

입체 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 굽힘 특성: 실험 및 FEM 시뮬레이션을 통한 연구

초록

본 논문에서는 저비용의 합리적인 설계를 통해 일반 직기에서 세 가지 다른 단면을 가지는 3차원(3D) 벌집 모양 샌드위치 구조의 직물을 제조하였다. 3D 벌집 모양 샌드위치 구조물 복합재는 진공 성형공정(vacuum assisted resin transfer molding process)을 통해 제작하였다. 제작 후 서로 다른 단면을 가지는 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 굽힘 특성을 테스트하였다. 결과는 육각형 단면을 갖는 3차원 벌집 모양 샌드위치 구조가 최대 하중특성을, 삼각형 단면을 갖는 3차원 벌집 모양 샌드위치 구조는 최소 하중 특성을, 사각형 단면을 갖는 3차원 벌집 모양 샌드위치 구조는 육각형 단면 구조와 삼각형 단면 구조 둘 사이의 하중 특성을 보였다. 굽힘으로 파괴시키는 방식의 실험에서는 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재가 정면에서의 압착 파괴와 후면에서의 인장 파괴를 보이면서 전형적인 파괴가 일어남을 보였다. 마지막으로 하중-변위 곡선과 파괴 방식에서는 ABAQUS 소프트웨어를 사용한 FEM(Finite Element Method) 시뮬레이션으로 결과를 얻고, 실험 결과와 비교하여 FEM의 타당성을 입증하였다.

벌집 모양 3차원(3D) 직물 구조 복합재는 강화된 벌집 모양 3D 섬유 직물과 매트릭스 상으로 수지를 사용하여 제작하였다. 일반적인 벌집 모양 복합재는 프레스 공정으로 가공하여, 방법은 간단하지만, 복합재의 완전성이 좋지 않고 균열이 일어나기 쉽다. 일반적인 벌집 모양 샌드위치 구조 직물은 일반 직물과 비교하여 많은 장점으로 우수한 강성, 경량성, 변형 가능한 단면 구조(정사각형, 마름모, 곡선, 육각형 등) 등이 있다. 이러한 이점을 고려하여 벌집 모양 3D 섬유 구조 복합재는 항공 우주, 자동차, 조선, 건설, 저장, 파이프 라인, 기타 분야에서 널리 사용될 수 있다.

서론

직조 연구에서, Tianjin Polytechnic 대학교는 도비 직기 또는 자카드 직기에 벌집 모양 구조와 제직 원리를 결합하여 새로운 원단을 제조하였다. Dong, 연구진은 벌집 모양 3D 복합재 직물을 연구하기 위해 크림핑 장치와 방출 메커니즘을 변경하였다. Liu, 연구진은 CSW053 컴퓨터 제어를 통해 현물암 섬유 원사로 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 직물을 제조하였다. Zhu, 연구진은 일반적인 직기에 육각형 단면을 갖는 3D 샌드위치 직물을 제조하였다. Nie,와 He, 연구진은 다층 직물 설계에서 하위 조직 개념을 제시하였고, 이 방법을 사용하여 다층 직물 조직도를 빠르고 정확하게 설계하였다. Chen, 연구진은 벌집 모양 3D 복합재의 기본 개념, 디자인, 제직 방법을 제시하였다. 현재, 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 직물은 도비 레이퍼에 직기 또는 개선된 직기에 의해 제조되지만, 직조 공정이 복잡하고 생산 단가가 높다. 또한, 일반 베틀에 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 직물을 가공하기 위한 상세한 변수가 정의되지 않았다. Lv, 연구진은 벌집 모양과 T자 모양의 3차원 일체형 직물을 제조하였으며, 그 결과가 본 논문의 기초로 활용되었다.

