

CFRP 복합재료 직교 격자 구조의 기계적 특성 연구

백상민* · 임성준*** · 김민성*† · 고명균* · 박찬익*

Study on Mechanical Properties of CFRP Composite Orthogonal Grid Structure

Sang Min Baek*, Sung June Lim***, Min Sung Kim*†, Myung Gyun Ko*, Chan Yik Park*

ABSTRACT: In this study, a grid panel structure in which the woven CFRP composites were stacked in the orthogonal array was proposed and the mechanical properties were analyzed and studied. The grid parts were fabricated by cutting prepreps and laminating them. The grid panel structure was fabricated by co-curing with lower laminate plate in auto-clave process. The behavior of the proposed grid panel structure was evaluated by tests under tensile, compressive, shear, and bending loads. The effect of increasing the stiffness of the orthogonal grid structure was verified through these tests. In addition, the finite element model was constructed and compared with the test results, confirming the validity and reliability of the test and analysis.

초 록: 본 연구에서는 직물 탄소섬유강화플라스틱 복합재를 직교 격자 형상으로 적층한 패널 구조를 제안하고, 기계적 특성에 대한 분석 및 연구를 수행하였다. 프리프레그를 재단하여 적층하는 방식으로 직교 격자 구조를 제작하였으며, 하부의 적층판과 오토클레이브 공정 일체 성형을 통해 격자 패널 구조를 제작하였다. 본 연구에서는 인장, 압축, 전단, 굽힘 하중을 부가하여 제안된 격자 패널 구조의 거동을 확인하였으며, 이러한 시험을 통해 본 직교 격자 구조물의 강성 증가 효과를 입증하였다. 또한, 유한요소해석 모델을 구축하여 시험 결과와 비교하였으며, 이를 통해 시험과 해석의 타당성을 확인하였다.

Key Words: 격자 패널 구조(Grid panel structure), 직교 격자(Orthogonal grid), 복합재료(Composite), 탄소섬유강화플라스틱(CFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastic), 곡률 구조물(Curvature structure)

1. 서 론

복합재료의 우수한 비강도, 비강성 특성이 많은 연구들에 의해 검증됨에 따라, 각 산업분야에서 복합재료의 적용 비중이 점차 증가하는 추세에 있다[1]. 복합재료 구조물에 보다 경량이면서 고강성 특성을 부여하기 위해 다양한 복합재료의 적층 방안도 지속적으로 연구되고 있다. 대표적인 적층 방법으로는 샌드위치 구조 및 격자 구조가 익히 알

려져 있다. 이 중 격자구조는 복잡한 격자 패턴으로 인해 tool 비용이 많이 발생하며, 제작 시간이 오래 걸린다는 단점이 있으나, 샌드위치 구조에 비해 더 높은 손상허용을 가지며, 열린 구조로서 비교적 검사가 쉽다는 특징이 있다[2]. 그리고 동일 무게의 샌드위치 구조에 비해 면외 방향으로의 강성이 약하나, 면내 방향으로 더 높은 강성을 가지고 있다. 이러한 특징들로 인해 격자 구조는 우주항공 구조물에서 많이 활용되고 있는 추세이다[3].

Received 9 April 2018, received in revised form 27 April 2018, accepted 27 April 2018

*Agency for Defense Development

*†Agency for Defense Development, Corresponding author (E-mail: castle@add.re.kr)

**Department of Weapon System Engineering, Science and Technology University

발사체 구조물에 주로 사용되고 있는 복합재 격자구조는 일반적으로 필라멘트 와인딩 공법을 사용하여 제작된다[3,4]. 한편, 이와 같은 공법은 주로 실린더 형태의 구조물에 많이 적용되고 있으며, 제작 시 교차부와 비교차부의 섬유 체적률이 달라지게 되어 해석에 대한 많은 시간과 노력이 요구된다. 또한, 제작할 수 있는 격자의 형상이 한정적이라는 특징이 있다. 격자 구조에 대한 연구로서, Tsai는 interlocked 격자 구조(1996)를 제안하였으며[5-7], 이에 대한 구조적 우수성을 입증하였으나, 격자와 판 사이의 추가적인 본딩(bonding) 공정이 요구되는 점과 격자를 구성하기 위한 slot에서 비교적 큰 응력집중이 발생하는 점이 단점으로 꼽힌다. Gibson의 연구(2008)에서는 유리섬유를 이용하여 iso-grid 복합재료 격자 패널을 제작하여 그 구조적 강성 증가를 입증하였다[8].

