

차원 복원해석과 가상균열닫힘 기법을 이용한 종방향 균열을 가진 세장비가 큰 보의 에너지 해방률 계산

장 준 환¹ · 구 회 민² · 안 상 호^{3*}

¹방위사업청, ²충남대학교 기계설계학과, ³신한대학교 자동차공학과

Computation of Energy Release Rates for Slender Beam through Recovery Analysis and Virtual Crack Closure Technique

Jun Hwan Jang¹, Hoi-Min Koo² and Sang Ho Ahn^{3*}

¹Defense Acquisition Program Administration, Gwacheon, 13809, Korea

²Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, 34134, Korea

³Department of Automotive Engineering, Shinhan Univ, Uijengbu, 11644, Korea

Abstract

In this paper, computation results of reducible modeling, stress recovery and energy release rate were compared with the results of VABS, Virtual Crack Closure Technique. The result of stress recovery analysis for 1-D model including the stiffness matrix is compared with stress results of three-dimensional 3-D FEM. Energy release rate of composite beam with longitudinal cracks is calculated and compare verifications of numerical analysis results of 3-D FEM and VABS. The procedure of calculating energy release rate through dimensional reduction and stress recovery is intended to be efficient and be utilized in the life-cycle of high-altitude uav's wing, wind blades and tilt rotor blade.

Keywords : cross-sectional analysis, reducible modeling, recovery analysis, virtual crack closure technique

1. 서 론

항공기 수명주기 과정에서 가혹한 환경에서의 장시간 노출과 고 하중 임무로 인해 기체의 주요 하중을 지지하는 부위에서 다양한 형태의 문제가 발생된다. 또한 제조과정에서 내재된 잠재결함이 시간이 지남에 따라 균열에 이르고, 이와 같은 문제는 항공기의 수명과 안전에 직결되기 때문에 정확한 해석과 다양한 실험이 필요하다. 구조 안정성 문제를 모사하기 위하여 3차원 유한요소로 접근하게 되면 해석 모델을 구축하는데 많은 시간과 인적 자원이 소요되며, 신뢰도가 있는 모델을 위해서는 많은 경험과 노하우가 필요로 한다(Jang *et al.*, 2015). 개발과정에서 모사된 해석모형의 정확성을 높이기 위한 다양한 실험 과정이 필요하고, 물질적, 시간적 손실이 발생된다. 세장비가 큰 복합재 보의 경우, 3차원 유한요소 모델의 효율성과

정확성이 저하되기 때문에 효과적으로 거동을 예측하기 위해서는 차원축소를 통한 1차원 보 모델을 구성해야 한다. 차원축소를 통한 보 모델에 관련된 국외의 연구 중에 Chen(2009)은 차원축소를 위한 단면해석 프로그램에 대한 수치 비교연구를 수행하였다. Hu(2010)는 Hodges(2003)의 운동방정식에 기반한 1차원 보의 거동과 하중을 계산하는 GEBT(Yu *et al.*, 2012)와 단면해석과 응력 및 변형률 복원을 수행하는 VABS(Yu *et al.*, 2012)를 연계하여 차원 축소와 복원의 과정을 통합하는 프로그램인 VABS-IDE에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 균열의 강성의 예측하기 위한 연구로 Burlayenko 등(2016)은 가상균열닫힘 해석을 이용하여 세라믹 표면상에서 발생하는 열탄성 문제를 계산하였고, Sun과 Liu(2015)는 티타늄합금에서의 균열침투를 가상균열닫힘 해석(VCCCT) 통해 수치해석을 예측하고 최적화 설계에 이용하였다. Ahn 등

* Corresponding author:

Tel: +82-31-870-3683; E-mail: drshahn@naver.com
Received October 23 2016; Revised December 2 2016;
Accepted January 2 2017

©2017 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.

(2012)은 가상균열단합 해석(VCCT)을 이용하여 섬유 보강 복합재료판에 K_I 과 K_{II} 에 의한 혼합모드 상태의 균열된 알루미늄판의 응력확대계수의 수치해석 효과적인 계산과정을 제시하였다. Heo 등(2001)은 체결부에 존재하는 임의의 균열에 대한 가상균열단합법을 이용하여 응력확대계수를 계산하였다.

