

# AZ31 마그네슘 합금판재의 소성변형특성

박진기<sup>1</sup> · 김영석<sup>#</sup> · Toshihiko Kuwabara<sup>2</sup> · 유봉선<sup>3</sup>

## Plastic Deformation Characteristic of AZ31 Magnesium Alloy Sheet

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

(Received May 12, 2005)

### 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 tests of AZ31 magnesium sheet alloy with thickness of 1.2mm were performed at room temperature. Uniaxial tensile tests were performed until 7% of engineering strain. Lankford 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 were calculated by application of plastic work theory. The results are compared with the theoretical predictions based on the Hill and Logan-Hosford model. In this study, Hill's 1979 yield function for the case of  $m=2.8$  and Logan-Hosford yield function for the case of  $M=8$  give good agreements with experimental results. 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. 서 론

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 그리

고 노트북 컴퓨터 등과 같은 첨단 산업분야에서 널리 이용되고 있다. 그러나 마그네슘 합금은 육방조밀구조(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. 따라서 마그네슘 판재의 부품제조를 위한 가공기술 확보를 위해서는 소성변형거동(항복곡면형상, 집합조직, 스프링백 등)에 대한 체계

1. 경북대학교 기계공학부  
2. 일본 도쿄농업공업대학 기계공학부  
3. 한국기계연구원 재료연구부 경량재료그룹  
# 교신저자: 경북대학교 기계공학부  
E-mail : caekim@knu.ac.kr

적인 연구가 절실히 필요하다.

김수현등[6]은 열간 압연한 AZ31 마그네슘 합금 판재의 미세조직 발달에 관한 연구를 수행하였으며, 이영선등[7]은 마그네슘 합금 판재를 냉간 성형하여 탄성 회복량을 예측하는 연구를 수행하였다. 한편, 원성연등[8]은 상온에서부터 200℃의 온도 범위에서 단축인장 실험을 행하여 200℃ 부근에서 이방성 계수가 1.0에 근접하여 등방성이 나타나고 가공경화 지수가 감소하여 가공 경화특성이 거의 나타나지 않는다는 것을 밝혔다. 또한, 상온에서는 결정립들이 조대하고 균일하지만 200℃ 부근에서는 재결정이 일어나 결정립이 미세하게 됨을 확인하였다. 그리고 Li 등[9]은 250℃ 부근에서 마그네슘 합금이 초소성이 되는 현상을 보였는데, 이는 미세한 결정들과 미세구조의 등방성과 같은 복합적인 영향 때문인 것으로 밝혀졌다[9].

본 연구에서는 노트북 컴퓨터의 케이스 등에 널리 활용되고 있는 마그네슘 판재 AZ31B를 대상으로 2축 인장시험기를 이용하여 단축 인장과 2축 인장실험을 수행하였다. 이를 통해 이방성 계수(R) 값과 가공경화지수(n)값과 같은 기본 물성을 구하였으며, 등가 소성일의 원리를 적용하여 AZ31 마그네슘합금판재의 항복곡면을 도출하여 마그네슘 합금판재의 성형공정에 대한 CAE 해석에 필요한 기초 데이터를 확보하고자 하였다.

## 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  $\sigma_{ij}$  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[10].

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

이를 2축 응력상태로 나타내면,

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

### 2.2 이방성 항복 조건식

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

### 2.2.1 von Mises의 항복 조건식

단축인장시의 항복응력을  $\bar{\sigma}$ 라고 정의 하고, 판재의 압연방향, 폭 방향 그리고 판 두께 방향을 각각 이방성 주 축과 일치시켜 나타내면, von Mises의 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 2축 평면응력 상태에 있으므로 위 식은 다음과 같이 간단히 정리된다.

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

항복곡면에서 응력증분 벡터와 x축이 이루는 각을  $\varphi$ 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  $\sigma_x$ 를 식(5)에 대입해서  $\sigma_y$ 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[11]

Hill's 1948 항복 조건식은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 F,G,H,L,M,N은 이방성 매개변수이며 x, y, z가 주 응력축이면, 위식은 다시 다음과 같이 간단히 정리된다.

