

AZ31 Mg 합금 압연 판재에서 하중방향에 따른 저주기 피로특성

박성혁¹, 홍성구¹, 이병호², 이종수[#]

Effect of loading direction on the low cycle fatigue behavior of rolled AZ31 Mg alloy

S. H. Park, S. G. Hong, B. H. Lee, and C. S. Lee

Abstract

Low-cycle fatigue (LCF) tests were carried out to investigate the effect of loading direction on the cyclic deformation behavior and fatigue resistance of rolled AZ31 magnesium alloy. The as-received alloy showed a strong basal texture indicating that the most of basal planes of hexagonal close-packed structure were located parallel to the rolling direction. Two types of specimens whose loading directions were oriented parallel (RD) and vertical (ND) to the rolling direction, respectively, were used for the comparison. It was found that RD specimens yielded at much lower stresses during compression, while vice versa for the ND specimens, which was mainly attributed to the formation of primary twins. This anisotropic deformation behavior resulted in the different mean stresses during the cycling of RD and ND specimens, affecting the fatigue resistance of two specimens. The ND specimen showed a superior fatigue resistance as compared to the RD specimen under strain-controlled condition.

Key Words : Magnesium alloy, Low-cycle fatigue, Deformation twin, Mean stress

1. 서론

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

발생할 수 있다. 그리하여 최근 마그네슘 합금의 wrought material로의 응용에 대한 연구가 매우 활발하다[1].

이러한 마그네슘 부품이나 설비들은 사용중 반복되는 하중이나 변형을 겪게 되므로, 사용에 앞서 피로특성을 이해하는 것은 필수이다. 최근 마그네슘 합금의 피로특성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으나[2], 압연 방향이나 압출 방향에 대한 것으로 압연 공정 동안 생성된 집합조직과 상온에서 변형의 한 방법으로 사용되어지는 쌍정구조로 인해 큰 소성이방성을 가지는 마그네슘 합금 판재에서 피로특성에 미치는 하중방향의 영향에 대한 연구가 미미한 실정이다.

1. 포항공대 신소재공학과

2. POSCO 기술연구소

교신저자: 포항공대 신소재공학과,

E-mail: cslee@postech.ac.kr

본 연구에서는 압연 판재에서 채취 방향이 다른 두 시편에 대한 저주기 피로 실험을 통하여 AZ31 마그네슘 합금 압연 판재의 하중방향에 따른 저주기 피로특성을 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 비교적 균일한 $65 \pm 10 \mu\text{m}$ 정도였다.

이러한 Mg 합금의 하중 방향에 따른 저주기 피로 특성을 알아보기 위해 압연 방향과 평행한 방향이 하중 중심 축이 되는 시편 (이후 통칭 RD시편)과 압연 방향에 수직인 방향인 Normal direction 이 중심 축이 되는 시편 (이후 통칭 ND시편)의 두 가지 방향으로 gage length 10mm, diameter 5mm의 봉상 피로 시편을 채취하였으며, 이렇게 가공된 시편을 INSTON 8801 유압식 피로 시험기를 이용하여 변형률제어 피로시험을 수행하였다. 본 실험은 상온에서 변형률 비 $R=-1$ 로 0.004-0.012 사이의 일정변형률 진폭의 조건하에서 1Hz의 일정한 변형률 속도에서 실험이 수행되었다.

또한 두 시편에 대한 인장 및 압축 특성을 알아보기 위해 상온 인장과 압축실험을 실시하였다. 인장실험은 INSTRON 5582 시험기를 사용하여 5mm/min의 변형률 속도로 수행하였으며, 압축실험은 Gleeble 3500 시험기를 이용하여 0.01/s의 변형률 속도로 수행하였다.

