

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(4), 275-283(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.4.275>

유전자 알고리즘을 이용한 복합재 로터 블레이드
단면 구조 최적설계방법에 관한 연구

원유진*, 이수용**

A Study on the Structural Optimum Design Method of Composite
Rotor Blade Cross-Section using Genetic Algorithm

You-Jin Won* and Soo-Yong Lee**

Korea Aerospace Research Institute, Naro-System Integration Team
/Graduate School of Korea Aerospace University *

Korea Aerospace University, School of Aerospace & Mechanical Engineering **

ABSTRACT

In this paper, the structural optimum design method of composite rotor blade cross-section was investigated with the genetic algorithm. An auto-mesh generation program was developed for iterative calculations of optimum design, and stresses in the blade cross-section were analyzed by VABS (variational asymptotic beam sectional analysis) program. Minimum mass of rotor blade was defined as an object function, and stress failure index, center mass and blade minimum mass per unit length were chosen as constraints. Finally, design parameters such as the thickness and layup angles of a skin, and the thickness, position and width of a torsion box were determined through the structural optimum design method of composite rotor blade cross-section presented in this paper.

초 록

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용한 복합재 로터 블레이드 단면 구조 최적설계방법에 대한 연구를 수행하였다. 반복적인 최적설계 계산을 위해 자동격자생성 프로그램을 개발하였으며, VABS를 이용해 로터 블레이드 단면에 대한 응력해석을 수행하였다. 로터 블레이드 최소질량을 목적함수로 정의하였으며, 응력 파손지수와 단면 질량중심 그리고 단위 길이당 블레이드 최소질량을 구속조건으로 설정하였다. 최종적으로 본 논문의 복합재 로터 블레이드 단면 구조 최적설계방법을 통해서 스킨 적층각 및 스킨 두께 그리고 토션박스 두께, 토션박스 위치, 토션박스 폭과 같은 블레이드 단면 설계변수들이 결정되었다.

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

† Received: January 2, 2013 Accepted: March 18, 2013

** Corresponding author, E-mail : leesy@kau.ac.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

I. 서론

최근 국내에서는 개발 마무리 단계에 있는 수리온 헬리콥터를 기반으로 다양한 군수 및 민수 관련 헬기 수요를 충족시키기 위한 파생 기종에 대한 연구가 진행되고 있으며 또한 노후된 500 MD 등을 대체하기 위한 검토가 본격적으로 수행되는 등 헬리콥터 관련 연구 개발업무가 활발히 진행되고 있다.

헬리콥터는 일반적으로 허브를 포함한 메인 로터 시스템과 테일 로터 시스템, 엔진, 동체, 착륙장치 그리고 연료 탱크/펌프 등의 주요 구성요소로 이루어진다. 로터 블레이드는 비행에 필요한 양력, 추력 및 제어력을 발생시키며 또한 구조적으로는 회전에 의한 원심력과 양력을 감당해야 하며, 플래핑(flapping), 페더링(feathering) 및 리드-래그(lead-lag) 움직임을 통해 양력 불균형 및 블레이드 하중을 완화시켜야 한다. 따라서 다양한 형태의 첨단 복합재 및 설계/제작기법 등의 적용을 통해 블레이드의 경량화, 고강도, 일체형 성형과 같은 제작성 등을 만족시킨다[1][5].

로터 블레이드는 초기 설계단계에서 블레이드 단면 구조 설계를 위한 사이징(sizing) 업무가 수행된다. 이러한 사이징 업무는 유한요소해석을 기반으로 제작성을 고려해 블레이드 단면을 구성하는 주요 구성요소인 스킨(skin), 토션박스(torsion box), 스파(spar) 등과 같은 주요 부재에 대한 두께(thickness), 위치(location), 폭(width), 복합재 적층각(layer angle) 등의 주요 설계변수(design parameter)를 결정하게 된다. 블레이드 경량화를 위해서는 최적화된 설계변수 결정이 필요하며, 이는 결과적으로 블레이드에 대한 반복적인 설계/해석을 요구한다.

로터 블레이드 설계 관련 문헌을 살펴보면, Park[2] 등은 BK117 헬리콥터에 기반한 로터 블레이드 구조설계 절차를 제시하였으며, Lee[3] 등은 로터 블레이드를 복합재 평판으로 구성된 상자로 가정 후 이에 대한 응력 및 응답특성 해석을 수행하였다. 또한 Park[4] 등은 로터 블레이드의 최적설계를 수행하였는데 적층각과 적층두께를 설계변수로 하며 다양한 구속조건을 적용하여 최소의 무게를 갖는 블레이드를 갖도록 하였으나, 블레이드 단면 형상은 복합재 박스의 단순 형상을 적용하였다.

