

'11 추계학술대회 최우수 논문

미시역학적 유한요소 모델을 이용한 다공성 복합재료의 기공 탄성 인자 산출

김성준*, 한수연*, 신의섭**+

Calculation of Poroelastic Parameters of Porous Composites by Using Micromechanical Finite Element Models

Sung Jun Kim*, Su Yeon Han*, Eui Sup Shin**+

ABSTRACT

In order to predict the thermoelastic behavior of porous composites, poroelastic parameters are measured by using micromechanics-based finite element models. The expanding deformation caused by pore pressure, and the degradation of homogenized elastic moduli with pores are calculated for the assessment of the poroelastic parameters. Various representative volume elements considering the shape, size, and array pattern of pores are modeled and analyzed by a finite element method. The effects of porosity and material anisotropy, and the distribution of strain energy density are investigated carefully. In addition, the measured poroelastic parameters are verified by predicting the thermo-pore-elastic behavior of carbon/phenolic composites.

초 록

본 논문에서는 다공성 복합재료의 열탄성 거동 예측을 위하여 미시역학적 유한요소 해석을 통해 기공 탄성 인자를 측정하였다. 먼저 기공 압력에 의한 복합재료의 응력 및 변형 상태를 기술하기 위해서 구성 방정식에 기공 탄성 인자를 도입하였다. 기공 탄성 인자의 산출에 필요한 기공 압력에 의한 팽창 변형도와 기공 형성에 따른 균질화 탄성 계수의 저하를 측정하였다. 기공의 형상, 크기, 배열 형태에 따른 이차원 대표 체적 요소의 모델링과 유한요소 해석을 수행하였다. 기공도, 재료 이방성이 기공 탄성 인자에 미치는 영향과 기공 압력에 따른 변형 에너지 밀도 분포를 살펴보았다. 또한, 측정된 기공 탄성 인자의 유용성을 검토하기 위하여 탄소/페놀릭 복합재료의 열탄성 거동을 예측하였다.

Key Words : 기공 탄성 인자(poroelastic parameter), 미시역학(micromechanics), 유한요소 해석(finite element analysis), 복합재료(composite), 열탄성(thermoelasticity)

1. 서론

고온 환경과 같은 다양한 외부 하중에 노출된 다공성 복합재료는 상변화에 따른 물성 변화 및 숯 층 형성과 같은 복잡한 열분해(pyrolysis) 과정을 겪게 된다[1,2]. 특히, Fig. 1의 개념도와 같이 열분해 및 숯 층에 형성된 무수히 많은 기공에는 생성된 분해 가스에 의한 기공 압력이 작용한다.

이는 복합재료의 거시적 이방성, 온도의 공간적 구배, 수축 효과 등과 함께 재료 내부의 열응력과 열 변형에 많은 영향을 준다. 그 결과 섬유와 기지의 손상 및 적층판 분리와 같은 복합재료의 파손 현상이 발생할 수 있다. 따라서 구조물의 안전성 측면에서 다공성 효과를 포함한 열탄성 거동을 예측한 후 설계에 반영하는 것이 필요하다.

다공성 복합재료의 열탄성 거동 예측을 위하여 많은 연구

2011년 추계학술대회 최우수논문(무심사)

* 전북대학교 대학원 항공우주공학과

**+ 전북대학교 항공우주공학과, 교신저자(E-mail: esshin@jbn.ac.kr)

들이 수행되어 왔다[3-5]. 이들 연구에서는 이방성을 갖는 재료 거동을 거시역학적 물성 값 또는 재료 상수로서 직접 묘사하는 이론이 주를 이루어 왔다. 예를 들면, 기공 압력 효과를 표현하기 위하여 좌표 방향에 따라 다른 값을 갖는 기공 탄성 인자(poroelastic parameters)를 구성 방정식에 도입하였다[6]. 최근 고온 환경에서 실험을 통해 기공 탄성 인자를 측정하려는 연구가 수행되기도 하였지만, 이를 위한 실험 환경 및 절차가 제한적이고 복잡하다[7].

다공성 복합재료의 기공 탄성 인자는 기공 형성 정도를 의미하는 기공도(porosity)와 기공 압력 등에 영향을 받는다. 이러한 주요 인자들은 열분해 환경에서 연속적으로 변화하기 때문에 현상의 모델링 측면에 적합한 산출 기준이 필요하다. 또한 재료의 파손 기준 확립 측면에서는 기공 및 기공 압력이 구조물의 강성 저하와 국부적인 응력 집중에 미치는 영향에 대한 확인 및 분석이 필요하다. 그러므로 재료 내부 현상을 대표 체적 요소를 이용하여 모델링하고, 유한요소 해석을 통한 응력 집중의 확인과 산출된 기공 탄성 인자를 구성 방정식에 적용하는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 미시역학적 유한요소 모델을 이용한 기공 탄성 인자의 산출과 다공성 복합재료의 열탄성 거동을 예측하였다. 기공의 형상, 크기, 배열이 고려된 다양한 대표 체적 요소의 모델링을 수행하였다. 기공 탄성 인자의 산출과정에서 기공 압력에 의한 팽창 변형과 기공 형성에 따른 균질화 탄성 계수의 차이를 측정하였다. 측정된 기공 탄성 인자의 값을 비교한 후, 구성 방정식에 적용하여 탄소/페놀릭 복합재료의 열탄성 거동을 확인하였다.

