

AFP로 제작된 두꺼운 복합재료 스파의 제작 및 구조 해석

김지현* · 한준수** · 배병환*** · 최진호* · 권진희*†

Manufacturing and Structural Analysis of Thick Composite Spar Using AFP Machine

Ji-Hyeon Kim*, Jun-Su Han**, Byung-Hwan Bae***, Jin-Ho Choi*, Jin-Hwe Kweon*†

ABSTRACT: A large composite spar was manufactured using an automatic fiber placement (AFP) machine. To verify its structural performance, the weakest part of the structure, which is called 'corner radius', was tested under bending and examined by finite element analysis. Since the application of AFP machine to composite structure fabrication is still in early stage in Korea, this paper presents the summary of whole process for manufacturing composite spar using AFP machine from mandrel design and analysis to verification test. The deflection and stress by mandrel weight and AFP machine force, thermal deformation and natural frequency were all examined for mandrel design. The target structure was composite C-spar and cured in an autoclave. Test results were compared with nonlinear finite element analysis results to show that the structure has the strength close to the theoretical value. It was confirmed that the corner radius of the spar manufactured by AFP process showed deviation less than 20% compared with first ply failure strength. The results indicate that the AFP technology could be used for large scale composite structure production in the near future.

초 록: 본 연구에서는 AFP 장비를 이용하여 대형 복합재 스파 구조를 제작하고, 스파 구조에서 가장 취약한 부분인 코너부(Corner radius)에 대한 굽힘강도 시험과 해석을 수행하였다. 국내에서 AFP를 이용한 제품 제작기술이 보편화되지 않은 초기단계임을 고려하여, 복합재 스파 제작을 위한 맨드릴 설계 및 해석에서 구조 검증시험에 이르기까지의 전 과정을 요약, 정리하였다. 맨드릴 설계에서는 자중과 장비 하중에 의한 처짐, 응력, 열변형, 고유진동수 등을 고려하였다. 대상 시제품은 대형 C-스파이프고 AFP로 제작한 후 오토클레이브에서 성형하였다. 제품의 성능 확인을 위해 스파 코너부에서 시편을 채취하여 4점 굽힘시험과 비선형 강도해석을 수행하여 제작된 구조물이 이론적 구조강도에 근접하는 강도를 보이는지 점검하였다. 연구결과, 제안된 공정을 사용하여 제작한 대형 C-스파의 코너부는 최초층 파손이론을 사용한 이론적 강도대비 20% 이내의 차이를 보이는 것을 확인하였고, 향후 양산용 대형 복합재 구조물 제작에 적용될 수 있는 가능성을 확인하였다.

Key Words: 복합재 C-스파(Composite C-spar), 자동섬유적층(AFP), 코너부(Corner radius), 4점 굽힘(4-point bending)

Received 20 August 2015, received in revised form 27 August 2015, accepted 27 August 2015

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

*†School of Mechanical and Aerospace Engineering, Research Center for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang National University, Corresponding author (E-mail: jhkweon@gnu.ac.kr)

**Aerospace center, Gyeongnam Technopark

***Aero-structure Production Engineering Section, Korea Aerospace Industries

1. 서 론

섬유 강화 복합재료는 경량화가 요구되는 항공기의 일차 구조물과 이차 구조물에 널리 적용되고 있다. 이러한 복합재료 구조물은 중간재인 프리프레그(Prepreg)를 여러 각도로 적층하여 제작한다. 그런데 프리프레그를 손으로 적층할 경우 원하는 위치에 정확한 각도로 적층하는 것이 어려울 뿐만 아니라 제작 과정 중에 오염이 발생하기 쉬운 문제점이 있다[1]. 이러한 이유로 인해 최근에는 1 cm 내외의 폭을 가진 복합재 테이프를 다축제어가 가능한 장치를 이용하여 원하는 위치와 각도를 정확히 제어하는 AFP (Automatic Fiber Placement) 장비의 사용이 늘고 있다[2,3]. AFP 장비를 사용할 경우 항공기의 동체나 날개의 외피와 같이 두께가 변하면서도 다양한 형상과 크기의 컷아웃(Cut-out)이 존재하는 구조물을 정확한 치수로 제작할 수 있고, 제작 과정상의 결함을 최소화할 수 있다.

