

높은 세장비를 가진 복합재 날개 구조의 효율적인 고기능 설계를 위한 구조해석 해석 라이브러리 개발

박제홍¹⁾ · 장준환^{*,2)}

¹⁾ 한서대학교 항공전자공학과

²⁾ 유한대학교 기계공학과 기계설계전공

Structural Analysis Library Development for Efficient High-Fidelity Composite Rotor Blade and Wing Design with High Aspect Ratio

Jehong Park¹⁾ · Jun Hwan Jang^{*,2)}

¹⁾ Dept. of Avionics Engineering of Hanseo University, Korea

²⁾ Dept. of Mechanical Engineering of Yuhan University, Korea

(Received 25 February 2019 / Revised 23 April 2019 / Accepted 7 June 2019)

ABSTRACT

It takes a lot of time and human resources to build a detailed three-dimensional finite element analysis model that is almost similar to the actual structure for sophisticated analysis, and a lot of experience and know-how is required to form a reliable analytical model. In this paper, the one-dimensional beam model connected by stiffness matrix through blade analysis library was compared with the results of three-dimensional analysis with the stress calculated through the process of dimensional restoration analysis based on the principle of virtual work. By comparing the stress calculated through dimensional restoration analysis with the three-dimensional analytical model, We will introduce the development status and application case of the blade analysis library by comparing efficiency and accuracy.

Key Words : Rotor Blade(로터 블레이드), Blade Analysis Library(블레이드 해석 라이브러리), Dimensional Reduction (차원 축소), Recovery Analysis(복원 해석)

1. 서론

일반적으로 보 모델링은 정적해석의 대략적인 거동

을 알기 위해 수행되며 공력해석이나 동역학 해석에서 주로 사용된다. 복잡한 형상을 등가적 특성을 갖도록 표현하는 것이 주요 관건이다. 특히 로터 블레이드의 경우 형상의 변화가 심하면서도 다양한 재료의 복합재료가 적용되었기 때문에 3차원 지오메트리의 정밀한 구현이 어렵다. 블레이드는 기하학적으로 길이

* Corresponding author, E-mail: bulbearj@gmail.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

대 두께의 비가 매우 큰 형태를 가지며 굽힘과 비틀림으로 인한 탄성 변형을 갖게 되어 비선형 특성이 고려되어야 한다. 특히 복합재료로 이루어진 헬리콥터 블레이드나 고고도 무인기 날개 구조물을 보 구조물로 해석할 경우, 재료 자체의 이방성에 기인하는 운동 상호 방향간의 연성효과를 적절히 고려해야 하며 높은 세장비에도 불구하고 횡 전단변형이나 단면내외의 워핑변형, 워핑구속 효과가 상대적으로 크게 나타나게 되어 일반 금속 구조에서는 찾아볼 수 없는 비고전적 효과들이 매우 중요한 해석인자가 된다¹²⁾.

복합재 블레이드의 차원 축소 모델링 기법은 20년 전부터 활발히 제안되고 있다. 국내외에서 수행되고 있는 연구결과 중에는 3차원 유한요소모델보다 자유도가 적은 1차원 유한요소를 모델을 이용하여 효과적인 정적/동적 해석을 수행하면서 정밀도는 3차원 해석과 동등한 결과를 내는 차원축소-복원해석 기법이 제시되고 있다. Hu^[34]는 Hodges의 운동방정식에 기반한 1차원 보의 거동과 하중을 계산하는 GEBT^[5]와 단면해석과 응력 및 변형을 복원을 수행하는 VABS^[6,7]를 연계하여 차원 축소와 복원의 과정을 통합하는 프로그램 VABS-IDE에 대한 연구를 수행하였다. 국내에서 수행된 연구 중에 도형수 외^[8]는 단면 모델링 프로그램 KSec2D의 집합연산에 관한 연구를 수행하였고 강연철 외^[9]는 C++ 3차원 그래픽 라이브러리 Open CASCADE를 활용하여 복잡하게 모델링 되어 있는 로터 블레이드의 단면을 효율적으로 설계할 수 있는 형상 단면 모델링, 요소생성 및 단면해석 프로그램을 개발하였다. 장준환과 안상호는^[10]는 Hodge와 Yu가 개발한 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.

