

論文

분리-혼합 기법을 이용한 일방향 다공성 복합재료의 열탄성 계수 예측

신의섭^{*+}

Prediction of Thermoelastic Constants of Unidirectional Porous Composites Using an Unmixing-Mixing Scheme

Eui Sup Shin^{*+}

ABSTRACT

A thermo-poro-elastic constitutive model of unidirectionally fiber-reinforced composite materials is suggested by extending the unmixing-mixing scheme which is based upon composite micromechanics. The strain components of thermal expansion due to a temperature change, gas pressure in pores, and chemical shrinkage are included in the constitutive model. On purpose to verify the derived constitutive relations, the representative volume element of two-dimensional lamina subject to various loading conditions is analyzed by the finite element method. The overall stress and strain responses are obtained, and compared with the predicted values by the unmixing-mixing scheme. The numerical results show the usefulness of the proposed model to predict the thermoelastic behavior of porous composites.

초 록

본 논문에서는 일방향 섬유강화 복합재료의 열-기공-탄성 거동을 효과적으로 기술하기 위하여 미시역학에 기반을 둔 분리-혼합 기법을 적용하였다. 온도 증가에 따른 열팽창, 내부 기공에서의 가스 압력, 열분해 과정의 수축 변형 효과를 정식화 과정에 모두 포함하였다. 유도된 구성 방정식을 검증하기 위한 비교 대상으로서 복합재료 이차원 단층의 대표 체적 요소를 유한요소법으로 모델링하고, 다양한 하중 조건에 대하여 해석하였다. 즉, 대표 체적 요소에 분포된 전체 평균 응력과 변형도를 구하여, 분리-혼합 기법에 의해 예측된 해당 결과 값을 서로 비교하였다. 도출된 수치 결과를 분석함으로써 제안된 복합재료의 열-기공-탄성 거동 예측 기법의 유용성을 확인하였다.

Key Words : 분리-혼합 기법(unmixing-mixing scheme), 복합재료(composite), 다공성(porosity), 열탄성(thermoelasticity)

1. 서 론

기계 구조물에 광범위하게 사용되는 복합재료는 초고온 환경을 비롯하여 다양한 외부 하중에 노출된다. 온도 증가에 수반되는 기본적인 열팽창 변형을 비롯하여, 열분해 과정(thermochemical decomposition 또는 pyrolysis)에서는 화학적 수축(shrinkage), 다공성(porosity) 확대 등의 거동을 보일 수 있

다. 열 보호 시스템(TPS, thermal protection system)에서 널리 사용되고 있는 페놀릭(phenolics) 수지 복합재료를 예로 들면, 기지를 구성하는 재료 특성으로 인하여 열분해 과정 이후 급격한 다공성 및 기공 압력(pore pressure) 증가 효과를 나타낸다[1,2]. 따라서 이러한 환경에서 사용되는 복합재 구조물을 해석하고 신뢰성 있는 설계 자료를 확보하려면, 다공성 효과를 포함한 열탄성 거동을 효과적으로 기술하는 구성 방정식이 필요하다.

접수: 2011년 9월 26일, 수정: 2011년 3월 12일, 게재승인: 2012년 3월 24일

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

섬유강화 복합재료에 대한 구성 방정식의 정식화는 기공 압력, 화학적 수축 현상의 정량화 과정에서 재료의 이방성을 함께 고려해야 한다. 기존의 연구 동향은 이방성을 갖는 재료 거동을 거시역학적(macromechanics) 물성 값 또는 재료 상수로서 직접 묘사하는 이론이 주를 이루어 왔다. 예를 들면, 거시역학적 이론에 근거한 대부분의 구성 방정식은 이방성 기공 압력 효과를 표현하기 위하여 좌표 방향에 따라 다른 값을 갖는 기공 인자(poroelastic parameter)를 도입하게 된다[3,4]. 그러나 실용적 관점에서는 이방성 기공 인자를 산출하는 실험 절차가 매우 복잡하기 때문에, 이와 같은 특성 값을 구하기 위해 곡선 맞춤(curve fitting) 기법에 의존하게 된다[5].

