



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 48(7), 505-511(2020)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2020.48.7.505

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

비대칭으로 보강된 복합재 원형 스파의 파손하중 예측

김성준¹, 이동건², 박상욱³

The Prediction of Failure Load for an Unsymmetrically Stiffened Circular Composite Spar

Sung Joon Kim¹, Donggeon Lee² and Sang Wook Park³

Korea Aerospace Research Institute

ABSTRACT

The circular composite tubes have been used as a main spar of HALE-UAV(High Altitude Long Endurance-Unmanned Air Vehicle). In this paper, an analytical model is presented for the prediction of the failure load of unsymmetrically stiffened circular spar using a modified Brazier approach. This model was used to predict the moment carrying capacity of the unsymmetrically stiffened circular spar. From the results, we can know that a stiffened cap placed in the top sector of a spar increased the bending capabilities. Four point bending tests were conducted to estimate the effect of the cap on the failure load and compared with the proposed model. And numerical simulations were performed to analyze the behavior of stiffened circular spar. Comparisons of the results from the proposed model with those from experiments and numerical modes show good correlation.

초 록

원형 복합재 튜브를 고고도 장기체공 무인기의 주요 스파에 사용하였다. 본 논문에서는 수정된 Brazier 방법을 이용하여 비대칭으로 보강된 원형 스파의 파단하중을 예측할 수 있는 이론적인 모델을 제안하였다. 이 모델을 이용하여 비대칭으로 보강된 원형스파의 최대 허용 굽힘 모멘트를 예측하였다. 해석 결과로부터 원형 스파의 상단에 위치한 보강된 캡은 최대 허용 굽힘 모멘트를 증가시키는 것을 알 수 있다. 4점 굽힘 실험을 수행하여 스파 캡이 파손하중에 미치는 영향을 평가하였고 제안된 모델과 비교하였다. 그리고 수치해석을 수행하여 보강된 원형 스파의 거동을 분석하였다. 제안된 이론적인 모델은 실험 및 수치해석 결과와 잘 일치함을 보였다.

Key Words : Circular Spar(원형 스파), Bending Load(굽힘 하중), Analytical Model(이론적 모델), Numerical Model(수치해석 모델), Four Point Bending Test(4점 굽힘 실험)

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 우수한 기계적 특성과 재료의 이방성 등을 이용한 최적화 설계를 적용할 수 있

으므로 항공기 등의 주요 구조물에 사용되고 있다. 최근 개발이 추진되고 있는 전기동력 고고도 장기 체공 무인기는 비행체의 특성상 구조물의 경량화 설계기술이 요구된다[1]. 한국항공우주연구원에서 최근

† Received : April 16, 2020 Revised : June 4, 2020 Accepted : June 6, 2020

¹ Principal Researcher, ² Researcher, ³ Senior Researcher

¹ Corresponding author, E-mail : yaelin@kari.re.kr, ORCID 0000-0002-8325-5951

© 2020 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

개발한 고고도 장치 채공 무인기는 탄소섬유 복합재를 주구조물(Primary structure)에 사용하였다. 본 연구에서는 원형 복합재 튜브(Tube)를 스파(Spar) 구조물에 적용하였다. 장기채공 무인기의 경량 설계를 위하여 날개의 스킨(Skin)이 하중을 담당하지 않도록 마이러(Mylar) 소재를 사용하는 경우가 많다. 이러한 경우 스파는 날개에 작용하는 전단, 굽힘 및 비틀림 하중을 감당하여야 한다. 따라서 원형 스파를 적용하는 것이 구조적으로 유리하다. Fig. 1은 개발된 고고도 장기채공무인기의 날개의 일부이다. 원형의 스파가 굽힘 하중을 받는 경우 곡률이 증가함에 따라 단면의 모양이 타원형이 된다. Fig. 2는 단면의 변형을 보여준다. 굽힘 하중에 의한 면내 응력이 단면이 타원형으로 변하게 한다. 이러한 종류의 좌굴거동은 Brazier[2]에 의해 연구되기 시작했다. Brazier는 원통형 튜브 구조물이 순수 굽힘 하중을 받는 경우 임계 굽힘 하중을 예측할 수 있는 이론 해를 제시하였다.