본 논문에서 소개할 블레이드 해석 라이브러리는 삼각 또는 사각 요소로 이산화된 유한요소를 기반으로 수행되며 국내외에서 개발된 차원축소 단면해석을 수행하는 단계를 통해 얻은 강성행렬과 연계하여 1차원 보 모델을 만들고, 수행된 보 해석의 결과로 얻은 변형을 및 하중을 입력하여 3차원 유한요소해석 결과와 동등 수준의 복원해석을 수행한다. 복원해석 결과를 이산화된 2차원 유한요소모델에 매핑하여 가시화된 변형을 및 응력 분포를 계산하고, 차원 축소 모델

의 해석 결과와 3차원 해석 결과를 비교한다. 많은 연구자들이 검증모델로 수행했던 연구모형을 이용하여 차원 복원해석의 비교연구를 수행하여 복합재료 보 해석 라이브러리의 응용사례와 향후 연구 방향을 소개하고자 한다.

2. 차원축소와 복원해석 프로시저

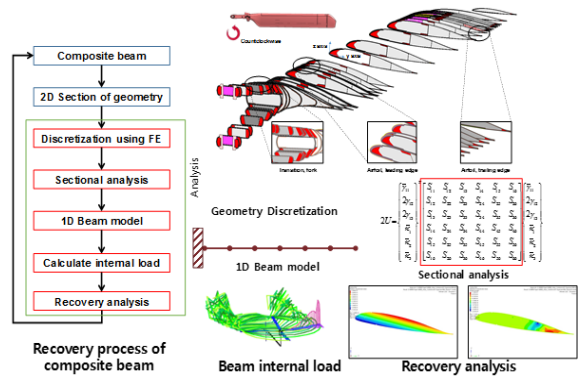


Fig. 1. Dimensional reduction model & recovery analysis procedure

Fig. 1에 제시된 높은 가로 세로 비율이 높은 날개와 로터 블레이드 설계의 문제에 대한 3차원 설계 기법은 2차원 단면분석과 1차원 보의 모델링으로 세분화된다. 이 접근법은 세장비가 큰 구조의 횡단면 특성을 쉽게 정의할 수 있다. 보 모델링은 일반적으로 가로 세로 비율이 높은 고고도 UAV의 날개나 로터 블레이드의 동특성 해석에 적용한다. Fig. 1과 같이 로터 블레이드의 단면은 구조 위상, 레이아웃, 재료 및 플라이 두께를 기준으로 분석된다. 그 후, 삼각형 또는 사각형 요소에 의해 분해되고 재료 특성이 적용되어 질량과 강성, 전단 중심, 무게중심이 결정된다. 4×4 또는 6×6의 질량 매트릭스와 강성 행렬이 별도로 생성된다. 이러한 질량과 강성 행렬은 속성으로서 1차원 모델의 보 요소에 할당된다. Fig. 1에 기술된 프로시저와 같이 복합 재료 블레이드의 설계는 차원 축소와 복원이 동시에 이루어지며 반복된다. 차원이 축소된 1차원 보 모델은 변형을 검토하고, 설계하중을 입력하여 차원 복원 해석을 통해 3차원 수치 결과를 2차원 단면에 매핑함으로써 응력 결과를 시각화할 수 있다. 차원 축소 모델에서 계산한 강성 행렬에 기초한 변형

를, 진동 요건을 충족할 때 블레이드의 설계 하중을 입력하여 유한 요소로 구성된 블레이드에 대한 3차원 복원 응력을 계산한다. 이러한 분석 프로시저 동안에 설정된 설계 변수는 수정될 수 있고, 분석을 반복하여 최적화된 구조적 요구사항을 만족하는 설계 변수를 결정하고 안전성의 구조적 여유를 계산할 수 있다.

