

섬유체적비 불균일 및 수지응집층이 복합재 격자 구조체 리브의 강성도 거동에 미치는 영향

강민송* · 전민혁* · 김인걸*[†] · 김문국* · 고은수* · 이상우**

The Effect of the Fiber Volume Fraction Non-uniformity and Resin Rich Layer on the Rib Stiffness Behavior of Composite Lattice Structures

Min-Song Kang*, Min-Hyeok Jeon*, In-Gul Kim*[†], Mun-Guk Kim*, Eun-Su Go*, Sang-Woo Lee**

ABSTRACT: Cylindrical composite lattice structures are manufactured by filament winding process. The fiber volume fraction non-uniformity and resin rich layers that can occur in the manufacturing process affect the stiffness and strength of the structure. Through the cross-section examination of the hoop and helical ribs, which are major elements of the composite lattice structure, we observed the fiber volume fraction non-uniformity and resin rich layers. Based on the results of the cross-section examination, the stiffness of the ribs was analyzed through the experimental and theoretical approaches. The results show that the fiber volume fraction non-uniformity and resin rich layers have an obvious influence on the rib stiffness of composite lattice structure.

초 록: 원통형 복합재 격자 구조체는 필라멘트 와인딩 기법으로 제작되며 제작 공정에서 발생할 수 있는 섬유체적비 불균일과 수지응집층은 구조체의 강성도 및 강도에 영향을 줄 수 있다. 구조체의 주요 요소인 후프 및 헬리컬 리브의 단면 분석을 통해 섬유체적비 불균일 및 수지응집층의 존재 여부를 확인하였으며, 단면 분석 결과를 바탕으로 후프 및 헬리컬 리브에 대한 실험 및 이론적 접근을 통해 섬유체적비 불균일 및 수지응집층이 리브 요소의 강성도에 미치는 영향을 분석하였다. 섬유체적비 불균일이 후프 리브의 굽힘 거동에 영향을 미치는 것을 확인하였으며 헬리컬 리브의 경우 섬유체적비 불균일 및 수지응집층에 의해 강성도에 변화가 있음을 확인하였다.

Key Words: 복합재 격자 구조체(Composite Lattice Structure), 후프 리브(Hoop Rib), 헬리컬 리브(Helical Rib), 섬유체적비(Fiber Volume Fraction), 수지응집층(Resin Rich Layer), 강성도(Stiffness)

1. 서 론

우주 발사체의 단 연결부에 사용되는 원통형 복합재 격자 구조체는 연속된 탄소 섬유 토우(Tow)를 에폭시 수지에 함침시켜 맨드릴(Mandrel)에 감아 적층하는 공정인 필라멘트 와인딩(Filament Winding) 공정으로 제작된다. 필라멘트 와인딩 공정의 특성상 적층 두께가 두꺼운 구조물의 경우

토우의 장력 제어 한계로 인하여 두께 방향(내경에서 외경 방향)으로 섬유체적비를 일정하게 유지하는 것은 매우 어렵다. 복합재 격자 구조체는 Fig. 1과 같이 후프 리브(Hoop Rib), 헬리컬 리브(Helical Rib)와 각 리브가 교차하는 후프-헬리컬 노트(Hoop-Helical Knot), 헬리컬-헬리컬 노트(Helical-Helical Knot) 요소로 구성되어 있다. 리브와 리브가 교차하는 노트 요소와 두께는 같지만 적층수는 노트 요

Received 13 April 2018, received in revised form 27 August 2018, accepted 27 August 2018

*Department of Aerospace Engineering, Chung-Nam National University

[†]Department of Aerospace Engineering, Chung-Nam National University, Corresponding author (E-mail: igkim@cnu.ac.kr)

**Defense and Aerospace Division, Hankuk Fiber Group

소의 1/2이 되는 리브 요소에서는 필라멘트 와인딩으로 적층된 층 사이에 공백이 발생하며, 이 공백에 여분의 수지가 응집되어 수지응집층이 생길 수 있다. 이러한 공정상의 이유로 복합재 격자 구조체는 두께방향으로 섬유체적비가 불균일하게 제작될 수 있고 리브에는 수지응집층이 존재할 수 있다. 적층 두께 방향에 따른 섬유체적비 불균일 및 수지응집층의 존재는 복합재 격자 구조체의 강성도 및 강도 저하를 유발할 수 있으며, 여러 파손 모드에 영향을 줄 수 있다. 따라서 섬유체적비 불균일 및 수지응집층에 의한 복합재 격자 구조체 요소의 국부적인 강성도 및 강도 변화에 대한 연구 수행이 필요하며, 해당 연구 결과를 기반으로 섬유체적비 불균일 및 수지응집층에 의한 복합재 격자 구조체 전체의 강성도 및 강도 변화에 대한 연구가 수행되어야 한다.

본 논문에서는 복합재 격자 구조체의 후프 및 헬리컬 리브의 단면 분석을 수행하여 적층 두께 방향에 따른 섬유체적비 불균일 및 수지응집층에 의한 리브의 강성도 변화에 대하여 고찰하였다. 연구 수행에 필요한 리브의 두께 방향에 따른 섬유체적비 및 수지응집층 정보는 광학 장비를 활용한 단면 분석을 통하여 취득하였으며, 섬유체적비의 경우 기존 기법을 보완한 이미지 처리 기법을 이용하여 측정하였다. 후프 리브는 굽힘 시험 및 유한요소해석을 통하여 섬유체적비 불균일에 의한 강성도 변화를 고찰 하였으며, 헬리컬 리브는 시편의 기하학적 형태에 의한 제약으로 강성 평가 시험 대신 이론적 접근 및 유한요소해석을 통해 섬유체적비 불균일 및 수지응집층이 강성도 거동에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 이미지 기법 개선

각 리브의 두께 방향에 따른 섬유체적비는 광학 장비를 활용한 이미지 기법으로 분석하였다. 섬유체적비 측정을 위한 이미지 기법의 경우 대표적으로 면적비 기법(Areal Method)[1]과 섬유 집계 기법(Fiber Counting Method)[2]이 활용된다. 두 기법 모두 고배율 광학현미경으로 촬영된 이미지를 처리하여 섬유체적비를 계산하는 방식으로, 면적비 기법의 경우 비교적 측정이 편리한 반면에 이미지 화소, 조명, 초점 등에 따라 오차가 발생하며, 섬유 집계 방식의 경우 비교적 정확하지만 측정이 까다롭고 섬유의 형상이 뚜렷하지 않은 경우 측정이 불가능한 단점이 있다.

