

마그네슘 합금 AZ31 판재의 온간 사각컵 딥드로잉 성형성의 유한요소 해석

김흥규[#] · 이위로¹ · 홍석관¹ · 한병기² · 김종덕¹

Finite-Element Analysis of Formability in Warm Square Cup Deep Drawing of Magnesium Alloy AZ31 Sheet

Heung-Kyu Kim, Wi Ro Lee, Seok Kwan Hong, Byoung Kee Han, Jong Deok Kim

Abstract

Magnesium alloys are expected to be widely used for the parts of structural and electronic applications due to their lightweight and EMI shielding characteristics. While the die casting has been mainly used to manufacture the parts from the magnesium alloys, the press forming is considered as an alternative to the die casting for saving the manufacturing cost and improving the structural strength of the magnesium alloy parts. However, the magnesium alloy has low formability at room temperature and therefore, in many cases, forming at elevated temperatures is necessary to obtain the required material flow without failure. In the present study, square cup deep drawing tests using the magnesium alloy AZ31 sheet were experimentally conducted at various elevated temperatures as well as room temperature, and the corresponding finite-element simulations, which calculated the damage evolution based on the Oyane's criterion, were conducted using the stress-strain relations from the tensile tests at various temperatures. The formability predictability by the finite-element analysis was investigated by comparing the predicted damage distributions over the deformed AZ31 sheet at elevated temperatures with the corresponding experimental deformations with failures.

Key Words : Magnesium, Warm Press Forming, Damage, Finite Element Analysis Method,

1. 서 론

마그네슘 합금은 약 1.8의 비중으로 알루미늄, 티타늄에 비해서도 훨씬 가벼운 초경량 소재이면서도 비강도, 전자파 차폐성, 진동 감쇠능, 열전도도 등이 모두 우수한 특성을 갖고 있다. 최근 에너지 절약 및 공해 저감을 위한 자동차 등의 수송기계 부품 경량화는 물론, 전자제품에서의 인체에 대한 전자파 차단 목적에서 마그네슘 합금 제품의 개발 및 적용에 대한 수요가 급증하고 있는 추세이다.

마그네슘 합금은 조밀육방체(HCP) 결정구조로

인해 특히 상온에서 소성가공성이 좋지 않아 주로 액체 상태의 마그네슘을 이용하는 주조 및 다이캐스팅에 의해서 제품이 생산되었으나, 구조용 부품에서의 기계적 강도 저하, 높은 후처리 비용, 박판 제품 개발의 어려움 등의 이유로 최근 들어 온간 프레스 금형 기술을 적용한 소성가공에 의한 생산 방식이 많이 연구되고 있는 상황이다. [1-4]

일반적으로 마그네슘 합금은 온도, 가공속도, 윤활 등의 조건에 따라 성형성이 민감하게 달라지므로 이러한 공정 조건에 따른 재료의 성형성 정보는 제품 성형 공정의 설계에 필수적인 요소가 된다. 그러나 실제 개발 제품들은 복잡한 형

1. 한국생산기술연구원 정밀금형팀

2. 홍익대 기계 시스템 디자인 공학과

한국생산기술연구원, E-mail: krystal@kitech.re.kr

상으로 구성되어 있기 때문에 정성적으로 파악된 마그네슘 합금의 성형성 정보만으로 성형 공정상의 문제점을 미리 파악하고 설계에 반영하는 일이 쉽지 않다. 따라서 마그네슘 합금의 소성가공 공정에 대해서도 CAE 해석에 의한 체계적 접근이 필요한데, 여러 온도 조건에 따른 마그네슘 합금의 변형 거동 및 성형성 예측을 위한 CAE 해석 기술은 아직 기반 이론에서부터 해결되어야 할 많은 문제들을 가지고 있다.

본 연구에서는 이러한 마그네슘 합금 프레스 성형의 CAE 해석을 위한 기반 연구로서 마그네슘 합금 AZ31 판재의 온간 사각컵 딥드로잉 공정에 대해 유한요소 해석을 수행하고 실험에서 관찰된 성형 결과와 비교, 분석하였다. 파단을 고려한 성형성 예측을 위해 유한요소 해석에 손상 (damage) 모델을 도입하였고, 실제 실험에서 제품에 파단이 발생하는 단계에 대해 손상계수 값을 계산하였다. 성형 온도에 따른 손상 계수의 변화를 비교, 분석함으로써 마그네슘 합금의 온간 프레스 성형성 예측을 위한 CAE 적용 가능성을 고찰하였다.

