

단면의 차원축소/복원해석과 에너지 해방률 계산을 위한 복합재 블레이드 해석 라이브러리 개발에 대한 연구

장준환 · 안상호*[†]

A Study on Composite Blade Analysis Library Development through Dimension Reduction/Recovery and Calculating Energy Release Rate

Jun Hwan Jang, Sang Ho Ahn*[†]

ABSTRACT: In this paper, numerical results of sectional analysis, stress recovery and energy release rate were compared with the results of VABS, 3-D FEM through the blade analysis library. The result of stress recovery analysis for one-dimensional model including the stiffness matrix is compared with stress results of three-dimensional FEM. 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 VABS와 3차원 유한 요소해석모델의 결과와 비교하였다. 그리고 유한요소모델과 차원축소 모델을 가상균열 닫힘법을 이용하여 에너지 해방률을 계산하였다. 블레이드 해석 라이브러리의 구성, 입력 및 출력 형태, 차원 축소와 복원 과정을 살펴보고 이를 이용한 활용 분야를 기술하였다. 블레이드 해석 라이브러리는 박 벽 단면의 강성 행렬 비교, 3차원 유한 요소 모델과 차원 축소 모델의 응력비교 그리고 에너지 해방률 계산 수치 비교연구를 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: 복합재 로터 블레이드(Composite rotor blade), 단면해석(Cross-sectional analysis), 복원해석(Recovery analysis), 차원축소 모델링(Reducible modeling), 가상균열 닫힘법(Virtual crack closure technique)

1. 서 론

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 3차

원 모델의 경우 오히려 해석결과에 대한 정성적인 물리적 경향의 파악이나 공탄성 해석과 같이 응용해석을 위해서 요구되는 데이터의 추출에 있어서는 만족스럽지 못한 결과를 제시하는 경우가 종종 발생된다.

초기 설계 단계에서와 같이 구조 및 공력 형상에 대한 구체적인 자료가 불충분하며 형상의 변화가 빈번한 경우에

매번 3차원 구조 모델을 변경한다는 것은 거의 불가능한 일이다. 복합재 로터 블레이드는 기하학적으로 급격하게 형상이 변하는 구간이 있고, 내부적으로는 재질이 변경되는 구간이 존재한다. 그리고 등방성 재료와 이방성 재질이 혼용해서 쓰이며, 많은 재질이 동시에 사용된다. 형상이 일정한 연속적인 구간이 드물고 일부 영역에서 특정 형상이 사용되고 불연속 구간에는 빈 공간을 채울 수 있는 재질이 사용된다. 따라서 초기 설계단계에서의 3차원 유한요소모델의 구현은 사실상 어렵고 효율적인 정적, 동적해석 및 피로 해석을 위해 거시적 특성을 비교적 간단하면서도 효과적으로 묘사할 수 있는 비선형 등가 모델링 기법이 요구된다.

세장비가 큰 복합재 블레이드의 거동을 예측하기 위해 차원축소를 통하여 1차원의 보 모델을 구성해야 한다. 국내외 연구 중에 Chen[1]은 차원 축소 모델링을 위한 단면 해석 프로그램에 대한 수치 비교연구를 수행하였다. 이를 통해 PreComp, VABS(Variational Asymptotical Beam Sectional Analysis), FAROB, CROSTAB, BPED의 특성을 기술하고 단면해석 성능을 비교하였다. Hu[2,3]는 Hodges의 운동방정식에 기반한 1차원 보의 거동과 하중을 계산하는 GEBT[4]와 단면해석과 응력 및 변형률 복원을 수행하는 VABS[5,6]를 연계하여 차원 축소와 복원의 과정을 통합하는 프로그램 VABS-IDE에 대한 연구를 수행하였다. 국내에서 수행된 연구 중에 박[7]은 유한요소를 기반으로 한 단면 특성 계산에 대한 연구를 수행하였고, 김[8,9]은 로터 블레이드의 형상의 모델링과 요소생성 및 단면해석 데이터에 관한 연구를 수행하였다. 도[10]는 단면 모델링 프로그램 KSec2D의 모델링 집합연산에 관한 연구를 수행하였고 강[11]은 C++ 3차원 그래픽 라이브러리 Open CASCADE을 활용하여 복잡하게 모델링 되어 있는 로터 블레이드의 단면을 효율적으로 설계할 수 있는 형상 단면 모델링, 요소생성 및 단면해석 프로그램에 대한 연구를 수행하였다.

