

6061 알루미늄 합금의 미세조직 발달에 미치는 이속 압연변수 영향

윤동근¹ · 양해웅² · 성유준¹ · 한다인¹ · 김동주³ · 고영건^{4, #}

Processing Factors Affecting Microstructure Evolution of Fine-Grained AA6061 via Differential Speed Rolling

D. K. Yoon, H. W. Yang, Y. J. Sheng, D. I. Han, D. J. Kim, Y. G. Ko
(Received July 5, 2021 / Revised July 30, 2021 / Accepted July 30, 2021)

Abstract

In this study, we investigated the dominant processing variables that would influence the microstructural development of AA6061 deformed by differential speed rolling (DSR) at ambient temperature. For this purpose, we carried out a series of DSR on the samples to investigate the effects of roll speed ratio, sample rotation, and number of operation under specific rotation. Among these, the condition with a height reduction of 75% at a speed ratio of 1:4 through rotation along rolling direction (RR) displayed the pronounced results of more homogenous matrix-structure and superior mechanical properties than the others tested in this study. This was mainly due to the cross shearing of macro-shear pattern in segment where dynamic recrystallization took place with ease throughout the sample. Thus, an average microhardness value of 101 Hv was obtained in the present sample deformed by 4-pass DSR with RR where macro cross-shearing was effectively applied.

Keywords : Differential Speed Rolling, AA6061, Structure, Microhardness

1. 서론

최근 환경오염 문제가 대두되며 다양한 산업에서 친환경과 관련된 기술들이 주목을 받고 있다. 특히, 자동차 산업의 에너지원은 화석연료에서 전기 또는 수소로 바뀌는 등 이산화탄소 배출을 저감하고자 하는 노력이 이어지고 있다. 1 회 충전 주행가능거리는 가장 중요한 전기자동차의 성능인데, 전기자동차에 사용되는 배터리로 인해 차량의 무게가 내연기관 차량 보다 더 무겁기 때문에 차량용 부품 혹은

차체 소재의 경량화는 에너지효율을 향상하기 위한 하나의 방법으로써 중요한 역할을 한다.

경량화를 위한 소재에는 고강도 철강재료, 비철금속 그리고 화학소재 등이 연구 및 적용되고 있다. 밀도 2.7 g/cm^3 로 약 철의 1/3 정도인 알루미늄 합금은 비강도, 전자파 차폐성, 재활용성, 소재 성형성 등 다양한 장점을 가지기 때문에 현재 가장 주목받고 있는 경량소재이다. 특히, Al-Mg-Si 계인 6xxx 계 알루미늄 합금은 알루미늄 합금 중에서 비교적 강도와 성형성이 우수하고 도장 소부경화처리 후 강도가 추가 향상되는 열처리 합금으로 강성과 내덴트성이 요구되는 차체의 외판 및 내판으로 활용되고 있다. 따라서 우수한 품질 및 기계적 특성을 부여할 수 있는 차량용 알루미늄 합금 내·외판 제조를 위한 압연 기술 연구가 필요하다.

1. 영남대학교 신소재공학과, 석사과정
2. 포항금속소재산업진흥원 소재솔루션연구실, 선임연구원
3. ㈜세아메카닉스 소재부품연구소, 연구소장
4. 영남대학교 신소재공학과, 교수
Corresponding Author : Department of Materials Science & Engineering, Yeungnam University, E-mail: younggun@ynu.ac.kr
ORCID : 0000-0001-8048-2908

