

미소한 손상경계면을 갖는 입자강화 복합재료의 미세역학 탄성 모델에 관한연구

A Micromechanics-based Elastic Model for Particle-Reinforced Composites Containing Slightly Weakened Interfaces

이 행 기* · 표 석 훈**

Lee, Haeng-Ki · Pyo, Suk-Hoon

ABSTRACT

This paper presents a part of micromechanics-based elastic modeling (Lee and Pyo, 2007) of particle-reinforced composites containing slightly weakened interfaces. The Eshelby's tensor for a damaged ellipsoidal inclusion to model particles with slightly weakened interfaces is incorporated into a micromechanical formulation by Ju and Chen (1994). A damage model in accordance with the Weibull's probabilistic function is also developed to simulate the progression of weakened interface in the composites.

Keywords: *Elastic model, particle-reinforced composites, progressive weakened interface*

1. 서 론

입자강화 복합재료(particle-reinforced composites)는 동일성질을 가지는 타재료에 비해 비강도, 비강성이 매우 높기 때문에 최근 들어 그 중요성이 더해가고 있다(Agarwal and Broutman, 1980). 따라서 이의 응력해석을 통한 복합재료의 성질 예측은 중요한 해석분야의 하나라 할 수 있다(김홍건, 1997). 입자강화 복합재료에 있어서 보강입자(particle)와 기지재료(matrix)사이의 계면손상(imperfect interface)이 전체의 강도저하에 중요한 역할을 한다. 이러한 입자강화 복합재료의 계면손상을 적절히 모델링하기 위하여 기법들이 많은 공학자들에 의하여 제안되고 있다.

본 연구에서는 미세역학을 기반으로 하여 미소한 손상을 갖는 복합재료의 탄성 거동을 예측하였다. 그림 1(a)과 같이 처음에는 무작위로 분포(randomly distributed)되어있고, 보강입자와 기지재료가 완벽하게 접합(perfectly bonded)되어있다고 가정한다. 하중이 증가함에 따라 그림 1(b)과 같이 확률적으로 점차 손상된 계면을 갖는 입자들이 증가한다고 가정하였다.

이러한 손상된 구형입자를 갖는 입자강화 복합재료를 모델링 하기위해 Qu(1993a, 1993b)에 의해 제안된 계면 두께의 선형 스프링 경계층모델을 기반으로 한 미소한 계면손상 모델(Lee and Pyo, 2007)을 채택하였다.

* 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 부교수 Email: leeh@kaist.ac.kr

** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정 Email: susbridge@kaist.ac.kr

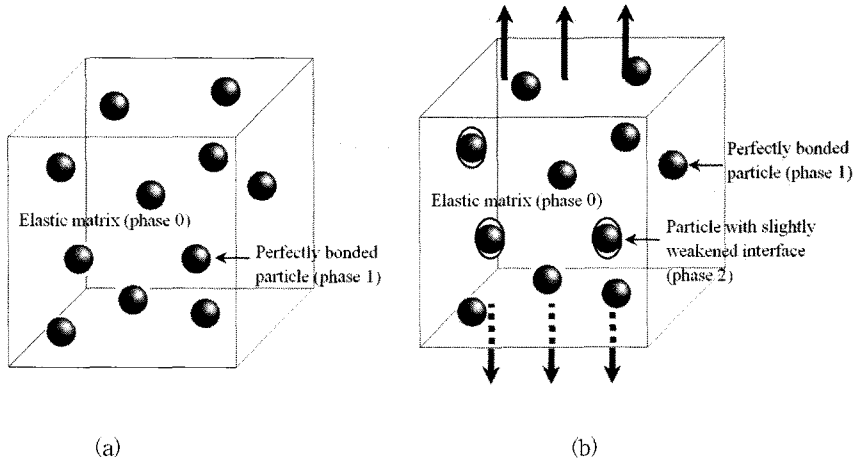


그림 1 단축 인장하중을 받는 입자강화 복합재료의 모식도 : (a) 초기 상태, (b) 손상 상태

2. 탄성 구성모델

초기상태에서 완벽하게 접합되어있는 2 상(phase)의 복합재료의 경우에서 하중이 증가함과 더불어 어떤 보강입자들은 계면손상을 겪게 된다. 즉, 3 상(phase)로 진전하게 된다. 여기서, 기지재료(phase 0)와 완벽하게 접합되어 있는 보강입자(phase 1)의 라메 상수(Lame constant)를 각각 $\lambda_0, \mu_0, \lambda_1, \mu_1$ 이라 하면, 3 상(phase)의 유효 강성텐서(effective stiffness tensor) \mathbf{C}^* 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(Ju and Chen, 1994).