본 논문에서 블레이드 해석 라이브러리의 개발현황과 강성, 복원응력, 에너지 해방률 계산사례를 소개하고자 한다. 개발된 블레이드 해석 라이브러리의 구성과 활용분야를 살펴보고 이를 통해 응용할 수 있는 수치해석 검증 예를 제시하였다. 차원축소 과정을 통한 단면해석 결과와 Hodge와 Yu[5]를 통해 개발된 VABS의 단면해석 결과와 비교하고, 복원 이론에 기반하여 계산된 응력을 3차원 해석모델과 비교함으로써 효율성과 정확성을 확인하였다. 그리고 가상균열 닫힘(Virtual Crack Closure Technique)을 이용하여 1차원 보의 단면의 변위와 힘을 복원하여 에너지 해방률을 계산하였다.

2. 이 론

2.1 차원축소를 통한 보의 단면해석

블레이드 해석 라이브러리는 보의 유한요소 평형 방정식 Bathe[12]에서 기술한 형태를 기반으로 함수형태로 정

리된다.

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

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 통한 보의 단면해석

복합재료로 구성된 세장비가 큰 블레이드의 거동을 계산하기 위하여 주어진 위치에서 단면 강성행렬을 정확하게 계산해야 한다. 보의 단면에 적용하는 힘과 모멘트는 강성행렬 K_s 와 선형의 관계를 가진다. 보의 단면에서 한 점에서 작용하는 응력과 변형률은 다음과 같이 3차원의 텐서로 표현할 수 있고 Hook' law가 적용된다.

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

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

$\varepsilon_{\alpha\beta}$ 는 미소변위이며 편미분의 형태를 나타낸다.

변형률은 변위성분과 응력성분의 편미분의 형태로 정리할 수 있고 아래와 같이 표현된다.

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

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

$$B=\begin{bmatrix}\partial/\partial x & 0 & \partial/\partial y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \partial/\partial x & \partial/\partial y & 0\end{bmatrix}^T \quad (4)$$

2.3 변형률 및 응력 복원

보의 평형방정식으로부터 θ 가 결정되 단면의 변형률은 다음과 같이 정리할 수 있다. 복원 응력과 변형률은 가우스 적분점 또는 요소를 기준으로 계산된다.

$$\varepsilon_e=S_eZ_e\psi_e\theta+B_eU_e\theta+S_eN_eU_{\partial z,e}\theta \quad (5)$$

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

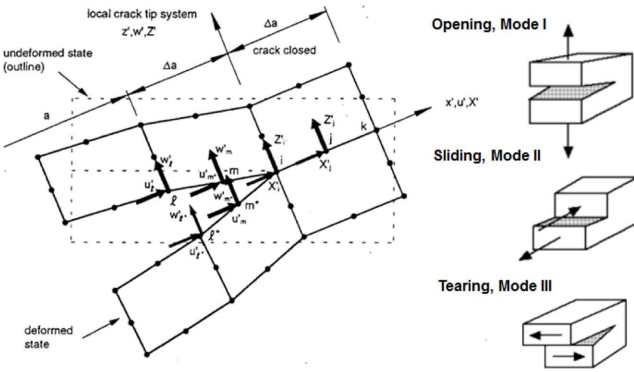


Fig. 1. Virtual crack closure technique using hexa element

2.4 가상균열담힘법

가상균열담힘법은 가상의 균열 증분을 닫기 위해 요구되는 일을 이용하여 응력확대계수를 구하는 방법이다. 응력장과 변위장은 요소의 형상함수를 이용하여 절점에 적용되는 힘을 구할 수 있다. Fig. 1은 8절점 요소에 대하여 모드 I, 모드 II, 모드 III의 에너지 해방율을 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} G_I &= \frac{1}{2a_1} \{ r_i^2 \Delta u_{i,n}^2 + r_j^2 \Delta u_{k,m}^2 \} \\ G_{II} &= \frac{1}{2a_1} \{ r_i^1 \Delta u_{i,n}^2 + r_j^1 \Delta u_{k,m}^1 \} \\ G_{III} &= \frac{1}{2a_1} \{ r_i^3 \Delta u_{i,n}^3 + r_j^3 \Delta u_{k,m}^3 \} \end{aligned} \quad (6)$$

위 식에서 u 는 변위이며 r 은 절점에서 적용되는 힘이다. 에너지 해방율은 평면응력과 평면변형률 조건에 따라 응력확대 계수로 변환된다.

$$K = \sqrt{Ge} \text{ for plane stress}$$

$$K = \sqrt{GE/(1-\nu^2)} \text{ for plane strain} \quad (7)$$

복합재 블레이드를 차원축소하여 1차원 보로 구성한 후 각 단면에 하중을 입력하여 차원을 복원하면 3차원 유한요소해석의 효과를 가질 수 있다. 블레이드 해석 라이브러리에서 계산된 단면에서 계산된 힘과 변위를 입력값으로 설정하면 에너지 해방율을 계산하여 균열진전을 허용하는 수명을 산출할 수 있다.

