

## 롤속도 비 1.5/1.0 비대칭 압연 시 알루미늄 판재에서 변형집합조직의 형성

지영규\* · 정효태\*\* · 허무영\*\*\*

(2003 년 4 월 1 일 접수)

### Development of Deformation Texture in Aluminum Sheets during Asymmetrical Rolling with a Roll Speed Ratio of 1.5/1.0

Y. K. Jee, H. T. Jeong and M. Y. Huh

#### Abstract

Sheets of aluminum alloy 1100 were asymmetrically cold rolled in a rolling mill with different roll speeds. In order to promote the shear deformation during asymmetrical rolling, cold rolling without lubrication was performed with a roll speed ratio of 1.5/1.0. The evolution of texture components during asymmetrical rolling was investigated by the calculation of the orientation distribution function (ODF) using the monoclinic sample symmetry. The strain state during asymmetrical rolling was tackled by means of FEM calculations. Asymmetrical rolling gave rise to the development of pronounced strain gradients throughout the thickness layers which resulted in the formation of strong texture gradients in the aluminum sheet.

**Key Words** : Asymmetrical Rolling, Cold Rolling Texture, Roll Speed Ratio, ODF, FEM

#### 1. 서론

두 롤의 회전속도가 동일한 정상적인 압연변형은 대부분의 시료가 평면변형을 한다고 가정한다.<sup>(1-3)</sup> 이와 같은 평면변형 조건에서 생성되는 알루미늄 판재의 압연집합조직은  $\beta$ -섬유로 알려진  $\{112\}<111>$  Cu-방위,  $\{123\}<634>$  S-방위,  $\{110\}<112>$  Bs-방위가 형성된다.<sup>(1,4)</sup> 그러나 정상적인 압연변형 시에도 압연 롤 사이에서 변형구역의 기하학적 형상 및 변형상태의 변화, 압연재와 압연롤과의 접촉면에서 마찰, 열간압

연면에서 마찰, 열간압연 시 압연재의 두께층에 따른 온도구배 등이 평면변형 상태로부터 벗어나는 원인이 되는 것이다.<sup>(5-6)</sup> 이와 함께 압연판재의 두께 층에 따라서도 불균질한 변형률 상태가 얻어지는데, 그 결과 판재의 두께 층에 따라 각종 물리적 특성의 변화가 얻어진다.<sup>(7)</sup>

비대칭압연은 상하 압연롤의 크기가 다른 압연기에서 행할 수 있으며, 또한 상하 압연롤의 크기가 같지만 상하 압연롤의 속도를 다르게 하여 행할 수 있다. 최근에 Kim<sup>(8)</sup>과 Lee<sup>(9)</sup> 등은 알루미늄 판재와 철강판재에서 비대칭압연 시 얻어지는 집합조직의 형성을 유한요소법을 이용한 변형률 상태를 추적함으로써 해석하였다. 또한 최근에 비대

\* 고려대학교 대학원 신소재공학과

\*\* 강릉대학교 금속공학과

\*\*\* 고려대학교 재료공학부

칭압연 시 변형률 상태를 고찰한 연구들이 보고되고 있다.<sup>(10-15)</sup>

상하 압연롤의 속도가 같은 정상적인 압연에서도 압연롤의 마찰은 압연재의 변형상태에 매우 중요한

역할을 한다. 압연롤에 마찰을 크게 할수록 전단변형이 크게 작용하여 시료 두께 층에 따라 심한 변형률의 구배가 얻어져 이에 따라 불균일 압연집합조직이 얻어진다. 마찰력이 크게 작용할 때 압연재의 중앙 층에서는 평면변형이 얻어져  $\beta$ -섬유의 압연안정방위가 형성되지만, 표면 층에는 높은 전단변형률 상태가 얻어져  $\{001\}\langle 110\rangle$ ,  $\{111\}\langle 112\rangle$ 와 같은 전단집합조직이 형성된다.<sup>(2,4,16)</sup>

