

마그네슘 합금 판재의 온간 성형 해석에서 FLD를 이용한 성형성 평가

이명한¹ · 김홍규² · 김현영³ · 오수익[#]

Evaluation of the Formability of Warm Forming Simulation of Magnesium Alloy Sheet Using FLD

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

(Received May 8, 2008)

Abstract

In this study, a forming magnesium alloy circular cup was simulated accounting for heat transfer at elevated temperatures. In order to predict the failure of magnesium alloy sheet during simulation, the forming limit diagram, which is used in sheet metal forming analysis to determine the criterion for failure, was investigated. For the failure prediction in the simulation accounting for heat transfer, the forming limit diagram for a temperature the same as the temperature of the blank element was used. The result of the simulation showed that the drawn depth increases with the increase of the die-holder temperature, and is in accord with the experimental results above the die-holder temperature of 150 °C. The forming limit diagram provided a good guide for the failure prediction of warm forming simulation accounting for heat transfer. In addition, the effect of the tool shoulder radius on the drawn depth at various tool temperatures is verified using the simulation conditions which agreed with the experimental results.

Key Words : Magnesium Alloy Sheet, Deep Drawing Process, Finite Element Analysis, Forming Limit Diagram

1. 서론

마그네슘 합금은 비중이 약 1.8인 경량 구조용 합금으로 비강도 및 비강성이 높고 전자파 차폐성이 우수하여 자동차, 항공 우주 및 전자 산업에서의 사용이 꾸준히 증가하고 있다. 마그네슘 제품의 대부분은 다이캐스팅(die-casting)에 의해 생산되었으나, 박판 부품 제작의 한계 및 제품 강도의 불균일 등의 문제점을 안고 있다. 이러한 문제점들은 프레스 성형 공정을 통해 해결할 수 있다.

마그네슘 합금 판재의 생산이 일반화되면서 프레스

성형 공정을 이용한 제품 생산에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 마그네슘 합금은 조밀 육방 결정구조로 인해 상온에서 낮은 성형성을 띄고 있다. 이러한 마그네슘 합금은 온간 (200~250°C)에서 비저면(non-basal) 슬립계의 활성화 또는 쌍정(twinning)의 발생으로 성형성이 향상된다[1].

마그네슘 합금 판재의 성형성이 향상되는 온간 성형의 필요에 따라 마그네슘 합금 판재의 온간 특성 및 성형성 평가에 대한 많은 연구가 수행되었다[2~4]. 이들 연구에서는 온간 인장 시험, 원형 또는 사각컵 딥드로잉(deep-drawing), 금형의 온도

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

에 따른 딥드로잉 시험 등을 수행하였고, 이들 시험을 통해 마그네슘 합금 판재는 온도가 올라갈수록 성형성이 좋아짐을 밝혔다. 이명환[5] 등은 온간 성형 해석을 통해 마그네슘 합금 판재의 성형성 해석을 수행하였고, Palaniswamy[6] 등은 DEFORM 2D와 3D를 이용하여 마그네슘 합금 판재의 성형성 해석을 수행하였다. 김홍규[7] 등의 연구에서는 손상모델을 이용한 파단예측을 통해 성형 해석을 수행하였고, Chen[3] 등의 연구에서는 FLD (forming limit diagram)을 이용하여 해석에서의 성형한계를 예측하였다. 판재의 성형 한계에 대한 예측으로는 여러 방법이 있으나, 주로 FLD를 이용한 방법을 사용하고 있다. Chen[3]의 연구에서는 열전달을 고려하지 않고 성형 해석 온도에 대한 FLD를 이용하였다. 이전 연구에서 마그네슘 합금 판재의 온간 성형 해석에서 열전달을 고려해야 한다는 결론을 얻었다[5]. 따라서 열전달이 고려된 온간 성형 해석에서 온도에 따른 FLD를 이용한 성형한계 예측에 대한 고찰이 필요하다.

