

3-방향 직물 복합재료 모델링 및 붐 구조물의 거동 연구

변선우¹, 양지윤¹, 이수용¹, 노진호^{1,†}

한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

A Study on the Modeling for Boom Structural Behaviors of the Triaxial Woven Fabric Composite

Seon-Woo Byun¹, Ji-Yoon Yang¹, Soo-Yong Lee¹ and Jin-Ho Roh^{1,†}

¹School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

Abstract

This paper studied the mechanical characteristics of boom structures by verifying the modeling method of representing unit cells of triaxial woven fabric (TWF) composites. The modeling of the representative unit cell obtained the ABD matrix by analysing the behaviour of tensile, shear, bending, and torsion using the periodic boundary conditions for the beam element. This study aimed to validate the ABD matrix by comparing the tensile analysis output from a finite element program with the experimental results from an MTS 810 machine. Additionally, the mechanical characteristics of a TWF composite boom structure were determined through bending analysis and experiments. The findings of this research are expected to be beneficial for developing structures using TWF composites.

초 록

본 논문은 3-방향 직물 복합재료의 대표 단위 셀의 모델링 방법에 대해 검증하여 붐 구조물의 기계적 특성에 대해 연구하였다. 대표 단위 셀의 모델링에는 빔 요소에 주기적 경계 조건을 이용하여 인장, 전단, 굽힘, 비틀림의 거동을 모사한 해석을 통해 ABD 행렬을 구했다. 유한 요소 프로그램을 통한 인장 해석과 만능재료 시험기를 이용한 실험 결과를 비교하여 ABD 행렬을 검증하였다. 3-방향 직물 복합재료 붐 구조물의 기계적 특성을 굽힘 해석과 실험을 통해 확인하였다. 이를 통해 3-방향 직물 복합재료를 이용한 구조물 거동 특성을 확인하고자 한다.

Key Words : Triaxial Woven Fabric(3-방향 직물), Periodic Boundary Condition(주기적 경계조건), Represent Unit Cell(대표 단위 셀)

1. 서 론

최근 3-방향 직물 복합재료는 미래 전개형 반사판 안테나 구조물로 사용되고 있다[1]. 3-방향 직물이란 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 섬유가 세 방향으로 꼬여 있는 구조를 뜻한다. 3-방향 직물은 기계적으로 준 등방성 그리고 낮은 밀도를 가지며, 기하학적 형상으로 인해 층간 파손과 변형에 대한 복원력이 일반 섬유복

합재료와 비교해 뛰어난 특징이 있다[2, 3]. Boesch *et al.*[4]은 우주용 전개 구조물을 3-방향 직물 복합재료로 설계하였고 DLR[5]은 3-방향 직물 복합재료로 초경량 전개형 구조물의 CFRP 붐을 제작하였다. 그러나 3-방향 직물 복합재료 구성 요소 형상은 섬유가 꼬여 있는 복잡한 형태로 인해 모델링이 쉽지 않다. 대표적인 모델링 방법에는 구조물 전체를 모델링 하는 방법과 대표 단위 셀을 모델링 하는 방법이 있다. 그러나 구조물 전체를 모델링하는 방법은 3-방향 직물의 기하학적 형상으로 인해 복잡한 구조물의 모델링이 어렵다는 단점이 있다[6].

Received: Aug. 16, 2022 Revised: Oct. 25, 2022 Accepted: Oct. 26, 2022

† Corresponding Author

Tel: +82-2-300-0289, E-mail: jinhoroh@kau.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

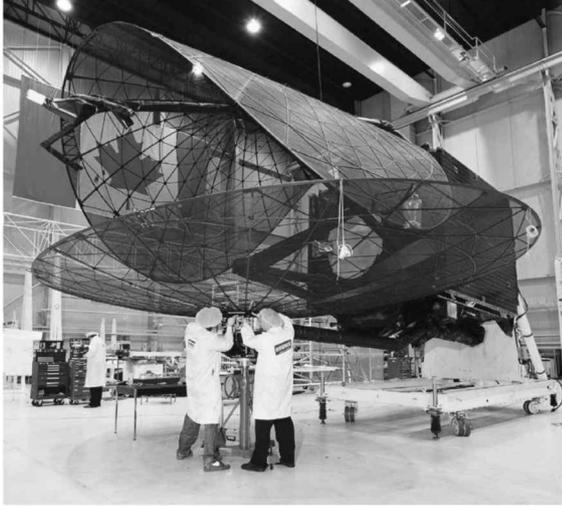


Fig. 1 Deployable Reflector Antenna on MASAT-2 Spacecraft [1]