또한 최근 국내 항공우주분야에서 이방성(anisotropy) 재질 빔 단면 구조해석 프로그램인 VABS 적용 여부를 살펴보면, Lee[5] 등은 복합재 블레이드 응력해석을 위해 VABS와 MSC Software의 Nastran 결과를 상호 비교하였으며,

셀 구조의 복합재 박스 빔 단면을 갖는 주익(main wing)의 공력탄성학적 해석에 필요한 강성행렬 계산[6] 및 위성 태양전지판 최적설계를 위해서 태양전지판의 복합재료 지지보에 대한 단면 물성 계산 등에 VABS가 사용되었다[7].

본 논문에서는 로터 블레이드 최적화 수행에 따른 반복적인 유한요소해석을 위해 자동격자 생성기법을 적용하였다. 블레이드 단면 유한요소해석을 위해서 VABS를 사용하였으며, 최적화 방법으로 유전자 알고리즘을 적용하였다.

본 연구에서 제시한 최적설계방법을 통해 최종적으로 로터 블레이드 질량을 최소화하며 다양한 구속조건을 만족시키는 블레이드 단면 구조 형상을 갖는 설계변수들이 도출되었다.

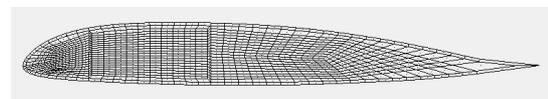
II. 본론

2.1 자동격자 생성

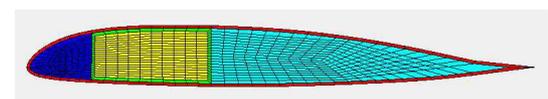
유전자 알고리즘과 VABS를 이용한 반복적인 블레이드 단면 유한요소 해석을 위해서는, 최적화 과정을 통해 얻어진 설계변수가 반영된 블레이드 단면 유한요소모델을 자동으로 반복 생성해야 한다. 따라서 본 연구에서는 블레이드 단면의 외부 형상 데이터 및 초기 설계변수를 입력하면 자동으로 절점(node) 및 요소(element)를 생성하도록 프로그램을 작성하였다. 생성된 유한요소모델에 요소의 기계적 물성값을 반영하여 유한요소해석을 위한 VABS 입력데이터를 작성하게 된다. Fig. 1은 자동격자생성 프로그램을 이용한 블레이드 단면의 유한요소모델 생성과정을 나타낸다.



(a) External configuration data reading



(b) Auto-mesh generation



(c) Mechanical properties reflection

Fig. 1. Auto-mesh generation process of rotor blade cross section

2.2 VABS 이론

VABS는 로터 블레이드와 같이 큰 가로세로비 (aspect ratio, AR)를 갖으며 이방성 재료의 빔 단면 구조해석을 위한 상용 유한요소해석 프로그램으로, 1989년 Georgia Tech의 Hodges에 의해 개발되었으며 이후 Cesnik, Yu 등에 의해 발전되어 현재 많은 관련 논문을 통해 VABS의 우수성이 소개되었다[8-13].

VABS는 3차원 비선형 빔 문제를 2차원 단면 해석 문제와 1차원 비선형 빔 해석문제로 분리시켜 해석을 수행하여 3차원 빔 해석과 같은 수준의 결과를 얻는다. Fig. 2는 VABS 해석흐름을 보여준다. VABS는 2차원 단면해석을 통해 질량중심(center mass), 중립축(neutral axis), 전단중심(shear center) 그리고 단면의 강성행렬(stiffness matrix) 및 와핑함수(warping function)와 같은 빔의 단면 정보를 먼저 계산한다.

티모션코 빔 모델(Timoshenko-like beam model)에 기반하는 경우에는 2차원 단면해석을 통해 계산된 강성행렬과 이미 알고 있는 작용하중을 (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. 와핑함수는 식 (2)와 같이 형상함수(shape function)와 절점 변위(nodal displacement)의 조합으로 나타낸다.

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

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

일반화된 일차원 변형률과 단면의 3차원 변형 에너지 최소화를 통해 구한 단면 와핑변위(w)를 이용해서 임의의 빔 길이(x_1)를 갖는 단면(x_2, x_3)에

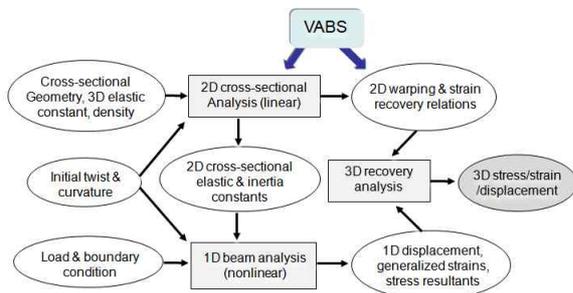


Fig. 2. VABS analysis flow

서 3차원 변위, 변형률, 응력을 계산할 수 있다. 식 (3)과 식 (4)는 VABS의 일반적인 3차원 변형률 계산 관계식을 나타내며, 식 (5)는 단면 형상이 각기둥(prismatic)인 경우 3차원 변형률 각 성분의 계산 관계식을 예로 나타낸다[8-9].

