

이산설계변수를 고려한 복합재 로터블레이드 단면 최적설계

원유진* · 이수용**

Optimal Design of Composite Rotor Blade Cross-Section using Discrete Design variable

You-Jin Won* · Soo-Yong Lee**

ABSTRACT

In this paper, optimal design of composite rotor blade cross-section to consider manufacturability was performed. Skin thickness, torsion box thickness and skin lay-up angle were adopted as discrete design variables and The position and width of a torsion box were considered as continuous variables. An object function of optimal design is to minimize the mass of a rotor blade, and various constraints such as failure index, center mass, shear center, natural frequency and blade minimum mass per unit length were adopted. Finally, design variables such as the thickness and lay-up angles of a skin, and the thickness, position and width of a torsion box were determined by using an in-house program developed for the optimal design of rotor blade cross-section.

Key Words : Optimal Design, Rotor Blade, VABS, Genetic Algorithm, Auto-Mesh Generation, Design Variable

기 호 설 명

\bar{X}	: 질량중심 [mm]
\bar{S}	: 전단중심 [mm]
$\bar{\omega}$: 회전각속도 [rad/s]
\bar{M}	: 단위길이당 최소질량 [kg/mm]

1. 서 론

로터 블레이드 최적설계는 2가지 단계로 계층적 구분(hierarchical decomposition)이 된다. 이것은 로터 블레이드 최적설계 문제를 상위수준의 최적화 문제(upper level optimal problem)와 하위수준의 최적화 문제(lower level optimal problem)로 구분하는 것이다 [1-2][5]. 로터 블레이드 상위수준의 최적문제는 주로 블레이드의 공력소음과 진동의 저감 그리고 공탄성 등의 성능을 향상시키기 위한 것으로 로터 블레이드의 공탄성 및 공력소음 거동에

†2014년 2월 13일 접수 ~ 2014년 3월 17일 심사완료

* 정희원, 한국항공우주연구원 한국형발사체사업단 /한국항공대학교 대학원

** 정희원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
연락처, E-mail: wonyj@kari.re.kr

대한 최적화가 수행된다. 블레이드 하위수준의 최적화 문제는 로터 블레이드 단면 내부 형상에 대한 최적화 문제로 상위수준 최적문제를 통해서 결정된 목표 강성(target stiffness), 공력 중심 위치 대비 질량중심과 전단중심의 위치 제한 등을 만족시키기 위해 블레이드 단면 내부형상의 배치, 적층, 재료 분포 등에 대한 최적설계가 주로 수행된다[5].

로터 블레이드 개발 초기단계에서는 블레이드 단면 구조 설계를 위한 사이징(sizing) 업무가 수행되는데 이는 주로 유한요소해석을 기반으로 제작성을 고려해 블레이드 단면의 주요 구성요소인 스킨, 토션박스, 스파 등과 같은 주요 부재에 대한 두께, 위치, 폭, 복합재 적층각 등의 주요 설계변수를 결정하게 된다. 블레이드 경량화를 위해서는 최적화된 설계변수 결정이 필요하며 이는 블레이드에 대한 반복적인 설계/해석을 요구한다.

본 논문에서는 최적화를 통해 얻어진 설계변수의 제작성을 고려하기 위하여 주요 설계변수에 대하여 이산설계변수 개념을 도입하여 복합재 로터 블레이드 단면 최적화를 수행하였다.

2 본 론

2.1 단면 최적설계 통합 프로그램 구성

블레이드 단면 최적설계를 위해서는 반복적인 유한요소 해석이 수행되므로 유한요소 모델을 자동으로 반복 생성해야 한다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 1과 같이 블레이드 단면의 외부 형상 데이터(profile)와 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 통해 얻어진 설계변수를 입력하면 자동으로 단면의 절점 및 요소 생성이 가능하도록 자동격자생성 프로그램을 작성하였다.

VABS(variational asymptotic beam section analysis)는 로터 블레이드와 같이 세장비가 크며 이방성 재질의 빔 단면 구조해석을 위한 2차원 유한요소해석 도구로 1979년 Berdichevsky에 의해 처음 소개된 변분근사법(variational

asymptotic analysis, VAM)에 수학적 기반을 갖는다. VABS는 복합재 빔과 같은 3차원 비선형 탄성문제를 2차원 선형 단면 해석 문제와 1차원 비선형 빔 문제로 분리시켜 해석을 수행하여 3차원 빔 해석과 같은 수준의 정확성을 갖는 결과를 제공한다[1-6].