리브의 섬유체적비 분포를 확인하기 위해서는 두께 방향을 따라 연속적으로 촬영된 단면 이미지를 분석하여야 하기 때문에 다수의 이미지를 빠르게 분석함과 동시에 오차율이 낮은 개선된 이미지 기법의 확립이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 동일한 이미지에 대하여 섬유 집계 방식으로 측정된 섬유체적비(v_{fc})에 면적비 기법으로 측정된 섬유체적비(v_{fA})가 수렴하도록 하는 특정 상수(k)를 도출하고 적용한 방법을 활용하여 이미지 기법을 개선하였으며 그

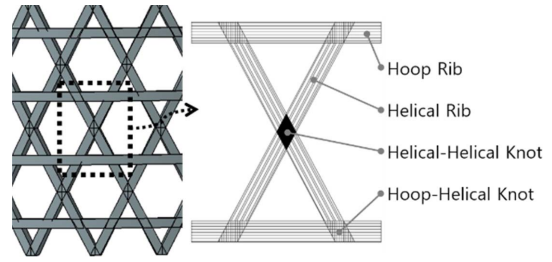


Fig. 1. Rib and Knot of Composite Lattice Structure

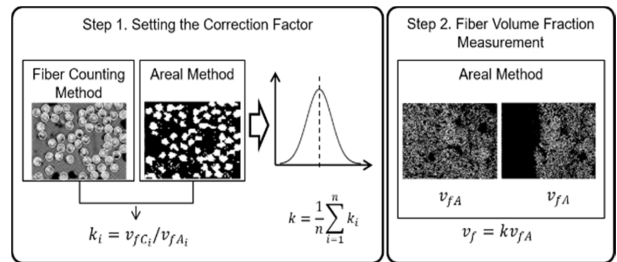


Fig. 2. Schematic Diagram for Image Processing

과정은 Fig. 2와 같다.

개선된 이미지 기법은 면적비 기법을 기반으로 다수의 이미지를 신속하게 처리한 후 상수 적용을 통해 값을 보정하는 방식이므로 보다 빠르고 정확하게 섬유체적비를 측정할 수 있다. 개선된 이미지 기법을 적용해 측정된 섬유체적비는 섬유체적비 측정 시험인 강열감량 시험(Ignition Loss Test)[3]을 통해 구해진 섬유체적비와 공정 예측 값(Ideal of Manufacture, v_{ideal})과 비교하여 값의 타당성을 확인하였다. 공정 예측 값은 이상적인 공정일 경우의 섬유체적비를 계산한 결과로, 필라멘트 와인딩 공정시 사용된 보강 섬유의 단면적(A_f), 토우를 구성하는 섬유의 개수(n_f), 사용된 토우의 개수(n_{tow}) 그리고 적층 수(n_{ply})를 이용해 전체 섬유의 단면적을 계산한 후 시편의 단면적(A_{rib})으로 나누어 계산한 값이며 식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$v_{ideal} = (A_f \times n_f \times n_{tow} \times n_{ply}) / A_{rib} \quad (1)$$

강열감량 시험, 개선된 이미지 기법(Image Processing) 그리고 공정 예측을 통해 얻어진 헬리컬 리브의 섬유체적비

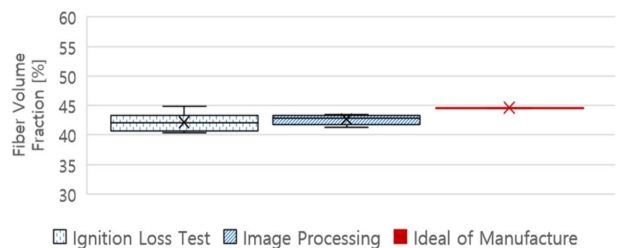


Fig. 3. Box-whisker's Plot for Fiber Volume Fraction of Helical Rib

를 Box-whisker's 그래프 형식으로 Fig. 3과 같이 나타내었다. 개선된 이미지 처리 기법을 통해 얻은 섬유체적비의 분포 및 평균값이 강열감량 시험을 통해 얻은 값의 분포 범위 안에 있는 것을 확인하였으며, 두 값 모두 이상적인 공정 예측 값보다는 낮게 측정됨을 확인하였다.

3. 단면 분석

후프 리브 및 헬리컬 리브의 수지응집층 유무 여부와 분포를 확인하기 위해 고배율 디지털 현미경(ICS-305B)을 이용하여 각 리브의 단면을 관찰하고 분석하였다. 또한 개선된 이미지 기법을 이용해 각 리브의 두께 방향(내경(Inner)에서 외경(Outer) 방향)에 따른 섬유체적비를 측정하여 섬유체적비 불균일 여부를 확인하였다. 후프 리브 및 헬리컬 리브의 단면 분석 시편은 각각 4개를 사용하였다.

3.1 수지응집층 분석

디지털 현미경을 이용하여 후프 리브와 헬리컬 리브의 단면을 관찰하였으며, 40배율로 관찰된 대표 시편의 모습은 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 헬리컬 리브의 경우 좌우 폭 방향에 걸쳐 수지가 응집되어 있는 수지응집층이 관찰되었다. 후프 리브의 경우 국부적으로 수지응집이 관찰되었으나 헬리컬 리브와 같이 폭 방향에 걸친 수지응집층은 관찰되지 않았다. 이러한 원인은 필라멘트 와인딩 공정시 헬리컬 리브에 적절한 장력이 가해지지 않았기 때문으로 판단되었다. 후프 리브의 경우 적절한 장력이 가해져 적층간의 공백이 발생하지 않았으나, 헬리컬 리브의 경우 충분한 장력이 가해지지 않았기 때문에 적층간의 공백이 발생하였으며 해당 공백에 여분의 수지가 응집되어 수지응집층을 형성한 것으로 판단되었다.

수지응집층이 확인된 헬리컬 리브를 각각 100 배율, 600 배율로 확대 관찰하였을 때 수지응집층(L_R)과 일방향 섬유/수지 혼합층(L_F)의 모습은 Fig. 5와 같다. 헬리컬 리브의 수지응집층 분포를 분석하기 위하여 Fig. 6과 같이 시편 폭의 중심선과 중심선으로부터 각각 좌/우로 1.35 mm씩 떨어진 지점에서 수지응집층과 섬유/수지 혼합층의 두께를 측정하였다. 4개의 헬리컬 리브 시편에 대한 수지응집층 분포

