

FCC 금속의 불균질 압연 집합조직 해석

鄭孝泰, 嚴慶根, 李東寧

서울대학교 신소재 박막가공 및 결정성장 연구센터, 재료공학부

Analysis of inhomogeneous rolling textures of FCC metal sheets

Hyo-Tae Jeong, Kyung-Keun Um and Dong Nyung Lee

Research Center for Thin Film Fabrication and Crystal Growing of Advanced Materials and Division of Materials Science and Engineering, Seoul National University

1. 서론

FCC 금속의 균질압연 집합조직은 실험적으로 Cu{112}<111>, S {123}<634>방위등이 발달하는 것으로 알려져 있으며^{1,2)}, 변형집합조직을 예측하는 이론적인 해석에서도 Taylor-Bishop-Hill의 완전구속모델이나, 이완구속모델에서 D{4 4 11}<11 11 8>, S, Cu 방위 등이 발달하는 것을 해석하였다³⁻⁹⁾. 그러나 실제의 압연공정에서는 압연판재와 롤표면 사이의 마찰에 의한 전단변형이 이루어지고 시편의 두께방향으로 불균질 변형집합조직이 발달한다¹⁰⁻¹²⁾. 불균질 변형집합조직에서 표면층의 전단변형집합조직은 {001}<110>방위와 {111}<112>방위, {111}<110>방위들이 주로 발달하는데, 압연조건에 따라서 전단변형 집합조직의 발달양상은 다르게 나타난다. 즉, {001}<110>방위만이 존재하는 경우, {111}<112> 또는 {111}<110>방위만이 존재하는 경우, 두 가지 종류의 방위가 혼합되어 나타나는 경우가 있다.

이 연구의 목적은 다양한 전단변형 집합조직을 해석하는 것으로서 상용순도의 알루미늄 판재를 압연하여 l/d 인자값에 따른 전단집합조직의 변화를 측정하였고, 전단변형에 따른 결정의 회전속도와 안정방위를 해석함으로써 변형조건에 따라 달라지는 FCC 판재의 전단변형집합조직이 압연변형중에 포함되는 전단변형률의 상대적인 기여도에 의한 것임을 해석하였다.

전단변형률은 마찰계수, 압연온도, 압연속도 등과 압연공정의 기하학적인 형상인자인, 압연률의 크기, 1회 압하량, 최종 압하량, 판재

의 초기두께 등에 따라 변화한다.¹⁰⁻¹³⁾ 이 연구에서는 형상인자들 중에서 초기 두께와 1회 압하량을 변화시켰으며 형상인자의 변화는 식(1)의 l/d 인자를 사용하여 나타내었다.

$$l/d = \frac{\sqrt{R(h_i - h_f) - (h_i - h_f)^2 / 4}}{(h_i + h_f) / 2} \quad (1)$$

여기에서 h_i 와 h_f 는 각각 압연판재의 초기두께와 압연후 두께, R 은 압연률의 반지름이다.

2. 실험 방법

상용순도의 알루미늄판재를 지름 127mm의 압연롤을 사용하여 압연하였다. 형상인자로서 l/d 인자를 사용하여 초기두께와 1회 압하량을 조절함으로써 전단변형률을 다르게 하였다. 이 연구에서 사용한 알루미늄 판재의 압연공정은 표 1과 같다. 각각의 압연공정에서 매 압연패스마다 l/d 인자값을 가능한한 일정하게 유지하였고 평균적인 l/d 인자값을 0.55, 2.62, 4.77로 다르게 하였다.

집합조직의 측정에는 X-선 회절기 사용하여 Schulz 반사법으로 (111), (200), (220) 극점도를 반사각도 80°까지 측정하였다.

3. 계산 방법

외부변형의 결정좌표계는 RD 방향을 X_1 축으로 ND 방향을 X_3 축으로 하는 오른손 직교좌표계로 정의하였고, 이 때의 압연변형은 식(2)와 같이 한개의 전단변형성분을 가정하였다. 전단변형률에 따른 안정방위는 유효변형률에 대한 결정의 회전속도를 구하여 결정하였다.