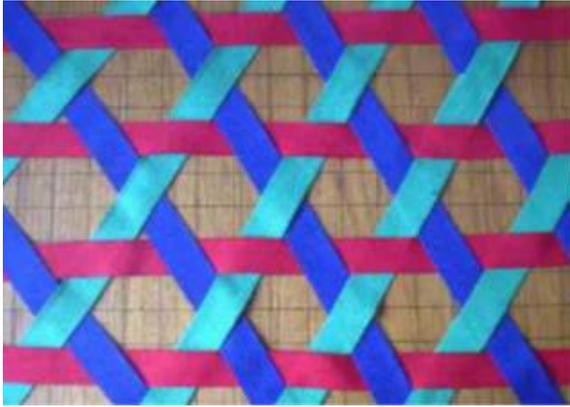


Fig. 2 Basic Weave of Triaxial Woven Fabric [2]

대표 단위 셀을 모델링하는 방법에는 크게 솔리드와 빔 요소를 이용한 유한요소 해석을 통해 강성행렬을 예측하는 방법이 있다. Obst *et al.*[7]은 솔리드 요소를 사용하여 3-방향 직물로 이루어진 복합재료의 모델링을 통한 해석으로 기계적 거동을 예측하였다. Zhou *et al.*[8]은 솔리드 요소를 이용해 3-방향 직물 복합재료를 모델링 하여 저속 충격에서 기계적 거동을 확인하였다. Aoki *et al.* [9]은 솔리드 요소를 이용한 3-방향 직물 복합재료의 대표 단위 셀의 해석을 통하여 강성 행렬을 예측하였다. Kukarni와 Gao[10]는 솔리드 요소를 이용하여 대표 단위 셀을 모델링하여 섬유 각도를 변형시켜 가장 뛰어난 물성을 가지는 섬유의 각도를 정하였다. Zhou *et al.* [11]은 3-방향 직물 복합재료 구조물 전체를 빔 요소로 모델링해 인장과 굽힘 거동을 확인했다. Kueh와 Pellegrino[12]는 빔 요소를 이용하여 3-방향 직물 복합재료 대표 단위 셀을 모델링하여 기계적 거동을 예측하였다. 모델링

방법 중 빔 요소를 이용하여 모델링하는 방법은 가장 간단하게 복잡한 형상의 구성요소를 모델링 할 수 있는 방법이다.

본 논문에서는 3-방향 직물 복합재료의 구조물 적용을 위해 모델링 방법의 검증과 붐 구조물의 거동을 확인하였다. 이를 위해 3-방향 직물 복합재료는 CFRP 섬유 (SK802/T300)과 에폭시 수지 (Hexcel 8552)를 사용하였다. 구조물의 거동 예측은 빔 요소를 이용해 대표 단위 셀을 모델링하고 유한요소해석을 통해 강성 행렬을 구하고 시편의 거동을 예측하고 실험 결과와 비교하여 모델링 방법에 따른 강성 행렬을 검증했다. 또한, 3-방향 직물 복합재료 구조물의 거동은 굽힘 해석과 실험 결과를 비교해 확인하였다.

