

VABS를 이용한 임의의 단면과 재료 분포를 가진 비균일 복합재료 보의 변형을 복원 해석

장준환* · 안상호**†

Strain Recovery Analysis of Non-uniform Composite Beam with Arbitrary Cross-section and Material Distribution Using VABS

Jun Hwan Jang*, Sang Ho Ahn**†

ABSTRACT: This paper presents a theory related to a two-dimensional linear cross-sectional analysis, recovery relationship and a one-dimensional nonlinear beam analysis for composite wing structure with initial twist. Using VABS including a related theory, the design process of the composite rotor blade has been described. Cross-sectional analysis was performed at cutting point including all the details of geometry and material. Stiffness matrix and mass matrix were linked to each section to make 1D beam model. The 3D strain distributions within the structure were recovered based on the global behavior of the 1D beam analysis and visualize numerical results.

초 록: 본 논문에서는 블레이드와 같이 세장비가 크고 초기 비틀림이 존재하는 복합재료로 구성된 날개 구조물에 대한 이차원 단면의 차원축소와 복원관계를 이론적으로 기술하고 이를 이용한 복합재료 로터 블레이드의 효율적인 설계 과정을 기술하였다. 차원축소와 복원해석 수치해석 프로그램인 VABS를 이용하여 단면해석을 수행하고 연성이 고려된 강성행렬과 질량행렬을 중립점에 연결하여 블레이드의 특성을 포함한 1차원 보 모델링을 구성하였다. 1차원 보 모델을 통해 블레이드의 거동을 확인하고 내부하중을 계산하여 단면위치에서 변형을 복원을 수치적으로 계산하고 이산화 된 단면에 수치적으로 매칭하여 시각적으로 형상화하였다.

Key Words: 복합재료 보 (Composite beam), 로터 블레이드 (Rotor blade), 단면해석 (Sectional analysis), 복원해석 (Recovery analysis), 차원축소 모델링 (Reducible modeling), 변분근사 보 단면해석 (VABS)

1. 서 론

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 블레이드는 기하학적으로 급격하게 형상이 변하는 구간이 있고, 내부적으로는 재질이 변경되는 구간이 존재한다. 그리고 등방성 재료와 이방성 재질이 혼용해서 쓰

이며, 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 피로해석을 위해 거시적 특성을 비교적 간단하면서도 효과적으로 묘사할 수 있는 비선형 등가 모델링 기법이 요구된다[1-4].

국외의 연구 중에 Hodges 등[5]은 유한요소 모델에 기초한

Received 28 June 2015, received in revised form 24 August 2015, accepted 27 August 2015

*Koreanair. Military Aero-structure Group

**†Department of Automobile Engineering, Shinhan University, Corresponding author (E-mail: drshahn@naver.com)

변분근사법을 제시하였다. Cesnik과 Hodges[6]과 Yu 등[7]은 변분근사 방법론을 계량하여 복잡한 3차원 형상을 단면 해석을 통해 2차원 탄성계수를 얻고 1차원의 비선형 보의 운동방정식에 대입하여 거동을 모사하였다. Hodges 등[5], Cesnik과 Hodges[8-11], Popescu 등[12], Cesnik과 Shin[13], Yu 등[7]의 이론을 기반으로 임의의 형상을 가진 복합재료 보에 대한 해석 코드의 개발이 진행되었다. 이러한 연구결과로부터 변분근사법에 기초한 유한요소법을 이용한 단면 해석 코드(VABS)[14]가 개발되었다. 그리고 Reddy[15]는 Kirchhoff 가정을 기반으로 하는 고전 적층판 이론을 바탕으로 압전 센서 및 작동기가 내재된 복합재료 적층판에 대한 구조 모델을 제안하였다. Yu 등[16]은 혼합법을 이용하여 복합재 보의 거동을 예측할 수 있는 코드를 개발하였다.

본 논문에서는 블레이드와 같이 세장비가 크고 초기 비틀림이 존재하는 복합재료로 구성된 날개 구조물에 대하여 개발된 코드인 VABS를 이용하여 차원이 축소된 모델링을 구성하고 블레이드의 거동을 확인하고 복원관계를 이용하여 원하는 지역에서 단면의 변형률 분포를 복원하고 시각적으로 형상화하였으며 구조 요건을 만족할 수 있는 효율적인 설계 과정을 기술하였다.

2. 이 론

2.1 이차원 단면의 차원축소와 강성행렬

세장비가 큰 날개 구조물과 블레이드는 유한요소 모델의 효율성과 결과에 대한 신뢰성을 동시에 만족시키기 어렵지만 이러한 문제를 해소시키기 위해 3차원 해석모델을 1차원으로 차원을 축소하는 과정이 필요하다. 3차원의 비틀림이나 복잡한 곡률을 가진 형상에서 적절한 단면위치를 선정하고 이 위치에서 단면해석을 통해 단위길이당 변형률 에너지를 계산해야 한다. 3차원 변형률장은 탄성 변형률과 워핑벡터와 워핑벡터의 미분값을 포함하여 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}\Gamma_{11} &= \bar{\gamma}_{11} + x_3 \bar{\kappa}_2 - x_2 \bar{\kappa}_3 + w_1' \\ 2\Gamma_{12} &= w_{1,2} - x_3 \bar{\kappa}_1 + w_2' \\ 2\Gamma_{13} &= w_{1,3} + x_2 \bar{\kappa}_1 + w_3' \\ \Gamma_{22} &= w_{2,2} \\ 2\Gamma_{23} &= w_{3,2} + w_{2,3} \\ \Gamma_{33} &= w_{3,3}\end{aligned}\quad (1)$$

식 (1)에서 정의한 바와 같이 워핑함수의 항을 포함하고 있는 3차원 변형률을 이용하여 변형률 에너지를 표현할 수 있다.