본 연구에서는 2차 본딩 공정 및 격자 방향에 대해 섬유의 손상 없이 직교 격자(Orthogonal grid) 패널을 제작하는 방법을 제안한다. 그리고 시험을 통해 제작된 격자 패널 구조의 기계적 특성을 평가하였다. 인장, 압축, 전단, 굽힘 시험을 수행하여 격자 유무 및 각 하중 조건에 따른 구조 거동을 확인하였고, 유한요소모델을 구성하여 시험결과를 해석적으로 입증하였다.

2. 적층형 격자 패널

2.1 탄소 직물 복합재료

본 연구에서 사용된 복합재료는 평직물(Plain weave fabric) 탄소섬유강화복합재료(CFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastics)이다. 섬유는 Style 3k~70-pw이며, 기지 재료(Resin)는 열경화성 에폭시이다. 기지의 경화 온도는 350°F(177°C)이며, 운용온도 범위는 -75~250°F(-59~121°C)이다. 제작된 복합재료는 약 37% 내외의 resin 함유량을 가진다. 평직물 복합재료는 일 방향 복합재료에 비하여 기계적 물성이 낮은 특징이 있지만, 삼차원 곡면이 있는 구조물을 제작함에 있어서는 일 방향 복합재료 보다 편의성이 있다. 본 연구에서 사용된 평직물 CFRP의 기계적 물성은 Table 1과 같다. 인장의 경우, ASTM D 3039[9], 압축의 경우, ASTM D 6641[10], 전단의 경우, ASTM D 5379[11] 규격에 따라 시험편을 제작하

Table 1. CFRP fabric lamina material properties

Property	Symbol	Value	Unit
Long. Modulus	E_{11}	64.02	GPa
Trans. Modulus	E_{22}	64.02	GPa
In-plane shear modulus	G_{12}	3.65	GPa
Poisson's ratio	ν_{12}	0.06	
Density	ρ	1550	kg/m ³
Ply thickness	t	0.2	mm

여 시험을 통해 기본 물성을 획득하였다.

2.2 적층형 격자 패널 제작

본 연구에서는 복합재료 평판의 강성 증가를 위해 적층형 격자 패널 구조를 제안한다. 우선, 원하는 격자 패턴에 맞게 몰드(Mold)를 구성한 뒤 격자에 사용될 프리프레그를 크기에 맞게 재단한다. 그 뒤, 형상에 맞추어 격자 파트를 적층하며, 이 때, 재료의 층간 분리 현상을 방지하기 위해서 매 4장 적층 시마다 진공 bagging 및 압착(Compaction)하는 작업을 수행한다. 이후, 패널 적층 판을 설계된 적층 방법에 따라 적층 한 뒤 진공 후 오토클레이브 공정으로 일체 성형한다.

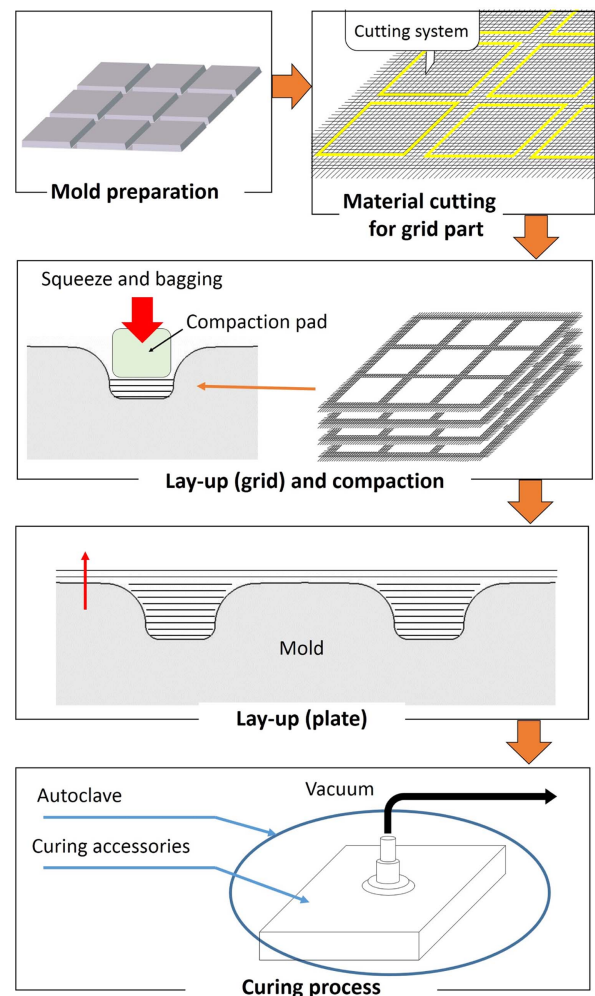


Fig. 1. Fabrication process for proposed grid panel structure

Table 2. Stacking sequence of proposed composite grid panel

Part	Stacking sequence	No. of plies
Plate	$[0/+45/0/-45/0/+45/0]_s$	14
Grid	$[0]_{20}$	20

