

변형률 구배 소성을 고려한 입자 강화 알루미늄 복합재의 크기 종속 강화 모델링[§]

서영성^{*†} · 박문식^{*} · 송 승^{*}

* 한남대학교 기계공학과

Modeling of Size-Dependent Strengthening in Particle-Reinforced Aluminum Composites with Strain Gradient Plasticity

Yeong Sung Suh^{*†}, Moon Shik Park^{*} and Seung Song^{*}

* Dept. of Mechanical Engineering, Hannam Univ.

(Received December 13, 2010 ; Revised April 22, 2011 ; Accepted March 14, 2011)

Key Words : Particle-Reinforced Aluminum Composites(입자강화 알루미늄 복합재), Strain Gradient Plasticity(변형률 구배 소성), Finite Element Modeling(유한요소 모델링), Dislocation Punching(전위 편칭), Particle Size Dependency(입자 크기 의존성)

초록: 입자강화 알루미늄 복합재의 강도를 계산하기 위하여 압밀 후 냉각할 때 일어나는 전위 편칭을 유한요소로 모델링 하였다. 다양한 입자의 체적비에서 입자의 크기가 강도에 미치는 영향을 고려하기 위하여 강화 입자 주위에 변형률 구배 소성과 테일러 전위 모델을 적용하였다. 변형률 구배는, 구형 단위 셀이 냉각하는 동안 입자와 기지재의 열팽창계수 차이에 의한 전위 편칭이 일어날 때 형성되는 등가소성변형률로부터 구하였다. 편칭된 영역에 걸쳐 평균적으로 변형률 구배를 고려함으로써 항복 응력이 증가하는 것을 관찰하였다. 유한요소 해석을 활용하여 다양한 입자 크기와 체적비에 대하여 SiC 강화 알루미늄 356-T6 복합재의 축대칭 단위 셀의 인장시 강도의 변화를 예측하였다. 예측된 강도는 실험 데이터와 잘 일치하며, 입자 크기 의존 효과를 분명히 보인다.

Abstract: This study proposes finite element modeling of dislocation punching at cooling after consolidation in order to calculate the strength of particle-reinforced aluminum composites. The Taylor dislocation model combined with strain gradient plasticity around the reinforced particle is adopted to take into account the size-dependency of different volume fractions of the particle. The strain gradients were obtained from the equivalent plastic strain calculated during the cooling of the spherical unit cell, when the dislocation punching due to CTE (Coefficient of Thermal Expansion) mismatch is activated. The enhanced yield stress was observed by including the strain gradients, in an average sense, over the punched zone. The tensile strength of the SiC_p/Al 356-T6 composite was predicted through the finite element analysis of an axisymmetric unit cell for various sizes and volume fractions of the particle. The predicted strengths were found to be in good agreement with the experimental data. Further, the particle-size dependency was clearly established.

- 기호설명 -

α : 결정립 구조에 따른 재료 상수
 η : 소성변형에 의한 변형률 구배
 η_{ave} : 소성변형에 의한 변형률 구배의 평균값
 ρ_G : 기하학적 필수전위밀도

σ : 기지재의 항복응력
 $\Delta\sigma_{SG}$: 변형률 구배에 의하여 증가한 항복응력
 ξ : 변형률 구배에 의한 편칭 영역의 크기 비
 a : 냉각 전 입자의 반지름
 a' : 냉각 후 입자의 반지름
 A : 냉각 전 기지재의 반지름 (구형 단위 셀)
 A' : 냉각 후 기지재의 반지름 (구형 단위 셀)
 b : Burgers 벡터
 c : 강화 입자 주변에 냉각에 의하여 형성된 소성영역의 크기

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010.

11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

† Corresponding Author, suhy@hannam.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

- f : 강화 입자의 체적비
 l : 길이 스케일
 m : Taylor 계수
 \bar{r} : Nye 계수

1. 서 론

입자강화 금속 기지 복합재(Particle-reinforced Metal Matrix Composites, MMC)는 강화 하지 않은 기지재에 비하여 높은 비강도와 비강성도를 갖기 때문에 자동차, 항공 우주, 레저, 스포츠 산업에서 많이 사용 된다. Arsenault 와 Shi,⁽¹⁾ Lloyd,⁽²⁾ Nan 과 Clarke⁽³⁾ 등 다수의 연구자들은 실험을 통하여 MMC 의 강화 입자 크기가 작아 질수록 복합재 강도가 증가함을 보고한 바 있다. 이는 금속 기지 복합재료를 제조하기 위하여 입자와 기지 재료를 섞어서 가압하고 소결한(consolidated) 후 냉각할 때, 입자와 기지재 간의 열팽창계수(Coefficient of Thermal Expansion, CTE)의 차 때문에 발생하는 입자 주변에 형성되는 기하학적 필수전위의 영향에 의한 것으로 알려져 있다.^(1~4)

