

AZ31B 마그네슘 판재의 온·열간 딥드로잉에 관한 연구

김한구¹·배정운¹·추동균¹·강충길[#]

A Study on the Deep Drawing of AZ31B Magnesium Sheet at Warm and Hot Temperature

H. G. Kim, J. W. Bae, D. K. Choo, C. G. Kang

(Received July 4, 2006)

Abstract

The drawability of AZ31B magnesium sheet is estimated at various temperatures(200, 250, 300, 350 and 400°C), and forming speed(20, 50, 100mm/min), thickness(0.5, 0.8, 1.0, 1.4mm). 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. Limit drawing ratio is increased from 2.1 to 3.0 in circular cup drawing and change of thickness is decreased from 16.3 to 6.9%. 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. 서 론

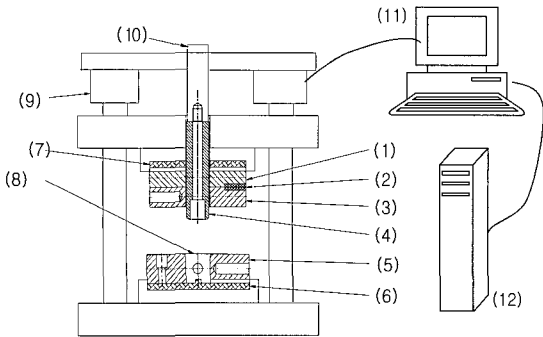
마그네슘 성형은 세계적으로 다이캐스팅이 공정이 주류이나 마그네슘 판재(AZ31B) 생산의 일 반화로 환경문제, 제품의 성형 가능성, 품질 및 환경 친화적 측면에서 우수한 마그네슘 박판 성형 기술에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 실제 마그네슘 다이캐스팅 제품의 경우 불량률이 40 %에 달하며, 환경오염을 유발하는 SF₆ 가스를 다량 사용하여야 한다. 지금까지 진행되고 있는 마그네슘 판재의 딥드로잉 공정에 대한 연구는 Yoshihara[1]의 펀치 국부 냉각 방식, Tagawa [2]의 펀치 반경의 영향, Koga[3]의 금형의 코팅 방법 등과 같이 주로 펀치 및 금형에 대한 연구가 이루어져 왔다. 반면 국내에서는 마그네슘 판

재(AZ31B)의 기초 물성치 데이터 베이스가 미흡한 실정이어서 그로 인하여 한계드로잉을 이하의 조건에서 주로 실험 및 해석이 진행되고 있다[4~6].

따라서 본 연구에서는 실험에 앞서 마그네슘 판재 AZ31B의 드로잉 성형성을 알아보기 위해 딥드로잉 실험을 진행할 온도 범위인 200~400°C에서 0.0013~0.1333s⁻¹의 변형률 속도로 인장시험을 수행하여 판재의 기초 물성치를 구한 다음 이를 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 위

1. 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
교신저자: 부산대학교 기계공학부, E-mail: cgkang@pusan.ac.kr



(1)Die holder, (2)Heater hole, (3)Blank holder, (4)Punch, (5)Die, (6) and (7)asbestos, (8)Blank, (9)Blank holding force control cylinder, (10)Main cylinder, (11)Data logger, (12)Blank holding force control box

Fig. 1 The schematic of the deep drawing press with blank holding force control system

해 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 변형률 속도 및 온도에서 인장 및 압축 실험을 하였다[7]. 딥드로잉에 사용된 프레스 및 데이터 획득장치의 구성은 Fig. 1과 같다.

