2-pass 이주속압연된 인탈산동판재의 두께방향으로의 미세조직 및 기계적 특성

이성희[†] · 장준혁 · 宇都宮 裕*

국립목포대학교 신소재공학과, *오사카대학교 재료과학과

Microstructure and Mechanical Property in Thickness Direction of a Deoxidized Low-Phosphorous Copper Sheet Processed by Two-Pass Differential Speed Rolling

Seong-Hee Lee[†], Jun-Hyuk Jang and Hiroshi Utsunomiya*

Department of Advanced Materials Science and Engineering, Mokpo National University, Mu-an-gun, Chonnam 534-729, Korea

*Department of Materials Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-Oka Suita, Osaka 565-0871, Japan

(2013년 7월 19일 접수: 2013년 7월 19일 최종수정: 2013년 7월 23일 채택)

Abstract A two-pass differential speed rolling(DSR) was applied to a deoxidized low-phosphorous copper alloy sheet in order to form a homogeneous microstructure. Copper alloy with a thickness of 3 mm was rolled to 75 % reduction by two-pass rolling at 150 °C without lubrication at a differential speed ratio of 2.0:1. In order to introduce uniform shear strain into the copper alloy sheet, the second rolling was performed after turning the sample by 180° on the transverse direction axis. Conventional rolling(CR), in which the rotating speeds of the upper roll and lower roll are identical to each other, was also performed by two-pass rolling under a total rolling reduction of 75 %, for comparison. The shear strain introduced by the conventional rolling showed positive values at positions of the upper roll side and negative values at positions of the lower roll side. However, samples processed by the DSR showed zero or positive values at all positions. {100}/ND texture was primarily developed near the surface and center of thickness for the CR, while {110}/ND texture was primarily developed for the DSR. The difference in misorientation distribution of grain boundary between the upper roll side surface and center regions was very small in the CR, while it was large in the DSR. The grain size was smallest in the upper roll side region for both the CR and the DSR. The hardness showed homogeneous distribution in the thickness direction in both CR and DSR. The average hardness was larger in CR than in DSR.

Key words differential speed rolling, copper alloy, microstructure, electron backscatter diffraction(EBSD), strain.

1. 서 론

최근 전기/전자 산업 및 정보통신 산업의 비약적인 발달로 고전도도와 고강도의 특성을 동시에 겸비한 동 소재의 개발이 절실히 요구되고 있다.¹⁻²⁾ 동의 고강도화 방법 중에 석출경화법의 경우 기지내에 미세한 석출물을 많이 그리고 균일하게 형성시키는 것이 매우 중요하다. 비대칭압연의 일종인 이주속압연(differential speed rolling,

DSR)³⁻¹¹⁾은 일반압연(conventional rolling, CR)에서는 두께 표면부위에만 도입되는 전단변형을 내부까지 도입시킬 수 있으므로 두께 방향으로 균일한 변형을 부가할 수 있을 뿐 아니라, 재료 전체에 큰 상당변형량을 도입할 수 있으므로 균일한 석출상의 생성에 매우 유리한 가공법이라 할 수 있다. 또한, 동과 같은 FCC금속의 경우, 롤과 재료사이의 마찰계수가 큰 조건의 일반 압연에서 재료 표면부위에만 도입되는 전단집합조직의 한 성분인

