

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(1), 17-24(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.1.17>

멀티스케일 모델링 기법을 이용한 섬유강화 복합재료의 미시역학적 파손예측 및 검증

김명준*, 박성호**, 박정선***, 이우일****, 김민성*****

Micro-mechanical Failure Prediction and Verification for Fiber Reinforced Composite Materials by Multi-scale Modeling Method

Myung-jun Kim*, Sung-ho Park**, Jung-sun Park***, Woo-il Lee**** and Min-sung Kim*****

Graduate School, Korea Aerospace Univ.*, Graduate School, Seoul National Univ.**, Aerospace and Mechanical Engineering Department, Korea Aerospace Univ.***, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National Univ.****, Agency for Defense Development*****

ABSTRACT

In this paper, a micro-mechanical failure prediction program is developed based on SIFT (Strain Invariant Failure Theory) by using the multi-scale modeling method for fiber-reinforced composite materials. And the failure analysis are performed for open-hole composite laminate specimen in order to verify the developed program. First of all, the critical strain invariants are obtained through the tensile tests for three types of specimens. Also, the matrices of strain amplification factors are determined through the finite element analysis for micro-mechanical model, RVE (Representative Volume Element). Finally, the microscopic failure analysis is performed for the open-hole composite laminate specimen model by applying a failure load obtained from tensile test, and the predicted failure indices are evaluated for verification of the developed program.

초 록

본 논문에서는 복합재료의 미시적 파손모드를 고려하는 복합재 파손예측 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 검증을 위하여 원공이 있는 복합재 적층판 시편의 인장시험 및 정적 파손해석을 수행하였다. 먼저 적층각도별 복합재 시편에 대한 인장시험을 통하여 논문에 사용된 재료에 대한 SIFT 허용치를 산출하였고, 미시역학적 모델인 RVE에 대한 유한요소 해석을 통하여 변형률 증폭계수를 결정하였다. 또한 원공이 있는 복합재 적층판 시편에 대한 인장시험을 수행하고, 실험을 통해 얻어진 파손하중 결과를 바탕으로 유한요소 모델에 대하여 정적 파손해석을 수행하였다. 마지막으로 실험결과를 바탕으로 예측된 파손지수 결과를 평가함으로써 개발된 프로그램의 효용성을 검증하였다.

Key Words : Strain invariant(변형률 불변량), Strain amplification factor(변형률 증폭계수), Volumetric strain(체적 변형률), Equivalent Strain(등가 변형률)

† Received: September 10, 2012 Accepted: December 31, 2012

*** Corresponding author, E-mail : jungsun@kau.ac.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

I. 서 론

복합재 구조물의 경우 재료의 특성을 제대로 파악하고, 구조적 안전성이 보장되도록 설계하는 것이 매우 중요하다. 특히 복합재 항공기 설계 과정에서 정적 파손을 예측하는 과정은 극한하중 하에서 기체의 안전성을 확인하기 위한 중요한 단계이다. 이때 실제와 가까운 파손 특성을 예측하기 위하여 다양한 파손 기준들이 제시되고 있으며, 실험적으로 모든 구조물의 파손 특성을 예측하기는 막대한 비용과 시간이 필요하기 때문에 해석적인 방법으로 정적 파손을 예측하는 방법들이 제시되고 있다. 최근에는 복합재료의 손상 (damage) 모드를 고려하여 미시적 수준에서의 파손을 예측하는 기법들이 제시되고 있다.

대부분의 복합재 구조물에 대한 정적 강도 예측에는 최대 응력 및 변형률 이론과 Tsai에 의한 이론 등의 거시역학적 파손 이론이 사용되고 있다[1]. 하지만 최근에는 Hashin과 Sun, Gosse 등에 의해 복합재료의 섬유 또는 기지에 대한 미시적 수준의 파손이론이 제시되었으며, 특히 Gosse에 의해 제안된 Strain Invariant Failure Theory (SIFT)의 경우는 실제로 Boeing사에서 복합재 구조물의 설계단계에 사용되고 있다[2-4].

SIFT는 섬유와 기지 각각에 대한 파손 기준을 정의하며, 기지의 파손을 정의하는 1차 변형률 불변량(first strain invariant)은 체적 변형을 나타내는 변형률 불변량 값으로써 등방성을 띄는 기지의 재료에 대한 파손 유무를 예측할 수 있다. Kelly는 1차 변형률 불변량이 인장 하중하에서 기지의 체적 변화에 의한 층간 파손에만 적용 가능하다고 보고, 인장과 압축하중에 대한 구분, 그리고 섬유와 기지에 대한 구분으로 식을 재 정의하였다[5]. Tay는 EFM(element failure method)과 SIFT를 통한 손상이론을 발표하였으며[6], 복합재의 파손과 손상에 대한 SIFT의 macro 접근법을 추가로 제안하였다[7].