3. 블레이드 해석 라이브러리

블레이드 해석 라이브러리는 세장비가 크며 복잡한 형상을 가지고 다양한 재질이 적용되어 있는 보의 정적해석에 대한 여유마진과 수명해석을 위한 에너지 해방률 계산을 위하여 개발되었다. 유한요소모델에 기반된 단면해석

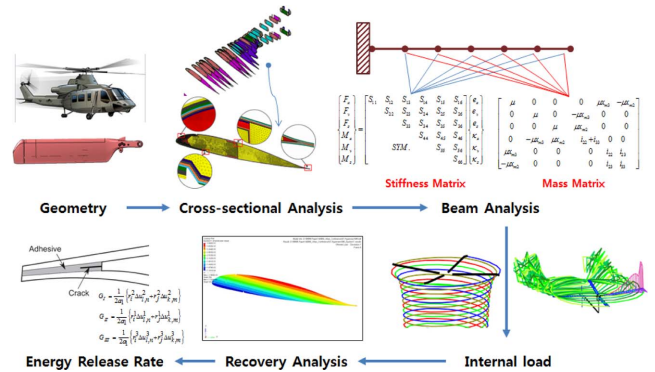


Fig. 2. Procedures of the Blade Analysis Library workflow for structural analysis

모듈로 블레이드의 각각의 단면을 연결하여 1차원 보 모델을 구성한다. 그리고 주어진 하중을 입력하여 차원 복원할 수 있는 함수로 구성되어 있다. Fig. 2은 블레이드 해석 라이브러리의 해석 적용의 순차적인 예이다. 더불어 응력확대 계수 K 와 일대일로 대응되는 에너지 해방율(Energy release rate) 혹은 균열 진전력이라 칭해지는 G 를 계산할 수 있다.

3.1 블레이드 해석 라이브러리의 구성

차원축소를 통한 블레이드의 모델링은 단면해석을 통해 형상과 재질 특성을 행렬의 형태로 표현하는 것이다. 3차원의 복합재 블레이드 모델을 단면으로 나누고 1차원의 보의 나타내지만 각 절점에는 강성행렬과 질량행렬이 포함되어 있다. 단면해석을 수행하기 위하여 2차원 단면 이산화 과정이 필요하고, 고려된 위치에서 유한요소로 구성된 이산화 모델을 구성해야 한다. 블레이드 해석 라이브러리는 단면의 이산화 정보, 즉 유한요소모델을 이용하여 강성행렬과 질량행렬을 계산할 수 있다. 여러가지 복합재의 재질 특성과 형상정보를 적절히 구분하여 전처리 도구로 유한요소모델을 만들어야 한다.

블레이드 해석 라이브러리는 Matlab의 함수 기반으로 개발되었다. 블레이드의 이산화는 다양한 유한요소 전처리 도구로 만들어진 입력값을 이용하여 텍스트 형태로 입력한다. 블레이드의 모델링은 외부/내부에 라미나의 적층률에 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. 사용자가 재질 및 적층각도를 입력할 수 있다. Fig. 3에서 블레이드 해석 라이브러리의 계층구조를 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, 에너지 해방률을 계산하는 부분, 결과 데이터를 형상화하는 부분으로 구분