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

여기서 D 는 복합재료의 재료 강성행렬이다. 변형률 에너지의 정의된 식 (2)로 표현하면 4×4 의 행렬을 얻을 수 있고 이는 고전이론을 적용한 강성행렬과 동일하다. 횡전단 변형을 허용하는 티모센코 보 모델에 대한 변형률 에너지의 형태로 표현하게 되면 아래와 같다.

$$2U = \bar{\epsilon}^T A \bar{\epsilon} + 2\bar{\epsilon}^T B \bar{\epsilon}' + \bar{\epsilon}'^T C \bar{\epsilon}' + 2\bar{\epsilon}'^T D \bar{\epsilon}' \quad (3)$$

식 (3)을 변형률 에너지의 정의된 식 (2)로 표현하면의 행렬을 얻을 수 있고 이는 횡전단 변형을 허용한 티모센코 보에 대한 강성행렬이다.

$$2U = \begin{Bmatrix} \bar{\gamma}_{11} \\ 2\gamma_{12} \\ 2\gamma_{13} \\ \bar{\kappa}_1 \\ \bar{\kappa}_2 \\ \bar{\kappa}_3 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} & S_{56} \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & S_{46} & S_{56} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\gamma}_{11} \\ 2\gamma_{12} \\ 2\gamma_{13} \\ \bar{\kappa}_1 \\ \bar{\kappa}_2 \\ \bar{\kappa}_3 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

2.2 확장된 헤밀턴의 원리에 의한 보의 운동 방정식

보의 거동은 운동에너지와 변형률 에너지 그리고 가상일의 원리가 포함된 확장된 헤밀턴의 원리에 의해 기술된다.

$$\int_{t_1}^{t_2} \int_0^l [\delta(K - U) + \delta \bar{W}] dx_1 dt = \delta \bar{A} \quad (5)$$

t_1 과 t_2 는 임의의 시간이며 K 는 운동에너지, U 는 변형률 에너지, δW 은 가상일이며 단위 길이당 에너지의 형태로 나타난다. Hodges[17]는 임의의 단면을 가진 보의 비선형 거동에 대한 운동방정식을 확장된 헤밀턴의 원리를 이용하여 아래와 같이 기술하였다.

$$\begin{aligned}F' + (\tilde{k} + \tilde{\kappa})F + f &= \dot{P} + \tilde{\Omega}P \\ M' + (\tilde{k} + \tilde{\kappa})M + (\tilde{e}_1 + \tilde{\gamma})F + m &= \dot{H} + \tilde{\Omega}H + \tilde{V}P\end{aligned}\quad (6)$$

유도된 보의 방정식은 단면의 강성이 연성되어 있으며 복합재료로 구성된 보의 정적 거동을 표현할 수 있다.

2.3 VABS를 이용한 변형률의 복원

VABS(Variational Asymptotic Beam Section Analysis)는 복잡한 형상을 가진 비균일 복합재료의 단면의 강성행렬을 계산하는데 주로 사용된다. 단면해석은 VABS를 이용하여 2차원의 단면해석 모델이 1차원의 보 형태의 모델로 차원 축소하는 과정이다. 역으로 보의 거동을 통해 계산된 변위와 내부 하중을 이용하여 차원의 복원이 가능하다. Hodges의 운동 방정식에서 계산된 거동과 내부 하중을 계산하여 결과값을 VABS에 입력하면 2차원 단면에서의 변형률과 응력 선도를 얻을 수 있다. 1차원 보에서 존재하지 않은 3차원

의 변형에 대해 워핑함수를 통해 정확한 응력, 변형률, 변위를 복원하는 수식은 아래와 같다. 초기에 비틀림과 굽힘이 있는 보 형상에 대하여 워핑함수는 h/R 과 h/l 의 차수로 표현할 수 있다.

$$w(x_i) = (V_0 + V_{1R})\varepsilon + V_{1S}\varepsilon' \quad (7)$$

여기서 $w(x_i)$ 는 3차원 워핑함수이며, V_0 는 $2U_0$ 를 최소화할 때의 워핑함수, V_{1R} , V_{1S} 는 $2U_1$ 을 최소화할 때의 워핑함수이다. 이는 고전 모델에 대한 근사적인 워핑함수이며 h/l 의 차수로 개진된다. 3차원 변형률을 변형률과 변형률의 1, 2차 미분항으로 표현된다.

$$\Gamma = [(\Gamma_a + \Gamma_R)(V_0 + V_{1R}) + \Gamma_\varepsilon]\varepsilon + [(\Gamma_a + \Gamma_R)V_{1S} + \Gamma_l(V_0 + V_{1R}) + \Gamma_\varepsilon]\varepsilon' + \Gamma_l V_{1S}\varepsilon'' \quad (8)$$

3차원 변형률은 $\Phi = [\Gamma_{11} \ 2\Gamma_{12} \ 2\Gamma_{13} \ \Gamma_{22} \ \Gamma_{23} \ \Gamma_{33}]^T$ 이다.

