

EDISON Ksec2D-AE를 이용한 원형 단면 날개 보의 파라미터 연구

구 상 훈^{1*} · 하 현 호¹

¹건국대학교 항공우주정보시스템공학과

Parameter Study of Circular Cross-section Wing Spar by Using EDISON Ksec2D-AE

Sang-Hoon Koo^{1*}, Hyeon-Ho Ha¹

¹Department of Aerospace Information Engineering, Konkuk Univ., 120 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05029, Korea

Abstract

Recently, carbon fiber-reinforced composite is widely used in many aerospace applications. Among most of the aerospace vehicles, human-powered aircraft essentially uses it for minimizing the weight of the vehicle and gaining high stiffness to increase its efficiency. In this paper, main wing spar of the human-powered aircraft is investigated. Finite element models were created based on the baseline model built in 2013 to make analysis of cross-section of the spar with varying ply angles of each layer of the spar. Objective function, which is affected from bending rigidity, torsional rigidity, and strength ratio, was evaluated for every cases. The model of 2013 and present cases were put into comparison by values evaluated from objective function. From the comparison, it was concluded that there are more chances to improve the baseline model to make the vehicle better in stiffness and weight than the model of 2013.

Keywords : *ply angle, carbon fiber-reinforced composites, parameter study, HPA(Human Powered Aircraft), objective function*

1. 서 론

높은 비강도와 비강성을 갖는 탄소 섬유 복합재(carbon fiber-reinforced composites)는 현재 항공우주분야에서 다양하게 쓰이고 있다. 특히 일반적인 항공기에 비해 상대적으로 적은 출력을 내는 인간 동력 항공기(Human Powered Aircraft, HPA)에서는 구조물의 경량화와 강성획득이 핵심이기 때문에 대부분의 구조물이 탄소 섬유 복합재로 이루어져 있다.

한국항공우주연구원이 주최한 2015 인간 동력 항공기 경진대회에서도 참가팀 모두 탄소 섬유 복합재를 사용하였다. 이 중 비행 하중 조건을 견디지 못하여 날개보(spar)가 파손되거나, 또는 필요 이상으로 무겁게 설계되어 중량 초과로 인해 이륙하지 못하는 경우가 발생하였다.

본 논문에서는 인간 동력 항공기의 구조물 중 대부분을 차지하고 있는 주익의 원형 단면 날개보를 다루었다. 탄소 복



Fig. 1 Failure of human powered aircraft main Spar

합재 원형 단면 보에 대한 기존의 많은 연구들은 자전거 프레임(Kim *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2012)이나 교각 등의 콘크리트 구조물을 보강하는 덮개(jacket)(Purba *et al.*, 1999) 등을 다루었다. 이러한 구조물은 날개보와는 다

른 하중 조건이 주어지므로, 해당 논문에서의 최적의 적층각 패턴을 찾았다고 하더라도, 날개보에 적용하기에는 무리가 있을 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 2013년에 제작된 탄소 섬유 복합재 날개보를 바탕으로 각 판의 적층각을 다르게 모델링하였다. 여기에 실제 인간 동력 항공기가 비행할 때와 동일한 하중 조건을 부여하고, EDISON Ksec2D-AE 프로그램을 이용하여 단면의 주요 물성을 도출하였다.

단면의 주요 물성을 토대로 목적 함수를 계산하고, 최적의 적층각 배열을 탐색함으로써 최적화된 원형 날개보 단면의 설계를 진행하였다.

2. 본 론

이 장에서는 먼저 해석할 단면의 주요 정보와 경계조건 및 하중조건을 서술한 후 Ksec2D-AE의 특징과 주요 기능을 소개한다. 적층각 배열과 목적함수를 설정하여 해석하고, 결과를 통해 기존의 모델과 비교 분석한다.