이 때, 각 파트별 적층 정보는 Table 2와 같다. 평판의 경우, 일반적으로 널리 사용되는 적층법인 준등방성(Quasi Isotropic)으로 적층하였다. 본 준등방성 적층법은 $0^\circ/90^\circ$ 로 이루어진 Cross ply에 비해 전단 방향에 대한 하중을 많이 견디며 층간분리 현상도 비교적 덜 발생한다. 격자 부분의 경우, 제안된 격자 형상에서 45° 방향으로 적층 및 재단하게 되면 섬유 손실이 많아 구조적 역할을 기대하기 어려

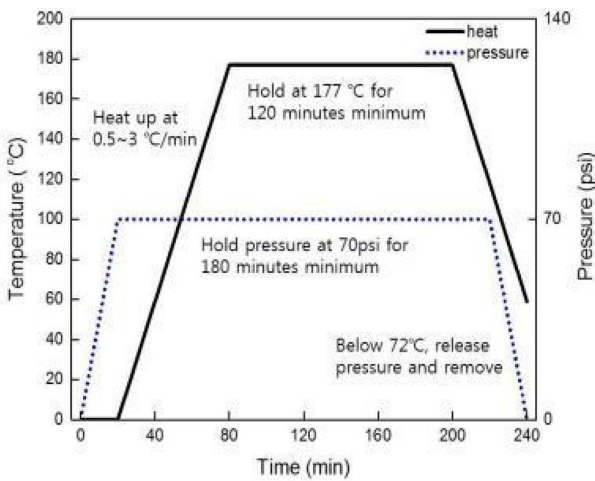


Fig. 2. The curing cycle

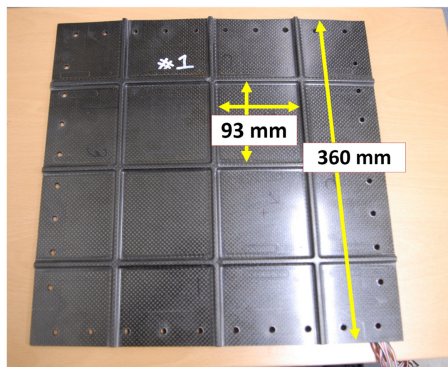
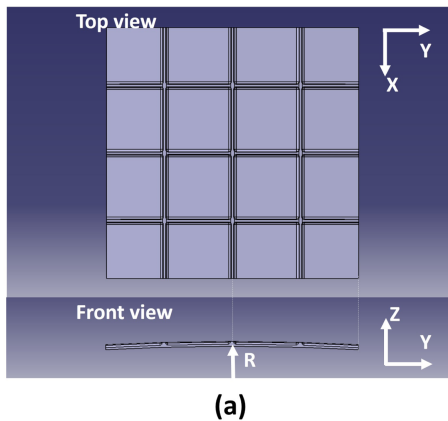


Fig. 3. Proposed grid panel structure (a) 3D model (b) fabricated

울 것으로 판단하여 $0^\circ/90^\circ$ 방향으로만 적층을 수행하였다. 하지만, 본 시편의 경우, 직물 복합재료를 사용하므로 방향에 따른 기계적 물성치는 차이가 없다.

오토클레이브 공정에 사용된 경화 주기는 기지 재료 원 소재 제작사에서 제공하는 공정을 반영하였으며 Fig. 2와 같다.

이러한 방법으로 제작된 격자 패널은 격자의 rib이 서로 가로지르는 부분에서 섬유의 손실 및 단절을 최소화 할 수 있으며, 적층판과 격자가 동일한 섬유 및 기지 재료를 공유함으로 인해 일체화된 구조의 제작이 가능하다. 또한, 재단 공정을 통해 격자의 너비 및 두께 관리가 일정한 수준으로 유지된다는 장점이 있다.

본 연구에서 사용된 적층형 격자 패널은 Fig. 3과 같이 제작되었다. 시편의 크기는 $360 \times 360 \text{ mm}^2$ 이며, 격자 사이의 셀 사이즈는 $93 \times 93 \text{ mm}^2$ 의 정사각형 형태이다. 격자의 너비 및 두께는 4 mm이다. 제작된 격자 패널의 무게는 780 g 이고, 이와 대조적으로 격자가 없는 시편의 무게는 645 g으로 측정되었다. 무게를 비교하면, 제작된 시편은 격자에 의한 무게 증가율이 21% 수준으로 측정되었다. 또한, 제작된 패널은 y-z 평면에서 볼 때, 하부 판 아랫면을 기준으로 3,500 mm의 일 방향 곡률을 가지고 있다.

