

이속 압연된 마그네슘 합금의 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 가공 변수의 영향

양해웅¹ · 고영건[#]

Effects of Processing Conditions on Microstructure and Mechanical Properties of Mg Alloy Deformed by Differential Speed Rolling

H. W. Yang, Y. G. Ko

(Received September 21, 2017 / Revised December 19, 2017 / Accepted December 27, 2017)

Abstract

This paper outlines the research findings on the microstructure and mechanical properties of AZ31 Mg alloy fabricated by differential speed rolling (DSR) with respect to processing variables such as temperature, roll speed ratio (RSR), and deformation route. The resultant microstructure of the sample, deformed by 2-pass DSRs at 473 K, comprised finer grains with more uniform distribution than those at 573 and 623 K. This was due to active recrystallization, which was expected to appear during DSR at temperatures higher than 573 K. When the sample was deformed via DSR with RSR of 1:4 for the upper and lower rolls at 453 K, the values of yield and ultimate tensile strength were observed to be higher than their counterpart with RSR of 1:1. The application of sample rotation around the longitudinal axis would give rise to an excellent combination of tension strength (~330 MPa) and ductility (~20 %) at ambient temperatures. This is discussed based on its uniform fine grained structure and the softening of basal texture.

Key Words : Differential Speed Rolling, Mg Alloy, Microstructure, Mechanical Properties

1. 서 론

최근 심화되고 있는 이산화탄소 규제와 더불어 수송기기의 연비향상에 대응하기 위해 소재 경량화를 위한 많은 연구들이 수행되고 있다. 특히 경량 소재 중 하나인 마그네슘 합금은 밀도가 1.74g/cm³로 철의 약 1/4, 알루미늄의 약 2/3 정도로 구조용 소재 중 가장 낮은 밀도를 가지며, 또한 전자파 차폐성, 진동 감쇠능, 우수한 비강도 및 기계가공성 등 다양한 장점을 가지기 때문에 자동차, 우주항공 및 특수방산용 부품으로 각광받고 있다. 하지만 마그네슘은 조밀육방결정구조(hexagonal closed packed structure,

HCP)로 슬립계가 기저면 슬립으로 한정되어 상온에서 소성변형이 어려운 단점[1] 때문에 용융가공인 다이캐스팅 공정을 통해 부품소재를 제조하고 있다. 다이캐스팅 공정은 복잡한 형상의 제품을 대량으로 제조할 수 있으나, 두께가 얇은 판재를 제조하기 어려운 단점이 있다. 최근 기술 선진국에서는 판재 가공용 마그네슘 합금의 제조 기술에 대한 관심이 증대 되고 있으며, 새로운 소성가공의 도입을 통해 두께가 얇고, 우수한 기계적 특성을 갖는 마그네슘 합금 소재를 개발하는 움직임이 보이고 있다. 특히, 금속재료의 소성가공 중 강소성가공(severe plastic deformation, SPD)을 통해 벌크소재에 극심한 변형을

1. 영남대학교 신소재공학부

Corresponding Author: School of Materials Science and Engineering, Yeungnam University, E-mail: younggun@ynu.ac.kr

부과하여 초미세결정립 제어를 통하여 기계적 특성을 증가시키기 위한 연구[2]가 활발히 이루어지고 있으며, 그 방법으로는 등통로각압축공정(equal channel angular pressing, ECAP)[3, 4], 고압비틀림공정(high pressure torsion, HPT)[5, 6], 누적압연접합공정(accumulative roll-bonding, ARB)[7] 등이 있다. 하지만 강소성가공은 초미세 결정립을 얻기 위해 많은 가공 횟수가 필요로 하며, 소재 크기의 제한과 판재 가공 부적합하며, 불연속 공정으로 인한 산업적 적용에 어려움이 있다. 본 연구에서는 강소성가공의 단점을 극복하기 위해 종래 소성가공의 연속성과 초미세 결정립으로부터 기계적 물성을 향상시킬 수 있는 전단가공의 장점을 결합한 이속압연(differential speed rolling, DSR)을 도입하였다.