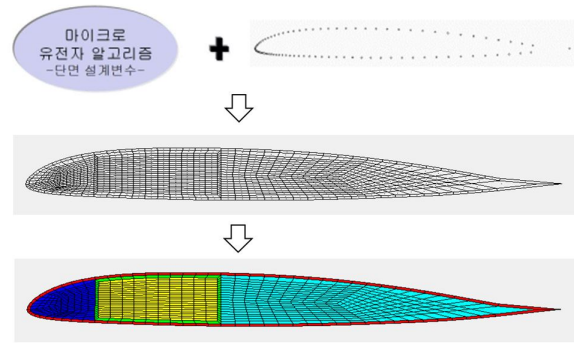


Fig. 1 Auto-Mesh Generation Process

2차원 단면해석을 통해 단면에 대한 질량중심, 중립축, 강성행렬 및 와핑함수(warping function) 등의 빔 단면 정보를 계산한다. 전단 변형을 고려하는 티모션코 빔 모델을 이용하면 Eq. (1)과 같이 단면해석으로 얻은 강성행렬 $[S]$ 와 주어진 설계하중을 이용해 6개 성분의 일차원 변형률이 구해진다. 유한요소법 적용을 위해 Eq. 2와 같이 단면을 이산화하여 임의의 단면형상과 이방성 재질을 갖는 일반적인 문제에 대한 와핑함수를 구할 수 있다[3-6].

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} & S_{56} \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & S_{46} & S_{56} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{11} \\ 2\gamma_{12} \\ 2\gamma_{13} \\ \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_3 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$w(x_1, x_2, x_3) = S(x_2, x_3) V(x_1) \quad (2)$$

단면의 3차원 변형에너지 최소화 식을 통해 계산된 단면 와핑변위(w)는 일차원 변형률과 함께 Eq. 3에 대입하여 임의의 빔 길이(x_1)를 갖는

단면(x_2, x_3)에서 3차원 변형률을 계산할 수 있다. $\Gamma_a, \Gamma_e, \Gamma_R, \Gamma_l$ 은 단면좌표(x_2, x_3)로 이루어진 함수연산자로 Eq. 3으로 구해진 3차원 변형률(Γ)을 응력-변형률 식에 대입하여 응력을 계산할 수 있다. VABS의 일반적인 3차원 변형률 계산 관계식을 Eq. (3), (4)에 나타내었다.

$$\Gamma = \Gamma_a w + \Gamma_e \bar{\epsilon} + \Gamma_R w + \Gamma_l w' \quad (3)$$

$$\Gamma = [\Gamma_{11} \ 2\Gamma_{12} \ 2\Gamma_{13} \ \Gamma_{22} \ 2\Gamma_{23} \ \Gamma_{33}]^T \quad (4)$$

블레이드 단면 설계변수들의 최적설계점을 탐색하기 위한 최적설계 도구로 마이크로 유전자 알고리즘을 사용한다.

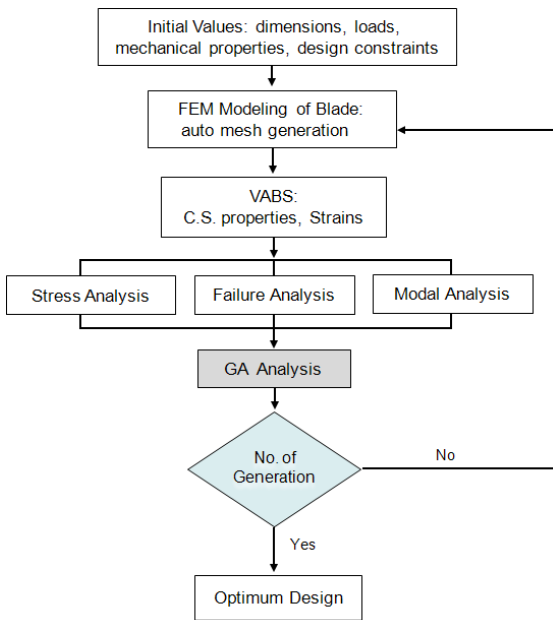


Fig. 2 Working flow of optimal design program

본 연구를 통해 작성된 블레이드 단면 최적설계 통합 프로그램의 흐름도는 Fig. 2와 같다.

22 블레이드 단면 최적화

로터 블레이드 단면 최적화는 블레이드 임의 위치(x_1, x_2, x_3)에서 주어진 설계하중 및 경계조건을 만족시키는 블레이드 최적 단면을 설계하

는 것으로 이를 통해서 얻어진 블레이드 단면 설계변수값은 이후 단계에서 수행되는 블레이드 상세설계를 위한 설계기초 입력자료로 활용될 수 있다.