3. 블레이드 해석 라이브러리

3.1 블레이드 해석 라이브러리의 개발 요소

3차원 복합재료 블레이드 모델을 1차원 보로 축소 모델을 구성하기 위해서는 강성 행렬과 질량 행렬을 계산하는 과정이 필요하다. 이 때, 2차원 단면의 특성을 파악해야 하고 이를 위해서 단면을 삼각형 또는 사각형 유한 요소로 나누어야 한다. 유한 요소 모델은 다양한 복합 재료의 특성과 구성 정보를 고려하여 전처리 도구에 의해 만들어져야 한다. 블레이드 해석 라이브러리는 매프를 기반으로 모듈 형태로 개발되었다. 국내 연구진이 개발한 독립 프로그램과 달리, 블레이드 해석 라이브러리는 내부 및 외부의 적층 규칙에 의해 정밀하게 설계되며, 설계 데이터를 입력한 이후, 단면 분석을 실시하여 구성의 왜곡 없이 정확하게 기술한다.

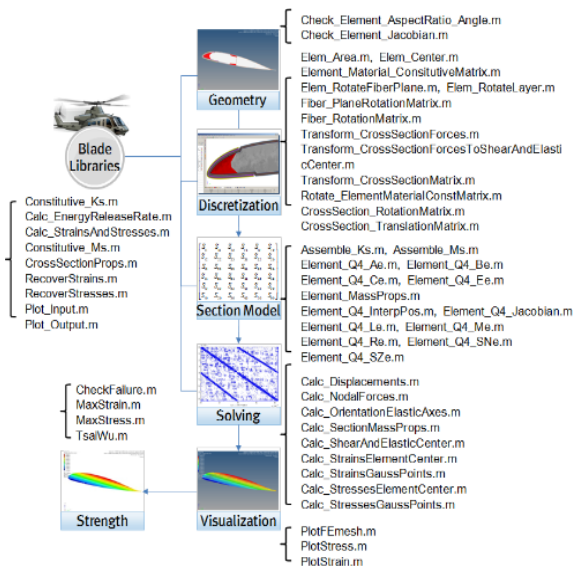


Fig. 2. Analysis library hierarchy of slender wing structure^[10]

블레이드 해석 라이브러리는 전처리 프로그램에 의해 생성된 절점과 요소를 분석하는 모듈이 포함되어 있다. Fig. 2에서 기술한 해석 라이브러리의 계층 구조는 절점과 요소를 검사하고, 요소로 이루어진 단면의 강성을 계산하고 하중과 제약조건을 입력하여 응력과 변형률을 검토할 수 있는 부분과 해석 결과 데이터를 시각화하는 부분이 포함된다. 또한 구조물의 이상 유무를 판단하기 위해 선택한 Tsi-Wu의 최대 응력, 최대 변형률 등 판단기준을 설정할 수 있다.

3.2 블레이드 해석 라이브러리의 입력

차원 축소를 통해 보 모델링을 연결하기 위해서, 구성의 특성을 표현하기 위해서 유한 요소 모델의 요소 수와 노드 수를 적절하게 나누어야 한다. 최적의 설계 프로시저 중에 노드 수와 요소 수를 줄이는 것은 선행조건이지만 보의 결합 특성을 올바르게 표현하기 위해서는 충분한 수의 요소로 나누어야 한다.

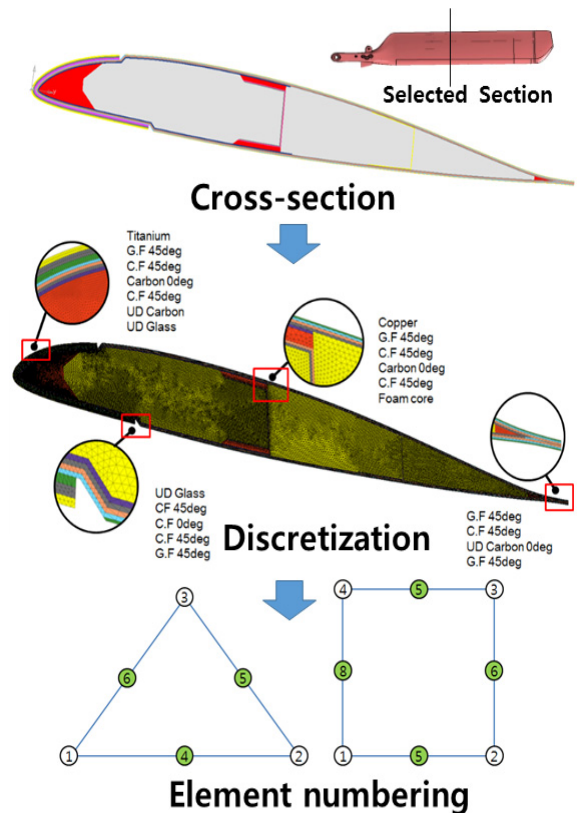


Fig. 3. Cross-sectional analysis example through cross-section discretization of rotor blade

