

다공성 복합재의 파손 강도 예측을 위한 미시역학 전산 해석

양대규* · 신의섭*†

Micromechanical Computational Analysis for the Prediction of Failure Strength of Porous Composites

Dae Gyu Yang*, Eui Sup Shin*†

ABSTRACT: Porosity in polymer matrix composites increases rapidly during thermochemical decomposition at high temperatures. The generation of pores reduces elastic moduli and failure strengths of composite materials, and gas pressures in internal pores influence thermomechanical behaviors. In this paper, micromechanical finite element analysis is carried out by using two-dimensional representative volume elements for unidirectionally fiber-reinforced composites with porous matrix. According to the state of the pores, effective elastic moduli, poroelastic parameters and failure strengths of the overall composites are investigated in detail. In particular, it is confirmed that the failure strengths in the transvers and through-thickness directions are predicted much more weakly than the strength of non-pored matrix, and decrease consistently as the porosity of matrix increases.

초 록: 고온에서 열화학적 분해 현상을 겪는 고분자 기지 복합재료는 기지 내부의 기공도가 급격히 증가한다. 기공의 생성은 재료의 탄성 계수와 파손 강도를 감소시키며, 기공 내부의 가스 압력은 재료의 열기계적 거동에 영향을 준다. 본 논문에서는 기지 내부에 많은 기공이 포함된 일방향 섬유 강화 복합재료의 이차원 대표 체적 요소를 설정하고 유한요소 해석을 수행하였다. 이를 통해 기공 상태에 따른 복합재료의 유효 탄성 계수, 기공 탄성 계수, 파손 강도 등을 산출하였다. 특히, 기지 재료의 특성에 많은 영향을 받는 섬유 수직 방향의 파손 강도가 원래 기지 강도보다 현격히 낮게 산출되며, 기공도가 증가함에 따라 지속적으로 떨어지는 경향을 확인하였다.

Key Words: 다공성 복합재(Porous composites), 파손 강도(Failure strength), 유효 탄성 계수(Effective elastic moduli), 기공 탄성 계수(Poroelastic parameter)

1. 서 론

우주 비행체 또는 발사체는 지구 대기권 재진입 시 극심한 공력 가열 현상을 겪게 되고, 이로 인해 재료가 표면에서부터 깎여져 나가는 삭마 현상을 수반한다[1]. 이와 같은 현상으로부터 구조물을 보호하기 위하여 열 보호 시스템의 개념이 도입된다. 열 보호 시스템의 핵심 요소는 바로 적용 재료이며, 탄소/탄소, 탄소/페놀릭, 세라믹 복합재가 주로 적용되는 추세이다. 이 중 열경화성 수지를 기지로 사용

하는 고분자 복합재는 삭마 환경에 노출됨으로써 열화학적 분해가 일어난다[2,3]. 열화학적 분해 과정을 통하여 재료 내부 기지 영역은 수많은 기공이 형성되며 기공도가 증가한다. 또한 기공 내부에서 재료 분해 가스에 기인한 기공 압력이 발생하여, 재료의 전체 기공 탄성 거동에 상당한 영향을 미친다[4].

열분해로 인해 기공이 형성된 재료의 열기계적 거동을 분석하기 위해 유효 물성 및 강도 산출에 관한 다양한 선행 연구들이 수행되어 왔다. 하지만 재료의 거시적 물성 또는

Received 3 January 2016, accepted 26 April 2016

*Department of Aerospace Engineering, Chonbuk National University

*†Department of Aerospace Engineering, Chonbuk National University, Corresponding author (E-mail: esshin@jbnu.ac.kr)

재료 상수를 이용하여 재료의 열 기공 탄성 거동을 설명하고자 하는 이론이 주를 이루었다. 또한, 열분해 효과 및 기공 압력에 의한 응력 상태를 고려하지 않은 상태에서 고온 환경의 재료 거동을 설명하고 있다는 한계를 지닌다. 열분해가 일어나는 재료의 열 기공 탄성 거동을 예측하기 위해 고려해야 할 대표적 인자로 기공 탄성 계수를 들 수 있다. Sullivan은 이 계수를 산출하기 위해 Biot 및 Willis의 이론[5]과 Carroll[6]의 유효 응력 개념을 도입하였다[7]. 또한 Wu 등은 실험 데이터와의 곡선 일치법을 통해 기공 탄성 계수를 상수로 추정하였다[8]. Matsuura 등은 실험을 통해 계수를 산출하려는 연구를 진행하였다[9]. 하지만 기공 탄성 계수를 결정하는 거시적 물성은 재료의 기공도, 기공 형상, 배열 등에도 영향을 받기 때문에 상수로 추정하는 것이 부적합하며, 고온 환경을 실험으로 정확하게 모사하는 것에는 한계가 있다. 반면 복합재를 미시역학적 관점에서 보면, 독립적 구성 성분을 기반으로 한 해석이 가능하고 미시 응력 및 변형을 통해 재료 파손을 설명 가능하다.

