

{10 $\bar{1}2$ } 쌍정 특성이 AZ31 마그네슘 합금 압연재의 변형거동에 미치는 영향

박성혁¹ · 홍성구² · 이정훈¹ · 이종수[#]

Effect of {10 $\bar{1}2$ } Twinning Characteristics on the Deformation Behavior of Rolled AZ31 Mg Alloy

S. H. Park, S. G. Hong, J. H. Lee, C. S. Lee

(Received August 16, 2010 / Revised September 14, 2010 / Accepted September 28, 2010)

Abstract

The {10 $\bar{1}2$ } twinning characteristics, such as active twin variants, volume fraction of twins with strain, twin morphology, twin texture and angle relationship between twins, were dependent on the activation mode (i.e., tension parallel to the c-axis or compression perpendicular to the c-axis). The selection criterion of active twin variants was governed by the Schmid law. This activation of selected twin variants depending on the activation mode consequently caused a totally different plastic deformation behavior in two activation modes. The differences in the deformation characteristics, such as flow stress and work hardening rate, between both activation modes were explained in relation with activation stresses for slips and twinning, relative activities of twinning and slips during plastic deformation, grain refining effect by twin boundaries (Hall-Petch effect), and twinning-induced change in activities of slips.

Key Words : Magnesium alloy; {10 $\bar{1}2$ } twinning; Twin variants; Twinning activity

1. 서 론

마그네슘은 밀도가 1.74g/cm³로 철강재료의 1/4, 알루미늄의 2/3 정도로 마그네슘 합금은 경량 구조용 소재 중 사용 가능한 가장 밀도가 낮은 금속 소재이면서, 높은 비강도, 뛰어난 기계가공성, 진동흡수능, 전자파 차폐성과 같은 우수한 특성으로 인해 자동차 산업 및 전자부품 산업에 주목을 받고 있는 재료이다[1]. 지금까지 마그네슘 합금의 성형은 다이캐스팅이나 용탕단조법이 주류이나, 이런 방법으로 제조된 부품은 기계적 프로세스를 거친 재료들에 비해 강도, 연신율과 같은 기계적 성질이 매우 취약하거나, 주조결함이 발생할 수

있다[2~4]. 그리하여 최근 마그네슘 합금의 가공재료의 응용에 대한 연구가 매우 활발하다.

마그네슘 가공재는 압연, 압출 등과 같은 공정과정 중에 강한 집합조직이 형성되게 된다. 이러한 집합조직은 방향성을 가지는 쌍정과 결부되어 변형 이방성을 야기하게 된다. 마그네슘의 경우 상온에서 변형 슬립계가 부족하여 쌍정이 변형기구에서 중요한 역할을 한다[5~11]. 마그네슘에는 여러 종류의 쌍정계가 존재하지만 {10 $\bar{1}2$ } 쌍정이 가장 용이하게 발생되고 변형거동에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이러한 {10 $\bar{1}2$ } 쌍정은 두 개의 응력모드에서 발생할 수 있다[12]. 즉, HCP의 c축에 수직인 방향으로의 압축 또는 c축과

1. 포항공과대학교 신소재공학과

2. 한국표준과학연구원

교신저자: 포항공과대학교 신소재공학과

E-mail: cslee@postech.ac.kr

평행한 방향으로의 인장 조건하에서 발생하게 된다. 이와 같이 마그네슘 가공재의 변형거동과 이 방향에 큰 영향을 미치는 {10 $\bar{1}$ 2} 쌍정에 대해 최근 활발한 연구가 이루어지고 있으나, c축 수직방향 압축에 의해 발생된 {10 $\bar{1}$ 2} 쌍정에 대하여 집중되어 있어, 응력모드에 따른 쌍정의 특성과 이에 따른 변형거동에 대한 연구가 미미한 실정이다.

본 연구에서는 c축 수직방향으로의 압축과 c축 평행방향으로의 인장을 통해 {10 $\bar{1}$ 2} 쌍정을 야기시키는 응력모드가 변형거동에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 소재는 3.6wt%Al-1.0wt%Zn-0.5wt%Mn의 조성을 가진 AZ31 Mg합금을 최종 두께 50mm로 압연한 판재이다. 이 재료에 대하여 400°C에서 6시간 동안 균질화 열처리를 수행하였다. 초기 결정립 크기는 대략 30 μ m 정도였다.

