

## 論文

## 복합재 로터 블레이드 단면 이산최적설계

원유진\*, 이수용\*\*

## Discrete Optimal Design of Composite Rotor Blade Cross-Section

You-Jin Won\*, Soo-Yong Lee\*\*

## ABSTRACT

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

**Key Words** : Rotor Blade(로터 블레이드), VABS(Variational Asymptotic Beam Sectional Analysis), Optimum Design(최적설계), Genetic Algorithm(유전자 알고리즘), Auto-mesh Generation(자동격자 생성)

## 1. 서 론

최근 국내에서는 수리온 헬기 시제기가 납품되어 운영되고 있으며 민수헬기 개발 관련 논의가 활발히 이루어지고 있다. 로터 블레이드는 헬리콥터의 핵심 구성품으로 구조적으로 회전에 의한 원심력과 양력을 감당하며 플래핑, 페더링 및 리드-래그 움직임을 통해 양력 불균형 및 블레이드 하중을 완화한다[1]. 따라서 다양한 형태의 첨단 복합재 및 설계/제작기법의 적용을 통해 블레이드의 경량화, 고강도 그리고 일체형 성형과 같은 제작성을 만족시킨다[3].

로터 블레이드 단면 설계 관련 문헌을 살펴보면 Park[2] 등은 로터 블레이드의 최적설계를 수행하였는데 적층각과 적층두께를 설계변수로 하며 다양한 구속조건을 적용하여 최소의 무게를 갖는 블레이드를 갖도록 하였으나, 블레이드 단면은 스파 형상만을 반영한 복합재 박스의 단순 형상을 적용하였다[3]. Won[3] 등은 로터 블레이드 단면의 구조 형상을 나타내는 주요 설계치수에 대하여 연속변수(continuous variables) 개념을 고려하여 자동격자 생성 프로그램, 유전자 알고리즘 그리고 VABS를 통합한 내부 최적설계 프로그램(in-house optimum design program)을 이용하여 로터 블레이드 단면 구조 최적 설계를 수행하였다. 그러나 최적화된 설계변수가 소수 값을 포함하며 특히 적층각도의 경우에는 복합재료 성형/제작 측면에서 일반적으로 적용되지 않는 적층각도를 포함하고 있어 제작성 측면에 대한 추가 검토가 요청된다. 또한 최적화된 단면 형상을 갖는 로터 블레이드에 대한 주파수 분석이

2013년 05월 02일 접수 ~ 2013년 06월 21일 심사완료  
논문심사일 (2013.05.03, 1차), (2013.06.12, 2차)

\* 한국항공우주연구원 한국형발사체개발사업단  
/한국항공대학교 대학원

\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부  
연락처, E-mail : wonyj@kari.re.kr  
대전광역시 유성구 과학로 169-84(어은동 45)

수행되어 로터 블레이드 운용 회전수와 함께 고려되어야 한다.

본 논문에서는 won[3] 등에 의해 수행된 로터 블레이드 최적설계 프로그램을 바탕으로 로터 블레이드 단면 구조 형상을 나타내는 주요 설계변수 중에서 스킨 두께, 토션박스 두께에 대하여 연속변수 형태의 두께 대신에 적층수의 개념을 도입한 이산설계변수를 적용하였다. 스킨 적층각의 경우에도 특정한 몇 개의 이산화된 적층각도 내에서 최적화된 스킨 적층각을 찾는 방식을 적용하였다. 토션박스 위치, 토션박스 폭과 같은 설계변수는 기존과 같은 연속변수를 적용하였다. 또한 로터 블레이드 모달해석을 수행하여 고유진동수 관련 구속조건을 최적설계에 반영하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 자동격자 생성

VABS를 이용한 반복적인 블레이드 단면 유한요소해석을 위해서는 유전자 알고리즘을 통해 생성된 설계변수를 반영한 블레이드 단면 유한요소 모델이 자동으로 반복 생성되어야 한다[3]. 따라서 본 연구에서는 관련 문헌 [1], [3]과 같이 블레이드 단면 외부 형상 데이터 및 초기 설계변수를 사용자가 입력하면 자동으로 절점(node) 및 요소(element)를 생성하는 자동격자 생성 프로그램을 작성하였다.

