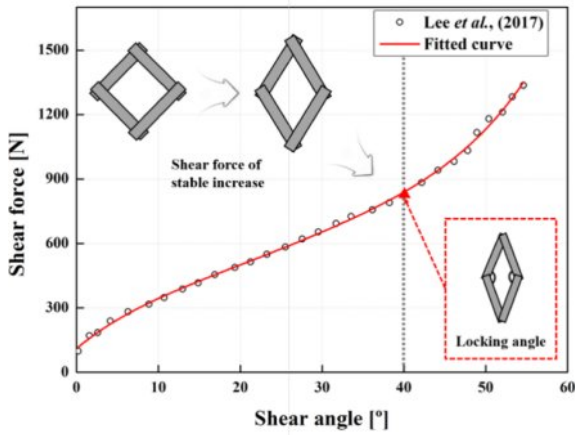


Fig. 2. Shear force–Shear angle curve of woven composites during bias extension [18]

로 제한되기 시작하는 임계 전단각을 의미한다. Fig. 2와 같이 전단력이 일정 구간에서 선형적으로 증가하다가 전단 잠김각 이후 비선형적으로 급증하는 경향이 나타난다.

본 연구에서는 전단각을 상태 변수로 정의하는 비선형 전단 모델을 적용하였으며, PEEK 수지의 용융점인 343°C를 초과하는 온도인 360°C 조건의 재료 물성이 적용된 직조 CF/PEEK를 사용하였다[16]. 식 (2)는 Zhihui Jiao 등[16]이 편향 인장시험에서 측정된 전단각에 따른 전단력 데이터를 기반으로 Harrison 등[19]의 정규화 절차를 거쳐 도출한 전단각-전단력 근사 경험식이다.

$$F_{\text{shear}}(\gamma) = a_1 \cdot \gamma + a_2 \cdot \gamma^2 + a_3 \cdot \gamma^3 + a_4 \cdot \gamma^4 + a_5 \cdot \gamma^5 + a_6 \cdot \gamma^6 + a_7 \cdot \gamma^7 \quad (2)$$

여기서  $F_{\text{shear}}$ 는 정규화된 면내 전단력,  $a_n$ ( $n = 1, 2, \dots, 7$ )은 경험적 계수를 나타낸다. 각각의  $a_n$ 은 편향 인장시험으로부터 도출된 전단력 데이터를 기반으로 피팅하여 산정한다. 제안된 경험식은 전단 지배 영역의 변형과 전단각, 전단 잠김각 이후의 비선형 강성 증가를 포함하고 있어 실제 CFRTP 공정 중 발생하는 전단 거동을 수치적으로 구현하는 데 적합하다[16].

360°C 조건의 CF/PEEK에 대해 편향 인장시험으로부터 얻은 전단각-전단력 데이터를 피팅하여 도출한  $a_n$  값을 Table 1에 나타내었다.

CFRTP 성형 과정에서 나타나는 면외 굽힘 거동을 면내 막 거동과 분리하여 주름 형상을 정밀하게 예측하였다. 이를 위해 Jiao 등[16]이 제안한 셸 요소의 적층 구조 기반 막-굽힘 분리 개념을 적용하였다. 막 거동과 굽힘 거동을 분리하기 위해 Fig. 3에 나타난 바와 같이 CFRTP를 두께 방향 기준 상하 표면층(surface layers)과 중앙층(central layer)의 세 층으로 구분하였다. 표면층은 굽힘 거동, 중앙층은 면내 인장과 전단 거동을 구현하도록 모델링하였으며, 각 층에서 서로 다른 탄성계수를 부여하였다.

Table 1. Empirical coefficients of the shear angle-shear force law for Carbon fiber and PEEK(CF/PEEK) polymer at 360°C [16]

Empirical coefficient	CF/PEEK	Units
$a_1$	0.870621747629119	
$a_2$	-0.092063149613796	
$a_3$	0.006089539430532	
$a_4$	-0.000232441893059	
$a_5$	0.000004744656425	
$a_6$	-0.000000048183470	
$a_7$	0.00000000191471	

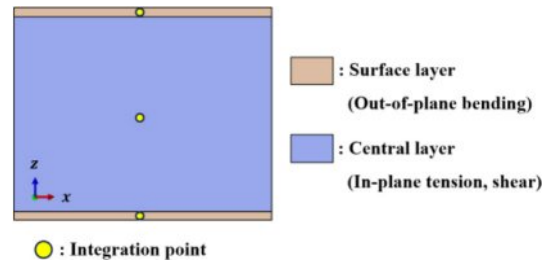


Fig. 3. Membrane-Bending decoupled shell model

이러한 적층 구조를 통해 면내 변형과 면외 굽힘 거동을 상대적으로 분리하여 제어할 수 있다. 식 (3)은 CFRTP의 등가 굽힘 강성( $B_{\text{eff}}$ )을, 식 (4)는 등가 인장 탄성계수( $E_{\text{eff}}$ )를 나타낸다.

