

pISSN 1229-3059 eISSN 2287-2302 Computational Structural Engineering Institute of Korea

# VABS를 이용한 높은 세장비를 가진 복합재료 보 구조의 차원축소 및 응력복원 해석기법에 대한 연구

안 상 호<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>신한대학교 자동차공학과

## A Study on Stress Recovery Analysis of Dimensionally Reducible Composite Beam Structure with High Aspect Ratio using VABS

Sang Ho Ahn<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Automotive Engineering, Shinhan University, Uijeongbu, 16644, Korea

#### Abstract

This paper presented the theory related to a two dimensional linear cross-sectional analysis, recovery relationship and a one-dimensional nonlinear beam analysis for composite beam with initial twist and high aspect ratio. Using VABS including related theory, preceding research data of the composite wing structure has been modeled and compared. Cross-sectional analysis was performed and 1-D beam was modeled at cutting point including all the details of real geometry and material. The 3-D strain distribution and margin of safety at recovery point was calculated based on the global behavior of the 1-D beam analysis and visualize numerical results.

Keywords : VABS, composite beam, Cross-sectional analysis, Reducible modeling, Recovery analysis

#### 1. 서 론

항공기 날개 구조물의 설계시 구조물은 강도(strength), 강성(stiffness), 안정성(stability)을 확보하고 예측하기 위하여 경제적인 측면을 고려하여 해석 모델을 구성해야 한다. 그러나 개발단계에서 형상이 빈번하게 수정되기 때문에 초기 설계단계에서의 3차원 해석모델 구현이 사실상 구성하기 어렵다. 이런 개발환경 때문에 변경되는 형상의 특성을 반영 하면서도 효율적인 정적, 동적 해석 및 피로해석을 수행할 수 있는 등가 모델링 기법(Hodges, 2007)이 필요하다. 최신의 항공기 날개나 틸트 로터, 터빈 블레이드, 그리고 풍력 블레이드 등은 성능의 최대화를 기하기 위해 고효율 유선형 에어포일을 채용하며, 내부의 스파나 표피 등을 이종의 복합 소재로 하는 세미 모노코크형 구조로 설계한다. 또한 테이퍼나 초기 비틀림각, 초기 원추각, 테이퍼 그리고 상반각과 같은

\* Corresponding author:

기하학적 비균일 특성을 적절히 활용하여 고성능으로 설계 하는 것이 일반화되어 있다. 블레이드 형상이 복잡해지고 진화 될수록 효과적인 모델링 기법도 다양하게 연구되고 있다. 기존의 상용 구조해석 프로그램을 이용한 고차원 유한요소 모델링에 의존하지 않으면서도 높은 정밀도를 갖는 일차원 보 또는 블레이드 이론을 자체적으로 개발하여 이를 이용한 고효율의 구조해석 체계를 구축되고 있다. 국내외의 연구 중에 Borri와 Mantegazza(1985), Hodges(1990)는 변형과 회전에 의한 미소 변형률이 존재한다는 사실에 입각하여 보의 차원 축소 모델링에 대한 연구를 진행하였다. Cesnik(1993) Popescu (1999), Yu 등(2002)의 이론을 기반으로 임의의 형상을 가진 복합재료 보에 대한 해석 코드의 개발이 진행되었다. 이러한 연구결과로부터 변분근사법에 기초한 유한요소법을 이용한 단면해석 코드(VABS)(Yu *et al.*, 2002)가 개발되었다. Park 등(2009)은 유한요소를 기반으로 한 단면특성 계산에 대한

Tel: +82-31-870-3683; E-mail: drshahn@naver.com Received June 9 2016; Revised August 30 2016; Accepted August 31 2016 © 2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons. org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

