

# 마그네슘 합금 판재의 온간 딥드로잉 공정의 성형해석

이명한<sup>1</sup> · 김현영<sup>2</sup> · 김형종<sup>2</sup> · 김흥규<sup>3</sup> · 오수익<sup>#</sup>

## Forming Analysis for Warm Deep Drawing Process of Magnesium Alloy Sheet

M. H. Lee, H. Y. Kim, H. J. Kim, H. K. Kim, S. I. Oh

(Received May 10, 2007)

### Abstract

Due to the low densities and high specific strength and stiffness, magnesium alloy sheets are very attractive lightweight materials for automotive and electrical products. However, the magnesium alloy sheets should be usually formed at elevated temperature because of their poor formability at room temperature. For the use of the magnesium alloy sheets for an industrial, their mechanical properties at elevated temperature and appropriate forming process conditions have to be developed. In this study, non-isothermal simulation of a square cup drawing of magnesium alloy sheets have been conducted to evaluate a proper forming process conditions such as the tool temperature, the tool shoulder radius, friction between the blank and the tools. According to this study, appropriate forming process conditions of square cup drawing at elevated temperature from magnesium alloy sheets are suggested.

**Key Words** : Magnesium Alloy, Warm Deep Drawing, Finite-Element Analysis

### 1. 서 론

마그네슘 합금은 비중이 약 1.8인 경량 구조용 합금으로 비강도 및 비강성, 열전도도 등이 우수한 특성을 지니고 있다. 최근의 자동차, 전자, 항공기 산업에서 경량화 및 환경보존에 대한 관심이 커지면서 마그네슘 합금의 수요는 꾸준히 증가하고 있다[1].

마그네슘 합금은 조밀육방구조(HCP)의 결정구조로 인해 상온에서 성형성이 좋지 않아 다이캐스팅에 의해 제품이 생산되어 왔다. 다이캐스팅으로 제작된 구조용 부품은 기계적 강도의 저하, 후처리 비용의 증가, 초박판 제품 개발의 어려움 등의 이유로 최근에는 프레스 금형 기술을 적용한

초박판 제품 생산 기술이 큰 주목을 받고 있다[2].

일반적으로 마그네슘 합금 판재의 온간 성형 시에는 온도, 가공속도, 윤활 등의 조건에 따라 성형성이 민감하게 달라지므로 이러한 공정 조건에 따른 재료의 성형성 평가를 통해 마그네슘 합금 판재의 온간 성형 공정을 설계하는 것이 중요하다. 따라서, 마그네슘 합금 판재의 온간 성형 공정 설계를 위해서는 판재의 특성 및 성형성 평가와 유한요소 해석을 이용한 재료에 대한 검증이 이루어져야 한다.

온간 인장 시험, 원형 또는 사각컵 드로잉 시험 등을 통해 마그네슘 합금 판재의 특성 및 성형성 평가에 대한 연구가 이루어졌다[3~6]. 이 같은 연구에서 마그네슘 합금 판재는 온도가 올라갈수록

1. 서울대학교 기계항공공학부 대학원  
2. 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부  
3. 한국생산기술연구원, 정밀금형팀  
# 교신저자: 서울대학교 기계항공공학부,  
E-mail: sioh@snu.ac.kr

성형성이 좋아짐을 알 수 있다. 유한요소를 이용한 성형 공정 해석에 대한 연구가 이루어졌으나 [7~8], 재료와 금형 사이의 열전달이 고려된 성형 공정 해석은 부족한 상황이다.

본 연구에서는 마그네슘 합금 판재의 온간 성형 공정을 위한 기반 연구로서 열전달이 고려된 마그네슘 합금 판재의 온간 딥드로잉 해석을 수행하였다. 금형의 온도, 금형의 반경, 금형과 판재 사이의 마찰 조건 등에 따른 마그네슘 합금 판재의 온간 성형 해석을 통해 마그네슘 합금 판재의 온간 성형 공정 조건을 제시하였다.

## 2. 온간 성형 유한요소 해석

본 연구에서는 마그네슘 합금 판재의 정사각컵 드로잉 온간 성형 해석을 위해 김홍규[6~7] 등이 제안한 연구 모델을 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 온간 성형 해석은 PAM-STAMP를 이용하였고, 펀치 및 다이의 코너 반경, 다이 및 펀치의 온도에 따른 성형성, 금형과 소재의 마찰에 따른 성형성 평가 해석을 수행하였다.