본 논문에서는 다공성 복합재의 내부 기공을 반영한 다수의 미시역학 전산 모형을 개발하였다. 미시역학 전산 모형의 유한요소 해석을 통하여 유효 탄성 계수, 기공 탄성 계수, 파손 강도를 산출하였다. 이를 통해 재료 내부 기공이 재료의 유효 탄성 계수, 기공 탄성 인자, 파손 강도에 미치는 영향을 확인하였다.

2. 다공성 복합재료 거동

2.1 탄성 계수 및 기공 탄성 계수

기공 압력이 작용하는 다공성 복합재의 열 기공 탄성을 응력-변형도 관계식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}(\sigma_{kl} + \pi_{kl}p) + \alpha_{ij}\theta_+ \quad (1)$$

여기서 S 는 탄성 유연성 계수, π 는 기공 탄성 계수, p 는 기공 압력, α 는 열팽창 계수, θ_+ 는 온도 변화를 나타낸다.

식 (1)에 나타낸 다공성 복합재의 열 기공 탄성 구성 방정식을 직교 이방성 재료에 적용하여 다음과 같이 표현하였다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} p = \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \theta_+ \quad (2)$$

단, 열에 의한 팽창 변형은 고려하지 않고 탄성 변형과 기공 압력에 의한 팽창 변형만을 고려하였다. 여기서 E 는 탄성 계수, G 는 전단 탄성 계수, ν 는 푸아송 비, 하첨자 1은 면내 섬유 방향, 2는 면내 기지 방향, 3은 재료 두께 방향을 나타낸다.

재료의 거동 예측에 주요 변수인 기공 탄성 계수는 식 (2)에서 기공 압력을 유효 응력에 반영하기 위한 계수로써 정의되었다. 기공 탄성 계수의 산출식은 식 (2)에서 기공 압력만이 가해지는 상태를 고려하여 유도되었다.

$$\begin{Bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu_{23}\nu_{32}}{E_2E_3\Delta} & \frac{\nu_{21}-\nu_{31}\nu_{23}}{E_2E_3\Delta} & \frac{\nu_{31}-\nu_{21}\nu_{32}}{E_2E_3\Delta} \\ \frac{\nu_{12}-\nu_{13}\nu_{32}}{E_3E_1\Delta} & \frac{1-\nu_{31}\nu_{13}}{E_3E_1\Delta} & \frac{\nu_{32}-\nu_{31}\nu_{12}}{E_3E_1\Delta} \\ \frac{\nu_{13}-\nu_{12}\nu_{23}}{E_1E_2\Delta} & \frac{\nu_{23}-\nu_{13}\nu_{21}}{E_1E_2\Delta} & \frac{1-\nu_{12}\nu_{21}}{E_1E_2\Delta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{\varepsilon}_1 \\ p \\ \hat{\varepsilon}_2 \\ p \\ \hat{\varepsilon}_3 \\ p \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\Delta = \frac{1-\nu_{12}\nu_{21}-\nu_{23}\nu_{32}-\nu_{31}\nu_{13}-3\nu_{12}\nu_{23}\nu_{31}}{E_1E_2E_3}$$

여기서 $\hat{\varepsilon}$ 은 기공 압력으로 인한 팽창 변형을 나타낸다.

2.2 파손 강도

인장 하중 및 기공 압력이 작용하는 다공성 복합재의 점진적 파손 해석 과정 중 요소의 파손 판정을 위하여 직교 이방성 재료의 최대 응력 파손 기준을 적용하였다.

$$\begin{aligned} Y_T &\leq \sigma_2 \quad \text{or} \quad \sigma_2 \leq Y_C \\ Z_T &\leq \sigma_3 \quad \text{or} \quad \sigma_3 \leq Z_C \\ |\tau_{12}| &\geq S \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 Y, Z 는 최대 응력, S 는 면내 전단 강도, 하첨자 T 는 인장, C 는 압축을 나타낸다.

섬유는 횡 방향 등방성, 기지는 등방성 재료이므로, 최대 응력 파손 기준을 적용하기 적합하지 않다. 다만, 요소의 물성 입력 시 섬유는 2, 3방향 강성 및 강도를 동일하게, 기지는 1, 2, 3 방향 강성 및 강도를 동일하게 적용하여 최대 응력 파손 기준을 적용할 수 있도록 하였다. 2, 3 방향 인장 하중 조건에서 전산 모형에 걸리는 2, 3 방향 최대 평균 응력을 강도의 개념으로 제시하였다. 또한, 기공 압력 하중 조건에서, 전산 모형에 걸리는 최대 기공 압력을 강도의 개념으로 제시하였다.

