

AZ31 마그네슘 판재의 더블 싱크형 딥드로잉 공정의 성형성에 관한 실험적 연구

권기태¹ · 강석봉² · 강충길[#]

Experimental Study on the Formability of Simultaneous Deep Drawing of Circular and Rectangular Cups with AZ31 Magnesium Alloy

K. T. Kwon, S. B. Kang, C. G. Kang

(Received September 4, 2008)

Abstract

In warm press forming of magnesium alloy sheet, it is important to control the sheet temperature by heating the sheet in closed die. When forming a commercial AZ31 magnesium alloy sheets which are 0.5mm and 1.0mm thick, respectively, time arriving at target temperature and temperature variation in magnesium alloy sheet have been investigated. The deep drawing process with rectangular shape alone at the first stage and with both circular and rectangular shapes at the second stage was employed. At the first stage, through deep drawing process with rectangular shape alone according to various forming temperature(150~350°C) and velocity(0.1~1.0mm/s), optimum forming condition was obtained. At the second stage, deep drawing process with the circular and rectangular shapes were performed following deep drawn square cups with Limited Drawing Height(LDH) obtained at the first stage. Here, clearance which is defined a gap between the die and the punch including sheet was set to ratio of 20, 40 and 100% to thickness in sheet. Accordingly, temperature, velocities, and clearances suitable for forming were suggested through investigating the thickness variation of the product.

Key Words : AZ31 Magnesium Alloy, Sheet Metal Forming, Deep Drawing Process, Complex Shape, Warm Temperature, Thickness Thinning, Clearance

1. 서 론

마그네슘 합금은 많은 상용 경량 소재 중에서 가장 가벼울 뿐만 아니라 비강성, 주조성 및 우수한 기계가공성 등의 이점이 있어, 구조용 부품의 박육화 및 경량화가 요구되는 분야에 폭넓게 응용되고 있다.

대부분 복잡한 형태로 이뤄진 구조용 부품에

마그네슘의 적용은 다이 캐스팅의 형태로 활용되고 있지만 가공재에 비해 강도도 낮고 박육형상의 구현이 어렵다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 박판재의 프레스 성형이 대두되고 있다.

마그네슘 합금 판재의 온간 프레스 성형에 관한 연구는 여러 공법에 의한 마그네슘 합금 판재의 성형성 개선에 관한 연구[1~4], 유한요소해석에 의한 마그네슘 합금 판재의 성형성 예측[5~7], 여러

1. 부산대학교 대학원 정밀가공시스템

2. 한국기계연구원 부설 재료연구소

교신저자: 부산대학교 기계공학부, cgkang@pusan.ac.kr

온도에서의 성형성에 관한 연구[8~12] 등 많은 연구 사례가 있다.

이러한 보고들은 원형 또는 사각형의 축대칭 형상을 이용하여 적절한 조건에서 온간 성형에 의해 마그네슘 합금의 성형성이 향상된다는 보고이다.

하지만 대부분 자동차 또는 전자 산업에 쓰이는 응용 부품의 경우 복잡한 기하학적 형상을 가지고 있으며, 이러한 복잡한 형상을 프레스 가공할 경우 원형 및 사각형의 축대칭 형상과는 다른 재료의 유동 특성을 보이기 때문에 성형성에 차이를 나타낸다.

한편 일반적으로 온간 프레스 성형은 소재를 예열한 다음 금형에 투입하여 성형이 이루어지지만, 마그네슘 판재는 열용량이 매우 작고, 방열성이 우수하기 때문에 소재 예열만으로는 성형 시에 필요한 온도를 유지하기 어렵다.

따라서 금형에 발열체를 삽입하여 금형을 목표 온도로 가열 및 제어한 후, 블랭크를 투입하여 상/하형 접촉에 의해 가열한다. 이러한 구조에서는 금형-소재간 열전달이 이루어져 성형 목표 온도까지 충분히 가열된 후 성형될 수 있도록 하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 두께가 0.5mm, 1.0mm 인 상용 AZ31 마그네슘 합금 소재를 이용하여 목표로 하는 금형 온도를 설정한 후, 블랭크를 삽입하여 소재가 원하는 온도에 도달하는 시간을 제시하였다. 이를 통해서 블랭크가 목표 온도까지 가열되는 시간을 예측할 수 있으며, 대량 생산 시 cycle time 를 제어할 수 있는 중요한 기초 자료로 활용할 수 있다.