[†]Corresponding author

E-Mail : shlee@mokpo.ac.kr (S. -H. Lee, Mokpo Nat'l Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<111>/ND를 재료 전체에 도입하는 것이 가능하게 되어 성형성 향상에 기여할 뿐 아니라, cube texture를 갖지 않게 되어 굽힘 특성 향상에도 효과가 있다. 본 연구팀은 지난 연구에서 몇몇 동합금에 비대칭압연을 적용하여 비대칭압연이 일반압연에 비해 균일 석출물 형성에 유리한 균일변형량 도입에 매우 효과적임을 확인하였다.⁹⁾ 그리고 이와 같은 이주속압연의 효과는 어닐링 후에도 확연히 나타남을 알 수 있었다.¹⁰⁾ 또한 C194의 경우, 압연시에 도입된 상당변형량의 크기는 이주속압연재에 비해 동속압연재에서 더 컸으나, 경도 및 강도는 동속과 이속에 관계없이 거의 같은 값을 나타내었으며, 어닐링 후에는 이주속압연이 동속압연에 비해 균일한 변형량 도입에 효과적임을 입증하였다.¹²⁾ 이와 같은 균일변형량 도입은 압하율이 증가할수록 그 효과가 크게 나타나리라 예상된다. 그러나 지금까지의 이주속압연에 대한 연구는 one-pass에 의한 50 % 압연에 관한 것이 대부분이었으며 multi-pass에 의한 고압하율에 관한 연구는 거의 없었다. 그러므로 본 연구에서는 동합금에 two-pass에 의한 고압하율의 이주속압연을 실시하여 동합금판재의 두께방향으로의 미세조직/집합조직의 형성 및 기계적 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 이주속압연

본 연구에서 사용된 재료는 이전 연구¹²⁾에서 사용된 C194(Cu-2.42Fe-0.097P)로 두께 3 mm, 폭 25 mm, 길이 300 mm인 열간압연 판재이다. 이주속압연공정의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 압연기는 상부롤과 하부롤의 주속을 다르게 제어할 수 있으며 롤 직경이 130 mm인 압연기를 사용하였다. 압연은 150 °C, 무윤활 조건에서 two-pass에 걸쳐서 진행하였으며, 첫 번째 압연은 압하율을 50 %로 하여 상부롤(upper roll)과 하부롤(lower roll)의 이속비(differential speed ratio)를 2 : 1로 하여 압연을 실시하였으며, 두 번째 압연은 전단변형량의 도입을 극대

Fig. 1. Schematic illustration of a differential speed rolling by two-pass.

화시키기 위하여, 그림과 같이, 시편의 상하를 뒤집고 압연방향을 반대로 하여 50 %압하율(총압하율 75 %)로 압연하였다. 이주속압연시 하부롤의 주속(v_1)은 2.0 m/min, 상부롤의 주속(v_2)은 4.0 m/min로 하였다. 비교를 위하여 일반 동속 압연(주속: 2.0 m/min)을 압하율 50 %씩 two-pass 실시하였으며, 이 경우는 두 번 모두 같은 방향으로 압연을 실시하였다. 압연에 의해 도입되는 전단변형량을 측정하기 위해 이전 연구^{9,12)}와 동일한 방법으로 압연 전에 시편 중앙부위에 시편과 동일한 재질의 핀을 삽입(핀삽입법)하여 두께방향으로의 전단변형량의 크기를 정량적으로 측정하였다.

2.2 조직관찰

압연 후 시편에 대하여 광학현미경에 의한 조직관찰을 실시하였다. 조직관찰은 시편을 횡단면(TD면)에서 판재 절단기로 잘라내어 연마 후 에칭액($\text{FeCl}_3 : \text{HCl} : \text{H}_2\text{O} = 5 \text{ g} : 12.5 \text{ ml} : 50 \text{ ml}$)에서 3초간 부식한 후 실시하였다. 또한 압연 후의 동합금 판재에 대하여 EBSD측정을 통한 미세조직 분석을 실시하였다. EBSD 측정은 판재의 폭 중앙부에서 횡단면에 평행하게 압연방향으로 시편을 얇게 잘라서 twin jet 전해연마에 의해 경면으로 한 다음 압연판재의 두께방향으로 상부롤 표면 부위, 중심 부위, 하부롤 표면 부위 등에 대하여 실시하였다. 측정된 EBSD 데이터로부터 ND방위맵(normal direction misorientation map), RD방위맵(rolling direction misorientation map) 및 GB맵(grain boundary map)을 얻었다. 여기서 ND방위맵 및 RD방위맵은 EBSD 측정에서 각 측정점의 압연면 법선방향(normal direction; ND)과 압연방향(rolling direction; RD)에 평행한 결정방향을 각각 표준 스테레오 삼각형으로 나타낸 것이다. 여기서 EBSD 측정에서 정확하게 검출할 수 있는 방위차의 한계를 2°라고 생각하고 방위차 2°미만의 결정립계는 해석에서 제외하였다. 즉, 본 EBSD 측정에서는 2°~15°의 방위차를 가지는 결정립계를 저각각입계(low angle grain boundary), 방위차 15°이상의 결정립계를 고각각입계(high angle grain boundary)라고 하였다. 얻어진 EBSD 해석으로부터 평균 입경, 고각각입계의 비율, 결정립계의 평균방위차 각도 등 여러 미세조직 인자를 정량적으로 구하였다.

