

Al-4.0%Zn-1.5%Mg-0.9%Cu 합금의 압출, 압연 및 열처리에 따른 미세조직 변화

권혁곤 · 박종문 · 오명훈 · 박노진[†]
금오공과대학교 신소재공학부

Evolution of Microstructure in Al-4.0%Zn-1.5%Mg-0.9%Cu Alloy by Extrusion, Rolling and Heat Treatment

Hyeok Gon Kwon, Jong Moon Park, Myung Hoon Oh, No Jin Park[†]

School of Advanced Materials Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology (KIT),
61 Daehak-ro, Gumi, Gyeongbuk 39177, Korea

Abstract In this study, microstructural changes due to extrusion, rolling and heat treatment were studied to fabricate Al-4.0wt%Zn-1.5wt%Mg-0.9wt%Cu alloys with homogeneous microstructure suitable for metal cases of smart phones and electronic products fabricated through plastic working. After extrusion microstructure and texture were developed very differently on the surface and inside. Inside, coarse grains were formed and a strong Cube component orientation was developed. On the surface, a weak texture was developed with small grains. After 72% cold rolling the intensity of the Cube component orientation was lower, and uniform texture was developed in all the layers and the R-value was uniformly predicted. After recrystallization, the grain size difference between at the surface and the inside is smaller, when 72% rolling was performed, indicating that a uniform structure is formed. Texture develops almost randomly after recrystallization and exhibits uniform R-values at all layers.

(Received January 19, 2018; Revised January 29, 2018; Accepted February 2, 2018)

Key words : Al-Zn-Mg alloy, Cold rolling, Recrystallization, Microstructure, Texture

1. 서 론

알루미늄 합금은 많은 분야에 적용되어 사용되고 있는 경량소재로서, 가벼우면서 강도가 높고 내식성, 전기전도성, 소성가공성 등이 우수하기 때문에 항공기를 비롯하여 자동차, 선박, 건축, 전기, 전자 및 일상 생활용품 등 각종 재료로 널리 사용되고 있다. 그러나 산업이 고도로 발달함에 따라 수송기관의 고속화, 에너지 절약, 환경오염방지 등을 위해서는 기존재료보다 더욱 더 비강도와 비탄성이 높은 특성을 갖는 새로운 알루미늄 합금 재료의 개발이 요구되고 있다[1-4].

최근 스마트폰용 케이스에서도 금속 소재를 채택하여 알루미늄 합금을 사용하고 있으며 경량화와 고강도화를 위하여 합금 조성, 공정 과정에 대한 연구가

추진되고 있다. 제품의 생산성과 생산 단가 등을 고려하여 다이캐스팅 공법을 이용한 생산이 주류를 이루고 있다. 하지만 다이캐스팅의 경우 주조성 향상을 위해 첨가된 다량의 Si로 인하여 금속 고유의 광택 및 질감을 표현할 수 없는 단점을 가지고 있으며 현재 제품생산을 위해 필요한 공정의 최적화가 이루어지지 못한 상태이다. 또한 다이캐스팅 공법으로 생산하는 과정에서 발생하는 기공 및 치수 불일치, 후가공 및 표면처리의 어려움 등으로 인하여 다이캐스팅 이외에 압출 및 단조에 사용될 고강도 합금 개발이 필요하다[5-8].

본 연구는 압출 및 단조용 7000계열 알루미늄 합금 중 금속케이스에 사용하기에 적절한 기계적 특성을 갖는 7×2×합금에 속하는 4.0% Zn, 1.5% Mg, 0.9% Cu를 첨가한 알루미늄 합금을 선택하여,

[†]Corresponding author. E-mail : njpark@kumoh.ac.kr
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

스마트폰 및 전자제품 등의 금속케이스에 적용하기 위하여 균일한 미세조직을 갖는 합금을 제조하는데 도움을 주고자 수행하였다. Al-Zn-Mg-Cu 합금은 가공용 알루미늄 합금 중에서 기계적 강도가 높은 고력합금 중의 하나로서 일반적으로 항공기, 철도차량, 스포츠용품 등 비강도를 중요시하는 구조재료에 사용되고 있으며[9, 10], 본 조성의 합금이 가공용 휴대폰 소재로 적용되는 것은 처음이다.