이러한 Mg 합금의 응력모드에 따른 변형거동 특성을 알아보기 위해 압연 방향과 평행한 방향이 하중 중심 축이 되는 시편(이후 통칭 RD시편)과 압연 방향에 수직인 방향인 Normal direction이 중심 축이 되는 시편(이후 통칭 ND시편)의 두 가지 방향으로 gage length 10mm, diameter 5mm의 봉상 시편을 채취하였으며, 이렇게 가공된 시편을 INSTON 8801 유압식 시험기를 이용하여 상온에서 0.005의 변형률로 인장 및 압축 실험을 하였다. c축 수직방향 압축 모드를 야기시키기 위해 RD시편을 압축하였으며, c축 평행방향 인장모드를 야기하기 위해 ND시편을 인장하였다.

그리고 초기 시편의 집합조직 분석을 위해 2400번 abrasive paper까지 연마한 시편의 표면에 X-ray diffraction을 통해 {0002}, {10 $\bar{1}$ 0}, {10 $\bar{1}$ 1}의 세 방향에서 극점도(pole-figure)를 관찰하였다. 극점도 관찰에는 RICA KU-DMAX X-ray diffractometer를 사용하였으며, 압연 면의 수직방향(ND방향)에서 X-선을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 초기 집합조직

다음의 Fig. 1은 X-선 회절 실험을 통해 얻어낸 AZ31 마그네슘 합금 압연재의 초기 집합 조직을 나타내는 극점도이다. 이 그림은 XRD 실험으로

모여진 X선 강도 data를 집합조직 해석 프로그램 Textool을 이용하여 분석한 것이다. Fig. 1(a)은 재계산된 (0002) 극점도를 나타낸 것으로서 ND방향으로 기저면의 극강도 값이 약 6정도로 강하게 발달하고 있으며, 또한 Fig. 1(b)의 재계산된 (10 $\bar{1}$ 0) 극점도에서도 ND방향에 평행한 모든 면으로 prismatic 면이 발달한 것을 알 수 있다. 이는 본 마그네슘 합금에 hexagonal cell의 기저면 대부분이 압연면과 평행하게 배열된 강한 basal fiber texture가 형성되어 있으며, prismatic pole은 압연면에 대해 균일하게 분포되어 있음을 나타낸다. 이로 인해 본 실험에서 채취한 RD시편의 경우 응력 축이 대부분의 결정립에서 기저면과 수평한 방향을 가지며, ND시편은 응력 축이 기저면에 대한 수직한 방향을 가지고 있음을 알 수 있다.

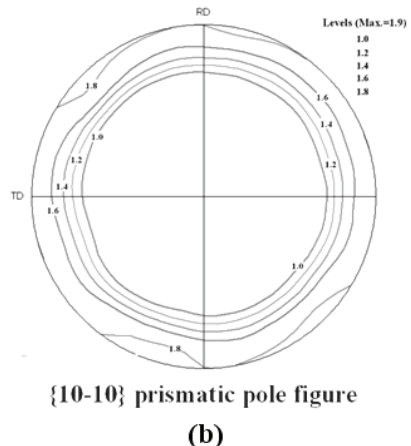
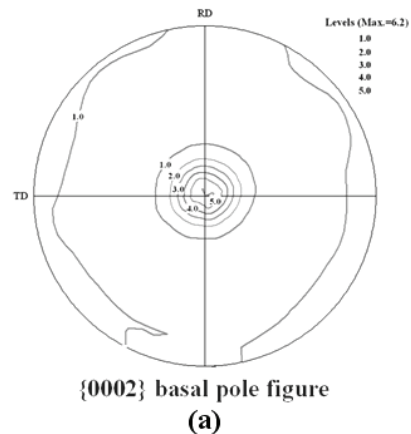


Fig. 1 Pole figures of the rolled AZ31Mg alloy: (a) (0002) and (b) (10 $\bar{1}$ 0) pole figures

3.2 변형 거동

Fig. 2는 위와 같은 집합조직을 가지는 압연 관재에서 채취한 RD와 ND시편에 대해 각각 압축과 인장 유동응력 거동을 절대값으로 나타낸 것이다.