본 연구에서는 상하 압연롤의 속도 비 (상하 압연롤의 회전 속도 비)를 1.5/1.0 으로 하여 비대칭압연을 행하였다. 비대칭 압연은 압연롤과 압연재와의 마찰을 크게 얻기 위하여 윤활유를 사용하지 않고 행하였다. 이와 같은 비대칭압연 조건에서 알루미늄 AA 1100 판재에서 얻어지는 집합조직을 측정하였고, 상용 FEM 프로그램인 DEFORM-2D<sup>(17)</sup>을 사용하여 비대칭압연 시 얻어지는 변형률 상태를 추적하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 6.2mm 의 알루미늄 AA 1100 열간 압연재를 사용하여 실험을 수행하였다. 먼저 이 열간 압연재를 직경 127mm 를 갖는 냉간압연기에서 윤활유를 사용하여 3 회의 냉간압연에 의하여 4.0mm 의 초기시편을 제조하였다. 비대칭압연은 상부 롤과 하부 롤의 직경이 모두 110mm 를 갖는 압연기에서 행하였다. 비대칭압연기는 상부 롤과 하부 롤이 각각 다른 모터에 의하여 구동되기 때문에 상부 롤과 하부 롤이 각각 다른 속도로 회전시킬 수 있는데, 본 연구에서는 상/하 롤속도비를 1.5/1.0 으로 실험 하였다. 비대칭압연은 두께 4.0mm 를 갖는 초기시료를 한번의 압연 패스에 의하여 두께 2.5mm 를 갖게 행하였다.

비대칭 압연된 알루미늄 AA 1100 판재의 집합조직은 각 시편의 두께 층에 따라 측정하였다. 본 연구에서는 두께 층을  $s$  로 정의 하였는데, 판재의 위쪽 표면 층을  $s=+1.0$ , 중앙 층을  $s=0.0$ , 아래쪽 표면 층을  $s=-1.0$  으로 정의 하였다. 집합조직은 위쪽 표면 층인  $s=+1.0$ , 위쪽 표면 층과 중앙 층의 중간 층인  $s=+0.5$ , 중앙 층인  $s=0.0$ , 아래쪽 표면 층과 중앙 층과의 중간 층인  $s=-0.5$ , 아래쪽 표면 층인  $s=-1.0$  에서 각각 측정

하였다.

집합조직은 자동화된 x-선 고니오메타에서  $\{111\}$ ,  $\{200\}$ ,  $\{220\}$  극점도를 측정된 후 Bunge<sup>(18)</sup>의 방법에 의하여 방위분포함수로 계산하였다. 이 논문에서 방위는 Miller 지수  $\{hkl\}\langle uvw\rangle$  또는 오일러 방위각( $\phi_1, \phi, \phi_2$ )으로 표시하였다. 비대칭압연 후에 판재에 존재하는 집합조직의 방위들이 일반 압연한 것과 같이 사방형(orthorhombic)의 대칭을 갖지 않고 단사정(monoclinic)의 대칭을 갖기 때문에 방위분포함수는 오일러 방위각  $\phi$  과  $\phi_2$  는  $90^\circ$  이내에서  $\phi_1$  각은  $180^\circ$  까지 계산하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

비대칭압연을 위한 두께 4.0mm 의 초기시료는 핫벤드를 냉간압연하여 얻었다. Fig. 1 은 이 초기시료의 중앙 층( $s=0.0$ )과 표면 층( $s=1.0$ )의 집합조직을 측정된 결과이다.