Fabian[3]은 비선형 쉘이론을 이용하여 Brazier가 제시한 이론 해와 수치해석 결과를 비교하여 두 결과가 일치함을 보였다. Tatting 등[4]은 직교이방성 실린더의 좌굴하중과 굽힘 거동에 영향을 주는 재료와 기하학적인 변수를 조사하였다. Ibrahim[5]은 측면 하중을 받는 복합재 원형 튜브로 된 외팔보의 거동

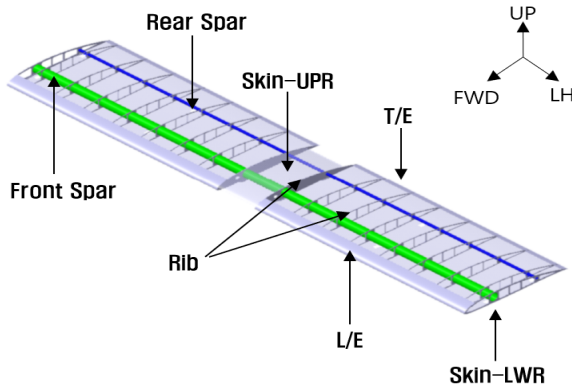


Fig. 1. Particular wing section of HALE UAV

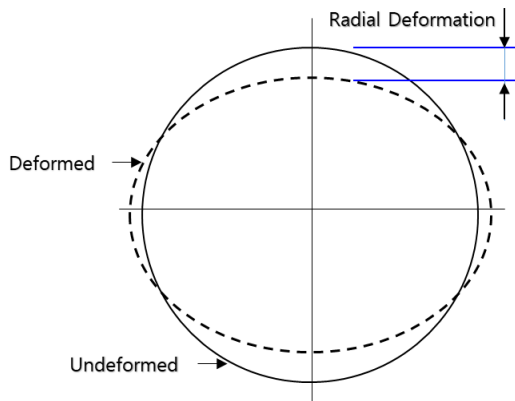


Fig. 2. Original and deformed cross-section

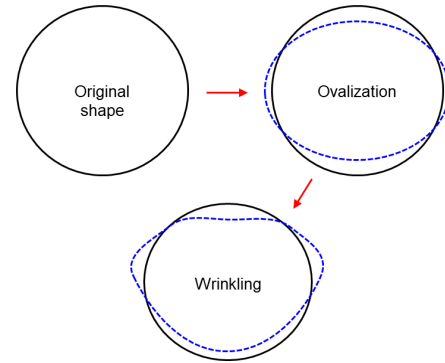


Fig. 3. Schematic diagram on ovalization and wrinkling of circular tube

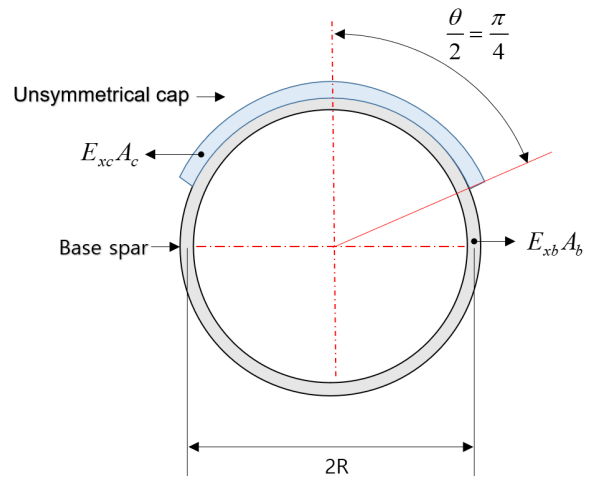


Fig. 4. Cross-section of an unsymmetrical circular spar with stiffened cap

을 연구하였다. 여러 가지 적층패턴과 기하학적인 변수가 비선형적인 거동에 주는 영향을 검토하였다. Tang 등[6]은 굽힘 하중을 받는 실린더 쉘의 좌굴거동을 연구하였다. 좌굴은 압축을 받는 부위에서 먼저 발생하고 단면의 곡률과 최대 굽힘 하중이 감소된다. Guarracino[7]는 원형 실린더가 압축하중을 받는 부위의 국부좌굴 현상을 수치해석을 통하여 연구하였다. Fuchs 등[8]은 박막의 복합적층 실린더가 굽힘 하중을 받는 경우의 거동을 비선형 쉘이론을 적용하여 해석하였다. 이 연구에서 포아송 비(Poisson's ratio)가 반경방향의 거동에 큰 영향을 준다고 평가하였다. Kim 등[9]은 대칭으로 보강된 원통형 복합재 튜브의 최대 허용 굽힘 모멘트를 Brazier의 이론해를 수정하여 제시하였다. 이 연구에서는 보강된 부위가 좌굴강도에 주는 영향을 검토하였다. Fig. 3은 원형 튜브가 좌굴이 진행되는 모양을 보여주고 있다. 비대칭으로 보강된 복합재 원형 튜브의 파손은 처음에는 단면이 타원형으로 변한후 압축을 받는 부분에 국부좌굴이 발생하고 최종적으로는 재료의 압축파손 및 층간분리가 발생한다. 본 연구에서는 최대 허용 굽힘 모멘트