연구를 수행하였고, Do 등(2011)은 단면 해석을 위한 집합 연산에 관한 연구를 수행하였다. Kang 등(2011)은 Open CASCADE를 활용한 단면 해석 프로그램에 대한 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 VABS를 이용한 세장비를 가진 복합재료 보 구조의 차원축소 및 응력복원 해석기법을 소개하고자 한다. 선행 연구의 비교결과를 통해 효율성과 정확성을 입증하고, 복합재료로 구성된 날개 구조물에 대하여 차원이 축소 모델링을 구성하고 복원관계를 이용하여 원하는 지역에서 단면의 응력 및 변형률 분포를 차원 복원하고 시각적으로 형상화하였으며 구조 요건을 만족할 수 있는 효율적인 복원해석 과정을 기술 하였다.

### 2. 이 론

이 장에서는 단면 해석을 통한 차원축소와 강성행렬을 계산하고 1차원 보 모델을 구성하는 과정을 소개한 후, 차원축소 모델의 복원 수식 전개 과정을 전개한다.

#### 2.1 단면 해석을 통한 차원축소와 강성행렬

차원축소 모델을 정의하면 단면해석을 통해 형상특성과 재질특성을 행렬의 형태로 표현하는 것이다. 워핑함수를 이용하여 에너지 1차원 에너지 함수형태로 표현하고 계산된 행렬을 1차원 보 형태로 연결하는 것이다.



Fig. 1 Reductible model & recovery analysis

3차원 해석모델을 1차원으로 차원을 축소하기 위해 먼저 단면해석을 수행해야 한다. Fig. 1과 같이 단면해석을 통하여 강성행렬, 질량행랼 및 관성모멘트, 중립점 등을 획득할 수 있다. 날개 구조물과 같이 3차원의 비틀림이나 복잡한 곡률을 가진 에어포일 형상의 계산하고자 하는 적절한 단면위치를 선정하고, 이 위치에서 단면해석을 통해 단위길이당 변형률 에너지를 계산해야 한다. 3차원 변형률장은 탄성 변형률과 워핑벡터와 워핑벡터의 미분값을 포함하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\Gamma_{11} = \bar{\gamma}_{11} + x_3 \bar{\kappa}_2 - x_2 \bar{\kappa}_3 + \bar{w}_1'$$

$$2\Gamma_{12} = \bar{w}_{1,2} - x_3 \bar{\kappa}_1 + \bar{w}_2'$$

$$2\Gamma_{13} = \bar{w}_{1,3} + x_2 \bar{\kappa}_1 + \bar{w}_3'$$

$$\Gamma_{22} = \bar{w}_{2,2}$$

$$2\Gamma_{23} = \bar{w}_{3,2} + \bar{w}_{2,3}$$

$$\Gamma_{33} = \bar{w}_{3,3}$$

$$(1)$$

워핑함수의 항을 포함하고 있는 3차원 변형률을 식 (1)을 이용하여 표현할 수 있다. 변형률 에너지는 다음과 같다.

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

여기서, D는 복합재료의 강성행렬이다. 단면해석을 계산될 수 있으며 변형률 에너지의 정의를 통하여 식 (2)의 형태로 정리하면 표현하면 고전 복합재료 역학에서 정의한 강성 행렬을 얻을 수 있다. 횡전단 변형을 허용하는 Timoshenko 보 모델에 대한 변형률 에너지의 형태로 표현하게 되면 식 (3)과 같다.

$$2U = \overline{\varepsilon}^T A \overline{\varepsilon} + 2\overline{\varepsilon}^T B \overline{\varepsilon} + \overline{\varepsilon}^{'T} C \varepsilon' + 2\overline{\varepsilon}^T D \overline{\varepsilon}"$$
(3)

식 (3)을 변형률 에너지의 정의된 식 (2)에서 정의한 형태로 정리하면 6×6의 행렬을 얻을 수 있다. 식 (4)는 횡전단 변형을 허용한 Timoshenko 복합재료 보에 대한 강성행렬이다.