3. 적층형 격자 패널의 기계적 특성 분석

3.1 유한요소 모델

본 연구에서 제안된 격자구조 패널은 크게 평판과 격자 부분으로 나뉜다. 평판 부분은 2D 평면 요소를 이용하여 모델링 하였으며, 격자 부분은 적층방향이 판에 수직인 방향이기 때문에 3D 육면체 요소를 사용하여 모델링 하였다. 총 50,148개의 요소가 사용되었고, 해석은 MSC. NASTRAN 소프트웨어를 사용하였다.

3.2 기계적 특성 시험

새로운 방식의 제작 방법을 통해 제작된 CFRP 복합재 격

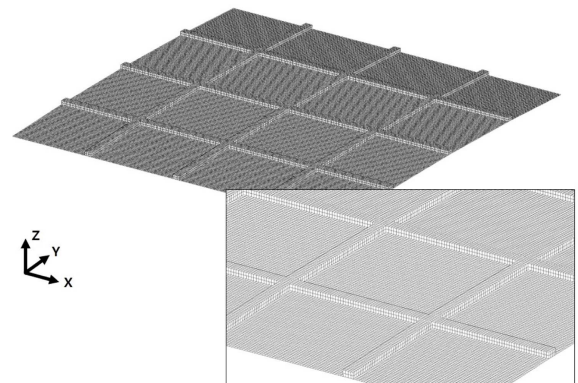


Fig. 4. Finite element modeling for the proposed grid panel structure

자 패널의 기계적 특성을 확인하고자, MTS 재료 시험기를 이용하여 축 방향에 대한 인장 및 압축, 전단, 굽힘 하중 시험을 수행하였다. 본 시험에서 사용된 시편은 격자 패널과 격자가 없는 패널을 구분하여 각 3개씩 수행하였으며, 변위 및 하중은 MTS 재료 시험기에서 측정하였다.

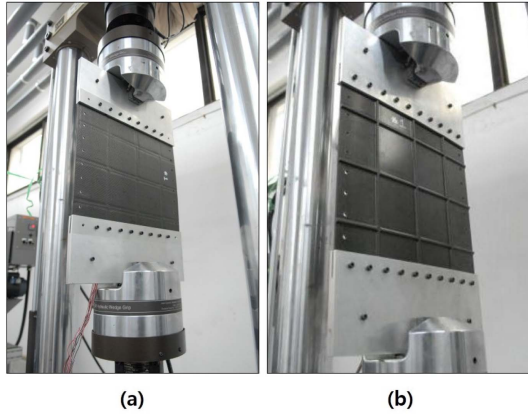


Fig. 5. Set up of axial tensile-compressive test (a) non-grid structure (b) grid structure

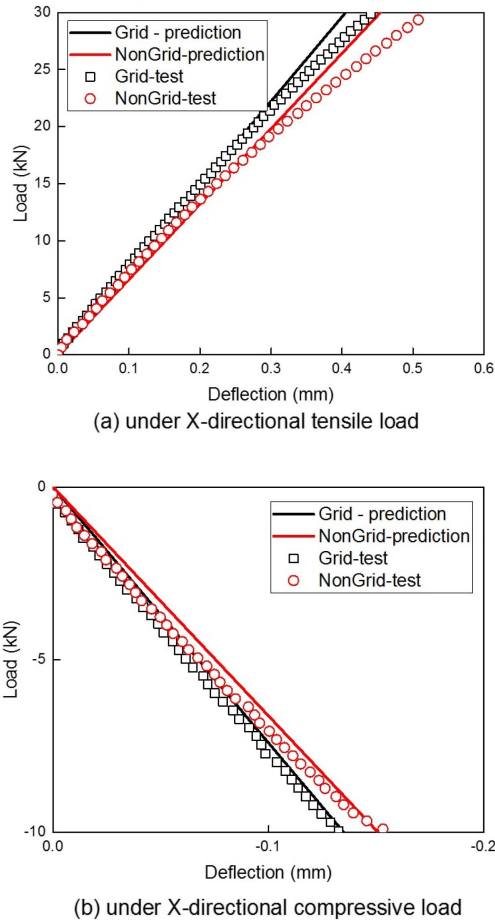


Fig. 6. Load-deflection results corresponding to x-direction (a) under tensile load (b) under compressive load

3.2.1 축 방향 인장 및 압축 시험

본 연구에 사용된 격자 패널 시편은 앞서 언급한 바와 같이 한쪽 방향으로 곡률을 가지고 있으므로 하중 방향에 따른 특성이 상이할 것으로 판단하였다. 이에 각 축 방향 하중에 대한 시험을 수행하여 구조 거동에서 격자의 기여도를 살펴보았다. 인장하중은 30 kN을 부가하였으며, 압축하중은 시험 안전상의 이유로 인하여 X방향으로 10 kN, Y방향으로 15 kN을 부가하여 구조 거동을 살펴보았다. 축 방향 인장, 압축 시험의 셋업은 Fig. 5와 같다.