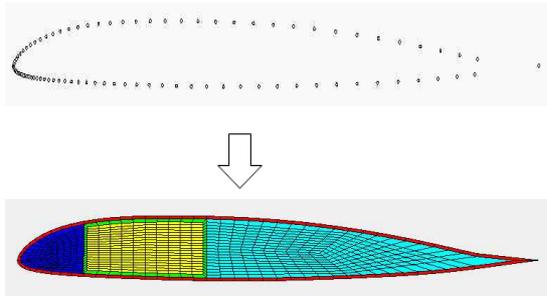


Fig. 1. 자동격자 생성 절차

### 2.2 VABS

로터 블레이드는 빔과 같이 가로세로비(aspect ratio)가 크며 이방성 성질을 갖는 복합재료를 이용한 제작방식이 주를 이룬다. 본 연구에서는 로

터 블레이드 단면 구조해석을 위해 이방성 재질의 빔 단면 유한요소해석 프로그램인 VABS를 사용한다. VABS는 3차원 비선형 빔 문제를 2차원 단면해석 문제와 1차원 비선형 빔 해석문제로 분리시켜 해석을 수행하여 3차원 빔 해석과 같은 수준의 결과를 얻는다[1][3]. 2차원 단면해석을 통해 단면에 대한 질량중심(center mass), 중립축(neutral axis), 강성행렬(stiffness matrix) 및 와핑함수(warping function) 등의 빔 단면 정보를 계산한다. 단면의 전단변형을 고려하는 티모션코 빔 모델(Timoshenko-like beam model)의 경우에는 2차원 단면해석으로 계산된 강성행렬과 주어 진 설계하중을 (1) 식에 대입하여  $\gamma_{11}, 2\gamma_{12}, 2\gamma_{13}, \kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ 로 이루어진 6개 성분의 일반화된 일차원 변형률(1D generalized strains)이 구해진다[3]. 와핑함수는 식 (2)와 같이 형상함수와 절점변위의 조합으로 나타낸다[3-8].

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

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

단면의 3차원 변형에너지 최소화 식을 통해 계산된 단면 와핑변위( $w$ )는 일반화된 일차원 변형률과 함께 (3)식에 대입함으로써, 임의의 빔 길이( $x_1$ )를 갖는 단면( $x_2, x_3$ )에서 3차원 변형률을 계산할 수 있다[3-5]. VABS의 일반적인 3차원 변형률 계산 관계식을 식 (3), (4)에 나타내었다[4-8].

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

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

$\Gamma_a, \Gamma_e, \Gamma_R, \Gamma_l$ 은 단면좌표( $x_2, x_3$ ) 변수로 이루어진 함수연산자(Functional operator)에 해당하며 식 (3)을 통해 구해진 3차원 변형률( $\Gamma$ )를 응력-변형률 관계식에 대입하여 최종적으로 임의의 빔 길이( $x_1$ )를 갖는 특정 단면 위치( $x_2, x_3$ )에서 응력을 계산할 수 있다[3-8]. Fig. 2는 전체적인 VABS의 해석흐름을 보여준다.

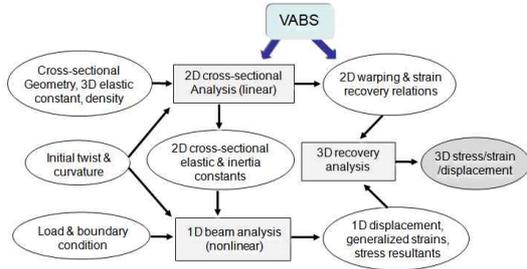


Fig. 2. VABS 해석 흐름

### 2.3 유전자 알고리즘

자연계 진화과정을 인공적으로 모델링한 알고리즘이 유전자 알고리즘으로 선택, 교차, 변이의 유전연산(Genetic operation)을 통해 다음 세대로 진화한다[9]. 본 연구에서 사용한 유전자 알고리즘은 개체 선택(selection)의 방법으로 토너먼트(tournament) 방식을 적용한다. 토너먼트 선택방식은 개체군에서 일정한 수의 개체를 임의 선택 후 개체 간 적합도(fitness) 비교를 통해 최고의 적합도를 갖는 개체를 다음 세대에 전달해주는 방법이다[3]. 교차확률( $P_c$ )은 0.5를 사용하며, 변이(mutation) 과정을 대신하여 Micro-GA 방법을 사용한다[10].