한편, 강소성 가공법은 금속 소재에 극심한 변형을 부여하여 결정립을 초미세립(ultra-fine grain, UFG) 또는 나노 스케일로 미세화하여 기계적 특성을 향상할 수 있다고 보고되고 있다[1]. 이러한 강소성 가공법에는 다방향가압 (multi directional forging, MDF), 등통로각압축 (equal channel angular pressing, ECAP), 반복접침접합압연(accumulative rolling bonding, ARB), 등통로각압연(equal channel angular rolling, ECAR), 비대칭압연(asymmetric rolling, AR) 등이 있다. 하지만 위와 같은 강소성 가공법들은 미세조직 발달과 기계적 물성 향상을 시키고자 큰 변형량 부여를 위해 수 차례 가공 혹은 높은 가공 온도가 요구되고, 대면적 가공 및 연속 공정에 한계를 가지기 때문에 산업 적용의 제한이 있다. 따라서 본 연구에서는 비대칭 압연의 하나로 상·하부 롤 속도를 달리하여 소재 전체에 균일한 전단변형을 부여하여 우수한 기계적 물성을 가질 수 있다고 알려진 이속압연(differential speed rolling, DSR)을 도입했다[2]. 이러한 이속압연 공정은 기존 강소성 가공법들의 대면적 가공 및 연속 가공의 한계를 극복할 수 있을 뿐만 아니라 조성과 상관없이 넓은 범위의 기계적 물성을 갖는 소재를 제조할 수 있으며 또한, 가공에 필요한 압하력이 낮아 롤 토크(torque) 및 동력(power)이 낮아져 가동 에너지 효율이 좋은 공정이다[3].

이러한 이속압연 공정의 변수에는 롤 속도비[4], 회전 방향[5], 총변형량[6] 등이 존재하고, 이런 각 변수의 영향으로 미세조직 및 기계적 물성이 차이를 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 체계적으로 공정 변수를 제어하여 가공한 알루미늄 6061 합금을 통해 미세조직 발달에 미치는 이속압연 공정변수 영향에 대하여 연구하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 소재는 중량비 0.91% Mg - 0.72% Si - 0.52% Fe - 0.21% Cu - 0.19% Cr - Al 의 화학 조성을 갖는 상용 6061 알루미늄 합금 판재이다. 압연 가공 전 시편을 길이 100 mm × 폭 40 mm × 두께 4 mm 크기로 절단한 후 823 K 에서 3 시간 동안 균질화 열처리 후 공냉하여 잔류응력이 완화된 평균 결정립 크기가 약 35 μm 인 균일한 등축 미세조직을 얻었다. 압연 롤의 직경은 220 mm 이며, 하부 롤의

회전속도는 5 rpm, 패스당 압하율(height reduction)은 30 %로 고정시켰다. 본 연구에서는 다양한 압연 가공변수의 영향을 살펴보기 위해 3 가지 다른 실험을 설계하였으며 관련 내용은 Table 1 에 제시하였다. 우선, P1 은 롤 이속 효과를 살펴보기 위해 상부 롤 속도를 5 및 20 rpm 으로 제어하여 속도비(하부롤 속도: 상부롤 속도) 1:1 과 1:4 로 4 회 가공하였다. 이 후, P2 는 회전 방향 영향을 살펴보기 위해 Fig. 1 에서처럼 시편 무회전(NR) 경우를 비교조건으로 설정한 후, 폭 방향에 따라 180°회전(RT), 압연 방향에 따라 180°회전(RR)하여 가공하였다. 이외에도 시편의 두께 방향으로 회전하는 경우(rotation along normal axis, RN)는 시편의 상하부에 균일 변형량 부과가 기계적으로 난이하기 때문에 본 실험에서는 제외하였다. 마지막으로, P3 는 짝수 번째 가공에서 RR 하며 총 4

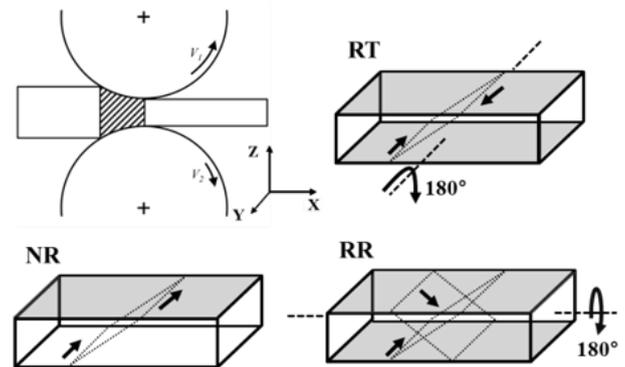


Fig. 1 Schematic illustration of DSR and deformation route: no rotation (NR), rotation along transverse axis (RT), and rotation along rolling axis (RR)