Huang, 연구진은 6층 벌집 모양 3D 직조 복합재의 전단 특성을 연구하였고, 적층 판과 비교해보았다. Zhu, 연구진은 유리 섬유와 폴리에스터 섬유로 된 벌집 모양의 3차원 복합재의 충격 성능을 시험한 결과, 에너지 흡수가 다른 섬유 부피 함유량과 다르다는 것을 밝혔다. Lai, 연구진은 복합 재료의 굴곡 특성에 바느질 매개 변수의 효과를 조사한 결과, 구조의 파괴는 대부분 코어 전단 파괴로 인한 것임을 밝혔다. Raju, 연구진은 저속 충돌 시 벌집 모양 샌드위치 복합재의 역학 성능을 연구하고 파괴 형태를 분석하였다. 하지만 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 역학 성능, 파괴 메커니즘 및 파괴 형태의 연구가 더 요구되고 있다. Lv, 연구진은 실험과 유한 요소법(FEM) 시뮬레이션으로 3D 현무암 섬유 복합 재료의 기계적 성질을 연구하였다.

세 가지 다른 단면의 3차원 벌집 모양 샌드위치 구조 직물은 적은 비용과 합리적인 설계를 통해 제작되었다. 본 연구에서는 600tex 유리 섬유 필라멘트를 경사로 사용했고 2000tex 현무암 섬유 필라멘트를 위사로 사용하였다. 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재는 진공 성형(VARTM) 공정으로 제작되었다. 그다음, 서로 다른 단면을 가지는 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 굽힘 특성을 분석하였다. 마지막으로 하중-변위 곡선과 파괴 형식은 ABAQUS 소프트웨어를 사용한 FEM 시뮬레이션을 통해 얻었다.

실험방법

실험 재료 및 장비

E-유리 섬유 필라멘트(600tex)를 경사로 사용하고 2000tex 현무암 섬유 필라멘트를 위사로 사용하였다. 복합재 매트릭

스 상으로 vinyl ester 수지가 사용되었다. 고체화 반응 시약으로 methyl ethyl ketone peroxide를 사용하였고 cobalt naphthenate를 촉진제로 사용하였다.

실험실에서 작은 샘플을 짜기 위한 장비(Y100S)를 사용하고, VARTM 시스템을 몰딩에 사용하였고, 범용 시스템 프로토 타입 (NHY-W)을 샘플 절단용으로 사용하고 마이크로컴퓨터 제어 전자 시험기인 RGT-5를 시험에 활용하였다.

3D 벌집 모양 샌드위치 구조 직물의 디자인 및 제작

3D 벌집 모양 샌드위치 구조 직물의 디자인

3차원 벌집 샌드위치 구조 직물은 다층 바인딩 조직에 속한다. 세 가지 다른 단면을 가지는 3D 벌집 모양 샌드위치 직물의 경사 구조 도면을 그림 1에 나타내었다. 3가지 다른 단면을 갖는 3D 벌집 일체형 직물의 경사 연결 도면을 작성하였고 그림 2에 나타내었다.

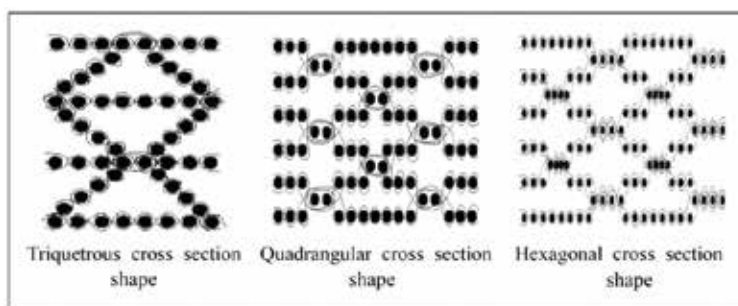


그림1. 세 가지의 다른 단면을 가지는 3D 벌집 모양 샌드위치 직물의 경사 구조 도면. 실선은 경사를 나타내고 점 모양은 위사를 나타냄.