하지만 압출을 통해 생산된 합금은 단면의 미세조직이 불균일하게 형성된다. 특히 표면과 내부, 즉 두께방향(through-thickness)의 조직이 매우 불균일하여 단조 등 후속 소성가공에 영향을 줄 수 있기 때문에 일반적으로 균질화 열처리 등의 공정을 거쳐 사용한다. 그러나 높은 압출비로 제조된 합금은 열처리만으로는 균질화 되기 어렵기 때문에 가공과 열처리를 통하여 미세조직을 균일하게 하는 노력이 필요하다[11].

본 연구에서는 압출된 합금을 냉간압연과 열처리 과정을 거쳐 미세조직을 균일하게 하고자 시도하였으며, 이를 확인하기 위하여 광학현미경 조직사진과 XRD를 이용한 집합조직 측정, 이의 분석을 통하여 예측한 소성변형률비(R값, 인장시편의 폭방향 변형률과 두께방향 변형률의 비)를 이용하였다. 집합조직은 응고, 소성변형, 열처리 등의 제조공정 중에 발달되며, 결정질 재료의 결정학적 이방성을 나타낸다. 재료의 물성과 성형성에 미치는 많은 특성들이 집합조직과 연관되어 있다[12, 14].

2. 실험 방법

Al-4.0wt.%Zn-1.5wt.%Mg-0.9wt.%Cu 합금 조성으로 주조된 직경 5인치(127 mm)의 원통형 빌릿을 예열로에서 약 470°C로 예열 후, 폭 81 mm 두께 3.8 mm의 직사각형의 단면으로 압출하였다. 압출 시 컨테이너의 직경은 135 mm로 단면적은 14,314 mm²이며 제품의 단면적은 308 mm²로 압출비는 (extrusion ratio) 약 46.5이다.

압출된 판재는 5°C/min의 승온속도로 520°C까지 가열하고 1시간 유지하여 균질화 처리 후 퀀칭하고, 압출방향과 평행한 방향으로 상온에서 윤활 압연하였다. 압연은 롤 지름이 127 mm인 실험실용 압연기에

서 압연하였다. 압연은 8 및 12패스 압연하여 각각 최종 1.78 mm, 1.05 mm의 두께가 되었으며 이는 53%와 72%의 총 압하율에 해당된다. 패스당 압하율은 약 6%로 동일하게 유지하였으며 압연방향은 매 패스마다 180도 회전하여 실험실 압연 시 발생할 수 있는 미세조직의 시편이방성을 최소화하였다. 냉간압연된 판재는 재결정을 위하여 5°C/min의 승온속도로 400°C까지 가열한 후, 30분 유지 후 퀀칭하였다.

시편의 미세조직은 광학현미경(OLIMPUS BX41M-LED)를 이용하여 관찰하였다. 시편은 SiC 연마지로 연마 후, Diamond Suspension 6 µm, 3 µm, 1 µm 순으로 미세연마 하였다. 에칭은 Keller 용액(175 ml D.I. water + 20 ml HNO₃ + 3 ml HCl + 2 ml HF)을 이용하였다.

집합조직 분석은 X-선 회절기(Bruker AXS D-5005)를 이용하여 3개의 {111}, {200}, {220} 극점도(pole figure)를 측정하여 분석하였다. 측정은 가속전압 40 kV, 전류 30 mA를 적용하고 Co-Target (파장: 0.17902 nm)을 사용하였다. 측정된 극점도는 Bunge의 급수전개방법[12]을 이용하여 방위분포함수(orientation distribution function, ODF)를 분석하였다. 본 실험에서 발달되는 집합조직은 판재의 두께 층에 따라 상이한 집합조직이 나타날 수 있으므로, 즉 두께 층에 따른 불균일성을 판별하기 위하여 시편의 표면층, 표면에서 1/4-층, 중심층까지 3층으로 나누어 연마하여 극점도를 측정하였다.

두께 층에 따른 집합조직의 해석결과를 이용하여 소성변형률비(R값)를 계산하였다. 이의 계산에는 소성변형의 Taylor이론을 이용하였으며, {111}<110> slip system을 적용하여 계산하였다[12, 13]. 측정된 극점도를 이용하여 압연방향의 0°, 45°, 90° 방향에서 R값을 계산하였으며, 이를 이용하여 평균 소성변형률비(R_m)를 다음 식을 이용하여 구하였다[12, 14].