Table 1. Rolling procedures of aluminium specimens.

	Total Reduction	Average l/d	Procedure (mm)
A	80%	0.55	6.3 -(0.15/pass)→ 5.35 -(0.1/pass)→ 3.95 -(0.05/pass)→ 2.95 -(0.025/pass)→ 1.95 -(0.015/pass)→ 1.43 -(0.01/pass)→ 1.26
B	80%	2.62	2.95 → 2.25 → 1.80 → 1.56 → 1.37 → 1.23 → 1.06 → 0.90 → 0.79 → 0.74 → 0.69 → 0.63 → 0.60
C	74%	4.77	3.4 → 1.7 → 0.9

$$d\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} d\varepsilon_{11} & 0 & d\varepsilon_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ d\varepsilon_{13} & 0 & -d\varepsilon_{11} \end{pmatrix} \quad (2)$$

이때의 결정의 회전속도에 따른 안정방위는 평면변형압축인 경우 안정방위로 예측되는 $D\langle 4\ 4\ 11 \rangle \langle 11\ 11\ 8 \rangle$ 방위에 대해서 전단변형에 의해 회전되는 $TD\parallel \langle 110 \rangle$ 인 방위들을 계산하여 예측하였고 전단변형률에 따른 결정의 회전속도를 비교하기 위해서 외부변형률은 유효 변형률을 $2/\sqrt{3}$ 으로 일정하게 하여 계산하였다. $TD\parallel [1\ \bar{1}\ 0]$ 의 관계를 갖는 방위들로 회전각 0° 를 $(001)[\bar{1}\ \bar{1}\ 0]$ 으로 정의하여 사용하였으므로 회전각, ω , 는 각각 한 개의 결정방위를 다음식으로 표현한다.

$$\begin{pmatrix} \frac{\sin\omega}{\sqrt{2}} & \frac{\sin\omega}{\sqrt{2}} & \cos\omega \\ -\frac{\cos\omega}{\sqrt{2}} & -\frac{\cos\omega}{\sqrt{2}} & \sin\omega \end{pmatrix} \quad (3)$$

그러므로, 이 연구에서 상대적인 전단변형률의 기여도는 유효변형률에 대한 전단변형률의 비율, $d\varepsilon_{13}/d\bar{\varepsilon}$ 로 정의하여 사용하였다. 이후 이값을 간단히 전단변형비(shear strain ratio)라고 부르겠다. 평면변형상태에서는 $d\varepsilon_{13}/d\bar{\varepsilon}=0.0$ 이고, 순수전단 변형상태에서는 $d\varepsilon_{13}/d\bar{\varepsilon}=\sqrt{3}/4$ 이다.

4. 전단변형에 의한 안정방위의 변화

그림 1에 회전각으로 표현한 결정방위들에 대한 각 결정방위의 회전속도를 전단변형비에 따라 나타내었다. 결정의 회전속도가 0이고 음의 기울기를 갖는 방위가 안정방위(stable orientation)이다.

그림 1의 회전각과 결정의 회전속도의 그림에서 전단변형비가 커짐에 따라서 회전각 -결

정의 회전속도 곡선은 회전각이 음인 방향으로 평행이동하고 있음을 알 수 있으며 전단변형만이 존재하는 경우($d\varepsilon_{13}/d\bar{\varepsilon}=\sqrt{3}/4$)에 그 이동각도가 -45° 가 되었다.