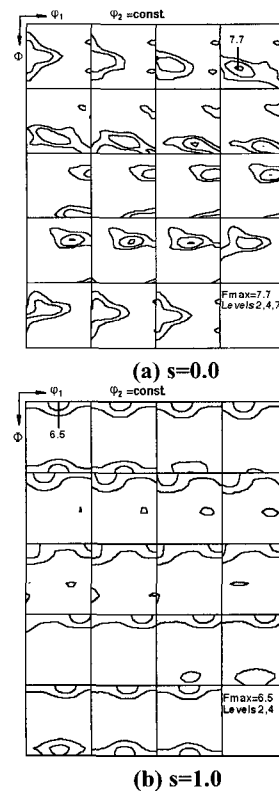


Fig. 1 ODF showing textures prior to asymmetrical rolling

초기시료의 중앙 층에는 강한 Bs-방위 {110}<112>로부터 S-방위 {123}<634> 그리고 Cu-방위 {112}<111>로 이어지는  $\beta$ -섬유가 형성되어 있었으며 특히 S-방위가 방위밀도  $f(g)=7.7$  로 높게 나타났다. 그러나 초기시료의 표면 층에는  $(\phi_1, \phi, \phi_2)=(45^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ 인 {001}<110>에서  $f(g)=6.5$  의 최대방위밀도를 갖는 압연전단 방위가 일어났다. 또한  $s=0.5$  인 중앙 층에서는 Cu-방위에서  $f(g)=7.6$  의 최대값이 얻어지며 거의 Bs-방위가 발달하지 않은 집합조직이 얻어졌다.

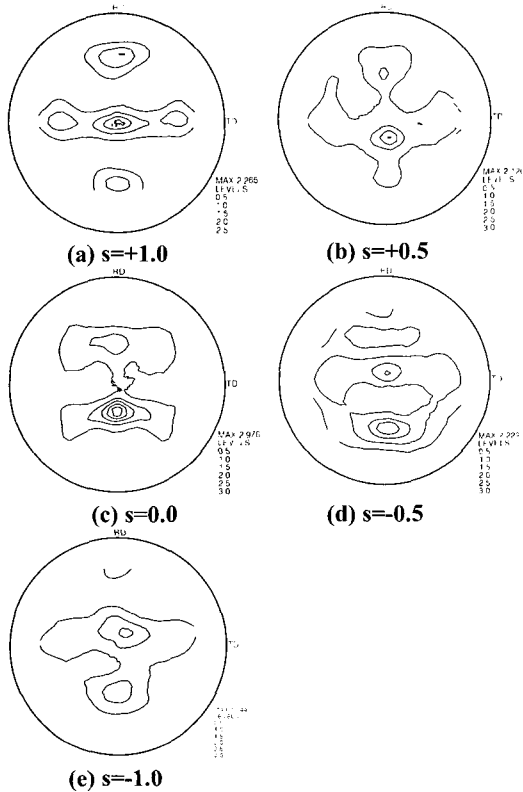


Fig. 2 {111} Pole figures showing textures after asymmetrical rolling

Fig. 2 는 4.0mm 의 초기시편을 한번의 비대칭압연에 의하여 2.5mm 로 압연 변형 후의 집합조직을 {111} 극점으로 측정된 결과이다. Fig. 2 에서 볼 수 있듯이 시편의 두께 층에 따라 서로 상이한 집합조직이 얻어진 것을 확인할 수 있다. 압연 판재의 상부 표면 층인  $s=+1.0$  에서는 전단집합조직의 대표적인 방위인 {001}<110>이 발달되어 있으며 압연면 방향(ND)에 평행하게 {111} 극점의 강도가 높게 얻어졌

다. 판재의 상부 표면 층과 중앙 층의 중간 층인  $s=+0.5$  에서는 전단집합조직과 압연집합조직의 중간 방위들이 발달하고 있고 최대방위밀도는 압연면(ND)으로부터 약  $30^\circ$  쯤 떨어진 곳에서 얻어진다. 중앙 층인  $s=0.0$  에서는 극강도가 가장 높게 집합조직이 형성되며, 압연집합조직과는 상이하게 극점도의 하부 쪽에 훨씬 큰 {111} 극점에서 최대값이 얻어졌다. 압연 판재의 중앙 층과 하부 표면 층과의 중앙부인  $s=-0.5$  에서는 {001}<110> 전단집합조직에 가까운 방위들의 생성이 관찰되며 {111}//ND 방위도 보여진다. 압연 판재의 하부 표면 층의 집합조직은 약간 무질서 한 약한 전단집합조직이 발달하며, 역시 {111}//ND 방위도 보여진다.