인장 실험을 통해 얻은 한계드로잉율(LDR)은 Table 1과 같으며, 한계드로잉율과 Folding-criteria, 그리고 식 (1)을 고려하여 Fig. 2와 같은 형상과 치수를 가지는 원형 컵을 목적물 형상으로 하여 실험을 진행하였다. 딥드로잉 성형 공정에 중요

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

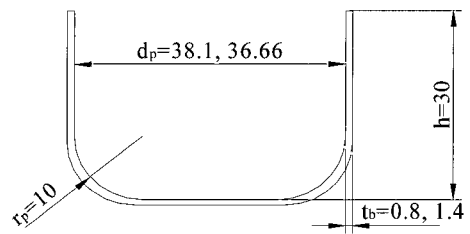


Fig. 2 The objective shape and dimension of the circular cup

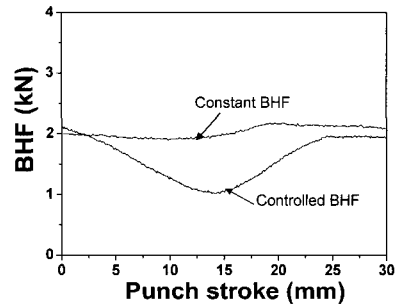


Fig. 3 Relationship between punch stroke and blank holding force

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

한 영향인자중 하나인 블랭크 홀더력의 영향을 알아보기 위하여 Fig. 3과 같이 두가지 형태의 블랭크 홀더력을 적용하여 드로잉성을 향상시키는 연구를 수행하여 Fig. 4와 같은 결과를 얻을 수 있었다[8].

Fig. 4 (a)에서 보여지는 바와 같이 두께 변화가 10% 이상 감소된 것을 볼 수 있다. Fig. 4 (a)의 실험 조건은 BHF=2.0kN, $t_b=1.4$ mm, $T_b=250^\circ\text{C}$ 그리고

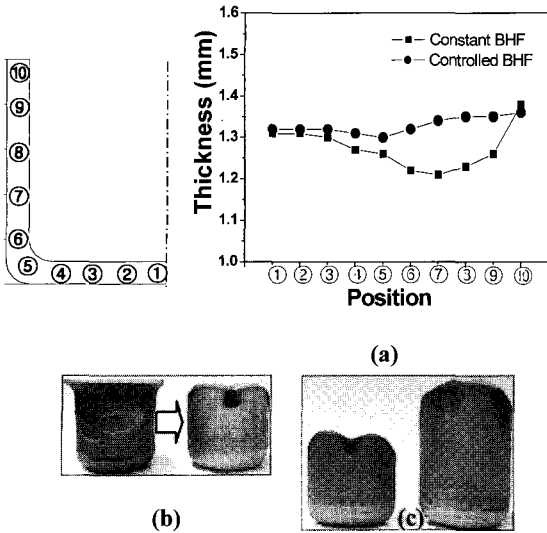


Fig. 4 Comparison between constant BHF and controlled BHF: (a) Change of the cup thickness according to the positions after the deep drawing test $T_d=250^\circ\text{C}$, $V_d=50\text{mm/min}$, $t_b=1.4\text{mm}$; (b) $T_d=350^\circ\text{C}$, $V_d=20\text{mm/min}$; (c) $T_d=250^\circ\text{C}$, $V_d=50\text{mm/min}$

$$h'_d = h_d - (r_p + t)$$

$$R_c = \sqrt{2r_c h'_d + r_c^2 + 1.14r_c r_p}$$

$$L_1 = w_1 + 2h'_d + \pi r_p, \quad L_2 = w_2 + 2h'_d + \pi r_p$$

$$w_1 = l_1 - 2(r_p + t), \quad w_2 = l_2 - 2(r_p + t) \quad (2)$$

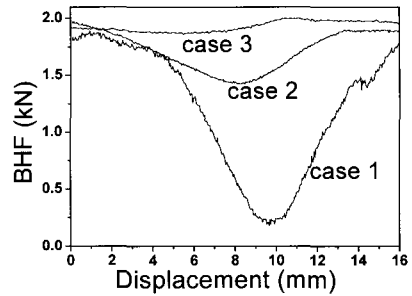


Fig. 6 Three cases of the BHF

낸 그림이다.

