

## 論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.8.711

## 고온 열분해 환경의 다공성 탄소/페놀릭 복합재의 열기계적 거동

김성준\*, 한수연\*, 신의섭\*\*

Thermomechanical Behavior of Porous Carbon/Phenolic Composites  
in Pyrolysis Environments

Sung Jun Kim\*, Su Yeon Han\* and Eui Sup Shin\*\*

## ABSTRACT

The thermoelastic behavior of the porous carbon/phenolic composites is studied using the thermomechanical response model of chemically decomposing composites. The model includes thermal dependence of the porous composites, porosity in the pyrolysis process, pore pressure due to decomposing gases, and shrinkage. The poroelastic coefficients are calculated based on representative volume element model and finite element analysis. The internal stress distribution caused by pores and pore pressure, and the overall deformation are verified. The effects of the poroelastic coefficients on the thermoelastic behavior are examined through numerical experiments.

## 초 록

본 논문에서는 열화학적 분해 및 열기계학적 변형이 고려된 구성 방정식을 사용하여 다공성 탄소/페놀릭 복합재료의 열탄성 거동을 예측하였다. 다공성 복합재료의 온도 의존성 및 열화학적 분해 과정에서의 기공도, 분해 가스에 의한 기공 압력, 재료의 수축을 고려하였다. 기공도와 기공 압력이 고려된 대표 체적 요소 모델의 유한요소 해석을 통해 산출된 거시적 기공 탄성 계수를 구성 방정식에 적용하였다. 간단한 수치 실험을 통해 기공 탄성 계수가 다공성 재료의 열탄성 거동에 미치는 영향을 분석하였으며, 재료 내부에 형성된 기공과 기공 압력에 의한 응력 구배 및 변형을 확인하였다.

**Key Words** : Thermoelastic Behavior(열탄성 거동), Poroelastic Coefficient(기공 탄성 계수), Representative Volume Element(대표 체적 요소), Pore Pressure(기공 압력), Finite Element(유한요소)

## 1. 서 론

일반적으로 탄소/페놀릭 복합재료와 같은 열보호 시스템에 사용되는 재료는 극심한 고온 환경에서 숯(char) 층이 형성되는 열화학적 분해

과정을 겪게 된다[1,2]. 이렇게 열분해(pyrolysis) 및 숯 층에 형성된 무수히 많은 기공에는 Fig. 1 과 같이 생성된 분해 가스에 의한 기공 압력이 작용한다. 복합재료의 거시적 이방성, 온도의 공간적 분포와 구배, 수축(shrinkage) 효과 등과 함께 재료 내부의 열응력과 열 변형에 많은 영향을 준다. 그 결과 열분해 층에서 지속적인 열기계적 하중을 받게 되면, 승화와 산화 현상과 같은 열화학적 삭마(ablation) 과정에서 섬유와 기지의 손상 및 층간 분리와 같은 복합재료의 파손 현상이 발생할 수 있다[3]. 구조물의 안전성 측면에서

† 2011년 5월 20일 접수 ~ 2011년 7월 13일 심사완료

\* 정희원, 전북대학교 대학원 항공우주공학과

\*\* 정희원, 전북대학교 항공우주공학과

교신저자, E-mail : esshin@jbnu.ac.kr

전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

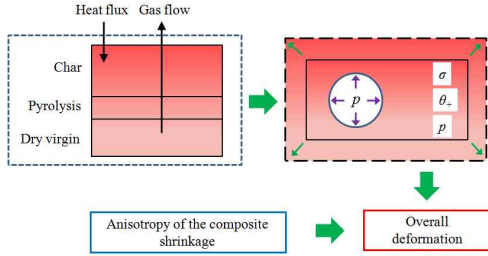


Fig. 1. Schematic of thermoelastic behavior

재료 내부의 국부적인 변화를 파악하여 열 보호 시스템의 설계에 반영하는 것은 중요하다.

재료의 열화학적 분해 반응을 해석하기 위하여 단순화된 열분해 모델을 이용한 다양한 연구들이 수행되어 왔다[4,5]. 이를 통해 사막 현상과 같은 거시적인 변화를 예측하는 관점에서는 실용적인 결과를 보여주고 있다. 하지만 구조적 관점에서 생성된 기공과 기공 압력에 의한 재료 내부의 역학적인 반응은 매우 중요하다. 따라서 열분해 과정에서의 기공도 및 기공 압력이 고려된 열기계적 반응 모델이 필요하다.