국내에서는 오래 전 개발한 쌍발 복합재 항공기[2]를 시작으로 최근 한국항공이 개발한 KC-100[3] 등의 주구조물에 복합재를 적용한 사례가 있지만 프리프레그를 사용한 전통적인 적층방법으로 구조물을 제작하였다. 최근 들어 국내에서도 AFP 장비가 도입되기 시작하면서 이를 이용한 복합재 구조 제작 연구가 진행되기 시작하였다. 특히 항공기의 동체 외피 등에 AFP 장비를 적용할 경우 창으로 인한 컷아웃을 고려한 복잡한 구조물을 설계에 따라 정확히 제작할 수 있음을 보였다[4].

외국에서는 더 활발한 연구들이 진행되고 있는데, AFP 장비로 제작한 곡률을 가지는 복합재 구조물의 다양한 결함 요인에 대한 연구[5], AFP 장비로 격자 구조의 새로운 항공기 동체를 제작하고 시험 평가한 사례 등이 소개되고 있다[6]. 또한 Rob[7] 등은 대형 복합재료 동체를 제작을 위해 다양한 방향으로 적층이 가능한 AFP 장비를 설계하였고, Todd[8] 등은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 일체형 스파 구조물을 AFP 장비로 최적화된 방법을 통해 제작하였다.

따라서 국내의 기업들이 복합재 구조 개발 분야에서 선진국을 따라 잡기 위해서는 AFP를 이용한 제작 기술을 서둘러 확보할 필요가 있다. 이에 경상대학교와 한국항공, 경남 TP 등에서는 AFP를 이용한 복합재 구조물 개발[4] 연구의 연속사업으로 민항기용 대형 복합재 C-스파를 AFP로 제작하기 위한 연구를 수행하였다. 본 논문에서는 AFP로 대형 스파를 제작하기 위한 맨드릴(Mandrel)의 설계와 제작에서부터, 이를 이용해 제작한 복합재 구조물의 강도평가에 이르기까지의 전체 과정을 정리하였다.

2. C-스파 및 맨드릴 형상

연구에 사용된 복합재 스파의 형상과 치수는 Fig. 1에 보인 바와 같다. 플랜지의 폭(h)은 200 mm이며 웹의 높이는

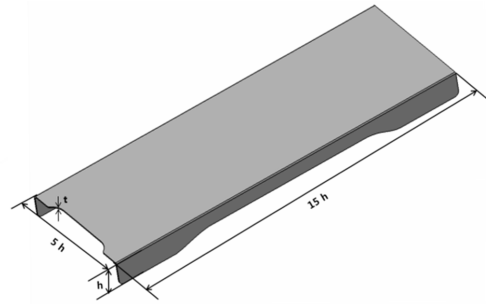


Fig. 1. Configuration of C-spar

Table 1. Material properties of T800S/3900-2B (Toray Industries, Inc)

Properties	Value
Young's modulus E_{11} (GPa)	139
Young's modulus $E_{22} = E_{33}$ (GPa)	8.8
Shear modulus $G_{12} = G_{13}$ (GPa)	4.6
Shear modulus G_{23} (GPa)	3.0
Poisson's ratio $\nu_{12} = \nu_{13}$	0.32
Poisson's ratio ν_{23}	0.46
Longitudinal tensile strength X_T (MPa)	3100
Transverse tensile strength $Y_T = Z_T$ (MPa)	55
Shear strength $S_{12} = S_{13}$ (MPa)	88
Shear strength S_{23} (MPa)	39

플랜지 폭의 5배인 1000 mm이다. 스파의 길이는 플랜지 폭의 15배로 3000 mm이다. 사용한 재료는 Toray 사의 탄소섬유 복합재료인 일방향 프리프레그 T-800S/3900-2B[9]이고, 적층순서는 $[45/90/-45/0]_{68}$ 이다. 경화된 후 한 층의 공칭두께는 0.190 mm이다. Table 1에 T-800S/3900-2B의 재료상수를 나타내었다.

AFP로 복합재 구조물을 제작하기 위해서는 맨드릴의 설계가 중요하다. 본 연구에서 맨드릴은 SS 400 구조용 압연강재를 사용하여 제작하였다. 아래의 Fig. 2는 CATIA로 설계한 맨드릴의 형상을 도면으로 나타낸 것이다. 양단의 원형 구조는 AFP 장비에 장착되는 부분이다. 맨드릴의 무게 절감과 오토클레이브 속에서의 효율적 열전달을 위해 웹에는 다수의 컷아웃을 설치하였다.