$$R_m = \frac{R_{0^\circ} + 2R_{45^\circ} + R_{90^\circ}}{4}$$

3. 결과 및 고찰

압출 및 압출 후 520°C에서 균질화 처리한 시편의 표면층, 1/4-층, 중심층에서의 미세조직을 Fig. 1

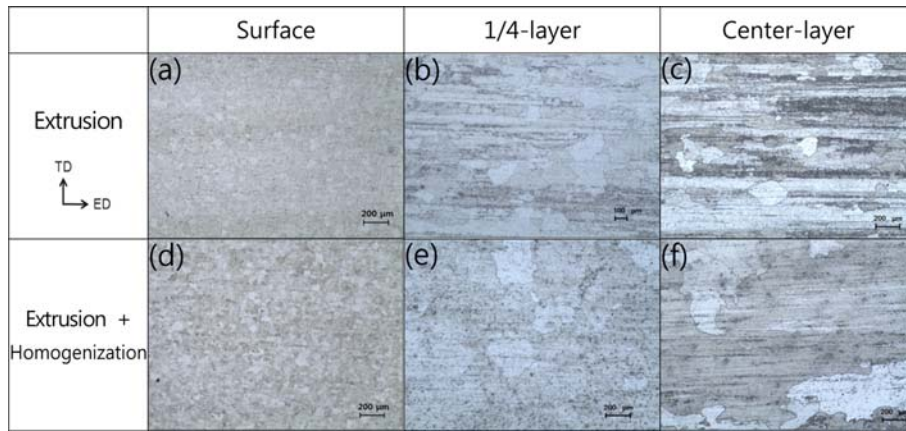


Fig. 1. Microstructure of as-extrusion (a), (b), (c) and homogenized specimen (d), (e), (f) on surface (a), (b), 1/4-layer (c), (d) and central layer (e), (f). (Observed region: ND, normal direction, ED, extrusion direction, TD, transverse direction of sheet).

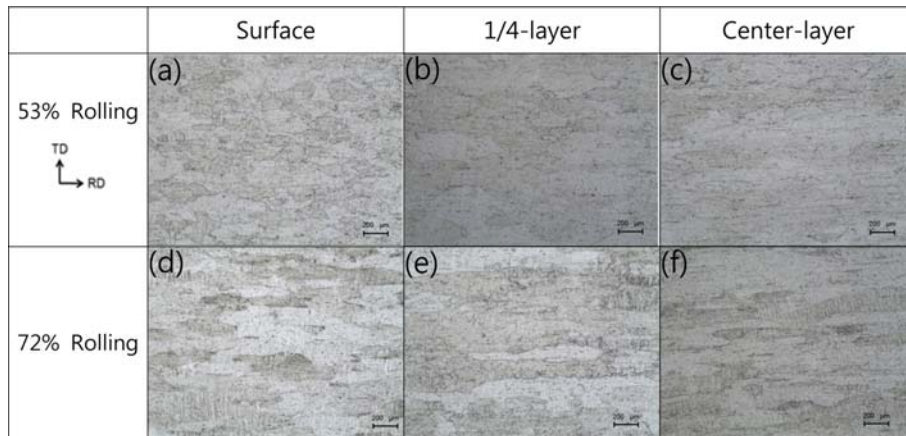


Fig. 2. Microstructure of 53% (a), (b), (c) and 72% (d), (e), (f) rolled specimen on surface (a), (b), 1/4-layer (c), (d) and central layer (e), (f). (Observed region: ND, normal direction, ED, extrusion direction, TD, transverse direction of sheet).

에 나타내었다. 관찰면은 판재수직(ND) 면이며 압출 방향(ED)과 폭방향(TD)을 표기하였다. 압출된 시편의 경우, 전 영역에서 재결정 조직과 압출조직의 흔적이 남아 있음을 볼 수 있으며, 표면층에 형성된 재결정립은 그 크기가 중간층보다 작게 발달되었다. 이는 압출 시 표면층과 중간층이 불균일하게 변형이 되어 나타나는 결과로 판단된다. 520°C에서의 균질화 처리 후에는 1/4-층과 중간층에서는 재결정과 더불어 결정립 성장이 진행되어 조대한 결정립이 형성되었음을 볼 수 있다.

Fig. 2에는 판재수직면에서 관찰한 53% 및 72% 냉간압연 한 시편의 표면층, 1/4-층, 중간층에서의

미세조직을 나타내었는데 압연이 진행됨에 따라 결정립이 압연방향으로 연신되는 것을 볼 수 있으며, 72% 압연했을 경우 더 길게 연신됨을 나타낸다. 또한 압연율이 높아질수록 결정립 내부에서 불균일한 변형현상이 나타나는데, 판재수직(ND) 면에서 보면 압연방향(RD)에 수직방향(TD)으로, 판재횡단(TD) 면에서 보면 압연방향에 20~40° 기울어지게 변형띠(deformation band)가 형성된 것을 볼 수 있다(Fig. 3). 변형띠 형성은 냉간가공 시 불균일 변형이 발생할 때 나타나는 현상으로 전단띠(shear band) 혹은 미소띠(micro band) 형태로 나타나며 특히 가공도가 높아지면 형성된다.

