

## 변형률속도 효과를 고려한 AZ31B 판재의 온간 성형한계도 예측 - II

최선철<sup>1</sup>· 김현영<sup>2</sup>· 김형중<sup>#</sup>

### Prediction of the Forming Limit Diagram for AZ31B Sheet at Elevated Temperatures Considering the Strain-rate Effect - II

S. C. Choi, H.Y. Kim and H. J. Kim

#### Abstract

The purpose of this study is to predict the forming limit diagram (FLD) of strain-rate sensitive materials on the basis of the Marciniak and Kuczynski (M-K) theory. The strain-rate effect is taken into consideration in such a way that the stress-strain curves for various strain-rates are inputted into the formulation as point data, not as curve-fitted models such as power function. Tensile tests and R-value tests were carried out at several levels of temperature and strain-rate from 25 °C to 300 °C and 0.16 to 0.00016 /s, respectively to obtain the mechanical properties of AZ31B magnesium alloy sheet. The FLD of this material was experimentally obtained by limit dome height tests with the punch velocity of 0.1 and 1.0 mm/s at 250 °C. The M-K theory-based FLD predicted using Yld2000-2d yield criterion was compared with the experimental results.

**Key Words** : AZ31B sheet (AZ31B 판재), Forming limit diagram (성형한계도), M-K theory (M-K 이론), Strain-rate (변형률속도)

#### 1. 서론

성형한계도(forming limit diagram, FLD)는 판재의 성형한계를 평가하는 가장 보편적인 방법이다. 다양한 폭을 가진 직사각형 또는 개뼈(dog bone) 형상의 시편을 지름 100 mm 정도의 반구형 펀치로 성형하여 네킹 또는 파단이 일어나는 영역 근처의 변형률 상태를 측정함으로써 여러 가지 변형 모드에서의 성형한계를 평가한다. 하나의 성형한계도를 얻기 위해 많은 비용과 시간이 소모되고, 때로는 기술적 어려움도 수반된다. 따라서 이론이나 유한요소해석과 같은 비실험적 방법으로 성형한계도를 예측하고자 하는 연구가 많이 시도되어왔다.

특히, Marciniak 과 Kuczynski (M-K)[1]는 부변형률이 양인 영역에서의 성형한계를 예측하기 위해 편평한 판재의 일부에 주변형률 방향에 수직으로

설정한 홈(groove)에 걸쳐 두께 또는 강도 상의 초기 결함이 존재하고, 판재가 이축 인장 하에서 변형됨에 따라 국부 넥을 야기한다고 가정하여 성형한계를 예측하였다. 또한, 주응력축에 직각이 아닌 방향의 홈을 가정함으로써 부변형률이 음인 영역까지 예측이 가능하게 되었다. 최근에는 다양한 이방성 항복조건을 사용한 예측 결과를 실험값과 비교·분석한 연구 결과가 많이 보고되고 있다[2-6].

본 연구에서는 선행된 연구에서 제안한 M-K 모델을 이용하여 변형률속도를 고려한 마그네슘 합금판재의 성형한계선을 이론적으로 예측하고 실험으로부터 구한 결과와 비교하였다. 먼저 재료 시험을 통해 온도 및 변형률속도에 따른 응력-변형률 곡선을 얻고, 이방성 항복조의 계수를 구하기 위해 재료 이방성 시험을 진행하였다. 변형률

1. 강원대학교 대학원 기계·메카트로닉스공학과

2. 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부

# 교신저자: 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부,

E-mail: khjong@kangwon.ac.kr

측정에는 2 가지 장비를 이용하여 그 결과를 상호 비교함으로써 측정의 신뢰성을 확인하였으며, 성형한계선을 결정하기 위해 ISO 표준 규격[7]에 명시된 측정법을 따랐다.

## 2. 재료 시험

선행 연구[6]에서는 일본 H 사의 두께 0.5 mm 마그네슘 합금 판재를 사용했으나, 본 연구에서는 동일한 두께의 일본 N 사 재료를 사용하였다. 인장 시험에는 INSTRON 5882 만능재료시험기를 사용하였다. 인장 시편은 표점거리 50 mm 인 KS B0801 13B 호로 제작하였고, 변형률은 비접촉식 측정 장치인 AVE 를 이용하여 측정하였다. 응력-변형률 곡선, 재료 이방성 등 재료의 기계적 물성을 얻기 위해 소재 온도(RT, 100, 150, 200, 250, 300℃) 및 압연 방향(0°, 45°, 90°)별로 인장 시험을 진행하였다. 또한, 압연 방향(0°) 시편으로는 온도 및 속도별로 실험을 수행하여, 변형률속도(0.00016, 0.0016, 0.016, 0.16/s)에 따른 데이터를 확보하였다.

