

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(2), 91-97(2013)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.2.91>

다공성 복합재료의 삼차원 거동 예측을 위한 분리-혼합 기법의 확장

최희길, 신의섭*

Extended Unmixing-Mixing Scheme for Prediction of 3D Behavior of Porous Composites

Hoi Kil Choi and Eui Sup Shin*

Department of Aerospace Engineering, Chonbuk National University

ABSTRACT

Pyrolysis and surface recession of charring composites are progressed primarily in the thickness direction. The unmixing-mixing scheme is applied to describe the in-plane and through-thickness behaviors of porous composites. The extended unmixing-mixing equations are based on transverse isotropy of unidirectionally fiber-reinforced composites. The strain components of gas pressure in pores, thermal expansion, and chemical shrinkage are included in the constitutive model. By analyzing micromechanical representative volume elements of porous composites, the validity of the derived equations are examined.

초 록

고온에서 열분해 과정을 겪는 복합재료의 탄화 및 삭마 과정의 표면 침식은 주로 두께 방향으로 진행된다. 본 논문에서는 다공성 복합재료의 면내 및 두께 방향 거동을 효과적으로 기술하기 위하여 분리-혼합 기법을 적용하였다. 섬유와 기지로 구성된 복합재료의 횡방향 등방성 가정을 통해 분리-혼합 방정식을 삼차원으로 확장하였으며, 기공 압력, 열팽창, 열분해 과정의 수축 효과를 포함하였다. 다공성 복합재료의 대표 체적 요소를 유한요소법으로 해석하여 면내 및 두께 방향의 물성 값을 상호 비교함으로써, 확장된 분리-혼합 기법의 타당성을 확인하였다.

Key Words : Unmixing-Mixing(분리-혼합), Three Dimension(삼차원), Porous Composite (다공성 복합재료), Representative Volume Element(대표 체적 요소)

1. 서 론

항공우주 구조물에 광범위하게 사용되는 다공성 복합재료는 초고온 환경을 비롯하여 다양한 외부 하중에 노출된다. 온도 증가에 따른 기본적인 열팽창 변형과 함께 열분해 과정(pyrolysis)에서는 화학적 수축(shrinkage), 다공성(porosity)

확대 등의 다양한 거동을 보일 수 있다. 열 보호 시스템(TPS, thermal protection system)에 널리 사용되는 페놀(phenolic) 수지 복합재료의 경우, 기지 재료의 특성으로 인하여 열분해 과정 이후 급격한 다공성 및 기공 압력(pore pressure) 증가 효과가 나타난다[1,2]. 이와 더불어 열기계학적 및 화학적 삭마로 인한 표면 침식 등의 효과는

† Received: December 12, 2012 Accepted: January 13, 2013

* Corresponding author, E-mail : esshin@jbnu.ac.kr<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

복합재료의 면내 방향뿐만 아니라 두께 방향 거동에도 영향을 끼친다[3]. 따라서 이러한 환경에서 사용되는 복합재 구조물을 해석하고 신뢰성 있는 설계 자료를 확보하기 위해서는, 열분해 과정에서 다공성 효과를 포함하여 두께 방향에서 발생하는 열탄성 거동을 효과적으로 기술할 수 있는 삼차원 구성 방정식이 필요하다.

섬유강화 복합재료에 대한 구성 방정식의 정식화는 기공 압력, 화학적 수축 현상의 정량화 과정에서 재료의 이방성을 함께 고려해야 한다. 기존 연구에서 거시역학적(macromechanics) 이론에 근거한 대부분의 구성 방정식은 이방성 기공 압력 효과를 표현하기 위하여 좌표 방향에 따라 다른 값을 갖는 기공 인자(poroelastic parameter)를 도입한다[4,5]. 그러나 이방성 기공 인자를 산출하는 실험이 매우 어렵기 때문에, 단순한 곡선 맞춤(curve fitting) 기법에 의존하게 된다[6].