2. 본 론

2.1 대표 단위 셀 모델링

대표 단위 셀은 빔 요소로 모델링되며 기계적 물성은 섬유와 수지의 부피 비를 고려한 혼합법칙과 Halpin-Tsai 관계를 이용하여 구했다 (Eq. 1). Table 1은 3-방향 직물 복합재료의 섬유와 수지의 물성이다 [13].

$$V_f = \frac{\rho_m W_f}{\rho_m W_f + \rho_f W_m}, \quad V_m = 1 - V_f \quad (1a)$$

$$E_1 = E_{1f} V_f + E_m V_m = E_{1f} V_f + E_m (1 - V_f) \quad (1b)$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{12f} V_f + \nu_m V_m = \nu_{12f} V_f + \nu_m (1 - V_f) \quad (1c)$$

$$E_2 = E_3 = E_m \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f}, \quad \eta = \frac{(E_f / E_m) - 1}{(E_f / E_m) + \xi} \quad (1d)$$

$$G_{12} = G_{13} = G_m \frac{(G_{12f} + G_m) + V_f (G_{12f} - G_m)}{(G_{12f} + G_m) - V_f (G_{12f} - G_m)} \quad (1e)$$

여기에서 V_f 는 섬유의 부피 비 그리고 V_m 는 수지의 부피 비이며, ρ_m 와 ρ_f 은 수지의 밀도와 섬유의 밀도이다. W_m 와 W_f 은 각각 수지의 단위면적당 무게와 섬유의 단위면적당 무게이다. ξ 은 커브 피팅 파라미터로서 2로 가정했다. 이를 통해 대표 단위 셀 모델링의 빔 요소에 적용되는 물성을 구한다(Table 2).

Table 1 Material Properties of Fiber and Matrix

Fiber (SK802/T300)	
Longitudinal Elastic Modulus [GPa]	233.2
Transverse Elastic Modulus [GPa]	23.1
In-Plane Shear Modulus [GPa]	8.9
Poisson's Ratio	0.2
Matrix (Hexcel 8552)	
Elastic Modulus [GPa]	4.8
Shear Modulus [GPa]	1.7
Poisson's Ratio	0.4

Table 2 Yarn Material Properties of TWF Composite

Properties	Value
Longitudinal Elastic Modulus [GPa]	153.1
Transverse Elastic Modulus [GPa]	13.2
In-Plane Shear Modulus [GPa]	4.4
Poisson's Ratio	0.3

대표 단위 셀의 크기는 광학현미경을 이용하여 측정하였다. x방향의 길이 (Δl_x)는 3.2 mm이고 y방향의 길이 (Δl_y)는 5.2 mm이며, 두께는 0.25 mm이다(Fig. 3).

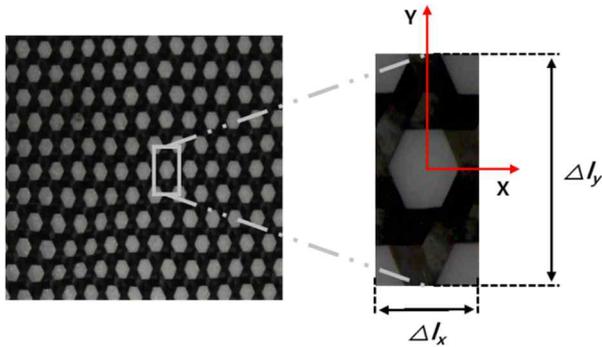
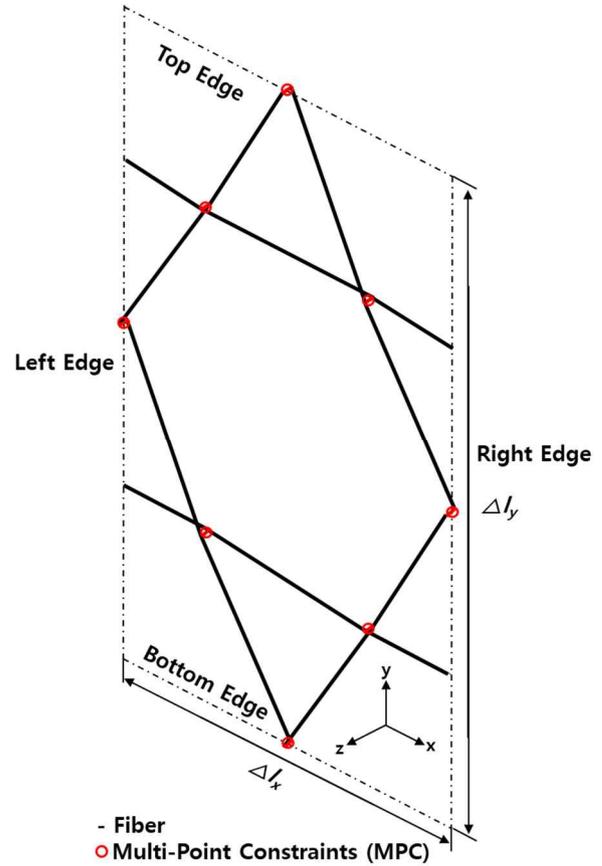
**Fig. 3** Represent Unit Cell (RUC) of TWF Composite