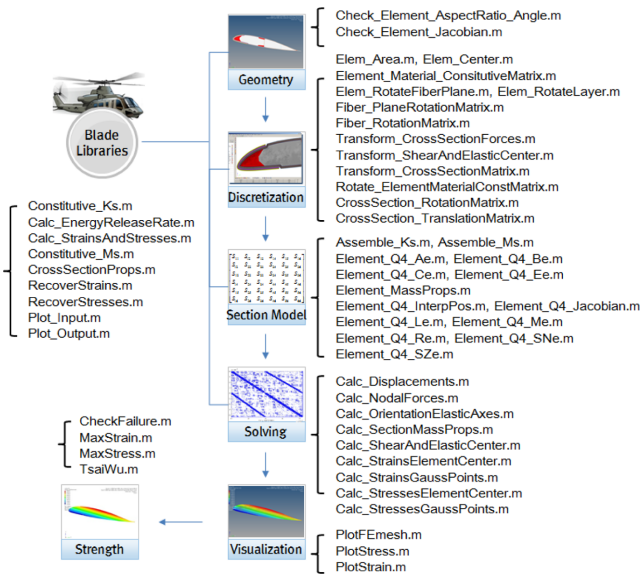


Fig. 3. Configuration of blade analysis library

할 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 라이브러리의 입력 및 출력

블레이드 해석 라이브러리는 복합재 구조해석을 수행하기 위하여 요소, 절점, 재질, 적층정보, 건전성 판단기준을 5개의 입력파일로 분리된 정보를 읽어드린다. 먼저 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. 블레이드 해석 라이브러리는 유한요소 전처리 도구에서 작성된 요소와 절점 정보를 입력하여 단면의 형상정보를 분석한다. 블레이드 해석 라이브러리에서 읽어드린 입력값을 분석하여 단면의 강성 행렬, 질량행렬, 인장 및 전단 중심, 단위길이당 질량, 복원 응력 및 변형률, 복합재의 파괴여부 및 에너지 해방률을 계산할 수 있다.

Fig. 4는 실물과 동일한 유한요소 블레이드 이산화 단면이다. 블레이드의 해석 라이브러리는 요소의 수, 절점의 수 및 각각의 삼각형/사각형 요소와 절점이 입력된다. 절점 정보는 (node number, y, z)가 입력된다. 요소 정보는 해석의 정확도를 향상시키기 위하여 삼각형 요소는 6개, 사각형 요소는 8개의 절점의 인덱스가 입력된다. 응력 및 변형률 선도는 가우스 적분 점에서 계산되며 1차 또는 2차 형상함수를 적용하여 각 절점에서 적용되는 응력과 변형률을 복원 계산할 수 있다. 2차 형상함수는 복원 해석의 정확도를 향상시킨다.

적용된 재질 정보는 등방성 또는 이방성 재질 특성을 입

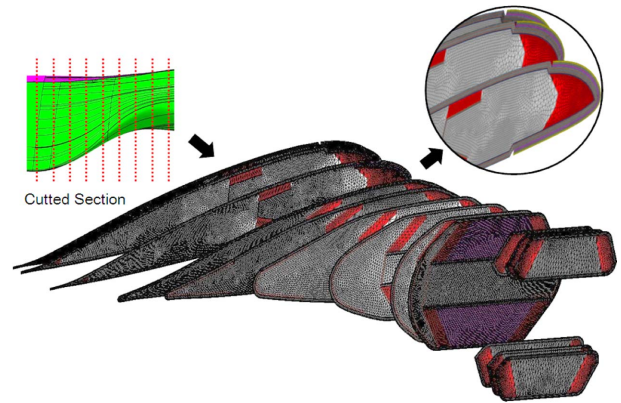


Fig. 4. 2-D Discretization example for cross-sectional analysis of composite rotor blade

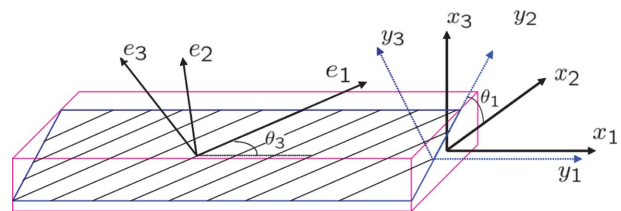


Fig. 5. Blade Analysis Library layout convention

력된다. 재질은 일반적인 복합재료 입력값과 동일하고 다음과 순서로 입력된다. 등방성 재질일 경우 y, z 방향으로 동일한 값을 적용한다.

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

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

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.

1차원 보 모델을 이용하여 블레이드의 동특성을 검토할 수 있다. 더불어 다양한 하중조건을 적용하여 각 절점에서 변형과 하중의 분포를 계산할 수 있다. 1차원 블레이드 보 모델을 구성한 이후 각 단면에서 구성된 블레이드의 하중을 입력하여 변형량과 응력의 분포를 계산할 수 있다. 블레이드 해석 라이브러리에서는 복원된 응력과 변형률을 단면의 유한요소에 분포시켜 시각적으로 확인할 수 있다. 그리고 사용자가 해석결과의 이상유무를 판단할 수 있도록 상용 후처리 프로그램의 양식에 맞추어 출력한다. Fig. 6은 블레이드 해석 라이브러리를 이용하여 변형률 복원 해석을 수행한 결과이다.