2. 온간 사각컵 딥드로잉 성형

2.1 온간 성형 장치

마그네슘의 판재 성형 거동을 실험적으로 고찰하기 위해 금형 내 소재 가열이 가능한 온간 사각컵 딥드로잉 금형을 설계, 제작하였다. 펀치는 40×40 mm의 사각 펀치를 사용하였고, 블랭크 홀더와 다이에 시즈 히터를 삽입하였다. 블랭크 홀더와 다이는 히터에 의해 가열되므로 가공 정밀도를 유지할 수 있도록 열변형이 작은 SKD11을 소재로 사용하였다. 사각컵 딥드로잉 금형을 기술하는 주요 기하학적 변수들을 Fig. 1에 나타내었으며, 본 연구에서 제작된 실제 금형에 대한 각각의 실제 변수 값들을 Table 1에 나타내었다. 윤활제는 상용 테프론 고체윤활제를 사용하였고, 펀치의 스트로크 속도는 10mm/min으로 하였다.

2.1 온간 성형 시험 결과

마그네슘 합금 판재 AZ31의 지름 120mm의 원형 블랭크에 대해 금형 내 온도 조건을 다르게 하면서 사각컵 드로잉을 수행하였다. 온도의 증가에 따른 최종 성형컵의 깊이가 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 전체적인 경향을 보면 온도가 증가

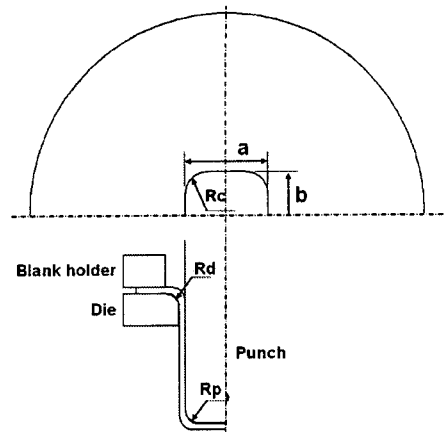


Fig. 1 Geometric parameters of the square cup deep drawing die

Table 1 Spec. of the square cup deep drawing die

Parameter	Value
Punch size (a × b)	40 × 40mm
Punch radius (Rp)	6.25mm
Corner radius (Rc)	10.96mm
Die radius (Rd)	6.25mm
Clearance	0.96mm

할수록 드로잉 깊이가 증가하였지만 200℃에서 드로잉 깊이가 최대가 되고 250℃에서는 오히려 감소함을 볼 수 있었는데, 이는 기존의 연구 결과와 유사함을 알 수 있다. [1] 윤활을 하지 않았을 경우에는 시편과 금형의 마찰로 인하여 드로잉 깊이가 고온에서도 작았는데, 드로잉 깊이는 윤활을 통해 크게 증가함을 알 수 있다.

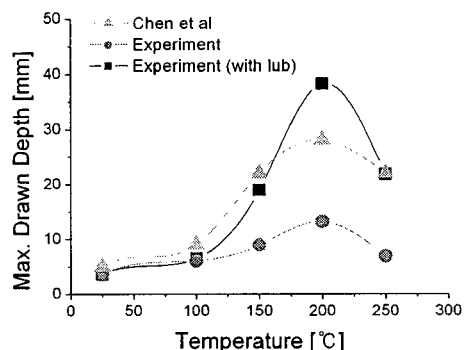


Fig. 2 Drawn square cup from ϕ 120 AZ31B blank at (a) room temperature, (b) 100 °C, (c) 200 °C, and (d) 250 °C

3. 유한요소해석

3.1 AZ31의 응력-변형률 관계

마그네슘 합금 AZ31의 응력-변형률 곡선을 얻기 위해서 상온, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C에서 인장 시험을 수행하였다. Strain rate는 6mm/min, 60mm/min으로 하였으며, 인장시험 결과는 Fig. 3과 같다.

