

◆ 특집 ◆ 최신 플라스틱·금속 성형 해석 기술

결정 소성학과 강소성 유한요소해석을 연계한 ECAE 공정에서의 변형 집합 조직 발달에 대한 연구

Prediction of Texture Evolution in Equal Channel Angular Extrusion (ECAE) Using Rate-Independent Crystal Plasticity with Rigid-Plastic Finite Element Method

김경진^{1,✉}, 윤정환², 양동열³
Kyung-Jin Kim^{1,✉}, Jeong-Whan Yoon², and Dong-Yol Yang³

¹ 경일대학교 기계자동차학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Kyungil University)

² 디킨대학교 공학부 (School of Engineering, Deakin University)

³ 한국과학기술원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

✉ Corresponding author: kkj@kiu.ac.kr, Tel: +82-53-600-5324

Manuscript received: 2015.8.28. / Revised: 2015.10.5. / Accepted: 2015.10.13.

Recently, the change of mechanical properties and microstructural evolution during severe plastic deformation (SPD), such as Equal Channel Angular Extrusion (ECAE), has been the subject of intensive investigation because of the unique physical and mechanical properties of severely deformed materials. In this study, two types of ECAE processes were considered, dies with intersection angles Φ of 90° and 120° , using experiments and simulations. The decoupled method, in which the rigid-plastic finite element method is incorporated with the rate-independent crystal plasticity model, was applied to predict the texture evolution in commercially pure aluminum during the ECAE processes with 120° and 90° dies. The simulated textures were compared with a measured texture via an EBSD OIM analysis. The comparison showed that the simulated textures generally were in good agreement with the experimentally measured texture.

KEYWORDS: Equal channel angular extrusion (등통로각압출), Crystal plasticity (결정소성학), Deformation texture (변형집합조직)

기호설명

$n^{(r)}$ = slip plane normal vector

$m^{(r)}$ = slip direction

$v_{i,j}$ = velocity gradient tensor

d_{ij}^P = plastic strain rate tensor

ω_{ij}^P = spin tensor

ω_{ij}^L = lattice spin tensor

$\dot{\gamma}$ = shear strain rate

φ_m = Euler angle

$F_n(\sigma_{ij})$ = plastic potential

$\tau^{(r)}$ = resolved shear stress

$\tau_{cr}^{(r)}$ = critical resolved shear stress

Φ = intersecting angle

Ψ = arc angle

1. 서론

일반적으로 사용되는 금속 재료들은 우수한 강도와 함께 소성 가공의 용이성으로 인하여 다양한 산업 분야에서 광범위하게 사용되는 재료로서, 결정학적으로 수많은 단결정으로 이루어진 다결정체이다. 금속을 이용하여 원하는 형상과 성질을 갖는 제품으로 생산하는 것은 주로 단조, 압출 및 압연과 같은 금속 성형 공정을 통해 이루어지며, 이때 발생하는 소성 변형은 재료내의 결정립들을 특정한 안정 방위로 회전시키면서 변형 집합조직 (Deformation texture)을 발생시킨다. 이러한 변형 집합조직의 발생은 생산된 제품의 기계적 성질에 큰 영향을 미치게 되고, 성형된 제품의 품질이나 후속 공정에 중요한 변수가 된다. 금속 재료의 변형 집합조직의 발생을 예측하기 위해서는 재료내의 결정학적 구조, 결정학적 슬립과 회전 등을 반드시 고려해야 하지만 현재 다양한 분야에서 사용되고 있는 유한 요소 해석의 경우, 소성 변형 동안에 발생하는 결정의 회전으로 인한 변형 집합조직의 발생과 같은 결정학적인 특징을 고려하지 못한다. 소성 가공 공정에서 발생하는 변형 집합조직의 발생을 예측하기 위해서는 유한 요소 해석과 결정 소성 모델이 연계되어야 한다. 유한 요소 해석과 결정 소성 모델의 연계방법으로는 연결 (Coupled) 해석과 비연결 (Decoupled) 해석이 있다.^{1,2} 연결 해석에서는 유한 요소 시뮬레이션 과정에서 전체 영역에서의 집합조직의 발달을 계산하고 각 단계마다 결정학적 항복식과 변형 집합조직이 업데이트 된다. 하지만 이런 연결 해석은 많은 해석량을 요구하고 계산 시간이 과도하여 복잡한 성형 공정에는 실제 적용이 불가능하다. 비연결 해석 방법은 먼저 유한 요소 해석을 통해 소성 가공을 받는 소재의 변형 이력 (Deformation history)을 계산하고, 이를 결정 소성 모델의 입력으로 사용하여 변형 집합조직을 계산한다. 이 방법은 계산량이 작고 원하는 영역에서의 변형 집합조직을 빠르게 계산할 수 있다는 장점이 있지만, 판재 성형과 같이 각 단계에서의 집합 조직이 다음 단계의 변형에 미치는 영향이 큰 공정에는 적합하지 않기 때문에