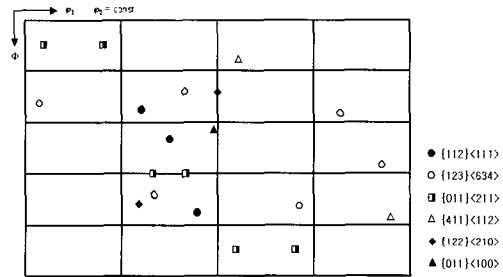


Fig. 3 Ideal orientations in the Euler space ( $\phi_2 = \text{constant}$  sections)

대부분의 극점도에서 볼 수 있는 것 같이 비대칭압연 후 판재에 존재하는 집합조직의 방위들은 일반 압연한 것과 같이 정방형(orthorhombic)의 대칭을 갖지 않고 사방정(monoclinic)의 대칭을 갖기 때문에 방위분포함수는 오일러 방위각  $0^\circ \leq \phi_1, \phi_2 \leq 90^\circ$  그리고  $0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$  의 범위에서 계산하였다. Fig. 3 은 이런 오일러 공간에서 나타나는 중요 이상 방위를 보여준다.

Fig. 4 는 비대칭압연 시 형성되는 집합조직의 방위들의 생성을 보다 잘 이해 하기 위하여 {111}, {200}, {220} 극점도를 측정된 실험결과를 Bunge<sup>(18)</sup>의 방법에 의하여 방위분포함수로 계산한 결과를 보여준다.

Fig. 2 의 극점도를 측정된 결과와 마찬가지로 두께 층에 따라 매우 불균일한 집합조직이 형성되어 있음을 알 수 있다. 압연 판재의 상부 표면 층인  $s=+1.0$  에서는 전단집합조직의 대표적인 방위인 {001}<100>이 발달되어 있다. 이 방위는 대