열화학적 분해 및 열기계적 변형에 따른 다공성 복합재료의 열탄성 거동을 유한요소법으로 해석한 연구들이 수행되어 왔다[6-8]. 이들 연구에서는 거시적인 재료 상수로서 기공 탄성 계수 (poroelastic coefficient)를 구성 방정식에 적용하였다. 그러나 큰 값의 상수 또는 온도만의 함수로서 기공 탄성 계수를 적용하는 것은 연속적인 열분해 현상의 모델링 측면에서 한계가 있다. 더욱이 고온 환경인 열화학적 분해 과정 중에 기공 탄성 계수를 직접적으로 측정하는 것은 매우 어렵다[9]. 그러므로 열분해 과정에서의 재료 내부 현상을 대표 체적 요소를 이용하여 모델링하고, 유한요소 해석을 통해 계산된 기공 탄성 계수를 구성 방정식에 적용하는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 다공성 탄소/페놀릭 복합재료의 열탄성 거동 예측을 위하여 열화학적 분해 및 열기계적 변형이 고려된 구성 방정식을 사용하였다. 열분해 모델을 통해 재료의 온도 의존성과 함께 기공도, 기공 압력, 질량 손실, 수축량을 계산하였다. 특히, 미시역학적으로 기공 및 기공 압력을 고려한 유한요소 모델 해석을 통해 기공 탄성 계수를 계산하였으며, 이를 기공도에 따라 구성 방정식에 적용하였다. 이와 함께 기공 주변에서의 응력 구배 등을 확인하였으며, 간단한 수치 실험을 통해 기공 탄성 계수에 따른 열탄성 거동의 기본적인 경향을 확인하였다.

## II. 열분해 및 열탄성 변형

### 2.1 열분해 모델

재료의 열화학적 분해 반응을 모델링하기 위한 다양한 실험 모델이 존재하지만, 본 연구에서는 아레니우스 방정식(Arrhenius equation)에 근거한 단순화된 열분해 모델을 사용하였다[7]. 탄소/페놀릭 복합재료의 열분해 반응 상수 (degree of conversion)  $c$ 는 기지의 질량  $m_0^{[m]}$ 과 반응 분율  $W$ 를 고려하면 다음과 같다. 열분해 반응과 관련된 재료 상수들을 Table 1에 나타내었다.

$$c = \frac{\sum_{r=1}^l (m_{(r)}^{[m]} - W_{f(r)} m_0^{[m]})}{m_0^{[m]} (1 - \sum_{r=1}^l W_{f(r)})} \quad (1)$$

여기서 아래 첨자 0과  $f$ 는 각각 열분해 초기 단계와 숯이 형성되는 최종 단계를 의미하며, 아래 첨자  $r$ 은 열분해 반응 단계,  $l$ 은 전체 열분해 반응 횟수이다.

각 열분해 과정에서의 반응 분율 및 열분해 반응 상수를 고려하면  $r$ 번째 반응 단계에서의 기지 질량을 구할 수 있다.

$$m_{(r)}^{[m]} = c_{(r)} (W_{0(r)} m_0^{[m]} - W_{f(r)} m_0^{[m]}) + W_{f(r)} m_0^{[m]} \quad (2)$$

각 반응 단계에서의 열분해 반응 속도는 아레니우스 방정식의 형태로 표현된다.

$$\dot{c}_{(r)} = -A_{0(r)} c_{(r)}^{n_{(r)}} \exp\left(-\frac{E_{a(r)}}{R\theta}\right) \quad (3)$$

여기서  $A$ 와  $n$ 은 열분해에 관련된 재료 상수,  $E_a$ 는 활성화 에너지,  $R$ 은 이상 기체 상수,  $\theta$ 는 열분해 온도이다. 한편 기공도  $\phi_1$ 은 열분해 반응 속도의 함수로 표현할 수 있다.

$$\phi_1 = c\phi_0 + (1-c)\phi_f \quad (4)$$

Table 1. Material constants for pyrolysis model

Material constant	rth Reactions			
	r = 1	r = 2	r = 3	r = 4
$n_{(r)}$	3.5	6.2	6.5	3.3
$W_{0(r)}$	0.015	0.095	0.590	
$W_{f(r)}$	0.000	0.000	0.290	0.190
$E_{a(r)}$ (J/mol)	88764.4	117236.0	211443.5	272155.0
$A_{0(r)}$ (1/s)	1.207305 $\times 10^{10}$	4.05750 $\times 10^9$	3.85777 $\times 10^{14}$	5.583611 $\times 10^{15}$