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

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

$$\begin{aligned} \Gamma_{11} &= \gamma_{11} + x_3 \kappa_2 - x_2 \kappa_3 + w'_1 \\ \Gamma_{22} &= w_{2,2} \\ \Gamma_{33} &= w_{3,3} \\ 2\Gamma_{12} &= w_{1,2} - x_3 \kappa_1 + w'_2 \\ 2\Gamma_{13} &= w_{1,3} + x_2 \kappa_1 + w'_3 \\ 2\Gamma_{23} &= w_{3,2} + w_{2,3} \end{aligned} \quad (5)$$

$\Gamma_w, \Gamma_e, \Gamma_R, \Gamma_l$ 은 단면좌표(x_2, x_3) 변수로 이루어진 함수연산자(Functional operator)에 해당한다. 식 (3)을 통해 구해진 3차원 변형률(Γ)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. VABS는 일반적인 빔 해석과 관련된 다양한 이론 중에서 결과가 매우 정확하며 계산에 소요되는 시간이 상당히 적어 로터 블레이드 설계/해석에 유용한 프로그램임이 관련 논문을 통해 증명되었다[10-13].

2.3 유전자 알고리즘

자연계 진화과정에서 특정 세대(generation)를 형성하는 개체들(individuals)의 집합, 즉 개체집단(population)중에서 주어진 환경에 잘 적응하는 개체는 살아남아 다음 세대에 후손을 남기며 적응하지 못한 개체는 사라진다. 유전자 알고리즘은 이러한 생물 진화과정을 인공적으로 모델링한 알고리즘으로 전통적 최적화 방법에서 사용하는 도함수 개념을 사용하지 않고 임의의 확률탐색 방법(random search)을 수행한다. 유전자 알고리즘은 확률적 임의 탐색방법으로서 전체공간에서 해가 존재할 가능성이 있는 국부적 영역만을 탐색하지 않고, 전역적으로 해를 탐색하는 방법이다[14-15].

유전자 알고리즘은 이진수로 구성된 임의의 스트링(string)으로 이루어진 개체집단에서 스트링의 이진수를 조합하여 평행적으로 최적화를 수행하는 특징을 갖는다. 그리고 다음 세대의 진화를 위해 선택(selection), 교차(crossover), 변이(mutation)의 유전연산(genetic operation) 과정을 수행한다.

선택(selection)의 방법으로 본 연구에서는 토너먼트(tournament) 선택을 적용하였다. 토너먼트 선택은 개체군에서 임의로 일정한 수의 개체를 선택 후 개체 간 적합도(fitness)를 비교하여 최고의 적합도를 갖는 개체를 다음 세대에 전달해주는 방법이다. 교차확률(Pc)은 0.5를 사용하며, 변이(mutation) 과정을 대신하여 Micro-GA 방법을 사용하였다. Micro-GA는 새로운 탐색공간을 조사하는 방법으로 유전자 알고리즘의 성능을 높이는데 기여한다[16].

본 논문에서는 로터 블레이드 단면 내부를 구성하는 스킨 두께, 토션박스 두께/위치/폭 그리고 스킨적층각을 설계변수로 설정하여 유전자 알고리즘을 이용한 각 설계변수들의 임의 탐색을 통해서 목적함수인 로터 블레이드의 질량을 최소화하며, 블레이드 관련 다양한 구속조건을 만족시키는 최적화된 설계변수를 구한다.

2.4 로터 블레이드 단면 최적화

로터 블레이드 단면 최적화는 임의 블레이드 위치(x_1, x_2, x_3)에서 주어진 설계하중(design load) 및 경계조건(boundary condition)을 만족시키는 블레이드 최적 단면을 설계하는 것으로 이는 블레이드 개발 초기단계에서 유용한 설계기초 자료로 활용될 수 있다.

Figure 3은 1개의 토션박스를 갖는 복합재 로터 블레이드 단면 구조 형상을 나타낸다. 블레이드 단면은 스킨, 1개의 토션박스과 토션박스 내부를 채우는 폼(foam), 하니콤(honeycomb) 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.