식 (8)은 Yu 등[7]에 전개 과정이 자세히 기술되어 있다. 보의 평형 방정식[17]으로 부터 얻은 변형률의 1차 미분과 2차 미분을 얻고 복원이론에 의하여 응력이 표현되고 횡전단 변형을 허용하는 티모센코 보의 단면해석을 통해 강성 행렬을 얻을 수 있다. 1차원 보의 거동에 대한 유한요소 모델을 통하여 응력과 변형률이 계산된다.

$$\varepsilon = S^{-1}F \quad (9)$$

여기서 변형률은 $\varepsilon = [\gamma_{11} \ 2\gamma_{12} \ 2\gamma_{13} \ \kappa_1 \ \kappa_2 \ \kappa_3]$ 이며 1차원의 티모센코 보의 거동을 통해 얻은 하중 $F = [F_1 \ F_2 \ F_3 \ M_1 \ M_2 \ M_3]^T$

입력하여 계산된다. 단면해석으로 계산된 응력과 모멘트 결과이다. 비선형 평형방정식[17]을 이용하여 응력에 대한 미분을 계산하여 나타내면 아래와 같다.

$$F' = -RF - f = \begin{bmatrix} \tilde{K}_B & 0 \\ \tilde{e}_1 + \tilde{\gamma} & \tilde{K}_B \end{bmatrix} F - f \quad (10)$$

$f = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ m_1 \ m_2 \ m_3]^T$ 이고 f 는 1차원 보의 거동에 대한 내부 하중이다. 식 (10)은 식 (9)에 의하여 계산되고 고차의 미분도 아래와 같이 계산된다.

$$F'' = (R^2 - F')F + Rf - f' \quad (11)$$

$$F''' = (-R^3 + RR' + 2R'R - R'')F + (-R^2 + 2R')f + RF' - f'' \quad (12)$$

F', F'', F''' 을 이용하여 1차원 보에 대한 미분값 $\varepsilon', \varepsilon'', \varepsilon'''$ 을 계산할 수 있으며 다음과 같다.

$$\varepsilon' = S^{-1}F', \quad \varepsilon'' = S^{-1}F'', \quad \varepsilon''' = S^{-1}F''' \quad (13)$$

3차원 변형률은 식 (8)의 식에 의하여 차원 축소된 1차원 보에 대한 차원 복원 계산이 가능하다.

