

기하적 필수 전위에 의한 길이효과를 고려한 입자 강화 복합재의 강도해석

서영성[#] · Shailendra P. Joshi¹ · K. T. Ramesh²

Strength Analysis of Particle-Reinforced Composites with Length-Scale Effect based on Geometrically Necessary Dislocations

Y. S. Suh, Shailendra P. Joshi, K. T. Ramesh

Abstract

An enhanced continuum model for the size dependent strengthening of particle reinforced composites is presented. The model accounts explicitly for the enhanced strength in a discretely defined “punched zone” around the particle in a metal matrix composite as a result of geometrically necessary dislocations developed through a CTE mismatch. The size of the punched zone presents an intrinsic length scale, and this results in the size dependence of the overall behavior of the composite. Results show that predicted 0.2% offset yield stresses are increasing with smaller inclusions and larger volume fractions and this length-scale effect on the enhanced strength can be observed by explicitly including GND region around the particle.

Key Words : Metal Matrix Composites, Geometrically Necessary Dislocations), Length-Scale Effect, Finite Element Analysis

1. 서론

입자강화 금속 기지 복합재 (particle-reinforced metal matrix composites, MMC)는 통상 강화하지 않은 기지재(matrix)에 비하여 높은 비강도와 비강성도를 갖기 때문에 자동차 및 항공 우주 산업에서 주요 부품에 사용되고 있다. Arsenault and Shi[1], Lloyd[2], 등 다수의 연구자들에 의하면, MMC는 특별히 입자의 크기가 작아지면, 그 강도가 증가함을 보고한 바 있다. 이는 복합재를 성형한 후 냉각을 할 때 입자와 기지재의 상이한 열팽창계수 때문에 빚어지는 잔류응력이 소성 풀림(plastic relaxation)되면서 입자 주위에 편칭(punching)되는

전위 때문인 것으로 관찰되었다[1-3]. 이 전위는 이미 형성된 통계적 축적 전위(statistically stored dislocation, SSD)위에 추가적으로 형성되는 기하적 필수 전위 (geometrically necessary dislocation, GND)라 불린다[4]. 전통적인 소성이론만으로는 입자의 크기에 의존하는 강도 효과를 제대로 나타낼 수 없었는데, 이 GND를 고려하면서, 미세 구조에서의 입자 크기에 의존하는 강화기구를 제대로 설명할 수 있게 되었다. 대표적인 관련이론으로서, 물리적 크기 규모가 작아지면 응력이 국부 지점 및 그 주위의 변형을, 즉 변형을 구배에 영향을 받아 증가되는 것을 설명하는 구배 소성이론 (strain-gradient plasticity, SGP)이 있는데[5,6], SGP는

[#] 교신저자: 한남대학교 기계공학과, E-mail: suhy@hnu.kr

1. National University of Singapore, Department of Mechanical Engineering

2. Johns Hopkins University, Department of Mechanical Engineering

단위 셀이나 실제 미세구조 모델에서의 변형을 구배를 계산하여 크기 의존 효과를 비교적 잘 나타낼 수는 있으나, 복합재 단위 셀의 경우, GND가 셀 전체에 형성되었다고 가정하여 유동응력을 계산하기 때문에 복합재의 입자크기 의존 효과를 고려하여 국부적으로, 특히, GND의 외부 경계 영역에서 현격한 응력차이로 인해 일어날 수 있는 연성 파손의 위치를 정확히 예측하기는 어렵다.

본 연구에서는 전위 역학과 연계하여 Abaqus[7]를 활용하여 전통적인 연속체 역학적인 방법으로 금속기지 복합재의 크기 의존 효과를 보다 간단하고도 효율적으로 모델링하는 방법을 제시한다.

2. 이론 및 모델링

금속기지 복합재를 제조할 때 입자와 기지재간 열팽창계수의 상이함으로 인해 냉각시에 잔류응력이 발생한다. 이 잔류응력이 어느 일정한 값을 상회하면 응력을 완화(relax)하기 위하여 전위가 기지재에 편칭된다. 편칭거리를 계산하기 위하여 본 연구에서는 Shibata 등[8]이 유도한 식을 적용하였다. 이들은 Eshelby 이론을 이용하여 열팽창계수의 상이함으로 비롯되는 고유변형률(eigenstrain)을 균일하게 희석하는 개념을 적용함으로써 구형 입자로부터 발생하는 전위를 분석하고, 소성일로 인한 에너지 발산을 정확히 계산하였으며 편칭거리를 입자의 크기, 입자의 체적비, 기지재의 전단항복 응력, 입자와 기지재의 열팽창계수, 입자와 기지재의 Lamé 상수, 그리고 입자와 기지재의 전단탄성계수의 함수로 나타내었다.