본 연구에서 적용하고자 하는 이속압연은 상·하부 롤 속도를 다르게 제어하여 소재의 전반에 전단변형을 유도함으로써 우수한 기계적 물성을 갖는다. 이속압연은 대칭압연(symmetrical rolling)에 대해 상대적인 개념인 비대칭 압연(asymmetrical rolling) 기술 중 하나이다. 이러한 비대칭 압연을 통해 합금원소의 첨가 없이 단순한 조성에서도 넓은 범위의 기계적 성질을 갖는 소재를 제조할 수 있다. 특히, 이속비가 증가할수록 전단변형 효과가 극대화되며, 소재 내부까지 전단변형을 도입시켜 균일한 전단 우선방위를 발달시킬 수 있어 초미세 결정립 제어에 효과적이다. 또한 이속압연을 통해 제조된 마그네슘 판재의 품질은 가공변수에 따라 기계적 물성의 차이를 보이게 된다. 따라서 본 연구에서는 이속압연된 마그네슘 합금의 미세조직과 기계적 물성에 미치는 가공변수의 영향과 상호관계를 연구하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용된 소재는 중량비 기준 Mg-2.89Al-0.96Zn-0.31Mn-0.15Fe-0.12Si의 화학조성을 갖는 AZ31 마그네슘 합금이다. AZ31 합금은 673K에서 24시간 동안 균질화처리 후 공냉 하였다. 균질화 처리 후 평균 결정립 크기 $\sim 35\mu\text{m}$ 의 미세조직을 얻었다. 상·하부롤의 직경은 220mm로 동일하며, 소재 내부에 전단변형을 부과하기 위해 하부롤은 $\sim 5\text{m/min}$ 으로 고정하고 상부롤의 속도를 5, 15, 그리고 20m/min로 변화시켰다. 각 패스당 30%의 압하율로

초기시편의 50%인 두께 2mm, 75%인 두께 1mm까지 압연하였다. 이속압연 후 미세조직을 관찰하기 위해서 RD-ND 방향으로 시편을 절단하였으며, 절단한 시편에 대해 기계적연마 후 에칭용액(5g picric acid + 10 ml acetic acid + 10ml H₂O + 90 ml methanol)을 이용하여 에칭하였다. 이를 광학현미경을 통해 미세조직을 관찰하였으며, 집합조직 관찰을 위해 후방산란전자회절분석(electron backscatter diffraction, EBSD)은 기계적 연마 후 2% nitric acid를 이용하여 에칭 후 주사전자현미경(HITACHI S-4300 FESEM)을 통해 관찰하였으며, TSL OIM 6.1.3 소프트웨어를 통해 해석하였다. 이속압연된 AZ31 판재 소재에 대해 인장시험기(BESTUTM-100MD)를 이용하여 인장 실험을 수행하였으며, 인장시편은 표점길이 25mm, 폭이 6mm인 ASTM E8 규격으로 가공하여 준비하였다. 인장시험은 상온에서 10^{-3}s^{-1} 의 크로스헤드 속도로 수행하였으며, 정확한 측정을 위해 extensometer를 이용하여 인장방향으로 표점거리변화를 실측하였다.

3. 실험 결과

3.1 가공온도 영향

이속압연 전 시편 예열온도의 영향에 따른 미세조직 및 기계적 물성의 변화를 규명하기 위해 균질화처리된 시편을 각각 473, 523, 573, 그리고 623K에서 30분간 예열 후 압연을 수행하였다. 각 온도별 시편을 35% 압하율로 압연하였으며, 시편은 무회전 가공하였다. 하부롤은 5m/min으로 고정하고 상부롤은 15m/min인 DSR 시편으로 1:3의 이속비로 제조하였다. 또한 비교재로 473 K에서 10분간 예열 후, 상·하부롤 속도 5m/min의 동일한 이속비로 ESR 시편을 준비하였다.

Fig. 1에는 473, 523, 573, 그리고 623K에서 예열 후 1패스 이속압연한 시편의 RD-ND 면의 미세조직을 나타내었다. Fig. 1(a)는 473K에서 10분간 예열 후 압연한 시편이다. 쌍정이 많이 관찰되며, 재결정 결정립의 확대가 관찰되고 있다. 소성변형과 동적재결정을 수용하기 위한 변형쌍정(deformation twin)이 관찰되었다. 변형쌍정은 부족한 슬립계로 인해 소성변형을 수용하기 위해 발생되었다고 보여진다.