2.3 기계적 특성

압연 전후 시편에 대하여 상온에서 경도시험을 실시하였다. 경도시험은 시편의 횡단면을 절단하여 기계 연마한 후 Micro-Vickers 경도기를 이용하여 실시하였다. 경도값은 하중 유지시간 5초로 10회 측정하여 최대값과 최소값을 뺀 나머지의 산술평균값을 취하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 압연에 의해 도입된 변형량의 크기

Fig. 2는 편압입법에 의해 구한 두께방향으로의 전단 변형량 분포를 나타낸 것이다. 시편의 실제 두께는 약 0.75 mm이지만 두께방향의 상대 위치를 나타내기 위해서 가로축을 $\Delta t/t$ (t : 시편의 실제 두께, Δt : 실제 두께와 상부를 부위를 기준으로 측정한 위치까지의 거리와의 차이)의 값으로 나타내었다. 전단변형량값에 대해서도 이전과 마찬가지로 시편의 상부를 방향(normal direction)에 대하여 압연방향으로의 전단변형량을 양(+), 압연 반대방향으로의 전단변형량을 음(-)의 값으로 나타내기로 한다. 동속의 경우, 그림에서와 같이, 전단변형량의 값이 상부를 측(upper roll side)부위에서는 양의 값을 나타내지만 하부를 측(lower roll side)부위에서는 음의 값을 나타내고 중앙 부위에서는 0을 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 이전 연구¹²⁾와 마찬가지로 중앙부위를 중심으로 상부와 하부에서 전단변형이 서로 반대방향으로 작용하였기 때문이다. 그러나 이주속압연된 시편의 경우에는 상부와 하부를 표면에서 0을 나타내며 그 외의 부위에서는 양의 전단변형량을 나타내었다. 즉, 음의 전단변형이 작용하지 않았다. 또한 도입된 전단변형량의 절대치는 동속압연재료에 비해 아주 작았다.

3.2 미세조직(Microstructure)

Fig. 3은 압연후 시편의 두께방향으로 상부를 부위, 중앙 부위, 하부를 부위에서 각각 촬영한 광학현미경 조직사진을 나타낸 것이다. 부위에 관계없이 동속 및 이주속압연 시편 모두 결정립이 압연방향으로 크게 연신된 압연 조직을 나타내었다.

Fig. 4는 동속압연재의 상부를 표면 부위와 중앙 부위

Fig. 2. The shear strain in thickness direction of samples deformed by conventional rolling(CR) and differential speed rolling(DSR).

Fig. 3. Optical microstructures in TD plane of the samples processed by conventional rolling and differential speed rolling.