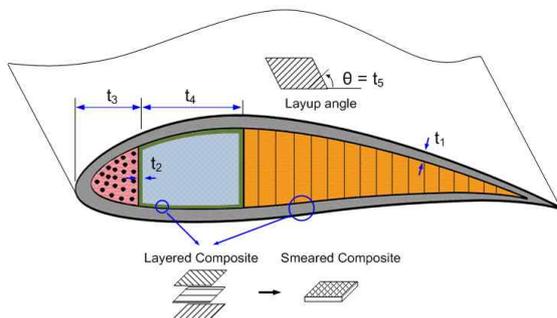


Fig. 3. Structural cross section of rotor blade & design variables

Table 1. Definition of object function, design variables & constraints

구분		값, 범위
목적함수		블레이드 질량 (kg)
설계변수 범위	스킨두께	$0.25\text{ mm} < t_1 < 3.0\text{ mm}$
	토션박스 두께	$0.25\text{ mm} < t_2 < 3.5\text{ mm}$
	토션박스 위치	$50\text{ mm} < t_3 < 100\text{ mm}$
	토션박스 폭	$80\text{ mm} < t_4 < 200\text{ mm}$
	스킨적층각	$0^\circ < t_5 < 90^\circ$
구속조건	Failure index	$FI < 1$
	질량중심 하한	$(0.9 \times \text{chord}/4)\text{ mm} < \bar{X}$
	질량중심 상한	$\bar{X} < (1.1 \times \text{chord}/4)\text{ mm}$
	블레이드 최소질량	$0.01\text{ kg/mm} < \bar{M}$

복합재료의 기계적 물성치는 적층된 복합재를 등가 강성을 갖는 재료로 가정하는 smeared properties 기법을 이용하여 최적화에 따른 반복적인 유한요소해석에 의한 계산 시간을 감소시킨다. 스킨과 토션박스는 탄소섬유(carbon fabric)로 적층각은 각각 0/90s도 및 ± 45 도이며, 스퍼는 0도 UD R-Glass로 설정한다. 초기 설계변수는 임의 값으로 식 (6)과 같이 설정한다.

$$t_1 = 3\text{ mm}, t_2 = 3.5\text{ mm}, t_3 = 70\text{ mm} \quad (6)$$

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

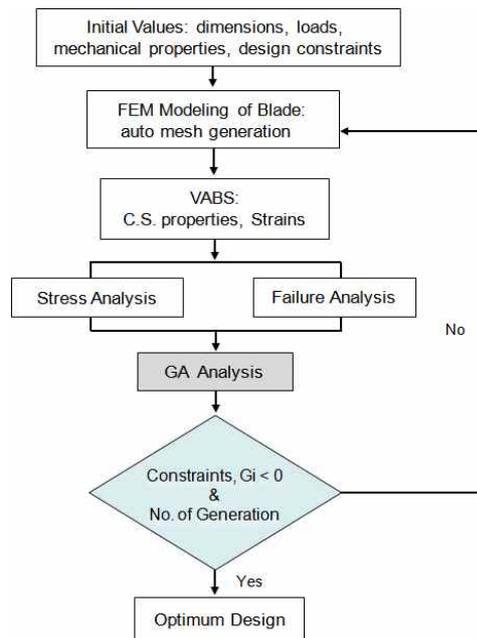


Fig. 4. Optimum design flow

로터 블레이드 스킨재료는 탄소섬유 패브릭으로 가정하였기에 스킨적층각의 설계변수 범위는 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 로 설정하였으며, 이것은 일방향 테이프(unidirectional tape)의 $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ 범위에 해당한다. 블레이드 최소질량이 목적함수로 정의되며, 응력 파손지수(failure index), 질량 중심 그리고 단위 길이당 블레이드 최소질량을 구속조건으로 설정한다. 블레이드 파손 판별은 식 (7)과 같이 Tsai-Wu 파손이론이 적용된다.

$$F_{ij}\sigma_i\sigma_j + F_i\sigma_i < 1 \quad (7)$$

Figure 4는 본 연구를 통해 작성한 로터 블레이드 단면 최적화 설계 프로그램의 흐름도(flow chart)를 나타낸다.

2.5 재료 물성치 및 설계하중

VABS를 이용한 유한요소해석에 적용되는 블레이드 요소별 물성값을 Table 2에 나타내었다.

Smearred properties 기법으로 계산된 등가강성을 이용해 VABS는 요소의 변형률을 계산하며, 요소 내 각 ply별 적층각을 고려해 응력을 계산하여 복합재 파손을 판별한다. Table 3은 블레이드 단면의 요소별 강도(strength)를 나타낸다.

Table 4는 임의 블레이드 길이(x_1)에서 단면 설계하중의 예를 나타내며, 설계하중에 대한 부호 규약(sign convention)은 Fig. 5와 같다.

Table 2. Mechanical properties

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 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 3. Mechanical strengths (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

Table 4. Design load of 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

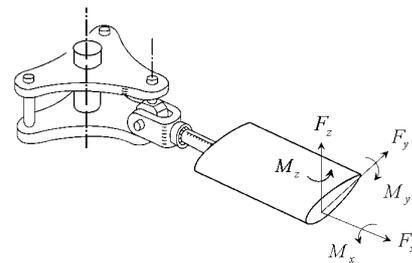


Fig. 5. Sign convention

2.6 최적화 설계 Case

복합재 로터 블레이드 단면 최적화 설계를 위한 최적화 경우의 수는 Table 5와 같다. 먼저 스킨적층각(t_5)의 설계변수 적용 유무에 따른 목적함수의 영향성을 확인하기 위해서 설계변수가 4개(t_1, t_2, t_3, t_4)인 경우와 설계변수가 5개(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5)인 경우로 크게 구분된다. 또한 설계변수 개수가 고정된 상태에서 개체수(no. of individual)의 증가에 따른 목적함수의 영향을 확인하기 위해 개체수를 5, 10으로 구분하였다. 세대수(no. of generation)는 공통적으로 1,000 세대를 적용한다.

