

전위셀에 기초한 미세조직 구성모델을 이용한 ECAP 공정 시 변형과 미세조직의 진화 해석

김형섭*

Analysis of Deformation and Microstructural Evolution during ECAP Using a Dislocation Cell Related Microstructure-Based Constitutive Model

H. S. Kim

Abstract

The deformation behavior of copper during equal channel angular pressing (ECAP) was calculated using a three-dimensional version of a constitutive model based on the dislocation density evolution. Finite element simulations of the variation of the dislocation density and the dislocation cell size with the number of ECAP passes are reported. The calculated stress, strain and cell size are compared with the experimental data for Cu deformed by ECAP in a modified Route C regime. The results of FEM analysis were found to be in good agreement with the experiments. After a rapid initial decrease down to about 200 nm in the first ECAP pass, the average cell size was found to change little with further passes. Similarly, the strength increased steeply after the first pass, but tended to saturate with further pressings. The FEM simulations also showed strain non-uniformities and the dependence of the resulting strength on the location within the workpiece.

Key Words : Severe Plastic Deformation, Equal Channel Angular Pressing, Dislocation Cell, Microstructure-Based Constitutive Model, Finite Element Analysis

1. 서론

최근에 벌크형태의 초미세/나노 결정립을 갖는 재료를 제조하는 top-down 방법으로서 심한소성변형법 (SPD, Severe Plastic Deformation) [1,2]으로 통칭되는 등통로각압축법 (ECAP, Equal Channel Angular Pressing), 반복접침압연접합법 등이 제안되어 탄성성질, 강도, 경도, 초소성

등에서 우수한 특성의 재료가 발표되고 있다. ECAP는 그림 1과 같이 다결정 벌크 형태의 일반 재료를 일정한 각으로 꺾어지도록 설계된 다이틀 통과시켜서 심한 소성변형을 주어 피가공재의 단면 형상의 변화 없이 1 μm 이하의 결정립을 갖는 초미세결정 재료-심지어는 나노결정 재료를 제조할 수 있는 공정이다. ECAP 공정으로 제조된 초미세결정 재료는 압분공정이 필요한 나노결정

* 충남대학교 신소재공학부

분말재료를 이용한 방법과는 달리 재료에 전단 변형을 가함으로 재료 내의 잔류기공이 없게 할 수 있다. 또한 초미세 결정립을 갖는 재료의 우수한 물리적, 기계적 성질을 나타내어 많은 응용이 시도되고 있다.

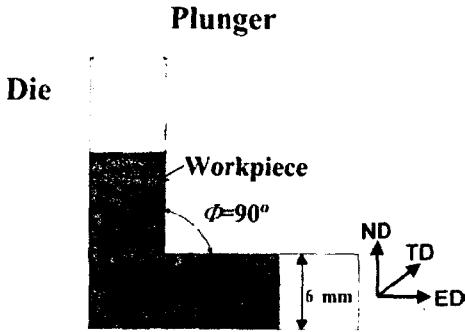


Fig. 1 Schematic plot of ECAP.

ECAP 공정 중에 조대한 결정립을 가지는 재료는 심한 소성변형을 받게 되고 전위의 셀 형성과 경계각의 증가로 인하여 미세한 조직으로 진화하게 된다. 현재 ECAP 공정을 수행하는 주목적이 재료의 결정립을 초미세하게 만들어 기계적 성질을 향상시키는 것이므로 가공 공정 조건과 관련된 미세조직 및 그에 따른 물성의 예측은 매우 중요하다. 현재까지 유한요소법, 상계해석, 슬립선장이론과 같은 연속체역학을 이용한 ECAP 공정의 해석은 많이 있지만, 미세조직과 연관된 모델을 이용한 해석은 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 재료의 대변형 시 전위에 의한 미세조직의 진화와 이에 따른 기계적 성질의 변화를 고려할 수 있는 전위셀 모델 [3]을 이용하여 ECAP 공정을 해석하고자 한다.