Fig. 1 에는 변형률속도가 0.016 /s 일 때 온도에 따른 응력-변형률 곡선을 나타내었다. 온도가 증가할수록 항복응력 및 인장강도는 낮아지며, 총 연신율은 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 2 는 250℃에서 변형률속도에 따른 응력-변형률 곡선을 나타내었다. 변형률속도가 빠를수록 항복응력 및 인장강도는 증가하나 총 연신율은 감소함을 확인할 수 있다. 온간 인장시험 시 확산넙(diffused neck)으로 인해 표점거리 내의 변형률은 불균일하므로 유동응력이 감소하는 변형연화(strain-softening) 현상을 보인다. 그러나 인장시편에 2×2 mm 정사각형 격자를 입히고, 표점 거리를 6, 14, 26, 50 mm 등으로 다르게 측정하여 응력-변형률을 계산하면 표점거리를 줄일수록 변형률 및 응력은 증가하여, 표점거리가 6 mm 의 경우 Fig. 2 의 점선과 같이 유동응력이 거의 일정하게 나타난다. 표점거리를 더 줄인다면 변형경화(strain-hardening) 거동을 보일 것으로 짐작되나, 그만큼 측정 오차 또한 증가하므로 표점거리가 6 mm 일 때의 응력-변형률 곡선을 선택하여 이론적 성형한계 예측에 사용하였다.

한편, 방향별 이방성을 평가하기 위해 변형률속도를 0.016 /s 로 하여 이방성 시험을 진행하였다. 시편에는 미리 격자를 인쇄하고, 인장 변형에 따른 데이터를 선형으로 근사하여 두께 및 폭 방향

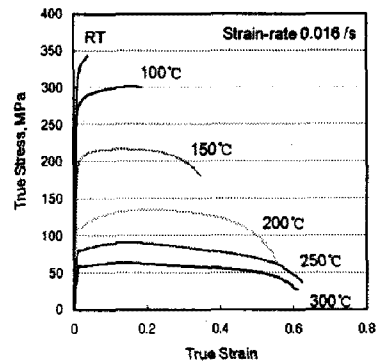


Fig. 1 Stress-strain curve at various temperatures

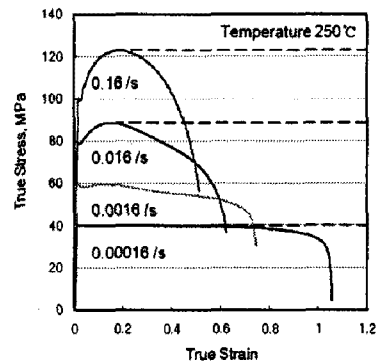
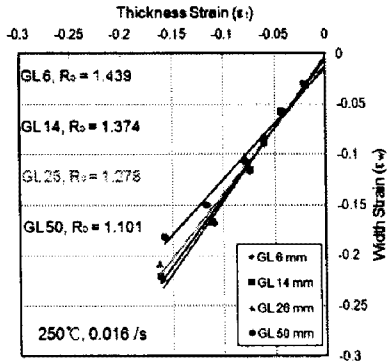


Fig. 2 Stress-strain curve for various strain-rates

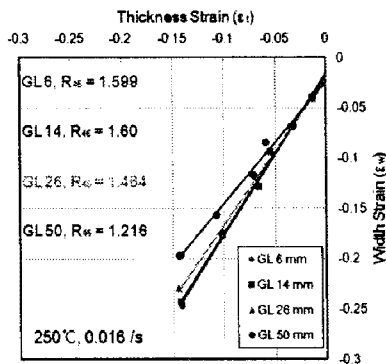
의 변형률증분을 계산하였다. 앞서의 경우와 마찬가지로 방향별로 표점거리를 다르게 하여 R-value 를 계산하였고, 이를 Fig. 3 에 나타내었다. R 값은 90° 방향이 가장 높았으며, 표점거리가 작을수록 높게 나타났다. 표점거리가 작을수록 그 내부의 변형률 분포가 균일하다고 볼 수 있으므로 표점거리 6 mm 일 때의 R 값을 선택하여 사용하였다.

## 3. 성형한계도

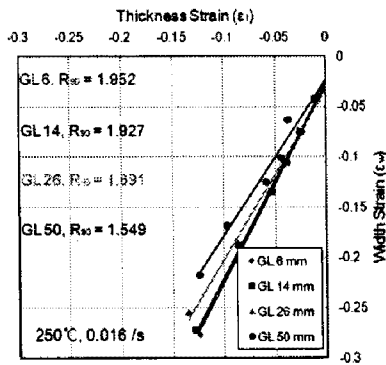
성형한계도를 실험적으로 얻기 위해 가운데가 잘록한 Nakajima 시편을 사용하였다. 펀치 속도는 0.1, 1.0 mm/s 로 하여, 속도에 따른 성형성을 비교하였다. 시편에는 2×2 mm 크기의 정사각형 격자의 중앙에 지름 0.9 mm 의 원형 격자를 함께 인쇄하여, 자체 개발한 자동 변형률측정시스템 ASIAS[8]와 상용 시스템 ARGUS[9]를 이용하여 변형률을 측정하였다. 2 가지 시스템으로부터의 측정 결과는 Fig. 4 에 도시한 주변형률 분포에서 보는 바와 같이 거의 일치하는 결과를 보였으며, 이는 변형률 측정의 정확도를 간접적으로 검증한 것으로 간주할 수 있다.



