

AZ31B 마그네슘판재의 온간, 열간 딥드로잉 성형성 평가

추동균¹· 오세웅¹· 이준희²· 강충길[#]

The Drawability Estimation in Warm and Hot Forming of AZ31B Magnesium Sheet

D. K. Choo, S. W. Oh, J. H. Lee, C. G. Kang

(Received April 11, 2005)

Abstract

The drawability of AZ31B magnesium sheet is estimated at various temperatures (200, 250, 300, 350, 400°C), forming speeds (20, 50, 100mm/min), thicknesses (0.8, 1.4mm) and blank holding forces (2.0, 2.8, 3.4kN). The deep drawing process (DDP) of circular cup is used in forming experiments. The results of deep drawing experiments show that the drawability is well at the range from 250 to 300°C, 50 mm/min forming speed and 2.0kN blank holding force. The 0.8mm magnesium sheets were deformed better than 1.4 mm. Blank holding force was controlled in order to improve drawability and prevent the change of cup thickness. When blank holding force was controlled, tearing and thickness change were decreased and limit drawing ratio was improved from 2.1 to 3.0.

Key Words : Drawability, AZ31B Magnesium Sheet, Deep Drawing Process, Limit Drawing Ratio, Blank Holding Force

1. 서 론

전 세계적으로 자동차 및 항공기 등 운송 수단
의 경량화, 재활용, 연비 향상 및 환경적인 측면
에서 차세대 친환경 경량소재를 이용한 부품 성
형 공정에 관한 연구가 관심의 대상이 되고 있다.
특히 마그네슘 합금은 알루미늄 합금과 연강을
대체할 차세대 소재로서 각광을 받고 있다[1~2].
마그네슘의 비강도는 알루미늄 합금의 2/3, 강
의 1/4에 불과할 뿐만 아니라 전자파 차폐능, 재활
용 측면에서 산업적으로 많은 수요가 발생하고
있기 때문이다. 특히 마그네슘은 소성가공이
어려우나 최근 박판 생산이 일반화되면서부터
차세대 환경친화형 비철 소재를 이용한 성형
신기술로 마그네슘 판재 성형에 대한 연구의
필요성이 증대되

고 있다[3]. 현재 마그네슘 성형은 세계적으로
다이크스팅이 주류이나 마그네슘 판재(AZ31)
생산의 일반화로 환경문제, 제품의 성형
가능성, 품질 및 환경 친화적 측면에서
우수한 마그네슘 박판 성형 기술에
대한 다양한 연구가 진행되고 있다.
Yoshihara의 편치 국부 냉각 방식[4],
Tagawa의 편치 반경의 영향[5],
Koga의 금형의 코팅 방법[6]에
대한 연구는 주로 편치 및 금형에
대한 연구인 것에 비해 딥드로잉
(deep drawing)의 중요한 성형
인자 중의 하나인 블랭크 홀더력
(Blank holding force)에
관련한 연구는 부족한 실정이다.
따라서 본 논문에서는 블랭크
홀더력에 관련하여 마그네슘
판재의 딥드로잉 성형성 증대에
대한 연구를 수행하였다.

실험에 앞서 마그네슘 박판 AZ31B의 드로잉성

1. 부산대학교 정밀기계공학과
2. 동아대학교 신소재공학과
교신저자 : 부산대학교 기계공학부
E-mail: cgkang@pusan.ac.kr

을 알아보기 위해 딥드로잉 실험을 진행할 온도 범위인 200~400℃에서 인장실험을 수행하여 판재의 기초 물성치인 항복응력(YS), 최대 인장강도(UTS), 강도계수(K), 가공경화지수(n), 수직 이방성 계수(R_{avg}) 그리고 변형률 민감도(m)을 구하였다[7]. 이를 토대로 한계 드로잉비와 블랭크 치수를 결정 한 후, 딥드로잉 실험을 진행하였다. 딥드로잉 실험은 5개의 온도구간 (200, 250, 300, 350 and 400℃), 3개의 펀치 속도구간 (20, 50, 100mm/min), 블랭크 홀더력 3구간 (2.0, 2.8, 3.4kN) 에서 진행하였으며, 블랭크의 두께는 0.8, 1.4mm 두 종류이다. 파단부 및 조직 변화의 관찰을 위해 에칭 후 미세 조직을 관찰하였다. 그리하여 가장 성형이 잘 되었던 2.0kN 블랭크 홀더력에서 가장 두께 변화가 심한 부분에서 적절히 블랭크 홀더력을 조절하여 AZ31B 판재의 성형성을 향상시킬 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 성형 조건에 따른 딥드로잉 성형성 평가
본 실험에서 사용된 마그네슘 판재 AZ31B 는 일본 산고 알루미늄사에서 제작한 두께 1.4mm 판재로서 화학적 성분은 Table 1 과 같다.

