

강소성 유한 요소 해석에 연계한 Rate-Independent 결정소성학을 이용한 3차원 알루미늄 압출재에서의 변형 집합 조직 예측

김경진, 양동열(한국과학기술원 기계공학과), 윤정환(Alcoa Technical Center)

Prediction of Texture Evolution of Aluminum Extrusion Processes using Rigid-Plastic Finite Element Method based on Rate-Independent Crystal Plasticity

K. J. Kim, D. Y. Yang(Mechanical Eng. Dept., KAIST), J. W. Yoon(Alcoa Technical Center)

ABSTRACT

Most metals are polycrystalline material whose deformation is dominated by the slip system. During the deformation process, orientation of slip systems is rearranged with preferred orientations, leading to deformation-induced crystallographic texture which is called deformation texture. Depending on the texture development, the property of material can be changed. The rate-independent crystal plasticity which is based on the Schmid law as a yield function causes a non-uniqueness in the choice of active slip systems. In this work, to avoid the slip system ambiguity problem, rate-independent crystal plasticity model based on the smooth yield surface with rounded-off corners is adopted. In order to simulate the polycrystalline material under plastic deformation, we employ the Taylor model of polycrystal behavior that all the grains are assumed to be subjected to the macroscopic velocity gradient. Rigid-plastic finite element program based on this rate-independent crystal plasticity is developed to predict the grain-level deformation behavior of FCC metals during metal forming processes. In the finite element calculation, one integration point is considered as a crystalline aggregate which has a number of crystals. Macroscopic behavior of material can be deduced from the behavior of aggregates. As applications, the extrusion processes are simulated and the changes of mechanical properties are predicted.

Key Words : aluminum extrusions(알루미늄 압출), rigid-plastic finite element method(강소성 유한요소법), crystal plasticity(결정 소성학), rate-independent model, texture(집합 조직)

1. 서론

압출공정의 시뮬레이션을 통해 압출공정을 설계 하는데 있어서 시간과 비용을 절감하기 위해서, 여러 수치적인 방법이 도입되었고, 그 중에서도 유한 요소법이 가장 널리 사용되고 있다. 여러 가지 유한요소 수식화 중에서, 강소성 유한요소법은 계산 시간에서의 효율성에 장점을 가지므로 압출공정과 같이 큰 소성변형을 유발시키는 공정의 해석에 많이 사용된다. 강소성 유한요소 해석을 통해 성형 하중, 재료의 유동 특성, 응력 분포, 변형률 분포 등 여러 가지 공정 변수들을 얻을 수 있다. 하지만, 소재의 미세조직의 변화는 예측할 수가 없다.

대부분의 금속은 다결정재료로서, 소성 변형을 받게 되면 각 결정들은 일정 방향으로 집합 조직(texture)을 형성하며 재배열된다. 특히 결정립들의 방위가 소성변형에 의해 특정방향으로 배열되며 발생하는 우선방위를 변형 집합 조직(deformation texture)이라고 한다. 이런 변형 집합 조직은 결정학적 이방성을 유발시키므로, 성형제품의 품질이나 후속 공정에 중요한 영향을 주게 된다.

Schmid 법칙을 기초로 하는 rate-independent 결정 소성학은 항복 곡면이 날카로운 모서리(sharp corners)를 가지기 때문에 작용하는 슬립시스템(active slip system)을 유일하게 선택할 수가 없다. 본 연구에서는 이를 극복하기 위해, Gambin 에 의해 제

안된 둥근 모서리(rounded-off corners)를 가지는 부드러운 항복 곡면에 기초한 rate-independent 결정소성학을 적용한다. 또한 다결정재료의 소성 변형 공정을 해석하기 위해서, 모든 결정립들이 외부의 변형률과 같다고 가정하는 Taylor 모델을 사용한다. 본 연구에서는 다결정재료인 알루미늄의 3 차원 압출재의 변형 집합 조직의 발달을 예측하기 위해, 우선 강소성 유한요소법을 통해 재료의 유동특성을 해석하고, 압출재의 형상의 특성에 따라서 여러 가지 특이점(specific points)을 지정한다. 이때의 유한요소 해석은 정상상태를 가정하고 이루어지므로, 유선 적분(flow line integration)을 통해 특이점에서의 변형 내력(deformation history)을 계산하고, rate-independent 결정소성학을 이용하여 변형 집합 조직의 발달을 계산한다.

