

5182 알루미늄 합금판재의 재결정 집합조직에 대한 l/d 파라메타의 영향

Effect of l/d Parameter on Recrystallization Textures of AA5182 Alloy Sheets

김기주¹, 원시태²✉
Kee Joo Kim¹ and Si Tae Won²✉

¹ 서정대학 자동차과 (Department of Automobile Engineering, Seojeong College)
² 서울과학기술대학교 제품설계금형공학과 (Department of Product Design and Manufacturing Engineering, Seoul National University of Science Technology)
✉ Corresponding author: stwon370@seoultech.ac.kr, Tel: 02-970-6370

Manuscript received: 2011.4.5 / Accepted: 2011.6.15

To fabricate the aluminum alloys with good drawability, the textures evolution of the AA5182 sheets due to the change of l/d parameter after rolling and subsequent annealing was studied. The measurement of the deformation textures was carried out for the sheets with high reduction ratio and the change of the recrystallization texture was investigated after heat-treatments of the rolled sheets in various l/d parameters. Rolling without lubrication and subsequent annealing led to the formation of favorable $rot-C_{ND}$ $\{001\}<110>$ and γ -fiber $ND//<111>$ textures in AA5182 sheets. From the results, the γ -fiber $ND//<111>$ component well evolved during rolling at high l/d parameter of 6.77. The initial shear deformation texture, especially, γ -fiber $ND//<111>$ was not rotated during heat treatment in holding time of 180~7,200 seconds on AA5182 with l/d parameter of 6.77. Therefore, the AA5182 sheets were fabricated by controlling l/d parameter having well evolved γ -fiber $ND//<111>$ which was advantageous in good drawability of the sheets.

Key Words: AA5182 Sheet (알루미늄 5182 합금판재), Recrystallization Texture (재결정 집합조직), l/d Parameter (l/d 파라메타), Rolling (압연), $ND//<111>$ (압연 직각방향 $//<111>$)

1. 서론

알루미늄 합금판재를 자동차용 차체 판넬에 적용하기 위해서는 압연성형 금속판재는 우수한 드로잉성(drawability)과 낮은 평면 이방성을 갖고 있어야 하며 이들 특성들은 집합조직의 발달과 밀접한 관련이 있다.¹ 알루미늄 합금판재의 드로잉성을 증가시키기 위해서는, 전단집합조직 성분이 잘 발달하도록 압연조건을 선정하여 가공해야 한다. 판재에 전단변형이 크게 가해지도록 가공할 때, 압연롤러와 슬라브 사이에서 발생하는 마찰계수(μ)

값은 커지게 된다.² 이 마찰계수는 압연 중 형상인자(l/d 파라메타)의 증가에 의해 커지게 되므로 형상인자의 조정으로 잘 제어될 수 있다. 여러 전단 변형 집합조직 중, 특히 γ -fiber $ND//<111>$ 성분이 잘 발달한다면, 평면이방성은 감소하며 판재의 드로잉성은 증가할 수 있는 반면에 $rot-C_{ND}$ $\{100\}<110>$ 성분이 잘 발달한다면 평면이방성은 증가한다.^{1,2}

본 논문은 압연공정 변수인 다양한 형상인자 조건들을 확정한 후에 서로 다른 집합조직을 갖는 다양한 판재들을 압연가공으로 제작하였고, 이들

판재들은 다양한 열처리조건으로 풀림처리 (annealing)를 하였고, 모든 시편들의 풀림처리 후 집합조직의 변화에 대한 면밀한 조사와 분석을 통하여 형상인자(l/d 파라메타)와 풀림조건에 대한 최적의 공정변수를 확립하고자 한다.

2. 실험 방법

그림 1 은 본 실험에서 냉간 압연 실험전에 사용한 열간 압연에 의하여 가공된 5182 알루미늄 판재의 미세조직이다. 미세조직의 관찰은 #2000 번의 사포로 기계적 연마 후 증류수로 희석시킨 40% HF(hydrofluoric) 용액으로 에칭하여, 이미지 어날라이저(image analyzer)에서 관찰한 결과, 평균 결정립 크기는 64 μm 이었다. 본 연구에서 5182 알루미늄 합금 판재의 냉간 압연 조건은 롤 회전속도 400rpm, 총 압하율(두께 감소율) 약 93% 및 표 1 에 나타낸 것과 같은 다양한 l/d 파라메타를 공정변수로 활용하여, 다양한 전단집합조직을 갖는 다양한 압연 판재들을 얻을 수 있었다. 보통 l/d 파라메타는 그림 2 에서 보는 바와 같이 변형형태를 나타내는 인자로 주로 사용된다.^{1,2}

여기서 l 과 d 는 식(1) 및 식(2)와 같이 나타낼 수 있으며 l 은 롤 바이트와 판재 사이의 투영접촉 길이이고, d 는 판재의 압하변화를 각각 나타낸다. 재결정 집합조직의 형성은 염욕로(salt bath)를 이용하여 판재를 350 $^{\circ}\text{C}$ 에서 0 초, 180 초, 1,200 초, 3,600 초 및 7,200 초 동안 풀림 처리하여 관찰하였다.