를 증가시키기 위해 원형 스파(Spar)를 비대칭 형상으로 보강하였다. 비대칭으로 보강한 이유는 복합재의 압축강도가 인장강도에 비해 작기 때문에 압축을 받는 부위가 파손 및 국부 좌굴현상이 발생하는 것을 방지하여 전체적인 좌굴강도를 증가시키기 위함이다.

본 논문에서는 비대칭으로 보강된 원형 복합재 스파의 굽힘 강도를 실험과 해석적인 방법으로 검토하였다. 해석은 수정된 Brazier 식과 수치해석적인 모델을 이용하였다.

II. 본 론

2.1 4점 굽힘 실험

원형 스파의 보강부위가 주는 영향을 평가하기 위해 굽힘 시험을 수행하였다. 시험을 위해서 INSTRAN 시험기를 이용하였다. 시험은 4점 굽힘 시험을 수행하였다. Figs. 5, 6은 굽힘 시험을 위한 장비와 치구의 설치 형상이다.

Figure 6으로부터 시험편에 작용하는 최대 굽힘 모멘트는 식 (1)로 계산된다.

$$M_t = \frac{P}{2} \times L_1 \tag{1}$$

시험에 사용된 시편은 오토클레이브(Autoclave)를 이용하여 제작하였다. Table 1은 시편 제작에 사용된 UD(Unidirectional) 탄소 복합재 라미나(Lamina)의 물성이다. Table 2에는 스파의 치수와 적층 패턴을 표시하였다. 시편 제작은 원형의 알루미늄환봉을 이용하여 제작한다. 환봉의 외부에 라미나를 감아서 base spar를 만들고 난 후에 길이 방향으로 spar cap

Table 1. Material properties of CFRP lamina

Properties	Values
E_1 (GPa)	146.1
E_2 (GPa)	7.7
G_{12} (GPa)	3.6
ν_{12}	0.355
σ_{1t} (MPa)	2551.8
σ_{1c} (MPa)	945.2
σ_{2t} (MPa)	36.7
σ_{2c} (MPa)	156.1
Thickness (mm)	0.094
Density (g/cm ³)	1.49

Table 2. Summary of layup pattern of a spar

Case	Diameter (mm)	Base spar layup	Cap layup
M30A	30.0	[0/90/0]	-
M30B	30.0	[0/90/0]	[0] ₂
M30C	30.0	[0/90/0]	[0] ₄