전통적인 소성 이론만으로는 입자 크기에 의한 강도 강화 효과를 설명할 수 없으며 복합재가 냉각될 때 입자 주위에 편칭되는 기하적 필수 전위를 고려함으로써 길이 스케일을 고려한 입자 크기 종속 강화 효과를 설명할 수 있는데, 크게 두 가지 방법으로 접근할 수 있다. 그 중 하나는, 최근에 Suh 등^(4,5)이 제시한 바와 같이, 우선 입자 주위에 형성되는 기하적 필수 전위 영역의 크기를 계산하고, 이 부분의 전위밀도를 구한 후, 이를 응력으로 환산하고, 입자, 기지재 안의 편칭 영역, 그리고 순수 기지재 영역으로 모델링 된 유한요소 단위 셀(unit cell)의 편칭 영역에 이 증가된 응력을 부가하는 방법이다. Suh 등^(4,5)은 구형입자의 경우 Shibata 등⁽⁶⁾이 제안한 편칭거리 식과 Ashby⁽⁷⁾ 전위밀도 식 또는 Taya⁽⁸⁾가 체적비를 고려하여 제안한 전위밀도 식을 활용하여 크기 의존에 의한 강도 강화 효과를 보여주었다. 그러나 이러한 방법은 입자 형상이 복잡하거나, 입자의 배열이 부분적으로 응집이 되는 등, 불균일하게 분포되어 있는 경우 각 입자 주위의 편칭 영역 크기를 수월하게 계산할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

또 다른 접근 방법은 금속의 항복이 오로지 한 질점의 소성변형률에만 의존하지 않고 그 질점

주변 다른 질점과의 상호작용에도 의존한다고 가정하는 변형률 구배 소성이론(Strain Gradient Plasticity, SGP)을 이용하는 것이다. Fleck 과 Hutchinson⁽⁹⁾은 변형률 구배에 대한 고차항의 경계조건과 지배방정식을 고려한 길이효과 정식화를 유도하였으며 초박판 굽힘, 미세 비틀림, 공극(void) 함유 금속에 대해 이를 적용하여 그 타당성을 보였다. Gao 와 Huang⁽¹⁰⁾은 고차 항을 배제한 비국부적 소성변형률 구배를 적용하여 정식화의 단순화를 시도함으로써 전통적 소성이론에 재료 모델을 바꾸어가면서 적용할 수 있도록 하였다. 이러한 연구들에 대하여 Evans 와 Hutchinson⁽¹¹⁾이 적절히 논평을 한 바 있다. 또한 Abu Al-Rub 과 Voyiadjis⁽¹²⁾는 Voce 유동응력 식을 채택하여 기하적 필수 전위가 통계적 축적 전위의 형성에 영향을 주는 비국부적 모델을 제시하고 더욱 광범위한 재질 및 형상에서 적용이 가능함을 보여 주었다. 이러한 변형률 구배 소성이론은 초박 구조물 및 입자 함유 금속 기지 복합재 뿐만이 아니라 공극 효과, 계면입계, 석출 계재물이 내재되어 있는 복합재의 미시 강도 평가에도 응용되고 있다.

본 연구에서는 임의의 입자 형상 및 배열을 갖는 금속기지 복합재의 강도평가를 효율적으로 수행하기 위하여 변형률 구배 소성이론의 적용 타당성을 검토하였다. 우선 단순화한 구형 유한요소 단위 셀로부터 냉각 후의 평균 소성 변형률 구배를 구하고 Taylor 전위모델과 결합하여 증가된 강도를 구하였다. 여기서 구한 강도는 Suh 등^(4,5)이 제시한 바와 같이 입자 주위의 편칭 영역에 할당하였다. 고려한 재료는 SiC 입자와 Al 356-T6 기지 기재로 구성된 금속 복합재이며 알루미늄의 거동을 고려하기 위하여 Hollomon 유동응력 식을 적용하였다. 유한 요소 계산은 Abaqus v. 6.9⁽¹³⁾를 활용하였다. 입자의 크기와 체적비를 변화시켜 가면서 실험값과 비교하고, 입자 크기에 의한 길이효과를 예측하였다. 또한 평균 변형률 구배 모델의 수렴성을 확인하기 위해서 편칭 영역을 세분화해 가면서 변형률 구배를 계산하고, 그에 따른 결과도 검토하였다.

