

## 비대칭 압연과 열처리한 Cu 판의 집합조직과 소성변형비 변화 ( I )

이철우<sup>1</sup>, 이동녕<sup>2</sup>, 김인수<sup>1#</sup>

### Changes of Texture and Plastic Strain Ratio of Asymmetrically Rolled and Annealed Cu Sheet ( I )

C. W. Lee, D. N. Lee, I. Kim

(Received September 27, 2019 / Revised October 14, 2019 / Accepted October 24, 2019)

#### Abstract

The plastic strain ratio is one of the factors that affect the deep drawability of metal sheets. The plastic strain ratio of fully annealed Cu sheet is low because its texture has  $\{001\}\langle 100 \rangle$ . In order to improve the deep drawability of Cu sheet, it is necessary to increase the plastic strain ratio of Cu sheet. This study investigate the increase of plastic strain ratio of a Cu sheet after the first asymmetry rolling and annealing, and the second asymmetry rolling and annealing in air and Ar gas conditions. The average plastic strain ratio ( $R_m$ ) was 0.951 and  $|\Delta R|$  value was 1.27 in the initial Cu sheet. After the second 30.1% asymmetric rolling and annealing of Cu sheet at 1000°C in air condition, the average plastic strain ratio ( $R_m$ ) was 1.03 times higher. However,  $|\Delta R|$  was 0.12 times lower than that of the initial specimen. After the second 18.8% asymmetric rolling and annealing of Cu sheet at 630°C in Ar gas condition, the average plastic strain ratio ( $R_m$ ) was 1.68 times higher and  $|\Delta R|$  was 0.82 times lower than that of the initial specimen. These results are attributed to the change of the texture of Cu sheet due to the different annealing conditions.

**Key Words:** Texture, Asymmetric Rolling, R-value, Plastic Strain Ratio, Annealing

#### 1. 서 론

면심입방정 (FCC) 결정구조인 구리(Cu)는 연성은 높으나 판재 성형성 척도의 하나인 소성변형비 (r-value 또는 Lankford parameter)가 낮다고 알려져 있다 [1]. 그 이유는 완전 열처리한 Cu 판재가 FCC 로 소성변형비를 낮추는 요소인 입방정 집합조직이라 불리는  $\{001\}\langle 100 \rangle$  성분이 높아져 이로 인하여 디프드로잉 성형성이 나빠진다고 알려져 있다 [2~4].

FCC 결정구조를 갖는 금속판재의 소성변형비를 증가시키기 위하여 알루미늄 합금 판재의 비대칭 압연에 의한 전단변형을 이용하여 소성변형비를 높

이는 요소인 ND// $\langle 111 \rangle$  집합조직 ( $\gamma$ -fiber 집합조직 또는  $\{111\}\langle 112 \rangle$ 와  $\{111\}\langle 011 \rangle$  집합조직이라 부른다.) 을 증가시키는 연구를 진행하고 있다 [5~15]. 그러나 Cu 의 비대칭 압연과 열처리로 소성변형비를 증가시키는 연구는 아직 이루어지지 않고 있다.

Cu 도 FCC 결정구조로서 전단변형에 의하여 변형 집합조직인 회전 입방정 집합조직,  $\{001\}\langle 110 \rangle$ 이 주로 발달 되고 동시에 평균 소성변형비를 높이는 ND// $\langle 111 \rangle$  집합조직 성분이 부수적으로 발달 된다고 알려지고 있다 [4~6]. 종전에는 Al 판재를 대칭 압연한 후 열처리하여 제품을 생산하였다. 최근 종전의 방법을 바꾸어 1 차로 비대칭 압연을 하고 열처리 한 판재를 또 다시 2 차 대칭 또는 비대칭 압연을 하고 열처리 함으로서 Al 판재의 소성변형비를 높이는 실험으로 좋은 연구 결과를 얻었다 [12-

1. 금오공과대학교 신소재공학부

2. 서울대학교, 재료공학부

# Corresponding Author : School of Materials Science and Engineering,  
Kumoh National Institute of Technology, E-mail: iskim@kumoh.ac.kr,  
ORCID : 0000-0003-2783-2432