Fig. 3에서 블레이드의 단면은 실 블레이드의 특성을 표현할 수 있는 정밀한 수준이다. 블레이드 해석 라이브러리에는 요소의 수, 절점의 수 정보가 입력된다. Fig. 3과 같이 삼각형과 사각형의 요소를 적용할 수 있다. 해석의 정확성을 높이기 위해 삼각형 요소에 6개의 형상함수, 사각형 요소에 8개 형상함수를 적용할 수 있다. 이것은 2차원 형상 함수에 의한 치수 회복 실행 후 응력과 스트레인의 정확도를 높이기 위한 것이다. 적용된 형상 함수는 각 유한 요소 내의 기본 함수를 마스터 요소로 변환하거나, 반대로 마스터 요소에 정의된 함수에서 각 유한 요소로 변환할 수 있어야 한다. 표준화된 마스터 요소에 대한 정의된 형상 함수의 변환을 조정함으로써, 각 유한 요소 내의 기본 함수를 쉽게 정의할 수 있다.

3.3 블레이드 해석 라이브러리의 결과

복합재 블레이드의 모델링 결과는 단면특성에 기초한 기하학적 정보, 강성 행렬 및 질량 행렬의 연결 정보이다. 단면분석 과정 중 계산된 기하학적 정보, 관성값, 굽힘강성 및 인장중심과 함께 전단 강성계수를 계산하고 워핑 벡터가 산출된다.

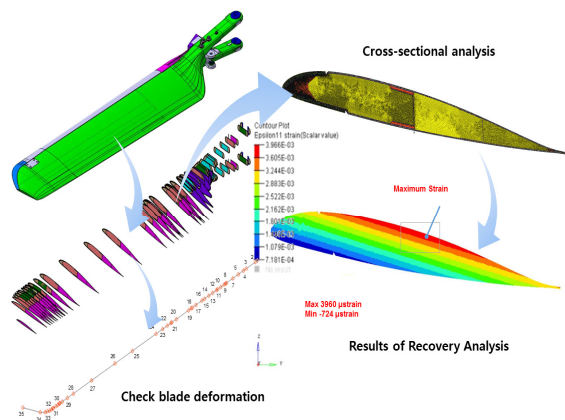


Fig. 4. Results of strain distribution through dimensional analysis of one-dimensional beam model

블레이드 분석 라이브러리의 결과는 아래와 같이 6개의 매트릭스와 강성 매트릭스를 포함하며, 고전적인 복합 역학에서 도출된 동일한 형식의 강성 행렬을 가지고 있다. 1차원 블레이드 보 모델이 구성되면 각 단면에 생성된 블레이드의 하중을 입력하여 변형률과 응력 분포를 계산할 수 있다. 블레이드 분석 라이브러

리에서 계산한 응력결과와 변형률 결과는 단면의 유한 요소에 매핑할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ & & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ & & & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ & & & & S_{55} & S_{56} \\ & & & & & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_z \end{Bmatrix} \quad (1)$$

SYM.

더불어 후처리 프로그램의 포맷에 맞추어 출력하면 분석 결과를 확인할 수 있다. Fig. 4는 블레이드 해석 라이브러리를 이용한 수치해석 결과로서 매핑된 가시화된 변형률 회복의 결과이다.

4. 블레이드 해석 라이브러리 검증 해석

4.1 원형 단면을 가진 등방성 재질이 적용된 보의 3차원 응력과 복원응력 비교

본 절에서는 3차원의 종방향 균열을 갖는 보 모델에 등방성 재질의 원형 단면 보 모델과 3차원 유한요소 모델 비교 모델은 Fig. 5와 같이 3차원 유한요소 모델과 1차원 보 모델로 구성하였다. 수치모델의 단면은 원형이며 초기균열이 적용되어 있다.

