

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(10), 920-927(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.10.920

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

복합재 로터 블레이드의 차원축소와 복원해석을 위한 블레이드 해석 라이브러리 개발

장준환*, 이 환

Blade Analysis Library Development of Dimension Reducible Modeling and Recovery Analysis for Composite Rotor Blades

Jun Hwan Jang* and Hwan Lee
Koreanair R&D Center

ABSTRACT

In this paper, numerical results of sectional analysis and stress recovery were compared with the results of VABS through the blade analysis library. The results of recovery analysis for one-dimensional model including the stiffness matrix is compared with the calculated three-dimensional stress results of three-dimensional FEM based on the principle of virtual work. We discuss the configuration of the blade analysis library and compare verifications of numerical analysis results of VABS. Blade analysis library through dimensional reduction and stress recovery is intended to be utilized in conjunction with pre- and post-processing of the analysis program of the composite blade, high-altitude uav's wing, wind blades and tilt rotor blade.

초 록

본 논문에서는 블레이드 해석 라이브러리를 통해 단면해석 및 응력복원 해석 결과를 VABS의 결과와 비교하였다. 강성 행렬로 연결된 1차원 보 모델을 가상일의 원리에 의해 계산된 에너지를 복원 이론에 기반한 차원 복원해석 과정을 통해 계산된 응력과 3차원 해석모델과 비교하였다. 블레이드 해석 라이브러리의 구성, 입력 및 출력 형태, 차원 축소와 복원을 통한 로터 블레이드의 구조해석 프로시저를 기술하고, 블레이드 해석 라이브러리의 검증은 고형모델, 박 벽 모델의 단면해석, 3차원 복합재료 유한요소 모델로 구성하여 VABS를 통하여 검증하였다. 차원 축소와 복원해석을 통하여 블레이드 해석 라이브러리는 복합재료 블레이드의 전후처리 프로그램과 연계되어 고고도 무인기, 로터 블레이드, 풍력 블레이드 및 틸트로터 블레이드의 모델링에 활용될 수 있을 것이다.

Key Words : Composite Rotor Blade(복합재 로터 블레이드), Sectional Analysis(단면해석), Recovery Analysis(복원 해석), VABS(변분 접근 보 단면 해석)

† Received : May 14, 2015 Revised : July 24, 2015 Accepted : August 15, 2015

* Corresponding author, E-mail : jhjang@koreanair.com

I. 서론

항공기 구조설계 과정의 경우 일반적으로 정확한 응력해석 및 진동해석을 위해 유한요소해석이 사용된다. 하지만 정교한 해석을 위하여 실제 구조와 거의 유사한 세부적인 3차원 유한요소해석 모델을 구축하는 것은 많은 시간과 인적 자원이 소요되며, 신뢰도 있는 해석 모델의 형성을 위해서는 많은 경험과 노하우가 필요하다. 또한 정밀한 3차원 모델의 경우 오히려 해석결과에 대한 정성적인 물리적 경향의 파악이나 공탄성 해석과 같이 응용해석을 위해서 요구되는 데이터의 추출에 있어서는 만족스럽지 못한 결과를 제시하는 경우가 종종 발생한다. 또한 초기설계 단계에서와 같이 구조 및 공력 형상에 대한 구체적인 자료가 불충분하며 형상의 변화가 빈번한 경우 매번 3차원 구조 모델을 변경한다는 것은 거의 불가능한 일이다. 특히 복합재 블레이드의 거동을 예측하기 위해 차원축소를 통하여 1차원의 보 모델을 구성하는 것이 일반적이다. 국외의 연구 중에 Chen[1]은 차원 축소 모델링을 위한 단면해석 프로그램에 대한 비교연구를 통해 PreComp, VABS(Variational Asymptotical Beam Sectional Analysis), FAROB, CROSTAB, BPED의 특성을 기술하고 단면해석 성능을 비교하였다. Hu [2]는 비선형 해석을 통한 1차원 보의 거동을 계산하는 GEBT[3]와 VABS[4]를 이용한 단면해석과 복원을 수행하는 과정을 최적화하는 프로그램 VABS-IDE에 대한 연구를 수행하였다.

국내에서도 효율적인 차원 축소를 위한 단면해석에 대한 연구가 이루어졌는데 박일주[5]는 유한요소를 기반으로 한 단면특성 계산에 대한 연구를 수행하였고, 김광식[6, 7]은 로터 블레이드의 형상의 모델링과 요소생성 및 단면해석 데이터의 형상화에 관한 연구를 수행하였다. 도형수[8]는 단면 모델링 프로그램 KSec2D의 모델링 집합연산에 관한 연구를 수행하였고, 강연철 [9]은 Open CASCADE을 활용하여 복잡하게 모델링 된 로터 블레이드의 단면을 효율적으로 설계할 수 있는 형상 단면 모델링, 요소생성 및 단면해석 프로그램에 대한 연구를 수행하였다. 본 논문에서 개발된 블레이드 해석 라이브러리를 통해 단면해석 결과와 Hodge와 Yu[10]를 통해 개발된 VABS의 결과와 비교하고, 강성 행렬로 연결된 1차원 보 모델을 가상일의 원리에 의해 계산된 에너지를 복원 이론에 기반하여 차원 복원해석을 통해 계산된 응력과 3차원 해석모델과 비교함으로써 효율성과 정확성을 비교하여 블레이드 해석 라이브러리의 개발현황과 응용사례를 소개하고자 한다.

