

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(2), 92-98(2017)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.2.92>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

분층형 유한요소 모델을 이용한 복합재료의 삼차원 기공 탄성 및 파손 해석

양대규, 임소영, 신의섭*

Three-Dimensional Poroelastic and Failure Analysis of Composites Using Multislice Finite Element Models

Dae Gyu Yang, Soyoung Lim and Eui Sup Shin*

Department of Aerospace Engineering, Chonbuk National University

ABSTRACT

Porosity in polymer matrix composites generated during pyrolysis process affect the thermomechanical behavior of the composites. In this paper, multislice finite element models for the porous composite materials are developed, and poroelastic and failure analysis for these models are performed. In order to investigate the three-dimensional effects, finite element meshes are modeled considering different porosity (up to 0.5) and the number of slices (up to five). As a result, effective Young's moduli and poroelastic parameters exhibit the maximum differences of 74.0% and 442.1% with respect to porosity respectively, and 98.7% and 37.2% with respect to the number of slices. First and last failure strengths are decreased 88.2% and 90.0% with respect to porosity respectively, and 53.8% and 171.8% with respect to the number of slices.

초 록

열분해 현상을 겪는 고분자 복합재료의 내부에서는 기공이 형성되며, 이는 열기계적 거동에 영향을 미칠 수 있다. 본 논문에서는 기공이 형성된 복합재료의 분층형 삼차원 유한요소 모델을 개발하고 이를 이용하여 기공 탄성 및 파손 해석을 수행하였다. 유한요소 모델의 삼차원 확장 효과와 기공이 복합재료 내부에 미치는 영향을 확인하기 위하여 분층수와 기공도에 따른 분층형 유한요소 모델을 사용하였다. 해석 결과로서 유효 탄성 계수 및 기공 탄성 계수는 기공도가 0.5까지 증가함에 따라 최대 74.0%, 442.1%, 분층 수가 5까지 증가함에 따라 최대 98.7%, 37.2% 차이를 보였다. 또한, 초기 및 최종 파손 강도는 기공도에 따라 최대 88.2%, 90.0%, 분층에 따라 최대 87.5%, 171.8%까지 감소함을 확인하였다.

Key Words : Multislice(다중 분층), Finite Element Model(유한요소 모델), Poroelasticity(기공 탄성), Failure(파손), Composite(복합재료)

1. 서 론

항공우주 분야의 대표적인 구조물인 우주 비

행체는 복합재료로 구성되며, 지구 재진입과 같은 극심한 공력 가열 환경 내에서 가해지는 거대한 열적 하중에 의해 표면 온도가 최대 1,650 °C

† Received : August 20, 2016

Revised : January 21, 2017

Accepted : January 23, 2017

* Corresponding author, E-mail : sshin@jbnu.ac.kr

까지 상승한다[1,2]. 이로 인해 구조물을 구성하는 복합재료는 열분해 현상을 겪게 되고, 내부에 기공이 형성된다[3,4]. 온도 증가에 따른 열분해 현상으로 인해 기공이 재료 내부에 형성된 경우를 다공성 복합재료라 한다. 기공 내부에서 분해된 가스의 온도 상승에 의한 팽창으로 압력이 작용하게 되며, 이를 기공 압력이라 한다. 기공 압력은 재료의 추가적인 변형을 발생시켜 전체 재료 거동에 영향을 미친다[5,6]. 따라서 다공성 복합재료의 기공 탄성 및 파손 등의 거동을 예측하기 위해서 기공으로 인해 발생하는 복합적인 효과를 고려해야 한다[7,8]. 또한, 다공성 복합재료의 거시적인 물성을 산출하는 데 있어서 재료의 이방성뿐만 아니라 기공도, 기공 형상, 배열 등의 영향을 받기 때문에 미시역학적인 관점으로 접근하는 것이 용이하다[9,10]. 따라서 다공성 복합재료의 기공 탄성 거동을 예측하기 위한 미시역학적인 접근법이 필요하다. 이에 따라 미세 전산화 단층 촬영 기법(Micro-CT)을 통해 재료 내부의 실제 기공 형상 및 배열 등을 정량적으로 측정하는 연구도 진행되고 있다[11].

본 논문에서는 기공도와 분층 수에 따라 다공성 복합재료의 분층형 유한요소 모델을 개발하고, 이를 통해 기공 탄성 및 파손 해석을 수행하였다. 주요 결과로써, 유효 탄성 계수, 기공 탄성 계수, 초기 및 파손 강도를 산출하였다. 이를 통해 분층과 기공도의 변화가 재료 거동에 미치는 영향을 확인하였다.