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2}{G+H} \quad (9)$$

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

$$\sigma_x = \bar{\sigma} \sqrt{\frac{r_{90}(1+r_0)}{r_{90}(1+r_0) - 2r_0r_{90}\tan\phi + r_0(1+r_{90})\tan^2\phi}} \quad (10)$$

2.2.3 Logan & Hosford의 항복 조건식[12]  
Logan & Hosford의 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 위 식을 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_x = \bar{\sigma} M \sqrt{\frac{r_{90}(1+r_0)}{r_{90}(1+r_0) - 2r_0r_{90}\tan\phi + r_0(1+r_{90})\tan^2\phi}} \quad (12)$$

여기서 M은 항복곡면의 상계해를 잘 나타내도록 결정되는 값으로 일반적으로 BCC금속에 대해서는 M=6, FCC금속에 대해서는 M=8~10이 실험결과를 잘 나타내는 것으로 알려져 있다. Logan-Hosford의 항복조건식은 항복곡면이 타원형이 아닌 경우를 표현하기 위해 제안되었으며, 본 연구에서는 M=8로 채택 하였을 때 AZ31마그네슘 합금 판재의 항복곡면을 잘 표현할 수 있었다.

2.2.4 Hill's 1979 항복조건식[13]

Hill's 1979 항복 조건식은 다음과 같이 표현된다.

$$F|\sigma_2 - \sigma_3|^m + G|\sigma_3 - \sigma_1|^m + H|\sigma_1 - \sigma_2|^m + A|2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3|^m + B|2\sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_1|^m + C|2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2|^m = 1 \quad (13)$$

2 축 인장상태에 대해서 위 식을 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_x = \bar{\sigma} \sqrt[m]{\frac{2(r_0 + 1)}{(2r_0 + 1)(1 - \tan\phi)^m + (1 + \tan\phi)^m}} \quad (14)$$

일반적으로 Hill's 1979년 항복식은 등, 알루미늄 등과 같이 모든 방향에서 이방성계수가 1 보다 작은 재료인 경우에도 등 2 축 인장에서의 항복응력이 단축인장에서보다 크다는 실험사실을 뒷받침하기 위해 제안되었다. 본 실험에서 측정된 이방성 계수가 1 보다 작진 않지만 m=2.8 로 채택 하였을 때 실험결과를 가장 잘 근사화하는 것을 확인할 수 있었다. 다음의 식은 식 (13)을 등 2 축 인장상태에 대해서 정리 한 것이다.

$$\sigma_b = \frac{\sqrt[m]{2(1+r_0)}}{2} \bar{\sigma} \quad (15)$$

Table 1 Standard chemical composition of test material (mass %)

	Al	Zn	Mn	Ni	Fe	Cu	Ca	Mg
AZ31B-H24	3	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	Bal

Unit : mm

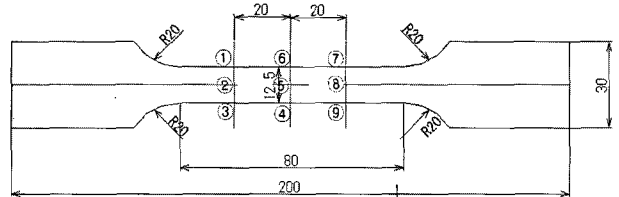


Fig. 1 Specimen for uniaxial tensile test

Table 2 Mechanical properties of the material

Tensile direction (°)	E (GPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	c*	n*	$\alpha^*$	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	4.15
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  $\epsilon^p = 0.06$

식 (15)에서도 알 수 있듯이  $1 + r_0 > 2^{m-1}$  을 만족해야 한다. 그래서 m < 2.86 이어야 한다. 본 연구에서 채택한 m=2.8 은 이를 만족하고 있다.

3. 실험방법 및 결과

3.1 단축 인장실험

인장 실험을 위해 변형 경화되고 부분적으로 열처리된 마그네슘 합금 AZ31 판재를 사용하였으며, 재료의 화학조성은 Table 1 에 나타내었다.