Figure 4는 대표 단위 셀의 형상 모델링이며 각 모서리에 8개의 경계 요소가 있다. 섬유와 섬유의 사이에는 다중 구속 조건 (MPC)는 Eq. 2로 표현된다[14].

$$\begin{aligned}
 u_1^{(b)} &= u_1^{(a)} + H\theta_2^{(a)} \\
 u_2^{(b)} &= u_2^{(a)} - H\theta_1^{(a)} \\
 u_3^{(b)} &= u_3^{(a)} \\
 \theta_1^{(b)} &= \theta_1^{(a)} \\
 \theta_2^{(b)} &= \theta_2^{(a)} \\
 \theta_3^{(b)} &= \theta_3^{(a)}
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서 H는 대표 단위 셀의 두께, a 그리고 b는 각각 위/아래 섬유에 해당하는 노드 점이다. 섬유의 단면은 원형으로 가정하고 대표 단위 셀을 모델링 하였다.

**Fig. 4** Shape Modeling of RUC

3-방향 직물 복합재료의 기계적 거동을 예측하기 위해서는 고전 적층판 이론 (Classical Laminate Theory)을 이용해 ABD 강성 행렬을 구했다(Eq. 3).

$$\begin{Bmatrix} [N] \\ [M] \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} [\varepsilon] \\ [\kappa] \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기에서 $[N]$ 와 $[M]$ 은 면내 하중과 모멘트 행렬이다. $[\varepsilon]$ 와 $[\kappa]$ 는 변형률과 곡률 행렬이다. $[A]$ 와 $[D]$ 는 면내 강성 행렬과 굽힘 강성 행렬이다. $[A]$ 와 $[D]$ 는 3 x 3 행렬로 대칭 ($A_{ij} = A_{ji}$, $D_{ij} = D_{ji}$)이다. ABD 강성 행렬이 구하기 위해서는 대표 단위 셀의 경계 요소에 균일한 변형률을 경계조건으로 준다. 이를 위해 주기적 경계 조건 (Periodic Boundary Condition)을 이용한다 (Tables 3). 주기적 경계 조건은 대표 단위 셀의 유한 요소 해석에 적용되며 단위 변형률 (인장, 전단, 굽힘 그리고 비틀림)로 적용하였다(Table 4). 이를 통해 단

위셀 경계 요소의 변위, 회전, 하중 그리고 모멘트를 구했다[15].

Table 3 Periodic Boundary Conditions of RUC

Top/Bottom	Left/Right
$u^T - u^B = \varepsilon_{xx} \Delta l_x$	$u^L - u^R = 0.5 \varepsilon_{xy} \Delta l_x$
$v^T - v^B = 0.5 \varepsilon_{xy} \Delta l_x$	$v^L - v^R = \varepsilon_{yy} \Delta l_x$
$w^T - w^B = -0.5 k_{xy, yz} \Delta l_x$	$w^L - w^R = -0.25 k_{xy} \Delta l_x \Delta l_y$
$\theta_x^T - \theta_x^B = -0.5 k_{xy} \Delta l_x$	$\theta_x^L - \theta_x^R = -k_{yy} \Delta l_y$
$\theta_y^T - \theta_y^B = k_{xx} \Delta l_x$	$\theta_y^L - \theta_y^R = 0.5 k_{xy} \Delta l_x$
$\theta_z^T - \theta_z^B = 0$	$\theta_z^L - \theta_z^R = 0$