본 논문에서는 SIFT 기반의 복합재 파손해석 프로그램을 개발하고 SIFT 허용치를 산출하기 위한 복합재 시편시험 및 유한요소 해석을 수행하였다. 또한 사용된 복합재료에 대한 파손예측 성능 검증을 위하여 원공이 있는 복합재 시편시험을 통해 얻어진 파손하중과 개발된 프로그램에 의한 파손예측 결과를 비교검증하였다. 본 논문에서 사용된 파손해석 프로그램은 Fortran을 기반으로 개발되었으며, 유한요소 해석에는 상용 프로그램인 MSC.Patran/Nastran을 이용하였다. 복합재 시편 제작 및 인장 시험은 ASTM 규격에 의거하여 진행되었다.

II. 본 론

2.1 Strain Invariant Failure Theory (SIFT)

2.1.1 변형률 불변량(strain invariant)의 정의

Gosse는 실험 결과를 바탕으로 복합재료의 미시적 파손 메커니즘을 Fig. 1과 같은 체적 팽창 변형에 의한 파손과 비틀림 변형에 의한 파손으로 구분할 수 있다고 제안하였다. 이에 따라 섬유와 기지에서의 초기 손상을 유효 팽창 변형률 불변량(effective dilatational strain invariant)과 유효 비틀림 변형률 불변량(effective distortional strain invariant)을 통해 예측하는 변형률 불변량 기반 파손 이론인 Strain Invariant Failure Theory, 즉 SIFT를 제안하였다[4].

SIFT는 변형률 불변량인 체적 변형률과 등가 변형률 또는 von-Mises 변형률을 통하여 섬유와 기지 각각의 파손 특성을 정의한다. 체적 변형률(volumetric strain)은 각 변형률 불변량들의 합으로 정의되는데, 이때 다음 식과 같은 1차 변형률 불변량(first strain invariant), J_1 은 체적 변형을 나타내는데 가장 지배적이기 때문에 이를 체적 변형률로 사용한다.

$$J_1 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (1)$$

체적 변형률의 경우 복합재료의 미시적 체적 팽창에 의한 변형률 불변량으로 압축 하중 하에서의 파손을 고려할 수 없다. 따라서 일반적으로 J_1 을 인장을 받는 상태에서의 체적 팽창에 대한 파손을 예측하는데 사용한다. 이에 따라 Gosse는 미시적 수준에서 체적 변형에 의한 파손은 1차 변형률 불변량 J_1 이 해당 임계값인 J_{1-crit} 에 도달하였을 경우 발생한다고 정의하였다.

비틀림 변형에 대한 파손을 예측하는데 사용하는 등가 변형률은 1, 2차 변형률 불변량을 사용하여 식 (2)에 의해 간단히 정의될 수 있다. 이는 금속재와 같은 등방성 재료의 파손을 판단하는데 사용되는 von-Mises 변형률과 동일한 형태 로 나타내어진다.

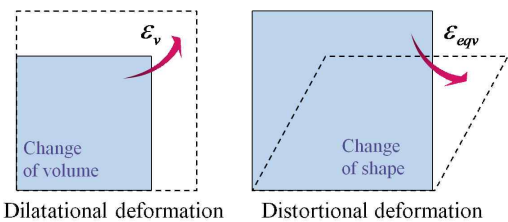


Fig. 1. Microscopic failure mechanism of composites

$$\epsilon_{eqv} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2]} \quad (2)$$

여기서 ϵ_1, ϵ_2 와 ϵ_3 는 주 변형률이며, 등가 변형률인 ϵ_{eqv} 는 복합재료의 형상의 변화에 의한 변형을 거동을 표현한다. Gosse는 비틀림 변형에 대해 등가 변형률이 해당 임계값인 $\epsilon_{eqv-crit}$ 에 도달하였을 때 파손이라고 정의하였다.