Table 1 Material properties of each prepreg (Lee, 2013)

		Uni-Directional	Fabric
Elastic Modulus (GPa)	E_1	131	65.4
	E_2	8.2	65.4
	E_3	8.2	-
Shear Modulus (Gpa)	G_{12}	4.5	3.59
	G_{13}	4.5	-
	G_{23}	3.5	-
Poisson's Ratio	ν_{12}	0.281	0.058
	ν_{13}	0.281	-
	ν_{23}	0.47	-
Tensile Strength (MPa)	X_T	2,000	959.1
	Y_T	61	929.1
	Z_T	61	-
Shear Strength (MPa)	S_{12}	70	118.6
	S_{13}	70	-
	S_{23}	40	-
Thickness (mm)	t	0.255	0.23
Density (kg/m^3)	ρ	1,580	1,580

2.1 단면의 제한

2.1.1 단면형상 및 물성치

2013년 인간 동력 항공기 기체설계 최종 보고서(Lee,

2013)에 따르면 주익 날개보 단면 형상은 Fig.2와 같다. 단면은 Mid-Line 기준으로 반지름이 5cm이고 두께가 1.94 mm인 원형 단면이다. 총 8개의 적층판(lamina)으로 구성되어 있으며, 적층판은 두 종류이다. 하나는 단방향 탄소 섬유 소재인 Uni-Directional Prepreg이고, 다른 하나는 직물형태의 섬유 소재인 Fabric Prepreg이다. 두 적층판이 한 층씩 교대로 쌓여 레미네이트를 구성한다.

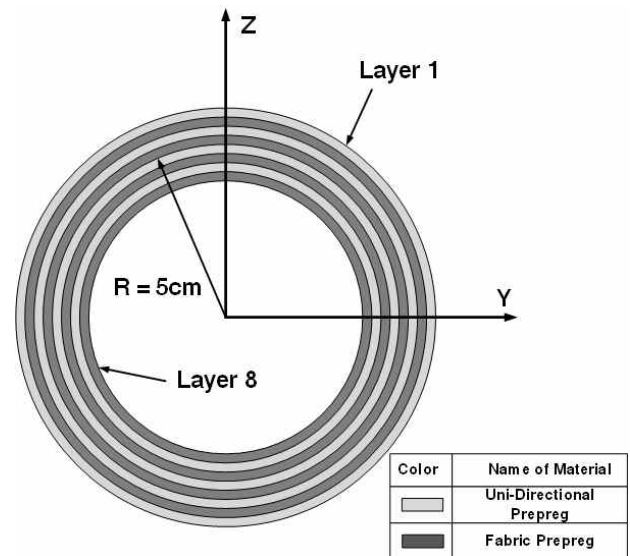


Fig. 2 Cross section of main wing spar

Uni-Directional Prepreg와 Fabric Prepreg의 물성치는 Table 1과 같다.

2.1.2 경계조건 및 하중조건

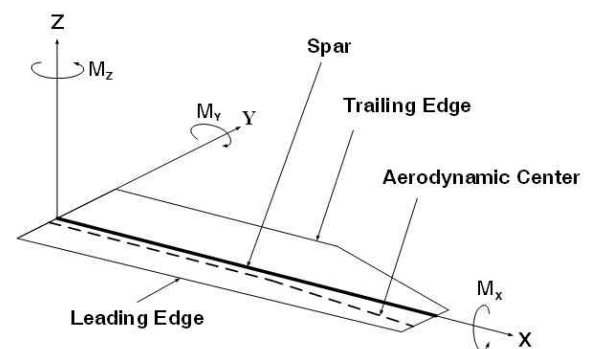


Fig. 3 Moment diagram of main wing

주익의 주요 구조와 해석에 필요한 좌표계를 Fig. 3에 나타내었다.

인간 동력 항공기에 작용하는 하중 종류는 비행 상태에 따라 다르지만 주로 자중과 양력, 그리고 항력으로 분류된다.