II. 이론

2.1 보의 유한요소해석

블레이드 라이브러리는 보의 유한요소 평형방정식 Bathe[11]에서 기술한 형태를 함수형태로 적용하였다.

$$\hat{K}\hat{u} = \hat{f} \text{ where } \hat{K} = \sum_{e=1}^{n_b} \hat{K}_e = \sum_{e=1}^{n_b} \int_0^{L_e} \hat{B}_e^T K_s \hat{B}_e dz \quad (1)$$

여기서 n_b 는 요소의 수이고 L_e 는 요소의 길이이며 \hat{u} 는 변위이다. 평형방정식은 외력 \hat{f} 에 의해 변위와 회전각이 생긴다. 보의 유한요소 강성행렬 \hat{K}_e 는 단면 강성행렬 K_s 와 변형률-변위 행렬 \hat{B}_e 로 표현된다. 단면의 요소는 라그랑지안 내삽 함수가 사용된다.

2.2 차원축소를 위한 보의 단면해석

1차원 보 해석의 정확성은 단면 강성행렬을 정확하게 계산해 내는가에 따라 결정된다. 보의 단면에 적용하는 힘과 모멘트는 강성행렬 K_s 와 선형의 관계를 가진다. 보의 단면에서 한 점에서 작용하는 응력과 변형률은 다음과 같이 3차원 텐서로 표현할 수 있고 Hook'law가 적용된다.

응력과 변형률은 전체 변위는 $s = Zr + N$ 으로 표현되는데 여기서 Zr 은 강제운동에 따른 변위이고 Nu 는 면내 및 면외방향의 워핑에 의한 변위를 의미한다. N 은 형상함수이다. 미소변형일 때 변형량은 텐서의 형태로 표현할 수 있으며 아래와 같다.

$$\epsilon_{\alpha\beta} = 1/2(\partial s_\alpha / \partial \beta + \partial s_\beta / \partial \alpha), (\alpha, \beta = x, y, z) \quad (2)$$

$\epsilon_{\alpha\beta}$ 는 미소변위이며 편미분의 형태를 나타낸다. 변형량은 변위성분과 응력성분의 편미분의 형태로 정리할 수 있고 아래와 같이 표현된다.

$$\epsilon = SZ\psi + Bu + SN \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3)$$

여기서 $\psi = (T_r + \frac{\partial}{\partial z})r, T_r, r = [0, 0, 0, \tau_y, -\tau_x, 0]$ 이고 변형률-변위 행렬 B 는 아래와 같다.

$$B = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & \partial/\partial y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \partial/\partial x & \partial/\partial y & 0 \end{bmatrix}^T$$

2.3 가상일의 원리

강성행렬의 역행렬인 F_s 를 계산하기 위해 단면평형 방정식을 계산해야 한다. 이 때 가상일의 원리를 이용하여 2차의 선형 편미분 방정식을 계산한다. 가상일의 원리는 $\delta W = \delta W_e + \delta W_i = 0$ 이며 아래 행렬로 정리된다. 내력에 의한 가상일은 (4)의 식과 같다.

$$\delta W_i = \int_{\Omega} \delta \varepsilon^T \sigma d\Omega = \begin{bmatrix} \delta u_{\partial z} \\ \delta u \\ \delta \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & C & L \\ C^T & E & R \\ L^T & R^T & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\partial z} \\ u \\ \psi \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 정리된 행렬 성분은 아래와 같다.

$$A = \sum_{e=1}^{n_e} \int_A Z_e^T S_e^T Q_e Z_e dA, R = \sum_{e=1}^{n_e} \int_A B_e^T S_e^T S_e Z_e dA$$

$$E = \sum_{e=1}^{n_e} \int_A B_e^T Q_e B_e dA, C = \sum_{e=1}^{n_e} \int_A B_e^T Q_e N_e dA$$

$$L = \sum_{e=1}^{n_e} \int_A Z_e^T S_e^T Q_e N_e dA, M = \sum_{e=1}^{n_e} \int_A N_e^T S_e Q_e N_e dA$$

여기서 n은 이산화 된 단면의 요소의 개수이고 n_e 는 절점의 개수이다. 단면의 외력에 의한 가상일은 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\delta W_e = \int_A \frac{\partial(\delta s^T p)}{\partial z} dA = \begin{bmatrix} \delta u_{\partial z} \\ \delta \\ \delta \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ P_{\partial z} \\ \theta \end{bmatrix} + \delta r^T (\theta_{\partial z} - T_r^T \theta) \quad (5)$$

단면의 내력과 외력에 의한 가상을 2차의 선형 편미분 방정식의 형태로 도출할 수 있고 강성행렬을 계산하기 위해 사용된다.