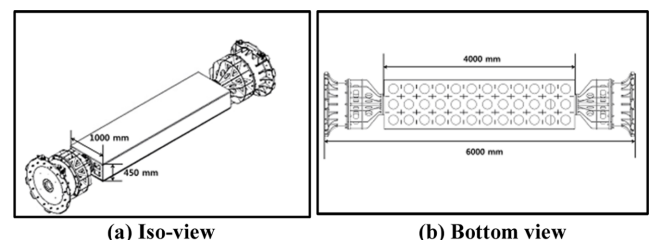


Fig. 2. Configuration of mandrel

3. 맨드릴 구조해석

3.1 맨드릴 유한요소모델

앞에서도 언급한 바와 같이 맨드릴은 그 자체로 대형구조물이다. 따라서 자중에 의한 처짐, 열변형, AFP에 의한 외부하중, 진동특성 등을 고려한 설계가 이루어져야 한다. 본 연구에서는 MSC.Nastran을 이용해 정적, 동적 구조해석과 열변형 해석을 수행하였다. 맨드릴의 구조재인 SS 400의 물성치는 Table 2에 나타내었다. 맨드릴 구조물의 복잡한 형상을 고려하여, 유한요소모델링시 형상의 영향을 덜 받으면서 상대적으로 정확한 해석 결과를 얻을 수 있는 10 절점 3차원 고체요소[10]를 사용하여 요소망(Mesh)을 생성하였다. 맨드릴의 유한요소모델은 Fig. 3에 보였다. 총 175,089개의 10 절점 3차원 고체요소를 사용하였고, 절점의 수는 340,867개이다. 맨드릴 양단은 AFP에 의해 지지되며, 원형 지지부를 따라 총 18개의 볼트로 고정되므로 유한요소모델에서의 경계조건은 고정지지(Fixed)로 가정하였다.

3.2 정적 해석 결과

맨드릴의 처짐이 커질 경우 맨드릴을 이용하여 제작하는 구조물의 초기형상이 달라지게 된다. 따라서 맨드릴의 변형은 복합재 구조물의 최대 허용공차 이내여야 한다. 본 연구에서 맨드릴의 처짐 및 응력 해석은 세가지 하중조건, 즉 자중, 자중과 장비에 의한 집중하중의 조합하중, 자중과 장비에 의한 분포하중의 조합하중에 대해 수행하였다. 맨드릴의 자중은 총 17,000 kg이며, 이를 유한요소의 모든 절점들에 균일하게 가하였다. 장비에 의한 집중하중은 AFP의 헤드가 복합재 테이프를 맨드릴에 적층하면서 누르는 힘인데, 본 연구에서는 제작사에서 제공한 데이터를 바탕으로 2,940 N으로 가정하였다. 분포하중은 실제 AFP의 헤

Table 2. Material properties of structural steel 400 (SS 400)

Property	Value
Elastic modulus (GPa)	205
Possion's ratio	0.29
Yield strength (MPa)	245
Density (kg/m ³)	7850
Coefficient of thermal expansion (m/m/°C)	15×10^{-6}

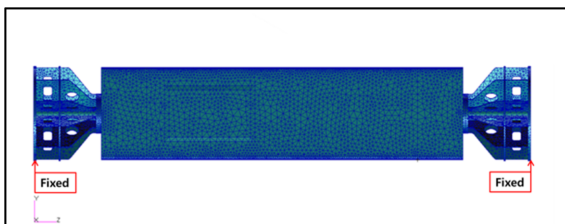


Fig. 3. Finite element model of mandrel

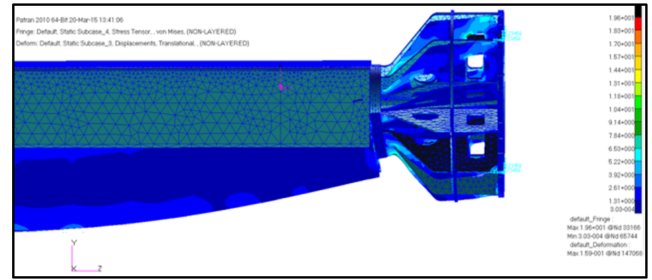


Fig. 4. Deformation and von-Mises stress distribution of mandrel (structure self-weight and distributed load at the center)

드가 복합재 테이프를 적층할 때 한 절점에 집중되는 집중하중이 아닌 면적에 가해지는 특징을 고려한 조건이다. 복합재 테이프의 폭인 8 mm 간격으로 4개의 절점에 가한 분포하중은 각각 735 N이 된다. 세 가지 하중조건을 고려하여 정적 해석을 수행한 결과, 미세한 차이지만 가장 큰 처짐과 응력을 보이는 경우는 자중과 분포하중의 조합하중이 가해지는 경우로 확인되었다. von-Mises 응력의 최대값은 맨드릴 지지부에서 발생하였고, 그 값은 19.6 MPa로서 항복응력 245 MPa에 비해 충분히 작은 값을 보였다. 최대 처짐은 맨드릴의 중앙에서 나타났고, 그 값은 0.16 mm였다. 자중 방향의 맨드릴의 변형은 일반적인 대형 구조물의 허용 공차를 0.762 mm 정도로 하므로 변형량은 복합재 구조물의 제작 허용공차 범위 내로 판단된다. Fig. 4에 자중과 분포하중의 조합하중이 가해지는 경우의 처짐과 von-Mises 응력 결과를 나타내었다.