회 가공함으로써 변형량에 따른 조직 발달 형태를 살펴보았다. 투과전자현미경(transmission electron microscope, TEM) 관찰을 위해서 시편을 기계적 연마 후 에칭액(20 % 과염소산 + 80 % 메탄올)에 전해연마 가공하였고, 이를 투과전자현미경(Philips TECNAI G2F20)을 사용하여 300 kV 가속전압으로 관찰하였다. 또한 가공된 시편의 미세조직 결정 방위 분석을 위해서 후방산란전자회절(electron backscatter diffraction, EBSD)분석을 하였다. 기계 연마 후 동일한 에칭 용액을 이용해 10 초 동안 전해연마하고 주사전자현미경(HITACHI S-4300)을 통해 Y 면(혹은 RD-ND 면) 중심부에서 0.1 μm step size 로 스캔 후, 신뢰 지수(confidence index, CI)가 0.1 이상 조건에서 분석하였다.

Table 1 Details of different DSR processing parameters used in this study

	Roll speed ratio	Reduction per pass	Number of passes	Total reduction	Specimen rotation
P1	1:1, 1:4	30 %	4	75 %	NR
P2	1:4	30 %	4	75 %	180° NR, RT, RR per every passes
P3	1:4	30 %	1, 3, 4	30 %, 66%, 75%	180° RR per even passes

가공된 소재에 대해 비커스 경도(Vickers hardness) 시험은 Y 면에 100 g 하중과 10 초 유지시간 조건에서 위치당 5 회 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 롤 이속 영향

Hamad 등[7]의 최근 연구결과에 따르면 알루미늄 합금을 이속비 1:4 (하부를 속도:상부를 속도) 조건 하에서 이속 압연을 수행할 경우 시편의 기계적 안정성(plastic instability)이 확보됨과 동시에 최대 유효 변형량을 부과할 수 있어 미세한 조직을 균일하게 제어할 수 있다고 보고하였다. 이에 본 연구에서는 속도비가 1:1인 등속 압연(equal speed rolling, ESR)과 1:4인 이속 압연가공을 수행하였으며, 각 시편 X, Y, Z 면 광학 현미경 관찰 결과를 3 차원으로 Fig. 2와 같이 나타내었다. 이속비와 관계없이 Z 면에서 다소 조대한 결정립이 일부 존재하였다. 한편 등속 압연된 X 면에서는 연신된 라멜라(lamella)구조가 관찰된 반면 이속 압연의 경우 전단에 의한 극심한 변형으로 입계 구분이 명확하지 않았다. 통상적으로 압연 변형 형태가 잘 관찰되는 Y 면의 경우 이속 압연을 수행할 경우 형성된 라멜라 간격은 등속 압연 조직보다 그 간격이 상대적으로 좁았다[8]. 롤 이속에 따

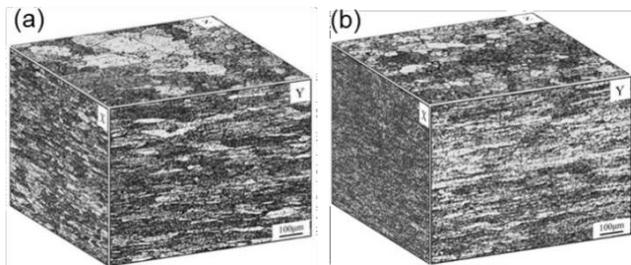


Fig. 2 Optical images of AA6061 sheet sample after (a) ESR with 1:1 and (b) DSR with 1:4 for speed ratio