473K에서 DSR 가공은 전단변형을 통해 동적재결정(dynamic recrystallized, DRX)발생을 유도하여 균일

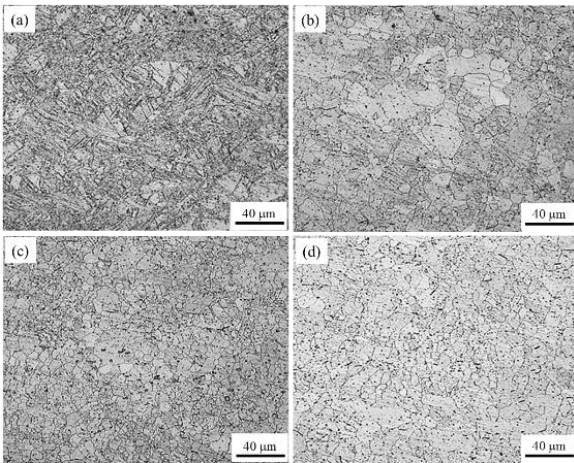


Fig. 1 Microstructural evolution of AZ31 Mg alloy samples deformed by 1-pass DSR at (a) 473 K, (b) 523 K, (c) 573 K, and (d) 623 K

한 미세조직이 나타난다. Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 523K에서 DSR 1패스 후 결정립의 크기가 473K에 비해 쌍정의 대부분이 사라졌으며 결정립 크기가 증가하였다. 게다가 473K, 1패스 DSR 시편과 비교하였을 때 재결정 결정립이 더 커짐을 확인할 수 있다. 523K 시편은 473K 시편의 결정립보다 높은 종횡비를 갖는 등축방 결정립 형태를 보이며 압하율 35%의 높은 변형량과 밀접한 관계를 가진다. 위와 같은 결과를 바탕으로 동적재결정변형기구가 제시될 수 있음을 보여준다. H. Watanabe 등[8]의 연구에 따르면 473K에서 523K로 온도를 증가시키면서 이속압연을 할 경우 미세조직의 큰 변화가 없다고 보고하였으나, 이는 1:1.1의 낮은 상·하률의 이속비와 ~15%의 낮은 압하율 때문으로 보여진다. Fig. 1(c)는 573K 이후에서 1패스 DSR 하였을 때의 미세조직이며, 등축방의 미세 결정립과 조대 결정립이 혼재하여 있다. Fig. 1(d)와 같이 623K에서는 완전 재결정 등축방 결정립으로 구성되었으며, 가공온도가 증가됨에 따라 결정립의 크기가 더욱 증가하게 된다. 이는 623K에서는 예열과 함께 변형 시 발생한 열로 인해 비-저면(non-basal) 슬립 시스템이 쉽게 활성화되어 결정립과 결정립 내부에 높은 변형이 축적이 가능하며, 동적재결정 구동력을 제공함으로써 완전 재결정화된 균일한 결정립 성장에 기인한 것으로 보여진다.

Fig. 2은 473, 523, 573, 그리고 623K에서 예열 후 1패스 DSR가공 시편과 비교재로서 473K에서 예열

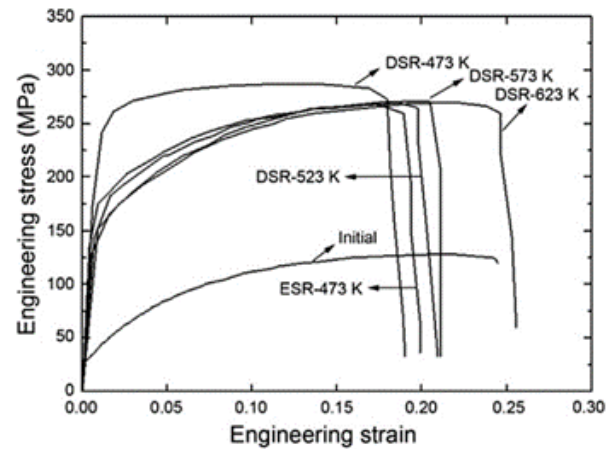


Fig. 2 Stress-strain curves of AZ31 Mg alloy samples deformed by 1-pass DSR at four temperatures