$$B_{\text{eff}} = \frac{1}{16} E_s (h-t)(h+t)^2 \quad (3)$$

$$E_{\text{eff}} = E_s \left( \frac{h-t}{h} \right) + E_c \left( \frac{t}{h} \right) \quad (4)$$

여기서  $h$ 는 CFRTP의 전체 두께,  $t$ 는 중앙층의 두께이며,  $E_s$ 와  $E_c$ 는 각각 표면층과 중앙층의 탄성계수이다.  $E_{\text{eff}}$ 는 실제 CFRTP의 인장시험으로부터 도출되며,  $B_{\text{eff}}$ 는 편향 인장시험에서 나타나는 주름 형상과 일치하는 값을 역추정한다. 본 연구에서 사용된  $E_{\text{eff}}$ 와  $B_{\text{eff}}$ 를 Table 2에 나타내었으며, 이를 이용하여  $E_s$ 와  $E_c$ 를 결정하였다.

## 2.2 해석 조건과 해석

CFRTP의 인장 변형에 따른 주름 거동을 예측하기 위해 상용 FEA 소프트웨어인 ABAQUS/Explicit를 활용하여 편향

Table 2. Mechanical properties of the Carbon fiber and PEEK(CF/PEEK) polymer at 360°C [16]

Material properties	CF/PEEK	Units
$E_{\text{eff}}$	3,800	MPa
$B_{\text{eff}}$	0.3	N/mm
$\nu_{12}$	0.3	-

인장시험에 대한 해석을 수행하였다. 면내 막 거동과 면외 굽힘 분리가 주름 형성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 두 가지 해석 케이스(Case #1, #2)를 설정하였다. Case #1에서는 고전 쉘 이론에 따라 막-굽힘이 분리되지 않은 모델을 사용하였고, Case #2에서는 적층 쉘 기반의 막-굽힘 분리 모델을 적용하여 중앙층에서 면내 막 거동을, 표면층

에서 면외 굽힘 거동을 각각 지배적으로 구현하였다. 이를 통해 두 케이스 간 해석 결과를 비교하여 면외 굽힘 거동의 분리 여부에 따른 주름 거동의 경향성을 분석하였다.

편향 인장 해석은 100 mm × 240 mm의 직조 CFRTP 시편을 대상으로 수행하였으며, 수치적 전단 잠김에 따른 해석 불안정과 과도한 강성 산정에 따른 해석 불안정을 완화하기 위해 4절점 저감 적분 쉘 요소(S4R)를 적용하였다. 유한 요소(finite element, FE) 모델의 적합한 요소 크기를 선정하기 위해 요소 수렴성 분석을 수행하였다. Fig. 4는 FE 모델에 적용된 요소 개수에 따른 최대 주름 진폭과 해석 소요 시간을 보여준다.

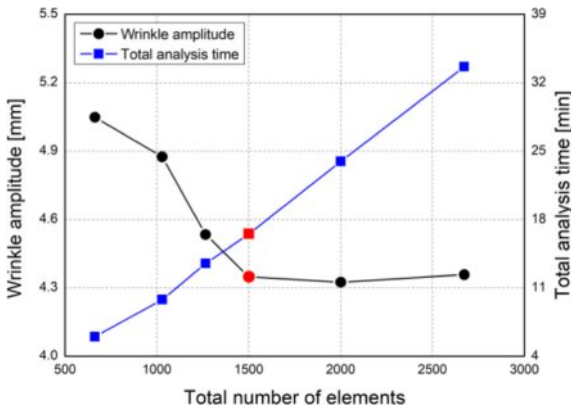


Fig. 4. Result of mesh convergence analysis

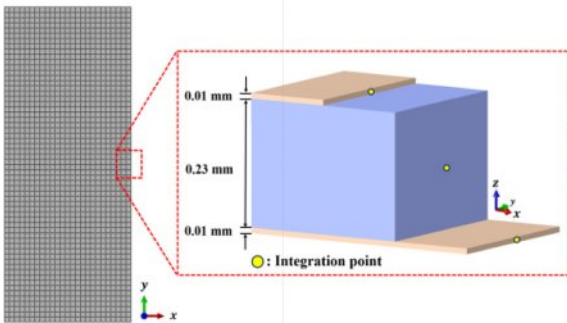


Fig. 5. FE model of the CFRTP and the three layer decoupled shell configuration

요소 개수가 1,500개 이상에서 요소 세분화에 따라 해석 소요 시간이 급격히 증가하는 반면, 해석 결과가 수렴하는 경향이 나타났다. 따라서 본 연구에서는 CFRTP의 FE 모델을 총 1,500개의 요소와 1,586개의 노드로 구성하였다. Fig. 5는 본 연구에서 사용된 CFRTP의 FE 모델을 보여준다.