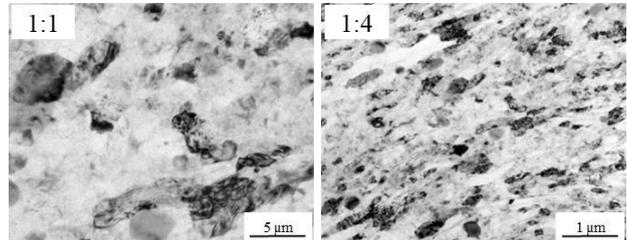


Fig. 3 TEM images of AA6061 sheet sample after (a) ESR with 1:1 and (b) DSR with 1:4 for speed ratio

른 미세한 결정립 크기의 차이를 확인하기 위해 Fig. 3과 같이 Y 면 중앙부에 대해 투과전자현미경 관찰을 실시하였다. 등속 압연은 미세한 라멜라 구조와 등속 결정립이 혼재되어 있고 결정립 크기가 약 3~5 μm인 반면 이속 압연은 미세조직 변화에 대한 효율이 높은 전단변형 효과로 인해 라멜라 밴드 구조보다는 약 1 μm 이하 크기의 초미세 결정립이 뚜렷하게 관찰되었다.

Y 면에 대한 미세 비커스 경도 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 평균 경도값은 이속 압연가공된 시편이 등속 압연 가공된 시편보다 높았으며, 이속 압연의 경우 전단변형이 시편 전체적으로 발생하기 때문에 미세 경도값의 분포 역시 상대적으로 균일하였다. 이와 같은 경도 경향성은 기계적 변형 거동은 다소 상이하지만 Tsai 등[9]의 4 회 ECAP 및 Horita 등[10]의 5 회 HPT 결과와 유사하였다. 다만, 기존 강소성 가공의 경우 시편의 형태 혹은 크기

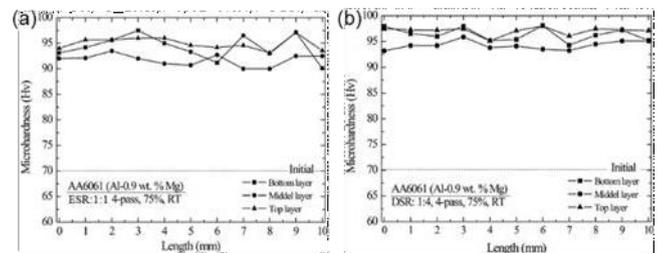


Fig. 4 Vickers microhardness of AA6061 after (a) ESR with 1:1 and (b) DSR with 1:4 for speed ratio

그리고 공정의 연속성에 있어 제한이 있는데 비해 이속 압연은 관재 가공 및 연속성으로 인해 금속 소재의 미세 결정립 및 기계적 특성을 향상시키는 데 효과적인 방법이라고 할 수 있다.

3.2 회전효과 영향

전단변형 기반 강소성 가공에서는 시편 회전조건에 따라 결정립, 집합조직, 그리고 기계적 물성에 있어 상이하다. 최근, Chang 등[5]의 연구결과에 따르면 동일한 공정변수 조건에서 회전방향에 따라 전단밴드(macro-shear band)가 중첩되거나 혹은 교차되어 기계적 분쇄 혹은 동적 재결정 형성이 달라지기 때문이다. 즉, RR 회전의 경우 NR 조건과 달리 초기 변형에서 형성된 전단밴드와 이후 변형에서 형성된 전단밴드 간 교차 발생으로 인해 급격한 조직 변화가 예측된다. 이러한 현상을 cross-shearing 으로 언급된 바 있다[11].