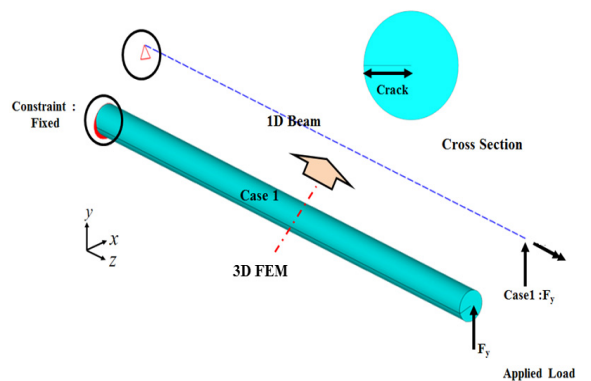


Fig. 5. Circular beam : 3D model & cross-section

원형단면 보의 끝단에 Y축 방향으로 10,000N을 하중을 가하였다. 보 모델의 형상과 재질을 Table 1에 나타나 있다.

Table 1. Geometry and material property of single material beam

| Geometry | | Properties | |
|---------------|-----------|------------|--|
| Cross section | R = 50 mm | E | 71,709 MPa |
| | | G | 27,370 MPa |
| Length | 2,000 mm | ν | 0.31 |
| | | ρ | 1.00E ⁻⁶ kg/mm ³ |

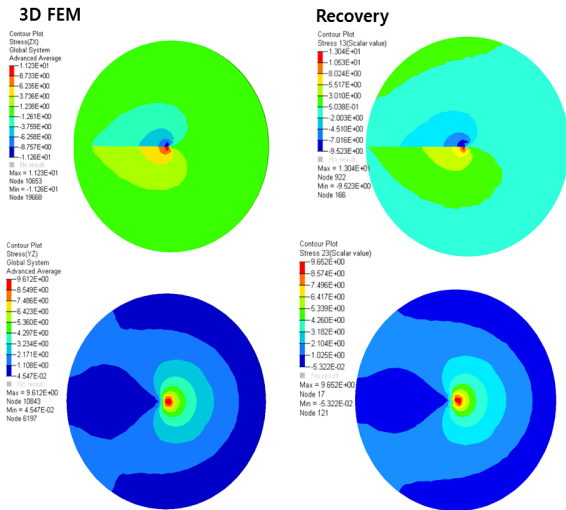


Fig. 6. Stress results of case1: 3D-FEM & recovery

Fig. 6은 보의 중앙부에서의 3차원 모델과 복원 해석된 보의 응력 분포를 시각적으로 표현한 결과이다. 3차원 해석의 결과와 유사한 응력분포를 보여 주고 있다. 1차원 모델에서의 복원해석 결과는 3차원 해석 결과와 비교해서 1 % 미만의 오차를 가지는 것을 알 수 있다.

4.2 120 ply로 적층된 이방성 재질이 적용된 보의 3차원 응력과 복원응력 비교

본 절에서는 3차원 모델 응력결과와 차원복원을 통해 얻어진 응력결과에 대한 검증 모델로 사각 단면의 6.35 mm, 세로 38.1 mm로 구성되어 있으며 길이 127 mm로 이루어진 복합재 보이다.

재질특성은 Table 2에 나타나내었고 준 등방성을 갖는 120 ply로 이루어져 있다. Fig. 7에서 120 ply로 이루어진 3차원 복합재 보의 적층 단면형상과 1차원 모

델 을 나타내었다. 보의 끝단 중심에서 전단하중 4.45 N을 가하였고, 반대쪽 끝단은 고정단으로 잡혀있다. 3차원 유한요소 모델은 8절점의 62401개의 솔리드요소로 구성되어 있고, 1차원 보 모델은 635개의 1차원 보 요소로 구성하였다.