단조 또는 압출과 같이 공정 중 이방성이 미치는 영향이 크지 않은 공정에 적합하다. 본 연구에서는 강소성 유한 요소 해석 방법과 Rate-independent 결정 소성 모델을 비연결 방법으로 연계하여 교차각이 90°와 120°인 두 종류의 등통로각압출 (Equal Channel Angular Extrusion, ECAE)³⁻⁸ 공정에 적용하여 변형 집합조직을 예측하였다. 또한, Schmid 법칙을 기초로 하는 Rate-independent 결정 소성 모델은 항복 곡면이 날카로운 모서리를 가지기 때문에 항복 곡면의 모서리에서 작용하는 슬립시스템(active slip system)을 유일하게 선택할 수가 없었다. 따라서 본 연구에서는 이를 극복하기 위해, Gambin⁹⁻¹¹에 의해 제안된 둥근 모서리 (Rounded-off corners)를 가지는 부드러운 항복 곡면에 기초한 Rate-independent 결정 소성모델을 적용한다. 또한 다결정재료의 소성 변형 공정을 해석하기 위해서, 모든 결정립들이 외부의 변형률과 같다고 가정하는 Taylor 모델을 사용하였다.¹² 해석과 같은 조건에서 AA1050 재료의 등통로각압출 공정을 수행하여 공정 중에 발생하는 변형 집합조직을 EBSD OIM 분석으로 측정하여 제안한 비연결 해석방법으로 계산된 변형 집합조직의 결과와 비교하였다.

2. 부드러운 항복 곡면을 가지는 Rate-Independent 결정 소성 모델

Hill과 Rice¹²에 의해 제안된 Rate-independent 결정 소성학은 항복 조건으로서 Schmid 법칙을 사용한다. 이 항복 곡면은 날카로운 모서리를 가지기 때문에, 소성 변형중에 발생하는 작용하는 슬립시스템을 유일하게 결정할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 Gambin에 의해 제안된 둥근 모서리를 가지는 부드러운 항복 곡면에 기초한 Rate-independent 결정소성학을 적용한다.⁹⁻¹¹

M 개의 슬립시스템을 가지는 결정에 대하여, 슬립시스템은 $\{m^{(r)}, n^{(r)}\}$, $r=1,2,\dots,M$ 과 같이 표현된다. 이 때, $n^{(r)}$ 은 슬립 평면에 수직인 단위 벡터이고 $m^{(r)}$ 은 슬립 방향으로의 단위 벡터이다.

단결정이 완전 강소성 변형을 한다고 가정하면, 속도 구배 텐서 $v_{i,j}$ 는 식(1)과 같이, 변형률 속도 텐서 d_{ij}^p 와 스핀 텐서 ω_{ij}^p , 그리고 격자 스핀 텐서 ω_{ij}^L 의 합으로 표현될 수 있다.

$$v_{i,j} = d_{ij}^p + \omega_{ij}^p + \omega_{ij}^L \quad (1)$$

$$d_{ij}^p + \omega_{ij}^p = \sum_{r=1}^M \dot{\gamma}^{(r)} m_i^{(r)} n_j^{(r)}, \quad \omega_{ij}^t = \dot{R}_{ia} R_{ja} \quad (2)$$

여기서 $\dot{\gamma}$ 는 각 슬립시스템에서의 전단 변형률 속도이고, R_{ja} 는 세 개의 오일러 각(Euler angle) φ_m 에 대한 함수이다. 부드러운 항복 곡면을 가지는 Rate-independent 모델에서는 단결정에서의 소성 포텐셜 함수 (plastic potential) 함수를 식(3)으로 정의할 수 있다.

$$F_n(\sigma_{ij}) = \frac{1}{2n} \left\{ \sum_{r=1}^M \left(\frac{\tau^{(r)}}{\tau_{cr}^{(r)}} \right)^{2n} - m \right\} \quad (3)$$

$$\tau^{(r)} = m_i^{(r)} \sigma_{ij} n_j^{(r)} \quad (4)$$

여기서 $\tau^{(r)}$ 은 r 번째 슬립 시스템에서의 분해 전단 응력이고, $\tau_{cr}^{(r)}$ 은 분해 전단 응력의 임계값이다. $m > 0$ 과 $1 \leq n \leq 20$ 는 재료에 따른 무차원 상수이다. 식(3)의 포텐셜 함수를 이용하여 다음의 식(5)와 (6)과 같이 각 결정립에서의 변형률 속도 텐서 d_{ij}^p 와 스핀 텐서 ω_{ij}^p 를 계산할 수 있다.