2.1.2 SIFT의 파손 기준

SIFT의 파손 기준은 기본적으로 섬유 또는 기지의 1차 변형률 불변량인 J_1 또는 등가 변형률 ϵ_{eqv} 이 해당 임계값을 초과하면 그에 따른 파손이 발생한다는 것이다. 또한 SIFT에서는 복합재료의 거시적-미시적 관계를 통하여 미시적 수준의 변형률을 산출하고, 이를 바탕으로 유효 변형률 불변량을 정의하여 파손 기준식에 적용한다. 이를 위해 먼저 복합재료의 미시역학적 모델인 RVE(Representative Volume Element)에 대한 유효요소 해석을 통하여 섬유와 기지 각각에 대한 변형률 증폭 계수를 정의하고, 이를 통해 섬유 또는 기지에 대한 유효 변형률 불변량을 산출한다. 또한 계산된 유효 변형률 불변량을 해당 임계값과 비교함으로써 복합재료의 미시역학적 파손 거동을 예측한다. 이때 변형률의 거시적-미시적 관계는 다음 식 (3)과 같다[6,7].

$$\{\epsilon\} = [M_\epsilon]\{\bar{\epsilon}\} + [T_\epsilon]\Delta T \quad (3)$$

여기서 ϵ 은 미시적 수준의 유효 변형률 텐서이며, $\bar{\epsilon}$ 는 유효요소 해석을 통해 구할 수 있는 거시적 수준의 변형률 텐서, ΔT 는 대상에 적용되는 온도 변화, 그리고 M_ϵ 와 T_ϵ 은 각각 섬유 또는 기지에 대한 기계적(mechanical), 열적(thermal) 변형률 증폭 계수 행렬을 의미한다. 각 변형률 증폭 계수 행렬 성분에 대한 식은 다음과 같이 정의된다.

$$M_{ij} = \frac{\epsilon_{ij}}{\Delta L_{ij}/L_0} \quad (4)$$

$$T_{ij} = \epsilon_{ij} - \alpha_i \Delta T \quad (5)$$

여기서 ϵ_{ij} 는 섬유 및 기지에 대한 미시적 모델인 RVE에서 얻어지는 국부 변형률, ΔL_{ij} 는 미시적 모델에 가해지는 단위 변위, L_0 는 가해지는 변위 방향에 대한 RVE의 초기 길이, α_i 는 열 팽창계수, ΔT 는 RVE 모델에 가해지는 온도차이를 의미한다. 본 논문에서는 기계적 하중만을

고려하여 기계적 변형률 증폭계수인 M_ϵ 만을 사용하였다. SIFT의 복합재 파손 기준식은 위 관계를 통해 산출된 유효 변형률 불변량을 통하여 다음 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_1 \geq J_{1-crit} \quad \text{or} \quad \epsilon_{eqv}^i \geq \epsilon_{eqv-crit}^i \quad (6)$$

여기서, i 는 f (fiber) 또는 m (matrix)를 나타내며, $-crit$ 는 해당 변형률 불변량의 임계값을 의미하며, 두 기준 중 하나를 만족 시 파손으로 정의된다. 대부분의 경우 복합재료 내의 체적 팽창에 의한 파손은 섬유보다는 기지에서부터 파손이 발생하게 되고 그 이후에 하중을 섬유가 담당하면서 섬유에서 파손이 일어나기 때문에 J_1 에 의한 파손 기준은 기지에 대해서만 적용될 수 있다. 등가 변형률의 경우에는 섬유와 기지 모든 경우에서 비틀림 변형에 의한 파손을 예측할 수 있으므로 두 경우 모두에 사용한다[6,7].

2.2 임계 변형률 불변량

2.2.1 SIFT 허용치 산출 방법

SIFT에서는 섬유와 기지의 파손 유무를 각기 파손식에서 사용되는 변형률 불변량과 그에 대한 임계값을 비교함으로써 판단하게 된다. 여기서 임계 변형률 불변량은 미시적 수준에서의 섬유 또는 기지 각각에 대한 값이기 때문에 단순히 한번의 실험이나 해석을 통해서 얻어질 수 있는 값이 아니다. SIFT를 제안한 Gosse는 SIFT 허용치 산출 방법으로 적층 방향별 시편시험을 통해 얻어진 정적 강도를 바탕으로 Global-to-micro 모델에 대한 해석을 수행하고 미시적 수준에서의 임계 변형률 불변량을 정의하는 것을 제안하였다. 이에 본 논문에서도 이와 동일한 방법을 통해 사용된 복합재료에 대한 임계 변형률 불변량을 산출하였다. SIFT 허용치 산출 방법을 정리하면 Fig. 2와 같다.