부분을 적층하였다. 굽힘 실험은 두 가지 종류의 스파 캡에 대한 시편을 제작하여 시험을 수행하였다. Fig. 7은 원형 스파의 파손된 후의 모습이다. Fig. 3과 같이 단면이 변형이 되며 파손되는 것을 알 수 있다. 시험 중 하중과 변위는 시험기 중앙에 있는 로드 셀(Load cell)에서 측정한다. Figs. 8, 9는 4점 굽힘 시험을 수행하여 구한 시간-변위 선도이다.



Fig. 5. Test setup for four-point bending test

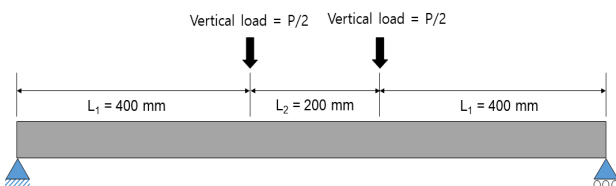


Fig. 6. Four-point bending configuration of circular tube

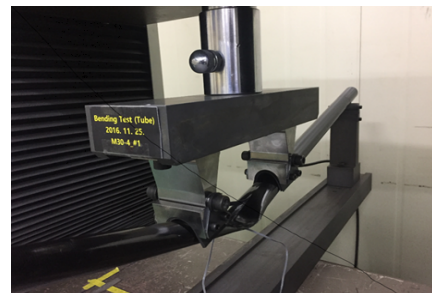


Fig. 7. Buckling failure mode (ovalization) of circular spar

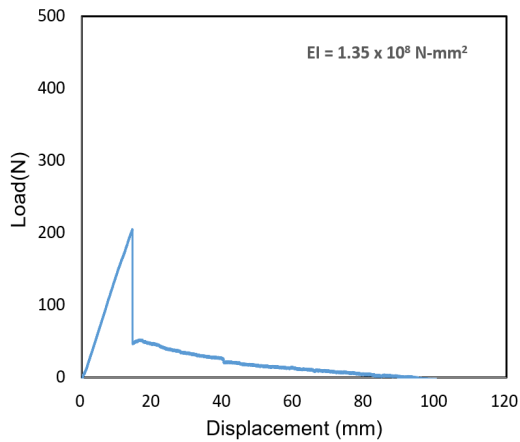


Fig. 8. Load-displacement curve for M30A specimen

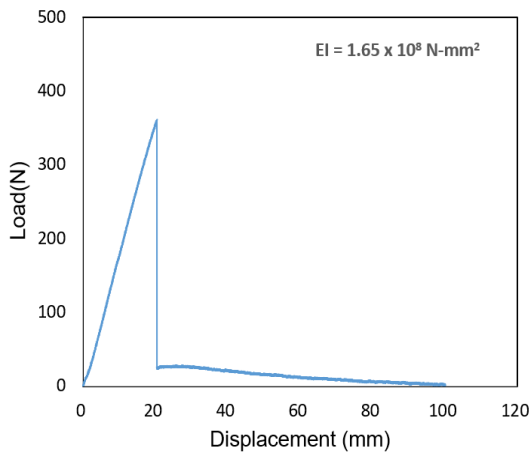


Fig. 9. Load-displacement curve for M30B specimen

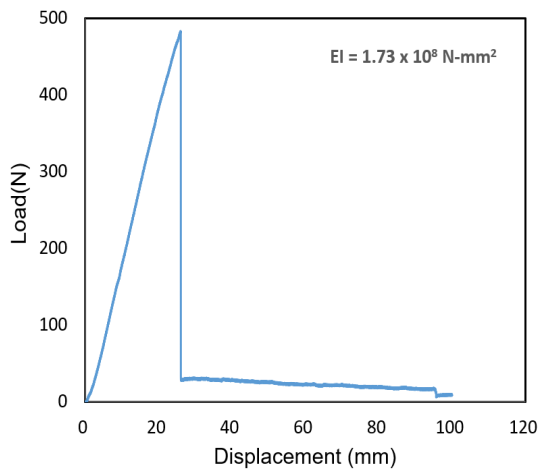


Fig. 10. Load-displacement curve for M30C specimen

실험결과로부터 비대칭으로 보강된 원형 스파의 굽힘 강도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 4점 굽힘

