

## 복합재 로터 블레이드의 구조 최적설계

박정진\* · 이민우\* · 배재성\*\* · 이수용\*\*\* · 김석우\*\*\*\*

### Structural Optimum Design of Composite Rotor Blade

Jung-Jin Park\* · Min-Woo Lee\* · Jae-Sung Bae\*\* · Soo-Yong Lee\*\* · Seok-Woo Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

This paper addresses a method for structural optimum design of composite rotor blade. The basic model of a composite helicopter main rotor blade is designed and its parameters determining the structural/dynamic properties are studied. Through the investigation of flap/lag/torsional stiffness, the structural properties of the model are analyzed. In this study, helicopter rotor blades are analyzed by using VABS. The computer program VABS (Variational Asymptotic Beam Section Analysis) uses the variational asymptotic method to split a three-dimensional nonlinear elasticity problem into a two dimensional cross-sectional analysis and a one-dimensional nonlinear beam problem. This is accomplished by taking advantage of certain small parameters inherent to beam-like structures. In addition, the rotational stability of the blade is estimated by the frequency diagram from FE analysis(MSC.Patran/Nastran) to understand its vibrational property. From the result, design parameters to determine and optimize the properties of the model are presented.

Key Words: VABS, 반응표면법, 최적화

#### 1. 서 론

1903년 라이트 형제에 의한 인류 최초의 동력 비행 성공 이후 100년 동안 항공 산업은 비약적으로 발전 및 성장을 이룩하였다. 두 차례의 세계대전으로 인한 군사용 항공 산업의 발전뿐만 아니라, 민수용 항공 산업도 양적, 질적으로 많

은 성장을 이루었다. 이러한 성장 속에 최근 항공 산업의 수요면에서 테러와 국지전의 가능성으로 인해 공수 및 전략 기동 능력의 요구가 증가하고 있다. 따라서 미국을 포함한 선진국을 중심으로 수송기와 헬리콥터의 수요가 증가함에 따라 헬리콥터 관련 기술개발의 수요도 증가하고 있다.

로터 블레이드 및 허브의 로터 시스템의 성능은 헬리콥터의 전체 성능에 중대한 영향을 미치는 주요 구성요소이다. 그 중 헬리콥터의 메인 로터 시스템은 블레이드, 허브, 그리고, 제어장치로 구분되는데, 회전하면서 공기력을 발생하

\* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

\*\* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

\*\*\* 선임연구원, 한국에너지기술연구원

연락처, E-mail: jsbae@kau.ac.kr

는 블레이드, 블레이드에서 발생하는 힘과 모멘트를 동체에 전달하는 하중경로를 제공하는 허브, 블레이드의 피치각을 제어하여 추력 및 조종력을 발생시키는 역할을 하는 제어시스템으로 구성된다.

헬리콥터의 메인 로터 시스템 중 로터 블레이드는 비행에 필요한 양력, 추력 및 제어하는 힘을 발생시키는 핵심적인 구성품으로 회전에 의한 원심력과 양력을 감당해야 하며, 플래핑, 페더링 및 리드래그 움직임을 통해 양력 불균형 및 블레이드 하중을 완화시켜야 하기에 블레이드의 경량화와 고강도, 일체형 성형에 따른 제작편의와 성능향상이 요구된다. 그러므로 다양한 복합재와 그에 따른 첨단제작기법이 가장 많이 사용되는 분야 중 하나이다.

특히 로터 블레이드의 회전에 따라 발생하는 주기적인 공력하중은 블레이드에 높은 주파수의 반복응력을 유발시키므로 블레이드의 운항 안전성과 구조적 안전성과 성능향상을 위해 피로하중은 반드시 고려해야 할 사항이다. 그러므로 일반적인 금속재료보다 뛰어난 피로저항을 가지며 중량에 비해 강성과 강도가 좋은 복합재료를 사용한다. 본 연구에서는 블레이드의 스킨 및 스파를 복합재료로 설계하는데 있어서 블레이드 스킨/스파의 적층방법에 대한 최적화를 수행한다. 최적화 방법으로는 반응표면법을 이용한 최적설계를 하고자 한다.