2.2 사각형컵의 뒤편드로잉 실험

실험에 사용된 블랭크의 두께는 0.5, 1.0mm이다. 두께에 따른 블랭크의 치수는 Fig. 5의 성형 목적물 형상에 따라 예비 블랭크 전개도에서 식 (2)를 이용하여 구하였다. 여기서 성형 목적물 형상의 l_1 , l_2 , r_c , r_p 의 값은 각각 40, 60, 5, 5mm이며 h_d 의 값은 15, 23mm으로 블랭크를 설계하였다.

사각형 뒤편드로잉에서도 블랭크 홀더력이 LDR에 영향을 미치는지 재확인 하기 위하여 Fig. 5와 같이 세가지 경우의 블랭크 홀더력을 적용하여 실험을 한 후 두께 변화율이 가장 적었던 case 1 형상의 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].

두께의 최대 변화율을 측정해 본 결과는 Table 2과 같다. 이를 통해 BHF 제어가 사각형 컵의 드로잉성에도 영향을 미치며 그 변화폭이 클수록 두께 변화율이 줄어드는 것을 확인할 수 있었으며 이 후 실험에서는 case 1과 동일한 BHF를 적

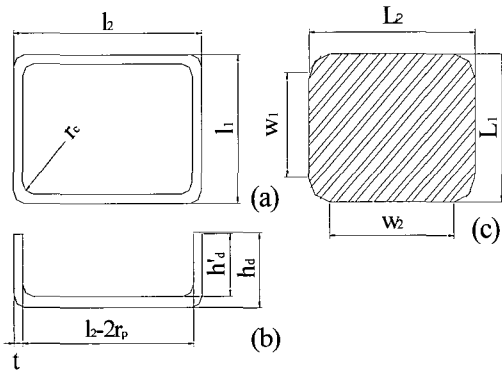


Fig. 5 The objective shape: (a) plane figure, (b) a front view and (c) pre-development figure of blank

$V_d=50\text{mm/min}$ 이다. Fig. 12의 제어되지 않은 일정한 블랭크 홀더력에서 350°C , 20mm/min 으로 성형하였을 때 컵의 옆 부분에 파단이 일어났던 것이 Fig. 13(b)와 같이 블랭크 홀더력을 조절하여 성형이 양호한 것을 나타내며, Fig. 13(c)는 인장 실험으로 구한 LDR로 성형이 되었던 컵이 컵높이 55 mm, LDR=3.0으로 성형이 된 것을 나타

Table 2 Thickness change of the cup according to the BHF

	Max(mm)	Min(mm)	Ratio of thickness change(%)
Case 1	1.02	0.95	6.9
Case 2	0.98	0.88	10.2
Case 3	0.98	0.82	16.3

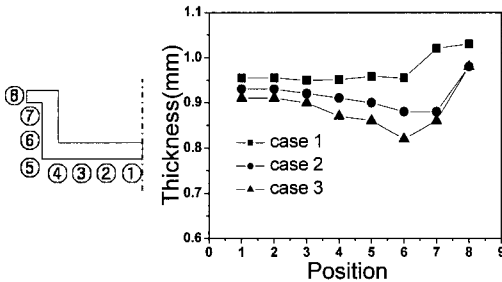


Fig. 7 Thickness change of the cup according to the BHF

용하여 실험을 하였다. Fig. 7 은 Fig. 6 과 같이 세 형태에 블랭크 홀더력을 적용했을 때의 소재의 두께 변화를 측정 한 것이다. 실험 조건은 250℃, 1.0mm 두께의 블랭크를 사용하여 15mm 깊이로 성형을 한 것이다. case 1 과 같은 블랭크 홀더력을 적용하여 성형 깊이 23mm 로 성형하였을 때, 200, 250, 300℃까지 성형이 되었고 350, 400℃에서는 성형이 되지 않았다.

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. 8 과 같다. 판재성형 공정상의 결함을 없애고, 실험에서 얻은 주요 물성 데이터를 바탕으로 상용 CAE 인 ABAQUS 6.5 를 활용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소 해석 과정은 식 (3)과 같은 비선형 방정식으로 표현된다.