반면 현상 관찰적인 접근 방법으로서 섬유 및 기지 자체의 특성으로부터 전체 복합재료 거동을 예측하는 미시역학적(micromechanics) 구성 방정식에 대한 연구도 수행되어 왔다[7]. 탄성 계수에 대한 단순 혼합 법칙(rule of mixtures)과 같이, 이방성 계수를 구성 재료의 체적 비율 함수로 표현할 수 있다[8]. 예로서, Bowles는 우주 환경에서 복합재료의 열탄성 거동을 예측하기 위해 열팽창 계수를 혼합 법칙을 통해 산출하고 이를 실험값과 비교하였다[9]. 신의섭 등은 분리-혼합 기법(unmixing-mixing scheme)을 제안하여 복합재료의 점소성 거동에 영향을 미치는 등방성 기지의 역할을 기지 분할법을 통해 정량적으로 분석하였다[10]. Huang은 기지와 섬유의 응력 변화량 사이의 비례 계수로써 브리징 행렬(bridging matrix)을 제안하여 복합재료의 열탄성 거동을 예측하고 파손 기준을 제시하였다[11]. 또한, 김명준 등은 다중 스케일 모델링을 이용하여 복합재료 적층판의 파손 예측 및 검증을 수행하였다[12].

본 논문에서는 다공성 복합재료의 면내 방향뿐만 아니라 두께 방향 거동까지 기술하기 위하여 미시역학에 기반을 둔 분리-혼합 방정식을 확장하였다. 기존 이차원 구성 방정식을 횡방향 등방성 가정을 통해 삼차원으로 확장하였다. 온도 증가에 따른 열팽창, 기공 압력 증가, 열분해 과정의 수축 변형을 정식화에 포함하였다. 다공성 기지의 유효 물성 값을 산출한 후 이를 분리-혼합 기법에 대입하여, 대표 체적 요소 모델을 유한요소법으로 해석한 결과와 비교하였다. 수치 결과를 분석함으로써 다공성 복합재료의 열탄성 거동 예측 기법의 유용성을 확인하였다.

II. 삼차원 구성 방정식

2.1 미시역학적 응력 및 변형도

다공성 복합재료의 미시역학적 구성 방정식을 삼차원으로 확장하여 분리-혼합 기법에 적용하였다. 기본적인 가정으로 섬유와 기지는 완전 결합되어 있으며, 경계에서의 미끄러짐은 없다. 주재료 좌표계(principal material coordinate)에서의 미시역학적 응력의 평형 상태는 다음과 같다.

$$\sigma_1 = V^{[f]} \sigma_1^{[f]} + V^{[\bar{m}]} \sigma_1^{[\bar{m}]} \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \sigma_2^{[f]} = \sigma_2^{[\bar{m}]} \quad (2)$$

$$\sigma_3 = \sigma_3^{[f]} = \sigma_3^{[\bar{m}]} \quad (3)$$

$$\tau_{23} = \tau_{23}^{[f]} = \tau_{23}^{[\bar{m}]} \quad (4)$$

$$\tau_{13} = \tau_{13}^{[f]} = \tau_{13}^{[\bar{m}]} \quad (5)$$

$$\tau_{12} = \tau_{12}^{[f]} = \tau_{12}^{[\bar{m}]} \quad (6)$$

여기서 V 는 체적 비율, 상첨자 $[f]$ 는 섬유 영역, $[\bar{m}]$ 은 기공을 포함하는 기지 영역을 나타낸다.

섬유는 횡방향 등방성 재료이며, 선형 열탄성 거동을 한다. 기지는 등방성 재료이며, 열탄성 이외에 기공 팽창과 비탄성 거동을 할 수 있다. 전체 변형은 작으므로, 변형도는 탄성, 기공 압력, 열팽창, 비탄성 성분으로 가산 분해된다. 변형도 성분에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon}_1 = \dot{\epsilon}_1^{e[f]} + \dot{\epsilon}_1^{t[f]} = \dot{\epsilon}_1^{e[\bar{m}]} + \dot{\epsilon}_1^{p[\bar{m}]} + \dot{\epsilon}_1^{t[\bar{m}]} + \dot{\epsilon}_1^{s[\bar{m}]} \quad (7)$$

$$\dot{\epsilon}_2 = V^{[f]} \left(\dot{\epsilon}_2^{e[f]} + \dot{\epsilon}_2^{t[f]} \right) + V^{[\bar{m}]} \left(\dot{\epsilon}_2^{e[\bar{m}]} + \dot{\epsilon}_2^{p[\bar{m}]} + \dot{\epsilon}_2^{t[\bar{m}]} + \dot{\epsilon}_2^{s[\bar{m}]} \right) \quad (8)$$