2. 블레이드 구조 모델

2.1 VABS

VABS(Variational Asymptotic Beam Sectional Analysis)는 블레이드처럼 가로·세로비(aspect ratio)가 큰 3차원 모델을 2차원 단면 해석과 1차원 보 해석으로 나눠 3차원 해석과 같은 결과를 얻어낼 수 있다. 2차원 단면 강성 보모형을 통해 EI, GJ값을 얻고, 1차원 보 해석의 익단에 힘 또는 모멘트를 가하고 변형을 측정 한 후 등가 보 모델이 측정한 변형과 같게 되

도록 등가 보모델의 강성값을 계산하는 방법이다. VABS를 이용하여 등가 빔 모델 수립 방법과 정적 변형 해석 및 모달 해석을 통해 복합재 블레이드의 모델링 기법을 연구하였다.

단면의 스트레인 에너지나 빔의 스트레인 에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$U = \frac{1}{2} \langle \Gamma^T D \Gamma \rangle \tag{1}$$

여기서  $D$ 는 정형화되지 않은 빔의 좌표계에서 6X6 대칭 매트릭스(symmetric matrix)다. 이제 기초적인 3차원 탄성 보(elastic beam) 문제에서 스트레인 에너지에 의한 휨(warping)을 최소화 하는 답을 구하려면 임의의 단면과 이방성재료, 유한요소방법을 이용하여 풀면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$w(x_1, x_2, x_3) = S(x_2, x_3) V(x_1) \tag{2}$$

$S(x_2, x_3)$ 는 요소 형상 함수로 표현되고,  $V$ 는 단면 위에 휨 변위 값의 행렬 값이다. (2)식을 (1)식에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$2U_0 = \frac{1}{h^2} V^T E V + \frac{2}{h} V^T D_{hc} \epsilon + \epsilon^T D_{cc} \epsilon \tag{3}$$

본 논문에서는 VABS를 이용한 등가 구조 모델을 이용한 구조해석의 검증에 위해 여러 형태의 구조물의 FEM해석 결과와 비교 검토하였다. 먼저 Fig. 1과 같이 사각형의 단면을 갖는 직선 외팔보에 대해 우측 끝단에 같은 하중조건인 100N을 가하고 그 결과를 비교해보았다.