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

여기서 $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2(\sigma_y' \sigma_y')}$, $\bar{\epsilon} = \sqrt{2/3(\dot{\epsilon}_y \dot{\epsilon}_y)}$, σ_y' 는 편차 응력, f_i 는 표면력, u_i 는 속도성분, $\dot{\epsilon}_y$ 는 변형률 속도, $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적 변형률 속도이다. 식 (3)은 유한요소 분할화 과정을 거치면 절점의 속도가 미지수인 식 (4)와 같은 비선형 방정식이 된다.

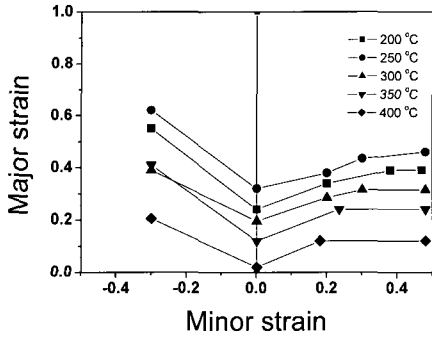
$$\phi(\hat{V}) = \int_{\hat{V}} \bar{\sigma} B^T DBdV \hat{v} + K \int B^T cc^T BdV \hat{v} - \int_{S_f} f_i^T Nds = 0 \quad (4)$$

두께 변화, 응력분포 및 FLD를 이용 성형 여부를 판단하기 위하여 요소들의 변형률 등을 구하기 위해ABAQUS의 해석 방법 중에서 Dynamic /Explicit를 사용하였으며, 1/4 3D로 모델링 하여 해석을 진행하였으며, 식 (4)에 대해ABAQUS는 초기 속도장을 가정하여 Newton-Raphson 법으로 해를 구한다. 또한 판재성형의 특성상 소재의 이방성(anisotropy)를 고려해 주어야 하므로 아래 행렬에 들어가는 파라미터들을 0, 90°방향으로 시편을 가공하여 1, 2축 방향 응력, 전단응력, 변형률, 전단변형률을 대입하여 구한 값들로 계산하여 해석을 수행하였다. 일반적으로 박판인 경우 3 방향의 요소들은 무시하므로, 3방향 응력 및 변형률은 고려하지 않았다.

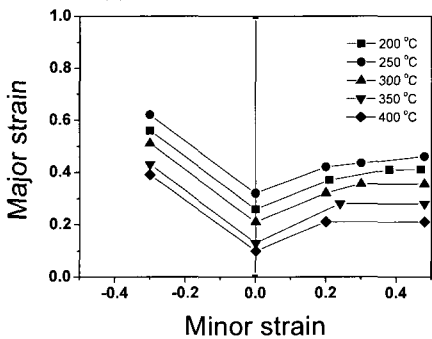
원형 및 사각형 형상의 제품에 대한 드로잉 공정을 3차원 유한요소법으로 해석하기 위해 소재형상의 대칭성을 이용하여 1/4을 제어 체적으로 선택하였으며, 탄소성(elasto-plastic) 유한요소법으로 해석하였다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & D_{1112} & D_{1113} & D_{1123} \\ & D_{2222} & D_{2233} & D_{2212} & D_{2213} & D_{2223} \\ & & D_{3333} & D_{3312} & D_{3313} & D_{3323} \\ & & & D_{1212} & D_{1213} & D_{1223} \\ & & & & D_{1313} & D_{1323} \\ & & & & & D_{2323} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = [D^d] \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix}$$