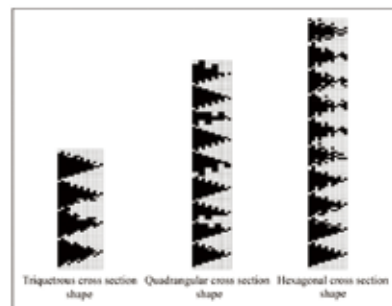


그림2. 세 가지 다른 단면 구조를 가지는 3차원 벌집 모양 샌드위치 직물의 도면

	Triquetrous cross-section shape		Quadrangular cross-section shape		Hexagonal cross-section shape	
	Basalt fiber filaments tows	E-glass fiber filaments tows	Basalt fiber filaments tows	E-glass fiber filaments tows	Basalt fiber filaments tows	E-glass fiber filaments tows
Linear density/tex	2000	800	2000	800	2000	800
Layer number of yarns	14	7	12	6	12	6
Density of warp and weft/(root/10 cm)	80	315	95	270	104	270

표1. 3차원 벌집 모양 샌드위치 구조 직물의 직조 매개 변수들

3D 벌집 모양 샌드위치 구조 직물의 제작

3차원 벌집 모양 샌드위치 구조 직물의 제작 매개 변수는 표 1에 나타내었다. 3가지 다른 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 일정한 두께를 만들기 위한 직조 매개 변수가 달라진다. 또한, 직물의 일정한 두께를 보장하기 위해 직조 매개 변수를 가능한 한 비슷하게 맞추었다. 같은 두께의 경우 하중-변위 곡선을 통해 비교할 수 있다.

3차원 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 제작

진공 성형법(VARTM)은 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재를 준비하는데 사용되었다. 또한, vinyl ester 수지, methyl ethyl ketone peroxide 및 cobalt naphthenate의 비율은 100 : 4 : 2로 선정하였다. 불포화 폴리에스테르 수지는 VARTM 기술에 의해 프리폼 내로 주입된 다음, 상온에서 60~90분의 시간 동안 진공 조건에서 방치하였다. 3차원 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 경사 단면을 가진 사진은 그림 3에 나타내었다. (성형성을 위해 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 직물은 폴리우레탄 폼으로 채워졌다)

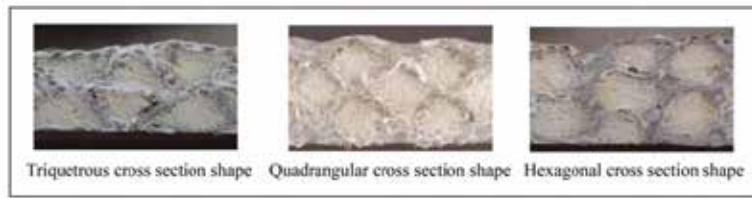


그림3. 3차원 벌집 모양 샌드위치 복합재의 사진. 왼쪽부터 삼각형, 사각형, 육각형 단면 구조.

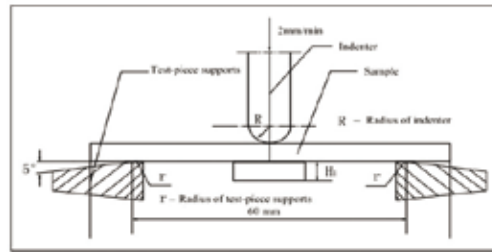


그림4. 3점 굽힘 시험의 개략도

	E_{11} /GPa	E_{22} /GPa	E_{33} /GPa	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}	G_{12} /GPa	G_{13} /GPa	G_{23} /GPa
Triquetrous cross-section shape	35	6	6	0.25	0.25	0.2	2.78	2.78	2.4
Quadrangular cross-section shape	36.5	7	6.6	0.3	0.3	0.25	3.55	3.05	2.6
Hexagonal cross-section shape	39.6	7.7	7.1	0.3	0.3	0.3	3.82	3.05	2.62

표2. 3차원 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 재료 특성

3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 시험

굽힘 특성의 시험은 GB/T 9341-2008/ISO 178:2001 (길이 160mm, 폭 30mm)에 따라 시행되었으며 NHY-W를 사용하여 시험 샘플을 준비하였다. 그런 다음 샘플을 마이크로컴퓨터 제어 시험기(RGT-5)를 사용하여 시험하였다. 시험 속도는 2mm/min으로 정하였다. 3점 굽힘 시험의 개략도를 그림 4에 나타내었다.