Table 4 Assumption of Periodic Boundary Condition Equation

	Assumption
1	$\varepsilon_{xx} = 1, \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{xy} = \kappa_{xx} = \kappa_{yy} = \kappa_{xy} = 0$
2	$\varepsilon_{yy} = 1, \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{xy} = \kappa_{xx} = \kappa_{yy} = \kappa_{xy} = 0$
3	$\varepsilon_{xy} = 1, \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \kappa_{xx} = \kappa_{yy} = \kappa_{xy} = 0$
4	$\kappa_{xx} = 1, \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{xy} = \kappa_{yy} = \kappa_{xy} = 0$
5	$\kappa_{yy} = 1, \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{xy} = \kappa_{xx} = \kappa_{xy} = 0$
6	$\kappa_{xy} = 1, \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{xy} = \kappa_{xx} = \kappa_{yy} = 0$

ABD 강성 행렬은 단위 셀에 주기적 경계 조건을 통해 구한 해석 결과를 가상일의 정리를 적용하여 구했다(Eq. 4). Figure 5은 주기적 경계 조건 중 x방향 인장 해석 형상 형상이다.

$$N_{ij} \kappa_{ij} \Delta l_x \Delta l_y = \sum_{B.N.} (F_k u_k + M_k \theta_k) \quad (4a)$$

$$M_{ij} \kappa_{ij} \Delta l_x \Delta l_y = \sum_{B.N.} (F_k u_k + M_k \theta_k) \quad (4b)$$

($i, j = x, y, k = x, y, z$)

여기에서 $B.N.$ 은 대표 단위 셀의 각 모서리에 8개의 경계 요소이다. N_{ij} 은 면내 하중으로 $[N]$ 의 구성요소이고 ε_{ij} 은 주기적 경계 조건에서 변형률이다. M_{ij} 은 모멘트로 $[M]$ 의 구성요소이고 k_{ij} 은 주기적 경계 조건에서 곡률이다. F_k 는 단위 셀 해석으로 구한 하중이고 u_k 는 단위 셀 해석으로 구한 변위이다. M_k 는 단위 셀 해석으로 구한 하중이고 θ_k 는 단위 셀 해석으로 구한 회전이다. 이것을 통해 ABD 강성 행렬을 구한다(Eq. 5).

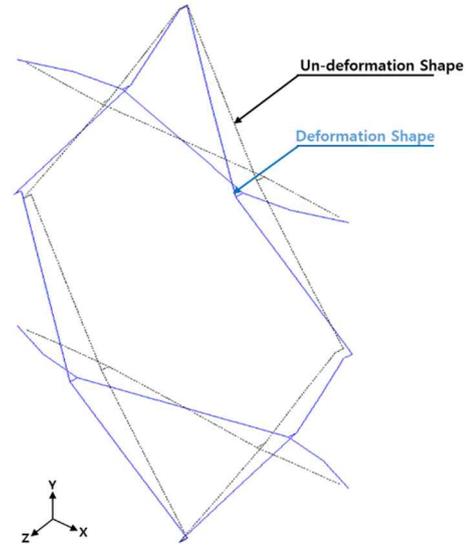


Fig. 5 RUC of X-Direction Tensile Analysis

$$ABD = \begin{bmatrix} 4211 & 2379 & 0 & 0 & 0 & -0.84 \\ 2377 & 4090 & 0 & 0 & 0 & 0.77 \\ 0 & 0 & 801.5 & 0.81 & -0.80 & 0 \\ 0 & 0 & 0.81 & 2.81 & 0.77 & 0 \\ 0 & 0 & -0.81 & 0.77 & 2.81 & 0 \\ -0.84 & 0.97 & 0 & 0 & 0 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 3-방향 직물 복합재료 ABD 강성 행렬 검증