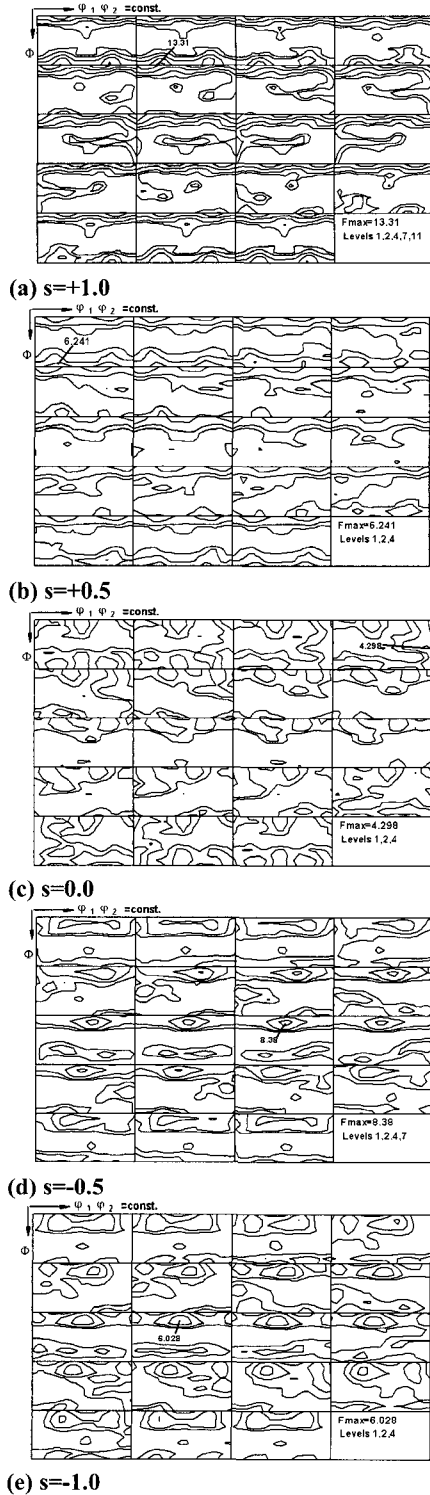


Fig. 4 OFs showing textures after asymmetrical rolling

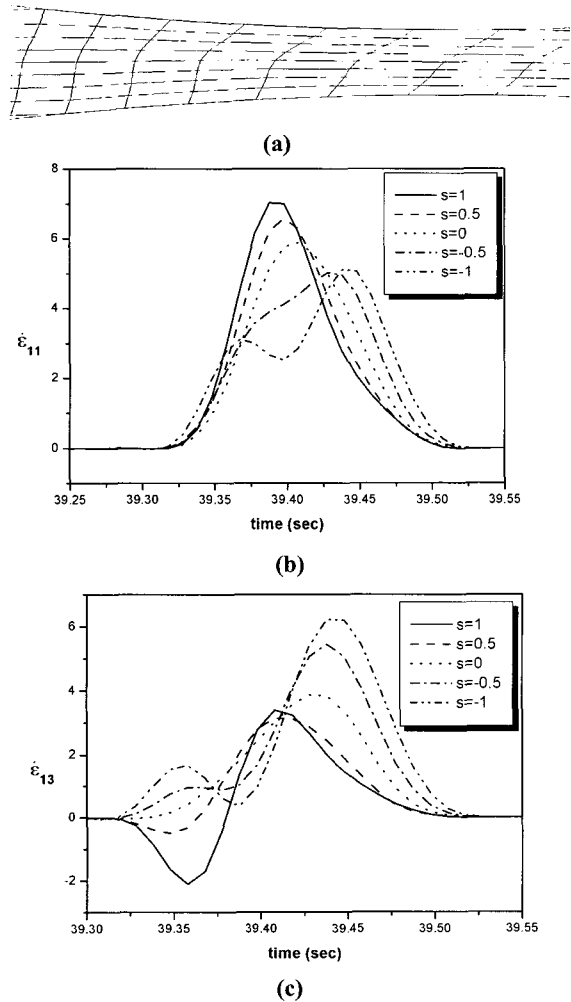
칭성에 의하여 모든  $\phi_2$  면에서 보여지는데, 예를 들면 오일 러 각  $(45^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ 와  $(0^\circ, 0^\circ, 45^\circ)$ 등에서 보여지고 있다.  $\phi_2=45^\circ$  인 면에서는 ND 에 평행하게  $\{111\}$  인 방위의 발달도 보여진다.

Fig. 4(b)의 압연된 판재의 상부 표면 층과 중앙 층의 중간 층인  $s=+0.5$  에서는 Fig. 4(a)에 비하여 약한 집합조직이 형성되나, 집합조직의 방위밀도 최대값은 역시  $\{001\}<110>$ 에서 형성된다. 이 집합조직에는 공통의  $\{001\}/ND$  방위들이 섬유형태로 보여지는데 이 방위들은 모든  $\phi_2$  면에서  $0^\circ \leq \phi \leq 20^\circ$  그리고  $70^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$  의 범위에 높은 방위밀도의 형성을 보여주고 있다.

압연판재의 중앙 층인  $s=0.0$  에서는 방위분포 함수에서 가장 낮은 최대방위밀도가 얻어졌다. 이것은 Fig. 4(a)와 (b)에서 방위밀도의 최대값이 대칭성이 높은  $\{001\}<110>$  방위에서 얻어 졌지만, Fig. 4(c)에서는 대칭성이 없는 방위인  $(170^\circ, 45^\circ, 15^\circ)$  즉  $\{277\}<711>$  근처에서 최대방위밀도가 얻어졌기 때문이다. 이 집합조직에는  $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$  등에 나타나는  $\{001\}<100>$  입방체 방위도 보여진다 하지만 이 방위는 매우 대칭성이 높아 이 방위에 있는 결정립의 부피분율은 매우 적은 것이 확실하다.