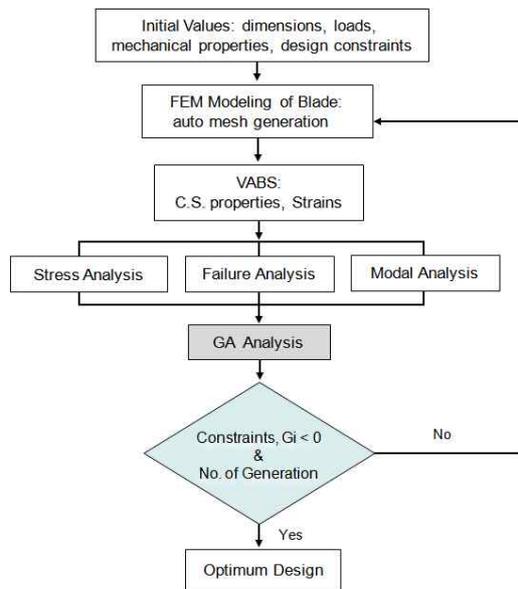


Fig. 3. 로터 블레이드 최적설계 흐름도

유전자 알고리즘을 이용해 로터 블레이드 단면 설계변수들의 임의 탐색을 수행하여 블레이드

질량을 최소화하며 제시된 구속조건들을 만족시키는 최적화된 설계변수를 구한다[3].

본 연구에서는 로터 블레이드 단면 구조 최적설계를 위해 자동격자 생성 프로그램, 유전자 알고리즘 그리고 VABS를 통합한 내부 최적설계 프로그램을 작성하였으며, 최적설계 프로그램의 흐름도는 Fig. 3과 같다.

## 3. 최적설계 및 결과 검토

### 3.1 블레이드 형상

본 연구에서 고려하는 로터 블레이드 형상은 회전중심에서 블레이드 끝단까지 총길이는 7,900mm이며 스펜 방향의 주요 구성품 및 치수는 Fig. 4와 같다.

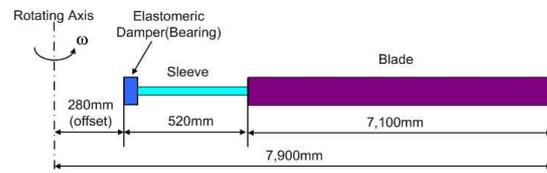


Fig. 4. 로터 블레이드 제원

최적화 대상인 로터 블레이드 단면 형상은 Fig. 5와 같이 코드 길이(chord length)는 550mm이며 스파, 토션박스, 토션박스 내부를 채우는 폼(foam), 하니컴(honeycomb) 그리고 스킨의 단순화된 단면 형상을 갖는다고 가정한다.

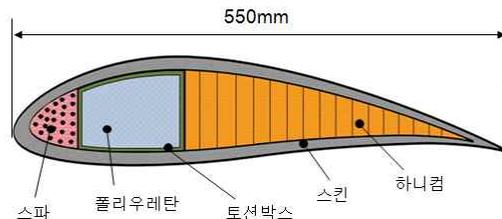


Fig. 5. 로터 블레이드 단면 구성

### 3.2 재료물성치 및 설계하중

블레이드 단면을 구성하는 구성품의 기계적 물성값은 Table 1과 같으며, 복합재 파손판정을 위한 기계적 강도는 Table 2와 같다.

Table 1. 기계적 물성치

구분	스킨/ 토션박스	스파	폼	하니컴
재질	Carbon Fabric	UD R-Glass	폴리우레탄	Hexel HRH-10-3 /16-1.5
밀도 $\times 10^3$	1.54 $\text{kg/m}^3$	2.0 $\text{kg/m}^3$	0.052 $\text{kg/m}^3$	0.024 $\text{kg/m}^3$
$E_{11}$	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
$\nu_{12}$	0.04	0.27	0.3	0.3
$\nu_{13}$	0.04	0.27	0.3	0.3
$\nu_{23}$	0.3	0.4	0.3	0.3

Table 2. 기계적 강도 (MPa)

구분	스킨/ 토션박스	스파	폼	하니컴
재질	Carbon Fabric	UD R-Glass	폴리우레탄	Hexel HRH-10-3 /16-1.5
$X_t$	680.7	1560	1	0.1
$X_c$	562.5	1300	1	0.1
$Y_t$	680.7	55	1	0.1
$Y_c$	562.5	214	1	0.1
$Z_t$	50	55	1	0.654
$Z_c$	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

Table 3은 로터 블레이드 임의 길이( $x_1$ )에서 블레이드 단면에 작용하는 설계하중(design load)의 예를 나타내며, 설계하중은 헬리콥터 비행 중 로터 블레이드 단면에서 발생하는 최대하중으로 정의되며 설계하중에 대한 부호 규약은 Fig. 6과 같다.

