

AZ31B 판재의 온간 디프드로잉 성형성 극대화를 위한 금형 온도

최선철¹, 김형중[#], 김현영², 홍석무³, 신용승³

Tool Temperatures to Maximize the Warm Deep-drawability of AZ31B Sheets

S. C. Choi, H. J. Kim, H. Y. Kim, S. M. Hong, Y. S. Shin

Abstract

In this study, the formability of AZ31B magnesium alloy sheets was investigated by the analytical and experimental approaches. Tensile tests and limit dome height tests were carried out at several temperatures between 25°C and 300°C to obtain the mechanical properties and forming limit diagram (FLD). The FLD-based criterion considering the strain-path and the blank temperature was used to predict the forming limit in a deep-drawing process of cross-shaped cup by finite element analysis. This criterion proved to be very useful in determining the optimal process conditions such as blank shape, punch velocity, minimum corner radius, fillet size, and so on, through the comparison between FEA and experimental data. In particular, the temperature of each tool that provided the best formability of the blank was determined by coupled temperature-deformation analyses. A practical method that can greatly reduce the forming time by increasing the punch speed during the forming process was suggested.

Key Words : AZ31B magnesium alloy sheet (AZ31B 마그네슘 합금판재), Forming limit diagram (성형한계도), Cross-shaped cup deep-drawing (십자형컵 디프드로잉), Deep-drawability (디프드로잉 성형성), Finite element analysis (유한요소해석)

1. 서론

마그네슘 합금은 200°C 부근에서의 온간성형 시 초소성 거동이 나타나는 것으로 알려져 있어, 재료특성에 관한 연구와 더불어 온·열간 프레스가공 등 성형기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 분야의 연구는 주로 여러 가지 공정조건에서의 재료의 성형성 평가에 근거를 두고 있다. 최근 발표된 주요 연구를 살펴보면 Naka 등[1]이 여러 가지 온도와 변형률속도에 대하여 Al-Mg 합금재료의 성형한계도를 얻었으며, Siegert 등[2]은 가스를 이용한 온간 벌지성형으로 AZ31 판재의 성형한계도를 얻었다. Yasumasa 등[3], Abu-Farha 등

[4]도 Erichsen 시험 및 가스 벌지성형으로 AZ31과 AZ31-H24 재료의 성형한계를 평가하였다. 국내에선 김홍규 등[5]이 AZ31 합금판재의 사각컵 디프드로잉 시 금형 형상에 따른 성형 민감도를 분석하였고, 이용신 등[6]은 AZ31합금의 온간 후방압출 시의 변형특성과 결합성장에 관한 연구를 하였다.

본 연구에서는 형상이 복잡하고 성형이 어려운 십자형컵 디프드로잉 공정을 대상으로, AZ31B 마그네슘 합금판재의 성형성을 극대화할 수 있는 최적 금형 온도를 구하기 위하여 유한요소해석과 실험을 수행하고 그 결과를 비교·분석하였다. 유한요소해석에서 성형한계, 즉 파단을 일으키지 않

1. 강원대학교 대학원 기계·메카트로닉스공학과
2. 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부
3. (주)삼성전자 생산기술연구소 정밀금형팀
교신저자: 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부,
E-mail: khjong@kangwon.ac.kr

고 성형할 수 있는 컵 높이를 예측하는 데 있어 성형한계도를 근거로 한 파단 기준을 적용하였다. 이 기준에는 파단 위험 부위의 변형경로와 온도에 따른 성형한계선의 변화를 고려하였다. 또한, 공정 도중 적시에 펀치 속도를 증가시킴으로써 변형률속도 증가에 따른 성형성 저하를 일으키지 않고 성형시간을 획기적으로 줄일 수 있는 방안을 제안하고 실험적으로 검증하였다.