한 ESR 가공 한 AZ31 시편의 응력-변형을 곡선이다. 가공 전 초기 시편의 항복강도, 최대인장강도, 그리고 연신율은 각각 ~35MPa, ~125MPa, 그리고 연신율은 25 %이다. 473K에서 DSR 후 항복강도와 최대인장강도는 각각 ~241MPa, ~286MPa이다. ESR 보다 DSR이 더 높은 항복강도와 최대인장강도를 보이며 변형 후 미세조직의 변화와도 일치하는 결과를 보여준다. 또한 ESR과 DSR 변형후 시편은 초기 시편보다 낮은 연신율을 보인다. 573K로 온도를 증가함에 따라 강도는 감소하는 것을 알 수 있는데, 이를 통해 573K 이상의 온도에서 높은 가공온도로 인한 결정립 성장과 불균일 변형으로 인해 연성은 증가하나, 강도는 감소하는 경향을 보인다. 이는 Kim [9] 등의 연구결과와도 일치한다. 하지만 623K에서는 DSR 가공 후 연신율의 큰 감소 없이 최대인장강도 ~265MPa의 높은 값을 가짐을 확인할 수 있다. 이를 통해 강도는 항상 결정립 크기 변화와 연관성이 없으며, Chang 등[10]의 결과와 부합한다.

3.2 이속비 영향

이속압연 시 상·하부 롤 속도비에 따른 차이를 규명하기 위해 두 종류의 시편을 준비하였다. 두 시편은 453K 에서 각 패스당 30%의 압하율로 초기 시편의 50%인 두께 2mm로 압연하였으며 패스마다 시편을 압연방향에 따라 180° 회전하였다. 하부롤은 5m/min으로 고정하고 상부롤은 5m/min인 ESR 시편과 상부롤이 15m/min인 DSR 시편으로 제조하였다.

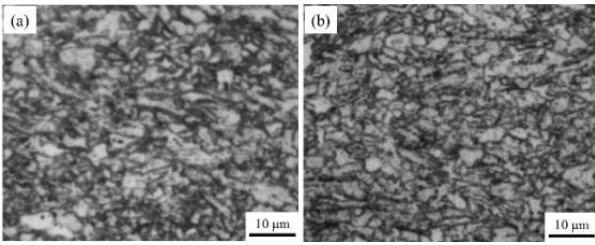


Fig. 3 Microstructural evolution of AZ31 Mg alloy samples deformed by (a) 2-pass ESR and (b) 2-pass DSR

1패스 후 ESR, DSR시편의 결정립 크기는 각각 ~14, ~6.7 μm 였다. 이는 DSR이 ESR보다 더 많은 소성변형이 부과되므로 결정립 미세화에 더 효과적임을 보고한 Lee 등[11]의 연구결과와 부합하였다. ESR과 DSR 2패스 후 미세조직을 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3(a)는 ESR 2패스한 AZ31 시편이며, 그림3(b)는 DSR 2패스한 AZ31 시편의 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 사진이다. 각각 평균 결정립 크기는 ~4.3, ~3.3 μm 로 관찰되었다. 특히 DSR 2패스의 경우 ESR 결정립 보다 등축의 형태를 보이며, 연신된 결정립의 분율 또한 적음을 보였다. 미세결정립과 등축의 결정립이 DSR에서 더 많이 관찰되는 것은 1패스 후 시편을 압연방향에 따라 180° 회전을 전단 변형을 교차로 부과하게 되어 2패스 후 결정립이 연신 되는 것을 억제하였다고 판단되며, 이는 최근 연구결과와 일치한다[12].

Fig. 4는 상·하부 롤 속도비의 변화에 따른 AZ31 시편의 응력-변형률 곡선을 보여주고 있다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 압연의 가공 횟수가 1패스에서 2패스로 증가함에 따라 ESR과 DSR은 공통적으로 기계적 물성이 향상하였으며, 특히 2패스 후 비교재인 ESR 압연재와 비교하여 DSR에 의해 변형된 시편의 항복강도(YS)와 최대인장강도(UTS)는 각각 198 MPa, 228 MPa로 높은 값을 나타내었다. 일반적으로 강소성가공법을 통해 제조된 소재는 강도를 증가시킬 경우 등가교환(trade-off)에 따라 필연적으로 연신율이 감소한다고 알려져 있다[9]. 하지만 본 연구에서 DSR 2패스 후 연신율은 ~7.1%로 ESR 2패스 후 연신율 ~4.1%보다 높은 결과를 보여준다. 이는 이속비증가에 따른 결정립 미세화와 함께 다른 미세조직 변수와 연관이 있음을 추론할 수 있다.

