

누적손상모델을 고려한 입자 강화 복합재료에 관한 해석

Analysis of Particle-Reinforced Composites Incorporating Cumulative Damage

김 봉 래* · 이 행 기**

Kim, Bong-Rae · Lee, Haeng-Ki

요 약

입자 강화 복합재료 내에서의 다양한 손상 메커니즘은 복합재료의 전체 거동을 예측에 상당한 영향을 미친다. 이에 본 연구에서는 입자 강화 복합재료 내에서의 누적 손상을 고려한 미세역학 기반 탄소성 모델 (Kim and Lee, 2009)을 소개하고자 한다. Kim and Lee (2009)에 의해서 입자 강화 복합재료의 탄소성 모델을 위해 입자 강화 복합재료 내 계면에서의 누적 손상 및 기지재의 연성 거동이 고려되었다. 제안된 모델을 이용한 입자 강화 복합재료의 탄소성 거동 예측값은 관련된 실험값 (Llorca et al., 1991)과의 비교를 통해 수치해석을 수행하였다.

keywords : 입자 강화 복합재료, 누적손상, 탄소성 거동, 미세역학 모델, 수치해석

1. 서 론

입자 강화 복합재료 (Particle-reinforced composites)는 우수한 공학적 특성 때문에 다양한 분야에 걸쳐 적용되고 있으며 많은 연구자들에 의해 실험적, 해석적으로 연구가 진행되고 있다. 특히, 서로 다른 상 (phase)을 가진 불균질 (heterogeneous) 재료인 입자 강화 복합재료 내에서 발생하는 계면 손상 (debonding of the matrix-inclusion interface), 강화재의 균열 손상 (brittle fracture of the reinforcing inclusions), 기지재의 연성 파괴 (ductile failure of the matrix) 등과 같은 다양한 손상 메커니즘은 전체 복합재료의 복잡한 거동에 상당한 영향을 미치고 있다 (Nutt and Duva, 1986; Ibrahim et al., 1991; Lloyd, 1991; Tohgo and Weng, 1994; Drabek and Böhm, 2005). 이러한 복잡한 손상 메커니즘에 의해 입자 강화 복합재료의 공학적 특성을 파악하기 위해서는 많은 실험이 필요하나, 이는 많은 시간이 요구되는 단점을 가지고 있다. 이에 입자 강화 복합재료의 공학적 특성을 정확하고 신뢰성 있게 표현할 수 있는 재료의 손상 구성 모델 개발이 선행될 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 입자 강화 복합재료 내에서의 손상을 고려한 미세역학 기반 탄소성 모델 (Kim and Lee, 2009)을 소개하고자 한다. 특히, Kim and Lee (2009)에서는 입자 강화 복합재료 내 강화재 (reinforced particle)와 기지재 (matrix) 사이의 계면에서의 누적 손상 (cumulative damage) 및 기지재의 연성 거동 (ductile behavior)을 고려함으로써, 입자 강화 복합재료의 탄소성 거동 및 손상 예측 가능한 미세역학 모델을 제안하였으며, 다양한 수치해석을 수행하였다.

* 학생회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 bong-ida@kaist.ac.kr

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

2. 누적손상을 고려한 탄소성 모델

하중이 계속 증가함에 따라 입자 강화 복합재료의 기지재는 탄성영역을 벗어나 소성영역으로 진전하며 이러한 입자 강화 복합재료의 탄소성 거동을 위해, 등방성 변형 경화 법칙 (isotropic strain hardening law)와 von-Mises 항복 조건이 적용되었다 (Kim and Lee, 2009).

$$F(\sigma, \bar{e}^p) = H(\sigma) - K^2(\bar{e}^p) \leq 0 \quad (1)$$

여기서, $H(\sigma) \equiv \sigma : \mathbf{I}_d : \sigma$ 는 편차 응력의 크기 (the square of the deviatoric stress norm),

$\mathbf{I}_d \equiv \mathbf{I} - \frac{1}{3} \mathbf{1} \otimes \mathbf{1}$ 는 4차 단위 텐서 \mathbf{I} 의 편차 부분이며, $\mathbf{1}$ 과 \otimes 은 각각 2차 단위 텐서와 2차 텐서의 곱을 의미한다. 또한 $K(\bar{e}^p)$ 는 등방성 경화 함수로써 $K(\bar{e}^p) = \sqrt{\frac{2}{3}} \{ \sigma_y + h(\bar{e}^p)^q \}$ 형태의 지수형 경화 함수가 사용되었고, h, q 는 입자 강화 복합재료의 등방성 경화 매개변수들을 나타낸다 (Ju and Lee, 2000, 2001; Kim and Lee, 2009). 입자 강화 복합재료내의 현재 응력 크기 (ensemble averaged current stress norm) 및 자세한 탄소성 모델은 Kim and Lee (2009)에 자세히 나타나 있다.

