

비대칭 압연과 열처리한 Cu 판의 집합조직과 소성변형비 변화 (II)

이철우¹ · 정종현¹ · 이동녕² · 김인수¹, #

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

C.W. Lee, J.H. Jeong, D.N. Lee, I. Kim

(Received September 27, 2019 / Revised February 26, 2020 / Accepted February 27, 2020)

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, due to its texture being $\{001\}\langle 100\rangle$. In this study, in order to increase the plastic strain ratio of Cu sheets we investigated the effect of two treatments: 1st the sheet was asymmetrically rolled and annealed, and 2nd the sheet was symmetrically and asymmetrically rolled and subsequently annealed. The average plastic strain ratio (R_m) of the initial Cu sheet was 0.95 and $|\Delta r|$ was 1.27. After the 2nd treatment of 5.3% symmetric rolling and annealing of Cu sheet at 1000°C for 60 min in Ar gas condition, the R_m was 2.29 times higher and the $|\Delta r|$ was 1.44 times higher than that of initial Cu sheet specimen. After the 2nd treatment of 8.2% asymmetric rolling and annealing of Cu sheet at 1000°C for 60 min in Ar gas conditions, the R_m was 2.51 times higher and $|\Delta r|$ was 0.53 times lower than that of the initial Cu sheet specimen. These results can be attributed to the change in texture of the Cu sheets due to the differences in the two methods of rolling.

Key Words: Cu; Symmetric Rolling; Asymmetric Rolling; Plastic Strain Ratio

1. 서 론

구리(Cu)는 면심입방정(FCC) 결정구조로서 전기 전도도와 연성은 높으나 판재 성형성 척도의 하나인 소성변형비(r -value 또는 Lankford parameter)가 낮다고 알려져 있다[1]. 그 이유는 완전 열처리한 FCC 결정구조인 Cu 판재가 열처리 후에 입방정 집합조직인 $\{001\}\langle 100\rangle$ 집합조직의 강도가 높은데 이 성분은 소성변형비를 낮추는 요소이기 때문이다. 이로 인하여 디프 드로잉 성형성(Deep drawability)이 나빠진다고 알려져 있다[2~4].

FCC 결정구조를 갖는 금속판재의 소성변형비를

증가시키기 위하여 비대칭 압연의 전단변형을 이용하여 소성변형비를 높이는 요소인 γ -fiber 집합조직인 $\{111\}\langle 112\rangle$ 와 $\{111\}\langle 011\rangle$ 집합조직, 즉 $ND//\langle 111\rangle$ 을 증가시키는 연구를 진행하였다[5~16].

Cu 도 FCC 결정구조로서 비대칭 압연시 전단변형에 의하여 변형집합조직인 회전 입방정 집합조직, $\{001\}\langle 110\rangle$ 이 주로 발달 되고 동시에 평균 소성변형비를 높이는 γ -fiber 집합조직, 즉 $ND//\langle 111\rangle$ 이 부수적으로 발달 된다고 알려지고 있다[4~6]. 최근 AI 판재를 종전의 대칭 압연하고 열처리하는 방법을 바꾸어 1 차로 비대칭 압연을 하고 열처리한 판재를 또 다시 2 차 대칭 또는 비대칭 압연을 하고 열처리 함으로서 AI 판재의 소성변형비를 높이는 연구 결과를 얻었다[16-19]. 이를 바탕으로 본 연구에서도 AI 과 결정구조가 같은 Cu 판재를