Fig.1 에 나타낸 시편을 이용하여 상온에서 단축 인장실험을 하여 공칭 변형률이 7%일 때 이방성 계수를 측정하였다. 이방성 계수는 Fig. 1 에 나타낸 1 ~ 9 의 각 부분에 대하여 실험 전과 실험 후의 상대좌표를 측정한 후 폭 방향과 길이 방향의 변형률을 계산하여 식 (16)의 방법에 따라 구하였다.

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_l} \quad (16)$$

측정은 각 방향에 따라 3 회씩 실시하였으며,

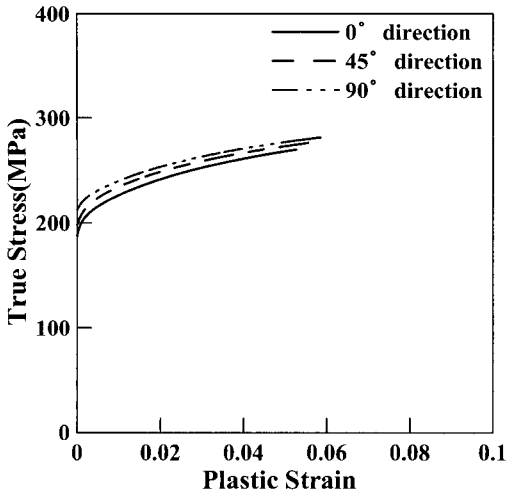


Fig. 2 Comparison of different directions

측정값의 표준편차는 각각 0.005, 0.02, 0.5 이다. 또한 각 방향별로 인장실험을 하여 n 승 경화 강소성 재료 모델인 Swift 커브피팅(Curve fitting)을 하여 얻어지는 재료상수들을 Table 2 에 나타내었다. 또한 각 방향별 응력-변형률 선도(Stress-strain curve)를 Fig. 2 에 나타내었다.

3.2.2 축 인장실험

Fig. 3 에 실험에 사용한 2축 인장시편의 형태를 나타내었다. 시편의 홈은 레이저로 가공하였으며, Fig. 4 에 나타난 2축 인장시험기를 이용하여 X 축과 Y 축의 응력비를 1:4, 1:2, 1:1, 2:1, 4:1 로 달리하여 실험을 하였다. 2축 인장시험기는 각 방향별로 4 개의 유압 실린더로 응력을 제어하게 되며, 팬토프로그형의 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.

응력비가 1:1인 등 2축 인장 상태인 (c)를 보면 동일한 응력 상태에서 변형은 압연방향으로 더 잘 뒜을 알 수 있으며, 또한 응력비가 2:1, 1:2인 (b)와 (d)에서는 이론적으로 한쪽 방향의 변형이 영이 되는 평면변형이 일어나지 않음을 알 수 있다. 그리고 응력비가 4:1, 1:4인 (a)와 (e)에서는 응력의 크기가 적은 방향으로 수축변형이 일어남을 알 수 있다.