평면변형상태에서 안정방위인 D방위의 전단 변형비에 따른 안정방위 변화는 그림 2의 (111) 극점도상에 나타내었다. 그림 2에서 대칭적인 D방위인 $(4\ 4\ 11)[\bar{1}\ \bar{1}\ 1\ 8]$ 방위와 $(4\ 4\ \bar{1}\ 1)[1\ 1\ 1\ 8]$ 방위가 전단변형의 비율에 따라 각기 다른 형태의 비대칭적인 안정방위를 갖는 것을 알 수 있으며, 전단변형비값에 따라 방위의 회전각도 뿐만 아니라 회전방향도 달라지는 것을 알 수 있다. $(4\ 4\ 11)[\bar{1}\ \bar{1}\ 1\ 8]$ 방위는 전단변형비가 $0\sim\sqrt{2}/3$ 인 경우에는 안정방위가 음의 회전각으로 이동하여 전단변형비가 커짐에 따라 $(\bar{1}\ \bar{1}\ 10)[\bar{5}\ \bar{3}\ \bar{1}]$ 방위로 안정방위가 변화하고, 전단변형비가 $\sqrt{2}/3\sim\sqrt{3}/4$ 인 경우에는 안정방위가 양의 회전각으로 이동하여 전단변형비가 $\sqrt{2}/3$ 인 경우 $(1\ 1\ 1)[\bar{1}\ \bar{1}\ 2]$ 방위에서 $\sqrt{3}/4$ 인 경우 $(1\ 1\ \sqrt{2})[\bar{1}\ \bar{1}\ \sqrt{2}]$ 방위로 변화한다. $(4\ 4\ \bar{1}\ 1)[1\ 1\ 1\ 8]$ 방위는 전단변형비가 $0\sim\sqrt{1}/2$ 인 경우에는 안정방위가 음의 회전각으로 이동하여 전단변형비가 커짐에 따라 $(1\ 1\ \bar{1})[1\ 1\ 2]$ 방위로 안정방위가 변화하고, 전단변형비가 $\sqrt{1}/2\sim\sqrt{3}/4$ 인 경우에는 안정방위가 양의 회전각으로 이동하여 전단변형비가 $\sqrt{1}/2$ 인 경우 $(0\ 0\ \bar{1})[1\ 1\ 0]$ 방위에서 $\sqrt{3}/4$ 인 경우 $(2\ 2\ \bar{9})[9\ 9\ 4]$ 방위로 변화한다.

이와 같은 전단변형비에 따른 안정방위의 변화를 대칭적인 두 개의 D방위에 대해 나타낸 그림 2에는 회전방향이 음에서 양으로 변화

하는 전단변형비값이 $\sqrt{1/2}$ 과 $\sqrt{2/3}$ 로 다르기 때문에 전단변형비에 따른 안정방위의 변화는 크게 3개의 영역으로 나누어 표현된다. 전단변형비가 $\sqrt{1/2}$ 보다 작은 경우와 $\sqrt{2/3}$ 보다 큰 경우에는 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 성분과 $\{111\}\langle 112 \rangle$ 성분이 함께 안정방위로 존재하고, 전단변형비가 $\sqrt{1/2} \sim \sqrt{2/3}$ 인 경우에는 오직 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 성분만이 안정방위로 존재함을 알 수 있다. 그러므로 전단변형의 경우 안정방위는 전단변형비의 크기에 따라 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 방위인 것과, $\{001\}\langle 110 \rangle$ 방위와 $\{111\}\langle 112 \rangle$ 방위의 혼합방위인 것으로 구분되는 것을 알 수 있다.

5. 전단변형에 따른 압연집합조직

그림 3은 표 1의 실험조건에 따라 압연한 알루미늄 판재의 표면층에서 측정된 (111)극점도이다. 그림 3(a)는 평균 l/d 값이 0.55 인 압연조건 A의 집합조직으로서 일반적으로 균질압연에서 얻어지는 Cu 방위, D 방위, S 방위가 주 방위임을 알 수 있으며, 그림 3(b)는 평균 l/d 값이 2.62 인 압연조건 B의 집합조직으로서 주방위는 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 방위만이 발달하고 있다. 그러나 평균 l/d 값이 4.77 인 압연조건 C에 대한 그림 3(c)의 경우에는 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 방위와 $\{111\}\langle uvw \rangle$ 방위가 혼합되어 발달하고 있다. 그림 3(d)는 전단변형률을 크게 하기 위해서 비대칭압연을 하였을 때의 집합조직으로 그림 3(c)와 같이 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 방위와 $\{111\}\langle uvw \rangle$ 방위가 혼합된 방위가 발달함을 알 수 있다. 그림 3(c)의 경우보다 그림 3(d)의 비대칭 압연에 의해서 $\{111\}\langle uvw \rangle$ 방위들이 보다 강하게 발달하고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