2. 기공 탄성 인자의 산출 기법

2.1 열-기공-탄성 구성 방정식

다공성 복합재료의 열탄성 거동은 탄성 변형, 기공 압력에 의한 팽창 변형, 열팽창 변형이 고려되어야 한다. 이를 위해 다음과 같은 열-기공-탄성 구성 방정식을 이용하였다.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{31} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & \frac{1}{E_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} \end{bmatrix} \left(\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_3 \\ \tau_{31} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \pi_1 \\ \pi_3 \\ 0 \end{Bmatrix} p \right) + \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_3 \\ 0 \end{Bmatrix} \theta, \quad (1)$$

여기서 E , G , ν 는 다공성 복합재료의 균질화 탄성 계수, π 는 이방성 기공 탄성 인자, p 는 기공 압력, α 는 열팽창 계수, θ 는 온도 변화이다. 기공 압력에 의한 팽창 변형도를 식 (1)과 같은 형태로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

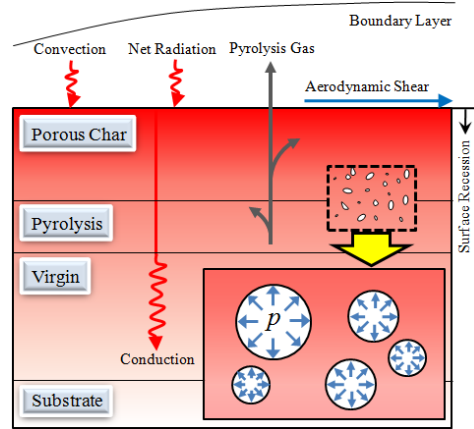


Fig. 1 Thermochemical decomposition phenomena.

$$\begin{Bmatrix} \pi_1 \\ \pi_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} \\ -2\nu_{13} & \frac{1}{E_3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \tilde{\epsilon}_1 \\ p \\ \tilde{\epsilon}_3 \\ p \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $\tilde{\epsilon}$ 는 기공 압력에 의한 유효 변형도를 의미한다. 또한, 기공 탄성 인자는 다음과 같이 고형(solid) 복합재료의 탄성 계수와 기공 형성에 따라 변화하는 균질화 탄성 계수와의 차이를 기준으로 정의된다[8].

$$\begin{Bmatrix} \pi_1 \\ \pi_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1-\nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Lambda} & \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}}{E_2 E_3 \Lambda} & \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Lambda} \\ \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Lambda} & \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Lambda} & \frac{1-\nu_{12}\nu_{21}}{E_1 E_2 \Lambda} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{1}{E_1^s} - \frac{\nu_{21}^s}{E_2^s} - \frac{\nu_{31}^s}{E_3^s} \\ \frac{1}{E_2^s} - \frac{\nu_{12}^s}{E_1^s} - \frac{\nu_{32}^s}{E_3^s} \\ \frac{1}{E_3^s} - \frac{\nu_{13}^s}{E_1^s} - \frac{\nu_{23}^s}{E_2^s} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

위 첨자 s 는 고형 복합재료의 탄성 계수임을 의미한다. 탄성 계수로 표현된 Λ 의 구체적인 형태는 다음과 같다.

$$\Lambda = \frac{1-\nu_{12}\nu_{21}-\nu_{23}\nu_{32}-\nu_{31}\nu_{13}-2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_2 E_3} \quad (4)$$

기공 탄성 인자의 산출 기법으로 '기준 1'은 식 (2)을, '기준 2'는 식 (3)을 각각의 계산 과정에 적용하였다.

2.2 대표 체적 요소 모델의 기공 탄성 해석

Fig. 2와 같은 이차원 대표 체적 요소 모델을 기공도($\rho = 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$)에 따라 생성한 후, 복합재료의 물성