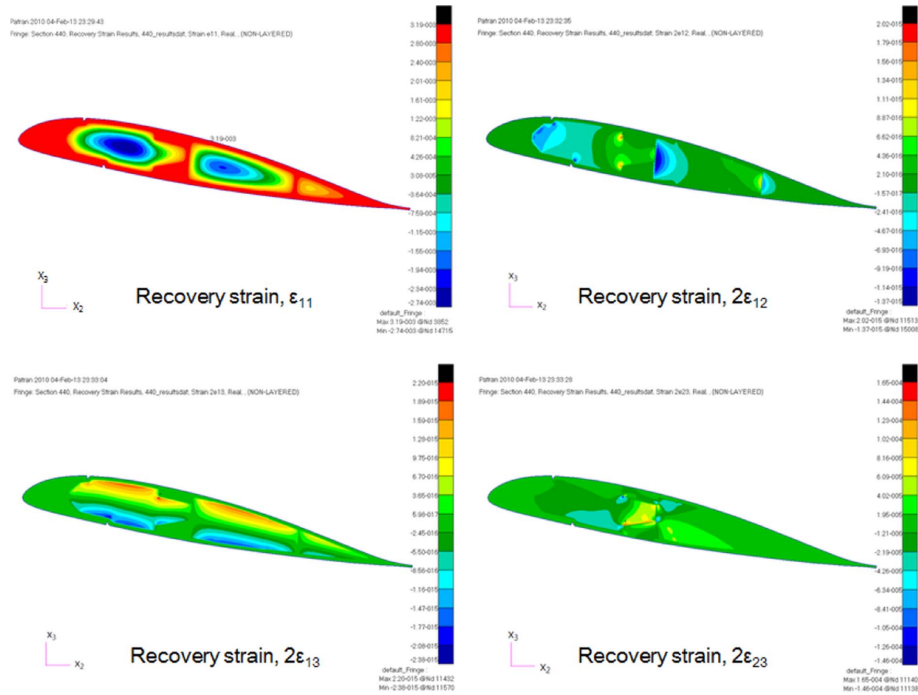


Fig. 6. Strain recovery distribution for composite blade from recovery analysis

4. 수치해석 검증 예제

본 절에서는 블레이드 해석 라이브러리의 수치해석 결과를 검증하기 위해서 단면해석 통한 강성행렬 비교, 차원 복원 해석을 통한 응력 비교, 가상균열단힘(VCCCT)을 이용한 에너지해방률(ERR)을 계산하였다. 단면해석은 네 가지의 재료로 구성된 고형 사각 단면을 적용하였고, 80 ply로 적층된 보를 3차원 유한요소 모델에서 응력을 추출하여 비교하였다. 그리고 가상균열단힘을 이용하여 3차원 유한요소 해석과 1차원 차원 복원 해석 모델의 에너지 해방률을 비교하였다.

4.1 등방성 및 이방성 재질이 적용된 사각형 단면해석 결과 비교

블레이드 해석 라이브러리와 VABS는 이론적 기반이 다르지만 유한요소기반으로 강성행렬을 계산하기 때문에 비교하기 용이하다. 블레이드 해석 라이브러리의 첫번째 검증

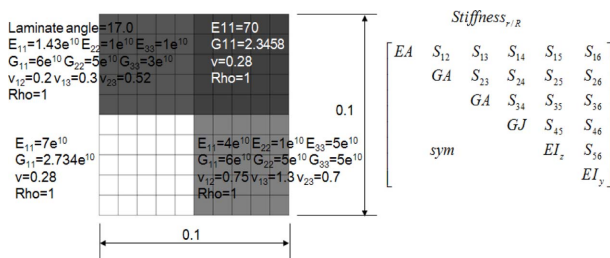


Fig. 7. Verification model 1, Blade Analysis Library

Table 1. Cross-sectional analysis comparison between VABS and Blade Analysis Library

Stiffness	Stiffness by Comparison	
	VABS	Blade Analysis Library
S_{11}	4.3549E+08	4.3549E+08
S_{22}	5.5439E+07	5.5439E+07
S_{33}	4.2501E+07	4.2501E+07
S_{44}	9.8282E+04	9.8282E+04
S_{55}	3.5129E+05	3.5129E+05
S_{66}	3.6328E+05	3.6328E+05
S_{12}	1.5273E+07	1.5273E+07
S_{13}	1.7987E+07	1.7987E+07
S_{14}	-5.6911E+05	-5.6911E+05
S_{15}	-3.3764E+06	-3.3764E+06
S_{16}	5.8699E+06	5.8699E+06
S_{23}	5.4057E+06	5.4057E+06
S_{24}	9.5213E+05	9.5213E+05
S_{25}	3.5379E+05	3.5379E+05
S_{26}	3.7208E+05	3.7208E+05
S_{34}	-9.0552E+05	-9.0552E+05
S_{35}	2.9138E+05	2.9138E+05
S_{36}	4.6952E+05	4.6952E+05
S_{45}	-1.0415E+04	-1.0415E+04
S_{46}	-1.8571E+04	-1.8571E+04
S_{56}	4.5637E+04	4.5637E+04