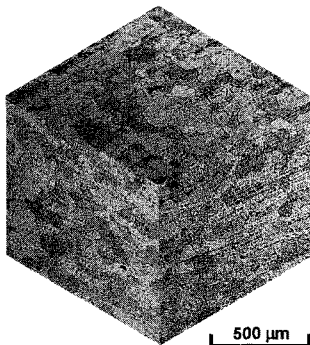


Fig. 1 Micrograph of AA5182 hot rolled sheets

본 연구에서 압연 가공된 알루미늄 판재의 집합조직을 분석하기 위한 극점도(pole figure)의 측정을 위한 시편은 기계적 연마 후 10% NaOH 용액으로 화학적 연마하여 표면으로부터 10 μm 를 제거

하여 표면 마찰의 영향이 없는 부위를 측정할 수 있도록 준비하였다. 이때 극점도 {111}, {200} 및 {220}는 Schultz reflection 방법으로, 측정장치는 Seifert 3003 으로, 각각 전압은 30KV, 전류는 15mA 의 조건으로 측정하였다. 타겟은 FCC 금속에 일반적으로 추천되고 있는 Co 타겟을 사용하였다.

Table 1 Rolling conditions of AA5182 sheets

Designation of Rolling Sheets	Number of Passes	Total Reduction	Average l/d
5182-P003	3	92.8	6.77
5182-P004	4	93.2	6.28
5182-P007	7	93.3	5.20
5182-P024	24	93.3	2.63
5182-P041	41	93.1	1.89

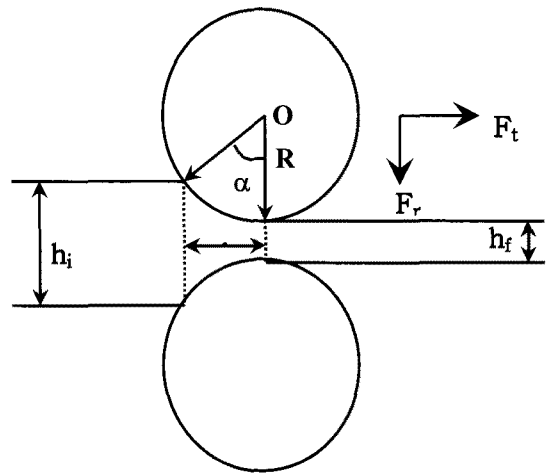


Fig. 2 Schematic for l/d parameter explanation

$$l = \sqrt{R(h_i - h_f) - (h_i - h_f)^2 / 4} \tag{1}$$

$$d = (h_i + h_f) / 2 \tag{2}$$

R = Radius of Rolling Roller

3. 실험결과 및 고찰

그림 3 은 면심입방 결정격자구조(Face centered cubic)를 갖는 금속재료의 대표적인 (111) 극점도 형상을 나타내었다. 그림 3(a), (b), (c), (d), (e) 및 (f) 는 각각 Cube {100}<001> 방위, Goss (110)<001> 방

