

AZ31 마그네슘 합금판재의 소성변형특성

박진기¹ · 김영석¹ · Toshihiko Kuwabara² · 유봉선³

Plastic Deformation Characteristic of AZ31 Magnesium alloy Sheet

J. G. Park, Y. S. Kim, T. Kuwabara, B. S. You

Abstract

In recent years, there has been a growth of the manufacture and application of magnesium products because of its small specific gravity as well as its relatively high strength. However, there are so many studies to assure good formability because magnesium sheet alloy is difficult to form. In this study, uniaxial tensile and biaxial tensile test of AZ31 magnesium sheet alloy with thickness of 1.2mm were performed at room temperature. Uniaxial tensile test were performed until 7% of engineering strain. R-values and stress-strain curve were obtained. Biaxial tensile tests with cruciform specimen were performed until the breakdown of the specimen occurs. The yield loci are made by application of plastic work theory. The results are compared with the theoretical predictions based on the Hill and Logan-Hosford model. However, next study will be performed at warm-temperature because the specimens are broken under the 0.5% of equivalent strain at biaxial tensile test.

Key Words : AZ31, Magnesium, Yield surface, Logan-Hosford model, Biaxial tensile test

1. 서론

자동차가 배출하는 배기가스는 환경오염과 지구 온난화의 주 원인으로 지적되어 차량 경량화를 통하여 연비를 향상시키고자 하는 연구가 활발히 행해지고 있다[1~3]. 마그네슘 합금은 경량소재로서, 밀도가 알루미늄에 비해 2/3, 철에 비해 1/5 정도이고 비강도와 비강성이 타 금속에 비해 뛰어난 기계적 특성을 가지고 있다. 또한 열 및 전기 전도도, 전자파 차폐 및 방열성 등이 우수하며 진동, 충격 등에 대한 흡수성이 뛰어나기 때문에 자동차, 항공기 등의 수송기기, 일반기계 그리고 노트북 컴퓨터 등과 같은 첨단 산업분야에서 널리 이용되고 있다. 그러나 마그네슘 합금은 육

방조밀구조(Hexagonal Close Packed Structure, HCP)로 슬립계가 매우 적을 뿐 아니라 슬립계와 슬립기구가 명확히 규명되어있지 않아 판재 프레스 가공에 많은 한계를 갖고 있다.

최근 마그네슘 합금소재와 벌크재료의 가공기술에 관한 연구결과는 많이 보고되고 있으나[4,5] 압연 판재의 소성변형 특성규명에 관한 연구는 많지 않다[6~8]. 따라서 마그네슘 판재의 부품제조를 위한 가공기술 확보를 위해서는 소성변형거동(항복곡면형상, 집합조직, 스프링백 등)에 대한 체계적인 연구가 절실히 필요하다.

본 연구에서는 노트북 컴퓨터의 케이스 등에 널리 활용되고 있는 마그네슘 판재 AZ31B를 대상으로 2축 인장시험기를 이용하여 단축 인장과

1. 경북대학교 기계공학부
2. 일본 도쿄농업공업대학 기계공학부
3. 한국기계연구원 재료연구부 경량재료그룹

2 축 인장실험을 수행하여, 이방성 계수(R) 값과 가공경화지수(n)값과 같은 기본 물성을 구하였으며, 등가 소성일의 원리를 적용하여 AZ31 마그네슘합금판재의 항복곡면을 도출하였다.

2. 기초이론

2.1 등가 소성일의 원리

다축 응력 하에서 발생하는 소성 변형률 증분 $d\varepsilon_{ij}^p$ 의 크기를 단축 인장 변형률과 비교하여 상대적으로 나타내기 위해 상당 소성 변형률 증분의 개념을 도입한다. 응력 σ_{ij} 하에서 소성 변형률 증분 $d\varepsilon_{ij}^p$ 가 생기는 경우에 이 소성변형에 필요한 단위 체적 당 소성일 증분 dW^p 는 다음과 같이 정의 된다[9].

$$dW^p = \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^p \quad (1)$$

이를 2 축 응력상태로 나타내면,

$$dW^p = \sigma_x d\varepsilon_x + \sigma_y d\varepsilon_y \quad (2)$$

2.2 이방성 항복 조건식

2 축 인장 실험결과와 비교하기 위한 다음과 같은 항복 조건식을 도입하였다.