1) 전단변형은 압연판재가 갖는 대칭성 (orthorhombic symmetry)을 갖지 않기 때문에 균질압연에서 대칭적인 안정방위인 2 가지 형태의 D 방위인 $(4\ 4\ 11)[\bar{1}\bar{1}\ 11\ 8]$ 방위와 $(4\ 4\ \bar{1}\bar{1})[11\ 11\ 8]$ 방위가 불균질압연의 경우 각각 비대칭적인 다른 방위로 안정방위가 회전

하였다.

2) 유효변형률에 대한 전단변형률의 비율을 전단변형비로 정의하여 전단변형비에 따른 안정방위의 변화를 해석하였다. 전단변형비의 크기에 따라 안정방위의 회전방향이 불연속적으로 변화하였으며, 이와 같은 불연속적인 변화가 일어나는 전단변형비는 $(4\ 4\ 11)[\bar{1}\bar{1}\ 11\ 8]$ 방위는 $\sqrt{2/3}$ 이고 $(4\ 4\ \bar{1}\bar{1})[11\ 11\ 8]$ 방위는 $\sqrt{1/2}$ 이다. 이 결과로 2 개의 D 방위를 고려한 집합조직은 전단변형비에 따라 3 가지 형태로 발달하였다.

3) 전단변형비가 $\sqrt{1/2}$ 보다 작은 경우와 $\sqrt{2/3}$ 보다 큰 경우에는 각각 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 인접방위와 $\{111\}\langle uvw \rangle$ 인접방위가 함께 발달하고, 전단변형비가 $\sqrt{1/2}$ 과 $\sqrt{2/3}$ 사이의 경우에는 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 인접방위만이 발달한다. 즉, 알루미늄 압연판재의 표면층 집합조직에서 압연조건에 따라 집합조직이, Cu 형 방위가 발달하는 경우, $\{001\}\langle 110 \rangle$ 방위만이 발달하는 경우, $\{001\}\langle 110 \rangle$ 방위와 $\{111\}\langle uvw \rangle$ 방위가 함께 발달하는 경우로 변화하는 것은 각각의 압연조건에 따른 전단변형비의 변화에 의한 것이라는 알 수 있다.

REFERENCE

1. J. Hirsch and K. Lucke: Acta metall. **36** (1988) 2863
2. U. von Schlippenbach, F. Emren and K. Lucke: Acta metall. **34** (1986) 1289
3. P. van Houtte: Textures and Microstructures, **8&9** (1988) 313f
4. P. van Houtte: Acta Metall., **26**(1978) 591
5. I. L. Dillamore and W. T. Roberts : Acta Metall. **12** (1964) 281
6. I. L. Dillamore and H. Katoh : Met. Sci., **8** (1974) 21
7. J. L. Raphanel and P. van Houtte : Acta Metall., **33** (1985) 1481
8. M. Arminjon : Acta Metall., **35** (1987) 615
9. P. Gilormini : Acta Metall., **37** (1989) 2093
10. M. Holscher , D. Raabe and K. Lucke : Acta Metall. Mater. **42** (1994) 879
11. W. Truszkowski, J. Krol and B. Major : Metall.