3. 미시역학 전산 모형

다공성 복합재의 내부 현상을 대표 체적 요소를 이용하여 모사하고, 유한요소 해석을 수행하였다. 전산 모형화 및 해석에는 한국과학기술정보연구원에서 보유 중인 MSC. Nastran을 사용하였다.

Fig. 1은 다공성 복합재의 내부 기공을 반영한 대표 체적 요소이다. 섬유와 기지의 체적비는 5:5이며, 기공의 생성은 기지 영역으로 국한하였다. 기지 기공도(0.1~0.5)와 기공 배열(무작위, 5종)을 기준으로 총 25개의 전산 모형을 개발하였다. 기공을 생성하기 위하여, 기지 기공도 0.0의 전산 모형에서 기지 영역 요소를 해당 기지 기공도 만큼 제거하였다. 제거할 요소는 랜덤 코드를 이용한 요소 번호 무작위 산출 과정을 통하여 결정하였다. 경계 조건은 x_1 - x_3 평면($x_2 = 0.0$)에서 2 방향 변위 구속과 x_1 - x_2 평면($x_3 = 0.0$)에서 3 방향 변위 구속을 적용하였다. x_1 - x_3 평면($x_2 = 1.0$)과 x_1 - x_2 평면($x_3 = 1.0$)에서 다중 점점 구속을 이용하여 균일 변위 조건을 적용하였다. 하중 조건은 2, 3 방향의 인장 하중과 기공 압력으로 나누어 적용하였으며, 기공 압력은 1 방향으로 작용하지 않도록 적용하였다. 점진적 파손 해석 과정에서 2, 3방향 인장 하중은 0.1 MPa 부터 0.1 MPa 단위로 증가하여 25 MPa까지 도달하도록 설정하였으며, 기공 압력은 0.1 MPa 부터 0.1 MPa 단위로 증가하여 40 MPa까지 도달하도록 설정하였다. 해석 단계 별로 판정된 파손 요소는 물성 감소 기법을 적용하여 처리하였다. 물성 감소 기법을 통해 파손 요소의 물성은 본래 설정한 요소 물성의 1%로 감소되었다.

Table 1에서는 미시역학 전산 모형의 기지 기공도 및 요소 정보를 정리하였다. 각 시리즈 별로 기공 배열을 다르게 하여 각각 5개의 전산 모형을 개발하였다. 섬유 영역의 요소 수는 25개의 전산 모형 전부 동일하지만, 기지 영역의 요소 수는 동일 기지 기공도라 할지라도 차이가 존재한다. 이는 기공 생성 방법에 원인이 있다. 기공 생성을 위하여 기지 영역의 요소를 제거하는 방법을 사용하였다. 이 때, 기지 영역 요소의 체적이 일정하지 않아, 동일 기지 기공도라도 제거된 요소의 개수 차이가 발생한다. 단, 요소 제거 시 해당 기지 기공도의 오차 범위를 $\pm 1\%$ 로 설정하여 제거 요

Table 1. Information on finite element models

Series	Porosity of matrix	The number of elements	
		Fiber	Matrix
2D-1	0.1	1325	3157~3167
2D-2	0.2	1325	2812~2819
2D-3	0.3	1325	2455~2462
2D-4	0.4	1325	2101~2134
2D-5	0.5	1325	2695~2792

Table 2. Material properties

Material property	Fiber		Matrix	
Elastic moduli	$E_1^{[f]}$ [GPa]	230.0	$E^{[m]}$ [GPa]	4.1
	$E_2^{[f]}$ [GPa]	15.0		
	$\nu_{12}^{[f]}$	0.200	$\nu^{[m]}$	0.340
	$\nu_{23}^{[f]}$	0.071		
Strength	$S_1^{[f]}$ [MPa]	3530.0	$S^{[m]}$ [MPa]	41.0
	$S_2^{[f]}$ [MPa]	230.0		

소 수를 조절하였다.

Table 2에서는 미시역학 전산 모형에 적용된 탄소 섬유와 페놀릭 기지의 물성을 정리하였다.

4. 해석 결과 및 분석

Fig. 2는 미시역학 전산 모형의 유효 탄성 계수 산출 결과이다. 2 방향 유효 탄성 계수는 기지 기공도가 0.1에서 0.5 까지 증가할 때, 평균값이 약 89.5% 감소하였다. 또한, 기지 기공도가 동일하더라도 기공 배열의 변화에 따라 최대 20.8%의 편차가 발생하였다. 3 방향 유효 탄성 계수는 기지 기공도가 0.1에서 0.5까지 증가할 때, 평균값이 약 89.0% 감소하였다. 기지 기공도가 동일하더라도 기공 배열의 변화에 따라 최대 28.4%의 편차가 발생하였다. 또한, 기지 기공도 0.4 이상부터 일정 값으로 수렴하는 경향을 보였다. 2, 3 방향 유효 탄성 계수는 동일해야 하나, 기공 배열로 인하여 차이