2. 전위셀 구성모델 및 계산

본 연구에서 사용한 구성모델은 대변형시 변형거동을 위하여 제안된 Estrin-Toth-Molinary의 전위셀 모델 [3]이다. 이 모델의 개념을 그림 2에 나타내었고, 이를 요약하면 다음과 같다.

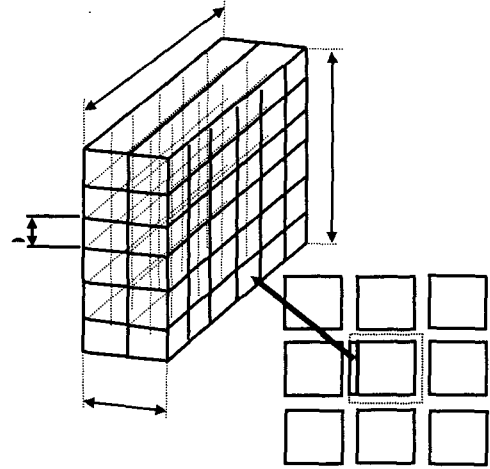


Fig. 2 Schematic diagram of dislocation cell model.

전위셀 구성모델의 핵심은 단상의 다결정 재료를 높은 전위밀도 ρ_w 의 전위셀벽과 이보다 낮은 전위밀도 ρ_c 의 전위셀내부로 이루어진 2상으로 설정하는 것이다. 총전위밀도 ρ_t 는 전위셀벽의 부피분율 f 를 고려한 혼합률식 (1)을 가정한다.

$$\rho_t = f\rho_w + (1-f)\rho_c, \quad (1)$$

전위셀벽의 부피분율 f 는 변형률에 따라 감소하는 식 (2)를 따른다.

$$f = f_\infty + (f_0 - f_\infty)\exp(-\gamma^r / \tilde{\gamma}^r), \quad (2)$$

위에서 f_0 는 초기분율, f_∞ 는 아주 큰 분해전단변형률 γ^r 에서의 포화분율, $\tilde{\gamma}^r$ 는 상수이다. 평균 셀크기 d 는 총전위밀도와 비례상수 K 를 매개로 다음의 관계가 있다.

$$d = K / \sqrt{\rho_t}, \quad (3)$$

전위셀벽과 전위셀내부에서의 분해전단응력 τ_c^r , τ_w^r 은 각각의 분해소성전단변형률속도 $\dot{\gamma}_w^r$, $\dot{\gamma}_c^r$ 와 다음의 관계가 있다.

$$\tau_c^r = \alpha G b \sqrt{\rho_c} \left(\frac{\dot{\gamma}_c^r}{\dot{\gamma}_0} \right)^{1/m}, \quad (4)$$

$$\tau_w^r = \alpha G b \sqrt{\rho_w} \left(\frac{\dot{\gamma}_w^r}{\dot{\gamma}_0} \right)^{1/m}, \quad (5)$$

위에서 G 는 전단계수, b 는 버거스벡터의 크기, $\dot{\gamma}_0$ 는 기준변형률속도, $1/m$ 은 변형률속도상수, α 는 보통 0.25 정도의 상수이다. 이 복합체의 평균전단응력 τ^r 은 식 (6)의 혼합률로 기술된다.

$$\tau^r = f \tau_w^r + (1-f) \tau_c^r. \quad (6)$$

각 상에서의 전위밀도는 각각 다른 전위반응 기구에 의하여 식 (7)과 (8)과 같이 증식(+)되거나 소멸(-)된다.

$$\dot{\rho}_c = \alpha^* \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{\rho_w}}{b} \dot{\gamma}_w^r - \beta^* \frac{6\dot{\gamma}_c^r}{bd(1-f)^{1/3}} - k_0 \left(\frac{\dot{\gamma}_c^r}{\dot{\gamma}_0} \right)^{-1/n} \dot{\gamma}_c^r \rho_c \quad (7)$$

$$\dot{\rho}_w = \frac{6\beta^* \dot{\gamma}_c^r (1-f)^{2/3}}{bdf} + \frac{\sqrt{3}\beta^* \dot{\gamma}_c^r (1-f) \sqrt{\rho_w}}{fb} - k_0 \left(\frac{\dot{\gamma}_w^r}{\dot{\gamma}_0} \right)^{-1/n} \dot{\gamma}_w^r \rho_w \quad (8)$$