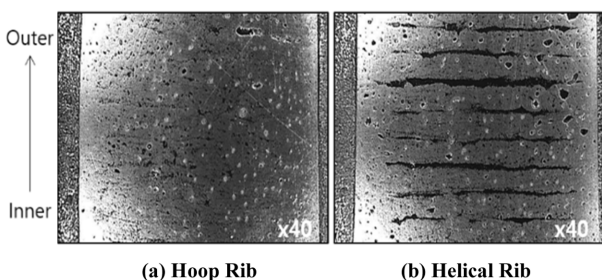


Fig. 4. Cross Section of (a) Hoop Rib and (b) Helical Rib

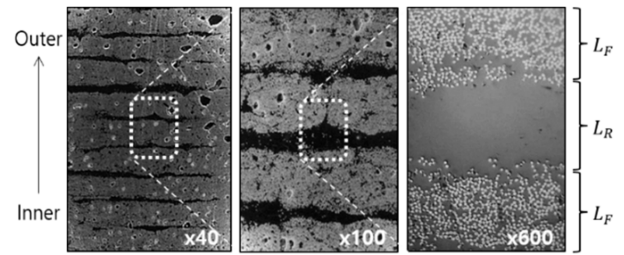


Fig. 5. Magnified Cross Section of Helical Rib

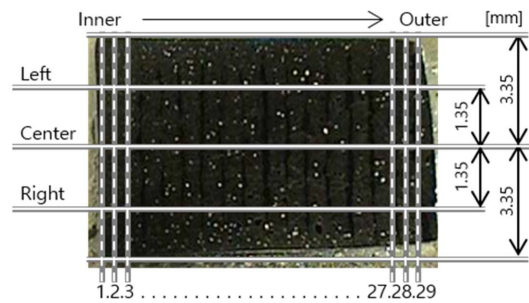


Fig. 6. Measurement Baseline for Helical Rib

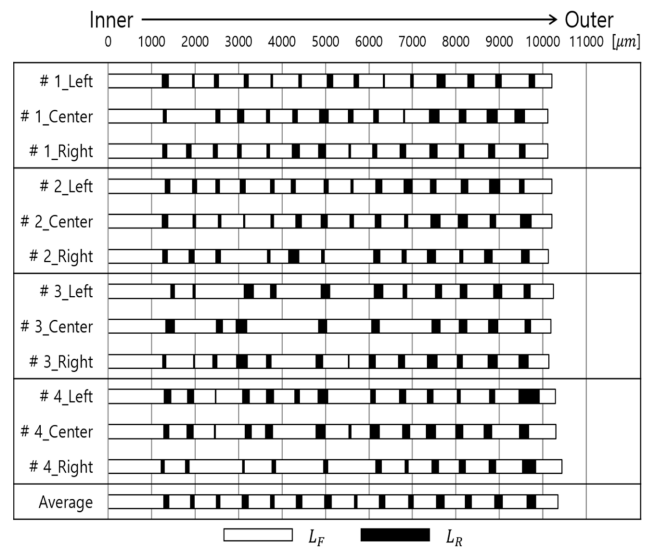


Fig. 7. L_F and L_R Distribution in the Cross Section of Helical Rib

측정 결과는 Fig. 7과 같다.

헬리컬 리브의 수지응집층 분포를 분석한 결과, 평균 15개 층의 일방향 섬유/수지 혼합층들 사이에 평균 14개 층의 수지응집층이 존재하는 것을 확인하였다. 일방향 섬유/수지 혼합층의 평균 두께는 571 μm , 수지응집층의 평균 두께는 126 μm 로 나타났다. 또한 원통형 격자 구조체의 내경에서 외경으로 갈수록 수지응집층의 두께가 두꺼워지는 경향을 확인하였고 내경부에서부터 평균 1,282 μm 지점까지는 수지응집층이 존재하지 않는 것을 확인하였다. 이는 서론에서 언급한 바와 같이 필라멘트 와인딩 공정상 적층 공정이 진행될수록 토우의 장력으로 인해 내경부에 지속적인

인 압력이 부가되어 외경부에 비하여 상대적으로 수지응집층이 구성될 수 있는 적층간의 공백이 형성될 수 없었기 때문에 판단된다.

3.2 섬유체적비 측정

개선된 이미지 기법을 이용하여 후프 리브와 헬리컬 리브의 두께 방향에 따른 섬유체적비를 측정하였다. 후프 리브의 경우 두께 방향에 따른 수지응집층이 관찰되지 않았기 때문에 Fig. 8과 같이 시편 폭의 중심선을 따라 17개 지점에서 섬유체적비를 측정하였다. 헬리컬 리브의 경우 3.1절에서 확인한 바와 같이 두께 방향에 따라 수지응집층이 존재하였고 폭 방향에 따라 수지응집층의 분포도가 변화하였다. 따라서 수지응집층 측정시와 마찬가지로 Fig. 6과 같이 시편 폭의 중심선과 중심선으로부터 각각 좌/우로 1.35 mm 씩 떨어진 지점에서 섬유/수지 혼합층의 섬유체적비를 측정하였다.

후프 리브의 두께 방향에 따라 섬유체적비를 측정한 결과는 Fig. 9와 같다. 후프 리브의 경우 내경에서 외경으로 갈수록 섬유체적비가 크게 감소하는 경향이 있음을 확인하였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 필라멘트 와인딩 공정상 내경부에 섬유 장력에 의한 압력이 지속적으로 부가되기 때문에 판단된다.

헬리컬 리브의 두께 방향에 따른 섬유체적비 측정 결과는 Fig. 10과 같다. 헬리컬 리브의 경우 내경부 근처에서 섬유체적비가 높게 측정되었으며, 외경부로 갈수록 섬유체