따라서 패스당 압하량(30%) 및 총 압하량(4 회 가공 시 75%)을 고정 후, 1:4 속도비 조건에서 NR, RT, 그리고 RR 가공하였으며, Y 면 중심부를 채취하여 우선방위 분석을 실시하였다. Fig. 5 에 각 회전 방법에 따라 가공한 시편의 역극점도(inverse pole figure) 결과이다. NR 및 RT 조건에서는 라멜라 형성이 두드러진데 비해 RR 조건에서는 라멜라 구조와 등축 형태의 미세 결정립으로 구성되었다. 이 때문에 기저 조직 내 (i) 결정립 크기 분포, (ii) 결정립 중형비, 그리

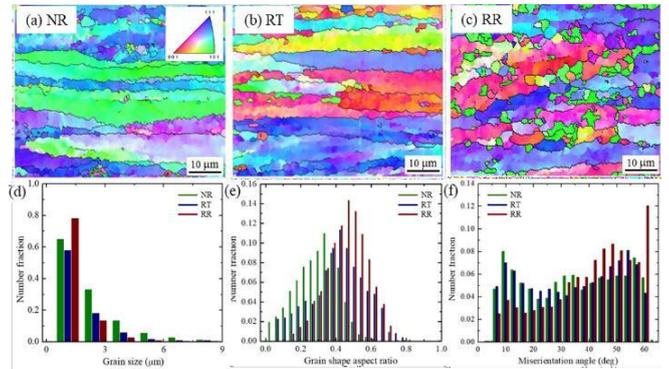


Fig. 5 IPF maps using (a) NR, (b) RT, and (c) RR and analysis results of (d) grain size distribution, (e) aspect ratio, and (f) misorientation angle

고 (iii) 방위에서 큰 차이를 가짐을 확인하였다. RR 조건의 경우 1 μm 내외 미세 결정립 및 중형비가 1에 유사한 등축정 결과를 나타내고 있다. 또한, 통상적으로 15° 이상 방위차를 보이는 입계를 고경각 결정립계로 정의하는데 이의 분율이 가장 높았다. Fig. 6 은 방위분포함수(orientation distribution function, ODF)분석 결과이다. Fig. 6(a)에서 면심입방격자 구조를 갖는 소재의 대표적인 집합조직 요소들과 세 가지 회전 조건에 따라 가공된 시편에 대한 ϕ_1 , ϕ_2 는 0 ~ 90°, 그리고 $\phi_2 = 45, 65^\circ$ 영역의 방위분포함수를 나타냈다. NR 및 RT 조건과 달리 RR 의 경우 세 가지 다른 점이 관찰되었다. (i) 재결정 집합조직인 Goss 와 P 에서 15° 내외 회전한 성분의 생성, (ii) 상