3. 비균일 복합재료 보의 차원 축소 및 복원해석 과정

임의의 단면형상과 재질분포를 갖는 복잡한 형상의 구조

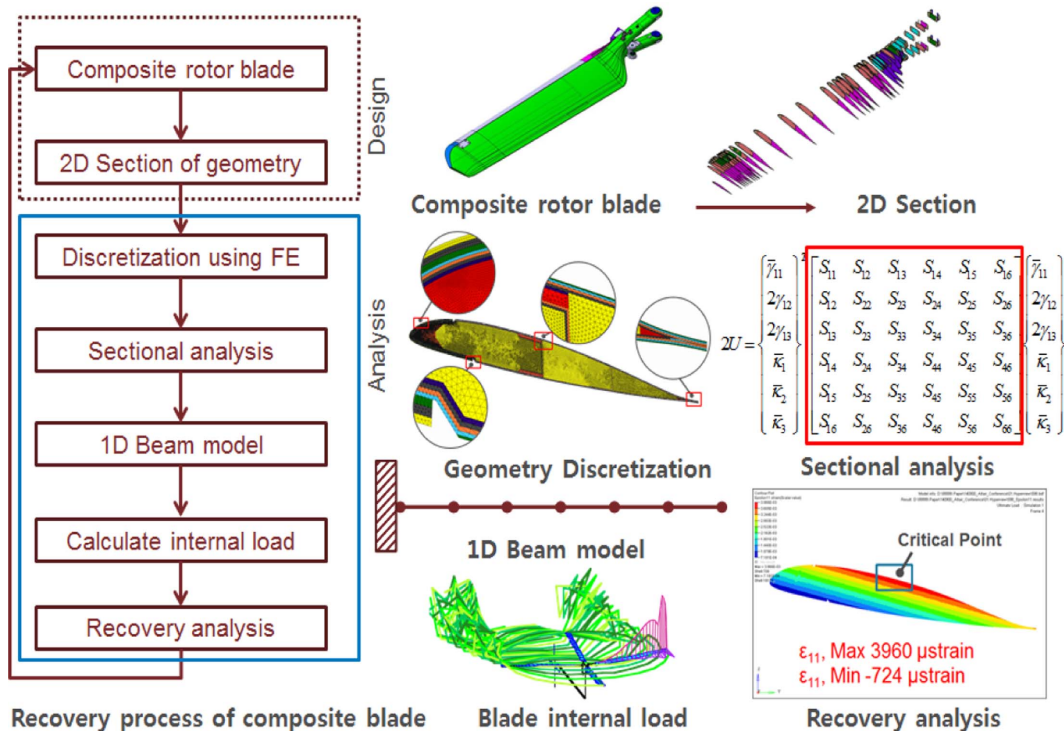


Fig. 1. Recovery process of composite rotor blade

를 보 모델로 단순화 시키기 위해서는 차원을 축소시키는 과정이 필요하다. 먼저 형상 정보가 정의되어야 하며 형상이 급격히 변하는 구간을 단면 해석 위치로 설정한다. 그리고 복합재 구조는 기본적으로 재료의 다양성이 존재하기 때문에 구조물 안에서 변화하는 재료의 분포를 고려하여야 한다. 복합재의 설계 특성상 재료의 두께가 계단 형태의 가감이 존재하고 구조물 외곽의 형태가 일정하다 하더라도 내부에서는 재질이 변할 수 있다. 따라서 재질분포가 변하는 구간도 단면해석의 위치로 고려하여야 한다. Fig. 1은 임의의 단면형상과 재질 분포를 대표하는 로터 블레이드의 단면 축소 모델링과 차원 복원의 과정을 나타낸 그림이다. VABS를 이용하여 단면해석을 수행한다. 해석 결과물의 일부로 구조물의 인장 중심 정보를 얻게 되는데, 인장 중심으로 새로운 사용자 정의 축을 생성해야 한다. 유한요소모델의 요소와 절점을 인장 중심으로 좌표변환을 다시 수행하고 최종적으로 구조물의 관성 각도만큼 회전변환을 실시한다. 본 논문에서 VABS를 이용하여 단면해석을 재수행하면 4×4 또는 6×6 형태의 강성행렬과 질량행렬을 얻을 수 있다. 2차원 유한요소 모델에서 강성행렬과 질량행렬 형태의 행렬을 얻는 과정이 보의 모델링 과정이며, 이후 각 단면의 강성행렬을 중립점을 기준으로 연결하여 1차원의 단순화된 유한요소 보 모델을 구성한다.

경계조건과 하중조건을 입력하면 전체적인 거동의 형태를 여러가지 변위 정보와 내부 하중정보를 추출할 수 있

다. 2장에서 기술된 복원 관계식을 이용하여 1차원의 거동 형태를 2차원 단면에서의 변형을 분포로 계산할 수 있으며 구조물의 고장 모드를 예측할 수 있다. 이러한 모델링의 과정과 복원이론을 이용하면 복합재 블레이드의 효율적인 설계가 가능하다. 그리고 복원이론을 통해 1차원 보 모델에 3차원 수치결과를 매핑하여 해석결과를 가시화한다.

1차원으로 축소된 보 모델이 복합재 블레이드의 기본적인 강도와 진동 및 피로요건을 만족하게 되면 블레이드의 설계 하중을 입력하여 3차원 복원 변형률을 계산한다. 이러한 결과를 통해 설정된 설계변수를 수정하여 단면해석을 반복하고 최적의 구조요건을 만족하는 설계변수를 확정하여 구조적인 여유마진을 계산한다. 1차원 보 모델은 거동과 내부하중을 계산하는데 쓰이고 rpm 별로 고유모드를 계산할 수 있다.

4. 비균일 복합재료 보의 복원 해석

4.1 복합재 블레이드의 2차원 단면해석

차원축소를 통한 보 모델링을 수행하기 위해서 유한요소 모델의 요소와 절점의 수는 형상의 특성을 표현할 수 있도록 충분히 나누어야 한다. 절점 및 요소의 수의 감소는 최적 설계 과정에 있어서 계산시간의 감소를 위한 필수조건이지만 보의 연성 특성을 정확하게 결정할 수 있는 충분한 요소가 필요하다. 특히 복합재 블레이드의 앞전에 해당하는 곡선 구간에서 절점과 요소의 수가 불충분하게 되면 형상의 왜

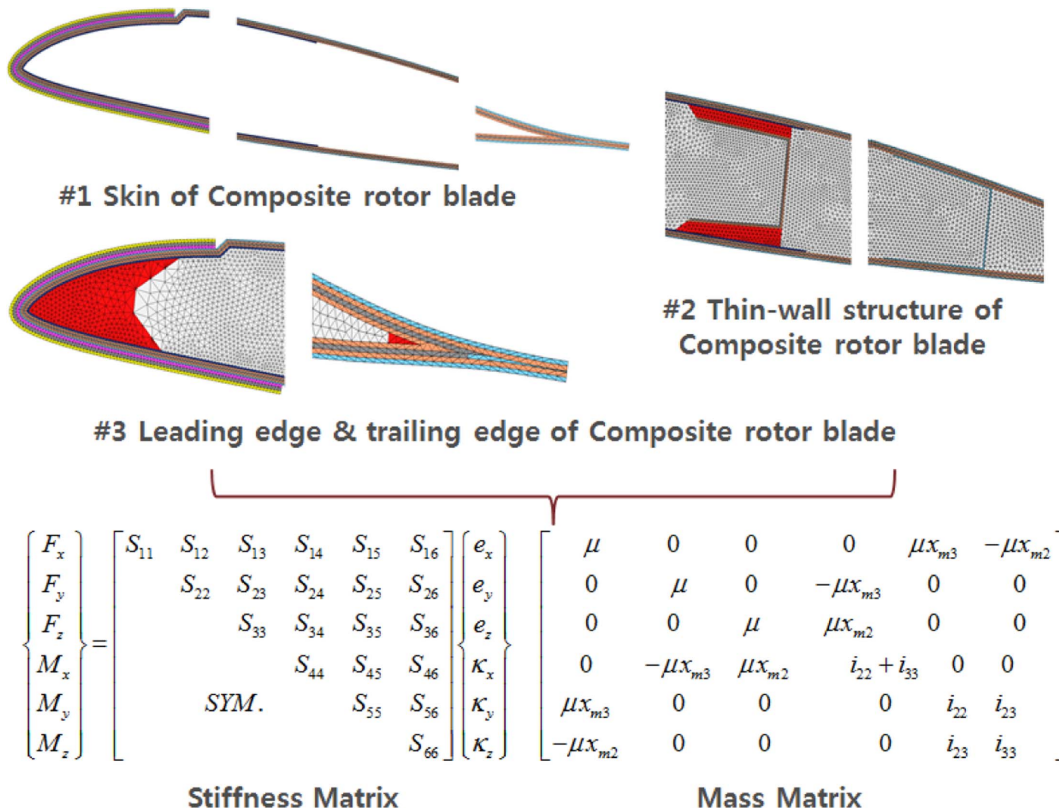


Fig. 2. 2-D Discretization for cross-sectional analysis of composite rotor blade with $r/R = 0.401$

곡된 정보로 인하여 강성행렬이나 질량행렬의 정확성이 떨어지게 된다. 그리고 정확한 단면해석 결과를 얻어내기 위하여 실물 블레이드의 형상과 동일하게 표현할 수 있도록 충분한 절점과 요소의 수를 갖는 유한요소 모델을 구성하였다.