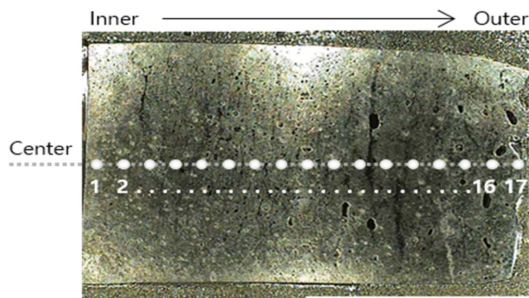


Fig. 8. Measurement Baseline for Hoop Rib

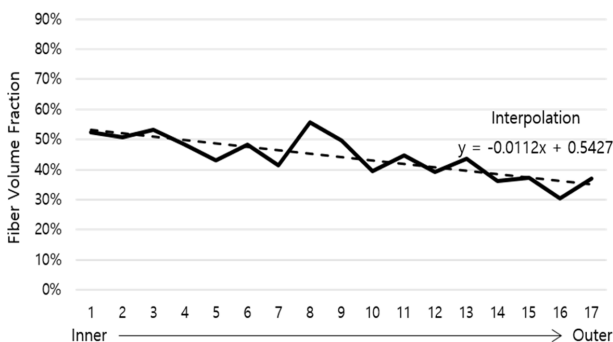


Fig. 9. Fiber Volume Fraction of Hoop Rib along Thickness Direction

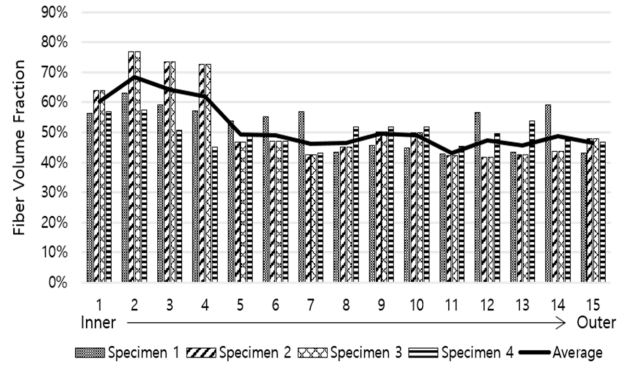


Fig. 10. Fiber Volume Fraction of Helical Rib along Thickness Direction

적비가 감소하는 경향은 보이나 5~15층 구간에서는 후프 리브와 같이 큰 폭으로 감소하지 않았다.

이러한 섬유체적비 변화 경향의 차이는 후프 리브의 경우 여분의 수지가 응집되어 층을 이루는 대신 섬유와 수지가 고르게 혼합되지만 내경부의 높은 압력으로 인해 내경부와 외경부의 수지 함유율 차이가 크고, 헬리컬 리브의 경우 여분의 수지가 수지응집층으로 구성되기 때문에 외경부 근처에서의 섬유/수지 혼합층의 섬유체적비의 차이가 후프 리브에 비해 낮은 것으로 판단된다.

4. 후프 리브의 강성도 변화

3.2절에서 후프 리브의 단면 분석을 통해 두께 방향에 따른 섬유체적비 분포를 Fig. 9와 같이 확인하였다. 섬유체적비에 따라 강성이 변하므로 후프 리브의 응력과 변형률 거동 역시 강성에 따라 다르게 나타난다. 따라서 후프 리브의 두께 방향에 따른 섬유체적비 분포가 후프 리브의 강성에 미치는 영향을 확인하기 위한 시험 수행이 필요하지만 곡선 형상을 가지는 후프 리브에 대한 단순 인장, 압축 시험 수행에는 많은 어려움이 따른다. 본 연구에서는 내경부와 외경부에서의 변형률 측정을 통해 후프 리브의 거동을 분석할 수 있는 4점 굽힘 시험을 수행하였다. 4점 굽힘 시험 결과와 수치적 모델, 유한요소해석으로 계산된 강성을 비교 분석하였다.

4.1 후프 리브의 4점 굽힘 시험

시험은 100 kN 용량의 만능시험기(Instron 5882)를 이용하였으며 복합재 굽힘 시험 규격인 ASTM D7264[4]를 참고하여 1.0 mm/min의 변위 제어 방식으로 시험을 수행하였다. Fig. 11과 같이 원통형 복합재 격자 구조의 후프 리브를 4점 굽힘 시험용 시편으로 준비하였으며 내경부와 외경부에서의 변형률을 스트레인 게이지를 사용하여 측정하였다. 하중 방향에 따른 후프 리브의 거동을 비교하기 위해 외경과 내경 방향으로 하중을 가하여 시험을 수행하였다. 시험

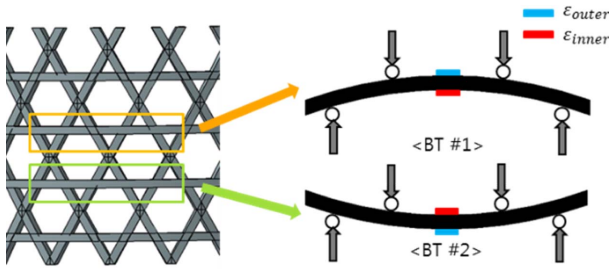


Fig. 11. Hoop Rib for Bending Test

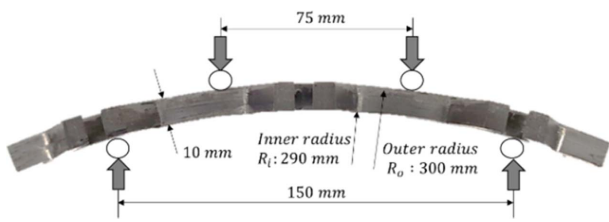


Fig. 12. 4-Point Bending Test for Hoop Rib

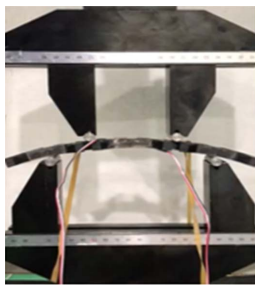


Fig. 13. 4-Point Bending Test Set-up

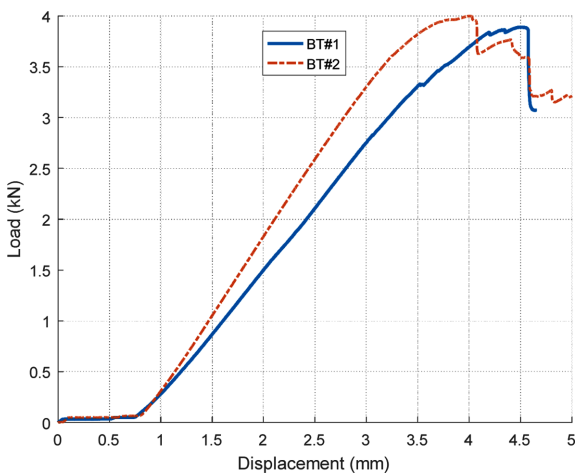


Fig. 14. Load-Displacement Curve of Bending Test for Hoop Rib [5]

치수는 Fig. 12와 같으며 Fig. 13과 같이 4점 굽힘 시험을 수행하였다. 하중 및 변위는 만능시험기로 측정하였고 변형률은 다채널 스트레인 앰프(MGCPlus)를 이용하여 측정하였다[5].

시험 결과인 하중-변위 선도는 Fig. 14와 같으며 Fig. 15는

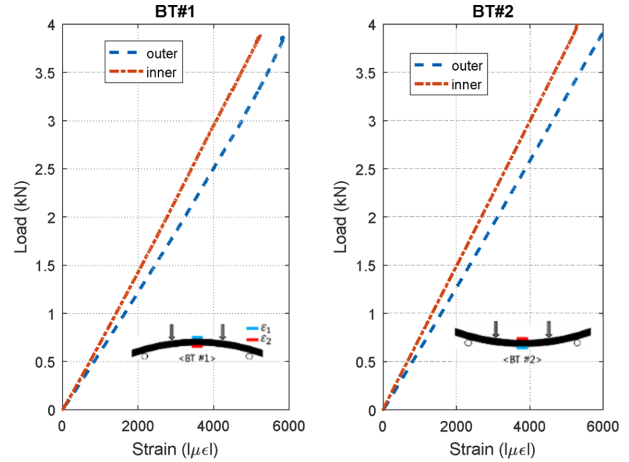


Fig. 15. Load-Strain Curve of Bending Test for Hoop Rib [5]

하중-변형률(절대값) 선도이다[5]. 변형률 측정 결과를 비교한 결과, 내경 또는 외경의 하중 방향에 관계없이 외경에서의 변형률이 더욱 크게 측정되었다.

