

AZ31B 마그네슘 판재의 온,열간 딥드로잉 성형성 및 공정해석

한수훈¹, 추동균¹, 강충길[#]

A Study on the Deep drawing drawability and Analyzing process of AZ31B Magnesium Sheet at Warm and Hot temperature

S. H. Han, D. K. Choo, C. G. Kang

Abstract

The drawability of AZ31B magnesium sheet is estimated at various temperatures (200, 250, 300, 350 and 400 °C), and forming speed (20, 50, 100 mm/min), thickness (0.5, 0.8, 1.0, 1.4 mm). The deep drawing process of circular cup and square cup were used in forming experiments. Experimental and FEM analysis are performed to investigate drawability and affection of controlled blank holding force. Through the controlled blank holding force, drawability was improved. This result is verified by FEM analysis. Through the observation of microstructure, the main cause is investigated as a quantity of the dynamic recrystallization.

Key Words : AZ31B Magnesium Sheet, Deep Drawing Process, Drawability, Limit Drawing Ratio, Dynamic Recrystallization

1. 서론

마그네슘 성형은 세계적으로 다이캐스팅이 공정이 주류이나 마그네슘 판재(AZ31B) 생산의 일반화로 환경문제, 제품의 성형 가능성, 품질 및 환경 친화적 측면에서 우수한 마그네슘 박판 성형 기술에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 지금까지 진행되고 있는 마그네슘 판재의 딥드로잉 공정에 대한 연구는 Yoshihara의 펀치 국부 냉각 방식, Tagawa의 펀치 반경의 영향, Koga의 금형의 코팅 방법등과 같이 주로 펀치 및 금형에 대한 연구가 이루어져왔다. 반면 국내에서는 마그네슘 판재(AZ31B)의 기초 물성치 데이터 베이스 조차 미흡한 실정이며 그로 인해 한계드로잉율 이하의 조건에서 주로 실험 및 해석이 진행되고 있다.[1]~[6]

따라서 본 연구에서는 실험에 앞서 마그네슘 판재 AZ31B의 드로잉 성형성을 알아보기 위해 딥드로잉 실험을 토대로 한계 드로잉비와 블랭크 치수를 결정한 후, 딥드로잉 실험을 진행하였다.

또한, 펀치 및 금형에 관련한 연구뿐만 아니라,

딥드로잉 공정의 가장 중요한 인자중의 하나인 블랭크 홀더력을 제어하여 실험을 진행하였으며 이로 인하여 개선된 한계드로잉율을 검증하기 위해 상용 CAE 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 해석은 실제 실험에서 사용된 조건으로 원형 및 직사각형 딥드로잉에 대한 해석을 수행하였으며 공정동안의 주요 관심분야 및 결함 발생 가능성 등을 파악하고자 하였다. 향후 시제품 금형이 제작되기 전 소재의 두께, 윤활, 펀치의 형상 및 금형의 공차 등에 따른 영향을 파악할 수 있을 것이며 이들을 해석에서 해석한 데이터들과 비교, 검토하여 신뢰성있는 해석 시스템을 구축하게 될 것이며 또한 금형 및 공정 설계시에 CAE의 활용도를 높일 수 있을 것이다.

2. 딥드로잉 실험

2.1 원형컵의 딥드로잉 실험

사전 연구에서 딥드로잉 실험 및 CAE에 필요한 기초 물성치인 탄성 계수, 강도 계수, 이방성 계수, 항복 강도, 최대 인장 강도, 가공 경화 지수, 변형률 민감도 지수 등을 실제 딥드로잉 실험에 사용할

1. 부산대학교 정밀기계공학과

#. 부산대학교 기계공학부, E-mail: cgkang@pusan.ac.kr

변형률 속도 및 온도에서 인장 및 압축 실험을 하였다.[7]

인장 실험을 통해 얻은 한계드로잉율(LDR)은 Table 1 과 같으며, 한계드로잉율과 Folding-criteria, 그리고 Eq. (1)을 고려하여 실험을 진행하였다. 딥드로잉 성형 공정에 중요한 영향인자중 하나인 블랭크 홀더력의 영향을 알아보기 위하여 Fig. 1 과 같이 두가지 형태의 블랭크 홀더력을 적용하여 드로잉성을 향상시키는 연구를 수행하여 Fig. 2 와 같은 결과를 얻을 수 있었다.[8]