Table 1 Chemical compositions (wt%) of magnesium alloy sheet (AZ31B)

Al	Zn	Zr	Mn	Fe
2.5 ~3.5	0.6 ~1.4	-	0.20 ~1.0	Under 0.005
Si	Cu	Ni	Ca	Rare earth
Under 0.10	Under 0.05	Under 0.005	Under 0.04	Under 0.30

미세조직 관찰을 위하여 에탄올 35ml, 물 5ml, 아세트산 5ml, 피크릭산 21g 용액에 에칭한 후 알코올 증기 세척 한 후 광학 현미경을 이용해 200 배 배율로 파단부의 조직을 관찰하였다.

인장 실험을 통해 얻어진 결과를 식 (1)에 적용하여 한계 드로잉비 (Limit Drawing Ratio)를 구하였고 결과는 Table 2 와 같다.

$$\ln(LDR) = \eta \left[\frac{2R_{avg}}{R_{avg} + 1} \right]^{0.27} \quad (1)$$

Table 2 Limit drawing ratio according to the temperature

Temperature(°C)	LDR
Room temperature	2.24
200	2.22
250	2.16
300	2.158
350	2.199
400	2.166

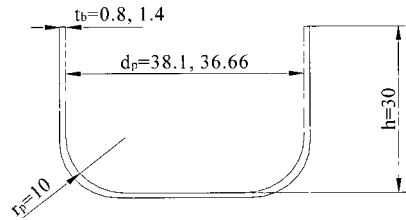


Fig. 1 Shape and dimension of the cup after the deep drawing process

식 (1)에서 η 는 변형효율을 나타내며 일반적으로 0.74~0.76 사이의 값을 적용하며[8], R_{avg} 는 실험에서 구한 수직이방성 계수이다.

Table 2 에서 구한 LDR과 folding-criteria를 적용하여 딥드로잉 성형 후 컵의 높이 h를 30mm 로 정하였다. 정해진 h를 드로잉 경험식 (2)를 통해 블랭크 크기 (d_b)를 77mm 로 구하여 실험을 진행하였다[9].

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

실험에 사용된 금형과 펀치, 블랭크의 치수는 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서와 같이 블랭크의 변경됨에 따라 펀치의 직경을 0.8mm 블랭크 일 때 38.1mm, 1.4mm 블랭크 일 때 36.66mm 가 되게 변화시켜 공차가 20%를 유지할 수 있게 실험하였다. 또한 250℃ 이상의 온도에서는 소재의 재결정에 의한 연화로 인해 블랭크의 소착이 발생하여 Boronitride (BN) 스프레이로 윤활을 하여 실험하였다. 딥드로잉 실험은 다음과 같은 조건 별로 시험을 수행하여 성형성을 평가 하였다.

- ① 성형 온도(T_d) = (200, 250, 300, 350, 400℃)
- ② 펀치 속도(V_d) = (20, 50, 100mm/min)
- ③ 블랭크 두께(t_b) = (0.8, 1.4mm)
- ④ 블랭크 홀더력(BHF) = (2.0, 2.8, 3.4kN)