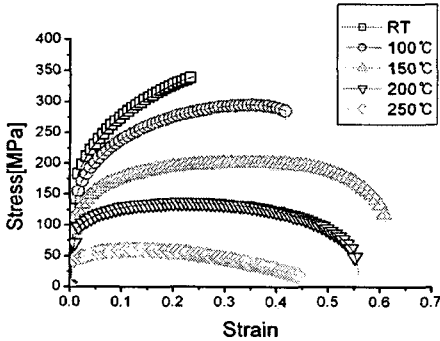


Fig. 3 Stress-strain curve at various temperatures

위의 곡선은 네킹 이후의 영역에 대해 정확한 진응력-진변형률 관계를 얻는데 어려움이 있으므로 본 논문에서는 실제 유한요소해석을 위해서 H. Takuda의 온도에 따른 근사식을 사용하였다. [2].

$$\sigma(\text{MPa}) = K \varepsilon^n \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^m \quad (1)$$

$$A = 0.016 \quad (150 \sim 300^\circ\text{C})$$

$$B = 62.0/t + 0.053$$

$$m = -105/t + 0.303$$

$$K(\text{MPa}) = 3.24 \times 10^5 / t - 406$$

3.2 파단 예측 기준

Cockroft 등은 소성변형일이 임계치에 도달하면 파괴가 일어난다는 소성 변형일 에너지 이론을 제안하였다. 또한 Oyane 등은 다음과 같이 보정상수 A_0 를 삽입한 식을 제안하였는데 본 연구에서는 파단 조건식으로 Oyane의 항복식을 사용하였다.

$$\text{Oyane} = \int \left[1 + \frac{A_0 \cdot \sigma_h}{\bar{\sigma}} \right] d\varepsilon_p = C \quad (2)$$

$$\sigma_h = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$$

3.2 유한요소 모델링 및 해석 조건

원형 블랭크 1/4 모델에 대해 4절점 노드를 갖는 사각형 쉘(shell)요소를 사용하였다. 블랭크 압력은 1MPa로 하였고, 테플론(teflon) 윤활 상태로 가정하여 소재와 금형의 마찰계수로 0.02를 사용하였다. 드로잉 속도는 10mm/min으로 하였다.

4. 시험 결과와 유한요소해석의 비교

4.1 성형 해석 결과

상온, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C에서 유한요소 해석에 의한 손상 계수값과 실험 데이터를 비교하여 파단이 일어날 때의 손상 계수값을 구한 것을 Fig. 4에 나타내었다. 150°C이하의 온도에서는 손상 계수가 2~3 정도에서 파단 되었으나 200°C 이상의 온도에서는 5 이상이 되어도 파단이 되지 않았다. 이것은 200°C를 전후로 하여 AZ31 물성이 많이 달라지는 것을 의미한다.

펀치와 블랭크 사이의 열전달을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우의 드로잉 후 플랜지 형상을 Fig. 5에 유한요소해석과 비교하여 나타내었는데, 열전달을 고려했을 때의 플랜지 형상이 실제 시험 결과와 유사함을 알 수 있다.

한편, 일정한 그리드(grid)가 새겨진 블랭크로 200°C에서 드로잉한 후의 그리드(grid) 패턴 변형을 유한요소해석의 요소 변형과 비교하여 Fig. 6에 나타내었다.

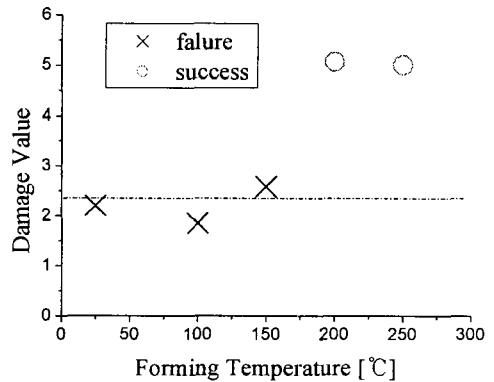


Fig. 4 Relation between damage value and forming temperature

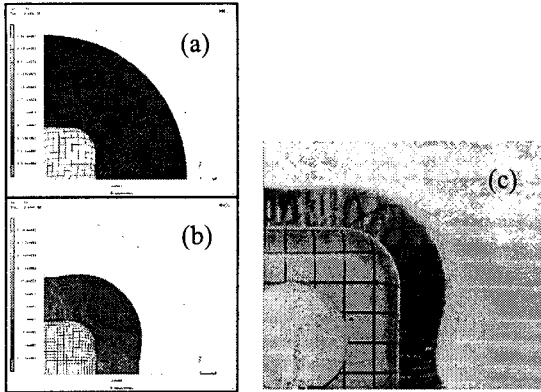


Fig. 5 Blank shapes compared with the experimental result (a) heat transfer is NOT considered, and (b) heat transfer is considered