Case #2의 막-굽힘 분리 모델에는 두께 방향으로 3층 적층 구조를 적용하였다. 상하부 표면층은 굽힘 거동만을 담당하도록 막 거동에 기여하는 강성을 제거하였고, 중앙층은 면내 인장, 전단 거동을 담당하도록 구성하였다. 이때 상하 표면층의 두께는 0.01 mm, 중앙층의 두께는 0.23 mm로 설정하였다.

표면층 두께 0.01 mm는 소재의 고유 물성이 아닌 모델 변수로, 식 (3)과 식 (4)에서  $B_{eff}$ 와  $E_{eff}$ 는 실험으로부터 결정된 고정값이므로 표면층 두께가 변함에 따라  $E_s$ 와  $E_c$ 가 변한다. 즉, 표면층 두께에 관계없이  $B_{eff}$ 와  $E_{eff}$ 는 동일하게 유지된다. 주름 형상은  $B_{eff}$ 에, 면내 변형은  $E_{eff}$ 에 의해 지배되므로 해석 결과 역시 두께 구성과 무관하다. 따라서 표면층 두께는 막-굽힘 분리 효과의 비교를 통해 선정하였다. Table 3에 표면층 두께 변화에 따른 물성과 표면층의 막 강성 기여율을 나타내었다.

ABAQUS Bias extension simulation Membrane - Bending decoupled model

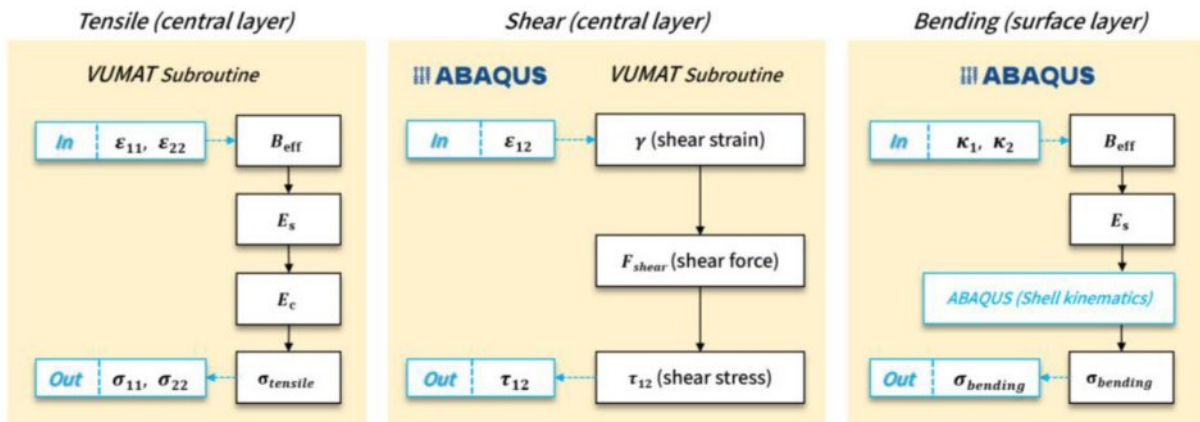
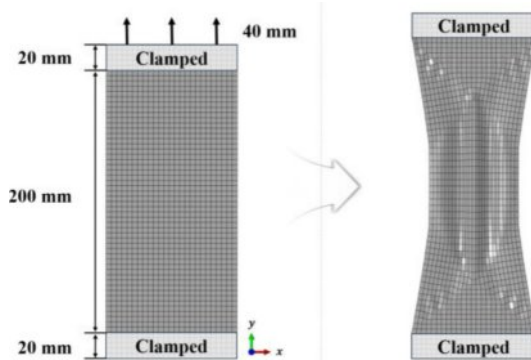


Fig. 6. Computational scheme of the membrane-bending decoupled model

**Table 3.** Calculated material properties and membrane stiffness contribution for various surface layer thicknesses

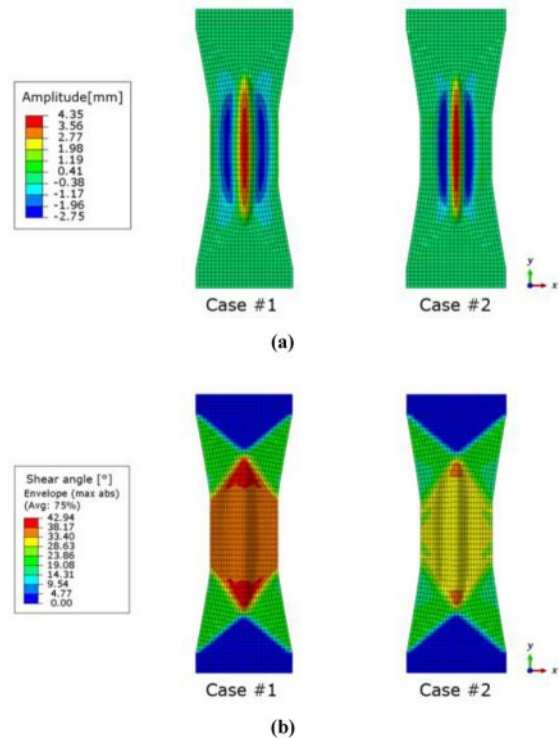
Surface layer thickness [mm]	$E_s$ [MPa]	$E_c$ [MPa]	$B_{eff}$ [N/mm]	$E_{eff}$ [MPa]	Contribution to membrane stiffness [%]
0.01	1,042	4,040	0.3	3,800	2.2
0.05	300	6,133	0.3	3,800	3.2
0.08	260	10,094	0.3	3,800	4.4