본 논문에서는 VABS를 이용한 복합재 보의 차원을 축소한 단면해석의 정확성을 제시하고 복원응력을 사용한 효과적인 에너지 해방률 계산사례를 소개하고자 한다. VABS는 단면해석과 복원해석을 위한 연구코드로 1989년 Georgia Tech의 Hodges에 의해 개발되었으며 이후 Cesnik, Yu 등에 의해 발전되고 있다. 차원축소-복원 과정을 통한 해석 결과와 3차원 유한요소 해석의 결과와 비교함으로써 차원축소와 복원해석의 효율성과 정확성을 확인한다. 이후 가상균열단합(virtual crack closure technique)을 이용하여 1차원 보의 단면의 변위와 힘을 추출하여 에너지 해방률을 계산하여 에너지 해방률(ERR)과 일대일로 대응하는 응력확대 계수를 얻어 잔존수명을 예측할 수 있다.

2. 단면해석을 통한 차원 축소와 복원

2.1 보의 차원축소

복잡한 3차원 형상을 차원축소를 통해 2차원 단면계수를 얻고 1차원 보의 운동방정식에 대입하여 거동을 모사하는 것이 단면해석을 이용한 차원축소 모델링의 핵심이며, 이러한 과정을 이용하여 응력과 변형률을 복원할 수 있다. 본 논문에서는 복합재 블레이드와 같이 큰 세장비를 갖는 이방성 재질의 적용된 보의 차원축소와 복원해석을 수행하기 위하여 VABS를 사용하였다.

Fig. 1은 차원 축소된 1차원 보 모델로부터 복원해석을 수행

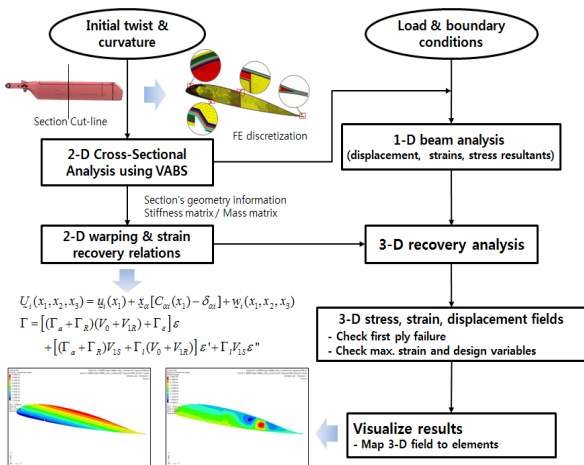


Fig. 1 Dimension reduction & recovery process of composite beam

하는 전체적인 과정이다. 2차원 복합재 보의 단면을 이산화하고 형상정보와 재질정보를 입력하면 단면해석을 수행하면 강성행렬과 질량행렬을 계산할 수 있다. 강성행렬과 질량행렬을 연결하여 1차원 보 모델을 구성한 이후, 거동해석을 수행하여 계산된 1차원 보의 거동을 계산하여 획득한 하중과 변위를 입력하여 3차원의 복원응력 또는 변형률을 출력할 수 있다.

2.2 차원축소 모델의 복원

설계 대상을 차원축소를 통해 행렬 형태로 만들 수 있다면 역으로 1차원 차원축소 모델을 3차원의 응력과 변형률 분포를 계산할 수 있다. 그 과정은 Yu 등(2012)에 전개 과정이 자세히 기술되어 있으며 보의 평형 방정식으로 부터 얻은 변형률의 1차 미분과 2차 미분을 복원이론에 의하여 응력이 표현된다. Fig. 2와 같이 횡전단 변형을 허용하는 Timoshenko 보의 단면해석을 통해 강성 행렬을 얻을 수 있다.

핵심은 구조의 단면을 3차원 변형률의 식으로 표현하는 것이며 변형률 에너지는 다음과 같다.

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

여기서, Γ 는 변형률, D 는 복합재료의 강성행렬이다. 단면해석을 계산될 수 있으며 변형률 에너지의 정의를 통하여 식 (1)의 형태로 정리하면 표현하면 고전 복합재료 역학에서 정의한 강성행렬을 얻을 수 있다. 식 (2)에서 S_{ij} 는 횡전단 변형을 허용한 Timoshenko 복합재료 보에 대한 강성행렬이다.