최외각의 타이타늄 금속재를 구성하는 부분에서부터 내부의 뒷전의 스파형태의 일방향 복합재까지 실물과 동일하게 구성하고 제작순서에 따른 적층각도를 정확하게 입력하였다. 비틀림 하중을 감당하기 위하여 $\pm 45^\circ$ 의 탄소섬유와 유리섬유가 사용되며 얇은 격벽의 $\pm 45^\circ$ 의 탄소섬유는 중량과 강성분배를 위해 익근 쪽으로 갈수록 두꺼워진다. 로터 블레이드 안쪽의 폐곡선을 기반으로 연결되어 있으며 로터 블레이드의 외피와 완벽히 맞닿아 있는 것을 알 수 있다. 금속재 등방성 재료와 복합재료의 이방성, 그리고 형상의 뒤틀어짐이 포함되면 강성행렬이 연성이 커지게 되며, 행렬의 대각선을 중심으로 대칭의 특성을 가지게 된다. 이는 비선형 거동의 특징으로 나타나게 된다. Fig. 2와 같이 단면을 등가적인 강성행렬로 나타내기 위하여 복합재 블레이드의 형상이 급격히 변하는 부분과 재질이 가감되는 구간을 선정하여 단면해석을 수행하였다.

4.2 복합재 블레이드의 1차원 보의 거동해석

일반적으로 상용해석에서의 보에 대한 유한요소 해석은 1차원 절점과 요소를 적용하고 구속조건과 적용하중을 입

력하기 때문에 해석과정이 복잡하지 않다. 그러나 복합재 블레이드의 거동은 2장에서 기술된 내용과 같이 에너지 변분식과 운동에너지 변분식을 포함하는 Hamilton 원리에 적용하여 유도된 운동 방정식[17]으로 계산하였다. 복합재 구조물의 길이방향으로 선정된 단면 해석으로 각각의 위치에서 연성이 포함된 강성행렬을 계산하였기 때문에 1차원 비선형 거동에 대한 각각의 절점에서의 변위와 내부하중 정보가 계산되면 복원 관계를 이용하여 2차원 단면에서의 응력과

