

복합재 블레이드의 1차원 보 모델링

이민우* · 배재성** · 이수용** · 이석준*** · 전부일***

One-Dimensional Beam Modeling of a Composite Rotor Blade

Min-Woo Lee* · Jae-Sung Bae** · Soo-Yong Lee** · Seok-Joon Lee*** · Boo-Il Jeon***

ABSTRACT

The three-dimensional finite element modeling of a composite rotor blade is very hard and requires much computation effort. The efficient method to model a composite beam is necessary for the dynamic and aeroelastic analyses of rotor blades. In this study, the beam modeling method of a composite rotor blade is studied using VABS. The computer program, VABS (Variational Asymptotic Beam Section Analysis), uses the variational asymptotic method to split a 3-D nonlinear elasticity problem into 2-D cross-sectional analysis and 1-D nonlinear beam problem. The VABS can produce the sectional stiffness coefficients of composite rotor blades with various cross section and initial twist/curvatures, and recover the original 3-D distribution of displacement/strain/stress fields. The results of various cross section beams show that VABS gives us the accurate results compared to commercial codes and does not need much computation effort. It can be concluded that VABS provides the efficient method to establish the FE model of a composite rotor blade.

Key Words: VABS, FEM, Displacement, Stress resultant, Timoshenko-like beam, Stiffness

1. 서 론

복합재 로터 블레이드의 해석 방법, 이것은 유한요소 해석을 통해 이뤄지며 최근에 들어 획기적 발전을 거듭하고 있다. 이러한 유한요소법 해석을 통해 복합재 로터 블레이드의 구조 거동

과 비행기 날개의 휘어짐, 휘어짐 방지, 복합재 로터 블레이드의 횡전단(transverse shear) 거동 등 비고전 효과의 중요성을 이해하는데 도움을 준다. 일반적으로 복합재 로터 블레이드는 스킨, 스파, 허니컴, 에어포일 형태를 유지시켜주는 폼과 웨이트 밸런스, 결빙방지 장치, 에어포일 머리 부분의 부식 방지 캡 등과 같은 여러 가지 구조물로 구성되어 있다. 로터 블레이드는 경량화와 고강도, 일체형 성형에 따른 제작편의와 성능향상이 요구되므로 다양한 복합재가 많이 사용되고 있다. 또한, 다양한 운영조건에 따

* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

** 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
연락처자, E-mail: jsbae@kau.ac.kr

*** 선임연구원, (주)한국항공우주산업

른 하중에 의한 피로수명에 대한 보증이 필요하다. 회전에 따라 발생하는 주기적인 공력하중은 블레이드에 높은 주파수의 반복응력을 유발시키므로 피로하중을 받게 되는 블레이드의 운항 안전성과 구조적 안전성과 성능향상을 위해 반드시 고려해야 한다.

복합재 빔을 연구하는 사람 누구나 등방성 재료의 빔을 해석하는 이론이 단순히 복합재 빔에 적용시키기가 어렵다는 것을 알 수 있다. 게다가 이런 방법의 이론 적용은 일반적으로 문제가 많다. 1940년대부터 1980년대 중반까지 쓴 빔 이론 논문에 비추어보면 문제를 적용시키기가 매우 어려운 것을 알 수 있다. 첫 번째 어려움으로 3-D 재료 상수를 단면 계수 방정식에 적용하기 어렵다는 점이다. 옛 이론의 대부분이 이방성 물질의 탄성 커플링, 초기 틀어짐이나 곡률 같은 현상을 다룰 수 없다. 두 번째로 인장 해석과 같은 고등 이론들은 엔지니어적으로 적용시키기에 문제점이 있다.

1980년대 중반부터 이 두 가지 문제점 해결에 발전이 있었다. Givatto(1983)[1]는 선형 탄성론을 기초로 구조(framework)를 사용하여 일반적인 복합재 빔 단면 해석에 선구자 역할을 했다. 비록 Borri와 Mantegazza(1985), Kosmatka와 Friedmann(1989)는 기하학적 비선형 문제라던지 휨 효과를 제대로 반영시키지 못했지만, 로터 블레이드의 동역학 비선형 문제에도 적용시켰다.