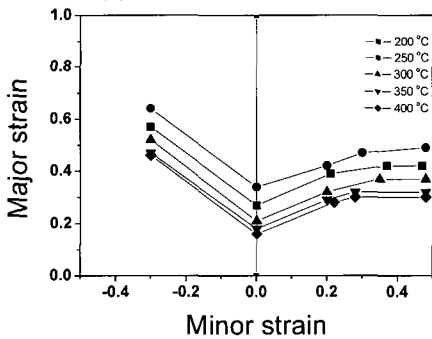
또한 블랭크 홀더력의 블랭크의 치수는 식 (1) 과 식 (2)에서 각각 원형 및 사각형 형상의 제품에 대해 구하였으며, 블랭크의 형상과 치수는 Fig. 2, 5와 같다. Fig. 9에 시뮬레이션에 사용된 모델의 형상과 메쉬의 분할된 형상을 보여주고 있다. 기타 해석에 사용된 주요 물성치 역시 실험에서 구한 것을 사용하였으며, 이는 Table 3과 같다.



(a) strain rate 0.0133 s^{-1}



(b) strain rate 0.0333 s^{-1}



(c) strain rate 0.0677 s^{-1}

Fig. 8 Forming limit diagram (FLD) according to the temperature and the strain rate

Table 3 Mechanical properties used to simulate deep drawing process obtained by tensile test

Test Condition		E (Gpa)	ν	N	K	R_{avg}
Temp ($^{\circ}\text{C}$)	Strain rate (sec^{-1})					
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)				

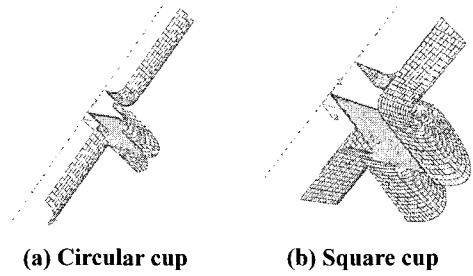


Fig. 9 FEM mesh of die, blank, punch and blank for circular and square cup deep drawing

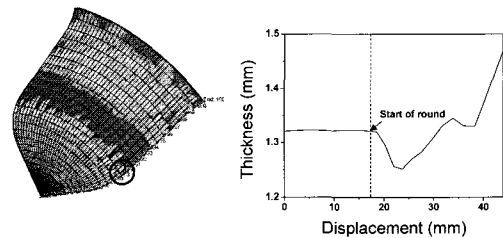


Fig.10 Change of the cup thickness according to the node after the circular cup deep drawing simulation, $T_d=250^{\circ}\text{C}$, $V_d=50\text{mm}/\text{min}$, $t_b=1.4\text{mm}$

4. 결과 및 비교

4.1 원형컵의 실험 및 해석 비교

Fig. 10은 250°C 온도에서 $50\text{mm}/\text{min}$ 의 성형속도로 1.4mm 두께의 블랭크를 30mm 깊이로 성형했을 때 시뮬레이션 결과 중 두께변화를 나타낸 결과이다. 컵의 라운드 부분부터 컵의 측면 중앙부까지 두께가 급격히 얇아짐을 알 수 있다. 따라서 실제 실험에서 제어된 블랭크 홀더력과 유사하게 하기 위해 블랭크 홀더력을 변화하여 두께가 가장 얇은 부분에서 변곡점을 가질 수 있게 Fig. 11 (a)와 같은 형태로 블랭크 홀더력을 적용시켜 보았다.

Fig. 11 (b)는 블랭크 홀더력의 제어 유무에 따른 컵의 두께 변화에 대해 시뮬레이션 해 본 결과를 나타낸 것이다. 블랭크 홀더력을 제어했을 때는 두께 변화폭이 블랭크 홀더력을 제어하지 않았을 때 보다 더 적음을 알 수 있다. Fig. 12는 350°C 온도에서 $20\text{mm}/\text{min}$ 의 성형속도로 1.4mm 두께의 블랭크를 30mm 깊이로 성형했을 때 블랭크 홀더력의 제어 유무에 따른 성형성을 동일한 조건의 인장실험을 통해 얻은 FLD를 통해 비교해 본 것이다.