본 연구에서는 열전달을 고려한 온간 성형 해석을 수행하였고, 성형한계 예측을 위해 온도에 따른 FLD를 이용하였다. FLD를 이용한 성형한계 예측 방법을 이용하여 금형의 형상에 따른 성형성 평가도 수행하였다.

2. 온간 원형컵 딥드로잉 유한요소 해석

2.1 유한요소 모델링

온간 원형컵 딥드로잉 공정에 대하여 열전달이 고려된 유한요소 해석을 수행하였다. 온간 성형 해석은 PAM-STAMP 2007.0.1을 이용하였다. PAM-STAMP를 이용한 온간 성형 해석을 위해서는 VELSCF (velocity scale factor)을 정해주어야 한다. VELSCF는 해석 시간 간격을 작게하여 열전달이 이루어지게 한다. 본 해석에서 VELSCF는 VELSCF의 영향에 대한 수 차례의 해석 결과를 토대로 비교적 타당한 열전달이 이루어진 0.001로 선정하여 해석을 수행하였다.

마그네슘 합금 판재의 온간 원형컵 딥드로잉 공정 해석 모델을 Fig. 1에 나타내었고, 해석에 사용한 입력값을 Table 1에 나타내었다. 금형과 펀치의 온도는 일정하고, 금형과 펀치로부터 블랭크로의 열전달만이 고려되었으며, 공기에 의한 열전달은 없다고 가정하여 해석을 수행하였다. 마그네슘 합금 판재는 온도가 올라감에 따라 이방성 특성이

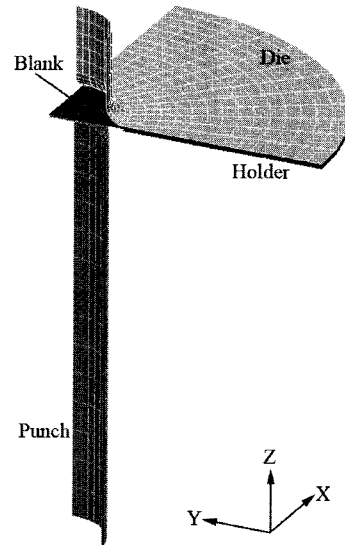


Fig. 1 Simulation model of the circular cup deep drawing

Table 1 Process parameters used in simulation

Thermal properties	
Thermal conductivity(sheet)	96 W/m ² °C
Heat capacity(sheet)	1000 J/kg ² °C
Interface heat transfer coefficient	4000 W/°C
Drawing conditions	
Punch diameter	40 mm
Punch and die corner radius	6.25 mm
Blank thickness	0.8 mm
Punch velocity	5 mm/sec
Punch stroke	40 mm
Blank holding force	5~6.8 kN
Friction coefficient	0.1
Initial blank diameter	100 mm
Blank heating time	2 sec
Temperatures(simulation with heat transfer)	
Blank at initial state	25°C
Punch	15°C
Die and blank holder	25~200°C

감소하고, 변형률 속도에 대한 영향이 증가하지만 본 연구에서는 이들에 대한 영향을 고려하지 않고 해석을 수행하였다.

마그네슘 합금 판재의 응력-변형률 관계는 이전 연구 결과를 이용하였고[8], Fig. 2와 같이 마그네

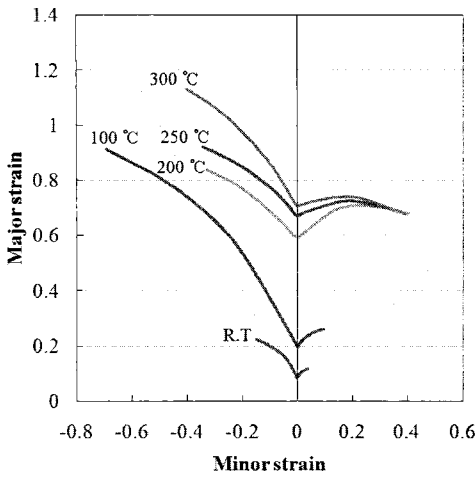


Fig. 2 FLD at various temperatures [9]