$$\dot{\epsilon}_3 = V^{[f]} \left(\dot{\epsilon}_3^{e[f]} + \dot{\epsilon}_3^{t[f]} \right) + V^{[\bar{m}]} \left(\dot{\epsilon}_3^{e[\bar{m}]} + \dot{\epsilon}_3^{p[\bar{m}]} + \dot{\epsilon}_3^{t[\bar{m}]} + \dot{\epsilon}_3^{s[\bar{m}]} \right) \quad (9)$$

$$\dot{\gamma}_{23} = V^{[f]} \dot{\gamma}_{23}^{e[f]} + V^{[\bar{m}]} \left(\dot{\gamma}_{23}^{e[\bar{m}]} + \dot{\gamma}_{23}^{s[\bar{m}]} \right) \quad (10)$$

$$\dot{\gamma}_{13} = V^{[f]} \dot{\gamma}_{13}^{e[f]} + V^{[\bar{m}]} \left(\dot{\gamma}_{13}^{e[\bar{m}]} + \dot{\gamma}_{13}^{s[\bar{m}]} \right) \quad (11)$$

$$\dot{\gamma}_{12} = V^{[f]} \dot{\gamma}_{12}^{e[f]} + V^{[\bar{m}]} \left(\dot{\gamma}_{12}^{e[\bar{m}]} + \dot{\gamma}_{12}^{s[\bar{m}]} \right) \quad (12)$$

여기서 상첨자 e , p , t , s 는 각각 탄성, 기공 압력에 의한 팽창, 열팽창, 화학적 수축을 의미하며, $(\dot{\quad})$ 는 시간 변화율을 나타낸다.

2.2 확장된 분리-혼합 방정식

섬유와 기지의 삼차원 배열 상태 가정을 통해 복합재료의 거시역학 거동과 미시역학 거동 사이

의 상호 관계를 Fig. 1에 나타내었다. 미시역학적 기본 가정 및 관계식을 정리하여 구성 방정식을 확장하면, 전체 복합재료의 거시역학적 물리량과 미시역학적 물리량을 직접 연결하는 일련의 방정식이 유도된다. 기공 압력 및 수축 변형 효과를 포함한 변형도-응력 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon} = \mathbf{A}(\dot{\sigma} + \pi \dot{p}) + \alpha \dot{\theta}_+ + \mathbf{D} \dot{\epsilon}^s \quad (13)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\pi = [\pi_1 \quad \pi_2 \quad \pi_2 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (15)$$

$$\alpha = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_2 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (16)$$

$$\mathbf{D} = V^{[\bar{m}]} \begin{bmatrix} \frac{E^{[\bar{m}]}}{E_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu^{[\bar{m}]} - \nu_{12} \frac{E^{[\bar{m}]}}{E_1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu^{[\bar{m}]} - \nu_{12} \frac{E^{[\bar{m}]}}{E_1} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서 π 는 기공 인자, α 는 열팽창 계수, θ_+ 는 온도 변화이다. 식 (13)의 마지막 항은 기지에서 발생한 화학적 수축이 전체 변형도에 기여하는 양이다. 섬유와 기지의 x_1 방향 변형도 관계식을 통해 유도된 응력 성분의 변화율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_1^{[f]} &= \frac{E_1^{[f]}}{E_1} \dot{\sigma}_1 + \left(\nu_{12}^{[f]} - \frac{\nu_{12} E_1^{[f]}}{E_1} \right) (\dot{\sigma}_2 + \dot{\sigma}_3) \\ &+ V^{[\bar{m}]} \frac{E_1^{[f]}}{E_1} (1 - 2\nu^{[\bar{m}]}) \pi^{[\bar{m}]} \dot{p} \\ &- V^{[\bar{m}]} \frac{E_1^{[f]} E^{[\bar{m}]}}{E_1} (\alpha_1^{[f]} - \alpha^{[\bar{m}]}) \dot{\theta}_+ \\ &+ \frac{E_1^{[f]} E^{[\bar{m}]}}{E_1} V^{[\bar{m}]} \dot{\epsilon}_1^{s[\bar{m}]} \end{aligned} \quad (18)$$