II. 복합재료의 기공 탄성 및 파손 이론

2.1 기공 탄성 이론

기지 내부에 기공을 포함하는 직교 이방성 복합재료는 기계적 하중과 기공 압력에 의한 변형이 발생한다. 기공 탄성 구성 방정식은 전체 변형을 탄성 변형과 기공 압력에 의한 팽창 변형 성분으로 가산 분해하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} \end{bmatrix} \left(\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \end{Bmatrix} p \right) \quad (1)$$

여기서 p 는 기공 압력, π 는 기공 탄성 계수, σ 는 인장 하중에 의한 응력, ε 은 기공 탄성 변형도, E 와 ν 는 각각 다공성 복합재료의 유효 탄성 계수, 푸아송 비를 의미한다. 복합재의 주 재료 좌

표계를 기준으로 아래첨자 1은 섬유 중 방향(x_1), 2와 3은 섬유 횡 방향(x_2, x_3)을 나타낸다.

기공 압력만이 작용하는 평면 응력 상태를 고려하면 기공 탄성 계수 산출식은 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \pi_2 \\ \pi_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_2}{E_2 - \nu_{23}^2 E_3} & \frac{E_2 E_3}{E_2 - \nu_{23}^2 E_3} \\ \frac{\nu_{23} E_2 E_3}{E_2 - \nu_{23}^2 E_3} & \frac{E_2 E_3}{E_2 - \nu_{23}^2 E_3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{\varepsilon}_2 \\ p \\ \hat{\varepsilon}_3 \\ p \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $\hat{\varepsilon}$ 은 기공 압력에 의한 팽창 변형을 의미한다. 식 (2)를 통하여 기지 내부에 기공을 포함하는 복합재료의 기공 탄성 계수를 계산한다.

2.2 점진적 파손 이론

섬유강화 복합재료의 경우 파손 모드를 구별하고 강도 예측의 정확도를 높이는 것이 중요하다. 본 논문에서는 섬유는 파손되지 않는다고 가정하였다. 등방성 기지의 파손만을 고려하였으며, 최대 응력을 기준으로 파손 여부를 판별하였다.

$$\begin{cases} |\sigma_2| \geq S \\ |\sigma_3| \geq S \end{cases} \quad (3)$$

여기서 S 는 등방성 기지의 인장 및 압축 강도를 나타낸다. 요소의 응력 성분이 재료 강도를 초과할 경우, 해당 요소의 물성을 감소시키는 점진적 파손 기법을 적용하였다.

III. 유한요소 모델

3.1 대표 체적 요소

대표 체적 요소는 다공성 복합재료의 특성을 고려하여 기공이 기지 영역에 국한되도록 설정하였다. 섬유와 기지의 체적비를 5:5로 가정하였으며, 기지 기공도와 분층 수를 변수로 유한요소 모델 11종을 개발하였다. 섬유는 기공에 비해 크기가 크기 때문에 단일 섬유를 고려하여 기공도 증가에 의한 영향을 중점적으로 분석하였다. 각 분층은 실제 복합재료 단면과 유사한 원형 섬유를 갖는 x_2 - x_3 평면 모델로 구성하였으며, 섬유 방향으로 평행하게 확장되도록 설정하였다. 기공은 기지 영역의 요소를 랜덤 함수를 이용하여 제거하는 방법을 통해 생성하였다. 따라서 유한요소 모델의 기공도는 (난수 생성으로 제거된 요소 수) / (기지 영역의 총 요소 수)로 정의된다. 유한요소 모델은 분층 수와 기공도에 따라서 Sx-P3 계열과 S5-Px 계열로 나뉘며, S와 P는 각각 분층과 기공도를 의미한다. 전산해석에는 상용 프로그램을 사용하였다.

