

## AZ31B 마그네슘 합금판재의 온간 성형한계도 및 스프링백 특성 시험

최선철<sup>1</sup>, 이한수<sup>1</sup>, 김형종<sup>2</sup>, 이경택<sup>3</sup>, 김현영<sup>#</sup>

### Experiments for Forming Limit Diagram and Springback Characteristics of AZ31B Magnesium Alloy Sheet at Elevated Temperature

C. S. Choi, H. S. Lee, H. J. Kim, K. T. Lee, H. Y. Kim

#### Abstract

The effect of temperature on the forming limit diagram was investigated for AZ31B magnesium alloy sheet through the limit dome height test in the range from room temperature to 300°C. The formability of AZ31B sheet was improved significantly according to the increasing temperature. Also we studied the springback characteristics through the 2D draw bending test with different blank holding forces at elevated temperatures. Springback quantity was considerably reduced as temperature went up. The blank holding force in the range used, however, had little influence on springback. Experimental results obtained in this study may provide a material database for AZ31B sheet.

**Key Words** : AZ31B Magnesium Alloy Sheet(AZ31B 마그네슘 합금 판재), Forming Limit Diagram(성형한계도), Springback(스프링백), Limit Dome Height(한계돔높이), 2D Draw Bending(2D 드로벤딩)

#### 1. 서 론

마그네슘은 밀도가 1.74g/cm<sup>3</sup>로 철강재료의 1/5, 알루미늄의 2/3 정도에 불과한 가벼운 금속이나, 다른 금속과 합금화 할 경우 낮은 밀도에 비해 비강도가 우수함은 물론, 기계가공성, 진동흡수능, 전자파 차폐성 등이 뛰어나 전자부품 및 각종 기계구조용 재료로 주목 받고 있다. 마그네슘의 성형은 다이캐스팅이나 용탕단조법이 주류이나, 이들 가공법은 소재를 액상 또는 반용융상으로 가열한 상태에서 제조하므로 상온에서 기계적 특성이 나빠지거나 주조결함이 발생할 수 있다. 또한, 마그네슘 합금은 결정구조가 조밀육방정(HCP)이므로 상온에서 소성가공 능력이 현저히 떨어진다. 이로 인해 온·열간 프레스가공 등 성형방법에 대

한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 열용량이 작은 재료특성 때문에 성형속도나 온도 등 공정변수의 조절이 쉽지만은 않다. 최근 국내·외에서 수행된 주요 연구들을 요약해 보면 다음과 같다.

Zhang 등[1], Yoshihara 등[2], Huang 등[3]은 마그네슘 합금의 온·열간 디프드로잉 성형 시 블랭크홀더력(blank holding force, BHF)의 영향과 성형성을 실험 및 해석을 통하여 연구하였다. 국내에서는 김한구 등[4]과 김홍규 등[5]이 온·열간 디프드로잉 성형성을 실험적으로 평가하였다. Naka 등[6]은 여러 가지 온도와 변형률속도에 대한 JIS-A5083 Al-Mg 합금재료의 성형한계도를 얻었으며, Chen 등[7], Bruni 등[8]도 성형한계도와 스프링백을 연구한 바 있다. 온·열간 디프드로잉 실험을 통한 성형성 평가 연구는 국내외적으로 다양하지만, 성형한계도나 스프링백에 관한 연구 사례는 아직 많지 않다.

1. 강원대학교 대학원 기계·메카트로닉스 공학과

2. 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부

3. ㈜ 오스텍 기술연구소

# 교신저자: 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부,

E-mail: khy@kangwon.ac.kr

따라서 본 연구에서는 한계돔높이 시험 및 2D 드로벤딩 시험을 통하여 AZ31B 마그네슘 합금판재의 온·열간 성형한계도와 스프링백 특성을 구하고, 이를 향후 실제품 성형을 위한 공정설계 및 금형설계의 기초 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 성형한계도