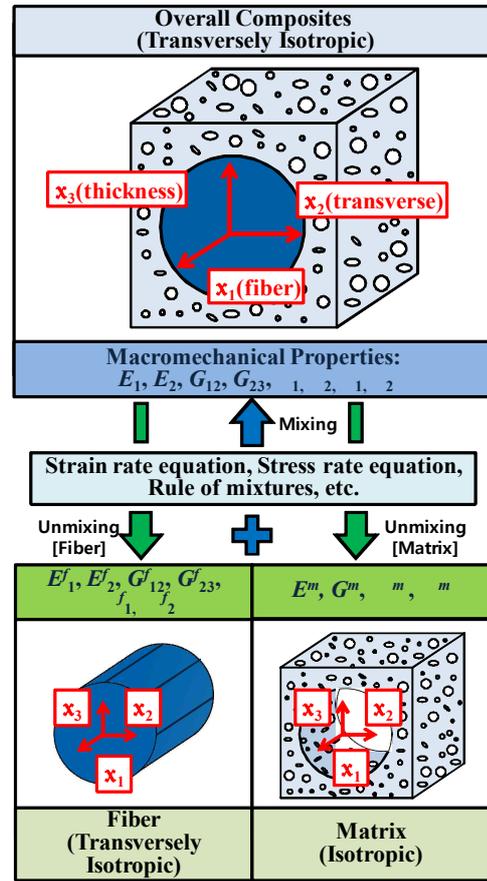


Fig. 1. Concept of unmixing-mixing scheme

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_1^{[\bar{m}]} &= \frac{E^{[\bar{m}]}}{E_1} \dot{\sigma}_1 + \left(\nu^{[\bar{m}]} - \frac{\nu_{12} E^{[\bar{m}]}}{E_1} \right) (\dot{\sigma}_2 + \dot{\sigma}_3) \\ &- V^{[f]} \frac{E_1^{[f]}}{E_1} (1 - 2\nu^{[\bar{m}]}) \pi^{[\bar{m}]} \dot{p} \\ &+ V^{[f]} \frac{E_1^{[f]} E^{[\bar{m}]}}{E_1} (\alpha_1^{[f]} - \alpha^{[\bar{m}]}) \dot{\theta}_+ \\ &+ \frac{E^{[\bar{m}]2}}{E_1} V^{[\bar{m}]} \dot{\epsilon}_1^{s[\bar{m}]} - E^{[\bar{m}]} \dot{\epsilon}_1^{s[\bar{m}]} \end{aligned} \quad (19)$$

식 (14)~(16)의 거시역학 계수는 혼합 법칙 (rule of mixtures)인 섬유와 기지의 체적 비율 등의 함수로 표현할 수 있다. 탄성 계수, 기공 인자, 열팽창 계수에 대한 표현을 정리하면 다음과 같다.

$$E_1 = V^{[f]} E_1^{[f]} + V^{[\bar{m}]} E^{[\bar{m}]} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_2} &= \frac{V^{[f]}}{E_2^{[f]}} + \frac{V^{[\bar{m}]}}{E^{[\bar{m}]}} \\ &- \frac{V^{[f]} V^{[\bar{m}]} (\nu_{12}^{[f]} E^{[\bar{m}]} - \nu^{[\bar{m}]} E_1^{[f]})^2}{E_1^{[f]} E^{[\bar{m}]} E_1} \end{aligned} \quad (21)$$

$$V_{12} = V^{[f]}V_{12}^{[f]} + V^{[m]}V^{[m]} \quad (22)$$

$$\frac{V_{23}}{E_2} = \frac{V^{[f]}V_{23}^{[f]}}{E_2^{[f]}} + \frac{V^{[m]}V^{[m]}}{E^{[m]}} + \frac{V^{[f]}V^{[m]}(v_{12}^{[f]}E^{[m]} - v^{[m]}E_1^{[f]})^2}{E_1^{[f]}E^{[m]}E_1} \quad (23)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V^{[f]}}{G_{12}^{[f]}} + \frac{V^{[m]}}{G^{[m]}} \quad (24)$$

$$\alpha_1 = V^{[f]}\frac{E_1^{[f]}}{E_1}\alpha_1^{[f]} + V^{[m]}\frac{E^{[m]}}{E_1}\alpha^{[m]} \quad (25)$$