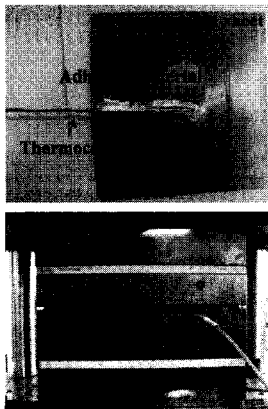


Fig. 1 Apparatus of AZ31 magnesium sheet to measure temperature

또한 두께가 0.5mm 인 소재를 이용하여 여러 온도, 속도 및 클리어런스에 따른 온간 성형 연구를 통해 공정 변수를 분석하였다.

온간 성형은 성형품의 기계적 성질의 향상과 성형성을 고려하여 두 공정으로 수행하였고, 1공정에서는 직사각형상(가로 90mm×세로 50mm)을 딥드로잉하였고, 2공정에서는 복잡한 형태로 원형(직경 26mm)과 정사각형(가로 26mm×세로 26mm)을 동시에 성형하는 Double Sink 형태를 이용하여 딥드로잉 공정 연구를 수행하였다.

2. AZ31 마그네슘 합금 판재의 온도 분포

AZ31 마그네슘 합금의 온간 성형 시 금형에 의해 간접적으로 가열되는 실험 소재의 온도를 목표 온도까지 정확하게 제어하는 것은 매우 중요하다. 따라서 금형속에서 시간에 따른 실험 소재의 온도 변화를 조사하였다.

Fig. 1은 두께가 0.5mm와 1.0mm이고, 가로 100mm×세로 100mm인 소재의 중앙 부위에 시스(sheath)형 K-type 열전대의 끝 부위를 고온 접촉체로 고정하여, 금형속에서 온도를 측정하기 위한 형상을 나타낸 것이다.

Fig. 2 는 열전대가 부착된 소재를 금형에 삽입한 후, 충분한 시간(3min) 을 유지하여 금형 온도와 소재 온도가 정상 상태를 이룰 수 있도록 하였고, 그 후 소재를 금형에서 꺼내어 상온(약 25℃) 까지 공냉한 온도 분포를 나타낸 것이다.

Table 1. 에 마그네슘 판재의 온도가 금형 온도와 같아지는 시간과 상온까지 냉각되는 시간을 정량적으로 나타내었다.

Table 1 Temperature variation of magnesium sheet

Die	Thickness (mm)	Heating time (sec)	Cooling time (sec)
150℃	0.5	43	183
	1.0	75	256
200℃	0.5	42	247
	1.0	67	332
250℃	0.5	33	255
	1.0	63	403
300℃	0.5	26	280
	1.0	32	414