의 ND map, RD map, GB map을 각각 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 표면 부위, 중앙 부위 모두 $\{112\}<110>$, $\{001\}<110>$, $\{111\}<110>$ 성분의 전단집합조직이 주로 발달되어 있음을 알 수 있다. 특히 중앙부위의 경우, 일반압연에서 좀처럼 발달되지 않는 $\{001\}/ND$ 전단집합조직이 크게 발달되어 있는데, 이것은 2-pass를 통한 높은 압하율에 의해 압축변형만 받은 부위가 매우 협소하며 중앙 부근에도 전단변형이 도입된 때문이라 사료된다. GB map을 통해서는 표면부위에서는 결정립계 방위각이 15° 이상인 고경각입계의 분율(53.4%)이 저경각입계의 분율(46.6%)보다 다소 높으나 센터부위에서는 고경각입계의 분율(47.4%)이 저경각입계의 분율(52.6%)에 비해 다소 낮은 것을 알 수 있다. Fig. 5는 동속압연재의 상부를 표면 부위와 센터 부위의 결정립계 방위각 분포도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 방위각 분포가 서로 매우 유사함을 알 수 있다. 평균방위각은 표면부위가 24.3° , 센터부위가 22.2° 로 거의 비슷하였다. Fig. 6은 동속압연재의 상부를 표면 부위와 센터 부위의 결정립 크기 분포도를 나타낸 것이다. 두 부위 모두 $3 \mu\text{m}$ 이하가 가장 높은 분율을 나타내고 있으나, 센터의 경우 $30 \mu\text{m}$ 이상의 조대한 결정립이 20%이상을 점유하고 있으므로 평균결정립 크기는 센터부위($15.5 \mu\text{m}$)가 표면부위($6.2 \mu\text{m}$)에 비해 2배 이상 컸다.

Fig. 7은 이주속압연재의 상부를 표면부위, 중앙부위, 하

Fig. 4. ND maps, RD maps and GB maps near upper roll side surface and center in thickness of the sample processed by conventional rolling(CR).

Fig. 5. Misorientation angle distributions near upper roll side surface (a) and center (b) in thickness of the sample processed by conventional rolling(CR).

Fig. 6. Grain size distributions near upper roll side surface (a) and center (b) in thickness of the sample processed by conventional rolling(CR).

부를 표면부위의 ND map, RD map, GB map을 각각 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 모든 부위가 매우 유사

한 집합조직을 나타내고 있으며 주로 $\{112\}<110>$, $\{111\}<110>$ 성분의 전단집합조직이 크게 발달되어 있다. 이

Fig. 7. ND maps, RD maps and GB maps near upper roll side surface, center and lower roll side surface in thickness of the sample processed by differential speed rolling(DSR).

Fig. 8. Misorientation angle distributions near upper roll side surface (a), center (b) and lower roll side surface (c) in thickness of the sample processed by differential speed rolling(DSR).

것은 비대칭압연에 의해 전단변형이 재료내부까지 성공적으로 도입되었음을 잘 나타낸다. 여기서 전단집합조직이 크게 발달한 면에 있어서는 동속압연재와 유사하나, 이주속압연재의 경우는 $\{112\}$ //ND 전단집합조직이 크게 발달하였다는 점에서 차이가 존재한다. 또한 경각입계의 분율에 있어서는 동속압연재와 차이가 존재하였다. 즉, GB map에 나타나 있듯이, 상부롤 부위의 고경각입계 분

율이 70 %인 반면, 센터부위와 하부롤 부위에서는 각각 36.6 %, 40.1 %로 매우 낮은 점유율을 나타내었다. 이와 같은 차이는 Fig. 8과 같은 방위각 분포도에서도 확연히 나타난다. Fig. 8(a)와 같이 상부롤 표면부위에서는 15° 이상의 고경각입계가 지배적이며 평균방위각이 30.9° 인 반면, 센터와 하부롤 표면부위에서는 저경각입계의 분율이 더 지배적이며 평균방위각이 각각 18.3° 와 19.7° 였

Fig. 9. Grain size distributions near upper roll side surface (a), center (b) and lower roll side surface (c) in thickness of the sample processed by differential speed rolling(DSR).

Fig. 10. Variation of hardness through the thickness (a) and the average hardness (b) of the samples processed by conventional rolling(CR) and differential speed rolling(DSR).

다. 이것은 평균방위각에 있어서 표면부위와 센터부위에 큰 차이가 없었던 동속압연재와 대조적인 결과이다. Fig. 9는 각 부위별 결정립 크기 분포를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 어느 부위에서나 $5 \mu\text{m}$ 이하의 미세한 결정립이 30%이상을 점유하고 있으며, 상부를 부위의 평균결정립 크기는 $6.9 \mu\text{m}$ 으로 가장 작았으며, 센터 및 하부를 부위의 평균결정립 크기는 각각 $17 \mu\text{m}$, $25 \mu\text{m}$ 을 나타내었다. 상부를 부위의 결정립 크기가 작은 이와 같은 경향은 동속압연재와 매우 유사하다.