Table 3. 설계하중

구분	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
값	350 kN	-7.5 kN	50 kN	5 kN-m	-5.5 kN-m	-20 kN-m

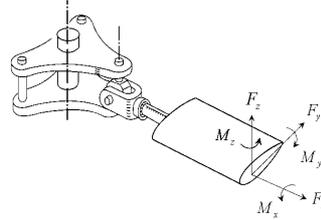


Fig. 6. 하중 부호 규약

### 3.3 단면 최적화

로터 블레이드 단면 최적화는 블레이드 임의 위치( $x_1, x_2, x_3$ )에서 주어진 설계하중(design load) 및 경계조건(boundary condition)을 만족시키는 블레이드 최적 단면을 설계하는 것으로 이를 통해서 얻어진 블레이드 단면 설계치수는 이후 단계에서 수행되는 로터 블레이드 상세설계를 위한 설계기초 입력자료로 활용될 수 있다[3].

Figure 7과 같이 스킨두께( $t_1$ ), 토션박스 두께( $t_2$ )/위치( $t_3$ )/폭( $t_4$ ) 그리고 스킨적층각( $t_5$ )이 블레이드 단면 설계변수로 설정된다. 스킨과 토션박스의 두께( $t_1, t_2$ )는 블레이드 단면 전체에 걸쳐 균일하다고 가정한다[3].

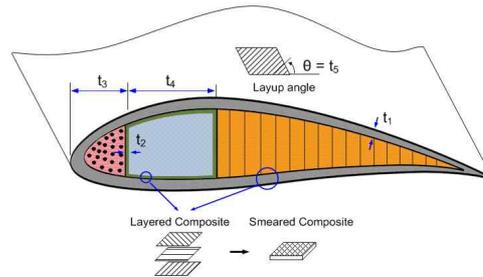


Fig. 7. 로터 블레이드 단면 설계변수

스킨과 토션박스는 평직 탄소섬유직물(plain woven carbon fabric)로 제작되며, 스킨과 토션박스 두께는 이산설계변수로서 적층수 즉 층(ply)의 개수를 고려한다. 스킨적층각은  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 의 이산화된 적층각 중에서 최적화된 적층각을 찾도록 설정한다. 토션박스의 적층각은  $45^\circ$ 로 고정하며, 스파는  $0^\circ$  UD R-Glass

로 설정한다. 층(ply) 1개의 두께는 0.25mm로 설정한다.

Table 4. 목적함수, 설계변수, 구속조건 정의

구분		값, 범위
목적함수		블레이드 질량 (kg)
설계변수 범위	스킨두께	$1\text{ply} < t_1 < 12\text{plies}$
	토션박스 두께	$1\text{ply} < t_2 < 14\text{plies}$
	토션박스 위치	$50\text{mm} < t_3 < 100\text{mm}$
	토션박스 폭	$80\text{mm} < t_4 < 200\text{mm}$
	스킨적층각	$t_5; 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$
구속조건	Failure index	$FI_i < 1, i = 1 \sim 5$
	질량중심 하한	$(0.9 \times \text{chord}/4)\text{mm} < \bar{X}$
	질량중심 상한	$\bar{X} < (1.1 \times \text{chord}/4)\text{mm}$
	1차 고유진동수 상한	$\bar{\omega}_1 < (0.95 \times \omega_n)\text{rpm}$
	2차 고유진동수 하한	$\bar{\omega}_2 > (1.05 \times \omega_n)\text{rpm}$
	블레이드 최소질량	$0.01\text{kg/mm} < \bar{M}$

VABS를 이용한 블레이드 단면 유한요소해석에서는 요소 내 적층된 복합재를 등가 강성을 갖는 하나의 재료로 가정하는 smeared properties 기법을 이용해 계산한다. 따라서 요소 수의 감소는 최적화에 따른 반복적인 유한요소해석에 필요한 계산시간의 감소를 가져온다[3].