4.2 수치적 계산

등방성 혹은 섬유 분포가 일정한 복합재료로 구성된 곡선보(Initially Curved Beam)의 경우 굽힘 하중을 받게 되면 응력과 변형률이 외경보다 내경에서 크게 발생한다. 하지만 굽힘 시험에서 측정된 후프 리브의 변형률은 외경에서 더욱 크게 발생하였다. 따라서 시험 결과와 수치적 모델을 이용한 계산 결과를 비교하고자 하였다.

단면 검사를 통해 구해진 섬유체적비와 혼합 법칙(Rule of Mixture)을 이용하여 각 층의 강성을 계산하였다. 강성이 다른 두 가지 이상의 재료로 구성된 구조물의 단면에서 두께 방향으로 강성이 변화할 경우 Composite Beam 이론 [6]을 적용하여 단면에서의 응력을 계산할 수 있다. Composite Beam 이론은 단면의 중립축을 기준으로 강성에 따라 각 단일층의 면적을 증가 혹은 감소시켜 전체 단면의 강성을 균일하게 변환한 후 간편하게 응력을 계산하는 방법으로 계산식은 식 (2)과 같다.

$$\sigma_{xy} = -\frac{n_j My}{I_t} \left(n_j = \frac{E_j}{E_o}, E_o < E_j \right) \quad (2)$$

σ_{xy} 는 j번째 단면에 작용하는 수직 응력이며 n_j 는 강성의 비율, I_t 는 변환된 단면의 단면 2차 모멘트이다. Fig. 9의 1차 함수로 보간된 섬유체적비 분포를 적용하였으며 이에 따라 Fig. 16과 같이 선형적으로 면적이 변화하는 사다리꼴 형태의 단면으로 변환하였다.

굽힘 시험을 수행한 후프 리브는 굽은 형상의 곡선보이다. 따라서 Fig. 17과 같이 곡선보의 변형을 계산할 수 있으며 다양한 단면 형상을 적용할 수 있는 Curved Beam Formula[6]를 이용하여 후프 리브의 변형을 계산하였다.

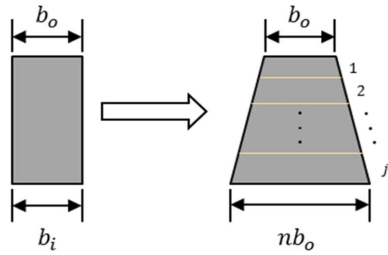


Fig. 16. Transformed Cross Section of Hoop Rib

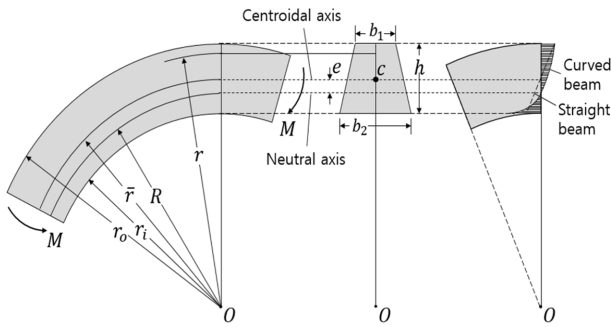


Fig. 17. Curved Beam in Pure Bending

Composite Beam 이론에 의해 Fig. 16과 같이 변환된 사다리꼴 단면을 적용한 응력 계산식은 식 (3)~(6)와 같다. \bar{r} 은 단면의 도심, R 은 중립축이다.

$$\bar{r} = \frac{1}{3} \left(\frac{2b_2 + b_1}{b_2 + b_1} \right) h \quad (3)$$

$$R = \frac{A}{\frac{1}{h} \left[(b_1 r_o - b_2 r_i) \ln \frac{r_o}{r_i} - h(b_1 - b_2) \right]} \quad (4)$$

$$e = \bar{r} - R \quad (5)$$

$$\sigma_\theta = \frac{M(R-r)}{Aer} \quad (6)$$

4.3 유한요소해석

굽힘 시험 결과와 비교를 위해 MSC.PATRAN/NASTRAN 을 이용하여 유한요소해석을 수행하였으며 유한요소해석

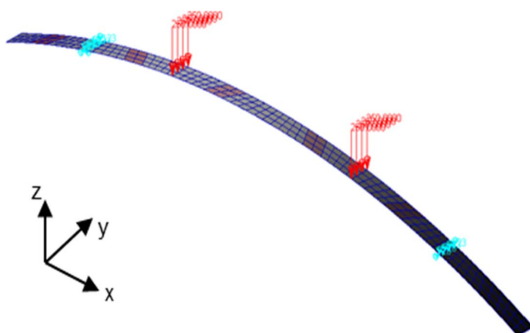


Fig. 18. Finite Element Model of Hoop Rib

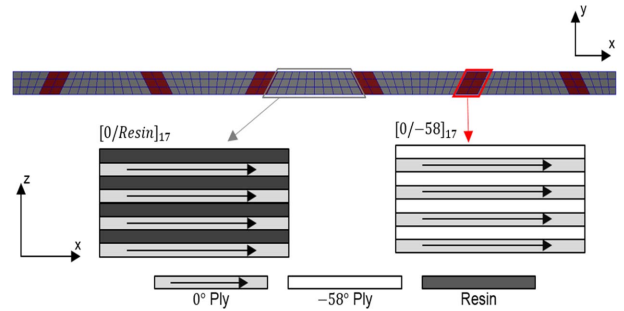


Fig. 19. Stacking Sequence of Hoop Rib and Hoop-Helical Knot

모델은 Fig. 18과 같다. 구조물의 두께는 일정하지만 후프 리브와 헬리컬 리브가 교차하는 후프-헬리컬 노트의 적층 수는 리브의 두 배이고 각 층의 두께가 일정하지 않으므로 연결부위 모사에 어려움이 많다. 따라서 Fig. 19와 같이 섬유와 수지층을 분리하여 모델링하였다. 경계 조건은 굽힘 시험과 동일하게 단순 지지이며 시험 결과와의 비교를 위해 2 kN의 하중을 가하였다. 4.2절의 수치적 모델과 마찬가지로 각 층의 물성은 혼합 법칙을 이용하여 섬유체적비에 따른 강성을 계산하여 적용하였다.