반면 현상 관찰적인 접근 방법으로서 섬유 및 기지 자체의 특성으로부터 전체 복합재료 거동을 예측하는 미시역학적(micromechanics) 구성 방정식에 대한 연구도 수행되어 왔다 [6]. 탄성 계수에 대한 단순 혼합 법칙(rule of mixtures)과 같이, 이방성 계수를 구성 재료의 체적 비율 함수로 표현할 수 있다. 이와 관련된 연구의 예를 들면, Kim 등은 분리-혼합 기법(unmixing-mixing scheme)을 제안하여 복합재료의 점소성 거동에 영향을 미치는 등방성 기지의 역할을 정량적으로 분석하였다[7]. 또한, 진교국 등은 미시역학적 파손 이론을 적용하여 복합재 적층판의 피로 수명을 예측하였다[8].

본 논문에서는 일방향 섬유강화 복합재료의 열-기공-탄성 거동을 기술하기 위하여 미시역학에 기반을 둔 분리-혼합 기법을 적용하였다. 온도 증가에 따른 열팽창, 내부 기공에서의 가스 압력, 열분해 과정의 수축 변형 효과를 정식화 과정에 포함하였다. 구성 방정식을 검증하기 위하여 복합재료 이차원 단층의 대표 체적 요소를 유한요소법으로 해석하여 분리-혼합 기법에 의해서 예측된 해당 결과 값을 서로 비교하였다. 이러한 수치 결과를 분석함으로써 제안된 복합재료의 열-기공-탄성 거동 예측 기법의 유용성을 확인하였다.

2. 분리-혼합 기법

2.1 미시역학적 기본 가정

일방향 강화 다공성 복합재료의 열탄성 구성 방정식 모델인 분리-혼합 기법을 적용하기 위하여 다음과 같이 가정하였다. (가) 복합재료는 평면 응력 상태이다. (나) 섬유와 기지는 완전 결합되어 있으며, 경계에서 미끄러짐이 없다. (다) 전체 변형은 작으며, 변형도는 탄성, 기공 압력, 열팽창, 비탄성 성분으로 가산 분해된다. (라) 섬유는 직교 이방성을 갖고, 선형 열탄성 거동을 한다. (마) 기지는 등방성 재료이며, 열탄성 이외에 기공 압력 팽창과 비탄성 거동을 보인다. Fig. 1의 개념도와 같이, 섬유와 기지의 이차원 배열 상태를 가정하여 복합재료의 거시역학적 거동에 미치는 영향을 살펴보았다.

분리-혼합 방정식을 유도하기 위한 첫 단계로서 주 재료 좌표계(principal material coordinate)에서 미시역학적 응력의

평형 상태를 고려한다.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= V^{[f]} \sigma_1^{[f]} + V^{[m]} \sigma_1^{[m]} \\ \sigma_2 &= \sigma_2^{[f]} = \sigma_2^{[m]}, \quad \tau_{12} = \tau_{12}^{[f]} = \tau_{12}^{[m]} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 V 는 체적 비율, 상첨자 $[f]$ 는 섬유 영역, $[m]$ 은 기공을 포함하고 있는 기지 영역을 나타낸다. 다음으로 변형도 성분에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon}_1 = \dot{\epsilon}_1^{e[f]} + \dot{\epsilon}_1^{t[f]} = \dot{\epsilon}_1^{e[m]} + \dot{\epsilon}_1^{p[m]} + \dot{\epsilon}_1^{t[m]} + \dot{\epsilon}_1^{s[m]} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_2 &= V^{[f]} (\dot{\epsilon}_2^{e[f]} + \dot{\epsilon}_2^{t[f]}) \\ &+ V^{[m]} (\dot{\epsilon}_2^{e[m]} + \dot{\epsilon}_2^{p[m]} + \dot{\epsilon}_2^{t[m]} + \dot{\epsilon}_2^{s[m]}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}_{12} &= V^{[f]} (\dot{\gamma}_{12}^{e[f]} + \dot{\gamma}_{12}^{t[f]}) \\ &+ V^{[m]} (\dot{\gamma}_{12}^{e[m]} + \dot{\gamma}_{12}^{p[m]} + \dot{\gamma}_{12}^{t[m]} + \dot{\gamma}_{12}^{s[m]}) \end{aligned} \quad (4)$$