**Fig. 7.** Boundary conditions of bias extension test FE model

표면층 두께가 0.01 mm에서 0.08 mm로 증가하더라도  $B_{eff}$ 와  $E_{eff}$ 는 동일하게 유지되며, 표면층의 막 강성 기여율 변화는 2% 이내로 제한적이다. 다만, 0.08 mm의 표면층 두께에서  $E_c$ 가 10,094 MPa로 급증하는 것은 중앙층이 과도하게 얇아질 경우 해석 모델의 수치 안정성이 저하될 수 있음을 시사한다. 또한 표면층이 얇아수록 막 강성에 대한 기여율이 낮아져 막-굽힘 분리 효과가 향상되므로, 0.01 mm의 표면층 두께가 분리 효과를 최대화하는 동시에 수치 해석적으로 안정적인 두께임을 확인하였다.

또한 CFRTP의 비선형 전단 거동을 실시간으로 해석에 반영하기 위해 사용자 재료 정의 부프로그램(VUMAT)을 사용하였으며, Fig. 6에 나타난 절차에 따라 각 적분점에서 전단각을 산정한 후 식 (2)의 전단각-전단력 관계를 이용하여 면내 전단 거동을 계산하였다. 굽힘 모멘트와 굽힘 응력은 표면층에 부여한 탄성계수,  $E_s$ 를 통해 쉘 요소의 굽힘 거동으로 반영되도록 설정하였다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 시편 하단 클램프 영역 20 mm는 x, y, z 방향 변위와 x, y, z 축 회전 자유도를 모두 구속하였고, 상단 클램프 영역 20 mm에는 y 방향 변위를 부여하여 6.5초 동안 40 mm를 인장하였다. 구속 영역과 자유 변형 영역을 분리함으로써 전단 변형이 시편 중앙부에서 지배적으로 발생하도록 하였고, 이를 기반으로 전단각 분포와 주름 발생 위치의 대응성을 평가하였다. 또한 두 해석 케이스에서는 경계 조건, 요소 크기, 출력 변수를 동일하게 유지하여 동일한 해석 조건에서 막-굽힘 분리 여부에 따른 주름 거동 차이를 정량적으로 비교하였다.

**Fig. 8.** Results of bias tensile analysis: (a)  $U_3$ ; (b) Shear angle

### 3. 결 과

#### 3.1 주름 분포

직조 CFRTP의 편향 인장시험 해석을 통해, 면내 전단 거동과 면외 굽힘 거동의 분리 여부가 주름 형성에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 8은 막-굽힘이 분리되지 않은 모델 (Case #1)과 이를 독립적으로 분리한 모델(Case #2)의 해석 결과를 나타낸다. Fig. 8(a)에 나타난 바와 같이, 두 해석 케이스 간 주름의 형상과 성장 영역의 크기에서 유의미한 차이가 확인되었다. Case #1은 주름이 폭 방향으로 넓게 퍼지는 전역적 주름 양상을 보인 반면, Case #2는 중앙부에 집중된 국부적 주름 형상을 나타냈다. Case #1에서는 과도하게 연계된 굽힘 강성이 국부적인 골루 변화를 억제하여 시편 전체가 휘어지는 거동을 유발한 반면, Case #2에서는 실제와 유사한 낮은 굽힘 강성으로 국부적인 면외 변형이 발생하며 변형 에너지가 소산되는 경향을 보였다.

한편 두 케이스 모두 시편 중앙부에서 최대 주름 진폭이 발생하였고 양측 영역에서는 역방향으로 최소 변위가 나타나는 파동 형태를 보였다. 이를 Fig. 8(b)의 전단각 분포와 비교할 때, 전단 변형이 가장 크게 집중되는 영역과 주름 발생 위치가 일치함을 확인하였다. 이는 주름 발생 위치가 기하학적 구속조건에 따른 면내 전단 거동에 의해 지배되는 반면, 주름의 구체적인 형상과 폭은 면외 굽힘 강성에 의해 결정됨을 시사한다.