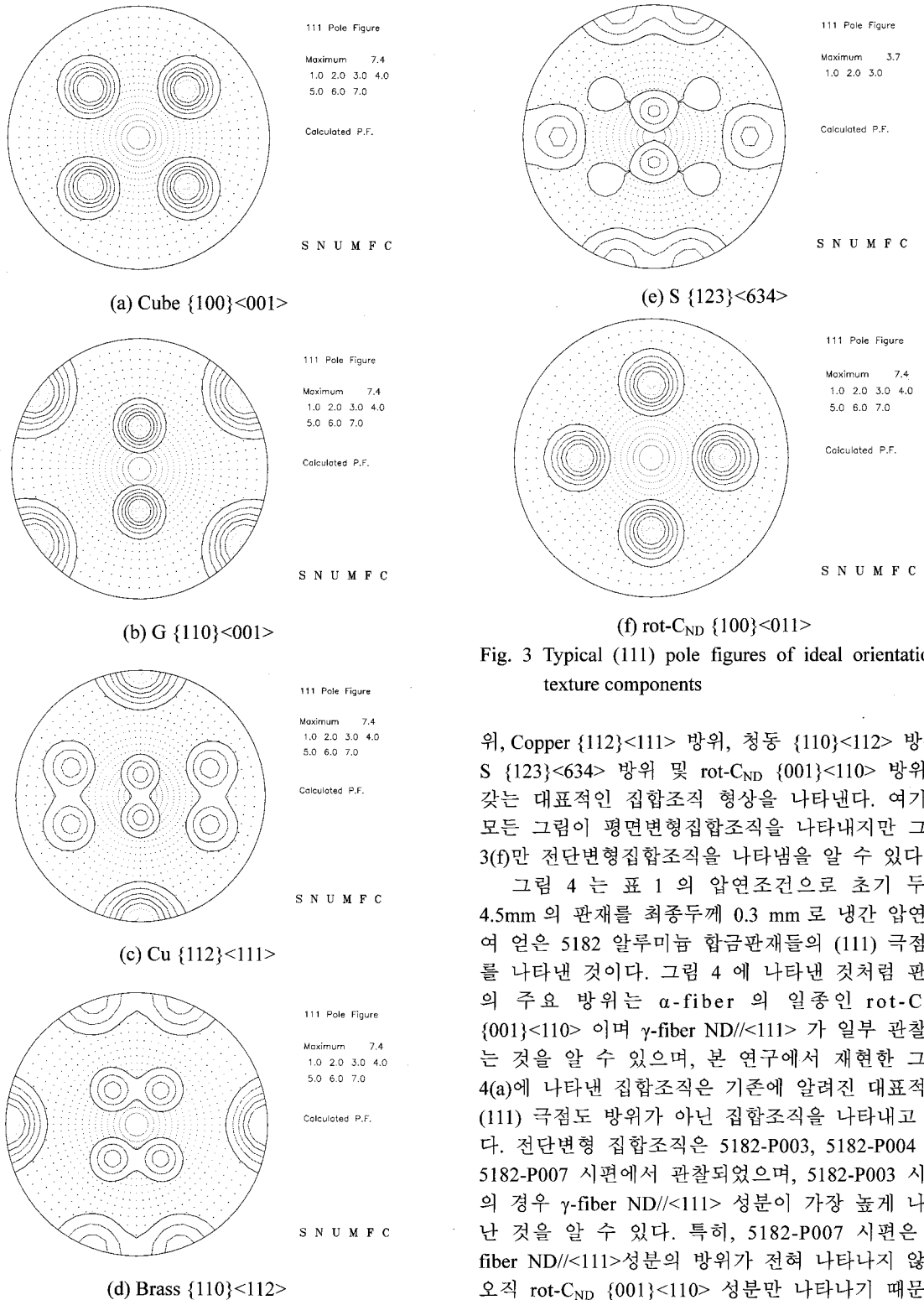


Fig. 3 Typical (111) pole figures of ideal orientations texture components

위, Copper $\{112\}\langle 111\rangle$ 방위, 청동 $\{110\}\langle 112\rangle$ 방위, S $\{123\}\langle 634\rangle$ 방위 및 rot- C_{ND} $\{001\}\langle 110\rangle$ 방위를 갖는 대표적인 집합조직 형상을 나타낸다. 여기서 모든 그림이 평면변형집합조직을 나타내지만 그림 3(f)만 전단변형집합조직을 나타냄을 알 수 있다.

그림 4는 표 1의 압연조건으로 초기 두께 4.5mm의 판재를 최종두께 0.3 mm로 냉간 압연하여 얻은 5182 알루미늄 합금판재들의 (111) 극점도를 나타낸 것이다. 그림 4에 나타난 것처럼 판재의 주요 방위는 α -fiber의 일종인 rot- C_{ND} $\{001\}\langle 110\rangle$ 이며 γ -fiber ND// $\langle 111\rangle$ 가 일부 관찰되는 것을 알 수 있으며, 본 연구에서 재현한 그림 4(a)에 나타난 집합조직은 기존에 알려진 대표적인 (111) 극점도 방위가 아닌 집합조직을 나타내고 있다. 전단변형 집합조직은 5182-P003, 5182-P004 및 5182-P007 시편에서 관찰되었으며, 5182-P003 시편의 경우 γ -fiber ND// $\langle 111\rangle$ 성분이 가장 높게 나타난 것을 알 수 있다. 특히, 5182-P007 시편은 γ -fiber ND// $\langle 111\rangle$ 성분의 방위가 전혀 나타나지 않고 오직 rot- C_{ND} $\{001\}\langle 110\rangle$ 성분만 나타나기 때문에