2.2.1 von Mises 의 항복 조건식

단축인장시의 항복응력을 $\bar{\sigma}$ 라고 정의 하고, 판재의 압연방향, 폭 방향 그리고 판 두께 방향을 각각 이방성 주 축과 일치시켜 나타내면, von Mises 의 항복 조건식은 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\}} \quad (3)$$

본 실험에서는 2 축 평면응력 상태에 있으므로 윗 식은 다음과 같이 간단히 정리된다.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2} \quad (4)$$

항복곡면에서 응력증분 벡터와 x 축이 이루는 각을 φ 라고 두면,

$$\sigma_y = \sigma_x \tan \varphi \quad (5)$$

식 (5)를 식(4)에 대입하여 정리하면,

$$\sigma_x = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{\tan^2 \varphi - \tan \varphi + 1}} \quad (6)$$

$0^\circ < \varphi < 90^\circ$ 이며, 식(6)에서 구한 σ_x 를 식(5)에 대입해서 σ_y 를 구하여 항복곡면을 작성할 수 있다.

또한 소성 변형률증분 방향은 다음과 같은 식에서 구할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{d\varepsilon_y^p}{d\varepsilon_x^p}\right) \quad (7)$$

2.2.2 Hill's 1948 항복 조건식[10]

Hill's 1948 항복 조건식은 다음과 같이 표현된다.

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{xz}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 \quad (8)$$

여기서 F,G,H,L,M,N 은 이방성 매개변수이며 x, y, z 가 주 응력축이면, 윗식은 다시 다음과 같이 간단히 정리된다.

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2}{G+H} \quad (9)$$

또한, $r_0 = H/G$ 와 $r_{90} = H/F$ 를 식(9)에 대입하고 2 축 인장상태조건 ($\sigma_z = \sigma_{xy} = 0$)을 가정하면 다음과 같이 정리된다.

$$\sigma_x = \bar{\sigma} \sqrt{\frac{r_{90}(1+r_0)}{r_{90}(1+r_0) - 2r_0 r_{90} \tan \varphi + r_0(1+r_{90}) \tan^2 \varphi}} \quad (10)$$

2.2.3 Logan & Hosford 의 항복 조건식[11]

Logan & Hosford 의 항복 조건식은 다음과 같이 표현된다.

$$F|\sigma_y - \sigma_z|^M + G|\sigma_z - \sigma_x|^M + H|\sigma_x - \sigma_y|^M = 1 \quad (11)$$

2 축 인장 상태에 대해서 윗 식을 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_x = \bar{\sigma} \left\{ \frac{r_{90}(1+r_0)}{r_{90} + r_0 \tan^M \varphi + r_0 r_{90} (1 - \tan \varphi)^M} \right\}^{\frac{1}{M}} \quad (12)$$

여기서 M 은 항복곡면의 상계해를 잘 나타내도록 결정되는 값으로 일반적으로 BCC 금속에 대해서는 M=6, FCC 금속에 대해서는 M=8~10 이 실험 결과를 잘 나타내는 것으로 알려져 있으며 본 연

구에서는 M=8 을 채택하였다.

3. 실험방법 및 결과

3.1 단축 인장실험

Fig.1 에 나타난 시편을 이용하여 상온에서 단축 인장실험을 하여 공칭 변형률이 7%일 때 이방성 계수를 측정하였다. 또한 각 방향별로 인장실험을 하여 n 승 경화 강소성 재료 모델인 Swift 커브피팅(curve fitting)을 하여 얻어지는 재료상수들을 Table 1 에 나타내었다. 또한 각 방향별 응력-변형률 선도(Stress-strain curve)를 Fig. 2 에 나타내었다.