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

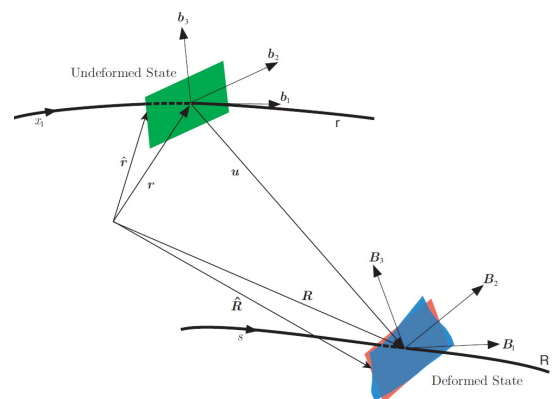


Fig. 2 Schematics of beam deformation (Yu et al., 2012)

2차원의 단면해석 모델이 1차원의 보 형태의 모델로 차원 축소되었다면 역으로 보의 거동을 통해 계산된 변위와 내부 하중을 이용하여 차원의 복원이 가능하다. 초기에 비틀림과 굽힘이 있는 보 형상에 대하여 워핑함수는 h/R 과 h/l 의 차수로 표현할 수 있다.

$$w(x_i) = (V_0 + V_{1R})\epsilon + V_{1S}\epsilon' \quad (3)$$

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 개선된다. 3차원 변형률을 변형률과 변형률의 1, 2차 미분항으로 표현된다.

$$\Gamma = [(\Gamma_a + \Gamma_R)(V_0 + V_{1R}) + \Gamma_\epsilon]\epsilon + [(\Gamma_a + \Gamma_R)V_{1S} + \Gamma_l(V_0 + V_{1R})]\epsilon' + \Gamma_l V_{1S}\epsilon'' \quad (4)$$

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

보의 평형 방정식(Hodges, 2003)으로 부터 얻은 변형률의 1차 미분과 2차 미분을 얻고 복원이론에 의하여 응력이 표현되고 횡진단 변형을 허용하는 Timoshenko 보의 단면해석을 통해 강성 행렬을 얻을 수 있다. 1차원 보의 거동에 대한 유한요소 모델을 통하여 응력과 변형률이 계산된다.

$$\epsilon = S^{-1}F \quad (5)$$

3. 가상균열단합법

3.1 가상균열단합법

가상균열단합 해석(VCCCT)은 균열이 발생된 인접한 두 면이 분리되는 현상으로 이상화시키고, 균열 전과 경로를 따라 응집영역을 가정하여 두 구간의 윗면과 아랫면 사이의 견인력과

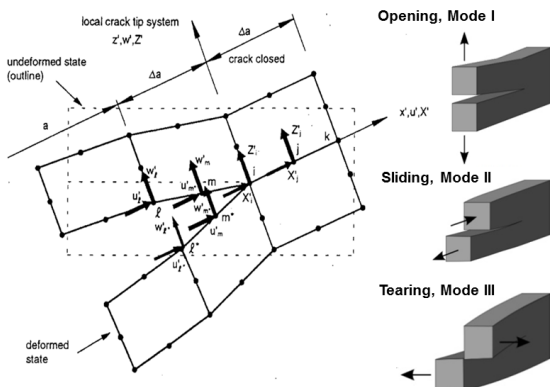


Fig. 3 Virtual crack closure technique using hexa element

변위의 관계를 구성방정식을 이용하고, 균열의 발생과 성장을 해석하는 기법이다. Fig. 3에서 8절점 사각요소에 대하여 모드 I, 모드 II, 모드 III를 나타내었으며 절점에서 변위와 힘을 추출하여 식 (6)으로 에너지 해방률을 계산한다(Blasques, 2015).

$$G_I = \frac{1}{2a_l} \{r_i^2 \Delta u_{l,n}^2 + r_j^2 \Delta u_{k,m}^2\}$$

$$G_{II} = \frac{1}{2a_l} \{r_i^1 \Delta u_{l,n}^1 + r_j^1 \Delta u_{k,m}^1\}$$

$$G_{III} = \frac{1}{2a_l} \{r_i^3 \Delta u_{l,n}^3 + r_j^3 \Delta u_{k,m}^3\}$$

$$G_{total} = G_I + G_{II} + G_{III} \quad (6)$$

여기서, u 는 변위이며 r 은 절점에서 적용되는 힘이다. 본 논문에서는 3차원 유한요소모델 및 VABS에서 구동된 단면해석 모델에서 변위와 힘을 추출하여 에너지 해방률을 계산한다. 에너지 해방률은 식 (7)에 의해 평면응력과 평면변형률 조건에 따라 나뉘고, 각각의 모드 별로 응력확대 계수로 변환할 수 있다.