Table 1 Limit drawing ratio according to the temperature

Temperature(°C)	LDR
R.T	2.24
200	2.22
250	2.16
300	2.158
350	2.199
400	2.166

$$d_b = 2\sqrt{\frac{d^2}{4} + dh + (\pi - 4)\frac{d}{2}r_p + (3 - \pi)r_p^2} \quad (1)$$

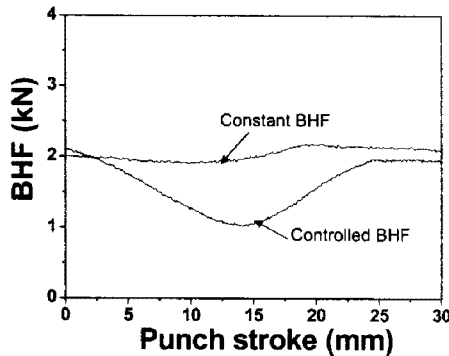


Fig. 1 Relationship between punch stroke and blank holding force

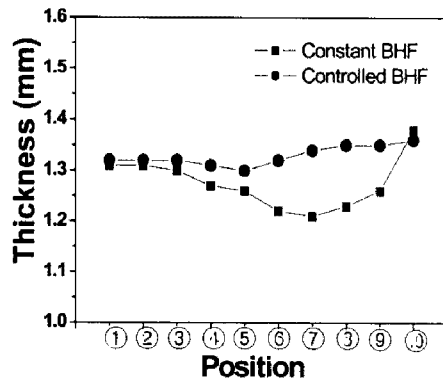


Fig. 2 Comparison between constant BHF and controlled BHF: Change of the cup thickness according to the positions after the deep drawing test $T_d = 250\text{ }^\circ\text{C}$, $V_d = 50\text{ mm/min}$, $t_b = 1.4\text{ mm}$

Fig. 2 에서 보여지는 바와 같이 두께 변화가 10% 이상 감소된 것을 볼 수 있다.

2.2 사각형컵의 딥드로잉 실험

실험에 사용된 블랭크의 두께는 0.5, 1.0 mm 이며, Eq. (2) 를 이용하여 구하였다. 여기서 성형 목적물 형상의 l_1 , l_2 , r_c , r_p 의 값은 각각 40, 60, 5, 5 mm 이며 h_d 의 값은 15, 23 mm 으로 블랭크를 설계하였다.

$$\begin{aligned} h'_d &= h_d - (r_p + t), \\ R_c &= \sqrt{2r_c h'_d + r_c^2 + 1.14r_c r_p} \\ L_1 &= w_1 + 2h'_d + \pi r_p, \quad L_2 = w_2 + 2h'_d + \pi r_p \\ w_1 &= l_1 - 2(r_p + t), \quad w_2 = l_2 - 2(r_p + t) \end{aligned} \quad (2)$$

사각형 딥드로잉에서도 블랭크 홀더력이 LDR에 영향을 미치는지 재확인 하기 위하여 Fig. 3 과 같이 세가지 경우의 블랭크 홀더력을 적용하여 실험을 한 후, 두께 변화율이 가장 적었던 case 1형상의 블랭크 홀더력을 적용하여 나머지 실험을 진행하였다. case 3은 블랭크 홀더력의 변화를 주지 않고 정적 하중을 적용한 것이며, case 1과 case 2의 경우는 하중 제어의 기울기에 따른 변화를 보기 위하여 하중이 감소하는 양을 조절한 것이다[9].

3. 유한요소 해석

블랭크의 두께 변화, 변형 특성 및 성형성을 알아보기 위하여 온도 및 속도에 따른 성형한계도 (FLD) 를 DYNAFORM S/W 를 이용하여 인장 실험에서 구한 이방성 계수 r , 강도 계수 K , 탄성 계수 E , 가공 경화지수 n 값을 대입하여 구하였다. 구한 FLD 는 Fig. 4 와 같다. 판재성형 공정상의 결함을 없애고, 실험에서 얻은 주요 물성 데이터를 바탕으로 상용 CAE 인 ABAQUS 6.5 를 활용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소 해석과정은 Eq. (3)과 같은 비선형 방정식으로 표현된다.