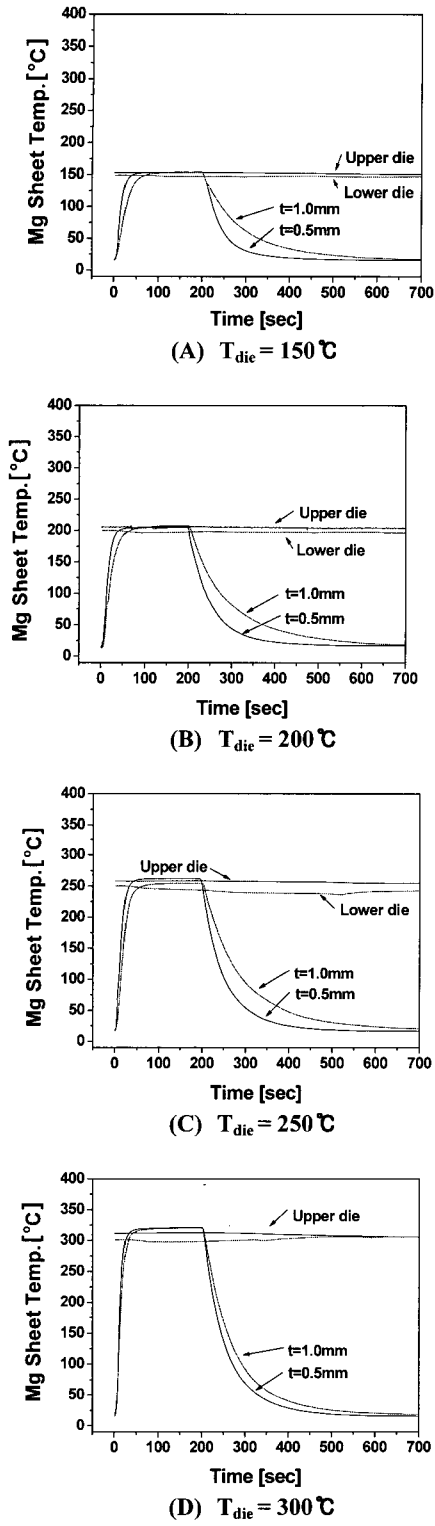


Fig. 2 Temperature variation of magnesium sheet between upper and lower dies

3. AZ31 마그네슘 합금 판재의 온간 딥드로잉 성형

실험 시편은 두께 0.5mm의 AZ31 마그네슘 합금 판재로부터 가로(압연방향) 130mm, 세로 90mm의 블랭크를 가공하여 사용하였다.

Fig. 3은 실험에 사용된 금형의 개략도를 나타낸 것이다. 실험 공정의 연속성을 고려하여, 하나의 금형에서 1공정과 2공정이 모두 이뤄질 수 있게 설계하였다.

1공정에서는 가로 90mm×세로 50mm인 직사각형 펀치를 이용하였으며, 2공정에서는 다이 치수를 고정하고, 클리어런스에 따라 펀치 치수를 달리하여 실험하였다.

Fig. 4는 각 공정의 기하학적 형상을 나타낸 것이며, Table 2에 각 공정에서 사용된 금형의 크기를 나타내었다.

용량 800W의 카트리지 히터를 상/하 금형에 각각 4개씩 삽입하여 금형을 가열하였으며, 컨트롤러를 사용하여 실험 중 금형 온도를 일정하게 유지하였다.

금형에 의해 간접적으로 가열되는 소재 온도는 선행 실험 결과를 바탕으로 목표 온도까지 충분히 가열하여 실험하였다.

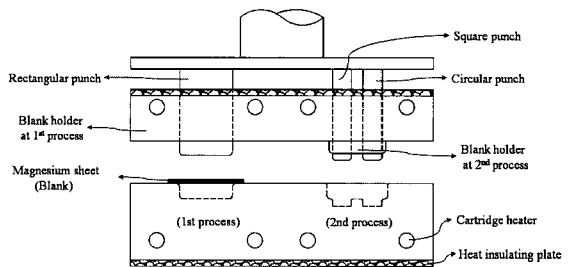
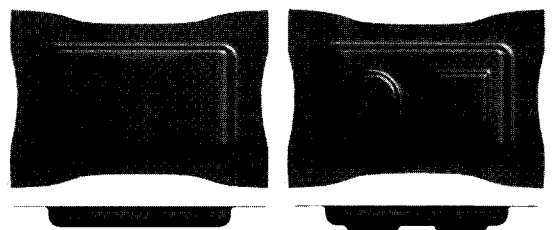


Fig. 3 Schematic diagram of the two step deep drawing system



(A) 1st process

(B) 2nd process

Fig. 4 Geometry of deep drawing process

먼저 1 공정에서 직사각 컵을 성형한 후 연속적으로 2 공정에서 원형과 정사각형 컵을 성형하였으며, 판재 투입부터 성형물 취출까지 모든 공정을 수행하는데 걸린 시간은 성형 속도가 가장 느린 0.1mm/s 일 때, 가장 깊은 성형 깊이를 기준으로 약 3분이었다.

성형 도중 블랭크 홀딩력은 10kN 으로 일정하게 유지하였으며, 윤활을 목적으로 시편의 양면에 MoS₂ 를 도포하여 사용하였고, Table 3 에 공정 변수를 나타내었다.

실험 후 판 두께 변화의 측정은 제품의 표면에 거리를 표시하여, 포인트 마이크로미터 측정기로 두께의 분포를 측정하였다.