편칭된 전위 영역 내의 전위밀도 ρ 는 열팽창계수의 상이함으로 인한 변형율을 풀기 위하여 편칭된 다면 루프의 총길이를 소성영역의 체적으로 나누는 것으로 정의하였다. 본 연구에서는 Dunand와 Mortensen[9]이 단결정 기지재를 가정하여 유도한 전위 밀도식을 활용하고, Arsenault와 Shi[1]가 사용했던 것과 같은 강도-전위 관계식을 적용해서 유동 응력을 계산한 후, 이 값을 GND 영역 안의 유동응력으로 할당하였다.

축대칭 요소로 모델링 된 단위 셀을 Fig. 1에 보인다. 재료는 SiCp/A356-T6 복합재를 선정하였으며, Abaqus를 활용하여 축대칭 단위 셀(unit cell)로 모델링하였다. 수직 대칭축의 상대편에 있는 변에

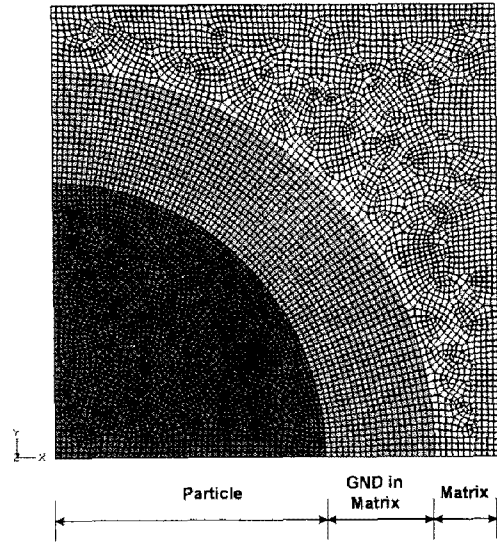


Fig. 1 Finite element meshes of an axisymmetric unit cell with perfectly bonded interface

는 주기적 대칭 조건을 부여하여 견인력(traction)이 영이며 변이 직선을 유지하며 움직일 수 있도록 하였다. 단위 셀의 상부에는 인장하중을 가하기 위하여 일정한 변위를 지정하였다. SiC 입자는 등방성과 탄성을 가지는 것으로 가정하였으며, 이것의 탄성계수와 프와송비, 열팽창계수는 각각 427 GPa, 0.17, 및 $4.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 이다. A356-T6 알루미늄 합금 기지재는 등방성과 탄소성을 가정하였고 버거 벡터(Burgers vector)는 0.283 nm로 가정하였다. 기지재의 항복 응력, 탄성계수, 프와송비, 열팽창계수는 각각 208 MPa, 76 GPa, 0.33, 및 $23.63 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 이다. 단축 응력 - 소성변형율의 관계식은, Lloyd[2]의 실험측정치로부터 Qu 등[10]이 피팅(fitting)하여 얻은 데이터를 활용하였다. GND 영역 내의 탄성 물성값은 기본적으로 기지재의 물성값과 동일하며, 유동응력은 편칭거리와 전위 밀도로부터 계산하여 할당하였다. 복합재 성형 후 냉각시 최대 변화온도는 474°C 로 가정하였다.

3. 결과

입자의 체적비가 15%, 크기가 $7.5 \mu\text{m}$ 및 $16 \mu\text{m}$ 인 경우 복합재의 진응력 - 진변형율의 예측 및 실험치를 Fig. 2에 보인다. 비교를 위하여 GND가 없는 경우(전통적인 소성이론에 상응하며, 입자의

크기에 상관없이 동일한 응력이 계산된다)의 예측치를 포함하였다. 변형율이 상당히 증가하면 파손이 일어날 수 있기 때문에, 변형율이 0.012에 이를 때까지만 나타내었다. GND가 없는 경우를 제외하고는 예측치가 실험치와 잘 들어맞음을 볼 수 있으며, 실험치와 마찬가지로 입자의 크기에 따라 강도가 변화하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3(a)는 입자크기에 따른 복합재의 표준화(normalized) 항복응력을 체적비 (강화 입자가 전혀 없는 체적비 0의 경우도 포함)에 대하여 도시한 것이다. 항복응력은 0.2% 오프셋을 적용하였다. 전체적으로 입자 크기가 작아질수록, 체적비가 커질수록 항복응력이 커짐을 관측할 수 있다.

