

입자보강 복합재료에서 크기효과 – Size-Dependent 소성역학

김승호[#] · 허 훈¹ · H. Thomas Hahn²

The Size Effect in Particulate Composite Materials – Size-Dependent Plasticity

S. H. Kim, H. Huh, H. Thomas Hahn

Abstract

This paper briefly reviews various existing methods to account for the effect of particle size on mechanical properties of particulate metal matrix composites. A simple and easy method is to use a size-dependent constitutive equation for the matrix. The suggested method does not require the development of a new computational algorithm and is compatible with any standard finite element software. Finite element analyses have been carried out to show how the deformation behavior of a metal matrix composite changes as the particle size and volume fraction are varied.

Key Words : Metal matrix composite, Material length scale, Particle size effect, Finite element analysis

1. 서 론

입자로 보강되는 금속모재복합재료(MMC, Metal Matrix Composite)는 저밀도, 고에너지, 고강성, 피로특성과 같은 기계적 특성은 물론 열적, 화학적 특성이 우수하여 자동차 부품, 항공우주산업, 군수산업 및 반도체의 기질 및 포장과 같이 무게의 감소가 요구되는 분야에서 널리 이용되고 있다. MMC의 기계적 특성은 보강재의 강도, 형상, 크기, 체적함유율 및 보강재-모재 사이 계면특성 등에 의해 좌우된다. 이러한 다양한 영향중에서, 보강재의 크기가 MMC의 기계적 특성에 미치는 영향을 마이크론 단위에서 실험적으로 관찰되어왔다. 입자보강 MMC의 강도, 항복응력 및 연성은 보강재의 크기가 작아질수록 증가하는 것으로 알려져 있다[1].

이러한 경향이 나노 단위에서도 똑같이 관찰될 것인지에 대한 실험적인 증명을 제대로 이루어지

지 않고 있다. 따라서, 나노크기의 보강재가 MMC의 강화에 미치는 영향을 이론적으로 파악하는 연구의 수행이 필요할 것이다.

MMC에서 보강재의 크기효과를 고려하기 위한 다양한 이론적인 연구들이 수행되어 왔다. 이러한 연구들은 크게 이산 전위 소성 이론 (Discrete Dislocation Plasticity Theory) [2], 비국소 소성역학 (Non-local Plasticity) [3], 변형률구배법 (Strain Gradient Method) [4] 및 크기-의존(Size-dependent, SD) 소성역학 [5]으로 구분된다. 이러한 방법들 중에서 SD 소성역학만이 새로운 구성방정식의 필요 없이 기존의 유한요소 프로그램에 간단하게 적용할 수 있다. 본 논문은 SD 소성역학을 기본으로 한 방법을 선택하여 유한요소 해석을 수행하였다. 상용유한요소 코드를 이용하였을 경우, 제안된 방법이 SiC/Al MMC에서 보강재의 크기와 체적함유율의 영향을 잘 예측할 있음을 보였다.

삼성코닝정밀유리 muzel@dreamwiz.com

1. 한국과학기술원 기계공학과

2. Mechanical and Aerospace Engineering, UCLA

2. Size-Dependent Plasticity

연속체역학을 근간으로 한 고전적인 소성역학은 MMC 에서 보강재의 크기나 체적함유율에 따른 기계적 물성치를 효과적으로 예상하는데 어려움이 있다. Localized Dislocation Model 이나 분자 동역학을 미세한 보강재 크기에 적용할 수 있겠으나, 복잡한 수식과 오랜 계산시간이 소요되어 다양한 현실적인 해석 모델에는 여전히 적용하기 힘든 현실이다. MMC 에서 보강재의 크기 효과를 설명하기 위해 다양한 이론적인 접근법이 제안되어 왔다. 이러한 이론적 방법들에는 모재의 변형 중에 전위를 선형의 결합으로 모델링 한 이산 전위 소성 이론, 순간 접선 계수를 재료의 길이단위를 고려하여 수정한 비국소 소성역학, 고차원의 응력항을 이용하여 변형률 구배를 구성방정식에서 이용하는 변형률 구배법 및 보강재의 크기와 체적함유율에 따라서 모재의 응력-변형률 관계식을 수정한 SD 소성역학 등이 있다. SD 소성역학 이외의 방법들은 MMC 에서 보강재의 크기의 감소에 따라 변형률 경화가 증가함을 설명할 수는 있으나, 새로운 전산적인 기법이 개발되어야 하므로 기존의 상용 유한요소프로그램에 적용하기 힘든 단점이 있다.