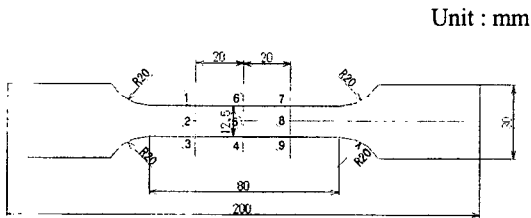


Fig. 1 Specimen for uniaxial tensile test

Table 1 Mechanical properties of the material

Tensile direction (°)	E (GPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	c^*	n^*	α^*	r^{**}
0	42.4	187.3	385.9	0.125	0.0022	2.64
45	41.8	198.0	376.7	0.110	0.0016	
90	42.4	212.0	385.9	0.116	0.0045	5.10

* Approximated using $\sigma = c(\alpha + \epsilon^p)^n$ for $\epsilon^p = 0.002 \sim 0.06$

** Measured at uniaxial plastic strain $\epsilon^p = 0.06$

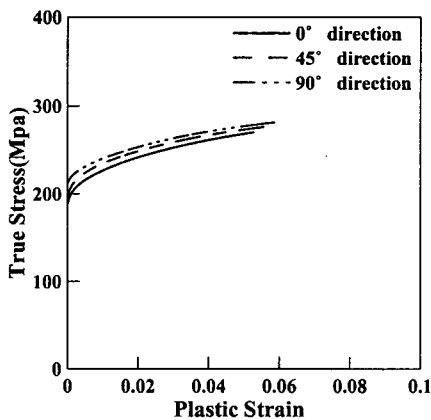


Fig. 2 Comparison of different directions

3.2 2 축 인장실험

Fig. 3 에 실험에 사용한 2 축 인장시편의 형태를 나타내었다. 시편의 홈은 레이저로 가공하였으며, Fig. 4 에 나타난 2 축 인장시험기를 이용하여 X 축과 Y 축의 응력비를 1:4, 1:2, 1:1, 2:1, 4:1 로 달리하여 실험을 하였다. 2 축 인장시험기는 각 방향별로 4 개의 유압 실린더로 응력을 제어하게 되며, 팬토그래프형의 링크 메커니즘(Pantograph-type link mechanism)을 이용하여 서로 마주보는 유압실린더의 응력을 동일하게 제어할 수 있도록 되어있다. 변형률은 Fig. 3 에 나타난 바와 같이 스트레인 게이지(Strain gage)를 통해 측정하였으며, 이로부터 얻은 응력-변형률 선도를 Fig. 5 에 나타내었다. 저면관계상 응력비가 1:2 와 1:4 인것은 생략하였다.

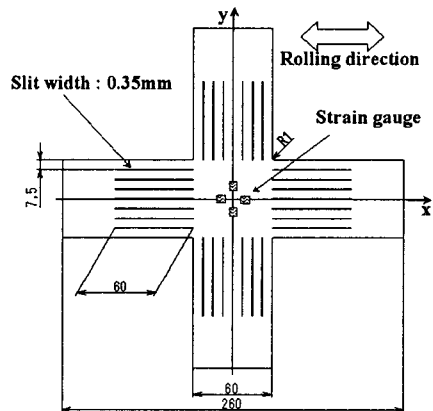


Fig. 3 Specimen for biaxial tensile test

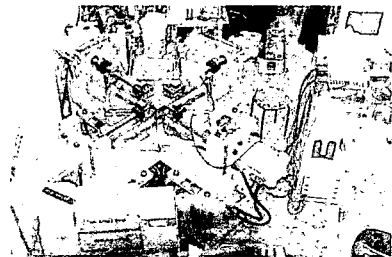
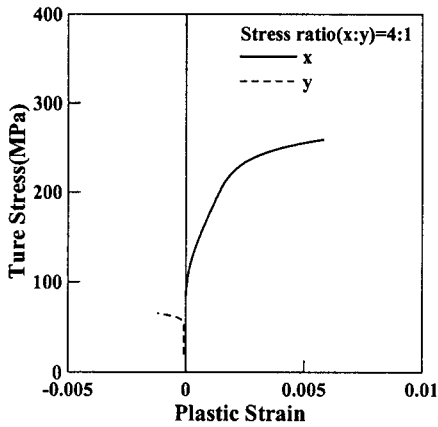
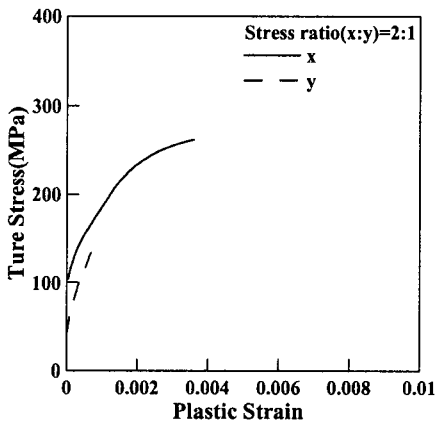