15]. 이 AI 연구 결과를 바탕으로 본 연구에서도 결정구조가 같은 Cu 판재를 1 차 비대칭 압연 후 열처리 한 것을 2 차 비대칭 압연과 열처리하였다. 이때 비대칭 압연의 전단변형 효과를 이용하여 집합조직의 변화시키고 열처리하여 디프 드로잉 성형성의 척도인 소성변형비의 변화를 관찰하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 두께 5.0 mm 인 Cu 판재에 압연방향을 표시하고 70 mm x 30 mm x 5.0 mm 크기로 절단하여 초기시편(initial specimen)이라고 한다. initial specimen 은 상/하 롤 지름 (15cm)을 동일하게 하고 상/하롤 회전속도 비를 1:1.5 로 무윤활 냉간 비대칭 압연하였다. 1 차 무윤활 냉간 비대칭 압연의 압하율은 80%였으며 이것을 600°C 에서 1 시간 열처리하였다. 2 차 무윤활 냉간 비대칭 압연은 최종 압하율을 5.3%에서 30.1%까지 하였다. 여기서 무윤활 상태에서 비대칭 압연을 한 이유는 롤과 시편 사이에 높은 마찰계수로 인하여 Cu 판재에 전단변형을 크게 하기 위함이다. 2 차 대칭과 비대칭 압하율을 5.3%에서 30.1%까지 낮게 한 이유는 새로운 공정으로 이 이상에서는 1 차 비대칭과 동일한 상태로 되어 2 차 압연의 또 다른 효과가 없어지기 때문이다[12-15]. 2 차 비대칭 압연한 시편은 각각 1 회 패스를 하여 최종 압하율이 되도록 하였다. 2 차 냉간 비대칭 압연한 시편은 그 동안 연구[12-15]를 바탕으로 온도를 설정하여 공기 분위기 1000°C 에서 1 시간 동안 열처리한 후 공랭하는 공정과 Ar 분위기 630°C 에서 1 시간 동안 열처리한 후 공랭하는 공정으로 나누어 실시하였다. Table 1 에는 Cu 판재를 1 차와 2 차 냉간 비대칭 압연하고 열처리한 시편의 준비과정과 이름을 정리하여 놓았다. 각 단계에서 비대칭 압연과 열처리한 시편은 느린 속도의 롤 쪽 판재 면을 기계적으로 연마한 후 최종 화학적으로 에칭하여 총 두께의 20%를 제거한 층에서의 극점도를 측정하였다. 타겟으로 Co-K $\alpha$  X-선을 사용하였으며 Schultz 반사법으로 (111), (200) 및 (220) 면의 불완전 극점도를 측정하였다. 이와 같이 측정한 2 차원 극점도는 각 시편의 집합조직을 분석하기 위하여 Bunge[16]가 제안한 방법으로 3 차원 방위분포함수 (Orientation Distribution Function, ODF)를 계산하였다. Taylor 이론 [17]에 바탕을 두고 Bunge[16]가 제안한 프로그램을

이용하여 소성변형비를 계산하였다.

소성변형비는 금속판재의 디프 드로잉 성형성을 나타내는 가장 중요한 파라메타 중의 하나이다. 소성변형비(r-value)는 폭방향 진변형률/두께방향 진변형률 비로 정의한다[18].

본 연구에서는 측정된 극점도를 이용하여 압연방향 (RD)에 대하여 각 방향으로부터 얻어진 소성변형비를 얻은 다음 평균 소성변형비 ( $R_m$ )와  $|\Delta R|$  값을 아래 식 (1)을 이용하여 구하였다[18].

$$R_m = (r_0 + 2r_{45} + r_{90}) / 4, \quad |\Delta R| = (r_0 - 2r_{45} + r_{90}) / 2 \quad (1)$$

여기서  $r_0$ ,  $r_{45}$  및  $r_{90}$  는 각각 RD 과 0°, 45° 및 90° 방향에서의 소성변형비를 의미한다.

## 3. 결과 및 토의

Table 1 Specimen fabrication procedure and name of specimen of Cu sheet

Specimen Name	Specimen fabrication procedure	
(a)	Initial specimen	
(b)	1 <sup>st</sup> 80% asymmetric rolling	
(c)	2 <sup>nd</sup> 5.3% asymmetric rolling	As-symmetric rolling
(d)	2 <sup>nd</sup> 8.2% asymmetric rolling	
(e)	2 <sup>nd</sup> 14.5% asymmetric rolling	
(f)	2 <sup>nd</sup> 18.8% asymmetric rolling	
(g)	2 <sup>nd</sup> 23.4% asymmetric rolling	
(h)	2 <sup>nd</sup> 30.1% asymmetric rolling	
(i)	2 <sup>nd</sup> 5.3% asymmetric rolling	Annealed at 1000°C in air and air cooling
(j)	2 <sup>nd</sup> 8.2% asymmetric rolling	
(k)	2 <sup>nd</sup> 14.5% asymmetric rolling	
(l)	2 <sup>nd</sup> 18.8% asymmetric rolling	
(m)	2 <sup>nd</sup> 23.4% asymmetric rolling	
(n)	2 <sup>nd</sup> 30.1% asymmetric rolling	
(o)	2 <sup>nd</sup> 5.3% asymmetric rolling	Annealed at 630°C in Ar gas and air cooling
(p)	2 <sup>nd</sup> 8.2% asymmetric rolling	
(q)	2 <sup>nd</sup> 14.5% asymmetric rolling	
(r)	2 <sup>nd</sup> 18.8% asymmetric rolling	
(s)	2 <sup>nd</sup> 23.4% asymmetric rolling	
(t)	2 <sup>nd</sup> 30.1% asymmetric rolling	