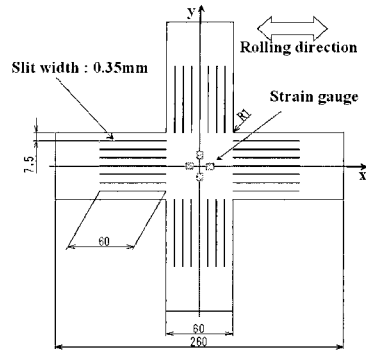


Fig. 3 Specimen for biaxial tensile test

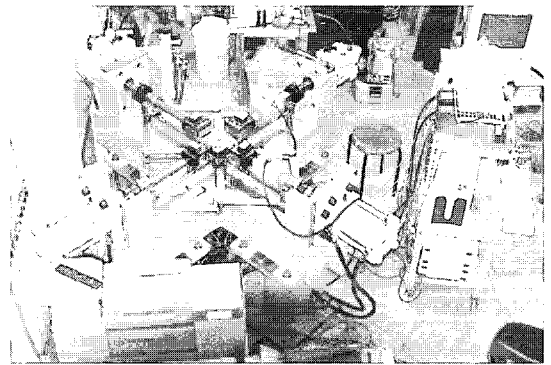


Fig. 4 Experimental apparatus for biaxial tensile test

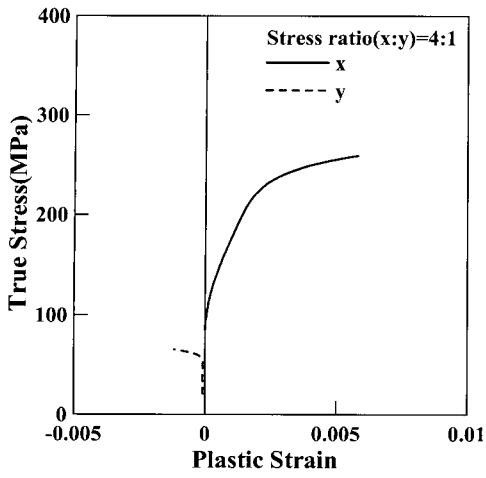
3.3 항복곡면의 작성

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

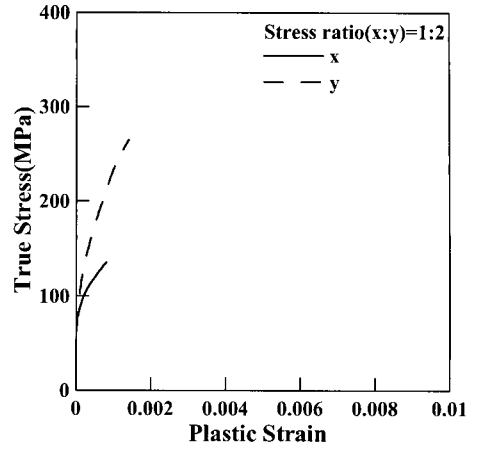
Fig. 6 은 Table 4 을 이용하여 항복곡면을 나타낸 것이다. 각각의 심볼은 임의의 등가 소성 변형률에 해당하는 소성일의 등고를 나타내며 각 심볼에 붙어있는 짧은 선은 소성 변형률 증분 벡터의 방향을 나타낸다. 소성 변형률 증분 벡터는 2 축 인장시험기로부터 매 0.5 초 마다 출력되는

Table 3 Plastic works for each plastic strains

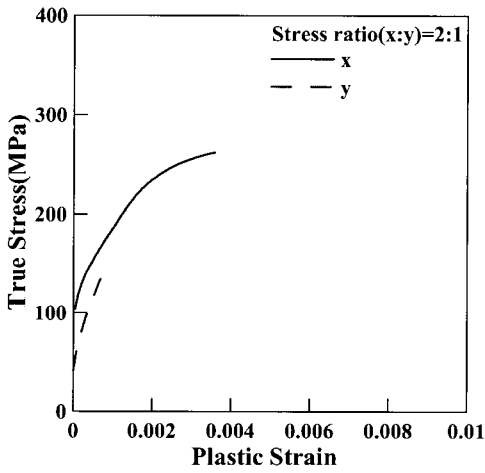
$\epsilon^p_0$	0.0005	0.001	0.002
W	0.053365	0.122064	0.292429



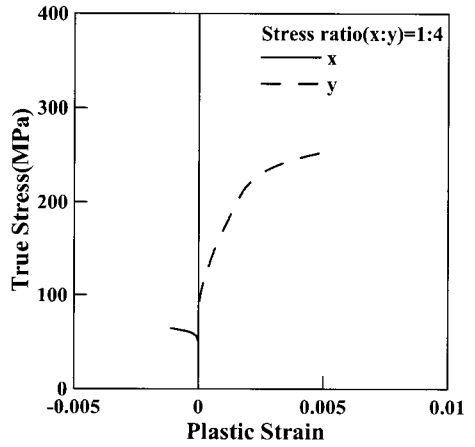
(a)



(d)