$$d_{ij}^p = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{\partial F_n}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial F_n}{\partial \sigma_{ji}} \right) \quad (5)$$

$$\omega_{ij}^p = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{\partial F_n}{\partial \sigma_{ij}} - \frac{\partial F_n}{\partial \sigma_{ji}} \right) \quad (6)$$

계수 $\lambda > 0$ 는 모든 슬립 시스템에서 같고, 부드러운 항복 곡면은 다음과 같이 표현된다:

$$f_n(\sigma_{ij}) = F_n \left(\frac{\sigma_{ij} + \sigma_{ji}}{2} \right) = 0 \quad (7)$$

3. 등통로각압출 (Equal Channel Angular Extrusion, ECAE) 공정

등통로각압출 (Equal channel angular extrusion, ECAE) 공정은 일정한 각도를 이루면서 교차하는 동일한 단면형상을 갖는 두 개의 채널을 통해 소재를 압출하여 소재에 전단변형을 가하는 방법으로서 결정립 미세화에 의한 금속 소재의 강도 증가 및 성형성 향상을 위한 기술로 최근 많은 주목을 받고 있다. Fig. 1은 ECAE 공정에 사용되는 금

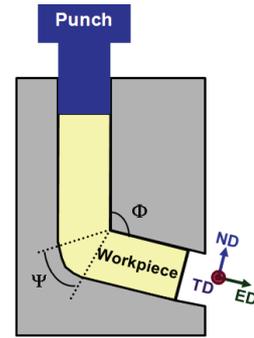


Fig. 1 Geometry of ECAE die

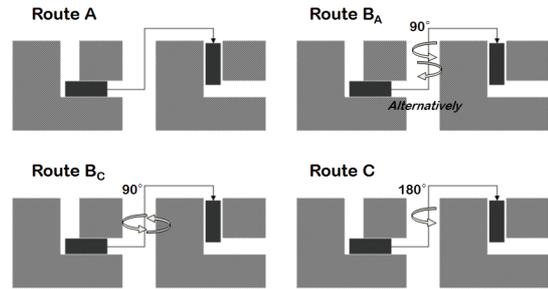


Fig. 2 Schematic illustration of the two ECAE processing routes A and C

형의 개략적인 형상을 나타내고 있다. Φ 는 두 개의 채널이 교차하는 교차각이며, Ψ 는 두 개의 채널이 구부러지는 정도를 나타내는 만곡각이다. Φ 와 Ψ 의 크기를 변화에 따라서 재료에 가해지는 전단변형의 크기를 조절 할 수 있으며,⁵⁻⁷ 공정을 거친 후에도 소재의 단면형상이 변하지 않으므로 반복 공정이 가능하다. Fig. 1에 표시된 세 개의 축은 ED는 압출방향 (Extrusion Direction), TD는 두 개의 채널에 모두 수직인 측면방향 (Transverse Direction), ND는 ED와 TD에 모두 수직인 방향 (Normal Direction)을 나타낸다. ECAE 공정을 반복적으로 수행할 때, 다음 단계에 사용될 소재를 회전시키는 방향에 따라 A, B_a, B_c, 그리고 C로 구분되는 4개의 가공 경로(route)가 존재한다. A 가공 경로는 전 단계의 소재를 회전 없이 그대로 사용하는 경로이고, B_a가공 경로는 소재를 번갈아 가며 $\pm 90^\circ$ 회전 시키는 가공 경로이며, B_c 가공 경로는 일정한 방향으로 소재를 90° 회전 시키는 가공 경로이고, C 가공 경로는 180° 회전시켜서 다음 단계에 이용하는 방식이다.⁶⁻⁸ Fig. 2에 ECAE의 가공 경로에 따른 소재의 회전을 개략적으로 나타내었다.

본 연구에서는 교차각이 90°와 120°인 두 개의 ECAE 금형에 가공 경로 A를 이용하여 상용 순알루미늄을 가공하였을 때, 발생하는 변형 집합조직을 시뮬레이션하여 측정된 결과와 비교하였다.