2.2.2 SIFT 허용치 산출을 위한 시편시험

SIFT 허용치인 임계 변형률 불변량(critical strain invariant)을 정의하기 위해서는 3가지 형태의 복합재 시편시험이 필요하다. 먼저 섬유의 등가변형률에 대한 허용치를 산출하기 위해서는 0° 적층 시편의 인장시험이 필요하다. 또한 기지의 체적변형률에 대한 허용치의 경우에는 90° 적층 시편의 인장시험이 필요하며, 등가변형률에 대한 허용치의 경우 임의의 적층각(θ)을 갖는 시편의 인장시험이 필요하다. Gosse의 연구에 따르면 0°~90°의 적층각도 변화에 따른 기지의 등가 변형률 변동에서 10° 적층 시편에 대한 등가 변형

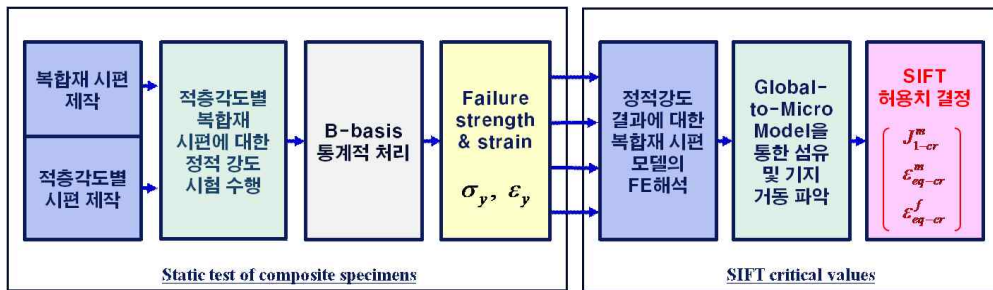


Fig. 2. Method for evaluation of critical strain invariants

Table 1. Mechanical properties of CU200NS

	Prepreg (CU200NS)	Fiber (T700)	Matrix (Epoxy resin)
E_1 [GPa]	129	230	4
E_2 [GPa]	13.2	15	-
ν_{12}	0.28	0.2	0.39
G_{12} [GPa]	4.80	27	-
G_{13} [GPa]	4.80	27	-
G_{23} [GPa]	4.07	7	-

Table 2. Results of Tensile Test

	0° UD	90° UD	10° UD
Tensile Strength [MPa]	1,911	25.47	294.18

률이 최대치를 나타내므로 10° 적층 시편의 인장 시험 결과가 기지의 등가변형률에 대한 허용치로 사용하는 것이 적절하다. 이에 본 논문에서는 0°, 10°, 90° 적층 시편에 대한 인장시험을 수행하고, 이를 통해 산출된 인장강도를 global-to-micro FE 모델에 대한 유한요소해석에 사용하였다.

3가지 종류의 시편에 대한 인장시험은 ASTM D3039에 의거하여 수행되었다. 시편 제작에 사용된 탄소-에폭시(carbon-epoxy) 계열의 프리프레그는 한국 카본사의 CU200NS 제품을 이용하였으며 해당 재료의 기계적 물성치는 Table 1과 같다. 또한 인장시험을 통해 얻어진 적층 각도별 인장강도는 Table 2와 같다.

2.2.3 SIFT 허용치 산출

인장시험을 통해 얻어진 각 적층각도별 인장 강도 데이터를 기반으로 Fig. 3과 같은 과정을 통해 global-to-micro FE 모델에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 이를 통하여 섬유 및 기지에 대한 SIFT 허용치를 산출하였으며 얻어진 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Mechanical properties of CU200NS

Critical strain invariants	Value	Fiber direction	Failure Mode
J_{1-cr}^m	0.00398	90°	Matrix/Dilatational
ϵ_{eq-cr}^m	0.04919	10°	Matrix/Distortional
ϵ_{eq-cr}^f	0.01495	0°	Fiber/Distortional

2.3 SIFT 기반 복합재 파손해석

2.3.1 SIFT 기반 복합재 파손해석 프로그램

본 논문에서는 자체개발된 SIFT 기반의 복합재 정적 파손해석 프로그램을 사용하였다. 프로그램은 SIFT 이외에도 기존의 다양한 파손 기준들을 통한 해석이 가능하도록 구성되었으며, 본 논문에서는 SIFT를 사용하여 복합재 원공 평판의 파손해석을 수행하고 이를 실제 시험 결과와 비교함으로써 파손예측의 정확성을 평가하였다. SIFT 기반 복합재 파손해석 프로그램의 순서도는 Fig. 4와 같다.

2.3.2 원공이 있는 복합재 시편의 인장시험

개발된 프로그램과 SIFT의 효용성을 검증하기 위하여 원공이 있는 복합재 시편에 대한 정적 파손해석을 수행하고 이를 실제 인장시험 결과와 비교하였다. 검증 시편에 대한 규격은 ASTM D5766에 의거하였으며 길이는 200mm, 너비는 36mm, 총 두께는 2mm, 구멍의 직경은 6mm이다. 적층순서는 $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ 과 같으며 각 플라이의 두께는 0.25mm이다. 5개 시편에 대한 인장시험을 통해 산출된 파단 하중은 29.773 kN, 인장 강도는 425.33 MPa으로 나타났다. 시편의 기하학적 형상정보는 Fig. 5와 같으며 파손된 시편의 모습은 Fig. 6과 같다.