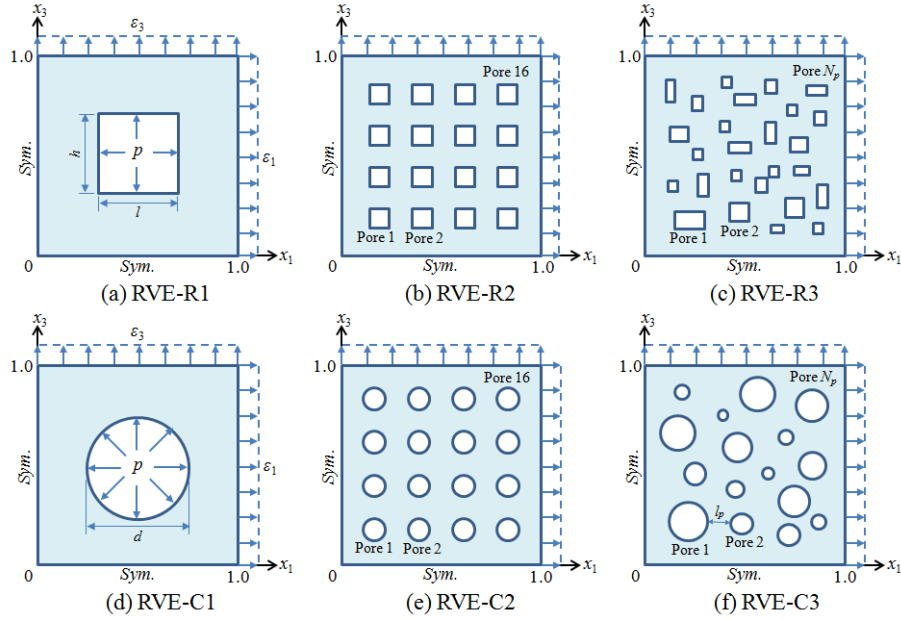


Fig. 2 Representative volume elements for poroelastic analysis.

Table 1 Estimate of homogenized elastic moduli for poroelastic assessment

Model	ϕ	Homogenized Elastic Moduli			Model	ϕ	Homogenized Elastic Moduli		
		E_1 (GPa)	E_3 (GPa)	ν_{13}			E_1 (GPa)	E_3 (GPa)	ν_{13}
RVE-R1	0.01	29.042	14.602	0.299	RVE-C1	0.01	29.041	14.614	0.304
	0.05	25.714	13.153	0.290		0.05	25.771	13.235	0.312
	0.10	22.507	11.637	0.272		0.10	22.578	11.784	0.311
	0.15	19.948	10.343	0.250		0.15	20.000	10.540	0.303
	0.20	17.821	9.222	0.228		0.20	17.899	9.482	0.291
RVE-R2	0.01	29.111	14.628	0.300	RVE-C2	0.01	29.059	14.619	0.303
	0.05	25.826	13.199	0.293		0.05	25.793	13.241	0.311
	0.10	22.610	11.685	0.275		0.10	22.597	11.791	0.311
	0.15	20.005	10.372	0.254		0.15	20.053	10.565	0.303
	0.20	17.867	9.246	0.231		0.20	17.937	9.499	0.291
RVE-R3	0.01	29.387	14.714	0.299	RVE-C3	0.01	29.142	14.652	0.303
	0.05	26.030	13.314	0.296		0.05	25.748	13.243	0.315
	0.10	22.079	11.542	0.293		0.10	22.143	11.673	0.326
	0.15	18.144	9.796	0.287		0.15	19.038	10.259	0.337
	0.20	15.931	8.647	0.283		0.20	16.277	8.953	0.346

값($E_1^s = 30$ GPa, $E_3^s = 15$ GPa, $\nu_{13}^s = 0.3$, $\nu_{12}^s = 0.2$, $G_{13}^s = 9.38$ GPa)을 적용하였다. 기본적인 기공의 형상으로 사각형(RVE-R1, R2, R3)과 원형(RVE-C1, C2, C3)을 선택한 후, 규칙 기공 배열(RVE-R1, R2, C1, C2)과 불규칙 기공 배열(RVE-R3, C3)을 갖는 경우를 고려하였다. 전체 모델은 기공 생성 방법을 고려하여 7,617~40,510개의 선형 사각형 요소를 사용하여 모델링하였다. 규칙 기공 배열을 갖는 모델은 기공이 차지하는 면적을 고려하여 기공을 생성하였다. 불규칙 기공 배열을 갖는 RVE-R3 모델은 생성된 요소를 랜덤 함수를

사용하여 제거하였고, RVE-C3 모델은 기공의 개수($N_p = 50$)를 기공 직경(d)에 따라 5등분한 후, 기공 간격($l_p = 0.02$ m)을 고려하여 정규 분포시켰다.

균일 변위 하중 조건에서 측정된 균질화 탄성 계수를 Table 1에 나타내었다. 전체적으로 기공이 차지하는 비율이 증가할수록 유효 탄성 계수 E_1 과 E_3 이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 규칙 기공 배열을 갖는 모델의 경우에는 기공의 형상 또는 크기는 균질화 탄성 계수 측정에 큰 영향이 없다. 반면 기공이 불규칙 배열을 갖는 모델의 경우에는 기공도

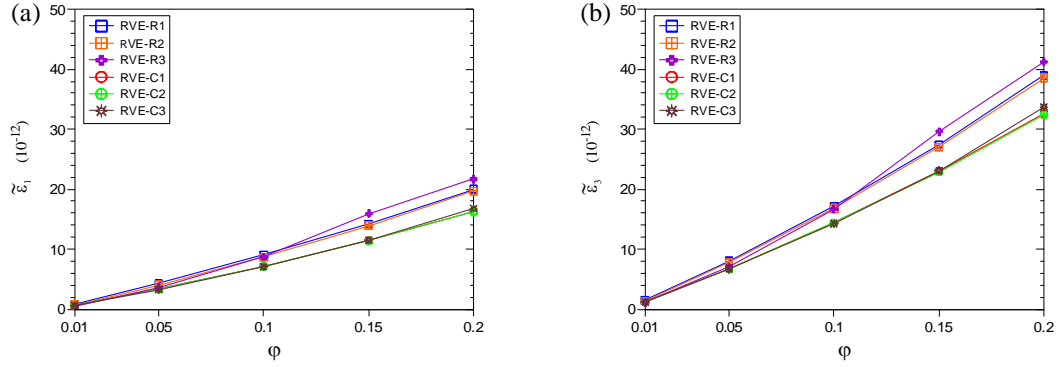


Fig. 3 Effective strains subjected to pore pressure.