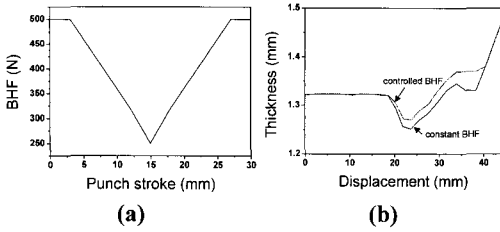


Fig.11 (a) Controlled BHF for improvement of drawability and (b) comparison of thickness change of the cup between constant BHF and controlled BHF, $T_d=250^\circ\text{C}$, $V_d=50\text{mm/min}$, $t_b=1.4\text{mm}$

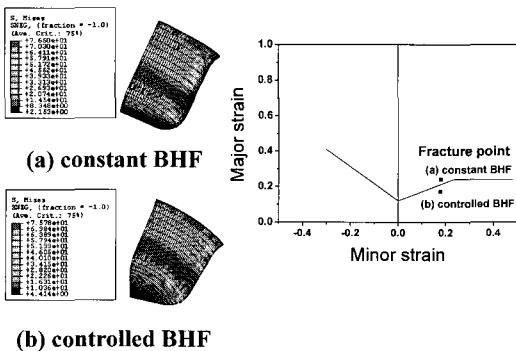


Fig.12 Comparison of the drawability between (a) constant BHF and (b) controlled BHF through the strain-path of FLD, $T_d=350^\circ\text{C}$, $V_d=20\text{mm/min}$, $t_b=1.4\text{mm}$ and node 985 : 0.,0.,13.32

동일한 위치임에도 불구하고 제어하지 않은 일정하중의 블랭크 홀더력을 받은 컵에는 FLD 상의 파단선을 넘어선 것을 알 수 있다. Fig. 12의 두 점들은 최종 성형된 절점의 Strain-path 중 가장 마지막 값을 표기한 것이다. 위 사실을 통해 블랭크 홀더력을 제어하면 마그네슘 판재의 딥드로잉 성형성을 향상시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 250°C 에서 AZ31B 마그네슘 판재의 한계드로잉비는 2.16이라는 것을 인장 실험을 통해 구하였다. Fig. 13은 블랭크 홀더력을 제어하여 성형 깊이 40 mm, 한계드로잉비 2.5가 되게하여 시뮬레이션 한 결과를 나타낸 것이다. 이 때 성형 온도 250°C , 성형속도 50mm/min , 블랭크 두께 1.4mm 이다. Fig. 13 (a)는 제어하지 않은 블랭크 홀더력에 대한 시뮬레이션 결과이다. 이를 통해 알 수 있듯이 제어하지 않은 블랭크 홀더력에서는 한계드로잉비를

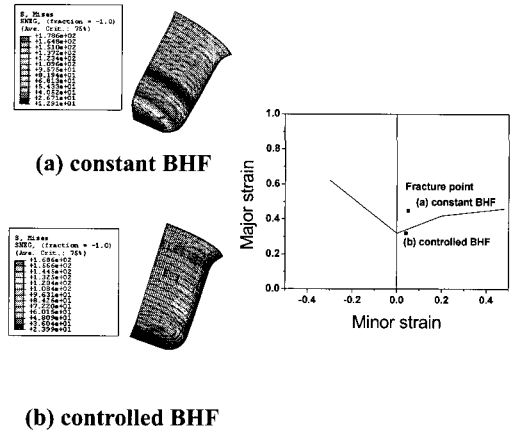


Fig.13 Comparison of the drawability between (a) constant BHF and (b) controlled BHF through the strain-path of FLD, $T_d=250^\circ\text{C}$, $V_d=50\text{mm/min}$, $t_b=1.4\text{mm}$ and node 985 : 0.,0.,13.32

넘어서는 제품을 성형할 수 없음을 알 수 있다. 하지만 Fig. 13 (b)를 보면 동일한 시뮬레이션 조건에서 요소와 FLD 선도상의 파단없이 성형이 될 수 있다는 것을 예측할 수 있다. Fig. 12와 마찬가지로 Fig. 13의 두 점들은 최종 성형된 절점의 Strain-path 중 가장 마지막 값을 표기한 것이다.