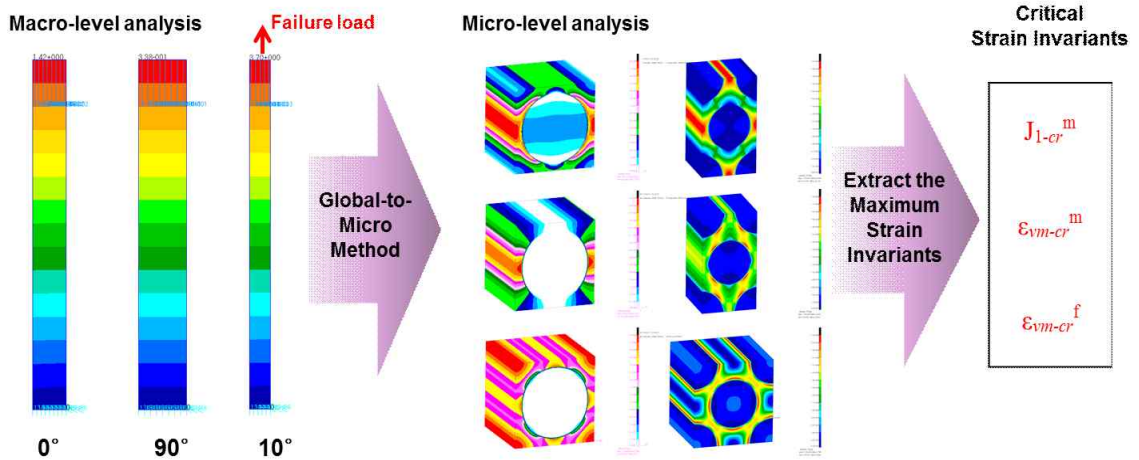


Fig. 3. Global-to-micro FE analysis

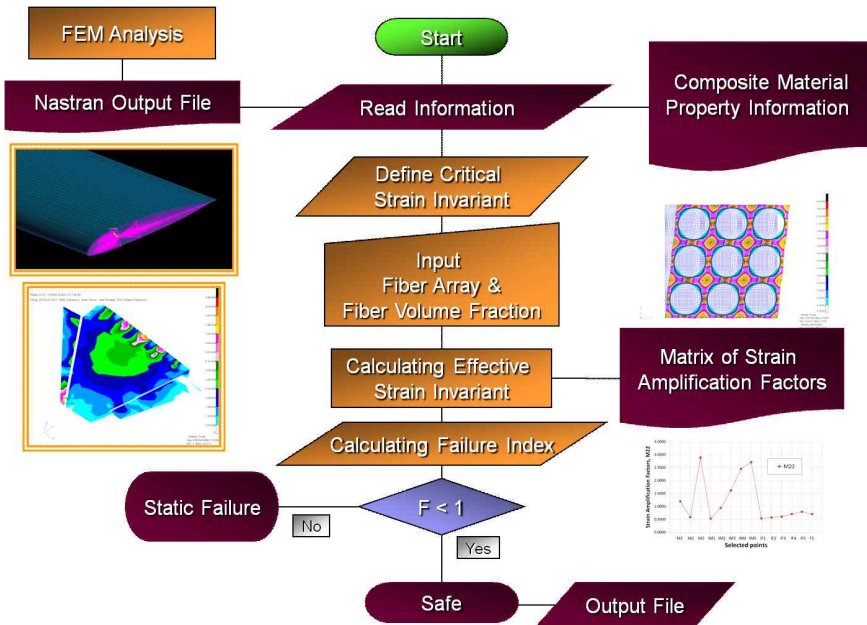


Fig. 4. Flow chart of SIFT failure analysis program

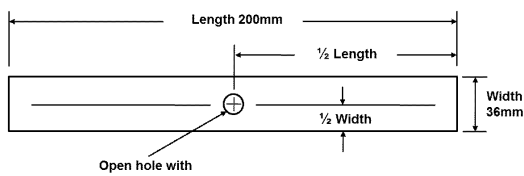


Fig. 5. Geometric configuration of specimen



Fig. 6. Failed specimen

2.3.3 원공이 있는 복합재 시편의 파손해석

인장시험 결과를 통해 얻어진 파단 하중을 통하여 원공이 있는 복합재 시편 모델에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 또한 해당 재료의 미시역학적 모델인 RVE에 대한 유한요소해석을 통하여 거시적-미시적 관계를 나타낼 수 있는 변형률 증폭계수를 산출하고 이를 통해 유효 변형률 불변량을 계산하였다. 계산된 유효 변형률 불변량과 앞서 얻어낸 임계 변형률 불변량을 비교하여 복합재료의 파손 유무를 판단하였다. 이때 파단 하중에 대한 파손지수 결과값이 1에 근접하면 실