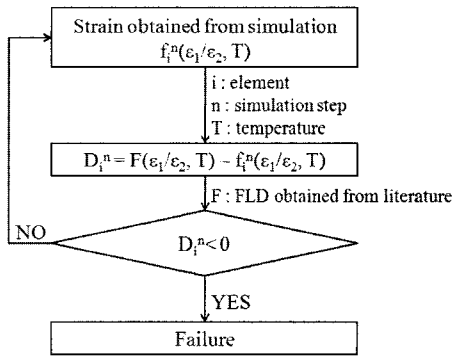


Fig. 3 Flowchart of forming limit prediction procedure

습 합금 판재의 FLD는 김현영[9] 등의 연구 결과를 이용하였다. 마그네슘 합금 판재의 FLD는 성형 온도가 올라갈수록 위로 올라가며, 이는 온도가 올라갈수록 성형성이 좋아짐을 의미한다. Fig. 2에서 얻을 수 없는 온도 영역에 대한 FLD는 보간법을 이용하여 얻었다.

2.2 유한요소 해석 결과

마그네슘 합금 판재의 온간 성형 해석에서의 성형한계 예측은 Fig. 3에 나타난 것과 같은 과정으로 이루어졌다. 해석에서 매 단계마다 각 요소의 주 및 부 변형률과 온도에 대한 정보를 얻고 이를 Fig. 2에서 얻은 FLD와 비교하여 성형한계를 예측하였다. 성형한계 예측은 이전 연구[10]의 결과를 참고하여 파단이 발생된 해석 단계를 추정하여 요소의 주 및 부 변형률, 온도 정보를 얻어

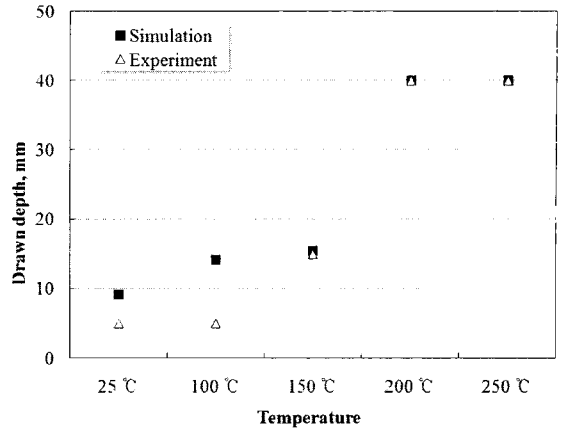


Fig. 4 Relationship between forming temperature and the drawn depth obtained from simulation and experiment

Fig. 2에서 얻은 FLD와 비교하였다. 본 연구에서는 FLD를 이용한 파단예측의 타당성 확인이 주목적이기에 Fig. 3과 같은 과정을 프로그램 작성 없이 수행하였다. 해석에서 현재 단계의 요소 온도, 주 및 부 변형률은 이전 단계에서의 요소 온도, 주 및 부 변형률에 영향을 받게 되어 각 단계는 독립된 단계라 할 수 없다. 하지만, 본 연구에서는 각 단계에서 요소 온도, 주 및 부 변형률간의 관계는 독립되어 있다고 가정하고 현재 단계에서의 요소 온도, 주 및 부 변형률만을 고려하여 성형 예측을 수행하였다.

