

AZ31 Mg 합금의 쌍정 형성에 미치는 초기 집합조직의 영향

이병호¹, 김용우¹, 박성혁¹, 이종수[#]

Effect of Initial Texture on the Twinning Formation of AZ31 Mg Alloy

Byoung Ho Lee, Yong Woo Kim, Sung Hyuk Park, Chong Soo Lee

(Received May 25, 2007)

Abstract

In this study, the effects of initial texture on the twinning formation of AZ31 Mg rolled sheet was investigated. Uniaxial compression tests were carried out on samples cut along the normal direction(ND) and rolling direction(RD), respectively, of rolled AZ31 Mg alloy sheet at various temperatures (RT, 200, 250, 300, 350, 400°C) with the fixed strain rate(10^{-2} /s). The results showed that deformation twinning occurred actively only in the RD specimens, which promoted homogeneous deformation as compared to the ND specimens. The effect of temperature on the formation of deformation twins was also investigated, and the slip/twin transition temperature was found to be approximately 250°C.

Key Words : AZ31 Mg Alloy, Deformation Twinning, Texture, Slip-Twin Transition

1. 서 론

자동차 산업에서 연비 향상에 대한 관심은 크게 증가하고 있다. 이러한 연비 향상의 방안으로는 차체 디자인 최적화, 엔진 설계의 최적화, 경량 구조재료의 사용 등의 방안이 있으나, 그 중 경량 구조 용 소재를 이용하는 것은 다른 방안과 함께 사용될 수 있으며 가장 본질적인 해결책으로 각광 받고 있다[1]. 경량 구조 용 소재 중 사용 가능한 가장 밀도가 낮은 구조 용 금속 소재인 마그네슘 합금은 특히 이러한 자동차의 차체 무게 감소를 위한 수많은 가능성을 내포하고 있는 재료이다. 지금까지 마그네슘 합금의 자동차 소재로의 응용은 거의 대부분이 주조재의 응용이었으나, 이런 방법으로 제조된 부품은 기계적 프로세스를 거친 재료들에 비해 강도, 연신율과 같은 기계적 성질이 매우 취약한 것으로 알려져 있다. 그

리하여 최근 마그네슘 합금의 가공재료의 응용에 대한 연구가 매우 활발하다[1].

일반적으로 마그네슘 합금은 그 슬립계의 제한으로 인해 상온에서 성형성이 좋지 못한 단점이 있다. 상온에서 사용 가능한 슬립계는 (0002)의 기저면에서의 슬립계이며, 다른 비 기저면 슬립계인 prismatic과 pyramidal면의 슬립계에 비해 CRSS (critical resolved shear stress)값이 매우 작아, 상온에서는 기저면 슬립이 주로 작용하게 된다[2]. 하지만 상온에서 연속체 가정에서 균일한 변형을 이루기 위해 필요한 서로 독립 작용이 가능한 5개 이상의 슬립계가 존재하기 힘들어 마그네슘 합금은 열악한 성형성을 갖는 단점이 있다. 그러나 온도가 증가하면 비기저면 슬립계의 CRSS값이 basal과 비교 가능한 수준으로 낮아져 기타 다른 슬립계가 작용하게 된다[3]. 이러한 부족한 슬립계 이외에도, 보통 마그네슘 합금은 쌍정을 변형의

1. 포스텍 신소재공학과
교신저자: 포스텍 신소재공학과,
E-mail:cslee@postech.ac.kr

한 방법으로 사용한다. 변형 쌍정이 생기면 초기 변형을 수용한다는 점 외에도 다른 슬립계가 작용하기 용이하게 해주는 장점이 있어 최근 마그네슘 합금의 쌍정 형성 연구에 대한 연구자들의 관심이 증가하고 있다[4~5]. 이러한 마그네슘 합금의 쌍정 형성은 마그네슘 합금의 집합 조직과도 밀접한 관련이 있다[5].