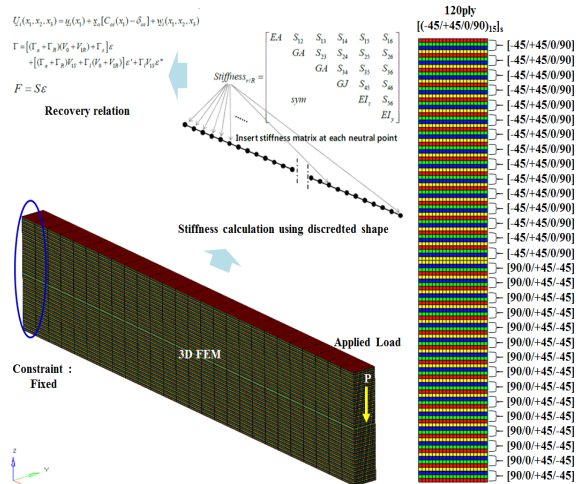


Fig. 7. 120 ply beam : 3D model & 1D beam model

Table 2. Material property of 120 ply beam

| Properties | Material |
|----------------------|---------------------|
| Layup | [(-45/+45/0/90)15]s |
| E_l | 141.9 GPa |
| E_t | 9.78 GPa |
| G_{lt} | 600,000 GPa |
| G_{tn} | 480,000 GPa |
| ν_{lt}, ν_{tn} | 0.42 |

Fig. 8과 Fig. 9는 3차원 복합재 보의 축 방향의 중심인 63.5 mm 지점에서 응력을 추출하여 차원복원 해석한 결과와 비교하여 응력 선도를 나타낸 것이다. 도출된 결과에서 3차원 보의 결과와 복원해석 결과가 매우 유사함을 확인하였으며, 블레이드 해석 라이브러리 복원된 응력의 상대오차는 0.1 % 이하이며 만족한 결과를 얻음을 확인하였다. 1차원 보 해석 모델이 차원축소를 통해 효율성을 가지면서 3차원 해석의 정확도를 가짐을 의미한다.

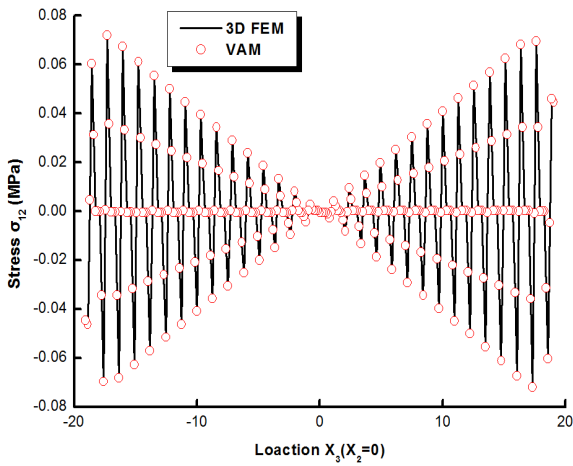


Fig. 8. Recovery stress results σ_{12} at mid-span $x_2 = 0$

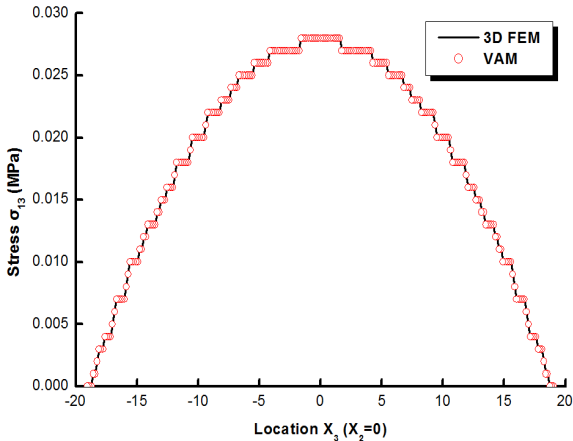
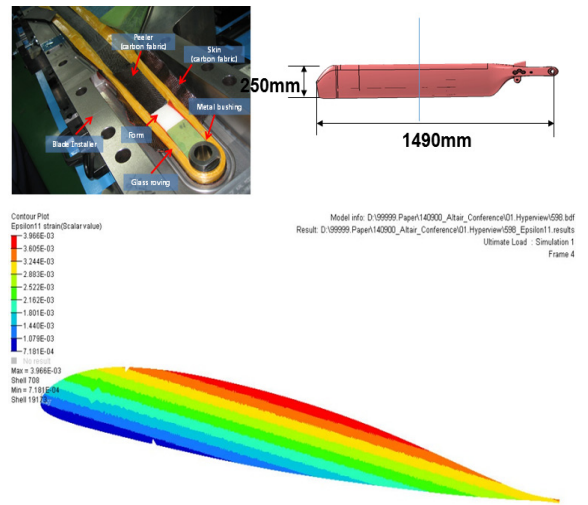