### 2.1 한계돔높이 시험

Fig. 1 은 본 연구를 위하여 설계·제작한, 상·하 각 50ton 용량의 실린더를 장착한 복동식 유압프레스이다. 베드 위에는 금형 세트와 소재를 소요 온도로 유지하기 위한 전기로와 온도 제어장치가 설치되어 있다. 각 금형은 그 내부 곳곳에 카트리지 방식의 가열선을 삽입하여 전기로를 사용하지 않고 직접 가열할 수 있도록 설계·제작하였으며, 그 주요 치수는 NUMISHEET '96[9]에 제시된 한계돔높이(limit dome height, LDH) 시험 규정에 따랐다(Fig. 2). 본 연구에서 수행한 모든 실험에서는 금형과 소재의 온도를 균일하게 유지하기 쉬운 직접 가열방식을 사용하였다.

실험에 사용한 소재는 두께 0.5mm 의 AZ31B 마그네슘 합금판재이며, 시편은 길이 175mm (압연 방향), 성형부 폭 25~175mm 의 7 종류를 준비하였다. 그 형상과 치수는 Fig. 3 과 같다. 폭이 좁은 시편의 경우, 직사각형 형상으로는 원하는 변형모드에서의 파단을 유도하여 성형한계를 구하는데 어려움이 있어 그림과 같은 Nakajima 시편 형상을 채택하였다.

격자 인쇄에는 전기·화학적 부식법을 사용하는

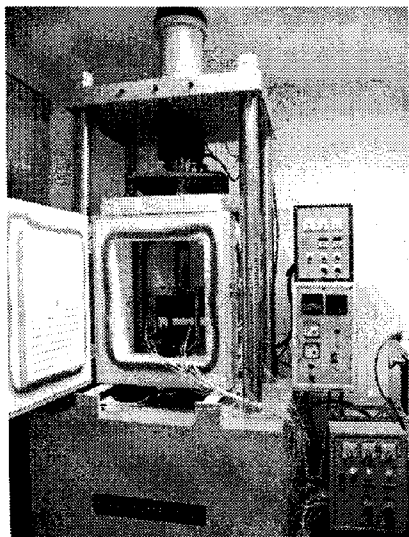


Fig. 1 Hot formability testing equipment

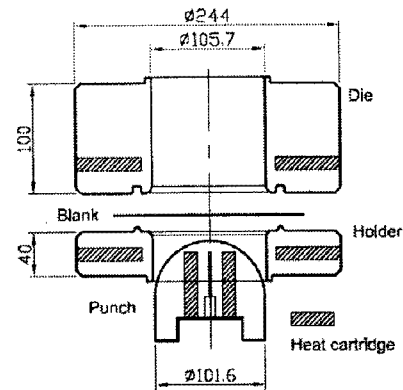


Fig. 2 Schematic diagram of the tools for the limit dome height test

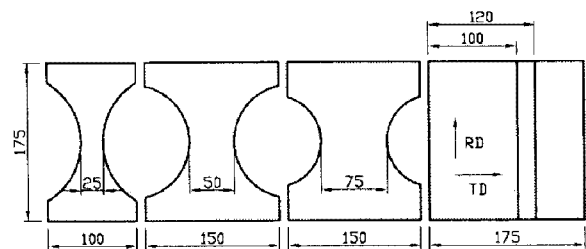


Fig. 3 Dimensions of the FLD test specimens

것이 보통이나, 마그네슘 합금판재의 경우 적합한 전해액이 유통되지 않고 있어 알루미늄용 전해액을 대신 사용할 수밖에 없는데, 이때 부식된 격자선의 노치효과로 인하여 성형한계가 상당한 영향을 받을 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

따라서 본 연구에서는 부식법 대신 전사법을 사용하여 3×3mm 크기의 정사각형 격자망을 인쇄하였다. 실험은 상온, 100℃, 200℃, 250℃, 300℃ 등 5 가지의 온도 조건에서 진행하였고, 펀치 속도는 0.1mm/s 로 일정하게 유지하였다. 또한, 2 축 인장 모드를 얻기 위해 고온용 수용성 흑연 윤활제를 사용하였다.