본 연구에서는 최근 가장 널리 쓰이는 AZ31 Mg 합금을 이용하여 초기 쌍정 형성에 영향을 미치는 초기 집합 조직의 영향 및 이러한 초기 쌍정 형성이 균일 변형에 미치는 영향을 조사할 것이다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 소재는 3.6wt%Al- 1.0wt% Zn-0.5wt%Mn의 조성을 가진 AZ31 Mg 합금을 최종 두께 50mm로 압연한 판재이다. 이 재료에 대하여 400℃에서 6시간 동안 균질화 열처리를 수행하였다. 압연된 재료의 경우 초기 결정립 크기는 비교적 균일한 65±10nm 정도였다.

이러한 Mg 합금의 초기 쌍정 형성에 미치는 집합 조직의 영향에 대해 알아보기 위해 압연 방향과 평행한 방향이 압축 중심 축이 되는 시편(이후 통칭 RD시편)과 압연 방향에 수직인 방향인 Normal direction이 압축의 중심 축이 되는 시편(이후 통칭 ND시편)의 두 가지 방향으로 직경 10mm, 높이 12mm의 원통형 압축 시편을 채취하였으며, 이렇게 가공된 시편을 Gleeble 3500 고온 압축 시험기를 이용하여 압축실험을 실시하였다. 압축 실험은 0.01/s의 고정된 변형률 속도로 실시하였으며, 온도에 따른 쌍정 형성의 변화를 알아보기 위해 RT, 200, 250, 300, 350, 400℃로 온도를 변화시켜 가며 실험을 실시하였다. 이때 응력-변형률의 변화는 Gleeble-3500 시험기에 장착된 컴퓨터를 통하여 연속적으로 측정·보정되었으며 실제 시편의 온도도 시편에 장착된 Thermocouple wire를 통해 실시간으로 측정하였다. 실험 후 미세조직을 보존하기 위해 실험 직후 시편은 수냉하였다.

또한 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 pole-figure를 관찰하였다. Pole figure 관찰에는 RIGAKU-DMAX X-ray diffractometer를 사용하였으며, 압연 방향의 위 (ND방향)에서 X-선을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 초기 집합 조직의 형성.

다음의 Fig. 1은 X-선 회절 실험을 통해 얻어낸 AZ31 마그네슘 합금 압연재의 초기 집합 조직을 나타내는 pole figure 이다. 이 그림은 XRD 실험으로 모여진 X 선 강도 data 를 Textool 이라는 집합 조직 해석 프로그램을 이용하여 다시 계산하여 구한 그림이다.

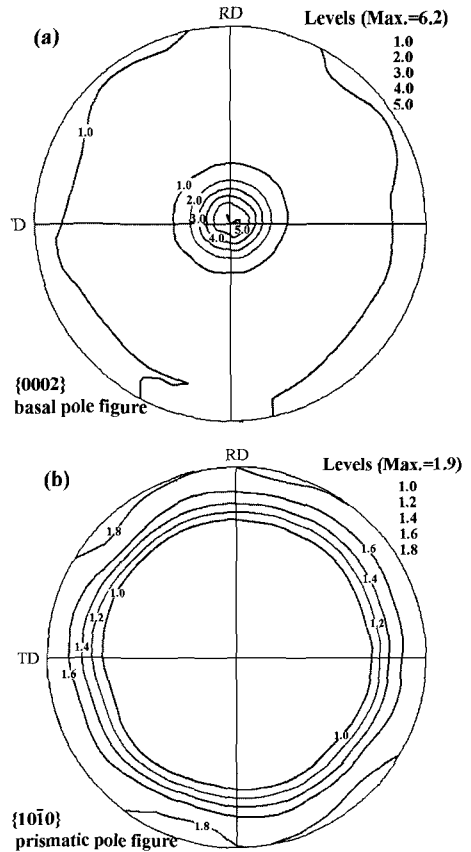


Fig. 1 Initial texture formation of AZ31 rolled sheet (a) {0002} pole figure and (b) {10 $\bar{1}$ 0} pole figure

이때 Fig. 1(a)는 재계산된 극점도 (pole figure)를 나타낸 것으로서 ND방향으로 기저면의 극강도 (pole-intensity) 값으로 약 6정도로 강하게 발달하고 있으며, 또한 Fig. 1(b)의 재계산된 {10 $\bar{1}$ 0}의 극점도에서도 ND방향에 평행한 모든 면으로 prismatic 면이 발달하는 것을 알 수 있다. 이것은 basal fiber texture가 형성되었음을 가리키는 것이다.