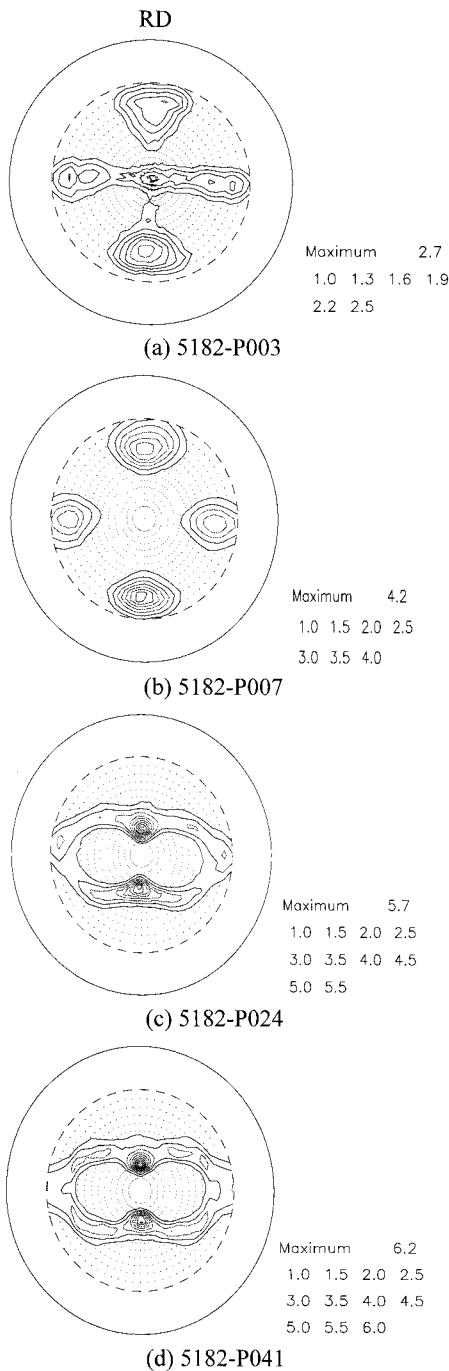


Fig. 4 Measured (111) pole figures of (a) 5182-P003, (b) 5182-P007, (c) 5182-P024 and (d) 5182-P041 sheet

이 관재의 이방성은 매우 높을 것으로 예측된다.³ 5182-P024 시편과 5182-P041 시편에서는 전형적인 평면변형 집합조직 성분인 Cu {112}<111>가

잘 발달한 것을 알 수 있으며 이것은 이 시편의 경우 l/d 파라메타 값이 낮아 전단변형을 받지 않는 압연조건이기 때문이다.

그림 5 는 350°C에서 다양한 시간 동안 풀림처리한 5182-P003 시편의 경도값의 변화를 나타낸 것이다. 회복(recovery)은 열처리 초기 단계에서 특정 온도에서 매우 빠른 시간 동안 진행되는 현상이다. 경도값의 변화로부터 관재의 재결정은 열처리 시간 대략 65 초에서 시작된 것을 알 수 있으며 열처리 시간 100 초에서 경도값이 급격히 저하되고 있고, 압연관재의 완전 재결정을 위해서는 350°C 온도에서 180 초 동안 풀림처리를 하여야 함을 알 수 있다.

그림 6 은 5182-P003 시편의 풀림처리 전 극점도와 다양한 조건에서 풀림처리 후 극점도의 변화를 나타내었다. 5182-P003 의 경우는 l/d 파라메타 값이 6.77 (압하율 92.8%)로 일반적인 알루미늄 합금들에 비하여 γ -fiber ND//<111> 성분의 방위가 매우 높게 발달한 시편이었다. 더욱이 풀림처리 시간 180 초에서는 rot- C_{ND} {001}<110> 방위 성분의 극강도는 낮아지는 반면에 γ -fiber ND//<111>성분의 방위는 매우 높아짐을 알 수 있었다. 그림 5 에 나타난 극점도에서는 rot- C_{ND} {001}<110> 방위 성분의 상하, 좌우 부분의 극강도가 180 초 이후 점차 낮아져 1,200 초 이후에는 더욱 낮아짐을 알 수 있다. 그림 6 에 나타난 바와 같이 5182-P003 시편은 rot- C_{ND} {001}<110> 방위 성분이 대칭적으로 상하 좌우로 나타난 것으로 보아 심하게 전단변형 되었음을 알 수 있으며, 풀림처리를 통하여 TD(transverse direction)방향을 기준으로 상하 5° 정도 회전되었음을 알 수 있었다. 그림 5(d)에 나타난 것처럼 풀림처리 시간 7,200 초 동안 γ -fiber ND//<111> 성분은 전혀 다른 방위로 바뀌거나 회전하지 않음을 알 수 있다.

