

육각 격자구조를 갖는 콘형 복합재 격자구조체의 구조안전성 평가 기법 연구

임재문* · 강승구* · 신광복**† · 이상우***

Study on Evaluation Method of Structural Integrity for Cone-Type Composite Lattice Structures with Hexagonal Cell

Jae-Moon Im*, Seung-Gu Kang*, Kwang-Bok Shin**†, Sang-Woo Lee***

ABSTRACT: In this paper, evaluation method of structural integrity for cone-type composite lattice structures with hexagonal cell was conducted. A finite element analysis was used to evaluate the structural integrity of cone-type composite lattice structure. The finite element model for evaluation of structural integrity was generated using solid element. In order to consider the difference in mechanical properties between intersection and non-intersection part, the mechanical properties were applied considering the fiber volume fraction of each part. Compression test of cone-type composite lattice structure were conducted for verification of evaluation method of structural integrity. The analysis result showed 2% errors in displacement and good agreement with test result.

초 록: 본 논문에서는 콘형 복합재 격자구조체의 구조안전성 평가 기법에 대해 연구를 수행하였다. 콘형 복합재 격자구조체의 구조안전성 평가는 유한요소해석을 통해 수행되었다. 구조안전성 평가를 위한 유한요소모델은 솔리드 요소를 사용하여 생성하였다. 섬유 교차부와 비교차부의 물성 차이를 고려하기 위해 섬유 체적률을 고려한 기계적 물성을 적용하였다. 구조해석 기법의 검증을 위해 콘형 복합재 격자구조체의 압축 시험을 수행하였다. 시험과 해석의 비교 결과, 약 2%의 변위 오차가 발생하여 잘 일치하는 것을 확인하였다.

Key Words: 복합재(Composite material), 유한요소해석(Finite element analysis), 격자구조체(Lattice structure), 구조안전성(Structural integrity)

1. 서 론

복합재 격자구조체는 경량 재료인 복합재와 최적의 형상 설계를 적용하여 경량화를 극대화한 구조물이다. 구조하중을 지지하기 위한 최소의 단면적을 가진 단위 격자 형상이 반복되는 구조인 격자구조체는 구조물의 중량이 성능에 매우 큰 영향을 미치는 고성능 유도무기, 우주 발사체

그리고 항공기 동체 등에 적용되고 있다. 러시아, 미국 등의 선진국에서는 항공우주 분야와 방위산업 분야에 복합재 격자구조체를 적용한 사례가 있으며 유도무기 및 우주 발사체의 성능에 직접적인 영향을 미치는 복합재 격자구조체 기술을 보호하여 유출을 방지하고 있다.

복합재 격자구조체가 적용된 대표적 사례로는 필라멘트 와인딩 공법으로 제작된 복합재 격자구조체를 Proton-M 로

Received 1 August 2018, received in revised form 22 August 2018, accepted 24 August 2018

*Graduate School of Mechanical Engineering, Hanbat National University

**†Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Corresponding author (E-mail: shin955@hanbat.ac.kr)

***Defense & Aerospace Division, Hankuk Fiber Group

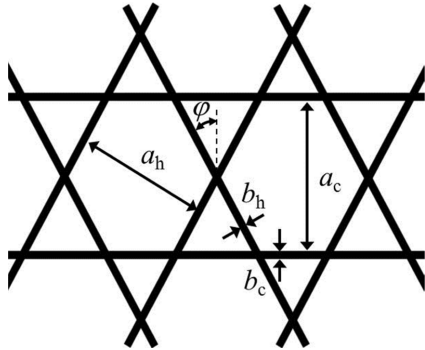


Fig. 1. Structural parameters of composite lattice structure

켓의 단 연결부에 적용한 사례가 있다[1-3]. 러시아의 Vasiliev 는 보 이론을 기반으로 한 복합재 격자구조체 설계 이론을 정립하였으며 이 이론은 식 (1)을 통해 격자구조체의 질량을 최소화 하는 것을 목적으로 하고 있다[4].

$$M = 2\pi RLH \left(2\rho_h \frac{\delta_h}{a_h} + \rho_c \frac{\delta_c}{a_c} \right) \quad (1)$$

여기서, M 은 질량, R 은 격자구조체 반지름, L 은 격자구조체 길이, H 는 격자구조체 두께를 나타내며 Fig. 1과 같이 ρ_h 와 ρ_c 는 헬리컬과 후프 리브의 밀도, δ_h 와 δ_c 는 헬리컬과 후프 리브의 폭, a_h 와 a_c 는 헬리컬과 후프 리브의 간격을 나타낸다.