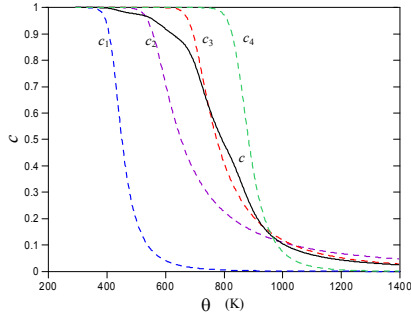


Fig. 2. Degree of conversion vs. temperature

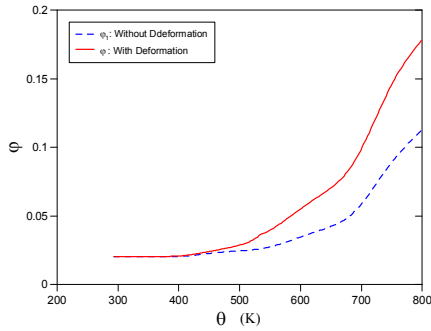


Fig. 3. Porosity vs. temperature

여기서 아래 첨자 1은 열분해에 의한 물리량을 의미한다. 기공 압력은 이상기체 상태 방정식을 도입하면 다음과 같은 관계식으로 유도된다.

$$p = \rho^{[g]} \frac{R\theta}{M_w} = \frac{R\theta}{M_w} \frac{m^{[g]}}{\varphi_1(1+\zeta) \left(1 + \frac{\Delta V^{[p]}}{V_1^{[p]}}\right) V_0} \quad (5)$$

여기서 위 첨자 [g]와 [p]는 각각 분해 gas와 기공에 관련됨을 의미한다. ρ는 밀도, M<sub>w</sub>는 평균분자량(M<sub>w</sub> = 0.03 kg/mol), ζ는 수축량, V는 체적을 의미하며, Δ는 열기계적 변형에 따른 변화량을 의미한다. 분해 가스 질량과 수축량에 대한 자세한 표현은 다음과 같다.

$$m^{[g]} = (1-c) \left(1 - \sum_{r=1}^l W_{f(r)}\right) m_0^{[m]} \quad (6)$$

$$\zeta = (1-c) \left[ \frac{\rho_0}{\rho_f} \left\{ WF \sum_{r=1}^l W_{f(r)} + (1-WF) \right\} - 1 \right] \quad (7)$$

여기서 WF는 기지의 질량 분율(WF = 0.3)이다. 균질화된 탄소/페놀릭 복합재료의 밀도 ρ<sub>0</sub>와 ρ<sub>f</sub>는 각각 1,500 kg/m<sup>3</sup>, 1,300 kg/m<sup>3</sup>이다.

Fig. 2와 Fig. 3은 온도에 따른 열분해 반응 상수와 기공도의 경향을 나타낸다. 열분해 반응 상수가 변화하기 시작하는 약 433 K 이후부터 기공도 증가가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 열기계적 변형에 의해서 기공도가 상당히 증가하는 것을 알 수 있다.

### 2.2 열탄성 구성 방정식

다공성 탄소/페놀릭 복합재료의 구성 방정식은 다음과 같다. 두께 방향(3축)을 기준으로 회전 에 대한 등방성(E<sub>1</sub> = E<sub>2</sub>, ν<sub>12</sub> = ν<sub>21</sub>, α<sub>1</sub> = α<sub>2</sub>, β<sub>1</sub> = β<sub>2</sub>)을 가지며, 면내 방향(1, 2축)은 두께 방향에 대하여 직교이방성(ν<sub>13</sub>/E<sub>1</sub> = ν<sub>31</sub>/E<sub>3</sub>)을 가진다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{31} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & \frac{1}{E_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_3 \\ \tau_{31} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_3 \\ 0 \end{Bmatrix} p \quad (8)$$

$$+ \begin{Bmatrix} \beta_1 \\ \beta_3 \\ 0 \end{Bmatrix} \theta + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