### 2.2 시험 결과

신뢰성 있는 실험 결과를 얻기 위해 동일한 조건에서의 실험과 변형률 측정을 수 차례에 걸쳐 실시하였다. 변형률 측정은 본 연구팀에서 자체 개발한 'ASIAS(Automated Surface Information Analysis System)' 를 사용하였다. 이 시스템은 최근 8Mpixel 이상의 고해상도까지 처리가 가능하게 되어 오차범위가 0.17%까지 감소하였다.[10]

Fig. 4 는 250℃에서 성형한 시편들의 사진이며, Fig. 5(a)~(e)는 차례대로 상온, 100℃, 200℃, 250℃ 및 300℃에서의 성형한계도이다. 각 온도별 성형한계선을 Fig. 6 에서 비교하였다. 전 온도구간에서

동일한 시편을 사용했음에도 불구하고 부변형률의 분포를 보면, 폭 25mm 시편의 경우 온도에 따라  $-0.15 \sim 0.7$ , 폭 175mm 윤활 시편의 경우  $0.04 \sim 0.4$  등으로 넓은 범위에 걸쳐 나타났음을 알 수 있다. 등 2 축인장 모드를 얻기 위해 사용한 흑연 윤활제의 효과는 기대 이하인 것으로 나타났다. 한편, 주변형률은 FLC<sub>0</sub> 점을 기준으로 상온에서는 0.09 이지만, 100℃, 200℃ 및 300℃의 경우

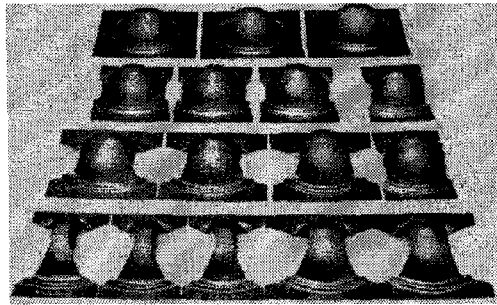
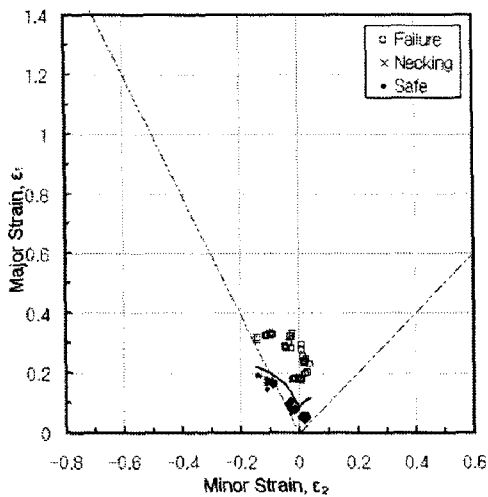
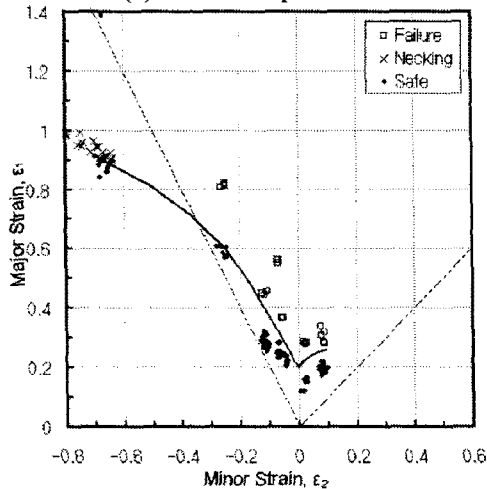