1. 금오공과대학교 신소재공학부, 석사, 학부생, #교수

2. 서울대학교 재료공학부, 교수

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

1 차 비대칭 압연 후 열처리 한 시편을 2 차로 대칭과 비대칭 압연하였다. 이 2 차 대칭과 비대칭 압연한 시편은 동일한 조건으로 각각 열처리하고 집합조직을 측정하여 디프 드로잉 성형성의 척도인 소성변형비의 변화를 관찰하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 두께 5.0 mm 인 Cu 판재에 압연 방향을 표시하고 70 mm x 30 mm x 5.0 mm 크기로 절단하여 초기시편(initial specimen)이라고 명명하였다. 초기시편은 상/하 롤 지름(15cm)을 동일하게 하고 상/하롤 회전속도 비를 1:1.5 로 무윤활 비대칭 압연하였다. 1 차 무윤활 비대칭 압연 조건은 총 3 회 패스(39%--> 63%--> 80%)하였으며 최종 총 압하율 80%로 하였다. 이것을 공기 분위기 중 600°C 에서 1 시간 열처리하였다. 1 차 비대칭 압연과 열처리한 시편을 무윤활 상태로 2 차 대칭과 비대칭 압연하여 최종 압하율을 각각 5.3%에서 30.1%까지 하였다. 여기서 무윤활 상태에서 대칭과 비대칭 압연을 한 이유는 롤과 시편 사이에 높은 마찰력을 주어 진단변형을 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[16-19]. 2 차 대칭과 비대칭 압연은 각각 1 회 패스 압연함으로써 최종 압하율이 되도록 하였다. 2 차 대칭과 비대칭 압연한 시편은 그 동안 연구[16-19]를 바탕으로 Ar 분위기 1000°C 에서 1 시간으로 설정하여 열처리하였다. Table 1 에는 Cu 판재(initial specimen)를 1 차 80% 비대칭 압연을 하고 이것을 열처리한 후 2 차 대칭과 비대칭 압연하고 열처리한 시편의 준비과정과 이름을 정리하여 놓았다. Table 1 에서 (a) 는 Cu 판재의 initial specimen 이고, (b)는 Cu 판재(initial specimen)를 1 차 80% 비대칭 압연한 시편이다. (c)부터 (g)까지는 Cu 판재(initial specimen)를 1 차 80% 비대칭 압연을 하고 공기 분위기 중 600°C 에서 1 시간 열처리한 후 각각 5.3%, 8.2%, 14.5%, 23.4% 및 30.1% 압하율로 2 차 대칭 압연한 시편이다. (h)부터 (l)까지는 각각 5.3%, 8.2%, 14.5%, 23.4% 및 30.1% 압하율로 대칭 압연하고 Ar 분위기 1000°C 에서 1 시간동안 열처리한 시편이다. 그

리고 (m)부터 (q)까지는 Cu 판재(initial specimen)를 80%로 1 차 비대칭 압연하고 600°C 열처리한 후 각각 5.3%, 8.2%, 14.5%, 23.4% 및 30.1% 압하율로 2 차 비대칭 압연하고 Ar 분위기 1000°C 에서 1 시간동안 열처리한 시편이다. 각 단계에서 얻어진 대칭과 비대칭 압연과 열처리한 시편은 느린 롤 속도 쪽의 판재 면에 평행하게 기계적으로 연마하고 화학적 에칭하였다. 극점도는 두께의 20%를 제거한 층 판재 면에서 측정하였다. 타겟으로 Co-K α X-선을 사용하였으며 Schultz 반사법으로 (111), (200) 및 (220) 면의 불완전 극점도를 측정하였다. 이와 같이 측정한 2 차원 극점도는 Bunge[20]가 제안한 방법을 이용하여 3 차원 방위분포함수(Orientation Distribution Function, ODF)를 계산하였다. 또 Taylor 이론[21]에 바탕을 두고 Bunge[20]가 제안한 ODF 를 이용하여 소성변형비를 계산하였다.

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

Specimen Name	Fabrication procedure	
(a)	Initial specimen	
(b)	1 st 80% asymmetric rolling	
(c)	2 nd 5.3% symmetric rolling	Without annealing
(d)	2 nd 8.2% symmetric rolling.	
(e)	2 nd 14.5% symmetric rolling	
(f)	2 nd 20.3% symmetric rolling.	
(g)	2 nd 30.1% symmetric rolling.	
(h)	2 nd 5.3% symmetric rolling	Annealed at 1000°C in Ar
(i)	2 nd 8.2% symmetric rolling	
(j)	2 nd 14.5% symmetric rolling	
(k)	2 nd 20.3% symmetric rolling	
(l)	2 nd 30.1% symmetric rolling	
(m)	2 nd 5.3% asymmetric rolling	Annealed at 1000°C in Ar
(n)	2 nd 8.2% asymmetric rolling	
(o)	2 nd 14.5% asymmetric rolling	
(p)	2 nd 23.4% asymmetric rolling	
(q)	2 nd 30.1% asymmetric rolling	

소성변형비는 금속판재의 디프 드로잉 성형성을 나타내는 가장 중요한 파라메타 중의 하나이다. 소성변형비(r-value)는 폭방향 진변형률/두께방향 진변형률 비로 정의한다[22].