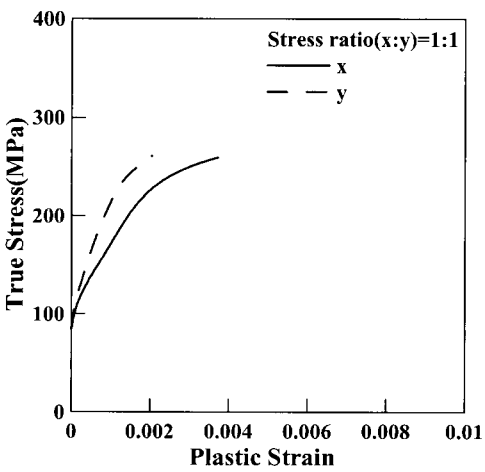


(b)



(e)

Fig. 5 Stress-strain curve at each stress ratio



(c)

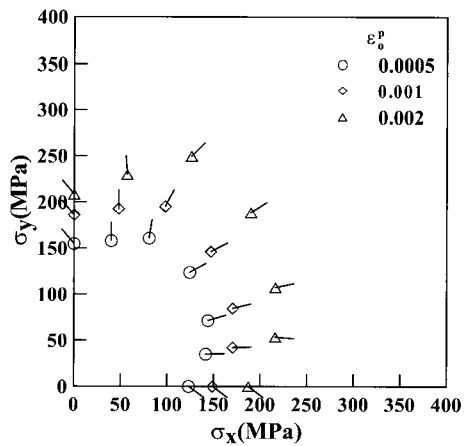


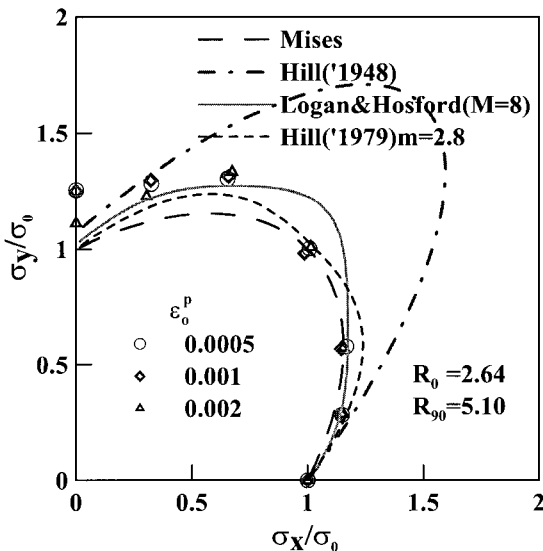
Fig. 6 Experimental data points for contours of plastic work

각 방향별 소성변형률을 이용하여 식(7)에 따라 구하였다.  $\epsilon_0^p = 0.002$ , 즉  $W=0.2924\text{MPa}$  인 경우에 4:1, 2:1, 1:1, 1:2 그리고 1:4 의 응력비에 따른 소성 변형률 증분방향의 각도는 각각 -5, 12, 32, 44 그리고 93 도로 나타났다. Fig. 7 에서는 실험에서 구한 항복곡면을 각각의 등가 소성 변형률에서의 X 방향의 항복응력  $\sigma_0$  로 무 차원화 시켜 von Mises, Hill('1948), Logan-Hosford(M=8) 그리고 m=2.8 일 때 Hill('1979) 의 항복조건식과 비교하여 나타내었다.

**Table 4 Equivalent stresses for each equivalent plastic strains(unit : MPa)**

$\epsilon_0^p$	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	40	158	48	193	57	230
0:1	0	154	0	186	0	208 (212)

( ) : 0.2% off-set yield stress in uniaxial tensile test at each direction



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

Fig. 7에 나타난 것과 같이 본 실험에 사용된 AZ31 마그네슘 판재의 소성 항복거동은 Logan-Hosford(M=8) 와 m=2.8일 때 Hill('1979)의 항복 조건식으로 가장 근사하게 표현된다.

Logan-Hosford 의 항복 조건식은 BCC 와 FCC 금속에 대해서 실험결과를 잘 나타내는 지수 M 이 알려져 있지만 HCP 금속에 대해서는 알려져 있지 않다. M 의 값을 크게 하면 Tresca 의 항복곡면에 수렴하고 M 값을 작게하여 2 가 되면 Hill('1948)식으로 수렴하게 된다. 그래서 Fig. 7 에 나타낸 것과 같이 M=8 로 하였을 때, Logan-Hosford 항복 조건식은 실험결과를 근사하게 표현하지만 실험결과 의 등 2 축 인장상태를 과대평가하고 있다.