여기서 α는 기공 탄성 계수, β는 열팽창 계수이며, θ는 온도 변화량을 의미한다. 구성 방정식에 적용된 재료 상수들은 온도의 함수로서 적용되는 균질화된 물성치이며, 이를 Table 2에 나타내었다[7]. 식 (8)에 억제 열 성장 실험을 모사하기 위한 경계 조건(σ<sub>1</sub> = σ<sub>2</sub> = 0, σ<sub>3</sub> ≠ 0)을 적용하면, 두께 방향 응력과 면내 방향 변형도를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\sigma_3 = (2\nu_{31}\alpha_1 - \alpha_3)p - (\beta_3\theta + \zeta_3)E_3 \quad (9)$$

Table 2. Mechanical and thermal properties

Property	Value
E <sub>1</sub> (Pa)	1.793×10 <sup>10</sup> (θ < 450)
	-1.413×10 <sup>8</sup> θ + 8.150×10 <sup>10</sup> (450 < θ < 533)
	6.205×10 <sup>9</sup> (533 < θ)
E <sub>3</sub> (Pa)	2.023×10 <sup>10</sup> (θ < 450)
	-2.022×10 <sup>8</sup> θ + 11.122×10 <sup>10</sup> (450 < θ < 533)
	-9.315×10 <sup>6</sup> θ + 8.412×10 <sup>9</sup> (533 < θ < 755)
	1.379×10 <sup>9</sup> (755 < θ)
ν <sub>13</sub>	0.295 (θ < 450)
	-0.00343θ + 1.83819 (450 < θ < 533)
	0.01 (533 < θ)
ν <sub>12</sub>	0.2
β <sub>1</sub> (1/K)	0.000006
β <sub>3</sub> (1/K)	0.000012

$$\epsilon_1 = -\frac{\nu_{31}}{E_3}\sigma_3 + \frac{(1-\nu_{12})\alpha_1 - \nu_{13}\alpha_3}{E_1}p + \beta_1\theta_+ \quad (10)$$

여기서 재료의 수축량은 기지의 열분해와 직접적으로 관련되므로 두께 방향 성분만을 고려한다. 기공 압력은 식 (5)에 다음과 같은 기공 체적 변형도를 적용하여 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta V^{[p]}}{V_1^{[p]}} = \left[ \frac{2(1-\nu_1-\nu_{13})\{(1+\varphi_1)\alpha_1 - \varphi_1\}}{E_1\varphi_1} + \frac{(1-2\nu_{31})\{(1+\varphi_1)\alpha_3 - \varphi_1\} - (\alpha_3 - 2\nu_{31}\alpha_1)^2}{E_3\varphi_1} \right] p + \left( 2\beta_1 + \beta_3 - \frac{\alpha_3 - 2\nu_{31}\alpha_1}{\varphi_1}\beta_3 \right) \theta_+ - \left( \frac{\alpha_3 - 2\nu_{31}\alpha_1}{\varphi_1} \right) \zeta_3 \quad (11)$$

열기계적 변형에 따른 기공도의 변화량은 다음과 같다.

$$\Delta\varphi = \left[ \frac{(\alpha_3 - \varphi_1) - 2\nu_{31}(\alpha_1 - \varphi_1)}{E_3} \right] \sigma_3 + \left[ \frac{2(1-\nu_1-\nu_{13})(\alpha_1 - \varphi_1)}{E_1} + \frac{(1-2\nu_{31})(\alpha_3 - \varphi_1)}{E_3} \right] p \quad (12)$$

식 (11)과 (12)를 통해 알 수 있듯이 유효 기공 압력과 기공도는 기공 탄성 계수에 의해서 결정된다. 기공 탄성 계수는 열분해 온도에 따른 재료 물성치 및 기공도, 기공의 형상, 크기, 분포, 밀집도 등에 영향을 받는다. 이와 같은 주요 인자의 변화에 따라 기공 탄성 계수를 계산한 후, 열화학적 분해 및 열기계적 변형이 고려된 구성 방정식에 적용해야 한다. 하지만 고온 환경에서 실험을 통한 기공 탄성 계수의 직접적인 측정은 한계가 있으므로 대표 체적 요소 모델의 유효요소 해석을 통해 계산하는 것이 바람직하다. 이를 구현할 수 있는 포트란 언어 기반의 프로그램을 통해 기공 탄성 계수에 따른 열탄성 거동의 기본적인 경향을 살펴보았다.