본 연구에서는 측정된 극점도를 이용하여 각 방향의 소성변형비로부터 평균 소성변형비(R_m)와 $|\Delta R|$ 값을 아래 식 (1)을 이용하여 구하였다[22].

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

여기서 r_0 , r_{45} 및 r_{90} 는 각각 압연방향(RD)에 0° , 45° 및 90° 방향에서의 소성변형비를 의미한다.

3. 결과 및 토의

Fig. 1, Fig. 2 및 Fig. 3에는 Table 1에 나타낸 초기 시편, 1차 비대칭 압연과 2차 대칭 및 비대칭 압연 후 각각 열처리한 시편의 극점도와 측정된 극점도를 바탕으로 ODF 계산 결과 및 각 집합조직 성분의 f(g)값 변화를 보여주고 있다.

이 결과를 분석하여 볼 때 Fig. 1, Fig. 2 및 Fig. 3의 (a)는 initial specimen의 결과로서 낮은 $\{110\}<111>$ 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 $\{001\}<110>$, β -fiber 중 $\{123\}<634>$ 와 $\{011\}<211>$ 집합조직 및 약한 γ -fiber 집합조직이 나타났다.

Fig. 1, Fig. 2 및 Fig. 3에서 (c) 부터 (g)까지는 2차 대칭 압연한 시편의 극점도, ODF 및 f(g) 값의 실험 결과이다. 여기서 (d)시편은 약하게 β -fiber가 발달하고 그 외 시편들은 강도의 차이는 있지만 모두 β -fiber가 잘 발달하였고, $\{110\}<001>$ 이 발달하였다.

Fig. 1, Fig. 2 및 Fig. 3에서 (h) 부터 (l)까지는 2차 대칭 압연하고 열처리 한 시편의 극점도, ODF 및 f(g) 값의 실험 결과이다. 여기서 (h)부터 (l)까지 시편 모두 집합조직의 강도는 서로 차이가 있지만 β -fiber가 발달하였고, η -fiber 중 $\{110\}<001>$ 이 발달하였다. 특히 (h)시편은 약한 γ -fiber 집합조직과 (i) 시편에서 $\{100\}<001>$ 도 발달하였다.

Fig. 1, Fig. 2 및 Fig. 3에서 (m) 부터 (q)까지는 2

차 비대칭 압연하고 열처리 한 시편의 극점도, ODF 및 f(g) 값의 실험 결과이다. 여기서 (m)에서 (q)까지 시편 모두 집합조직의 강도는 서로 차이가 있지만 β -fiber가 잘 발달하였다. 그 외로 (q) 시편에서는 γ -fiber, (m), (n) 및 (p) 시편에서는 η -fiber 중 $\{110\}<001>$ 도 발달하였다.

Fig. 1, 2 및 3의 극점도, ODF 및 f(g) 값의 변화를 바탕으로 실험 결과를 비교 종합하면 다음과 같다. (a) Cu 판재의 원소재인 initial specimen은 무질서(random)한 집합조직임 알 수 있다. (b) Cu 판재의 initial specimen 시편을 압하율 80%로 1차 비대칭 압연한 시편은 회전 입방정 집합조직인 $\{001\}<110>$ 이 강하게 발달하였고, β -fiber 중 $\{123\}<634>$ 와 $\{011\}<211>$ 집합조직 및 약한 γ -fiber가 동시에 나타났다.

(b) 시편을 열처리 후 압하율 5.3%~30.1%로 2차 대칭 압연을 한 (c)부터 (g)까지 시편은 집합조직의 발달 강도 차이는 있지만 모두 $\{112\}<111>$ 을 포함한 강한 β -fiber가 발달하고 η -fiber중 $\{110\}<001>$ 이 발달하고 있음을 알 수 있다.

(b) 시편을 열처리 후 압하율 5.3%~30.1%로 2차 비대칭 압연한 시편은 압하율이 높아짐에 따라 약한 η -fiber, 약한 γ -fiber 및 강한 β -fiber가 발달[23]하였다. 이와 같이 2차 비대칭 압연한 시편[23]은 (c)부터 (g)까지 2차 대칭 압연한 시편의 결과보다 γ -fiber가 약간 더 발달한 것 이외에 유사한 집합조직을 나타냈다.