그리고 RD방향과 TD방향에 관계없이 대부분의 집합 조직이 나타나고 있음을 알 수 있었다. 이것으로 본 재료의 초기 집합조직은 강한 basal fiber texture 인 것으로 보인다. 다음의 Fig. 2는 이러한 basal Texture가 형성되었을 본 실험에서 채취한 시편의 방향과 형성된 집합조직의 방향을 모식적으로 나타내는 그림이다.

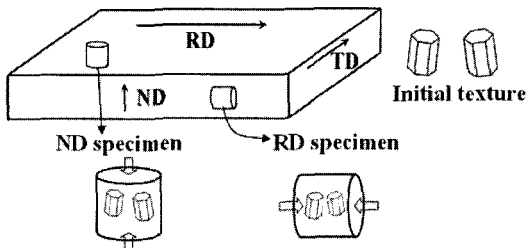


Fig. 2 Schematic diagram for specimen direction and angle relationship between compression specimen and initial texture

위 그림에서 알 수 있듯이 본 실험에서 채취한 RD방향의 압축 시편의 경우 압축 응력 축에 대하여 대부분의 결정립에서 기저면이 수평한 방향으로 형성되어 있음을 알 수 있다. 이에 비해 ND시편의 경우 응력 축에 대해 형성된 집합 조직이 기저면에 대해 거의 수직한 방향으로 형성되어 있었다.

3.2 쌍정 형성에 미치는 초기 집합조직의 영향

초기 집합 조직의 형성이 쌍정의 발생에 미치는 영향을 분석하기 위해, 위의 집합 조직을 갖는 압연된 시편을 ND방향과 RD방향이 압축 시편의 cylinder축에 평행하게 각각 시편을 채취하여 압축 실험을 수행하였다. 다음의 Fig. 3은 이와 같이 각각 다른 집합 조직을 갖게 가공된 압축 시편의 상온 압축 시험 결과를 나타내는 것이다. 이 결과를 보면 ND방향 시편의 경우 Mg합금의 고온 압축 실험 시에 전형적으로 나타나는 아래로 볼록한 형태의 stress-strain curve를 보이는데 반하여, RD방향의 시편의 경우 압축 실험을 실시하였음에도 불구하고 YS값이 거의 두 배가 넘는 위로 볼록한 양식의 stress-strain curve를 보이고 있음을 알 수 있다.

마그네슘 합금과 같이 c/a ratio가 1.732보다 작은 재료의 경우 (c/a=1.632) HCP재료에서 가장 활

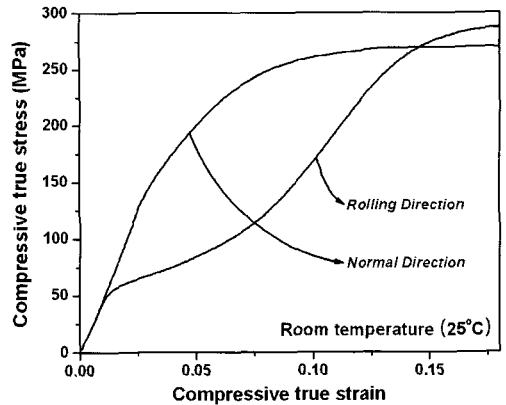


Fig. 3 True stress-strain curves of room temperature compression specimens with different specimen directions(RD and ND)