마그네슘 합금과 같이 c/a ratio가 1.732보다 작은 재료의 경우($c/a=1.632$), HCP재료에서 가장 활발하게 나타나는 $\{10\bar{1}2\}$ twin primary system이 기저면에 대하여 가지는 각도관계로 인하여 기저면에 쌍정이 형성되었을 경우 기저면이 수축하는 현상을 보이는 것은 많은 연구자들에 의해 밝혀진 현상이다[12]. 이러한 $\{10\bar{1}2\}$ 쌍정은 마그네슘 합금에서는 c -axis extension twin 이라고 불리는데, 이는 $\{10\bar{1}2\}$ 쌍정면과 기저면이 가지는 각도(43.3°)가 45° 보다 작아 기저면이 수축되는 방향의 응력을 받을 경우, 즉 c -axis가 팽창되는 응력조건하에 $\{10\bar{1}2\}$ 쌍정이 형성되기 때문이다[12].

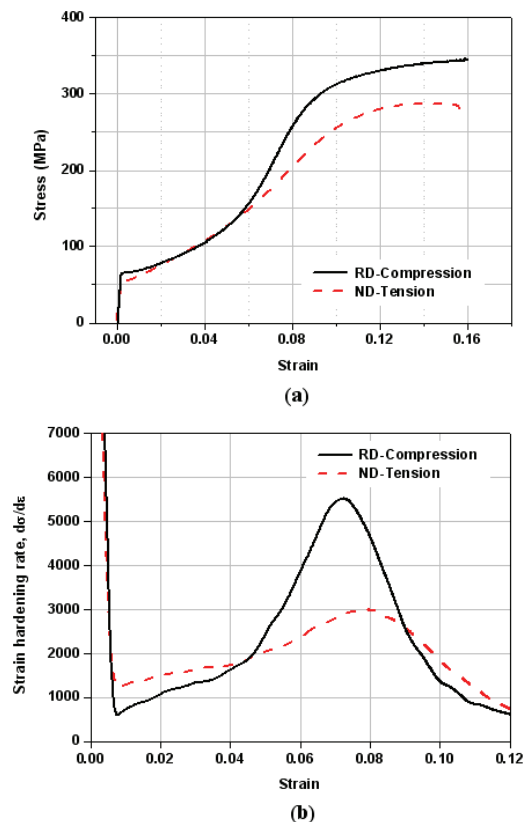
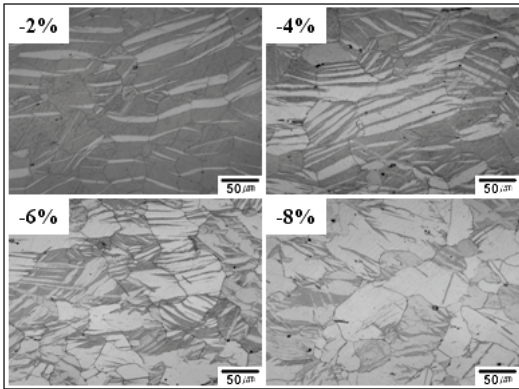


Fig. 2 Deformation characteristics: (a) stress-strain curve and (b) strain hardening rate curve