$$2U = \begin{cases} \overline{\gamma}_{11} \\ 2\gamma_{12} \\ 2\gamma_{13} \\ \overline{\kappa}_{1} \\ \overline{\kappa}_{2} \\ \overline{\kappa}_{3} \end{cases} \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} & S_{56} \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & S_{46} & S_{56} & S_{66} \end{cases} \begin{bmatrix} \overline{\gamma}_{11} \\ 2\gamma_{12} \\ 2\gamma_{13} \\ \overline{\kappa}_{1} \\ \overline{\kappa}_{2} \\ \overline{\kappa}_{3} \end{bmatrix}$$
(4)

#### 2.2 차원축소 모델의 복원

3차원 형상을 2차원 단면해석을 통해 행렬 형태로 만들 수 있다면 역으로 1차원 차원축소 모델을 3차원의 응력과 변형률 분포를 계산할 수 있다. 그 과정은 Yu 등(2002)에 전개 과정이 자세히 기술되어 있다. 보의 평형 방정식으로 부터 얻은 변형률의 1차 미분과 2차 미분을 얻고 복원이론에 의하여 응력이 표현되고 횡전단 변형을 허용하는 Timoshenko 보의 단면해석을 통해 강성 행렬을 얻을 수 있다.

Hodges의 운동 방정식으로부터 계산된 거동과 내부 하중을 계산하여 결과값인 보의 하중과 변위를 VABS에 입력하면 2차원 단면에서의 변형률과 응력의 분포 선도를 얻을 수 있다. 초기에 비틀림과 굽힘이 있는 보 형상에 대하여 워핑함수는 h/R과 h/l의 차수로 표현할 수 있다.

$$\tilde{w}(x_i) = (\tilde{V}_0 + \tilde{V}_{1R})\varepsilon + \tilde{V}_{1S}\varepsilon'$$
(5)

여기서,  $w(x_i)$  는 3차원 워핑함수,  $V_0$ 는  $2U_0$ 를 최소화할 때의 워핑함수,  $V_{1R}$ ,  $V_{1s}$ 는  $2U_1$ 을 최소화할 때의 워핑함수이다. 3차원 변형률을 변형률과 변형률의 1, 2차 미분항으로 표현된다. 변형률은 워핑함수와 변형률의 미분항으로 구성되며 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\Gamma = \left[ (\Gamma_a + \Gamma_R) (V_0 + V_{1R}) + \Gamma_{\varepsilon} \right] \varepsilon + \left[ (\Gamma_a + \Gamma_R) V_{1S} + \Gamma_l (V_0 + V_{1R}) \right] \varepsilon' + \Gamma_l V_{1S} \varepsilon''$$
(6)

여기서, 3차원 변형률은 [ $\Gamma_{11}, 2\gamma_{12}, 2\Gamma_{13}, \Gamma_{22}, \Gamma_{23}, \Gamma_{33}$ ] <sup>T</sup>이다. 그리고 1차원 보의 거동에 대한 유한요소 모델을 통하여 응력과 변형률을 계산할 수 있다.

$$\varepsilon = S^{-1}F \tag{7}$$

변형률의 미분항을 계산하기 위하여 Hodges의 운동 방정식[인용]을 이용한다. 응력에 대한 미분을 계산하여 나타 내면 아래와 같다.

$$F' = -RF - f = \begin{bmatrix} \tilde{K}_B & \tilde{0} \\ \tilde{e}_1 + \tilde{\gamma} & \tilde{K}_B \end{bmatrix} F - f$$
(8)

f는 1차원 보의 거동에 대한 내부 하중이다. 고차의 미분도 아래와 같이 계산된다.

$$F'' = (R^{2} - F')F + Rf - f'$$
  

$$F''' = (-R^{3} + RR' + 2R'R - R'')F$$
  

$$+ (-R^{2} + 2R')f + RF' - f''$$
(9)

식 (9)을 이용하여 1차원 보에 대한 미분값 ϵ', ϵ", ϵ"'을 계산할 수 있으며 다음과 같다.

$$\varepsilon' = S^{-1}F', \ \varepsilon'' = S^{-1}F'', \ \varepsilon''' = S^{-1}F'''$$
(10)

3차원 변형률은 식 (10)의 식에 의하여 차원 축소된 1차원

보에 대한 차원 복원 계산이 가능하다.