### III. 수치 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 기공 탄성 계수의 영향

간단한 수치 실험을 통해 기공 탄성 계수가 재료의 열탄성 거동에 미치는 영향을 확인해 보았으며, 그 경향을 실험값과 비교하였다[10]. 초기 온도는 293 K( $\varphi_0 = 0.02$ )이며, 최대 기공도  $\varphi_f$ 는 0.2이다.

Fig. 4와 Fig. 5는 기공 탄성 계수  $\alpha_1$ ( $\alpha_1 = 0.1, 0.3, 0.5, 0.9, 1.0$ )에 따른 두께 방향 압축 응력과

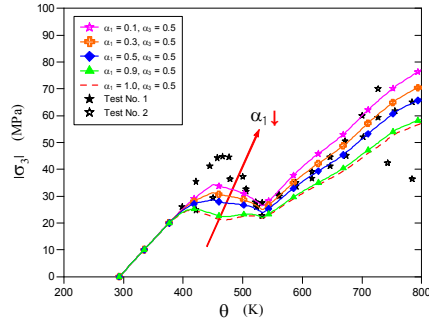


Fig. 4. Compressive stress vs. temperature with different values of  $\alpha_1$  ( $\alpha_3 = 0.5$ )

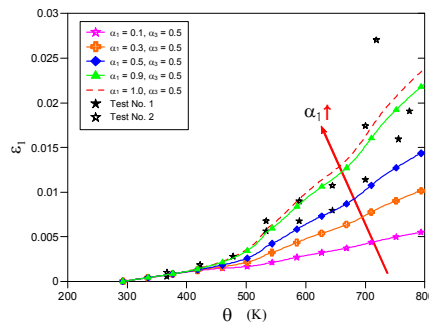


Fig. 5. Lateral strain vs. temperature with different values of  $\alpha_1$  ( $\alpha_3 = 0.5$ )

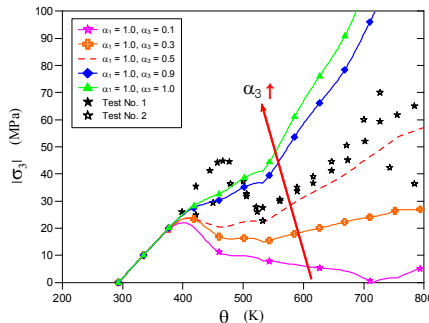


Fig. 6. Compressive stress vs. temperature with different values of  $\alpha_3$  ( $\alpha_1 = 1.0$ )

면내 방향 변형도를 나타낸다. 기공 탄성 계수  $\alpha_3$ 은 전체 열분해 과정에서 상수 0.5로 적용하였다. 두께 방향 압축 응력의 경우에는 열분해 온도 533 K 이전에서  $\alpha_1$ 이 0.1에 가까울수록 실험 데이터와 비슷해지는 경향을 보이며,  $\alpha_1$ 의 값은 두께 방향보다는 면내 방향의 열탄성 거동에 큰 영향을 준다. 기공 탄성 계수  $\alpha_1$ 을 1.0 상수로 고정한 후,  $\alpha_3$ ( $\alpha_3 = 0.1, 0.3, 0.5, 0.9, 1.0$ )에 따른 두께 방향 압축 응력과 면내 방향 변형도를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.  $\alpha_3$ 이 클수록 두께 방향

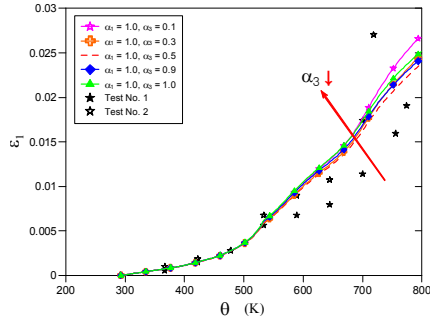


Fig. 7. Lateral strain vs. temperature with different values of  $\alpha_3$  ( $\alpha_1 = 1.0$ )

압축 응력이 증가하며, 면내 방향 변형도는 감소한다. 특히,  $\alpha_3$ 은 두께 방향 열탄성 거동에 많은 영향을 준다는 것을 확인하였다. 실험값을 기반으로 결정된 기공 탄성 계수를 통해 재료의 열탄성 거동을 일부 확인할 수 있다. 하지만 상수로써 적용된 기공 탄성 계수는 정밀한 열탄성 해석에 있어 한계가 있으며, 고온 환경에서의 재료 실험은 매우 어렵고 제한적이다.