2. 부드러운 항복 곡면을 가지는 rate-independent 결정 소성학

Hill 과 Rice⁽¹⁾에 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 rate-independent 결정 소성학에서 발생하는 슬립시스템의 선택 문제를 해결하기 위해서, Gambin 에 의해 제안된 둥근 모서리를 가지는 부드러운 항복 곡면에 기초한 rate-independent 결정소성학을 적용한다^(2,3,4).

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 평면(slip plane)에 수직인 단위 벡터이고 $m^{(r)}$ 은 슬립 방향(slip direction)으로의 단위 벡터이다.

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

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

그리고

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

여기서 $\dot{\gamma}$ 는 각 슬립시스템에서의 전단 변형률

속도이고, $R_{j\alpha}$ 는 세 개의 오일러 각(Euler angle) φ_m 에 대한 함수이다.

이 rate-independent 모델은 변형률 속도 텐서 d_{ij}^p 와 스핀 텐서 ω_{ij}^p 에 대한 포텐셜 함수를 갖고 이 포텐셜 함수는 아래의 식 (3)으로 표현된다.

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

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

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.

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

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

계수 $\lambda > 0$ 는 모든 슬립 시스템에서 같고, 부드러운 항복 곡면은 다음과 같이 표현된다⁽⁵⁾.

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

3. 변형 집합조직 발달의 시뮬레이션

3.1 평면 변형과 전단 변형에서의 집합조직 예측

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

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

D 는 변형률 속도 텐서이고, W 는 스핀 텐서이다.

유한 요소 해석에 있어서, 각 적분점은 수백 개의 결정립을 가지는 결정립 집합체로 간주한다. Fig1 은 초기에 임의의 결정 방향을 가지는 결정립들이 평면 변형과 전단 변형을 받은 후에 발생하는

변형 집합 조직의 결과를 나타낸다. 이는 기존의 문헌에서 예측된 결과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다⁽⁶⁾.

본 연구에서는 임계 분해 전단 응력과 전단 응력의 관계를 다음과 같이 Voce (saturation-type) law 로 묘사한다.

$$\tau_c = h(\Gamma) = A - B \cdot \exp(-C \cdot \Gamma) \quad (9)$$

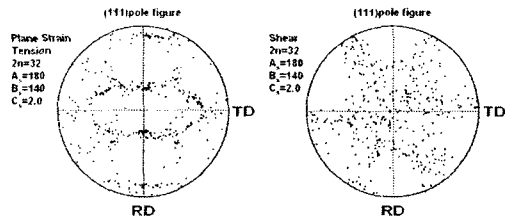
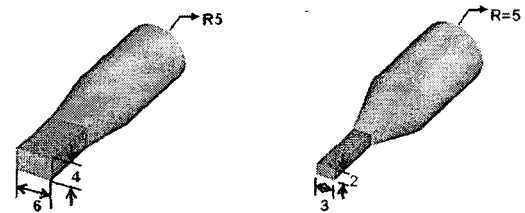
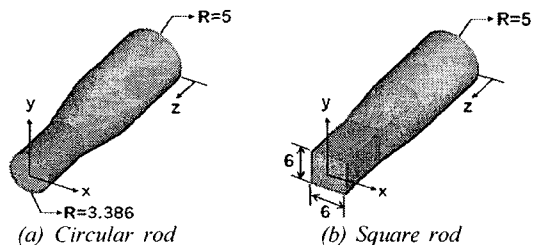


Fig.1: Predicted textures for plane strain tension and shear with the Taylor model.