제5회 첨단 사이언스·교육 허브 개발(EDISON) 구조동역학 경진대회

비행속도는 순항속도인 $V_{\infty} = 10\text{m/s}$ 을 기준으로 하였다.

자중에 의한 모멘트는 M_X , M_Y 에 관여한다. 그러나 주익 구조물에서 탄소 섬유로 이루어진 날개보에 비해 비닐로 이루어진 외피나, 발사나무로 되어 있는 리브 구조물 등은 매우 가벼우므로 이들에 의한 질량은 무시할 수 있다. 따라서 자중에 의한 X축 방향 모멘트는 없다고 가정한다. 또한 항력에 의한 X축 방향 모멘트의 경우, 다른 힘에 의한 모멘트에 비해 매우 작기 때문에 무시하였다. 위의 가정에 따라 자중, 양력 그리고 항력에 의한 모멘트를 다음과 같이 정의할 수 있다.

- $M_{Y, Gravity}$: 자중에 의한 Y축 방향 모멘트
- $M_{X, Lift}$: 양력에 의한 X축 방향 모멘트 (피칭 모멘트)
- $M_{Y, Lift}$: 양력에 의한 Y축 방향 모멘트
- $M_{Z, Drag}$: 항력에 의한 Z축 방향 모멘트

각 모멘트의 계산은 주익을 n 개의 패널로 나눈 후에 각 패널에서 작용하는 힘과 모멘트 암을 곱하여 모두 더하는 방식으로 구하였다. 대략적인 개념을 Fig. 4와 식 (1)에 나타내었다.

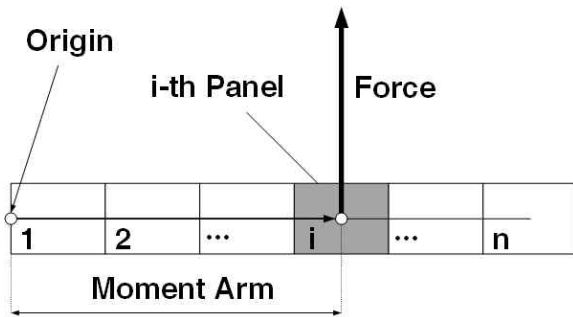


Fig. 4 Force and moment arm of i -th panel

$$M = \sum_{i=1}^n [(Moment\ Arm)_i \times (Force)_i]$$

(1)

각 모멘트의 계산 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Moments of each item

Item		Moment (N·m)	Sum (N·m)
M_X	$M_{X, Lift}$	-334.79	-334.79
M_Y	$M_{Y, Gravity}$	588.9	-4,437.4
	$M_{Y, Lift}$	-5,026.3	
M_Z	$M_{Z, Drag}$	147.3925	147.3925

2.2 Ksec2D-AE의 특징

Ksec2D-AE는 단면을 2D 유한요소화 한 후, 단면의 공학적 중심치, 강성 등 물성치를 계산하는 프로그램이다. Ksec2D-AE의 특징은 다음과 같다.

- ① 임의의 단면형상에 대해 계산이 가능하다.
- ② Isotropic, Orthotropic, Anisotropic 등 다양한 재료로 구성된 단면에 대한 해석이 가능하다.
- ③ 하중에 의해 단면에 발생하는 응력분포를 확인할 수 있고, 응력값을 이용하여 파단해석을 수행할 수 있다.

본 연구에서는 Ksec2D-AE를 이용하여 탄소 섬유 복합체의 단면에 대한 해석을 진행하고, 그 결과를 목적함수의 계산에 이용하였다. Ksec2D-AE의 입·출력 데이터는 Fig.5와 같고, 단면의 2D 유한요소 모델은 Fig. 6과 같다.