상첨자 e, p, t, s 는 각각 탄성 변형, 기공 압력에 의한 팽창, 열팽창, 화학적 수축을 의미하며, $(\dot{\quad})$ 는 시간 변화율이다. 기지에서 기공 압력에 의한 팽창 변형도 성분은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\epsilon}_1^{p[m]} = \dot{\epsilon}_2^{p[m]} = \frac{1-2\nu^{[m]}}{E^{[m]}} \pi^{[m]} \dot{p}, \quad \dot{\gamma}_{12}^{p[m]} = 0 \quad (5)$$

여기서 E 는 탄성 계수, ν 는 푸아송 비, π 는 무차원 기공 인자(poroelastic parameter), p 는 기공 압력이다.

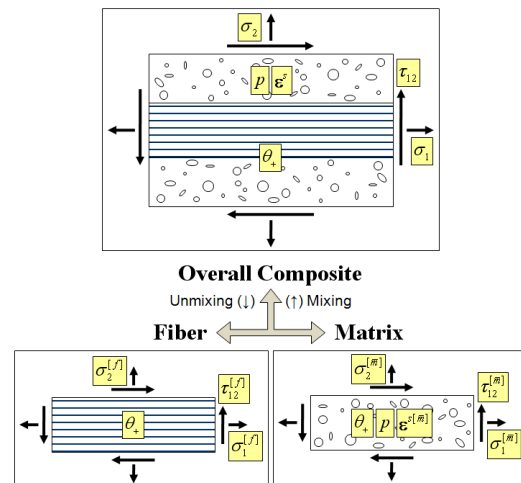


Fig. 1 Micromechanical unmixing-mixing model.

2.2 기공 압력 및 열탄성 구성 방정식

섬유와 기지에 적용되는 여러 기본 방정식을 재배열하고 정리하면, 전체 복합재료에 대한 거시역학적 물리량과 미시역학적 물리량을 직접 연결하는 일련의 방정식이 유도된다. 먼저, 변형도 변화율에 대한 결과 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_1 \\ \dot{\epsilon}_2 \\ \dot{\gamma}_{12} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\sigma}_1 \\ \dot{\sigma}_2 \\ \dot{\tau}_{12} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} \pi_1 - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \pi_2 \\ \frac{1-\nu_{23}}{E_2} \pi_2 - \frac{\nu_{12}}{E_1} \pi_1 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{p} \\ &+ \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ 0 \end{Bmatrix} \dot{\theta}_+ + V^{[m]} \begin{bmatrix} \frac{E^{[m]}}{E_1} & 0 & 0 \\ \nu^{[m]} - \nu_{12} & \frac{E^{[m]}}{E_1} & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_1^{[m]} \\ \dot{\epsilon}_2^{[m]} \\ \dot{\gamma}_{12}^{[m]} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 G 는 전단 탄성 계수, α 는 열팽창 계수, θ_+ 는 온도 변화이다. 마지막 항은 기지에서 발생한 화학적 수축이 전체 변형도에 기여하는 정도를 의미한다. 또한, 섬유와 기지가 담당하는 x_1 축(섬유) 방향의 응력 성분의 변화율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \dot{\sigma}_1^{[f]} \\ \dot{\sigma}_1^{[m]} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{E_1^{[f]}}{E_1} & \frac{V^{[m]}}{E_1} \\ \frac{E^{[m]}}{E_1} & \nu^{[m]} - \nu_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\sigma}_1 \\ \dot{\sigma}_2 \\ \dot{\tau}_{12} \end{Bmatrix} \\ &+ \begin{Bmatrix} V^{[m]}(1-2\nu^{[m]})\frac{E_1^{[f]}}{E_1}\pi^{[m]} \\ -V^{[f]}(1-2\nu^{[m]})\frac{E_1^{[f]}}{E_1}\pi^{[m]} \end{Bmatrix} \dot{p} \\ &+ \begin{Bmatrix} -V^{[m]}\frac{E_1^{[f]}E^{[m]}}{E_1}(\alpha_1^{[f]} - \alpha^{[m]}) \\ V^{[f]}\frac{E_1^{[f]}E^{[m]}}{E_1}(\alpha_1^{[f]} - \alpha^{[m]}) \end{Bmatrix} \dot{\theta}_+ \\ &+ \begin{bmatrix} V^{[m]}\frac{E_1^{[f]}E^{[m]}}{E_1} & 0 & 0 \\ V^{[m]}\frac{E^{[m]2}}{E_1} - E^{[m]} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_1^{[m]} \\ \dot{\epsilon}_2^{[m]} \\ \dot{\gamma}_{12}^{[m]} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (6), (7)에 나타나는 여러 거시역학적 계수는 일종의 혼합 법칙(rule of mixtures)으로 표현할 수 있다. 즉, 탄성 계수, 기공 인자, 열팽창 계수에 대한 표현을 구체적으로 정리하면 다음과 같다.