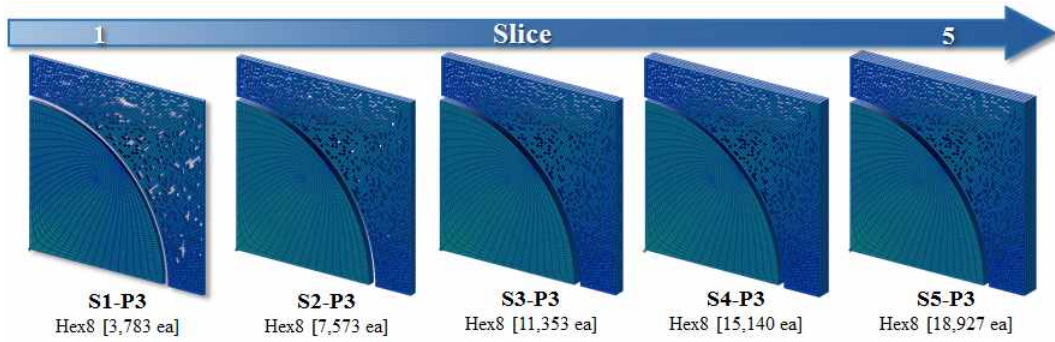


Fig. 1. Multislice finite element models: Sx-P3 series

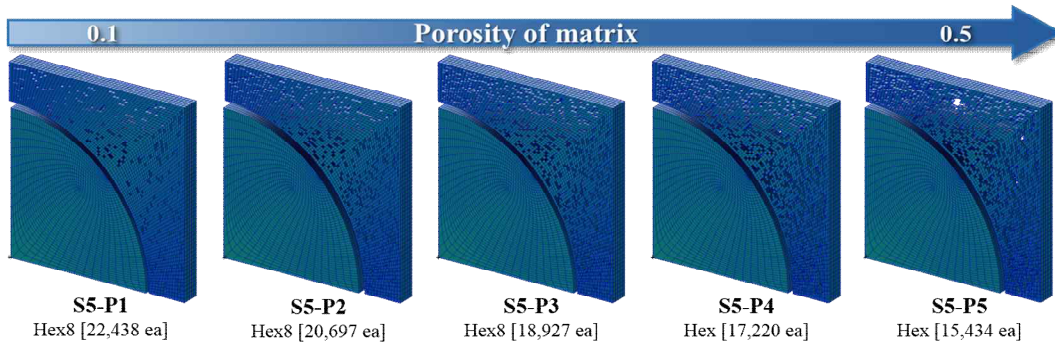


Fig. 2. Multislice finite element models: S5-Px series

3.1.1 Sx-P3 계열

Sx-P3 계열은 기공도가 0.3으로 동일하고 각 분층 별로 임의의 기공 배열을 고려하여 최대 다섯 장까지 결합하였다. 여기서 x는 분층 수를 의미한다. 분층 수에 따라 5종의 유한요소 모델을 개발하였으며, Fig. 1과 같다.

3.1.2 S5-Px 계열

S5-Px 계열은 기공도 0.1~0.5까지 임의의 기공 배열을 고려한 동일 기공도의 분층 다섯 장을 결합한 모델이다. 여기서 x는 기공도의 소수점 첫째자리 숫자를 의미한다. 기공도에 따라 유한요소 모델 5종을 개발하였으며, Fig. 2와 같다.

3.2 경계/하중 조건 및 재료 물성

각 유한요소 모델의 경계 조건은 Fig. 4에 정리하였다. x_2 - x_3 평면($x_1 = 0$), x_1 - x_3 평면($x_2 = 0$), x_1 - x_2 평면($x_3 = 0$)에서 각각 x_1 , x_2 , x_3 방향의 변위를 구속하였다. 또한 x_1 - x_3 평면($x_2 = 1$), x_1 - x_2 평면($x_3 = 1$)에 다중 절점 구속(MPC, multi-point constraint)을 이용하여 절점 A와 B에 각각 연계 구속하였다. 인장 하중 및 기공 압력에 대해 x_2 , x_3 방향 변위가 균일하도록 경계 조건을 부여하였다. 평면 응력 상태를 고려하기 때문에 휨(bending)을 방지하기 위해 독립 절점 A와 B의 x_1 방향의 회전을 구속하였다. 기공 탄성 해석의