(b) 시편을 열처리 후 압하율 5.3%~30.1%로 2차 대칭 압연을 하고 열처리한 (h)부터 (l)까지 시편은 집합조직의 발달 강도 차이는 있지만 모두 $\{112\}<111>$ 와 $\{011\}<211>$ 을 포함한 β -fiber, η -fiber 중 $\{110\}<001>$ 가 발달하였다. 그 외로 (h)시편은 γ -fiber가 약하게 발달하였다.

(b) 시편을 열처리 후 압하율 5.3%~30.1%로 2차 비대칭 압연을 하고 열처리한 (m)부터 (q)까지 시편은 집합조직의 발달 강도 차이는 있지만 모두 β -fiber, η -fiber중 $\{110\}<001>$ 이 발달하였다. 그 외로 (q)시편은 γ -fiber 중 $\{111\}<110>$ 이 발달하였다.

(b) 시편을 열처리 후 압하율 5.3%~30.1%로 2차 대칭 압연하고 열처리한 (h)부터 (l)까지 시편과 2차 비대칭 압연하고 열처리한 (m)부터 (q)까지 시편의 집합조직은 서로 유사하였다. 그러나 2차 대칭 압연 후 열처리한 시편보다 2차 비대칭 압연

후 열처리한 시편에서 β -fiber와 γ -fiber 집합조직이 좀 더 잘 발달하였다. 그 이유는 공정의 특성상 2차 비대칭 압연이 2차 대칭 압연보다 Cu판재의 전 두께 층에 균일하게 전단변형을 주었기 때문으로 판단된다.

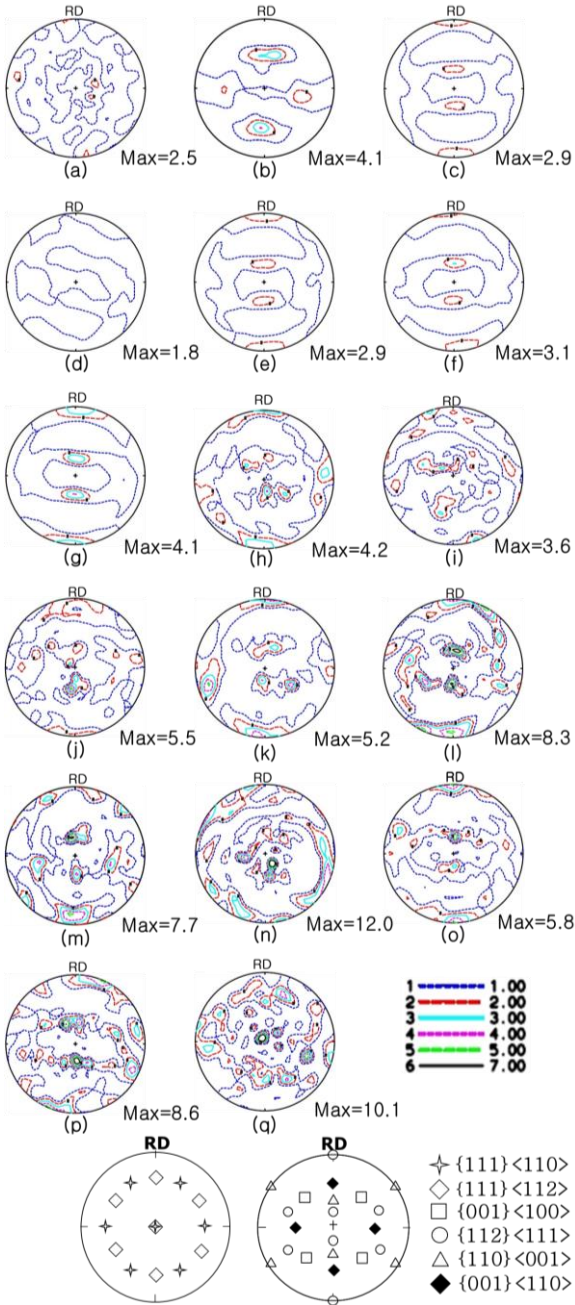


Fig. 1 (111) Pole figures of Cu sheets; (a) through (q) specimens

Fig. 2의 ODF의 자료를 이용하여 계산한 평균 소성변형비(R_m)와 $|\Delta R|$ 값을 Table 2와 Fig. 4에 나타내었다. Table 2와 Fig. 4에서 (a) Cu 판재의 원소재인 initial specimen의 평균 소성변형비(R_m)는 0.95이고 $|\Delta R|$ 값은 1.27이다. initial specimen을 80% 압하율로 비대칭 압연한 (b) 시편의 평균 소성변형비(R_m)는 0.70이고 $|\Delta R|$ 값은 1.1이다.