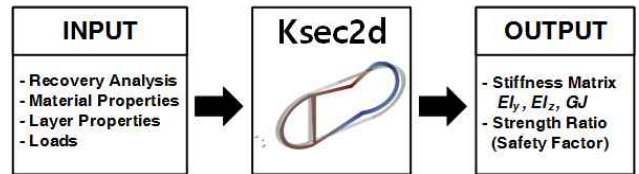


Fig. 5 Inputs and outputs of Ksec2D-AE

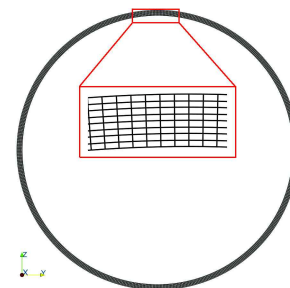


Fig. 6 2-Dimensional finite element model of cross section

2.3 설계 변수 설정

2.3.1 적층각 배열

기존의 탄소 섬유 복합재 원형 보에 대한 연구들은 적층각의 종류를 0°, 45°, -45°, 90°로 제한하였다. 이번 연구에서는 기존 연구와 달리 적층각 종류를 다양화하여 -75°부터 15° 단위로 90°까지 총 12개로 설정하였다.

Fabric Prepreg는 Uni-Directional Prepreg와 달리 0° 방향 Young's Modulus와 90°방향 Young's Modulus가 같다. 따라서 Fabric Prepreg로 이루어진 층은 90°로 고정하여 적층각 변화를 고려하지 않았다. 또한, 최외각 적층판의 적층각은 0°로 하여 경우의 수를 12⁴개에서 12³개로 감소시켰다. Table 3은 층별 적층각 배열 분포를 나타낸 것이다.

Table 3 Ply angle arrangement of spar

Layer	Ply Angle (deg)	Material
1	Fixed to 0	Uni-Directional Prepreg
2	Fixed to 90	Fabric Prepreg
3	-75 ~ 90	Uni-Directional Prepreg
4	Fixed to 90	Fabric Prepreg
5	-75 ~ 90	Uni-Directional Prepreg
6	Fixed to 90	Fabric Prepreg
7	-75 ~ 90	Uni-Directional Prepreg
8	Fixed to 90	Fabric Prepreg

2.3.2 목적함수 설정

Table 3에 따라 목적함수의 설계 변수는 적층판의 적층각 배열로 하며, 1,2,4,6,8 층의 적층각을 고정함으로써 설계 변수의 경계 조건을 설정하였다.

항공기 주익 날개보의 경우 Y축과 Z축 방향 굽힘 강성(Bending stiffness, EI_y, EI_z)과 비틀림 강성(Torsional Stiffness, GJ)을 높이는 것이 관건이다. 또한 강도비(Strength Ratio, R)를 높여 파단에 대한 저항을 증가시켜야 한다. 따라서 EI_y, EI_z, GJ, R 값을 최대화 할 수 있도록 목적함수를 설정하였다.

강도비는 다음과 같이 정의된다.(Tsai, 2008)

$$R = \frac{\sigma_{strength}}{\sigma_{max}} \quad (2)$$

구조물에 파단이 발생하지 않도록 하기 위해서 R 이 1보

다 큰 값을 갖도록 제약 조건을 설정하였다. 구조물에 가해지는 최대 응력 σ_{max} 가 구조물이 버틸 수 있는 최대 응력인 $\sigma_{strength}$ 보다 작은 경우, 즉 $R > 1$ 인 경우에 파단이 발생하지 않기 때문이다. R 과 연관이 있는 파손 기준(Failure criterion)은 Tsai-Hill stress failure criterion을 사용하였다. 목적함수의 설정을 수학적으로 정의하면 다음과 같다.