4.2 사각형컵의 실험 및 해석 비교

현재 상용화 되고 있는 마그네슘 판재 제품의 경우 대부분이 노트북이나 디지털 제품의 케이스에 국한되어 있다. 따라서 본 연구에서는 직사각형 드로잉의 성형성 평가 및 개선에도 초점을 맞추어 보았다. 원형컵의 딥드로잉 시뮬레이션을 통해 블랭크 홀더력을 컵의 두께가 가장 얇아지는 구간에서 변곡점을 가질 수 있도록 하여 줄여주면 성형성을 개선해 줄 수 있다는 것을 알 수 있었다. 블랭크 홀더력 감소의 기술기에 따른 성형성의 비교를 위해 Fig. 6과 같은 형태의 세가지 블랭크 홀더력을 적용하여 시뮬레이션하여 성형품의 두께를 측정 해 본 결과가 Fig. 14에 나타나 있다. 감소폭이 크면 클수록 컵의 두께 변화가 줄어드는 것이 확인되었다. 시뮬레이션 조건은 온도 250°C , 성형속도 50mm/min , 블랭크 두께 1.0mm 이며, 성형 깊이는 15mm 이다. 동일한 조건에서 Fig. 6의 case 1 과 case 3 형태의 BHF를 적용하여 23mm 깊이로 시뮬레이션 해본 결과를 FLD 상에 도시해 본 결과가 Fig. 15에 나타나 있다. 실제 실

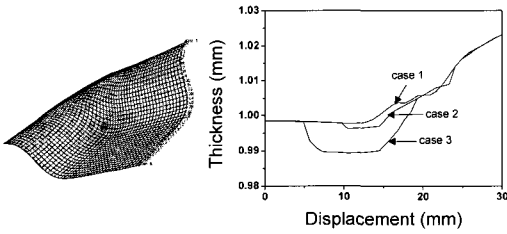
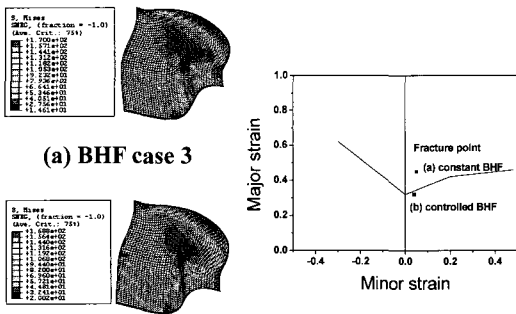


Fig.14 Comparison of the thickness change of the cup between three cases of BHF, $T_d=250\text{ }^\circ\text{C}$, $V_d=50\text{mm/min}$, $t_b=1.0\text{mm}$



(a) BHF case 3

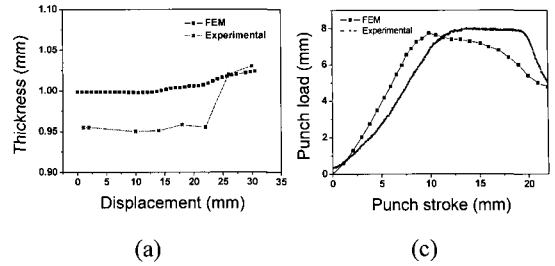
(b) BHF case 1

Fig.15 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

힘과 유사하게 블랭크 홀더력의 제어가 성형성에 영향을 미침을 예측할 수 있다.

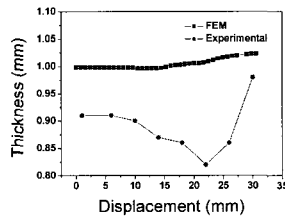
Fig. 16(c)와 같이 성형중 펀치의 변위-하중 선도는 실험과 FEM 이 비슷하나, Fig. 16(a), (b)와 같이 두께 변화의 비교는 실험과 FEM 이 다른 양상을 보였다. 이는 실험에 쓰인 원소재 자체의 두께의 오차와 관련이 있다. 그리고 Fig.11, 14와 같이 블랭크 홀더력의 제어가 FEM 결과에서도 두께 변화를 줄이는 역할을 할 수 있다는 것은 알 수 있다.