Fig. 4 Photo of FLD test specimens at 250℃

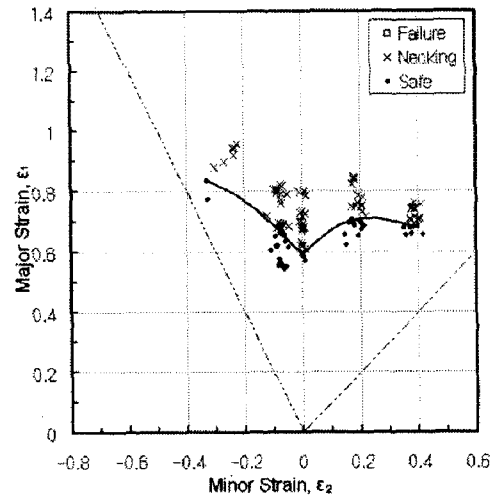
0.20, 0.59 및 0.71로 나타나 상온대비 각 122%, 556% 및 689% 증가한 것을 확인하였다. 이는 일반적으로 알려져 있는 바와 같이 200℃ 이상의



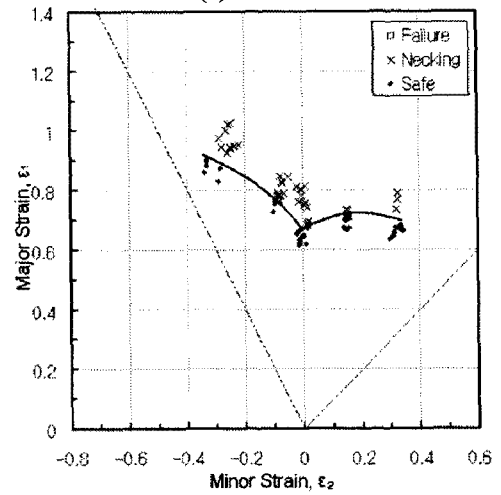
(a) Room temperature



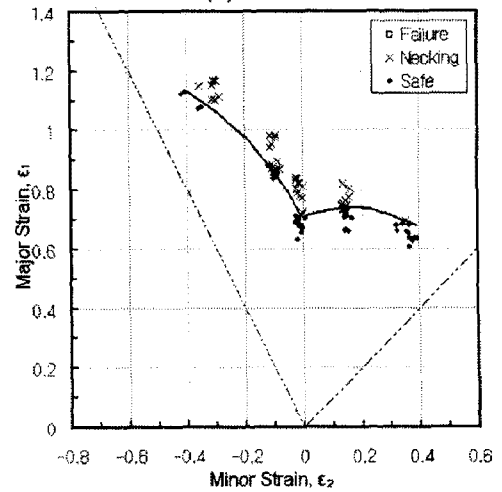
(b) 100℃



(c) 200℃



(d) 250℃



(e) 300℃

Fig. 5 FLD's at various temperatures

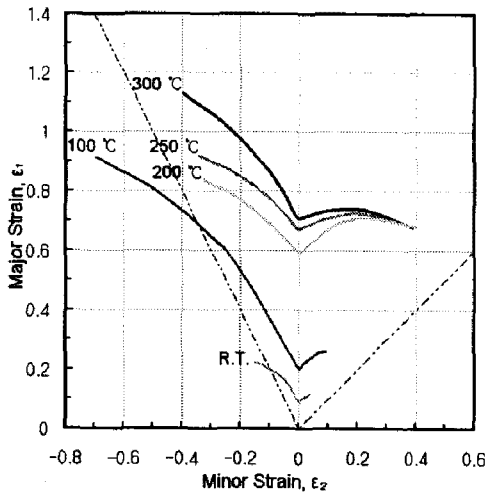


Fig. 6 Comparison of FLD's at different temperatures

온도에서 재결정이 일어나 결정립이 미세해지고 연성이 크게 증가한다는 사실과 일치한다.

상온 및 100°C의 경우, 대부분의 시험에서 성형도중 갑작스런 취성 파단이 일어나 국부네키가 발생하는 순간에 펀치를 정지시키기 어려웠고, 이로 인해 안전영역과 파단영역의 주변형을 차이가 크게 나타났다. 반면 200°C 이상에서는 국부네키가 발생하는 시점을 하중-변위 그래프에서 비교적 쉽게 찾을 수 있어, 결과적으로 안전영역과 네키 영역의 경계를 명확히 판별하는 것이 용이하였다. 또한, 네키 영역의 주변형을 분포가 주변형률에 따라 다르긴 하지만 최대 0.2 정도의 폭을 가진 밴드 형태로 나타나 네키 영역이 넓게 형성됨을 확인할 수 있었다.