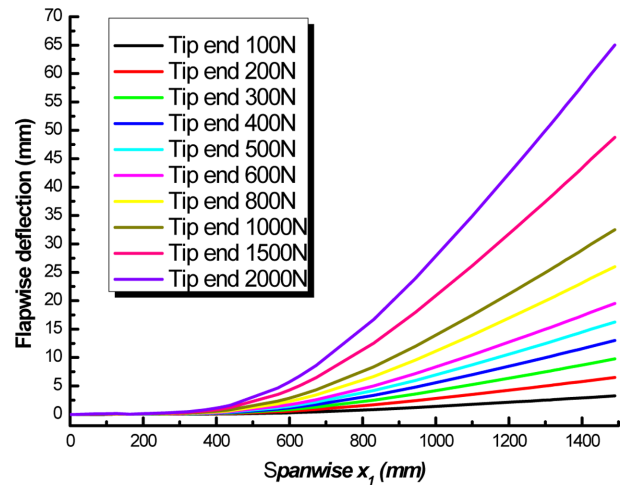


Fig. 4. Behavior estimation of composite rotor blade

Section of Composite rotor blade

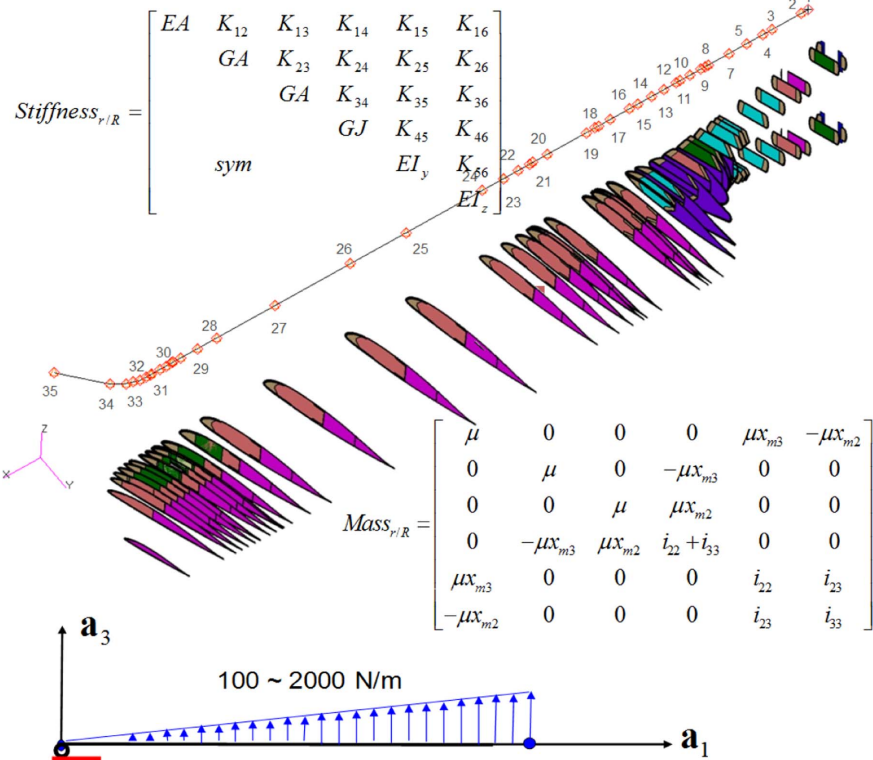


Fig. 3. Analysis model with 1-D beam for composite rotor blade and applied load

변형률 계산이 가능하게 된다. Fig. 3은 블레이드의 선정된 단면에 강성행렬을 중립점에 연결하여 구성된 1차원 보에 대한 유한요소 모델 형상이다. 블레이드가 허브가 고정되는 부분 $r/R = 0.0$ 이며 단순지지 조건으로 경계조건을 모사하였다. 그리고 블레이드 끝단 위치 $r/R = 1.0$ 에서 100 N 부터 2000 N까지 하중을 부가하여 Fig. 4에서 전체적인 거동을 확인하였다.

4.3 임의의 단면과 재료 분포를 가진 비균일 복합재료 보의 복원 해석

로터 블레이드의 개발기간 동안 발생하는 설계변경과정에서 복합재 블레이드의 3차원 유한요소 모델을 구성하기에는 불가능하기 때문에 1차원 보의 모델링 이후 복원 관계식을 이용하여 블레이드의 각각의 재료의 층별로 응력나 변형률을 추출한다면 3차원 해석효과와 1차원 모델의 효율성을 갖출 수 있다. 설계 제한 하중은 ADS-29를 근간으로 하고 있다. 헬리콥터의 운용시 블레이드의 회전속도, 피치각, 돌풍등의 외부조건을 입력하고 구속조건을 적용하여 보로 구성된 블레이드의 내부하중을 계산한다. 보로 구성된 블레이드 운동을 Fig. 5와 같이 기술할 수 있으며, 설계하중은 블레이드의 보 모델링을 통하여 생성된 강성 행렬을 통하여 계산이 가능하다. CAMRAD II[9]에서 복합재 구조물을 Euler-Bernoulli의 이론을 기본으로 보의 거동과 하중을 계산하였다. Fig. 6의 계산된 하중을 입력하여 단면위치($r/R = 0.295$)의

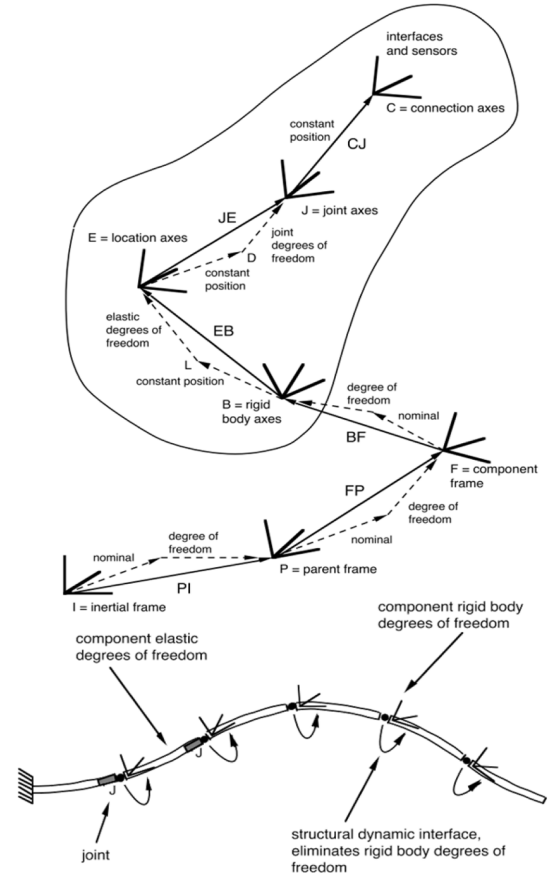


Fig. 5. Motion of connection for composite rotor blade [9]