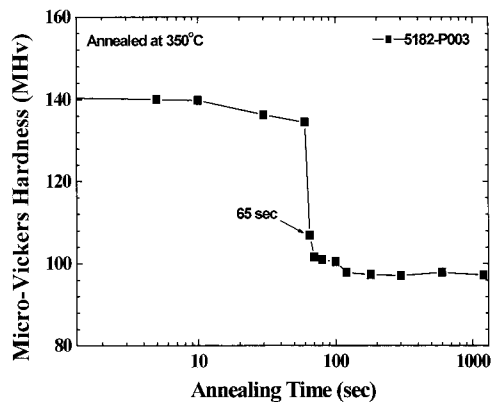


Fig. 5 Micro-Hardness of cold rolled 5182-P003 aluminum sheet as a function of annealing time at 350°C

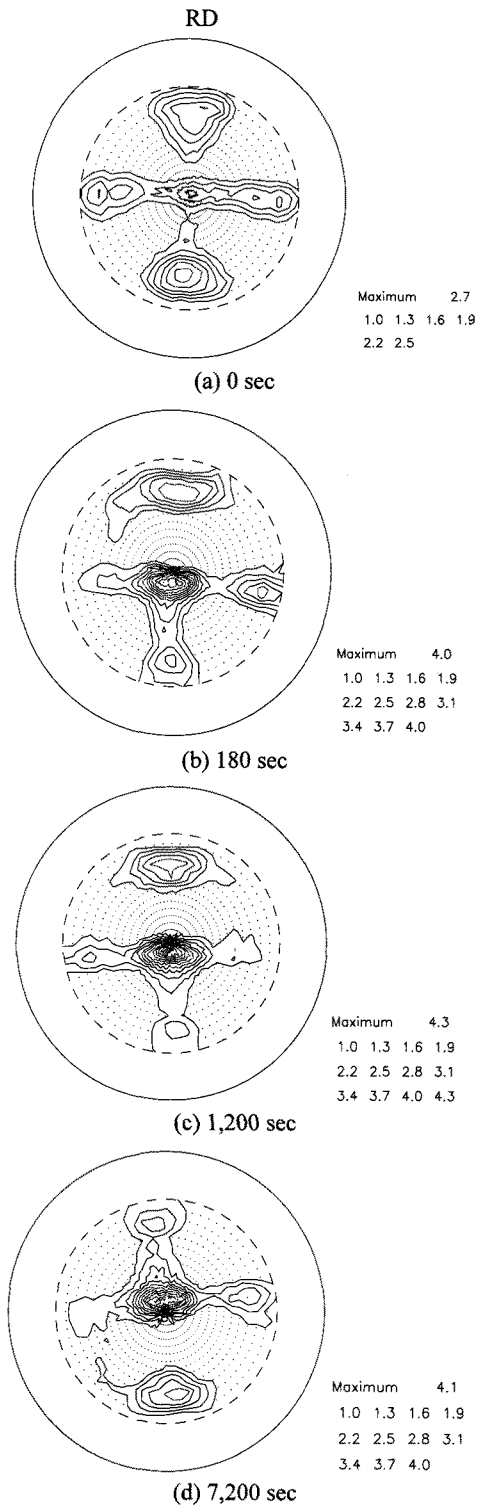


Fig. 6 Measured (111) pole figures of AA 5182 sheets after annealing at 350°C

그림 7 과 8 은 각각 5182-P004 및 5182-P007 시편을 온도 350°C에서 3,600 초 및 7,200 초 동안 풀림처리 한 후 극점도를 측정한 결과이다.

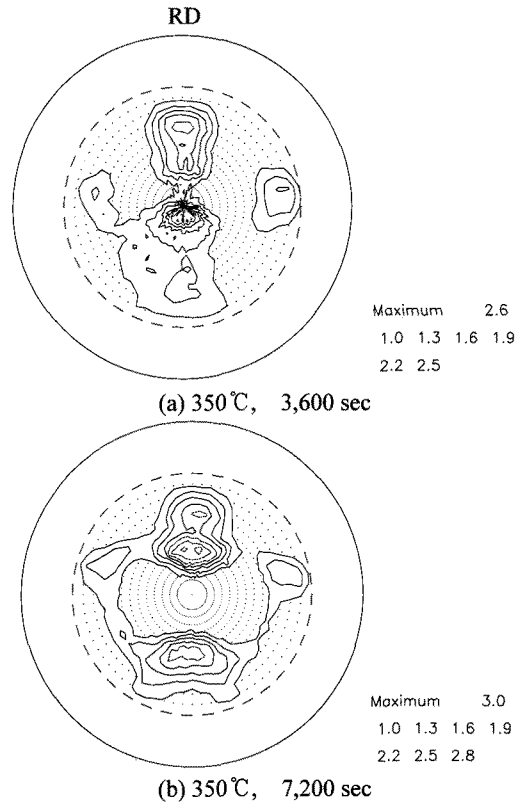


Fig. 7 Measured {111} pole figures of 5182-P004 sheets after annealing at 350°C for (a) 3,600 sec, (b) 7,200 sec