3.2 대표 체적 요소 모델

재료의 온도 의존성과 함께 기공도와 기공 압력이 고려된 기공 탄성 계수를 계산하였다. 이를 위해 식 (8)에 순수 기공 압력 상태를 적용하여 정리하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\mathcal{E}_p^{\parallel}}{p} = \frac{(1-\nu_{12})}{E_1} \alpha_1 - \frac{\nu_{13}}{E_3} \alpha_3 \quad (13)$$

$$\frac{\mathcal{E}_p^{\perp}}{p} = -\frac{2\nu_{31}}{E_3} \alpha_1 + \frac{1}{E_3} \alpha_3 \quad (14)$$

여기서  $\mathcal{E}$ 은 기공 압력에 따른 유효 변형도를 의미한다. 즉, 기공 압력에 따른 각 방향 유효 변형도 성분을 알 수 있다면 기공 탄성 계수를 구할 수 있다. 하지만 고온 환경에서 기공 및 기공 압력에 의한 재료의 거시적인 변형을 측정하기는 매우 어렵다. 그러므로 재료 거동을 충분히 모사할 수 있는 Fig. 8과 같은 대표 체적 요소(RVE) 모델의 유한요소 해석을 통해 기공 탄성 계수를 계산하였다. 대표 체적 요소에 적용된 다공성 재료 물성치는 균질화된 재료 물성치를 기준으로 유한요소 해석을 통해 계산하였다. 열화학적 분해에 의해 형성된 기공은 랜덤 함수를 사용하여 모델링하였으며, 순수 기공 압력 상태에서 해석을 수행하였다. Fig. 9는 기공 압력에 따른 대표 체적 요소의 변형을 보정 계수(scale factor) 5.0

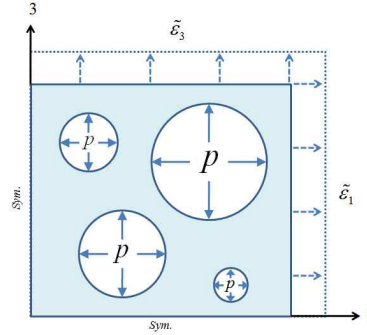


Fig. 8. Representative volume element model

$\times 10^8$ 을 적용하여 나타낸 그림이다. 열분해 온도 293 K( $\varphi = 0.02$ )에서 유효 변형도  $\mathcal{E}_p^{\parallel}$ 과  $\mathcal{E}_p^{\perp}$ 는 각각  $1.79 \times 10^{-12}$ 과  $1.57 \times 10^{-12}$ 이며, 열분해 온도 701 K( $\varphi = 0.1$ )에서는 각각  $2.9310^{-11}$ 과  $9.69 \times 10^{-11}$ 로, 열분해 온도 836 K( $\varphi = 0.2$ )에서는 각각  $5.35 \times 10^{-11}$ 과  $2.72 \times 10^{-10}$ 로 증가하였다. 열화학적 분해에 따라 형성된 기공이 많을수록 각 방향의 유효 변형도가 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 열분해 온도가 증가할수록 두께 방향 변형이 면내 방향보다 크다. 이는 재료의 온도 의존성으로 인하여 두께 방향 강성이 크게 저하되었기 때문이다.

Fig. 10은 열분해 온도가 293 K, 701 K, 836 K 일 때의 기공도 ( $\varphi = 0.02, 0.1, 0.2$ )를 기준으로 계산된 기공 탄성 계수를 나타낸다. 계산된  $\alpha_1$ 과  $\alpha_3$ 을 선형 보간하여 구성 방정식에 적용한 기준 1과 기공도 0.2에서의 값을 상수( $\alpha_1 = 0.4199, \alpha_3 = 0.3768$ )로 적용한 기준 2에 대하여 열탄성 거동의 경향을 확인하였다. 열분해 온도에 따른 두께 방향 압축 응력과 면내 방향 변형도를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 수축 효과를 고려하지 않은 상태에서 기준 2가 실험값과 비슷한 경향을 보인다. 열분해 온도 450 K ~ 533 K에서의 두께 방향 압축 응력의 감소는 재료의 온도 의존성에 따라 강성이 급격히 감소하였기 때문이다. 기준 1의 경우에는 533 K 이전의 초기 열분해 온도에서 실험값과 비슷한 경향을 보인다. 이를 통해 초기 열분해 온도에서의 재료 내부의 변화가 고려된 기공 탄성 계수가 적용되었음을 알 수 있다. 하지만 533 K 이후에서 실험값과 차이가 난다. 이는 기공 탄성 계수에 영향을 주는 주요 인자들 중, 열탄성 거동 예측을 위한 기초 연구로서 기공도와 기공 압력만을 해석 모델에 고려하였기 때문이다. 즉, 정밀한 기공 탄성 계수의 계산을 위해서는 재료 내부에 형성된 기공의 형