독일의 Belardo 등[5]은 탄소섬유 복합재 격자구조체를 적용한 재진입 운반체 설계에 대한 연구를 수행하였고, 인도의 Krishna 등[6]은 우주발사체 내부의 복합재 격자구조체 탱크 설계 연구를 수행하였으며, 영국의 Querin 등[7]은 위상최적화 기법을 이용한 항공기 동체 적용을 위한 복합재 격자구조체의 최적 설계에 대해 연구하였다. 이란의 Kanou 등[8]은 수치해석적 방법을 통해 원통형 복합재 격자구조체 구조성능 평가에 대한 연구를 수행하였다.

국내에서도 도 등[9,10]이 필라멘트 와인딩 공법을 이용한 복합재 격자구조체의 설계 및 제작 그리고 시험 평가를 수행한 연구사례가 있으나 이는 매우 기초 수준의 단계로 기술 선진국과 비교하여 격차가 매우 큰 실정이다. 또한 수치해석적 방법을 이용한 원통형 복합재 격자구조체의 구조안전성 평가 기법에 대한 연구를 수행한 사례가 있으나 [11,12] 원통형 복합재 격자구조체의 구조안전성 평가에 대한 연구로 콘형 복합재 격자구조체의 구조안전성 평가 기법에 대한 연구가 필요하다.

이에 본 논문에서는 유한요소해석 기법을 이용한 육각 격자구조를 갖는 콘형 복합재 격자구조체의 구조안전성 평가에 대해 연구를 수행하였다. 연구에 적용된 콘형 복합재 격자구조체는 필라멘트 와인딩 공법을 통해 제작되었으며 구조안전성 평가 결과와 구조시험의 결과 비교를 통해 평가 방법을 검증하였다.

2. 복합재 격자구조체 구조해석

2.1 콘형 격자구조체 형상

필라멘트 와인딩 공법을 통해 제작되는 복합재 격자구조체는 Fig. 2와 같이 실리콘 금형 상부에 수지가 함침된 섬유를 와인딩하여 제작하게 된다.

제작 공정의 특성상 Fig. 3과 같이 섬유 교차부가 발생하게 되며 섬유 교차부는 비교차부와 비교하여 두 배수의 섬유가 와인딩된다. 와인딩된 섬유 수의 차이로 인해 발생하는 두께 불균일 현상의 감소를 위해 섬유 교차부에 추가적인 압착 공정을 진행한다. 섬유 교차부의 압착 공정과정에서 이탈되는 잉여 수지가 비교차부로 이동해 섬유 교차부와 비교차부의 섬유 체적률의 차이가 발생된다.

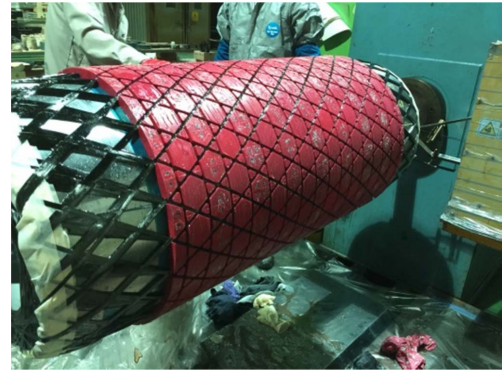


Fig. 2. Fiber winding process of composite lattice structure

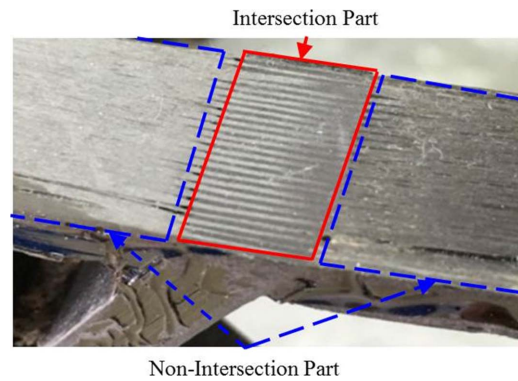


Fig. 3. Cross section of intersection and non-intersection part

Table 1. Specifications of cone-type composite lattice structure

Diameter of Structure	438 mm-600 mm
Height of Structure	600 mm
No. of Helical Rib	30
No. of Hoop Rib	8
Width of Hoop Rib	6.7 mm
Width of Helical Rib	6.7 mm
Thickness of Rib	13.2 mm