결과적으로, 동일한 전단 집중 위치에서도 주름의 국부

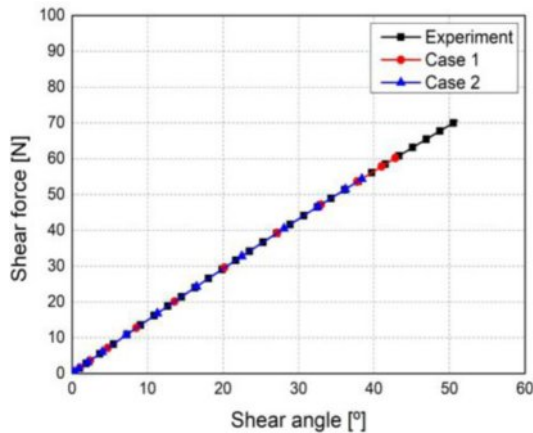


Fig. 9. Comparison of the VUMAT and experimental normalized shear force with shear angle

성은 케이스에 따라 상이하게 나타났으며, 이는 막 굽힘 결합 방식에 따라 면의 굽힘 저항과 에너지 분산 경로가 달라져 주름의 형상이 민감하게 변화할 수 있음을 보여준다.

### 3.2 전단 거동

편향 인장 해석에 적용된 사용자 서브루틴을 통해 계산되는 전단각에 따른 전단력 값을 검증하였다. Fig. 9는 FEA로부터 산출된 전단각-전단력 데이터를 Jiao 등[16]의 실험 데이터와 비교한 결과이다. 두 해석 케이스 모두 전단각의 전 구간에서 걸쳐 실험값과 매우 근접한 일치를 보였다. 이를 통해 식 (2)의 전단각-전단력 경험식이 VUMAT 내에서 정상적으로 구현되었음을 확인하였다.

Fig. 9의 검증 결과에서 확인된 바와 같이, 두 케이스는 동일한 전단 구성식을 통해 전단력이 계산됨에도 불구하고 Fig. 10은 시간에 따른 전단력 누적 이력에서 케이스 간 차이가 나타남을 보여준다. 본 해석에서 면내 전단력은 전단각을 상태 변수로 하는 비선형 전단 구성식인 식 (2)로 계산되므로, 전단력의 시간 이력은 각 케이스에서 형성되는 전단각의 누적 속도 및 분포에 의해 결정된다. 인장 초기인 0-3초 구간에서는 두 케이스의 전단력이 거의 동일한 증가 경향을 보였다. 이는 초기 변형 구간에서 전단 변형이 주로 섬유 회전에 의해 지배되며, 이 구간에서는 막-굽힘 결합 방식의 차이가 전단각 누적 거동에 제한적으로 반영되기 때문으로 해석된다. 본 연구의 막-굽힘 분리 모델링은 초기 전단 응답을 유지하는 경향을 보였다.

반면 변형이 누적되는 3초 이후 구간에서는 Case #2의 전단력이 Case #1에 비해 낮게 나타났으며, 해석 종료 시점에서 약 10%의 차이가 확인되었다. 이러한 시간에 따른 전단각 및 전단력의 차이는 막-굽힘 결합 방식과 막 강성 조건의 차이로 인해 변형이 면내 전단과 면외 굽힘 사이에서 분배되는 양상이 달라졌기 때문으로 해석된다.

Case #1에서는 고전 쉘 이론에 기반한 연계 모델을 적용

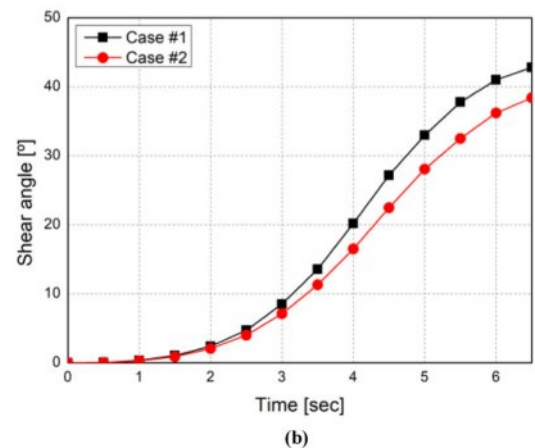
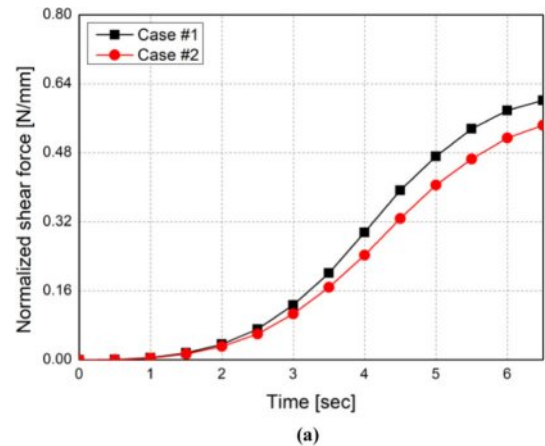


Fig. 10. Results of (a) normalized shear force and (b) shear angle of CFRTP dependent on analysis time

함으로써 상대적으로 큰 굽힘 저항이 형성되어 면외 변형이 제한되고, 동일 인장 변위 조건에서 변형이 면내 성분으로 집중될 가능성이 커진다. 반면 Case #2에서는 막-굽힘 분리 모델을 통해 상대적으로 낮은 굽힘 저항이 구현되어, 변형의 일부가 면외 굽힘 모드로 분담되면서 면내 전단 변형의 집중이 완화될 수 있다.