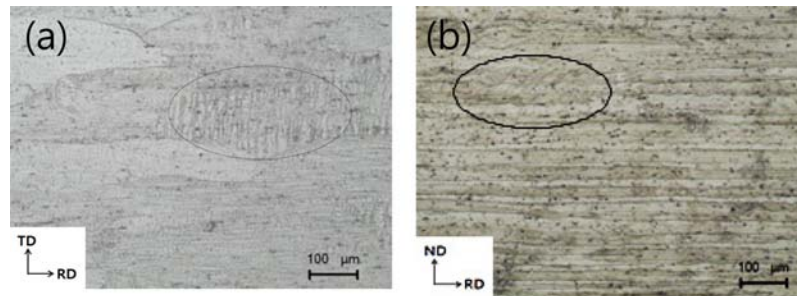


Fig. 3. Observed deformation band in 72% rolled specimen (a) normal direction of sheet and (b) transverse direction of central layer.

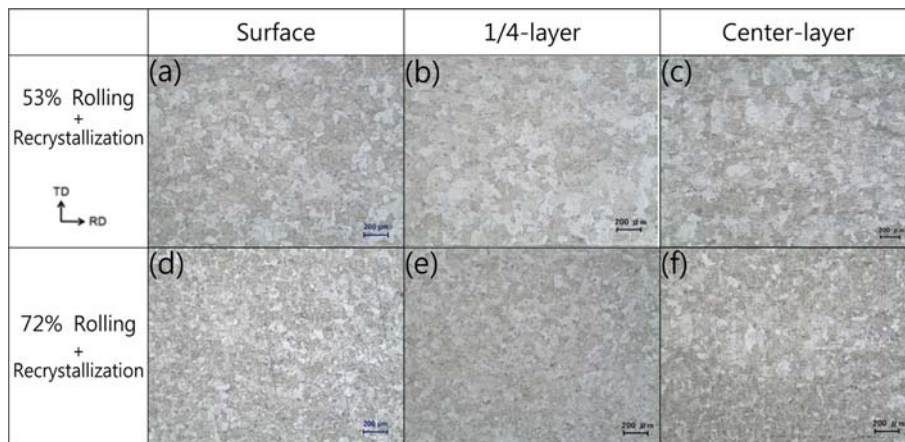


Fig. 4. Microstructure of surface, 1/4-layer and central layer on recrystallized specimen after rolled (Observed region: ND, normal direction, ED, extrusion direction, TD, transverse direction of sheet).

Table 1. Average grain size of recrystallized specimen (unit: μm)

Specimen	Surface	1/4-layer	Center-layer	Average
Recrystallization after 53% Rolling	48.78	58.44	55.57	54.26
Recrystallization after 72% Rolling	38.81	42.01	40.46	40.43

압연된 시편을 400°C에서 열처리하여 재결정된 조직을 Fig. 4에서 볼 수 있는데, 모든 시편에서 두께와 관계없이 일정하게 등방성 형태로 재결정된 것을 볼 수 있다. 그러나 평균 결정립 크기는 열처리 전의 냉간압연율과 층의 위치에 따라 상이하게 나타나는데 이를 Table 1에 나타내었다. 모든 층에서의 평균 결정립 크기는 53% 압연한 경우 54.26 μm , 72% 압연한 경우 40.43 μm 로써 열처리 전의 냉간압연율이 큰 경우 결정립 크기가 20% 이상 작게 형성되었다. 이는 압연율이 커짐에 따라 축적되는 냉간가공에너지가 높아지며, 72% 압연 시 생성된 변

형미 등이 재결정 초기에 더 많은 재결정립 핵생성 위치로 작용하여 나타난 결과로 판단된다. 동일한 압연율로 압연 후 재결정 한 경우에는 표면층에서 더 작은 결정립이 형성되었음을 볼 수 있는데, 이는 압출과 균질화 열처리 후에 이미 표면과 내부의 조직이 불균일하게 발달되어 나타난 결과이다. 특이한 것은 72% 압연한 경우에는 표면과 내부층의 결정립 크기 차이가 약 10%이지만, 53% 압연한 경우에는 약 20%로 더 불균일한 결정립 크기 분포를 보여주는데, 이는 압연율이 높아짐에 따라 내부의 미세조직이 균일하게 형성되었음을 나타내는 결과이다.

