

# 결정소성학을 이용한 교차압연시의 집합조직과 소성이방성의 예측

김동수\* · 원성연\* · 손현성\* · 김영석\*\*

## Predictions of Texture Evolution and Plastic Anisotropy by Cross Rolling Based on Crystal Plasticity

D. S. Kim, S. Y. Won, H. S. Son and Y. S. Kim

### Abstract

FEM simulating system of the cross-rolling texture formation offers a systematic and efficient way of exploring the relationship between the process variables and the state of plastic anisotropy of sheet product. Cross-rolled sheets possess higher average plastic strain ratios and lower planer anisotropy than those of the straight-rolled sheets. The employed model is a finite-element polycrystal model which each element used in FEM is assumed to be a crystal having different orientation by Takahashi. Texture development, deformation textures due to cross-rolling are predicted for face-centered cubic sheet metal. Crystal orientations are assigned on the basis of the pole figures obtained by X-ray diffraction. Development of anisotropy during cross rolling of an fcc sheet material is predicted theoretically with respected to flow stress and R-value in tensile test

**Key Words** : Plastic Anisotropy(소성이방성), Finite Element Polycrystal Model(유한요소다결정 모델), Cross Rolling(교차압연), Texture(집합조직), Pole Figure(극점도)

### 1. 서론

일반적으로 자동차용 강판 및 음료 캔용 판은 단일방향으로 압연하여 생산된다. 이런 강판들은 압연가공 중에 발생한 금속 결정립의 소성변형에 의해 우선방위를 가지며 방위에 따라 강판의 기계적 특성 및 항복거동이 다른 이방성을 띠게 된다. 판의 두께방향에 대한 면방향으로

의 상대적인 변형을 나타내는 소성이방성 계수  $R$ 값은 덩드르잉된 원형용기의 귀(ear)발생과 같은 문제와 밀접한 관계<sup>(1)</sup>가 있다. 즉, 판재의 면내에 존재하는 방향별 이방성 차이에 대한 크기의 척도 ( $\Delta R = (R_0 - 2R_{45} + R_{90})/2$ )가 낮을수록 제품의 유효높이가 상대적으로 높아져 재료손실을 줄일 수 있다. 따라서, 판재

\* 경북대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 경북대학교 기계공학과

의  $R$ 값 예측을 위하여 압연공정시 발달하는 집합을 이해하고 집합조직에 따른  $R$ 값의 변화를 고찰해 볼 필요가 있다.

이론적인 집합조직의 이해를 위해 재료를 하나의 연속체로 다루는 거시적인 스케일에서 탈피하여 근본적인 금속의 기본 변형모드인 결정립을 고려하는 결정소성학적 접근 방법이 Taylor 이후 널리 연구되었으며,<sup>(2)-(4)</sup> 최근들어 결정소성이론을 FEM과 접목시켜 재료의 거동을 예측하는 연구가 많았는데<sup>(5)-(8)</sup> 그 중 Takahashi 등은 압연판재의 이방성 거동과 컵 성형시의 귀의 발생 등을 예측하였다.<sup>(9)</sup> 또한, W.B. Lee<sup>(10)</sup>는 냉간압연 판재의 생산에 적용되는 단일방향의 정상압연(normal rolling)에 비해 정상압연한 후 압연방향과 직각방향인 폭방향(width direction)으로 추가 압연하는 교차압연(cross rolling)이 판재에서 낮은  $\Delta R$ 값을 가짐을 밝혔다.

본 연구에서는 Takahashi등이 제안한 유한요소다결정모델(FEPM)을 사용하여 알루미늄 재질의 냉간 교차압연시 발생하는 집합조직을 이론적으로 해석하고 실험결과와 비교하여 해석모델의 타당성을 검토하였다. 또한, 교차압연의 전·후기 압하률에 의존하는 압연방법(path schedule)의 대표적 세가지 경로에 따라 소성이방성 및 유동응력을 이론적으로 예측하여 비교하였다.

## 2. 이론

### 2.1 유한 요소 다결정모델

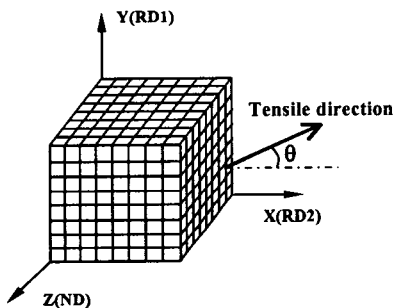


Fig. 1 Analysis model ( $N=8^3$ )

유한 요소 다결정모델은 유한요소법에 있어서의 각 분할요소를 한 개의 결정립 혹은 복수개의 다결정으로 보는 이론이다. Fig. 1에서 한 개의 블록을 하나의 결정립으로 간주하여 전체의 변형과정을 여러 단계 스텝으로 분할하여 각 변형 단계마다 FEM을 적용하므로써 소성 변형 해석을 행한다.