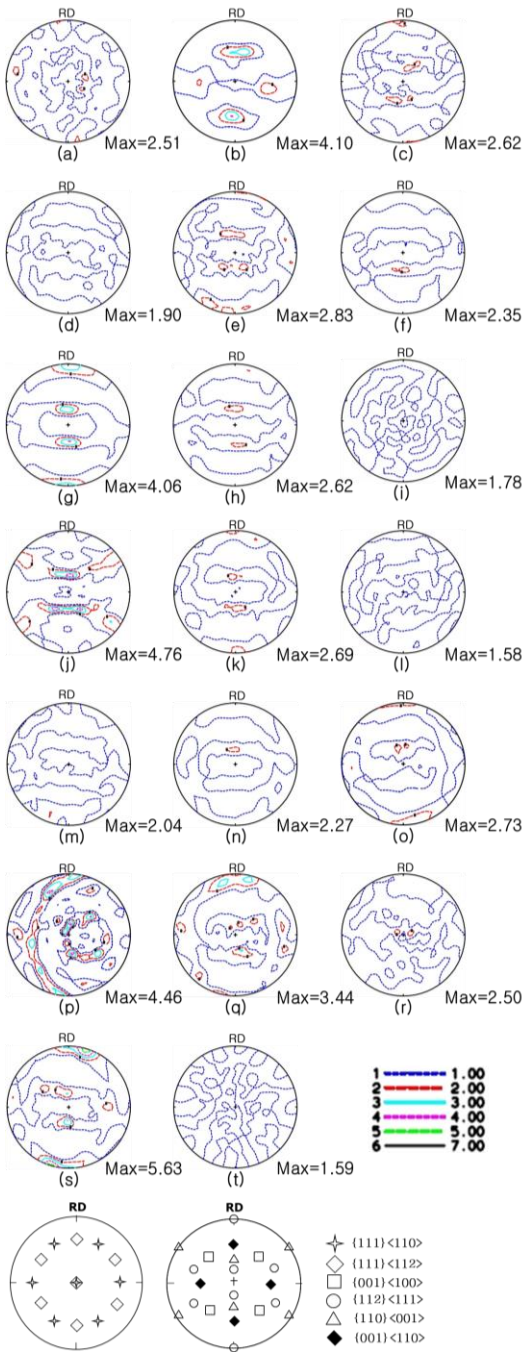


Fig. 1 (111) Pole figures of Cu sheets; (a) through (t) specimens

Fig. 1, Fig. 2 및 Fig. 3에는 Table 1에 나타낸 시편의 제작 조건과 같이 initial specimen, 비대칭 압연과 각각 열처리한 시편의 극점도와 측정된 극점도를 바탕으로 ODF 계산 결과 및 각 집합조직 성분의 f(g) 값 변화를 보여주고 있다.

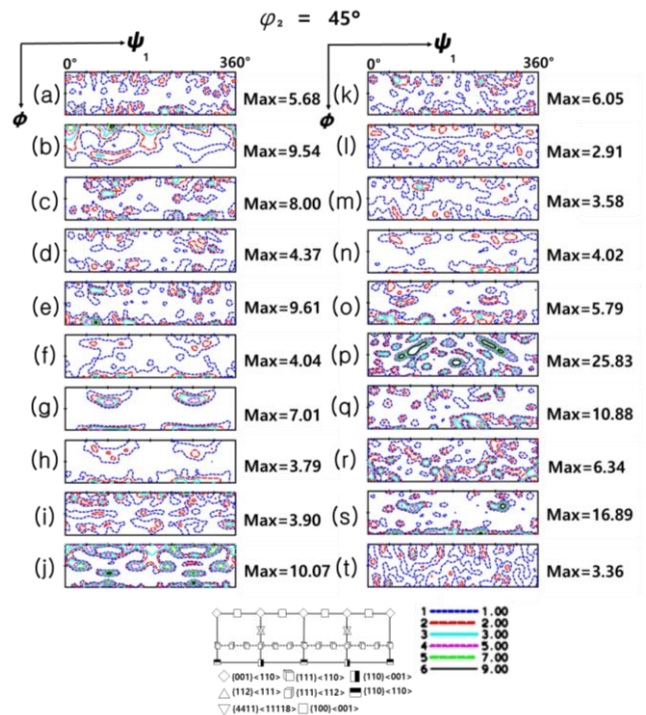


Fig. 2 ODFs at  $\psi_2 = 45^\circ$  of Cu sheets; (a) through (t) specimens.