3.3 열변형 해석 결과

오토클레이브(Autoclave) 공정으로 복합재료를 경화시킬 때 고온의 오토클레이브 내에서 금속 맨드릴에는 열에 의한 변형이 발생하게 된다. 또한 이러한 열변형은 복합재 구조물의 형상에도 영향을 미치게 되므로 정적 변형과 마찬가지로 열변형도 제한적이어야 한다[11].

따라서 본 연구에서는 사용하는 복합재의 최고 성형온도인 180°C에서의 열변형 해석을 수행하였다. 오토클레이브 속에서도 구조물은 앞서와 동일한 형태로 지지되므로, 해석에 적용되는 경계조건도 정적해석에서와 동일하다. 오토클레이브 밖 상온은 25°C로 가정하였다. 오토클레이브 속에서도 맨드릴에 의한 자중은 계속 가해지므로 열변형 해석에서도 맨드릴의 자중은 함께 고려하였다.

해석 결과 자중 방향으로 0.014 mm, 맨드릴 횡 방향으로 0.016 mm, 맨드릴 길이 방향으로 0.034 mm의 변형이 발생하였다. 맨드릴의 양단이 고정되어 있지만 구조물이 완전한 대칭이 아니므로 양단 사이에서는 미세한 길이방향 열변형이 발생한 것으로 판단된다. 맨드릴 길이방향의 변형은 구조물 제작 후 트림을 하게 되므로 문제가 되지 않는다. 자중과 횡방향의 변형은 앞서 언급한 바와 같이 일반적

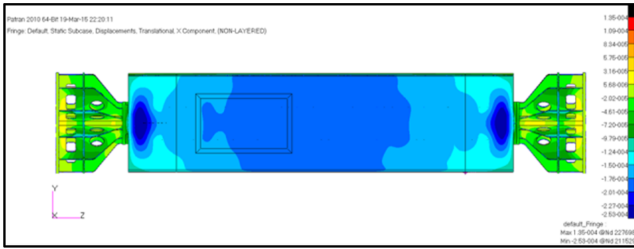


Fig. 5. Thermal deformation of mandrel (Direction of self-weight)

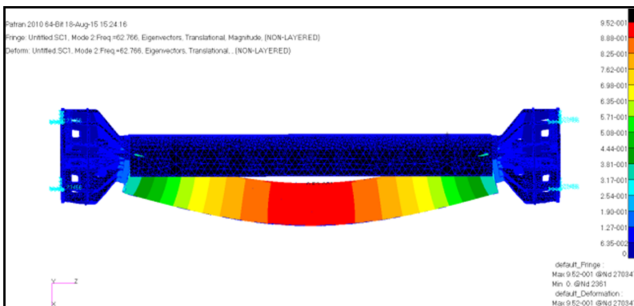


Fig. 6. Natural mode 2 of mandrel

인 제작공차 범위를 만족하는 것으로 나타났다. Fig. 5에 맨드릴의 자중 방향으로의 열변형 해석 결과를 보였다.

3.4 고유 진동수 해석 결과

AFP로 복합재료를 적층할 때 AFP 헤드는 회전하지 않고 맨드릴이 회전하면서 적층이 이루어진다. 맨드릴이 회전할 때 구조물의 고유진동수와 외부 진동수가 일치하게 되면 공진(Resonance) 현상이 발생할 수 있다. 본 연구에서 사용한 AFP의 경우 구조물의 고유진동수가 최소 15 Hz 이상일 것을 요구하고 있다. 이를 확인하게 위해 정적 해석에서 사용한 유한요소모델을 이용하여 고유진동수 해석(Modal Analysis)을 수행하였다. 모드 4까지 해석을 수행하였고, 모드 1에서 4까지의 고유진동수는 각각 36.39 Hz, 62.77 Hz, 98.95 Hz, 152.66 Hz로, 맨드릴의 공진 위험은 없는 것을 확인하였다. Fig. 6은 모드 2에서의 고유진동모드를 보인 것이다.