그리고 초기 시편의 집합조직 분석을 위해 2400번 abrasive paper까지 연마한 시편의 표면에 X-ray diffraction을 통해 {0002}, {10-10}, {10-11}의 세 방향에서 pole-figure를 관찰하였다. Pole figure 관찰에는 RICA KU-DMAX X-ray diffractometer를 사용하였으며, 압연 방향의 위 (ND방향)에서 X-선을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1.1 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 X선 강도 data를 집합조직 해석 프로그램 Textool을 이용하여 분석한 것이다. Fig. 1(a)은 재계산된 {0002} 극점도 (pole figure)를 나타낸 것으로서 ND방향으로 기저면의 극강도 (pole intensity) 값으로 약 6정도로 강하게 발달하고 있으며, 또한 Fig. 1(b)의 재계산된 {10-10}의 극점도에서도 ND방향에 평행한 모든 면으로 prismatic 면이 발달하는 것을 알 수 있다. 이는 본 마그네슘 합금에 hexagonal cell의 기저면이 압연면과 평행하게 배열된 강한 basal fiber texture가 형성되었음을 나타낸다. 이로 인해 본 실험에서 채취한 RD시편의 경우 응력 축이 대부분의 결정립에서 기저면과 수평한 방향을 가지며, ND시편은 응력 축이 기저면에 대한 수직인 방향을 가지고 있음을 알 수 있다.

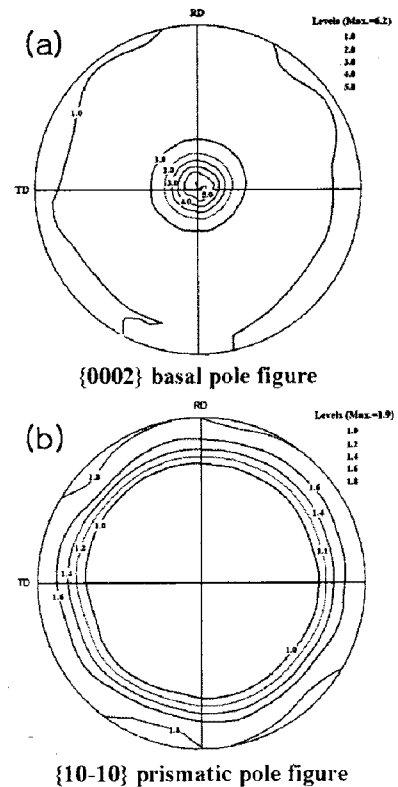


Fig. 1 Pole figures of the rolled AZ31Mg alloy: (a) (0002) and (b) (10-10) pole figures.

3.1.2 인장 및 압축 특성

Fig. 2는 위와 같은 집합조직을 갖는 압연 판재에서 채취한 RD와 ND시편에 대해 상온 인장과

압축 실험에 대한 stress-strain curve를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)의 인장 실험 결과에서 RD시편이 ND시편에 비해 YS가 두 배 이상의 값을 가짐을 알 수 있다.

마그네슘 합금과 같이 c/a ratio가 1.732보다 작은 재료의 경우 ($c/a=1.632$) HCP재료에서 가장 활발하게 나타나는 {10-12} twin primary system이 기저면에 대하여 가지는 각도관계로 인하여 기저면에 쌍정이 형성되었을 경우 기저면이 수축하는 현상을 보이는 것은 많은 연구자들에 의해 밝혀진 현상이다.[3] 이러한 {10-12} 쌍정은 Mg합금에서는 c-extension twin 이라고 불리는데, primary twin 면과 기저면의 각도 관계에 의해 기저면이 수축되는 방향의 응력을 받을 경우 primary twin이 형성되기 때문에 나타나는 현상이다.[3] 본 재료의 경우 기저면이 압연 방향에 평행하게 존재하는 집합조직을 가지므로, RD시편은 인장 방향에 대하여 기저면이 대부분 수직인 형태를 가져 c-compression 되는 조건이 되어 {10-12} 쌍정계가 형성될 수 없으나, ND시편은 인장 축이 기저면이 수축하는 방향으로 작용하여 primary twin system이 작용하여 초기 YS가 작고 아래로 볼록한 양식의 stress-strain curve 형태를 보인다.