Minimize:

$$f(\theta_1, \dots, \theta_8) = -w_1 \frac{EI_y}{EI_{y,0}} - w_2 \frac{EI_z}{EI_{z,0}} - w_3 \frac{GJ}{GJ_0} - w_4 \frac{R}{R_0} \quad (3)$$

$(w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 1)$

subject to the constraints:

$$R > 1 \quad (4)$$

with bounds for design variables as:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= 0 \text{ (deg)} \\ \theta_2 = \theta_4 = \theta_6 = \theta_8 &= 90 \text{ (deg)} \\ -75 \leq \theta_3, \theta_5, \theta_7 &\leq 90 \text{ (deg)} \end{aligned} \quad (5)$$

$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_8$ 은 각 층에서의 적층각을, 0이 하첨자로 붙은 변수들은 적층각 배열이 (0°/90°)₄인 기준모델 값을 의미한다.

2.4 결과 및 분석

2.4.1 적층각 케이스별 결과

적층 패턴에 따른 목적함수 그래프는 Fig. 7과 같다.

제5회 첨단 사이언스·교육 허브 개발(EDISON) 구조동역학 경진대회

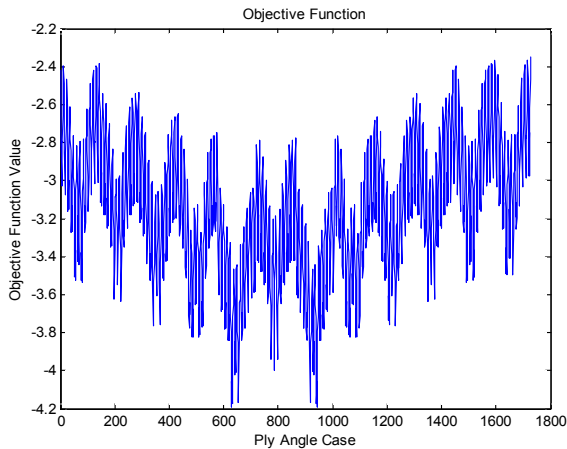


Fig. 7 Objective function values with respect to each case

위 그래프에서 목적함수의 최저점은 Case 629와 Case 943이다. 해당 케이스에서의 목적함수 값은 각각 $y_{case629} = y_{case943} = -4.192$ 이다. 해당 케이스의 적층각 배열은 Table 4와 같다.

Table 4 Ply angle arrangement at minimum objective function cases

Layer	Case 629 (deg)	Case 943 (deg)
1	0	0
2	90	90
3	-15	15
4	90	90
5	-15	15
6	90	90
7	-15	15
8	90	90

Table 4로부터 적층각 배열이 $0^\circ/90^\circ/(15^\circ/90^\circ)_3$ 이거나 $0^\circ/90^\circ/(-15^\circ/90^\circ)_3$ 일 때 목적함수 값이 최소가 나옴을 확인할 수 있었고, 두 경우 모두 3, 5, 7층의 적층각이 동일했다.

비교 분석을 위해 적층판 3,5,7 층의 적층각을 n° 로 동일하게 설정하여 $0^\circ/90^\circ/(n^\circ/90^\circ)_3$ 인 경우의 목적함수값을 비교해 보았다. 총 1728개의 케이스 중에서 대표적인 n 값을 $n = 0^\circ, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ, \pm 60^\circ, \pm 75^\circ$ 로 설정하였다.

Fig. 8은 n 의 변화에 따른 목적함수의 변화를 그래프로 나타낸 것이다.