결과 및 토론

재료 특성

3차원 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 재료 특성은 표 2에 나와 있다. 이러한 매개 변수는 시험하기가 매우 복잡하였다. 따라서 본 연구에서는 표 2의 매개 변수 시험을 생략하였다. 그 대신 ABAQUS 소프트웨어를 통해 계산하고 디버깅했다. 표 2의 매개 변수는 ABAQUS 소프트웨어 및 실험을 사용한 FEM 시뮬레이션 결과에 가장 적합하였다.

기하학 모델과 시뮬레이션 메쉬 모델

3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 기하학적 모델은 왼쪽 나선형 규칙을 가진 ABAQUS / Explicit 동적 유한 요소 해석 모델의 실제 표본에 따라 설정하였다. C3D8R 솔리드 요소는 기하학적 모형의 메쉬 처리를 위해 사용하였다. 3차원 벌집 모양 샌드위치 구조 직물의 정확한 성형을 위해 폴리우레탄 폼으로 채웠으므로 FEM 시뮬레이션을 수행했을 때 폴리우레탄 폼을 복합재에 채웠으며 폴리우레탄 폼의 영률은 39.4mpa였고 푸아송비는 0.42였다. 삼각형 단면 구조를 갖는 메쉬 모델의 총 개수는 2,304개이다. 사각 단면 구조를 갖는 메쉬 모델의 총 개수는 1,376이다. 육각형 단면 구조를 갖는 메쉬 모델의 총 개수는 3,584였다. 기하학적 모델에서 길이, 너비, 높이의 경우의 수는 각각 32, 6, 4였다. 양쪽에 있는 요소의 수는 동일하였다. 요소의 구조는 ABAQUS 소프트웨어에 의해 자동으로 생성되었다. 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 메쉬 모델을 그림 5에 나타내었다.

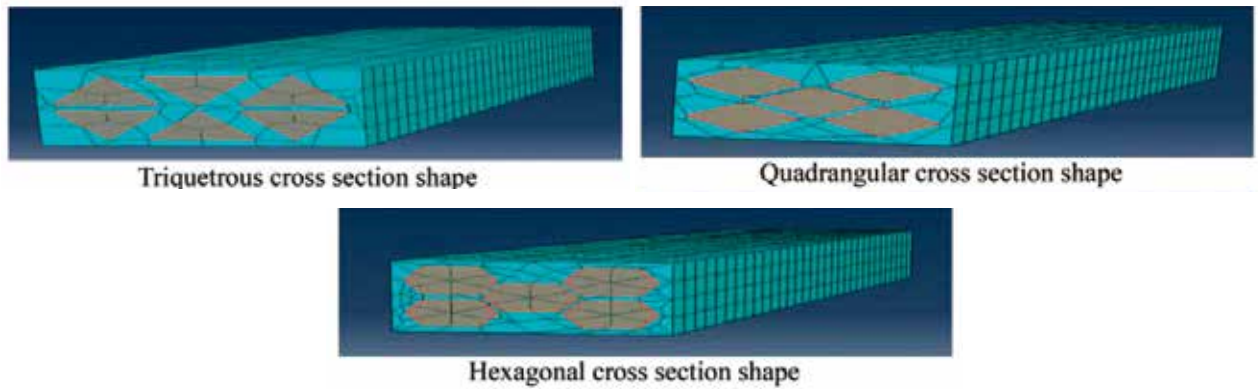


그림5. 3차원 벌집 모양 샌드위치 복합재의 시뮬레이션 메쉬 모델.