Berdichevsky(1980)[2]의 VAM(Variational Asymptotic Method)은 하나 혹은 그 이상의 작은 변수 값에 의존하는 정적인 점을 찾는 진행 과정을 단순화시키는 매우 유용한 수학적 방법이다. 고유 변수에 적용되는 정적인 점을 찾는 함수는 찾는 어떤 문제에도 적용 가능하다. 게다가 3-D 비선형 빔 같은 구조물의 해석을 비선형 1-D 해석이나 선형 2-D 해석으로 나눠서 해석이 가능하다. 이 방법은 6X6, 4X4 단면 강성계수를 도출할 수 있다. 이것은 단순 등방성 빔뿐만 아니라 복합재로 이뤄진 박벽 빔에도 적용할 수 있다. VAM의 이론적 기초로 빔 해석에 적용

하여 만든 컴퓨터 프로그램이 VABS다. 이런 발전으로 VABS의 Hodges(2006)의 이론은 두 가지 문제를 적용시킬 수 있을 뿐만 아니라 헬리콥터나 풍력발전기의 로터 블레이드에 적용시킬 수 있다.

VABS(Variational Asymptotic Beam Sectional Analysis)는 블레이드처럼 가로·세로비(aspect ratio)가 큰 3차원 모델을 적은 시간으로도 좋은 결과를 보여주는 툴이다. General Beam 해석과 관련한 여러 가지 이론 중 가장 정확하고, 여러 가지 단면정보 획득이 가능하다. 단면정보를 이용하여 3차원 변위, 변형률, 응력 해석이 가능하고 로터 블레이드 해석/설계를 위한 최적화 된 프로그램이다. 계산된 단면계수를 이용하며 이와 같은 기법은 기존의 다양한 연구 결과로부터 기준이 되는 비선형 3차원 빔 문제를 2차원이나 1차원으로 분리하여 계산한 결과가 일치함이 알려져 있다.[1]

2. VABS와 블레이드 해석

2.1 VABS의 이론적 기초

로터 블레이드, 비행기 날개, 우주 구조물과 같은 구조물들은 한 직경보다 다른 두 직경이 훨씬 큰 특징이 있다. 이런 휘어지기 쉬운 구조물은 1-D 빔으로 가정하여 계산하여야 한다. 이 계산 방법은 완벽한 3-D 형태의 모델에서 얻는 식보다 간단한 식으로 표현 할 수 있다. 이것을 하기 위해서는 다른 두 직경을 제거한 형태의 모델에서도 하나의 직경이 그 물체의 거동을 정확히 표현되어야 한다.

먼저 3-D 비선형 로터 블레이드에서 3-D 변형률은 회전 인장력을 1-D 변형률 값과 임의의 단면의 휘어짐으로 나눠진 식으로 표현할 수 있다.

$$\Gamma = \frac{1}{h} \Gamma_h w + \Gamma_s \epsilon + \Gamma_R w + \Gamma_l w' \quad (1)$$

여기서 Γ 는 3-D 변형률의 matrix 값이고 $\Gamma = [\Gamma_{11} \ 2\Gamma_{12} \ 2\Gamma_{13} \ \Gamma_{22} \ 2\Gamma_{23} \ \Gamma_{33}]$ 으로 표현된다. 휘어짐 함수는 $w = [w_1 \ w_2 \ w_3]$ 으로 표현되고, 1-D 변형률 값은 $\epsilon = [\gamma_{11} \ \kappa_1 \ \kappa_2 \ \kappa_3]$ 이고, $\Gamma_h, \Gamma_e, \Gamma_R, \Gamma_l$ 은 x_2 축과 x_3 축의 함수 값이다. 단면의 변형 에너지 값이나 빔의 변형 에너지값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$U = \frac{1}{2} \langle \Gamma^T D \Gamma \rangle \quad (2)$$

D 는 빔의 6×6 물성치 매트릭스이다. 여기서 간단한 3-D 탄성 빔 문제에서 변형 에너지를 최소화 하는 휨 함수의 답을 찾을 수 있다. 임의의 단면이나 이방성 재료를 다루기 위해서는 유한 요소법을 이용하여 휘어짐을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w(x_1, x_2, x_3) = S(x_2, x_3) V(x_1) \quad (3)$$