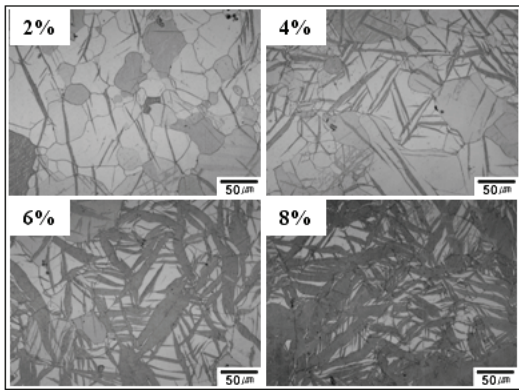
본 압연재는 대부분의 기저면이 압연면과 평행하게 배열되어 있으므로, RD시편 압축시 c 축 수직 방향으로의 압축모드가 되고, ND시편 인장시 c 축 방향으로의 인장모드가 되어 두 조건 모두에서 $\{10\bar{1}2\}$ 쌍정이 야기된다. 이로 인해 Fig. 2(a)와 같이 두 유동곡선 모두 낮은 항복응력을 보이며 변형초기에 낮은 변형 경화율 속도를 보인다. 그러나 Fig. 2(b)와 같이 변형률 증가에 따른 가공경화 속도(strain hardening rate) 거동이 크게 차이가 남을 알 수 있다. RD시편 압축시에는 4% 변형이후 가공경화속도가 크게 증가 후 7% 부근 이후 감소하는 반면, ND시편 인장시에는 8% 부근까지 점차적으로 증가하다가 이후 감소하는 경향을 보인다. 또한, ND시편 인장시 RD시편 압축시 보다 낮은 항복응력과 최대응력을 보인다.

3.3 미세조직 변화

Fig. 3은 변형량에 따른 미세조직 변화를 나타낸 것으로 RD시편 압축의 경우에는 조직상의 밝은 부분이, 그리고 ND시편 인장시에는 어두운 부분이 쌍정밴드(twin band)를 나타낸다. 두 변형조건 모두 변형이 증가함에 따라 쌍정의 분율이 증가하고 있으나, 형성된 쌍정의 분율과 그 형상은 큰 차이를 보인다. RD시편 압축의 경우 Fig. 3(a)와 같이 쌍정밴드들이 전반적으로 한쪽방향을 향하고 있으며 한 결정립에 존재하는 쌍정밴드의 경우 거의 평행하게 생성되어 있다. 이와는 달리 Fig. 3(b)의 ND시편 인장시에는 쌍정이 특정한 방향성 없이 배열되어 서로 교차하고 있으며, 한 결정립 내에서 형성된 쌍정밴드들은 그 교차각이 대략 60° 를 이루고 있다. 이는 응력모드에 따라 작동하는 쌍정 시스템(twin variant)이 달라져서 야기되는 것으로, RD시편 압축시에는 c 축에 대하여 수직 방향으로의 압축인 응력모드가 되어 3쌍의 twin variants와 응력방향이 가지는 Schmid factor(m) 값이 각기 달라지고 이로 인해 3쌍의 twin variant에서 쌍정을 발생하기 위한 응력(twinning stress) 또한 달라지게 된다. 이들 twin variants 중 가장 높은 Schmid factor 값을 가지는 한 쌍의 twin variants만이 작동하게 되어 한 결정립내에서 발생된 쌍정들은 같은 결정학적 방위로 형성되며 모든 결정립에서의 쌍정들은 유사한 방위관계를 가지고 발생하게 되어 Fig. 3(a)와 같이 쌍정들이 방향성을 띄게 된다. 이와 달리 ND시편 인장시에는 c 축 방향으로 인장 모드로 응력이 발생하여 6개의 twin



(a)



(b)