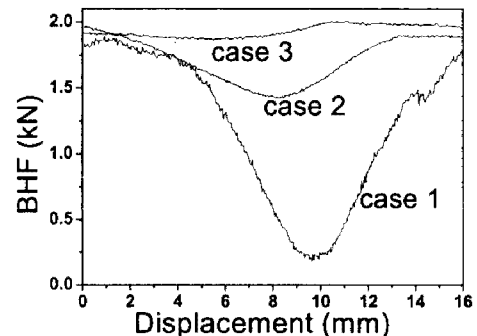


Fig. 3 Three cases of the BHF

$$\delta\pi = \int \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int \epsilon \delta \epsilon_v dV - \int f_i \delta u_i dS = 0 \quad (3)$$

여기서 $\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2}(\sigma_{ij}'\sigma_{ij}')}$, $\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}(\epsilon_{ij}\epsilon_{ij})}$, σ_{ij}' 는 편차응력, f_i 는 표면력, u_i 는 속도성분, ϵ_{ij} 는 변형률 속도, ϵ_v 는 체적 변형률 속도이다. Eq. (3) 은 유한요소 분할화 과정을 거치면 절점의 속도가 미지수인 Eq. (4) 와 같은 비선형 방정식이 된다.

$$\phi(\hat{V}) = \int_{\hat{\epsilon}} \bar{\sigma}^T DBdV \hat{v} + K \int B^T cc^T BdV \hat{v} - \int f_i^T Nds = 0 \quad (4)$$

두께 변화, 응력분포 및 FLD 를 이용 성형 여부를 판단하기 위하여 요소들의 변형률등을 구하기 위해 ABAQUS 의 해석 방법 중에서 Dynamic/Explicit 를 사용하였으며, 기타 해석에 사용된 주요 물성치 역시 실험에서 구한 것을 사용하였으며, 이는 Table 2 와 같다.

Table 2 Mechanical properties used to simulate deep drawing process obtained by tensile test

Test Condition		E	ν	N	K	r_{avg}
Temp (°C)	Strain rate (sec ⁻¹)	(Gpa)				
250	0.033	26.2	0.32	0.13	178	1.549
350	0.013	8.01	0.33	0.05	63	0.920
Density (kg/mm ²)		1.74e ⁻⁶				
Friction coefficient		0.025				
BHF (N)		500 (controlled or uncontrolled)				

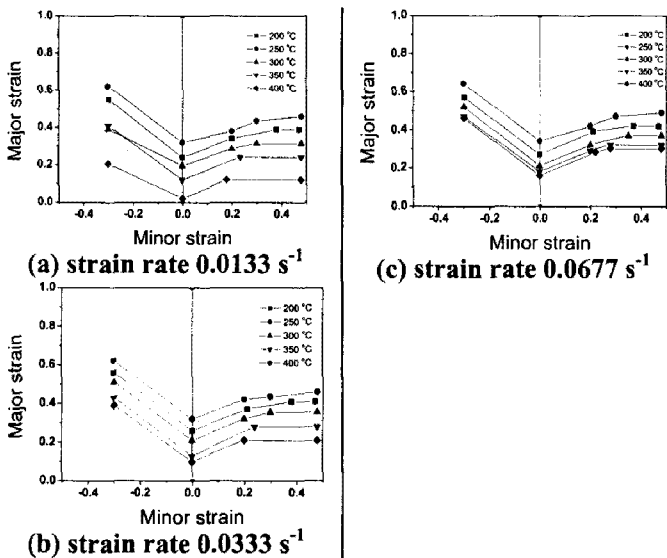


Fig. 4 Forming limit diagram (FLD) according to the temperature and the strain rate

4. 결과 및 비교

4.1 원형컵의 실험 및 해석 비교

블랭크 홀더력을 제어했을 때는 두께 변화폭이 블랭크 홀더력을 제어하지 않았을 때 보다 더 적음을 알 수 있다. Fig. 5 는 350 °C 온도에서 20 mm/min 의 성형속도로 1.4 mm 두께의 블랭크를 30 mm 깊이로 성형했을 때 블랭크 홀더력의 제어 유무에 따른 성형성을 동일한 조건의 인장실험을 통해 얻은 FLD 를 통해 비교해 본 것이다.

Fig. 6 은 블랭크 홀더력을 제어하여 성형 깊이 40 mm, 한계드로잉비 2.5 가 되게하여 시뮬레이션 한 결과를 나타낸 것이다. 이 때 성형 온도 250 °C, 성형속도 50 mm/min, 블랭크 두께 1.4 mm 이다. Fig. 6 (a) 는 제어하지 않은 블랭크 홀더력에 대한 시뮬레이션 결과이다.