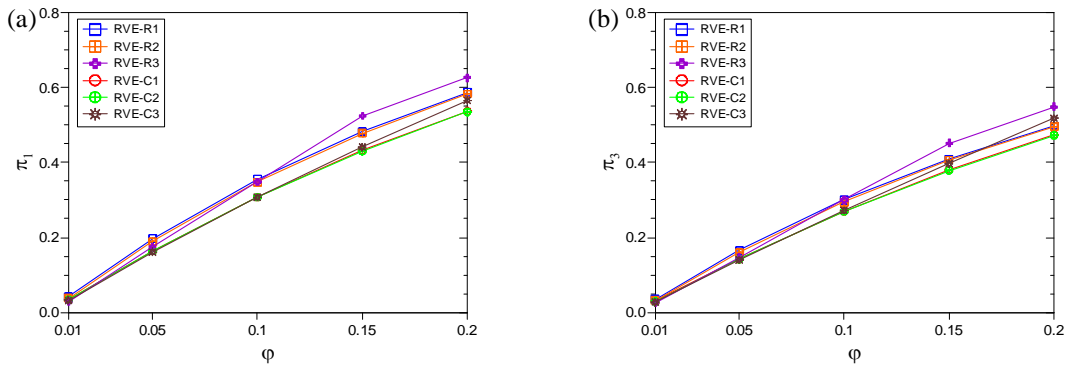
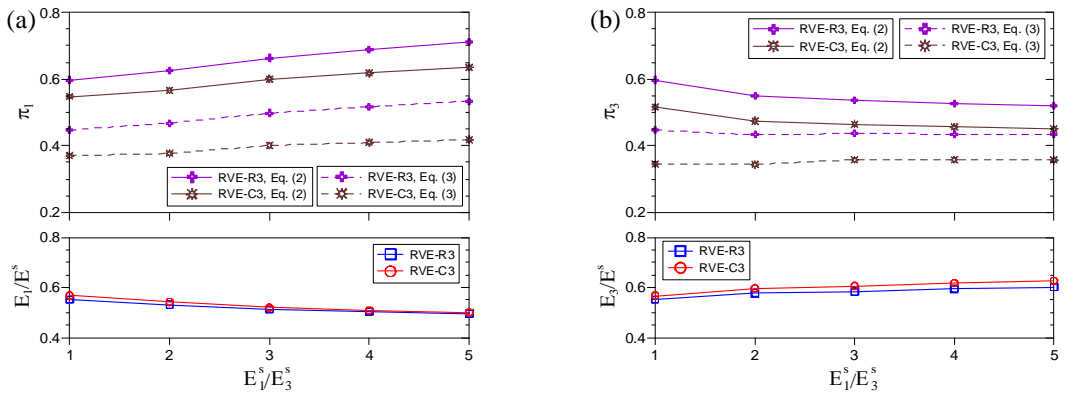


Fig. 4 Poroelastic parameters vs. porosity.

Fig. 5 Poroelastic parameters and normalized elastic moduli vs. relative ratio of E_1 ($E_3^0 = 15 \text{ GPa}$, $\phi = 0.2$).

0.1 이상에서 규칙 배열을 갖는 모델보다 균질화 탄성 계수가 낮게 측정 된다. 예를 들어, RVE-R3 모델의 기공도 0.2에서 E_1 은 약 10.6~11.2%, E_3 은 약 6.2~8.9% 정도 낮게 측정된다. 이는 기공도가 증가함에 따라 기공 간격이 좁아지고 밀집도가 증가하여, 하중을 감당하는 유효 면적이 감소하였

기 때문이라 판단된다.

기공에 작용하는 기공 압력($p = 1 \text{ Pa}$)에 의한 팽창 변형을 유효 변형도로서 측정하였으며, 이를 Fig. 3에 나타내었다. 기공도가 증가함에 따라 기공 팽창 효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 기공의 형상이 원형인 경우보다 사각형