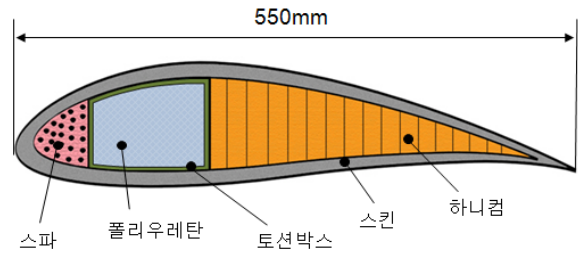


Fig. 3 Composition of rotor blade cross-section

본 연구에서 고려하는 로터 블레이드 단면 형상은 Fig. 3과 같이 코드 길이는 550mm이며 스파, 토션박스, 토션박스 내부를 채우는 폼, 하니컴 그리고 스킨의 단순화된 단면 형상을 갖는다고 가정한다. 설계변수는 스킨두께(t_1), 토션박스 두께(t_2)/위치(t_3)/폭(t_4) 그리고 스킨적층각(t_5)으로 설정된다. 스킨과 토션박스의 두께(t_1, t_2)는 블레이드 단면 전체에 걸쳐 균일하다고 가정한다. 복합재료의 기계적 물성치는 적층된 복합재를 등가 물성을 갖는 하나의 재료로 가정하는 smeared properties 기법을 이용하여 유한요소의 수를 줄임으로서 최적화에 따른 반복적인 유한요소해석 시간을 크게 감소시킨다.

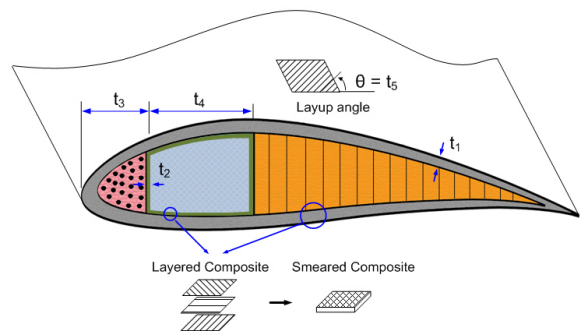


Fig. 4. Design variables

스킨과 토션박스는 평직 탄소섬유직물(plain

woven carbon fabric)이 적용되며, 제작성을 고려하기 위해 스킨과 토션박스 두께는 이산설계 변수인 적층수 즉 층(ply)의 개수가 고려된다. 스킨적층각은 특정한 이산화된 적층각들 중에서 최적화된 적층각을 찾도록 설정한다. 토션박스의 적층각은 45도로 고정하며, 스파는 0도 UD R-Glass로 설정한다. 층(ply) 1개의 두께는 0.25mm로 설정한다. 초기 설계변수는 임의 값으로 Eq. (5)와 같이 설정한다.

$$t_1 = 3\text{ mm}, t_2 = 3.5\text{ mm}, t_3 = 80\text{ mm} \quad (5)$$

$$t_4 = 120\text{ mm}, t_5 = 0\text{ deg.}$$

블레이드 파손 판별은 식 Eq. (6)과 같이 Tsai-Wu 파손이론이 적용된다.

$$F_{ij}\sigma_i\sigma_j + F_i\sigma_i < 1 \quad (6)$$

Table 1. Object, design variables, constraints

구분	값, 범위	
목적함수	블레이드 질량 (kg)	
설계 변수 범위	스킨두께	1 ply < t ₁ < 12 plies
	토션박스 두께	1 ply < t ₂ < 14 plies
	토션박스 위치	50 mm < t ₃ < 100 mm
	토션박스 폭	80 mm < t ₄ < 200 mm
	스킨적층각(t ₅)	0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 45°, 50°, 60°, 70°, 80°, 90°
구속 조건	Failure index	FI _i < 1, i = 1 ~ 5
	질량중심 하한	(0.95 × chord/4) mm < X̄
	질량중심 상한	X̄ < (1.05 × chord/4) mm
	전단중심 하한	(0.95 × chord/4) mm < S̄
	전단중심 상한	S̄ < (1.05 × chord/4) mm
	1차 고유진동수 상한	ω̄ ₁ < (0.95 × ω _n) rpm
	2차 고유진동수 하한	ω̄ ₂ > (1.05 × ω _n) rpm
	블레이드 최소질량	0.01 kg/mm < M̄

Table 1은 목적함수와 설계변수의 범위 그리고 블레이드 단면 설계 시 고려해야하는 다양한 구속조건을 정의한다.