3.1 단순한 형상(Simple shape)의 딥드로잉 성형성-1st process

크기가 가로 90mm×세로 50mm 이고, 서로 다른 모서리 반경을 가진 직사각형 펀치를 사용하여 온간 딥드로잉을 수행하였다.

Fig. 5 는 육안으로 파단이 관찰될 때까지 성형 깊이를 증가시키면서 성형 시험을 수행한 후, 온

Table 2 Dimension of tools (mm)

		Clearance (%)	1 st process		2 nd process	
			Width	Length	Circle	Square
Die	Core size	-	91.4	51.4	26	26
	Shoulder radius	-	2	2	2	2
Punch	Size	20	-	-	24.8	24.8
		40	90	50	-	-
		60	-	-	24.4	24.4
		100	-	-	24	24
	Shoulder radius		2	10	2	2
Distance between center of circular and square punch					44	

Table3 Processing parameters of deep drawing test

	1 st process	2 nd process
Temperature (°C)	150, 200, 250, 300, 350	200
Velocity (mm/s)	0.1, 0.5, 1.0	0.1
Blank holding force (kN)	10	10
Sheet thickness (mm)	0.5	0.5
Clearance (%)	40	20, 60, 100

도와 속도에 따른 최대 성형 깊이를 나타낸 것이며, Fig. 6 은 온도에 따른 성형 결과물이다.

소재 온도가 200°C 부근에서 최대 성형 깊이를 나타내며, 이 후 온도가 상승 할수록 성형 깊이는 줄어 들거나 큰 차이를 나타내지 않았다.

3 가지의 성형 속도 중 0.1mm/s 일 때가 가장 깊이 성형되었으며, 소재 온도가 200~250°C 에서는 성형 속도에 따른 큰 차이를 나타내지 않았다.

Fig. 7 은 성형 깊이에 따른 성형 하중을 나타낸 것이다. 속도가 증가할수록 성형 하중은 증가하고, 온도가 상승할수록 성형 하중은 감소하고 있으며 최대 성형 깊이를 나타내었던 온도와 속도에서 하중은 7~8kN 정도였다.

또한 소재 온도가 200 °C 이후에는 하중이 급격히 감소하는데, 이 온도 분포에서 마그네슘 합금의 재결정이 발생하기 때문이다[13].

Fig. 8 은 딥드로잉 후 제품의 두께 변형 분포를 나타낸 것이다. 압연방향으로의 두께 분포(A)는 플랜지 부근에서 발생하는 압축변형에 의해 두께

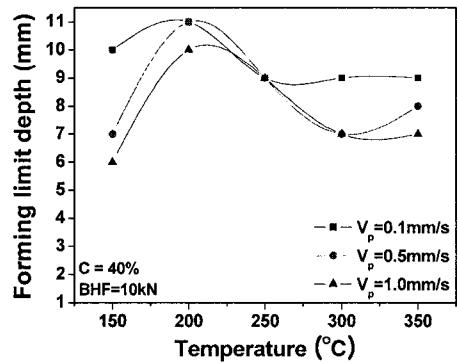


Fig. 5 Forming limit depth of first deep drawing process at various temperature and velocities

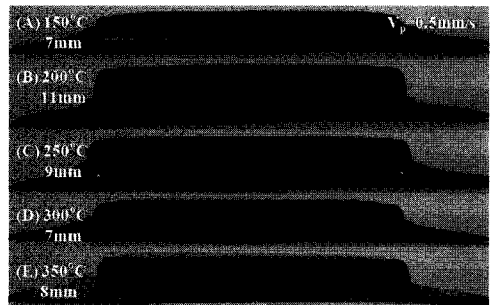


Fig. 6 Photography of rectangular cups formed at various temperatures

가 증가하며, 다이 반경 보다는 펀치 반경 부근에서 두께가 크게 감소하는 경향이 나타난다.

성형 속도가 1.0mm/s 일 때 펀치 반경 부근에서 최대 5% 두께가 감소하여, 이 부근에서 파단이 발생할 것으로 예측할 수 있다.