모델은 Fig. 7과 같이 재질 4개가 적용된 사각 단면이다. 4절점 사각요소가 적용되어 있으며 블레이드 라이브러리에서 계산된 강성과 VABS에서 계산된 강성을 비교하였다. Table 1의 강성행렬의 성분을 비교하면, 두 개의 등방성 재질이 적용된 사각 단면에서 동일한 강성행렬 성분이 계산되었다. VABS와 블레이드 해석 라이브러리에서 계산된 강성행렬의 성분은 동일하다. 강성값의 오차율은 VABS를 기준으로 10^{-6} 이하이다.

4.2 이방성 재질이 적용된 80 ply 적층 보의 3차원 응력과 복원응력 비교

1차원 보 모델링에 대한 차원 복원 관계에 대한 검증 모델은 가로 6.35 mm, 세로 25.4 mm 단면으로 구성되어 있으며 길이 127 mm의 복합재 보 형상이다. 재질특성은 그림 8에 나타내었고 적층은 이방성을 갖는 80 ply로 설정하였다. 끝단에서 전단하중 4.45 N을 부여하였다.

3차원 응력 추출 지점은 보의 중간지점의 $y = 0$ 인 지점이

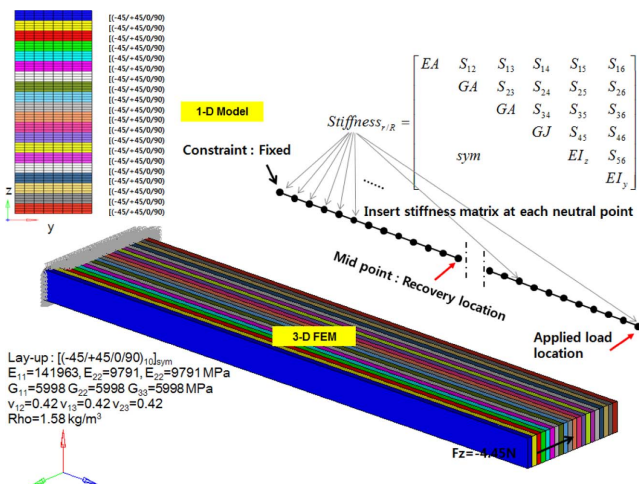


Fig. 8. Verification model 2, Blade Analysis Library

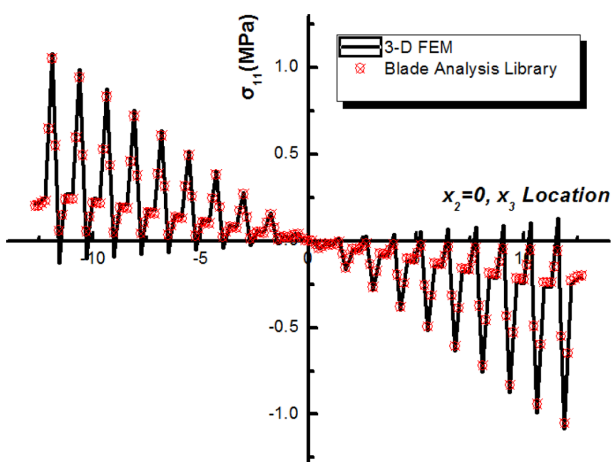


Fig. 9. Recovery stress component σ_{11} at mid-span, $x_2 = 0$

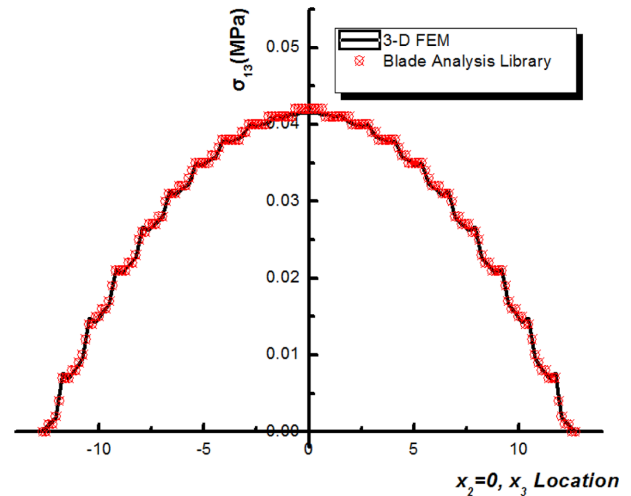


Fig. 10. Recovery stress component σ_{13} at mid-span, $x_2 = 0$

다. 3차원 유한요소 모델의 $y = 0$ 인 지점에서 두께방향으로 3차원 응력을 추출해보면 Fig. 9과 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다. 그리고 블레이드 해석 라이브러리를 이용하여 1차원 보 모델에 복합재료가 적층된 80 ply의 단면에 보의 중간지점의 하중을 적용하여 응력을 복원하였다. 응력을 복원하기 위하여 2차의 형상함수를 적용하였다. 복원된 응력은 3차원 유한요소모델의 오차를 0.1% 이하로 3차원 유한요소모델에서 추출된 응력의 선도를 따라가고 있다. 이는 블레이드 해석 라이브러리로부터 복원된 응력결과는 효율성을 가지며 3차원 유한요소모델의 정확성을 가지고 있음을 의미한다.