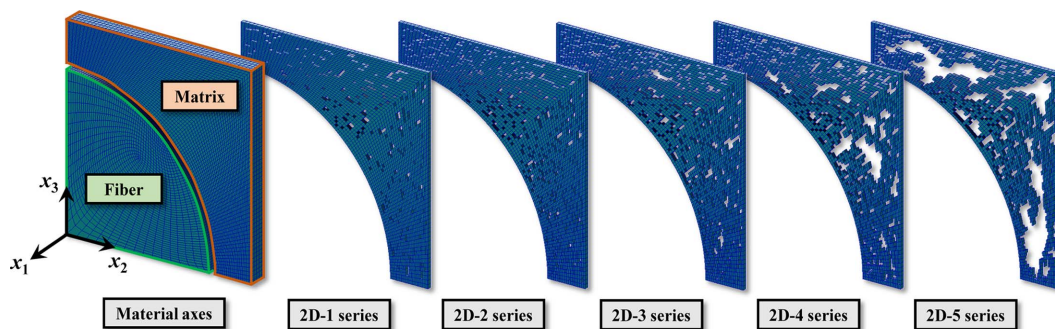


Fig. 1. Micromechanical finite element meshes

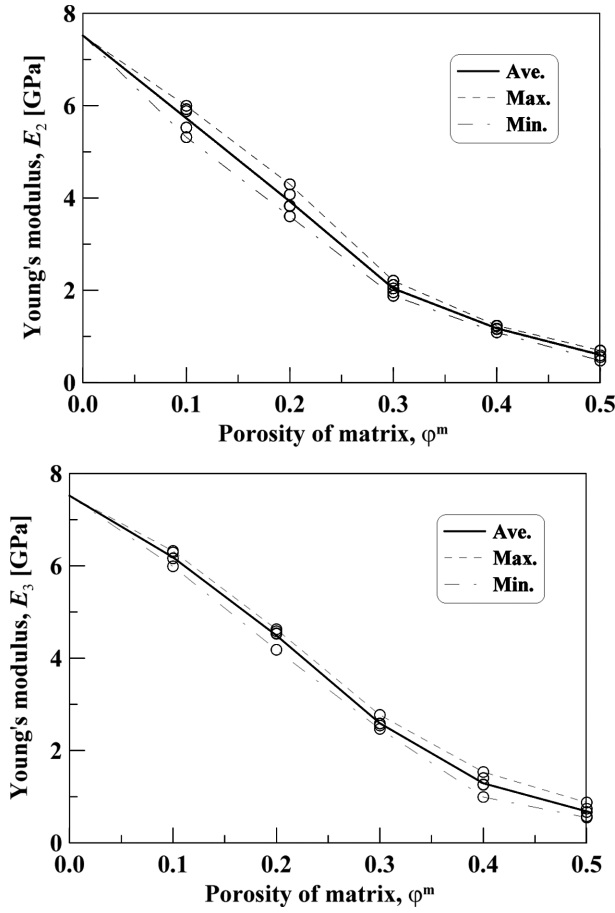


Fig. 2. Young's moduli vs. porosity of matrix

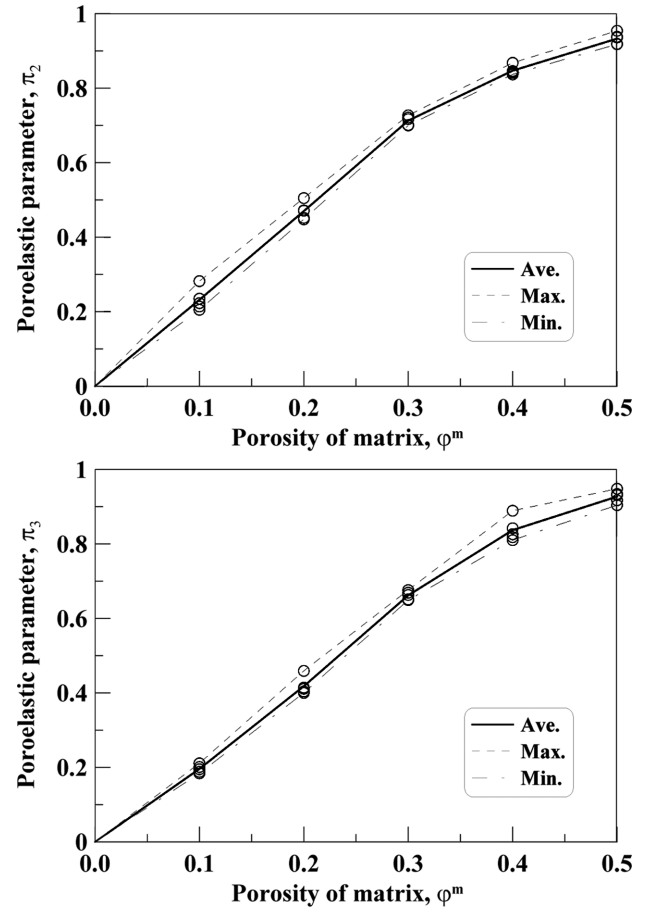
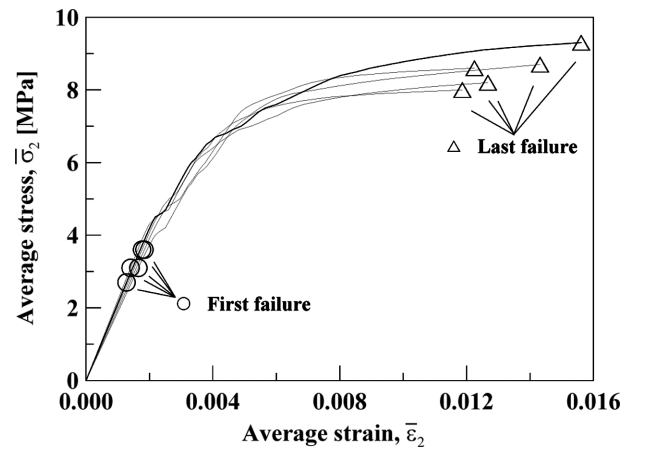