4. C-스파 제작

AFP를 이용하여 C-스파를 제작하는 대략적인 과정은 Fig. 7에 보였다. 그림의 상단 좌측에 보인 바와 같이 먼저 맨드릴을 AFP에 설치한다. 다음으로 성형 후 탈형(De-mold)을 위해 맨드릴 위에 이형 필름(Release Film)을 부착한 후 AFP 장비로 프리프레그 테이프를 적층한다. AFP 헤드가 복합재료를 적층하는 중에 적층각을 확인하는 육안 검사를 수행하였고(하단 우측 사진), 진공백(Vacuum Bagging) 과정을 거친 후 오토클레이브에서 성형한다. 실제 AFP로 적층을 하는 상세한 사진을 Fig. 8에 제시하였다. Fig. 9는 성형이 끝난 복합재 스파 구조물이다.

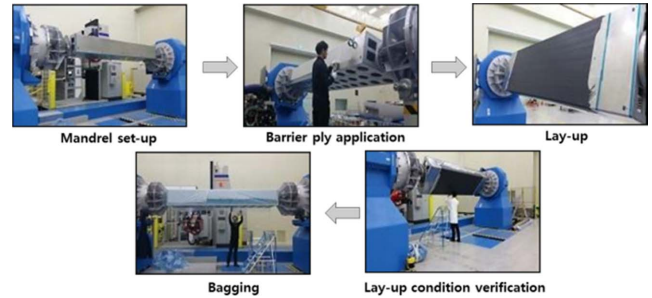


Fig. 7. Manufacturing process of C-spar using AFP machine



Fig. 8. Manufacturing set-up

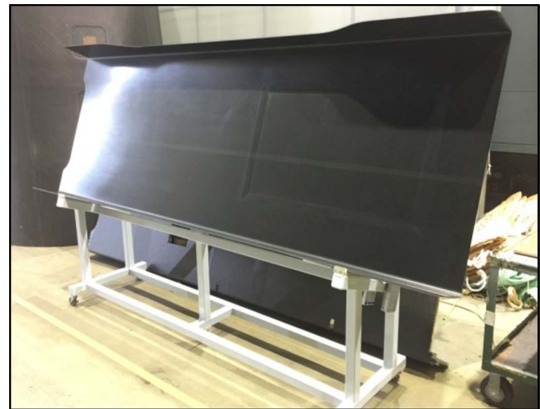
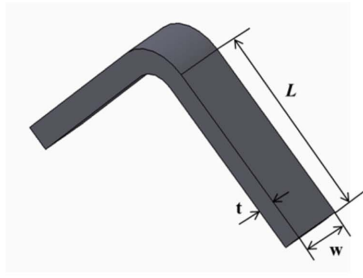


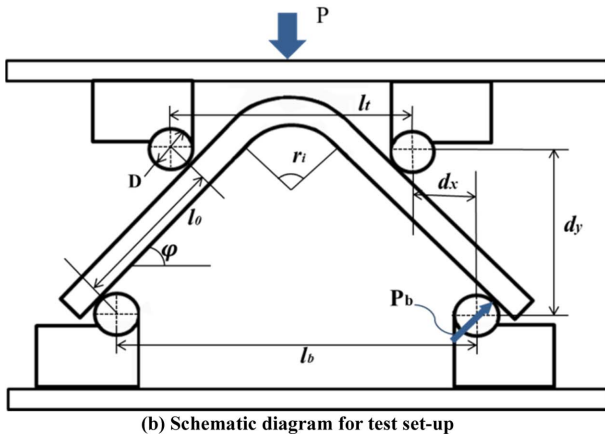
Fig. 9. Composite C-spar after curing

5. 구조강도 시험

제작된 C-스파 구조물의 구조적 품질을 확인하기 위한 방법으로, 구조물에서 가장 취약한 부분인 코너부(Corner radius) 시편을 채취하여 곡률 굽힘시험을 ASTM D 6415[12]에 따라 수행하였다. 4점 굽힘시험을 위한 시편(a)과 시험구성도(b)는 Fig. 10과 같다. 시편의 직선부(Loading Leg, L)는 90 mm, 너비(W)는 25 mm, 두께(t)는 9.12 mm이다. 시험셋업 구성도에서 실린더 형상의 핀 직경(D)은 9.85 mm, d_x , d_y 는 상, 하부 핀 중심에서 수평, 수직 거리이며 각각 19 mm, 38 mm이다. l_1 는 상부 핀 중심 간의 거리로 40 mm, l_b 는 하