또한 본 연구에서는 막 탄성계수를 Case #1에서 3,800 MPa, Case #2에서 4,040 MPa로 적용하였으며, 이러한 막 강성 차이 역시 전단각 누적과 전단력 시간 이력에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 3초 이후의 전단력 차이는 굽힘 모드 분담과 막 강성 조건이 복합적으로 작용하여 전체 변형 양상이 재분배된 결과로 판단된다.

### 3.3 주름 성장 거동

주름의 성장 거동은 편향 인장에 따른 시편 중앙 노드의 주름 진폭의 변화를 통해 비교하였으며, Fig. 11에 그 결과를 나타내었다.

Fig. 11에 나타난 바와 같이 주름 발생 시점과 성장 양상에서 두 해석 케이스 간의 차이가 명확히 나타났다. Case #1에서는 2초 이후 주름이 형성되기 시작하여 짧은 시간 동안

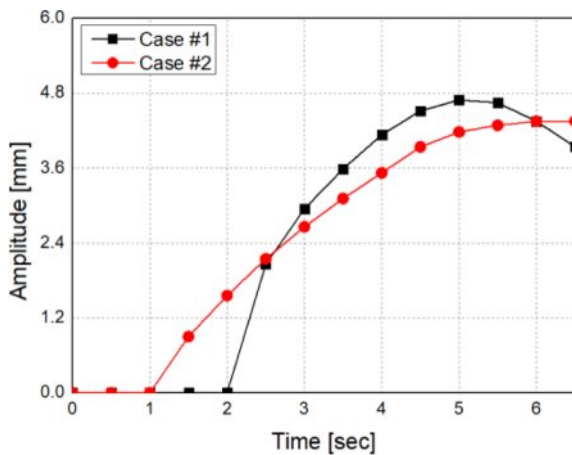


Fig. 11. Results of  $U_3$  of CFRTP dependent on analysis time

안 급격히 성장하였으며, 5.5초에서 최대 주름 진폭인 4.68 mm에 도달한 후 완화된 경향을 보였다. 반면 Case #2에서는 주름 발생이 더 이른 시점에서 관찰되었으나, 최대 주름 진폭은 전반적으로 완만하게 증가하여 해석 종료 시점인 6.5초에 4.36 mm로 최대 주름 진폭에 도달하였다.

이러한 차이는 막-굽힘 결합 방식에 따른 에너지의 축적과 분산의 차이에서 기인한다. Case #1의 급격한 주름 거동은 과도하게 평가된 굽힘 강성으로 인해 유도된 좌굴 거동과 직접적으로 연관된다. 고전적 쉘 이론을 적용한 Case #1은 실제 소재보다 높은 굽힘 강성을 가지므로 초기 전단 변형 단계에서 면의 변형을 효과적으로 억제한다. 그 결과 변형 에너지가 면의 방향으로 해소되지 못하고 막 변형 에너지로 지속적으로 축적된다. 이후 축적된 에너지가 임계점을 초과하는 순간, 억제되어 있던 면의 변형이 급격히 발생하면서 급격한 주름 성장을 초래한다. 반면, Case #2의 점진적 거동은 에너지가 지속적으로 분산되는 과정을 반영한다. 막-굽힘 분리 기법을 통해 실제 소재와 근접한 낮은 굽힘 강성이 적용되면서, 전단 변형 초기부터 미세한 국부 주름이 점진적으로 형성된다. 이러한 국부 면의 변형은 전단 변형 에너지를 실시간으로 분산시키는 역할을 하며 막 에너지가 임계치까지 과도하게 축적되는 것을 방지한다.

결과적으로 직조 복합재 성형에서 주름은 면내 압축과 전단에 의해 유도되지만 주름의 크기와 성장 양상은 굽힘 강성에 의해 지배된다는 점을 시사한다.

또한 본 연구에서 제안한 막-굽힘 분리 모델은 단일층 평직 CFRTP를 대상으로 그 유효성을 검증하였으나, 실제 성형 공정에서 사용되는 다층 적층이나 다양한 직조 구조에 대해서도 확장이 가능하다.