$$E_1 = V^{[f]}E_1^{[f]} + V^{[m]}E^{[m]} \quad (8)$$

$$\nu_{12} = V^{[f]}\nu_{12}^{[f]} + V^{[m]}\nu^{[m]} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_2} &= \frac{V^{[f]}}{E_2^{[f]}} + \frac{V^{[m]}}{E^{[m]}} \\ &+ \frac{V^{[f]}V^{[m]}}{E_1} \left(2\nu_{12}^{[f]}\nu^{[m]} - \nu_{12}^{[f]2} \frac{E^{[m]}}{E_1^{[f]}} - \nu^{[m]2} \frac{E_1^{[f]}}{E^{[m]}} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V^{[f]}}{G_{12}^{[f]}} + \frac{V^{[m]}}{G^{[m]}} \quad (11)$$

$$\pi_1 - 2\nu_{12}\pi_2 = V^{[m]}(1 - 2\nu^{[m]})\pi^{[m]} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{1-\nu_{23}}{E_2}\pi_2 - \frac{\nu_{12}}{E_1}\pi_1 \\ = V^{[m]} \left[1 - \frac{V^{[f]}}{E_1} \left(\nu_{12}^{[f]}E^{[m]} - \nu^{[m]}E_1^{[f]} \right) \right] \frac{1-2\nu^{[m]}}{E^{[m]}} \pi^{[m]} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\alpha_1 = V^{[f]}\frac{E_1^{[f]}}{E_1}\alpha_1^{[f]} + V^{[m]}\frac{E^{[m]}}{E_1}\alpha^{[m]} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \alpha_2 = V^{[f]}\alpha_2^{[f]} + V^{[m]}\alpha^{[m]} \\ + \frac{V^{[f]}V^{[m]}}{E_1} \left(\nu_{12}^{[f]}E^{[m]} - \nu^{[m]}E_1^{[f]} \right) \left(\alpha_1^{[f]} - \alpha^{[m]} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

3. 수치 결과 및 검토

3.1 단순 미시역학 모형화 및 해석

분리-혼합 기법을 적용한 열-기공-탄성 구성 방정식을 일차적으로 검증하기 위해서 단순 미시역학 모형을 설정하였다. 복합재료의 대표 체적 요소(RVE, representative volume element)로서 단층 내의 일방향 강화 섬유 배열을 고려한 단위 셀을 선택하였다. 해석 과정을 단순화하기 위하여 기지 내에서 기공이 차지하는 부분을 별도로 유한요소 모형화(modelling)하지 않았다. 이는 기지 및 기공의 체적 영역에 대한 균질화(homogenization) 상태를 가정하였음을 의미한다.

섬유와 기지로 이루어진 대표 체적 요소의 이차원 유한요소 모형을 Fig. 2에 도시하였다. 경계 및 하중 조건에 따라 복잡한 비균일 장(nonuniform field) 문제까지 풀 수 있도록 상대적으로 촘촘한 10,201개(101개×101개)의 절점과 20,000개의 선형 삼각형 요소를 사용하였다. 또한, 대표 체적 요소의 기하학적 대칭 조건을 고려하여 이차원 영역의 1/4 부분만 분할하였다. 수치 해석에 사용된 탄소 섬유와 고분자 수지 계열의 재료 물성 값은 Table 1에 제시하였다. 해석 도구는 포트란 프로그램을 작성하여 코드화하였으며, 일반적인 개인용 컴퓨터 사양에서 계산을 수행하였다.