Fig. 3 Optical microstructures with strain along the (a) RD and (b) ND

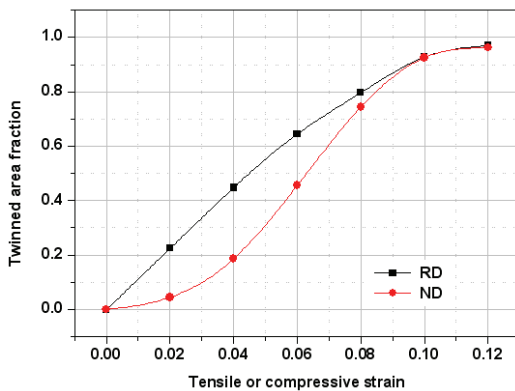


Fig. 4 Twinned area fraction with strain along the RD and ND

variants에 상응하는 Schmid factor 값이 모두 동일하게 되며, 또한 모든 결정립의 c축이 ND방향으

로 평행하고 a축만이 RD-TD plane에서 random하게 배열된 조직이라고 가정하면 한 결정립 내에서 뿐만 아니라 모든 결정립에서 동일한 Schmid factor 값과 twinning stress를 가지게 된다. 이로 인해 6개 twin variants가 모두 동일한 발생 가능성을 가지게 되어 한 결정립 내에서 발생한 쌍정들은 서로 기저극(basal pole)이 60° 관계를 가지며 형성하게 되고 모든 결정립을 고려시에는 쌍정이 발생한 영역의 기저극들이 압연면에 거의 평행한 방향으로 그리고 RD시편 압축시와 달리 RD-TD plane에 대하여 특정 방향성 없이 모든 방향으로 형성된다. 이로 인해 Fig. 3(b)와 같이 쌍정들이 방향성없이 복잡한 형태로 얽힌 모양으로 발생된다 [13].

Fig. 4는 변형량에 따른 쌍정분율 변화를 나타낸 것으로 RD시편 압축시가 ND시편 인장시에 비해 초기에 쌍정 분율이 높으며, 10% 변형시 두 응력 조건 모두 90% 이상의 쌍정이 발생함을 알 수 있다. RD시편 압축의 경우 ND시편 인장에 비하여 낮은 평균 Schmid factor 값을 가지나 (RD: 0.437, ND:0.499)[13] 쌍정이 평행하게 형성되어 폭으로의 성장이 용이하게 되어 변형 초기에 성장이 활발히 이루어져 분율이 높게 나타난다. 하지만 ND시편 인장시에는 다양한 방향으로 형성되는 쌍정끼리 서로 교차하여 쌍정의 성장을 방해하게 되어 변형 초기에는 분율 증가 속도가 느리다가 변형이 증가되고 응력이 높아지면 모든 쌍정들이 쌍정교차로 인한 저항력을 넘어서게 되어 활발히 성장하게 되어 분율 증가 속도가 상승하게 된다.

3.4 변형 특성 분석

변형거동에 있어 쌍정의 역할은 (1) 소성변형의 수용, (2) 쌍정립계(twin boundary) 형성으로 인한 결정립 크기 감소 효과, 그리고 (3) 쌍정영역에서의 결정방위 변화로 인한 슬립시스템 활성화도 (activity) 변화, 이렇게 세가지로 볼 수 있다. 소성 변형의 수용은 쌍정의 형성으로 인해 최대 6.5% 변형량의 소성변형을 수용함을 말하며, 쌍정립계로 인한 결정립 크기 감소는 쌍정립계가 결정립계와 같은 역할을 하여 결정립이 감소된 효과를 가져와 Hall-Petch hardening을 야기함을 말하며, 쌍정영역의 결정방위 변화는 쌍정밴드의 결정방위가 재배열 됨으로써 슬립계 작동을 위한 응력이 변화되어 변형거동에 영향을 주는 것을 의미한다.

Fig. 4의 변형량에 따른 쌍정분율 변화를 기반으

로 하여 변형량이 증가함에 따라 쌍정과 슬립이 변형에 기여하는 정도를 Fig. 5와 같이 나타내었다. RD시편 압축의 경우 4% 변형까지 쌍정이 슬립보다 변형에 더 큰 기여를 하다가 그 이후 쌍정의 기여도가 급격히 감소하고 슬립의 기여도가 증가함을 알 수 있다. 이러한 증가된 슬립 기여도는 응력 상승을 의미하며 Fig. 2(b)와 같이 4% 이후의 급격한 가공경화속도 상승을 야기하게 된다. 이에 반해 ND시편 인장의 경우 7% 변형까지 쌍정의 기여도가 증가하고 있으며, 9.3%까지 쌍정의 기여율이 슬립보다 높은 상태여서 Fig. 2(b)에 보이는 것과 같이 가공경화속도가 급격한 증가없이 점차적으로 상승하고 있다.