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

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

3.2 차원축소와 복원을 통한 에너지 해방률 계산

임의의 단면에 대한 종방향 균열을 가진 복합재료 구조물의 에너지 해방률 효과적으로 계산하기 위해서 단면해석을 통해 차원축소와 복원해석을 수행한다. Fig. 4는 VABS를 통해 보의 차원축소와 차원복원 해석을 수행한 이후 응력확대 계수(K)와 일대일로 대응되는 에너지 해방률(ERR) 혹은 균열 진전력(G)을 계산하는 순차적인 예이다. 에너지 해방률을 계산하는 과정은

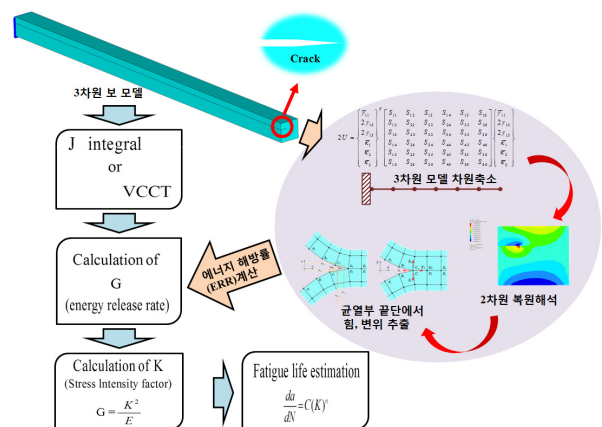


Fig. 4 Linear elastic fracture mechanism approach

6단계로 구분된다.

1단계는 해석을 하고자 하는 형상에 대해 파악하고 3차원의 형상을 2차원의 단면으로 구현하기 위해 각각의 단면을 구분한다. 2단계에서 각각의 2차원 단면 형상을 유한요소를 통해 FEM을 생성한다. 3단계는 2차원 FEM 단면 형상을 이용하여 각 단면의 형상 정보와 재질 정보를 포함한 강성행렬을 1차원 보에 적용한다. 4단계는 구조물에 적용되는 하중 조건을 1차원 보에 적용을 하여 하중에 따른 결과를 산출한다. 5단계는 1차원 보 해석을 통해 구해진 결과를 2차원 FEM 형상단면에 복원한다. 6단계에서는 복원된 단면에서 응력, 힘, 변위 등을 이용하여 균열부에서 발생하는 에너지 해방률(ERR) 혹은 균열 진전력(G)을 계산한다. 도출된 결과를 통해 최종 파단까지의 균열성장애 사용되는 반복수명을 실험값과 유사하게 예측할 수 있다. 균열 길이를 다양하게 변경하며 빠르게 결과를 효율적으로 산출할 수 있기 때문에 이를 통해 임계균열 크기로 성장하지 못하게 설계하거나 안전/수명 또는 파괴/안전 설계를 수행할 수 있다.

4. 수치해석 검증 예제

본 장에서는 차원축소와 복원해석을 통해 얻어지는 결과를 3차원 유한요소해석 결과와 비교한다. 그리고 3차원 모델의 가상균열단합 결과와 차원축소-복원해석 후 변위와 하중을 추출하여 에너지 해방률 계산결과를 비교한다.

4.1 등방성 재질이 적용된 보의 3차원 응력과 복원응력 비교

Fig. 5와 같이 3차원 유한요소 해석과 차원축소 및 복원해석 결과를 비교하기 위해 등방성 재질과 이방성 재질이 적용된 2가지 모델을 구성하였다. 10×10mm의 단면으로 구성되어 있고, 길이는 500mm의 보 형상이다. 보의 재질과 형상은 Table 1에 나타내었고, Case 1은 한 개의 등방성 재질, Case