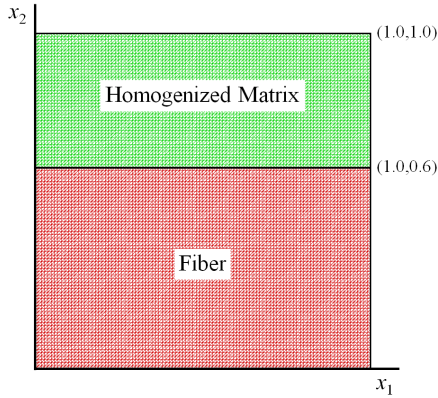


Fig. 2 Simple finite element mesh.

Table 1 Material properties of fiber and matrix

	Fiber		Homogenized matrix	
Volume fraction	$V^{(f)}$	0.6	$V^{(m)}$	0.4
Elastic modulus	$E_1^{(f)}$	230 GPa	$E^{(m)}$	2.8 GPa
	$E_2^{(f)}$	16.6 GPa	$\nu^{(m)}$	0.4
	$\nu_{12}^{(f)}$	0.2		
	$G_{12}^{(f)}$	8.27 GPa		
Poroeastic parameter			$\pi^{(m)}$	0.5
Thermal expansion	$\alpha_1^{(f)}$	$0.045 \times 10^{-6} /K$	$\alpha^{(m)}$	$45 \times 10^{-6} /K$
	$\alpha_2^{(f)}$	$20.2 \times 10^{-6} /K$		

Table 2 Estimate of material properties of overall composites(simple finite element mesh)

Load case		Unmixing-mixing	FEA (RVE)
Stress σ_1	E_1	139.12 GPa	139.12 GPa
	ν_{12}	0.2800	0.2800
Stress σ_2	E_2	6.39 GPa	6.39 GPa
	G_{12}	2.12 GPa	2.12 GPa
Pore pressure p	π_1	0.1403	0.1403
	π_2	0.1792	0.1792
Temperature θ_+	α_1	$0.41 \times 10^{-6} /K$	$0.41 \times 10^{-6} /K$
	α_2	$37.21 \times 10^{-6} /K$	$37.21 \times 10^{-6} /K$

Table 2는 분리-혼합 기법과 대표 체적 요소의 유한요소 해석(FEA)에 의해 예측된 복합재료의 거시역학적 물성 값을 정리한 것이다. 유한요소 해석 과정에서 하중 종류(응력 성분, 기공

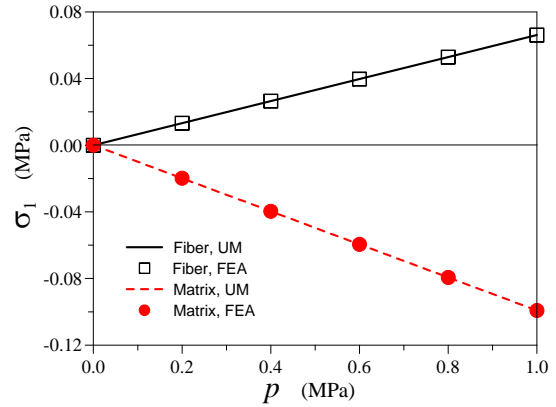


Fig. 3 Stress σ_1 of fiber and matrix vs. pore pressure.

압력, 온도 변화)에 따라 경계 및 하중 조건을 부과하였으며, 화학적 수축에 의한 변형도 성분은 고려하지 않았다. 각각의 응력과 변형도 성분은 전체 체적에 걸친 평균값을 취하였다. 분리-혼합 기법과 유한요소 해석 결과를 서로 비교하면, 모든 물성 값에 대해 유효 숫자 범위에서 오차가 발생하지 않았다. 이는 분리-혼합 기법에 의해 유도된 식 (8)~(15) 및 유한요소 모형이 적절함을 의미한다. 또한, 복합재료의 이방성 기공 인자 π_1 과 π_2 는 기지의 등방성 기공 인자 $\pi^{(m)}$ 에 비해 작은 값을 갖으며, 섬유에 의해 기공 팽창 효과가 상대적으로 감소하기 때문이다.

Fig. 3은 기공 압력에 따른 섬유 및 기지의 x_1 축 방향 응력 성분을 도시한 것이다. 선형 문제이므로 직선으로 표현되며, 식 (7)에서 구한 분리-혼합 기법 결과(UM)와 유한요소 해석 결과는 차이가 없다.