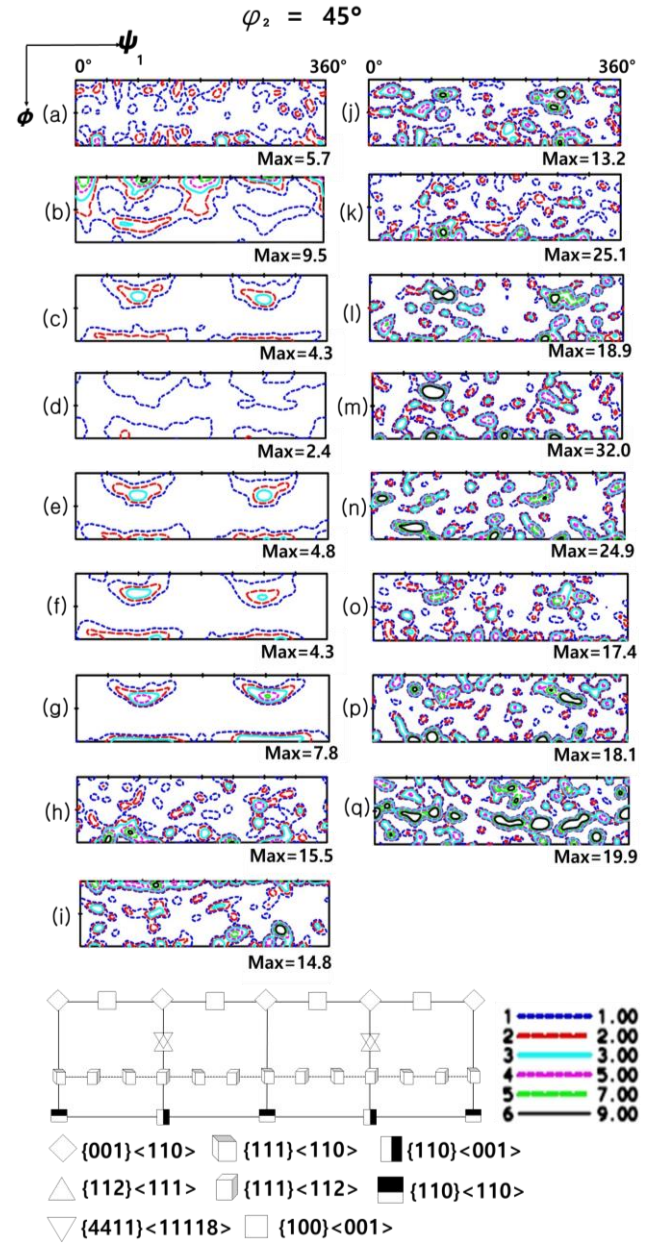


Fig. 2 ODFs at $\psi_2=45^\circ$ of Cu sheets; (a) through (q) specimens

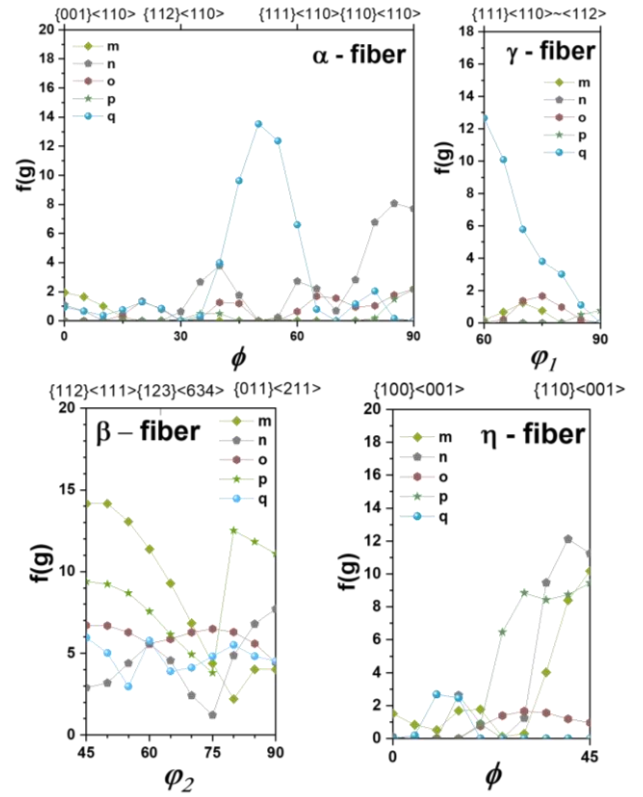
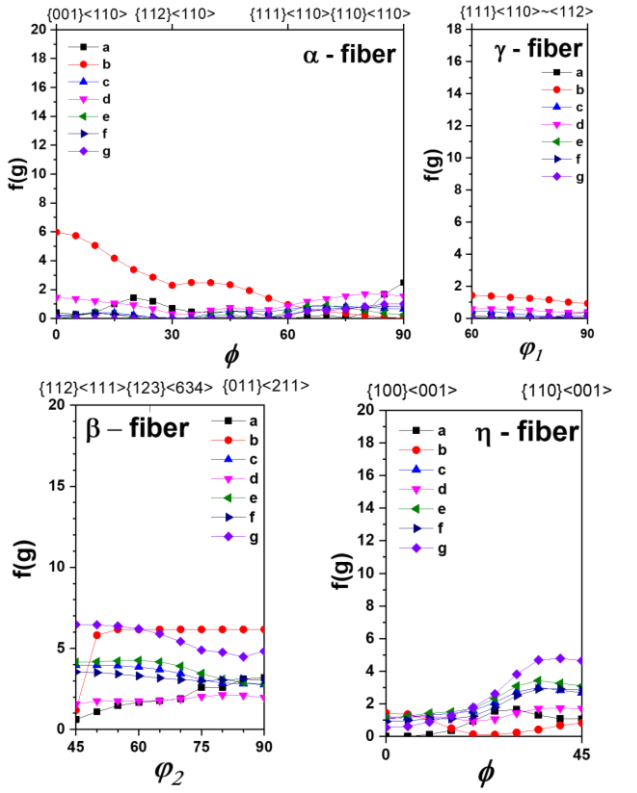