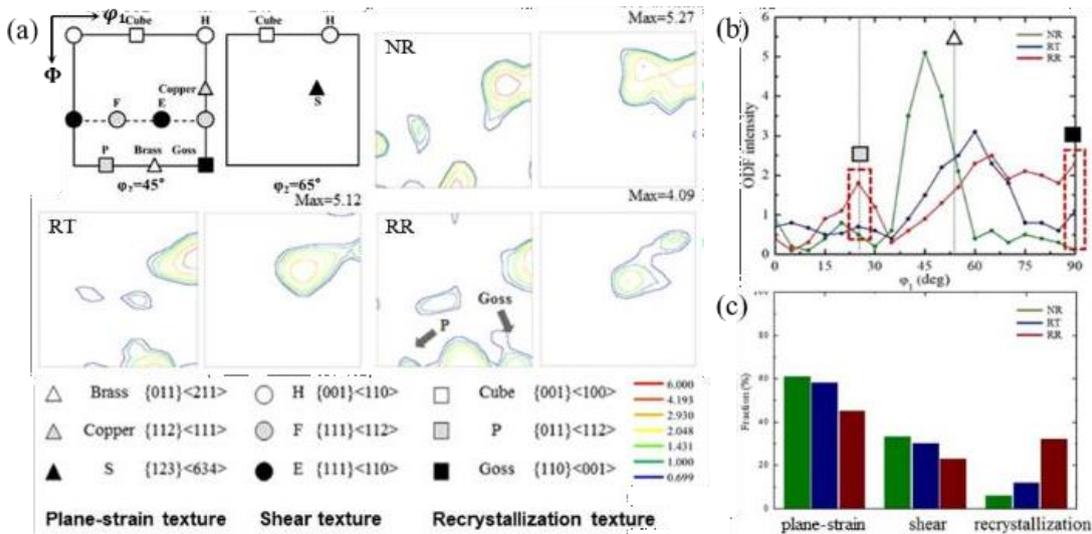


Fig. 6 ODF images of (a) the general texture components of face-centered cubic metals and the constituent texture components by means of NR, RT, and RR together with peak intensity. (b) Distribution of ODF intensity values and (c) relative fractions of texture components such as plane strain, shear, and recrystallization

대적으로 낮은 ODF 강도값(NR / RT / RR=5.27 / 5.12 / 4.09) 과 (iii) 평면변형, 전단 및 재결정 집합조직을 갖는 결정립 분율을 분석을 통해 다른 회전 조건에 비해 상대적인 재결정 집합조직 강화가 관찰되었다. 이러한 결과로 인해 RR 조건의 경우 미세 결정립의 효율적인 형성은 재결정 집합조직의 발달과 상관성이 있다고 판단된다. 이에 대한 상세한 연구(정적 재결정 및 동적 재결정 영향)는 후속 연구에서 추진하고자 한다.

3.3 가공횟수 영향

본 절에서는 미세조직 발달이 우수한 RR 조건에 대해 가공횟수에 따라 조직 발달 형태를 살펴보고자 1, 3, 4 회 가공한 시편을 분석을 하였다. Fig. 7 에서 가공횟수 별 역극점도와 결정립계 분석결과를 나타냈다. 1 회 가공 시에 폭이 약 4 μm 되는 라멜라 간격이 3 회 가공 시에 더욱 감소하였다. 반면에 4 회 가공 시에 라멜라 구조는 거의 사라지고 1 μm 이하 크기의 초미세 결정립이 뚜렷하게 관찰되었다. 결정립계 분석결과는 1 회 가공 시 고경각 결정립계의 라멜라 구조 내부에 저경각 결정립계가 관찰되고, 3 회 가공 시에 가공량의 증가로 인해 전위와 같은 결함이 증가하게 되며 따라서 저경각 결정립계가 더욱 뚜렷하게 관찰되는 반면에 일부 크기가 작은 등축의 고경각 결정립들이 라멜라 구조 입체 주변에 형성되며 국부적 조직 불균일이 나타났다. 하지만 4 회 가공 시에 저경각 결정립계들이 상대적으로 감소하였고, 등축의 초미세 고경각 결정립들이 Y 면 중심부에서 균일하게 관찰되었다. 즉, RR 회전 가공 시에 변형량이 증가함에 따라 라멜라 구

조가 등축정의 초미세 결정립 구조로 바뀌었는데, 이러한 조직 발달의 원인은 라멜라 구조가 가공횟수에 따라 변형이 누적되며 라멜라 내부에 저경각의 아결정립이 점차 고경각계로 바뀌기 때문이다 [12]. 또한, RR 회전으로 인해 이전 가공에서 형성된 거시적 전단밴드를 교차하게 되므로 효과적인 결정립 미세화가 발생하였다.

Y 면에 대해 기계적 물성을 확인하고자 미세 비커스 경도 맵핑 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 1 회 가공 시 회전속도가 빠른 상부롤과 접촉하는 시편의 표면이 상대적으로 느린 하부롤과 접촉하는 표면 보다 경도가 높았고 따라서 Y 면에서 경도의 균일성이 가장 떨어졌으며, 평균 경도는 86 Hv 였다. 3 회 가공 시에 평균 경도는 97 Hv 로 향상했고, 경도의 균일성이 보다 향상되었다. 4 회 가공 시에 평균 경도가 101 Hv 로 가장 높았고, 또한 Y 면에서 경도가 가장 균일한 것을 확인하였다. 이러한 4 회 가공 시 시편의 균일성 향상은 Fig. 1 의 RR 모식도에서처럼 회전을 통해 이전 패스에 가해진 전단을 가로지르며 역방향 전단을 부여할 수 있는 거시적 교차 전단변형이 누적되며 효과적인 라멜라 구조의 분절과 동적 재결정이 시편 전체에 걸쳐 더욱 균일하게 이루어졌기 때문이라고 판단된다.