설계하중은 헬리콥터 비행중에 로터 블레이드 단면들에서 발생하는 최대하중으로 정의된다. 블레이드 각 단면에서 발생하는 6개 하중성분 중에서 각 방향의 최대하중을 분류(sorting)하여 각 방향의 최대하중이 동시에 블레이드 단면에 작용한다는 가정한다. 본 연구에서 블레이드 단면에 적용되는 설계하중은 Table 2와 같다.

Table 2. Design load of rotor blade cross-section

구분	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
값	350 kN	-7.5 kN	50 kN	5 kN-m	-5.5 kN-m	-20 kN-m

블레이드 단면을 구성하는 구성품의 기계적 물성값은 Table 3과 같으며, 복합재 파손판정을 위한 기계적 강도는 Table 4와 같다.

Table 3. Mechanical properties

구분	스킨/ 토션박스	스파	폼	하니컴
재질	Carbon Fabric	UD R-Glass	폴리 우레탄	Hexel HRH-10-3/16-1.5
밀도 × 10 ³	1.54 kg/m ³	2.0 kg/m ³	0.052 kg/m ³	0.024 kg/m ³
E ₁₁	65.1 GPa	56 GPa	20 MPa	1.0 MPa
E ₂₂	65.1 GPa	16 GPa	20 MPa	1.0 MPa
E ₃₃	10.8 GPa	16 GPa	20 MPa	41.3 MPa
G ₁₂	4.74 GPa	3.5 GPa	7.7 MPa	20.7 MPa
G ₁₃	4.74 GPa	3.5 GPa	7.7 MPa	20.7 MPa
G ₂₃	3.38 GPa	4.1 GPa	7.7 MPa	20.7 MPa
ν ₁₂	0.04	0.27	0.3	0.3
ν ₁₃	0.04	0.27	0.3	0.3
ν ₂₃	0.3	0.4	0.3	0.3

Table 4. Mechanical strength (MPa)

구분	스킨/ 토션박스	스파	폼	하니컴
재질	Carbon Fabric	UD R-Glass	폴리우레탄	Hexel HRH-10-3/16-1.5
Xt	680.7	1560	1	0.1
Xc	562.5	1300	1	0.1
Yt	680.7	55	1	0.1
Yc	562.5	214	1	0.1
Zt	50	55	1	0.654
Zc	250	214	1	0.654
S_{xy}	111.6	67	0.5	0.448
S_{xz}	111.6	67	0.5	0.448
S_{yz}	50	50	0.5	0.448

23 해석 경우의 수

복합재 로터 블레이드 단면 최적화 설계를 위한 해석 경우의 수는 Table 5와 같다.

Table 5. Analytic cases

구분	Case 0	Case 1
최적화 여부	미적용	적용
설계변수 개수	초기 입력 설계변수	5개 (t_1, t_2, t_3, t_4, t_5)
개체수	-	10
세대수	-	500
파라미터	-	Pc = 0.5, Micro-GA

24 해석 결과

Equation (5)의 임의 초기 설계변수값이 적용된 Case 0의 블레이드 질량은 약 94kg으로 단면 최적화가 적용된 Case 1은 Case 0 대비 약 25% 정도 블레이드 질량이 감소하였다. 이산설계변수가 적용된 스킨 두께와 토션박스 두께는 각

각 7 층(plies)과 9 층(plies)으로 이는 1.75 mm와 2.25 mm의 두께에 해당한다. 스킨적층각은 40도의 이산화된 적층각도를 나타낸다.

Table 6. Analytic results (kg, mm)

구분	Case 0	Case 1
총질량	94.13	71.0
스킨 두께	3.0	1.75 (7 plies)
토션박스 두께	3.5	2.25 (9 plies)
토션박스 위치	80	65.69
토션박스 폭	120	175.72
스킨 적층각	-	40°

Table 7은 각 해석 경우에 대한 무차원 구속조건 결과를 나타낸다. Case 1은 12개의 구속조건 모두를 만족시키며 최적화된 블레이드 단면을 나타냄을 Table 6과 7을 통해 알 수 있다.