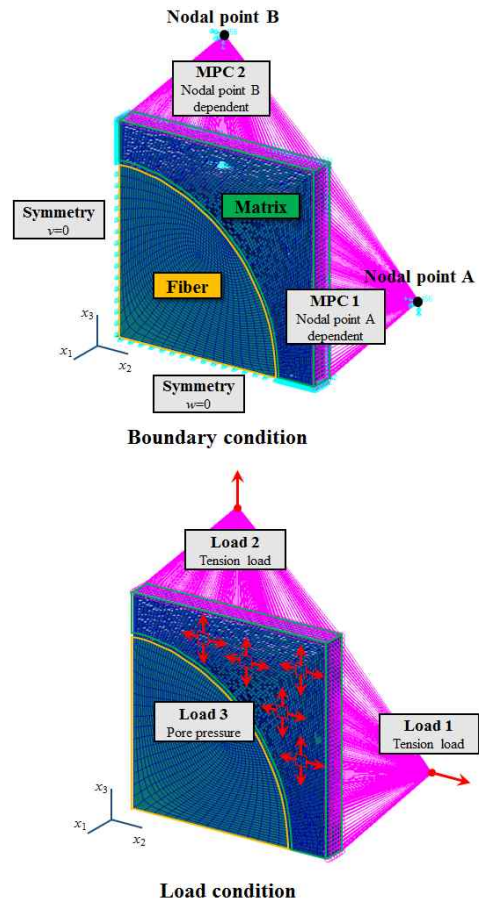


Fig. 3. Boundary and load conditions

경우, 하중 조건은 Fig. 3과 같이 x_2, x_3 방향의 인장 하중과 기공 압력을 적용하였다.

이 때, 기공 탄성 계수는 기공 압력(p)과 기공 압력에 의한 팽창 변형($\hat{\epsilon}$)의 상대적인 값을 이용하여 산출하므로 적용 하중의 절대적인 크기는 중요하지 않다. 따라서 계산의 편의성을 위해 단위 하중을 부여하였다. x_2, x_3 방향의 인장 하중과 기공 압력은 1.0 MPa이 되도록 설정하였다. 파손 해석의 경우, 기공 탄성 해석과 적용되는 하중의 종류는 동일하며, x_2, x_3 방향의 인장 하중은 0.1 MPa부터 25.0 MPa까지 0.1 MPa 단위로 증가하도록 설정하였다. 기공 압력은 40.0 MPa까지 증가하도록 설정하였다.

또한, 다공성 복합재료의 기공 탄성 및 파손 해석을 위한 유한요소 모델의 재료 물성은 섬유와 기지 영역을 구분하여 적용하였다. 섬유의 물성은 $E_1 = 230$ GPa, $E_2 = 15$ GPa, $G_{12} = 17$ GPa, $\nu_{12} = 0.20$, $\nu_{23} = 0.071$ 이다. 기지의 물성은 $E = 4.10$ GPa, $\nu = 0.34$, $S = 41$ MPa이다.

4.1 기공 탄성 해석

분층형 유한요소 모델을 이용하여 다공성 복합재료의 기공 탄성 해석을 수행하였다. 해석 결과로써, x_2, x_3 방향 유효 탄성 계수와 기공 탄성 계수를 산출하였다. Sx-P3 계열의 유효 탄성 계수 및 기공 탄성 계수는 각각 Fig. 4와 5에 정리하였다. 분층이 한 장에서 다섯 장으로 증가함에 따라 유효 탄성 계수는 최대 98.7%, 77.2% 증가하였다. 기공 탄성 계수는 최대 34.5%, 37.2% 감소하였다. 단, 각 유효 물성은 분층 수 증가에 따라 특정 값에 수렴하는 경향을 보인다. 이는 단일 분층 모델로는 삼차원 효과를 충분히 반영하기 어려움을 의미한다. 또한, 분층 수가 증가할수록 완전한 삼차원 결과에 근접할 수 있지만 해석 효율성은 감소할 수 있다. 그러므로 적절한 분층

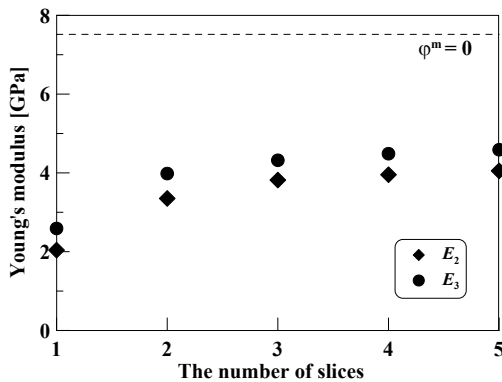


Fig. 4. Young's modulus vs. the number of slices (Sx-P3 series)



Fig. 5. Poroelastic parameter vs. the number of slices (Sx-P3 series)