#### 3. VABS를 이용한 검증 모델

본 장에서는 VABS를 이용하여 박스형 보의 차원축소를 통한 강성 비교 검증, I-형 보의 1차원 거동 해석을 통한 VABS의 유효성 검증을 수행하였다.

#### 3.1 VABS를 이용한 상자형 보 모델의 검증

상자형 모델은 복합재 블레이드의 탄성 연성 특성을 효율적으로 모사할 수 있는 모델이다. 상자의 벽을 [ $\theta$ /- $\theta$ ] 혹은 [ $-\theta/\theta$ ]의 조합으로 구성하여 인장-비틀림 또는 굽힘-비틀림의 연성 특성을 부여할 수 있다. 더불어 복합재료의 물성을 부여하고 적층각을 변화시키면서 연성의 정도를 확장시킬 수 있다. 본 절에서는 상자형 모델의 등방성 재질을 부여한 CUS 모델과 비등방성 재질을 부여한 CAS 모델에 대한 수치적으로 검증하였다.



Fig. 2 Configuration of the cross-section of a box beam(Yu, 2010)

Fig. 2와 같이 이방성 재질로 구성된 상자모델에 대하여 단면해석을 수행하여 비틀림 강성을 비교해 보았다. 복합 재료로 구성된 블레이드의 단순 모사로 볼 수 있으며 연성

Table 1 Properties of thin-walled box beams

Outer Dimensions		Width a = $0.953$ in
Wall Thickness h=0.03		Height $b = 0.53$ in
CAS1	Right, Upper	$\left[\theta_{3}/-\theta_{3}\right]$
	Left, Lower	$\left[-\theta_{3}/\theta_{3}\right]$
CAS2	Right	$\left[\theta / -\theta\right]_{3}$
	Left	$\left[-\theta / - \theta\right]_{3}$
	Upper	$[\theta]_6$
	Lower	$\left[-\theta\right]_{6}$
Material	E <sub>t</sub> , E <sub>l</sub>	1141.9, 9.78GPa
	G <sub>lt</sub> , G <sub>tn</sub>	5.98, 4.79GPa
	Vlt, Vtn	0.42, 0.42

특성을 잘 나타낼 수 있도록 CAS1과 CAS2로 구분하여 6개의 적층수를 갖도록 모델링하였다. CAS1의 실험적인 결과는 Chandra 등에서 처음 소개되었고 많은 연구자가 소개한 대표적인 검증 모델이다.

Fig. 3은 CAS1을 적용하여 적층 각도가 변화함에 따라 비틀림 강성을 나타낸 결과이다. 단면 벽의 굽힘 변형률을 무시한 경우에 비틀림 강성에 큰 오차가 발생되어 VABS로 계산한 비틀림 강성보다 낮은 값을 갖는다. Fig. 4에서 복합재료가 적층된 CAS2 모델의 끝단에 하중 4.44N을 적용했을 때 모사된 비틀림 각에 대한 수치해석과 실험값을 비교하였다. VABS를 이용한 연성이 고려된 1차원 보해석 결과가 실험치와 근접함을 알 수 있다.