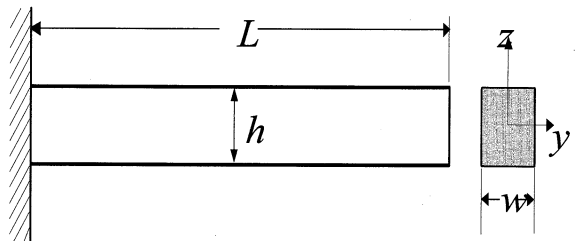


Fig. 1 일정 두께 외팔보

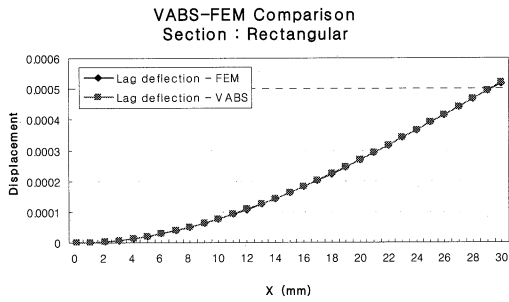


Fig. 2 일정 두께 외팔보의 Lag Displacement

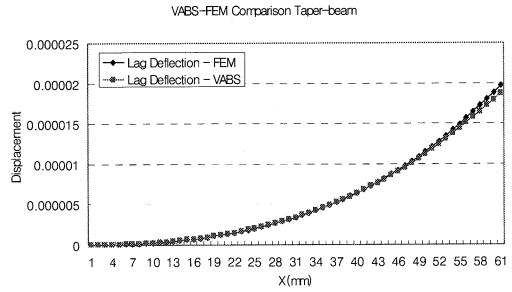


Fig. 5 두께가 변하는 외팔보의 Lag Displacement

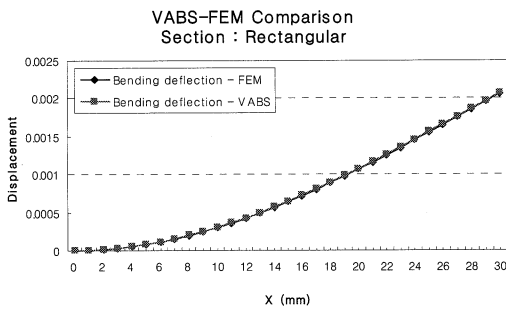


Fig. 3 일정 두께 외팔보의 Bending Displacement

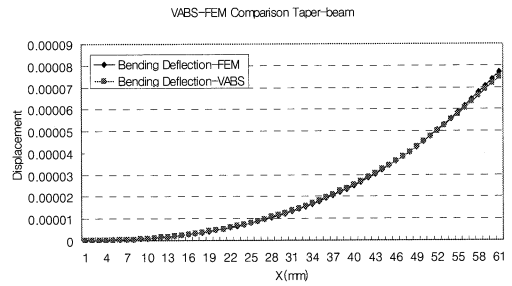


Fig. 6 두께가 변하는 외팔보의 Bending Displacement

위와 같은 조건을 이용하여 기본적으로 MSC Software의 NASTRAN을 이용하여 정적해석을 수행하였고, 검증 대상인 VABS를 통해 외팔보의 단면정보를 이용하여 강성행렬을 계산한 값을 이용하여 NASTRAN의 Beam analysis로 해석하였으며, Lag방향과 Bending방향의 변위를 비교하였고 Fig. 2와 Fig. 3에서 보는 것처럼 만족할 만한 결과를 주고 있다.

다음은 Fig. 4와 같은 두께가 변하는 외팔보에 대해 우측 끝단에 같은 하중조건이 가해지고 있고 나머지 조건은 일정두께 외팔보와 같으며, 결과는 다음과 같다.

앞의 예제와 마찬가지로 Lag 방향과 Bending 방향의 변위를 비교하였고 Fig. 5와 Fig.6에서 보는 것처럼 만족할만한 결과를 주고 있다.

마지막으로 Fig. 7과 같이 복합재료 박스빔을 비교해 보았다. 역시 우측 끝단에 같은 하중조건이 가해지고 있으며, 결과는 다음과 같다.