SD 소성역학은 Nan 과 Clarke[5]에 의하여 제안된 방법으로 고전적인 소성역학이 재료의 구성방정식에 그대로 유지되어 있다. MMC 의 변형률-응력 관계식은 (1)식과 같다

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + c \frac{\sigma_0^m}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0^m} \right)^{1/n} \quad (1)$$

여기서 σ_0^m 은 항복응력, c 는 무차원 상수를 나타낸다. 그러나 σ_0^m 은 상수가 아니고, 소성변형률의 변화에 따라 (2)식과 같이 수정되어진다.

$$\sigma_0^m = \sigma_0 + \Delta\sigma^m \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta\sigma^m &= \sigma_{or} + \sigma_{iso} + \sigma_{kin} \\ &= \alpha\mu b \sqrt{\frac{4V_p}{\pi d^2}} + \beta\mu \sqrt{\frac{b\epsilon_c^p V_p}{d}} + \gamma\mu V_p \sqrt{\frac{b\epsilon_c^p}{d}} \end{aligned} \quad (3)$$

(3)식에서 첫 번째 항은 직경이 d 인 보강재들의 배열을 전위들이 통과하는데 필요한 Orwan 응력항이고, 두 번째 항과 세 번째 항은 각각 기하적으로 필요한 전위들에 관련된 등방 및 운동 변

Table 1 Material Properties

Material	E, GPa	μ , GPa	σ_0 , MPa	n	c
Aluminum Matrix (Al 356 T4)	70.0	26.3	86	0.212	0.429
SiC Particle	427	182	N.A	N.A	

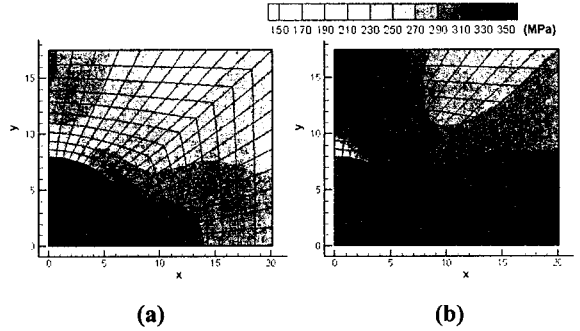


Fig. 1 Comparison of von Mises stress distributions, $V_p=15\%$; (a) SI plasticity; (b) SD plasticity.

형률구배 효과를 나타내는 항이다. (3)식에서 V_p 는 보강재의 체적함유율, μ 는 전단계수, b 는 Burgers vector, α (~1)와 β (~0.4), γ (~2) 는 각각 상수를 나타낸다. (1-3)식에서 알수 있듯이, SD 구성방정식은 보강재의 크기 정보를 요구하는데 이것은 보강재의 크기에 따라 모재의 구성방정식이 수정되어야 함을 의미한다. 그러나, 이 방법은 일반적인 상용 유한요소 프로그램에 쉽게 적용이 가능하므로, 본 논문에서는 MMC 의 응력-변형률 거동을 살펴보기 위하여 상기와 같은 SD 구성방정식을 이용하였다.

3. SD 소성역학을 이용한 유한요소해석

본 논문에서는 상용유한요소 코드인 ABAQUS / Standard 를 이용하여 SiC / Al MMC 의 거동을 SD 구성방정식을 이용하여 해석하였다. 기하적인 대칭성을 고려하여 대칭 경계조건을 부가하였고, x-축의 끝단에 균일한 변위 경계조건을 부가하여 해석을 수행하였고 대칭면 이외의 면들은 대칭면과 평행을 유지하도록 하는 주기 경계조건을 부가하였다. Table 1 에 해석에 이용한 재료의 물성치를 나타내었다.

Fig. 1 은 Size-Independent (SI) 소성역학과 SD 소성역학의 해석으로부터 계산된 von Mises 응력을 비교한 것이다. SD 소성역학의 결과가 더 높은 응력을 예측하고 있음을 알 수 있는데, 이는 보강

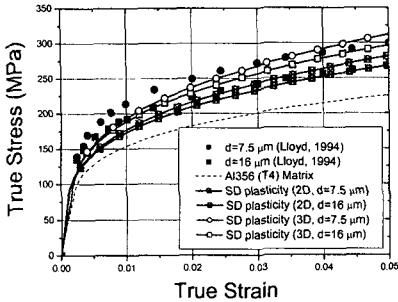


Fig. 2 Predicted size effects compared with experimental data: $V_p=15\%$.