Fig. 4(d)와 (e)는 각각 압연 판재의 중앙 층과 하부 표면 층의 중앙부인  $s=-0.5$  층과 하부 표면 층의 방위분포함수를 보여준다. 이 층들에서는 거의 유사한 집합조직이 보여지는데 방위밀도의 최대값은  $\{001\}<110>$  전단집합조직에서 얻어지지 않고  $(90^\circ, 20^\circ, 45^\circ)$  에 가까운 방위들에서 얻어졌다. 또한 특징적인 집합조직은 공통의  $\phi = 10^\circ$  를 갖고  $30^\circ \leq \phi \leq 150^\circ$  를 갖는 방위들이 섬유 형태로 현성되어 있는 것이다. 이 방위들은  $\{001\}/ND$  방위들로부터 약  $10^\circ$  떨어진 방위들이다. Fig. 4(d)와 (e)에서는 명확히 발달한  $\{111\}/ND$  방위도 보여진다. 이 방위들은  $\phi_2=45^\circ$  에서 공통의  $\phi = 55^\circ$  를 갖고 섬유집합조직을 형성하고 있다.

비대칭압연을 행한 알루미늄 판재 시료에서는 Fig. 2의 극점도와 Fig. 4의 방위분포함수에서 알 수 있듯이 시편 두께 층에 따라 아주 상이한 집합조직이 얻어졌다. 소성변형 시 재료에 존재하는 결정립들에서의 슬립은 특정 결정면에서 특정결정방향으로 일어나며 이에 따라 결정립들의 회전 이 일어나 결정립들의 방위가 시편 축에 대하여 특정방향으로 놓여지기 때문에 집합조직이 형성된다.<sup>(19-21)</sup> 그런데 비대칭압연 후 시료의 두께층



**Fig. 5** FEM results showing (a) shape change of meshes, (b) variation of  $\dot{\epsilon}_{11}$  and (c) variation of  $\dot{\epsilon}_{13}$  in the roll gap during asymmetrical rolling

에 따라 서로 다른 집합조직이 형성된 것은 이 시료의 각 두께 층에 따라 서로 상이한 변형상태가 주어졌다는 것을 의미하는 것이다. 비대칭 압연 시 어떠한 불균일한 변형상태가 이와 같은 불균일한 집합조직을 형성시켰는지 알기 위하여 비대칭 압연을 상용 프로그램인 DEFORM-2D<sup>(17)</sup>를 이용하여 비대칭 압연을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 시 소재의 가공경화 곡선은 인장실험결과를 이용하였으며, 무윤활 조건에서 알루미늄 판재와 롤과의 마찰은 쿨롱마찰계수  $\mu = 0.25$  로 하였다.

압연변형 전과 후의 압연 판재 형태 변화만을 고

려하면 압연변형은 두께가 줄어드는 것만큼 길이가 길어지는 평면변형으로 간단히 가정 될 수 있다. 그러나 Fig. 5(a)에서 볼 수 있는 것 같이 압연 변형 시 변형 상태는 전 연구<sup>(1-2)</sup>에서 고찰한 것과 같이 평면변형이 아니다. 압연변형 시  $e_{13}$  과  $e_{31}$  은 일정한 값을 갖는 것이 아니고 롤의 입구에서 출구로 진행함에 따라 점차 변화한다. 기하학적 형상에 따른 전단변형률  $e_{31}$  은 Lee 와 Duggan<sup>(22)</sup>이 보고한 것과 같이 압연 롤의 직경, 두께 변형률, 시편의 두께에 의존한다.<sup>(1-2,23)</sup> 또한 롤과 압연재의 표면에서 작용하는 마찰력에 의한 전단변형  $e_{13}$  은 롤과 압연판재와의 속도차이로 얻어진다.<sup>(2,23)</sup>

Fig. 5(b)는 상부 롤의 회전 속도비 1.5/1.0 으로 비대칭압연 시 압연방향으로의 수직전단 변형률 속도의 변화인  $\dot{\epsilon}_{11}$  의 변화를 두께 층에 따라 FEM 계산을 통하여 구한 결과이다. 상부 표면 층인  $s=+1.0$  층으로부터 하부 표면 층인  $s=-1.0$  층으로 내려감에 따라  $\dot{\epsilon}_{11}$  의 최대값이 낮아지며  $\dot{\epsilon}_{11}$  의 최대값이 천천히 얻어짐을 확인할 수 있다. 이 결과는 상부 롤의 속도가 하부 롤의 속도에 비하여 빠르기 때문에 얻어지는 것이라 믿어진다. Fig. 5(b)에서 흥미로운 것은  $\dot{\epsilon}_{11}$  을 재료가 롤의 입구에서부터 출구까지의 지나가는 시간에 대하여 적분하면 모든 층에서 거의 동등한  $\epsilon_{11} = 0.55$  가 얻어졌다는 것이다. 이것은 상부 압연롤의 속도가 차이가 나면 압연방향으로 연신 되는 양이 위치에 따라 다르지만 최종 압연변형 종료 후에는 동등한 길이로 연신 되는 것을 의미하는 것이다.