5182-P004 및 5182-P007 시편의 재결정 집합조직은 유사하였다. γ -fiber ND// $\langle 111 \rangle$ 성분의 극강도는 3,600 초 및 7,200 초 동안 풀림처리 시 거의 변화하지 않았으나 rot- C_{ND} {001} $\langle 110 \rangle$ 방위 성분의 극강도는 5182-P003 시편에서 처럼 풀림처리 시간이 증가함에 따라 낮아짐을 알 수 있다. 7,200 초 동안 풀림처리한 시편의 경우 TD 방향을 기준으로 γ -fiber ND// $\langle 111 \rangle$ 성분은 5° 회전하는 것을 알 수 있다. 또한, 5182-P004 시편을 3,600 초 동안 풀림처리한 경우에는 rot- C_{ND} {001} $\langle 110 \rangle$ 방위의 상하 또는 좌우로 비대칭성을 나타내었다. 반면에 5182-P004 시편을 7,200 초 동안 풀림처리한 경우에는 상하는 비대칭이었으며, 좌우는 대칭인 것을 알 수 있었다. 5182-P007 시편을 3,600 초 및 7,200 초

동안 풀림처리한 경우는 상하는 비대칭, 좌우는 대칭인 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 5182-P007 시편은 5182-P003 및 5182-P004 시편에 비하여 상대적으로 전단변형이 덜 가해졌음을 유추할 수 있다. 즉, 풀림처리를 통하여 전단변형 집합조직으로부터 평면변형 집합조직으로 변화하는 경향은 $1/d$ 파라메타 값이 낮은 경우 증가하는 것을 알 수 있는데, 이 결과는 5182-P004 시편의 경우 350°C에서 7,200 초 동안 풀림처리한 극점도가 5182-P007 시편을 350°C에서 3,600 초 동안 풀림처리한 경우 유사한 극점도를 나타낸 것을 통하여 예측해 낼 수 있다.

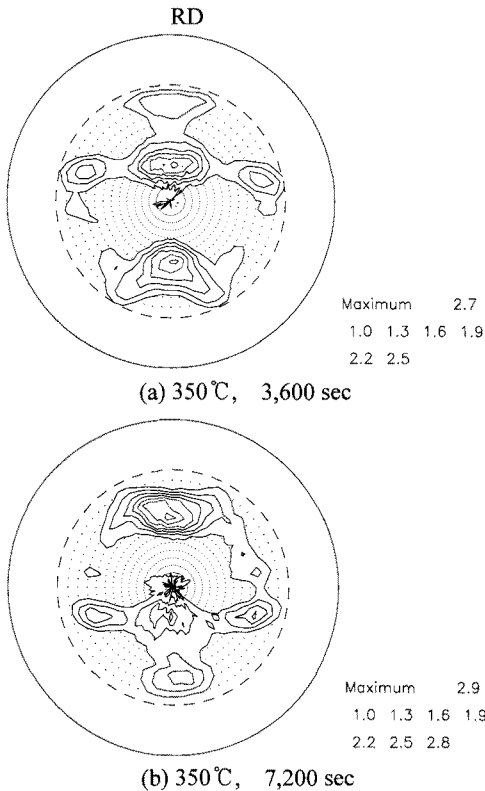


Fig. 8 Measured {111} pole figures of 5182-P007 sheets after annealing at 350°C for (a) 3,600 sec, (b) 7,200 sec

그림 9 는 가공 초기에 평면변형 집합조직이 잘 발달하였던 5182-P041 시편을 350°C 에서 3,600 초 및 7,200 초 동안 풀림처리한 재결정 집합조직을 나타낸 것이다. 이 결과 풀림처리 시간이 증가함에 따라 방위의 회전은 나타나지 않았으며, β -

fiber 의 일종인 $\text{Cu } \{112\} \langle 111 \rangle$ 평면변형 집합조직의 극강도는 증가하였다. 즉, 전형적인 평면변형 집합조직 성분인 $\text{Cu } \{112\} \langle 111 \rangle$ 이 관찰되었으며, 균질한 방위인 $\text{Cu } \{112\} \langle 111 \rangle$ 방위는 매우 안정적인 방위임을 알 수 있었다. 극점도에서 방위는 TD 방향에서 균등하였으며 TD 방향을 중심으로 전,후 다른 방향으로 회전하지 않음을 알 수 있는 평면변형 집합조직을 나타내었다. 이것은 5182-P041 시편의 경우 5182-P003 ~ 5182-P007 시편과 같은 전단변형이 가해지지 않았기 때문이다.