Fig. 4 Experimental apparatus for biaxial tensile test

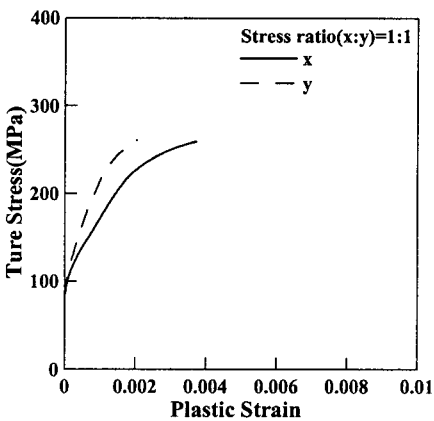
응력비가 1:1 인 등 2 축 인장 상태인 (c)를 보면 동일한 응력 상태에서 변형은 압연방향으로 더 잘 됨을 알 수 있으며, 또한 응력비가 2:1 인 (b)에서는 이론적으로 한쪽방향의 변형이 영이 되는 평면변형이 일어나지 않음을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Stress-strain curve at each stress ratio

3.3 항복곡면의 작성

단축 응력-변형을 선도로부터 소성일을 계산하여 각 등가 소성 변형률에 따른 소성일을 Table 2에 나타내었다. Table 3에서는 다양한 응력비의 2축인장하에서 소성일을 식(2)에 의해 계산하고, 이 값이 Table 2의 단축 인장하에서의 소성일과 같게 될 때의 각 방향별 응력값을 나타내었다.

Table 2 Plastic works for each plastic strains

ε^p_0	0.0005	0.001	0.002
W	0.053365	0.122064	0.292429

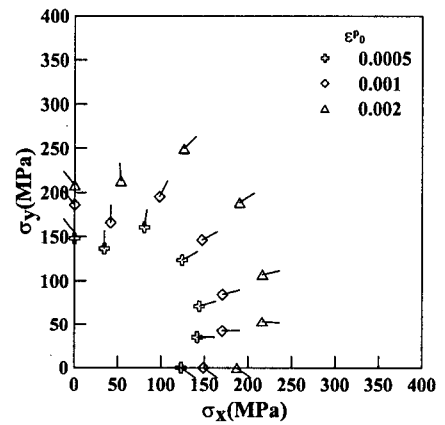


Fig. 6 Experimental data points for contours of plastic work.

Table 3 Equivalent stresses for each equivalent plastic strains.(unit : MPa)

ε^p_0 응력비	0.0005		0.001		0.002	
	x	y	x	y	x	y
1:0	123	0	148	0	187 (187)	0
4:1	141	34	170	42	216	53
2:1	143	71	170	84	216	107
1:1	124	123	146	146	189	188
1:2	80	160	97	195	126	249
1:4	34	136	41	166	53	213
0:1	0	154	0	186	0	208 (212)

(): 단축 인장실험에서 0.2% off-set 항복응력

Fig. 6은 Table 3을 이용하여 항복곡면을 나타낸 것이다. 각각의 심볼은 임의의 등가 소성 변형률에 해당하는 소성일의 등고를 나타내며 각 심볼에 붙어있는 짧은 선은 소성 변형률 증분

참고 문헌

벡터의 방향을 나타낸다. Fig. 7에서는 실험에서 구한 항복곡면을 임의의 소성 변형률에서의 X 방향의 항복응력 σ_0 로 무차원화시켜 von Mises, Hill 그리고 Logan-Hosford의 항복조건식과 비교하여 나타내었다.