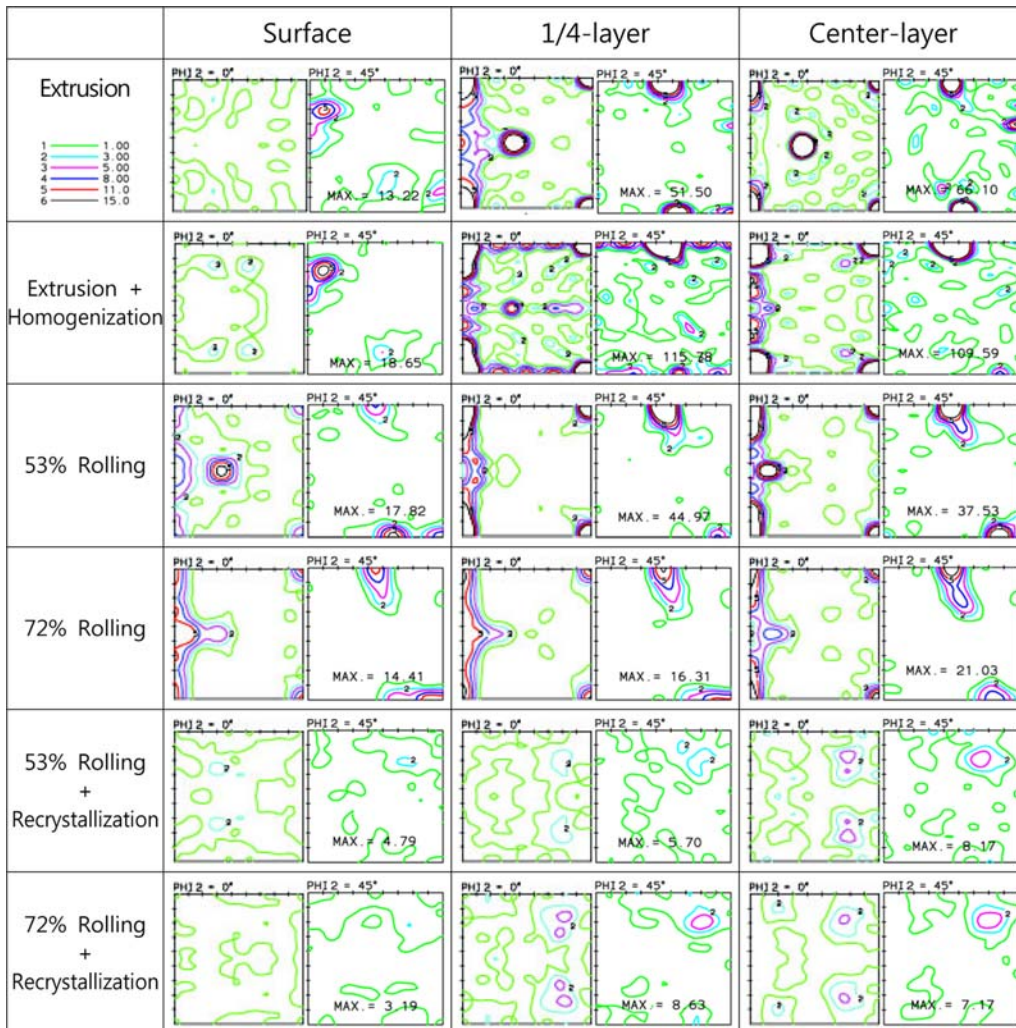


Fig. 5. Orientation distribution function on developed texture of aluminum sheet with various process in surface, 1/4-layer and central layer (ODF, $\phi_2=0, 45^\circ$ section).

