

이단성형속도에 따른 AZ31판재 온간 성형성 변화

김홍규[#], 김종덕¹, 허영무²

Warm Formability Variation of AZ31 Sheet by Double Stage Forming Velocity

H. K. Kim, J. D. Kim, Y. M. Heo
(Received February 19, 2009)

Abstract

Press forming of magnesium alloy sheet is conducted at elevated temperatures to improve the press formability due to its low formability at room temperature. At elevated temperatures, magnesium alloy sheet formability is known to be very sensitive to the strain rate. In this paper, warm deep drawing tests of magnesium alloy AZ31 sheet was conducted under double forming velocity as well as single forming velocity to examine the formability change by forming velocity profile. The observed formability improvement by double forming velocity was analyzed by using the finite element analysis.

Key Words : Press Forming, Magnesium Alloy Sheet, Formability, Forming Velocity

1. 서론

최근 전세계적 관심사인 에너지 소비 절감을 위해서는 자동차, 항공기 등 수송기기 부품의 경량화가 절실하다. 이를 위해 상용 금속 중 최경량인 마그네슘 합금이 큰 주목을 받고 있는데, 특히 부품강도와 생산성 확보 차원에서 주조가 아닌 단조나 프레스에 의한 부품개발이 최근의 주된 연구 대상이다[1~6].

지금까지의 연구에 따르면 프레스성형 방식으로 마그네슘 합금 판재 부품을 제작하기 위해서는 금형 내 판재 가열이 가능한 온간 프레스금형과 더불어 서보제어 방식의 프레스장비가 필요하다.

여기서 서보 프레스가 필요한 이유는 두 가지로 볼 수 있다. 첫째는 금형 내 판재 가열과 그 이후 성형 공정을 하나의 프레스 싸이클 내에서 처리하기 위함이고, 둘째는 성형속도에 민감한 마

그네슘 성형성을 감안하여 지속 성형을 구현하기 위함이다. 그런데 지속 성형의 경우 성형성을 높이는 효과는 있으나 전체 성형 시간을 늘리기 때문에 생산성 측면에서는 손해가 된다.

만약 전체 성형 시간을 늘리지 않으면서 성형성을 향상시킬 수 있다면 생산성과 성형성의 두 가지 목표를 모두 만족할 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 전체 성형 시간을 변화시키지 않는 대신에 하나의 연속적인 성형 속도를 서보프레스 설정에 의해 불연속적인 이단 속도로 변경해 적용하고 그 효과를 고찰하였다. 연속적인 하나의 성형 속도 대신에 이단 성형 속도를 적용함으로써 나타나는 성형성의 변화를 실험을 통해 온도별로 관찰하였다. 관찰되는 성형성 변화의 원인은 유한요소해석을 통해 분석하였다. 결과적으로 서보프레스에 의한 이단 속도를 적용함으로써 생산성과 성형성 모두를 확보할 수 있음을 알 수 있었다.

1. 한국생산기술연구원 금형기술지원센터
2. 한국생산기술연구원 금형·성형기술연구부
교신저자: 한국생산기술연구원 금형·성형기술연구부,
E-mail: krystal@kitech.re.kr

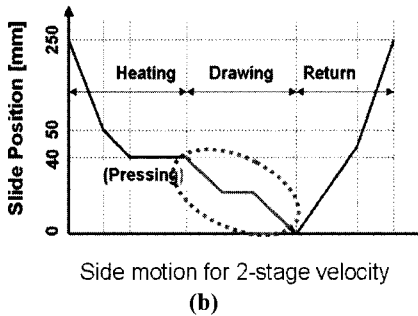
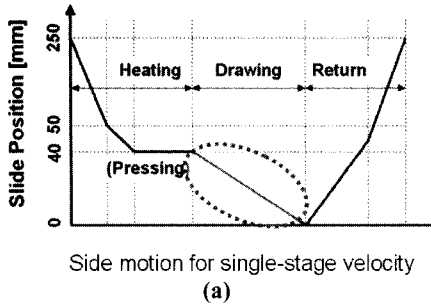