X방향의 하중 시험에 대한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 시험 결과 X방향의 시험조건에서는 제안된 시편이 선형변형 구간에 있음이 확인된다. 유한요소해석으로 예측한 시편의 기계적 거동과 실제 시험에서 얻어진 결과가 유사한 것으로 판단되며, 본 유한요소모델 방법 및 해석의 타당성을 입증하였다. X방향의 인장 압축 거동에서는 격자 패널 시편의 변형이 보다 작게 나타나는 하지만, 격자에 의한 면내 강성 증가의 효과가 유의미하게 부각되지는 않는다고 판단된다. 한편, X방향 압축하중에서의 선형 좌굴(Buckling critical load)이 15.8 kN으로 계산되었고 격자 모델의 경우 26.6 kN으로 계산되었다. 즉, 격자에 의해 21%의 무게 증가가 발생하지만, 면외 방향의 강성 증가에 의해 약 68%의 좌굴하중 증가 효과가 있는 것으로 생각된다. X방향 압축하중 하에서의 좌굴 모드 해석결과는 Fig. 7과 같다.

Y방향 하중에 대한 시험결과와 해석결과를 Fig. 8과 같이 나타내었다. Y방향의 경우 일방향 곡률이 있기 때문에, 동일 하중에서 X방향의 시험보다 더 높은 변형이 나타난다. Y방향 인장에서는 해석 값이 측정 값보다 더 크게 예측하

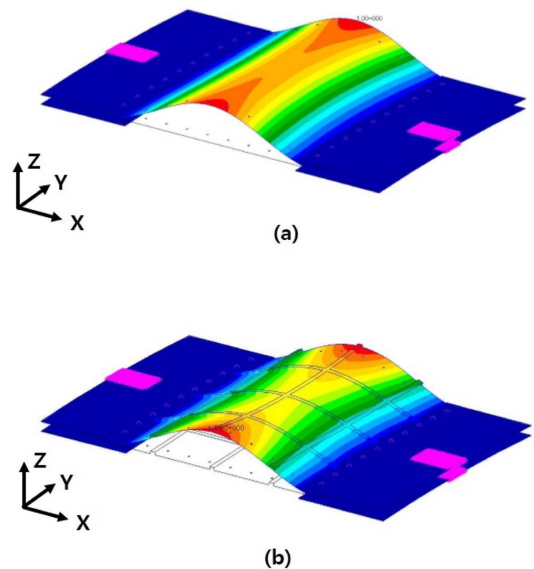
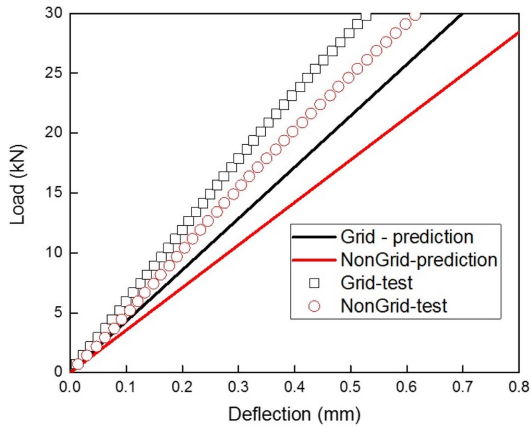
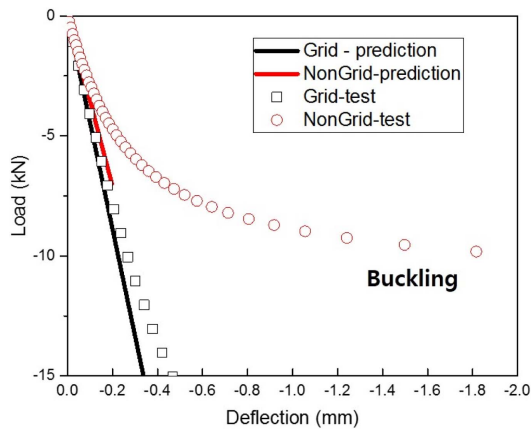