$$\alpha_2 = V^{[f]}\alpha_2^{[f]} + V^{[m]}\alpha^{[m]} - \frac{V^{[f]}V^{[m]}}{E_1}(v^{[m]}E_1^{[f]} - v_{12}^{[f]}E^{[m]})(\alpha_1^{[f]} - \alpha^{[m]}) \quad (26)$$

$$\pi_1 - 2v_{12}\pi_2 = V^{[m]}(1 - 2v^{[m]})\pi^{[m]} \quad (27)$$

$$\frac{1 - v_{23}}{E_2}\pi_2 - \frac{v_{12}}{E_1}\pi_1 = V^{[m]}\left(1 - V^{[f]}\frac{v_{12}^{[f]}E^{[m]} - v^{[m]}E_1^{[f]}}{E_1}\right)\frac{1 - 2v^{[m]}}{E^{[m]}}\pi^{[m]} \quad (28)$$

III. 대표 체적 요소 해석

3.1 기지의 유효 물성 값 산출

분리-혼합 기법을 적용하여 전체 복합재료의 거시역학적 물성 값을 구하기 위해서는 섬유와 기지 각각의 미시역학적 물성 값이 필요하다. 기공을 포함한 기지 영역의 유효 물성을 산출하기 위해 이차원 대표 체적 요소(RVE, representative volume element)를 모델링하여 유한요소법으로 해석하였다.

다공성 기지의 유한요소 모델을 Fig. 2에 도시하였다. 오른쪽 방향이 x_2 축이며, 위 방향이 x_3 축이다. 크기가 다른 원형, 사각형의 기공을 각각 30개, 100개씩 무작위로 생성하였다. 기공은 전체 면적(1.0×1.0 m)의 20%를 차지하며, 기공도는 0.2이다. 요소 기준 크기를 0.01 m로 설정하여, 총 9,282개의 사각형 요소를 사용하였다. 또한, 대표 체적 요소의 대칭 조건을 고려하여 이차원 영역의 1/4 부분만 분할하였다. 해석에 사용된 페늘 수지 물성 값은 $E^{[m]} = 10$ GPa, $\nu^{[m]} = 0.25$, $\alpha^{[m]} = 10 \times 10^{-6}$ K⁻¹이다. 해석용 소프트웨어는 MSC. PATRAN/NASTRAN 2005 R2를 사용하였다.

경계 및 하중 조건(Load case)은 응력 성분, 기공 압력, 온도 변화를 개별적으로 부과하였으

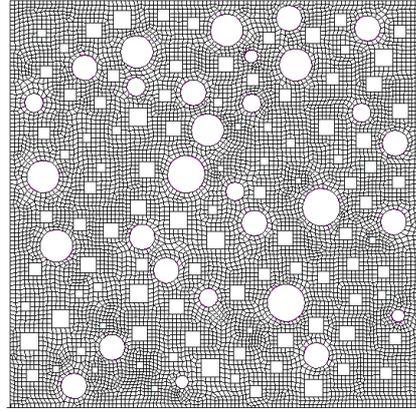


Fig. 2. Finite element mesh of matrix

Table 1. Effective properties of matrix

Load case	Effective properties	
σ_2	$E^{[m]}(x_2)$	5.620 GPa
	$\nu^{[m]}(x_2-x_3)$	0.255
σ_3	$E^{[m]}(x_3)$	5.761 GPa
	$\nu^{[m]}(x_3-x_2)$	0.262
τ_{23}	$G^{[m]}(x_2-x_3)$	1.938 GPa
π	$\pi^{[m]}(x_2)$	0.454
	$\pi^{[m]}(x_3)$	0.442
θ	$\alpha^{[m]}(x_2)$	10.000×10^{-6} K ⁻¹
	$\alpha^{[m]}(x_3)$	10.000×10^{-6} K ⁻¹

며, 화학적 수축에 의한 변형도 성분은 고려하지 않았다. Table 1은 유한요소 해석으로 산출된 기지 영역의 유효 물성 값을 정리한 것이다. 기공 효과에 의해 $E^{[m]}$ 은 43%, $G^{[m]}$ 은 52% 정도 감소하였으며, $\nu^{[m]}$ 은 3.4% 정도 증가하였다. 물성 값 옆에 병기한 괄호는 해당 좌표(x_2 또는 x_3)를 의미하는데, $E^{[m]}$ 은 약 2.5%, $\pi^{[m]}$ 은 약 2.7%의 차이가 생긴다. 이는 등방성 기지 재료도 기공 생성에 따라 이방성을 가질 수 있음을 의미한다.