(a) Curved beam specimen



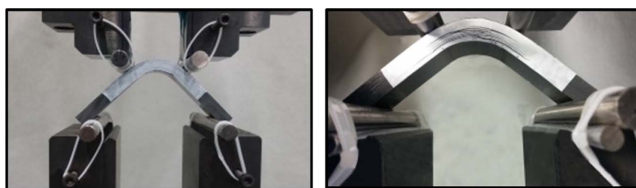
(b) Schematic diagram for test set-up

Fig. 10. Curved beam (corner radius) and test set-up

부 편 중심 간의 거리로 80 mm, l_0 는 시편 직선부와 상, 하 부 편 중심 간의 거리이다. ϕ 는 시편 직선부와 수평면의 사이 각, r_i 는 내부 곡률 반경으로 9.5 mm이다. P_b 는 하나의 편에 의해 가해지는 적용하중이다. 시편과 치구는 ASTM D 6415에서 규정하는 치수와 동일하게 설정하여 시험을 수행하였다.

하중속도는 규정에 명시된 0.5 mm/min를 따르되 파손이 1분에서 10분 사이에 일어나는 것을 원칙으로 하였다. 총 5개 시편에 대한 시험을 수행하였고, 코너부 중앙에서 층간 분리(Delamination)가 먼저 발생하고 하중이 가해짐에 따라 외부로 층간분리가 진전되는 것을 확인하였다. Fig. 11에 시험 셋업(a)과 파손형상(b)을 보였다.

Fig. 12에 보인 바와 같이 시험 결과 하중-변위 선도는 비선형으로 나타났고 코너부 중앙에서 층간분리가 발생한 이후에는 추가적인 하중을 지지하지 못하였다. ASTM D6415에서 규정하는 곡률보(Curved beam)의 강도 계산식 (1)을



(a) Test set-up



(b) Failure mode

Fig. 11. Curved beam 4-point bending test

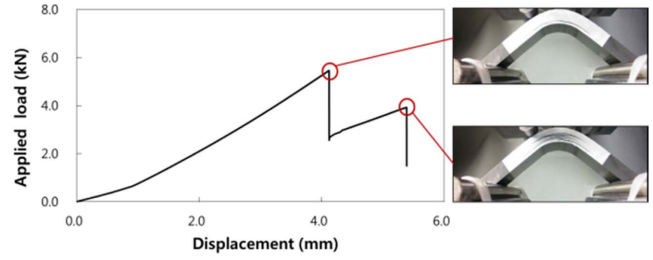


Fig. 12. A typical load-displacement curve (CB-1)

Table 3. Results of curved beam 4-point bending test

Specimen ID	CB-1	CB-2	CB-3	CB-4	CB-5	Average
Value						
Failure load (kN)	5.5	5.2	4.7	5.5	4.7	5.1
Interlaminar strength (MPa)	63	67	65	68	67	66

통해 얻은 강도값(CBS)을 층간강도(Interlaminar Strength) 계산식 (2)에 대입하여 층간강도값을 계산하였다.

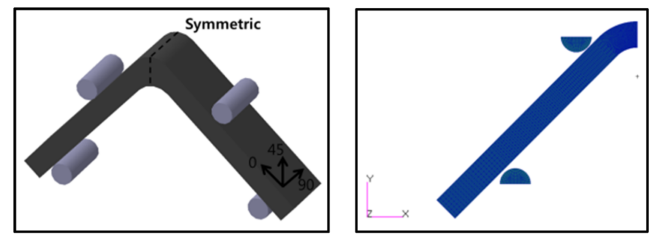
$$CBS = \frac{M}{w} = \left(\frac{P_b l_0}{2w \cos(\phi)} \right) \left(\frac{d_x}{\cos \phi} + (D+t) \tan(\phi) \right) \quad (1)$$

$$\sigma_r^{\max} = \frac{3 \cdot CBS}{2t \sqrt{r_i r_0}} \quad (2)$$

Table 3에 5개 시편의 파손강도값과 계산한 층간강도값을 나타내었다. 시험 파손하중은 평균 5.1 kN, ASTM D6415 규정의 면내 층간강도 계산 식을 통해 계산한 면내 층간강도값은 평균 66 MPa이다.

6. 구조강도 해석

시험에서 얻은 구조 강도값이 구조물의 설계 강도값과 일치하는지를 검증하기 위해 유한요소해석을 수행하여 거동과 파손하중의 연계성을 살펴보았다. MSC.Marc의 8절점 육면체 고체요소를 사용하여 비선형 구조해석을 수행하였다. 구조물의 대칭성을 이용하여 절반만을 모델링하였고, 치구와 시편의 접촉도 고려하였다. Fig. 13에 시험 셋업의 CAD 모델(a)과 유한요소모델(b)을 보였다.