Fig. 3 The $f(g)$ value variations of Cu sheets; (a) through (q) specimens

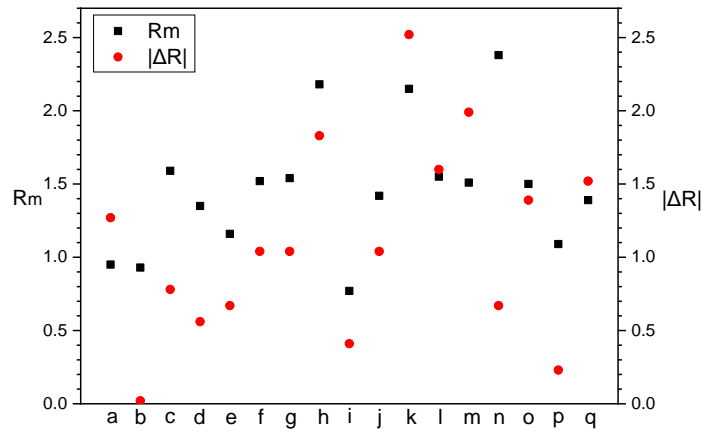
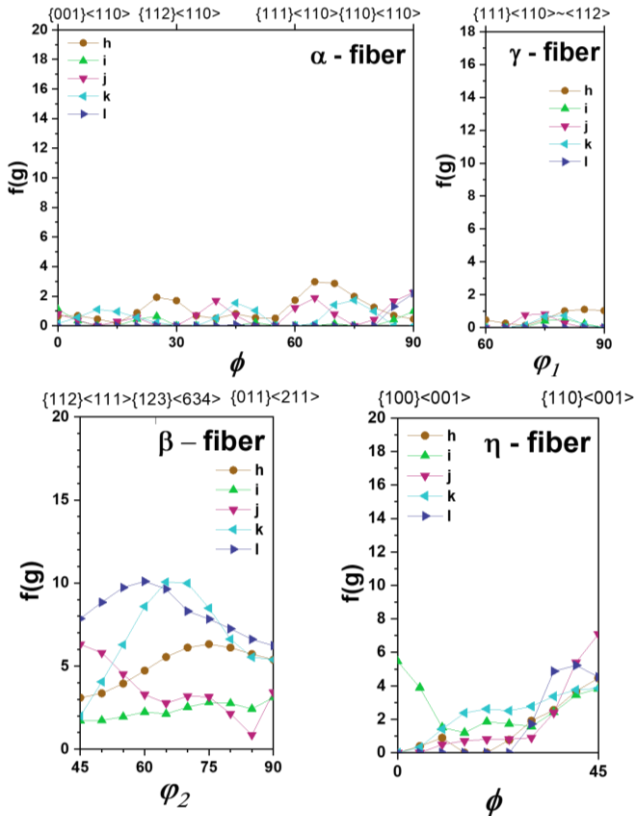