Table 7. Non-dimensional constraints Results

구속조건		Case 0	Case 1	
파손 지수	스킨	G(1)	-0.831	-0.047
	토션박스	G(2)	-0.560	-0.058
	스파	G(3)	-0.926	-0.854
	폼	G(4)	-0.989	-0.972
	하니컴	G(5)	1.602	-0.730
질량중심 하한		G(6)	-0.143	-0.065
질량중심 상한		G(7)	0.056	-0.033
1차 고유진동수 상한		G(8)	-0.412	-0.360
2차 고유진동수 하한		G(9)	-0.040	-0.040
단위 길이당 최소질량		G(10)	-0.246	-0.19E-4
전단중심 하한		G(11)	-0.228	-0.020
전단중심 상한		G(12)	0.172	-0.077

Figure 5는 Case 1의 세대수 증가에 따른 블

레이드 질량 변화이력을 나타낸다. 최적설계가 진행됨에 따라 로터 블레이드 질량이 약 200세대부터 71kg으로 수렴한다는 것을 알 수 있다. Figure 6 ~ 7은 블레이드 단면 설계변수 중에서 대표적으로 세대수 진행에 따른 스킨 두께와 토션박스 위치의 변화 이력으로 블레이드 질량 변화이력과 매우 유사한 경향을 보여준다.

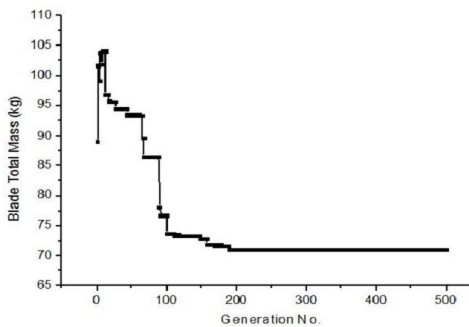


Fig. 5. Generation no. vs. blade total mass

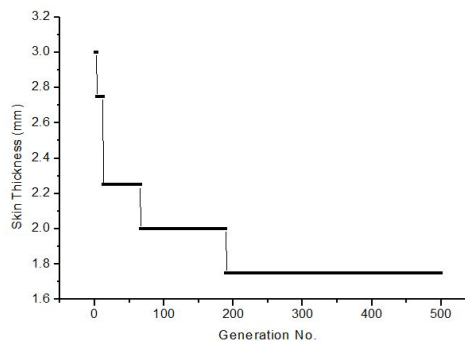


Fig. 6. Generation no. vs. Skin thickness

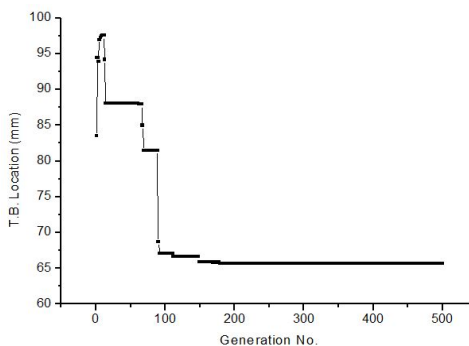


Fig. 7. Generation no. vs. T.B. Location

3. 결 론

본 논문에서는 제작성을 고려하기 위해 이산 설계변수가 반영된 복합재 로터 블레이드 최적 설계 프로그램을 작성하여 블레이드 질량을 최소화하며 동시에 다양한 구속조건을 모두 만족시키는 블레이드 단면 설계변수들을 얻었다. 이를 통해서 자동격자생성 프로그램, VABS 그리고 유전자 알고리즘이 통합된 내부 최적설계 프로그램이 로터 블레이드 단면 초기설계 단계에서 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Dewey H. Hodges, "Nonlinear Composite Beam Theory", AIAA, 2006
- [2] Wenbin Yu, Vitali V. Volovoi, Dewey H. Hodges, Xianyu Hong, "Validation of The Variational Asymptotic Beam Sectional Analysis (VABS)", AIAA, Journal Vol. 40, pp. 2105~2113, No. 10, Oct. 2002.
- [3] 원유진, 이수용, "유전자 알고리즘을 이용한 복합재 로터 블레이드 단면 구조 최적설계방법에 관한 연구", 한국항공우주학회지, 제 41권, 제 4호, 2013, pp. 275~283.
- [4] 원유진, 이수용, "복합재 로터 블레이드 단면 이산최적설계", 한국항공우주학회지, 제 21권, 제 2호, 2013, pp. 7~14.
- [5] 원유진, 이수용, "제작성을 고려한 복합재 로터 블레이드 단면 이산최적설계, 한국항공우주학회 2013 추계학술대회, 2013.
- [6] 원유진, 정의승, 이수용, "싱글 토션박스를 갖는 복합재 로터 블레이드 단면 최적설계, 항공우주시스템공학회 2013 춘계학술대회, 2013.