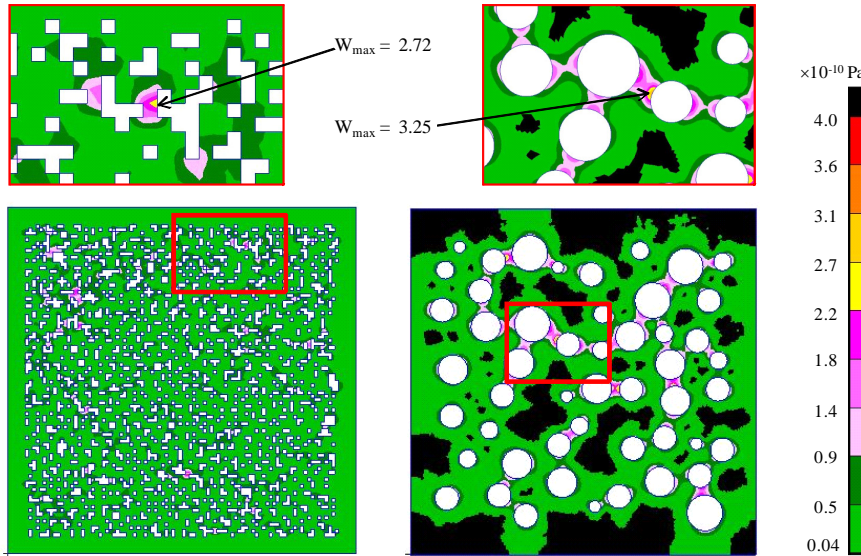


Fig. 6 Contours of strain energy density due to pore pressure (RVE-R3, RVE-C3, $\phi = 0.2$).

인 모델의 유효 변형도가 높게 측정된다. 이는 동일 기공도에서 기하학적으로 실제 기공 압력이 작용하는 면적이 사각형 기공이 약 12.7% 정도 크기 때문이다.

기공 탄성 인자의 산출 기준 1에 따라 측정된 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 전체 모델에 대하여 기공 탄성 인자는 기공도에 따라 π_1 이 0.029~0.042에서 0.535~0.626, π_3 은 0.025~0.035에서 0.473~0.549의 범위 내에서 측정되었다. 기공도 0.2를 기준으로 기공 형상에 따라 불규칙 기공 배열을 갖는 모델인 RVE-R3과 RVE-C3에서 높게 측정되었다. 이는 두 모델에서 기공도 진전에 따른 균질화 탄성 계수의 감소와 기공 팽창 효과가 크게 나타났기 때문이다.

재료 이방성 정도에 따라 측정된 기공 탄성 인자와 균질화 탄성 계수를 Fig. 5에 나타내었다. 기공 탄성 인자는 기준 1의 경우, 이방성 정도가 클수록 π_1 은 최대 19.3% 정도 증가, π_3 은 최대 14.7% 정도 감소하는 경향을 보였다. 기준 2의 기공 탄성 인자는 기준 1보다 낮게 측정된다. 예를 들어, 이방성 정도가 5인 경우에는 RVE-R3 모델의 π_1 과 π_3 은 각각 25.0%, 16.7% 정도 낮게 측정된다. 이는 균질화 탄성 계수에서 일정하다고 가정한 ν_{12} 의 영향이라 판단된다.

기공 탄성이 응력 집중에 미치는 영향을 자세히 살펴보기 위하여 RVE-R3과 RVE-C3 모델의 변형에너지 밀도 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 기공이 크고 기공 간격이 좁은 주변에서 변형에너지 밀도가 크게 나타난다. 즉, 기공 팽창에 의한 응력 집중은 기공도의 진전 또는 기공의 크기와 밀집 정도에 따라 크게 증가할 수 있다. 예를 들어, Fig. 7과 같이 불규칙 기공 배열을 갖는 RVE-C3 모델의 경우에는 기공 간격($l_p = 0.005\sim 0.04$ m)에 따라 0.04 m 기준으로 최대 7.2배 정도 증가하였다.

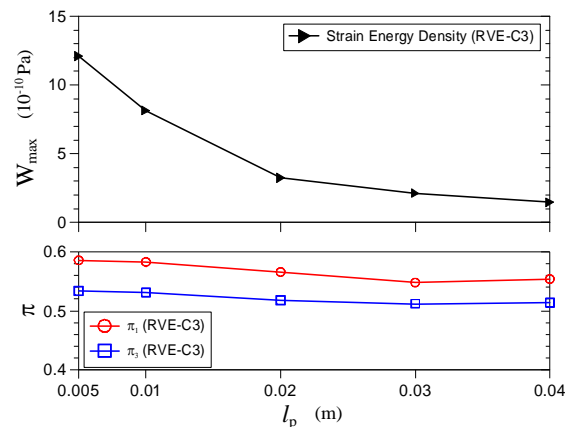


Fig. 7 Strain energy density and poroelastic parameters vs. permissible range of between pores ($\phi = 0.2$).

3. 다공성 복합재료의 열탄성 거동 예측

3.1 열화학적 분해 모델

측정된 기공 탄성 인자의 유용성 확인을 위하여 탄소/페놀릭 복합재료의 열탄성 거동을 예측하였다. 열분해 과정에서 연속적으로 변화하는 기공도와 기공 압력을 고려하기 위하여, 아레니우스 방정식(Arrhenius equation)에 근거한 열분해 모델을 사용하였다. 각 반응 단계 i 에서의 열분해 반응 상수 c_i 는 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{c}^{(i)} = -A_0^{(i)} (c^{(i)})^{n^{(i)}} \exp\left(-\frac{E_a^{(i)}}{R\theta}\right) \quad (5)$$

여기서 A_0 와 n 은 열분해에 관련된 재료 상수, E_a 는 활성화 에너지, R 은 이상 기체 상수이다. $(\dot{\quad})$ 는 시간 변화율을 의미한다. 기공의 체적 비율을 의미하는 기공도는 다음과 같이 계산된다.