3.2 기공이 포함된 미시역학 모형화 및 해석

다공성 복합재료의 실제 미시 구조에 가까운 현상을 구현하기 위해서 기공이 포함된 기지 부분에 대한 유한요소 모형을 재설정하였다. Fig. 4는 Fig. 2의 기지 영역만을 확대하여 표현한 것이다(섬유 영역은 변경되지 않음). 즉, 기지 영역 8,000개 삼각형 요소 중에서 무작위로(random) 800개의 요소를 선정하여 유한요소 모형에서 완전 제외하였다. 따라서 기지 영역의 다공성(기공 체적 비율)이 0.1인 경우가 된다.

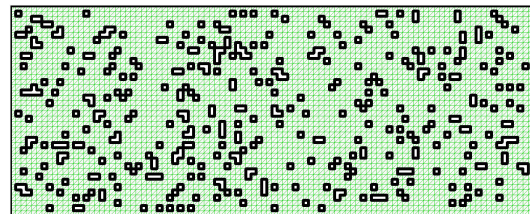


Fig. 4 Modified finite element mesh(only matrix part is shown).

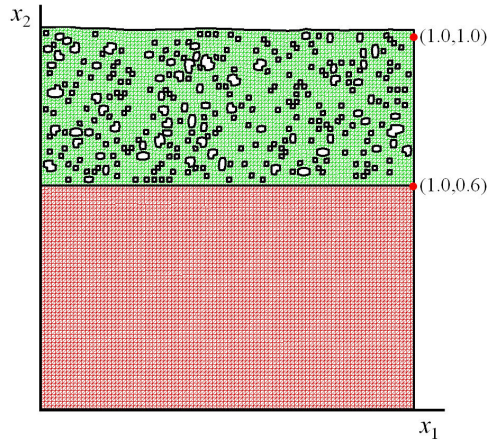


Fig. 5 Deformed configuration of composite.

Table 3 Estimate of material properties of overall composites(modified finite element mesh)

Load case		Unmixing-mixing	FEA (RVE)
Stress σ_1	E_1	138.92 GPa	138.92 GPa
	ν_{12}	0.2687	0.2687
Stress σ_2	E_2	5.34 GPa	5.27 GPa
Stress τ_{12}	G_{12}	1.81 GPa	1.76 GPa
Pore pressure p	π_1	0.1954	0.1944
	π_2	0.2557	0.2593
Temperature θ_+	α_1	$0.34 \times 10^{-6} /K$	$0.34 \times 10^{-6} /K$
	α_2	$36.73 \times 10^{-6} /K$	$36.73 \times 10^{-6} /K$

Table 3은 복합재료의 탄성 계수를 비롯하여 각종 물성 값에 대한 예측 결과이다. 분리-혼합 기법에서는 기지 영역에 대한 유효 물성 값으로 $E^{(m)} = 2.29$ GPa, $\nu^{(m)} = 0.372$, $\pi^{(m)} = 0.5650$ 을 사용하였다. 열팽창 계수는 다공성에 거의 영향을 받지 않으며, Table 1에 제시된 값을 이용하였다. 분리-혼합 기법과 유한요소 해석 결과와 서로 비교한 결과, 대부분의 물성 값에 대한 예측이 매우 잘 일치하였다. E_2 와 G_{12} 는 각각 1.3%, 2.8% 정도의 작은 차이가 발생하였다. 이는 기지 재료의 유효 탄성 계수가 다소 높게 산출되었고, 혼합 법칙인 식 (10), (11)을 사용하였기 때문이다.