(a) 0° to RD



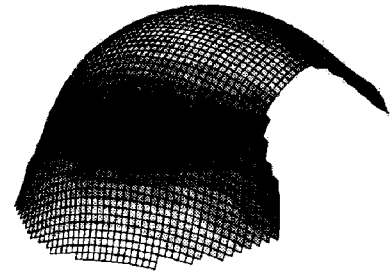
(b) 45° to RD



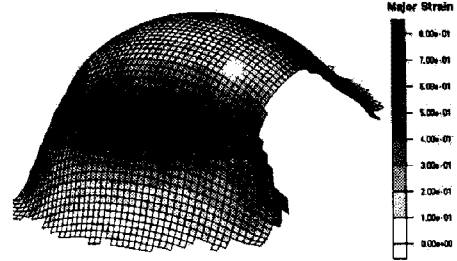
(c) 90° to RD

Fig. 3 Influence of the gage length on R-value

최근 성형한계도 시험에 관한 표준이 ISO12004-2[7]에 명시되었으며, 여기에는 한계 주변형률 및 주변형률 결정에 관한 내용도 자세히 언급되어 있다. 이에 따르면 한계 변형률은 Fig. 5 와 같이 종 모양 곡선(bell-shaped curve)으로 근사하여 결정하게 되어 있다. 이 방법으로 측정할 경우 ASTM 규정 등 기존의 방식으로 측정된 결과보다 성형한계가 다소 낮게 평가되는 경향이 있다. 그러나 경미한 넥이 발생한 경우나 완전한 파단이 일어난 경우에도 비교적 일정한 성형한계를 도출할 수 있고, 격자 크기에 따른 편차도 줄어드는 것으



(a) Measured by ASIAs



(b) Measured by ARGUS

Fig. 4 Major strain distribution of an FLD specimen

로 판단된다.

성형한계도의 이론적 예측을 위해 선행 연구에서 기술한 M-K 이론을 사용하였다. 이방성 항복조건은 Yld2000-2d[10]를 사용하였으며, 다음 7 개의 실험값을 사용하여 계수를 결정하였다.

$$\sigma_0 = 1.0, \sigma_{45} = 1.017, \sigma_{90} = 1.042, \sigma_b = 1.021, \\ r_0 = 1.44, r_{45} = 1.60, r_{90} = 1.95$$

$$a = 8, \alpha_1 = 1.0593, \alpha_2 = 0.9612, \alpha_3 = 1.0340, \alpha_4 = 0.9440, \\ \alpha_5 = 0.9760, \alpha_6 = 1.0020, \alpha_7 = 1.0116, \alpha_8 = 0.9157$$

$$a = 6, \alpha_1 = 1.0645, \alpha_2 = 0.9796, \alpha_3 = 1.0515, \alpha_4 = 0.9342, \\ \alpha_5 = 0.9706, \alpha_6 = 1.0151, \alpha_7 = 1.0228, \alpha_8 = 0.8879$$

등이축 항복응력( $\sigma_b$ )은 0° 및 90° 방향 항복응력의 평균값을 사용하였고,  $C_{12}'' = C_{21}'' = 0$  이라 가정하였다.

M-K 모델 계산 시 초기 변형률중분은 0.0002, 초기 재료결함( $f_0$ )은 0.996 을 사용하였다. 실험 및 이론으로 예측한 결과를 Fig. 6 에 비교하였다. 실험값은 necking 및 안전 요소의 변형률을 모두 표시하였으며, ISO 규정에 명시된 방법으로 성형한계선을 결정하였다.

편치속도 0.1 mm/s 의 경우, 이론적 예측값은 드로잉 모드에서는 실험값과 비슷한 결과를 보이나, 이축인장 모드에서는 전반적으로 상당한 차이를 보이고 있다. 실험에서는 등이축 모드에 가까워질수록 성형한계가 급격히 낮아지는 현상이 나타나,

다른 금속이나 타사 Mg 합금판재에서 보던 일반적인 성형한계선과는 다른 형태를 보이고 있다. 이 때문에 M-K 접근에 의한 예측은 1 사분면에서 특히 실험결과와 큰 차이를 나타낸다.