Fig. 6은 쌍정립계를 결정립계로 고려하여 쌍정 형성으로 인한 유효결정립 크기 변화를 변형률에 따라 나타낸 것이다. RD시편 압축의 경우, 앞서 설명한 바와 같이 쌍정밴드들이 서로 평행하게

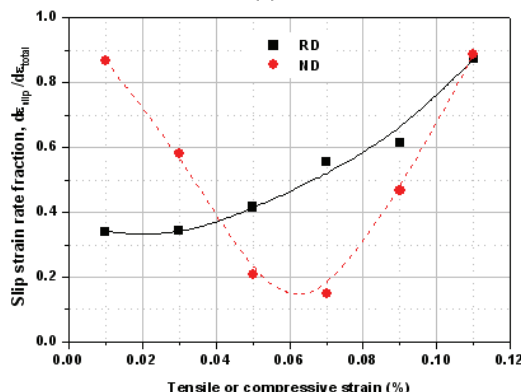
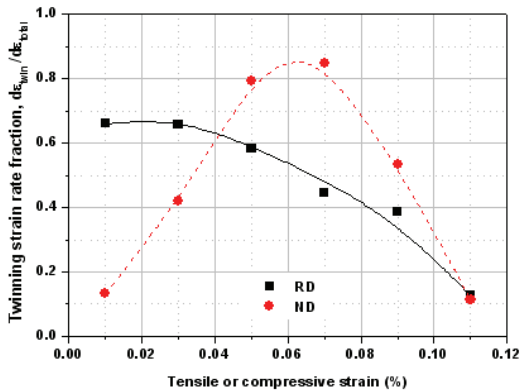


Fig. 5 Relative activities of (a) $\{10\bar{1}2\}$ twinning and (b) dislocation slips in the deformation

형성되어 쌍정교차로 인한 저항이 없어 초기 2% 변형에 많은 쌍정이 형성되어 유효결정립이 크게 감소한 후 6%의 변형까지는 생성된 쌍정밴드가 성장을 하면서 변형을 수용하여 쌍정립계의 양은 거의 변화지 않아 유효결정립 크기가 거의 유지된다. 그 후의 변형에서는 Fig. 3(a)와 같이 쌍정밴드가 성장하여 합쳐지게 된다. RD시편 압축으로 인해 형성된 쌍정은 한 쌍의 twin variants에서 발생한 것으로 결정방위 관계가 똑같거나 유사하기 때문에 쌍정밴드가 만나서 형성되는 boundary의 각도는 7°이하가 된다. 따라서 15°이상의 고경각을 결정립계를 고려할 경우 쌍정밴드의 교차는 쌍정립계가 감소하는 효과를 가져와 Fig. 6에서와 같이 유효결정립이 8%에서 증가하는 것을 알 수 있다.

반면, ND시편 인장시에는 초기 변형시에 쌍정교차로 인한 성장 방해로 인해 초기에 형성된 쌍정이 성장을 하기보다는 새로운 쌍정의 형성이 주가 되어 쌍정립계가 증가하고 있음을 Fig. 3(b)에서 알 수 있다. 6% 변형 이후에서는 성장과 생성이 같이 발생하고 있으나, RD시편 압축시와는 달리 쌍정밴드의 교차로 인해 생성된 boundary가 60°를 가져 쌍정밴드의 교차는 유효결정립 크기 감소 효과를 가져와 Fig. 6과 같이 변형율이 증가함에 따라 지속적으로 유효결정립이 감소하게 된다. 그러나 이러한 쌍정의 형성, 성장, 및 결합으로 야기되는 유효결정립 변화는 변형거동에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

쌍정영역에서의 결정방위 변화로 인한 슬립시스템 활성화도 변화를 알아보기 위해 상온 변형시

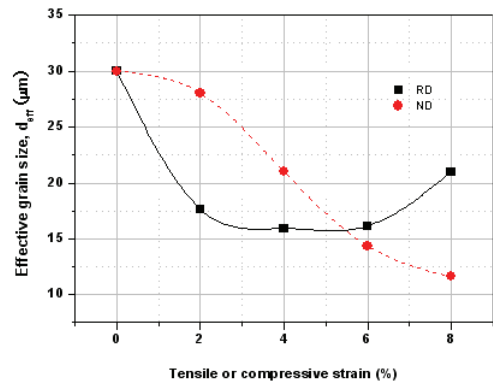


Fig. 6 Average effective grain size with strain; the boundaries with a misorientation angle of $>15^\circ$ were used for measuring an effective grain size