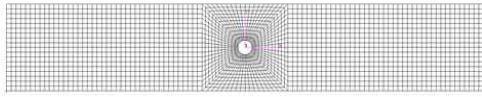


Fig. 7. FE model of open hole laminate

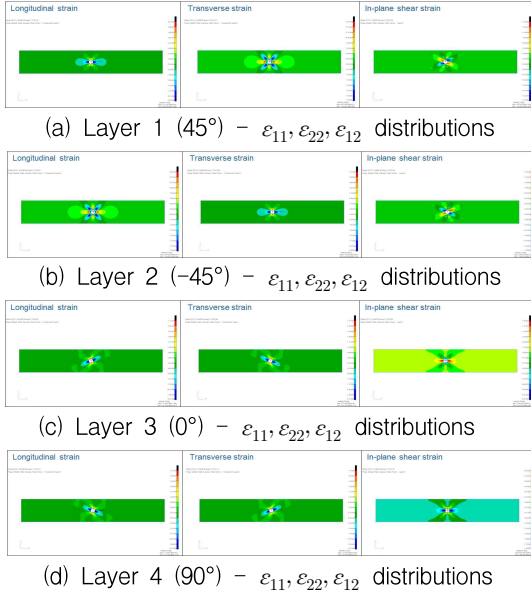


Fig. 8. Strain distributions of open hole laminate

제 파손된 하중에 대한 SIFT의 예측 결과가 정확하다고 판단하였다. 원공이 있는 복합재 시편의 유한요소 모델은 2차원 shell 요소를 사용하여 Fig. 7과 같이 모델링되었으며, 복합재 플라이별 변형률($\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{12}$) 분포는 Fig. 8과 같다.

복합재 원공 시편에 대하여 얻어진 거시적 변형률 결과를 섬유 및 기지에 대한 미시적 변형률로 변환하기 위해 변형률 증폭계수를 통한 미시역학적 수정 단계가 필요하다. 변형률 증폭계수 산출을 위하여 RVE에 대한 유한요소 해석이 수행

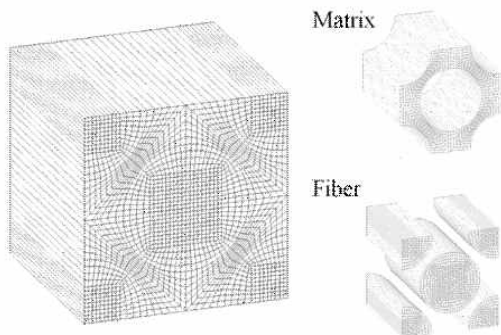


Fig. 9. FE model of square array RVE

되었다. RVE의 섬유배열 형태는 사각(square), 육각(hexagonal), 다이아몬드(diamond) 배열 중 하나로 가정될 수 있다. 본 논문에서는 사각 섬유배열로 가정하여 Fig. 9와 같이 유한요소 모델을 생성하였으며, 섬유체적분율(v_f)은 55.5%이다.

RVE에 대한 유한요소 해석은 총 6가지의 하중 조건에 대하여 수행되었으며, 이는 미소 요소의 6가지 변형 형태를 모두 고려한 하중 조건이다. 즉, Fig. 10에서 정의된 3개의 수직 방향과 3개의 전단 방향에 대해서 단위 변위 하중이 가해지고 각각의 조건에서 변위 하중이 가해지지 않는 나머지 면들은 대칭 경계 조건으로 구속된다. 이에 따른 RVE의 유한요소 해석을 위한 하중 및 경계 조건은 Table 4와 같다.