### 2.2 유한요소 방정식

유한요소 방정식에서 어떤 부하경로에 대한 블록경계에서의 일정한 변위는 다음으로 설명된다. 제한된 체적의 평형방정식  $\sigma_{ij,j} = 0$ 는  $\delta du_i = 0$ 의 경계조건하에서 어떤 가상변위  $\delta du_i$ 에 대해 다음의 가상일  $\delta \Phi$ 를 영으로 만들므로써 만족한다.

$$\delta \Phi = - \int (\sigma_{ij,j}) \delta du_i dV = \int \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV \quad (1)$$

각 계산 단계별로 증가하는 미소변형과 회전을 가정하고 다음과 같은 미소 구성식을 사용한다.

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl} (d\epsilon_{kl} - d\epsilon_{kl}^p) \quad (2)$$

위 식에서  $d\epsilon_{ij}^p$ 는 소성변형 증분,  $D_{ijkl}$ 은 등방탄성계수로  $D_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + 2G \delta_{ik} \delta_{jl}$ 이다. 여기서  $G$ 는 전단탄성계수,  $E$ 는 탄성계수,  $\nu$ 는 프와송비이고  $\lambda$ 는 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

수치해석에서 응력 증가는 벡터형식으로 다음과 같다.

$$d\sigma = \sigma - \sigma_1 \quad (3)$$

단,  $\sigma_1$ 은 이전 단계의 응력이다.

미소변형률증분과 변위증분 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d\epsilon = B du \quad (4)$$

위 식에서  $du$ 는 절점변위,  $B$ 는 Fig. 1의 한 개 블록을 다섯 개 사면체요소로 나누어 각각 요소에서 구한 변형률과 절점변위간의 관계 행렬을 평균하여 구한 값이다. 위 식(1), (2), (4)로부터 다음의 유한요소 방정식을 도출할 수 있다.

$$K du = F \quad (5)$$

$$\text{단, } K = \int B^T D B dV, \quad F = \int B^T (D d\epsilon^p - \sigma_1) dV$$

그러므로, 식(5)에서  $d\epsilon^p$ 와  $\sigma_1$ 을 알고 있다면,  $du$ ,  $d\epsilon$ ,  $\sigma$ 를 구해낼 수 있다.

### 2.3 결정격자의 회전

결정 전체 회전  $d\omega_{ij}$ 는 탄성회전  $d\omega_{ij}^e$ , 소성회전  $d\omega_{ij}^p$ , 격자회전  $d\omega_{ij}^*$ 로 이루어진다.<sup>(4)</sup>

$$d\omega_{ij} = (\partial du_i / \partial x_j - \partial du_j / \partial x_i) / 2 \quad (6)$$

$$= d\omega_{ij}^e + d\omega_{ij}^p + d\omega_{ij}^*$$

여기서, 소성회전은 다음과 같다.

$$d\omega_{ij}^p = h \sum W_{ij}^{(r)} dy^{(r)} \quad (7)$$

단, 탄성스핀  $W_{ij} = (a_i b_j - a_j b_i) / 2$  이다.

따라서, 격자회전은 소성회전에 비해 크기가 작은 탄성회전을 무시하면 다음과 같다.

$$d\omega_{ij}^* = d\omega_{ij} - d\omega_{ij}^p \quad (8)$$

### 2.4 경화법칙

Taylor는 단결정에 대한 다음과 같은 등방경화모델을 제안하였다.

$$d\tau_\alpha = h \sum_{\beta=1}^n dy^\beta \quad (9)$$

단, h는 각 슬립계의 항복전단 응력이고  $\beta$ 는 각 슬립계를 의미한다.