### 3. 스프링백 특성

#### 3.1 2D 드로벤딩 시험

AZ31B 마그네슘 합금판재의 스프링백 특성을 평가하기 위해 NUMISHEET '93[11] 규정에 따른 2D 드로벤딩 시험을 수행하였다. 사용된 금형의 주요 치수 및 형상은 Fig. 7에 나타내었다. 소재는 길이(압연방향) 350mm, 폭 35mm의 직사각형 형상이며, 두께는 1.0mm이다. 시험은 상온, 100°C, 200°C, 300°C 등 4가지 온도에서 진행하였으며, 블랭크홀더력(BHF)은 2.5kN 및 5.0kN으로 설정하였다.

#### 3.2 시험 결과

펀치 속도는 1.0mm/s로 일정하게 유지하였으며,

펀치 변위는 70mm로 설정하였다. 스프링백의 정량적 측정은 NUMISHEET '93에 제시되어 있는 방법을 따랐다.

Fig. 8은 BHF 2.5kN으로 성형한 온도별 시편과 단면 형상을 나타낸 사진이며, Fig. 9는 온도와 BHF에 따른 스프링백 각을 비교한 그림이다. 스프링백은 일정한 BHF에서는 온도가 높아짐에 따라 큰 폭으로 감소하고, 동일한 온도에서는 BHF가 클수록 감소하나 그 정도는 미미한 것으로 나

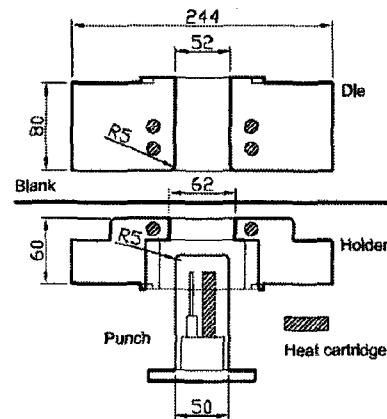


Fig. 7 Schematic diagram of the tools for the 2D draw bending test

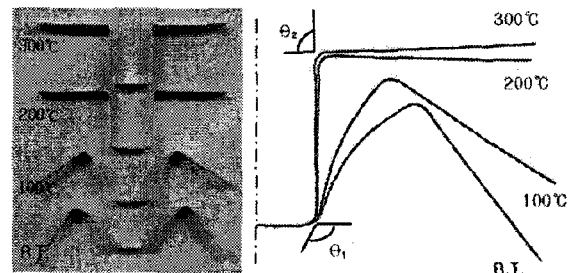


Fig. 8 Photo of the 2D draw bending test specimens with BHF of 2.5kN

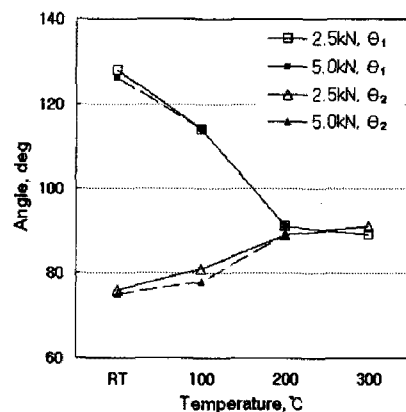


Fig. 9 Variation of the springback angles with the forming temperature and BHF

타났다. 일반적으로 BHF가 커질수록 시편의 측벽부에 소성변형이 발생하여 스프링백이 감소하는 경향이 생기는데, 마그네슘의 유동응력은 온도가 올라갈수록 현저히 낮아지므로 온도에 따른 스프링백의 경향을 보려면 동일한 소성변형 하에서 실험을 해야 하지만, 실제 200℃ 이상에서는 두께가 줄어 상온보다 상대적으로 큰 소성변형이 발생하였고, 온도의 영향과 결부되어 스프링백이 거의 없는 것으로 나타났다. 시편의 두께를 측정한 결과 상온 및 100℃에서는 두께변화가 없었으나, 200℃ 및 300℃에서는 각각 0.97mm, 0.90mm로 두께가 줄어들었다. 따라서 200℃ 이상에서 온도에 따른 스프링백의 영향을 정확히 분석하기에는 어려움이 많으나, 상온 및 100℃의 결과를 미루어 볼 때 스프링백은 감소할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 AZ31B 마그네슘 합금판재의 온·열간 성형한계도 및 스프링백 특성을 실험적으로 평가하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 고온 성형성 평가 시험을 위하여 전기로 가열방식 및 카트리지가열방식을 선택적으로 사용할 수 있는 복동식 유압프레스를 설계·제작하였다.