### 2.1 유한요소 모델링

PAM-STAMP를 이용한 온간 성형 해석을 위해서는 열전달을 위한 접촉 두께와 VELSCF(Velocity Scale Factor)를 정해주어야 한다. 접촉 두께는 소

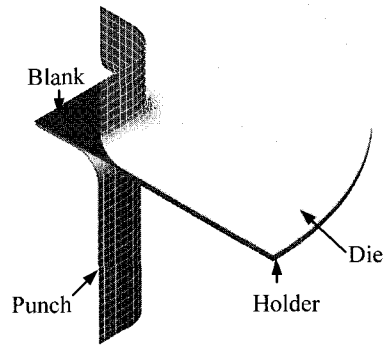
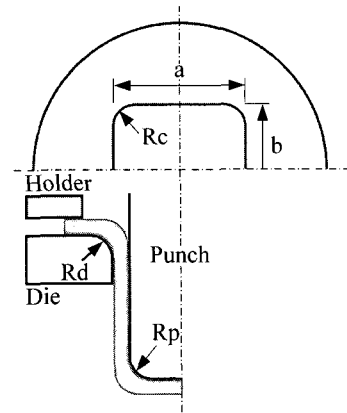


Fig. 1 Geometric parameters and simulation model of the square cup deep drawing

재와 금형과의 열전달을 위한 두께이며, VELSCF는 열전달을 위한 시간 간격을 조정해주는 값이다. 본 연구에서는 수 차례의 해석 결과를 토대로 비교적 타당한 열전달이 이루어지길 수 있는 접촉두께와 VELSCF를 선정하였다. 접촉두께는 소재 두께로 VELSCF는 0.001로 선정하여 해석을 수행하였다.

마그네슘 합금 판재의 정사각컵 드로잉 해석 모델을 Fig. 1에 나타내었고, 해석에 사용된 입력 값을 Table 1에 나타내었다. 본 해석에서는 금형과 펀치의 온도는 일정하고, 금형과 펀치에서 블랭크로의 열전달만이 고려되었으며, 공기에 의한 열전달은 없다고 가정하여 해석을 수행하였다. 금형과 블랭크 사이의 열전달 계수는 균일하다고 가정하였고, 그 값은 김홍규[7] 등의 결과를 사용하였다. 마그네슘 합금 판재는 온도가 올라감에 따라 이방성 특성이 감소한다[9]. 따라서 블랭크는 등방성 재료로 가정하였고, 재료의 진응력-진변형률 선도

Table 1 Process parameters used in simulation

Tooling setup	
Punch dimension	40×40 mm
Punch and die corner radius (Rc)	10.96 mm
Punch and die shoulder radius	Rd 6.25 mm Rp 6.25 mm
Clearance	0.96 mm
Mechanical properties	
Young's modulus	44.8 GPa
Poisson's ratio	0.35
Flow stress	Obtained from literature [7]
Friction coefficient	0.02
Thermal properties	
Thermal conductivity (sheet)	96 W/m K
Heat capacity (sheet)	1000 J/kg °C
Interface heat transfer coefficient	4 N/s mm °C

는 김홍규[7] 등의 실험 결과를 사용하여 해석을 수행하였다. 블랭크 두께는 0.8mm, 지름 120mm이며 4절점 사각형 셀요소를 사용하였고, 모든 해석에서 블랭크의 초기 온도는 25℃로 하여 해석을 수행하였다. 블랭크 홀딩 압력은 1MPa, 드로잉 속도는 1.66mm/sec로 하였으며, 최대 성형 깊이는 40mm이다. 소재와 금형과의 마찰계수는 0.02로 김홍규[6] 등의 연구 결과를 토대로 결정하였다.

### 2.2 금형의 온도에 따른 성형성 평가

펀치, 다이, 블랭크 홀더의 온도 조건에 따른 마그네슘 합금 판재의 성형성 평가 해석을 수행하였다. 펀치 온도는 15℃로 일정하게 두고, 다이와 블랭크 홀더의 온도는 25~250℃로 변화시켜가며 해석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 다이 및 블랭크의 온도가 증가할수록 컵 성형 깊이는 증가하였으나 250℃가 되면 오히려 감소함을 볼 수 있다. 기존 연구에서는 약