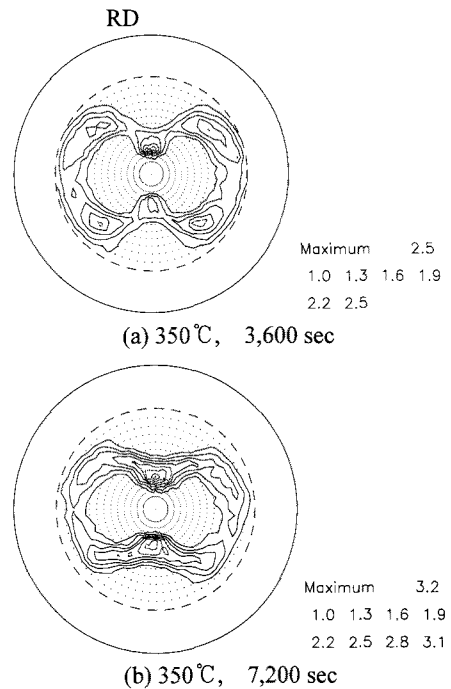


Fig. 9 Measured {111} pole figures of 5182-P041 sheets after annealing at 350°C for (a) 3,600 sec, (b) 7,200 sec

그림 4 에서 나타나듯이 5182 알루미늄 합금의 경우 형상인자($1/d$ 파라메타)를 5.20~6.77 로 변화시킬 때 전단변형 집합조직이 관찰되는 반면에 형상인자가 5.20 인 5182-P007 시편의 경우는 오직 $\text{rot-C}_{ND} \{001\} \langle 110 \rangle$ 방위만 나타났다. 형상인자가 2.63 및 1.89 인 경우, 마찰계수의 영향은 상대적으로 감소하였으며, 전형적인 평면변형 집합조직인 β -fiber 가 각각 잘 발달함을 알 수 있다. 따라서, 드로잉성의 향상에 기여하는 γ -fiber $\text{ND} // \langle 111 \rangle$ 방위가 잘 발달할 수 있는 압연조건은 형상인자 값이 높

을수록 유리함을 알 수 있다.

그림 10 은 형상인자인 l/d 파라메타의 변화에 따른 유효변형률과 마찰계수간의 관계를 유한요소법(FEM)으로 예측한 결과를 나타낸 것이다.^{4,5}

본 그림에서 유효변형률은 마찰계수가 높을 때 증가함을 알 수 있다. 여기서, 유효변형률은 von Mises 항복함수에서의 변형률증가 항(term)으로 표현할 수 있으며 그 식은 다음과 같다.

$$d\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \{ (d\epsilon_{11} - d\epsilon_{22})^2 + (d\epsilon_{22} - d\epsilon_{33})^2 + (d\epsilon_{33} - d\epsilon_{11})^2 + 6(d\epsilon_{23}^2 + d\epsilon_{31}^2 + d\epsilon_{12}^2) \}^{1/2} \quad (3)$$

한편, 평면변형압축(압연변형시)의 경우는 오직 $d\epsilon_{11}$ 및 $d\epsilon_{31}$ 성분만 존재하기 때문에, 유효변형률 증가 항은 다음의 식으로 간략화 된다.

$$d\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} [(d\epsilon_{11}^2 + d\epsilon_{31}^2)]^{1/2} \quad (4)$$