4.4 시험 및 계산 결과 비교

후프 리브의 4점 굽힘 시험 결과와 수치적 계산, 유한요소해석을 통해 계산된 변형률을 Table 1, Fig. 20과 같이 비교하였다. 두께 방향으로의 섬유체적비 분포를 적용한 수치적 모델과 유한요소해석 모두 시험 결과와 동일하게 외경에서의 변형률이 더욱 크게 발생하였다. 따라서 두께 방향으로의 섬유체적비 불균일이 후프 리브의 강성도 및 거동에 영향을 주는 것을 시험과 해석을 통해 확인하였다.

Table 1. Comparison of Bending Test Results for Hoop Rib with Numerical Model and FEA

Analysis Method		E_1 [GPa]	ϵ_θ [$\mu\epsilon$] (Relative error to test results)
Test	BT#1	Inner	2764
		Outer	-3235
	BT#2	Inner	-2678
		Outer	3119
Numerical model (BT #1 model)		Inner	3022 (11.1%)
		Outer	-3392 (6.7%)
FEA (BT #1 model)		Inner	2816 (3.5%)
		Outer	-3291 (3.6%)

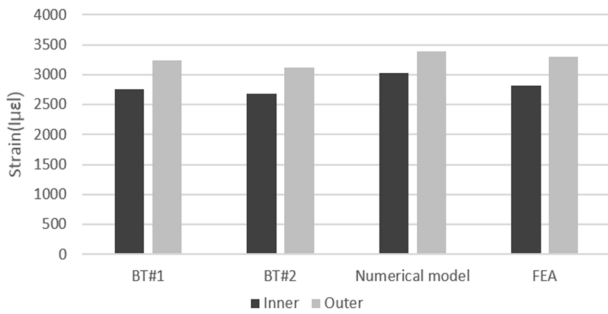


Fig. 20. Comparison of Bending Strains for Hoop Rib with Numerical Model and FEA

5. 헬리컬 리브의 강성도 변화

헬리컬 리브는 주로 원통형 격자 구조체의 축 방향으로 작용하는 압축 하중을 지지하는 요소이다. 따라서 압축 시험을 수행하여 압축력에 의한 헬리컬 리브의 강성도 변화를 분석해야 한다. 그러나 연구 대상체의 헬리컬 리브의 경우 길이가 25 mm 정도로 매우 짧아 해당 시편을 활용한 강성도 평가 시험을 수행하기에는 어려움이 있다. 이에 이론적 접근과 유한요소기법을 활용하여 섬유체적비 불균일 및 수지응집층에 의한 헬리컬 리브의 강성도 변화를 분석하였다.

압축 하중을 받는 구조물의 경우 구조물의 일방향 강성도와 연관된 대표적인 특성은 좌굴 하중이다. 따라서 적층판 이론을 기반으로 굴곡 강성도와 좌굴 하중을 분석하는 이론적 접근과 단면 검사 결과를 기반으로 모델링한 유한요소해석 모델을 이용하여 헬리컬 리브의 좌굴 하중 및 거동을 분석하는 해석적 접근을 통해 섬유체적비 불균일 및 수지응집층이 헬리컬 리브의 좌굴 특성 거동에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

5.1 이론적 접근

적층 보의 경계조건을 단순 지지로 가정하였을 때 단위 폭당 좌굴 하중(N_{cr})은 식 (7)과 같다[7].

$$N_{cr} = D_{11} \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 \quad (7)$$

식 (7)에서 구해진 값은 단위 폭당 좌굴 하중이므로 시편의 폭을 곱해줘야 좌굴 하중(P_{cr})이 된다. 식 (7)에서 D_{11} 은 적층 복합재의 굴곡 강성도(Bending Stiffness)를 나타내는 D Matrix의 1행 1열의 값이며, a 는 구조물의 길이이다. D Matrix는 $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21}, G_{12}$ 등의 각 단일층의 물성 정보로 구성된 Q Matrix와 중립면으로부터 각 단일층까지의 높이 정보로 구성되어 있다. 물성 정보는 각 층의 섬유체적비(v_f)에 따라 혼합 법칙으로 단순화하였다.

3절에서 수행한 헬리컬 리브 단면 분석 결과, 내경에서 외경으로 갈수록 섬유체적비는 낮아졌으며 수지응집층은

두꺼워지는 경향을 확인하였다. 따라서 수지응집층의 두께 비율이 증감함에 따라 헬리컬 리브의 굴곡 강성도와 좌굴 하중 경향을 분석할 필요가 있다.

단면 분석 결과를 기반으로 몇 가지 가정을 통해 Fig. 21과 같이 수지응집층의 두께를 변수로 하는 모델을 구성하였다.

가정 (1): 1개의 일방향 섬유/수지 혼합층을 중심으로 총 14개의 일방향 섬유/수지 혼합층(L_F)과 총 14개의 수지응집층(L_R)이 대칭적으로 교차 적층되어 있다.

가정 (2): 각각 1개의 일방향 섬유/수지 혼합층과 수지응집층이 단일층으로 구성되며, 단일층의 두께(t_{ply})는 일정하다.

가정 (3): 단일층 내의 수지응집층의 두께(t_R)가 변하면 일방향 섬유/수지 혼합층의 두께(t_F)가 변하며, 이에 따라 일방향 섬유/수지 혼합층의 섬유체적비(v_{fLF})는 변한다.

가정 (4): 모델 전체의 섬유체적비(v_{fTotal})와 두께(t_{fTotal})는 일정하다.