$$\varphi = \varphi_{\text{dec}} + \Delta\varphi_{\text{def}} = c\varphi_0 + (1-c)\varphi_i + \Delta\varphi_{\text{def}} \quad (6)$$

아래 첨자 0과 i 는 각각 열분해 초기 단계와 숯 층 형성의 최종 단계를 의미한다. 아래 첨자 dec와 def는 각각 열화학적 분해와 열기계학적 변형 단계에서의 물리량을 의미하며, Δ 는 변화량을 의미한다. 기공 압력은 다음과 같이 이상 기체 상태 방정식으로부터 유도된다.

$$p = \frac{R\theta}{M_w} \rho_{[g]} = \frac{R\theta}{M_w} \frac{m_{[g]}}{\varphi_{\text{dec}} \left(1 + \frac{\Delta V_{\text{def}[p]}}{V_{\text{dec}[p]}}\right) V_0} \quad (7)$$

여기서 아래 첨자 $[g]$ 와 $[p]$ 는 각각 분해 gas와 기공에 관련됨을 의미한다. M_w , ρ 는 각각 평균 분자량과 밀도를 나타내며, m 은 질량, V 는 체적을 의미한다.

탄소/페놀릭 복합재료의 물성 값을 이용하여 기본적인 열분해 경향을 살펴보았다[4]. 대표적인 결과로서 온도에 따른 열분해 반응 상수와 기공도의 변화를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 약 433 K 이후부터 열분해 반응 상수가 변화하기 시작하며 기공도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 기공도의 경우에는 재료의 물성 변화가 급격하게 일어나는 약 450~600 K의 천이(transition) 구간과 이후 열-기공-탄성 구간에서 크게 증가한다. 또한 기공 압력에 기인한 기공 팽창과 같은 열기계학적 변형에 의해서도 기공도가 상당히 증가하는 것을 알 수 있다.

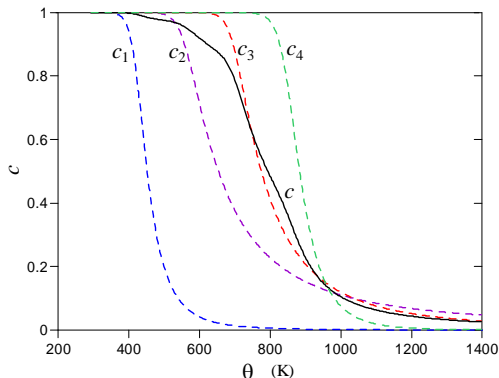


Fig. 8 Degree of conversion vs. temperature.

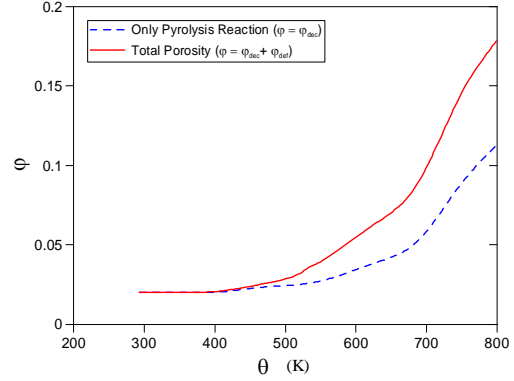


Fig. 9 Porosity vs. temperature.

3.2 탄소/페놀릭 복합재료의 열탄성 해석

불규칙 기공 배열을 갖는 RVE-R3과 RVE-C3 모델을 기준으로 탄소/페놀릭 복합재료의 기공 탄성 인자를 측정하였다. Table 2는 열분해 온도에 따른 탄소/페놀릭 복합재료의 균질화 탄성 계수를 기준으로 각 기공도($\varphi = 0.02, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$)에서 측정된 탄성 계수를 나타낸다. 산출 기준 1과 기준 2에 따라 측정된 기공 탄성 인자는 Fig. 10과 같다. 기준 1의 π_1 은 0.071~0.498, π_3 은 0.081~0.395 범위에서 측정되었으며, 기준 2의 π_1 은 0.053~0.568, π_3 은 0.061~0.421 범위에서 기공도가 클수록 기준 1보다 높게 측정되었다. 이는 복합재료의 탄성 계수의 값이 다소 크게 측정되었기 때문이다. 모델에 따라서는 기공 팽창 효과가 크게 나타나는 RVE-R3이 RVE-C3 모델보다 기공 탄성 인자가 높게 측정되는 것이 확인되었다.