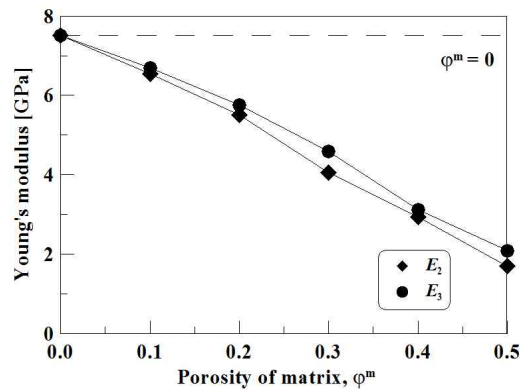


Fig. 6. Young's modulus vs. porosity of matrix (S5-Px series)

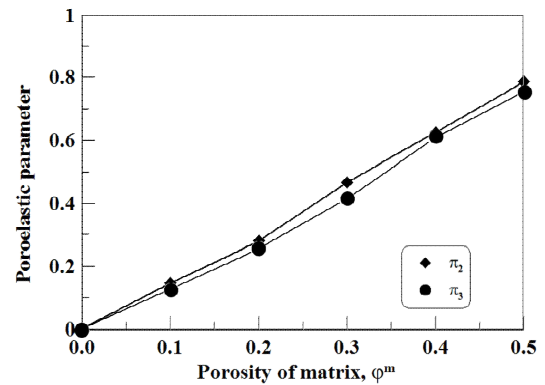


Fig. 7. Poroelastic parameter vs. porosity of matrix (S5-Px series)

수를 설정하고 이를 반영한 모델을 해석함으로써, 삼차원 기공 탄성 해석의 효율을 향상시킬 수 있다.

S5-Px 계열의 유효 탄성 계수 및 기공 탄성 계수는 Fig. 6과 7에 정리하였다. 기공도가 증가함에 따라 유효 탄성 계수는 최대 74.0%, 69.0% 감소하였다. 이는 동일한 기계적 하중이 작용하

더라도 기공도 증가에 의해 더 큰 변형이 발생할 수 있기 때문이다. 반면, 기공 탄성 계수는 최대 442.1%, 373.0% 증가하였다. 기공 탄성 계수는 식 (1)과 같이 유효 응력과 기공 압력 사이의 비례 계수로써 정의된다. 이는 기공도 증가에 따라 기공 압력의 작용 면적이 커지면서 유효 응력이 증가함을 의미한다. 따라서 기공도 증가는 재료의 파손점까지 도달하는 시간을 단축시킴과 동시에 변형률을 크게 증가시킬 수 있다.

4.2 점진적 파손 해석

다공성 복합재료의 점진적 파손 해석을 수행하였다. 이를 위해 각 모델의 응력-변형도를 산출하여 도식화하고 이를 통해 초기 및 최종 파손

강도를 예측하였다. 여기서, 초기 파손 강도는 첫 번째 파손이 발생한 요소의 응력이며, 최종 파손 강도는 파손이 지속되어 일정한 파단선을 형성했을 때의 응력을 나타낸다. Sx-P3 계열의 초기 및 최종 파손 강도를 분층 수에 따라 비교하기 위해 Fig. 8에 정리하였다. 초기 파손 강도는 x_2 , x_3 방향 인장 하중과 기공 압력에 대해 최대 32.3%, 53.8%, 87.5% 증가하였다. 최종 파손 강도는 최대 64.6%, 69.4%, 171.8% 증가하였다.

Figure 9는 기공도에 따른 초기 및 최종 파손 강도를 보여준다. 기공도 증가에 따라 초기 파손 강도는 x_2 , x_3 방향 인장 하중과 기공 압력에 대해 최대 79.8%, 82.4%, 88.2% 감소하였다. 또한, 최종 파손 강도는 최대 20.3%, 59.2%, 90.0% 감