2. 접근방법

2.1 구형 모델을 이용한 변형률 구배의 계산

금속 복합재에서 입자 주변의 기지재에 형성되는 강도 강화를 나타내는 모델로서 전위론에 기반

을 둔 Taylor 모델에 길이 효과를 변형률 구배와 연관시킨다면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \sigma_y + \Delta\sigma_{SG} \quad (1)$$

여기서 σ 는 알루미늄 기지재의 항복응력이고 $\Delta\sigma_{SG}$ 는 변형률 구배에 의하여 길이효과를 나타내는 강도강화 식 (2)와 같다.⁽¹⁴⁾

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{SG} &= m\alpha\mu b\sqrt{\rho_G} \\ &= m\alpha\mu b\sqrt{\bar{r}\frac{\eta}{b}} = \alpha\mu\sqrt{18b\eta} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\rho_G = \bar{r}\eta/b$ 는 기하학적 필수전위밀도, m 은 Taylor 계수(fcc 금속의 경우 3.08), \bar{r} 는 Nye 계수(fcc 금속의 경우 1.9), α 는 결정립 구조에 따른 재료 상수(금속의 경우 0.1~0.5), μ 는 전단 계수, b 는 Burgers 벡터(알루미늄의 경우 0.286 nm), η 는 소성변형에 의한 변형률 구배($\eta = \partial\varepsilon/\partial x$)이다.⁽¹²⁾ 한편 식 (2)는 길이 스케일 ℓ 로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta\sigma_{SG} = \sigma_{ref}\sqrt{\ell\eta} \quad (3)$$

여기서 $\ell = 18\alpha^2(\mu/\sigma_{ref})^2b$ 이다. σ_{ref} 는 응력 - 변형률 거동 식에서의 재료상수이다. 식 (2)로 강화된 강도를 계산할 때는 변형률 구배를 대입하여야 한다. 본 연구에서는 구형 강화 입자 주변의 η 를 구하기 위하여, 입자 주변 구형 기지재에 적용되는 구대칭 인장 변형식 (4)를 고려한다

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= \varepsilon_r; \quad \varepsilon_{\theta\theta} = -\frac{1}{2}\varepsilon_r; \quad \varepsilon_{\phi\phi} = -\frac{1}{2}\varepsilon_r \\ \varepsilon_{ij} &= 0 \quad \text{for all } i \neq j \end{aligned} \quad (4)$$

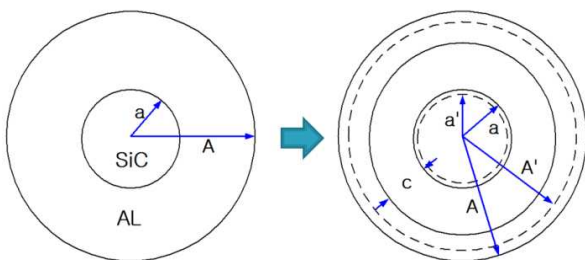


Fig. 1 Spherical unit cell model for the elastic-plastic cooling simulation

여기서 변형률은 소성변형률이며 비압축성 조건 $\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\theta\theta} + \varepsilon_{\phi\phi} = 0$ 을 부여한 것이다. 이제 식 (4)를 변형률 구배의 식 (5)에 대입한다.

$$\eta = \frac{1}{2}\sqrt{\eta_{ijk}\eta_{ijk}} \quad (5)$$

여기서, 성분표기는 다음과 같다.

$$\eta_{ijk} = u_{k,ij} = \varepsilon_{ik,j} + \varepsilon_{jk,i} - \varepsilon_{ij,k} \quad (6)$$

이로부터 구형입자 주변의 변형률 구배는 다음과 같이 유도된다.

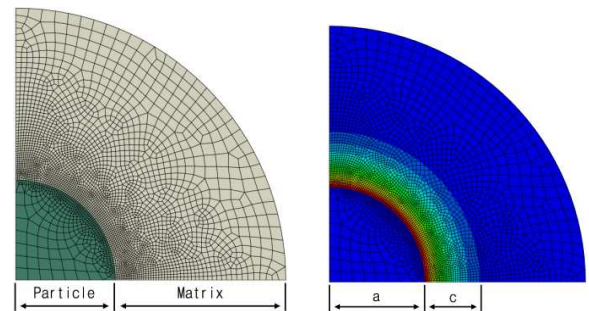
$$\eta = \frac{\sqrt{10}}{4} \left| \frac{d}{dr} \varepsilon_r \right| = \frac{\sqrt{10}}{4} \frac{d}{dr} \varepsilon_e \quad (7)$$

여기서 $\varepsilon_e = \sqrt{\frac{2}{3}\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij}}$ 는 등가 소성 변형률이다.