인장 실험은 만능재료 시험기 (MTS-810)를 이용하였다 (Figs. 6). 변형률은 시편 중앙에 스트레인 게이지 CEA-13-240UZ-120를 부착하여 측정하였다. 3-방향 직물 복합재료의 시편 형상 Fig. 7과 같고 실험 속도는 ASTM D3039에 따라 2 mm/min 진행했다[16]



Fig. 6 Tensile Experiment of TWF Composite

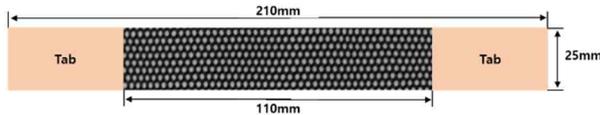


Fig. 7 TWF Composite Specimen Shape

3-방향 직물 복합재료의 ABD 강성 행렬을 인장 실험과 해석의 비교로 검증했다. Figure 8과 Figure 9는 인장 실험과 해석 결과 그래프이고 선형 탄성 구간에서 거동을 비교했다(Table 5).

Table 5 The Comparison of Tensile Experiment and Analysis Stiffness

Stiffness	Experiment	Analysis	Error
E_{xx} (GPa)	2.43	2.59	6.5 %
E_{yy} (GPa)	2.54	2.52	0.8 %

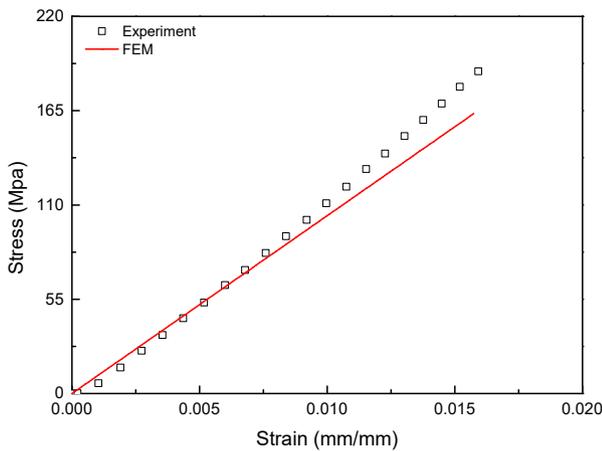


Fig. 8 Comparison of Experiment and Analysis Results (0° Tensile)

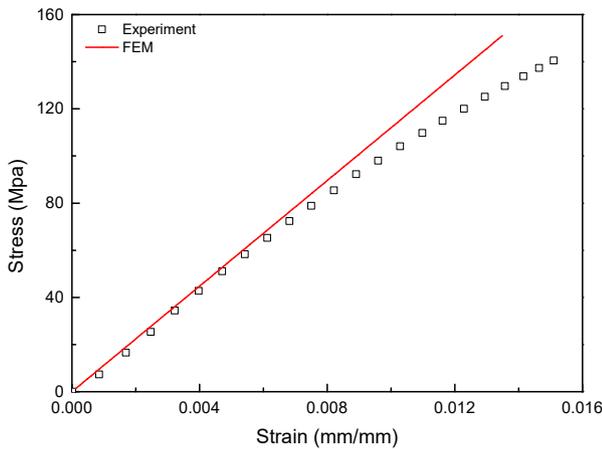


Fig. 9 Comparison of Experiment and Analysis Results (90° Tensile)

3-방향 직물 복합재료의 ABD 강성 행렬을 적용한 해석 결과는 실험결과 와 비교해 약 0.8 ~ 7%의 오차로 강성을 예측하였다. 이를 통해 ABD 강성 행렬을 검증했다.

2.3 3-방향 직물 복합재료 붐 구조물 해석

3-방향직물 복합재료 구조물의 거동은 붐 굽힘 해석과 실험의 비교를 통해 거동을 확인하였다. 붐 구조물은 길이 220 mm, 지름 17 mm 그리고 폭 34.5 mm 로 제작했고 3-point 방식의 굽힘 실험으로 Figure 10과 같이 속도 2 mm/min으로 진행하였다[17]. 굽힘 해석은 3-방향 직물 복합재료의 ABD 행렬을 적용하여 쉘 요소를 이용하여 모델링했다.