즉, 입자 크기의 강도에 대한 영향은 작은 입자로 큰 체적비를 갖는 복합재의 경우에 더 명백하다. 입자크기가 커질수록, GND 영역의 강도가 기저재의 강도에 가까워지기 때문에 항복응력은 GND가 없는 경우의 항복응력에 가까워진다. 이와 유사한 거동을 McDanelis[11] ($\text{SiC}_p/\text{Al6061-T6}$), Llorca 등[12] ($\text{SiC}_p/\text{Al2024-T6}$) 등이 실험을 통해서 관찰한 바 있다.

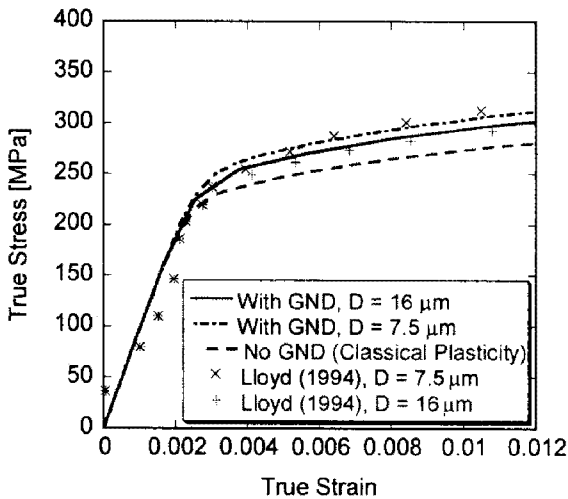


Fig. 2 Comparison of numerical and experimental [2] composite true stress - true strain curves for particle sizes of $D = 7.5 \mu\text{m}$ and $16 \mu\text{m}$. For reference, a numerical result without GND (corresponding to the classical plasticity) is included.

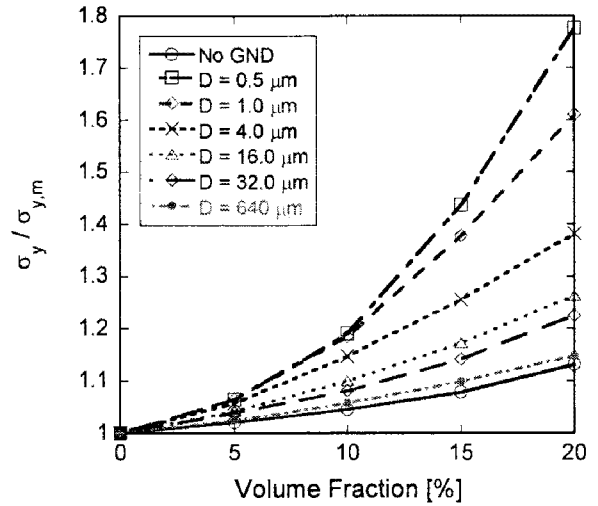


Fig. 3(a) Normalized composite yield stresses (0.2% offset) vs. volume fractions

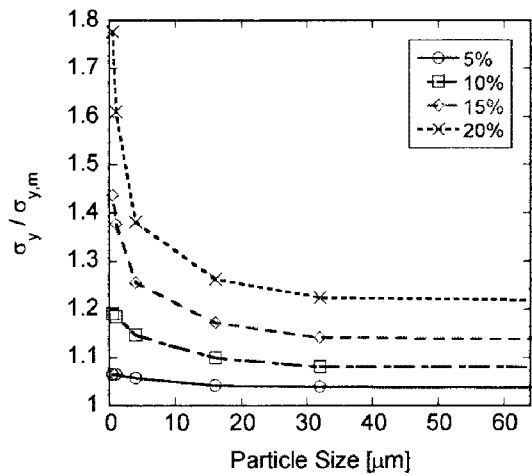


Fig. 3(b) Normalized composite yield stresses (0.2% offset) vs. particle sizes

Fig. 3(b)는 체적비에 따른 복합재의 표준화(normalized) 항복응력을 입자 크기에 대하여 도시한 것이다. 항복응력이 입자크기가 커지면서 감소하는 것을 보여주며 이는 체적비가 커질 때 더 뚜렷하게 보인다. Arsenault 등[13]도 $\text{SiC}_p/\text{Al1100}$ 이 체적비 20%일 때, 유사한 경향을 보였다.