기공 압력의 영향을 자세히 살펴보기 위하여 Fig. 5에 변형 후 단층 형상을 도시하였다. 기공 부위의 삭제된 요소 경계면에 균일 압력 $p = 1.0$ MPa를 부과한 경우이다. 변형 형상의 식별을 위하여 변위 벡터의 척도를 500배로 조절하였다. 섬유 수직 방향인 x_2 방향의 변형이 상대적으로 큼을 알 수 있다. Fig. 6은 기지 영역의 응력 성분 분포도이다. 섬유 영역의 응력 분포는 거의 균일(uniform) 상태이므로 별도로 도시

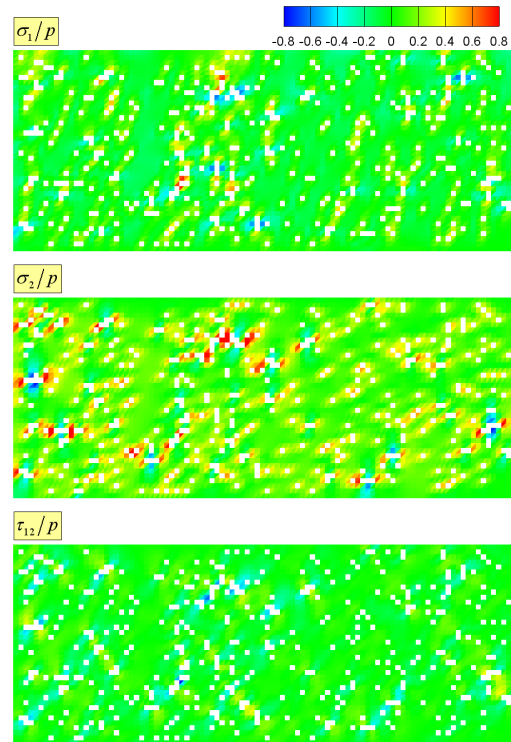


Fig. 6 Stress distribution in matrix-pore region.

하지 않았다. 각 응력 성분의 최대 또는 최소 값 범위는 $\sigma_1/p = -0.970 \sim 1.668$, $\sigma_2/p = -1.035 \sim 2.206$, $\tau_{12}/p = -1.227 \sim 0.902$ 이다. 응력의 집중 정도는 기공 주변의 요소 분할 상태에 따라 다소 영향을 받으나, 전반적으로 기공 압력 보다 큰 값을 갖는다. 따라서 다공성 진전에 의해 기공 영역이 더욱 확대 되면, 응력 집중도 급격히 증가될 개연성이 있다. 이는 다공성 복합재료의 기계적 파손 위험이 미시역학적인 응력에 의해 높아질 수 있음을 시사한다.

4. 결론

본 논문에서는 분리-혼합 기법을 적용하여 기공 압력 효과에 의한 변형도 성분을 고려할 수 있는 일방향 섬유강화 복합재료에 대한 열탄성 구성 방정식을 검토하였다. 유한요소법으로 복합재료 단층에 대한 이차원 대표 체적 요소를 간단히 모형화하여 미시역학적 해석의 기준 값을 산출하였다. 이와 동시에 분리-혼합 방정식으로 전체 복합재료의 열탄성 거동을 예측한 바, 유한요소 해석 결과와 거의 일치하는 유효 탄성 계수, 기공 인자, 열팽창 계수 및 응력-변형도 곡선을 얻을 수 있었다. 또한 섬유 및 기지 영역 각각의 평균화

된 응력과 변형도를 비롯하여 기공 부위의 응력 집중에 관한 기본적인 현상을 확인하였다. 이는 향후 파손 해석 등을 위한 기준(criteria) 설정에도 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었습니다(2011-0025818).

참고문헌

- 1) 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.
- 2) Wu, Y., "Theory and Numerical Modeling on Thermo-mechanical Response of Decomposing Composites," Ph.D. Dissertation, Ohio State University, 1995.
- 3) Sullivan, R.M. and Salamon, N.J., "A Finite Element Method for the Thermochemical Decomposition of Polymeric Materials - I. Theory," *International Journal of Engineering Science*, Vol. 30, No. 4, 1992, pp. 431-441.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Jones, R.M., *Mechanics of Composite Materials*, 2nd Ed., Taylor & Francis, 1999, pp. 126-136.
- 7) Kim, S.J. and Shin, E.S., "A Thermoviscoplastic Theory for Composite Materials by Using a Matrix-Partitioned Unmixing-Mixing Scheme," *Journal of Composite Materials*, Vol. 30, No. 15, 1996, pp. 1647-1669.
- 8) 진교국, 하성규, 김재혁, 한훈희, "미시역학적 파손이론을 이용한 복합재 적층판의 피로수명 예측," *한국복합재료학회지*, 제24권 제1호, 2011, pp. 10-16.