Fig. 4 Calculated average plastic strain ratio(R_m) and $|\Delta R|$ variations of Cu sheets; (a) through (g) specimens

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

Specimen name	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	0.93	0.02
(c)	0.90	1.98	1.50	1.59	0.78
(d)	1.25	1.63	0.90	1.35	0.56
(e)	1.07	1.50	0.59	1.16	0.67
(f)	0.82	2.04	1.19	1.52	1.04
(g)	1.13	2.06	0.90	1.54	1.04
(h)	0.85	3.10	1.68	2.18	1.83
(i)	0.54	0.98	0.86	0.77	0.41
(j)	0.69	1.94	1.12	1.42	1.04
(k)	0.60	3.41	1.17	2.15	2.52
(l)	0.85	2.35	0.65	1.55	1.60
(m)	0.71	2.50	0.30	1.51	1.99
(n)	1.96	2.04	3.47	2.38	0.67
(o)	0.75	2.19	0.80	1.50	1.39
(p)	0.50	1.00	1.90	1.09	0.23
(q)	0.30	2.25	0.90	1.50	1.52

Table 2 와 Fig. 4 에서 (c)부터 (g)까지는 2 차 대칭 압연한 시편으로 평균 소성변형비(R_m)가 1.59~1.16 이고 $|\Delta R|$ 값은 1.04~0.56 이다. 여기서 (b)부터 (g)까지 시편의 평균소성변형비(R_m)와 $|\Delta R|$ 값은 냉간 가공한 상태에서 얻어진 값이다. 그러므로 이들 시편을 판재 성형에 사용하기 위해서는 열처리 한 후에 사용 할 수 있기 때문에 이 때의 평균소성변형비(R_m)와 $|\Delta R|$ 값의 의미가 크지 않다.

(h)부터 (l)까지는 2 차 대칭 압연한 시편을 Ar 가스 중에서 1000°C 열처리한 시편으로 평균 소성 변형비(R_m)가 0.77~2.18 이고 $|\Delta R|$ 값은 0.41~2.52

이다. 이 시편들 중 (h) 시편의 평균 소성변형비 (R_m)는 2.18 로 initial specimen 보다 2.29 배 증가하고 $|\Delta R|$ 는 1.83 으로 initial specimen 보다 1.44 배 증가하였다.

(m)부터 (q)까지는 2 차 비대칭 압연하고 Ar 가스 분위기 1000°C 에서 열처리한 시편으로 평균 소성변형비(R_m)가 1.09~2.38 이고 $|\Delta R|$ 값은 0.23~1.99 이다. 이 들 시편 중 (n) 시편의 평균 소성 변형비(R_m)는 2.38 로 initial specimen 보다 2.51 배 증가하고 $|\Delta R|$ 는 0.67 으로 initial specimen 보다 0.53 배로 감소하였다.

Cu 판재를 1 차 비대칭 압연한 시편, 2 차 대칭 압연한 시편 및 2 차 대칭과 비대칭 압연 후 Ar 가스 분위기에서 열처리한 시편의 평균 소성변형비(R_m)와 $|\Delta R|$ 값을 시편 그룹간에 비교하면 일반적으로 2 차 비대칭 압연 후 Ar 가스 분위기에서 열처리한 시편의 평균 소성변형비(R_m)가 높았고 $|\Delta R|$ 값은 낮아 졌다.

그 이유는 2 차 비대칭 압연은 2 차 대칭 압연보다 전단변형을 Cu 판재의 전 두께 층에 주고 소성 변형비를 증가시키는 요소중의 하나인 γ -fiber 집합조직이 증가되었기 때문으로 판단된다[16-19]. 그리고 재결정 열처리한 후에도 2 차 비대칭 압연 때 생긴 γ -fiber 집합조직이 감소되지 않고[16-19] 소성변형비를 증가시키는 원인이 되었을 것이다.