또한, Hill('1979)의 항복 조건식이 실험결과를 가장 근사하게 표현하나 Hill('1979)의 항복 조건식은 재료가 평면 등방성일 경우를 표현하기 위해 제안되었다. 하지만 Table 2에 나타난 것과 같이 AZ31 마그네슘 판재가 평면 등방성이 아님을 자명하다. 그러나 본 연구실의 내부 연구 보고서인 '알루미늄판재(3004-O)의 기계적 특성 분석'[14]에 따르면 Hill('1979)의 항복조건식이 이방성 재료인 알루미늄의 항복곡면을 잘 표현함을 알 수 있었다. 그래서 본 연구에서는 m=2.8일 때 Hill('1979)의 항복조건식이 AZ31 마그네슘 합금 판재의 항복곡면을 가장 근사하게 표현한다고 판단된다.

그러나 엄밀하게는 AZ31 마그네슘 합금 판재의 항복곡면은 이방성조건을 만족하며 타원형이 아닌 항복조건식을 따르는 것으로 판단되며, 마그네슘 합금 판재의 항복곡면을 표현하는 새로운 항복 조건식에 대한 연구가 이루어져야 하겠다. 또한, 실제 마그네슘 합금의 성형 온도인 200℃부근에서의 소성변형 거동에 대해서도 연구가 이루어져야 할 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 마그네슘 합금 AZ31 압연 판재에 대해 단축과 2 축 인장 실험을 행하여 항복곡면을 도출하였다. 이 실험연구결과 M=8 일 때 Logan-Hosford 항복 조건식과 m=2.8로 채택하였을 때 Hill('1979)의 항복조건식이 실험을 통한 항복곡면을 잘 근사하고 있지만 결정구조나 이방성현상을 고려하면, AZ31 마그네슘 합금 판재의 항복곡면을 좀더 잘 표현할 수 있는 식을 제안하는 것이 필요하다.

또한, 고온 2 축 인장시험기를 제작하여 고온에서의 마그네슘 합금의 성형성 평가에 대해서 연구를 진행할 것이다.

### 후 기

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

### 참 고 문 헌

- [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, S. M. Hwang, 2003, Forming limits for anisotropic sheet metals, JSME Int. J., Vol. 46A, No. 4, pp. 627~634.
- [3] D. Li, 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] 김수현, 임창동, 유봉선, 서영명, 정인상, 2004, 열간 압연한 AZ31 마그네슘 합금 판재의 미세조직 발달에 관한 연구, 제 5 회 압연심포지엄, 한국소성가공학회, pp. 63~71.
- [7] 이영선, 김민철, 권용남, 이정환, 2004, Mg 합금 판재 냉간 성형품의 탄성회복량 예측, 한국소성가공학회 2004 년도 춘계학술대회 논문집, pp. 43~46.
- [8] 원성연, 오상균, Kozo Osakada, 박진기, 김영석, 2004, AZ31 마그네슘 합금 판재의 기계적 특성 평가(1), 한국소성가공학회 2004 년도 춘계학술대회 논문집, pp. 53~56.
- [9] L. Lin, Z. Liu, L. Chen, T. Liu, S. Wu, 2004, Microstructure evolution and low temperature superplasticity of ZK40 magnesium alloy subjected to ECAP, Met. Mat. Int., Vol. 10, No. 6, pp. 501~506.
- [10] 김영석, 2003, 소성역학, 시그마프레스.
- [11] R. Hill, 1950, The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford University Press, Oxford, UK.
- [12] 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.
- [13] R. Hill, 1979, Theoretical plasticity of textured aggregates, Proc. Camb. Phil. Soc., Vol. 85, pp. 179~191.
- [14] 김영석, 원성연, 박진기, 신효동, 2005, 알루미늄(3004-O)판재의 기계적 특성 분석.