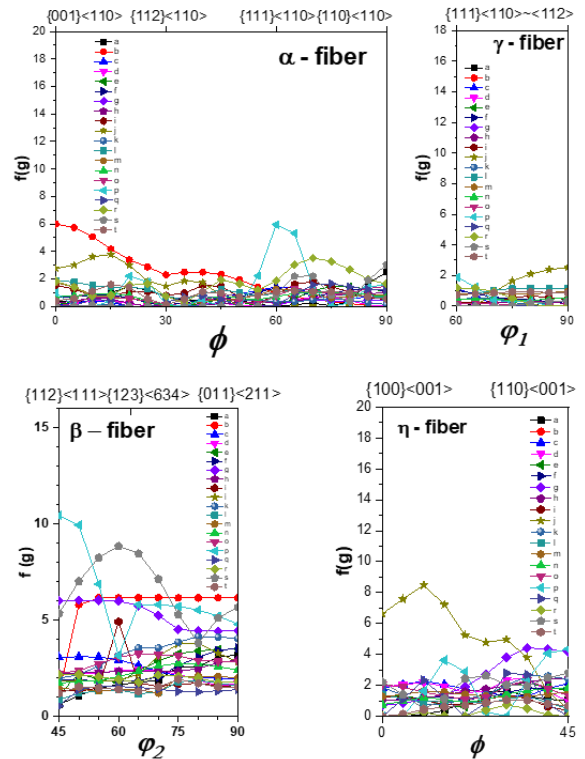


Fig. 3 The f(g) value variations of Cu sheets; (a) through (t) specimens

이 결과를 종합적으로 볼 때 Fig. 1, Fig. 2 및 Fig. 3의 (a)는 initial specimen의 결과로서 낮은  $\{110\}\langle 111\rangle$ 를 갖고 그 외에 특별히 발달한 집합조직이 없는 무질서 (random)한 집합조직에 가까운 것을 알 수 있다. (b)는 initial specimen을 1차로 압하율 80%로 비대칭 압연을 한 시편의 결과로 회전 입방정 집합조직인 강한  $\{001\}\langle 110\rangle$ ,  $\beta$ -fiber 중 강한  $\{123\}\langle 634\rangle$ 와  $\{011\}\langle 211\rangle$  집합조직 및 약한  $\gamma$ -fiber 집합조직이 나타났다.

Fig. 1, Fig. 2 및 Fig. 3의 (c) 부터 (h)까지는 initial specimen을 80%로 1차 비대칭 압연하고 600°C 열처리한 후 2차로 압하율을 5.3%부터 30.1%까지 비대칭 압연한 시편의 극점도와 ODF 및  $f(g)$ 이다. (c)는 initial specimen을 압하율 80%로 1차 비대칭 압연을 한 시편을 공기 중에서 600°C 열처리 후 2차 5.3% 비대칭 압연한 시편의 결과로서 Cu 집합조직인  $\{112\}\langle 110\rangle$  집합조직이 발달하였다. (d)는 2차 8.2% 비대칭 압연한 시편의 결과로서 입방정 집합조직인  $\{100\}\langle 001\rangle$ 와  $\{112\}\langle 111\rangle$ 이 약하게 발달하였지만 무질서 집합조직에 가깝다. (e)는 2차 14.5% 비대칭 압연한 시편의 결과로서 Brass 집합조직인  $\{011\}\langle 211\rangle$  와 약한  $\{100\}\langle 001\rangle$  집합조직이 발달하였다. (f)는 2차 18.8% 비대칭 압연한 시편의 결과로서 약한  $\{112\}\langle 111\rangle$  집합조직과  $\{011\}\langle 112\rangle$  집합조직이 나타났다. (g)는 2차 23.4% 비대칭 압연한 시편의 결과로서 강한  $\beta$ -fiber 집합조직이 발달하고,  $\{110\}\langle 001\rangle$  집합조직이 약하게 발달하였다. (h)는 2차 30.1% 비대칭 압연한 시편의 결과로서  $\{112\}\langle 111\rangle$  집합조직,  $\{011\}\langle 112\rangle$  집합조직과 Goss 집합조직인  $\{110\}\langle 001\rangle$ 과  $\gamma$ -fiber 집합조직이 약하게 발달하였다.

Fig. 1, Fig. 2 및 Fig. 3의 (i) 부터 (n)까지는 initial specimen을 80%로 1차 비대칭 압연하고 600°C 열처리한 후 2차로 압하율을 5.3%부터 30.1%까지 비대칭 압연하고 Air (공기) 분위기 1000°C에서 1시간 동안 열처리 한 시편의 극점도, ODF 및  $f(g)$ 이다. (i)는 압하율을 2차 5.3% 비대칭 압연하고 공기 분위기에서 열처리 한 시편의 결과로서 약한  $\{100\}\langle 001\rangle$  집합조직과  $\gamma$ -fiber 집합조직이 약하게 발달하였으나 무질서 집합조직에 가까운 시편이다. (j)는 2차 8.2% 비대칭 압연하고 열처리 한 시편의 결과로서  $\{001\}\langle 110\rangle$  집합조직,  $\{112\}\langle 110\rangle$  집합조직,  $\{100\}\langle 001\rangle$  집합조직 및  $\{011\}\langle 211\rangle$ 이 약하게 발달하고  $\gamma$ -fiber 집합조직 성분 중  $\{111\}\langle 112\rangle$ 이 약하게 발달하였다.

(k)는 2차 14.5% 비대칭 압연하고 열처리 한 시편의 결과로서  $\{112\}\langle 111\rangle$  집합조직 및  $\{011\}\langle 211\rangle$  집합조직이 발달하였다. (l)은 2차 18.8% 비대칭 압연하고 열처리 한 시편의 결과로서  $\{001\}\langle 110\rangle$  집합조직이 약하게 발달하였으나 무질서에 가까운 집합조직을 보이고 있다. (m)은 2차 23.4% 비대칭 압연하고 열처리 한 시편의 결과로서  $\{112\}\langle 111\rangle$  집합조직이 발달하였으나 무질서에 가까운 집합조직을 보이고 있다. (n)은 2차 30.1% 비대칭 압연하고 열처리 한 시편의 결과로서  $\{112\}\langle 111\rangle$  집합조직과  $\{011\}\langle 211\rangle$  집합조직이 약하게 발달했으나 무질서에 가까운 집합조직을 보이고 있다.