4. ECAE 공정에서의 변형 집합 조직 예측

다결정 재료의 소성 변형을 해석하기 위해서, 모든 결정립들이 외부의 변형률, L 과 같다고 가정하는 Taylor 모델을 사용한다.¹³ 단결정에 적용했던 모든 과정을 다결정 재료의 각각의 결정립들에 적용한다.

$$L = [v_{i,j}] = D + W \tag{8}$$

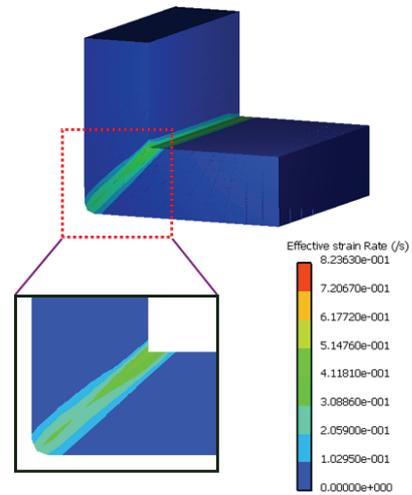
D 는 변형률 속도 텐서이고, W 는 스핀 텐서이다. 유한 요소 해석에 있어서, 각 적분점은 수백 개의 결정립을 가지는 결정립 집합체로 간주한다. 또한, 본 연구에서는 임계 분해 전단 응력과 전단 응력의 관계를 다음과 같이 Voce (saturation-type) law로 묘사한다.

$$\tau_c = h(\Gamma) = A_s - B_s \exp(-C_s \Gamma) \tag{9}$$

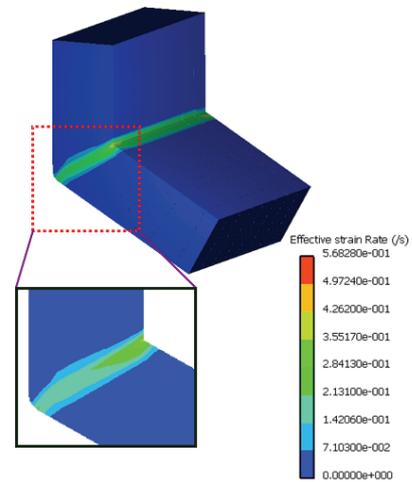
ECAE 공정에서 발생하는 변형 집합조직을 예측하기 위해 먼저 in-house 프로그램을 사용하여 강소성 유한 요소 해석을 수행하였다.^{14,15} 교차각이 90°와 120°인 ECAE 공정을 고려하였으며, 두 경우 모두 만곡각은 10°이고, 채널의 단면 크기는 20 (mm) × 60 (mm)이다. 유한 요소 해석은 상온에서 정상상태 (Steady state)를 가정하여 수행하였다. ECAE 공정에 적용된 소재는 상업용 순알루미늄 (AA1050)이며 구성방정식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 132\bar{\epsilon}^{0.258} \text{ (MPa)} \tag{10}$$

아래의 Fig. 3에 정상 상태 가정의 강소성 유한 요소 해석 결과로서 ECAE 공정에서의 유효변형률 속도를 나타내었다. 두 개의 채널이 교차하는 영역에서 변형이 집중되는 것을 확인할 수 있으며, ECAE 공정에서 발생하는 주변형은 채널이 교차하는 면에 나란한 방향으로의 전단 변형으로 특징지어질 수 있다. 교차각이 90°인 ECAE 공정에서 120°인 공정보다 심한 변형이 발생하는 것을 알 수 있으며, 이렇게 집중된 소성 변형 영역에서 변형 집합조직이 발달한다고 예측할 수 있다.



(a) Workpiece through the 90° ECAE die



(b) Workpiece through the 120° ECAE die

Fig. 3 Distribution of the effective strain rate for the ECAE process with the (a) 90° die, (b) 120° die

본 연구에서는 정상상태 가정하에 강소성 유한 요소법을 이용하여 ECAE 공정을 해석하기 때문에 변형 집합조직의 계산을 위해 요구되는 소성 변형 이력을 계산하기 위해서 유선 적분법 (Flow-line integration)을 적용한다. 즉, 집합 조직을 관찰하고 싶은 점(Point)을 선택하고 이 점의 초기 위치 ($\zeta=0$)에서부터 최종 위치 ($\zeta=1$)까지 압출되는 과정 동안의 유선 (Flow-line)을 구한 후, 유선을 따라서 계산된 속도 구배 (Velocity gradient)를 결정 소성 모델의 입력으로 사용하여 ECAE 공정 동안에 집합조직의 발달을 예측한다. Fig. 4에 90° 및 120°의