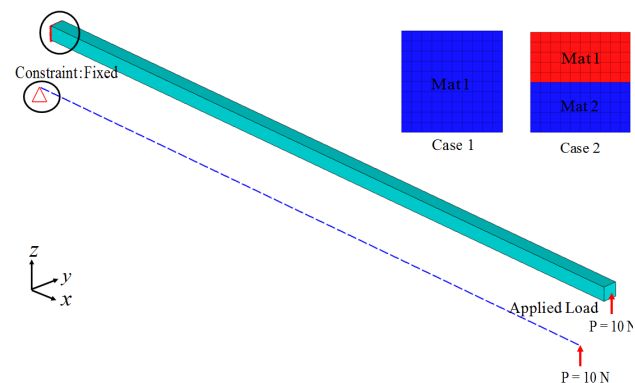


Fig. 5 Rectangular beam : 3-D FEM & 1-d beam model

2는 보의 중립면 기준으로 두개의 등방성 재질로 구성되어 있다. 3차원 유한요소모델은 5001개의 솔리드 요소로 되어있고, 1차원 변분근사 모델은 50개의 보 요소로 되어있다.

끝단은 고정단으로 경계조건을 주었고 다른 한쪽은 전단하중 10N을 가하였다. Fig. 3에서 3차원 모델 단면형상과 1차원 변분근사 모델링 및 적용하중을 나타내었다. 3차원 유한요소 모델의 응력결과는 축 방향의 중심 250mm 위치에서 추출하였고, 1차원 변분근사모델의 결과 또한 중립축에서 복원해석 수행하였다. Fig. 6과 7을 통해 3차원 모델의 응력과 차원 축소모델의 복원응력이 동일한 응력선도를 나타내고 결과 또한 1% 이하의 오차 수준임을 확인하였다.

Table 1 Material property and geometry

Properties	Material 1	Material 2
E	71,709MPa	195,122MPa
G	27,370MPa	75,842MPa
v	0.31	0.28
Length	500mm	
Width	10mm	
Height	10mm	

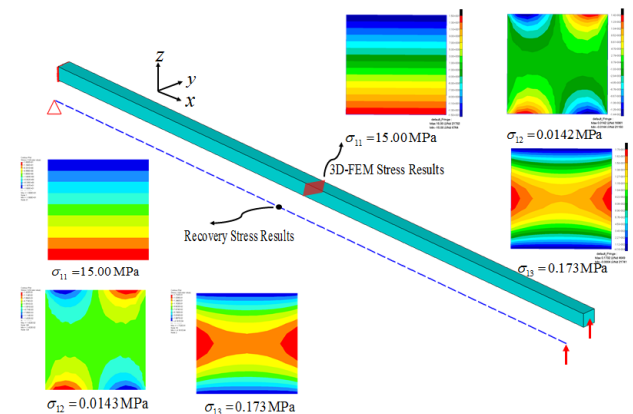


Fig. 6 Stress result at span=250mm, Case 1

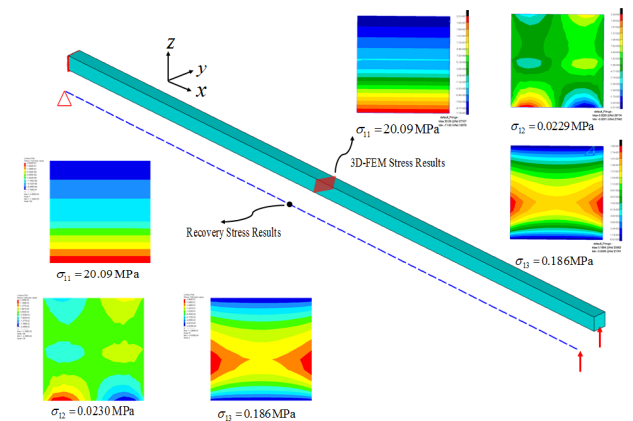


Fig. 7 Stress result at span=250mm, Case 2

4.2 가상균열 단립을 이용한 보의 에너지 해방률 비교

본 절에서는 3차원의 종방향 균열을 갖는 보 모델에서의 에너지 해방률(ERR)을 구하기 위해 등방성 재질의 원형 단면을 적용한 보 모델을 가지고 가상 균열단립 해석(VCCT)을 수행한다. 균열진전 수치모델은 Fig. 8과 같이 3차원 유한요소 모델과 1차원 보 모델로 구성하였다. 수치모델의 단면은 원형(Case1)과 사각형(Case2)이며 초기균열은 원형 단면인 경우 $\Delta a_0 = 2.0\text{mm}$, 사각 단면의 경우 $\Delta a_0 = 3.33\text{mm}$ 이 적용되어 있다. 원형단면 보의 끝단에 Y축 방향으로 10,000N을 하중을 가하였고, 사각형단면 보에는 Z축 방향으로 10,000Nm의 모멘트를 부여한다. 보 모델의 형상과 재질을 Table 2에 나타나 있다.