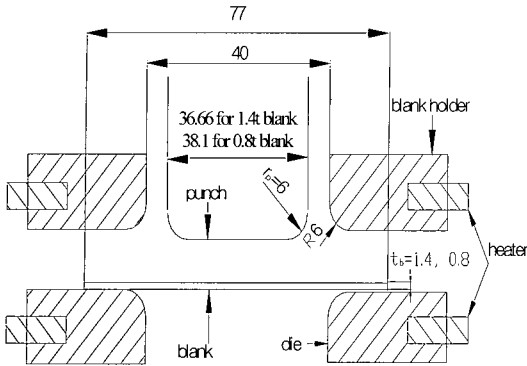


Fig. 2 The schematic of die structure for deep drawing experiments

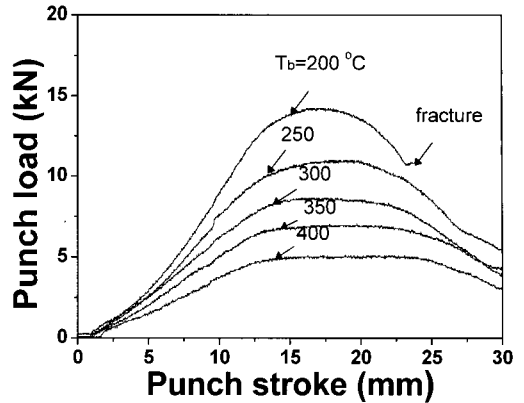
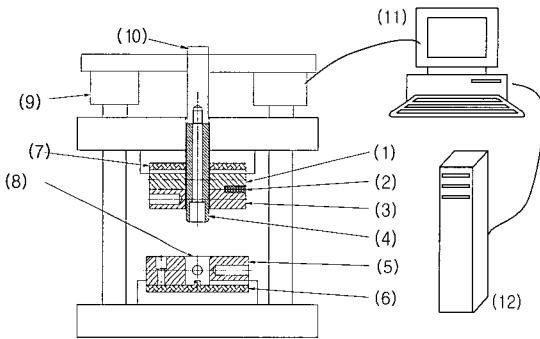


Fig. 4 Relationship between punch stroke and load according to the temperature ($t_b = 0.8\text{mm}$, $d_b = 77\text{mm}$, $V_d = 50\text{mm/min}$)



- (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. 3 The schematic of the deep drawing press with blank holding force control system

2.2 블랭크 홀더력 조절을 통한 성형성 개선

본 연구에서 사용된 마그네슘 판재 성형 전용 장비는 정격하중 50ton인 프레스로써 Fig. 3과 같이 데이터 획득장치 및 블랭크 홀더력 제어장치와 함께 구성 되어있다.

Fig. 3(a)는 프레스의 구성과 형상을 나타낸 것이며, Fig. 3(b), (c)와 같이 성형중 블랭크 홀더력을 임의로 제어하기 위한 제어장치와 S/W로 구성되어 있다. 일정한 블랭크 홀더력에서 컵 두께를 측정해 가장 두께가 얇아졌던 10~15mm 부분에서의 두께

변화와 파단을 방지하기 위해 약 15mm 지점이 변곡점이 되도록 블랭크 홀더력을 제어하여 실험을 진행하였다[10].

3. 결과 및 고찰

3.1 성형조건에 따른 딥드로잉 성형성 평가

3.1.1 온도에 따른 딥드로잉 성형성 평가

200, 250, 300, 350, 400 °C에서 $t_b = 0.8\text{mm}$, $d_b = 77\text{mm}$, $V_d = 50\text{mm/min}$ 의 조건으로 딥드로잉 실험을 실시하였고, 그에 따른 punch stroke-load 그래프와 제품의 형상은 Fig. 4와 Fig. 9와 같고 미세 조직은 Fig. 5과 같다. 온도 별로 고찰해 보면, 250, 300, 350 °C 구간에서 비교적 양호한 컵의 형상이 나타났고, 그 이하의 온도인 200 °C에서는 약간의 파단을 관찰할 수 있었고 400 °C에서는 컵의 형태는 양호하였으나, 1 이하의 값을 가지는 이방성계수 때문에 온도가 상승할수록 줄어들던 컵의 귀발생 현상이 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. Fig. 5의 미세조직을 보면, 온도가 상승할수록 동일한 지점에서의 결정립의 크기는 커짐을 관찰할 수 있고, 소재의 변형이 심하게 일어나는 ③, ④지점에서 동적 재결정이 활발하게 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

3.1.2 성형속도에 따른 딥드로잉 성형성 평가

펀치 속도 즉 성형 속도에 따른 punch stroke-load 선도 Fig. 6에서 $T_d = 300\text{ °C}$, $t_b = 0.8\text{mm}$, $d_b = 77\text{mm}$ 이었다. 300 °C 이외의 온도 구간에서는 20, 100mm/min