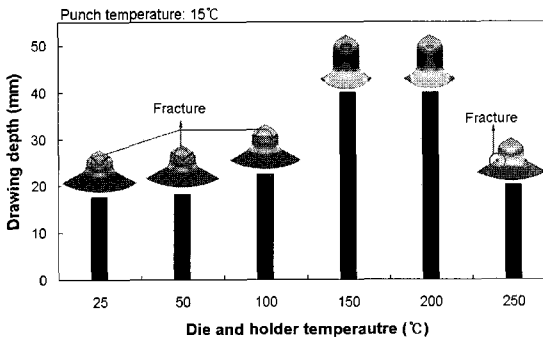


Fig. 2 Drawing depth variation for die and holder temperature variation

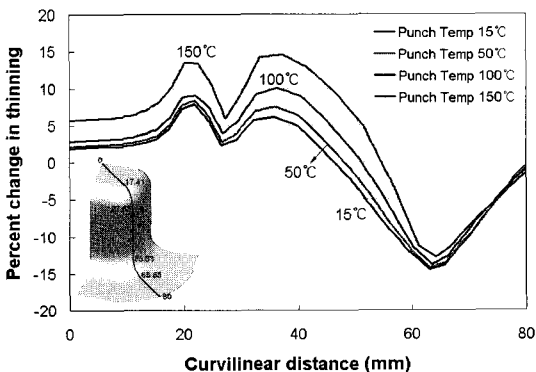


Fig. 3 Percent thinning distribution obtained from simulation at various punch temperatures

200℃에서 성형 깊이가 최대가 된다고 알려져 있지만[3, 4, 7], 본 연구에서는 150~200℃에서 성형 깊이가 최대가 됨을 알 수 있다. 기존 연구와 본 해석과의 차이는 블랭크와 금형 사이의 마찰, 열 전달 등의 영향을 해석에 정확하게 반영할 수 없는 데서 발생된 것으로 판단된다.

펀치의 온도가 15~250℃로 변하고 다이 및 블랭크 홀더의 온도는 200℃로 일정한 경우에 대한 온간 성형 해석을 수행하였다. 그 결과 펀치의 온도 150℃까지는 성형 깊이 40mm까지 성형이 이루어졌으나 펀치의 온도 200, 250℃ 일 때는 파단이 발생되었다. 펀치 온도에 따른 사각컵 중심에서 플랜지까지의 두께 감소율을 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3는 펀치 온도에 따른 온간 성형 해석 결과를 나타내고 있으며, 펀치 온도가 낮을수록 두께 감소율이 펀치 온도가 높을 때보다 작은 것을 알 수 있다. 펀치 온도가 15℃ 일 때의 최대 두께 감소율은 약 7.5%이며, 펀치 온도가 150℃ 일 경우에는 약 15%이다. 이러한 경향은 펀치의 온도가 올라가면 판재의 응력이 작아져 플랜지 코너에서의 재료 유입량보다 이미 유입된 재료에서의 변형량이 커지기 때문에 발생된 것으로 판단된다. 펀치 온도가 각각 15, 150℃일 경우 플랜지 크기의 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

### 2.3 마찰에 따른 성형성 평가

프레스 성형 고정에서 판재와 금형 사이의 마찰은 제품의 성형 및 품질에 영향을 미친다. 마찰은 접촉면의 마찰계수와 수직방향 힘에 의해 결정되는데 본 연구에서는 마찰계수의 영향만을 살펴보았다. 다이 및 블랭크 홀더의 온도 200℃, 펀

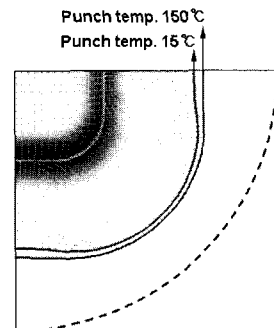


Fig. 4 Final blank shapes at punch temperature 15℃ and 150℃

치 온도 15°C에 대하여 블랭크와 금형 사이의 마찰계수에 따른 성형성 평가 해석을 수행하였다. 마찰계수는 0.02와 0.25 사이의 값을 선택하였다. Fig. 5에서 마찰계수가 0.02, 0.05일 때는 성형 깊이 40mm까지 성형이 이루어졌으나 마찰계수가 0.1과 0.25일 때는 성형 깊이가 각각 약 24, 13mm임을 알 수 있다. 각 마찰계수에 따른 펀치 하중을 Fig. 6에 나타내었고, Fig. 7에 마찰계수 0.01과 0.05에 대한 성형 후의 두께 감소율을 나타내었다. Fig. 6과 Fig. 7에서 마찰계수가 증가할수록 펀치 하중이 증가하며, 두께 감소율도 큰 것을 알 수 있다.