#### 3.2 VABS를 이용한 I-형 보 모델의 검증

I-형 복합재료 보 형상은 무베어링 헬리콥터 블레이드 시스템에서 피치운동을 자유롭게 하는 유연보를 모사하는 경우이다. 해석 모델은 Chandra 등의 실험연구에 이용된 모델이며 25.4mm×12.7mm 단면을 가지며 길이가 762mm 이며 적층구조와 단면은 Fig. 5와 같다. 그리고 3차원 유한 요소 모델과 단면해석을 통해 얻어진 강성행렬을 연결시켜 1차원의 보 모델을 구성하였다. Table 2는 해석 수행 시 이용한 재질의 물성을 나타내었다. I-형 보의 재질은 graphiteepoxy가 적용되었으며 적층형태는 웹에서 [Odeg/90deg]<sub>4</sub>와 플랜지 하단에서는 [(Odeg/90deg)<sub>3</sub>/(adeg)<sub>2</sub>]이다. 본 모델 에서는 α를 15deg로 설정하였다. 굽힘과 비틀림에 연관된 워핑으로부터 I-형 복합재료 보의 변형의 거동을 계산할 수 있으며, 최종적인 보의 변형은 인장과 면과 면내방향의 굽힘과 전단, 그리고 비틀림과 이의 변화율로 발생된다.



Fig. 5 Lay-up geometry of a I-type beam

 Table 2 Material properties and geometry information

 of I-type beam

Properties		Values	
Material	$E_l$ , $E_t$	141.9, 9.78GPa	
	$G_{12}$	6.13GPa	
	$v_{lt}$ , $v_{tn}$	0.42, 0.42	
Geometry	Length	762mm	
	Width×height	25.4×12.7mm	
	Wall thickness	1.016mm	
	Number of layer	8ply	
	Ply thickness	0.127mm	

차원축소모델은 단면해석 결과로 얻어진 강성행렬을 보의 길이 방향으로 균일 분할된 절점에 입력하여 연결하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 적충된 I-형 보의 끝단에 단위 비틀림 모멘트를 부여했을 때의 3차원 유한요소모델, VABS모델, Chandra 등의 실험과 비교하여 보의 길이 방향에 따른 비틀림 각과 굽힘 기울기를 나타낸 것이다. Fig. 6과 7의 결과에서 알 수 있듯이 보의 비틀림 각의 변화와 굽힘 기울기는 Chandra (1991)의 시험결과로 판단했을 때, VABS를 이용한 차원축소 1차원 모델의 해석결과가 3차원 유한요소모델을 적용한 결과보다 더 일치하고 있다.







#### Tig. 7 The bending slope under twist momen

## 4. 세장비가 큰 날개구조의 차원축소 및 복원해석

#### 4.1 단면해석을 통한 차원축소 모델링

복합재 블레이드의 이산화 모델링이 끝나면 차원축소를 위해 Fig. 8과 같은 이산화 구조형상을 생성하게 된다. 이때 생성 되는 요소망은 로터 블레이드 내부의 경계면에서 요소가 서로 일치해야 하며 중복되는 절점이 없어야 한다. 또한 로터 블레이드의 심재 부분과 같이 곡률이 없는 면에 대해서는 세밀한 요소가 크게 필요하지 않기 때문에 불필요한 요소 개수를 줄일 수 있다. 복합재료의 적층 각(0, 45, 90)은 유한요소 모델의 완료 후, 각각의 층에 해당하는 요소들을 그룹으로 나누고 각각의 단면의 물성정보에 기입하여 반영 한다. 정확한 단면해석 결과를 얻어내기 위하여 실물 블레이드의 형상과 동일하게 표현할 수 있도록 충분한 절점과 요소의 수를 갖는 유한요소 모델을 구성하였다.