3.2 대표 체적 요소 모형 및 해석

일방향 강화 다공성 복합재료의 면내(x_2) 및 두께(x_3) 방향 거동을 살펴보기 위하여 Fig. 3과 같이 섬유/기지 단면의 대표 체적 요소를 유한요소법으로 해석하였다. 즉, 두께 방향에 관련된 계수를 집중적으로 비교 및 검토하기 위해서 복잡한 삼차원 모형 대신에 이차원 모형을 선택하였다. 섬유와 기지의 체적 비율은 5:5이다. 기공은 Fig. 2의 모형과 동일하게 생성하였다. 기지 영역의 기공도는 0.2, 즉 전체 복합재료의 기공도는 0.1인 경우이다. 요소 기준 크기는 0.01 m이며, 섬유 영역에 4,338개, 기지 영역에 5,340개의

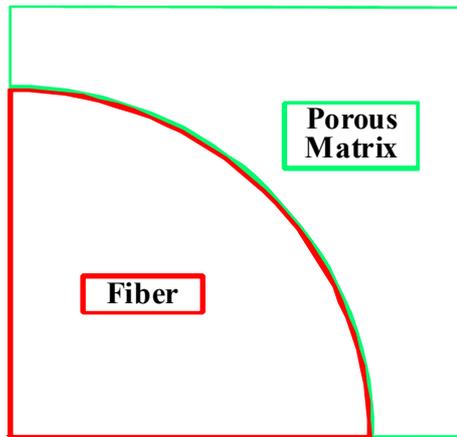


Fig. 3. Finite element mesh of composite

Table 2. Effective properties of composite

Load case	Unmixing-mixing		RVE (FEM)
σ_2	E_2	9.316 GPa	10.457 GPa
	ν_{23}	0.241	0.207
σ_3	E_3	9.316 GPa	9.980 GPa
	ν_{32}	0.241	0.207
π	π_2	0.320	0.273
	π_3	0.320	0.311
θ_t	α_2	$6.841 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$6.436 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
	α_3	$6.841 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$6.554 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

사각형 요소를 사용하였다.

경계 조건으로 우측과 상단 면의 x_2, x_3 방향 변위를 각각 구속하여 하중 작용면에서 균일 변위가 발생하도록 설정하였다. 분리-혼합 기법에서는 탄소 섬유 및 Table 1의 기지 영역의 유효 물성 값의 평균을 적용하였다. 섬유의 물성 값은 $E_2^{[f]} = E_3^{[f]} = 20 \text{ GPa}$, $\nu_{23}^{[f]} = 0.18$, $\alpha_2^{[f]} = \alpha_3^{[f]} = 3.88 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 이며, 기지의 유효 물성 값은 $E^{[m]} = 5.691 \text{ GPa}$, $\nu^{[m]} = 0.258$, $\pi^{[m]} = 0.442$, $\alpha^{[m]} = 10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 이다. Table 2는 복합재료의 거시적 유효 물성 값에 대하여 분리-혼합 기법과 유효요소 해석 결과를 비교한 것이다. E_2 는 11%, ν_{23} 은 16%, π_2 는 15%의 차이를 보였으며, $E_3, \pi_3, \alpha_2, \alpha_3$ 의 차이는 7% 이하였다. 이는 대표 체적 요소의 응력 및 변형도 분포의 비균일성과 기지 영역의 유효 물성 값의 차이에서 기인하는 것으로 판단된다. 유효요소 결과에서는 E_2 와 E_3 는 약 4.6%, π_2 와 π_3 은 약 14%의 차이가 생겼다. 이는 기지의 미시적 기공 상태가 전체 복합재료의 이방성을 야기할 수 있음을 의미한다.