유효변형률의 마찰계수값이 0.4 일 때, 유효변형률은 l/d 파라메타의 증가에 따라 강하게 증가함을 그림 10 으로부터 알 수 있다. 이것은 마찰계수값이 큰 경우 유효변형률이 l/d 파라메타에 크게 영향을 받기 때문이다. 그러나, 유효변형률의 마찰계수값이 0.2 또는 0.1 과 같이 낮은 경우에는 유효변형률은 l/d 파라메타의 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서 충분한 윤활을 가한 압연 가공의 경우와 같이 마찰계수 값이 낮은 경우는, 전단변형 집합조직이 나타날 가능성이 매우 적고, 판재의 표면에 유효변형률이 작게 나타나는 결과를 초래하게 될 것으로 생각한다. 이상과 같이 본 연구에서는 모든 압연시험은 롤 바이트의 지름을 증가시키지 않고, 오직 l/d 파라메타(접촉길이 l 과 압하변화 d 만 조정)만 제어하여 전단변형 집합조직 성분이 잘 발달한 판재를 얻을 수 있었다. 본 압연공정은 관련 산업계에서 당장 사용할 수 있는 공정이며 상기 분석에서 나타났듯이, 알루미늄 합금이 주로 대칭 냉간압연에서 생산됨에도 불구하고 오직 l/d 파라메타만 제어하여도 전단변형 집합조직이 잘 발달한 판재를 제조할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서, 알루미늄 합금에서 마찰계수의 차이에 기인하는 전단변형 집합조직이 잘 발달하도록 하는데, l/d 파라메타의 제어가 상당히 효과적인 공정변수임을 실험적으로 증명하고 재현하였다.

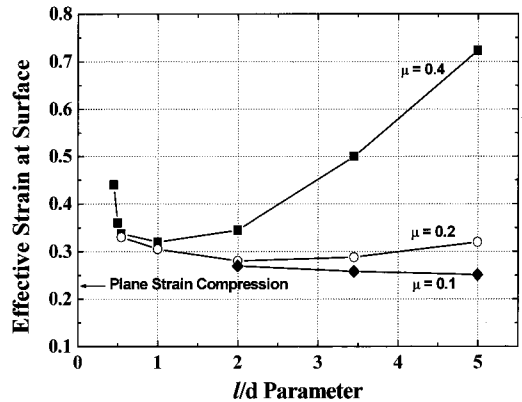


Fig. 10 FEM calculated effective strain of surface layer of 20% rolled IF steel sheets as functions of l/d parameter and friction coefficient^{4,5}

4. 결론

- (1) 높은 l/d 파라메타를 이용한 5182 알루미늄 합금판재의 압연으로부터, 전단변형을 부여할 수 있었으며, 이로부터 전형적인 전단변형 집합조직 성분인 γ -fiber ND//<111> 및 rot-C_{ND} {001}<110> 성분을 갖는 판재를 얻을 수 있었다.
- (2) l/d 파라메타를 6.77 로 압연가공한 5182 알루미늄 합금판재의 경우, 초기 전단변형 집합조직 성분은 풀림처리 시간 180~7,200 초 동안 열처리 후 열처리 전 나타났던 γ -fiber ND//<111>는 다른 방위로 회전하지 않음을 알 수 있었다.
- (3) l/d 파라메타를 5.20 이하로 압연가공한 5182 알루미늄 합금판재의 경우 풀림처리 후 평면변형 집합조직 성분인 Cu {112}<111>로 회전하는 경향이 있음을 알 수 있었다.
- (4) l/d 파라메타 값이 6.77 인 압연조건을 이용하여 전단변형 집합조직, 특히 γ -fiber ND//<111>이 재결정 중 다른 방위(예: Cu {112}<111> 등)로 회전하지 않는 공정을 확립하였으며, 이 조건에서 드로잉성이 우수할 것으로 기대되는 집합조직을 지닌 5182 알루미늄 합금판재를 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. Kamijo, T., Adachihara, H. and Fukutomi, H., "Formation for (001)[100] Deformation Structure in Aluminum Single Crystals of an S-Orientation," Acta Mater., Vol. 41, No. 3, pp. 975-990, 1993.

2. Kim, K. J., "Plastic Strain Ratios and Planar Anisotropy of AA5182/Polypropylene/AA5182 Sandwich Sheets," *Inter. J. of Auto. Tech.*, Vol. 6, No. 3, pp. 259-265, 2005.
3. Lequeu, Ph. and Jonas, J. J., "Modeling of the Plastic Anisotropy of Textured Sheet," *Metall. Trans. A*, Vol. 19, No. 1, pp. 105-120, 1998.
4. Um, K. K., Jeong, H.-T., An, J. K., Kim, G. and Kwon, O., "Effect of Initial Sheet Thickness on Shear Deformation in Ferritic Rolling of IF-Steel Sheets," *ISIJ Int.*, Vol. 40, No. 1, pp. 58-64, 2000.
5. Kim, K. J. Rhee, M. H., Choi, B. I, Kim, C. W., Sung, C. W., Han, C. P., Kang, K. W. and Won, S. T., "Development of Application Technique of Aluminum Sandwich Sheets for Automotive Hood," *Inter. J. of Precision Eng. and Manufacturing*, Vol. 10, No. 4, pp. 71-75, 2009.