(2) 한계돔높이 시험을 통하여 상온, 100℃, 200℃, 250℃ 및 300℃에서 성형한계도를 구하였으며, 2D 드로벤딩 시험으로부터 상온, 100℃, 200℃ 및 300℃에서 스프링백 특성을 분석하였다.

(3) 한계 주변형률은 FLC<sub>0</sub>점을 기준으로 상온에서 0.09이나, 100℃와 200℃의 경우 각각 0.20, 0.59로 나타나 상온대비 각각 122% 및 556% 증가하였다. 재결정으로 인하여 200℃까지는 큰 폭으로 증가하나, 그 이상의 온도에서는 소폭 증가하였다.

(4) 스프링백은 일정한 BHF에서는 온도가 높아짐에 따라 큰 폭으로 감소하고, 동일한 온도에서는 BHF가 클수록 감소하나 그 정도는 미미한 것으로 나타났다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 국제공동기술개발사업(과제번호: 10028109)의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 아울러 많은 도움을 주신 관계자 분들께 깊은 감사를 표합니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] S. H. Zhang, K. Zhang, Y. C. Xu, Z. T. Wang, Y. Xu, Z. G. Wang, 2007, Deep-drawing of magnesium alloy sheets at warm temperatures, *J. Mat. Proc. Tech.* Vol. 185, pp. 147~151.
- [2] S. Yoshihara, K. Manabe, H. Nishimura, 2005, Effect of blank holder force control in deep-drawing process of magnesium alloy sheet, *J. Mat. Proc. Tech.* Vol. 170, pp. 579~585.
- [3] T. B. Huang, Y. A. Tsai, F. K. Chen, 2006, Finite element analysis and formability of non-isothermal deep drawing of AZ31B sheets, *J. Mat. Proc. Tech.* Vol. 177, pp. 142~145.
- [4] 김한구, 배정운, 추동균, 강충길, 2006, AZ31B 마그네슘 판재의 온·열간 딥드로잉에 관한 연구, *한국소성가공학회지*, 제15권, 제7호, pp. 504~511.
- [5] 김홍규, 이위로, 홍석관, 김종덕, 한병기, 2006, 마그네슘 합금 AZ31 판재의 온간 사각킵 디프드로잉 공정의 유한요소 해석, *한국소성가공학회지*, 제15권, 제3호, pp. 232~240.
- [6] T. Naka, G. Torikai, R. Hino, F. Yoshida, 2001, The effects of temperature and forming speed on the forming limit diagram for type 5083 aluminum-magnesium alloy sheet, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 113, pp. 648-653.
- [7] F. K. Chen, T. B. Huang, 2003, Formability of stamping magnesium-alloy AZ31 sheets, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 142, pp. 643~647.
- [8] C. Bruni, A. Forcellese, F. Gabrielli, M. Simoncini, 2006, Air bending of AZ31 magnesium alloy in warm and hot forming conditions, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 177, pp 373~376
- [9] J. K. Lee, G. L. Kinzel, R. H. Wagoner, 1996, NUMISHEET '96
- [10] 최선철, 김형중, 2006, 고해상도 화상처리를 통한 자동 변형률 측정의 정확도와 편의성 개선, *한국소성가공학회 제5회 박판성형심포지엄*, pp. 34~39.
- [11] A. Makinouchi, E. Nakamachi, E. Onate, R. H. Wagoner, 1993, NUMISHEET '93