압연방향에 수직인 방향으로의 두께 분포(B)도 유사한 경향을 나타내고 있지만, 성형 속도가 0.5mm/s 와 1.0mm/s 일 경우 플랜지 부근에서 컵 바닥 부근의 두께 보다 상대적으로 감소하고 있다.

이것은 실험 시편의 초기 두께 분포가 전체적으로 균일하지 않았기 때문이다. 또한 재료의 이방성에 의해 압연방향에 수직인 방향(TD)의 두께 변화보다 압연방향(RD)의 두께 변화가 큰 경향을 보이고 있다.

3.2 복잡한 형상(Complex shape)의 딥드로잉 성형성-2nd process

선형 공정에서 깊이 10mm 로 성형한 직사각 컵에 펀치와 다이의 간격(이하 클리어런스)이 소재

두께의 20, 60, 100%가 되도록 하여 원형과 정사각형 펀치를 동시에 딥드로잉하였다. 성형 온도는 성형성이 가장 우수하였던 200 ℃에서 딥드로잉하였다.

Fig. 9 에 파단 없이 성형 가능한 최대 성형 깊이를 나타내었다. 클리어런스가 소재 두께의 60% 일 때 속도에 따라 근소한 차이를 나타내지만 평균적으로 펀치와 다이 사이 간격이나 속도에 따른 성형 깊이는 차이를 보이지 않았으며 3mm 정도 성형 가능하였다.

복잡한 기하학적 형상의 구속과 이로 인한 재료의 유동특성이 제한되어 속도나 사이 간격에 관계없이 성형 깊이가 동일한 것으로 사료된다.

Fig. 10 는 최대 성형 깊이 이상으로 딥드로잉했을 때 나타나는 대표적인 파단 양상을 나타낸 것이다.

원형 컵은 펀치 반경 부근에서 파단 발생하였으며, 사각 컵은 초기에 다이 반경 부근에서 파단

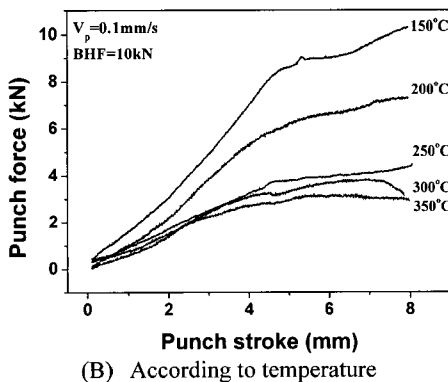
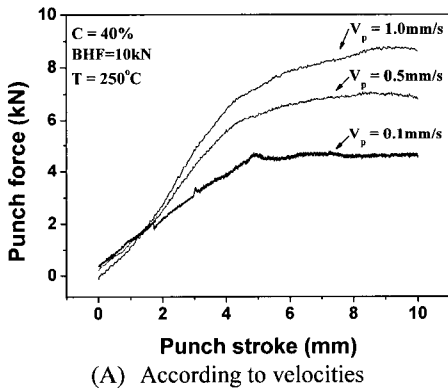


Fig. 7 Relationship between punch load and stroke according to temperature and velocities

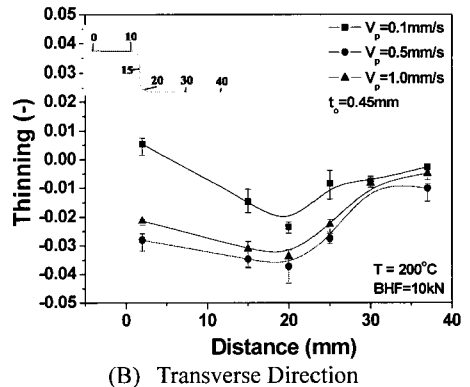
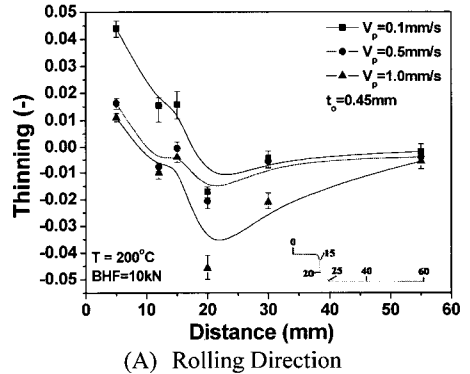


Fig. 8 Thinning distribution according to rolling direction at forming temperature 200 ℃ and various velocities

이 발생하여, 성형 깊이가 증가할 수록 펀치 반경 부근으로 파단이 이동하는 양상을 Fig. 10 (A) (B)로부터 관찰할 수 있다.