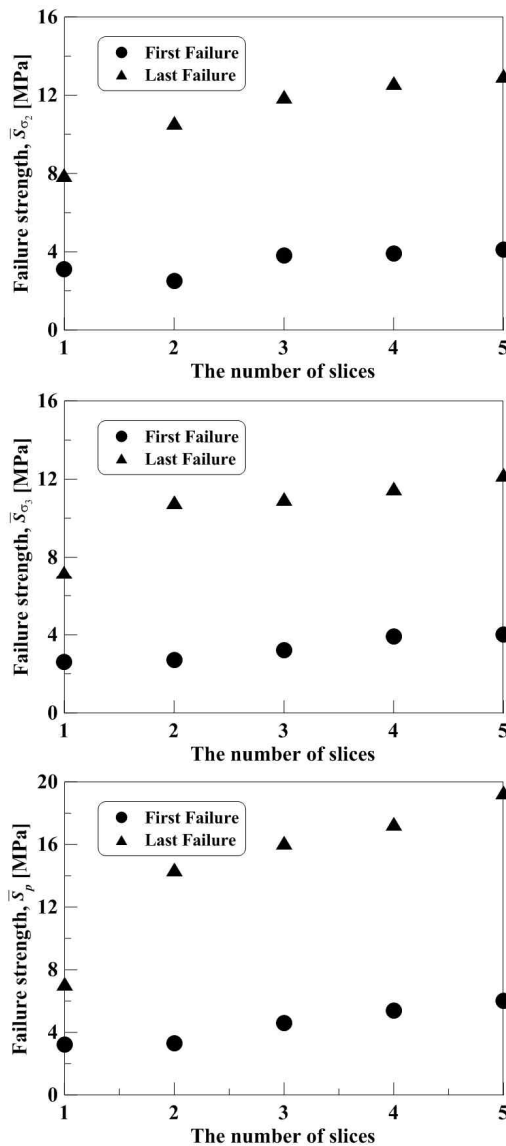


Fig. 8. Failure strengths vs. the number of slices (Sx-P3 series)

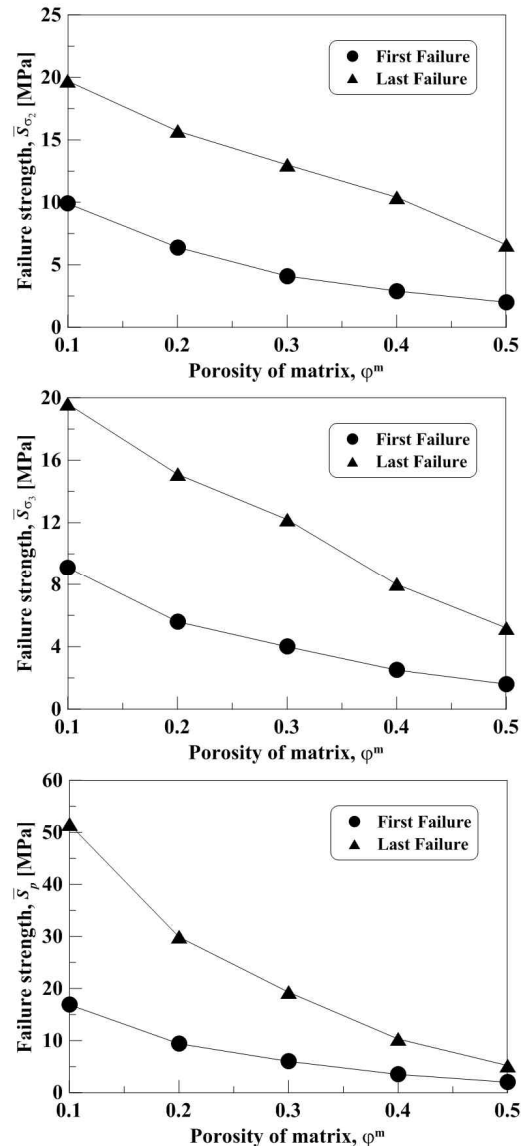


Fig. 9. Failure strengths vs. porosity of matrix (S5-Px series)

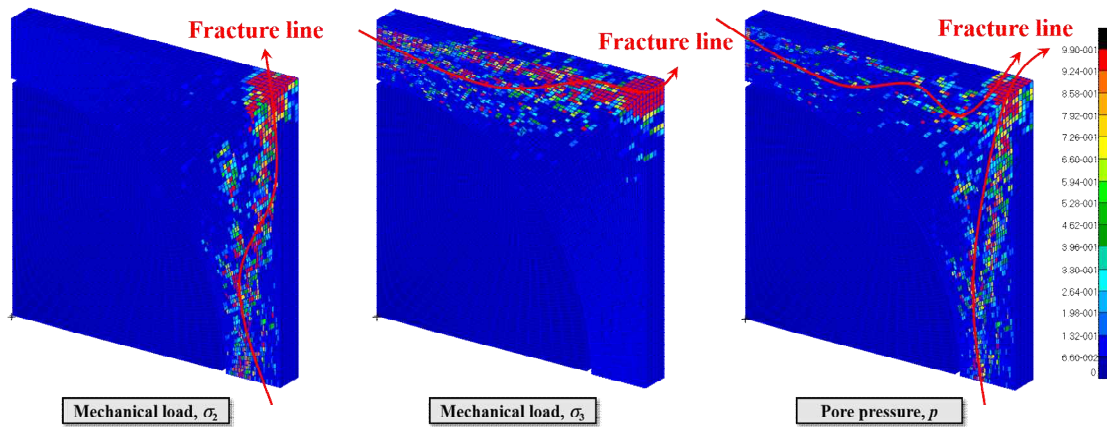


Fig. 10. Element damage of multislice finite element models (S5-P3)