$$Mu_{\partial z} + (C - C^T)u_{\partial z} + L\psi_{\partial z} - Eu - R\psi = 0$$

$$L^T u_{\partial z} + R^T u + A\psi = 0$$

$$\theta_{\partial z} = T_r^T \theta \quad (6)$$

2.4 단면 평형 방정식

가상일에 의해 계산된 식 (6)에 구속조건을 적용한다. 아래의 응력과 변형량의 관계를 이용하면 (7)의 식으로 표현할 수 있다.

$$Kw = f \rightarrow \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ 0 & K_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서

$$K_{11} = \begin{bmatrix} E & R & D \\ R^T & A & 0 \\ D^T & 0 & 0 \end{bmatrix}, K_{12} = \begin{bmatrix} (C^T - C) & -L & 0 \\ L^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$w_1 = [u^T \ \psi^T \ \lambda_u^T]^T, \quad w_2 = [\partial u^T / \partial z \ \partial \psi^T / \partial z \ \lambda_{u_{\partial z}}^T]^T$$

$$f_1 = [0^T \ \theta^T \ 0^T]^T, \quad f_2 = [0^T \ (T_r^T \theta)^T \ 0^T]^T \quad \text{이다.}$$

단면의 외력과 내력의 가상일의 원리로부터 도출된 식(7)로부터 단면의 강성행렬의 역행렬 F_s 로 표현된 식을 계산할 수 있다.

$$F_s = W^T G W, K_s = F_s^{-1} \quad (8)$$

2.5 변형률 및 응력 복원

보의 평형방정식으로부터 θ 가 결정되 단면의 변형량은 다음과 같이 정리된다. 응력과 변형률은 가우스 점 또는 요소를 기준으로 계산할 수 있다.

$$\varepsilon_e = S_e Z_e \psi_e \theta + B_e U_e \theta + S_e N_e U_{\partial z, e} \theta \quad (9)$$

여기서 $U_e, U_{\partial z, e}, \psi_e$ 는 요소의 자유도를 계산할 때 쓰는 배열이고 응력은 $\sigma_e = Q_e \varepsilon_e$ 의 관계로부터 계산할 수 있다.

III. 블레이드 해석 라이브러리

3.1 블레이드 해석 라이브러리 구성

3차원의 복합재 블레이드 모델을 1차원의 보로 축소시키기 위해서 강성행렬과 질량행렬의 계산과정이 필요하다. 이때 2차원 단면 이산화 과정이 필요하고, 고려된 위치에서 유한요소로 구성된 이산화 모델을 구성해야 한다. 여러가지 복합재의 재질 특성과 형상정보를 적절히 구분하여 전처리 도구로 유한요소모델을 만들어야 한다. 블레이드 해석 라이브러리는 Matlab을 기반으로 개발되었다. 국내 연구자들에 의해 개발된 독립 프로그램과 다르게 블레이드의 형상 모델링의 기능은 없다. 실제 개발된 블레이드의 모델링은 외부/내부적으로 적층 물에 따라 정밀하게 설계되어 있고 형상을 왜곡하지 않고 올바르게 표현하기 위해서는 설계 데이터를 바로 읽고 단면해석을 수행하여야 한다. 블레이드 해석 라이브러리는 요소 및 격자를 상용 프로그램에서 생성하고 이를 분석하는 모듈을 포함하고 있다.

Figure 1에서 블레이드 해석 라이브러리의 계

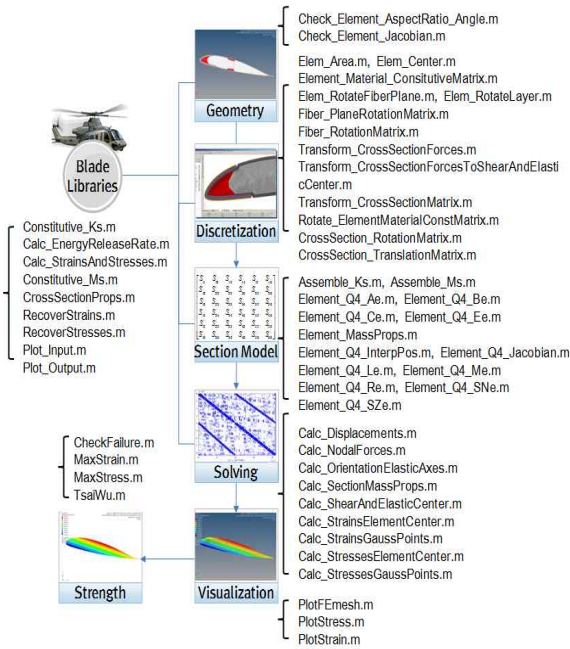


Fig. 1. Configuration of Blade Analysis Library

층구조를 나타내었다. 블레이드 해석 라이브러리는 절점과 요소 정보를 검사하는 부분, 삼각형 또는 사각형 요소로 이루어진 형상의 강성을 계산하는 부분, 하중 및 구속조건을 입력하여 응력 및 변형률을 계산하는 부분, 결과 데이터를 형상화하는 부분으로 구분할 수 있다. 그리고 형상화된 해석 데이터에서 최대 응력, 최대 변형률, Tsi-Wu의 Criteria를 선택하여 구조물의 이상 유무를 판단할 수 있도록 구성하였다.