Fig. 3과 같은 과정으로 얻은 성형 깊이를 이전 연구의 실험 결과[10]와 함께 Fig. 4에 나타내었다. 온간 성형 해석 결과 다이와 홀더의 온도가 올라갈수록 성형 깊이가 증가하는 것을 알 수 있다. 다이와 홀더의 온도 150°C 이상에서 실험과 해석 결과가 잘 일치하지만, 다이와 홀더의 온도 100°C 이하에서는 실험과 해석 결과간에는 큰 차이가 있다. 마그네슘 합금 판재는 조밀육방 구조로 인해 상온에서 낮은 성형성을 갖고 있으며, 이로 인해 실험에서의 성형 깊이는 매우 낮다. 해석에서는 마그네슘 합금 판재의 결정 구조 및 항복 조건 등을 적용할 수 없으며, 단지 응력-변형률 곡선과 von-mises 항복 조건을 이용하여 해석을 수행하였다. 따라서, 낮은 온도에 대한 마그네슘 합금 판재의 특성을 정확하게 해석으로 나타내기 어렵게 되었고, 이 같은 이유로 낮은 온도 영역에서 실험과 해석간의 결과 차이가 크게 발생한 것

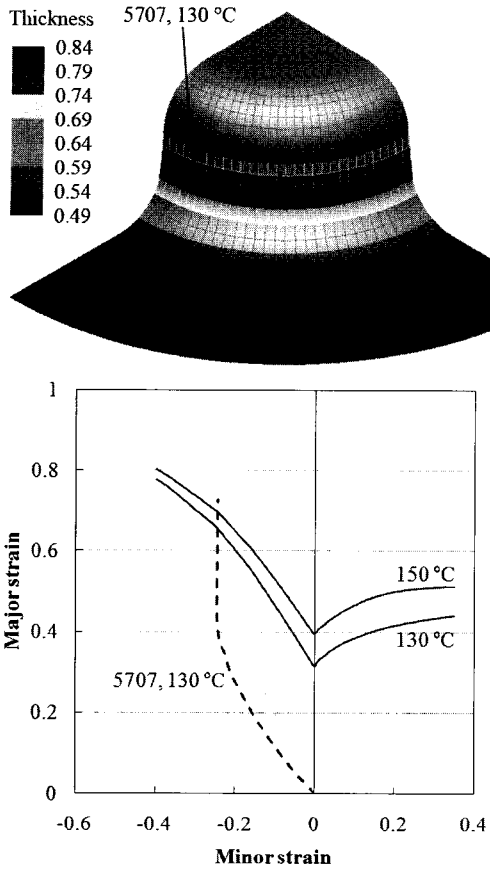


Fig. 5 Strain paths of element number 5707 in failure zone (die and holder temperature 150°C)

으로 판단된다.

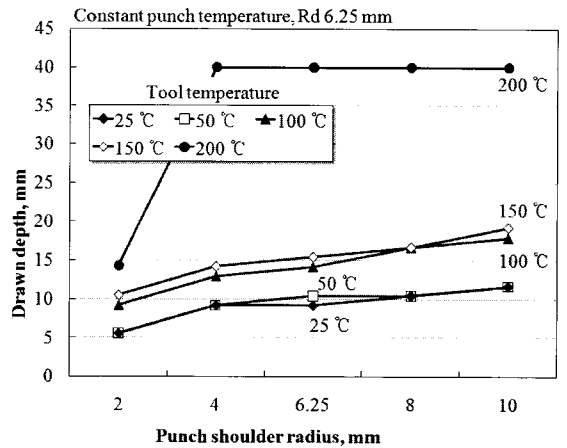
다이와 홀더의 온도 150°C에 대한 파단 부분의 변형 경로를 Fig. 5에 나타내었다. 파단 부분 요소의 온도는 약 130°C이며 성형한계 예측을 위한 FLD도 같은 온도에 대한 FLD를 이용하였다. 열전달을 고려한 중간 성형 해석에서 각 요소의 온도는 해석 단계마다 변하게 된다. 따라서, 성형한계 예측을 위한 FLD를 다이와 홀더의 온도에 맞추어 선택하는 것이 아니라 각 요소의 온도에 맞추어 선택하는 것이 타당하다고 판단된다.