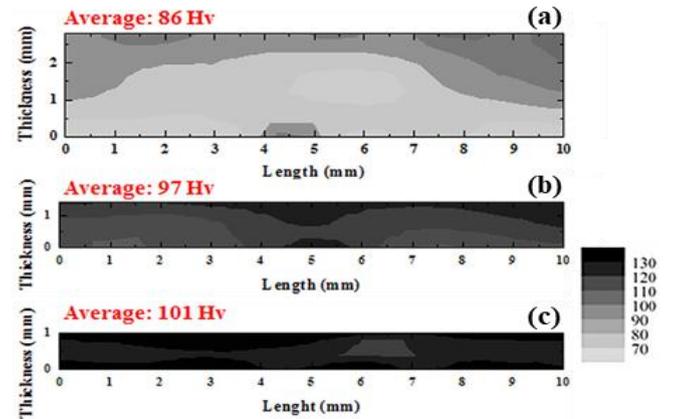


Fig. 8 Microhardness contour maps on RD-ND plane deformed by (a) 1-, (b) 3-, and (c) 4-pass

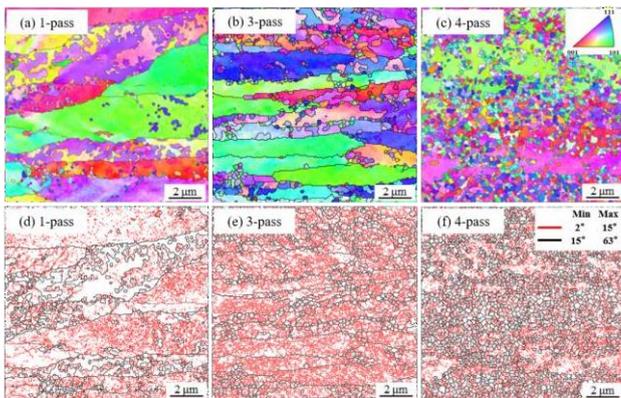


Fig. 7 IPF maps of the deformed samples via (a) 1-, (b) 3-, and (c) 4-pass and grain boundary maps of (d) 1-, (e) 3-, and (f) 4-pass

4. 결론

본 연구에서는 6061 알루미늄 합금의 미세조직 발달에 미치는 이속 압연변수 영향에 대해 살펴보았다. 롤 이속 영향을 연구하고자 이속비 1:4 에서 각 패스당 30 % 압하로 총 4 회 가공하여 75 % 변형한

결과 전단으로 라멜라 구조가 분절되며 등속 압연보다 더욱 미세한 결정립을 형성하였고, 경도가 향상되었다. 다음으로 시편 회전효과 영향을 연구하고자 동등한 공정 변수조건에서 NR, RT, RR 회전 방향을 변수로 하여 연구한 결과 RR 시편에서 1 μm 이하 초미세 결정립 형성에 의해 종횡비는 1에 유사하며 고경각 결정립계 분율은 증가하였다. 또한, QK 방위분석 결과 Goss 및 P에서 15° 내외로 회전한 재결정 집합조직이 두드러졌다. 이러한 RR의 미세조직 발달 형태를 살펴보고자 1, 3, 4회 가공한 시편을 분석하였고, 거시적 교차 전단변형이 가해지는 4회 가공 시편에서 라멜라 구조의 붕괴와 동적 재결정 발달이 시편 Y면 전체에 균일하게 관찰되며, 비커스 경도 또한 가장 높고 균일한 결과를 보여줬다.