Fig. 1 Press slide motions for (a) single-stage and (b) multi-stage velocity profile

2. 이단속도 성형 시험

2.1 이단속도에 의한 판재 디프드로잉

카트리지 타입 히터가 장착된 온간 금형을 사용하여 AZ31 판재의 디프드로잉을 수행하였다. 이 때 디프드로잉성을 향상시키기 위하여 15℃의 냉각수를 사용하여 드로잉 펀치를 연속적으로 냉각하였다[7]. 불연속적인 이단속도 프로파일을 성형 공정에 적용하기 위하여 서보프레스를 사용하였다. 이단속도에 의한 성형 결과는 연속적인 단일 속도(1%)를 사용했을 때의 결과와 비교하였다. (서보프레스 최대속도가 100%로 설정되어 있음) 서보프레스에 의한 단일속도와 이단속도 각각의 경우에 대한 프레스 슬라이드 위치를 Fig. 1의 (a), (b)에 비교하여 나타내었다. 동일한 성형 시간을 유지하기 위하여 단일속도와 이단속도의 드로잉에 걸리는 시간은 서로 같게 설계하였다. 따라서, 예를 들어, 이단속도의 경우 전반부 속도를 단일 속도(1%)보다 크게 설계하였다면 후반부 속도는 단일속도(1%)보다 작아지게 된다. 이것은 반대의 경우에도 마찬가지가 된다.

이단속도 성형에 모두 5 가지의 속도 조합(전반부 + 후반부)이 사용되었는데, 사용된 값들을 드

Table 1 Sets of double stage forming velocity

Stage	1 st stage (40 → 35mm)	Pause	2 nd stage (35mm →)
Set 1	0.7%	-	1.97%
Set 2	0.9%	-	1.30%
Set 3	3%	-	0.71%
Set 4	5%	-	0.66%
Set 5	7%	-	0.64%

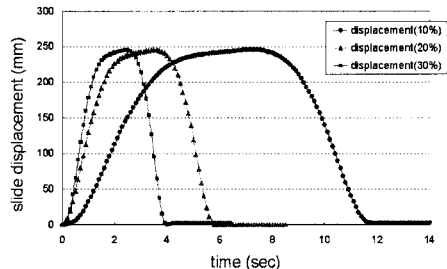


Fig. 2 Experimentally measured press slide motions

로잉 깊이에 따라 Table 1에 나타내었다. 한편, 프레스 슬라이드의 실제 변위를 LVDT로 측정하였는데, 프레스 최대속도 대비 10, 20, 30%에 대한 시간-슬라이드 변위 곡선을 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 이단속도에 따른 드로잉 깊이 변화

5 가지의 이단속도 조합에 대해서 150℃와 250℃ 두 가지 온도 조건(금형 기준)에서 디프드로잉 시험을 수행하고 파단이 발생하는 드로잉 깊이를 측정하였다. 그 결과 각각의 온도에서 측정된 파단 발생 드로잉 깊이를 Fig. 3에 나타내었다. 결과를 보면, 150℃에서는 이단속도 설정이 set1과 같은 가속 모드(전반부 속도보다 후반부 속도가 큰 경우)로부터 set5와 같은 감속 모드(전반부 속도가 후반부 속도보다 큰 경우)로 갈수록 파단 드로잉 깊이가 증가함을 볼 수 있었고, 250℃에서는 이단속도 설정이 가속 모드로부터 감속 모드로 갈수록 파단 드로잉 깊이가 감소함을 볼 수 있었다. 비교를 위해 단일속도를 사용하여 디프드로잉 시험 후 파단 드로잉 깊이를 측정해 보면 150℃에서는 6mm, 250℃에서는 10mm의 값을 볼 수 있었다. 이 결과를 보면 이단속도를 사용함으로써 단일속도를 사용했을 때보다 두 가지 온도 모두에서 파단 드로잉 깊이를 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 다만, 이단속도를 적용할 때 가속 모드가 유리한지 감속 모드가 유리한지는 온도 조건에 따라 달라짐을 알 수 있다.