열탄성 거동의 예측 결과는 역제 열 성장 실험 결과(RTG Ex. 1, RTG Ex. 2)와 비교하였다[5]. 실제 실험에서는 시편의 면내 방향에 균일하게 가해진 열 하중에 의한 두께 방향 압축 응력 $|\sigma_3|$ 과 면내 방향 변형도 ε_1 을 측정하였다. 열-기공-탄성 구성 방정식에 실험 환경을 모사($\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 \neq 0$)하여 정리하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\sigma_3 = (2\nu_{31}\pi_1 - \pi_3)p - E_3\alpha_3\theta_+ \quad (8)$$

$$\varepsilon_1 = -\frac{\nu_{31}}{E_3}\sigma_3 + \frac{(1-\nu_{12})\pi_1 - \nu_{13}\pi_3}{E_1}p + \alpha_1\theta_+ \quad (9)$$

기공 탄성 인자의 산출 기준 및 적용 방법에 따른 열탄성 거동의 예측 결과를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 기본적인 경향 확인을 위하여 측정된 기공 탄성 인자를 기공도의 함수로서 적용한 경우($\pi(\varphi)$)와 기공도 0.2에서 측정된 값을 일정하게 적용한 경우($\pi(0.2)$)를 고려하였다. 산출 기준 1과 기준 2에 의한 예측 결과를 살펴보면, 기공도의 함수로서 적용한 경우에는 열탄성 및 일부 천이 구간에서는 실험 값과

Table 2 Elastic moduli of carbon/phenolic composites

Model	ϕ	Elastic Moduli			Model	ϕ	Elastic Moduli		
		E_1^z (GPa)	E_3^z (GPa)	ν_{13}^z			E_1^z (GPa)	E_3^z (GPa)	ν_{13}^z
RVE-R3	0.02	18.677	21.105	0.299	RVE-C3	0.02	18.994	21.474	0.296
	0.05	7.262	3.379	0.01		0.05	7.417	3.416	0.01
	0.10	8.993	2.471	0.01		0.10	9.182	2.451	0.01
	0.15	11.814	2.114	0.01		0.15	11.525	2.017	0.01
	0.20	14.419	2.382	0.01		0.20	14.052	2.296	0.01

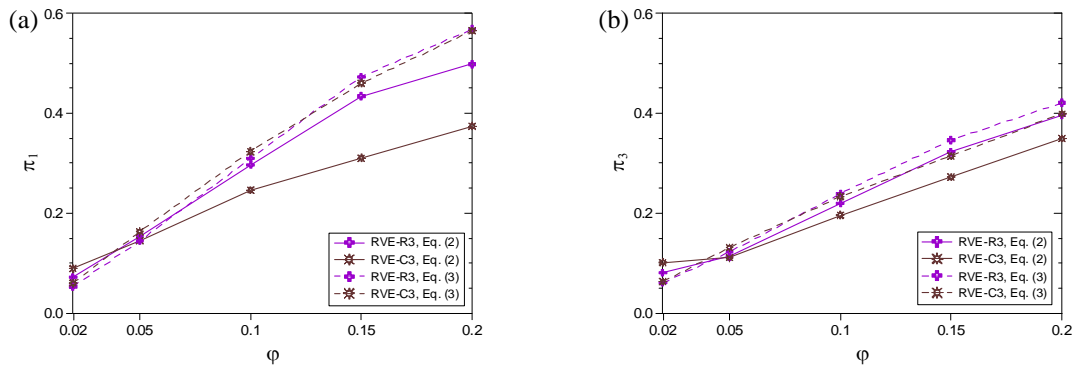


Fig. 10 Porelastic parameters vs. porosity (carbon/phenolic).

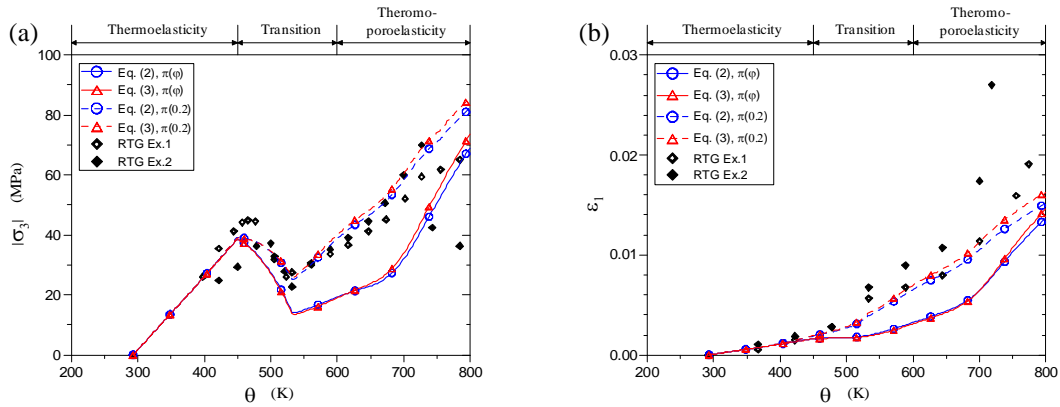


Fig. 11 Thermoelastic behavior for carbon/phenolic composites: (a) restraining stress, (b) lateral strain (RVE-R3).