(a) CAD model

(b) FE model

Fig. 13. Model of corner radius

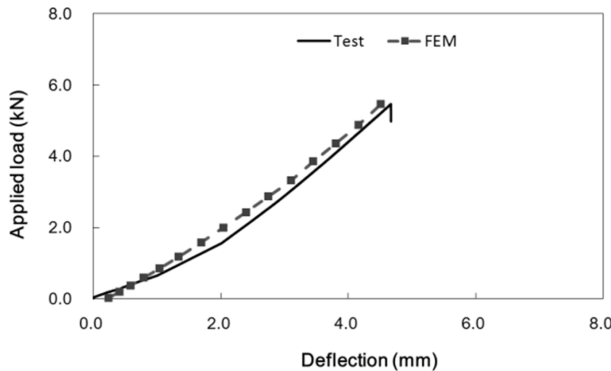


Fig. 14. Load-deflection curves

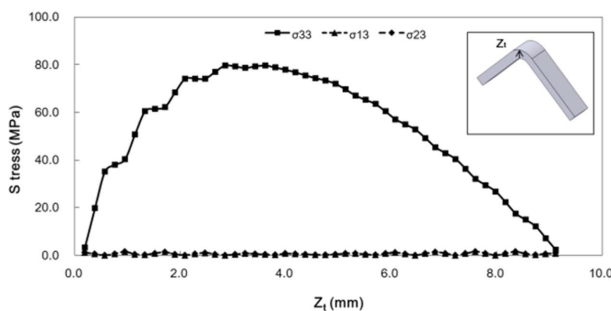


Fig. 15. Stress distributions along thickness direction

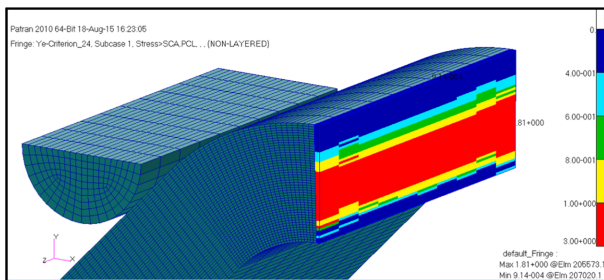


Fig. 16. Ye failure index distribution at the center section

Fig. 14는 시험과 해석에 의한 하중-처짐 곡선이다. 시험에 의한 파손하중에 도달할 때까지 시험과 해석에 의한 하중-변위 곡선이 잘 일치하고 있는데, 이는 접촉을 고려한 유한요소모델이 잘 작동하였음을 보여준다.

해석의 주 관심은 시편의 중앙부에서의 층간분리 파손 발생 시점이다. Fig. 15에 시험에 의한 평균 파손하중 5.1 kN을 가하였을 때, 시편의 중심면 즉 대칭면에서의 두께방향 응력 분포를 보였다. 그림으로부터 두께방향 전단응력인 σ_{13} , σ_{23} 은 0.02-1.6 MPa 정도로 무시할 정도이며, 수직응력인 σ_{33} 가 주요 성분임을 알 수 있다. Fig. 15에 구조물의 안쪽 면에서 바깥쪽 면으로 가면서 두께방향 수직응력이 어떻게 변하는지를 보였다. 최대 응력은 15번째 층인 -45도 층에서 나타나고, 시편의 내외 표면보다는 내부에서 응력이 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 16은 시편 중앙 절단면에서 Ye 층간분리 파손지수(Failure Index)[13]를 보인 것이다. Fig.

15에서 짐작할 수 있듯이 중립면 부근, 7번째 층(45도)에서 31번째 층(90도) 사이에서 층간분리가 집중적으로 발생하는 것을 볼 수 있다.

보수적으로 파손하중을 평가할 때 사용하는 최초층 파손이론(First Failure Theory)[14]의 관점에서 살펴보면 시험에 의한 평균 파손하중인 5.1 kN 보다 20.2% 낮은 하중인 4.1 kN에서, 11번째 층(-45도)의 파손이 발생한다. 최초층 파손이론이 실제 구조물의 강도를 과도하게 낮게 평가하는 것이 일반적이라는 점을 고려하더라도, AFP로 제작된 구조물이 이론적으로 예측된 파손하중보다 20% 가량 더 높은 값을 보이는 것은 제작 기술 관점에서 의미있는 일이라 할 수 있다. 보다 정확한 구조 성능 평가를 위해서는 향후 일반적 적층방법으로 제작한 코너부 시편에 대한 시험 결과와의 비교나, 손상영역법 등을 사용한 정교한 파손하중 예측이 필요할 것으로 생각된다.