## 3. 해석 모델

Fig. 1은 해석의 초기형상을 나타내는 것으로서 형상은  $N(=8^3)$ 개의 결정들로 이루어지고 각 결정의 방위는 난수 발생 프로그램을 이용하여 오일러각( $\varphi, \theta, \psi$ )을 부여하였다. 계산에 사용된 재료의 탄성계수와 프와송비는 각각 70GPa과 1/3으로 하였다. 압연공정은 평면변형압축으로 간주하고 표면에는 마찰이 없는 것으로 가정하였다. 이에 대해 경화 법칙( $h=1.2$ )을 적용하였고 적용된 경계 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_z = -e, \quad \bar{\varepsilon}_y = 0, \quad \bar{\sigma} = \bar{\tau}_{xy} = 0 \\ \bar{\tau}_{yz} = \bar{\tau}_{zx} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

## 4. 해석 결과

### 4.1 실험값과 이론값의 비교

Fig. 2는 알루미늄 압연 판재에 대해 유동응력과 R값에 대한 실험치와 계산치를 비교하기 위한 그림이다. (a)는 계산에 사용된 (111)극점도 즉 방위이다. (b)는 (a)의 방위를 이용하여 시료를 방향별로 1%까지 인장시험 해석을 하여 구한 유동응력과 R값 그래프이다. 이론값과 실험값이 완전히 일치하지는 않지만 그 경향은 유사하게 나타나고 있다. 따라서 이것을 바탕으로 교차 압연 방법에 대한 집합조직과 유동응력 그리고 R-값을 예측한다.

### 4.2 교차압연 집합조직

Fig. 3의 (a), (b), (c)는 계산을 통하여 Al 판재를 RD1 방향으로 압하를 각각 20%, 40%, 70%까지 압연하고 시료를 90° 회전시켜서 RD2 방향으로 총 두께 압하를 84.7%까지 압연하여 얻은 (111) 극점도이고 (d)는 RD1방향 압하를 75%와 RD2방향 압하를 84.7%의 (111)극점도로 실험으로 구한 값이다. Fig. 2의(d) 실험값을 참고 할 때 총압연량을 동일하게 하는 조건에서 RD1방향 초기 압연량이 높으면 RD2방향 압연량이 비록 작다고 하더라도 {011}<755>의 발달을 용이하게 한다는 것을 알수 있다.

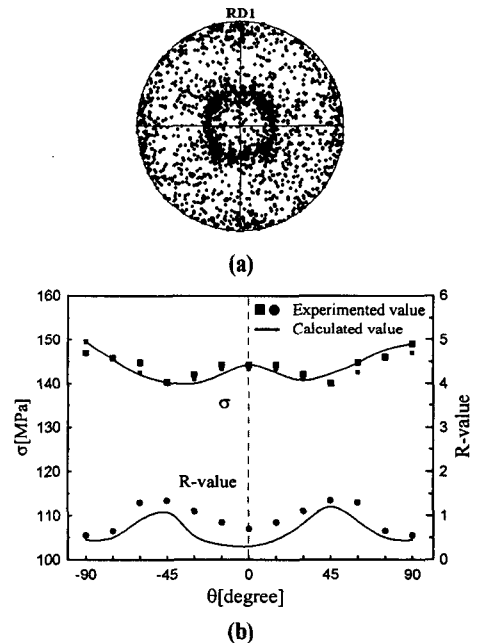


Fig. 2 (a) (111) pole figure of input orientation for calculations, (b) comparisons of anisotropy between experiments and calculations.

### 4.3 소성이방성

Fig. 4는 fig. 3의 극점도상의 방위를 이용하여 시료를 방향별로 1% 인장시험을 계산하여 구한 유동응력과 R값을 나타내는 그래프이다. 유동응력에서는 큰 차이가 나타나지 않았지만, R값의 경우 +45°, -45°에서 초기 RD1방향으로 압연률이 높을수록 높게 나왔다.

각 초기 압연률 20%, 40%, 70%에 대해  $\Delta R$ 은 -1.075, -1.265, -1.377로 나타나 세 조건에서 R값은 초기 압연률이 높아질수록 이방성이 높아지는 것으로 나타났다.