3.2 블레이드 해석 라이브러리 입력

차원축소를 통한 보 모델링을 수행하기 위해서 유한요소모델의 요소와 절점의 수는 형상의 특성을 표현할 수 있도록 충분히 나누어야 한다. 절점 및 요소의 수의 감소는 최적설계 과정에 있어서 계산시간의 감소를 위한 필수조건이지만 보의 연성 특성을 정확하게 결정할 수 있는 충분한 요소가 필요하다.

Figure 2는 실물과 동일한 블레이드 단면이다. 블레이드의 해석 라이브러리는 요소의 수, 절점의 수 및 각각의 삼각형 요소와 절점이 입력된다. 절점 정보는 (node number, y, z) 이 입력된다. 까지 입력된다. 요소 정보는 해석의 정확도를 향상시키기 위하여 삼각형 요소는 6개, 사각형 요소는 8개의 절점의 인덱스가 입력된다. 이는 2차 형상함수를 적용하여 차원 복원을 수행한 후 응력과 변형률의 정확도를 향상시키기 위함이다.

적용된 재질 정보는 등방성 또는 이방성 재질

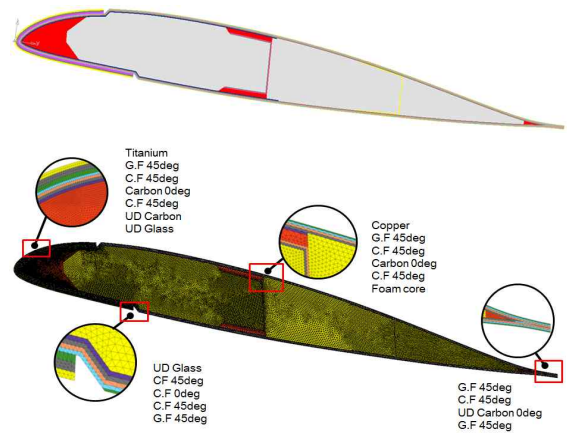


Fig. 2. Example of Blade Section Discretization

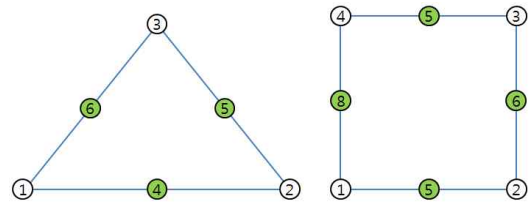


Fig. 3. Numbering of Tri & Quad Element

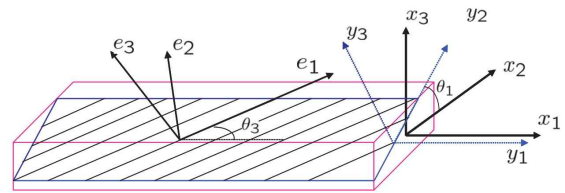


Fig. 4. Laminate Sequence Angle & Section Rotational Angle

특성을 입력된다. 재질은 일반적인 복합재료 입력값과 동일하고 다음과 순서로 입력된다.

$$(E_{11}, E_{22}, E_{33}, G_{12}, G_{13}, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, \rho)$$

각 요소에 적용 재질 정보를 입력하기 위하여 (element number, material number, fiber angle, fiber plane angle)가 입력된다.

3.3 블레이드 해석 라이브러리의 출력

차원축소 과정으로 얻은 복합재 구조물에 대한 보 모델링 결과는 단면위치에 따른 기하정보와 강성행렬 및 질량행렬이다. 단면해석 과정에서 면적, 관성값, 가중 계수 도심을 계산하여 인장 및 굽힘강성과 인장 중심을 계산하며, 전단 강성 계수를 이용하여 워핑 벡터를 계산하고 이를 이용해 전단 중심과 비틀림 강성을 계산한다. 블레이드 해석 라이브러리의 결과물은 아래의 6

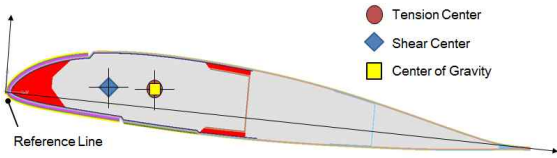


Fig. 5. Geometry & Axis of Blade Section

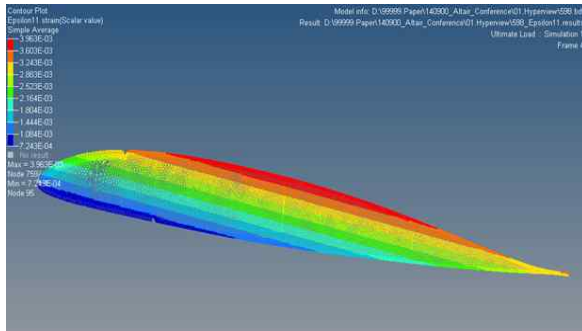


Fig. 6. Strain Distribution Example of Beam Model using Dimensional Recovery Analysis

by 6 행렬은 강성행렬을 포함하고 있으며 고전 복합재료 역학에서 얻어지는 강성 행렬과 동일한 형태를 가진다. 강성행렬과 더불어 탄성 중심, 기하중심, 질량중심 및 단위길이당 질량을 계산한다. 블레이드 해석 라이브러리에서는 텍스트 형태로 출력된다.