Fig. 4. Cone-type composite lattice structure

본 연구에 적용된 콘형 복합재 격자구조체는 Toray T700 탄소섬유와 에폭시 수지를 사용해 필라멘트 와인딩 공법으로 제작되었으며 이전 연구를 통해 도출된 Table 1의 설계 치수로 제작되었다. Fig. 4는 연구에 적용된 콘형 복합재 격자구조체를 보여준다.

2.2 콘형 격자구조체 유한요소모델

콘형 복합재 격자구조체의 구조안전성 평가를 위한 유한요소모델은 Fig. 5와 같이 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS v.6.13을 사용하여 생성하였다. 솔리드(solid) 요소인 C3D8R 요소를 사용하였으며 696,570개의 절점과 509,040개의 요소를 적용하여 유한요소모델을 생성하였다.

콘형 복합재 격자구조체에 적용된 탄소섬유/에폭시 복합재의 물성은 시편의 물성시험을 통해 도출하였으며 Table 2와 같다. 이때 공정의 특성상 발생하는 섬유 교차부는 비교차부와 섬유 체적률이 다르기 때문에 기계적 물성이 상이하다. Fig. 6과 같이 섬유 교차부와 비교차부의 섬유 체적률을 측정하여 각각 0.7과 0.3을 확인하였으며 섬유 교차부 물성은 시편단위 물성시험을 통해 도출하였으며 비교차부의 물성은 식 (1)과 (2)의 혼합물 법칙(rule of mixture)를 통해 도출하였다. 혼합물 법칙을 이용한 물성 도출을 위해 스트랜드 시험과 수지의 시험을 통해 섬유와 수지의 탄성계

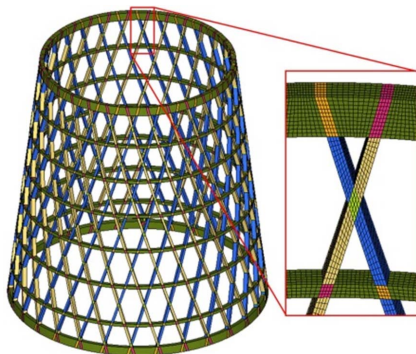


Fig. 5. Finite element model of cone-type composite lattice structure

Table 2. Mechanical properties of carbon/epoxy composite

Mechanical properties		Intersection	Non-Intersection
Elastic Modulus (GPa)	E ₁₁	134.00	74.82
	E ₂₂	8.08	6.64
	E ₃₃	8.08	6.64
Shear Modulus (GPa)	G ₁₂	5.33	2.28
	G ₁₃	5.33	2.28
	G ₂₃	2.74	1.17

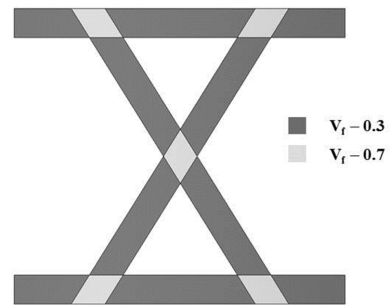


Fig. 6. Fiber volume fraction of composite lattice structure

수를 도출하였다. Fig. 6은 복합재 격자구조체의 위치별 섬유 체적률을 보여준다.

$$E_L = v_f E_f + v_m E_m \tag{1}$$

$$E_T = \frac{E_f E_m}{v_f E_m + v_m E_f} \tag{2}$$

여기서 E_L은 길이방향 탄성계수, E_T는 폭방향 탄성계수, E_f는 섬유 탄성계수, E_m은 모재 탄성계수, v_f는 섬유 체적률 그리고 v_m은 모재 체적률을 나타낸다.