Fig. 8와 같이 단면을 등가적인 강성행렬로 나타내기 위하여 복합재 블레이드의 형상이 급격히 변하는 부분과 재질이 가감



Fig. 8 Analysis model with 1-D beam for composite rotor blade

되는 구간을 선정하여 단면해석을 수행하였다. 이산화된 단면의 형상을 이용하여 VABS를 적용한 차원축소 과정으로 얻은 복합재 구조물에 대한 보 모델링 결과는 단면위치에 따른 기하



Fig. 9 Axial stiffness distribution of composite beam structure



Fig. 10 Flapwise stiffness distribution of composite beam structure

정보와 강성행렬 및 질량행렬이다. 강성행렬과 질량행렬을 각 절점에 입력하고 연결하면 1차원 보 모델을 완성할 수 있다. 절점의 위치는 VABS를 통해 얻어진 기하정보인 중립점이다. Fig. 9와 10은 복합재로 이루어진 날개 구조물의 강성 분포을 나타낸다. Fig. 9에서 축방향의 강성은 힘의 단위로 표현되며 최대 2.527×10<sup>8</sup>의 값을 가진다.

Fig. 10에서 날개의 수직방향의 강성은 힘과 거리의 곱으로 표현되며 날개가 장착되는 중심부위이며 최대 1.09×10<sup>12</sup>의 값을 가진다

#### 4.2 복원해석을 통한 여유마진 산출

적용된 날개 구조물의 강도와 강성은 MIL-S-8698에 "Class I"로 분류된 구조하중 배수인 -0.5g~+3.5g를 만족 하여야 한다. 적용된 하중의 축방향 원심력 Fx=225kN이고 적용된 모멘트 My=1060 N-M, Mz=1690 N-M로 설정 하였다. 보 해석에서 설계 하중을 입력하고 VABS의 복원 해석을 통하여 구조해석을 수행하면 날개 구조물 단면의 집중 응력이 발생하는 지역, 최대 변형률이 발생하는 지역을 예측할 수 있다. VABS를 통해 축방향의 위치(r/R=0.295)에서 복원된 변형률을 계산하였다. 그리고 수치해석 데이터는 후처리 해석을 통해서 요소 별로 평균값을 적용하여 매평하면 Fig. 11과 같다.



Fig. 11 Strain recovery analysis result for composite beam structure

Fig. 11과 같이 ε<sub>11</sub>을 기준으로 볼 때 최대 변형률이 발생하는 지점은 스킨의 상단지점이다. 이는 굽힘 모멘트에 의한 Mc/I 관계에 의해 계산된 위치와 동일하다. 이때 날개 구조물의 설계 포인트는 격벽의 위치, 스킨 두께 및 적층 시퀀스이며 이를 조정하여 설계를 변경할 수 있다.

Table 3을 통해 날개 구조물의 정적 강도를 평가하기 위한 허용값과 VABS를 통해 계산된 최대 변형률을 계산하고 여유마진을 계산하였다. 허용치가 적은 유리섬유 ±45가 적용 되어 있고 최상단 위치에 적용되어 있기 때문에 여유마진의

Table 3 Material allowable and margin of safety, location r/R=0.295

Matorial	Allowable	Max.	Margin of
Material	strain	strain	safety
Carbon Fabric 0/90	10300	3094	+2.32
Carbon Fabric 45	8890	3111	+1.85
Carbon Layer	10700	3072	+2.48
Glass Fabric 0/90	13200	3144	+3.19
Glass Fabric 45	12000	3960	+2.03
Glass Roving	23300	3175	+6.33

수준이 가장 낮다. 차원 축소된 보로부터 복원해석을 한 이후 최대변형률 분포의 유효성은 직접적으로 날개 구조물의 정적실험을 통해 예측할 수 있고, 이후 고유진동수 실험을 통한 해석치의 비교를 통해 간접적으로 예측할 수 있다.

#### 5. 결 론

세장비가 크고 복잡한 재질로 이루어진 복합재 날개 구조물에 3차원 유한요소모델을 적용하는 것은 많은 시간과 노력이 필요하다. 본 논문에서는 VABS를 이용한 보의 차원축소 모델에 대한 유효성을 검증하기 위해 선행연구 모델을 활용 하여 기존 연구결과를 수치적으로 비교하였다.