위에서 α^* , β^* , k_0 , n 은 재료상수이다. 전위셀모델을 적용하여 순구리에 대한 ECAP 공정 유한요소해석을 실시하였다. ABAQUS[4]의 UMAT 를 이용하였고 금형과 재료의 마찰은 무시하였다. 계산에 사용한 재료상수들은 참고문헌 [5]의 값을 이용하였다. 변형경로는 A, Bc, C에 대하여 1-8 회까지의 공정을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

전위셀모델에 의하여 구한 분해전단변형률에 따른 전위밀도와 전위셀벽의 파괴분율을 각각 그림 3, 4에 나타내었다. 변형이 진행될수록 각 상의 전위밀도는 증가하나 전위밀도가 증가할수록 소멸항이 더 두드러져 각 상의 전위밀도 증가율은 감소한다. 변형률이 증가할수록 전위밀도는 증가하나 전위의 재배열로 인하여 전위셀벽은 더욱 좁고 날카로워지므로 파괴분율은 그림 4와 같이 감소한다.

최종적으로 결정립도와 같아지는 전위셀의 크기는 그림 5에서와 같이 1 pass의 ECAP 공정에서 200 nm까지의 큰 감소를 보이고, 그 이후로는 거의 차이가 없으며, 이는 실험에서 관찰되는 사실과 일치한다.

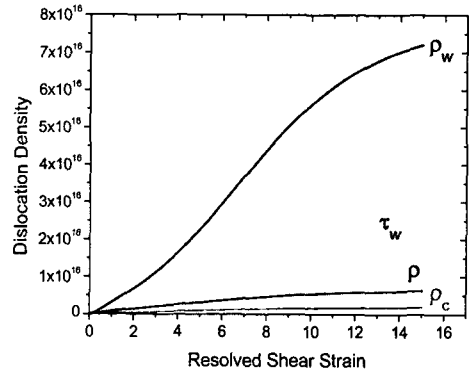


Fig. 3 Dislocation vs. resolved shear strain.

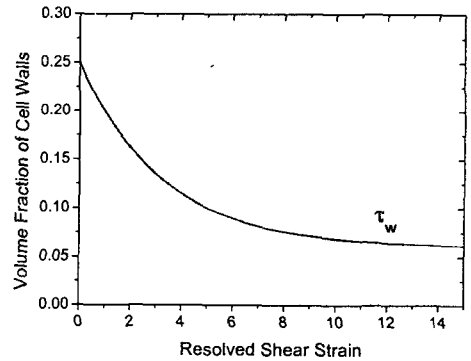


Fig. 4 Volume fraction of cell walls vs. resolved shear strain.

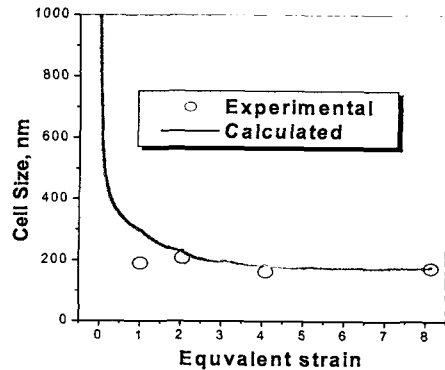


Fig. 5 Calculated dell size with the number of passes.

그림 6의 셀크기의 분포를 관찰하면, ECAP 이후의 부분에서 시편의 바닥부분의 셀크기(결정립도)가 나머지 부분에서의 값보다 큼을 알 수 있다. 이는 재료의 가공경화 효과로 인하여 모서리 틈이 발생하여 변형률이 적어졌기 때문에 발생한 현상으로서 [6,7], 재료의 기계적 특성이 금형 내부에서의 변형에 영향을 끼치고 결국 국부적인 물성(강도, 결정립도)의 차이를 나타내는 결과를 잘 재현해주고 있다.