Table 5. Analytic cases of optimum design

	Case 0	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
구분	초기 설계 변수	설계변수 4개 (t_1, t_2, t_3, t_4)		설계변수 5개 (t_1, t_2, t_3, t_4, t_5)	
	-	개체수 5	개체수 10	개체수 5	개체수 10
세대수	-	1,000			
파라미터	-	Pc = 0.5, Micro-GA			

2.7 해석 결과

Table 5에 제시된 최적화 경우의 수에 대한 블레이드 단면 최적화 해석 결과를 Table 6에 비교 정리하였다.

식 (6)의 임의 초기 설계변수값이 적용되며 최적화가 고려되지 않은 Case 0의 블레이드 질량은 약 88kg으로 이 값은 블레이드 질량을 최소화하며 동시에 다양한 구속조건을 만족하기 위한 최적화 경우의 수에 대한 결과들(Case 1~4) 보다 큰 값으로, Case 3과 Case 4 대비 약 20% 정도 블레이드 질량이 더 무겁다는 것을 알 수 있다.

Table 7의 무차원화된 구속조건을 살펴보면 G(1)~G(5)는 스킨, 토션박스, 스파, 폴리우레탄, 하니컴에 대한 각각의 파손지수(failure index) 구속조건을 나타내며, G(6)과 G(7)은 질량중심 하한 및 상한 구속조건 그리고 G(8)은 로터블레이드 단위길이당 최소질량 구속조건을 나타낸다. Table 7의 Case 0에 대한 구속조건 결과를 살펴보면 하니컴의 파손지수를 나타내는 G(5)와 질량중심 상한을 나타내는 G(7)의 값이 양의 값으로

Table 6. Analytic results of optimum design cases (kg, mm)

구분	Case 0	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
총질량	87.8	86.9	80.3	71.0	71.0
스킨 두께	3.0	1.29	1.11	1.76	2.17
토션박스 두께	3.5	2.69	3.35	0.66	1.7
토션박스 위치	70	88.3	76.6	78.1	66.47
토션박스 폭	130	187.9	200	111.7	134.6
스킨 적층각	-	-	-	51.3°	43.1°

Table 7. Constraint results of optimum design cases

구분	Case 0	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
파손 지수	G(1)	-0.82	-0.78	-0.70	-0.43	-0.49
	G(2)	-0.52	-0.68	-0.79	-0.47	-0.28
	G(3)	-0.92	-0.96	-0.95	-0.87	-0.86
	G(4)	-0.99	-0.99	-0.99	-0.98	-0.97
	G(5)	1.78	-0.59×10^{-4}	-0.91×10^{-3}	-0.93	-0.75
질량 중심 하한	G(6)	-0.22	-0.14×10^{-3}	-0.02	-0.34×10^{-1}	-0.15
질량 중심 상한	G(7)	0.04	-0.18	-0.17	-0.15	-0.37×10^{-1}
단위 길이당 최소 질량	G(8)	-0.19	-0.18	-0.12	-0.53×10^{-4}	-0.34×10^{-5}

구속조건이 위반됨을 알 수 있다.

스킨적층각(t_5)이 설계변수에 포함된 Case 3과 Case 4의 최적화 결과는 이를 설계변수에 포함하지 않은 Case 1과 Case 2에 비해 블레이드 질량이 크게 감소하며, 스킨의 파손지수 G(1), 토션박스의 파손지수 G(2), 스파의 파손지수 G(3), 블레이드 단위 길이당 최소 질량의 구속조건을 나타내는 G(8)이 음의 값 상태에서 0에 더 가깝게 접근한다. 특히 G(8)의 값은 거의 0으로 Case 3과 Case 4는 최적화 설계를 통해 모든 구속조건을 만족시키면서 블레이드의 최소 질량에 도달함을 알 수 있다. 스킨적층각(t_5)의 변화는 스킨 강성 및 응력에 영향을 주며, 결과적으로 스킨을 포함한 블레이드 단면 구조 설계변수와 관련된 파손지수 G(1)~G(5)를 변화시킨다. Table 6과 7을 통해서 스킨적층각(t_5)을 최적설계에 설계변수로 적용하는 것이 블레이드 질량 감소에 큰 영향을 준다는 것을 확인할 수 있다.