식 (2)에 나타난 강화 응력을 계산하기 위하여 식 (7)로부터 변형률 구배를 구한다. 이를 위하여 Fig. 1 과 같은 구형 단위 셀 모델에 대한 냉각과정을 탄소성 유한요소해석을 수행한 후 등가소성 변형률의 분포를 얻어, 구형입자 주변의 등가 변형률 미분 값을 구하였다.

요소의 배열은 Fig. 2(a)와 같으며 재료 물성값은 Table 1 과 같다⁽³⁾.

재료로는 SiC_p/A356-T6 복합재를 사용하였으며 Abaqus v. 6.9 를 활용하여 축대칭 단위 셀을 모델링하였다. Fig. 1 및 Fig. 2 에서 a 와 a' 은 냉각 전과 후의 입자의 반지름을, A 와 A' 은 냉각 전과 후의 기지재의 반지름을, c 는 냉각을 거쳐 입자 주위에 형성된 소성변형 영역을 가리킨다. 요소는 수렴성을 확인하면서 5000 개 안팎으로 조절하되,



(a) FE mesh

(b) Equivalent plastic strain

Fig. 2 Finite element meshes of the axisymmetric spherical model

보다 정확한 변형률 구배의 계산을 위해 입자 주변의 요소 밀도를 높였다.

냉각 계산에 의하여 Fig. 2(b)와 같은 등가 소성 변형률 분포를 얻고, 이로부터 입자 주위의 반경 방향 소성변형률 분포를 피팅(fitting)에 의해 Fig. 3에 보인 바와 같이 구하였다. 여기서 변형률을 미분하여 식 (7)에 보인 변형률 구배를 구하였다. 단, 좌표마다 달라지는 변형률 구배를 다음 식 (8)과 같은 영역 평균값으로 대체하여 강화된 항복강도를 계산하되, 영역을 1 개, 3 개, 5 개로 분할해 봄으로서 그 수렴성을 확인하였다.

$$\eta_{ave} = \frac{\sqrt{10}}{4} \frac{1}{c} \int_0^c \frac{\partial \epsilon_e(r)}{\partial r} dr \quad (8)$$

본 연구에서는 입자의 크기와 입자 체적비에 따른 강도강화의 경향을 구하고자 하였으므로 입자 지름은 $2a = 2, 7.5, 16 \mu\text{m}$, 그리고 입자의 체적비는 $f = 5, 15, 25\%$ 를 가정하여 총 9 가지 경우의 변형률 구배를 구하였다.

입자크기와 체적비의 조합에 따른 냉각 계산 결과와 변형률 구배, 편칭 영역의 크기 값 등을 Table 2에 수록하였다. Table 2를 보면 입자의 크기나 체적비가 다른 경우, 입자 주변의 ϵ_{max} 이나

ϵ_{avg} 는 크게 변화하지 않으나 평균 변형률 구배는 크게 차이가 난다. 동일 체적비에서는 입자 크기가 작아질수록 평균 변형률 구배가 커짐을 알 수 있고 상대적으로 동일 입자 크기에 대한 체적비의 영향은 그다지 크지 않다. 여기서 편칭 영역의 크기 비는 $\xi = (a+c)/a$ 인데, 참고로 Shibata 등⁽⁶⁾이 계산한 이론적 크기 비(ξ_{ref})를 수록하였다.

2.2 변형률 구배를 적용한 강화 모델링

인장 거동을 예측하기 위한 유한요소 모델링을 위하여 Fig. 4(a)와 같은 축 대칭 단위 셀을 이용하였다. 여기서 ESZ 라고 표시한 영역은 Fig. 2(b)에서 c 로 표시한 영역으로서 알루미늄 기지재의 변형률 구배에 의한 증가 응력(식 (1))을 적용할 강도 강화 영역(Enhanced Strength Zone)이다. 식 (1)과 (2)에 의한 강도 강화 값은 Table 3에 표시하였다. 입자 직경이 $7.5 \mu\text{m}$, 체적비가 15%일 때의 복합재 응력 - 변형률 선도를 Fig. 5에 보였다. 냉각과정에 의한 구형 모델로부터 계산한 변형률 구배를 Fig. 4(a)와 같은 강도 강화 영역에 할당할

Table 1 Material properties of SiC and Al 356-T6

Material	E (GPa)	Poisson's ratio	CTE (1/°C)	Flow stress (MPa)
SiC	427	0.17	4.3×10^{-6}	
Al 356-T6	76	0.33	2.36×10^{-5}	$\sigma = 464\epsilon^{0.136}$