4. 결론

(1) Cu 판을 2 차로 5.3% 대칭 압연하고 Ar 가스 분위기 1000°C 열처리한 시편의 평균 소성변형비 (R_m)는 2.18 로 initial specimen 보다 2.29 배 증가하였으며 $|\Delta R|$ 는 1.83 으로 1.44 배 증가하였다.

(2) Cu 판을 2 차로 8.1% 비대칭 압연하고 Ar 가스 분위기 1000°C 열처리한 시편의 평균 소성 변형비(R_m)는 2.38 로 initial specimen 보다 2.51 배 증가하고 $|\Delta R|$ 는 0.67 로 0.53 배로 감소하였다.

후 기

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

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] M. Hatherly, W. B. Hutchinson, 1979, *An Introduction to Textures in Metals*, Institution of Metallurgists, London.
- [3] 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, pp. 2883.
- [4] 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, No. 5, p. 869.
- [5] 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, No 12, p. 1139.
- [6] H. Utsunomiya, T. Ueno, T. Sakai, 2007, Improvement in the R-value in the Aluminum Sheets by Differential-Friction Rolling, *Scrip. Mater.*, Vol. 57, No. 7, p. 1109.
- [7] 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, pp. 21.
- [8] I. Kim, S. K. Nam, S. Akramov, 2010, Texture Change of Severe Plastically Deformed Al Alloy Sheets, *Mater. Sci. Forum*, Vol. 654~656, pp.1259.
- [9] S. Akramov, I. Kim, N. J. Park, 2007, Texture and Formability of Frictionally Rolled AA 1050 Aluminum Alloy Sheets, *Adv. Mater. Res.*, Vol. 26/28, pp. 393.
- [10] S. Akramov, I. Kim, 2009, Texture and Formability Development of Non-Lubrication Rolled Al Alloy Sheet, *Trans. Mater. Proc.*, Vol. 18, No. 2, p. 116~121
- [11] I. Kim, S. Akramov, H. B. Jeong, 2009, Texture and Formability Development of Asymmetry Rolled AA3003 Al Alloy Sheet, *Mod. Phys. letter B*, Vol. 22, No.31~32, pp. 5859.
- [12] I. Kim, S. Akramov, H. B. Jeong, T. K. No, 2009, Texture Development and Drawability of Frictional Rolled AA 5052 Al Alloy Sheet, *Mod. Phys. letter B*, Vol. 22, No.31~32, pp. 5931.
- [13] S. Akramov, I. Kim, 2009, Texture Analysis and R-value Variation after Severe Deformed and Heat Treated Al Alloy Sheets, *J. Phys.* Vol. 165, pp. 1.
- [14] 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, No.8, pp. 502.
- [15] S. K. Nam, H. B. Jeong, I. Kim, 2011, Texture Analysis of Asymmetrically Rolled and Annealed AA5083 Al Alloy Sheet, *Mater. Res. Innovat.*, Vol.15(suppl. 1), p. S454.
- [16] G.-H. Lee, S.K. Nam, D.N. Lee and I. Kim, 2017, A Process for Increasing Plastic Strain Ratio of AA1050 Alloy Sheet, *Int. J. Mater. Produc. Tech.*, Vol. 54, No.1/2/3, pp. 202.
- [17] S. K. Nam, I. Kim, and 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, pp. 203.
- [18] J.-H. Lee, G.-H. Kim, S. K. Nam, I. Kim and 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, pp 45.
- [19] S. K. Nam, J.-H. Lee, G.H. Kim, D. N. Lee and 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, pp. 5186.
- [20] H. J. Bunge, 1982, *Texture Analysis in Materials Science*, Butterworth, Guildford, UK.
- [21] G. T. Taylor, 1938, Plastic Strain in Metals, *J. institute of Metals*, Vol. 62, pp. 307.
- [22] ASTM E 517-81, 1981, Standard Test Method for Plastic Strain Ratio R for Sheet Metal, ASTM standards, U.S.A.
- [23] C. W. Lee, D.N. Lee, I. Kim, 2019, Changes of Texture and Plastic Strain Ratio of Asymmetrically Rolled and Annealed Cu Sheet (I), *Trans. Mater. Proc.*, Vol. 27, No. 6, pp. 354.