4. 결론

유한요소법을 활용한 미세구조 모델링을 통하여 입자 주위를 둘러싼 GND에 의한 길이 스케일

의존 강화효과를 보였다. 이 방법은 연속체 역학적으로 접근하였으며, 각 입자 주위에 소성 편칭으로 인해 형성되는 GND의 크기를 계산하고, 이로 인한 밀도 및 GND 영역의 유동응력을 구한 후, 이를 기반으로 유한요소로 모델링하였다. 경계면에서 파손이 없다고 가정할 때, 입자크기가 작아질수록, 그리고 체적비가 커질수록 0.2% 오프셋 항복응력이 증가함을 보였다. 입자의 크기가 일정할 경우에는 체적비가 증가할수록 GND에 의한 응력 증가가 더 큼을 보였다. 이 결과들은, 비록 재료성분은 다르지만, 입자의 크기와 체적비가 강도변화에 직접적인 관계가 있음을 관찰한 기존의 실험결과들과 정성적으로 일치함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 첫번째 저자가 2008년 한남대학교 교비학술연구비로 부분적인 도움을 받아 미국 Johns Hopkins University에서 연구 연가를 수행하는 중에 이루어진 것이며, 두 기관의 지원에 대하여 감사드립니다. 본 발표 내용은 동일한 저자들이 Journal of Mechanics and Physics of Solids에 투고하여 현재 심사중인 An Enhanced Continuum Model for Size-Dependent Strengthening and Failure of Particle Reinforced Composites의 일부분입니다.

참 고 문 헌

- [1] R. J. Arsenault, N. Shi, 1986, "Dislocation Generation due to Differences between the Coefficients of Thermal Expansion," *Materials Science and Engineering*, Vol. 81, pp. 175~187.
- [2] D. J. Lloyd, 1994, Particle Reinforced Aluminum and Magnesium Matrix Composites, *International Materials Reviews*, Vol. 39, No. 1, pp.1~23.
- [3] M. Vogelsang, R. J. Arsenault, R. M., Fisher, 1986, "An In Situ HVEM Study of Dislocation Generation at Al/SiC Interfaces in Metal Matrix Composites," *Metallurgical transactions A*, Vol. 17, No. 3, pp. 379~389.
- [4] M. F. Ashby, 1970, The Deformation of Plastically Non-homogeneous Materials, *Philosophical Magazine*, Vol. 21, No. 170, pp. 399~424.
- [5] N. A. Fleck, J. W. Hutchinson, J.W., 1993, A Phenomenological Theory for Strain Gradient Effects in Plasticity, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 41, pp. 1825~1857.
- [6] N. A. Fleck, G. M. Muller, M. F. Ashby, J. W. Hutchinson, 1994, Strain gradient plasticity theory and experiment, *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 42, pp. 475~487.
- [7] Abaqus V6.8, 2008, SIMULIA/Dassault Systèmes, Providence, RI.
- [8] S. Shibata, M. Taya, T. Mori, T. Mura, T., 1992, Dislocation Punching from Spherical Inclusions in a Metal Matrix Composite, *Acta Metallurgica Et Materialia*, Vol. 40 No. 11, pp. 3141~3148.
- [9] D. C. Dunand, A. Mortensen, 1991, On Plastic Relaxation of Thermal Stresses in Reinforced Metals, *Acta Metallurgica Et Materialia*, Vol. 39, No. 2, pp. 127~139.
- [10] S. Qu, T. Siegmund, Y. Huang, P. D. Wu, F. Zhang, K. C. Hwang, 2005, A Study of Particle Size Effect and Interface Fracture in Aluminum Alloy Composite via an Extended Conventional Theory of Mechanism-based Strain-Gradient Plasticity, *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp.1244~1253.
- [11] D. L. McDanel, 1985, Analysis of Stress-Strain, Fracture, and Ductility Behavior of Aluminum Matrix Composites Containing Discontinuous Silicon Carbide Reinforcement, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 16, No. 6, pp. 1105~1115.
- [12] J. Llorca, A. Needleman, 1992, An Experimental and Numerical Study of Cyclic Deformation in Metal-Matrix Composites, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 23, No. 3, pp. 919~934.
- [13] R. J. Arsenault, L. Wang, C. R. Feng, 1991, Strengthening of composites due to microstructural changes in the matrix, *Acta Metallurgica Et Materialia*, Vol. 39, No. 1, pp. 47~57.