$$\mathbf{C}^* = \mathbf{C}_0 \cdot \left[\mathbf{I} + \sum_{r=1}^2 \left\{ \phi_r (\mathbf{A}_r + \mathbf{S}_r)^{-1} \cdot \left[\mathbf{I} - \phi_r \mathbf{S}_r \cdot (\mathbf{A}_r + \mathbf{S}_r)^{-1} \right]^r \right\} \right] \quad (1)$$

여기서, \mathbf{C}_r 은 r-상(phase)의 강성텐서를 나타내며 ϕ_r 은 r-상(phase)의 체적비를 나타낸다. 또한, 4차 텐서 \mathbf{A}_r 은 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{A}_r \equiv (\mathbf{C}_r - \mathbf{C}_0)^{-1} \cdot \mathbf{C}_0 \quad (2)$$

등방성(isotropic)이며 선형의 기지재료에 완벽하게 접합되어 있는 보강입자의 Eshelby 텐서 \mathbf{S}_1 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(S_1)_{ijkl} = \frac{1}{15(1-\nu_0)} \left\{ (5\nu_0 - 1)\delta_{ij}\delta_{kl} + (4 - 5\nu_0)(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) \right\} \quad (3)$$

여기서, ν_0 는 기지재료의 푸아송비(Poisson's ratio)를 나타낸다. 또한, 등방성(isotropic)이며 선형의 기지재료에 미소한 손상된 계면을 가진 보강입자의 Eshelby 텐서 \mathbf{S}_2 는 Qu(1993a, 1993b)로부터 구하였고, 자세한 내용은 Lee and Pyo (2007)에 나타내었다.

유효 영의 계수(Young's modulus) E^* 와 유효 푸아송비 ν^* 는 식 (4, 5)과 같이 유도할 수 있다(Lee and

Pyo, 2007).

$$E^* = \frac{\mu^*(3\lambda^* + 2\mu^*)}{\lambda^* + \mu^*} \quad (4)$$

$$\nu^* = \frac{\lambda^*}{2(\lambda^* + \mu^*)} \quad (5)$$

여기서, 유효 라메 상수 λ^* , μ^* 는 식 (6, 7)과 같이 유도할 수 있다(Lee and Pyo, 2007).

$$\lambda^* = (3\lambda_0 + 2\mu_0)(\Lambda_1 + \Lambda_3) + 2\lambda_0 \left(\frac{1}{2} + \Lambda_2 + \Lambda_4 \right) \quad (6)$$

$$\mu^* = 2\mu_0 \left(\frac{1}{2} + \Lambda_2 + \Lambda_4 \right) \quad (7)$$

여기서, $\Lambda_1, \dots, \Lambda_4$ 는 Lee and Pyo(2007)에 나타내었다.

외부하중의 증가에 따른 미소한 경계손상을 갖는 보강입자의 증가는 식 (8)과 같이 Weibull(1951) 확률 분포를 이용하여 모델링 하였다. 이때, Weibull 확률 분포는 보강입자의 내부 응력을 지배인자(controlling factor)라 가정 하였고, 내부 응력의 자세한 유도는 Lee and Pyo (2007)에 나타내었다.

$$\phi_2 = \phi P_d[(\bar{\sigma}_{11})_1] = \phi \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{(\bar{\sigma}_{11})_1}{S_0} \right)^M \right] \right\} \quad (8)$$

3. 수치해석 및 분석

본 연구에서 제안된 미세역학을 기반으로 하여 미소한 손상을 갖는 복합재료의 탄성 모델을 실제로 적용하기 위하여 그림 1과 같이 단축 인장하중 하에서의 응력-변형률 및 이에 따른 보강입자들의 체적비를 예측하였다. 예측에 사용된 재료의 물성치와 모델에 필요한 상수는 Lee and Pyo (2007)에 나타내었다.