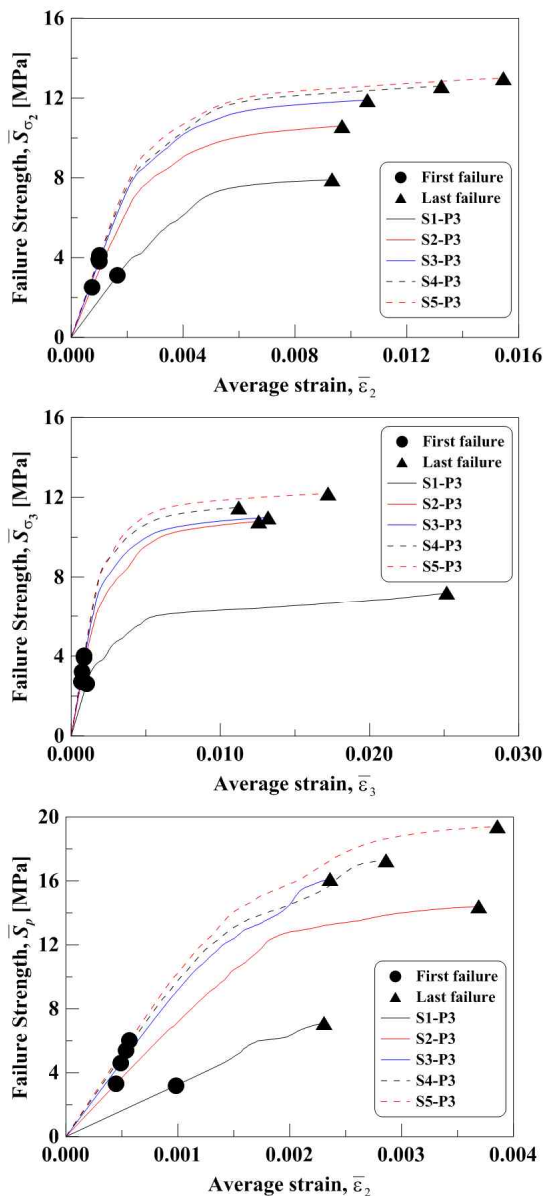


Fig. 11. Stress-strain curves (Sx-P3)

소하였다. 기계적 하중에 대해 초기 및 최종 파손 강도는 기공도에 따라 선형적으로 감소하였으며, 기공 압력에 대해서는 반비례하여 감소하는 경향을 보였다. 이는 동일한 하중이 작용하더라도 기공 이외 지지 영역이 감당하는 응력이 기공도에 따라 선형적으로 증가하기 때문이다. 특히, 기공 압력이 작용할 경우 기공 탄성 계수가 함께 증가함에 따라 지지 영역의 유효 응력이 급격히 증가하기 때문이다. 따라서 기공도는 다공성 복합재료의 기계적 파손 위험성을 증가시킬 수 있는 주요 인자로서 파손 거동 예측에 필수적으로 반영되어야 한다.

기공도 0.3 모델의 파손 진전에 따른 파단선을 Fig. 10과 같이 가시화하였다. 요소의 파손 지수는 파란색(0.00)부터 붉은색(0.99)까지 스펙트럼의 형태로 나타났다. 파손 지수는 각 요소의 물성 감소 비율을 의미하며, 1.00일 때 완전 파손으로 판단한다. 또한, 최대 응력 파손 기준에 의해 요소가 파손되었다고 판정이 되면, 해당 요소의 물성을 1%가 될 때까지 점차적으로 감소시키는 과정을 반복적으로 수행하게 된다. 파단선은 하중이 작용하는 방향에 우선적으로 영향을 받으며, 상대적으로 지지의 체적비가 작아 응력이 집중되는 지점부터 형성되기 시작한다. 또한, 기공 주변의 응력 집중 영역을 기점으로 전파된다. 이와 같이 분층 수에 따라 각각의 하중이 작용하는 경우에 대한 평균 응력-변형도 선도를 Fig. 11에 도시하였다.