Fig. 10에서 1차원 보에서 복원된 응력은 3차원 유한요소 모델에서 추출된 응력의 선상 위치에서 값이 추출되었다. 블레이드 해석 라이브러리로 복원된 응력 상대오차는 0.1% 이하이며 만족한 결과를 얻었다.

4.3 가상균열 달힘을 이용한 에너지 해방률 비교

가상균열단합법(VCCT)을 이용하여 에너지해방률을 계산하기 위해 Fig. 11과 같이 3차원 유한요소모델과 1차원 보 모델을 구성하였다. 수치모델의 단면은 원형과 사각형이며 초기 균열 $a = 50, 33.33 \text{ mm}$ 이 적용되어 있다. 그리고 등방성 재질이 적용되며 끝단에 y 방향 10000 N 이 작용하고 있다. 3차원 유한요소모델을 구성한 후 Nastran의 Implicit nonlinear solver을 이용하여 비선형 해석을 수행하였다. Murakami[13]의 에너지 해방률을 계산 실험식을 이용하여 오차를 계산하는 판단 기준을 설정하였다. Murakami의 실험식은 식 (8)과 같으며 초기 균열의 크기와 적용하중과 포아송비로 구성된 에너지 해방률을 계산하는 식이다. 3차원 유한요소해석모델의 요소는 Hexa를 사용하였고 이는 에너지 해방율을 계산하는 비선형해석을 사용하기 위함이다.

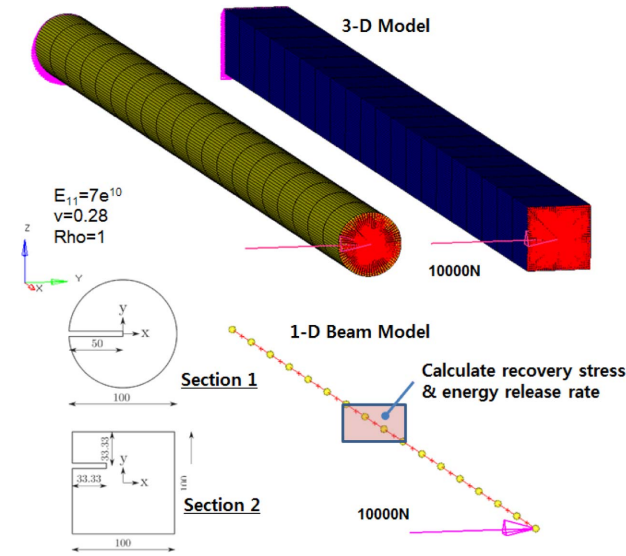


Fig. 11. Verification model 3, Blade Analysis Library

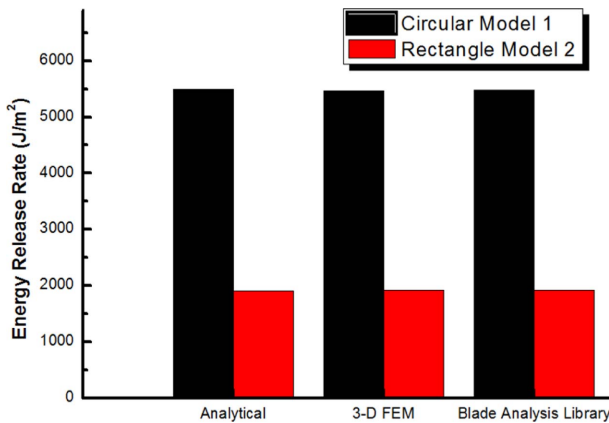


Fig. 12. Comparison energy release rate, verification model 3

Table 2. Energy release rate of Model 1, Model 2

Method	Circular Model 1		Rectangle Model 2	
	G_{III} (J/m ²)	Error (%)	G_{III} (J/m ²)	Error (%)
Analytical	5497	-	1902	-
3-D FEM	5468	0.527	1921	0.998
1-D Beam	5481	0.291	1920	0.946