Figure 5는 블레이드의 단면 형상의 기하정보와 블레이드의 앞전의 축을 기준으로 한 기하정보이다. 차원이 축소된 1차원 보 모델을 구성할 때, 블레이드의 단면을 기준으로 각 단면의 인장중심을 연결하여 모델을 구성한다.

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ & & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ & & & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ & & & & S_{55} & S_{56} \\ & & & & & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_z \end{Bmatrix}$$

SYM.

1차원 블레이드 보 모델을 구성한 이후 각 단면에서 구성된 블레이드의 하중을 입력하여 변형량과 응력의 분포를 계산할 수 있다. 블레이드 해석 라이브러리에서는 계산은 응력과 변형률을 단면의 유한요소에 분포한다. 그리고 사용자가 해석결과의 이상유무를 판단할 수 있도록 상용 후처리 프로그램의 양식에 맞추어 출력한다. Fig. 6은 블레이드 해석 라이브러리를 이용하여 변형률 복원 해석을 수행한 결과이다.

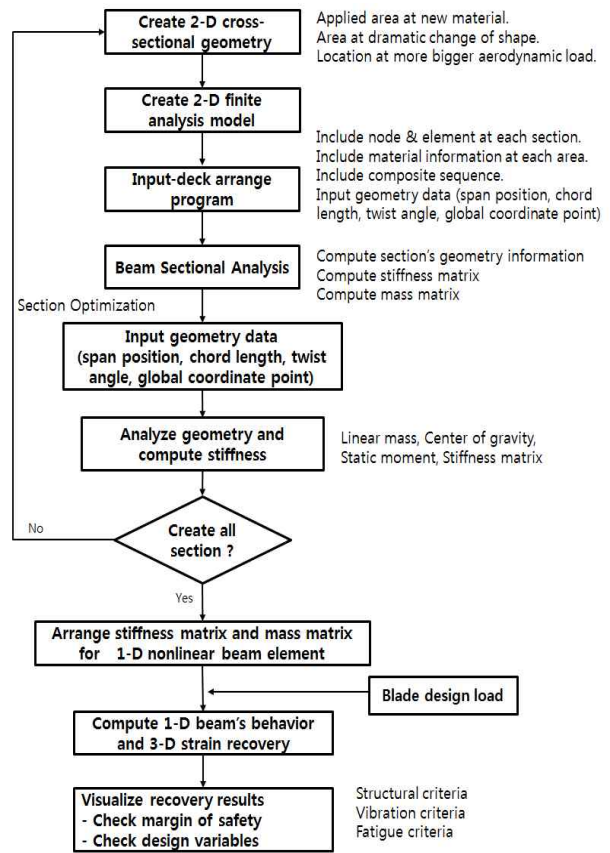


Fig. 7. Structural Analysis Procedure of Composite Rotor Blade

3.4 로터 블레이드 차원 축소 및 복원 해석 프로시저

Figure 7에서 기술된 과정과 같이 차원축소를 통해 복합재 블레이드의 설계 효율성을 극대화할 수 있다. 차원이 축소된 1차원 보 모델의 응력과 변형률 복원을 통해 1차원 보 모델에 3차원 수치결과를 매핑하여 해석결과를 가시화 할 수 있다. 블레이드의 설계하중을 입력하여 차원이 축소된 모델의 각 단면에서 계산된 강성행렬을 이용하여 응력과 변형률을 블레이드의 강도와 진동 및 피로요건을 만족하게 되면 유한요소로 구성된 블레이드 단면에 3차원 응력 또는 복원 변형률을 매핑한다. 이러한 결과를 통해 설정된 설계변수를 수정하여 단면해석을 반복하고 최적의 구조요건을 만족하는 설계변수를 확정하여 구조적인 여유마진을 계산한다.

IV. 수치해석 검증 예제

본 절에서는 블레이드 해석 라이브러리의 수치해석 결과를 검증하기 위해 단면해석과 차원복

Table 1. Applied Material of Numerical Analysis

Material	Case#1	Case#2	Case#3	Case#4
E_{11} (Pa)	100	$100/\alpha$	480	1.873E7
E_{22} (Pa)	100	$100/\alpha$	120	1.364E6
E_{33} (Pa)	100	$100/\alpha$	120	1.364E6
G_{12} (Pa)	41.667	$41.667/\alpha$	60	7.479E5
G_{13} (Pa)	41.667	$41.667/\alpha$	60	6.242E5
G_{23} (Pa)	41.667	$41.667/\alpha$	50	6.242E5
ν_{12}	0.2	$0.2/\alpha$	0.19	0.3
ν_{13}	0.2	$0.2/\alpha$	0.19	0.3
ν_{23}	0.2	$0.2/\alpha$	0.26	0.3
ρ Kg/m ³	1	$1/\alpha$	1	1.45E-4

Table 2. Configuration & Material Information of Numerical Analysis

Geometry	Element Type	Material
Solid Square	Quad4	Case #1, #2
Three Cells	Quad4	Case #1, #3
Solid Square	Quad4	Case #4

원 해석 결과를 VABS의 결과와 비교하였다. 단면해석은 두 가지의 등방성 재질로 구성된 고형 사각 단면과 이방성 재질이 적용된 박스의 사례로 구분하여 수치결과를 VABS의 결과와 비교하였다. 그리고 3차원 유한요소 해석과 1차원 차원 복원 해석 모델의 3차원 응력을 추출하여 차원 축소된 1차원 보 해석모델의 정확성과 효율성을 비교하였다. 수치해석 모델의 Fig. 6, Table 1 및 Table 2에서 재질과 형상을 구분하여 나타내었다.