펀치속도 1.0 mm/s의 경우에는 전반적으로 이론적 예측값이 실험값보다 낮게 나타났으나, 초기 재료결합( $f_0$ ) 값을 적절히 증가시킴으로써 예측값을 상향 조정할 수 있다. 그러나 이축인장에서

는 여전히 실험 결과와 상당한 차이를 나타낸다. 따라서 본 연구에 사용한 재료에 대해서는 M-K 이론에 의한 예측은 동적재결정에 의한 미세조직의 변화 등을 고려한 새로운 접근법이 필요할 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

AZ31B 마그네슘 합금판재의 온간 성형한계도를 얻기 위한 이론적, 실험적 연구를 수행하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 온간 성형한계도 예측을 위해 온도 및 변형률 속도에 따른 인장시험을 수행하였고, 이방성을 평가하기 위해 방향별 이방성 시험을 진행하였다.
- (2) M-K 이론과 Yld2000-2d 이방성 항복조건을 사용하여, 변형률속도를 고려한 성형한계도를 예측하여 실험 결과와 비교·분석하였다.
- (3) 온간 성형한계 예측 결과는 드로잉 모드에서는 실험과 비교적 잘 일치하였으나, 이축인장 모드에서는 상당한 차이를 나타냈다. 이론 및 실험 양면으로부터 보다 정교한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

#### 참고 문헌

- [1] Z. Marciniak, K. Kuczynski, 1967, I. J. Mech. Sci., Vol. 9, pp. 609-620.
- [2] M. C. Butuc, A. B. Rocha, J. J. Gracio, J. F. Duarte, 2002, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 125-126, pp. 213-218.
- [3] A. F. Avila, E. L. S. Vieira, 2003, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 141, pp. 101-108.
- [4] M. Ganjiani, A. Assempour, 2007, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 182, pp. 598-607.
- [5] S. Ahmadi, A. R. Eivani, A. Akbarzadeh, 2009, Com. Mat. Sci., Vol. 44, pp. 1272-1280.
- [6] S.C. Choi and H.J. Kim, 2009, Proc. Spring Conf. KSTP, pp. 172-175.
- [7] International Standard, ISO 12004-2:2008(E)
- [8] D.S. Kim and H.Y. Kim, 1999, KSTP, Vol. 8, pp. 294-305
- [9] ARGUS, GOM mbH., <http://www.gom.com>
- [10] F. Barlat, J.C. Brem, J.W. Yoon, K. Chung, R.E. Dick, D.J. Lega, F. Pourboghrat, S.H. Choi, E. Chu, 2003, Int. J. Plasticity, Vol. 19, pp. 1297-1319.

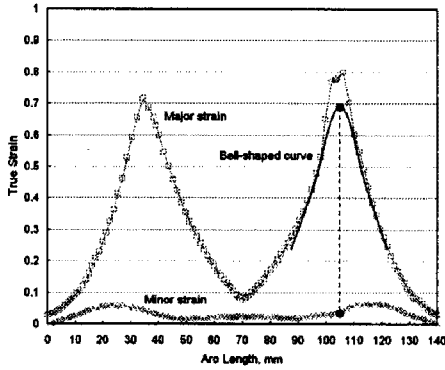
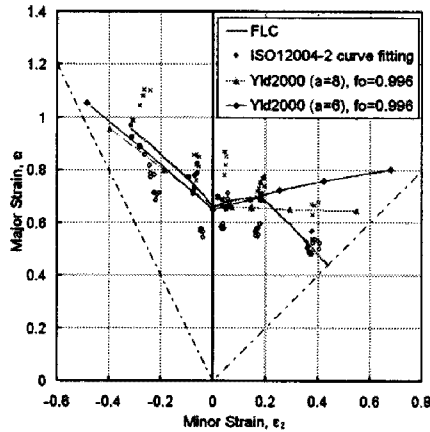
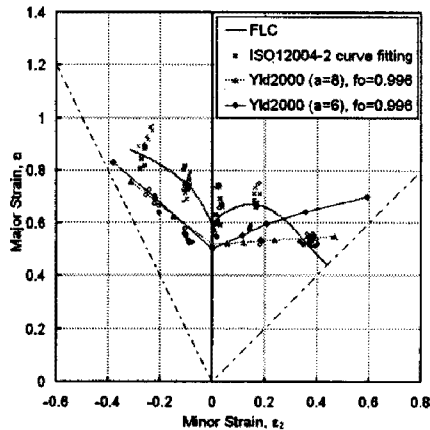


Fig. 5 Bell-shaped curve fitting from sectional strain



(a) Punch velocity 0.1 mm/s



(b) Punch velocity 1.0 mm/s

Fig. 6 Comparison between theoretical and experimental FLDs at 250°C