이를 통해 알 수 있듯이 제어하지 않은 블랭크 홀더력에서는 한계드로잉비를 넘어서는 제품을 성형할 수 없음을 알 수 있다. 하지만 Fig. 6 (b) 를 보면 동일한 시뮬레이션 조건에서 요소와 FLD 선도상의 파단없이 성형이 될 수 있다는 것을 예측할 수 있다.

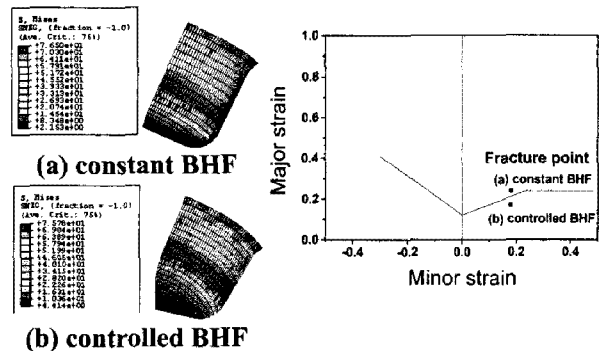
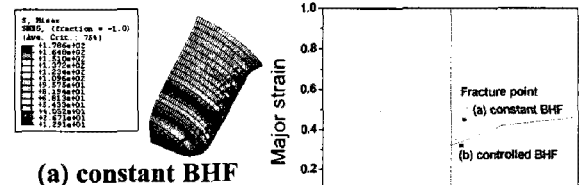
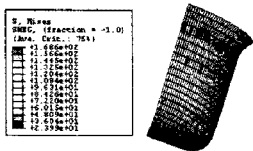


Fig. 5 Comparison of the drawability between (a) constant BHF and (b) controlled BHF through the strain-path of FLD, $T_d = 350$ °C, $V_d = 20$ mm/min $t_b = 1.4$ mm and node 985 : 0., 0., 13.32

4.2 사각형컵의 실험 및 해석 비교

블랭크 홀더력 감소의 기울기에 따른 성형성의 비교를 위해 Fig. 3 과 같은 형태의 세가지 블랭크 홀더력을 적용하여 시뮬레이션하여 성형품의 두께를 측정 해 본 결과가 Fig. 7 에 나타나 있다. 감소폭이 크면 클수록 컵의 두께 변화가 줄어드는 것이 확인되었다.





(b) controlled BHF

Fig. 6 Comparison of the drawability between (a) constant BHF and (b) controlled BHF through the strain-path of FLD, $T_d = 250\text{ }^\circ\text{C}$, $V_d = 50\text{ mm/min}$, $t_b = 1.4\text{ mm}$ and node 985 : 0., 0., 13.32

Fig. 3 의 case 1 과 case 3 형태의 BHF 를 적용하여 23 mm 깊이로 시뮬레이션 해본 결과를 FLD 상에 도시해 본 결과가 Fig. 8 에 나타나 있다. 실제 실험과 유사하게 블랭크 홀더력의 제어가 성형성에 영향을 미침을 예측할 수 있다.

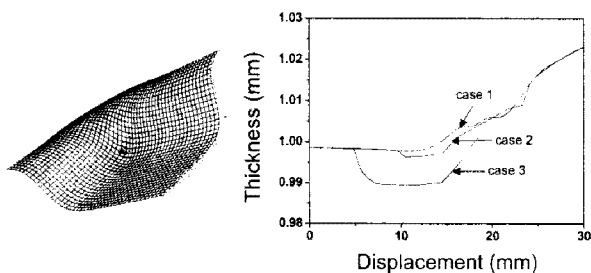
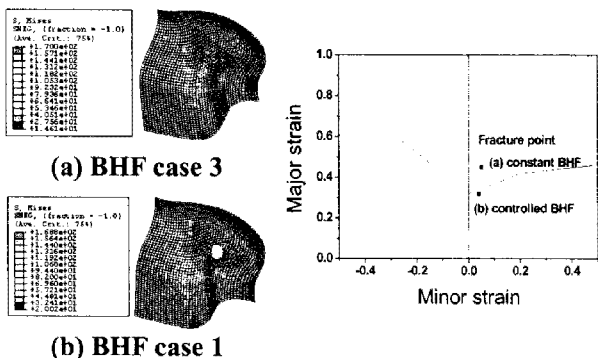
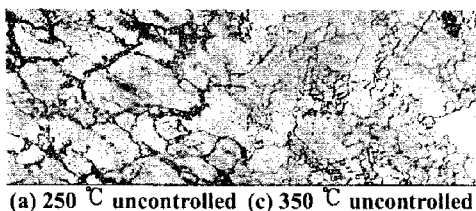