Fig. 7. Buckling mode under x-directional compressive load (a) non-grid structure (b) grid structure



(a) under Y-directional tensile load



(b) under Y-directional compressive load

Fig. 8. Load-deflection results corresponding to y-direction (a) under tensile load (b) under compressive load

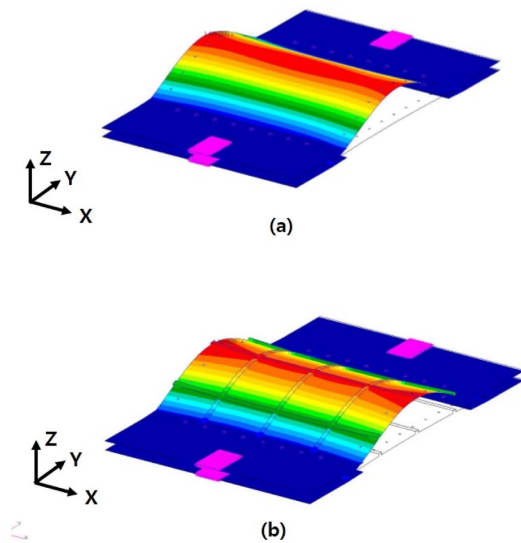
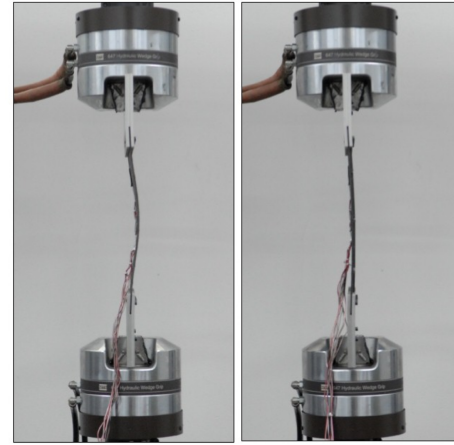


Fig. 9. Buckling mode under y-directional compressive load (a) non-grid structure (b) grid structure

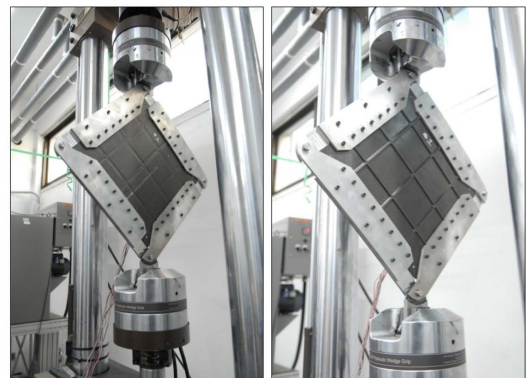


(a)

(b)

Fig. 10. Deformed shape of specimen under compression load (a) non-grid structure (b) grid structure

였다. 이는 곡률에 의한 오차로 판단되나, 경향성은 해석과 시험간의 유사성이 나타남을 확인할 수 있다. X축 시험과 마찬가지로 격자 패널 시편의 변형이 보다 작게 나타나지만 격자에 의한 면내 강성 증가 효과는 크지 않은 것으로 판단된다. Y방향 압축의 경우 언급한 바와 같이 일 방향 곡률에 의해 좌굴에 취약할 것으로 예상되었으며, 시험 결과 격자가 없는 모델의 경우 약 -7 kN 수준에서 큰 변형이 발생하기 시작하였다. 한편, 격자 시편의 경우 -15 kN까지 선형성이 유지됨을 확인할 수 있다. 유한요소 모델에서 좌굴임계하중을 계산한 결과, 격자가 없는 모델은 -10 kN으로 계산된 반면, 격자 모델의 경우 -17 kN으로 계산되었다. 즉, 제안된 격자구조는 비격자구조에 비해 21%의 무게 증가가 발생하지만, 면외 방향으로 강성을 향상시켜 곡면 방향에 대해 좌굴임계하중을 70% 증가시켜, 좌굴을 방지하는데 효과적인 것으로 판단된다. Y방향 압축하중 하에서의 좌굴 모드 해석 결과는 Fig. 9와 같다.