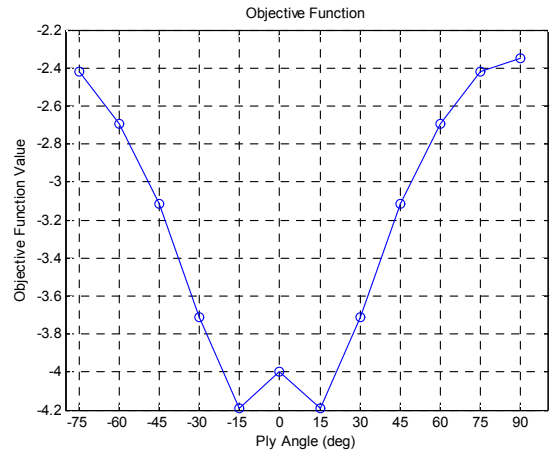


Fig. 8 Objective function graph for special cases

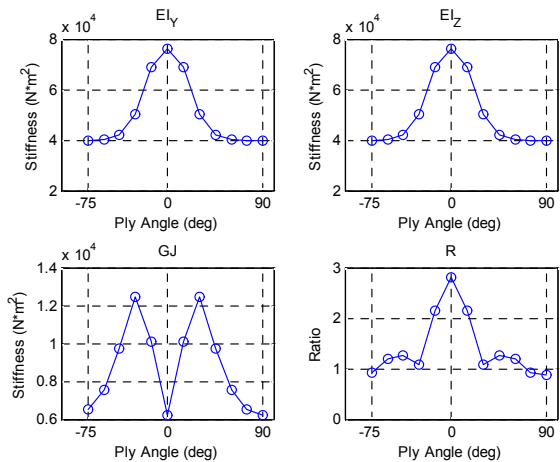


Fig. 9 Bending stiffness, torsional stiffness, and strength ratio for special cases

Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 목적함수 값은 적층각 n 이 0° 에 가까울수록 작아지는 경향을 보인다. Fig. 9에서 적층각이 0° 에 가까울수록 EI_y , EI_z 와 R 이 커지기 때문이다. 그러나 목적함수의 최소값은 적층각 n 이 $\pm 15^\circ$ 일 때 발생하고, $\pm 15^\circ$ 에서 0° 로 가까워질수록 목적함수 값이 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 GJ 가 적층각 $\pm 30^\circ$ 에서 최대가 되고, 적층각 0° 에서는 최소가 되기 때문이다. 또한 적층각 n 이 75° 보다 커지거나 -75° 보다 작아지면 R 이 1보다 작아져 파단이 발생한다.

2.4.2 2013년도 인간 동력 항공기 날개보 모델과의 비교

2013년도 인간 동력 항공기의 날개보 모델의 적층각 배열은 $0^\circ/90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ/45^\circ/90^\circ$ 였다. 2013년도 모

델과 이번 연구 결과로 얻은 최적의 적층각 배열 모델의 해석 결과를 서로 비교해보았다. Fig. 10은 두 모델을 서로 비교하여 요약한 것이다.

두 모델을 비교한 결과, 본 연구를 통해 얻은 적층각 배열 모델이 2013년 모델에 비하여 모든 지표에서 앞서 있음을 알 수 있었다. 이번 연구에서 얻은 EI_Y , EI_Z , GJ 가 2013년 모델에 비해 큰데, 이는 비틀림 모멘트에 대한 저항력이 기존의 모델에 비해 더 크다는 것을 의미한다. 또한 R 도 2013년 모델에 비하여 증가함으로써 상대적으로 Safety margin과 안정성이 확보되었다.

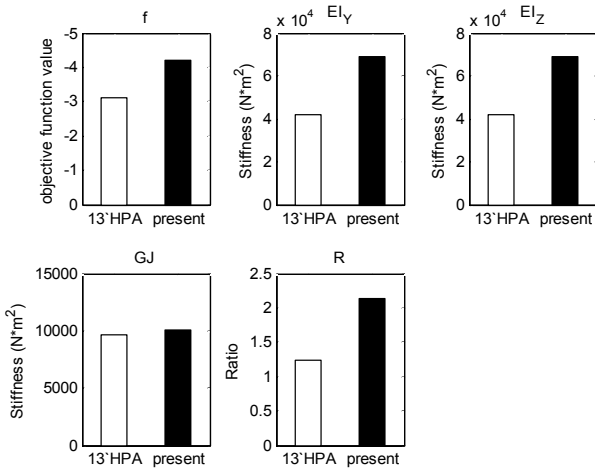
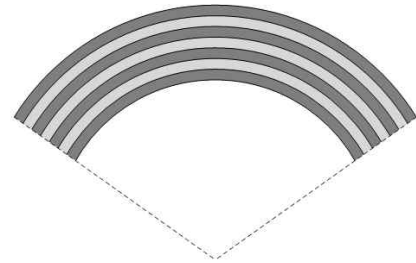