3. 금형 형상에 따른 성형 한계 평가

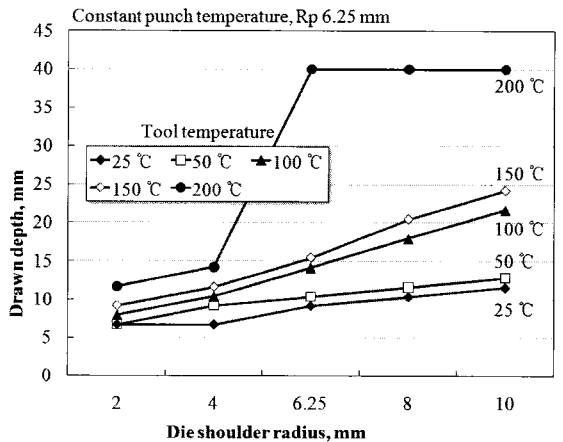
앞 절에서와 같은 해석 조건을 이용하여 금형 코너 반지름에 따른 성형 한계를 중간 성형 해석을 통하여 평가하였다. 해석에 사용한 금형 코너 반지름의 크기를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Tool shoulder radius (R_D is die shoulder radius and R_P is punch shoulder radius)

CASE 1		CASE 2	
R_D	R_P	R_D	R_P
	2.0 mm	2.0 mm	
6.25 mm	4.0 mm	4.0 mm	6.25 mm
	6.25 mm	6.25 mm	
	8.0 mm	8.0 mm	



(a) CASE 1; constant $R_D = 6.25$ mm



(b) CASE 2; constant $R_P = 6.25$ mm

Fig. 6 Effect of tool shoulder radius on formability at various temperatures

다이 및 홀더 온도에 따른 금형 형상에 대한 성형 깊이를 Fig. 6에 나타내었다. 일반적으로 금형의 코너 반경이 증가할수록 성형 깊이는 증가

한다. 본 연구에서도 성형 온도 조건에 상관없이 금형의 코너 반경이 증가할수록 성형 깊이가 증가하는 결과를 얻었고, 동일한 금형의 코너 반경 조건에 대해서는 성형 온도가 증가할수록 성형 깊이가 증가하는 결과를 얻었다.

CASE 1에서 다이와 홀더 온도 200°C에 대한 R_p 4mm의 성형해석 결과 성형 깊이가 40mm까지 파단 없이 성형이 되었음을 확인할 수 있다. 또한, 금형 온도 150°C 이하에서는 펀치 코너 반경의 증가에 대한 성형 깊이의 증가율이 적은 것을 알 수 있다.

CASE 2에서 다이의 코너 반경이 작을수록 성형 깊이가 작은 것을 알 수 있다. 다이와 홀더의 온도 200°C에 대한 해석에서 R_D 6.25mm 이상에서 성형 깊이가 40mm까지 성형된 것을 알 수 있다. 또한, 다이와 홀더의 온도 150°C 이하에서는 다이 코너 반경이 증가함에 따라 성형 깊이도 증가하는 것을 알 수 있다.

다이와 홀더의 온도 150°C 이하에 대한 해석 결과에서 CASE 1의 펀치 코너 반경 증가에 따른 성형 깊이 증가율이 CASE 2의 다이 코너 반경 증가에 따른 성형 깊이 증가율에 비해 작은 것을 알 수 있다. 다시 말해, 펀치의 코너 반경이 일정한 경우에는 다이의 코너 반경이 증가할수록 성형 깊이는 증가하지만, 다이의 코너 반경이 일정한 경우에는 펀치의 코너 반경의 증가에 비해 성형 깊이 증가량이 적은 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 마그네슘 합금 판재의 온간 성형 해석에서 FLD를 이용한 파단 예측 연구와 금형의 형상 따른 성형성 평가를 수행하였다.