$$K_{III} = \frac{(1.375776 + 1.354244\nu)T_y}{a^{2.5}}$$

$$G_{III} = \frac{(1+\nu)K_{III}^2}{E} \quad (8)$$

크랙의 증가량은 원형 단면인 경우 $\Delta a_0 = 2.0$ mm이며 사각형의 경우 $\Delta a_0 = 3.33$ mm으로 설정하였다. Table 2와 같

이 원형과 사각형 모델에서 계산된 에너지 해방률은 1% 미만의 오차율을 가지며 Murakami의 실험값에 근접한다. 이는 차원 축소와 복원해석으로 계산된 이후 가상균열단합(VCCT)로 에너지 해방률을 계산하는 과정이 정확성과 효율성을 가지고 있다고 판단할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 복합재 블레이드의 단면 해석을 수행하여 강성행렬 및 질량행렬을 계산할 수 있고 차원 복원을 통해 3차원 응력과 변형률을 계산할 수 있는 블레이드 해석 라이브러리를 개발하였다. 개발된 해석 라이브러리는 VABS와 단면해석 결과, 복원 해석 결과 및 에너지 해방률을 비교하여 효율성과 정확성을 입증하였다.

또한 가상균열 단합법을 적용하여 에너지 해방률을 계산하여 Murakami의 에너지 해방률 실험식과 비교하였다. 블레이드 해석 라이브러리는 함수 형태로 구성되어 있기 때문에 기존에 개발된 코드에 통합 및 확장이 용이하며, 정밀하게 설계된 복합재로 블레이드의 전후처리 프로그램과 연동하여 활용될 것으로 예상된다. 특히 개발된 블레이드 해석 라이브러리는 고고도 무인기의 날개, 헬리콥터 로터 블레이드, 풍력 블레이드, 킬로터 등 정적, 동적 모델링에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

REFERENCES

- Chen, H., Yu, W., and Capellaro, M., "A Critical Assessment of Computer Tools for Calculating Composite Wind Turbine Blade Properties", *Wind Energy*, Vol. 13, 2009, pp. 497-516.
- 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 and Astronautics, Inc., Orlando, Florida, 2010.
- Hu, T., "A Validation and Comparison about VABS-IDE and VABS-GUI", Master, Utah State University, 2012.
- Yu, W. and Blair, M., "GEBT: A General-purpose Nonlinear Analysis Tool for Composite Beams", *Composite Structures*, Vol. 94, 2012, pp. 2677-2689.
- Yu, W., VABS Manual for Users, 2012.
- Yu, W., Hodges, D.H., and Ho, J.C., "Variational Asymptotic Beam Sectional Analysis - An Updated Version", *International Journal of Engineering Science*, Vol. 59, 2012, pp. 40-64.
- Park, I.-J., Jung, S.N., Cho, J.Y., and Kim, D.-H., "A Study on Calculation of Cross-Section Properties for Composite Rotor Blades Using Finite Element Method", *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 37, 2009, pp. 442-449.
- Park, I.-J., Jung, S.N., Cho, J.Y., and Kim, D.-H., "Development of Weighted Triangular Mesh Generation Algorithm using

- Domain-wise Hash Structure and Quad Tree Structure”, *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2008, pp. 110-113.
9. Park, I.-J., Jung, S.N., Cho, J.Y., and Kim, D.-H., “A Study on Calculation of Cross-Section Properties for Composite Rotor Blades Using Finite Element Method”, *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2008, pp. 375-378.
 10. Do, H.S., Cho, J.Y., Park, I.-J., Jung, S.N., Kim, T.J., and Kim, D.-H., “Development of Program for Modeling of Cross Section of Composite Rotor Blade”, *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 39, 2011, pp. 261-268.
 11. Kang, Y.C., Cho, J.Y., Dhadwal, M.K., Jung, S.N., and Kim, T.J., “Development of Program for Modeling of Cross Section of Composite Rotor Blade Using Open CASCADE”, *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2011, pp. 1787-1791.
 12. Bathe, K.J., *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1996.
 13. Murakami, Y., “Stress Intensity Factors Handbook”, Pergamon Press, 1987.