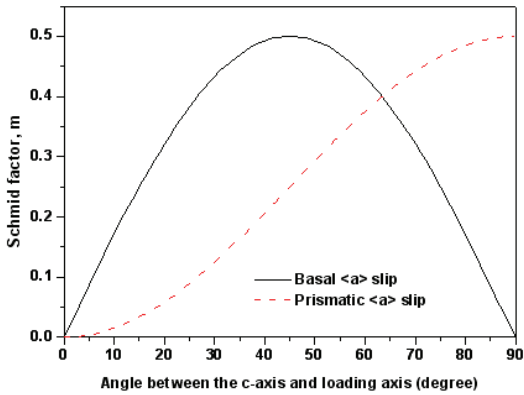


Fig. 7 Schmid factor value of the dislocation slip systems with angle between the basal pole and loading direction

주된 영향을 미치는 슬립 변형기구인 basal slip 과 prismatic slip에 대하여 결정방위와 응력방향의 각도 관계에 따른 Schmid factor 변화를 Fig. 7에 나타내었다. RD시편 압축의 경우 초기 결정립의 c축과 응력 방향이 거의 수직인 관계를 가져 basal slip에 대한 Schmid factor는 0에 가까운 반면 prismatic slip에 대한 Schmid factor 값은 최대 0.499의 높은 값을 가져 prismatic slip 활성화도가 높은 상태이다. 압축변형으로 쌍정이 형성되면 쌍정영역은 초기 결정립에 대하여 ~86°의 각도관계를 가지고 reorientation이 된다. 그리고 가장 높은 Schmid factor를 가지는 한 쌍의 twin variants만이 작동하는 선택적 twin variants의 활성화로 인해 쌍정영역의 c축과 응력방향인 RD 방향과의 각도관계는 0~30°를 가지게 된다[13]. 이로 인해 basal slip에 대한 평균 Schmid factor 값은 다소 증가하여 활성화도가 증가하지만, prismatic에 대한 Schmid factor가 크게 감소하여 쌍정영역에서의 슬립시스템 활성화도는 초기 결정립에 비해 낮아진다.

반면, ND시편 인장의 경우 초기 결정립의 c축은 응력방향인 ND방향과 거의 평행하게 배열되어 있어 0°부근의 각도관계를 가져 두 슬립시스템 모두 Schmid factor값이 0에 가까워 슬립의 활성화도가 매우 낮은 상태이다. 그러나 쌍정영역의 c축은 응력 방향에 대하여 ~86°를 가지므로 basal slip에 대한 Schmid factor 값은 여전히 낮은 상태이나 prismatic slip에 대한 Schmid factor 값이 크게 증가하여 슬립을 활성화도가 증가하게 된다. 이로 인해 쌍정영역이 조직의 대부분을 차지하는 변형 후반부에 ND

시편 인장의 경우가 RD시편 압축의 경우보다 슬립 활성화도가 용이해서 변형 후기 유동응력이 Fig. 2(a)와 같이 RD시편 압축시보다 낮음을 알 수 있다.

또한 쌍정으로 인한 소성변형의 시작으로 야기되는 항복강도는 쌍정이 발생할 수 있는 최소 응력값(twinning stress)와 같다고 볼 수 있다. 이러한 twinning stress는 쌍정의 임계분해전단응력(critical resolved shear stress, CRSS)을 평균 Schmid factor값으로 나눈 값으로 구해진다. 쌍정의 임계분해전단응력이 두 응력모드에서 동일하지만, ND시편 인장시의 평균 Schmid factor 값이 0.499로 RD시편 압축의 0.437에 비해 높은 값을 가져 쌍정 발생을 위한 임계 응력이 ND시편 인장시가 낮게 되어 Fig. 1(a)와 같이 항복강도가 RD시편 압축시에 비해 낮게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 {10 $\bar{1}2$ } 쌍정을 야기하는 두 응력 모드에 따라 쌍정의 특성과 소성변형 거동이 어떠한 차이를 보이는지 확인하기 위해 하중방향이 rolling direction과 normal direction에 평행한 두 시편에 대하여 각각 압축과 인장 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다..