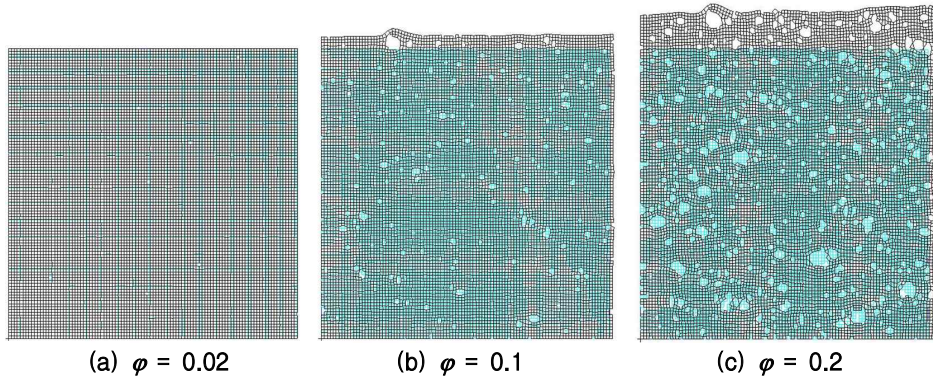


Fig. 9. Deformation of representative volume element model under pore pressure

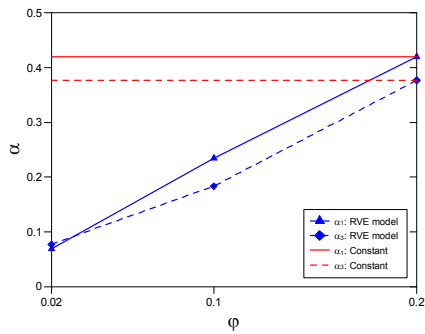


Fig. 10. Poroelastic coefficient vs. porosity

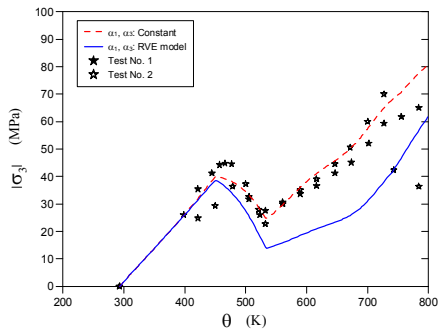


Fig. 11. Compressive stress vs. temperature

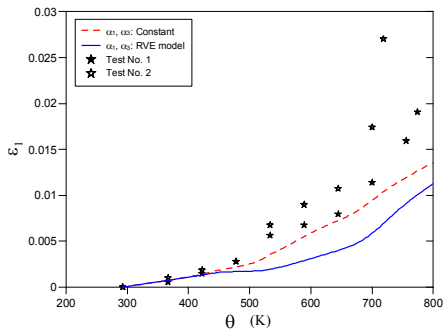


Fig. 12. Lateral strain vs. temperature

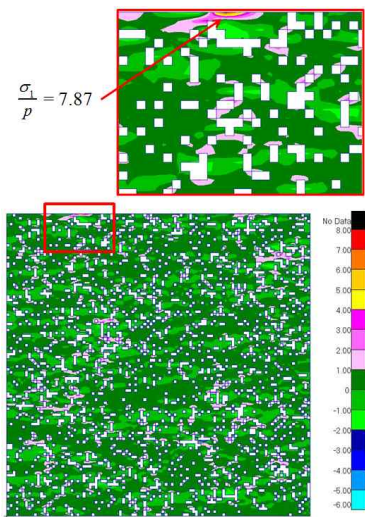


Fig. 13. Stress in the in-plane direction

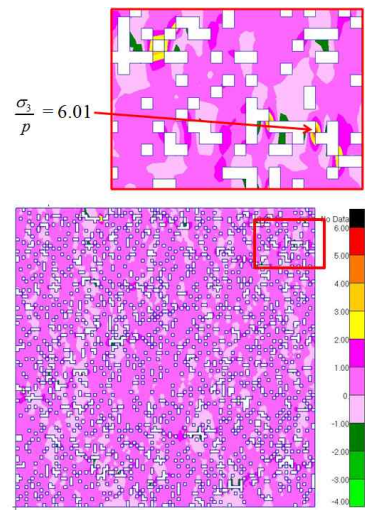


Fig. 14. Stress in the across-ply direction

상, 크기, 분포, 밀집도 등과 같은 주요 인자들을 고려해야 한다.