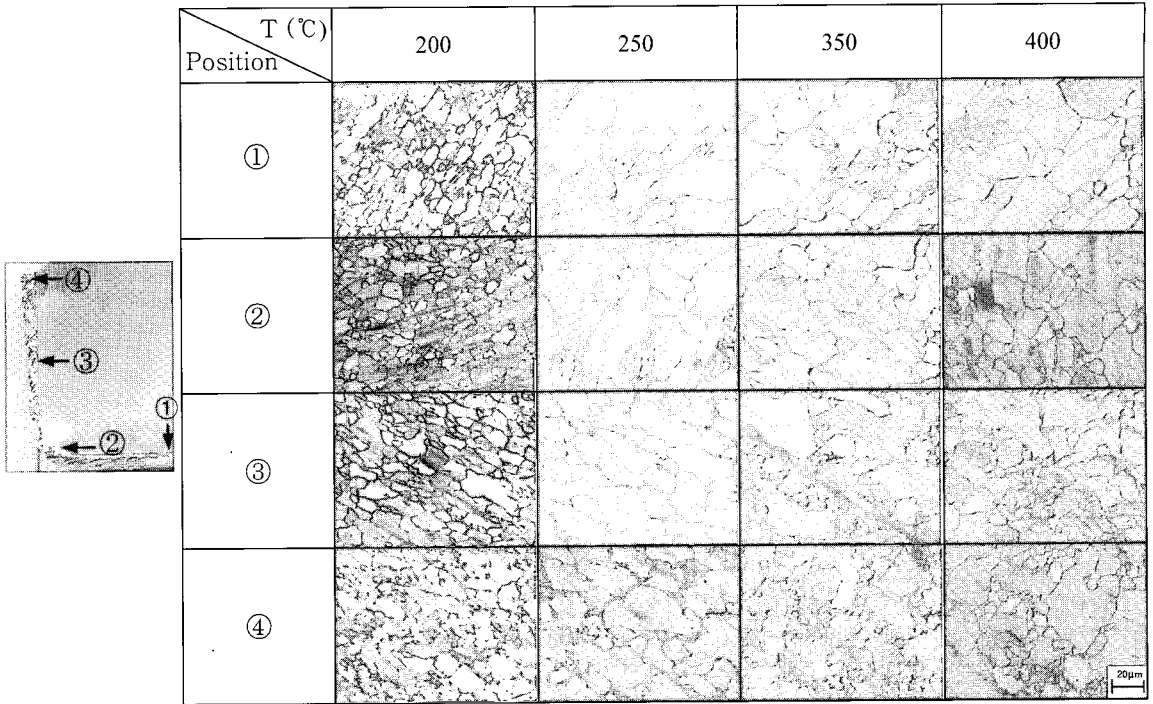


Fig. 5 Change of the microstructure according to the temperature

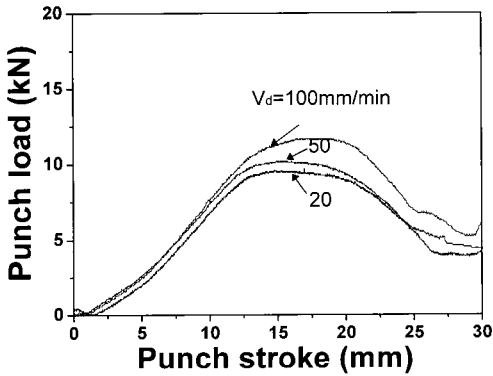


Fig. 6 Relationship between punch stroke and load according to the punch speed ($T_d = 300^\circ\text{C}$, $t_b = 0.8\text{mm}$, $d_b = 77\text{mm}$)

영역에서 파단이 일어나는 것을 Fig. 10에서 볼 수 있었는데 이는 너무 낮은 속도에서는 가공경화지수가 낮아서 파단이 일어나고, 너무 높은 속도에서는 미세조직을 관찰한 결과처럼 결정립계의 파단으로 인해 성형이 되지 않음을 알 수 있기 때문에 적절한 성형 속도가 필요한 것을 알 수 있다.

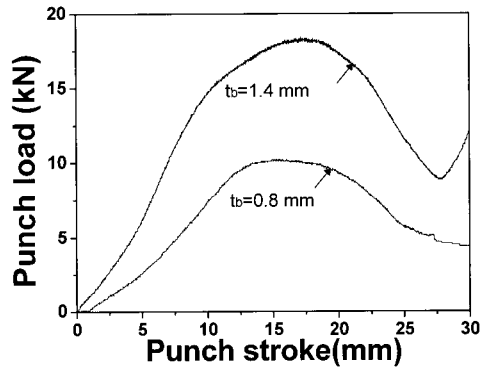


Fig. 7 Relationship between punch stroke and load according to the blank Thickness ($T_d = 250^\circ\text{C}$, $d_b = 77\text{mm}$, $V_d = 20\text{mm/min}$)

3.1.3 블랭크 두께에 따른 성형성 평가

공차(Clearance)를 20%로 동일하게 두고 $T_d = 250^\circ\text{C}$, $d_b = 77\text{mm}$, $V_d = 20\text{mm/min}$ 조건에서 실험하였다.