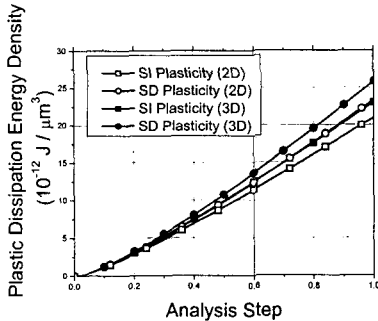


Fig. 3 Comparison of plastic dissipation energy densities: $V_p=15\%$.

재의 크기 효과와 체적함유율, 전위의 움직임을 고려한 구성방정식에 의하여 모재의 변형을 경화를 미리 가정하였기 때문이다. Fig. 2 는 해석으로 예측된 복합재료의 응력-변형을 관계식을 실험결과와 비교한 것이다. 두가지 다른 보강재의 크기에 대하여 3 차원 해석의 경우가 2 차원 해석의 경우보다 실험결과[1]와 잘 일치하고 있음을 알 수 있는데, 이는 2 차원 결과는 원통형 보강재를 가정하였기 때문에 실제와는 차이가 나는 것이다. 예상했던 대로, 보강재의 직경이 7.5 μm 인 경우 기존의 구성방정식에 비하여 SD 구성방정식의 결과가 높은 응력상태를 보이고 있음을 알 수 있다. 기존의 고전적인 소성역학의 관계식은 복합재료의 응력-변형을 관계식에 보강재의 크기 효과는 전혀 나타내지 않고 있음을 주지하여야 할 것이다.

Fig. 3 은 2 차원 해석과 3 차원 해석에 대하여 단위 체적당 소성변형에너지지를 비교한 것이다. 3 차원 해석의 경우 더 많은 소성변형 에너지 밀도가 발생하였는데, 이는 동일한 체적함유율에 대하여 3 차원의 경우가 보강재의 직경이 더 크기 때

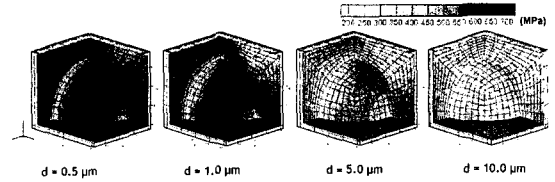


Fig. 4 Von Mises stresses decreasing with increasing particle size: $V_p=15\%$, applied strain = 0.05.

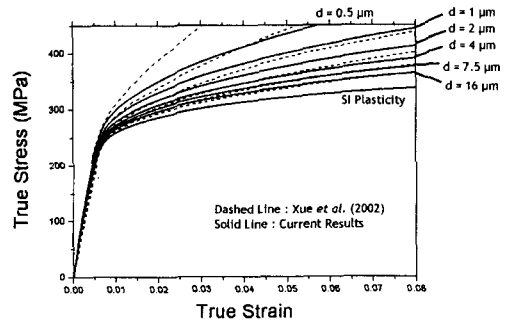


Fig. 5 Comparison with strain gradient method.

문에 (11)식에서 더 큰 변형률경화가 반영되었기 때문이다. SD 소성역학의 결과가 SI 소성역학의 결과에 비하여 더 높은 소성변형을 예측하였고, 이는 보강재의 크기 효과에서 발생한 강화 현상으로 설명되어질 수 있다.

보강재의 크기 효과를 나노 단위까지 확장하여 비교하기 위하여 보강재의 크기를 0.5 μm 에서 10 μm 로 변화시켜 해석을 수행하였고, 변형을 구배법, 유효 매개체 방법과 같은 다른 이론적인 방법들의 결과와 비교하였다. Fig. 4 는 보강재의 체적함유율이 15%인 경우에 대하여 보강재의 크기에 따른 von Mises 응력의 3 차원 해석결과 분포를 비교한 것이다. 보강재의 크기가 작아질수록 당연히 더 높은 응력이 발생하고 있음을 알 수 있다.