비슷한 경향을 보인다. 하지만, 약 533 K 이상의 천이 구간과 열-기공-탄성 구간에서는 차이가 나타난다. 이는 열탄성 거동 예측을 위한 기초 연구로서 기공도와 기공 압력만을 해석 모델에 고려하였기 때문이다. 특히, 정밀한 열탄성 거동 예측을 위해서는 천이 및 열-기공-탄성 구간에서의 급격한 물성 저하와 같은 복잡한 현상의 모델링과 신뢰성 있는 물성 값 등 해석에 필요한 기초 자료의 확보가 필요하다. 기공도 0.2에서의 값을 일정하게 적용한 경우에는 전 구간에 있어서 실험 값과 차이가 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 다공성 복합재료의 열탄성 거동 예측을 위하여 유한요소 해석을 통해 기공 탄성 인자를 측정하였다. 기공을 갖는 대표 체적 요소의 모델링을 수행하였으며, 균일 변위 하중 조건에서 다공성 복합재료의 균질화 탄성 계수와 기공 압력에 기인한 팽창 변형도 성분을 계산하였다. 이를 기공 탄성 인자의 측정에 필요한 산출 수식에 각각 적용하였다.

간단한 수치 실험을 통해 기공 형상, 크기, 배열 형태가

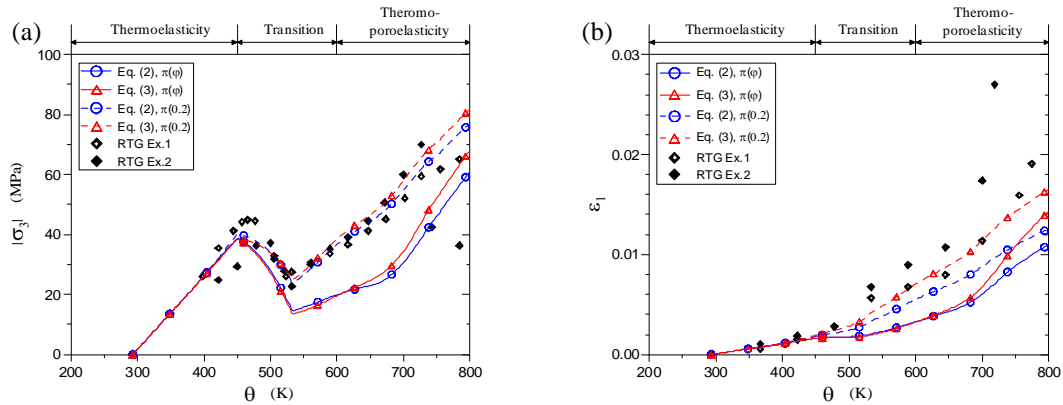


Fig. 12 Thermoelastic behavior for carbon/phenolic composites: (a) restraining stress, (b) lateral strain (RVE-C3).

기공 탄성 인자에 미치는 영향을 살펴보았다. 불규칙 기공 배열을 갖는 미시역학 모델의 경우, 기공도가 증가함에 따라 규칙 배열 모델에 비해 균질화 탄성 계수가 다소 낮게 측정되었다. 기공 압력에 의한 팽창 변형은 기공 형상에 영향을 받으며, 밀집된 기공 주변에서 변형 에너지 밀도가 크게 나타나는 것을 확인하였다. 측정된 기공 탄성 인자의 타당성을 검토하기 위하여 탄소/페놀릭 복합재료의 열탄성 거동을 예측하였다. 기공도의 함수로 기공 탄성 인자를 가정한 경우, 두께 방향 응력 성분에 다소 차이가 발생할 수 있다. 전반적으로 해당 온도 영역에서 실험 결과와 유사한 응력 및 변형도 응답을 예측할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었습니다(2011-0025818). 또한, 부분적으로 국토해양부의 하늘 프로젝트로 지원되었습니다.

참고문헌

- Potts, R.L., "Application of Integral Methods to Ablation Charring Erosion, A Review," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 32, No. 2, 1995, pp. 200-209.
- 윤남균, 조용준, 정발, "로켓 추진기관에 사용되는 삭마 복합재료," 한국복합재료학회지, 제3권 제2호, 1990, pp. 57-64.
- Henderson, J.B. and Wiecek, T.E., "A Mathematical Model to Predict the Thermal Response of Decomposing, Expanding Polymer Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, No. 4, 1987, pp. 373-393.
- Wu, Y., and Katsube, N., "A Constitutive Model for Thermomechanical Response of Decomposing Composites under High Heating Rates," *Mechanics of Materials*, Vol. 22, 1996, pp. 189-201.
- Hubbert, T.E., "Mechanical Properties of FM5055 baseline Carbon Phenolic," *Southern Research Institute Report*, No. SRI-MME-89-1149-6071-23, 1990.
- Sullivan, R.M. and Salamon, N.J., "A Finite Element Method for the Thermochemical Decomposition of Polymeric Materials - II. Carbon Phenolic Composites," *International Journal of Engineering Science*, Vol. 30, No. 7, 1992, pp. 939-951.
- Matsuura, Y., Hirai, K., Kamita, T., Sato, Y., Takatoya, T., and Igawa, H., "A Challenge of Modeling Thermo-Mechanical Response of Silica-Phenolic Composites under High Heating Rates," *AIAA Paper 2011-139*, 2011, pp. 1-19.
- Carroll, M.M., "An Effective Stress Law for Anisotropic Elastic Deformation," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, No. B13, pp. 7510-7512.