Fig. 9. Recovery stress results σ_{13} at mid-span $x_2 = 0$

4.3 복합재 블레이드의 변형을 복원해석

본 절에서는 블레이드의 복원해석 결과를 단면해석 모델에 복원결과를 매핑하여 형상화하였다. 로터 블레이드의 설계 하중을 대입하여 복원해석을 통하여 구조해석을 수행하면 블레이드 형상의 집중응력이 발생하는 지역, 최대 응력이 발생하는 지역을 예측할 수 있다. Fig. 10은 블레이드의 단면위치($r/R = 0.598$)에서 복원된 변형률을 나타낸다. 최대 변형률이 발생하는 지점은 스킨의 상단지점이다.복원해석의 결과는 향후 하중의 추가적인 설계 변경에 따른 설계 변경의 참고 자료가 될 수 있고, 블레이드의 정적구조 시험 또는 비행시험의 측정 위치를 선정하는 기준점으로 사용될 수 있다.



ϵ_{11} Recovery result

Fig. 10. Recovery stress results of composite rotor blade

5. 결론

본 연구에서 개발된 블레이드 해석 라이브러리는 정교하게 구성된 복합 재료의 차원 축소와 복원해석 프로시저를 통해 3차원 해석의 구현효과를 얻을 수 있었다. 단면해석을 통해 산출한 질량행렬과 강성 행렬을 연결하여 1차원 모델을 구성하고 변위 및 하중의 입력을 통하여 응력 원 해석의 프로시저를 시각화할 수 있다. 형상의 변경에 따르게 대처할 수 있기 때문에 유한요소모델의 구축기간, Solver의 분석시간, 데이터 용량을 3차원 해석 대비 1/10 이하로 절약할 수 있다. 그리고 블레이드 해석 라이브러리로 복원된 응력의 상대오차는 0.1% 이하이며 만족한 결과를 얻을 수 확인하였다.

개발된 라이브러리는 3차원 모델에서는 구성하기 어렵고 복합 블레이드처럼 설계 과정에서 자주 수정되는 설계 대상에 대한 응력 분석의 정확성, 효율성 및 분석의 정확성을 달성할 수 있다. 라이브러리 형태로 만들어졌기 때문에, 종래 개발된 코드에 적용하기 쉽고, 복합재료 블레이드의 정밀하게 설계된 후처리 프로그램에 접목이 용이하게 될 것으로 기대한다.

References

- [1] D. H. Hodges, "A Review of Composite Rotor Blade Modeling," *AIAA Journal*, Vol. 28, No. 3, pp. 561-565, 1990.
- [2] S. N. Jung, V. T. Nagaraj, I. Chopra, "Assessment of Composite Rotor Blade Modeling Techniques," *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 44, No. 3, pp. 188-205, 1999.
- [3] P. Hu, "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, 2010.
- [4] T. A. Hu, "Validation and Comparison About VABS-IDE and VABS-GUI," Utah State University, 2012.
- [5] W. Yu, M. Blair, "GEBT: A General-Purpose Nonlinear Analysis Tool for Composite Beams," *Composite Structures*, Vol. 94, No. 9, pp. 2677-2689, 2012.
- [6] W. Yu, "VABS Manual for Users," Utah State University, pp. 1-22, 2012.
- [7] W. Yu, D. H. Hodges, J. C. Ho, "Variational Asymptotic Beam Sectional Analysis - An Updated Version," *International Journal of Engineering Science*, Vol. 59, pp. 40-64, 2012.
- [8] H.-S. Do, J.-Y. Cho, I.-J. Park, S.-N. Jung, T.-J. Kim, D.-H. Kim, "Development of Program for Modeling of Cross Section of Composite Rotor Blade," Vol. 39, No. 3, pp. 261-268, 2011.
- [9] Y.-C. Kang, J.-Y. Cho, M.K. Dhadwal, S.-N. Jung, T.-J. Kim, "Development of Program for Modeling of Cross Section of Composite Rotor Blade Using Open CASCADE," Conference of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 2011.
- [10] J. H. Jang, H. Lee, "Blade Analysis Library Development of Dimension Reducible Modeling and Recovery Analysis for Composite Rotor Blades," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 43, No. 10, pp. 920-927, 2015.