Fig. 3. Poroelastic parameters vs. porosity of matrix

가 발생한다. 이는 재료 내부의 기공 배열이 유효 탄성 계수에 큰 영향을 끼치며, 더 나아가 재료의 이방성화에 원인이 됨을 의미한다.

Fig. 3은 미시역학 전산 모형의 기공 탄성 계수 산출 결과이다. 2 방향 기공 탄성 계수는 기지 기공도가 0.1에서 0.5까지 증가할 때, 평균값이 약 302.2% 증가하였다. 또한, 기지 기공도가 동일하더라도 기공 배열의 변화에 따라 최대 21.7%의 편차가 발생하였다. 3 방향 기공 탄성 계수는 기지 기공도가 0.1에서 0.5까지 증가할 때, 평균값이 약 373.0% 증가하였다. 또한, 기지 기공도가 동일하더라도 기공 배열의 변화에 따라 최대 9.9%의 편차가 발생하였다. 기공 탄성 계수의 편차 발생 원인은 유효 탄성 계수이다. 기공 탄성 계수 산출식의 유효 탄성 계수 행렬과 기공 압력으로 인한 팽창 변형도 행렬 모두 유효 탄성 계수에 의해 결정되기 때문에 유효 탄성 계수의 편차 발생 시 기공 탄성 계수 또한 반드시 편차가 발생한다. 이는 기공 탄성 해석의 핵심 인자인 기공 탄성 계수가 기공도 뿐만 아니라 재료의 기공 형상, 배열과 같은 형상적인 요소에 의해서도 결정되기 때문에 특정 상수 값으로 정의할 수 없음을 의미한다.

Fig. 4는 2 방향의 기계적 인장 하중 적용 시, 미시역학 전

Fig. 4. Average stress-average strain curves subjected to tension (x_2 -direction)

산 모형의 평균 응력-평균 변형도 선도이며, 기지 기공도 0.3의 전산 모형 5종에 대하여 산출한 결과이다. 초기 파손은 첫 번째 파손 요소 발생 지점을 의미하며, 최종 파손은 파단선이 형성되는 지점을 의미한다. 동일 기지 기공도의 전산 모형 5종 전부 초기 파손 및 최종 파손 지점이 각기 다른 경향을 확인할 수 있다. 이는 재료 내부 기공 배열이 기

계적 인장 하중에 대한 파손 강도에 큰 영향을 끼친다는 것을 의미한다. 또한, 인장 하중이 가해지는 방향이 3 방향으로 변하더라도 기공 배열은 파손 강도에 영향을 준다.

Fig. 5는 기공 압력 적용 시의 기공 압력-평균 변형도 선도이며, 기지 기공도 0.3의 전산 모형 5종에 대하여 산출한 결과이다. 기공 압력은 일정 방향으로 가해지는 것이 아니며, 기공 내부에서 외부 전체 방향으로 작용하므로 일정 변형도 성분으로 그 거동을 나타내기 어렵다. 다만 최종 파손