발하게 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[6]. 이러한 $\{10\bar{1}2\}$ 쌍정은 Mg합금에서는 c-extension twin 이라고 불리는데, primary twin면과 기저면의 각도 관계에 의해 기저면이 수축되는 방향의 응력을 받을 경우 Primary twin이 형성되기 때문에 나타나는 현상이다[6]. 본 재료의 경우 위의 Fig. 2와 같이 초기 재료의 집합 조직이 기저면이 압연 방향에 평행하게 늘어서 존재하는 것으로 관찰되었다. 이때 ND방향으로 시편을 채취하면, 압축 방향에 대하여 basal면이 대부분 수직한 형태를 보인다. 이런 경우 c-compression 되는 조건으로 $\{10\bar{1}2\}$ 쌍정계가 형성될 수 없어 위의 Fig. 3과 같은 형태의 stress-strain curve 경향을 보인다. 하지만 이에 비해 RD방향 시편의 경우, 응력 축이 기저면이 수축하는 방향으로 작용하고 있으므로, 이로 인해 primary twin system이 작용하여 초기 YS가 작고 아래로 볼록한 양식의 stress-strain curve 형태를 보인다.

Fig. 4는 상온 압축된 ND시편과 RD시편의 초기 변형량 (0.07)과 후기 변형량 (0.2, 0.22)에서의 미세조직을 나타내는 것이다. 이 미세조직 사진을 보면, ND방향 시편의 경우 (Fig. 4(a)) 0.07의 초기 변형량에서 결정립 내부에 형성된 변형 쌍정이 거의 보이지 않는데 반해 RD방향의 시편의 경우 (Fig. 4(c)) 초기 변형량인 0.07의 변형에서도 이미 대부분의 결정립 내부에 변형 쌍정이 형성되어

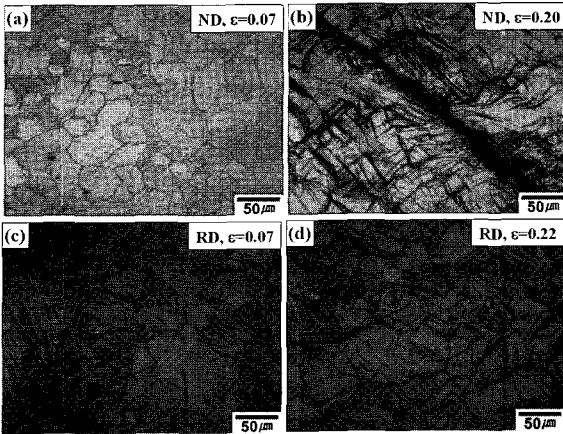


Fig. 4 Microstructures of compressed specimens (a), (b) ND and (c), (d) RD direction; deformed to a strain of (a), (c) 0.07, (b) 0.2 and (d) 0.22

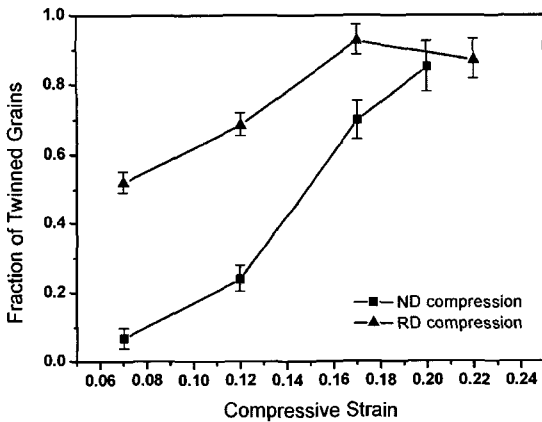


Fig. 5 Fraction of twinned area of ND and RD specimens compressed to various strains

있는 것을 알 수 있다. 변형량이 증가하여 0.2까지 변형을 가했을 경우, 파단이 일어나기 직전의 미세조직 사진을 찍은 결과 ND방향의 시편의 경우 전단 방향으로 crack이 발생하고 있으며 쌍정도 전단 방향으로 형성되고 있는데 반하여, RD방향 시편의 경우 전체적으로 쌍정이 고르게 형성되고 0.22의 변형량까지 시편 전체가 균일하게 변형된 것을 알 수 있었다. 다음의 Fig. 5는 이러한 변형량에 따른 각기 다른 방향 시편의 쌍정 분율을 나타내는 것이다. 쌍정 분율은 쌍정이 형성된 결정립의 area fraction을 Image analyzer를 이용하여 관찰하였다. 이때 RD방향의 압축 시편의 경우 초기 변형량인 0.07의 작은 변형량에도 쌍정이 형성

된 결정립의 분율이 50% 이상임을 알 수 있으며, 변형량이 0.16 이상이 되면 쌍정이 형성된 결정립 분율이 거의 포화되는 것을 알 수 있다.