SD 구성방정식을 이용한 해석결과를 변형률구배 방법[4]과 Fig. 5 에 비교하였다. 두가지 방법이 보강재의 크기에 상관없이 거의 같은 복합재료의 응력-변형을 관계식을 예측하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6 은 유한요소 해석이 아닌 관계식을 통하여 응력-변형을 관계식을 예측하는 유효매개체 방법[5]의 결과와 비교한 것이다. 유효매개체 방법 역시 복합재료의 거동을 예측할 수는 있

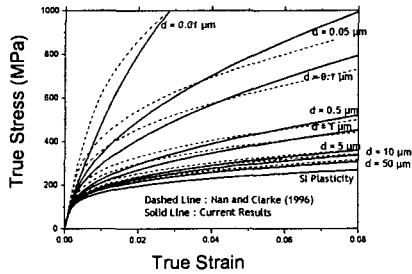


Fig. 5 Comparison with effective medium method.

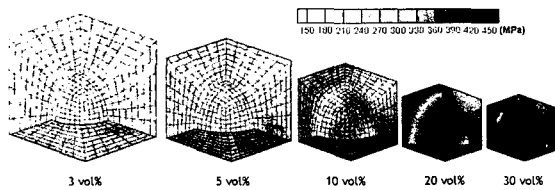


Fig. 6 Comparison of von Mises stress distribution w.r.t. particle volume fraction.

으나 보강재의 형상이 복잡해지거나 이중 이상의 보강재를 이용한 경우 적용할 수 없는 단점이 있다. Fig. 6 는 보강재의 체적함유율에 따른 von Mises 응력의 분포를 비교한 것이다. 체적함유율이 증가할수록 응력이 증가하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7 은 보강재의 체적함유율에 따른 진응력-변형률 관계식을 비교한 것이다. SI 소성역학에서는 예측할 수 없었던 높은 변형률 경화가 SD 소성역학을 이용한 경우 발생하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

MMC 에서 보강재의 크기가 작아질수록 보강재 사이의 내부간격과 관련하여 전위들의 움직임이 어려워지므로 변형률경화가 증가하는데, 이러한 강화효과는 다양한 이론으로 설명될 수 있다. 그러나, 대부분 전산적인 알고리즘의 새로운 개발이 요구되어 실제 현상에 적용할 수 없는 단점이 있다. 본 논문에서는 보강재의 크기, 체적함유율에 따라 모재의 응력-변형률 관계식을 수정하는 SD 소성역학을 MMC 의 해석에 적용하여 보강재의 크기와 함유율에 따른 복합재료의 강화현상을 설명하였고, 대표적인 이론들과 정량적으로 비교

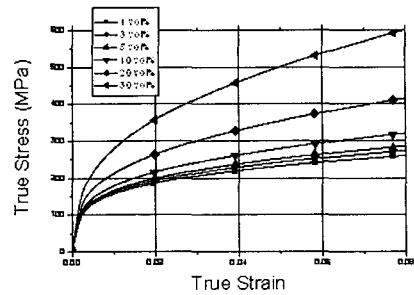


Fig. 7 Comparison of true stress-strain curves w.r.t. particle volume fraction

하고 검증하였다. 본 논문에서 제안된 방법을 나노단위의 보강재에 적용하기 위해서는 기존의 SD 구성방정식을 적절히 수정하고 실험치와 비교하여 검증할 필요성이 있을 것이다.

후 기

본 연구는 Office of Naval Research (USA, N00014-02-1-0642)와 한국과학재단의 2003 년도 전반기 해외포닥연수 (M01-2003-000-10014-0)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] D.J. Lloyd, 1994, Particle reinforced aluminum and magnesium matrix composites, *Int Mater Rev.* Vol., pp. 1 ~ 23.
- [2] H. H. M. Cleveringa, *et al.*, 1997, Comparison of discrete dislocation and continuum plasticity predictions for a composite material, *Acta Mater.*, Vol. 45, pp. 3163 ~ 3179.
- [3] A. Acharya and J. L. Bassani, 2000, Lattice incompatibility and a gradient theory of a crystal plasticity, *J. Mech. Phys. Solids.*, Vol. 48, pp. 1565 ~ 1595.
- [4] Z. Xue, *et al.*, 2003, Particle size effect in metallic materials: a study by the theory of mechanism-based strain gradient plasticity, *Acta Mater.*, Vol. 50, pp. 149 ~ 160.
- [5] C. W. Nan and D. R. Clarke, 1996, The influence of particle size and particle fracture on the elastic/plastic deformation of metal matrix composites, *Acta Mater.*, Vol. 44, pp. 3801 ~ 3811.