하부 롤에 비하여 상부 롤의 속도가 빠른 비대칭압연에 의하여 롤의 입구와 출구 사이에서 전단변형률 속도  $\dot{\epsilon}_{13}$  는 두께 층에 따라 매우 큰 변화를 갖는 것을 Fig. 5(c)는 보여준다. 판재의 상부 표면인  $s=+1.0$  층에서는  $\dot{\epsilon}_{13}$  는 먼저 음의 값을 갖으며 음의 최대값을 지난 후에는 다시 증가하여 양의 최대값을 갖는 형태를 보여준다. 상부 표면 층과 중앙 층의 중간인  $s=+0.5$  층에서는 음의 값을 갖는  $\dot{\epsilon}_{13}$  의 크기는 감소하며 양의 값을 갖는  $\dot{\epsilon}_{13}$  의 크기는  $s=+1.0$  층과 유사한 형태를 갖는다. 압연 판재의 중앙 층 아래쪽인  $s=0.0, -0.5, -1.0$  두께 층들에서는 음의 값을 갖는  $\dot{\epsilon}_{13}$  는 존재하지 않으며 모든  $\dot{\epsilon}_{13}$  는 항상 양의 값을 갖는다. 비대칭 압연한 판재의 하부 층으로 갈수록 양의 값을 갖는  $\dot{\epsilon}_{13}$  의 크기는 증가한다.