한편 일부 성형 결과물은 두 형상 사이 부근에서 기하학적 형상의 구속에도 불구하고 주름이 발생하였다. 이 부근은 원형과 정사각형 컵이 압축변형을 겪는 플랜지가 중복되는 곳으로 매우 심한 압축변형을 겪는 곳이다.

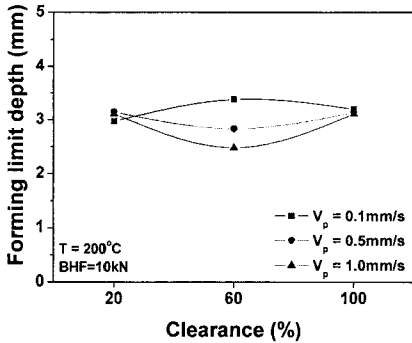
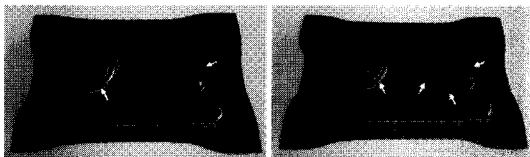


Fig. 9 Forming limit depth of second step deep drawing process at various temperature and velocities



(A) $v_p = 1.0 \text{ mm/s}$, $h = 4 \text{ mm}$ (B) $v_p = 1.0 \text{ mm/s}$, $h = 5 \text{ mm}$

Fig.10 Photograph with a fracture aspect at forming temperature 200°C and clearance 60%

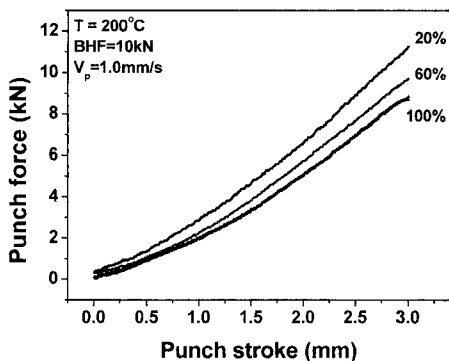


Fig.11 Relationship between punch load and punch stroke according to clearances

따라서 주름이 발생하기 쉬우며, 이러한 주름과 같은 파형은 형상의 치수 정도를 떨어뜨리기 때문에, 주름을 억제하기 위해 블랭크 홀더의 압력을 증가 시킬 필요가 있다.

Fig. 11 에 클리어런스에 따른 성형 하중을 나타내었다. 클리어런스가 소재 두께의 20%로 좁은 경우 마찰에 의해 측벽부의 재료 이동이 억제되기 때문에 클리어런스가 좁을 수록 성형 하중이 증가하고 있다.

성형 후 제품의 두께 변화 분포를 조사하였으며, 측정은 제품의 중간을 압연방향에 따라 절단하여 측정하였다.

Fig. 12 는 펀치 바닥면을 기준으로 하여 펀치와 다이 사이 간격에 따른 두께 분포를 나타낸 것이다. Fig. 12 (A) 는 사각형 컵의 두께 분포를 나타낸 것이다. 2 공정의 다이 반경 부근에서 극심한 두께 감소가 발생하였으며, 클리어런스가 소재 두께의 20%일 때 최대 18%까지 두께가 감소하였다.

Fig. 12 (B) 는 원형 컵의 두께 분포를 나타내고 있다. 사각 컵과 달리 펀치 반경 부근에서 극심한 두께 감소가 발생하며, 클리어런스가 소재 두께의 20%일 때 최대 13%까지 두께가 감소하였다.

클리어런스가 좁을수록 펀치에 의해 원주방향의 압축변형이 억제되어 소재의 두께 증가가 일어나지 않게 되며, 측벽부의 재료 이동이 마찰에 의해 억제되기 때문에 두께 감소율이 증가됨을 알 수 있다.

Fig. 13 (A) 에 성형 속도 0.1mm/s 로 성형 된 제품의 마이크로 비커스 경도를 측정하여 나타내었다.