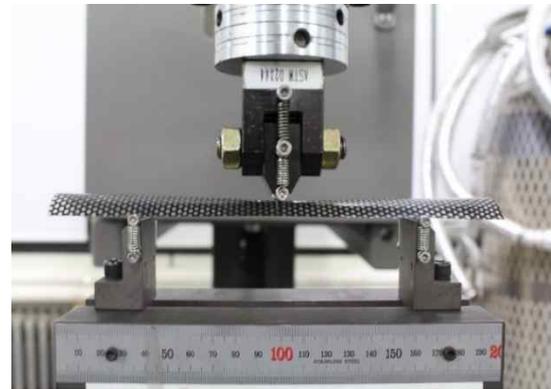


Fig. 10 Bending Experiment of TWF Composite Boom Structure

실험과 해석 결과는 시간에 따라 하중과 변위를 측정했다. 해석과 실험에서 좌굴이 발생하는 하중을 비교하면 약 11 %의 오차가 있었다(Fig. 11).

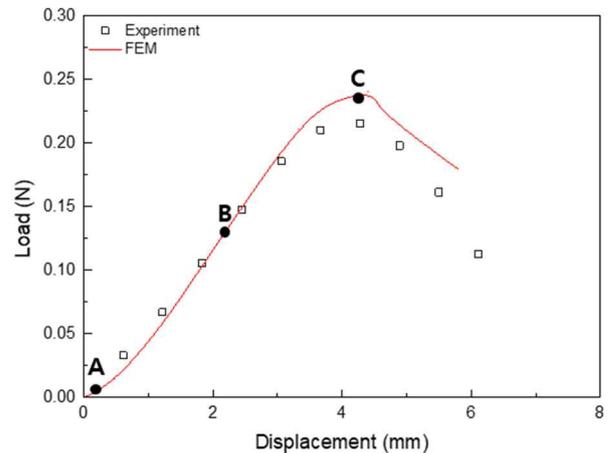


Fig. 11 Comparison of Experiment and Analysis Results (Boom Structure)

임계 하중 (Point C)에서 좌굴이 발생하였고 이 후 하중은 줄어들지만 변위는 증가하는 것을 해석을 통해 확인하였다. Figure 12의 점 A, B 그리고 C는 Fig. 11의 붉 구조물의 변형 형상이다.

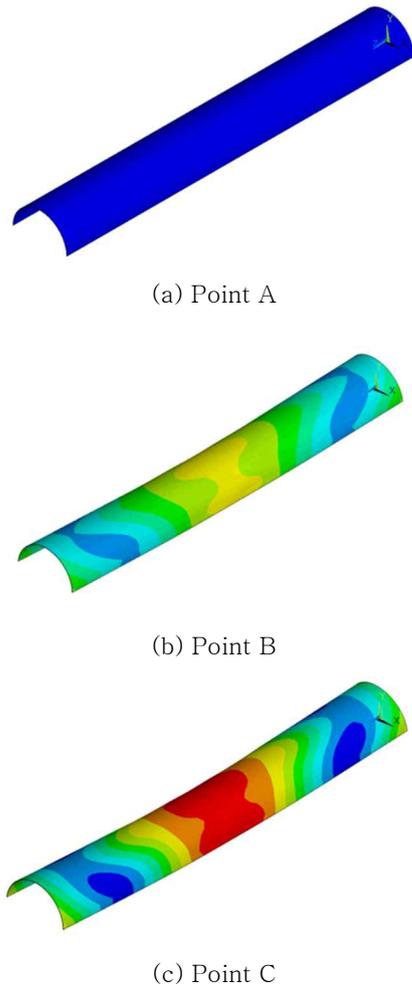


Fig. 12 Deformed Shape of Boom Structure with Respect to Load Point Variations

3. 결 론

본 연구에서 3-방향 직물 복합재료의 대표 단위 셀을 빔 요소로 모델링하는 방법을 제안했고 대표 단위 셀을 이용하여 ABD 행렬을 예측하였다. 셀 모델에 적용하여 인장 실험과 해석의 결과를 비교하여 강성 행렬 예측 방법에 대해 검증했다. 0°와 90°의 강성을 비교하면 0° 인장 강성의 경우 7 %의 오차가 있고 90° 인장 강성의 경우 3 %의 오차가 있었다. 또한, 3-방향 직물 복합재료 붉 구조물의 굽힘 해석과 실험 결과 비교하였다. 실험과 해석 결과는 최대 하중이 해당하는 변위 약 4 mm부터 좌굴이 일어났고, 좌굴의 발생 후