여기서 $S(x_2, x_3)$ 는 형상 함수이고, V 는 휘어짐으로 인한 노드점 변형의 세로 매트릭스 값이다. (3)식을 (2)식에 대입하고 3-D 문제의 필수 휨 값을 찾으면 다음과 (4)식으로 표현할 수 있다.

$$2U_0 = \frac{1}{h^2} V^T E V + \frac{2}{h} V^T D_{hs} \epsilon + \epsilon^T D_{ss} \epsilon \quad (4)$$

이 식에는 주어진 단면의 크기 값과 재료의 물성치 값의 정보를 포함한다. 이 식을 티모셴코 빔(Timoshenko-like Beam)같은 일반적인 빔 모델을 공학적으로 적용하기 위한 강성 매트릭스 형식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} & S_{56} \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & S_{46} & S_{56} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_1 \\ 2\gamma_2 \\ 2\gamma_3 \\ \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_3 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

VABS에서는 일반 빔(Classical Beam) 모델이나 티모셴코 빔(Timoshenko-like Beam), 블라조브 빔(Vlasov-like beam) 모델 등 3가지 모두 적용 가능하다.

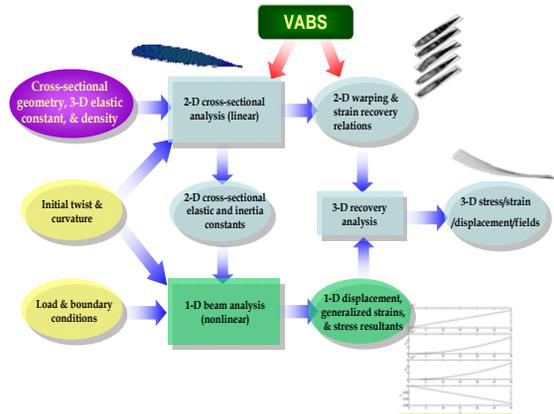


Fig. 1 VABS를 이용한 복합재 로터 블레이드 해석도

Fig. 1은 VABS를 이용하여 전체 복합재 로터블레이드 모델링 과정을 보여준다. 타원은 데이터를 나타내고, 사각형은 해석을 나타낸다. 단면 해석에서 단면의 좌표 정보, 물성치 같은 세부사항이 필요하다. 초기 곡률과 틀어짐은 1-D와 2-D해석에서 입력해야 하고, 1-D해석에서는 하중과 경계조건만이 영향을 미친다. 사용자는 단면의 메쉬작업과 물성치를 넣어주면 VABS를 이용할 수 있다. VABS의 해석결과로 단면의 물성치와 응력, 변형률의 Recovery 영역과 연결될 수 있는 값을 얻을 수 있다. 이러한 과정은 3-D 유한요소문제를 직접 모델링하고 해석하는 계산과정을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 티모셴코 빔 모델을 이용하여 연구를 진행했고, 3-D해석과정과 VABS의 1-D, 2-D과정을 수행하여 두 과정의 값(Displacement, Stress resultant)을 비교해 보기로 한다.

22 결과 및 검토

2.2.1 일정 두께의 외팔보(cantilever beam)

Fig. 2과 같이 사각형의 단면을 갖는 직선 외팔보에 대해 우측 끝단에 Table 1과 같은 하중조건이 가해지고 있으며, 외팔보의 크기와 재료 상수 값은 Table 2에 제시되어 있다.