(a)

(b)

Fig. 11. Set up of shear test (a) non-grid structure (b) grid structure

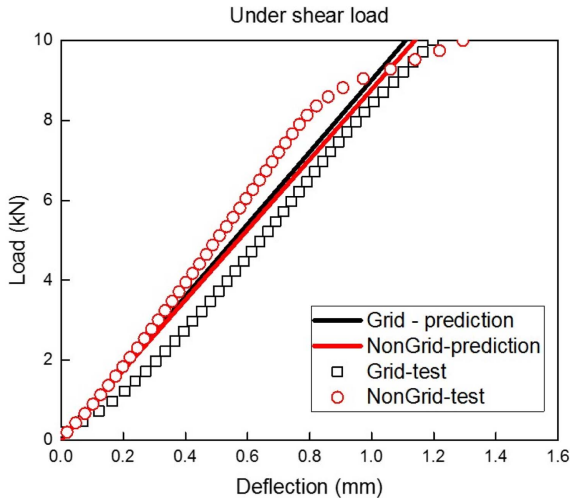


Fig. 12. Load-deflection results under shear load

Y축 방향 압축시험에서 발생한 좌굴 현상을 다음 Fig. 10과 같이 나타내었다. 비 격자구조의 좌굴하중 하에서 격자구조는 형상이 유지됨을 확인할 수 있다. 또한 시험에서 나타난 좌굴 모드가 해석과 유사함을 확인할 수 있다.

3.2.2 전단 시험

전단 시험은 Fig. 11와 같이 치구를 제작하고 시험을 구성하였으며[12], 각 코너에는 볼 베어링을 두어 전단 변형이 가능하도록 하였다. 전단 시험에서는 10 kN의 하중을 부가하여 구조의 거동을 확인하였다.

전단 하중 시험에 대한 시험 결과와 해석 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 유한요소해석에서는 두 구조의 거동이 거의 유사하게 계산되었다. 전단 하중 시험 결과에서 살펴보면, 일정 하중 이하의 선형 구간에서 비격자 구조의 변형이 격자 구조보다 작게 나타나는 것을 확인할 수 있으나, 이는 복잡한 구성품들이 포함되어 있는 전단 치구 셋업에서 발

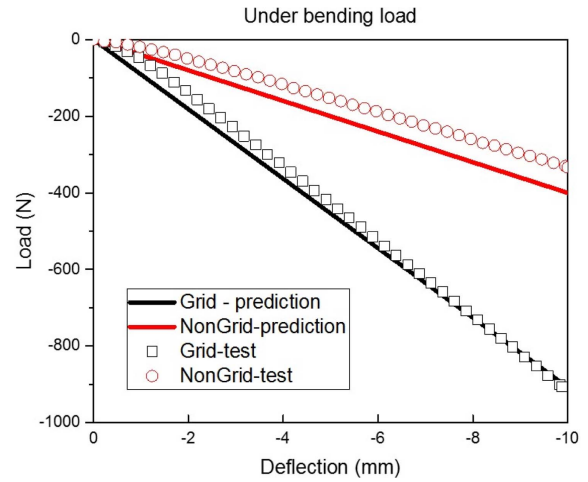


Fig. 14. Load-deflection results under bending load

생할 수 있는 오차 수준으로 판단되어 실질적으로 큰 차이는 없는 것으로 보인다. 한편, 격자가 없는 패널 시편의 경우에는 하중 증가에 따른 일부 비선형 구간이 나타난 것을 확인하였다. 이는 시편의 기하학적 특성인 Y방향의 곡률에 의한 현상으로 판단된다. 하지만, 본 연구에서 제안하는 격자 패널 시편의 경우, 이러한 현상이 나타나지 않는 것으로 보아 곡률로 인한 비선형 현상을 격자 구조가 완화해 주는 것으로 판단된다.

3.2.3 3-Point 굽힘 시험

굽힘 하중 시험은 Fig. 13과 같이 설치하여 변위를 제어하는 방법으로 시험을 수행하였다. 시편의 양 모서리 끝 단은 시험 치구에 걸쳐 있으며, 가운데 위치에서 하중을 부가하여 각 시편의 구조적 거동을 살펴보았다. 시험조건을 반영하여 유한요소 모델에서도 단순지지 조건으로 해석을 수행하여 결과를 산출하였다.

Fig. 14에서는 굽힘 하중 시험에 대한 결과를 유한요소해석으로 예측한 값과 비교하여 나타내었다. 본 굽힘 하중 시험은 동일 변위(10 mm) 조건에서 수행되었으며, 격자 패널의 하중은 격자가 없는 시편에 비해 약 2.7배로 측정되었다. 격자 패널의 경우, 해석으로 예측한 값과 일치하는 것으로 보이고 격자가 없는 패널의 경우, 하중의 차이는 일부 존재하나, 경향성은 일치하고 있다. 이를 통해, 격자 구조물이 패널의 굽힘 강성을 약 2.7배 향상시키는 것을 시험과 해석을 통해 입증하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 새로운 복합재료 격자 패널 제작 방법을 제안하였으며, 기계적 특성을 시험을 통해 확인하였다. 제안된 방법은 기존의 복합재 laminate 제작공정을 그대로 적용할 수 있고, 격자 구조에 의한 추가적인 2차 본딩 공정이