Figure 6~11은 세대수 증가에 따른 로터 블레이드의 질량과 설계변수들의 변화 이력을 나타낸다. 세대수의 증가 즉 최적화 설계가 진행됨에 따라 목적함수인 로터 블레이드의 질량 및 설계변수들이 점차적으로 특정한 값으로 수렴한다는 것을 알 수 있다.

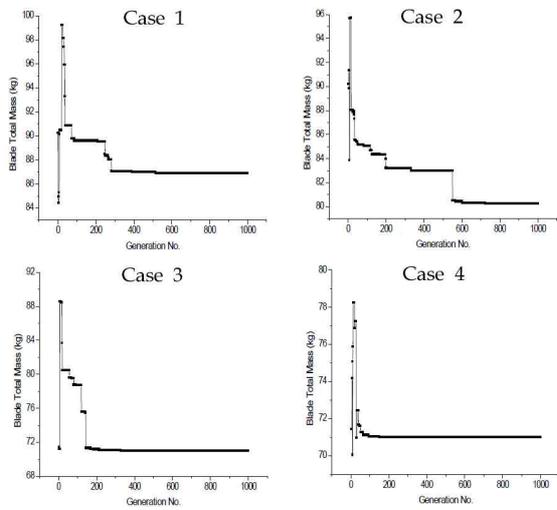


Fig. 6. Generation no. vs. Blade total mass

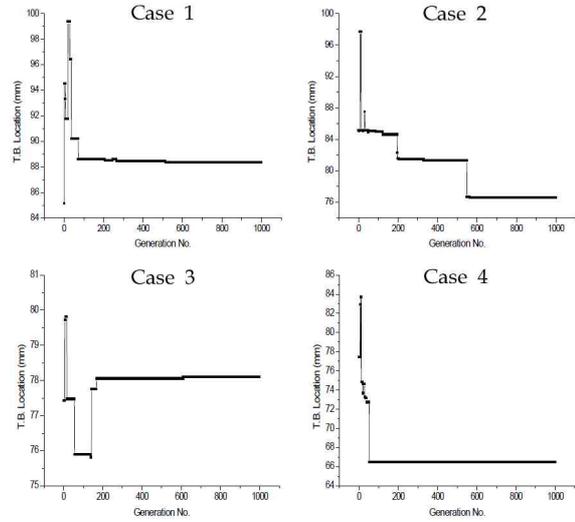


Fig. 9. Generation no. vs. Torsion box Location

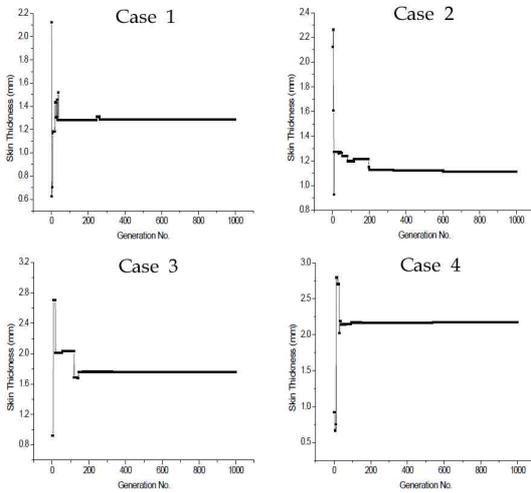


Fig. 7. Generation no. vs. Skin Thickness

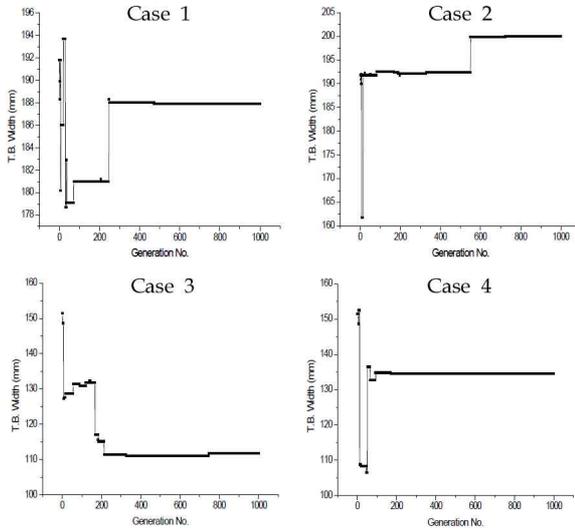


Fig. 10. Generation no. vs. Torsion box Width

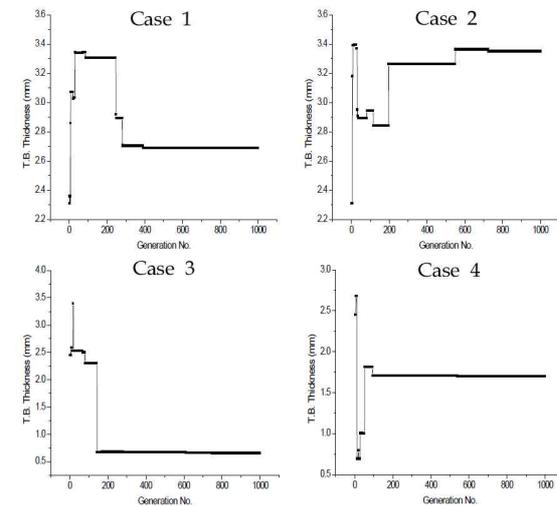


Fig. 8. Generation no. vs. Torsion box Thickness

개체수가 10인 Case 2와 Case 4는 개체수가 5인 Case 1과 Case 3에 비해 목적함수 및 설계변수의 수렴속도가 상대적으로 개선된다는 것을 Fig. 6~11을 통해 알 수 있다. 세대 내 개체수의 증가는 다양하며 우수한 유전인자를 갖는 개체를 갖게 될 확률을 높이며 이는 결과적으로 적합도 (fitness)가 높은 개체 즉 목적함수를 최소화하는 설계변수를 갖게 된다고 판단된다.