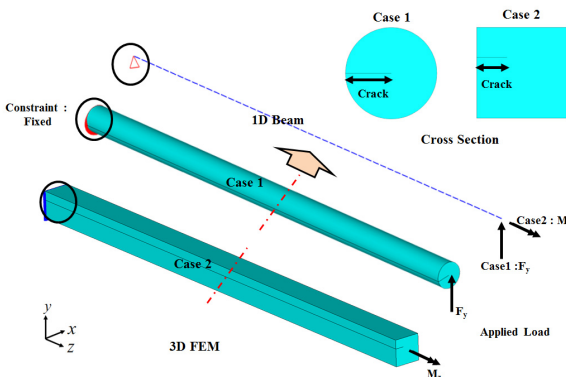


Fig. 8 Circular beam : 3D model & cross-section

Table 2 Geometry and material property of single material beam

Geometry			Properties	
Cross Section	Case 1	R=50mm	E	71,709MPa
	Case 2	100mm×100mm	G	27,370MPa
Length	2000mm		ν	0.31
			ρ	$1.00\text{E}^{-6} \text{ Kg/mm}^3$

3차원 유한요소해석은 Nastran을 이용하여 수행하였다. 3차원 결과와 차원 축소로 구한 에너지 해방률(ERR) 결과를 시험식(Murakami, 1987)을 통해 비교하였다. Murakami (1987)의 실험식은 적용하중, 포화충비, 균열길이로 표현되고 식 (8)과 같다.

$$K_{III} = \frac{(1.375776 + 1.354244\nu)T_y}{(1-\nu)a^{1.5}}, \quad G_{III} = \frac{(1+\nu)K_{III}^2}{E}$$

$$K_{III} = \frac{3.22482M_z}{w^{2.5}}, \quad G_{III} = \frac{(1+\nu)K_{III}^2}{E} \quad (8)$$