적층 조건의 경우, 적층 수가 증가함에 따라 적층판 전체의 유효 굽힘 강성은 두께의 세제곱에 비례하여 급격히 증가한다. 이에 따라 주름 발생을 억제하는 저항력이 커지며, 발생하는 주름의 파장은 길어지고 진폭의 성장은 상대적

으로 완만해질 것으로 예상된다. 또한, 다층 구조에서는 프리프레그 층간 마찰이 추가적인 구속 조건으로 작용하여 주름 발생 시점에 영향을 미칠 수 있다.

직물 형태와 관련하여, 주자직(Satin weave)과 같은 형태는 본 연구에서 사용된 평직 대비 섬유 교차점이 적어 전단 잠김 각도가 높고 전단 변형에 유연하다. 따라서 동일한 변위 조건에서 평직보다 주름 발생이 억제되거나 더 큰 전단 변형 이후에 주름이 나타나는 경향을 보일 것으로 예상된다. 이러한 복합재 구성 조건에 따른 연구는 본 해석 기법의 범용성을 확장하기 위한 향후 연구로 수행할 예정이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 직조 CF/PEEK(CFRTP)의 편향 인장시험 해석을 통해 막-굽힘 분리 여부가 주름 형성 예측에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 적층 쉘 요소 기반의 3층 모델을 구성하였고, 중앙층에는 전단각-전단력 경험식을 적용하여 면내 전단 거동을, 표면층에는 굽힘 거동을 반영하였다. 동일한 경계 조건 하에서 굽힘 거동을 막 강성에 종속시킨 모델(Case #1)과 굽힘 거동을 독립적으로 분리한 모델(Case #2)을 비교하였다.

모든 케이스에서 전단 변형이 집중되는 영역과 주름 발생 위치가 정합적으로 대응하였으며, 주름의 발생 위치는 전단각 분포에 의해 지배됨을 확인하였다. 반면 주름의 발생 시점과 성장 양상은 막-굽힘 결합 방식에 따라 유의미하게 달라졌다. Case #1은 폭 방향으로 넓게 퍼지는 전역적 주름 형태를 보인 반면, Case #2는 중앙부에 집중된 국부적 주름 형상을 나타내었다. 이는 굽힘 강성의 분리 여부가 주름 형상에 직접적인 영향을 미침을 보여준다. 시간에 따른 전단각, 전단력을 비교한 결과, 인장 초기에는 Cases #1, #2가 유사한 값을 보였으나, 변형이 누적되면서 Case #2에서 전단각이 더 작게 나타났고, 이에 따라 전단력 또한 점진적으로 낮아졌다. 이는 동일 전단 구성식을 사용했음에도 막 강성 분포와 막-굽힘 결합 방식의 차이로 인해 전체 변형 거동이 달라지면서 시간에 따른 전단각이 변화한 결과이다.

한편, 주름 성장 양상은 두 케이스에서 상이하게 나타났다. Case #1은 특정 시점 이후 주름이 급격히 성장하여 최대 주름 진폭에 도달한 뒤 감소하는 경향을 보였다. 반면 Case #2는 Case #1에 비해 완만한 성장 거동을 보였으며, 해석 종료 시점에서의 최대 주름 진폭이 상대적으로 크게 나타났다. 이는 막-굽힘 결합 방식에 따라 면의 변형 모드로의 에너지 축적과 분산 양상이 달라질 수 있음을 시사한다.

향후 연구에서는 실제 직물의 굽힘 거동을 정량적으로 반영하기 위해 성형 온도와 변형 속도 의존성을 고려한 실험 기반 비선형 굽힘 구성 모델을 수립하고 이를 열성형 해석에 적용할 계획이다. 또한, 적층 수, 적층각, 직물 조직 등의 변화에 따른 주름 성장 거동의 민감도를 분석하여 본 해

석 모델의 범용성을 확장할 예정이다. 나아가 금형-소재 간 열전달, 구속 조건, 냉각과 탈형 단계를 포함하는 열-구조 연계 공정 해석으로 확장하여 실제 성형 조건에 대한 적용 가능성을 평가할 것이다. Digital Image Correlation(DIC) 기반 측정 등 실제 실험 결과와의 정밀한 비교를 통해 예측 정확성을 최종 검증하고, 주요 설계 변수에 대한 민감도 분석을 수행함으로써 막-굽힘 분리 모델의 적용 범위와 한계를 명확히 정립할 필요가 있다.

그럼에도 불구하고 본 연구는 적층 셀 기반 막-굽힘 분리 접근을 통해 주름의 발생 위치와 성장 거동을 구분하여 평가할 수 있음을 제시하였으며, 향후 열가소성 직물 복합재의 주름 예측 정밀도 향상과 공정 조건 최적화를 위한 기초 자료로도 활용될 수 있다.

## 후 기

이 연구는 2026년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구입니다. (No.RS202400433049). 또한 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(No.RS-2024-00444205).