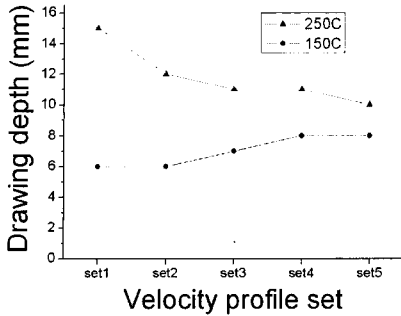


Fig. 3 Measured drawing depths at 150 and 250 °C

3. 이단속도 성형의 유한요소해석

3.1 AZ31판재 파단해석 모델

이단속도에 의한 파단 드로잉 깊이 증가의 원인을 분석하기 위하여 변형과 파단 거동에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 파단 거동 예측을 위하여 온도와 변형률 속도를 고려할 수 있는 손상 (damage) 기반의 파단 예측 모델[8]을 유한요소해석에 적용하여 150°C와 250°C 조건의 단일속도와 이단속도 디프드로잉 공정을 해석하였다.

사용한 손상 기반의 파단 예측 모델은 기존의 Freudenthal 연성파괴기준에 기초를 두고 있다. 일축 인장시험 데이터로부터 파단 발생시 손상을 온도와 변형률 속도의 함수로 표현하기 위한 매개변수로 Zener-Holloman 변수를 사용하였다. Zener-Holloman 변수의 함수로 표현된 유한요소해석 파단 예측 모델은 최종적인 형태로 Eq. (1)-(4)의 식으로 나타낼 수 있었다.

$$W_{NC}^* = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T)}{h(\dot{\bar{\epsilon}}, T)} d\bar{\epsilon} = 1 \quad (1)$$

$$W_{NC}^* = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T)}{f(Z)} d\bar{\epsilon} = 1 \quad (2)$$

$$f(Z) = -25698.17 + 7824.87 \times \ln(Z) - 962.38 \times [\ln(Z)]^2 + 61.24 \times [\ln(Z)]^3 - 2.13 \times [\ln(Z)]^4 + 0.038 \times [\ln(Z)]^5 - 0.00028 \times [\ln(Z)]^6 \quad (3)$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (4)$$

위의 Eq. (4)에서 Q는 활성화 에너지로서 92kJ/mol로 주어지고, R은 가스(gas) 상수이다.

3.2 이단속도 디프드로잉의 유한요소해석

온도 150°C 조건에서 이단속도 5가지 조합에 대해 시험에서 측정된 파단 발생 드로잉 깊이와 유한요소해석에 의한 파단 예측 드로잉 깊이를 비교하여 Fig. 4(a)에 나타내었다. 결과를 보면 150°C에서는, 비록 절대값의 차이는 있으나, 이단속도 조합에 따른 변화의 경향은 상당히 유사함을 볼 수 있었다. 반면 온도 250°C 조건에서는 시험에서 측정된 파단 발생 드로잉 깊이와 유한요소해석에 의한 파단 예측 드로잉 깊이를 Fig. 4(b)에 나타내었는데, 결과를 보면 이단속도 조합에 따른 변화 추이가 서로 유사하지 않음을 볼 수 있었다.

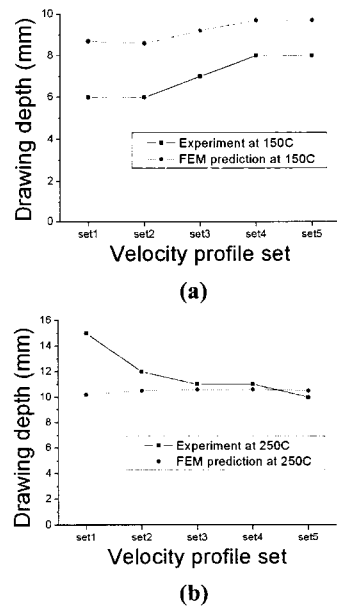


Fig. 4 Comparison of drawing depth between experiment and FEM prediction at temperatures of (a) 150 °C and (b) 250 °C