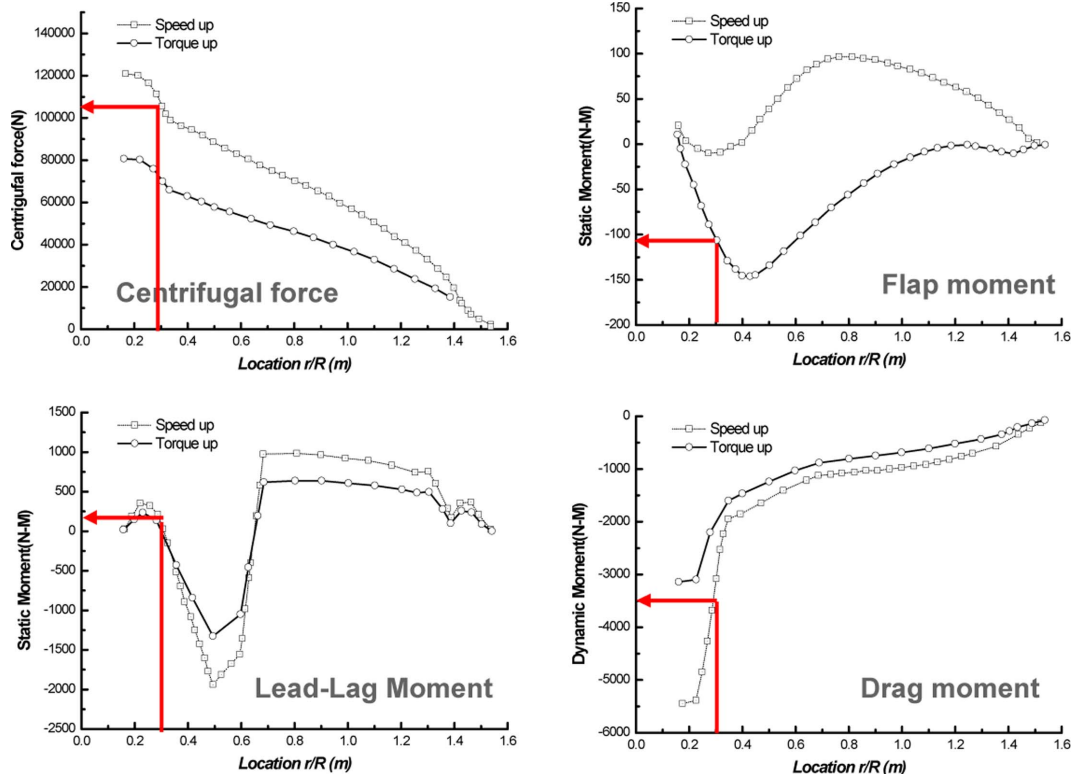


Fig. 6. Design load estimation of composite rotor blade

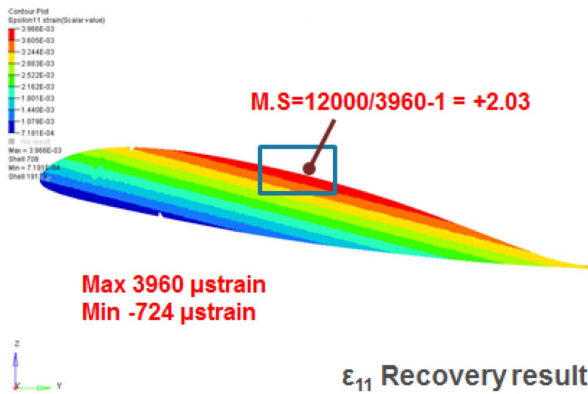


Fig. 7. ϵ_{11} strain recovery analysis result for composite rotor blade

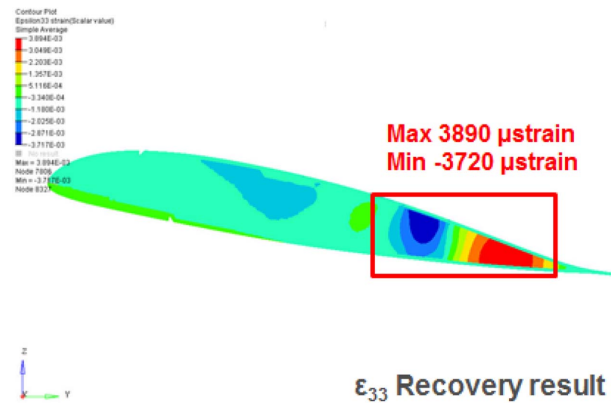


Fig. 10. ϵ_{33} strain recovery analysis result for composite rotor blade

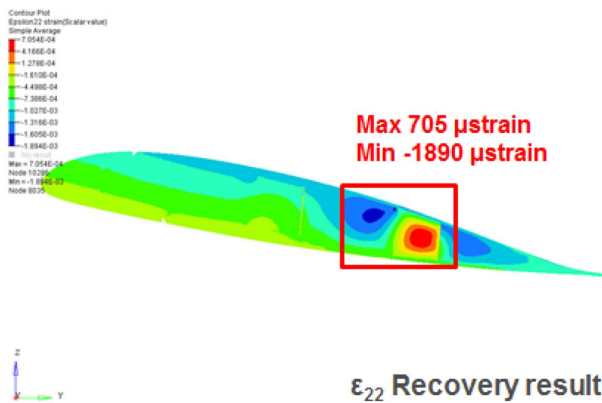


Fig. 8. ϵ_{22} strain recovery analysis result for composite rotor blade



Fig. 9. $2\epsilon_{23}$ strain recovery analysis result for composite rotor blade

유한요소 모델의 각각의 요소와 VABS로 계산된 수치해석 결과를 매핑하여 후처리 프로그램으로 형상화하였다. 보 해석에서 계산된 설계 하중을 입력하고 복원해석을 통하여 구조해석을 수행하면 블레이드 형상의 집중응력이 발생하는 지역, 최대 변형률이 발생하는 지역을 예측할 수 있다. Fig. 7, 8, 9, 10은 블레이드의 단면위치($r/R = 0.295$)에서 복원 변형

률을 계산하여 후처리로 매핑한 결과이다.

이러한 데이터는 향후 하중의 추가적인 설계 변경에 따른 설계 변경의 참고자료가 될 수 있고, 블레이드의 정적구조 시험 또는 비행시험의 측정 위치를 선정하는 기준점으로 사용될 수 있다. 최대 변형률이 발생하는 지점은 스킨의 상단 지점이다. 최대 응력의 위치에 따라 얇은 벽의 위치를 조정하여 설계변수를 조정할 수 있으며 이후에 동특성 해석을 통해 안정성을 검토할 수 있다.