Figure 6에서 로터 블레이드 질량에 대한 수렴은 Case 3의 경우 약 200 세대부터 약 71kg으로 수렴이 진행되며, Case 4는 약 100 세대부터 수렴이 시작되어 Case 3과 동일한 수준인 약 71kg을 유지한다. 이와 같은 로터 블레이드 질량에 대한 수렴 경향을 Fig. 11의 스킨적층각(t_5)에 대

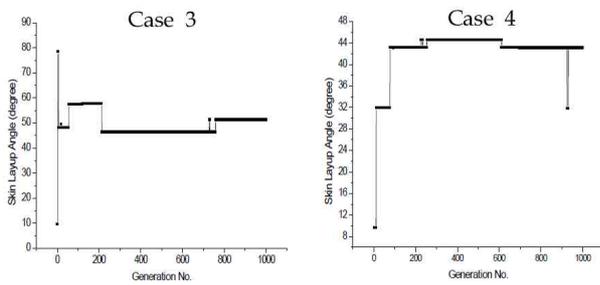
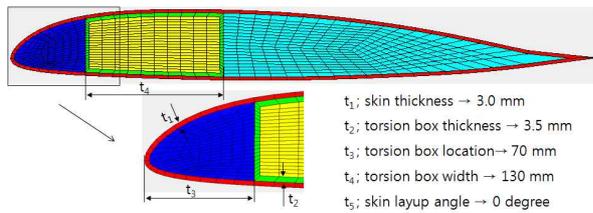
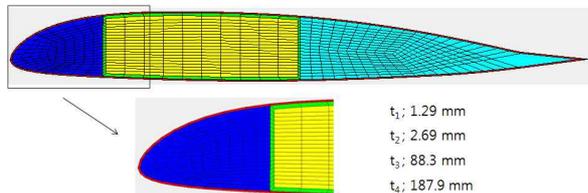


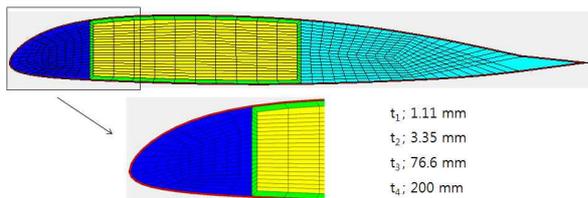
Fig. 11. Generation no. vs. Skin layup angle



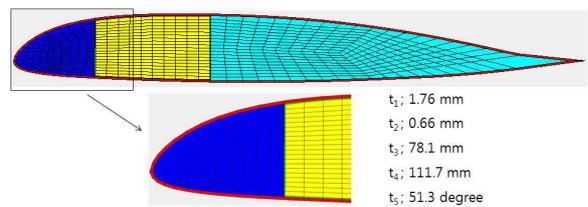
(a) Detailed configuration of Case 0



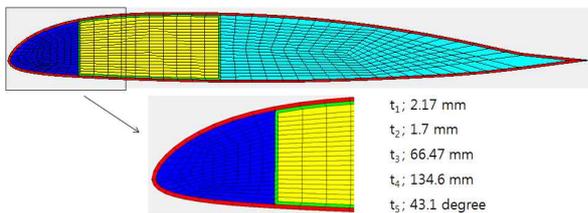
(b) Detailed configuration of Case 1



(c) Detailed configuration of Case 2



(d) Detailed configuration of Case 3



(e) Detailed configuration of Case 4

Fig. 12. Detailed configurations of optimum design cases

한 변화이력과 함께 고려하면 Fig. 11의 Case 3과 Case 4의 두 경우 모두 약 45도 부근에서 스킨적층각이 수렴한다는 것을 알 수 있다.