각 공정에 따라 제조된 시편의 표면층, 1/4-층, 중심층에서 측정된 집합조직은 발달된 방위분포함수(ODF)를 잘 표현할 수 있는 $\phi_2=0, 45^\circ$ section ODF로써 Fig. 5에 나타내었다. 압출한 시편의 경우, 표면층에서는 약한 집합조직이 발달하고 있는 반면 1/4-층과 중심층에서는 압출로 인한 강한 β -fiber 집합조직($\{110\}\langle 112\rangle$, $\{112\}\langle 111\rangle$, $\{123\}\langle 634\rangle$ 성분이 연결되어 발달된 집합조직)과 Cube 방위($\{100\}\langle 001\rangle$) 성분이 형성되어있는 것을 확인할 수 있다. 이는 평면변형과 재결정에 의하여 발생하는 집합조직이다[11, 15]. 이러한 경향은 용체화 처리

후에도 유지되고 있으나, 특히 내부에서 그 강도가 매우 증가하고 있으며, 압출에 의해 형성되었던 β -fiber 집합조직은 모두 Cube 방위($\{100\}\langle 001\rangle$) 성분으로 변환된 것을 확인할 수 있다. Cube 방위($\{100\}\langle 001\rangle$) 성분은 FCC 결정구조를 갖는 금속속에서 나타나는 재결정 집합조직 성분으로써[16] 본 연구에서 적용한 520°C 에서의 균질화 처리로 Fig. 1에서 보는 것과 같이 재결정과 결정립 성장을 통해 그 강도가 매우 높게 형성되었다.

냉간압연 후에는 용체화 처리 시 발달했던 강한 Cube 방위($\{100\}\langle 001\rangle$) 집합조직이 현저히 약해

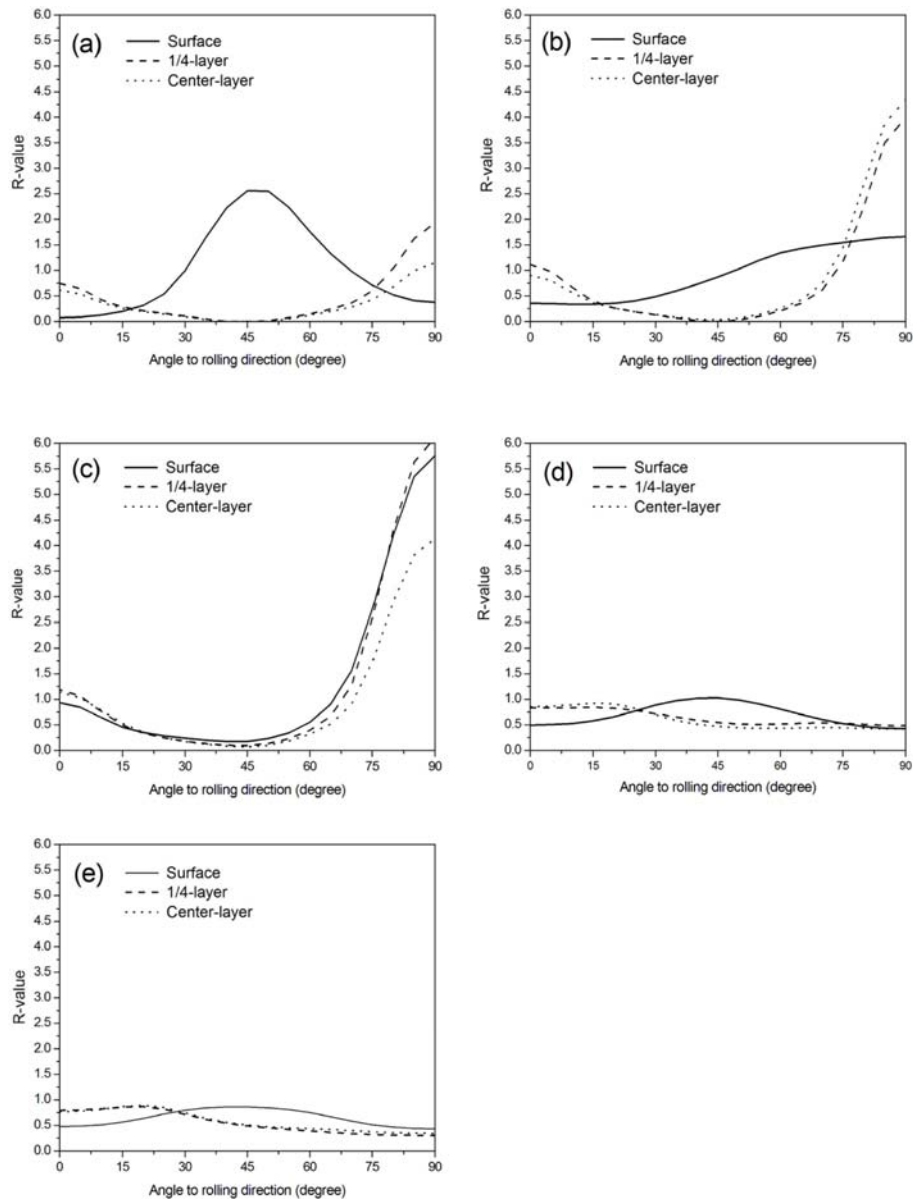


Fig. 6. Calculated R-value on aluminum sheet using result analysis of developed texture in surface, 1/4-layer and central layer (a) homogenization after extrusion, (b) rolled 53%, (c) rolled 72%, (d) recrystallization after rolled 53% and (e) recrystallization after rolled 72%.