하지만 이에 비해 ND방향의 시편의 경우 초기 변형량 (0.07)에서는 형성된 쌍정의 분율이 매우 작으며 변형량이 증가함에 따라 쌍정 분율이 증가하지만 그것은 전단 방향으로 형성되고 것이며, 시편 전체에 쌍정이 포화되지 않고 특정 방향에 집중되어 분포되는 것을 알 수 있다. 그리하여 결국 0.2의 변형량에서 집중 분포된 쌍정들을 따라 전단 크랙이 발생하는 것을 알 수 있다.

3.3 쌍정 형성에 미치는 온도의 영향.

다음의 Fig. 6은 상온에서 쌍정이 나타나는 RD 방향의 시편에서 고정된 변형을 속도인 0.01/s로 실험하였을 경우 stress-strain curve의 변화를 나타내는 것이다. 이 그림을 보면 상온을 비롯하여 250℃까지도 {1012} twining formation의 증거인 아래로 볼록한 양식의 stress-strain curve를 보이는 것을 알 수 있다[3]. 그러나 이러한 쌍정의 형성은 300℃ 이상의 온도에서는 나타나지 않는다. 이것은 250℃ 부근에서 Prismatic과 Pyramidal slip계가 변형에 도움을 주어 굳이 twin이 형성되지 않더라도 균일한 변형을 수용할 수 있기 때문이다[3]. 다음의 Fig. 7은 RD 시편을 고정된 0.01/s의 변형 속도와 다양한 온도(200, 250, 300, 350℃)에서 0.3의 변형율까지 압축 했을 때의 미세조직을 나타내는 그림이다. 이를 보면 유동 응력 곡선이 아래로 볼록한 양식을 보이는 200℃까지 시편의 경우 미세조직에서 변형 쌍정의 형성을 관찰할 수 있는데 반해서 300℃ 이상의 온도에서는 결정립 내부에 형성된 쌍정이 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있었다.

이는 최근 M.R. Barnett [7] 등이 제시한 바 있는 slip-twin dominated flow의 변화가 일어난 것으로 200℃ 이하의 온도에서는 쌍정이 주도되어 변형이 일어나는데 반해 300℃ 이상의 온도에서는 슬립이 주로 일어나 변형이 일어난다는 것을 보여 준다. 그리고 RD시편의 미세조직 사진에서 한가지 더 특기할 만한 것은 250℃ 이상의 온도에서 동적 재결정현상이 활발하게 일어난다는 것이다. 하지만, 250℃ 시편의 경우 시편 전체에 걸쳐 동적 재결정이 일어나지 않고 300℃나 350℃ 시편의 미세조직과 비교해 보았을 때 재결정된 결정립의 분율이 작은 것을 알 수 있었다. 이것은 동

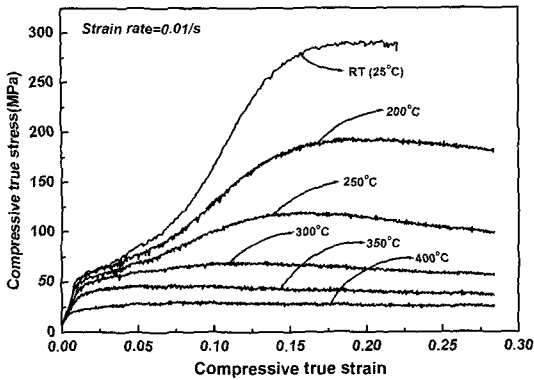


Fig. 6 Compressive stress-strain curves of RD specimen deformed at various temperatures with 0.01/s strain rate