(1) RD시편 압축시에는 한 쌍의 twin variants가 활성화 되어 쌍정들은 방향성을 가지며, ND시편 인장시 모든 twin variants가 활성화 되어 쌍정들이 방향성 없이 형성되어 서로 교차를 이루었다.

(2) RD시편 압축의 경우 변형 초기에 급격한 쌍정 성장으로 인해 변형 후기에 슬립 기여도가 증가하여 4% 변형 이후에 가공경화속도가 급격히 증가하였다. 반면 ND시편 인장시에는 쌍정교차로 인한 성장 방해로 쌍정이 점차적으로 형성되어 8% 변형까지 가공경화속도가 지속적으로 증가하였다.

(3) ND시편 인장의 경우 쌍정의 평균 Schmid factor 값이 RD시편 압축 경우보다 높아 항복강도가 낮았으며, 쌍정으로 인한 결정 재배열로 prismatic 슬립이 용이해져 변형 후기 유동응력 또한 낮은 거동을 보였다.

(4) 변형거동에 미치는 쌍정의 영향은 변형에 따른 쌍정의 형성정도가 변형 초기에 크게 기여하며, 결정재배열로 인한 슬립시스템 활성화도 변화는 변형 후기에 주된 영향을 미쳤으며, 쌍정립계로 인한 유효결정립 감소로 인한 영향은 적었다.

후 기

본 연구는 POSCO 및 RIST의 연구비 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] B. L. Mordike, T. Ebert, 2001, Magnesium: Properties-applications-potential, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 302, pp. 37~45.
- [2] X.Y. Lou, et al., 2007, Hardening evolution of AZ31B Mg sheet, Int. J. Plast., Vol. 23, pp. 44~86.
- [3] H. Mayer, M. Papakyriacou, B. Zettl, S. E. Stanzl-Tschegg, 2003, Influence of porosity on the fatigue limit of die cast magnesium and aluminum alloys, Int. J. Fatigue, Vol. 25, pp. 245~256.
- [4] J.P. Weiler, et al., 2005, Relationship between internal porosity and fractures strength of die-cast magnesium AM60B alloy, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 395, pp. 315~322.
- [5] S. G. Lee, et al., 2005, Variability in the tensile ductility of high-pressure die-cast AM50 Mg-alloy, Scripta Mater., Vol. 53, pp. 851~856.
- [6] Wu L, et al., 2008, Twinning-detwinning behavior during the strain-controlled low-cycle fatigue testing of a wrought magnesium alloy, ZK60A, Acta Mater., Vol. 56, pp. 688~695.
- [7] S. H. Park, S-G Hong, C. S. Lee, 2010, Effect of anisotropy on the low-cycle fatigue behavior of rolled AZ31 magnesium alloy, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 527, pp. 417~423.
- [8] S. H. Park, S-G Hong, C. S. Lee, 2010, Role of initial $\{10\bar{1}2\}$ twin in the fatigue behavior of rolled Mg-3Al-1Zn alloy, Scripta Mater., Vol. 62, pp. 666~669.
- [9] Y. N. Wang, J. C. Huang, 2007, The role of twinning and untwinning in yielding behavior in hot-extruded Mg-Al-Zn alloy, Acta Mater., Vol. 55, pp. 897~905.
- [10] Y. Chino, K. Kimura, M. Mabuchi, 2009, Deformation characteristics at room temperature under biaxial tensile stress in textured AZ31 Mg alloy sheets, Acta Mater., Vol. 57, pp. 1476~1485.
- [11] M. R. Barnett, Z. Keshavarz, A. G. Beer, D. Atwell, 2004, Influence of grain size on the compression deformation of wrought Mg-3Al-1Zn, Acta Mater., Vol. 52, pp. 5093~5103
- [12] Robert E. Reed-Hill, R. Abbaschian, 1991, Physical Metallurgy Principles, PWS publishing company, Boston.
- [13] S. H. Park, S-G Hong, C. S. Lee, 2010, Activation mode dependent $\{10\bar{1}2\}$ twinning characteristics in a polycrystalline magnesium alloy, Scripta Mater., Vol. 62, pp. 202~205.