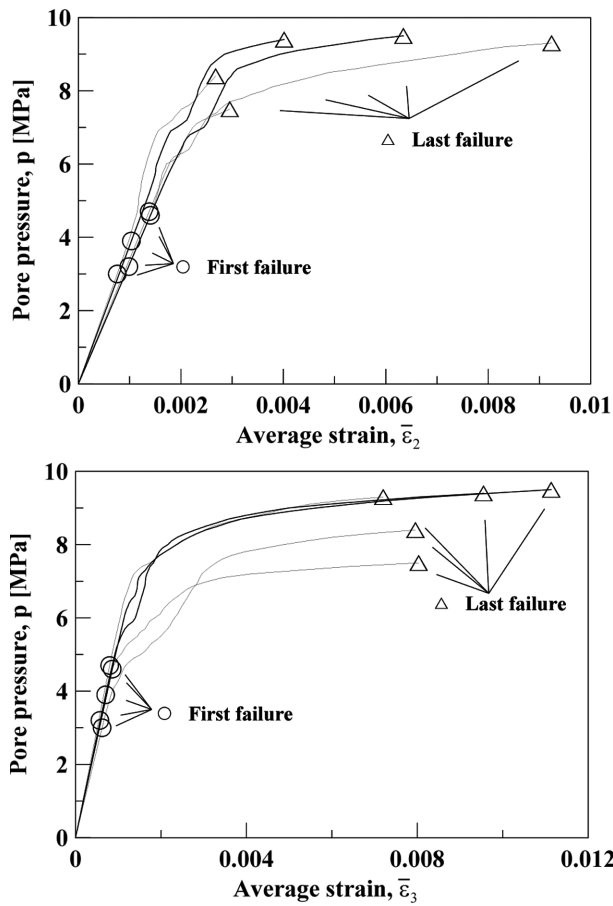


Fig. 5. Pore pressure - average strain curves subjected to pore pressure

시 파단선의 생성 방향이 2 방향 또는 3 방향으로 발생하는 경향을 보이기 때문에, 재료 거동을 기공 압력에 대한 2, 3 방향 평균 변형도 성분을 각각 도시함으로써 나타내었다. 동일 기지 기공도인 전산 모형 5종의 초기 파손 및 최종 파손 지점이 각기 다름을 확인할 수 있다. 이는 재료 내부 기공 배열이 기공 압력에 대한 파손 강도에 영향을 끼친다는 것을 의미한다.

Fig. 6에는 기지 기공도 0.3인 미시역학 전산 모형의 점진적 파손 해석 결과를 대표적으로 나타내었다. 우측 바는 요소의 손상 정도를 파란색부터 붉은색까지 스펙트럼으로 나타냄과 동시에 0.0부터 0.99까지 숫자로도 표현한다. 요소의 손상 정도는 본래 물성 대비 감소 비율을 의미한다. 그 예로, 요소의 물성은 손상 정도가 0.0 일 때, 100% 본래 물성이고, 손상 정도가 0.99일 때, 본래 물성의 1%이다. 즉, 최대 응력 파손 기준에 의하여 파손 요소를 판별하고 손상 정도를 증가시켜 요소 물성을 감소시키며, 요소 손상 정도가 0.99에 도달하면 요소 물성은 본래 설정된 물성의 1%로 감소된다. 기계적 인장 하중의 경우 하중 적용 방향에 따라 초기 파손 위치가, 기공 배열에 따라 파단선 형성이 결정되는 경향을 보인다. 기공 압력의 경우 기공의 배열에 따라 초기 파손 위치와 파단선 형성이 결정되는 경향을 보인다.

Fig. 7은 미시역학 전산 모형의 파손 강도 산출 결과이다. 초기 파손 강도와 최종 파손 강도를 하중 종류에 따라 분류하여 도시하였다. 2, 3 방향 기계적 인장 하중 적용 시, 미시역학 전산 모형에 작용하는 2, 3방향 평균 응력을 강도의 개념으로 제시하였다. 즉, 2 방향 인장 하중 조건에서는 첫 파손 요소 발생 시, 전산 모형에 걸리는 2 방향 평균 응력이 초기 파손 강도가 된다. 또한, 파손 요소가 지속적으로 발생하여 일정 파단선이 형성될 때, 미시역학 전산 모형에 걸리는 2 방향 평균 응력이 최종 파손 강도가 된다. 이는 3 방향 인장 하중 조건에서도 동일하다. 기공 압력 하중 조건에서는 미시역학 전산 모형이 감당하는 기공 압력 자체를 강도의 개념으로 제시하였고, 이에 따라 초기 및 최종 파손 강도를 산출하였다.