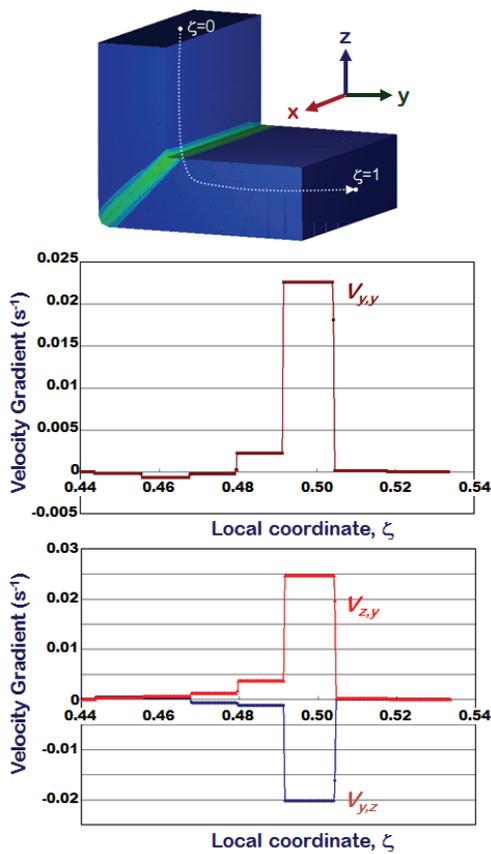


Fig. 4 Flow-Line and velocity gradient fields for the ECAE process with the 90° die

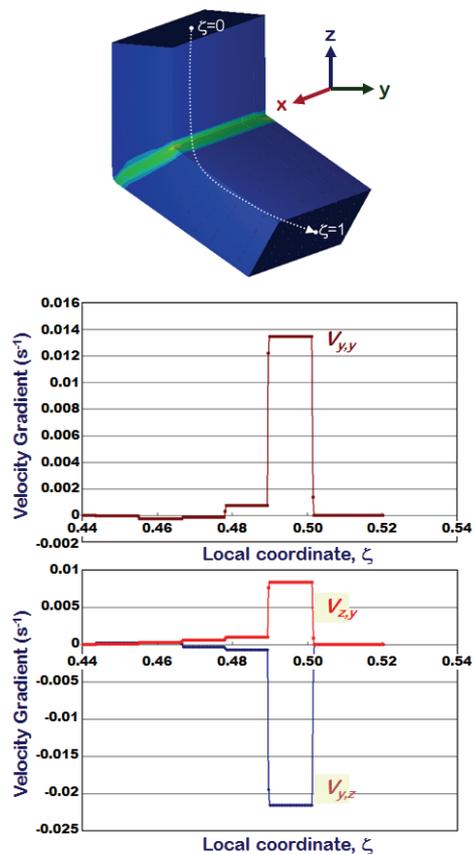


Fig. 5 Flow-Line and velocity gradient fields for the ECAE process with the 120° die

교차각을 갖는 ECAE 공정에서 소재의 단면 중앙점의 유선과 유선에서의 속도 구배 분포를 나타내었다. Figs. 4와 5에 표시된 좌표계에서 정의된 ECAE 공정에서의 속도 구배 분포의 특징은 평면 변형을 압축성분인 $V_{y,y}$, 와 교차 채널을 전단 변형 성분인 $V_{z,y}$, $V_{y,z}$ 의 성분만 존재하고 나머지 성분은 모두 0의 값을 갖는다. 이는 ECAE 공정에서 소재의 변형 특성이 z-y 면에서의 단순 전단변형을 교차각의 절반만큼 반시계 방향으로 회전시킨 것으로 고려될 수 있기 때문이다. 본 논문에서는 유선을 구한 점을 500개의 결정립으로 구성된 소재로 고려하였으며, 결정립들은 초기에 임의 분포의 집합조직을 가지고 있는 것으로 간주하여, 이상의 결과에서 얻어진 속도 구배와 함께 등근 모서리를 가지는 Rate-independent 결정 소성 모델에 적용하여 변형 집합조직의 발달을 예측하여 실험 결과와 비교하였다.

5. 실험 방법

5.1 ECAE 공정

유한 요소 해석에 사용한 소재 및 ECAE 금형과 동일하게 ECAE 공정의 실험을 수행하기 위하여 교차각 Φ 가 90°와 120°이고 만곡각 Ψ 가 10°인 두 종류의 ECAE 금형을 제작하였다. 소재는 압연된 두꺼운 판상 상용 순알루미늄을 직육면체 형상인 20 (mm) × 60 (mm) × 70 (mm) 크기로 가공하여 343°C 에서 7시간 동안 어닐링하여 ECAE 공정에 적용하였다. 실험은 450 톤 유압프레스를 이용하였고, 펀치는 8 mm/s의 속도로 유지하였으며 모두 상온에서 이루어졌다. 가공 전에 그리스(Grease)를 이용하여 펀치와 소재를 충분히 윤활하여 최대 하중은 교차각이 90°인 경우 약 25톤, 120°인 경우 약 15톤으로 측정되었다.