Table 3. Effect of spar cap on the bending moment capacity

Case	Collapse load P [N]	Bending moment [N-mm]	λ
M30A	205.2	41,040.0	-
M30B	361.2	72,240.0	1.76
M30C	483.3	96,660.0	2.36

실험 결과를 Table 3에 정리하였다. 식 (2)는 보강된 원형 스파와 보강이 되지 않은 스파의 최대 굽힘 하중의 비(Ratio)를 의미한다. 실험결과로부터 스파 캡의 두께가 증가할수록 최대 굽힘 하중이 증가하는 것을 알 수 있다.

$$\lambda = \frac{M_{\text{mod}}}{M_{\text{cr}}} \quad (2)$$

여기서 M_{mod} 는 스파 캡으로 보강된 최대 허용 굽힘 모멘트이고, M_{cr} 은 보강되지 않은 스파의 최대 허용 굽힘 모멘트이다.

2.2 수치해석 모델

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 LS-Dyna를 이용하여 해석을 수행하였다. 실험을 모사하기 위해 해석 모델을 이용하여 4점 굽힘 조건에 대한 해석을 수행하였다. 원형 튜브의 최대 허용 굽힘 모멘트를 해석하기 위해 점진적 파손 및 좌굴 후 거동 해석을 수행하였다. 적층판을 모사하기 위해 사각형 셸(Shell)요소를 사용하고 재료모델은 선형 탄성 모델인 MAT54를 사용하였다. 재료 수준의 파손은 Chang/Chang[10] 파손이론을 적용하였다. 본 논문에서는 수치해석 모델을 이용하여 보강된 원형 스파의 파손 진행 과정을 모사하였다. Fig. 11은 비대칭으로 보강된 원형 스파의 4점 굽힘 시험 형상의 유한요소 모델이고, Fig. 12는 변형된 후의 외부 및 단면 형상을 보여준다. Fig. 3의 변형 형상과 유사함을 알 수 있다. Figs. 13~15는 시편에 대한 하중-변위 선도를 실험과 수치해석 결과를 이용하여 비교한 것이다.