실험을 한 각기 다른 두께를 가지는 블랭크에 대해 실험을 했을때의 punch stroke-load 선도와 제품

의 형상이 Fig. 7와 Fig. 9에 나타나 있다. 동일한 조건에서 실험할 때 $t_b = 1.4\text{mm}$ 소재가 가공하기 어려움을 Fig. 10에서 확인할 수 있다. Fig. 9의 제품 형상을 보면, $t_b = 0.8\text{mm}$ 소재에는 미세한 주름이 보이는데 이는 얇은 소재일수록 높은 블랭크 홀더력을 필요로 한다는 것을 알 수 있다. Fig. 10에서 보면 두꺼운 소재일수록 펀치의 라운드 부에 미세한 균열이 생기는 것을 볼 수 있는데, 이는 같은 정도의 변형을 받을 때 두꺼운 소재가 많은 인장응력을 받기 때문에 생기는 현상이다. 이를 통해 얇은 소재는 블랭크 홀더력을 두꺼운 소재는 변형량에 유의해서 가공을 해야 한다.

3.1.4 블랭크 홀더력에 따른 성형성 평가

블랭크 홀더력이 낮을수록 성형 하중이 높게 나왔다. 이는 블랭크 홀더력이 상승하게 되면 블랭크가 압축력을 받게 되어 소재의 두께 변화를 야기하기 때문이다. 데이터를 바탕으로 Fig. 10에 실험 조건별 맵을 도표로 작성해 보았다. 2.0kN 에서도 주름이 발생하지 않고, 3.4kN 경우 성형이 되지 않았다. 앞에서 결론 내린 바와 같이, 온도, 속도, 블랭크 치수별 결과를 재확인할 수 있다. Fig. 5에서 관찰한 바와 마찬가지로 영역 ③ 부분부터 동적 재결정이 활성화 되는 것을 관찰할 수 있다. 동적 재결정으로 인하여 소재의 연화가 가속화 되며, 이것이 컵의 벽면에서 소재의 두께변화를 일으키고 결국 찢어짐을 일으키는 주 원인이 된다는 것을 알 수 있다.

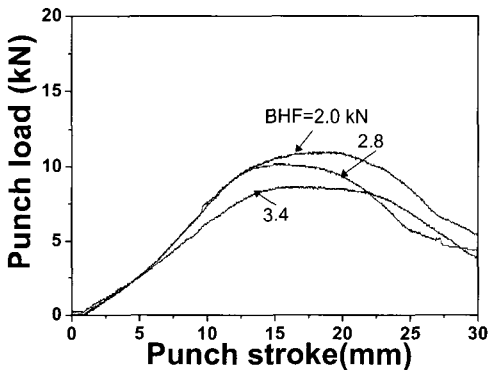


Fig. 8 Relationship between punch stroke and load according to the blank Thickness ($T_d = 250^\circ\text{C}$, $d_b = 77\text{mm}$, $V_d = 20\text{mm/min}$)

Shape of cups	T_d ($^\circ\text{C}$)				
	200	250	300	350	400
	V_d (mm/min)			T_b (mm)	
	20	50	100	0.8	1.4

Fig. 9 Shape of cups after the deep drawing according to the temperatures, speeds and thickness of blank

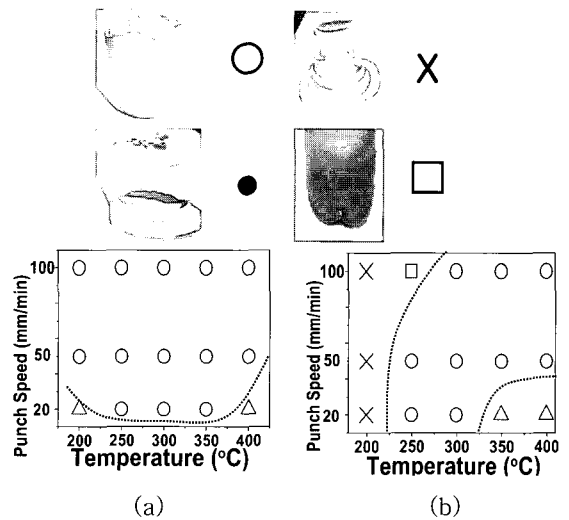


Fig.10 Relations of defect analysis (a) 0.8mm blank and (b) 1.4mm blank after the deep drawing process