2.3 콘형 격자구조체 구조해석

콘형 복합재 격자구조체 구조해석은 해석 기법의 검증

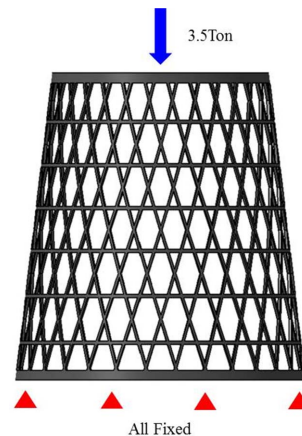
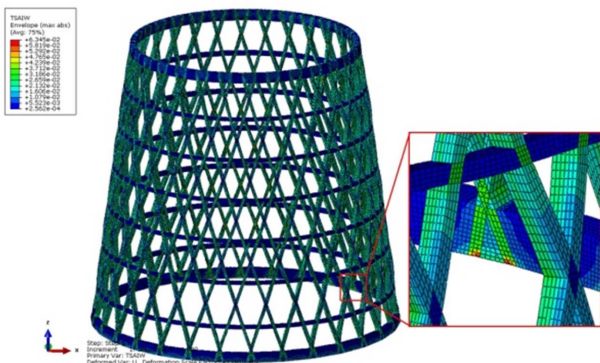


Fig. 7. Load and boundary condition

Table 3. Analysis results of cone-type composite lattice structure

Tsai-Wu index	0.06
Max. Stress Failure index	0.023(Fiber)
	0.038(Matrix)
Max. Strain Failure index	0.016(Fiber)
	0.030(Matrix)
$S_{11, max}$	26.70 MPa
P_{cr}	548 Ton

**Fig. 8.** Tsai-Wu index result of intersection part

을 위해 격자구조체의 압축 시험을 모사하여 수행하였다. Fig. 7과 같이 구조물의 하단부는 자유도를 모두 구속하였으며 상단부는 시험 지그를 고려하여 설계 요구 조건인 3.5 Ton의 압축 하중을 분포 하중으로 부과하였다.

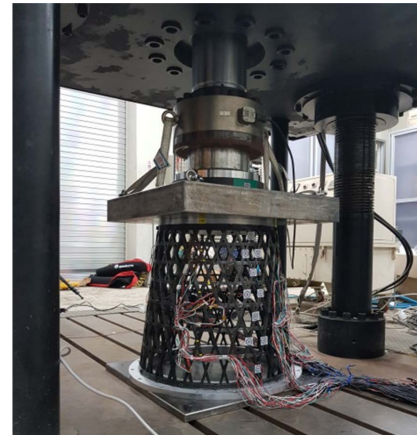
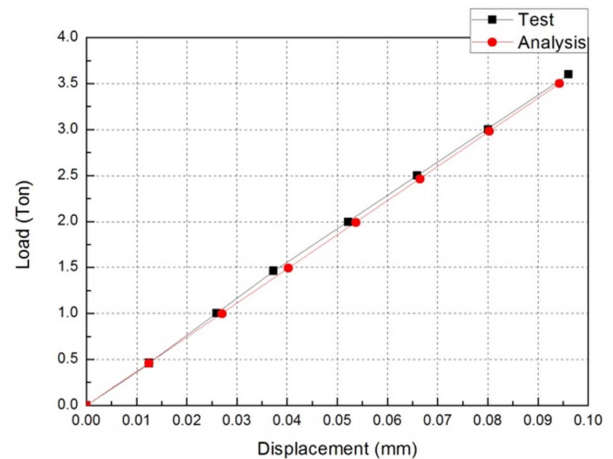
구조해석 결과는 Table 3과 같이 도출되었다. 최대 Tsai-Wu 계수는 Fig. 8과 같이 헬리컬 리브(helical rib)와 후프 리브(hoop rib)가 교차하는 섬유 교차부의 경계에서 발생하였으며 좌굴임계하중은 548 Ton을 확인하여 3.5 Ton의 압축 하중에 대해 구조적으로 안전함을 확인하였다.

3. 복합재 격자구조체 압축 시험

큰형 복합재 격자구조체의 구조해석 기법을 검증하기 위한 압축 시험은 구조해석과 동일한 조건으로 수행하였다. Fig. 9와 같이 압축 시험기를 사용하여 수행하였다. 격자구조체의 상단부에는 일정한 분포하중을 가할 수 있도록 하였으며 하단부는 자유도를 모두 구속하였다. 이때 시험은 2 mm/min의 속도로 수행하였다.

시험 결과, 큰형 복합재 격자구조체는 3.5 Ton의 압축 하중에서 약 0.092 mm의 변위가 발생하였다. 구조해석 결과는 3.5 Ton의 압축 하중에서 약 0.094 mm의 변위가 발생하여 Fig. 10과 같이 약 2%의 변위 오차가 발생한 것을 확인하였다.