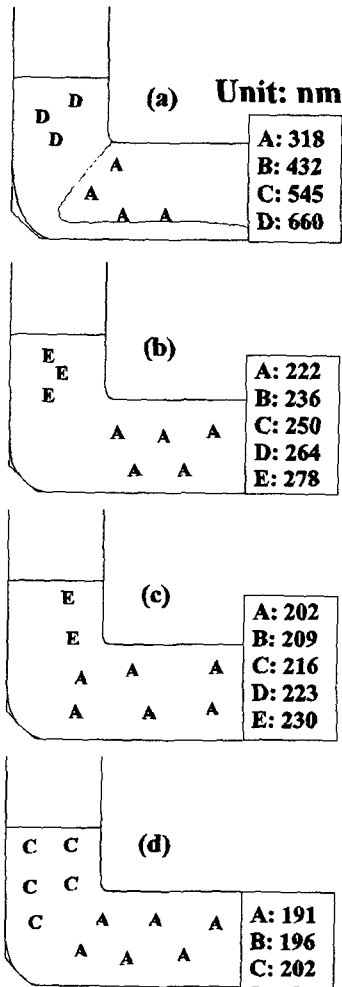


Fig. 6 Cell size distribution: (a) 1 pass, (b) 2 passes, (c) 3 passes and (d) 4 passes.

4. 결론

전위셀에 기초한 구성방정식을 유한요소법과 결합하여 순구리 1-8 회의 ECAP 공정 단계에서 미세조직, 전위밀도의 진화와 변형거동을 고찰하였다. 유한요소해석 결과를 실험결과와 비교한 결과, 1 회 공정에서 약 200 nm까지 급격히 미세화되고 그 후 거의 변화가 없는 결정립도 변화 과정을 잘 예측하였다. 재료의 강도는 첫 공정에서 가장 큰 경화를 나타내고 그 후 포화되는 현상을 잘 재현하였다. 가공횟수에 따라 모서리 틈이 점차 감소하는 현상을 포함한 시편 내부에서의 불균일 현상을 관찰할 수 있다.

후기

이 연구는 한국과학재단 한독국제공동연구의 지원으로 수행되었다. 이 연구에 도움을 주신 Prof. Y. Estrin 과 백승철 박사에게 감사를 드린다.

참고 문헌

- (1) V. M. Segal, 1996, "Materials Processing by Simple Shear", Mater. Sci. Eng., Vol. A197, pp. 157~164.
- (2) R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev and I. V. Alexandrov, 2000, "Bulk Nanostructured Materials from Severe Plastic Deformation", Progress Mater. Sci., Vol. 45, pp. 103~189.
- (3) L. S. Tóth, A. Molinari, Y. Estrin, 2002, "Strain Hardening at Large Strains as Predicted by Dislocation Based Polycrystal Plasticity Model", J. Eng. Mater. Technol., Vol. 124, pp. 71~77.
- (4) ABAQUS/Standard, Version 5.8, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. (1998).
- (5) S. C. Baik, R. Hellmig, Y. Estrin, H. S. Kim, 2003, "Modeling of Deformation Behavior of Copper under Equal Channel Angular Pressing", Zeitschrift für Metallkunde, Vol. 94, pp. 754~760.
- (6) H. S. Kim, M. H. Seo and S. I. Hong, 2000, "On the Corner Gap in the Equal Channel Angular Pressing", Mater. Sci. Eng., Vol. 291A, pp. 86~90.
- (7) H. S. Kim, S. I. Hong and M. H. Seo, 2001, "Effects of Strain Hardenability and Strain Rate Sensitivity on the Plastic Flow and Deformation Homogeneity during Equal Channel Angular Pressing (ECAP)", J. Mater. Res., Vol. 16, pp. 856~864.