초기 블레이드 단면 형상에 적용되는 사용자 입력 설계변수는 임의 값으로 식 (5)와 같이 설정한다[3].

$$t_1 = 3\text{mm}, t_2 = 3.5\text{mm}, t_3 = 70\text{mm} \quad (5)$$

$$t_4 = 130\text{mm}, t_5 = 0\text{deg}.$$

로터 블레이드 단면 최적설계를 위한 목적함수, 설계변수 그리고 구속조건에 대한 정의를 Table 4에 나타내었다. 먼저 블레이드 최소질량이 목적함수로 정의되며, 응력 파손지수(failure index), 질량중심(center mass), 고유진동수(natural frequency) 그리고 단위 길이당 블레이드 최소질량을 구속조건으로 설정한다.

Smeared properties 기법으로 계산된 등가강성을 이용해 VABS는 요소의 변형률을 계산하며, 요소 내 각 층(ply)별 적층각을 고려해 단면의

요소별 응력을 계산함으로써 복합재 파손을 최종 판별한다[3]. 블레이드 파손 판별은 식 (6)과 같이 Tsai-Wu 파손이론이 적용된다[3].

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

최적설계를 통해 계산된 블레이드 단면적과 슬리브(leeve)를 포함한 블레이드 스패 전체길이를 고려해 블레이드 질량행렬을 구성하며, 블레이드 회전에 의한 원심력이 고려된 블레이드 강성행렬을 이용하여 최종적으로 블레이드 유한요소 모델을 생성 후 모달해석을 수행한다. 모달해석을 통해 계산된 고유진동수중에서 1차 고유진동수( $\bar{\omega}_1$ )와 2차 고유진동수( $\bar{\omega}_2$ )가 로터 블레이드 운용 회전수( $\omega_n$ )인 300 rpm을 피하도록 구속조건을 반영하였다. 모달해석을 위한 단순화된 로터 블레이드 구성은 Fig. 4와 같다.

### 3.4 최적설계 Case

자동격자 생성 프로그램, 유전자 알고리즘 그리고 VABS를 통합한 내부(in-house) 최적설계 프로그램을 작성 후 Table 5의 각 경우(case)에 대한 최적설계를 수행하였다.

Table 5. 최적설계 Case

구분		Case 0	Case 1	Case 2
설계변수 개수		사용자 입력값	5개 ( $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ )	
형식	이산	-	-	$t_1, t_2, t_5$
	연속	-	$t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$	$t_3, t_4$
개체수		-	10	
세대수		-	1,000	
파라미터		-	Pc = 0.5, Micro-GA	

Case 0는 식 (5)와 같이 사용자 입력값을 이용한 해석으로 최적설계는 미 수행된다. Case 2는 스킨과 토션박스 두께 그리고 스킨적층각을 이산 설계변수로 고려한 최적설계로 토션박스 위치/폭은 연속변수가 적용된다. Case 1은 5개의 설계변수가 연속변수로 적용된 최적설계이며 Case 2와 결과 비교를 위해 반영되었다.

### 3.5 해석 결과

Table 5에 제시된 각 해석 경우에 대한 최적

설계 결과를 Table 6에 정리하였다.

**Table 6. 최적설계 결과 (kg, mm)**

구분	Case 0	Case 1	Case 2
총질량	87.8	71.0	73.06
스킨 두께	3.0	2.17	2.5 (10 plies)
토션박스 두께	3.5	1.7	0.75 (3 plies)
토션박스 위치	70	66.47	72.3
토션박스 폭	130	134.6	80.0
스킨 적층각	-	43.1°	45°

최적설계 결과 Case 2의 블레이드 총질량은 약 73kg으로 이는 Case 0 대비 약 15kg의 블레이드 질량감소를 나타내며, Case 1에 비해서는 약 2kg 정도 더 무겁다는 것을 알 수 있다. 최종 수립된 설계변수를 살펴보면 Case 2의 스킨두께는 10 plies, 토션박스 두께는 3 plies로 이는 2.5mm와 0.75mm의 두께에 해당된다. 스킨 적층각의 경우는 45도이며 특히 토션박스 폭이 Case 0와 Case 1에 비해서 크기가 상당히 작음을 알 수 있다.