Fig. 1, Fig. 2 및 Fig. 3의 (o) 부터 (t)까지는 initial specimen을 80%로 1차 비대칭 압연하고 600°C 열처리한 후 2차로 압하율을 5.3%부터 30.1%까지 비대칭 압연하고 Ar 가스 분위기 630°C에서 1시간동안 열처리 한 시편의 극점도, ODF 및  $f(g)$ 이다. (o)는 2차 5.3% 비대칭 압연하고 Ar 가스 분위기 630°C에서 1시간동안 열처리 한 시편의 결과로서  $\{112\}\langle 111\rangle$  집합조직과  $\{011\}\langle 211\rangle$  집합조직이 강하게 발달하였다. (p)는 2차 8.2% 비대칭 압연하고 열처리 한 시편의 결과로서 강한  $\gamma$ -fiber 집합조직,  $\{110\}\langle 001\rangle$  및 강한  $\{112\}\langle 111\rangle$  집합조직과  $\{011\}\langle 211\rangle$  집합조직이 발달하였다. (q)는 2차 14.5% 비대칭 압연하고 열처리 한 시편의 결과로서 강한  $\{112\}\langle 111\rangle$  집합조직,  $\{011\}\langle 211\rangle$  집합조직과  $\gamma$ -fiber 집합조직이 발달하였다. (r)은 2차 18.8% 비대칭 압연하고 열처리 한 시편의 결과로서 강한  $\{112\}\langle 111\rangle$  집합조직과  $\{011\}\langle 211\rangle$  집합조직 및  $\gamma$ -fiber 집합조직이 잘 발달하였다. (s)는 2차 23.4% 비대칭 압연하고 열처리 한 시편의 결과로서 강한  $\{112\}\langle 111\rangle$  집합조직과  $\{011\}\langle 211\rangle$  집합조직 및  $\gamma$ -fiber 집합조직이 잘 발달하였고 Goss 집합조직인  $\{110\}\langle 001\rangle$ 이 발달하였다. (t)는 2차 30.1% 비대칭 압연하고 열처리 한 시편의 결과로서 무질서에 가까운 집합조직을 보이고 있다.

Fig. 1, Fig. 2 및 Fig. 3의 극점도, ODF 및  $f(g)$  값의 변화를 바탕으로 Cu 판을 압하율 80%로 비대칭 압연하면 회전 입방정 집합조직인 강한  $\{001\}\langle 110\rangle$  및  $\beta$ -fiber 중 강한  $\{123\}\langle 634\rangle$ 와  $\{011\}\langle 211\rangle$  집합조직이 나타났다.

공기 중에서 600°C 열처리 후 압하율 5.3%부터 30.1%까지 2차 비대칭 압연을 하면 일반적으로 대칭압연에서 잘 나타나는 Cu 집합조직인  $\{112\}\langle 111\rangle$

성분이 나타났다. 공기 중에서 600°C 열처리 후 압하율 5.3%부터 30.1%까지 2차 비대칭 압연을 하고 공기 분위기에서 1000°C로 1시간 열처리를 하고 공랭하면 압하율 8.2% 시편에서  $\beta$ -fiber 집합조직인  $\{112\}\langle 111\rangle$  집합조직과  $\{011\}\langle 211\rangle$  집합조직이 강하게 발달하고  $\gamma$ -fiber 집합조직이 약하게 발달하였다. 2차 비대칭 압하율이 높아지면 무질서 집합조직이 나타났다. 공기 중에서 600°C 열처리 후 압하율 5.3%부터 30.1%까지 2차 비대칭 압연을 하고 Ar 가스 분위기에서 630°C로 1시간 열처리를 하고 공랭하면  $\beta$ -fiber 집합조직인  $\{112\}\langle 111\rangle$  집합조직과  $\{011\}\langle 211\rangle$  집합조직이 강하게 발달하고  $\gamma$ -fiber 집합조직이 약하게 발달하였다.

특히 2차 30.1% 비대칭 압연하고 공기 분위기 1000°C로 1시간 열처리 한 시편 (n)에서  $\{112\}\langle 111\rangle$  집합조직과  $\{011\}\langle 211\rangle$  집합조직이 약하게 발달했으나 무질서에 가까운 집합조직을 보이고 있다. 그 외 공기 분위기 1000°C로 1시간 열처리 한 시편은 무질서한 집합조직을 나타냈다. 그러나 Ar 가스 분위기에서 630°C로 1시간 열처리를 하고 공랭한 압하율 8.2% 시편 (o) 에서  $\beta$ -fiber 집합조직인  $\{112\}\langle 111\rangle$  집합조직과  $\{011\}\langle 211\rangle$  집합조직이 강하게 발달하고  $\gamma$ -fiber 집합조직이 발달하였다. 또 압하율 18.8% 시편인 (r)에서도  $\beta$ -fiber 집합조직인  $\{112\}\langle 111\rangle$  집합조직과  $\{011\}\langle 211\rangle$  집합조직이 강하게 발달하고  $\gamma$ -fiber 집합조직이 발달하였다.