회방향에 대한 변형률의 수준은 $2\epsilon_{23}$ 을 제외하고 0에 가깝다. 복원된 변형률은 운용온도에 따른 열응력을 고려할 수 있으나, 본 논문에서는 상온을 기준으로 변형률을 복원하였다.

5. 결 론

세장비가 크고 복잡한 재질로 이루어진 로터 블레이드에 3차원 유한요소모델을 적용하는 것은 많은 시간과 노력이 필요하다. 차원축소와 복원관계를 이해하고 VABS를 활용하면 블레이드 개발 단계에 적절히 대응할 수 있고, 효율성과 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 실물과 가장 가까운 복합재 로터 블레이드 3차원 모델에 등방성 및 이방성 재질을 적용하여 실제 모델에 1:1로 대응할 수 있는 정밀한 단면을 이산화하고, VABS를 이용하여 질량행렬과 강성행렬을 계산하였다. 단면해석을 통하여 연성이 고려된 강성행렬과 질량행렬을 중립점에 연결하여 블레이드의 특성을 포함한 1차원 보 모델링을 수행하였다. 보의 거시적 거동을 확인하였으며 VABS를 통해 계산된 변형률의 복원해석 결과를 매핑하여 가시화하였다. 그리고 VABS를 이용한 차원 축소와 복원해석을 통하여 공력해석에 의해 결정된 날개 외부형상 안쪽의 내부 재료 배치설계 결과를 빠르게 계산할 수 있다. 최종 설계 단면형상의 변화를 적절히 반영하고 다양한 재료로 적용되어 있는 블레이드의 개발과정에서 일어날 수 있는 변화를 손쉽게 표현할 수 있기 때문에 국내외 블레이드 설계의 개발 도구로 다양하게 활용될 수 있을 것이다.

REFERENCES

1. (International Journal) Hodges, D.H. and Popescu, B., "On Asymptotically Correct Timoshenko-like Anisotropic Beam Theory", *International Journal of Solids and Structures*, pp. 37, 1999, 535-558.
2. (International Journal) Cesnik, C.E.S. and Hodges, D.H., "Variational-Asymptotical Analysis of Initially Twisted and Curved Composite Beams", *International Journal for Engineering Analysis and Design*, Vol. 1, 1994, pp. 177-187.
3. (International Journal) Hodges, D.H. and Yu, W., "A Rigorous, Engineer-friendly Approach for Modelling Realistic, Composite Rotor Blades", *Wind Energy*, Vol. 10, 2007, pp. 179-193.
4. (International Journal) Volovoi, V.V., Hodges, D.H., Cesnik, C.E.S., and Popescu, B., "Assessment of Beam Modeling Methods for Rotor Blade Applications, Mathematical and Computer Modelling", Vol. 33, 2001, pp. 1099-1112.
5. (International Journal) Hodges, D.H., Atilgan, A.R., Cesnik, C.E.S., and Fulton, M.V., "On a Simplified Strain Energy Function for Geometrically Nonlinear Behavior of Anisotropic Beams", *Composite Engineering*, Vol. 2, 1992, pp. 513-526.
6. (International Journal) 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, 1997, pp. 27-38.
7. (International Journal) Yu, W., Hodges, D.H., Volovoi, V.V., and Cesnik, C.E.S., "On Timoshenko-like Modeling of Initially Curved and Twisted Composite Beams", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 39, 2002c, pp. 5101-5121.
8. (International Journal) Cesnik, C.E.S. and Hodges, D.H., "Stiffness Constants for Initially Twisted and Curved Composite Beams", *Applied Mechanics Review*, Vol. 46, 1993, pp. 211-220.
9. (Manual) W. Johnson, CAMRAD II Comprehensive Analytical Model of Rotorcraft Aerodynamics and Dynamics, Johnson Aeronautics, 2008.
10. (International Journal) Cesnik, C.E.S. and Hodges, D.H., "Stiffness Constants for Composite Beams Including Large Initial Twist and Curvature Effects", *Applied Mechanics Review*, Vol. 48, 1995, pp. 61-67.
11. (International Journal) Cesnik, C.E.S. and Shin, S., "On the Modeling of Integrally Actuated Helicopter Blades", *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 33, 2001, pp. 1765-1789.
12. (International Journal) Popescu, B., Hodges, D.H., and Cesnik, C.E.S., "Obliqueness Effects in Asymptotic Cross-Sectional Analysis of Composite Beams", *Computers and Structures*, Vol. 76, 2000, pp. 533-543.
13. (International Journal) Cesnik, C.E.S. and Shin, S.-J., "On the Modeling of Active Helicopter Blades", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, 2001, pp. 1765-1789.
14. (Manual) Yu, W., "VABS Manual for Users", 2010.
15. (International Journal) Reddy, J.N., "On Laminated Composite Plate with Integrated Sensors and Actuators", *Engineering Structures*, 1999, pp. 568-593.
16. (International Journal) Yu, W. and Blair M., "GEBT A General-Purpose Implementation of the Mixed Formulation of the Geometrical Exact Beam Theory", *Composite Structure*, Vol. 94, 2012, pp. 2677-2689.
17. (International Journal) Hodges, D.H., "Geometrically-Exact, Intrinsic Theory for Dynamics of Curved and Twisted Anisotropic Beams", *AIAA Journal*, Vol. 41, 2003, pp. 1131-1137.