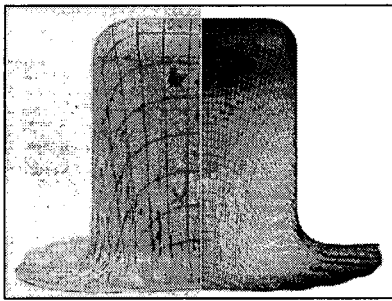


Fig. 6 Grid deformation of experiment compared with mesh deformation of FEM

200°C에서의 손상 계수값과 유효 변형율의 분포를 Fig. 8 에 나타내었다. 열전달을 무시한 경우는 바닥 부분 모서리에서 높은 손상 계수와 유효 변형율이 예상되지만, 열전달을 고려한 경우에는 컵 벽(wall) 부분의 모서리에서 높은 값들이 예상되었다. 실제 실험 결과(Fig. 9)와 비교하면 열전달을 고려했을 때 실제 파단 부위 근방에서 높은 손상 계수와 유효 변형률이 나타남을 알 수 있다.

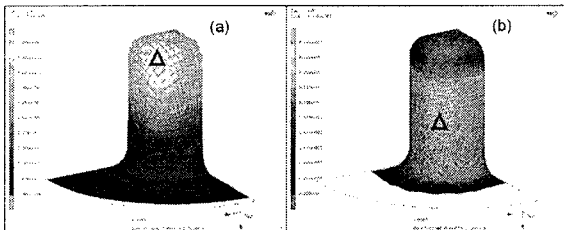


Fig. 8 Damage contours when (a) heat transfer is NOT considered, and (b) heat transfer is considered

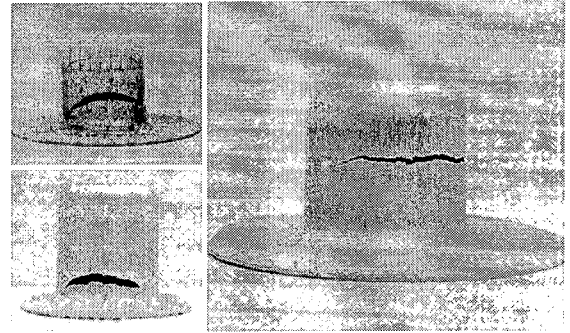


Fig. 9 Failures in the square cup drawing of AZ31

5. 결론

마그네슘 합금 AZ31 판재에 대해 온간 사각컵 딥드로잉 공정의 유한요소해석을 수행하고 실제 실험 결과와 비교하였다. 비교 결과 열전달을 고려할 때 실제 실험과 유사한 변형 거동을 얻을 수 있었다. 손상 모델을 도입하여 온도에 따른 실제 파단 거동과 유한요소해석에 의한 손상 계수 값을 비교한 결과 200°C 이하에서는 파단 시점에 일정한 손상 계수 값이 예측되지만 200°C 이상 온도에서는 더 높은 손상 계수 값에서도 파단이 일어나지 않음을 알 수 있었다. 열전달을 고려한 유한요소해석에서만 최대 손상 계수 값이 예상되는 부위가 실제 실험에서 관찰되는 파단 부위와 유사함을 알 수 있었다. 향후에는 200°C 전후의 각각의 온도 범위에서 손상 모델의 변화를 규명하고 이를 반영한 유한요소해석을 수행할 필요가 있다.

참고 문헌

- [1] F.K. Chen, T.B. Huang, C.K. Chang, 2003, Deep drawing of square cups with magnesium alloy AZ31 sheets, *Int. J. Mach. Tool. Manu.*, 1553-1559
- [2] H. Takuda, T. Morishita, T. Kinoshita, N. Shirakawa, 2005, Modelling of formula for flow stress of a magnesium alloy AZ31 sheet at elevated temperatures, *J. Mat. Proc. Tech.*, 164-165.
- [3] H. Takuda, T. Yoshii, N. Hatta, 1999, Finite-element analysis of the formability of a magnesium-based alloy AZ31 sheet, *J. Mat. Proc. Tech.*, 135-140
- [4] E. Doege, K. Droder, 2001, sheet metal forming of magnesium wrought alloys-formability and process technology, *J. Mat. Proc. Tech.*, 14-19