두 공정으로 성형 할 경우 재가공에 의한 가공 경화 현상이 두드러지는 것을 Fig. 13 (A)의 경도 분포를 통해 확인할 수 있으며, 제품의 표면에서 내부로 이동할 수록 경도가 증가하는 경향을 나타내고 있다.

원형과 사각 컵의 중간 지점은 Fig. 13 (B)와 같은 쌍정 조직의 발달로 연화되어 성형 전 초기 경도 수준으로 감소하였다[14].

4. 결론

금형 온도 150 °C 에서 300 °C까지의 온도 범위에서 AZ31 마그네슘 합금 판재가 가열될 때 온도 분포를 조사하였다. 그리고 이 온도 분포를 바탕으로 2 단 온간 딥드로잉을 수행하였으며, 성형 한계성 및 두께 변화를 고찰하였다.

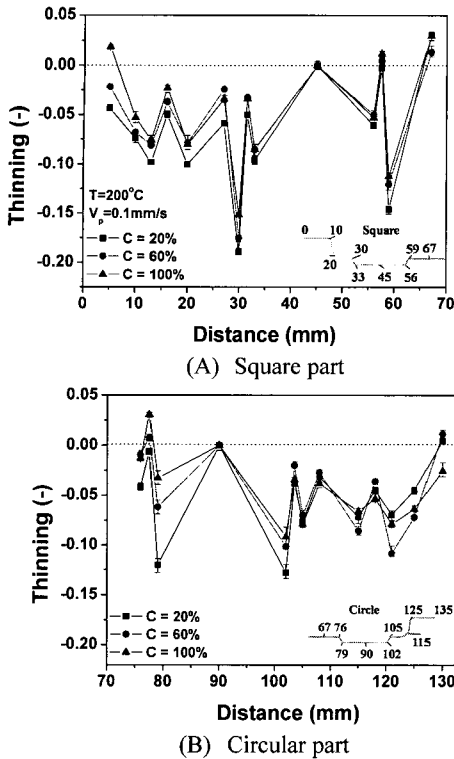


Fig. 12 Thinning distribution according to clearances at temperature 200 °C, velocity 0.1mm/s

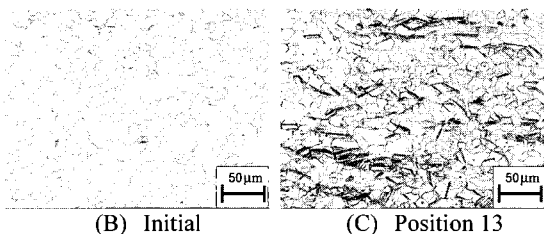
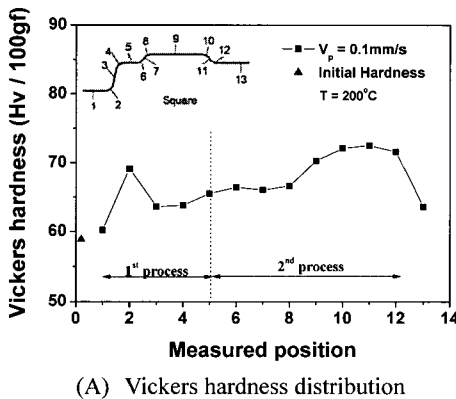


Fig.13 Vickers hardness distribution of the square part and microstructure

(1) AZ31 마그네슘 합금 판재의 온간 성형 시 소재 온도를 정확하게 제어하기 위한 가열 시간을 제안하였으며, 소재 온도가 다이 온도와 동일해지는 시간을 Table 1에 나타내었다.

(2) 1 공정에서 성형된 직사각형 컵의 두께 변형 분포에서 압연방향의 두께 변형 분포가 압연방향에 수직한 두께 변형 분포보다 크게 나타났다. 즉, 압연방향에 수직한 방향이 두께 방향으로의 변형 저항이 큰 것을 알 수 있었다.

(3) 2 공정에서 원형과 사각형 컵을 동시에 성형하는 복잡한 형태의 딥드로잉 경우, 기하학적 형상이 재료의 유동을 제한하여 속도나 클리어런스에 따른 성형 깊이는 3mm 정도임을 알 수 있었다.