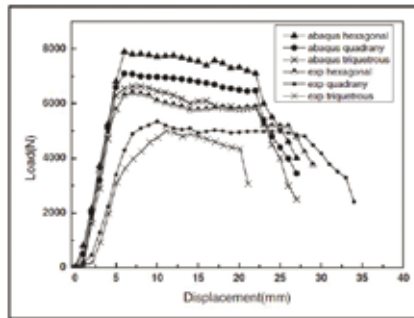


그림 . 3차원 벌집 모양 샌드위치 복합재의 실험과 FEM 시뮬레이션 하중-변위 곡선

Type	First group/N	Second group/N	Third group/N	Mean/N	Average variance	Coefficient of variation
Triquetrous cross-section shape	5083	5051	5072	5068.7	13.3	0.26%
Quadrangular cross-section shape	5319	5333	5304	5318.7	11.9	0.22%
Hexagonal cross-section shape	6583	6603	6576	6587.3	11.3	0.17%

표 . 최대 하중의 평균과 분산

하중-변위 곡선

실험에 의한 최대 하중의 평균과 분산을 표 3에 나타내었다.

3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 실험 및 FEM 시뮬레이션 하중-변위 곡선은 그림 6에 나와 있다.

그림 6에서 실험 및 FEM 시뮬레이션의 곡선 결과와 경향은 비슷하였다. 따라서 본 논문에서는 ABAQUS 소프트웨어를 사용하여 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 하중-변위 곡선을 예측하였다. 이러한 비슷한 경향은 FEM의 타당성을 입증하였다. 하중-변위 곡선은 세 단계로 나눌 수 있다. 처음에는 하중-변위 곡선이 거의 선형이었다. 이것은 섬유와 수지 사이의 결합 상태가 양호함을 나타낸다. 따라서 재료는 선형 탄성 성능을 나타냈다. 두 번째 단계에서는 곡선이 더는 직선을 나타내지 않고 곡선의 기울기가 감소하게 된다. 이는 변위가 증가함에 따라 시료와 콘 사이의 접촉 표면적이 증가하기 때문이다. 또한, 수지가 파괴되기 시작했고, 이때 섬유 다발은 보강재로서 주 하중을 견디게 된다. 그리고 여전히 많은 여유 하중을 가진다. 세 번째 단계는 내림차순 분기로, 섬유 다발 및 수지가 손상되기 시작하는 단계이다.

그림 6은 육각형 단면을 갖는 3차원 벌집 모양 샌드위치 구조가 최대 하중특성을, 삼각형 단면을 갖는 3차원 벌집 모양 샌드위치 구조는 최소 하중 특성을, 사각형 단면을 갖는 3차원 벌집 모양 샌드위치 구조는 육각형 단면 구조와 삼각형 단면 구조 둘 사이의

하중 특성을 보였다. 이것은 다음의 이유로 나타날 수 있다.

(1) 섬유질 질량 분율(3차원 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 섬유질 질량 분율은 연소 방법에 따라 달성되었다. 구체적인 단계는 다음과 같다: 가열 머플에서, 최저 온도는 400℃로 설정되고, 최고 온도는 600℃로 설정된다. 3차원 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재와 3차원 벌집 모양 샌드위치 구조 직물의 질량 차이 값을 부피로 나눈 다음 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 질량은 섬유질 질량 분율이었다.). 육각형 단면 구조를 갖는 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 섬유질 질량 분율은 63.97%이고, 사각 단면 구조를 갖는 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 섬유질 질량 분율은 59.27%이고, 삼각형 단면 구조를 가진 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재는 57.06%였다.

(2) 횡단 면적 : 횡단 면적이 클수록 3차원 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 성능이 더 안정하였다. 육각형 단면 구조를 갖는 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 단면적이 최대였고, 삼각형 구조 복합재가 최소, 사각형 구조 복합재가 육각형과 삼각형 영역 사이에 있었다.

(3) 접합부의 조직 구조 : 본 연구에서는 3가지의 서로 다른 부분에 대해 각 층을 평직 구조로 만들었다. 그러나 단면이 육각형인 접합부 조직 구조는 4세트의 '위사1-경사2' 구조가 사용되었고, 사각형 단면 구조를 갖는 접합부의 조직 구조는 하나의 세트, 삼각형 단면 모양의 교차점 조직 구조는 평직 구조를 사용하였다. 이것은 그림 1에서 볼 수 있다. 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 직물의 접합부 조직 구조는 다른 단면 구조에 따라 달라진다.