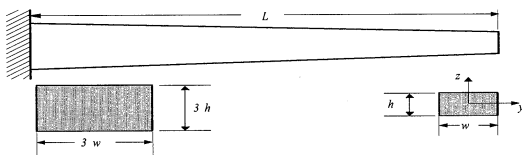


Fig. 4 두께가 변하는 외팔보

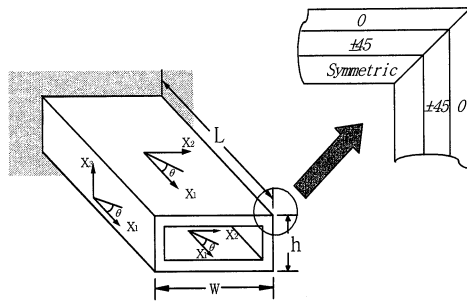


Fig. 7 복합재 Box-beam 의 적층형상

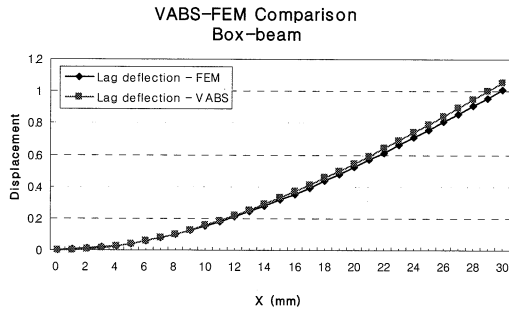


Fig. 8 복합재 Box-Beam의 Lag Displacement

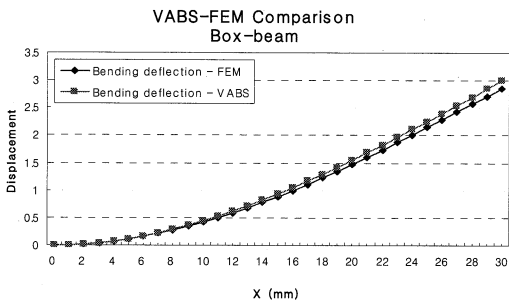


Fig. 9 복합재 Box-Beam의 Bending Displacement

앞의 다른 예제와 마찬가지로 위와 같은 조건을 이용하여 기본적으로 MSC. Software 의 NASTRAN 을 이용하여 정적해석을 수행하였고, 검증 대상인 VABS를 통해 직선보의 단면정보를 이용하여 강성행렬을 계산하고 그 값으로 NASTRAN의 Beam analysis로 해석하였다. Lag방향과 Bending방향의 변위를 비교하였고 Fig. 8과 Fig. 9에서 보는 것처럼 만족할만한 결과를 보여주고 있다.

## 2.2 반응표면법

### 2.2.1 반응표면법의 개요

반응표면법은 설계변수와 반응변수의 실험적 관계를 수학적식으로 표현하기 위해 실험이나 시뮬레이션으로부터 얻은 수치 값들로부터 근사적 반응표면 모델을 만들어내는 통계적 기법들의 집합을 말한다. 여기서 회귀모델 생성을 위한 통계적 분석 방법을 회귀분석(regression analysis)이라고 하며 임의의 회귀모델에 대한

계수들을 회귀계수(regression coefficient)라 한다.

### 2.2.2 회귀분석

회귀분석은 독립변수와 종속변수에 대한 관계를 단순회귀모형(simple regression model)이나 다중회귀모형(multiple regression model)등으로 근사한 반응함수로 가정하여 실험자가 흥미를 가지고 있는 설계변수들의 함수식을 국부 영역에서만 만족하도록 구성하는 통계적 분석방법이다. 일반적으로 실험 데이터로부터 추정된 회귀모델에는 수치오차나 노이즈 같은 오차 항이 포함될 수 있으나 이는 실험을 반복함으로써 보간 되어 평균값이 0이 되는 것으로 간주된다. 반응표면의 형태는 가정되는 후보함수에 따라 좌우되며 실제로 반응표면 후보함수의 선택에 따라 해의 정확도와 수렴속도가 결정된다. 일반적으로 여러 가지 후보함수 중에서 설계변수의 흥미영역이 좁을 경우에는 다음 식 (4), (5)와 같은 저차의 1, 2차 다항식이 주로 사용된다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \lambda \quad (4)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i \leq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \lambda \quad (5)$$

여기서  $x_i$ 는 반응변수,  $k$ 는 설계변수의 수,  $\beta_i$ 는 회귀상수를 그리고  $\lambda$ 은 오차를 나타낸다. 1차 회귀모형(first order regression model)은 알고자 하는 반응치의 변화가 큰 곡률을 가지지 않는 선형적인 경향을 가질 경우 사용된다. 또한 반응표면 형상이 곡면으로 표현될 것이라고 예상된다면, 2차 회귀모형(second order regression model)을 사용하는 것이 바람직하다.

## 3. 복합재 블레이드의 최적설계

### 3.1 반응표면법을 이용한 복합재 블레이드의 최적설계

무한지 복합재료 로터 블레이드를 균일한 강성 분포를 갖는 외팔보로 가정하였고, 블레이드의

초기 곡률이 없다고 가정하였다. 사용된 복합재료 블레이드의 단면 형태는 상자형이며, 적층형상은 Fig. 10에 명시되어 있다.