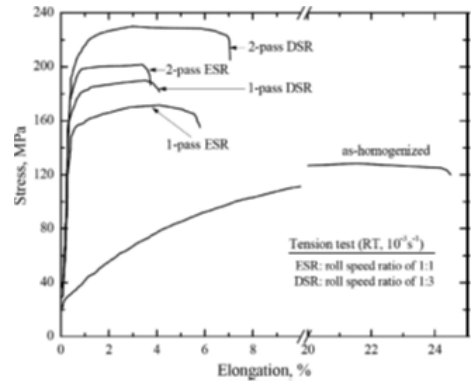


Fig. 4 Stress-strain curves of AZ31 Mg alloy samples deformed by ESR and DSR

3.3 가공경로 영향

이속압연 시 가공경로의 영향에 따른 차이를 규명하기 위해 두 종류의 시편을 준비하였다. 두 시편은 423K에서 각 패스당 30%의 압하율로 초기시편의 50%인 두께 2mm로 압연하였으며, 무회전시편(route A)과, 패스마다 시편을 압연방향에 따라 180° 회전시킨 교차전단 시편(route D)을 준비하였다. 하부롤은 5m/min으로 고정하고 상부롤은 20m/min로 1:4 이속비로 제조하였다.

2패스 압연 후 route A 시편의 평균 결정립 크기는 2 \pm 0.4 μm 였으며, 미세결정립과 함께 연신된 결정립이 함께 존재함을 보였다. 하지만 route D 시편의 평균 결정립 크기는 1.2 \pm 0.1 μm 로 route A 시편보다 작았으며, 등방의 균일한 미세결정립을 가진다. 또한 EBSD를 통해 route D 시편의 경우 고경각 경계(high angle boundaries, HABs)로 둘러싸인 완전 균일한 미세조직을 관찰하였다. 또한 route D 시편은 고경각 결정립 분율과 평균 방위차는 각각 ~64%, 36°로 route A보다 높은 값을 보였다.

Fig. 5는 DSR을 통한 route A, route D의 방위분포함수(orientation distribution function, ODF)와 (0001) 역극점도(inverse pole figure)를 나타내었다. ODF에서 보는 바와 같이 교차전단을 통한 집합조직 약화를 볼 수 있으며 대표적인 약화 집합조직은 (0001)[10 $\bar{1}$ 0], (0001)[1 $\bar{1}$ 00], (0001)[0 $\bar{1}$ 10], 그리고 (0001)[1230]이다.

위와 같은 기저면 집합조직 약화를 통해 소성변형에 필요한 더 많은 슬립계가 구동할 수 있다. 따라서 route D의 교차전단이 route A 보다 연성이 증가할 것으로 보여진다.

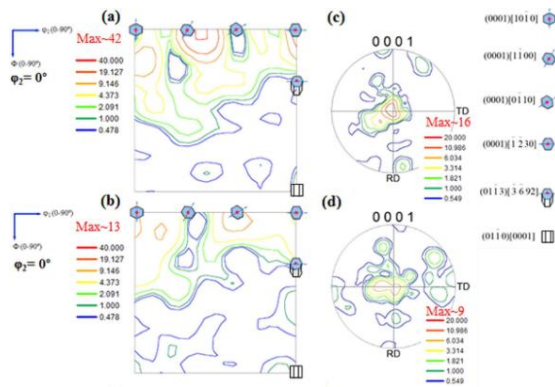


Fig. 5 Orientation distribution functions and (0001) pole figure of AZ31 Mg alloy samples deformed by DSR using (a,c) routes A and (b,d) D

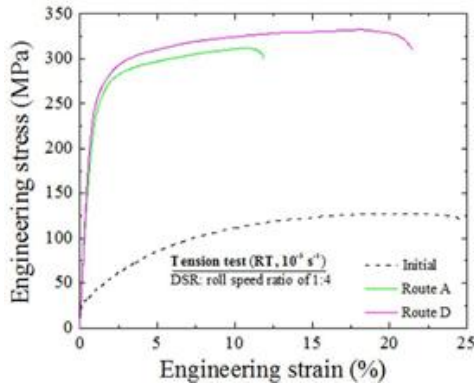


Fig. 6 Stress-strain curves of AZ31 Mg alloy samples deformed by DSR using routes A and D