파괴 형태 및 파괴 메커니즘

세 종류의 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 결과는 유사하였다. 따라서 삼각형의 단면 구조를 가진 복합재를 기준으로 사용하였다. 삼각형 단면 구조를 가진 복합재의 전체 및 부분 확대 사진과 FEM 스트레스 분석 결과 모델을 그림 7에 나타내었다.

그림 6에서 실험 곡선과 FEM 시뮬레이션의 결과는 유사하였다. 또한, 그림 7에서 파괴 형태와 장소, FEM 시뮬레이션 값이 일치하였다. 따라서 그림 6과 그림 7에서 FEM 모델은 실험 결과를 정확하게 예측할 수 있다. 실험 결과와 FEM 시뮬레이션 결과 사이에 그림 7의 삼각형 단면 구조를 갖는 복합재의 변형과 파괴에 대한 일치를 보였다. 이는 유한 요소 모델의 적합성을 입증하였다.

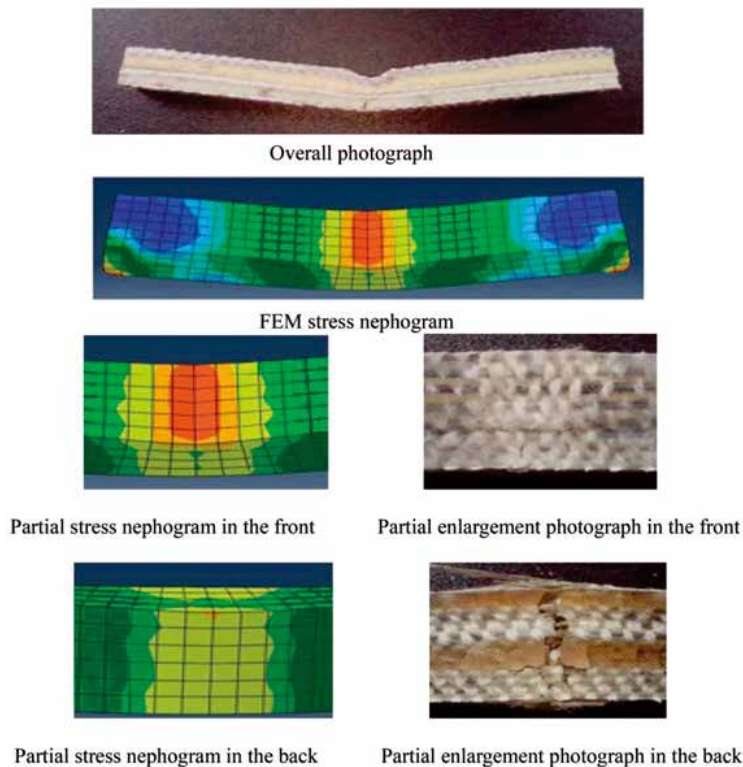


그림 7. 삼각형 단면 구조를 가진 복합재의 전체 및 부분 확대 사진과 유한 요소법(FEM) 스트레스 분석 모델

그림 7에서 굽힘 파괴 형태는 삼각형 단면 구조를 갖는 복합재가 정면에서의 압착 파괴와 후면에서의 인장 파단이 있는 전형적인 굽힘 파괴 형태를 보여준다. 또한, 박리가 발생하지 않았다. 그다음 단면이 사각형인 3차원 복합재와 단면이 육각형인 복합재의 굽힘 파괴 형태는 삼각형 단면 구조를 갖는 복합재와 유사하였다. 또한, 복합재는 박리가 일어나지 않았기 때문에 높은 박리 저항성을 가졌다.