후 기

이 연구는 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(P0002019, 2021년 산업혁신인재성장지원사업) 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2019R1FA1062702).

REFERENCES

- [1] R. Z. Valiev, A. V. Korznikov, R. R. Mulyukov, 1993, Structure and Properties of Ultrafine-Grained Materials Produced by Severe Plastic Deformation, *Mater. Sci. Eng. A*. Vol. 168, No. 2, pp. 141~148. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(93\)90717-S](https://doi.org/10.1016/0921-5093(93)90717-S)
- [2] H. Watanabe, T. Mukai, K. Ishikawa, 2007, Effect of Temperature of Differential Speed Rolling on Room Temperature Mechanical Properties and Texture in an AZ31 Magnesium Alloy, *J Mater Process Technol* Vol. 182, No. 1~3, pp. 644~647. <https://doi.org/10.1016/j.jm atprotec.2006.08.010>
- [3] W. Polkowski, 2016, Differential Speed Rolling: A New Method for a Fabrication of Metallic Sheets with Enhanced Mechanical Properties, *Progress in Metallic Alloys*. <https://doi.org/10.5772/64418>
- [4] W. Polkowski, P. Jozwik, Z. Bojar, 2015, Electron Backscatter Diffraction Study on Microstructure, Texture, and Strain Evolution in Armco Iron Severely Deformed by the Differential Speed Rolling Method, *Metall. Mater. Trans. A*. Vol. 46, No. 5, pp. 2216~2226. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-2760-4>
- [5] L. L. Chang, S. B. Kang, J. Cho, 2013, Influence of Strain Path on the Microstructure Evolution and Mechanical Properties in AM31 Magnesium Alloy Sheets Processed by Differential Speed Rolling, *Mater. Des.* Vol. 44, pp. 144~148. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.052>
- [6] H. G. Jeong, Y. G. Jeong, W. J. Kim, 2009, Microstructure and Superplasticity of AZ31 Sheet Fabricated by Differential Speed Rolling, *J. Alloys Compd.* Vol. 483, No. 1~2, pp. 279~282. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.08.130>
- [7] K. Hamad, J. H. Park, Y. G. Ko, 2015, Finite Element Analysis of Deformation Behavior in Al-2.2 wt.%Mg Alloy Subjected to Differential Speed Rolling, *J. Mater. Eng. Perform.* Vol. 24, No. 8, pp. 2990~3001. <https://doi.org/10.1007/s11665-015-1598-7>
- [8] J. K. Lee, D. N. Lee, 2008, Texture Control and Grain Refinement of AA1050 Al Alloy Sheets by Asymmetric Rolling, *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 50, No. 5, pp. 869~887. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2007.09.008>
- [9] T. L. Tsai, P. L. Sun, P. W. Kao, C. P. Chang, 2003, Microstructure and Tensile Properties of a Commercial 5052 Aluminum Alloy Processed by Equal Channel Angular Extrusion, *Mater. Sci. Eng. A*. Vol. 342, No. 1~2, pp. 144~151. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00283-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00283-6)
- [10] Z. Horita, T. G. Langdon, 2005, Microstructures and Microhardness of an Aluminum Alloy and Pure Copper After Processing by High-Pressure Torsion, *Mater. Sci. Eng. A*. Vol. 410~411, No. 25, pp. 422~425. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.133>
- [11] K. Hamad, Y. G. Ko, 2016, A Cross-Shear Deformation for Optimizing the Strength and Ductility of AZ31 Magnesium Alloys, *Sci. Rep.* Vol. 6, pp. 29954. <https://doi.org/10.1038/srep29954>
- [12] L. D. Larasati, 2021, Microstructure Evolution and Thermal Stability of AZ31 Alloy Deformed by Multi-Pass DSR, *Metallogr. Microstruct. Anal.* Vol. 10, No. 2, pp. 148~157. <https://doi.org/10.1007/s13632-021-00730-0>