Fig. 6은 가공경로의 변화에 따른 AZ31 시편의 응력-변형률 곡선을 나타낸다. 가공 전 초기 시편의 항복강도 최대인장강도, 그리고 연신율은 각각 ~35 MPa, ~125MPa, 그리고 연신율은 25%이다. DSR 변형 후 높은 항복강도와 최대인장강도를 얻었으며 이는 Fig. 8의 미세조직 결과와도 일치함을 알 수 있다. 또한 route A의 경우 연신율 ~11%이며, 초기 시편보다 낮은 값을 얻었다. 일반적으로 강소성가공을 통해 결정립 미세화된 금속소재는 연신율의 제약을 받지만 조대결정립으로 구성된 금속 소재는 낮은 강도를 갖지만 연신율이 증가하는 경향이 있다고 알려져 있어 일치함을 보여준다. 하지만 route D의 경우 강도는 route A보다 증가하였으며, 연신율은 ~21%로 초기시편의 연신율인 ~25%비해 약간 감소하였다. 이는 교차전단을 통해 강도와 연신율이 동시에 증가하였음을 확인할 수 있다.

본 연구에서 제안한 바와 같이 시편 축 방향으로 180도 회전한 가공경로를 적용하여 이속압연 가공된 마그네슘 합금의 인장강도가 다른 강소성 가공법에 의해 제조된 마그네슘 합금 결과보다 상대적으로 높았다. 가령, ECAP 가공법을 적용한 Kim 등 [13] 연구결과에 의하면, AZ31 마그네슘 합금의 인장강도는 약 290MPa이었으나 상온 연신율은 약 9% 정도로 본 연구결과에 비해서 낮은 값을 보였다. 또한 Kulyasova 등[14]은 HPT를 적용했음에도 불구하고 기계적 물성값은 상술한 ECAP 결과값과 유사하였다. 이러한 결과는 가장 극심한 가공을 부여하는 HPT의 경우 나노 결정립 제어에도 불구하고 가공시 발열 혹은 미세조직 불균일성 때문에 기계적 물성값이 낮은 것으로 판단된다.

알려진 바와 같이 대부분의 강소성 가공법은 불연속공정의 한계로 인해 산업적 적용이 실질적으로 제한되어 있어 가공의 연속성이 상대적으로 확보된 이속압연 가공법은 산업적 잠재력이 있어 이에 관한 공정-조직-물성에 관련된 심도 깊은 연구결과 도출이 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 이속압연 된 마그네슘 합금 제조 시 가공조건이 미세조직 변화 및 다양한 기계적 물성에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 이를 위해 473, 523, 573, 그리고 623K의 다른 온도를 제어하였으며, 1:1, 1:3의 서로 다른 이속비를 제어하였고, 마지막으로 가공 시 무회전 이속압연과 각 패스마다 시편을 압연방향으로 180° 회전하여 가공경로를 제어하였다. 온도가 573에서 623K로 증가함에 따라 동적재결정을 통해 얻어진 완전 재결정미세조직을 얻을 수 있었으며, 온도가 증가함에 따라 연신율이 증가하게 되는데 이는 예열 시 발생한 열과 변형 시 발생한 열로 인해 슬립계가 쉽게 활성화 됨을 알 수 있었다. 623K, 2패스 DSR 가공 후 ~20%의 최대 연신율을 얻을 수 있었다. 이속비가 1:3에서 결정립의 크기가 감소하였으며, 항복강도, 최대인장강도, 그리고 연신율이 각각 198MPa, 228MPa, ~7.1%로 이속비 1:1에 비해 향상되었음을 알 수 있으며 이는 이속비 증가로 인해 결정립 미세화를 통해 강도로 보여진다. 마지막으로 무회전 전단압연과 교차전단 압연의 비교를 통해 가공경로에 따른 미세조직의

변화와 기계적 물성을 평가하였다. 교차전단이 무회전 이속압연보다 더 많은 핵생성을 통해 변형 중 더 많은 동적재결정 결정립 분율을 보이며, 이를 통해 교차전단이 결정립 미세화에 더욱 유리함을 알 수 있었으며, 교차전단을 통해 마그네슘 합금의 강도와 연신율을 동시에 향상시킬 수 있었다.