### 2.4 금형의 반경에 따른 성형성 평가

Table 2와 같은 조합으로 다이 반경, Rd와 펀치 반경, Rp에 따른 마그네슘 합금 판재의 온간 성형성 평가를 수행하였다. 해석에 사용된 다이 및 펀

치의 코너 반경은 10.96mm로 일정하며, 다이와 블랭크 홀더의 온도는 200°C, 펀치의 온도는 15°C이며, 소재와 금형사이의 마찰계수는 0.02이다. 해석 결과 모든 경우에 있어서 성형 깊이가 40mm까지 성형이 되었다. 이는 김홍규[7] 등의 연구 결과와 많은 차이를 나타내고 있다. 이러한 차이는 김홍규[7]

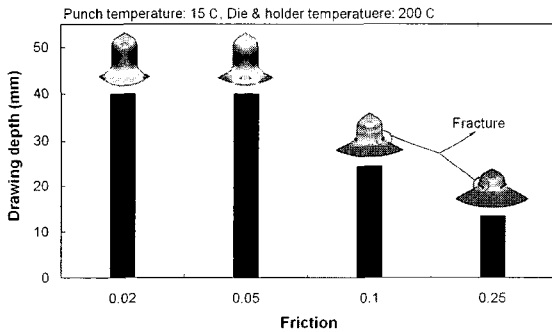


Fig. 5 Punch load obtained from simulation at various frictions between tools and blank

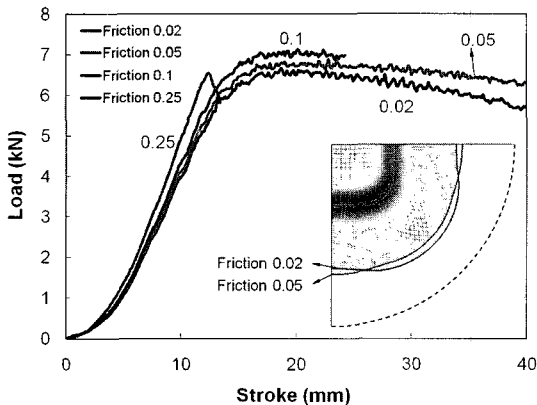


Fig. 6 Punch load obtained from simulation at various frictions between tools and blank

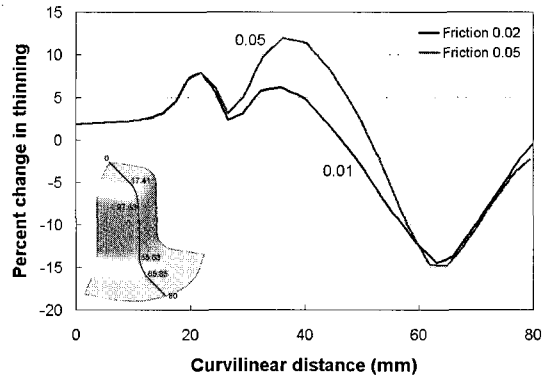


Fig. 7 Percent thinning distribution obtained from simulation

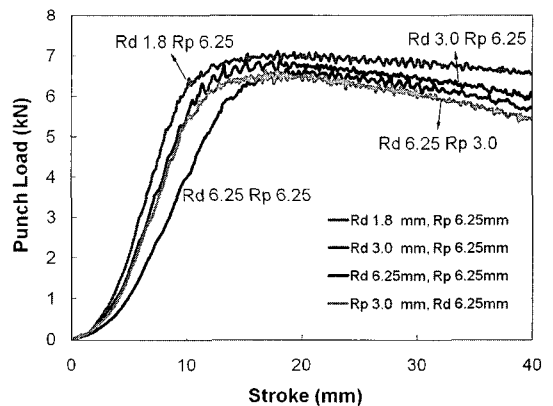


Fig. 8 Punch load obtained from simulation at various die and punch radii

Table 2 Punch and die dimensions for square cup deep drawing die system

Set	Die radius Rd, mm	Punch radius Rp, mm
#1	1.8	6.25
#2	3	6.25
#3	6.25	6.25
#4	6.25	3

## 후 기

등의 연구 결과와 달리 블랭크 홀딩 압력을 일정한 조건으로 하였고, 윤활 조건에 대한 언급이 없어 김홍규[6] 등의 이전 연구 결과를 이용하여 마찰계수를 결정하여 해석을 수행하였기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 이 외에도 소재와 판재의 열전달과 같이 실제 실험 조건과 해석상의 조건과의 차이로 이 같은 결과의 차이가 발생한 것으로 판단된다. 좀 더 정확한 해석을 위해 실제 공정 조건을 잘 반영하는 해석 변수값들에 대한 연구가 필요하다.