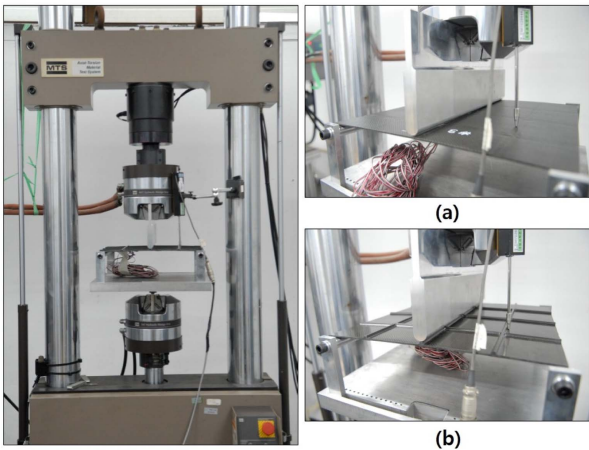


Fig. 13. Set up of 3-point bending test (a) non-grid structure (b) grid structure

필요치 않다는 장점이 있다. 그리고 격자의 일정한 폭, 격자간 거리 및 두께를 기대할 수 있다.

제작된 격자 패널의 기계적 특성을 확인하기 위하여 축방향에 대한 인장 및 압축, 전단, 굽힘 하중 시험을 수행하였다. 제안된 격자 패널 구조는 축방향 인장, 압축 및 전단 시험에서, 선형구간 내에서 동일 하중에 대한 변형이 격자가 없는 구조에 비하여 적게 나타났지만 그 차이는 크지 않았다. 즉, 격자 구조로 인한 면내 강성의 증가효과는 미미하였다. 그러나 압축하중이 증가하는 좌굴 조건 및 굽힘하중 조건에서는 격자가 없는 시편보다 더 우수한 특성을 보임이 시험적으로 확인되었다. 본 시험을 통해 제안된 격자 패널은 그 무게가 평판에 비해 21% 증가하지만 압축 하중 시험에서는 70%의 좌굴 하중 증대 효과가 나타났고, 굽힘 하중 시험에서는 약 2.7배로 굽힘 강성이 증가하였다. 제안된 격자모델은 유한요소해석을 수행하여 시험과의 유사성을 입증하였으며, 이를 통해 해석 방법의 타당성을 검토하였다.

REFERENCES

1. Lee, I., "Composite Research and Development in Korea," *Advanced Composite Materials*, Vol. 15, No. 1, 2006, pp. 33-79.
2. Huybrechts, S., Hahn, S., and Meink, T., "Grid Stiffened Structures: A Survey of Fabrication, Analysis and Design Methods," *Proceedings of the 12th International Conference on Composite Materials*, 1999.
3. Im, J.M., Kang, S.G., Shin, K.B., and Lee, S.W., "Study on Evaluation Method of Structural Integrity of Cylindrical Composite Lattice Structures," *Composites Research*, Vol. 30, No. 6, 2017, pp. 338-342.
4. Im, J.M., Shin, K.B., Lee, S.W., and Son, J., "Manufacturing Processes of Cylindrical Composite Lattice Structures using Filament Winding Method," *KSPE Spring Conference*, 2017, pp. 835-837.
5. Han, D., and Tasi, S.W., "Interlocked Composite Grids Design and Manufacturing," *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, No. 4, 2003, pp. 287-316.
6. Chen, H.J., and Tsai, S.W., "Analysis and Optimum Design of Composite Grid Structures," *Journal of Composite Materials*, Vol. 30, No. 4, 1996, pp. 503-534.
7. Huybrechts, S., and Tsai, S.W., "Analysis and Behavior of Grid Structures," *Composite Science and Technology*, Vol. 56, No. 9, 1996, pp. 1001-1015.
8. Gibson, R.F., "Energy Absorption in Composite Grid Structures," *Advanced Composite Materials*, Vol. 14, No. 2, 2005, pp. 113-119.
9. ASTM D3039, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
10. ASTM D6641, Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture.
11. ASTM D5379, Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method.
12. Park, S.J., Ko, M.G., Kim, D.G., Kim, S.K., Moon, C.O., Kweon, J.H., and Choi, J.H., "Design and Verification of Shear Buckling Test Fixture for Composite Laminate," *Composite Research*, Vol. 27, No. 4, 2017, pp. 158-167.