졌다. 압연율이 높아질수록 표면층의 집합조직이 1/4층, 중간층과 비슷한 집합조직으로 변형되고 있으며 균질한 집합조직을 형성하고 있음을 알 수 있다. 특히 72% 압연 후에는 재결정 집합조직인 Cube 방위($\{100\}\langle 001 \rangle$) 성분이 매우 낮아지고 Goss 방위($\{110\}\langle 001 \rangle$) 성분이 발달된 것을 볼 수 있다.

53%와 72% 냉간압연 시편을 재결정 열처리하면 모든 층에서 집합조직 강도가 약한 무질서한 집합조직을 나타낸다.

집합조직의 해석결과를 이용하여 계산한 소성변형률비(R값)를 Fig. 6에 나타내었다. R값은 압연방향부터 관재의 횡방향(압연방향과 90° 위치)까지 5° 간

Table 2. R-value of each layer with various process (homogenization, cold rolling and recrystallization)

	Homogenization			53% Rolling			72% Rolling			Recrystallization after 53% Rolling			Recrystallization after 72% Rolling		
	Surface	1/4-layer	Center	Surface	1/4-layer	Center	Surface	1/4-layer	Center	Surface	1/4-layer	Center	Surface	1/4-layer	Center
0°	0.07	0.74	0.61	0.36	1.11	0.90	0.93	1.18	1.13	0.50	0.83	0.85	0.48	0.79	0.76
45°	2.56	0.00	0.00	0.87	0.00	0.03	0.18	0.09	0.07	1.02	0.55	0.47	0.86	0.49	0.51
90°	0.38	1.93	1.14	1.66	4.01	4.34	5.76	6.12	4.14	0.42	0.48	0.42	0.43	0.30	0.35
R _m	1.39	0.67	0.44	0.94	1.28	1.33	1.76	1.87	1.35	0.74	0.60	0.55	0.66	0.52	0.53

격으로 계산하여 각 층별로 나타내었으며, 압연방향에서 0, 45, 90°에서의 R-값과 평균 소성변형률비(R_m)를 Table 2에 정리하였다. 압출 후 용체화 처리한 시편의 경우 표면층과 내부층(1/4층, 중심층)에서의 값이 매우 다르게 나타난다. 표면층에서는 압연 방향의 45° 방향에서 2.56으로 가장 높은 R-값을 나타내며, 0°와 90°에서 낮은 값을 나타내는 반면에 내부층에서는 45° 방향에서는 R-값이 0으로 성형성이 매우 낮게 평가되고 오히려 0°와 90° 방향에서 높은 R-값을 나타낸다. 이는 용체화 처리 후 판재 내부에 강하게 발달된 Cube 방위({100}<001>) 성분에 기인한 것으로써[14], 이렇게 층별로 매우 다른 R-값을 나타내면 딥드로잉(deep drawing) 등 가공 시 층별로 다른 변형거동을 나타내기 때문에 불량 발생할 것으로 판단된다. 그러나 압연이 진행됨에 따라 표면층과 내부층에서의 R-값 차이가 감소하여 72% 압연 후에는 모든 층에서 유사한 R-값이 나타남을 볼 수 있다. 이는 앞의 집합조직 분석 결과에서도 확인 할 수 있었던 것으로 두께층 전체에서 유사한 미세조직이 형성되었음을 나타낸다. 또한 압연이 진행됨에 따라 압연방향에서 45° 방향에서는 R-값이 0에 가까운 낮은 값을 가지나, 0°에서는 1에 가까운 값을 가지며 특히 90° 방향에서 4를 상회하는 매우 높은 R-값을 나타낸다. 이는 압연이 진행됨에 따라 판재 전체 층에서 발달된 Cube 방위({100}<001>) 성분과 특히 Goss 방위({110}<001>) 성분에 기인한 것으로 판단된다[14]. 재결정 열처리 후에는 모든 방향에서 0.5~1 사이의 R-값을 갖는 것을 확인하였다. 이는 집합조직이 약해져서 거의 무질서한 집합조직이 발달한 결과이며, 모든 층에서 균일한 R-값을 나타내는데 이는 현미경 미세조직과 집합조직에서도 확인 할 수 있는 결과이다.