유한요소해석과 시험 결과와의 비교로부터 이단속도를 적용할 경우에 전반부 속도가 후반부 속도보다 전체 드로잉 성형성에 더 큰 영향을 미치는 사실을 추측할 수 있다. 즉, 150°C에서는 전반부의 낮은 성형 속도(긴 성형 시간)로 인해 비교적 충분한 시간 동안 AZ31 판재가 150°C 이하로 냉각되면서 기본적인 소재 성형성이 감소했을

것으로 예상된다. 반대로 250℃에서는 전반부의 낮은 성형 속도(긴 성형 시간) 조건에서 판재가 250℃ 이하로 냉각되더라도 그 냉각으로 인한 소재 기본 성형성 감소보다는 낮은 성형 속도에 의한 변형률 속도의 효과가 더 컸을 것으로 예상된다. 따라서 유한요소해석 파단 예측의 정확도를 향상시키기 위해서는 사용한 파단 예측 모델에서 전반부 파단 거동에 대한 가중치가 증가되어야 할 것으로 보인다.

4. 결론

본 논문에서는 AZ31 판재의 온간 디프드로잉 공정에서 단일속도가 아닌 이단속도를 적용하였을 때 성형성의 변화를 시험과 유한요소해석을 통해 고찰하였다.

편치의 냉각 작용으로 인해 특히 150℃ 조건에서는 이단속도의 전반부 성형 시간이 후반부와 전체 성형 공정에서 매우 중요한 인자가 되었다. 전반부 성형 구간에서 편치 냉각 작용 150℃의 AZ31 판재의 성형성 저하에 심각한 영향을 미치는 것으로 보였다. 150℃에서 이단속도 조합에 따른 성형성의 변화 추이는 유한요소해석을 사용하여 비교적 정확하게 예측되었다.

반면 250℃에서는 전반부 성형 구간에서의 편치 냉각 작용이 후반부나 전체 성형성에 작은 영향만을 미치는 것으로 보였다. 250℃에서는 파단 예측 모델을 사용하여 이단속도 전체 공정에 걸쳐 유한요소해석을 수행하면 시험 결과와 잘 맞지 않음을 볼 수 있었는데, 위에 설명한 이유로 인해 250℃에서는 전반부에서의 변형률 속도 효과만을 고려할 때 측정된 시험 결과를 비교적 정확히 설명할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 “2010 생산기반혁신기술개발사업”의 “경량판재 프레스성형부품화 기반기술 개발” 과제

의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. Takuda, T. Yoshii, N. Hatta, 1999, Finite-element analysis of the formability of a magnesium-based alloy AZ31 sheet, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 89-90, pp. 135~140.
- [2] F. K. Chen, T. B. Huang, C. K. Chang, 2003, Deep drawing of square cups with magnesium alloy AZ31 sheets, *Int. J. Mach. Tool. Manufac.*, Vol. 43, pp. 1553~1559.
- [3] E. Doege, K. Droder, 2001, Sheet metal forming of magnesium wrought alloys-formability and process technology, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 115, pp. 14~19.
- [4] 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, *Transactions of Materials Processing*, Vol. 15, No. 3, pp. 232~240.
- [5] J. G. Park, Y. S. Kim, T. Kuwabara, B. S. You, 2005, Plastic Deformation Characteristic of AZ31 Magnesium Alloy Sheet, *Transactions of Materials Processing*, Vol. 14, No. 6, pp. 520~526.
- [6] N. Ogawa, M. Shiomi, and K. Osakada, 2002, Forming limit of magnesium alloy at elevated temperatures for precision forging, *Int. J. Mach. Tool. Manufac.*, Vol. 42, pp. 607~614.
- [7] S. Yoshihara, H. Yamamoto, K. Manabe, H. Nishimura, 2003, Formability enhancement in magnesium alloy deep drawing by local heating and cooling technique, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 143-144, pp. 612~615.
- [8] W. J. Kim, H. K. Kim, W. Y. Kim, S. W. Han, 2008, Temperature and strain rate effect incorporated failure criteria for sheet forming of magnesium alloys, *Mat. Sci. Eng. A*, Vol. 488, pp. 468~474.