초기 파손 강도의 경우 기지 기공도가 증가할 때, 평균값

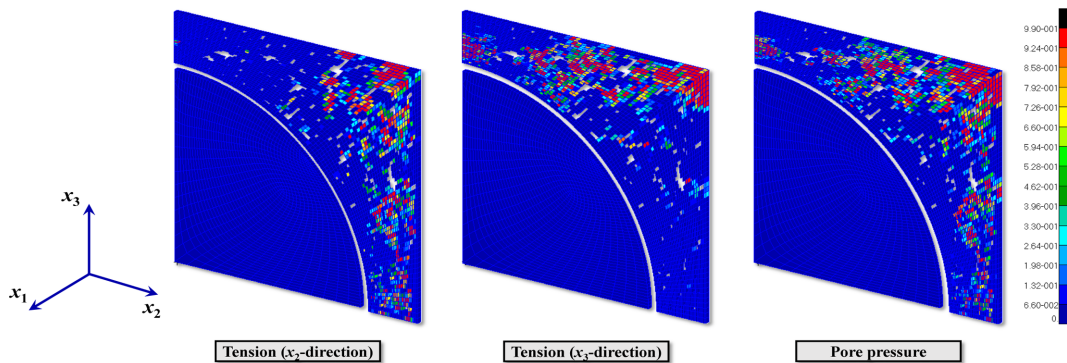


Fig. 6. Element damage of micromechanical FE model (2D-3-1) subjected to tension and pore pressure for last failure

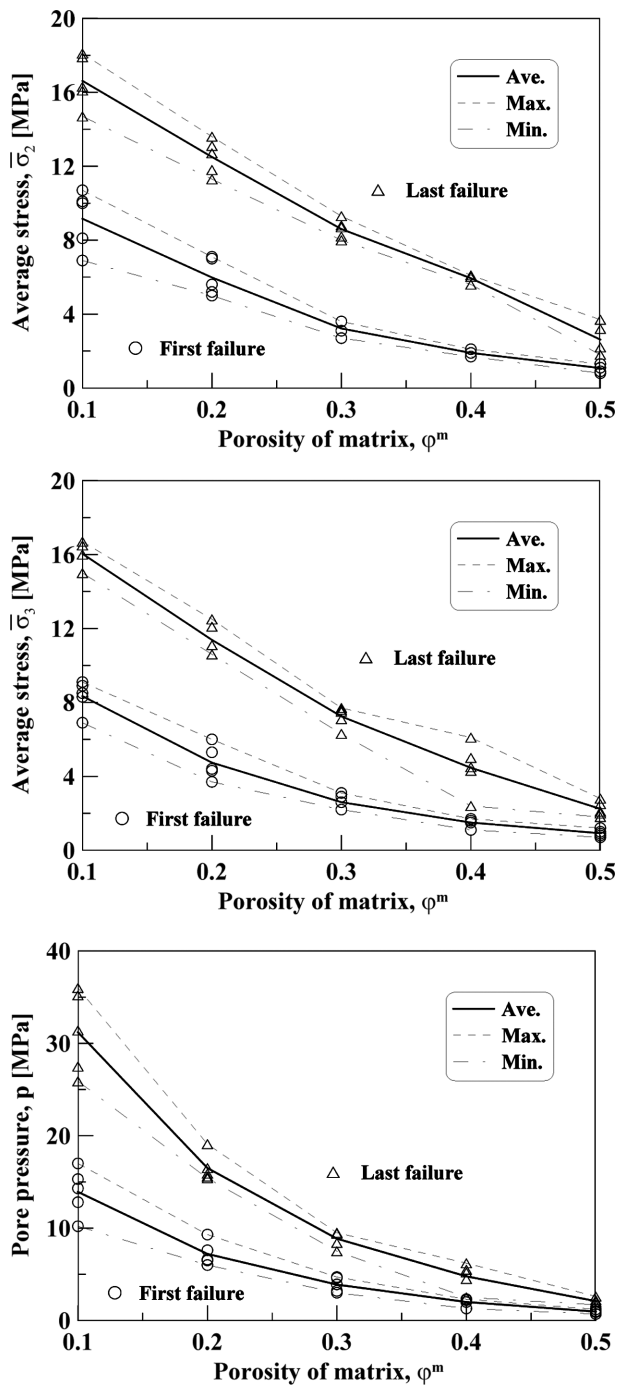


Fig. 7. Failure strengths vs. porosity of matrix

이 88.2%(2방향 인장), 88.7%(3방향 인장), 93.1%(기공 압력) 감소하였다. 또한, 기지 기공도가 동일하더라도 기공 배열의 변화에 따라 최대 25.9%(2방향 인장), 30.4%(3방향 인장), 35.0%(기공 압력)의 편차가 발생하였다. 최종 파손 강도의 경우 기지 기공도가 증가할 때, 평균값이 84.2%(2방향 인장), 86.0%(3방향 인장), 93.3%(기공 압력) 감소하였다. 또한, 기지 기공도가 동일하더라도 기공 배열의 변화에 따라