Fig. 2의 ODF의 자료를 이용하여 계산한 평균 소성변형비 ( $R_m$ )와  $|\Delta R|$  값을 Table 2와 Fig. 4에 나타내었다. Table 2와 Fig. 4에서 (a) initial specimen의 평균 소성변형비 ( $R_m$ )는 0.95이고  $|\Delta R|$  값은 1.27이다. initial specimen을 80% 비대칭 압연한 시편 (b)의  $R_m$ 은 0.63이고  $|\Delta R|$  값은 0.75이다. initial specimen을 80% 비대칭 압연하고 600°C 열처리한 시편을 2차 5.3% 비대칭 압연한 시편 (c)의  $R_m$ 은 0.93이고  $|\Delta R|$  값은 0.02이다. 8.2% 비대칭 압연한 시편 (d)의  $R_m$ 은 1.01고  $|\Delta R|$  값은 0.18이다. 14.5% 비대칭 압연한 시편 (e)의  $R_m$ 은 1.13이고  $|\Delta R|$  값은 0.68, 18.8% 비대칭 압연한 시편 (f)의  $R_m$ 은 1.03이고  $|\Delta R|$  값은 0.15, 23.4% 비대칭 압연한 시편 (g)의  $R_m$ 은 1.5이고  $|\Delta R|$  값은 0.59, 30.1% 비대칭 압연한 시편 (h)의  $R_m$ 은 1.3이고  $|\Delta R|$  값은 0.86이다. Initial specimen을 80%로 1차

비대칭 압연하고 600°C 열처리한 시편을 5.3% 비대칭 압연한 시편을 공기 중에서 1000°C 열처리한 시편 (i)의  $R_m$ 은 0.93이고  $|\Delta R|$  값은 0.02이다. 8.2% 비대칭 압연한 시편 (j)의  $R_m$ 은 0.95고  $|\Delta R|$  값은 0.07이다.

14.5% 비대칭 압연한 시편 (k)의  $R_m$ 은 1.01이고  $|\Delta R|$  값은 0.18, 18.8% 비대칭 압연한 시편 (l)의

**Table 2** Calculated average plastic strain ratio ( $R_m$ ) and  $|\Delta R|$  variations of Cu sheets; (a) through (g) specimens

Specimen	R-value			$R_m$	$ \Delta R $
	0°	45°	90°		
(a)	1.49	0.32	1.68	0.95	1.27
(b)	0.16	1.03	0.36	0.63	0.75
(c)	0.90	0.91	0.98	0.93	0.02
(d)	0.86	1.14	0.98	1.01	0.18
(e)	0.80	1.46	0.79	1.13	0.68
(f)	0.88	1.09	1.06	1.03	0.15
(g)	1.01	1.76	1.32	1.50	0.59
(h)	0.75	1.69	1.00	1.30	0.86
(i)	0.90	0.93	0.99	0.93	0.02
(j)	0.91	1.00	0.92	0.95	0.07
(k)	0.88	1.09	0.98	1.01	0.18
(l)	0.89	1.02	1.02	0.99	0.08
(m)	0.80	1.02	1.00	0.96	0.11
(n)	0.87	1.11	1.03	1.03	0.15
(o)	1.03	1.80	1.38	1.50	0.59
(p)	0.88	1.32	0.88	1.10	0.45
(q)	0.75	1.76	0.98	1.30	0.86
(r)	1.55	2.12	0.61	1.60	1.04
(s)	1.08	1.75	0.69	1.32	0.86
(t)	0.96	1.02	0.95	0.99	0.06

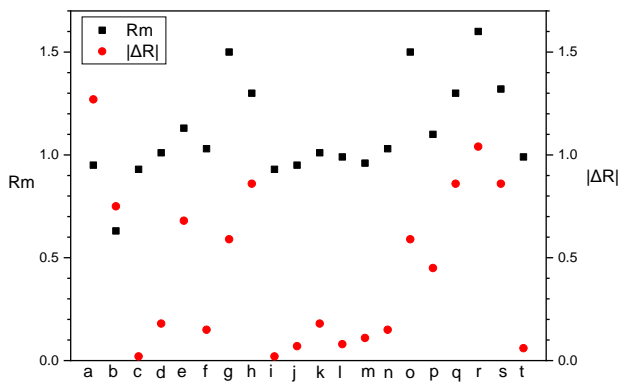


Fig. 4 Calculated average plastic strain ratio ( $R_m$ ) and  $|\Delta R|$  variations of Cu sheets; (a) through (t) specimens