동적 재결정으로 인하여 소재의 연화가 가속화 되며, 이것이 컵의 벽면에서 소재의 두께변화를 일으키고 결국 찢어짐을 일으키는 주 원인이 된다는 것을 알 수 있다. 200 $^\circ\text{C}$ 에서는 재결정이 일어나지 않아 성형이 되지 않는다.

3.2 블랭크 홀더력 조절을 통한 성형성 개선
블랭크 홀더력의 제어는 프레스의 유압펌프에 전압을 이용한 제어를 장치하여 1mm 간격으로 전압을 조절할 수 있게하여 유압을 제어하는 방법

을 사용하였다. 실험을 통해 드로잉 후 컵의 두께를 측정해 본 결과가 Fig. 11에 나타나 있다.

Fig. 11에서 보는 바와 같이 컵의 라운드부분인 ⑤ 영역이 지나는 부분부터 컵의 두께가 급격하게 얇아져서 ⑥, ⑦ 지점에 왔을 때가 가장 얇아지는 것을 확인할 수 있었다. 이 점에 주목하여 블랭크 홀더력을 ⑤, ⑥, ⑦ 지점에서 가장 낮은 값을 가질 수 있도록 Fig. 12의 제어된 블랭크 홀더력과 같은 형태로 ⑥번 구간과 ⑦번 구간 사이, 즉 10~15mm 지점이 곡선의 변곡점이 되도록 하여 실험한 결과와 일정하중의 블랭크 홀더력을 적용하여 실험한 결과의 비교가 Fig. 13에 나타나 있다.

Fig. 13(a)에서 보여지는 바와 같이 두께 변화가 10% 이상 감소된 것을 볼 수 있다. Fig. 13(a)의 실험 조건은 BHF = 2.0kN, $t_b = 1.4\text{mm}$, $T_b = 250^\circ\text{C}$ 그리고 $V_d = 50\text{mm/min}$ 이다.

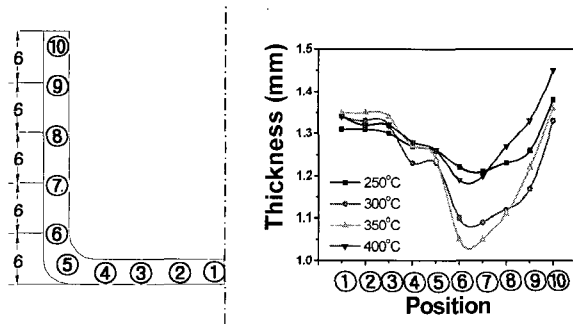


Fig.11 Change of the cup thickness according to the positions after the deep drawing test at the various temperature