Fig. 9와 Fig. 10에서와 같이 보의 중앙부에서의 3차원

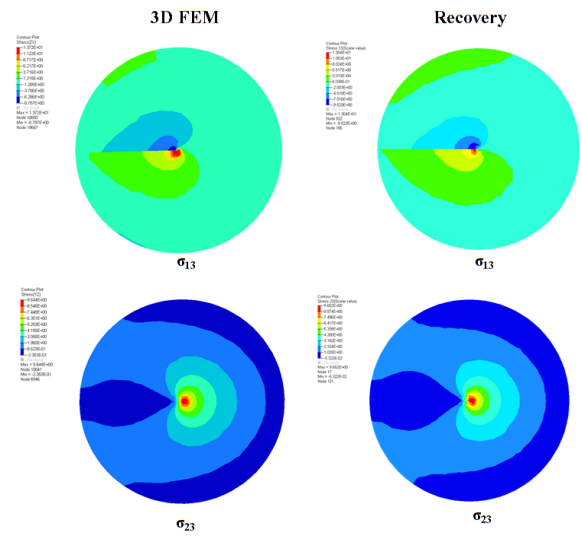


Fig. 9 Stress results of case 1, 3-d FEM & 1-d beam recovery result

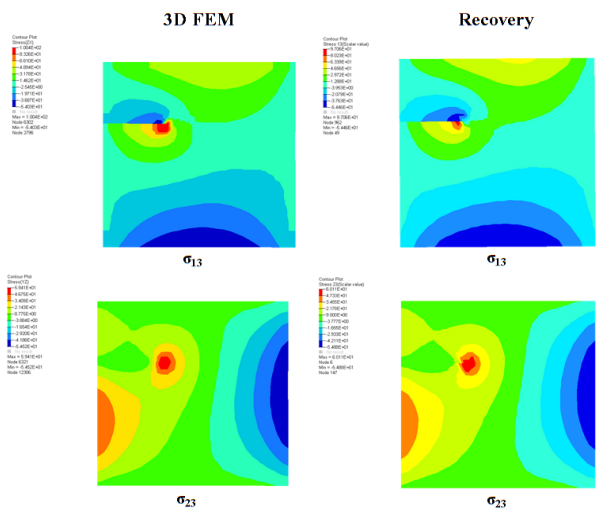


Fig. 10 Stress results of case 2, 3-d FEM & 1-d beam recovery result

모델과 복원 해석된 보의 응력 분포를 시각적으로 표현하였고, 유사한 응력분포를 볼 수 있다. Fig. 11, Fig. 12는 길이 방향에 따른 에너지 해방률(ERR)의 값을 계산하여 축 방향으로 계산한 결과로 경계조건과 하중 조건이 있는 양 끝단을 제외하고 중앙부분에 접근할수록 3차원 해석결과와 차원복원 해석 결과가 점진적으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11과 Fig. 12의 결과에서 보의 길이방향에서 중간 지점을 관심지역 ($L/2 = 1000\text{mm}$)에서의 결과를 추출하여 Table 3과 같이 비교하였다.

원형 모델에서는 실험값을 기준으로 3차원 해석결과에서 얻은 에너지 해방률의 오차는 0.54%, 1차원 보의 복원해석 결과에서 수치해석으로 계산된 에너지 해방률의 오차는 0.81%를 확인할 수 있다. 사각 단면 모델에서는 실험값을 기준으로 3차원

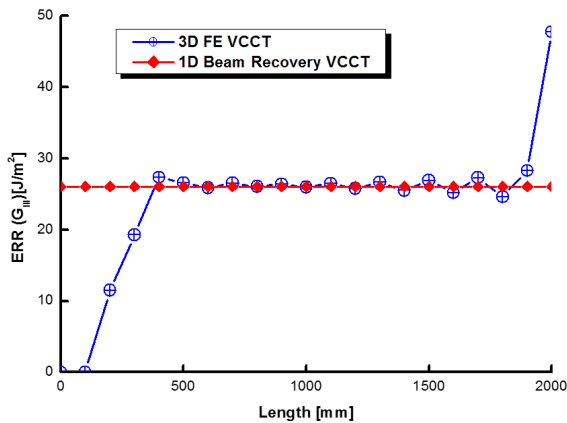


Fig. 11 ERR along the lengthwise direction : Case 1

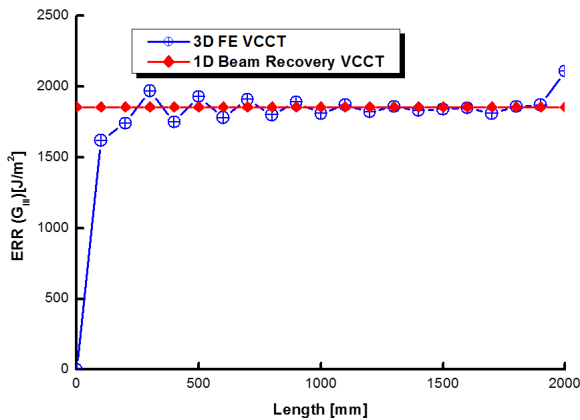


Fig. 12 ERR along the lengthwise direction : Case 2

Table 3 Geometry and material property of single material beam

Case	Case 1		Case 2	
	$G_{III}(J/m^2)$	Err(%)	$G_{III}(J/m^2)$	Err(%)
Analytical (Murakami, 1987)	25.85	-	1902	-
3D FE VCCT	25.99	0.54	1882	1.05
1D Recovery	26.06	0.81	1885	0.89

해석결과에서 얻은 에너지 해방률의 오차는 1.05%, 1차원 보의 복원해석 결과에서 수치해석으로 계산된 에너지 해방률의 오차는 0.89%를 확인할 수 있다.

5. 결 론

세장비가 큰 보 구조를 3차원 유한요소모델 형태로 접근하게 되면 모델을 구축하는 것은 많은 시간과 인적자원이 소요되며, 많은 경험과 노하우가 필요로 한다. 본 논문에서는 차원축소와 복원해석을 바탕으로 효율적인 가상균열단합 해석(VCCT)을 통해 에너지 해방률(ERR)을 계산하는 과정을 기술하였고

다음과 같은 결론을 얻었다.