$R_m$ 은 0.99 이고  $|\Delta R|$  값은 0.08 이다. 23.4% 비대칭 압연한 시편 (m)의  $R_m$ 은 0.96 이고  $|\Delta R|$  값은 0.11, 30.1% 비대칭 압연한 시편 (n)의  $R_m$ 은 1.03 이고  $|\Delta R|$  값은 0.15 이다. Initial specimen 을 80%로 1 차 비대칭 압연하고 600°C 열처리한 시편을 2 차 5.3% 비대칭 압연한 시편을 Ar 가스 중에서 630°C 열처리한 시편 (o)의  $R_m$ 은 1.5 이고  $|\Delta R|$  값은 0.59 이다. 8.2% 비대칭 압연한 시편 (p)의  $R_m$ 은 1.1 고  $|\Delta R|$  값은 0.45 이다. 14.5% 비대칭 압연한 시편 (q)의  $R_m$ 은 1.3 이고  $|\Delta R|$  값은 0.86, 18.8% 비대칭 압연한 시편 (r)의  $R_m$ 은 1.6 이고  $|\Delta R|$  값은 1.04 이다. 23.4% 비대칭 압연한 시편 (s)의  $R_m$ 은 1.32 이고  $|\Delta R|$  값은 0.86, 30.1% 비대칭 압연한 시편 (t)의  $R_m$ 은 0.99 이고  $|\Delta R|$  값은 0.06 이다.

Cu 판재를 1 차 비대칭 압연한 시편, 2 차 비대칭 압연한 시편, 2 차 비대칭 압연 후 1000°C 로 1 시간 공기분위기 열처리 한 시편, 2 차 비대칭 압연 후 630°C 로 1 시간 Ar 가스 분위기에서 열처리한 시편의  $R_m$  을 각각의 그룹으로 비교하면 다음과 같다. Initial specimen 보다 이를 1 차 비대칭 압연한 시편이  $R_m$  이 0.66 배로 감소하였고  $|\Delta R|$ 도 0.59 배로 감소하였다. 그 이유는 비대칭 압연으로 소성변형비를 상승시키는 요소인  $\gamma$ -fiber 집합조직의 강도가 증가하기도 하지만 감소시키는 요소인 회전 입방정 집합조직  $\{001\}\langle 110 \rangle$  강도의 증가가 조합되어 일어난 현상이다. 2 차 비대칭 압연한 시편에서 시편 (g)는 Initial specimen 보다  $R_m$  이 1.58 배로 증가하고  $|\Delta R|$ 은 0.46 배로 감소하였다. 그 이유는 시편 (g) 강한  $\beta$ -fiber 가 발달하였기 때문이다. 이 시편 (g)의

$\beta$ -fiber 는 회전 입방정 집합조직  $\{001\}\langle 110 \rangle$  보다 소성변형비가 높기 때문이다[2]. 그러나 시편 (c)부터 (h)까지는 비대칭 압연을 한 상태이기 때문에 열처리를 해야 판재를 성형하는데 사용할 수 있다.

1 차 비대칭 압연한 시편을 600°C 에서 열처리하고 2 차 비대칭 압연한 후 공기 중 1000°C 에서 열처리하고 공랭한 시편 (i)부터 (n)까지  $R_m$  이 Initial specimen 보다 0.98~1.03 배로 유사했으나  $|\Delta R|$  값은 0.02~0.14 배로 낮았다. 특히 시편 (n)은  $R_m$  이 1.03 배로 증가하고  $|\Delta R|$ 은 0.12 배로 감소하였다. 그 이유는 열처리 후 무질서 집합조직으로 되었기 때문이다. 또한 1 차 비대칭 압연한 시편을 2 차 비대칭 압연하고 Ar 가스 분위기 중 630°C 에서 열처리하고 공랭한 시편 (o)부터 (t)까지  $R_m$  이 Initial specimen 보다 약 1.04~1.68 배 높았고  $|\Delta R|$  값은 0.05~0.82 배로 낮아졌다. 특히 시편 (r)은  $R_m$  이 1.68 배로 증가하고  $|\Delta R|$ 은 0.82 배로 감소하였다. 그 이유는 회전 입방정 집합조직,  $\{001\}\langle 110 \rangle$ , 보다 평균 소성변형비가 높은  $\gamma$ -fiber 집합조직과  $\beta$ -fiber 집합조직인  $\{011\}\langle 211 \rangle$ 이 발달하였기 때문이다[2].

따라서 Cu 판재를 1 차 비대칭 압연한 시편, 2 차 비대칭 압연한 시편, 2 차 비대칭 압연 후 공기 분위기 열처리 한 시편, Ar 가스 분위기에서 열처리한 시편의  $R_m$  이 그룹간에 비교하면 일반적으로 Ar 가스 분위기 열처리한 시편의  $R_m$  이 높았으며,  $|\Delta R|$  값은 공기 분위기에서 열처리한 시편에서 가장 낮은 경향을 나타냈다. 이유는 열처리 중에 공기 분위기보다 불활성 Ar 가스 분위기가 Cu 의 산화 차단 효과로 재결정 집합조직에 영향을 주어 일어난 현상으로 판단된다[19].

#### 4. 결론

(1) Cu 판을 2 차로 30.1% 비대칭 압연 후 공기 분위기 1000°C 에서 열처리 하였을 때 무질서 집합조직이 되었으며 평균 소성변형비 ( $R_m$ )는 초기 시편보다 1.03 배 증가하였고  $|\Delta R|$  값은 0.12 배로 감소하였다.