발생된 2%의 오차는 복합재 격자구조체의 부분별 섬유 체적률의 정확한 측정을 통해 정확한 기계적 물성을 적용하면 감소할 수 있을 것으로 판단된다.

**Fig. 9.** Compressive Test of cone-type composite lattice structure**Fig. 10.** Comparison of test and analysis

4. 결 론

본 논문에서는 유한요소해석 기법을 이용한 육각 격자 구조를 갖는 큰형 복합재 격자구조체의 구조안전성 평가에 대해 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유한요소해석을 통해 필라멘트 와인딩 공법으로 제작된 큰형 복합재 격자구조체의 구조안전성 평가를 수행하였다.
- (2) 유한요소해석에 사용된 유한요소모델은 솔리드 요소를 적용하였으며 섬유 교차부와 비교차부의 섬유 체적률을 측정하여 이를 고려한 기계적 물성을 적용하였다.
- (3) 큰형 복합재 격자구조체의 압축 시험 결과와의 비교 결과, 약 2%의 변위 오차가 발생하는 것을 확인하였으며 격자구조체의 부분별 섬유 체적률의 정확한 측정을 통해 정확한 기계적 물성을 적용하면 정확도를 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 연구를 통해 도출된 큰형 복합재 격자구조체의 구조해석 기법은 향후 연구될 대형 복합재 격자구조체의 구조

안전성 평가에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 민군협력진흥원(ICMTC)의 재원으로 복합재 Lattice 격자구조체 기술개발(15-CM-MA-12)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

REFERENCES

1. Vasiliev, V.V., Barynin, V.A., and Rasin, A.F., "Anisogrid Lattice Structures – Survey of Development and Application," *Composite Structures*, Vol. 54, 2011, pp. 361-370.
2. Vasiliev, V.V., and Rasin, A.F., "Anisogrid Composite Lattice Structures for Spacecraft and Aircraft Applications," *Composite Structures*, Vol. 76, 2006, pp. 182-189.
3. Vasiliev, V.V., Barynin, V.A., and Rasin, A.F., "Anisogrid Composite Lattice Structures – Development and Aerospace Applications," *Composite Structures*, Vol. 94, 2012, pp. 1117-1127.
4. Barynin, V.A., Bunakov, V.A., Rasin, A.F., and Vasiliev, V.V., "Aerospace Composite Lattice Structure," *Proceeding of ICCM*, 2009.
5. Belardo, M., Paletta, N., and Mercurio, U., "Conceptual Design of the Composite Sandwich Fuselage of a Re-Entry Vehicle," *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Vol. 46, No. 4-5, 2015, pp. 420-430.
6. Krishan, P.K., and Muruganatham, P., "Design and Analysis of a typical Inter-Tank Structure of a Launch Vehicle using Integrally Stiffened Construction," *International Journal of Research in Engineering & Technology*, Vol. 1, No. 1, 2013, pp. 21-34.
7. Querin, O.M., Toporov, V.V., Liu, D., Busch, L.H., et al., "Topology and Parametric Optimization of a Lattice Composite Fuselage Structure," http://www.altairuniversity.com/wpcontent/uploads/2014/04/Topology_and_Parametric_Optimization-of-a-Lattice_Composite_Fuselage_Structure_as_published.pdf, 2014.
8. Kanou, H., Nabavi, S.M., and Jam, J.E., "Numerical Modeling of Stresses and Buckling Loads of Isogrid Lattice Composite Structure Cylinders," *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 5, No. 1, 2013, pp. 42-54.
9. Doh, Y.D., Chung, S.K., Lee, S.W., and Son, J.H., "Design and Fabrication of Filament Wound Composite Lattice Structures," *Proceeding of Spring Conference of The Korean Society of Propulsion Engineers*, 2010, pp. 421-427.
10. Doh, Y.D., Chung, S.K., Lee, S.W., and Chang, H.B., "Design and Fabrication of Cone Type Composite Lattice Structures," *Proceeding of Spring Conference of the Korean Society of Propulsion Engineers*, 2011, pp. 307-311.
11. 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.
12. Im, J.M., Shin, K.B., and Lee, S.W., "Study on Finite Element Modeling Method for Cylindrical Composite Lattice Structures with Hexagonal Cell," *Journal of Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 35, No. 6, 2018, pp. 609-613.