3.3 경도 분포(Hardness distribution)

Fig. 10에 공시재료 및 압연 가공된 재료의 두께방향으로의 경도분포(Fig. 10a) 및 평균경도(Fig. 10b)를 나타내었다. 그림에서와 같이 공시재료 및 동속, 이주속압연 재료 모두 두께방향으로 비교적 균일한 경도분포를 나타내었고, 압연재료가 공시재료보다 더 큰 경도값을 나타내었다. 그리고 동속의 평균경도가 이속의 평균경도에 비해 다소 큰 값을 나타내었다. 이것은 압연시에 도입된 상당변형량의 크기가 이속에 비해 동속에서 더 큰 것과 연관이 있다고 사료된다. 즉, 총압하율이 75%로 같으므로 결보기 변형량은 같으나 실질적인 상당변형량은 동속의 경우가 더 컸으므로 그로 인한 여분의 가공경화율이 경도값으로 반영되어 나타난 결과라 사료된다.

4. 결 론

2-pass 이주속압연된 인탈산동의 미세조직 및 기계적 성질을 조사한 결과 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 두께방향으로의 전단변형은 동속의 경우 중앙부위를 중심으로 상부를 부위에서는 양의 값을 하부를 부위에서는 음의 값을 나타내었으나, 이속의 경우는 0 또는 양의 값을 나타내었다. 둘째, 이주속압연에 의해 도입된 전단변형량의 절대 크기는 동속압연재에 비해 더 작았다. 셋째, 동속압연재의 경우 $\{100\}/\text{ND}$ 의 전단집합조직 성분이, 이주속압연재의 경우 $\{110\}/\text{ND}$ 전단집합조직 성분이 각각 발달하였으며, 부위에 따른 집합조직의 큰 차이는 두 경우 모두 존재하지 않았다. 넷째, 동속압연재의 경우, 부위에 따른 결정립계 방위각 분포의 차이는 미미하였으나, 이속압연재의 경우는 상부를 부위에서 방위각이 가장 컸으며 중심부위와 하부를 부위는 유사한 값을 나타내었다. 다섯째, 결정립계 크기는 동속압연재, 이주속압연재 모두 상부를 부위에서 가장 작은 값을 나타내었다.

References

1. De-Ping Lua, Jun Wang, Wei-Jun Zengb, Yong Liu, Lei Lub and Bao-De Suna, Mater. Sci. Eng., **A421**, 254 (2006).

2. Y. G. Kim, B. C. Hwang, S. H. Lee, C. W. Lee and D. H. Shin, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **46**(9), 545 (2008).
3. T. Sakai, S. Hamada and Y. Saito, *Scripta Mater.*, **44**, 2569 (2001).
4. K. -H. Kim and D. N. Lee, *Acta Mater.*, **49**, 2583 (2001).
5. S. H. Lee and D. N. Lee, *J. Mech. Sci.*, **43**, 1997 (2001).
6. S. H. Lee, T. Sakai and D. H. Shin, *Mater. Trans.* **44**(7), 1382 (2003).
7. J. Watanabe, T. Sakai, N. Iwamoto and H. Utsunomiya, *J. Japan Research Institute for Advanced Cu-Base Materials and Technologies*, **44**(1), 73 (2005).
8. W. J. Kim, J. D. Park and W. Y. Kim, *J. ALLOYS and COMPOUNDS*, **460**, 289 (2008).
9. S. H. Lee, D. J. Yoon, T. Sakai, S. H. Kim and S. Z. Han, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **47**(2), 121 (2009).
10. S. H. Lee, D. J. Yoon, K. J. Euh, S. H. Kim and S. Z. Han, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **48**(1), 77 (2010).
11. S. H. Lee, J. Y. Lim, H. Utsunomiya, K. J. Euh and S. Z. Han, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **48**(10), 942 (2010).
12. S. H. Lee, *Kor. J. Mater. Res.*, **22**(11), 581 (2012).