Fig. 13과 Fig. 14는 기공도가 0.2일 때, 기공 압력( $p = 1$  Pa)에 따른 각 방향에서의 응력 분포를 나타낸다. 기공의 형상, 크기, 밀집도 등에 따라서 기공 주변에서 응력 구배가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 기공 압력에 의한 응력 집중 계수가 면내 방향과 두께 방향에 대해 각각 7.87과 6.01로 크게 나타난다. 열탄성 및 강도 해석을 위해서는 대표 체적 요소 모델의 해석을 통한 기공 주변에서의 응력 구배의 확인 및 분석이 필요하다 하는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 열화학적 분해 및 열기계적 변형이 고려된 구성 방정식을 통해 다공성 탄소/페놀릭 복합재료의 열탄성 거동의 기본적인 경향을 확인하였다. 재료의 연속적인 열화학적 분해에 따른 기공도, 기공 압력, 수축량은 단순화된 열분해 모델을 사용하여 계산하였다. 대표 체적 요소 모델의 유한요소 해석을 통해 기공 탄성 계수를 계산하였으며, 이를 기공도에 따라 구성 방정식에 적용하였다.

간단한 수치 실험을 통해 기공 탄성 계수의 영향을 확인하였다. 열분해 온도에 따라서 기공 탄성 계수  $\alpha_1$ 과  $\alpha_3$ 은 각각 면내 방향 변형도와 두께 방향 응력의 값에 많은 영향을 주었다. 특히  $\alpha_1$ 은 열분해 초기 온도에서는 0.1에 가까울수록 두께 방향 응력이 실험값과 비슷해지는 경향을 보인다. 미시역학 모델의 해석 결과, 기공 주변에서 응력 집중과 구배가 크게 나타나는 것을 확인하였다. 기공 탄성 계수  $\alpha_1$ 과  $\alpha_3$ 의 계산을 위해 기공 압력에 따른 유효 변형도도 계산하였다. 기공 탄성 계수는 재료의 온도 의존성과 함께 기공도, 기공 압력, 기공의 형상, 크기, 분포, 밀집도 등에 영향을 받는다는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 재료의 온도 의존성과 기공도 및 기공 압력을 주로 고려하였다. 기공 탄성 계수의 정밀한 계산을 위해서는 다공성 재료 물성치 구축과 고온 환경에서의 실제 기공의 형상, 크기, 분포 등이 고려된 유한요소 모델이 필요하다.

#### 후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을

받아 수행되었습니다(2010-0021665). 또한, 국토해양부의 하늘 프로젝트로 지원되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Mcmanus, H. L. N. and Springer, G. S., "High Temperature Thermomechanical Behavior of Carbon-Phenolic and Carbon-Carbon Composites, I. Analysis", *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 2, 1992, pp. 206-229.
- (2) 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.
- (3) Bahramian, A. R., Kokabi, M., Famili, M. H. N., and Beheshty, M. H., "Ablation and Thermal Degradation Behaviour of a Composite Based on Resol Type Phenolic Resin: Process Modeling and Experimental", *Polymer*, Vol. 47, No. 10, 2006, pp. 3661-3673.
- (4) Chen, Y. K and Milos, F. S., "Two-Dimensional Implicit Thermal Response and Ablation Program for Charring Materials on Hypersonic Space Vehicles", AIAA 2000-0206.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Koo, J. H., Ho, D. W. K., Bruns, M.

C., and Ezekoye, O. A., "A Review of Numerical and Experimental Characterization of Thermal Protection Materials - Properties Characterization", AIAA 2007-2131.

(10) Stokes, E. H., "The effect of Moisture on the Mechanical and Thermal Response of FM5055 Carbon Phenolic Composites", Southern Research Institute Report, No. SRI-EAS-87-1244-6245-6, 1987.