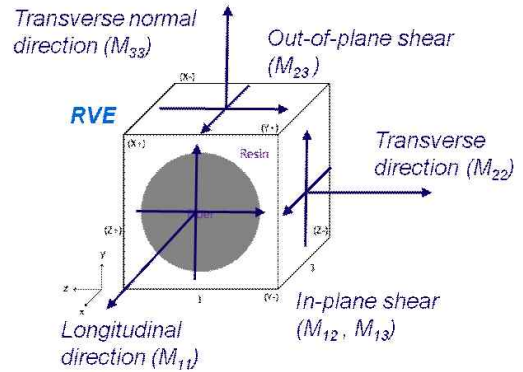


Fig. 10. Local coordinate system of RVE

Table 4. Boundary conditions of RVE

Mechanical strain amplification factor	Load & Boundary conditions
Case of M_{11} (longitudinal direction)	$\epsilon_{11} = 1,$ $\epsilon_{22} = \epsilon_{33} = \gamma_{12} = \gamma_{13} = \gamma_{23} = 0$
Case of M_{22} (transverse direction)	$\epsilon_{22} = 1,$ $\epsilon_{11} = \epsilon_{33} = \gamma_{12} = \gamma_{13} = \gamma_{23} = 0$
Case of M_{33} (transverse direction)	$\epsilon_{33} = 1,$ $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \gamma_{12} = \gamma_{13} = \gamma_{23} = 0$
Case of M_{12} (in-plane shear)	$\gamma_{12} = 1,$ $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_{33} = \gamma_{13} = \gamma_{23} = 0$
Case of M_{13} (in-plane shear)	$\gamma_{13} = 1,$ $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_{33} = \gamma_{12} = \gamma_{23} = 0$
Case of M_{23} (out-of-plane shear)	$\gamma_{23} = 1,$ $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_{33} = \gamma_{12} = \gamma_{13} = 0$

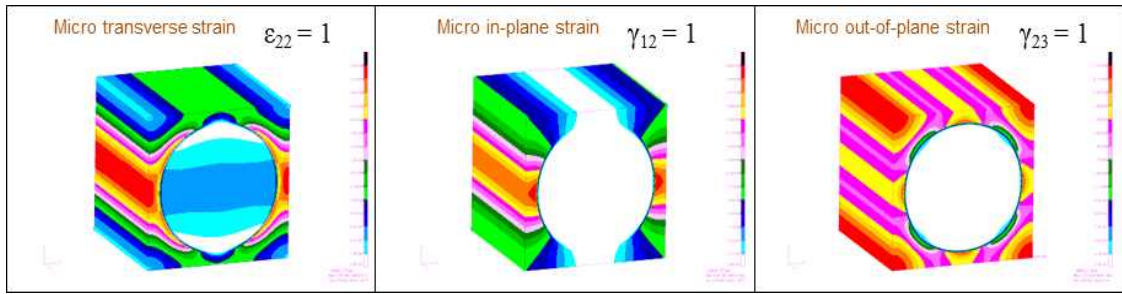


Fig. 11. Strain distribution of RVE model

변형률 증폭계수 산출을 위해 수행된 각 방향별 해석 결과는 Fig. 11과 같다. 이때 거시적 변형률 텐서를 ϵ , RVE 해석을 통해 얻어진 변형률 증폭계수 행렬을 M 이라고 할 때 섬유 및 기지에 대한 유효 변형률 텐서는 ϵ' 으로 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 얻어진 유효 변형률 텐서로부터 유효 변형률 불변량은 식 (8), (9)과 같이 계산될 수 있다.

$$\{\epsilon'\} = [M]\{\epsilon\} \quad (7)$$

$$J_1 = \epsilon'_1 + \epsilon'_2 + \epsilon'_3 \quad (8)$$

$$\epsilon_{eqv} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\epsilon'_1 - \epsilon'_2)^2 + (\epsilon'_1 - \epsilon'_3)^2 + (\epsilon'_2 - \epsilon'_3)^2]} \quad (9)$$

앞의 식과 같이 계산된 유효 변형률 불변량을 2.2.3절에서 구한 임계 변형률 불변량과 비교함으로써 복합재료의 파손유무를 판단할 수 있다. 각 변형률 불변량을 해당 임계값으로 나누어 1에 도달하면 해당 파괴모드(섬유 또는 기지)에서 파손이 발생했다고 판단한다. 본 논문에서 수행된 원공이 있는 복합재 시편에 대한 파손해석 결과는 Table 5와 같다. 복합재료의 적층패턴이 대칭이므로 1~4 층에 대한 파손지수만 확인하였다. 기지 파손의 경우에는 체적변형률과 등가변형률에 의한 파손지수 중 최대값을 평가하였고, 등가변형률에 의한 섬유의 파손은 복합재료의 완전파단을 의미한다.