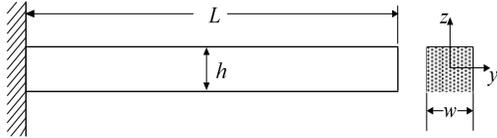


Fig. 2 일정 두께의 외팔보

Table 1. 일정두께의 외팔보 모델의 하중조건

하중방향	Fx	Fy	Fy
단위(N)	-	100	100
모멘트방향	Mx	My	Mz
단위(Nmm)	-	-	-

Table 2. 일정두께의 외팔보의 재료상수

Size	L	h	w
단위(N)	30	1	2
Property	E	G	v
단위(GPa)	70	26	0.33

위와 같은 조건을 이용하여 기본적으로 MSC. Software의 NASTRAN을 이용하여 정적 해석을 수행하였고, 검증 대상인 VABS를 통해 외팔보의 단면정보를 이용하여 강성행렬을 계산한 값을 이용하여 NASTRAN의 Beam analysis로 해석하였으며, Lag방향과 Bending방향의 변위를 비교하였고 Fig. 3와 Fig. 4에서 보는 것처럼 만족할만한 결과를 주고 있다.

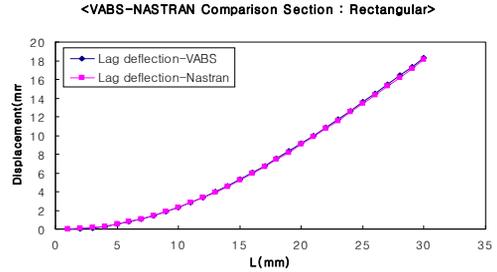


Fig. 3 일정두께 외팔보의 Lag Displacement

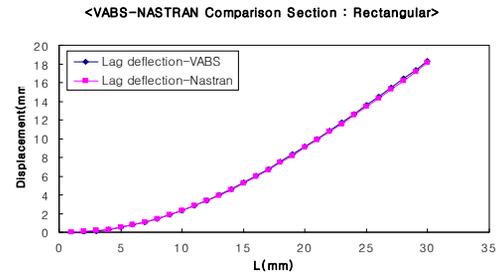


Fig. 4 일정두께 외팔보의 Bending Displacement

2.2.2 복합재 로터 블레이드(Composite Rotor Blade)

최종적으로 Fig. 5와 같이 실제 복합재 로터 블레이드를 모델링 하여 우측 끝단에 Table 3과 같은 하중조건이 가해지고 있으며, 로터 블레이드의 재료 상수 값은 Table 4에 제시되어 있다. 앞의 다른 예제와 마찬가지로 위와 같은 조건을 이용하여 기본적으로 MSC. Software의 NASTRAN을 이용하여 정적 해석을 수행하였고, 검증 대상인 VABS를 통해 직선보의 단면정보를 이용하여 강성행렬을 계산하고 그 값으로 NASTRAN의 Beam analysis로 해석하였다. 모멘트를 가한 결과와 일반 힘을 가한 결과의 Lag방향과 Bending방향의 변위를 비교하였고, 축방향 길이와 코드길이의 비가 7:1이라는 점을 볼 때 Fig. 5~8에서 보는 것처럼 만족할만한 결과를 주고 있다.

Table 3. 복합재 로터 블레이드의 하중조건

하중방향	Fx	Fy	Fy
단위(N)	-	10,000	10,000
모멘트방향	Mx	My	Mz
단위(Nmm)	1,216,000	-	-

Table 4. 복합재 로터 블레이드의 물성치

Material	MVOL	E(MPa)	G(MPa)	t(mm)
GF 0/90	1.73	19600	3040	0.31
GF ± 45	1.73	9000	8400	0.31
CF 0/90	1.48	54000	3730	0.355
CF ± 45	1.48	13500	26000	0.355
Glass Tape	2.014	53000	5900	0.25
Foam core	0.075	0	0	-
Stainless Steel	7.9	190000	73400	0.5
Honeycomb	0.024	0	0	0.6
Adhesive Film	1.2	2100	850	0.13