**Table 7. 최적설계 후 구속조건 결과**

구속조건		Case 0	Case 1	Case 2
파손 지수	스킨 G(1)	-0.820	-0.494	-0.004
	토션박스 G(2)	-0.522	-0.279	-0.044
	스파 G(3)	-0.923	-0.856	-0.870
	폭 G(4)	-0.988	-0.975	-0.978
	하니킵 G(5)	1.776	-0.754	-0.830
질량중심 하한	G(6)	-0.216	-0.150	-0.166
질량중심 상한	G(7)	0.043	-0.037	-0.019
1차 고유진동수 상한	G(8)	-0.389	-0.355	-0.360
2차 고유진동수 하한	G(9)	-0.043	-0.040	-0.039
단위 길이당 최소질량	G(10)	-0.191	-0.34 x 10 <sup>-5</sup>	-0.028

Table 7을 이용해 각 해석 경우의 수에 대한 최종 구속조건 결과를 살펴보면, 먼저 최적설계

가 미 적용된 Case 0는 일부 구속조건 결과가 0보다 큰 양의 값으로 이를 통해 구속조건이 위반됨을 알 수 있다. 특히 스킨과 토션박스의 파손 관련 구속조건인 G(1), G(2)가 Case 1과 Case 2에 비해 더 큰 음의 값을 나타내는데 이는 파손까지의 여유가 상대적으로 많다는 것을 나타내며 따라서 해당 Case 0에 대한 최적설계가 필요하다는 것을 알 수 있다. 최적설계가 수행된 Case 1과 Case 2는 구속조건 관련 모든 결과가 음의 값을 유지한 상태에서 0에 더 가깝게 접근하며 결과적으로 최적설계가 수행됨을 알 수 있다.

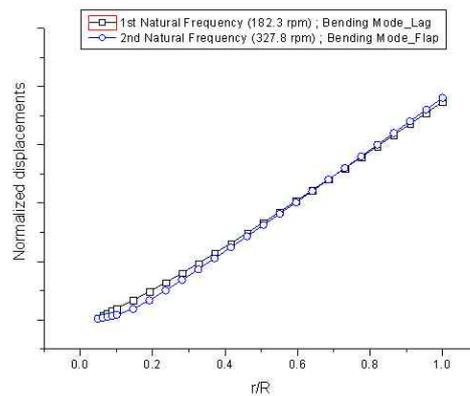


Fig. 8. Case 2 모드형상

Case 1의 단위 길이당 최소질량 관련 구속조건인 G(10)은 매우 작은 음의 값으로 거의 0에 해당하며 이를 통해서 블레이드 최소질량에 도달됨을 알 수 있다. 이산설계변수가 적용된 Case 2의 경우 단면 최적화를 통해 스킨과 토션박스 두께 관련 구속조건인 G(1)과 G(2)는 구속조건을 만족함과 동시에 거의 0에 근접함으로써 파손 직전 수준까지 최적화가 수행됨을 알 수 있다.

Case 1과 Case 2의 고유진동수 관련 구속조건 결과를 살펴보면 G(8), G(9)는 음의 값을 만족하며 이를 통해서 최적설계된 블레이드의 고유진동수가 헬리콥터 운용 회전수를 회피한다는 것을 알 수 있다. Figure 8에 Case 2의 1차 및 2차 고유진동수에 대한 모드형상을 나타내었다. 1차 고유진동수는 182.3rpm으로 래그방향 굽힘모드, 2차 고유진동수는 327.8rpm으로 플랩방향으로 굽힘 형상을 나타낸다.

최적설계가 수행된 Case 1과 Case 2에 대하여 세대수 증가에 따른 블레이드 총질량, 각 설계변수들의 변화이력을 Fig. 9 ~ Fig. 14에 걸쳐 나타내었다.