입자 강화 복합재료 내 강화재와 기지재 사이의 계면에서의 누적 손상 또한 입자 강화 복합재료의 거동에 영향을 미친다. 본 연구에서는 이러한 계면에서의 손상은 강화재의 내부 응력과 Weibull 확률 밀도 함수에 의해 지배된다고 가정하였다 (Lee, 2001). 특히, 현 시점에서의 계면 손상 (current damage stage)에 따른 강화재의 내부 응력 및 Weibull parameter의 변화는 그 후에 이어서 발생하는 계면 손상 (subsequent damage stage)에 영향을 미치는 누적 손상 개념을 고려하였다 (Kim and Lee, 2009). 이러한 누적 손상을 고려한 입자 강화 복합재료 내 강화재의 체적비는 다음과 같다 (Kim and Lee, 2009).

$$\phi_3 = \Phi \left[1 - \exp \left\{ - \left[\frac{(\bar{\sigma}_p)_+}{(S_0)_1} \right]^M \right\} \right] \cdot \left[1 - \exp \left\{ - \left[\frac{[(\bar{\sigma}_p)_2 - (\bar{\sigma}_p)_1] + (\sigma_{eq})_+}{(S_0)_2} \right]^M \right\} \right] \quad (2)$$

$$\phi_2 = \Phi \left[1 - \exp \left\{ - \left[\frac{(\bar{\sigma}_p)_+}{(S_0)_1} \right]^M \right\} \right] - \phi_3 \quad (3)$$

$$\phi_1 = \Phi - \phi_2 - \phi_3 \quad (4)$$

여기서, ϕ, ϕ_1, ϕ_2 는 각각 초기 입자 강화재의 체적비, 부분 계면 손상을 가진 입자 강화재 (partially debonded particle), 전계면 손상을 가진 입자 강화재 (completely debonded particle)를 의미한다. $(\bar{\sigma}_p)_r, (S_0)_r, M$ 은 각각 입자 강화재의 내부 응력과 Weibull parameters를 말하며, $(\cdot)_r$ 는 r 상을 의미한다. 또한 $(\sigma_{eq})_1$ 은 등가 응력 (equivalent stress)로써 $(\sigma_{eq})_1 = (\bar{\sigma}_p)_1 \left[\frac{(S_0)_2}{(S_0)_1} \right]$ 의 형태로 표현

된다. 자세한 누적 손상 내용은 Kim and Lee (2009)에 나타나 있다.

3. 수치해석

본 연구에서는 Kim and Lee (2009)에 의해 소개된 누적 손상을 고려한 탄소성 모델을 통해 다양한 수치 해석이 수행되었으며, 손상 정도에 따른 거동 분석을 위해 다양한 손상 변수에 따른 연구 (parametric study)가 수치해석을 통해 수행되었다. 수치해석을 통해 강화재와 기지재 사이 계면에서의 누적 손상 및 기지재의 연성 거동의 특성을 분석하였고, 탄성거동·누적손상에 의한 비선형 거동·기지재에서의 연성거동의 3단계로 이루어진 입자강화 복합재료의 비선형 거동을 예측할 수 있었다. 또한, 제안된 누적 손상 탄소성 모델의 적용을 위해 해석모델의 예측값을 관련 실험값 (Papazian and Adler, 1990; Llorca et al, 1991)들과 비교하였으며, 제안된 모델이 입자강화 복합재료의 누적 손상 탄소성 모델로서 적합한 것을 알 수 있었다. 자세한 수치 해석 및 분석은 Kim and Lee (2009)에 나타나 있다.

4. 결론

본 연구에서는 입자 강화 복합재료 내에서의 손상을 고려한 미세역학 기반 탄소성 모델 (Kim and Lee, 2009)이 소개되었다. Kim and Lee (2009)에서는 입자 강화 복합재료의 탄소성 모델을 위해 강화재와 기지재 사이 계면에서의 누적 손상 및 기지재의 연성 거동을 고려하였으며, 수치해석을 위해 제안된 해석모델의 예측값을 관련 실험값 (Llorca et al., 1991)과 비교하였다. 향후 본 연구에서는 parametric study를 포함한 관련 변수를 검증하는 다양한 수치해석을 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 스마트 사회기반시설 연구센터로부터 지원된 연구비[R11-2002-101-02003 (2009)]와 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT핵심기술개발사업[2008-F-044-01, 전자과, 음향 및 건물 환경을 개선하는 지능형 건설 IT 융합 신기술 개발]의 일환으로 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Drabek, T. and Böhm, H.J. (2005) "Damage models for studying ductile matrix failure in composites," *Composite Science and Technology*, 32, pp. 329~336.
- Ibrahim, I.A., Mohamed, F.A., and Lavernia, E.J. (1991) "Particulate reinforced metal-matrix composites—a review," *Journal of Materials Science*, 26, pp. 1137~1156.
- Ju, J.W.. and Lee, H.K. (2000) "A micromechanical damage model for effective elastoplastic behavior of ductile matrix composites considering evolutionary completely particle debonding," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 183(3, 4), pp. 201~222.
- Ju, J.W.. and Lee, H.K. (2001) "Micromechanical damage model for effective elastoplastic behavior of partially debonded ductile matrix composites," *International Journal of Solids and Structures*, 38(36, 37),