기공 압력에 의한 대표 체적 요소의 거동을 자세히 살펴보기 위하여 Fig. 4에 변형 후의 형상을 도시하였다. 기공 압력은 모든 기공 경계에

서 균일하게 10 MPa을 부과하였다. 섬유 영역에 비해 작은 탄성 계수를 갖는 기지 영역, 특히 내부 기공에서의 변형이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5~7은 응력 성분 $\sigma_2, \sigma_3, \tau_{23}$ 의 분포도 및 각각의 최대 또는 최소 응력 성분이 발생하는 부위의 확대도이다. 응력 집중 정도는 유효요소의 종류와 메시(mesh)의 섬세함(fineness)에 의존하지만, 주로 기공 사이의 거리가 가까울수록 집중도가 크게 나타난다. 계산된 각 응력 성분의 범위는 $\sigma_2/p = -1.39 \sim 2.13$, $\sigma_3/p = -1.24 \sim 2.58$, $\tau_{23}/p = -0.76 \sim 1.05$ 로서 전반적으로 기공 압력보다 큰 값을 갖는다. 따라서 기공이 확대될수록 응력 집중도는 더욱 커질 수 있으며,

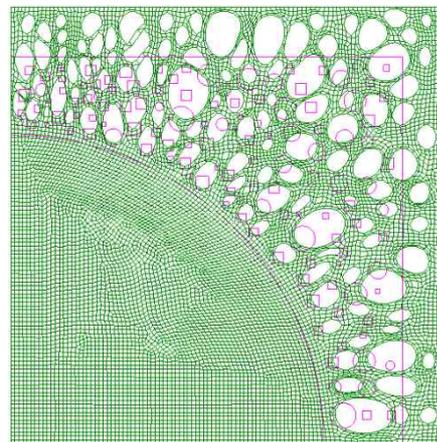


Fig. 4. Deformed configuration of composite

Unit : [Pa]