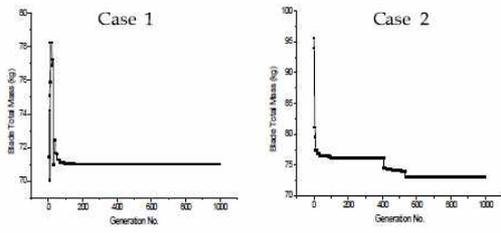


Fig. 9. 세대수 vs. 블레이드 질량

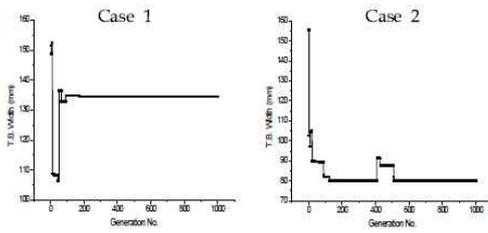


Fig. 13. 세대수 vs. 토션박스 폭

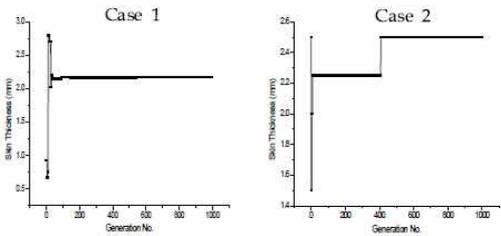


Fig. 10. 세대수 vs. 스킨두께 변화

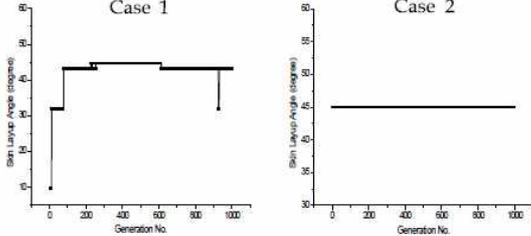


Fig. 14. 세대수 vs. 스킨적층각

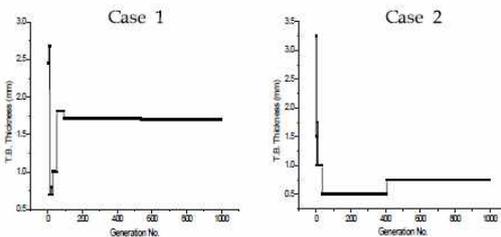


Fig. 11. 세대수 vs. 토션박스 두께

세대수에 따른 블레이드 총질량 변화를 살펴보면 Case 1은 약 100세대에서 약 71kg으로 수렴을 하며, Case 2는 500세대 이후부터 약 73kg으로 수렴함을 Fig. 9를 통해 알 수 있다. 이러한 블레이드 총질량 차이는 Case 2의 스킨두께와 토션박스 두께 그리고 스킨적층각의 이산 설계변수 적용에 의한 영향이라고 판단된다.

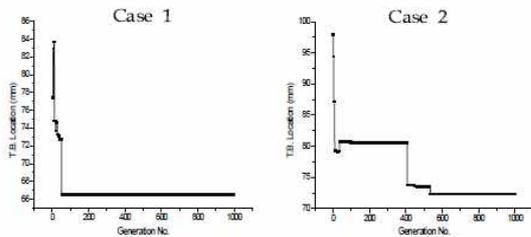


Fig. 12. 세대수 vs. 토션박스 위치

Figure 9 ~ 14를 통해 설계변수들의 수렴성을 전체적으로 살펴보면 Case 1은 모든 설계변수들이 약 100세대 부근에서 최종적으로 수렴된 값을 나타내며, Case 2는 약 500세대 부근부터 최종 수렴되는 경향을 보여준다. Case 1의 스킨적층각 설계변수 범위는  $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 가 적용되며, 최적설계에 의한 Case 1의 세대수에 따른 스킨적층각 변화 이력을 단순하게 표현한 것이 Fig. 14의 Case 2라고 할 수 있다. Case 2의 스킨적층각은  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  적층각 중에서 세대수 증가에 따라 해당 세대에서 가장 최적화된 스킨적층각을 찾는 것으로 세대수에 무관하게  $45^\circ$  적층각의 결과를 나타낸다.

로터 블레이드 단면 최적화에 있어 설계변수의 적용방식 즉 연속설계변수 또는 이산설계변수의 적용은 목적함수 및 설계변수 결과에 영향을 준다. 특히 연속설계변수를 적용하는 경우 목적함수인 블레이드 질량 최소화에서 유리하나 최종 수렴된 설계변수의 제작성 측면에 대한 추가 검토가 필요하다. 이산설계변수의 경우는 연속설계변수에서 사용하는 제작성이 고려되지 않는 이상적인 설계변수값의 적용이 사전에 제한되므로 블레이드 질량 최소화 측면에서는 연속설계변수보다는 블레이드 질량이 더 무거우나 그 질량 차이는 크지 않다는 것을 Table 6의 해석결과를 통해 알 수 있다.

Figure 15는 Case 1과 Case 2의 최종 수렴된

블레이드 단면 형상을 Case 0와 비교하여 나타낸다.