그림 2(a)는 완벽접합 모델(*Perfect bonding model*)과 손상계면 모델(*Weakened interface model*)의 단축 인장하중 하에서의 응력-변형률 예측곡선을 나타내고 있다. 또한 그림 2(b)는 손상계면 모델(*Weakened interface model*)의 완벽히 접합된 보강입자와 손상된 계면을 갖는 보강입자들의 예측 체적비를 나타내고 있다. 그림들에서와 같이 초기 하중 단계에서는 손상된 계면을 갖는 보강입자들의 체적비가 낮아 선형거동을 보이나, 하중이 증가함과 함께 손상된 계면을 갖는 보강입자들의 체적비가 증가함으로 손상계면 모델(*Weakened interface model*)은 비선형 거동을 나타내고 있다. 최종적으로 모든 보강입자들이 손상된 계면을 갖게 되면 비록 초기의 기울기보다 작은 기울기를 갖지만, 응력-변형률 곡선은 다시 선형거동을 보이게 된다. 이는 실제적인 물리현상을 잘 반영한다고 판단된다.

본 연구에서는 손상된 구형입자를 갖는 입자강화 복합재료를 모델링 하기위해 Qu(1993a, 1993b)에 의해 제안된 계면 두께의 선형 스프링 경계층모델을 기반으로 한 미소한 계면손상 모델을 적용하여 실제 복합재료에 적용할 수 있는 미세역학을 기반으로 한 선형 구성모델(Lee and Pyo, 2007)을 제안하였다. 또한 제안된 구성모델을 실제 재료에 적용하여 탄성 거동을 예측하였다. 향후 좀 더 널리 사용되고 있는 연성의 특성을 갖는 재료를 예측하기위해 소성 구성모델 연구를 추가적으로 수행할 예정이다.

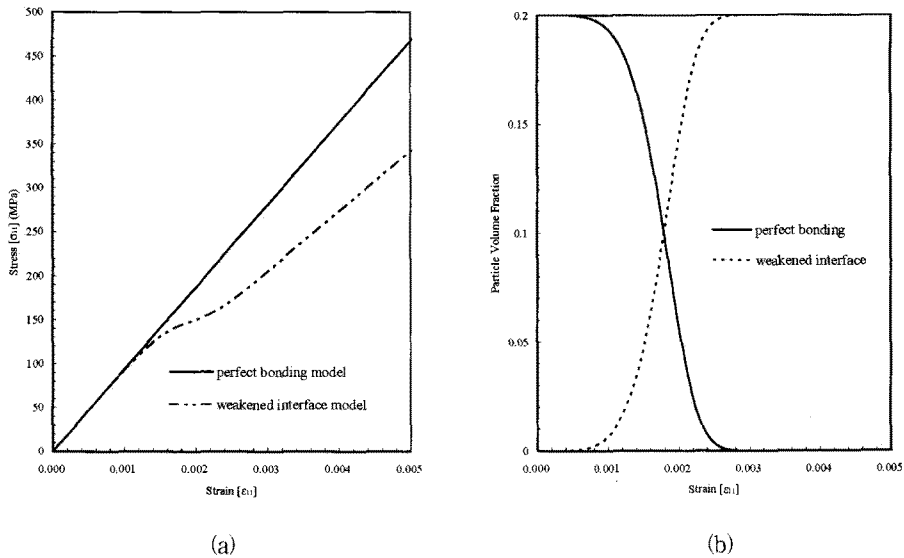


그림 2 (a) 단축 인장하중 하에서의 응력-변형률, (b) 이에 따른 보강입자들의 체적비

감사의 글

본 연구는 스마트 사회기반시설 연구센터로부터 지원된 연구비(NC 36456, R11-2006-101-02004-0)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김홍건 (1997) 불연속 금속복합체에서의 탄성거동에 관한 미세구조역학적 해석, 한국공작기계기술학회지, 6(3), pp.58~64.
- Agarwal, B.D. and Broutman, L.J. (1980) Analysis and performance of fiber composites, *John Wiley and Sons*, New York.
- Ju, J. W. and Chen, T. M. (1994) Micromechanics and effective elastoplastic behavior of two-phase metal matrix composites, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 116, pp.310~318.
- Lee, H.K. and Pyo, S.H. Micromechanics-based elastic damage modeling of particulate composites with weakened interfaces, *International Journal of Solids and Structures*, in review.
- Qu, J. (1993a) Eshelby tensor for an elastic inclusion with slightly weakened interfaces, *Journal of Applied Mechanics*, 60(4), pp.1048~1050.
- Qu, J. (1993b) The effect of slightly weakened interfaces on the overall elastic properties of composite materials, *Mechanics of Materials*, 14, pp.269~281.
- Weibull, W. (1951) A statistical distribution function of wide applicability, *Journal of Applied Mechanics*, 18, pp.293~297.