결과를 살펴보면 적층판의 전체 플라이에서는 섬유파손은 일어나지 않고 기지의 파손이 지배적으로 나타난 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 3, 4번째 플라이의 경우는 기지뿐만 아니라 섬유의 파손지수가 1을 넘어 복합재료의 완전파단이 일어난 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 실제 시편시험 결과를 통한 파단 하중을 유한요소 해

Table 5. Maximum failure index for each layer

Layer	Maximum Failure Index		Failure Results
	Matrix Failure	Fiber Failure	
1 (45°)	5.9206	0.4658	Matrix failure
2 (-45°)	5.9203	0.4657	Matrix failure
3 (0°)	4.2322	1.0599	Matrix & Fiber failure
4 (90°)	7.4505	1.0219	Matrix & Fiber failure

석상의 하중값으로 가하였기 때문에 실제의 복합재 파손을 매우 정확히 예측한 것으로 판단할 수 있다. 실제로 복합재료에 존재하는 기지의 파손은 단일방향 적층판의 경우 횡방향 하중을 지탱하지는 못하지만 다양한 각도로 적층된 복합재의 경우 완전파단을 나타내지는 않는다. 하지만 섬유의 파손은 길이방향의 하중을 더 이상 지탱하지 못하는 것이며, 높은 강도를 갖는 섬유가 파손되었다는 것은 이미 복합재료 내에 존재하는 기지는 모두 파손된 것과 같기 때문에 실질적으로 복합재의 완전파단을 의미한다. 이에 따라 SIFT를 통한 복합재 구조물의 파손예측에서 섬유의 파손지수에 따라 완전파단을 예측하는 것이 적절하다고 판단된다.

III. 결 론

본 논문에서는 자체개발된 SIFT 기반의 복합재 파손해석 프로그램을 사용하여 원공이 있는 복합재 적층판 시편에 대한 파손해석을 수행하고, 이를 실제 인장시험 결과와 비교함으로써 개발된 프로그램 및 SIFT의 효용성을 검증하였다. 이를 위해 먼저 논문에서 사용된 복합재료에 대한 SIFT 허용치인 임계 변형률 불변량을 산출하였

다. 0°, 10°, 90°의 3가지 적층각을 갖는 단일방향 복합재 시편에 대한 인장시험을 수행하였으며, 이를 통해 얻어진 파단하중을 바탕으로 global-to-micro FE 모델에 대한 유한요소 해석을 수행하여 해당 재료의 임계 변형을 불변량을 산출하였다. 또한 원공이 있는 복합재 적층판 시편을 제작하고 이에 대한 인장시험을 수행하였으며, 시험을 통해 얻어진 파단 하중을 사용하여 실제 시편과 동일한 형태의 모델에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 또한 해당 복합재료의 거시적-미시적 관계를 정의하기 위하여 섬유 및 기지의 미시역학적 모델인 RVE에 대한 유한요소 해석을 통하여 기계적 하중에 대한 변형을 증폭 계수 행렬을 산출하였으며, 개발된 SIFT 기반 복합재 파손예측 프로그램을 사용하여 실제 시험에서 얻어진 파단 하중에 대한 정적 파손유무를 판단하였다. 적층판의 전체 플라이에서는 기지의 파손이 나타난 것을 확인할 수 있었으며, 0°, 90° 적층각을 갖는 플라이의 경우는 기지뿐만 아니라 섬유의 파손지수가 1을 넘어 복합재료의 완전파단이 일어난 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 실제 시험을 통해 얻어진 파단하중에 대한 SIFT 기반의 파손 예측이 실제 시험과 동일한 결과를 나타내었다고 판단할 수 있었다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다. (계약번호 UD100048JD)

References

- 1) Tsai, S.W., Wu, E.M., "A General Theory of Strength for Anisotropic Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 5, 1971, pp.58-80.
- 2) Hashin, Z., "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 47, 1980, pp.329-334.
- 3) Sun, C.T., Tao, T.X., "Prediction of failure envelopes and stress/strain behaviour of composite laminates," *Composites Science and Technology*, Vol. 58, 1009, pp.1125-1136.
- 4) Gosse, JH, Christensen, S., "Strain invariant failure criterion for polymer in composite materials," *Structural Dynamics and Materials Conference*, Vol. 1, 2001, pp.45-55.
- 5) R. Li, D. Kelly, A. Crosky, "An evaluation of failure criteria for matrix induced failure in composite materials," *Composite Structures*, Vol. 57, 2002, pp.385-391.
- 6) Tay T.E., Tan S.H.N, Tan V.B.C., Gosse J.H., "Damage progression by the element-failure method(EFM) and strain invariant failure theory(SIFT)," *Composites Science and Technology*, Vol.65, 2005, p.935-944.
- 7) Tong-Earn Tay, Vincent B.C., Tan, Guangyan Liu, "A new integrated micro-macro approach to damage and fracture of composites," *Materials Science and Engineering*, B 132, 2006, pp.138-142.