Fig. 7에 다이 반경 및 펀치 반경에 따른 성형 중 변위-펀치 하중 선도를 나타내었다. 다이 반경 및 펀치 반경이 작을수록 펀치의 최대 하중이 큰 것을 알 수 있다.

## 3. 결 론

마그네슘 합금판재의 온간 딥드로잉 공정 변수-금형 온도, 금형 반경, 금형과 소재간의 마찰계수-에 따른 열전달이 고려된 온간 성형 해석을 통해, 온간 성형 공정 조건에 대한 평가를 수행하였다. 다이 및 블랭크 홀더의 온도가 150, 200℃일 경우는 성형 깊이 40mm까지 성형이 이루어졌고, 펀치의 온도가 낮을수록 두께 감소율이 작은 것을 알 수 있다. 금형과 소재간의 마찰계수가 작을수록 성형 깊이까지 성형이 이루어졌으며, 마찰계수가 큰 경우보다 마찰계수가 작은 경우가 펀치에 걸리는 하중이 작은 것을 알 수 있다. 다이 반경에 따른 펀치의 변위-하중 곡선이 펀치 반경에 따른 펀치 변위-하중 곡선보다 위쪽에 위치한 것을 알 수 있고, 다이 반경이 커질수록 펀치 변위-하중 곡선이 아래로 내려가는 것을 알 수 있다. 따라서, 사각컵 딥드로잉 공정에서는 다이 및 블랭크 홀더의 온도를 펀치의 온도보다는 높게 하고, 마찰계수를 작게 하는 것이 유리하다고 판단된다.

열전달이 고려된 온간 성형 해석을 통해 실제 성형 공정에 근접한 해석을 수행하였고 이를 통해 마그네슘 합금 판재의 성형에서 금형 온도의 영향을 평가할 수 있었다. 하지만, 온간 성형 공정에 대한 정확한 해석이 수행되기 위해서는 금형과 소재간의 마찰, 열전달 등에 대한 연구가 필요하다. 그 밖에도 펀치의 속도, 펀치-다이의 클리어런스 등의 성형 조건에 따른 성형해석도 수행될 필요가 있다.

본 연구는 2010 생산기반혁신기술개발사업의 경량판재 프레스성형부품화 기반기술 개발 과제 의 일환으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] B. L. Mordike, T. Ebert, 2001, Magnesium properties-applications-otential, Mater. Sci. Eng., A 302, pp. 37~45.
- [2] R. Neugebauer, T. Altan, M. Geiger, M. Kleiner, A. Sterzing, 2006, Sheet metal forming at elevated temperature, Annals of CIRP, 55/2, pp. 793~16.
- [3] E. Doege, K. Droder, 2001, Sheet metal forming of magnesium wrought alloys-formability and process technology, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 115, pp. 14~19.
- [4] F. K. Chen, T. -B. Huagn, C. -K. Chang, 2003, Deep drawing of square cups with magnesium alloy AZ31 sheets, Int. J. Mach. Tool. Manu., Vol. 43, pp. 1553~1559.
- [5] 추동균, 오세웅, 이준희, 강충길, 2005, AZ31B 마그네슘 판재의 온간, 열간 딥드로잉 성형성 평가, 한국소성가공학회지, 제14권, 제7호, pp. 628~634.
- [6] 김홍규, 김기덕, 2007, AZ31 판재의 온간 사각 컵 딥드로잉에서 금형 설계에 대한 성형성 민감도의 평가, 한국소성가공학회지, 제16권, 2호, pp. 120~125.
- [7] 김홍규, 이위로, 홍석관, 김종덕, 한병기, 2006, 마그네슘 합금 AZ31 판재의 온간 사각컵 딥드로잉 공정의 유한요소 해석, 한국소성가공학회지, 제15권, 제3호, pp. 232~240.
- [8] H. Palaniswamy, G. Ngaile, T. Altan, 2004, Finite element simulation of magnesium alloy sheet forming at elevated temperatures, J. Mater. Proc. Techno., Vol. 146, pp. 52~60.
- [9] F. Kaiser, D. Letzig, J. Bohlen, A. Styczynski, Ch. Hartig, K. U. Kainer, 2003, Anisotropic properties of magnesium sheet AZ31, Mater. Sci. Forum, Vol. 419-422, pp. 315~320.