온간 성형 해석에서 파단 예측을 위한 FLD를 각 요소의 온도와 같은 FLD를 사용하여 성형 한계를 평가하였다. 다이와 홀더의 온도 150°C 이상에서 FLD를 이용한 파단 예측 해석을 통해 얻은 성형 깊이 결과가 실험에서 얻은 성형 깊이 결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다. 마그네슘 합금 판재의 온간 성형 해석에서, 파단 예측을 위한 FLD를 다이와 홀더의 온도에 맞추어 선택하는 것이 아니라 매 해석 단계마다 변하는 요소의 온도에 맞추어 선택하는 것이 성형 깊이 결정에 도움이 될 것이라 판단된다.

금형 형상과 온도 변화에 대한 해석 결과에서

는, 펀치의 코너 반경이 일정한 경우에는 다이의 코너 반경이 증가할수록 성형 깊이가 증가하는 것이 확연하게 나타나지만, 다이의 코너 반경이 일정한 경우에는 펀치의 코너 반경의 증가에 따른 성형 깊이가 증가하는 미비한 것을 알 수 있었다. 또한, 동일한 금형의 코너 반경에 대하여 성형 온도가 올라갈수록 성형 깊이가 증가하는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 FLD를 이용한 파단 예측에 대한 연구를 수행하였다. 다이와 홀더의 온도 100°C 이하에서 해석과 실험 간의 성형 깊이 차이가 크게 발생된 것을 확인하였다. 이 같은 차이는 마그네슘 합금 판재의 특성-항복 조건, 이방성, 등-을 해석에 반영하는데 한계가 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 마그네슘 합금 판재의 특성을 해석에 반영하는 연구도 수행될 필요가 있다.

후기

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

참고 문헌

- [1] H. E. Freidrich, B. L. Mordike, 2006, Magnesium technology—Metallurgy, design data, applications, Springer Berlin Heidelberg.
- [2] E. Doege, K. Droder, 2001, Sheet metal forming of magnesium wrought alloys—formability and process technology, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 115, pp. 14–19.
- [3] F. K. Chen, T.-B. Huang, C.-K. Chang, 2003, Deep drawing of square cups with magnesium alloy AZ31 sheets, Inter. J. Machine Tools and Manufac., Vol. 43, pp. 1553–1559.
- [4] D. K. Choo, S. W. Oh, J. H. Lee, C. G. Kang, 2005, The drawability estimation in warm and hot forming of AZ31B magnesium sheet, Trans. Mater. Proc., Vol. 14, pp. 628–634.
- [5] M. H. Lee, H. Y. Kim, H. J. Kim, H. K. Kim, S. I. Oh, 2007, Forming analysis for warm deep drawing process of magnesium alloy sheet, Trans. Mater. Proc., Vol. 16, pp. 401–405.

- [6] H. Palaniswamy, G. Ngaile, T. Altan, 2004, Finite element simulation of magnesium alloy sheet forming at elevated temperature, *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 146, pp. 52~60.
- [7] H. K. Kim, W. R. Lee, S. K. Hong, J. D. Kim, B. K. Han, 2006, Finite-element analysis of warm square cup deep drawing process of magnesium alloy AZ31 sheet, *Trans. Mater. Proc.*, Vol. 15, pp. 232~240.
- [8] M. H. Lee, H. Y. Kim, H. K. Kim, S. I. Oh, Finite element analysis of warm circular cup deep drawing process of AZ31 sheet, 2007 fall conference proceedings of KSTP, pp. 230~233.
- [9] H. Y. Kim, S. C. Choi, H. S. Lee, H. J. Kim, K. T. Lee, 2007, Experiments for forming limit diagram and springback characteristics of AZ31B magnesium alloy sheet at elevated temperature, *Trans. Mater. Proc.*, Vol. 16, pp. 364~369.
- [10] M. H. Lee, H. Y. Kim, H. K. Kim, G. D. Kim, S. I. Oh, 2008, Non-isothermal simulation of warm circular cup deep drawing processing of an AZ31 magnesium alloy sheet, *Mater. Trans.*, Vol. 49, pp. 1120~123.