3.2 3 차원 압출 공정에서의 변형 집합 조직 예측

이번 장에서는 Fig.2 에 나타나 있는 네 가지 형상의 압출공정에 대해서 소성 변형 동안 발생하는 변형 집합 조직의 발달을 예측한다. 이를 위해서 먼저 강소성 유한 요소 해석을 통해서, 각 압출 공정에서의 변형에 따른 유동 특성을 계산한다. 원형 막대, 정사각형 막대, 직사각형 막대 1, 직사각형 막대 2 에 대한 압출비는 각각 2.18, 2.18, 3.27, 13.01 이다. 해석은 대칭성을 고려하여 1/4 영역에 대해서만 수행하였으며, 램(ram) 속도는 3mm/sec, 재료는 Al1100 이다. 유한 요소 해석은 450°C 에서의 등온 정상상태를 가정하고 수행하며, 이때의 구성방정식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 4.3\bar{\epsilon}^{0.130} \text{ (ksi)} \quad (10)$$



(c) Rectangular rod 1 (d) Rectangular rod 2
Fig.2: Modeling of four kinds of extrusion processes.

압출 공정에 대한 해석이 정상 상태를 가정하고 이루어지므로, 소성 변형 동안의 변형 이력을 계산하기 위해서 유선 적분법을 적용한다. 각각의 압출 공정은 변형 집합 조직의 특성을 나타낼 수 있는 특이점을 갖게 된다. 이는 압출 되는 형상의 대칭성을 고려하였을 때, Fig.3, 4, 5 에 나타난 것과 같이 원형 막대, 정사각형 막대, 직사각형 막대에 대해 각각 2 개, 3 개, 4 개의 특이점을 설정할 수 있다. 이때 한 개의 적분점은 100 개의 결정립을 포함하고 있는 것으로 간주한다.

이 특이점들의 유선을 따라서 변형 이력을 해석하여, 초기에 임의의 방위를 가지고 있던 결정립들이 형성하는 변형 집합 조직을 계산한다.

Fig.3 과 Fig.4 그리고, Fig.5 는 각 압출 공정에서의 특이점에서 계산된 변형 집합 조직의 발달을 나타낸다.

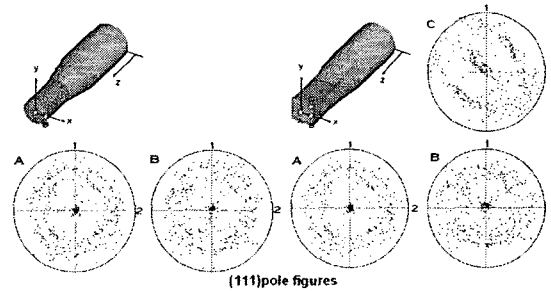


Fig.3 Predicted textures at the characteristic points for a circular rod and a square rod.

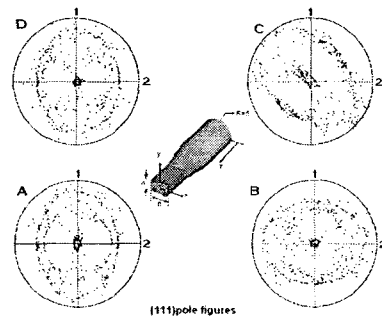


Fig.4 Predicted textures at the characteristic points for a rectangular rod 1.

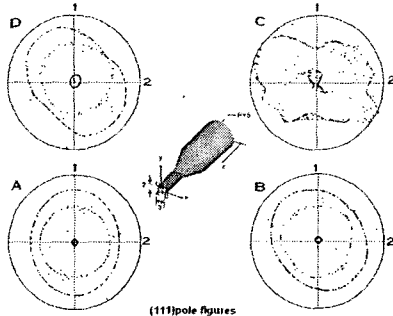


Fig.5 Predicted textures at the characteristic points for a rectangular rod 2.