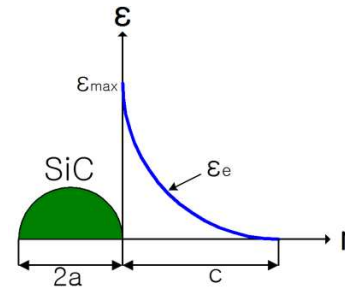
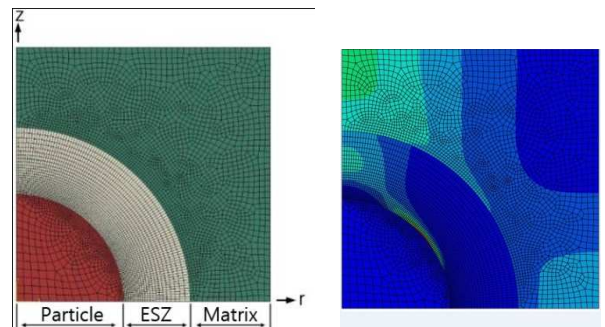


Fig. 3 Typical plastic strain distribution around a particle



(a) Mesh arrangement (ESZ: Enhanced Strength Zone) (b) Equivalent plastic strain at 2% composite strain

Fig.4 Finite element meshes of an axisymmetric unit cell model for $2a = 7.5 \mu\text{m}$ and $f = 15\%$

수 있는 이유는 구 대칭 변형장의 식 (4)와 단축 인장 변형률의 식이 같을 뿐만 아니라 항복응력에 있어서도 유사관계가 성립되기 때문이다.⁽¹⁰⁾

Fig. 4(a)에서 경계조건은 바닥과 좌측에 면 대칭으로, 상부 면을 따라서 수직 상향(인장)으로 동일한 변위를, 그리고 우측 면을 따라 수평 우측 방향으로 동일한 변위가 발생하도록 부가하였다.

인장 거동은 상부 면의 변위 또는 하중으로 조절하였으며 상부 면에 작용하는 힘을 해당 증분에서의 단면적으로 나누어 진응력을 구하고, 상부 면의 변위를 단위 셀의 원래 길이로 나누고 이를 진변형률로 변환함으로써 전체 복합재의 진응력 - 진변형률 관계를 구하였다. Fig. 4(b)에 전체변형률이 0.02 일 때의 등가 소성 변형률의 분포를 보

Table 2 Calculated plastic strain, plastic strain gradient and punching zone size due to cooling

f (%)	$2a$ (μm)	ϵ_{max} ($\times 10^{-3}$)	$\epsilon_{\text{ave}} = \frac{1}{c} \int_0^c \epsilon_e(r) dx$ ($\times 10^{-3}$)	η_{ave} ($\times 10^{-3} / \mu\text{m}$)	c (μm)	$\xi = (a + c) / a$	ξ_{ref}
5	2	16.45	6.12	18.90	0.66	1.66	1.18
5	7.5	15.51	5.90	5.00	2.33	1.62	1.18
5	16	15.60	5.86	2.30	5.02	1.63	1.18
15	2	15.13	5.79	18.40	0.61	1.61	1.17
15	7.5	15.20	5.72	4.80	2.34	1.62	1.17
15	16	15.19	5.78	2.30	4.92	1.62	1.17
25	2	14.76	5.69	18.30	0.60	1.60	1.15
25	7.5	14.87	5.60	4.70	2.32	1.62	1.15
25	16	17.05	5.99	2.30	5.30	1.66	1.15

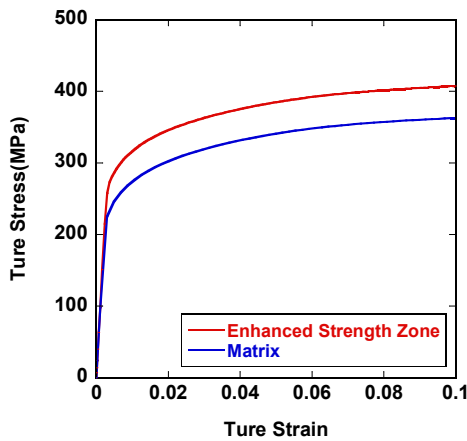


Fig. 5 True stress – true strain for the matrix and the enhanced strength zone ($2a = 7.5 \mu\text{m}$, $f = 15\%$)

이다. 입자의 지름이 $7.5 \mu\text{m}$, 입자의 체적비가 15%인 경우이다.