이러한 가정들을 통한 분석 모델을 구성한 뒤 수지응집층의 두께가 실제로 구성될 수 있는 범위, 즉 단일층 두께 대비 수지응집층의 두께(t_R/t_{ply})가 0~30% 범위에 있을 때 굴곡 강성도와 좌굴 하중 변화를 분석하였다. t_R/t_{ply} 에 따른 주요 변수들의 거동은 Fig. 22와 같다. 또한 모델 전체의 두께에 따라 수지응집층의 영향이 달라질 것으로 판단되어 전체 모델의 두께가 10.2 mm, 5.4 mm인 경우로 나누어 분

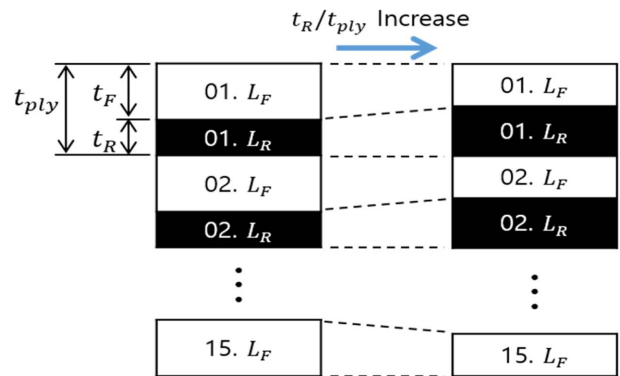


Fig. 21. Assumed Helical Rib Model for Theoretical Approach

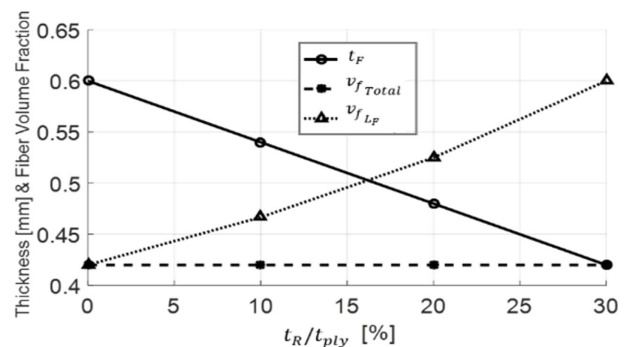
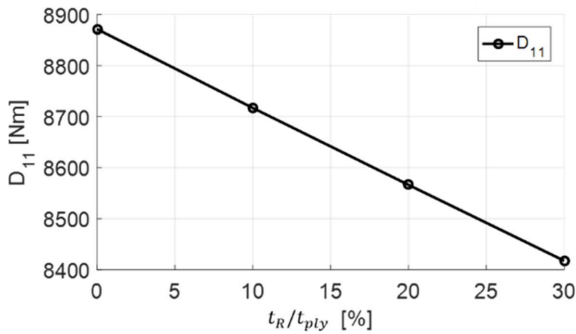
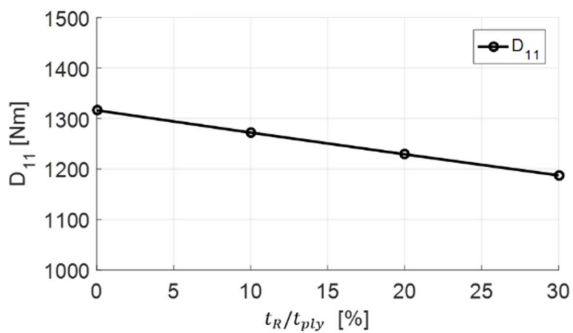


Fig. 22. Thickness and Fiber Volume Fraction of Ply vs. Resin Rich Layer Thickness Ratio

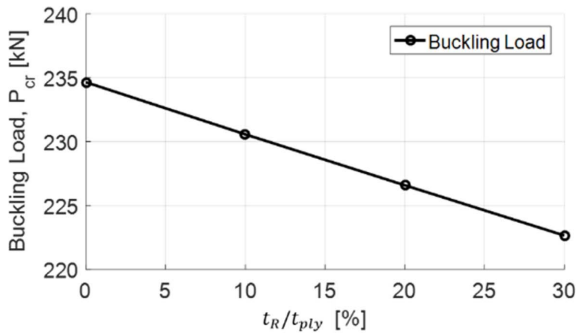


(a) Total Thickness: 10.2 mm

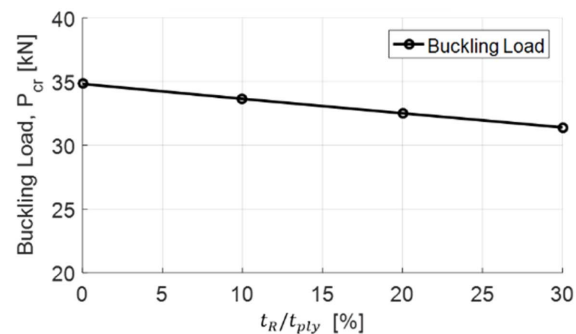


(b) Total Thickness: 5.4 mm

Fig. 23. Bending Stiffness due to Resin Rich Layers



(a) Total Thickness: 10.2 mm



(b) Total Thickness: 5.4 mm

Fig. 24. Buckling Load due to Resin Rich Layers

석을 수행하였다.

t_R/t_{ply} 에 따른 두께 10.2 mm, 5.4 mm 모델의 굴곡 강성도와 좌굴 하중 변화는 Fig. 23~24와 같다. 분석 결과 수지용집층의 두께가 증가할수록 굴곡 강성도와 좌굴 하중이 감소하는 경향이 있음을 확인하였다. 하지만 수지용집층의 두께비가 30%로 증가하더라도 굴곡 강성도와 좌굴 하중의 감소 비율은 약 5% 수준으로 나타나 실질적으로 우려할만한 수준으로 강성도가 저하되지 않는 것으로 판단하였다.

5.2 유한요소해석

유한요소기법을 이용하여 일방향 강성도와 연관이 있는 좌굴 해석 수행을 통해 좌굴 하중과 방향을 분석하여 섬유체적비 불균일과 수지용집층 여부에 따른 헬리컬 리브의 강성도 변화를 평가하였다. 유한요소모델의 모델링과 해석에는 상용 소프트웨어인 MSC.PATRAN/NASTRAN을 활용하였다.

해석 모델은 섬유/수지 혼합층의 섬유체적비가 두께방향으로 선형으로 변화하고 각 섬유/수지 혼합층 사이에 수지용집층이 존재하는 불균일 모델(Non-uniform Model)과 균일한 섬유/수지 혼합층으로만 이루어진 균일 모델(Uniform Model)을 모델링하여 결과를 비교하였다. 또한 헬리컬 리브의 길이 변화에 따라 섬유체적비 불균일 및 수지용집층이 강성도에 미치는 영향이 달라질 수 있다고 판단하여 헬리컬 리브의 길이를 달리한 모델에 대해 추가적인 해석을 수행하였다. 불균일 모델과 균일 모델의 형상은 Fig. 25와 같으며, 해석 모델의 형상 정보 및 해석 조건은 Table 2와 같다.