실물과 가장 가까운 복합재 날개 구조물의 3차원 형상에 단면해석을 적용하여 정밀한 단면의 이산화를 수행하고 VABS를 이용하여 1차원 보 모델링을 수행하였다. VABS를 통해 계산된 변형률의 복원해석 결과를 매핑하여 가시화 하였다. VABS는 복원해석을 통하여 다양한 재료로 적층되어 있는 항공기의 개발과정에서 일어날 수 있는 변화를 예측하고 계산하여 설계변수를 적절히 수정하여 여러 단계로 이루어 지는 개발 단계에서 3차원 유한요소 해석을 대체하고 비용과 시간을 줄일 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 논문은 2016년도 신한대학교 학술연구비 지원으로 연구되었음.

#### References

- Borri, M., Mantegazza, P. (1985) Some Contributions on Structural and Dynamic Modeling of Helicopter Rotor Blades, *l'Aerotecnica Missili e Spazio*, 64, pp143~154.
- **Cesnik**, C.E.S., Hodges, D.H. (1993) Stiffness Constants for Initially Twisted and Curved Composite Beams,

Applied Mechanics Review, 46, pp.211~220.

- Chandra, R, Chopra, I. (1991) Experiment and Theoretical Analysis of Composite I–Beams with Elastic Couplings, AIAA J., 29, pp.2197~2206.
- Do, H.S., Cho, J.Y., Park, I.J., Jung, S.N., Kim, T.J., Kim, D.H. (2011) Development of Program for Modeling of Cross Section of Composite Rotor Blade, J. Korean Soc. Aeronaut. & Space Sci., 39(3), pp.261~268.
- Hodges, D.H. (1990) A Review of Composite Rotor Blade Modeling, AIAA J., 28, pp.561~565.
- Kang, Y.C., Cho, J.Y., Dhadwal, M.K., Jung, S.N., Kim, T.J. (2011) Development of Program for Modeling of Cross Section of Composite Rotor Blade Using Open CASCADE, J. Korean Soc. Aeronaut. &

Space Sci.,, pp.1787~1791.

- Park, I.J., Jung, S.N., Cho, J.Y., Kim, D.H. (2009) A Study on Calculation of Cross-Section Properties for Composite Rotor Blades Using Finite Element Method, J. Korean Soc. Aeronaut. & Space Sci., 37(5), pp.442~449.
- Popescu, B., Hodges, D.H. (1999) On Asymptotically Correct Timoshenko-like Anisotropic Beam Theory, Int. J. Solids & Struct., 37, pp.535~558.
- Yu, W., Hodges, D.H., Volovoi, V.V., Cesnik, C.E.S. (2002) On Timoshenko-like Modeling of Initially Curved and Twisted Composite Beams, *Int. J. Non-Linear Mech.*, 39, pp.5101~5121.

Yu. W. (2010) VABS Manual for Users.

요 지

본 논문에서는 풍력 블레이드와 같이 세장비가 크고 초기 비틀림이 존재하는 복합재료로 구성된 블레이드에 대한 이차원 단면의 차원축소와 복원관계를 이론적으로 기술하였다. 그리고 VABS 이용한 보의 차원축소모델에 대한 유효성을 검증하기 위해 선행연구 모델을 활용하여 기존 연구결과를 수치적으로 비교하였다. 실물과 가장 가까운 날개 구조물 2차원 형상에 단 면해석을 적용하여 정밀한 단면의 이산화를 수행하고 VABS를 이용하여 블레이드의 특성(질량행렬, 강성행렬)을 포함한 1 차원 보 모델링을 수행하였다. 1차원 보 모델을 통해 세장비가 큰 날개 구조물의 거동을 확인하고 내부하중을 계산하여 단 면위치에서 변형률 복원을 수치적으로 계산하고 이산화된 단면에 수치적으로 매평하여 시각적으로 확인하고 여유마진을 계 산하였다.

핵심용어 : VABS, 복합재 보, 단면해석, 차원축소 모델링, 복원해석