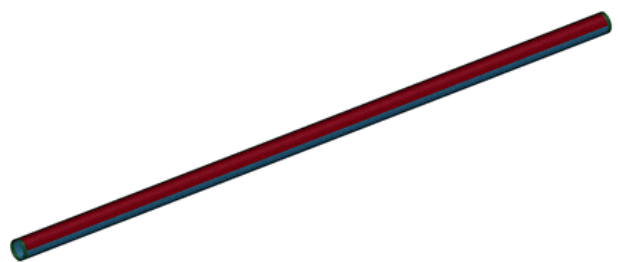


Fig. 11. Finite element model of a four-point bending configuration

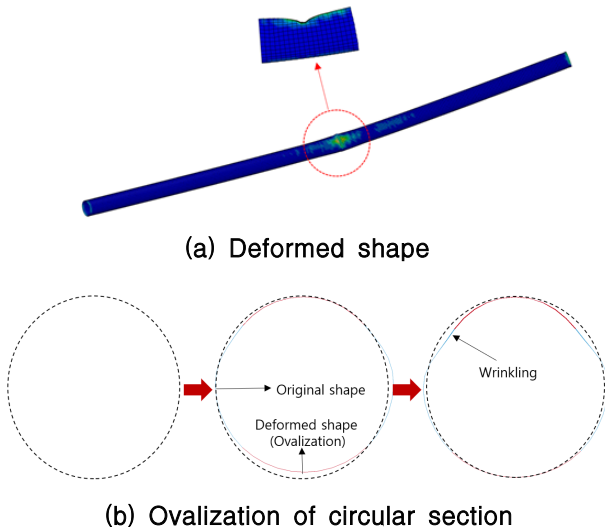


Fig. 12. Deformed shape and ovalization of a circular spar

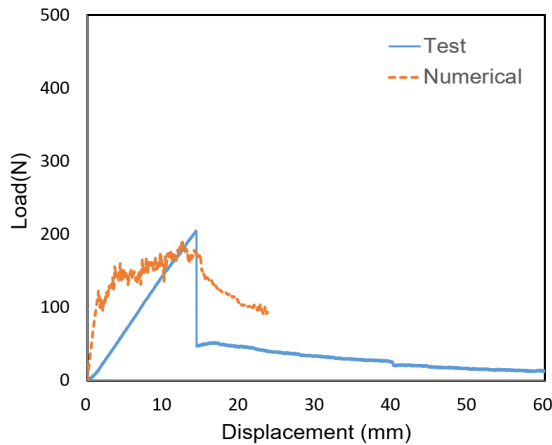


Fig. 13. Comparison of the load-displacement curve between the experimental and numerical results for M30A

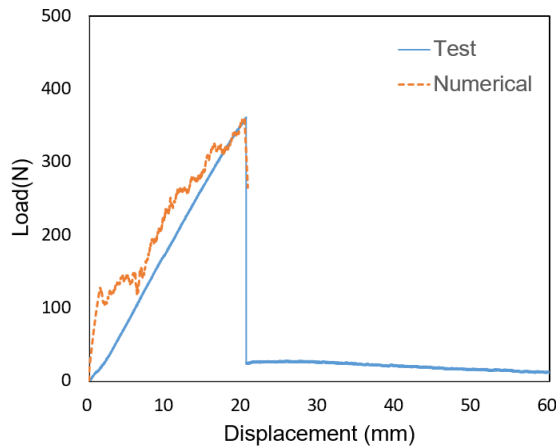


Fig. 14. Comparison of the load-displacement curve between the experimental and numerical results for M30B

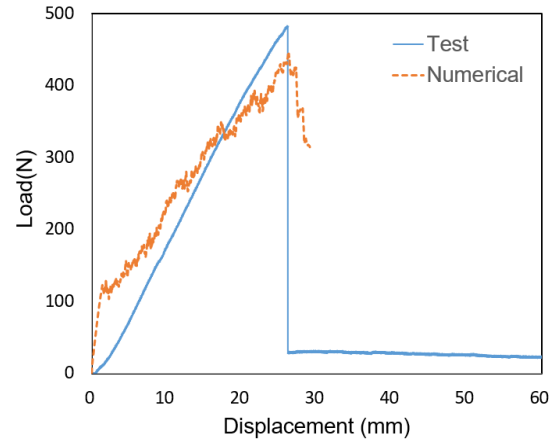


Fig. 15. Comparison of the load-displacement curve between the experimental and numerical results for M30C

Table 4. Effect of spar cap on the bending moment capacity

Case	(a) Test [N-mm]	(b) Numerical [N-mm]	Ratio (b/a)
M30A	41,040	39,636	0.97
M30B	72,240	75,092	1.04
M30C	96,660	88,929	0.92

최대 허용 굽힘 모멘트는 해석과 실험결과가 일치하는 것을 알 수 있다. Table 4는 Table 2 시편에 대한 실험과 해석결과를 비교한 것이다. 비대칭으로 보강된 원형 스파의 파손은 좌굴, 비선형성 및 재료의 파손 등이 복합적으로 연관되어 매우 복잡하다. 해석 결과로부터 수치해석 모델은 보강된 원형 스파의 임계하중을 적절히 예측할 수 있음을 보여준다.