공정 후에 금형 내부에 남아있는 시편을 빼내기 위해 연속적으로 시편을 압출하여 다음 단계의

시편이 전 단계의 시편을 밀어내도록 하였다. 두 종류의 금형에 대해 2회씩의 ECAE 공정을 수행하였으며, 각 공정의 사이에 전단계의 소재를 회전 없이 그대로 사용하는 가공 경로 A를 적용하여 2 번째 패스를 진행하였다.

5.2 미세조직의 측정

ECAE 공정 중에 발생하는 결정립의 형상, 결정립의 크기 및 변형집합조직 등 미세조직 발달의 특징을 정량적으로 관찰하기 위해 FEG-SEM을 사용한 EBSD 측정을 통해 OIM (Orientation Imaging Microscopy) 분석을 수행하였다. ECAE 공정을 거친 소재의 비정상상태 변형과 마찰의 영향을 피하기 위해 시편의 중간 부분에서 6 mm × 6.5 mm × 7 mm 크기의 시편을 채취하여 EBSD 측정을 하였다. EBSD 측정은 Fig. 1에 표시된 TD와 수직한 면에서 실시하였다.

6. ECAE 공정에서의 변형 집합조직 예측 및 실험 결과 비교

본 논문에서는 집합 조직의 특징을 묘사하기 위해, (111) 극점도를 사용하였다. 아래의 Fig. 6에 ECAE 공정을 거치기 전, 어닐링하여 무질서한 방위 분포를 가지는 상용 순알루미늄의 (111) 극점도와 결정 소성 모델에 적용하기 위한 결정립 집합체의 (111) 극점도를 나타내었다. 해석에 사용되는 결정립의 수는 500개로 하였으며, 난수 발생으로 얻어진 각 결정립의 오일러 각을 사용하여 무질서 방위의 집합조직을 구현하였다. 극점도에 표시된 축 (ED-ND)은 Fig. 1에 표시된 축을 사용하였다.

Figs. 7과 8에 교차각이 90°와 120°인 ECAE 공정에서 강소성 유한요소해석과 비연결 방법으로 연계하여 예측한 변형 집합조직과 실험으로 측정된 변형 집합조직을 비교하였다. ECAE 공정에서의 변형 특성은 교차하는 채널이 형성하는 전단면에서의 전단변형이 주요 변형 모드이며, 그에 따라 발생하는 변형 집합조직도 전단 변형 집합조직으로 설명할 수 있다. 일반적으로 알루미늄과 같은 FCC (Face centered cubic) 재료의 전단 변형에 따라 발생하는 이상적인 집합조직은 Fig. 9와 같다. 이때 SPN은 전단면의 법선 방향, SD는 전단 방향을 나타낸다. 전단 변형의 방향이 양의 방향이면 A_1^* 집합 조직이, 음의 방향이면 A_2^* 집합 조직이 약하게 발생한다. Fig. 10에 나타낸 바와 같이 이상적인 전

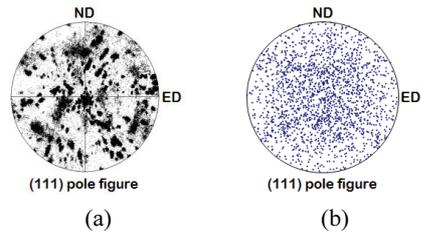


Fig. 6 (a) Measured (111) pole figure of initial AA1050 (b) Random (111) pole figure for simulations

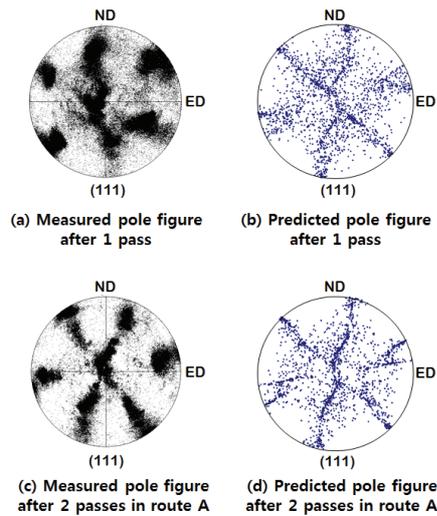


Fig. 7 Measured and predicted texture evolution during the ECAE process with $\Phi=90^\circ$