2.3 입자 크기 및 체적비에 따른 강도 계산

체적비가 15%인 경우, 입자의 지름이 각각 2, 7.5 및 $16 \mu\text{m}$ 인 복합재의 진응력 - 진변형률을 Fig. 6에 나타내었다. Lloyd의 실험 값⁽²⁾을 함께 수록하였는데, 입자의 지름이 $7.5 \mu\text{m}$ 인 경우 해석결과와 실험 값이 잘 일치함을 볼 수 있다. 또한 입자의 크기가 작을수록 강도가 높아지는데 이는 입자의 길이 효과를 보여준 Lloyd의 실험 값과도 같은 경향을 보인다. 다만 입자의 지름이 $16 \mu\text{m}$ 인 경우, 변형률이 커짐에 따라 해석결과가 실험 값과 차이가 나는데, 이는 입자와 기지재의 경계면을 완전결합(perfect bonded)으로 간주하여 Suh 등⁽⁴⁾이 보인 바와 같이 입자 경계가 분리되거나 입자 파손이 일어날 경우를 고려하지 않았기 때문이다.

Table 3 Enhanced yield strengths at the punched zone in the matrix

f (%)	$2a$ (μm)	$\Delta\sigma_{SG}$ (MPa)
15	2	111.2
	7.5	56.8
	16	39.3

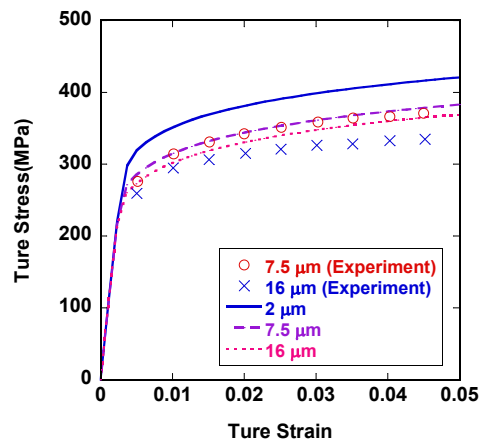


Fig. 6 Predicted stress-strain for different particle sizes (volume fraction: 15%) in comparison with experimental data⁽²⁾

다음으로, 체적비를 다르게 하여 진응력 - 진변형률 거동을 예측하고 이를 Fig. 7에 나타내었다. 일반적으로 입자 강화 금속 복합재에서 관찰할 수 있듯이, 체적비가 클수록 강도가 증가한다는 것을 보여주고 있다.

식 (8)의 평균 변형률 구배 값과 전 절에서 제시한 모델링을 검증하기 위하여 이번에는 입자의 지름이 $7.5 \mu\text{m}$, 체적비가 15%인 경우에 대하여 구배의 평균값을 취할 영역을 1개, 3개, 5개로 추가 분할해 가면서 그 결과를 관찰하였다. 영역을 세 분할 할 때는 Fig. 4(a)의 응력 강화 영역을 반지름

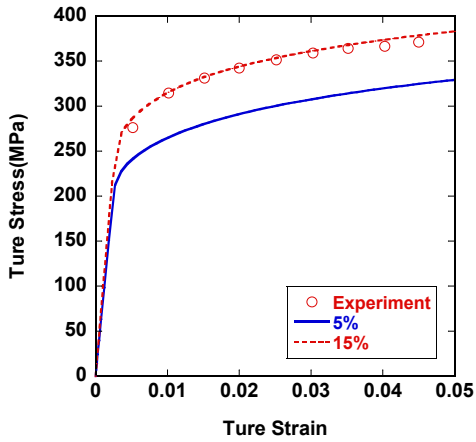


Fig. 7 Predicted stress-strain for different volume fractions (particle diameter: $7.5 \mu\text{m}$). Symbol denotes experimental data⁽²⁾

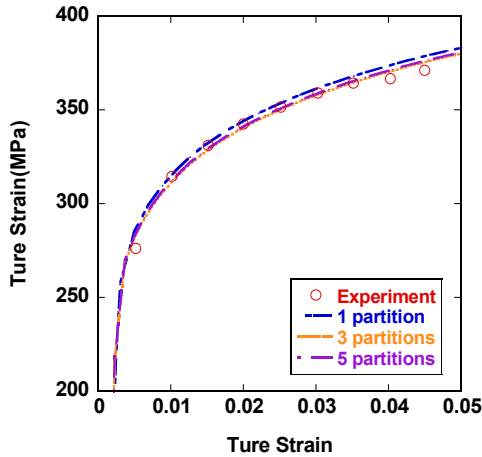


Fig. 8 Predicted stress-strain for the refinement of averaging partitions of the enhanced strength zone (particle diameter: $7.5 \mu\text{m}$, volume fraction = 15%). Symbol denotes experimental data⁽²⁾