Fig. 10 Comparison of results of 13' HPA(Human Powered Aircraft) and optimum solution of this study

2.4.3 적층 장수를 줄인 모델에 대한 연구

2.4.2의 결과를 바탕으로 연구를 확장하여 적층 장수를 줄인 모델에 대해서도 비교분석하였다. 적층판 모델의 1층을 제거하고 2층부터 8층까지 총 7장의 적층판으로 이루어진, 보다 가벼운 모델을 동일한 하중 조건을 주어 시험해 보았다. Fig. 11은 7개의 적층판으로 이루어진 모델의 적층각 배열을 나타낸 것이다.



Color	Name of Material	Ply Angle
Dark Gray	Uni-Directional Prepreg	Fixed to 90 deg
Light Gray	Fabric Prepreg	-75 ~ 90 deg

Fig. 11 Ply angle arrangement of 7-layer beam

2.4.1에서와 같이 Uni-Directional Prepreg 층의 적층각을 모두 동일하게 하여 적층각 배열이 $90^\circ/(n^\circ/90^\circ)_3$ 이 되도록 하였다.

Fig. 12는 n의 변화에 따른 목적함수 변화 경향 그래프이고, Fig. 13은 적층각 n에 따른 강성 값과 강도비의 변화를 나타낸 것이다. 적층각 n이 $\pm 15^\circ$ 일 때 목적함수 값이 최저이므로 $90^\circ/(15^\circ/90^\circ)_3$ 또는 $90^\circ/(-15^\circ/90^\circ)_3$ 이 최적의 적층각 배열임을 알 수 있다. R은 1.5 이상이므로 파단이 발생하지 않는다. 적층판 8장 모델과 비교하였을 때, 날개보의 중량은 24.07kg에서 20.86kg으로 13.37 % 감소하였다.

따라서 이번 연구에서 확인된 적층각 배열을 이용하면, 적층 장수를 줄일 수 있고 결과적으로 항공기 자체의 중량을 줄일 수 있게 된다.