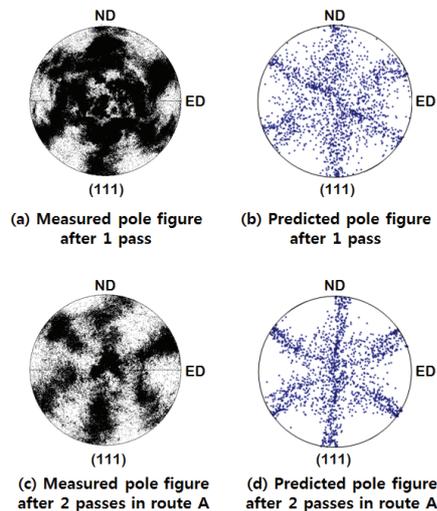


Fig. 8 Measured and predicted texture evolution during the ECAE process with $\Phi=120^\circ$

단변형 집합조직을 교차각의 절반만큼 반시계방향으로 회전시킨 집합조직을 ECAE 공정에서의 변형 집합조직으로 나타낼 수 있다. 따라서 교차각이 90°인 ECAE 공정은 45°, 120°인 ECAE 공정은 60° 회전된 전단변형 집합조직으로 고려할 수 있다. Figs. 7과 8에서 볼 수 있듯이 실험으로 측정한 (111) 극점도와 예측한 극점도 모두 회전된 전단 변형 집합조직과 거의 유사한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 특히 예측한 결과가 실험으로 측정된 결과 보다 이상적인 집합조직에 가까운 강한 집합 조직을 나타냄을 확인할 수 있다. 이는 결정 소성 모델을 이용하여 변형 집합조직을 예측한 경우에 순수하게 결정의 슬립과 회전만을 고려하는데 실제 실험에서는 결정립계에서의 미끄러짐, 결정립 미세화 등의 다양한 미세 변형이 발생하기 때문에 이상적인 집합조직에서 분산된 집합조직이 발생하기 때문이다. 가공 경로 A로 2 패스의 ECAE 공정을 진행한 경우에 전단 변형에 대한 영향이 증가하기 때문에 측정된 극점도와 예측한 극점도의 유사성이 1패스만 거친 소재의 결과보다 높게 나타나는 것으로 보인다. 또한 교차각이 90°인 경우가 측정된 집합조직과 예측한 집합조직이 더 유사한 결과를 나타낸다. 이는 교차각이 90°인 경우에 120°인 ECAE 공정 보다 더 강한 전단변형이 가해지기 때문에, 결정립 미세화, 결정립계 미끄러짐 등의 영향이 상대적으로 더 적기 때문인 것으로 생각된다.

7. 결론

이상의 결과에서 강소성 유한 요소 해석과 결정 소성 모델을 비연결 방법으로 연계한 방법으로 시뮬레이션한 변형 집합 조직이 실험으로 측정된 변형 집합 조직을 매우 잘 묘사하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구에서는 둥근 모서리를 가지는 부드러운 항복 곡면에 기초한 Rate-independent 결정 소성 모델을 적용하여 기존의 결정 소성 모델에서 가지는 슬립 시스템을 유일하게 결정하지 못하는 문제점을 극복하고, 소성 가공 공정에서 효율적으로 정확하게 변형 집합조직을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. ECAE 공정의 경우 결정립 미세화를 통한소재의 물성치 강화에 대한 연구가 주로 이루어져 왔지만, 최근에는 ECAE 공정에서 발생하는 전단 변형 집합조직으로 인한 성형성 향상에 대한 연구도 이루어지고 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법을 적용하여 ECAE에서의 공

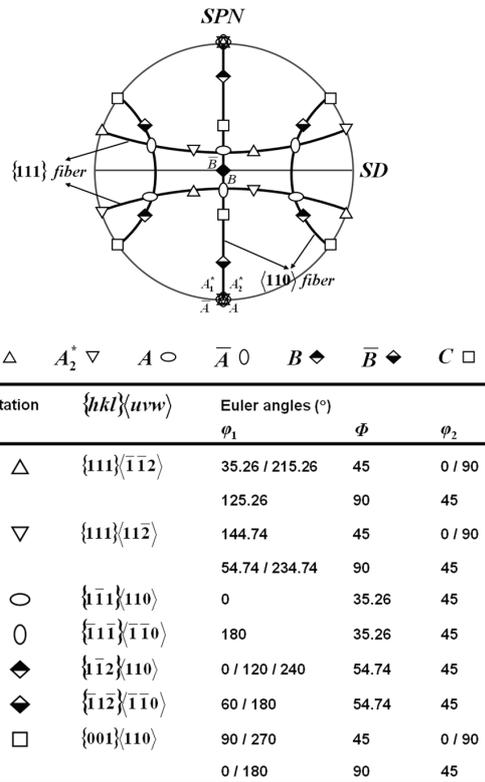


Fig. 9 Main ideal texture components in the simple shear deformation of FCC materials