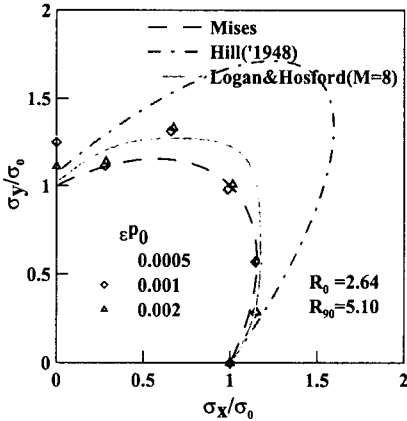


Fig. 7 Comparison of experimental data points for contours of plastic work with theoretical yield loci.

Fig. 7의 결과로부터 본 실험에 사용된 AZ31 판재는 Logan-Hosford의 항복조건식이 실험결과와 부합하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 마그네슘 합금 AZ31 압연 판재에 대해 단축과 2축 인장 실험을 행하여 항복곡면을 도출하였다. 이 실험으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) Logan-Hosford의 항복조건식이 2축 인장 실험 결과와 잘 부합한다.

후속 연구로는 고온 2축 인장시험기를 제작하여 고온에서의 마그네슘 합금의 성형성을 평가에 대해서 연구를 진행할 것이다.

후 기

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업의 연구비 지원에 의해 행해졌으며 이에 관계자 제위께 감사드립니다. 또한 본 실험을 도와준 Kuwabara 연구실의 Masauki Syuno 조교께 감사드립니다.

- [1] 김영석, 1992, 알루미늄 판재성형기술의 현황과 과제, 한국자동차공학회지, Vol. 14, No. 1, pp. 3~12
- [2] Y. S. Kim, C. Kim, S. Y. Lee, S. Y. Won, and S. M. Hwang, 2003, Forming limits for anisotropic sheet metals, JSME Int. J., Vol. 46A, No. 4, pp. 627~634
- [3] D. Li and A. Ghosh, 2003, Tensile deformation behavior of aluminum alloys at warm forming temperatures, Mat. Sci. Eng., Vol. 352A, pp. 279~286
- [4] Nahed A. El-Mahallawy, Mohamed A. Taha, Engenius Pokora, and Friedrich Klein, 1998, On the influence of process variables on the thermal conditions and properties of high pressure die-cast magnesium alloys, J. Mat. Pro. Tech., Vol. 73, pp. 125~138
- [5] B.H. Hu, K.K. Tong, X.P. Niu, and I. Pinwill, 2000, Design and optimization of runner and gating systems for the die casting of thin-walled magnesium telecommunication parts through numerical simulation, J. Mat. Pro. Tech., Vol. 105, pp. 128~133
- [6] 원성연, 오상균, Kozo Osakada, 박진기, 김영석, 2004, AZ31 마그네슘 합금 판재의 기계적 특성 평가(1), 한국소성가공학회 2004년도 춘계학술대회 논문집, pp. 53~56.
- [7] 이영선, 김민철, 권용남, 이정환, 2004, Mg 합금 판재 냉간 성형품의 탄성회복량 예측, 한국소성가공학회 2004년도 춘계학술대회 논문집, pp. 43~46
- [8] 김수현, 임창동, 유봉선, 서영명, 정인상, 2004, 열간 압연한 AZ31 마그네슘 합금 판재의 미세조직 발달에 관한 연구, 제 5 회 압연심포지엄, 한국소성가공학회, pp. 63~71
- [9] 김영석, 2003, 소성역학, 시그마프레스
- [10] R. Hill, 1950, The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford University Press, Oxford, UK
- [11] R. W. Logan, and W. F. Hosford, 1980, Upper-bound anisotropic yield locus calculations assuming <111> pencil glide, Int. J. Mech. Sci., Vol. 22-7, pp. 419~430