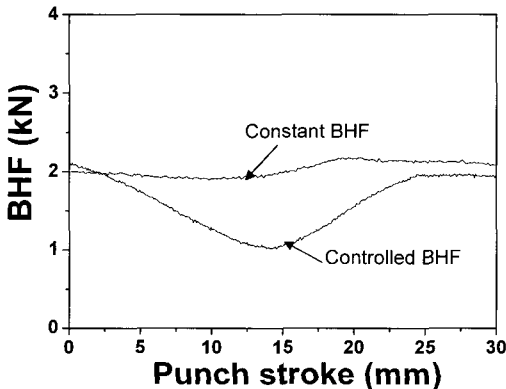


Fig.12 Relationship between punch stroke and blank holding force

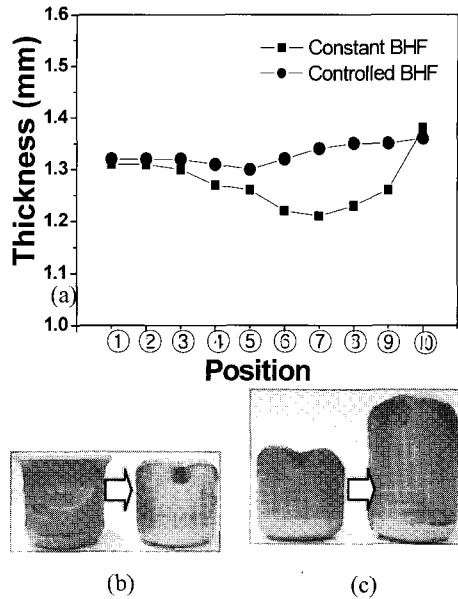


Fig.13 Comparison between constant BHF and controlled BHF: (a) Change of the cup thickness according to the positions after the deep drawing test $T_d = 250^\circ\text{C}$, $V_d = 50\text{mm/min}$, $t_b = 1.4\text{mm}$; (b) $T_d = 350^\circ\text{C}$, $V_d = 20\text{mm/min}$; (c) $T_d = 250^\circ\text{C}$, $V_d = 50\text{mm/min}$

Fig. 12 의 제어되지 않은 일정한 블랭크 홀더력에서 350°C , 20mm/min 으로 성형하였을 때 컵의 옆부분에 파단이 일어났던 것이 Fig. 13(b) 와 같이 블랭크 홀더력을 조절하여 성형이 양호한 것을 나타내며, Fig. 13(c)는 인장실험으로 구한 LDR로 성형이 되었던 컵이 컵 높이 55mm, LDR = 3.0으로 성형이 된 것을 나타낸 그림이다.

4. 결론

본 연구에서는 일반적으로 AZ31B 판재의 소성가공이 이루어지고 있는 200°C 이상의 온도부터 소성이 발생한다고 보고된 450°C 미만의 온도 구간까지의 범위에서 변형률 속도를 변경하여 인장 실험한 결과를 바탕으로 온도, 속도, 블랭크의 두께, 블랭크 홀더력에 따른 딥드로잉 성형성을 알아 보았다. 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 미세조직을 관찰한 결과 250°C 미만의 온도에서는 동적 재결정이 일어나지 않으므로, 소재의 연성이 부족하여 성형성이 떨어져 딥드로잉 공정

에 적합하지 않으며 성형이 되지 않는다.

(2) 온도가 올라가면서 이방성 계수가 낮아지면서 LDR이 낮아져 가공성은 낮아지고 귀발생 현상은 감소하였다. 350℃ 이상이 되면 이방성 계수가 1 이하로 되면서 귀발생 현상이 보다 심해진다.

(3) 50mm/min 미만의 속도에서는 가공경화지수가 낮아져 파단이 쉽게 일어나고, 100mm/min 속도에서는 미세조직의 관찰 결과 동적 재결정이 더 활발하게 일어나서 조직이 연화되기 때문에 50mm/min 속도 영역에서 성형성이 뛰어났다.

(4) 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.

(5) 일정한 블랭크 홀더력을 적용하였을 때 성형에 실패하였던 조건인 350℃, 20mm/min 에서 블랭크 홀더력을 조절하여 성형에 성공할 수 있었고, LDR 이상의 높이를 가지는 LDR=3.0인 원형컵을 성형할 수 있었다.

후 기

본 연구는 동아대학교 신소형재 가공 청정공정개발 연구센터의 지원에 의해 행해졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 원성연, 오상균, 2004, AZ31 마그네슘 합금 판재의 기계적 특성평가(1), 한국소성가공학회 춘계 학술대회논문집, pp. 53~56.
- [2] 이병호, 신광선, 이종수, 2004, AZ31 Mg 합금의 가공 조건에 따른 고온 성형성 연구, 한국소성가공학회 춘계학술대회논문집, pp. 80~83.
- [3] E. Doege, 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, 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, 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] 추동균, 김우영, 이준희, 강충길, 2004, 온간, 열간 판재 성형을 위한 AZ31B의 기계적 성질 평가, 한국소성가공학회 추계학술대회논문집, pp. 256~259.
- [8] 김낙수, 김형중, 2002, 소성 가공과 해석, pp. 35~36.
- [9] 박상봉, 1996, 디프드로잉 공정설계 및 금형설계의 자동화 시스템에 관한 연구, 부산대학교 정밀기계공학과 박사학위논문, pp. 32~36.
- [10] L. Shulkin, R. Posterado, A. Mustafa, L. Gary., 2000, Blank holder force (BHF) control in viscous pressure forming (VPF) of Sheet Metal, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 98, pp. 7~16.