2.3 이론적 모델

Brazier 효과는 굽힘 하중이 작용하는 경우 원형 단면이 타원형으로 변하는 비선형적인 거동을 보이는 현상이다. 박막의 원형 튜브가 굽힘 하중을 받는 경우 단면이 평편해지면서 파손이 된다. Brazier는 실린더 셸의 파손을 예측하기 위해 식 (3)의 이론 해를 개발하였다. 식 (3)은 원형 튜브의 최대 허용 굽힘 모멘트를 의미한다.

$$M_{cr} = 2\pi R \sqrt{\frac{8}{27} E_x H D_{22}} \quad (3)$$

여기서 E_x 는 적층판의 길이 방향의 탄성계수, H 는 적층판의 두께, R 은 원형스파의 반지름 그리고 D_{22} 는 원주방향의 강성이다. 식 (3)은 균일한 두께의 튜브에만 적용가능하다. Fig. 4와 같이 일부 보강된 형상에는 적용할 수 없으므로, 본 논문에서는 이 식을

수정하여 적용하려 한다. 식 (3)은 식 (4)로 표현될 수 있다.

$$M_{cr} = \sqrt{\frac{8}{27}} \sqrt{2\pi R H E_x} \sqrt{2\pi R D_{22}} \quad (4)$$

여기서 $\sqrt{2\pi R H E_x}$ 와 $\sqrt{2\pi R D_{22}}$ 는 각각 실린더의 길이방향의 인장 강성도(Rigidity)와 원주방향의 굽힘 강성도이다. 비대칭으로 보강된 원형 스파의 최대 허용 굽힘 모멘트는 식 (4)를 수정하여 아래의 식을 적용한다.

$$M_{mod} = M_{cr} f_a f_b \quad (5)$$

여기서 f_a 와 f_b 는 각각 길이방향 및 원주방향의 강성도 보정계수이다. 이 보정계수들은 보강된 스파 캡의 최대 허용 굽힘 모멘트에 주는 영향을 고려하기 위해 사용된다. 길이 방향의 보정계수 f_a 는 식 (6)으로 표현된다.

$$f_a = \sqrt{\frac{E_{xb}A_b + E_{xc}A_c}{E_{xb}A_b}} \quad (6)$$

여기서 $E_{xc}A_c$ 는 스파 캡의 길이방향 강성도이고, $E_{xb}A_b$ 는 보강되지 않은 스파의 길이방향 강성도이다. Fig. 16은 원주방향의 굽힘 강성 계산을 위한 개략도이다. 원주방향의 보정계수는 식 (7)로 표현된다.

$$f_b = \sqrt{\frac{\frac{\theta}{2\pi} \times 2\pi R_1 D_{22A} + \frac{2\pi - \theta}{2\pi} \times 2\pi R_2 D_{22B}}{2\pi R_2 D_{22B}}} \quad (7)$$

여기서 D_{22A} 는 part A 부분의 원주방향의 굽힘 강성이고, D_{22B} 는 part B 부분의 굽힘 강성이다. 식 (5)를 이용하여 Table 2 시편에 대한 해석을 수행하고 실험 결과와 비교하였다. Table 5는 최대 허용 굽힘 모멘트를 비교한 것이다. 해석과 실험 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

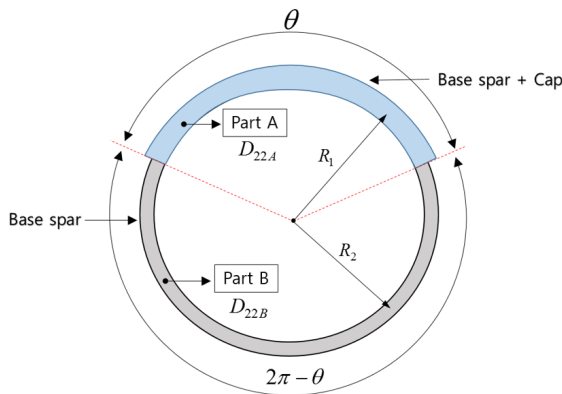


Fig. 16. Bending stiffness in the circumferential direction of spar

Table 5. Comparison of the bending moment capacity between the test and analytical results