실험과 비교해 보았을 때 그 차이가 미미한 것은 FEM에서는 Fig. 17과 같은 동적 재결정의 효과를 고려하지 못하기 때문이다. Fig. 17은 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].



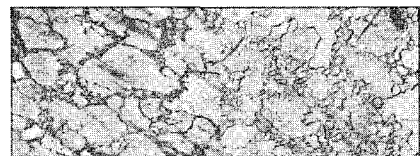
(a)

(c)

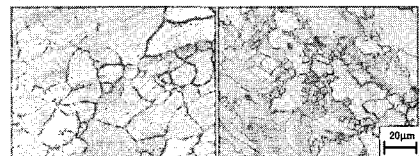


(b)

Fig.16 Comparison of the result between FEM and experiment ; Thickness change of the cup after the deep drawing (a) case1 BHF, (b) case3 BHF and (c) relationship between punch load and stroke graph $T_d=250\text{ }^\circ\text{C}$, $V_d=50\text{mm/min}$, $t_b=1.0\text{mm}$



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



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

Fig.17 Microstructures at each position and experimental conditions

5. 결론

본 연구에서는 AZ31B 마그네슘 합금판재의 성형성을 분석하기 위하여 사전 연구된 인장 및 압축실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 한 원형 및 사각형 컵드로잉의 성형성에 대해 CAE와 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. 이로 인해 일정한 두께를 가지는 원형컵을 성형할 수 있었다. 일정한 블랭크 홀더력을 적용하였을 때 성형에 실패하였던 조건인 350°C, 20 mm/min에서 블랭크 홀더력을 제어하여 성형에 성공할 수 있었고, LDR 이상의 높이를 가지는 LDR=3.0인 원형컵을 성형할 수 있었다.

(2) 사각형컵의 딥드로잉 실험에서도 실시간으로 블랭크 홀더력을 제어한 경우 case 1의 블랭크 홀더력을 적용하면 두께 변화율이 펀치 코팅과 상관없이 10% 이하임으로 블랭크 홀더력의 제어가 성형성을 개선할 수 있다는 것을 재확인 할 수 있다.

(3) 실험과 CAE 를 비교해 본 결과 펀치의 변위-하중선도는 유사하나 두께 변화의 비교는 차이가 많은데 이는 원소재 자체의 두께차와 CAE 프로그램 상에서는 동적재결정을 고려하지 못하기 때문이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RT104-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] S. Yoshihara, 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.
- [2] S. Tagawa, 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.
- [3] 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.
- [4] 원성연, 오상균, 2004, AZ31 마그네슘 합금 판재의 기계적 특성평가(1), 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 53~56.
- [5] 이병호, 신광선, 이종수, 2004, AZ31 Mg 합금의 가공 조건에 따른 고온 성형성 연구, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 80~83.
- [6] E. Doege, K. Dröder, 2001, Sheet metal forming of magnesium wrought alloys-formability and process. *J. Mater. Proc. Technol.*, Vol. 115, pp. 14~19.
- [7] 오세웅, 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, 오세웅, 이준희, 강충길, 2005, AZ31B 마그네슘판재의 온간, 열간 딥드로잉 성형성 평가, 한국소성가공학회지 제 14 권 7 호, pp. 628~634.
- [9] 추동균, 이준희, 강충길, 2005, 틀 표면처리 및 온도가 AZ31 마그네슘 판재의 드로잉성에 미치는 영향, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 118~121.
- [10] H. Ding, L. Liu, 2005, Simulation of dynamic recrystallization of AZ91 alloys by cellular automata model, 1st Aisan Symp on Mg alloys, pp.341~344.