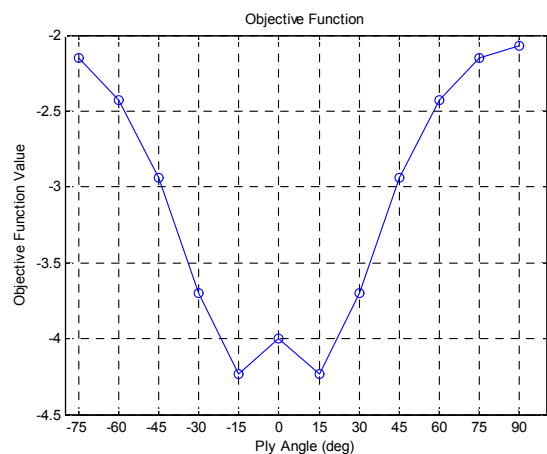


Fig. 12 Objective function graph for 7 layers

Reference

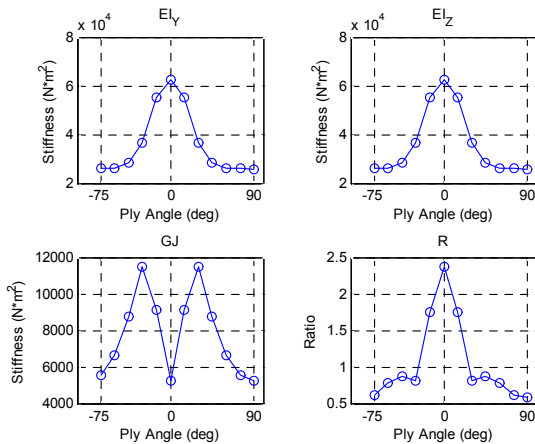


Fig. 13 Bending stiffness, torsional stiffness and strength ratio for 7 layers

3. 결 론

본 연구에서는 EDISON Ksec2D-AE를 이용하여 탄소 섬유 복합재 날개보의 최적 적층각 배열을 탐색하였다. 기존에 설계된 인간 동력 항공기의 주익 날개보 구조를 토대로 유한 요소 모델링을 실시하였고, 항공기 구조물의 휨 강성과 비틀림 강성, 강도비를 바탕으로 목적함수를 설정하여 최적의 적층각 배열을 도출했다. 여러 적층 패턴의 목적함수 값을 비교한 결과 최적의 적층각 배열은 $0^\circ/90^\circ/(15^\circ/90^\circ)_3$ 또는 $0^\circ/90^\circ/(-15^\circ/90^\circ)_3$ 임을 확인할 수 있었다.

뿐만 아니라 기존 인간 동력 항공기의 주익 날개보 모델과의 비교를 통해 이번 연구 결과에서 얻은 적층각 배열의 우수성을 확인할 수 있었다. 연구를 확장하여 적층판 수를 줄인 7장 날개보 모델에도 같은 결과가 도출되었고, 기존 모델에 비하여 가벼운 날개보를 설계할 수 있음을 확인했다.

따라서 다양한 단면 모델 및 하중 조건에 대하여 탄소 섬유 적층판의 적층각 배열 탐색 및 연구하는 데에 EDISON Ksec2D-AE의 효용성을 확인할 수 있었다. 또한 본 논문에서 수행한 파라미터 연구를 활용하여 초기 개념 설계 단계에서의 복합재 최적 적층 패턴 가이드라인을 제시할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단이 주관하는 첨단 사이언스 교육 허브 개발 사업(EDISON: NRF-2014M3C1A6038842)의 지원을 받아 수행한 연구결과입니다.

- Kim, J. H., Jeong, J. A., Kim, J. H. (2012) Bending Characteristic Evaluations Circular Cross-Section Carbon Composite and Hybrid Structural Material, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers., 21(3), pp.421~424
- Lee, H. B. (2013) 2013, HPA Contest Design Final Report, Dept. of Aerospace information engineering, Konkuk Univ., p.97

- Lee, Y. S., Shin, K. H., Cheong, S. K., Choi, U. J., Kim, Y. K., Park, K. R., Kim, H. S. (2012) Utilization of Finite Element Analysis in Design and Performance Evaluation of CFRP Bicycle Frames, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, 37(1), pp.121~127
- Liu, T. J. C., Wu, H. C. (2010) Fiber direction and stacking sequence design for bicycle frame made of carbon/epoxy composite laminate, Materials & Design, 31(4), pp.1971~1980
- Dhadwal, M. K. (2016). *Ksec2D-AE: Finite Element Sectional Analysis for Anisotropic Beams Based On Reduced Elasticity Approach User's Guide for Version 1.7*, Intelligent Rotorcraft Structure Lab., Konkuk University, p.23
- Park, I. J., Jung, S. N., Kim, D. H., Yun, C. Y. (2009). General Purpose Cross-section Analysis Program for Composite Rotor Blades, *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 10(2), 77-85.
- Park, K. W., Jeon, N. I., Han, S. Y. (2012). Structural Optimum Design of Strut Structure of

제5회 첨단 사이언스·교육 허브 개발(EDISON) 구조동역학 경진대회

vehicle using CFRP, The Korean Society of Mechanical Engineers Autumn Conference , The Korean Society of Mechanical Engineers, pp.2175~2179.

Yonhapnews (2015)

<http://www.yonhapnews.co.kr/local/0899000000.html?cid=MYH20150918013600038&from=search> (accessed Feb., 25, 2016)