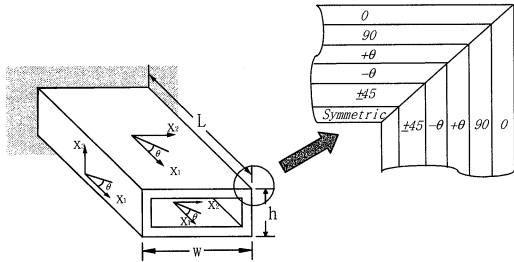


Fig. 10 복합재 블레이드의 적층현상

Fig. 10에서 보여진 적층형태에서 바깥쪽에 위치하는 0°의 적층은 블레이드에 작용하는 축방향 응력과 굽힘 응력에 대한 강성 및 강도를 유지하기 위해 포함되었으며,  $\theta_1, \theta_2$ 의 적층은 구조적인 연성을 조절하는 역할을 한다. 그리고 적층판의 중심에 위치하는  $\pm 45^\circ$ 의 적층은 전단 응력에 대한 강성 및 강도를 유지하기 위해 포함되었다. 최적설계를 수행하기 위해 본 연구에서는 Table 1.에 주어진 물성치를 갖는 블레이드로 해석을 수행하였고, 실험계획법은 앞 절에서 소개한 중심합성법을 이용하였다. 설계변수는  $\theta_1, \theta_2$ , 2개이며 중심점의 수는 1개로 설정하였다.

Table 1. 복합재 블레이드 물성치

Rotor blade		HFG CU-125NS	
R (m)	3.55	$E_1$ (GPa)	130
c (m)	0.04	$E_2$ (GPa)	10
d (m)	0.03	$E_3$ (GPa)	10
Ply Thickness (m)	0.000125	$G_{12}$ (GPa)	4.85
C/R	0.0492	$G_{23}$ (GPa)	3.62
$a_0$	5.73	$G_{13}$ (GPa)	4.85
$Cd_0$	0.0095	$\nu_{12}$	0.31
$\sigma$	0.07	$\nu_{23}$	0.52
$\gamma$	6.34	$\nu_{13}$	0.31
$\Omega$ (rpm)	290	$\rho$	1445

총 해석횟수는 9번이었으며 반응 값으로는

Bending 방향으로의 변위로 설정하였다. 그에 따라 생성된 반응표면은 Fig. 11과 같다.

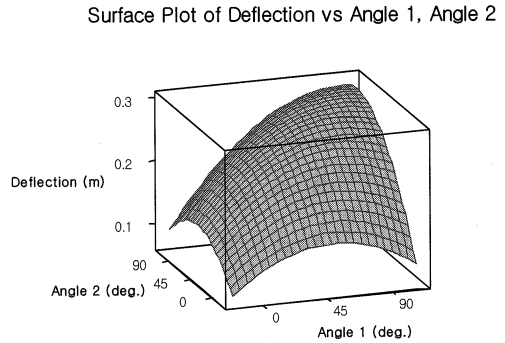


Fig. 11 중심합성법을 이용하여 생성한 반응표면

변위가 최소가 되는 의 조합은 두 각 모두 0°의 경우였으며 추가적으로 (0°, 90°)의 조합에서도 다른 각도의 조합에 비해 작은 변위가 나타남을 알 수 있었다. 추가적으로 동특성 해석결과를 분석하여 동역학적으로 안정한지 확인하기 위해 변위가 가장 작았던 (0°, 0°)의 경우와 (0°, 90°), 2가지 경우의 동특성 해석을 수행하였고 결과는 다음과 같다.