일정한 하중에서 변위가 증가했다. 이러한 결과를 바탕으로 3-방향 직물 복합재료 모델링 방법이 구조물 거동 특성을 예측하는데 적용이 가능함을 확인했다.

후 기

본 연구는 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호: 2022R1A6A1A03056784)입니다.

References

- [1] Tan, L.T., and Pellegrino, S., "Thin-shell deployable reflectors with collapsible stiffeners Part 1: approach." *AIAA Journal*, vol. 44, no 11, pp. 2515-2523, 2006.
- [2] Cox, B.N., and Flanagan, G., "Handbook of analytical methods for textile composites." *NASA-CR-4750*, 1997.
- [3] Zhao, Q.I., and Hoa, S.V., "Thermal deformation behavior of triaxial woven fabric (TWF) composites with open holes." *Journal of Composite Materials*, vol. 37, no. 18, pp. 1629-1649, 2003.
- [4] Boesch, C., Pereira, C., John, R., Schmidt, T., Seifart, K., Sparr, H., and Pyttel, T., "Ultra-Light Self-Motorized Mechanism for Deployment of Light Weight Spacecraft Appendages." *39th Proceedings of Aerospace Mechanisms Symposium*, pp. 7-9, 2008.
- [5] Belvin, W.K., Straubel, M., Wilkie, W.K., Zander, M., Fernandez, J.M., and Hillebrandt, M. "Advanced deployable structural systems for small satellites." 2016
- [6] D'Amato, E., "Finite element modeling of textile composites." *Composite Structures*, vol. 54, no. 4, pp. 467-475, 2001.
- [7] Obst, A., Palermo, G., Ticci, L., and Prowald, J.S., "Modeling of triaxial woven fabrics for antenna reflectors." *European Conference on Spacecraft Structures, Materials & Mechanical Testing*, ESA/ESTEC, 2005.
- [8] Zhou, H., Jiang, W., Zhao, L., Li, G., Zhou, B., and Ma, Q., "Numerical simulation and experimental study of off-axis tensile performance of triaxial woven fabric reinforced rubber composites." *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 16, 2021.
- [9] Aoki, T., Yoshida, K., and Watanabe, A., "Feasibility study of triaxially-woven fabric composite for deployable structures." *48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, pp. 1811, 2007.
- [10] Kulkarni, S.G., and Gao, X.L., "Modeling of Mechanical

Response and Progressive Failure of Tri-axially Woven SiCf-SiC Composites." *ICF13*. 2013.

- [11] Zhou, X., Ma, X., Fan, Y., and Li, H., "Tensile and bending behavior of thin-walled triaxial weave fabric composites." *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol 14, 2019.
- [12] Kueh, A., and Pellegrino, S., "ABD matrix of single-ply triaxial weave fabric composites." *48th AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, pp. 2161, 2007.
- [13] Christensen, R.M., "Mechanics of composite materials." *Courier Corporation*, 2012.
- [14] Kueh, A., and Pellegrino, S., "Triaxial Weave Fabric Composite", *European Space Agency Contractor Report*, 2007.
- [15] Karkkainen R.L., and Sankar, B.V., "A direct micromechanics method for analysis of failure initiation of plain weave textile composites." *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 1, pp. 137-150, 2006.
- [16] ASTM D3039, "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Material." ASTM, 2014.
- [17] Kim, H.I., "A Study on Viscoelastic Properties of Deployable Composites using Shape Memory Polymers", Thesis of Master, *Korea Aerospace University*, 2015.