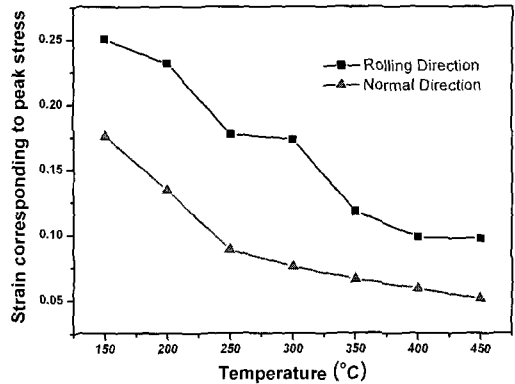


Fig. 8 Peak strain corresponding to peak stress for RD and ND specimens compressed with 0.01/s at various temperatures(150~450°C)

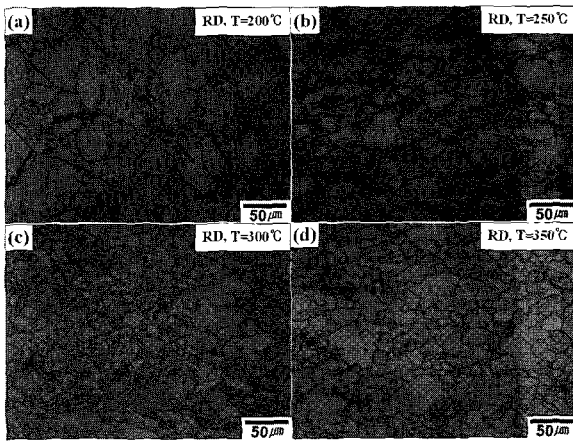


Fig. 7 Microstructures of compressed RD specimen deformed with 0.01/s at (a) 200°C, (b) 250°C, (c) 300°C, (d) 350°C

적 재결정이 시작되는 변형율을 나타내는 임계 변형율 (ϵ_c)의 변화로 분석 가능하다. 일반적으로 동적 재결정이 시작되는 임계 변형율 값은 최대 압축 응력을 보이는 변형량의 크기에 비례한다. 다음의 Fig. 8은 다양한 온도에서 RD시편과 ND시편의 경우 최대 압축 응력을 보이는 변형량을 나타내는 그림이다.

이 그림을 보면 RD시편의 경우 온도가 증가함에 따라 peak strain이 급하게 떨어지는 것을 알 수 있는데, 이는 곧 동적 재결정이 시작되는 임계 변형율 값 또한 떨어진다는 것을 말한다. 즉 250°C의 온도의 경우 동적 재결정이 시작되는 변형율

값이 다른 300°C와 350°C에서 압축 실험한 시편에 비해 크기 때문에, 0.3의 변형율에서도 동적 재결정이 포화되지 못한다에 비해, 높은 온도에서 압축 실험한 시편의 경우 빨리 재결정이 포화되는 것이다.

또한 이 Fig. 8의 경우 전체적으로 RD시편이 ND시편에 비해 최대 압축 응력을 보이는 변형율의 값이 큰 것으로 관찰되었다. 이는 초기 변형율에서 ND시편의 경우 형성된 초기 집합 조직과 basal 면과의 각도 관계 때문에 primary twin이 시편 전체에 걸쳐 잘 발생하지 않아, 초기 변형율 오직 슬립으로만 수용하기 때문에 슬립이 일어나는 동적 연화가 초기 변형량에서 시작되는 것에 반하여 RD시편의 경우 슬립이 일어나기 전에 시편의 결정립 전체에 쌍정이 형성된 후 슬립이 일어나기 때문에 쌍정이 일어난 동안의 변형 해소만큼의 변형량이 최대 압축 응력 전에 나타나기 때문이다. 이러한 쌍정 변형 시 쌍정이 슬립과는 달리 쌍정 중의 모든 원자면이 변형에 참여하므로, 쌍정 형성으로 생기는 변형 그 자체 보다는 이로 인한 결정 방향의 변화 때문에 새로운 슬립계가 작동할 수 있게 되어 슬립이 더 많이 일어날 수 있는 역할을 한다.