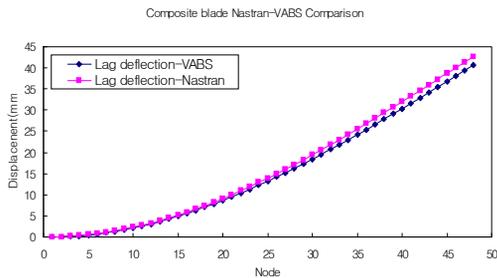


Fig.5 복합재 로터 블레이드의 Lag Displacement

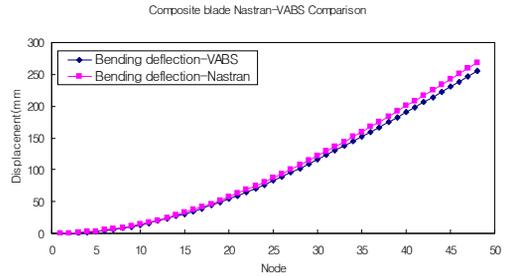


Fig. 6 복합재 로터 블레이드의 Bending Displacement

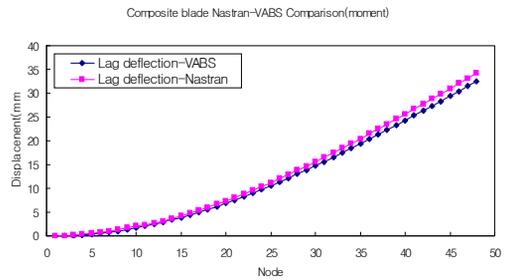


Fig. 7 복합재 로터 블레이드의 Lag Displacement(Moment)

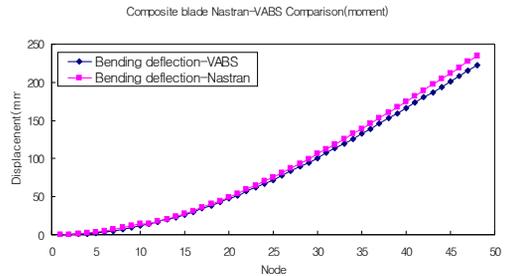


Fig. 8 복합재 로터 블레이드의 Bending Displacement(Moment)

2.2.3 Stress Resultant 비교

Table 5. Stress Resultant 결과

구 분	VABS	NASTRAN
Cantilever Beam	7.874GPa	7.884GPa
Tapered Beam	295.8MPa	295.5MPa
Tubular Beam	4.736GPa	4.653GPa
NACA0012	1.758GPa	1.762GPa
Composite Box-Beam	100.3GPa	100.3GPa
Composite Blade	226.5GPa	222.6GPa

4. 결 론

본 연구에서는 단면계수를 계산하여 Beam 해석을 한 결과와 사용코드를 이용한 FEM해석 결과를 비교하였다. 먼저 일반 금속 재료(Al-alloy)를 이용한 직선 외팔보와, 복합재 로터 블레이드 등을 이용하여 각각의 변위와 스트레스를 비교하였다. 한 개의 단면정보를 이용하여 단면계수를 이용하여 변위와 스트레스를 계산하였고 두 경우 모두 결과가 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 복합재 로터 블레이드를 해석함에 있어서도 단면이 변하면 모델링을 변할 때마다 해야 하는 단점이 있지만 원하는 위치의 단면을 수정하고 해석하기 위해서는 VABS를 이용하는 것이 더 효율적이라는 것이라 판단된다.

후 기

본 연구는 한국항공우주산업 및 한국항공우주 연구원의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Dewey, H. Hodges, "Nonlinear Composite Beam Theory" Vol.213 Progress in Aeronautics and Astronautics, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. Mar.20,2006
- [2] V. L. Berdichevsky. Variational - asymptotic method of constructing a theory of shells. PMM, 43(4):664-687, 1979
- [3] Wenbin, Yu and Dewey, H. Hodges, "The Timoshenko-like Theory of the Variational Asymptotic Beam Sectional Analysis" AIAA, 2003-1419, 44thAIAA/ASME/ASCE/AHS/ASCStructures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Norfolk, Virginia, Apr.7-10,2003
- [4] 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.
- [5] Wenbin, Yu and Vitali, V. Volovoi, "VALIDATION OF THE VARIATIONAL ASYMPTOTIC BEAM SECTIONAL ANALYSIS (VABS)" AIAA, Vol.40, No.10, Oct.2002, (2105-2112)
- [6] Wenbin, Yu and Vitali, V. Volovoi, "The Vlasov Theory of the Variational Asymptotic Beam Sectional Analysis" AIAA, 2004-1520, 5th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASCStructures, Structural Dynamics, and Materials Conference, PalmSprings, California, Apr. 19-22,2004