4.1 등방성 재질이 적용된 사각면의 단면 해석 결과 비교

블레이드 해석 라이브러리와 VABS는 이론적 기반이 다르지만 유한요소기반으로 강성행렬을 계산하기 때문에 비교하기 용이하다. 블레이드 해석 라이브러리의 첫번째 검증모델은 등방성 재질 2개가

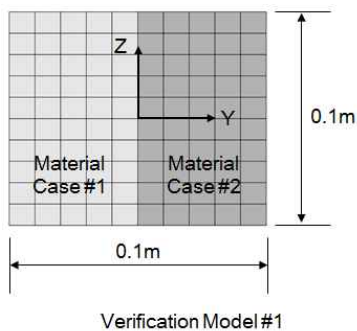


Fig. 8. Verification Model #1 of Blade Analysis Library

Table 3. Stiffness Results Comparison of Rectangle using Blade Analysis Library & VABS

Stiffness	Stiffness by VABS				
	a=1	a=10 ²	a=10 ³	a=10 ⁴	a=10 ⁵
$K_{S,11}$	3.49E-1	1.38E-1	1.68E-1	1.73E-1	1.73E-1
$K_{S,22}$	3.49E-1	1.77E-1	1.75E-1	1.75E-1	1.75E-1
$K_{S,33}$	1.00E+0	5.05E-1	5.01E-1	5.00E-1	5.00E-1
$K_{S,44}$	8.34E-4	4.21E-4	4.17E-4	4.17E-4	4.17E-4
$K_{S,55}$	8.34E-4	4.21E-4	4.17E-4	4.17E-4	4.17E-4
$K_{S,66}$	5.91E-4	2.35E-4	2.31E-4	2.30E-4	2.30E-4
$K_{S,35}$	0.00E+0	1.24E-2	1.25E-2	1.25E-2	1.25E-2
$K_{S,26}$	0.00E+0	-4.33E-3	-4.37E-3	-4.38E-3	-4.38E-3
Stiffness	Stiffness calculate by Blade Analysis Library				
	a=1	a=10 ²	a=10 ³	a=10 ⁴	a=10 ⁵
$K_{S,11}$	3.49E-1	1.38E-1	1.68E-1	1.73E-1	1.73E-1
$K_{S,22}$	3.49E-1	1.77E-1	1.75E-1	1.75E-1	1.75E-1
$K_{S,33}$	1.00E+0	5.05E-1	5.01E-1	5.00E-1	5.00E-1
$K_{S,44}$	8.34E-4	4.21E-4	4.17E-4	4.17E-4	4.17E-4
$K_{S,55}$	8.34E-4	2.21E-4	4.17E-4	4.17E-4	4.17E-4
$K_{S,66}$	5.91E-4	2.35E-4	2.31E-4	2.30E-4	2.30E-4
$K_{S,35}$	0.00E+0	1.24E-2	1.25E-2	1.25E-2	1.25E-2
$K_{S,26}$	0.00E+0	-4.33E-3	-4.37E-3	-4.38E-3	-4.38E-3

a= E_{11}/E_{22}

적용된 사각 단면이다. 4절점 요소가 적용되어 있으며 계수 a를 변수로 설정하여 재질 특성을 변경하여 블레이드 라이브러리에서 계산된 강성과 VABS에서 계산된 강성을 비교하였다. a는 x와 y의 탄성계수의 비이다.

Table 3은 Fig. 8의 왼쪽 면의 재질을 변경하여 계산한 강성행렬의 성분을 포함하고 있다. Table 3의 강성행렬의 성분을 비교하면, 두 개의 등방성 재질이 적용된 사각 단면에서 동일한 강성행렬 성분이 계산되었다.

4.2 등방성 및 이방성 재질이 적용된 박의 단면해석 결과 비교

Figure 9의 상단면과 하단면은 45도로 적층된 이방성 재질이 적용되어 있다. 그리고 수직으로 보강된 부위는 등방성 재질이 적용된 형상이다. 3셀의 박형 구조로 적용되어 있기 때문에 블레이드 형상을 모사하는 형상 중에 하나이다. VABS에서 계산된 강성행렬을 기준으로 상대 오차를 계산하여 Table 4에 나타내었다. 단면해석 결과로 얻어진 결과는 1차원의 보 모델에 사용된다. 1차원 보 모델의 구성하는데 있어서 탄성 중심에 6 by 6의 강성행렬을 연결한다. 이후 구속조건과 하중조건을 입력함으로써 1차원 보의 정적 거동 및 동적 특성을 계산할 수 있다.