좌굴 해석 결과를 Table 3에 정리하였다. 불균일 모델과 균일 모델의 해석 결과, 좌굴 방향에서 차이가 발생하였다. 좌굴 방향의 경우 두께보다 얇은 폭 방향으로 좌굴이 일어

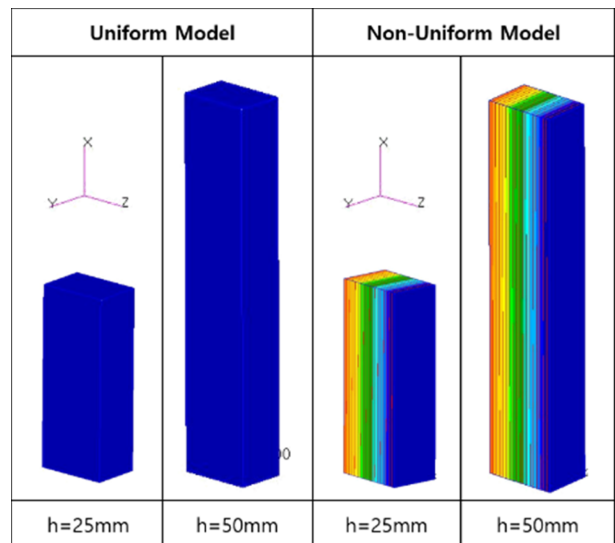


Fig. 25. FEA Modeling for Helical Rib

Table 2. FEA Condition for Helical Rib

Condition	Uniform Model	Non-Uniform Model
Total v_f	42%	
Each Ply v_f	Constant	Linear in the thickness direction (61%-41%)
Resin-Rich Layer	X	O
Dimension [mm]	Height(x) = 25 or 50, Width(y) = 6.7, Thickness(z) = 9.8	
Element Type	3D Orthotropic (CHEX8)	
Boundary Condition	Simply Support	

Table 3. Buckling Analysis Result for Helical Rib

Type	Uniform Model		Non-Uniform Model	
	Buckling Direction	Buckling Load	Buckling Direction	Buckling Load
Height 25 mm	Y	181 kN	Y	-
	Z	235 kN	Z	181 kN
Height 50 mm	Y	73 kN	Y	73 kN
	Z	126 kN	Z	107 kN

난 균일 모델과 달리 불균일 모델은 섬유체적비 불균일 및 수지응집층의 영향으로 폭보다 두꺼운 두께방향으로 좌굴이 발생하였다. 이러한 불균일 모델의 좌굴 거동은 섬유/수지 혼합층이 두께방향으로 연속적이지 않고 각 섬유/수지 혼합층 사이에 수지응집층이 존재하여 각각의 섬유/수지 혼합층의 국부 좌굴이 전체 좌굴 거동에 영향을 미친 것으로 판단된다. 하지만 좌굴 하중에서는 큰 변화가 없었다. 결과적으로 섬유체적비 불균일과 수지응집층은 좌굴 방향에 영향을 주었으나 좌굴 하중에는 영향을 주지 못하는 것을 확인하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 섬유체적비 및 수지응집층이 복합재 격자 구조체 리브의 강성도에 영향을 있음을 확인하였다.

이를 위하여 특정 단면에 대한 빠르고 정확한 섬유체적비 측정을 위해 이미지 기법을 개선하였으며, 섬유체적비 측정 시험 결과와 비교를 통해 개선된 이미지 분석 기법의 타당성을 확인하였다.

단면 분석을 통해 헬리컬 리브에서 다수의 수지응집층이 존재함을 확인하였으며, 후프 리브와 헬리컬 리브의 섬유체적비가 두께 방향을 따라 불규칙한 특성을 확인하였다. 이 과정에서 후프 리브의 섬유체적비 정보와 헬리컬 리브의 섬유체적비 및 수지응집층 정보를 확보하였다.

섬유체적비 불균일에 의한 후프 리브의 강성도 변화를

분석하기 위해 4점 굽힘 시험과 단면 분석 결과를 적용한 수치적 계산 및 유한요소해석을 수행하였다. 이를 통해 섬유체적비 불균일이 후프 리브의 강성도에 영향을 주는 것을 확인하였다.

헬리컬 리브의 경우, 이론적 접근과 유한요소해석을 통해 수지응집층 및 섬유체적비가 헬리컬 리브의 강성도 및 좌굴 특성에 영향을 주는 것을 확인하였다. 그러나 본 연구에서 고려한 적층 두께, 폭 그리고 길이를 갖는 헬리컬 리브의 경우 실제로 우려할 만한 수준의 강성도 및 좌굴 하중 저하가 유발되지 않아 압축 하중을 지지하는 헬리컬 리브의 경우 섬유방향 강성도에는 섬유체적비 불균일과 수지응집층의 영향이 크지 않음을 확인하였다.

본 연구를 통해 수행된 단면 분석 결과와 강성도 예측 결과는 향후 복합재 격자 구조체의 성형 공정 개선에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 주로 압축하중을 받는 복합재 격자 구조체는 다양하고 복잡한 파손 거동을 보이는데, 본 연구를 통해 발견된 복합적인 단면 특성을 고려한 강도 예측 연구, 특히 복합재 격자 구조체의 해석적 모델 정립에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 섬유체적비 불균일과 수지응집층이 복합재 격자 구조체 각 요소의 강도에 미치는 영향에 대하여 고찰할 계획이다.

후 기

본 연구는 민군협력진흥원(ICMTC)의 지원을 받아 수행한 연구입니다(15-CM-MA-12).

REFERENCES

1. Cann, M.T., and Adams, D.O., "Characterization of Fiber Volume Fraction Gradients in Composite Laminates", *Journal of Composite Materials*, Vol. 42, No. 5, 2008, pp. 447-466.
2. Zemcik, R., Srbova, H., Ekstein, K., Pirner, I., and Medlin, R., "Analysis of the Fiber Distribution, Size, and Volume Ratio of Unidirectional Composite Plates with Different Thicknesses", *Materiali in Tehnologije / Materials and Technology*, Vol. 51, No. 1, Feb. 2017, pp. 59-64.
3. ASTM D2584, *Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins*.
4. ASTM D7264, *Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*.
5. Jeon, M.H., Kang, M.S., Kim, I.G., Kim, M.G., Go, E.S., and Lee, S.W., "Compression and Bending Test for the Stiffness of Composite Lattice Subelement", *Composites Research*, Vol. 30, No. 6, 2017, pp. 331-337.
6. Ugral, A.C., and Fenster, S.K., *Advanced Mechanics of Materials and Applied Elasticity*, Pearson Education, 2011.
7. Whitney, J.M., *Structural Analysis of Laminated Anisotropic Plates*, 1987.
8. Vasiliev, V.V., Barynin, V.A., and Rasin, A.F., "Anisogrid Lattice

Structures – Survey of Development and Application”, *Composite Structures*, Vol. 54, 2001, pp. 361-370.

9. Terashima, K., Kamita, T., Kimura, G., Uzawa, T., Aoki, T., and Yokozeki, T., “Experimental and Analytical Study of Composite

Lattice Structure for Future Japanese Launchers,” *The 19th International Conference on Composite Materials*, 2013, pp. 5373-5382.