최대 41.2%(2방향 인장), 46.2%(3방향 인장), 47.7%(기공 압력)의 편차가 발생하였다. 이는 기지 기공도 및 기공 배열이 재료의 유효 탄성 계수, 기공 탄성 계수뿐만 아니라 초기 파손 강도, 최종 파손 강도에도 상당한 영향을 끼친다는 것을 의미한다. 또한, 기지의 인장 강도가 2, 3 방향 인장 강도의 결정에 매우 지배적이나, 실제 미시역학 전산 모형을 통한 강도 산출 결과는 기지의 인장 강도보다 매우 낮게 산출되는 경향을 확인하였다. 기지 기공도 0.1일 때, 초기 파손 강도는 9.16 MPa(2 방향 인장), 8.34 MPa(3 방향 인장), 최종 파손 강도는 16.62 MPa(2 방향 인장), 16.04 MPa(3 방향 인장)로 산출되었으며, 이는 비록 기지 기공도 0.1의 전산 모델이지만 기지의 인장 강도 41.0 MPa에 비교하여 현저히 떨어진 수치이다. 또한, 기공도가 증가할수록 초기 및 최종 강도는 지속적으로 떨어지는 경향을 보인다. 기공 압력의 경우는 2, 3 방향 인장 강도와 같이 비교할 기준이 뚜렷하게 존재하지는 않지만, 기지 기공도가 증가할수록 파손 강도 값이 떨어지는 경향을 보임을 확인하였다. 이를 통해 재료 기공도, 기공 배열과 같은 형상적 요소를 반영할 수 있는 미시역학적 접근법을 기반으로 한 유한 요소 전산 모형화 기법이 실제 다공성 복합재의 파손 강도 예측에 더욱 적합함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 다공성 복합재의 기공 탄성 해석에 적합한 미시역학 전산 모형을 개발하고 기공 탄성 계수 산출 과정을 정리하였다. 미시역학 전산 모형의 유한요소 해석을 통해 유효 탄성 계수, 기공 탄성 계수, 파손 강도를 산출하였다. 파손 강도는 첫 번째 파손 요소 발생 지점인 초기 파손 강도와 파단선 형성 지점인 최종 파손 강도로 나누어 산출하였다. 산출된 유효 탄성 계수, 기공 탄성 계수, 파손 강도 전부 동일 기공도 내에서 기공 배열에 따라 편차가 발생하였다. 이를 통해 기공이 재료의 유효 탄성 계수, 기공 탄성 계수, 파손 강도에 상당한 영향을 끼치며, 다공성 복합재의 정확한 기공 탄성 거동 예측에 있어서는 기공의 형상적 요소가 반드시 반영되어야 함을 확인하였다. 또한, 기지의 강도에 지배적 영향을 받는 2, 3 방향 파손 강도가 기지 강도보다 현저히 낮게 산출됨을 확인하였으며, 기공도 증가에 따라 지속적으로 떨어지는 경향을 확인하였다. 기공 압력에 대한 파손 강도 또한, 기공도 증가에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 보임을 확인하였다. 이를 통해 미시역학적 접근법을 기반으로 한 유한요소 전산 모형화 기법이 다공성 복합재의 파손 강도 예측에 적합한 기법임을 확인하였다. 단, 실제 기공은 삼차원 형상을 갖기 때문에 향후 연구에는 미시역학 전산 모형의 삼차원화를 고려할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2014M1A3A3A02034622).

REFERENCES

1. Looyeh, M.R.E., Samata, A., Jihan, S., and McConnachie, J., "Modelling of Reinforced Polymer Composites Subject to Thermo-mechanical Loading," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 63, No. 6, 2005, pp. 898-925.
2. Mcmanus, H.L.N. and Springer, G.S., "High Temperature Thermomechanical Behavior of Carbon-Phenolic and Carbon-Carbon Composites - I. Analysis," *Journal of Composite Material*, Vol. 26, No. 2, 1992, pp. 206-229.
3. Mcmanus, H.L.N. and Springer, G.S., "High Temperature Thermomechanical Behavior of Carbon-Phenolic and Carbon-Carbon Composites - II. Results," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 2, 1992, pp. 230-255.
4. Yang, B.C., *A Theoretical Study of Thermo-mechanical Erosion of High-Temperature Ablatives*, Ph.D. Dissertation, Pennsylvania State University, 1992.
5. Biot, M.A. and Willis, D.G., "The Elastic Coefficients of the Theory of Consolidation," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, 1957, pp. 594-601.
6. Carroll, M.M., "An Effective Stress Law for Anisotropic Elastic Deformation," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, No. B13, 1979, pp. 7510-7512.
7. Sullivan, R.M. and Salamon, N.J., "A Finite Method for the Thermochemical Decomposition of Polymeric Materials - I. Theory," *International Journal of Engineering and Science*, Vol. 30, No. 4, 1992, pp. 431-441.
8. Wu, Y. and Katsube, N., "A Thermomechanical Model for Chemically Decomposing Composites - I. Theory," *International Journal of Engineering Science*, Vol. 35, No. 2, 1997, pp. 113-128.
9. Matsuura, Y. and Hirai, K., "A Challenge of Predicting Thermo-Mechanical Behavior of Ablating SiFRP with Finite Element Analysis," *AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 49th, AIAA 2010-6975.