Fig. 7 Comparison of the thickness change of the cup between three cases of BHF, $T_d = 250\text{ }^\circ\text{C}$, $V_d = 50\text{ mm/min}$, $t_b = 1.0\text{ mm}$

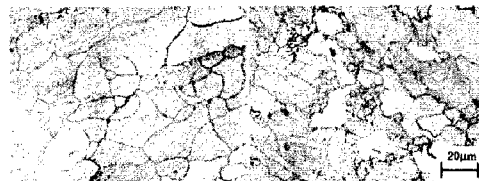


(b) BHF case 1

Fig. 8 Comparison of drawability between (a) constant BHF and (b) controlled BHF through the strain-path of FLD, $T_d = 250\text{ }^\circ\text{C}$, $V_d = 50\text{ mm/min}$, $t_b = 1.0\text{ mm}$ and node 1341 : 18.083183, 0., 16.767138



(a) 250 °C uncontrolled (c) 350 °C uncontrolled



(b) 250 °C controlled (d) 350 °C controlled

Fig. 9 Microstructures at each position and experimental conditions

Fig. 9 는 성형된 컵의 가장 큰 변형을 받는 측면부의 조직을 관찰한 것이다. 사전 연구에서 알 수 있듯 온도가 올라갈수록, 그리고 두께 변화가 많을수록 동적 재결정의 생성 및 성장이 활발해 짐을 알 수 있다[10].

5. 결론

본 연구에서는 AZ31B 마그네슘 합금판재의 원형 및 사각형 컵드로잉의 성형성에 대해 CAE 와 실험을 통해 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일정한 블랭크 홀더력을 적용하여 실험을 하였을 때에 비해 블랭크 홀더력을 제어하여 적용하였을 때 컵의 두께 변화가 10 % 이상 감소하였다.

(2) 사각형컵의 닥드로잉 실험에서도 실시간으로 블랭크 홀더력을 제어한 경우 case 1 의 블랭크 홀더력을 적용하면 두께 변화율이 10% 이하였다.

(3) 컵의 두께 변화가 많은 실험 조건일수록 미세조직을 관찰한 결과 동적 재결정이 많이 발생하였고, 이를 통해 AZ31 마그네슘 합금의 두께 변화는 동적 재결정이 그 중요한 원인이 됨을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 원성연, 오상균, 2004, AZ31 마그네슘 합금 판재의 기계적 특성평가(1), 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 53~56.
- [2] 이병호, 신광선, 이종수, 2004, AZ31 Mg 합금의 가공 조건에 따른 고온 성형성 연구, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 80~83.
- [3] E. Doege and K. Dröder, 2001, Sheet metal forming of magnesium wrought alloys-formability and process. J. Mater. Proc. Technol., Vol. 115, pp. 14~19.
- [4] S. Yoshihara and H. Nishimura, 2003, Formability enhancement in magnesium alloy stamping using a

local heating and cooling technique circular cup deep drawing process, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 142, pp. 609~613.

- [5] S. Tagawa and N. Koga., 2003, Effect of tool radius on formability during deep drawing of AZ31 magnesium alloy sheets, Journal of Japan Institute of Light Metal, Vol. 53, pp. 152~156.
- [6] N. Koga, 2001, Practical use of hard-carbon-coated tools in deep drawing of AZ31 magnesium alloy sheets, Journal of Japan Institute of Light Metal, Vol. 51, pp. 441~445.
- [7] 오세용, 추동균, 이준희, 강충길, 2005, 마그네슘 판재성형을 위한 인장 및 압축실험을 통한

기계적 물성 평가, 한국소성가공학회지 제 14 권 7 호, pp. 635~641.

- [8] 추동균, 오세용, 이준희, 강충길, 2005, AZ31B 마그네슘판재의 온간, 열간 딥드로잉 성형성 평가, 한국소성가공학회지 제 14 권 7 호, pp. 628~634.
- [9] 추동균, 이준희, 강충길, 2005, 톨 표면처리 및 온도가 AZ31 마그네슘 판재의 드로잉성에 미치는 영향, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 118~121.
- [10] H. Ding and L. Liu, 2005, Simulation of dynamic recrystallization of AZ91 alloys by cellular automata model, 1st Aisan Symp on Mg alloys, pp.341~344.