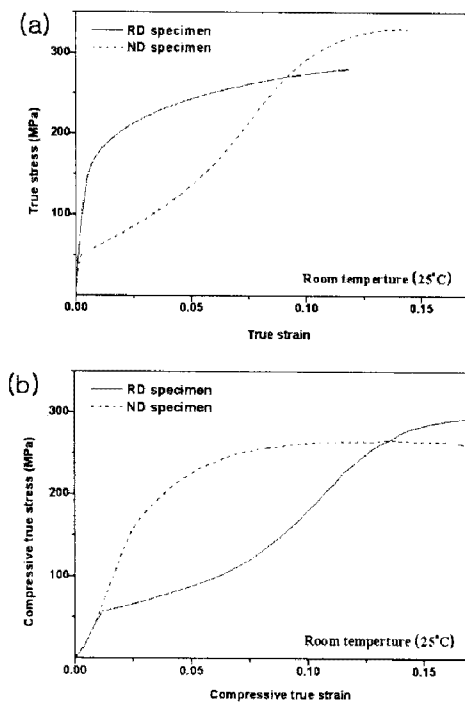


Fig. 2 Stress-strain curves of RD and ND specimens: (a) tensile and (b) compressive stress-strain curves.

반면, 압축시에는 ND시편이 c-compression mode가 되고 RD시편이 쌍정발생이 용이한 c-extension mode가 되어 Fig. 2(b)와 같이 RD시편이 낮은 YS 값을 가진다.

3.1.3 저주기 피로 특성

Fig. 3은 0.004~0.012의 total strain amplitude 하에서 각 strain amplitude에 대한 반수명에서의 hysteresis loop를 ND와 RD시편에 대해 나타낸 것이다. 위에서 언급한 것과 같이, 집합조직과 쌍정발생 모드에 의해 발생하는 변형 이방성으로 인해 Fig. 3과 같이 ND시편의 인장 영역과 RD시편의 압축영역에서 낮은 응력은 가지는 왜곡된 hysteresis loop가 나타남을 알 수 있다.

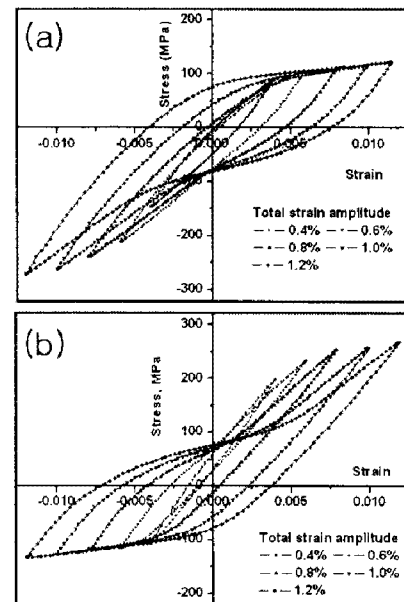


Fig. 3. Stress- strain hysteresis loops at half-life: (a) ND and (b) RD specimens.

Hysteresis loop의 형태는 strain amplitude에 따라 달라지는데, 0.004의 매우 낮은 strain amplitude에서는 loop의 폭이 좁으며 대칭적이나, 0.006 이상의 strain amplitude에서는 ND시편에서는 인장시 쌍정이 발생하고 RD시편에서는 압축시 쌍정이 발생하여 loop가 비대칭 형태가 되며, strain amplitude가 증가함에 따라 왜곡된 영역은 넓어지지만 최대응력은 크게 증가하지 않는다.

Fig. 4는 사이클을 수명으로 나눈 life fraction에 대한 mean stress 변화를 나타낸 것이다. 앞서 설명한 것과 같이 인장과 압축시 나타나는 flow curve

의 이방성으로 인해 hysteresis loop 가 비대칭적으로 생겨 completely reversed strain control fatigue tests 동안 0 이 아닌 mean stress 가 발생하게 된다. 인장시 쌍정 발생으로 인해 압축시와 비교하여 상당히 낮은 항복강도를 가지는 ND 시편은 compressive mean stress 가 생기고, 반대로 압축시 낮은 항복강도를 가지는 RD 시편은 tensile mean stress 가 생긴다. 또한, ND 시편은 strain amplitude 가 증가함에 따라 mean stress 값이 점차 감소하는 반면, RD 시편은 위로 볼록한 stress-strain curve 때문에 0.008~0.012 의 strain amplitude 에서 인장 최대응력이 거의 유사한 값을 가져 mean stress 또한 거의 같은 값을 갖는다.