다음의 Fig. 9는 200°C에서 0.3strain까지 고온 압축한 압축 시편의 표면을 나타내는 그림이다.

이 그림을 보면 RD시편의 표면은 성형 온도가 낮은 조건임에도 불구하고 깨끗하지만 ND시편의 경우 RD시편에 비해 표면에 Orange peel과 같은 현상이 발생한다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이

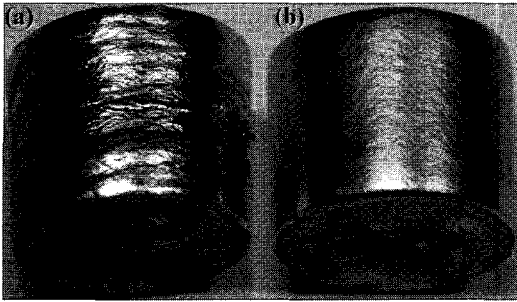


Fig. 9 Surface morphologies of specimens deformed at 200°C, 0.01/s; (a) ND and (b) RD

변형 시 쌍정이 관여하지 못하고 한정된 슬립계만으로 변형을 수용했기 때문에 표면에 나타나는 슬립의 자취일 것으로 예상되며 ND시편의 경우 RD에 비해 내부 미세조직 또한 매우 불균일한 것으로 조사되었다.

4. 결론

본 연구에서는 AZ31 Mg 합금에서 초기 집합조직이 변형 쌍정의 형성에 미치는 영향에 대해 알아보았다.

(1) 압연 재료의 집합 조직은 압연 재의 수직면에서 basal fiber texture가 발달하게 초기 집합 조직이 형성된 것으로 나타났다.

(2) 시편의 집합 조직과 압축 응력 축의 각도로 인해 ND 시편의 경우 초기 primary twin이 형성되지 않았지만, RD 시편의 경우 초기 primary twin이 형성되었다.

(3) RD 시편의 경우 이러한 초기 primary twin 형성의 경향은 온도가 증가함에 따라 완화되었으며, 300°C 이상에서는 쌍정이 나타나지 않았다.

(4) 압축시험의 결과 쌍정이 형성된 RD 시편은 쌍정이 형성되지 않은 ND 시편에 비해 균일한 변형거동을 나타내었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 2003년 국가지정연구실 사업에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] S. S. Park, Y. S. Park, N. J. Kim, 2002, Microstructure and properties of strip cast AZ91 Mg alloy, *Met. Mater. Int.*, Vol. 6, pp. 551~554.
- [2] X. Y. Lou, M. Li, R. K. Boger, S. R. Agnew, R. H. Wagoner, 2007, Hardening evolution of AZ31B Mg sheet, *Inter. Journal of Plasticity*, Vol. 23, pp. 44~86.
- [3] T. Obara, H. Yoshinaga, S. Morozumi, 1973, [11-22](11-23)slip system in magnesium, *Acta Mater.* Vol. 21, pp. 845~853.
- [4] Y. N. Wang, J. C. Huang, 2007, The role of twinning and untwining in yielding behavior in hot-extruded Mg-Al-Zn alloy, *Acta Mater.* Vol. 55, pp. 897~905.
- [5] L. Jiang, J. J. Jonas, A. A. Luo, A. K. Sachdev, S. Godet, 2007, Influence of {10-12} extension twinning on the flow behavior of AZ31 Mg alloy, *Mater. Sci. Eng.* Vol. 445~446, pp. 14~19.
- [6] Robert E. Reed-Hill, R. Abbaschian: *Physical Metallurgy Principles*, PWS publishing company, Boston 1991.
- [7] M. R. Barnett, Z. Keshavarz, A. G. Beer, D. Atwell, 2004, Influence of grain size on the compressive deformation of wrought Mg-3Al-1Zn, *Acta Mater.* Vol. 52, pp. 5093~5103.