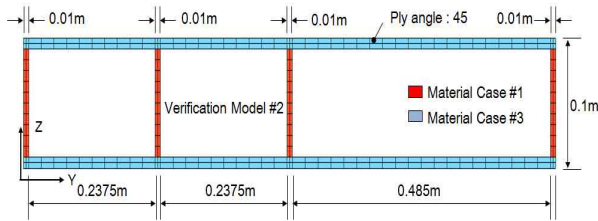


Fig. 9. Verification Model #2 of Blade Analysis Library

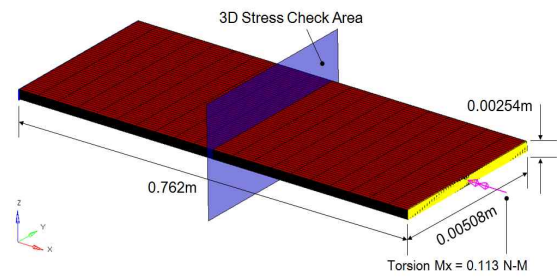


Fig. 10. Verification Model #3 of Blade Analysis Library

Table 4. Stiffness Results Comparison of Thin-wall using Blade Analysis Library & VABS

Stiffness	VABS	Blade Library	Relative Error(%)
$K_{S,11}$	1.79E+0	1.79E+0	5.58E-10
$K_{S,22}$	3.22E-1	3.22E-1	1.24E-9
$K_{S,33}$	4.37E+0	4.37E+0	2.29E-10
$K_{S,44}$	5.23E-2	5.23E-2	7.65E-10
$K_{S,55}$	3.81E-1	3.81E-1	-7.87E-10
$K_{S,66}$	7.73E-2	7.73E-2	0.00E+0
$K_{S,13}$	-8.48E-1	-8.48E-1	1.18E-10
$K_{S,15}$	2.75E-3	2.75E-3	1.02E-08
$K_{S,24}$	-3.13E-3	-3.13E-3	1.60E-09
$K_{S,26}$	-1.49E-2	-1.49E-2	-2.68E-09
$K_{S,35}$	5.64E-2	5.64E-2	-1.77E-10
$K_{S,46}$	1.83E-2	1.83E-2	5.47E-10

Table 5. Elastic & Shear Center Comparison of Thin-wall using Blade Analysis Library & VABS

Coord.	VABS	Blade Library	Relative Error(%)
y_t	-1.45E-02	-1.45E-02	0.00
z_t	0.00E+0	0.00E+0	0.00
y_s	-4.30E-2	-4.30E-2	0.00
z_s	0.00E+0	0.00E+0	0.00

Table 4에서 보는 바와 같이 두 번째 검증 모델에서 계산된 블레이드 해석 라이브러리와 VABS에서 계산된 강성행렬 역시 상대 오차율이 매우 적으며 만족할 만한 결과를 얻었다. Table 5에서 탄성 중심과 전단 중심을 계산하였다.

4.3 이방성 재질이 적용된 보의 3차원 응력과 복원응력 비교

최근 몇 년 동안 복합재로 구성된 3차원 유한요소 모델과 1차원 보 모델에 대한 연구는 여러 연구자들에 의해 수행되었다. Kovvali[12]는 VABS를 이용하여 1차원 보 모델을 구성한 후, 2차원 단면에 응력을 복원하여 3차원 유한요소 모델과 비교하여 효율성과 정확성을 입증하였는데, 본 논문에서 동일한 모델을 구현하여 블레이드 해석 라이브러리를 이용하여 3차원 응력을 계산하였다.

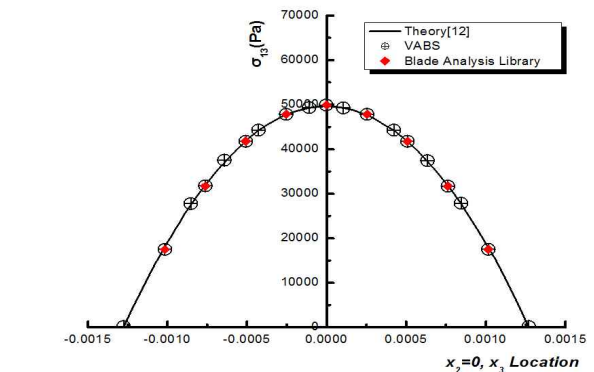


Fig. 11. 3-D Stress of Verification #3 using Blade Analysis Library & VABS, $\alpha_{13}, x_2 = 0$

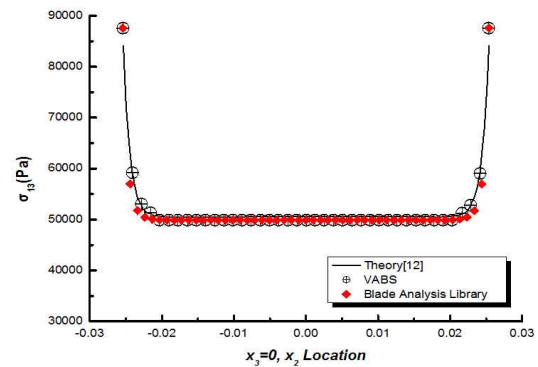


Fig. 12. 3-D Stress of Verification #3 using Blade Analysis Library & VABS, $\alpha_{13}, x_3 = 0$

세 번째 검증모델에서 얇은 사각형 형상의 보의 끝단에 비틀림 모멘트가 입력되고 반대쪽은 6 자유도를 구속하였다. 3차원 응력 추출 지점은 보의 중간지점의 중심이다.