Tensile mean stress는 crack opening과 fatigue damage accumulation을 가속화시켜 피로 수명을 감소시키는 역할을 한다[14]. 반대로 compressive mean stress는 피로 수명에 이로운 영향을 미친다.

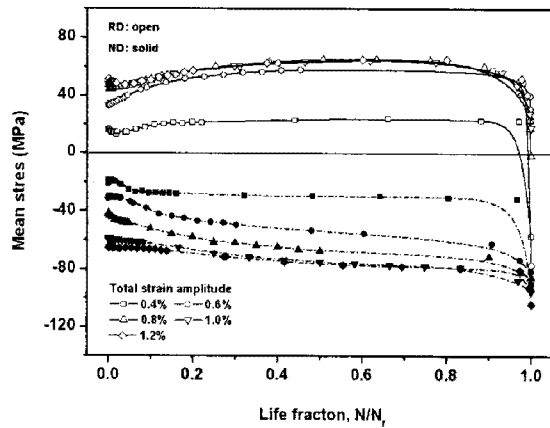


Fig. 4. Mean stresses evolution of ND and RD specimens with life fraction..

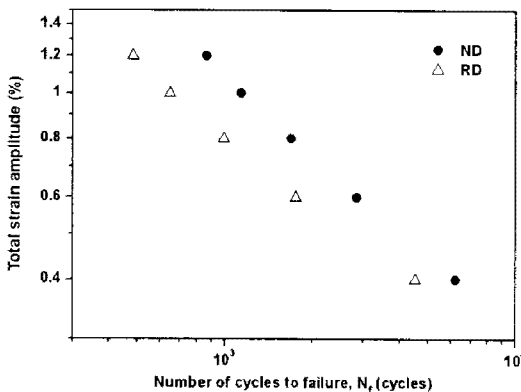


Fig. 5. Total strain amplitude - fatigue life curves for ND and RD specimens.

따라서, Fig. 5과 같이 전 strain amplitude에 걸쳐 tensile mean stress를 가지는 RD시편이 동일한 strain amplitude의 ND시편보다 짧은 피로 수명을 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서는 AZ31 Mg 합금 압연 판재에서 하중방향에 따른 저주기 피로특성을 알아보기 위해 하중방향이 rolling direction과 normal direction에 각각 평행한 두 시편에 대하여 저주기 피로 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다..

(1) 압연된 AZ31 마그네슘 합금은 대부분의 hexagonal cell의 기저면이 판재의 압연면과 평행하게 배열된 강한 basal fiber texture가 형성되었다.

(2) 시편의 집합 조직과 응력 축의 각도관계로 인해 ND시편의 경우 인장시 초기 primary twin이 형성되고 RD시편의 경우 압축시 초기 primary twin이 형성되어 변형 이방성을 나타내었다.

(3) Fully reversed strain control fatigue test동안 발생한 비대칭적인 hysteresis loop로 인해 compressive mean stress를 가지는 ND시편이 tensile mean stress를 가지는 RD시편 보다 우수한 피로 저항성을 나타내었다.

후 기

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

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] S. Hasegawa, 2007, Evaluation of low cycle fatigue life in AZ31 magnesium alloy, Int. J. Fatigue, Vol. 29, pp. 1839~1845.
- [3] Robert E. Reed-Hill, R. Abbaschian: Physical Metallurgy Principles, PWS publishing company, Boston 1991.
- [4] P. R. V. Evans, N. B. Owen, L. N. McCartney, 1974, Mena stress effects on fatigue crack growth and failure in a rail steel, Eng. Fract. Mech., Vol. 6, pp. 183~193.