7. 결 론

본 연구에서는 AFP 자동 적층 장비를 이용하여 두꺼운 항공기 날개 구조물인 C-스파를 제작하고 시험과 해석을 통해 구조물의 강도를 평가하였다. C-스파 제작을 위한 맨드린은 구조강으로 제작하였고, 정적 해석, 열변형 해석, 고유진동수 해석을 수행하여 설계 타당성을 검증하였다. 제작된 복합재 C-스파 구조물의 강도를 평가하기 위해 구조물에서 가장 취약한 코너부에서 시편을 채취하여 4점 굽힘 시험을 수행하고, 해석결과와 비교하였다. 시험결과 시편의 중앙 내부에서의 층간분리가 주된 파손모드로 나타났고, 이는 Ye 파손기준식을 사용한 유한요소해석을 통해서도 확인할 수 있었다. 최초층 파손이론을 사용하여 층간분리 파손을 예측한 결과 시험 결과와 20%의 차이로 비교적 잘 일치하는 결과를 얻었다. 이로부터 현재 설치된 AFP 장비를 이용하여 제작한 대형 복합재 C-스파 구조물의 기본적인 구조적 건전성을 확인하였으며, 추후 일반공정 시편과의 강도 비교와 비파괴 검사 등을 거쳐 실용화 제품 생산에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 동남지역사업평가원의 광역경제권 선도산업 육성사업의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

REFERENCES

- Kuklinski, M., "Influence of Void and Layers Number on Mechanical Properties of Hand Lay-up Bended Laminates," *Journal of Polish CIMAC*, 2011.
- Kim, Y.I. and Choi, S.M., "Application of Composites on Korean Aircraft Program," *Composite Research*, No. 1, 2003,

- pp. 68-74.
3. Shim, J.Y., Jung, K.W., Lee, H.Y., Lee, S.K., Hwang, G.C., and Ahn, S.M., "KC-100 Full-scale Airframe Static Test," *International Journal of Aeronautical and Sciences*, Vol. 42, 2014, pp. 67-75
 4. Kumar, D., Ko, M.K., Roy, R., Kweon, J.H., Choi, J.H., Jeong, S.K., Jeon, J.W., and Han, J.S., "AFP Mandrel Development for Composite Aircraft Fuselage Skin," *International Journal of Aeronautical and Sciences*, Vol. 15, 2014, pp. 32-43.
 5. Akabarzadeh, A.H., Arian, N.M., and Pasini, D., "The Role of Shear Deformation in Laminated Plates with Curvilinear Fiber Paths and Embedded Defects," *Composite Structures*, Vol. 118, 2014, pp. 217-218.
 6. Mack, J., McGregor, O., and Mitschang, P., "Prepreg Lay-up Technology for Manufacturing of Lattice Structure Fuselage Sections," *Proceeding of the 16th European Conference on Composite Materials*, 2014, pp. 22-26.
 7. Rob, F., Justin, N., and Todd, R., "Production Implementation of Multiple Machine, High Speed Fiber Placement for Large Structures," 2010 SAE International, Paper No. 2010-01-1877.
 8. Todd, R., Guy, F., John, N., and Andrew, P., "One Piece AFP Spar Manufacture," 2011 SAE International, Paper No. 2011-01-2592.
 9. McCallum, S., "The Influence of Preload and Boundary Conditions on Pre-damaged Composite Plates Subject to Soft-body Impact," *Material & Design*, Vol. 83, 2015, pp. 848-857.
 10. MSC Nastran 2012 Linear Static Analysis User's Guide, Nov. 2011.
 11. Narender, K., Rao, A.S.M., Rao, K.G.K., and Krishna, N.G., "Temperature Dependence of Density and Thermal Expansion of Wrought Aluminum Alloys 7041, 7075 and 7095 by Gamma Ray Attenuation Method," *Journal of Modern Physics*, Vol. 4, 2013, pp. 331-336.
 12. Standard Test Method for Measuring the Curved Beam Strength of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite, ASTM Standard D6415 / D6415M.
 13. Ye, L., "Role of Matrix Resin in Delamination Onset and Growth in Composite Laminate," *Journal of Composite Science and Technology*, Vol. 33, 1988, pp. 257-277.
 14. Ever, J.B., "Introduction to Composite Materials Design", Second Edition, pp. 233-243.