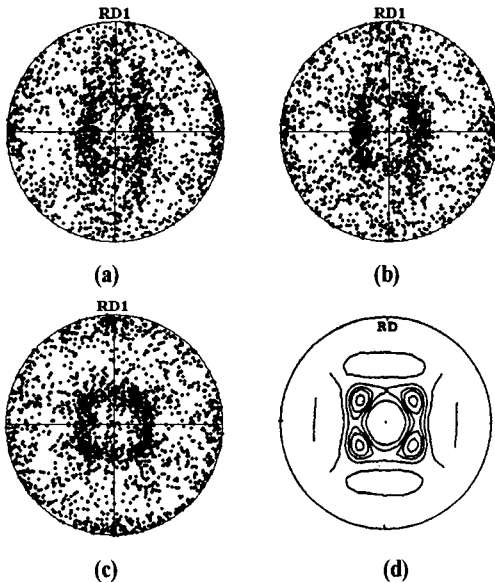


Fig. 3 Predicted and experimented deformation {111} polefigures of the cross-rolling texture for hardening by FEPM, (a)84.7% cross-rolled specimen after 20% normal-rolled specimen (b)84.7% cross-rolled specimen after 40% normal-rolled specimen (c)84.7% cross-rolled specimen after 70% normal-rolled specimen (d)84.7% cross-rolled specimen after 75% normal-rolled specimen (Cross-rolled specimen was first normal-rolled and then RD2 was rotated 90° around ND1. With maintaining a RD2, all specimen was rolled to the total reduction of 84.7%)<sup>(7)</sup>

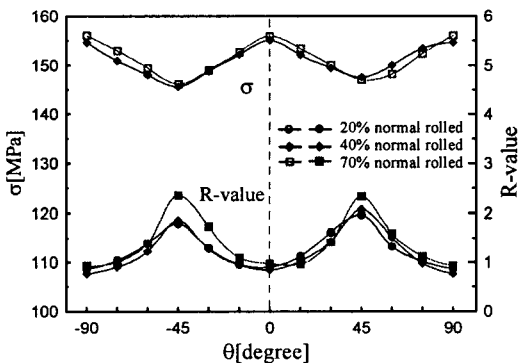


Fig. 4 Comparisons of anisotropy for cross rolling, Variation of R-value and flow stress with orientation  $\theta$  from rolling direction by FEPM ( $h=1.2$ )

## 5. 결론

본 연구에서는 Taylor의 등방경화모델을 이용한 Takahashi의 FEPM이론을 근거로 압연 방법에 따른 교차압연에 대한 집합조직과 소성이방성을 예측해 보았다.

- (1) Takahashi 모델을 이용한 교차압연 집합조직 계산을 통하여 초기 초기 압하률이 집합조직에 영향이 있음을 알 수 있었다.
- (2) 집합조직의 방위각을 이용한 유동응력과 R값의 교차압연에 의한 경향을 예측할 수 있었으며 교차압연으로 초기 압연량에 따른 R값의 영향을 예측할 수 있었다.

## 참고 문헌

- (1) 광재현, 허무영, 안성욱, "냉간압연가공도가 저탄소강판의 구형성에 미치는 영향", 한국소성가공학회지, Vol. 2, No. 1, pp. 51~59.
- (2) G. I. Taylor, 1938, "Plastic Strain in Metals", Int. J. Metals., Vol. 62, pp. 307~324.
- (3) W. F. Hosford, 1993, "The Mechanics of Crystals and Textured Polycrystals", Oxford Uni. Press, 128~138.
- (4) 권재욱, 정효태, 오규환, 이동녕, 1999, "유한요소법을 이용한 면심입방정 금속의 변형집합조직 예측", 한국소성가공학회지, Vol. 3, No. 2, pp. 229~242
- (5) K. W. Neale and Y. Zhou, 1991, "Simulation of the Behavior of FCC Polycrystals in Modeling the Deformation of Crystalline Solids", T. C. Lowe et al., eds., TMS, Warrendale, PA. pp. 239~246.
- (6) 김영석, 장은상, 박준영, 1998, "입의 형상의 결정립계를 갖는 다결정체의 소성변형거동 해석", 대한금속학회지, Vol. 36, No. 4, pp. 553~558.
- (7) Y. H. Kim, Y. S. Cho and M. Y. Huh, 1998, "Cross Rolling and Annealing Texture in Aluminium 5182 Sheet", J. of Kor. Inst. Met. & Mater., Vol. 36, pp. 303~309.
- (8) P. Van Houtte, 1978, "Simulation of the Rolling and Shear Texture of Brass by the Taylor Theory Adapted for Mechanical Twinning", Acta Metall., Vol. 26, pp. 591~604.
- (9) M. Takahashi, H. Motohashi and S. Tsuchida, 1996, "Predictions of Plastic Anisotropy in Aluminium Rolled Sheets", Proceedings of AEP A '96, pp. 351~356.
- (10) W. B. Lee and S. To, 1995, "Computer Modelling of the Effect of Rolling Schedule on the Plastic Anisotropy of Cold-Rolled Aluminium Sheets", J. of Mater. Proc. Tech. Vol. 48, pp. 173~178.