결론

1. 세 가지 다른 단면 구조를 갖는 입체 벌집 모양 샌드위치 구조 직물이 적은 비용과 합리적인 설계법에 따라 제작되었다.
2. 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재는 우수한 기계적 성질을 가진다. 시험 과정에서, 재료는 우수한 층간 전단 강도를 보이며 박리, 분열 현상을 나타내지 않았다. 또한, 보강재로 사용되는 샌드위치 직물의 구조가 다르고, 3차원 직물로 제조된 복합재의 굽힘 특성도 큰 차이를 보였다. 육각형 단면을 갖는 3차원 벌집 모양 샌드위치 구조가 최대 하중특성을, 삼각형 단면을 갖는 3차원 벌집 모양 샌드위치 구조는 최소 하중 특성을, 사각형 단면을 갖는 3차원 벌집 모양 샌드위치 구조는 육각형 단면 구조와 삼각형 단면 구조 둘 사이의 하중 특성을 보였다.
3. 본 논문은 3D 벌집 모양 샌드위치 구조 복합재의 굽힘 특성을 예측하기 위해 ABAQUS/Explicit 동적 유한 요소 해석 모듈을 사용하여 FEM 시뮬레이션을 적용하였고, 그 타당성을 입증하였다.

참고문헌

1. Huang G. The organizational structure and weaving process of honeycomb 3-D woven fabric. *J Tianjin Inst Text Sci Technol* 1998; 14: 15-18.
2. Menta VGK, Vuppapalapati RR, Chandrashekhara K, et al. Manufacturing and mechanical performance evaluation of resin-infused honeycomb composites. *J Reinf Plast Compos* 2012; 31: 415-423.
3. Zhao RF, Hua J and Nie JB. Research on honeycomb three dimensional fabric and its composite material. *Progr Text Sci Technol* 2007; 5: 5-6.
4. Chen XG, Sun Y, Zhou X, et al. Design, manufacture, and experimental analysis of 3-D honeycomb textile composites part I. *Text Res J* 2008; 78: 771-781.
5. Chen XG, Taylor LW and Tsai LJ. An overview on fabrication of three-dimensional woven textile preforms for composites. *Text Res J* 2011; 81: 932-944.
6. Dong JG. Design and production of honeycomb plate three-dimensional fabric. *Cotton Text Technol* 2006; 34:36-37.
7. Liu CL, Liu HW and Shen XM. Test weaving of honeycomb weave fabric using basalt continuous filament. *Shandong Text Sci Technol* 2007; 2: 13-15.
8. Zhu CY, Tan DY, Tian W, et al. Structural design and weaving methods of 3D orthogonal integrated cellular woven fabrics. *J Text Res* 2006; 27: 9-12.
9. Nie JB and He YZ. Weave design of multi-layer woven fabric. *J Text Res* 2010; 31: 50-53.
10. Chen XG, Sun Y and Gong XZ. Design, manufacture, and experimental analysis of 3d honeycomb textile composites, part II: experimental analysis. *Text Res J* 2008;78: 1011-1021.
11. Lv LH, Wei CY, Wang X, et al. Key points for weaving of honeycomb shaped and T shaped solid woven fabrics. *Cotton Text Technol* 2013; 41: 1-4.
12. Huang G, Ma CQ, Ling GC, et al. The development of the 3-D woven composites. *J Text Res* 1999; 20: 4-6.
13. Zhu CY, Chen JJ, Zhu JP, et al. Development of 3-D integrated and sandwiched fabric composites. *J Text Res* 2007; 28: 56-59.
14. Zhu CY, Wang J, Zhang HX, et al. Impact property of glass fiber polyester 3-D integrated honeycomb structure hybrid composite plates. *J Text Res* 2008; 29: 41-44.
15. Lai J, Yan D, Rao X, et al. Study on three-point bending properties of stitched foam sandwich structure composites. *Eng Plast Appl* 2016; 44: 101-105.
16. Raju KS, Smith BL, Tomblin JS, et al. Impact damage resistance and tolerance of honeycomb core sandwich panels. *J Compos Mater* 2008; 42: 385-412.
17. Lv LH, Zhang XF, Liu GB, et al. Mechanical properties of 3d woven basalt fiber composite materials: experiment and fem simulation. *J Fiber Sci Technol* 2016; 72: 33-39.
18. Mei QL, Ji YD and Chen XC. Processing of liquid composite molding and development of equipment. *Fiber Reinf Plast Compos* 2014; 9: 52-62.