(2) Cu 판을 2 차로 18.8% 비대칭 압연 후 Ar 분위기에서 630°C 에서 열처리 하였을 때  $\gamma$ -fiber 집합조직과  $\beta$ -fiber 집합조직인  $\{011\}\langle 211 \rangle$ 이 발달하였으며 평균 소성변형비 ( $R_m$ )은 초기 시편보다 1.68 배 증가하였고  $|\Delta R|$  값은 0.82 배로 감소하였다.

## 후 기

본 연구는 금오공과대학교의 학술연구비 지원 사업으로 연구된 논문으로 이에 감사 드립니다.

## REFERENCES

- [1] S. Kalpakjian, S. Schmid, 2008, Manufacturing Processes for Engineering Methods, 5<sup>th</sup> ed, Pentice Hall, p. 440.
- [2] P. H. Lequeu, J. J. Jonas, 1988, Modeling of the Plastic Anisotropy of Textured Sheet, Metall. Trans. A, Vol. 19, No. 1, pp. 105~120.
- [3] M. Hatherly, W. B. Hutchinson, 1979, An Introduction to Textures in Metals, Institution of Metallurgists, London.
- [4] J. Hirsch, K. Lucke, 1988, Mechanism of Deformation and Development of Rolling Textures in Polycrystalline F. C. C. Metals-Simulation and Interpretation of Experiments on the Basis of Taylor-tape Theories, Acta Metall. Vol. 36, p. 2883.
- [5] J.-K. Lee, D. N. Lee, 2008, Texture Control and Grain Refinement of AA1050 Al Alloy Sheets by Asymmetric Rolling, J. of Mech. Sci, Vol. 50, p. 869.
- [6] Y. Saito, H. Utsunomiya, H. Suzuki, T. Sakai, 2000, Improvement in the R-value of Aluminum Strip by a Continuous Shear Deformation Process, Scrip. Mater., Vol. 42, p. 1139.
- [7] H. Utsunomiya, T. Ueno, T. Sakai, 2007, Improvement in the R-value in the Aluminum Sheets by Differential-friction Rolling, Scrip. Mater., Vol. 57, p. 1109.
- [8] H. T. Jeong, S. D. Park, T. K. Ha, 2006, Evolution of Shear Texture According to Shear Strain Ratio in Rolled FCC Metal Sheets, Met. Mater. Int., Vol. 12, No.1, p. 21.
- [9] S. Akramov, I. Kim, 2009, Texture and Formability Development of Non-Lubrication Rolled Al Alloy Sheet, Transactions Materials Processing, Vol. 18(2), p. 1.
- [10] S. K. Nam, H. B. Jeong, I. Kim, 2010, Texture Change with the Number of Passes of Asymmetric Rolling in AA1050 Al Alloy Sheet, Trans. Mater. Proc., Vol. 19(8), p. 502.
- [11] S. K. Nam, H. B. Jeong, I. Kim, 2011, Texture Analysis of Asymmetrically Rolled and Annealed AA5083 Al Alloy Sheet, Mater. Res. Inovat., Vol.15 (suppl. 1), p. S454.
- [12] G.-H. Lee, S.K. Nam, D.N. Lee, I. Kim, 2017, A Process for Increasing Plastic Strain Ratio of AA1050 Alloy Sheet, Int. J. Mater. Produc. Tech., Vol. 54 (1/2/3), p. 202.
- [13] S.K. Nam, I. Kim, D. N. Lee, 2016, Improvement in Plastic Strain Ratio of AA1050 Al Alloy Sheet by Enhancing the <111>//ND Texture Component, Appl. Mech. Mater. Vol. 835, p. 203.
- [14] J.-H. Lee, G.-H. Kim, S. K. Nam, I. Kim, D. N. Lee, 2015, Calculation of Plastic Strain Ratio of AA1050 Al Alloy Sheet Processed by Heavy Asymmetric Rolling-Annealing Followed by Light Rolling-Annealing, Comp. Mater. Sci., Vol. 100, p 45.
- [15] S. K. Nam, J.-H. Lee, G.-H. Kim, D. N. Lee, I. Kim, 2019, Texture Analysis for Enhancement of R-value in Asymmetrically Rolled Al Alloy Sheet, J. Mater. Eng. and Perfor., Vol. 28, No. 8, p 5186.
- [16] H. J. Bunge, 1982, Texture Analysis in Materials Science, Butterworth, Guildford, UK.
- [17] G. T. Taylor, 1938, Plastic Strain in Metals, J. institute of Metals, Vol. 62, p. 307.
- [18] ASTM E 517-81, 1981, Standard Test Method for Plastic Strain Ratio R for Sheet Metal, ASTM standards, U.S.A.
- [19] J. Hu, J. Xu, Y. Zhao, L. Shi, Q. Li, F. Liu, Z. Ullah, W. Li, Y. Guo, L. Liu, 2017, Roles of Oxygen and Hydrogen in Crystal Orientation Transition of Copper Foils for High-Quality Graphene Growth, scientific report, Sci. Report. Vol. 7, p. 1.