4. 결 론

소성가공을 통하여 제작되는 스마트폰 및 전자제품 등의 금속케이스에 적합한 특히 두께방향에서 균일한 미세조직을 갖는 Al-4.0wt.%Zn-1.5wt.%Mg-0.9wt.%Cu 합금을 제조하기 위하여 압출, 압연 및 열처리에 따른 미세조직 변화를 연구한 결과 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1. 압출 후 520°C에서 균질화 처리한 경우, 현미경 미세조직, 집합조직, R-값 등이 표면과 내부에서 매우 상이하게 발달되었다. 내부에서는 재결정과 더불어 결정립이 성장되어 조대한 결정이 형성되었으며, Cube 성분({100}<001>) 방위를 갖는 강한 집합조직이 발달하였고, 표면에서는 작은 재결정립과 더불어 약한 집합조직이 발달하였다.

2. 냉간압연이 진행됨에 따라 높은 압연율에서 변형띠(deformation band)가 형성되었다. 집합조직은 Cube 성분({100}<001>) 방위의 강도가 낮아지고 Goss 방위({110}<001>) 성분이 발달되었으며 72% 압연 후에는 모든 층에서 균일한 집합조직이 발달되고 R-값도 균일하게 예측되었다.

3. 재결정 처리한 경우, 압연율이 큰 경우 20% 이상 더 작은 결정립이 형성되었으며, 동일한 압연율인 경우, 재결정 후 표면에서 더 작은 결정립이 형성되었다. 표면과 내부의 결정립 크기 차이는 72% 압연했을 경우 더 작아 균일한 조직이 형성되었음을 보여준다. 집합조직은 재결정 후 거의 무질서하게 발달하며, 모든 층에서 균일한 R-값을 나타낸다.

4. 53% 압연보다 72% 압연 한 시편에서 집합조직 및 R-값이 두께층에서 더 균일하게 발달하고 있으나, 재결정 후에는 압연율과 무관하게 모든 층에서 균일한 특성을 나타낸다. 그러나 72%압연 후 재결

정한 시편이 결정립 크기는 작고, 크기 분포도 적은 균일한 미세조직이 형성되어 연구 목적에 맞는 공정으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역신산업 선도인력양성사업 성과임(No. NRF-2016H1D5A1910938).

References

1. D. Xu, Z. Li, G. Wan, X. Li, X. Lv, Y. Zhang and Y. Fan : Materials Characterization, **131** (2017) 285.
2. M. X. Guo, Y. Zhang, X. K. Zhang, J. S. Zhang and L. Z. Zhuang : Materials Science & Engineering A, **669** (2016) 20.
3. K. Wen, Y. Fan, G. Wang, L. Jin, X. Li, Z. Li, Y. Zhang and B. Xiong : Progress in Natural Science: Materials International, **27** (2017) 217.
4. J. Rojas and D. Crespo : Materials Characterization, **134** (2017) 319.
5. L. Wang and X. Nie : Thin Solid Films, **494** (2006) 211.
6. J. He, Q. Z. Cai, H. H. Luo, L. Yu and B. K. Wei : J. Alloys and Compounds, **471** (2009) 395.
7. S. I. Jeon : J. Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology, **5**(4) (2015) 771.
8. J. M. Park, J. S. Kim, J. K. Kim, S. R. Kim, N. J. Park and M. H. Oh : J. of the Korean Society for Heat Treatment, **31**(1) (2018).
9. H. I. Lee, Y. S. Han, D. H. Kim and W. T. Kim : Korea steel news (2005).
10. J. E. Hatch : ASM, Metals Park (1984) 79.
11. M. B. Chen, J. Li, Y. M. Zhao, H. Yuan and W. C. Liu : Materials Characterization, **62** (2011) 1188.
12. H. J. Bunge : Butterworths Pub., London (1982) 47.
13. H. R. Wenk and P. V. Houtte : Rep. Prog. Phys, **67** (2004) 1367.
14. N. J. Park, H. Klein and E. Dahlem-Klein : Cuvillier Verlag, Goettingen (1994).
15. J. Hirsch and K. Luecke : Acta Metall., **36** (1988) 2883.
16. N. Hansen and D. J. Jensen : Metall. Trans. A, **17A** (1986) 253.