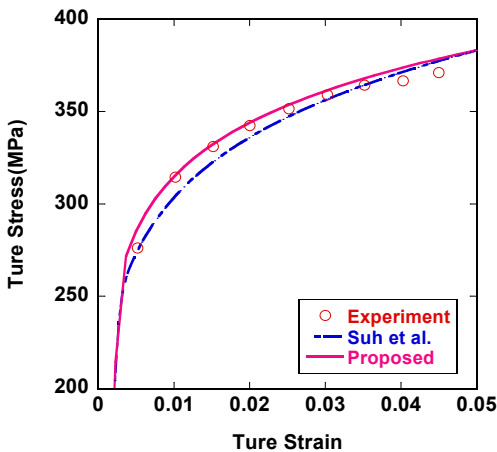


Fig. 9 Predicted stress-strain by Suh et al.⁽⁴⁾ and by the proposed method (particle diameter: $7.5 \mu\text{m}$, volume fraction=15%). Symbol denotes experimental data⁽²⁾

방향으로 균등 분할하는 방법을 취하였으며, 그 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 세 경우의 결과가 큰 차이는 없으나, 평균값을 취한 분할 영역이 1 개일 때보다는 3 개일 때 강도가 약간 작아지며, 실험값에 가까워지는 것을 볼 수 있다. 3 개일 때와 5 개일 때는 거의 변화가 없으므로, 수렴이 됨을 확인할 수 있다.

마지막으로 입자의 지름이 $7.5 \mu\text{m}$, 체적비가 15%일 경우에 대하여 본 연구에 의한 결과와, Suh 등^(4,5)이 시도한, 해석적 편칭영역 크기와 전위밀도 식으로부터 계산한 증가 강도를 편칭영역에 추가하는 방법에 의한 결과를 Fig. 9 에 나타내었다. 두 경우 모두 실험 값과 유사하지만 본 연구에서 제시한 방법으로 변형률 구배를 적용한 결과가 실험 값에 조금 더 근사함을 보여주었다. 본 연구에서는 편칭 영역에서의 변형률 구배 평균 값을 적용하였으나, Abaqus 의 UMAT 이나 UHARD 와 같은 사용자 프로그램을 활용하여 각 유한요소에서 변형률 구배를 직접 계산하여 기지재 전체에 걸쳐 국부적인 강도 증가를 고려하게 되면, Suh 등^(4,5)처럼 단순한 입자의 기하학적 형상을 가정하여 편칭영역의 크기를 계산할 필요가 없으므로, 입자의 모양과 배열이 매우 불규칙한 경우에도 훨씬 더 정확하고 수월하게 복합재의 강도를 예측할 수 있을 것이다.

3. 결론

변형률 구배를 고려하여 수 미크론 크기의 SiC 입자를 함유하는 알루미늄 복합재 강화 입자의 길이 스케일을 효과적으로 보일 수 있는 유한요소 해석 방법을 제시하였다. 입자의 크기에 따른 강도 강화를 예측하기 위하여, 테일러 전위 모델과 입자 주변에 형성된 소성 변형률 구배를 결합시켜 강화된 강도를 편칭 영역에 입력하는 방법을 취하였다. 소성 변형률 구배는 단축 인장 변형과 유사성을 보이는 구형모델의 냉각과정 탄소성 해석을 수행한 후, 소성 변형 영역 평균값으로 구하였다. 복합재의 인장강도는 축 대칭 단위 셀로 모델링하였으며 서로 다른 입자 크기 및 체적비에 대하여 진응력 - 진변형률을 구하였다. 변형률 구배의 평균을 계산할 때 편칭영역을 추가 분할하여 봄으로써 영역 세분화의 수렴성도 평가하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 소성 변형률 구배를 고려한 본 연구의 모델링 방법에 의한 결과는 입자 크기 $7.5 \mu\text{m}$, 체적비

가 15%의 경우에 문헌의 실험 값⁽²⁾와 잘 일치하였다. 입자 크기 16 μm 인 경우는 모델링에 입자 경계 분리나 입자의 파괴를 고려하지 않아 파손이 일어나는 것으로 추정되는⁽⁴⁾ 실험값과 비교할 수 없지만, 파손이 시작되는 것으로 추정되는 변형률까지의 유동응력은 실험값과 거의 일치하였다.

(2) 본 연구의 결과는 입자 크기에 따라 강도가 변화하는 길이 스케일 효과를 잘 나타내 주고 있다. 즉, 입자의 크기가 작을수록 강도가 증가하는 것을 보여준다. 또한 통상 알려진 바와 같이, 체적비가 증가할 때 강도가 증가하는 것도 확인하였다.