후 기

본 연구는 영남대학교 연구년 연구과제 지원을 받아 수행하였기에 감사드립니다(#217A061020).

REFERENCES

- [1] D. H. Park, J. J. Yun, Y. H. Tak, C. W. Lee, 2015, Development of Automotive Dash Panel Parts using Warm Drawing of Magnesium Alloy AZ31B, *Trans. Mater. Process*, Vol. 24, No. 4, pp. 248~255.
- [2] D. J. Lee, Y. Lee, H. K. Kim, Y. N. Kwon, H. S. Kim, E. Y. Yoon, 2016, Analyses of Severe Plastic Deformation Behavior of Hot Isostatic Pressed Ni-base Super alloy during High Pressure Torsion Process, *Trans. Mater. Process*, Vol. 25, No. 4, pp. 254~260.
- [3] R. Z. Valiev, T. G. Langdon, 2006, Principles of Equal-channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement, *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 51, No. 7, pp. 881~981.
- [4] S. Akramov, M. K. Lee, I. Kim, B. H. Park, 2005, Texture and Plastic Strain Ratio of the Severe Shear Deformed with ECAP and heat-treated AA 1050 Aluminum Alloy Sheet, *Trans. Mater. Process*, Vol. 14, No. 6, pp. 553~558.
- [5] J. Straska, M. Janeczek, J. Gubicza, T. Krajnak, E. Y. Yoon, H. S. Kim, 2015, Evolution of Microstructure and Hardness in AZ31 Alloy Processed by High Pressure Torsion. *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 625, No. 11, pp. 98~106.
- [6] Z. Horita, D. J. Smith, M. Furukawa, M. Nemoto, R. Z. Valiev, T. G. Langdon, 1996, An Investigation of Grain Boundaries in Submicrometer-Grained Al-Mg Solid Solution Alloys Using High-Resolution Electron Microscopy, *J. Mater. Res.*, Vol. 11, No. 8, pp. 1880~1890.
- [7] Y. S. Kim, 2005, Thermal Stability and Dry Sliding Wear Behavior of Ultra-Fine Grained 6061 Al Alloy Processed by the Accumulative Roll-Bonding Process, *Trans. Mater. Process*, Vol. 14, No. 1, pp. 71~77.
- [8] 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. Tech.*, Vol. 182, No. 1-3, pp. 644~647.
- [9] S. C. Yoon, C. H. Bok, E. J. Kwak, Y. G. Jeong, T. S. Kim, H. S. Kim, 2008, Effect of Equal Channel Angular Pressing Temperature on the Fracture and Mechanical Properties of Magnesium, *Trans. Mater. Process*, Vol. 17, No. 1, pp. 13~18.
- [10] L. L. Chang, J. H. Cho, S. B. Kang, 2011, Microstructure and Mechanical Properties of AM31 Magnesium Alloys Processed by Differential Speed Rolling, *J. Mater. Process. Tech.*, Vol. 211, No. 9, pp. 1527~1533.
- [11] J. B. Lee, T. J. Konno, H. G. Jeong, 2010, Effect of Differential Speed Rolling on the Anisotropy of Mechanical Properties and Texture Evolution of AZ31 Mg Alloys, *J. Alloy. Compd.*, Vol. 499, No. 2, pp. 273~277.
- [12] Loorentz, Y. G. Ko, 2012, Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Severely Deformed Al Alloy Processed by Differential Speed Rolling, *J. Alloy. Compd.*, Vol. 536, No. S1, pp. S122~S125.
- [13] H. K. Kim, W. J. Kim, 2004, Microstructural Instability and Strength of an AZ31 Mg Alloy after Severe Plastic Deformation, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 385, No. 1-2, pp. 300~308.
- [14] O. B. Kulyasova, R. K. Islamgaliev, Y. H. Zhao, R. Z. Valiev, 2015, Enhancement of the Mechanical Properties of an Mg-Zn-Ca Alloy Using High-Pressure Torsion, *Adv. Eng. Mater.*, Vol. 17, No. 12, pp. 1738~1741.