Figure 12는 최적화 설계 결과를 통해 얻은 로터 블레이드 최적화 단면 형상을 나타낸다. 임의 초기 설계변수가 적용된 최적화 미적용 단면 형상인 Case 0에 비해서 설계변수 4개(t_1, t_2, t_3, t_4)가 고려되는 Case 1과 Case 2는 스킨과 토션박스 두께가 얇아지고 토션박스의 크기가 상대적으로 커진 단면 형상을 갖는다. 스킨적층각(t_5)이 추가되어 설계변수가 5개(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5)인 Case 3과 Case 4는 다른 Case들에 비해서 토션박스의 두께가 가장 얇으며 토션박스의 크기는 Case 0보다 작거나 유사한 크기를 갖으며, Case 1과 2보다는 작은 토션박스 형상을 나타낸다.

III. 결 론

본 논문에서는 복합재 로터 블레이드 단면 구조 최적설계를 위한 방법으로 자동격자생성 프로그램, VABS 그리고 유전자 알고리즘을 통합한 내부(in-house) 최적화 프로그램을 작성하여 1개의 토션박스를 갖는 복합재 로터 블레이드의 단면 내부 형상에 대한 구조 최적설계를 수행하였다. 상기의 연구를 통해서 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, 본 연구의 최적화 프로그램을 이용해 로터 블레이드 질량을 최소화하며 동시에 구속조건을 만족시키는 블레이드 단면에 대한 설계변수들을 얻을 수 있었으며 이를 통해서 자동격자생성 프로그램, VABS 그리고 유전자 알고리즘이 통합된 최적설계방법이 로터블레이드 단면 구조 형상 설계에 효과적으로 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

둘째, 스킨적층각을 설계변수로 고려한 최적설계가 이를 적용하지 않은 최적설계보다 목적함수인 블레이드 질량을 크게 감소시키며, 이는 스킨적층각에 의한 영향이라고 판단된다.

로터 블레이드 설계에는 회전에 의해 발생하는 주기적인 공력하중에 의한 블레이드 피로 및 블레이드 분당 회전수와 같은 운항조건을 고려한 고유진동수가 영향을 주며 또한 블레이드 최적설계 시 제작성을 고려한 설계변수 검토가 요구된다. 따라서 로터 블레이드 단면 최적화 설계방법을 위한 향후 연구에는 이러한 추가 검토 사항들이 반영 예정이다.

References

- 1) S. Y. Lee, J. S. Bae, S. J. Lee, B. I. Jeon, "Optimum Design of Composite Rotor Blade Corss-Section", Proceeding of the 2008 KSAS Spring Conference, pp. 698~701
- 2) J. Y. Park, G. B. choi, C. J. Nam, C. S. Kim, "Preliminary Design of Helicopter Composite Rotor Blade", Proceeding of the 1998 KSAS Spring Conference, pp. 318~322
- 3) H. K. Lee, H. C. Park, "A Study on the Structural Analysis of Helicopter Rotors Mode of CFRP", Journal of KSAS, Vol.14, No.2, Aug. 1986, pp. 67~77
- 4) J. Y. Park, N. S. Jung, S. J. Kim, "Aeroelastic Optimum Design of Helicopter Rotor Blade made of Composites", Journal of KSAS, Vol.21, No.3, June. 1993, pp. 44~54
- 5) M. W. Lee, J. S. Bae, S. Y. Lee, S. J. Lee, B. I. Jeon, "One-Dimensional Beam Modeling of a Composite Rotor Blade", Journal of SASE, Vol.2, No.1, Mar. 2008, pp. 7~12
- 6) N. K. Yoon, S. J. Shin, "Static Aeroelastic Analysis upon a Composite Main Wing", Proceeding of the 2011 KSAS Fall Conference, pp. 1183~1187
- 7) Y. H. Kim, H. D. Kim, J. S. Park, "Optimization Design of a Composite Structure by using VABS ", Proceeding of the 2012 KSAS Spring Conference,, pp. 312~317
- 8) Webbin Yu, "VABS Manual for Users", March 12, 2011.
- 9) D. H. Hodges, "Nonlinear Composite Beam Theory", Vol.213 Progress in Aeronautics and Astronautics, AIAA, Inc. Mar. 20, 2006.
- 10) 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
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) W. Yu, D. H. Hodges, V. V. Volovoi, and C. E. S. Cesnik, "On Timoshenko-like modeling of initially curved and twisted composite beams", International Journal of Solids and Structures, 39(19): 5101~5121, 2002.
- 14) Y. H. Kim, "Optimization of a Mindlin Plate Considering Elasto-Plastic Region by Genetic Algorithms", Paper of a Master's degree, Korea Aerospace University, 1999
- 15) J. H. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial System", University of Michigan Press, 1975.
- 16) K. Krishnakuma, Micro-Genetic Algorithms for Non-Stationary Function Optimization, SPIE; Intelligent Control and Adaptive Systems, Vol. 1190, Philadelphia, PA, 1989.