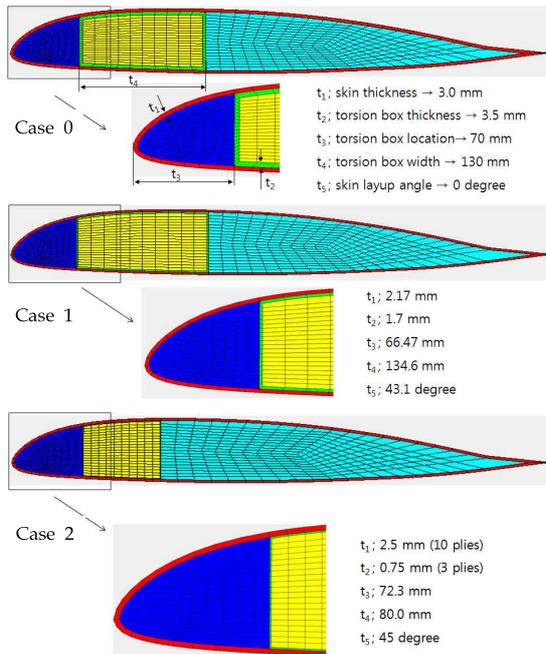


Fig. 15. 최적설계 단면 형상

연속설계변수가 적용된 Case 1은 스킨두께가 가장 얇으며 토션박스 크기는 Case 0보다 약간 증가한 형상을 나타낸다. 이산설계변수가 적용된 Case 2의 토션박스 두께는 매우 얇은 0.75mm 즉 3 plies이며 토션박스의 폭은 Case 0와 Case 1에 비해 매우 작은 크기를 나타낸다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 Won[3] 등에 의해 수행된 기존의 자동격자생성 프로그램, VABS 그리고 유전자 알고리즘을 통합한 복합재 로터 블레이드 단면 최적설계 프로그램을 기반으로 제작성을 고려한 이산설계변수 및 블레이드 모달해석을 반영한 복합재 로터 블레이드 단면 최적설계를 수행하였다. 본 연구를 통해서 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

이산설계변수 및 블레이드 모달해석이 고려된 복합재 로터 블레이드 최적설계 프로그램을 이용해 로터 블레이드 질량을 최소화하며 동시에 구속조건을 모두 만족시키는 블레이드 단면 설계변수들을 얻을 수 있었으며 이를 통해서 자동격자

생성 프로그램, VABS 그리고 유전자 알고리즘이 통합된 내부 최적설계 프로그램이 로터블레이드 단면 초기설계 단계에서 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

본 연구를 통해서 얻어진 설계변수와 구속조건은 로터 블레이드 상세설계를 위한 기초자료로 활용될 수 있다고 판단한다.

#### 참고문헌

- [1] 이수용, 배재성, 이석준, 전부일, "복합재 로터 블레이드 단면 최적 설계", 한국항공우주학회 2008년도 추계학술발표대회 논문집, pp. 698~701
- [2] 박중용, 정성남, 김승조, "복합재료 헬리콥터 로터 블레이드에 대한 공력탄성학적 최적 설계", 한국항공우주학회지, 제21권 제3호, 1993.6, pp. 44~54
- [3] 원유진, 이수용, "유전자 알고리즘을 이용한 복합재 로터 블레이드 단면 구조 최적설계방법에 관한 연구", 한국항공우주학회지, 제 41권, 제 4호, 2013, pp. 275~283.
- [4] Webbin Yu, "VABS Manual for Users", March 12, 2011
- [5] D. H. Hodges, "Nonlinear Composite Beam Theory", Vol.213 Progress in Aeronautics and Astronautics, AIAA, Inc. Mar. 20, 2006
- [6] Cesnik, C. E. S. and Hodges, D. H., "VABS : A New Concept for Composite Rotor Blade Cross-Sectional Modeling", Journal of the American Helicopter Society, Vol.42, No.1, Jan. 1997, pp. 27 - 38
- [7] Wenbin. Yu, V. V. Volovoi, D. H. Hodges, and X. Hong, "Validation of the variational asymptotic beam sectional analysis", AIAA Journal, 40(10): 2105~2113, Oct. 2002
- [8] W. Yu and D. H. Hodges, "Generalized Timoshenko theory of the variational asymptotic beam sectional analysis", Journal of the American Helicopter Society, 50(1): 46~55, 2005
- [9] 김영호, "유전자알고리즘과 소성을 고려한 MINDLIN PLATE의 최적설계", 석사학위논문, 한국항공대학교, 1999
- [10] K. Krishnakuma, Micro-Genetic Algorithm for Non-Stationary Function Optimization, SPIE; Intelligent Control and Adaptive Systems, Vol. 1190, Philadelphia, PA, 1989