단면해석 프로시저를 통해 차원축소와 복원해석을 수행하여 3차원 유한요소해석의 한계를 극복하고 효율적인 에너지 해방률 계산 기법을 제시하였다.

보의 차원축소와 복원기법 및 가상균열 단합법을 이용하여 복원해석 결과 및 에너지 해방률을 비교하여 효율성과 정확성을 입증하였다. 특히 제시된 에너지 해방률 계산 기법은 고고도 무인기의 날개, 헬리콥터 로터 블레이드, 풍력 블레이드, 틸트 로터 등의 정적, 동적 모델링 및 수명평가에 활용될 수 있을 것이다.

References

- Ahn, J.S., Woo, K.S. (2012) Mixed Mode Analysis using Two-step Extension Based VCCT in an Inclined Center Crack Repaired by Composite Patching, *J. Korean Soc. Civil Eng. A*, 32, pp.11~18.
- Blasques, J.P., Bitsche, R.D. (2015) An Efficient and Accurate Method for Computation of Energy Release Rates in Beam Structures with Longitudinal Cracks, *Eng. Fract. Mech.*, 133, pp.56~69.
- Burlayenko, V.N., Altenbach, H., Sadowski, T., Dimitrova, S.D. (2016) Computational Simulations of Thermal Shock Cracking by the Virtual Crack Closure Technique in a Functionally Graded Plate, *Comput. Mater. Sci.*, 116, pp.11~21.
- Chen, H., Yu, W., Capellaro, M. (2009) A Critical Assessment of Computer Tools for Calculating Composite Wind Turbine Blade Properties, *Wind Energy*, 13, pp.497~516.
- Hodges, D.H. (2003) Geometrically-Exact, Intrinsic Theory for Dynamics of Curved and Twisted Anisotropic Beams, *AIAA J.*, 41, pp.1131~1137.
- Hu, P. (2010) 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.
- Hur, S.-P., Yang, W.-Ho, Kim, C., Ko, M.-H. (2001) Stress Intensity Factor Calculation of Elliptical Arc Through Cracks in Mechanical Joints by Virtual Crack Closure Technique, *Korean Soc. Mech. Eng.*, pp.33~38.
- Jang, J.H., Lee, H. (2015) Blade Analysis Library Development of Dimension Reducible Modeling and

- Recovery Analysis for Composite Rotor Blades, *J. Korean Soc. Aeronaut. & Space Sci.*, 43, pp.920~927.
- Murakami, Y.** (1987) Stress Intensity Factors Handbook, Pergamon Press.
- Sun, Y., Liu, M.** (2015) Analysis of the Crack Penetration/Deflection at the Interfaces in the Intelligent Coating System Utilizing Virtual Crack Closure Technique, *Eng. Fract. Mech.*, 133, pp.152~162.
- Yu, W., Blair, M.** (2012) GEBT: A General-Purpose Nonlinear Analysis Tool for Composite Beams, *Composite Structures*, 94(9), pp.2677~2689.
- Yu, W., Hodges, D.H., Ho, J.** (2012) Variational Asymptotic Beam Sectional Analysis-An Updated Version, *Int. J. Eng. Sci.*, 59, pp.40~64.
- Yu, W., Hodges, D.H., Ho, J.C.** (2012) Variational Asymptotic Beam Sectional Analysis-An updated version, *Int. J. Eng. Sci.*, 59, pp.40~64.

요 지

본 논문에서는 이종재질로 구성된 세장비가 큰 보의 차원축소와 복원의 효율성과 정확성을 입증하기 위하여 VABS와 3차원 유한요소해석 모델의 결과와 비교하였다. 그리고 3차원 유한요소모델과 차원축소 모델을 가상균열단힘법을 이용하여 에너지 해방률을 계산하였다. 원형과 사각형의 단면에 초기 크랙을 가진 수치모델을 이용하여 보의 차원축소와 복원기법 및 가상균열단힘법을 이용하여 복원해석 결과 및 에너지 해방률을 비교하여 효율성과 정확성을 입증하였다. 특히 제시된 에너지 해방률 계산 기법은 고고도 무인기의 날개, 헬리콥터 로터 블레이드, 풍력 블레이드, 틸트로터 등의 정적, 동적 모델링 및 수명평가에 활용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 단면해석, 차원축소 모델링, 복원해석, 가상균열단힘법