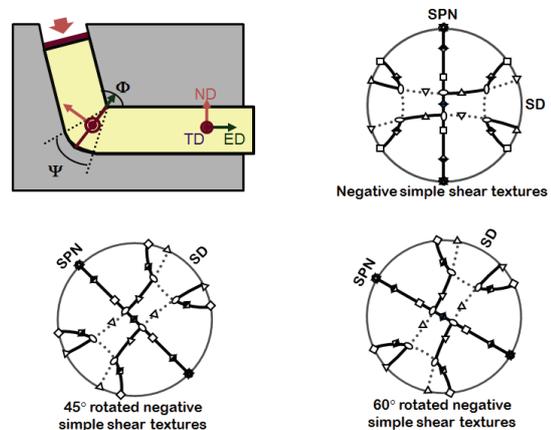


Fig. 10 Rotated negative simple shear texture according to the intersection angle in ECAE

정 변수를 조절하여 소재의 집합조직 제어 또는 원하는 집합조직을 발생시킬 수 있는 공정의 설계 등에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 기

존의 금속 성형 공정으로 생산된 제품의 결정립 수준의 변형 특성에서부터 거시적인 항복 곡면, 소성 변형비와 같은 기계적 물성을 예측하는데 유용한 도구가 될 수 있을 것으로 생각된다.

REFERENCES

1. Aukrust, T., Tjøtta, S., Vatne, H., and Van Houtte, P., "Coupled FEM and Texture Modelling of Plane Strain Extrusion of an Aluminium Alloy," *International Journal of Plasticity*, Vol. 13, No. 1, pp. 111-125, 1997.
2. Beaudoin, A. J., Mathur, K., Dawson, P., and Johnson, G., "Three-Dimensional Deformation Process Simulation with Explicit Use of Polycrystal Plasticity Models," *International Journal of Plasticity*, Vol. 9, No. 7, pp. 833-860, 1993.
3. Kwon, G., Chae, S., Kwon, S., Kim, M., and Hwang, S., "Frictional Effects on the Deformation Behavior of Materials and Die during Equal Channel Angular Pressing (ECAP) with Pure-Zr," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 18, No. 6, pp. 182-187, 2001.
4. Segal, V., "Equal Channel Angular Extrusion: From Macromechanics to Structure Formation," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 271, No. 1, pp. 322-333, 1999.
5. Iwahashi, Y., Wang, J., Horita, Z., Nemoto, M., and Langdon, T. G., "Principle of Equal-Channel Angular Pressing for the Processing of Ultra-Fine Grained Materials," *Scripta Materialia*, Vol. 35, No. 2, pp. 143-146, 1996.
6. Nakashima, K., Horita, Z., Nemoto, M., and Langdon, T. G., "Development of a Multi-Pass Facility for Equal-Channel Angular Pressing to High Total Strains," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 281, No. 1, pp. 82-87, 2000.
7. Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M., and Langdon, T. G., "An Investigation of Microstructural Evolution during Equal-Channel Angular Pressing," *Acta Materialia*, Vol. 45, No. 11, pp. 4733-4741, 1997.
8. Kim, K., Yang, D., and Yoon, J., "Microstructural Evolution and Its Effect on Mechanical Properties of Commercially Pure Aluminum Deformed by ECAE (Equal Channel Angular Extrusion) via Routes A and C," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 29, pp. 7927-7930, 2010.
9. Gambin, W., "Plasticity of Crystals with Interacting Slip Systems," *Engineering Transactions*, Vol. 39, No. 3-4, pp. 303-324, 1991.
10. Gambin, W., "Crystal Plasticity Based on Yield Surfaces with Rounded-off Corners," *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, Vol. 71, No. 4, pp. T265-T268, 1991.
11. Gambin, W. and Barlat, F., "Modeling of Deformation Texture Based on Rate Independent Crystal Plasticity," *International Journal of Plasticity*, Vol. 13, No. 1-2, pp. 75-85, 1997.
12. Hill, R. and Rice, J., "Constitutive Analysis of Elastic-Plastic Crystals at Arbitrary Strain," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 20, No. 6, pp. 401-413, 1972.
13. Taylor, G. I., "Plastic Strain in Metals," *Journal of the Institute of Metals*, Vol. 62, pp. 307-324, 1938.
14. Yoon, J. and Yang, D., "A Three-Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Bevel Gear Forging by Using a Remeshing Technique," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 32, No. 4, pp. 277-291, 1990.
15. Park, K. and Yang, D., "Mismatching Refinement with Domain Decomposition for the Analysis of Steady-State Metal Forming Process," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 48, No. 7, pp. 1089-1106, 2000.