중심으로부터 단면의 폭과 두께 방향으로의 VABS와 블레이드 라이브러리로부터 계산된 응력을 추출하여 비교하였다.

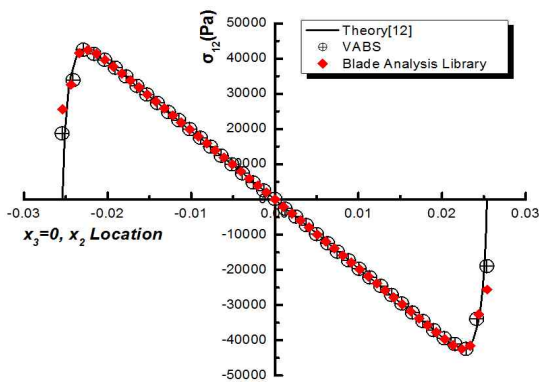


Fig. 13. 3-D Stress of Verification #3 using Blade Analysis Library & VABS, $\alpha_{12}, x_2 = 0$

강성행렬을 포함하고 있는 1차원 보 모델의 중간지점에서 복원된 3차원 응력은 VABS와 동일하며 Fig. 11, 12, 13 선도의 끝단 영역의 다른 지점에서 복원하여 나타내어 일치하는 지점이 발생하였다. 이 부분을 제외하면 VABS와 블레이드 해석 라이브러리로 복원된 응력 상대오차는 0.01% 이하이며 만족한 결과를 얻었다.

V. 결론

본 연구에서는 정밀하게 구성된 복합재 블레이드의 단면 구조의 차원을 축소하여 강성행렬을 계산할 수 있고 차원 복원을 통해 3차원 응력과 변형률을 계산할 수 있는 블레이드 해석 라이브러리를 개발하였다.

개발된 해석 라이브러리는 VABS와 단면해석 결과와 복원 해석 결과와 비교하여 효율성과 정확성을 입증하였다. 라이브러리 형태로 구성되어 있기 때문에 기존에 개발된 코드에 이식이 용이하며, 정밀하게 설계된 복합재료 블레이드의 전후처리 프로그램과 연동하여 활용될 것으로 예상된다. 특히 개발된 블레이드 해석 라이브러리는 고고도 무인기의 날개, 헬리콥터 로터 블레이드, 풍력 블레이드, 틸트로터 등의 정적, 동적 모델링에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

Reference

1) Chen, H., Yu, W., and Capellaro, M. "A critical assessment of computer tools for calculating composite wind turbine blade properties," *Wind Energy* Vol. 13, No. 6, 2009, pp. 497-516.

2) Hu, P. "VABS-IDE: VABS-Enabled Integrated Design Environment (IDE) for Efficient High-Fidelity Composite Rotor Blade and Wing Design", 51st, AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. American Institute of Aeronautics.

3) Yu, W., and Blair, M. "GEBT: A general-purpose nonlinear analysis tool for composite beams," *Composite Structures* Vol. 94, No. 9, 2012, pp. 2677-2689

4) Yu, W., Hodges, D. H., and Ho, J. C. "Variational asymptotic beam sectional analysis - An updated version," *International Journal of Engineering Science* Vol. 59, No. 0, 2012, pp. 40-64.

5) Park, I. Jung, S., Cho, J., Kim, D., "A Study on Calculation of Cross-Section Properties for Composite Rotor Blades Using Finite Element Method", *Journal of the KSAS*, Vol. 37, No. 5, 2009, pp. 442-449.

6) Kim, K., Cho, J., Jung, S., Kim, T., "Development of Weighted Triangular Mesh Generation Algorithm using Domain-wise Hash Structure and Quad Tree Structure", *Journal of the KSAS*, 2008, pp. 110-113.

7) Kim, K., Cho, J., Jung, S., Kim, T., "Development of Pre/Post-Processor for Cross-Section Modeling for Composite Rotor Blades", *Journal of the KSAS*, 2008, pp. 375-378.

8) Do, H., Cho, J., Park, I., Jung, S., Kim, T., Kim, D., "Development of Program for Modeling of Cross Section of Composite Rotor Blade", *Journal of the KSAS*, Vol. 39, No. 3, 2011, pp. 261-268.

9) Kang, Y., Cho, J., Dhadwal, M. K., Jung, S., Kim, T., "Development of Program for Modeling of Cross Section of Composite Rotor Blade Using Open CASCADE", *Journal of the KSAS*, 2011, pp. 1787-1791.

10) Yu, W. "VABS Manual for Users." 2012.

11) KJ, B. *Finite Element Procedures.*, New Jersey: Prentice Hall, 1996.

12) Kovvali, R. K., and Hodges, D. H. "Verification of the Variational Asymptotic Beam Section (VABS) Analysis for Initially Curved and Twisted Beams," 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. AIAA, Denver, Colorado, 2011.