정상적인 압연의 경우에는  $s=0.0$  인 판재의 중앙 층에서 압연 롤의 입구와 출구 사이에서  $\dot{\epsilon}_{13}$ 의 변화는 거의 없다.<sup>(1-2,23)</sup> 그러나 본 연구에서 보여주듯이 상하 압연 롤의 속도를 다르게 하는 비대칭압연에서는 중앙 층에서도 다른 모든 층과 같이 큰  $\dot{\epsilon}_{13}$ 의 변화가 일어났다. 상부 롤의 속도가 하부 롤의 속도보다 1.5 배 빠른 비대칭 압연에서는 양의  $\dot{\epsilon}_{13}$ 의 변화는 이 음의  $\dot{\epsilon}_{13}$ 의 변화는 에 비하여 모든 층에 비하여 높게 계산되었다. 이것은 Fig. 5(a)의 비대칭압연 변형 시 FEM-격자의 변화에서도 확인할 수 있는데 압연이 끝난 후 즉 출구 쪽에서 모든 두께 층의 격자는 양의 방향으로 기울어져 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 상하 압연 롤의 속도비 1.5/1.0, 무윤활 조건에서 비대칭 압연 변형 시 알루미늄 AA1100 판재에서 얻어지는 집합조직을 측정하고, 상용 FEM 프로그램인 DEFORM 을 사용하여 변형률 상태를 추적하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 비대칭 압연 후 판재에 존재하는 전단집합조직의 방위들은 사방정(monoclinic)의 대칭을 나타내었다.
- (2) 비대칭 압연 후 두께 층에 따라 매우 불균일한 집합조직이 형성되었다. 압연 판재의 상부 표면 층에서는  $\{001\}\langle 110 \rangle$ 이, 중앙 층에서는 거의 무질서한 집합조직이 일어났다. 압연 판재의 중앙 층과 하부 표면 층에서는 공통의  $\phi = 10^\circ$ 를 갖고  $30^\circ \leq \phi_1 \leq 150^\circ$ 를 갖는 이 섬유형태의 집합조직과  $\{111\}/ND$  방위가 발달 하였다.
- (3) 비대칭압연 시 압연방향으로의 수직전단 변형률 속도  $\dot{\epsilon}_{11}$ 의 변화는 두께 층에 따라 차이를 보이지만 모든 두께 층에서 거의 동등한  $\dot{\epsilon}_{11}$ 가 일어났다.
- (4) 비대칭압연 시 전단변형률 속도  $\dot{\epsilon}_{13}$ 는 상부 표면 층에서는  $\dot{\epsilon}_{13}$ 는 음과 양의 값을 갖지만, 압연 판재의 중앙 층 아래쪽인  $s=0.0, -0.5, -1.0$  두께 층들에서는 모든  $\dot{\epsilon}_{13}$ 는 항상 양의 값을 갖는다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(No. R01-2001-00261-0)의 지원을 받았습니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 허무영, 2001, 한국소성가공학회지, vol 11, pp. 14~23.
- (2) O. Engler, M.Y. Huh, C.N. Tomé, 2000, Metall. Mater. Trans. A, vol. 31A, pp. 2299~2315.
- (3) M. Y. Huh, H.C. Kim, J.J Park and O. Engler, 1999, Met. & Mater. Int., vol. 5, pp. 437~443.
- (4) M.Y. Huh, J.H. Kim, K.Y. Ha and S. Lee, 1996, Mater. Sci. Forum, vols. 217-222, pp. 571~576.
- (5) S.I. Wright, G.T. Gray III, and A.D. Rollett, 1994, Metall. Mater. Trans. A, vol. A25, pp. 1025~1031.
- (6) A. Van Bael, E. Hoferlin, L. Kestens, and P. Van Houtte, 1998, Mater. Sci. Forum, vols. 273-275, pp. 417~422.
- (7) M.Y. Huh and O. Engler, 2001, Mater. Sci. Eng., vol. A308/1-2, pp. 74~87.
- (8) K.H. Kim and D.N. Lee, 2001, Acta mater., vol. 49, pp. 2583~2595.
- (9) S.H. Lee and D.N. Lee, 2001, Int. J. Mech. Sci., vol. 43, pp. 1997~2015.
- (10) H. Hyja, J. Markowski and D. Stoinski, 1996, J. Mater. Proc. Tech., vol. 60, pp. 73~80.
- (11) M. Salimi and F. Sassani, 2002, Int. J. Mech. Sci., vol 44, pp. 1999~2023.
- (12) C.W. Knight, S.J. Hardy, A.W. Lees and K.J. Brown, 2003, J. Mater. Proc. Tech., vol 134, pp. 180~189.
- (13) J.S. Lu, O.K. Harrer, W. Schwenzfeier and F.D. Fischer, 2000, Int. J. Mech. Sci., vol 44, pp. 49~61.
- (14) H. Gao, S.C. Ramalingam, G.C. Barber and G. Chen, 2002, J. Mater. Proc. Tech., vol 124, pp. 178~182.
- (15) A. Bettina Richelsen, 1997, Int. J. Mech. Sci., vol. 39, pp. 1199~1211.
- (16) H.O. Asbeck, and H. Mecking, 1978, Mat. Sci. Eng., vol. 34, pp. 111~119.
- (17) DEFORM-2D, Ver. 7.1, 2001, Science Forming Technologies Cooperation, Columbus, OH.
- (18) H.J. Bunge, 1982, Texture Analysis in Materials Science, Butterworths, London.
- (19) M.Y. Huh, Y.S. Cho and O. Engler, 1998, Mater. Sci. Eng. vol. A247, pp. 152~164.
- (20) Y.S. Cho, H.C. Kim and M.Y. Huh, 1998, Met. & Mater. Vol. 4, pp. 397~403.

- (21) U.F. Kocks, 1970, Metall. Trans., vol. 1, pp. 1121~1143. 22A, pp. 2637-2643.
- (22) C.S. Lee, and B.J. Duggan, 1991, Metall. Trans. A, vol. (23) M.Y. Huh, J.C. Park, and S. Lee, 1996, Metals and Mater. Int., vol. 2, pp. 141~149.