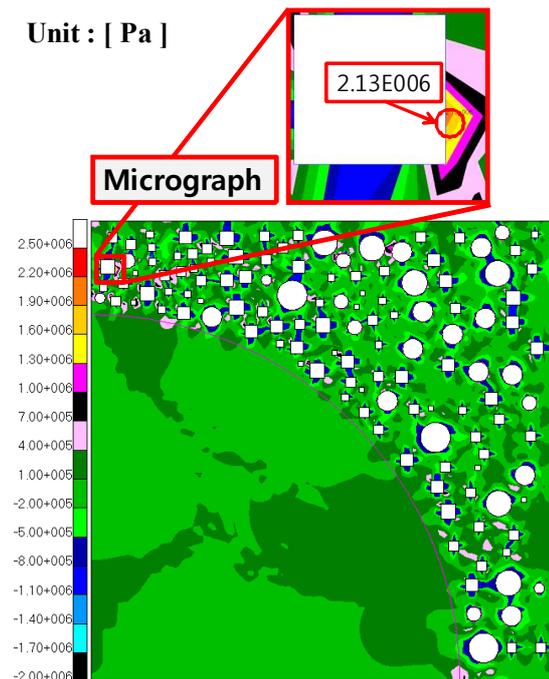


Fig. 5. σ_2 distribution in composite

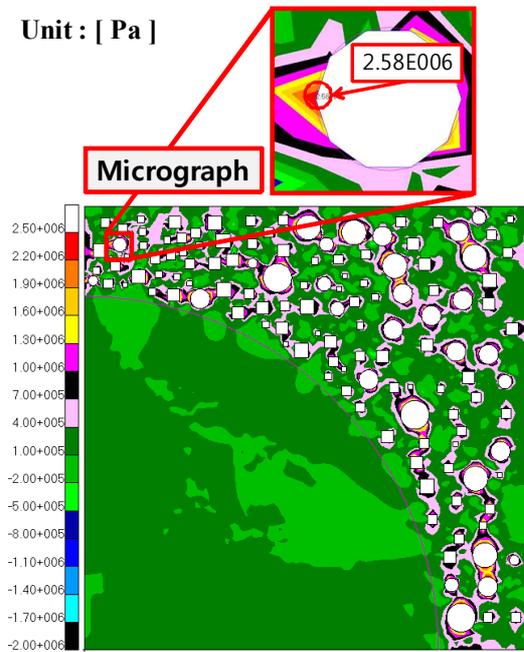


Fig. 6. σ_3 distribution in composite

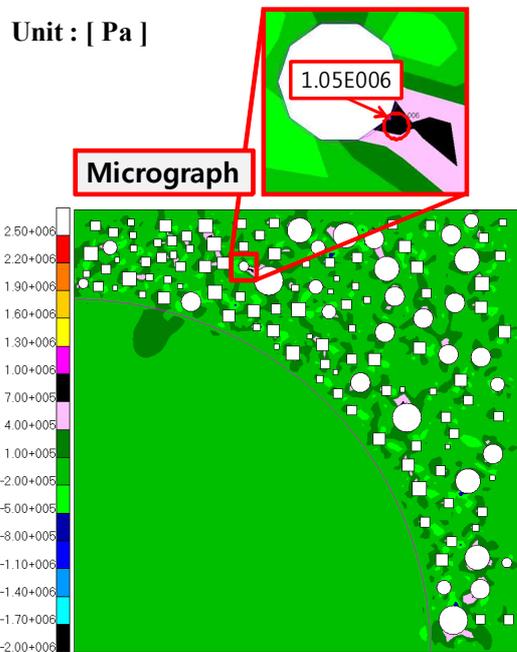


Fig. 7. τ_{23} distribution in composite

이는 미시역학적 응력 집중에 의해 전체 복합재료의 기계적 파손 위험성이 높아질 수 있음을 의미한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 다공성 복합재료의 면내 및 두께 방향 거동을 예측하기 위하여 미시역학 기반

의 이차원 구성 방정식을 삼차원으로 확장하였다. 내부 기공 압력 증가, 온도 증가에 따른 열팽창, 열분해 과정의 수축 변형 효과를 정식화 과정에 포함하였다. 유한요소법을 통해 기지 영역의 대표 체적 요소를 모형화하여 유효 물성 값을 산출하였다. 이를 분리-혼합 기법에 대입하고 결과를 비교하기 위하여 섬유/기지 단면 모델을 해석하여 열탄성 및 기공 거동을 살펴보았다. 해석 결과, 기지 영역은 다공성 효과에 의한 물성 감소 뿐 아니라 이방성을 가질 수 있으며, 미시적 관점에서의 이방성 효과는 전체 복합재료의 거시적 이방성에도 영향을 끼침을 알 수 있었다. 분리-혼합 방정식과 유한요소 해석 결과에 따른 복합재료의 거시적 유효 물성 값은 대부분 잘 일치하였다. 또한, 내부 기공 압력은 대표 체적 요소의 응력 집중 현상을 증가시키는 주요 요소임을 확인할 수 있었다. 이는 다공성 복합재료의 파손 기준을 설정하는데 있어 기공 압력에 의한 미시역학적 효과를 고려해야 함을 의미한다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었습니다(2012-0007232). 또한, 부분적으로 국토해양부의 하늘 프로젝트로 지원되었습니다.

References

- 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 Thermomechanical Response of Decomposing Composites," Ph. D. Dissertation, Ohio State Univ., 1995.
- 3) Russell, G. W. and Strobel, F., "Modeling Approach for Intumescent Charring Heatshield Materials," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 43, No. 4, 2006, pp. 739-749.
- 4) 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.

5) 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.

6) 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.

7) Aboudi, J., *Mechanics of Composite Materials: Unified Micromechanical Approach*, Elsevier, 1991, pp. 111-124.

8) Hyer, M. W., *Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials*, McGraw-Hill, 1998, pp. 83-145.

9) Bowles, D. E., "Micromechanics Analysis of

Space Simulated Thermal Deformations and Stresses in Continuous Fiber Reinforced Composites," NASA TM 102633, 1990, pp. 5-28.

10) Shin, E. S. and Kim, S. J., "Thermovisco-plasticity of Composite Materials by Using a Matrix-Partitioned Unmixing-Mixing Scheme," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 23, No. 3, 1995, pp. 85-92.

11) Huang, Z.-M., "Simulation of the Mechanical Properties of Fibrous Composites by the Bridging Micromechanics Model," *Composites: Part A*, Vol. 32, 2001, pp. 145-172.

12) Kim, M. J., Park, S. H, Park, J. S., Lee, W. I., and Kim, M. S., "Micro-Mechanical Failure Prediction and Verification for Fiber Reinforced Composite Materials by Multi-Scale Modeling Method," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 41, No. 1, 2013, pp. 17-24.