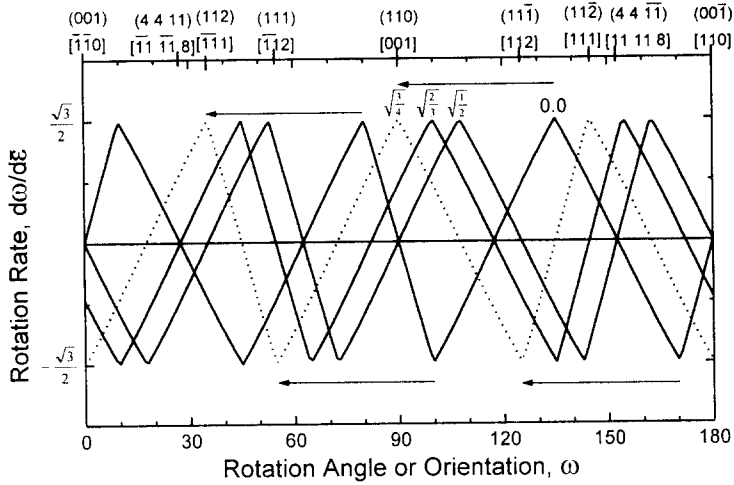


Fig. 1 Rotation rates as functions of orientation and shear strain ratio.

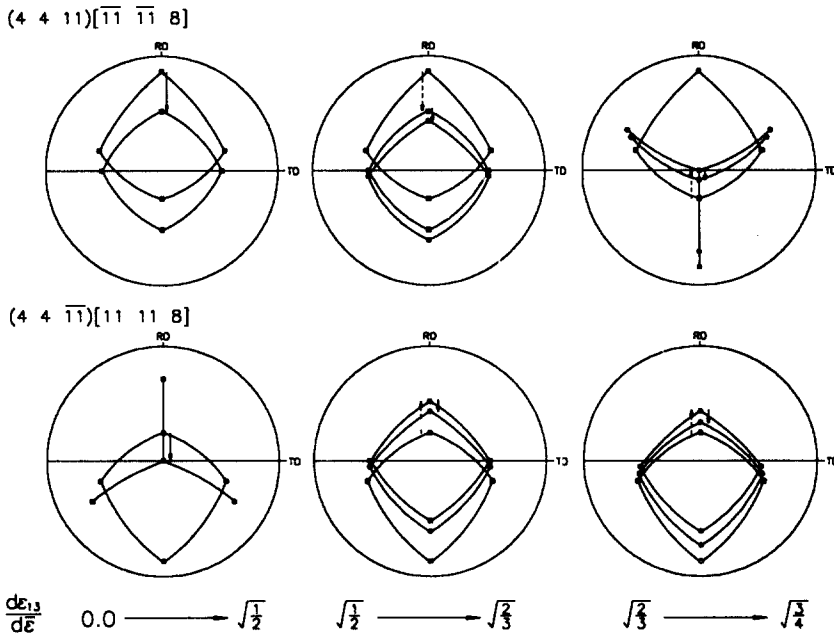


Fig. 2 (111) pole figures showing changes of stable orientation as function of shear strain ratio.

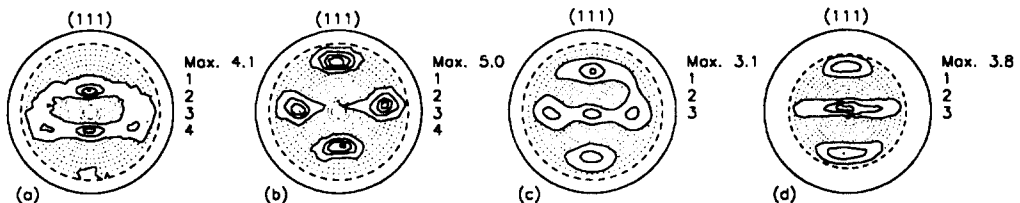


Fig. 3 Measured (111) pole figures of surface layers of cold rolled aluminum sheet (a) specimen A, (b) specimen B and (c) specimen C in Table 1 and (d) asymmetrically rolled sheet.