## REFERENCES

- Friedrich, K., and Almajid, A., "Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications," *Applied Composite Materials*, Vol. 20, 2013, pp. 107-128.
- Kim, S., Kim, D.H., Kim, S.W., and Lee, S.Y., "Prediction of Process-Induced Deformation in CFRTP Thermoforming using Finite Element Analysis and Parametric Study of Key Process Parameters," *Composites Research*, Vol. 38, No. 4, 2025, pp. 468-478.
- Boisse, P., Hamila, N., Guzman-Maldonado, E., Madeo, A., Hivet, G., and Dell'Isola, F., "The Bias-extension Test for the Analysis of In-plane Shear Properties of Textile Composite Reinforcements and Prepregs: A Review," *International Journal of Material Forming*, Vol. 10, 2017, pp. 475-492.
- Kim, S., Kim, D.H., Kim, S.W., and Lee, S.Y., "Investigation of Process-induced Deformation in Thermoplastic Composites Through Sequential Thermoforming Simulation Considering Crystallization Kinetics," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 249, 2025, 104389.
- Prodromou, A.G., and Chen, J., "On the Relationship between Shear Angle and Wrinkling of Textile Composite Preforms," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 28, No. 5, 1997, pp. 491-503.
- Zhu, B., Yu, T.X., and Tao, X.M., "An Experimental Study of In-plane Large Shear Deformation of Woven Fabric Composite," *Composites Science and Technology*, Vol. 67, No. 2, 2007, pp. 252-261.
- Long, A.C., Rudd, C.D., Blagdon, M., and Smith, P., "Characterizing the Processing and Performance of Aligned Reinforcements during Preform Manufacture," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 27, No. 4, 1996, pp. 247-253.
- Mohammed, U., Lekakou, C., Dong, L., and Bader, M.G., "Shear Deformation and Micromechanics of Woven Fabrics," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 31, No. 4, 2000, pp. 299-308.
- Nolte, A.J., Chung, J.Y., Davis, C.S., and Stafford, C.M., "Wrinkling-to-delamination Transition in Thin Polymer Films on Compliant Substrates," *Soft Matter*, Vol. 13, No. 43, 2017, pp. 7930-7937.
- Naderi, M., Ji, M., Liyanage, S., Palliyaguru, U., Soghrati, S., Iyyer, N., Seneviratne, W., and Phan, N., "Experimental and Numerical Analysis of Wrinkles Influence on Damage Mechanisms and Strength of L-Shape Cross-ply Composite Beams," *Composites Science and Technology*, Vol. 223, 2022, 109420.
- Harrison, P., Clifford, M.J., and Long, A.C., "Shear Characterisation of Viscous Woven Textile Composites: A Comparison Between Picture Frame and Bias Extension Experiments," *Composites Science and Technology*, Vol. 64, No. 10-11, 2004, pp. 1453-1465.
- Lee, W.O., Um, M.K., Byun, J.H., and Cao, J., "Characterization of In-plane Shear Behaviors of Woven Fabrics by Bias-extension and Trellis-frame Tests," *Composites Research*, Vol. 23, No. 5, 2010, pp. 8-14.
- Hamila, N., and Boisse, P., "Simulations of Textile Composite Reinforcement Draping Using a New Semi-discrete Three Node Finite Element," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 39, No. 6, 2008, pp. 999-1010.
- Liang, B., Hamila, N., Peillon, M., and Boisse, P., "Analysis of Thermoplastic Prepreg Bending Stiffness during Manufacturing and of Its Influence on Wrinkling Simulations," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 67, 2014, pp. 111-122.
- Döbrich, O., Gereke, T., Diestel, O., Krzywinski, S., and Cherif, C., "Decoupling the Bending Behavior and the Membrane Properties of Finite Shell Elements for a Correct Description of the Mechanical Behavior of Textiles with a Laminate Formulation," *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 44, No. 1, 2014, pp. 70-84.
- Jiao, Z., Wang, Y., Li, H., Du, L., Mu, Y., Zheng, J., and Li, Y., "Wrinkling Prediction and Controlling for the Hot Stamping of Plain Weave CF/PEEK Prepreg in the Molten State," *Composite Structures*, Vol. 376, 2025, 119817.
- Potluri, P., Ciurezu, D.P., and Ramgulam, R.B., "Measurement of Meso-scale Shear Deformations for Modelling Textile Composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, No. 2, 2006, pp. 303-314.
- Lee, J.M., Kim, B.M., Min, B.J., Park, J.H., and Ko, D.C., "Formability of CFRTP Prepreg Considering Heat Transfer," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 4, No. 2, 2017, pp. 161-168.
- Harrison, P., Taylor, E., and Alsayednoor, J., "Improving the Accuracy of the Uniaxial Bias Extension Test on Engineering Fabrics Using a Simple Wrinkle Mitigation Technique," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 108, 2018, pp. 53-61.