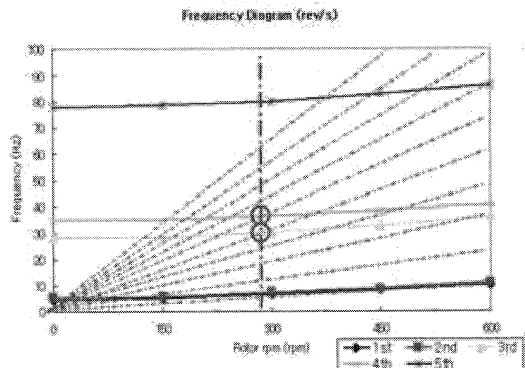


Fig. 12 고유진동수 선도 ( $\theta_1, \theta_2$ ) = (0°, 0°)

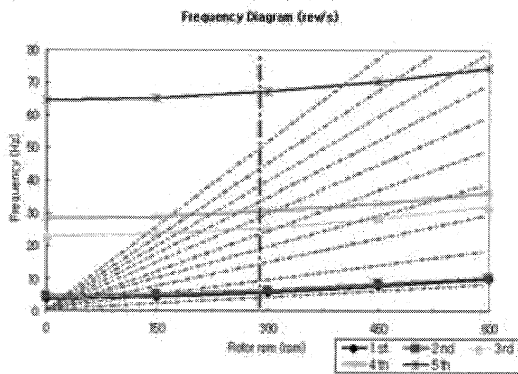


Fig. 13 고유진동수 선도 ( $\theta_1, \theta_2$ ) = ( $0^\circ, 90^\circ$ )

먼저,  $\theta_1, \theta_2$ 가 ( $0^\circ, 0^\circ$ )인 경우에는, Fig. 12에서 원으로 표시한 것과 같이 진동수/회전수 정수배 직선과 진동모드 곡선과 목표 회전속도인 290(rpm) 지점에서 근접하고 있으므로 앞에서 언급한 바와 같이 진동관점에서 안정하지 못한 것을 알 수 있다. 하지만  $\theta_1, \theta_2$ 가 ( $0^\circ, 90^\circ$ )인 경우에는 Fig. 13과 같이 진동관점에서 안정한 모습을 보여준다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 다양한 운용조건에서의 구조 강성 및 강도 요구 조건을 충족시키기 위한 복합재 블레이드의 스킨 및 스파의 적층 방법의 최적화를 수행하였다. 이를 위해 기존 방식의 실제 구조물의 모델링을 통한 해석이 아닌 블레이드의 단면계수를 이용한 등가 구조물인 보 해석을 수행하여 최적화된 단면계수 값을 구하였다.

기존의 민감도를 이용한 최적화 방법과 민감도를 사용하지 않으면서 해석횟수와 시간을 절약해 줄 수 있는 실험계획법을 이용한 반응표면법을 이용하여 최적화를 수행하였다. 설계변수는 복합재의 적층각으로 하였으며 목적함수로는 변형의 크기를 최소로 하는 것으로 설정하였다. 실제 최적화를 통해 나온 결과를 이용하여 동특성 해석을 거쳐 변형을 최소로 하면서 진동특성

면에서도 안정한 최적화된 적층형태를 찾을 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 한국항공우주산업 및 에너지기술연구원의 연구비지원으로 수행되었으며, 본 연구의 수행에 있어서 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Wenbin, Yu and Dewey, H. Hodges, "The Timoshenko-like Theory of the Variational Asymptotic Beam Sectional Analysis" AIAA, 2003-1419, 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Norfolk, Virginia, Apr.7-10, 2003
- [2] 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, January 1997, pp.27-38.
- [3] Wenbin, Yu and Vitali, V. Volovoi, "VALIDATION OF THE VARIATIONAL ASYMPTOTIC BEAM SECTIONAL ANALYSIS (VABS)" AIAA, Vol.40, No.10, Oct.2002, (2105-2112)
- [4] Wenbin, Yu and Vitali, V. Volovoi, "The Vlasov Theory of the Variational Asymptotic Beam Sectional Analysis" AIAA, 2004-1520, 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Palm Springs, California, Apr.19-22, 2004
- [5] 권혁준, "복합재료 로터 블레이드에 대한 공력탄성학적 최적설계," 석사학위논문, 한국과학기술원, 2000.