V. 결론

본 논문에서는 분층 수와 기공도에 따른 다공성 복합재료의 유한요소 모델 11종을 개발하였다. 또한, 각 모델의 기공 탄성 및 파손 해석을 수행함으로써, 유효 탄성 계수, 기공 탄성 계수,

초기 및 최종 파손 강도를 산출하였다. 분층 수 증가에 따라 유효 탄성 계수는 최대 98.7%, 77.2% 증가하였으며, 기공 탄성 계수는 최대 34.5%, 37.2% 감소하였다. 다만, 분층 수가 다섯 장에서 두 겹 모두 오차 2% 이내로 수렴하는 경향을 확인하였다. 초기 파손 강도는 x_2 , x_3 방향 인장 하중과 기공 압력에 대해 최대 32.3%, 53.8%, 87.5% 감소하였다. 최종 파손 강도는 최대 64.6%, 69.4%, 171.8% 감소하였다. 이를 통해 분층형 유한요소 모델의 삼차원 확장 효과가 존재함을 확인하였다.

기공도 증가에 따라 유효 탄성 계수는 최대 74.0%, 69.0% 감소하는 반면 기공 탄성 계수는 최대 442.1%, 373.0% 증가하였다. 초기 파손 강도는 x_2 , x_3 방향 인장 하중과 기공 압력에 대해 최대 79.8%, 82.4%, 88.2% 감소하였다. 최종 파손 강도는 최대 20.3%, 59.2%, 90.0% 감소하였다. 특히, 기공 압력의 작용 시 가장 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 이를 통해 기공도가 다공성 복합재료의 기계적 파손 위험성을 결정하는 주요 인자임을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. 2014M1A3A3A02034622).

References

- 1) Pulci, G., Tirillo, J., Marra, F., Fossati, F., Bartuli, C. and Valente, T., "Carbon-Phenolic Ablative Materials for Re-Entry Space Vehicles: Manufacturing and Properties," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 41, No. 10, 2010, pp. 1483-1490.
- 2) Odabas, O. R. and Sarigul-Klijn, N., "Thermomechanical Coupling Effects at High Flight Speeds," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 2, 1994, pp. 425-430.
- 3) Tzeng, S. S. and Chr, Y. G., "Evolution of Microstructure and Properties of Phenolic Resin-Based Carbon/Carbon Composites during Pyrolysis," *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 73, 2002, pp. 162-169.
- 4) Trick, K. A. and Saliba, T. E., "Mechanisms of the Pyrolysis of Phenolic Resin in a Carbon/Phenolic Composite," *Carbon*, Vol. 33, No. 11, 1995, pp. 1509-1515.
- 5) Wu, Y. and Katsube, N., "A Constitutive Model for Thermomechanical Response of Decomposing Composites under High Heating Rates," *Mechanics of Materials*, Vol. 22, No. 3, 1996, pp. 189-201.
- 6) Kim, S. J., Han, S. Y., and Shin, E. S., "Thermomechanical Behavior of Porous Carbon/Phenolic Composites in Pyrolysis Environments," *Journal of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 39, No. 8, 2011, pp. 711-718.
- 7) Xu, Z., Fan, X., Zhang, W. and Wang, T. J., "Numerical Analysis of Anisotropic Elasto-Plastic Deformation of Porous Materials with Arbitrarily Shaped Pores," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 96-97, 2015, pp. 121-131.
- 8) Lee, S., Salamon, N. J. and Sullivan, R. M., "Finite Element Analysis of Poroelastic Composites Undergoing Thermal and Gas Diffusion," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 10, No. 4, 1996, pp. 672-680.
- 9) Kim, S. J., Han, S. Y. and Shin, E. S., "Calculation of Poroelastic Parameters of Porous Composites by Using Micromechanical Finite Element Models," *Composites Research*, Vol. 25, No. 1, 2012, pp. 1-8.
- 10) Vajari, D. A., Gonzalez, C., Llorca, J. and Legartha, B. N., "A Numerical Study of the Influence of Microvoids in the Transverse Mechanical Response of Unidirectional Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 97, 2014, pp. 46-54.
- 11) Feng, Y., Feng, Z., Li, A., Zhang, W., Luan, X., Liu, Y., Cheng, L. and Zhang, L., "Micro-CT Characterization on Porosity Structure of 3D Cf/SiCm Composite," *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42, No. 11, 2011, pp. 1645-1650.