Case	(a) Test [N-mm]	(b) Analytical [N-mm]	Ratio (b/a)
M30A	41,040	42,423	1.03
M30B	72,240	64,781	0.90
M30C	96,660	107,119	1.11

III. 결 론

본 논문에서는 비대칭으로 보강된 원형 스파의 굽힘 거동을 실험, 수치해석 및 이론 해를 이용하여 분석하였고 최대 허용 굽힘 모멘트를 예측할 수 있는 방안을 제안하였다. 4점 굽힘 실험(Four point bending test)을 수행하여 보강된 스파 캡이 최대 허용 굽힘 모멘트에 주는 영향을 검토하였다. 실험결과로부터 비대칭으로 보강된 스파 캡의 두께가 두꺼워 질수록 최대 허용 굽힘 하중이 증가하는 것을 알 수 있었다. 원형 복합재 스파의 굽힘 거동을 예측하기 위해 유한요소 모델을 이용하였다. 이 모델에서는 재료와 기하학적 비선형 및 파손의 영향을 고려하였다. 이 수치해석 모델은 최대 허용 굽힘 모멘트를 잘 예측하며 단면이 타원형으로 변형이 되며 파손되는 것을 실험결과와 유사하게 모사하는 것을 알 수 있었다. 또한 수정된 Brazier 식을 이용한 이론적인 식도 비대칭으로 보강된 원형스파의 최대 허용 굽힘 모멘트를 $\pm 10\%$ 수준에서 예측하는 것을 보였다. 즉 본 연구에서 제안한 수치해석 모델과 이론식은 실험결과와 잘 일치하므로 비대칭으로 보강된 원형 스파의 설계 시 적절하게 이용될 수 있다고 판단된다.

References

- 1) Park, S. W., Shin, J. W. and Kim, T., "Development of the main wing structure of a high-altitude long endurance UAV," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 19, 2018, pp. 53~71.
- 2) Brazier, L. G., "On the flexure of thin cylindrical shell and other "Thin" section," *Proceedings of the Royal Society: series A*, Vol. 116, 1927, pp. 104~114.
- 3) Fabian, O., "Collapse of cylindrical elastic tubes under combined bending, pressure and axial loads," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 13, 1977, pp. 1257~1270.

- 4) Tatting, B. F., Gurdal, Z. and Vasiliev, V. V., "The brazier effect for finite length composite cylinders under bending," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 34, 1997, pp. 1419~1440.
- 5) Ibrahim, S. and Polyzois, D., "Ovalization analysis of fiber-reinforced plastic poles," *Composite Structures*, Vol. 45, 1999, pp. 7~12.
- 6) Tang, S. C., Chu, C. C. and Yeung, K. S., "Collapse of long, noncircular, cylindrical shells under pure bending," *Computer and Structures*, Vol. 21, 1985, pp. 1345~1353.
- 7) Guarracino, F., "On the analysis of cylindrical tubes under flexure: theoretical formulations, experimental data and finite element analysis," *Thin-Walled Structures*, Vol. 41, 2003, pp. 127~147.
- 8) Fuchs, H. P. and Hyer, M. W., "The nonlinear prebuckling response of short thin-walled laminated composite cylinders in bending," *Composite Structures*, Vol. 34, 1996, pp. 309~324.
- 9) Kim, S. J., Shin, J. W., Kim, H., Kim, T. and Kim, S., "The modified Brazier approach to predict the collapse load of a stiffened circular composite spar under bending load," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 55, 2016, pp. 474~481.
- 10) Chang, F. K. and Chang, A., "A progressive damage model for laminate composites containing stress concentrations," *Journal of composite materials*, Vol. 21, 1987, pp. 834~855.