(4) 2 공정에서 성형된 원형 및 정사각형 컵의 두께 분포를 통해 클리어런스의 영향을 확인 할 수 있었으며, 클리어런스가 줄어들수록 두께 감소폭이 컸고, 성형 하중이 증가하였다. 클리어런스 100%일 때 가장 적은 두께 감소율을 나타냈다.

(5) 성형 후 제품의 경도 분포는 재가공에 의해 가공경화가 심화되는 2 공정 파트 부근의 경도가 높게 나타났다.

후기

본 연구는 KIMM 에서 진행하는 Mg 중기저점 기술개발 사업으로 진행된 결과로써 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고 문헌

- [1] Shoichiro Yoshihara, Ken-ichi Manabe, Hisashi Nishimura, 2005, Effect of blank holder force control in deep-drawing process of magnesium alloy sheet, J. Mat. Pro. Tech., Vol.170, pp. 579~585.
- [2] Shyong Lee, Yung-Hung Chen, Jian-Yih Wang, 2002, Isothermal sheet formability of magnesium alloy AZ31 and AZ61, J. Mat. Pro. Tech., Vol.124, pp. 19~24.
- [3] Myeong-Sup Rhee, Dae-Min Kang, 2006, Improvement of Formability of AZ31 Magnesium Alloy Sheet during Warm Deep Drawing, Transactions of Materials Processing, Vol.15, No.2,

- pp. 148~152.
- [4] Dae-Min Kang, Ken-ich Manabe, 2005, Improvement on the Formability of Magnesium Alloy Sheet by Heating and Cooling Method, Transactions of Materials Processing, Vol. 14, No.7, pp. 607~612.
- [5] S. W. Kim, Y. S. Kim, Y. N. Kwon, J. H. Lee, 2008, A Study on Warm Incremental Forming of AZ31 Alloy Sheet, Transactions of Materials Processing, Vol.17, No.5, pp. 373~379.
- [6] Hariharasudhan Palaniswamy, Gracious Ngaile, Taylan Altan, 2004, Finite element simulation of magnesium alloy sheet forming at elevated Temperatures, J. Mat. Pro. Tech., Vol.146, pp. 52~ 60.
- [7] Tyng-Bin Huang, Yung-An Tsai, Fuh-Kuo Chen, 2006, Finite element analysis and formability of non-isothermal deep drawing of AZ31B sheets, J. Mat. Pro. Tech., Vol.177, pp. 142~145.
- [8] Fuh-Kuo Chen, Tyng-Bin Huang, Chih-Kun Chang, 2003, Deep drawing of square cups with magnesium alloy AZ31 sheets, Int. J. Mach. Tools & Manu., Vol. 43, pp.1553~1559.
- [9] D. G. Choo, J. H. Lee, C. G. Kang, 2005, The Effect of Tool Surface Treatment and Temperature on Deep Drawability of AZ31 Magnesium Alloy Sheet, Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference, pp. 118~121.
- [10] K. Iwanaga, H. Tashiro, H. Okamoto, K. Shimizu, 2004, Improvement of formability from room temperature to warm temperature in AZ-31 magnesium alloy, J. Mat. Pro. Tech., Vol. 155~156, pp. 1313~1316.
- [11] K. F. Zhang, D. L. Yin, D. Z. Wu, 2006, Formability of AZ31 magnesium alloy sheets at warm working conditions, Int. J. Mach. Tools & Manu., Vol.46, pp. 1276~1280.
- [12] T. Naka, T. Uemori, R. Hino, M. Kohzu, K. Higashi, F. Yoshida, 2008, Effects of strain rate, temperature and sheet thickness on yield locus of AZ31 magnesium alloy sheet, J. Mat. Pro. Tech., Vol. 201, pp. 395~400.
- [13] T. Al-Samman, G. Gottstein, 2008, Dynamic recrystallization during high temperature deformation of magnesium, Mat. Sci. Eng. A, Vol. 490, pp. 411~420.
- [14] M. R. Barnett. 2007, Twinning and ductility of magnesium alloys Part I: "Tension" twins, Mat. Sci. Eng. A, Vol. 464, pp. 1~7.