변형 집합 조직의 발달을 묘사하기 위해, $\{111\}$ 극점도를 나타내었다.

특이점 A 에서의 변형 집합 조직은 네 가지 경우에 모두 거의 같은 형상을 나타내는 것을 알 수 있다. 하지만, 압출비가 증가할수록 더 명확한 집합 조직의 형상을 나타내고 있다. 원형 막대와 정사각형 막대의 경우 서로 같은 압출비를 갖는다. 특이점 B 에서는 서로 비슷한 집합 조직을 나타내지만, 정사각형 막대의 특이점 C 에서는 완전히 다른 집합 조직이 발달하고 있음을 확인할 수 있다. Fig.4 와 Fig.5 에서 확인할 수 있듯이, 원형이나 정사각형 막대보다 변형이 큰 직사각형 막대의 경우에 보다 뚜렷한 변형 집합 조직의 발달을 확인할 수 있고, 압출비가 가장 큰 직사각형 막대 2 의 경우가 가장 선명한 변형 집합 조직이 발달하는 것을 알 수 있다.

그리고, 정사각형 막대와 직사각형 막대의 특이점 C 에서의 변형 집합 조직은 유동의 복잡성 때문에 집합 조직이 흐뜨러짐을 알 수 있다.

이런 결정립들의 방위 변화를 고려한 해석을 통해 성형 후에 발생하는 이방성과 같은 거시적인 재료의 물성을 예측할 수 있다.

4 결론

rate-independent 결정 소성학은 근본적으로 작동하는 슬립 시스템을 유일하게 결정하는데 문제점이 있다. 이를 극복하기 위해 Gambin 에 의해 제안된 등온 모서리를 가지는 부드러운 항복 곡면에 기초한 rate-independent 결정 소성학을 적용하여 이를 강소성 유한요소 해석과 연계하여, 다결정 재료의 소성변형을 해석하였다. 이는 금속의 체적 성형 공정이나 박판 성형 공정에서의 변형 집합 조직의 발달을 예측하는데, 유용한 도구가 될 수 있다. 변형 집합 조직의 발달을 묘사하기 위해서 4 가지 서로

다른 형상의 압출 공정에서의 극점도의 변화를 나타내었다. 압출비가 2.18 인 원형 막대와 정사각형 막대, 그리고 형상비가 같지만 압출비가 3.27 과 13.01 로 다른 직사각형 막대의 압출공정에서 각각 특이점을 설정하여, 그 특이점에서의 변형 집합 조직을 관찰하였다. 이런 결정립 수준의 변형 특성에 서부터 거시적인 항복 곡면, 소성 변형비와 같은 물성을 예측하여, 후속 공정에 사용할 수 있다.

참고문헌

- Hill, R. and Rice, J.R., "Constitutive analysis of Elastic-Plastic Crystals at Arbitrary Strain," J. Mech. Phys. Solids, Vol. 20, pp. 401-413, 1972.
- Gambin, W., "Plasticity of Crystals with Interacting Slip Systems," Engineering Transactions, Vol. 39, pp. 303-324, 1991.
- Gambin, W., "Refined Analysis of Elastic-Plastic Crystals," Int. J. Solids Structures, Vol. 9, pp. 2013-2021, 1992.
- Gambin, W. and Barlat, F., "Modeling of Deformation Texture Based on Rate Independent Crystal Plasticity," Int. J. Plasticity, Vol. 13, pp. 75-85, 1997.
- Gambin, W., "Crystal Plasticity Based on Yield Surfaces with Rounded-Off Corners," Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanics, Vol. 71, pp. T265-T268, 1991.
- Kim, E. Z., and Lee, Y. S., "Anisotropy due to Texture Development in FCC Polycrystals," Transactions of the KSME (A), Vol.20, pp. 1516-1523, 1996..