(3) 소성 변형률 구배의 편칭 영역 평균값을 계산할 때, 추가 분할한 경우와 분할하지 않은 경우가 그리 큰 차이를 보이지 않으며, 추가적으로 분할하여도 매우 빠르게 수렴됨을 관찰하였다.

(4) 강화 입자 주위의 전위 편칭 영역 크기를 해석적으로 계산하여 이를 유한요소 모델링 하는 방법으로는, 해석적인 해가 발표된 구형 및 타원형 등 단순한 입자 형상 및 규칙적인 입자의 배열을 갖는 금속 복합재의 경우만을 제한적으로 고려할 수 있다. 그러나 Abaqus 와 같은 상용프로그램의 사용자 서브루틴에 본 논문에서 사용한 소성 변형률 구배와 테일러 전위모델의 구성식을 적용함으로써 요소 차원에서 변형률 구배를 계산하여 국부적인 강도의 증가를 예측할 수 있다면, 강화 입자가 보다 복잡한 형상을 갖거나, 응력 집중을 일으키는 경우, 그리고 불규칙적인 배열을 갖는 경우에도 비교적 정확하면서도 간편하게 복합재 강도를 예측할 수 있을 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 첫 번째 저자에게 수여된 한국 연구재단의 2010 년 기초연구사업(일반연구지원사업-지역대학우수과학자)과제(2010-0017042)의 지원과 2011 년도 한남대학교 학술연구조성비로부터 부분적인 지원을 받았으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Arsenault, R. J. and Shi, N., 1986, "Dislocation Generation due to Differences Between the Coefficients of Thermal Expansion," *Materials Science and Engineering*, Vol. 81, pp. 175~187.

(2) Lloyd, D. J., 1994, "Particle Reinforced Aluminum and Magnesium Matrix Composites," *International Materials Reviews*, Vol. 39, No. 1, pp. 1~23.

(3) Nan, C. W. and Clarke, D. R., 1996, "The Influence of Particle Size and Particle Fracture on the Elastic/Plastic Deformation of Metal Matrix Composites," *Acta Materialia*, Vol. 44, No.9, pp. 3801~3811.

(4) Suh, Y. S., Joshi, S. P. and Ramesh, K. T., 2009, "An Enhanced Continuum Model for Size-Dependent Strengthening and Failure of Particle-Reinforced Composites," *Acta Materialia*, Vol. 57, No. 19, pp. 5848~5861.

(5) Suh, Y. S., Kim, Y. B. and Rhee Z. K., 2009, "Strength Analysis of Particle-Reinforced Aluminum Composites with Length-Scale Effect Based on Geometrically Necessary Dislocations," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 18, No. 6, pp.482~487.

(6) Shibata, S., Taya, M., Mori T. and Mura, T., 1992, "Dislocation Punching from Spherical Inclusions in a Metal Matrix Composite," *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 40, No. 11, pp. 3141~3148.

(7) Ashby, M. F., 1970, "Deformation of Plastically Non-Homogeneous Materials," *Philosophical Magazine*, Vol. 21, No. 170, pp. 399~424.

(8) Taya, M., Lulay, K. E. and Lloyd, D. J., 1991, "Strengthening of a Particulate Metal Matrix Composite by Quenching," *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 39, No. 1, pp. 73~87.

(9) Fleck, N. A. and Hutchinson, J. W., 2001, "A Reformulation of Strain Gradient Plasticity," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 49, No.10, pp. 2245~2271.

(10) Gao, H. and Huang, Y., 2001, "Taylor - Based Nonlocal Theory of Plasticity," *International Journal of Solids and Structures*, Vo. 38, No.15, pp. 2615~2637.

(11) Evans, A. G. and Hutchinson, J. W., 2009, "A Critical Assessment of Theories of Strain Gradient Plasticity," *Acta Materialia*, Vol. 57, No.5, pp. 1675~1688.

(12) Abu Al-Rub, R. K. and Voyiadjis, G. Z., 2006, "A Physically Based Gradient Plasticity Theory," *International Journal of Plasticity*, Vol. 22, No. 4, pp. 654~684.

(13) Dassault Systèmes Simulia, Inc., 2010, Abaqus v. 6.9, Providence, U.S.A.

(14) Xue, Z., Huang, Y. and Li, M., 2002, "Particle Size Effect in Metallic Materials: a Study by the Theory of Mechanism-Based Strain Gradient Plasticity," *Acta Materialia*, Vol. 50, No. 1, pp. 149~160.