2. 재료 시험 및 금형 제작

Fig. 1과 2는 선행 연구에서 단축인장시험 및 한계도높이 시험을 통하여 구한, 온도에 따른 응력-변형을 곡선과 성형한계도이다[7]. 단축인장시험은 두께 0.5 mm의 AZ31B 마그네슘 합금판재를 사용하여 25(상온), 100, 150, 200, 250 및 300℃에서 압연방향에 대하여 0°, 45° 및 90° 방향으로 실시하고, 각 변형률에 대응하는 응력 값을 평균하였다. 시험장비는 용량 5 kN의 로드셀과 비접촉식 신율계 AVE (advanced video extensometer)를 장착한 만능시험기 INSTRON 5582를 사용하였고, 시편은 표점거리 25 mm의 ASTM E8 서브사이즈를 채택하였다. 크로스헤드 속도는 0.5 mm/s (변형률속도 약 0.02/s에 해당)로 일정하게 하였다. 성형한계도 시편은 길이(압연방향)가 175 mm로 일정하고 폭은 25, 50, 85 및 175 mm인 4가지를 사용하였으며, 변형률을 측정하기 위하여 2×2 mm의 정사각형 격자를 표면에 인쇄하였다. 지름 101.6 mm의 반구형 펀치를 사용하여 25, 100, 150, 200, 250 및 300℃에서 0.1 mm/s의 일정한 펀치 속도로 시험을 수행하였다. Fig. 2에 검은 선으로 표시된 온도별 성형한계선은 실제 시험으로부터 얻은 결과이며, 회색 선은 25℃ 간격으로 선형 보간한 것이다. 온도별 성형한계도는 유한요소해석 시 파단 여부를 결정하는데 사용된다.

십자형 금형의 형상과 치수, 그리고 다이와 블랭크홀더 내부의 가열 채널 및 펀치와 패드 내부의 냉각 채널 등은 선행 연구에서 수행한 온도-변형 해석 및 열전달 해석을 통하여 설계-제작하였다[8,9].

3. 성형 실험 및 해석

3.1 실험

십자형컵 디프드로잉 실험은 Table 1에 나타낸

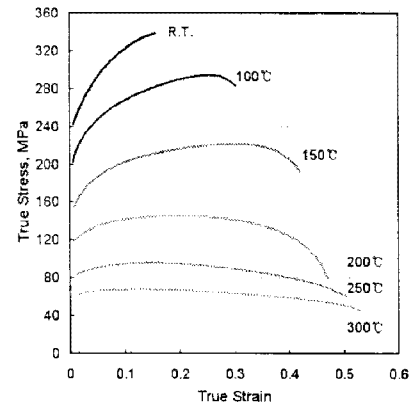


Fig. 1 True stress – true strain curves of AZ31B Mg alloy sheet at various temperatures

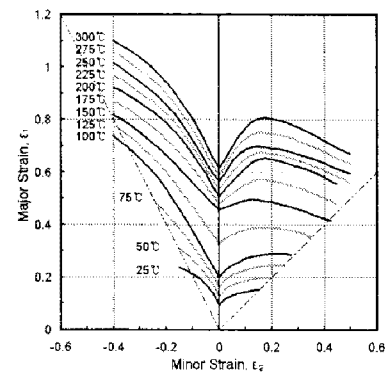


Fig. 2 FLD of AZ31B magnesium alloy sheet at various temperatures

12가지 금형 온도 조건으로 실시하였다. 다이와 블랭크홀더, 펀치와 패드는 각각 같은 온도로 설정하였다. 소재의 상하 표면에는 고온용 수용성 액체 윤활제를 성형 전에 도포하였다. 펀치속도는 평균 0.15 mm/s로 설정하였으며, 전체 12가지 조건 중 2가지 조건(Case 250-50, Case 250-100)에서만 성형 깊이 25 mm까지 파단 없이 성형되었다. 실험 결과의 일부분을 Fig. 3에 나타내었다. Case 250-50 조건에서는 코너부에 네킹이 발생한 경우도 있었으며, 이로 미루어 볼 때 50℃ 근처가 펀치 냉각 온도의 하한선이라 판단된다. 가열 및 냉각 채널의 사용으로 금형 온도에 따른 십자형컵 디프드로잉 성형성의 우열이 분명하게 나타났다.

3.2 유한요소해석

의연적 코드 PAM-STAMP를 사용하여 실험과 동일한 온도 조건에서 온간성형 공정해석을 실시하였다. 초기 요소 크기가 1.0 mm인 셀 요소를 사

Table 1 Tool temperature conditions under which experiments were performed

Cases	Tool surface temperature (°C)		Cooling (Water temp.)
	Die & Blank holder	Punch & Pad	
200-50	200	50	Cooling (30°C)
200-100	200	100 [†]	Cooling (60°C)
200-150	200	150 [†]	Half cooling [§]
200-200	200	200 [†]	No cooling
250-50	250	50	Cooling (30°C)
250-100	250	100	Cooling (60°C)
250-150	250	150	Half cooling
250-200	250	200 [†]	No cooling
300-50	300	50 [‡]	Cooling (30°C)
300-100	300	100 [‡]	Cooling (60°C)
300-150	300	150 [‡]	Half cooling
300-200	300	200 [‡]	No cooling

[†] Actually, 15°C -30°C lower than the controlled temperature

[‡] Actually, 15°C -30°C higher than the controlled temperature

[§] Cooling only before test, and no cooling during forming

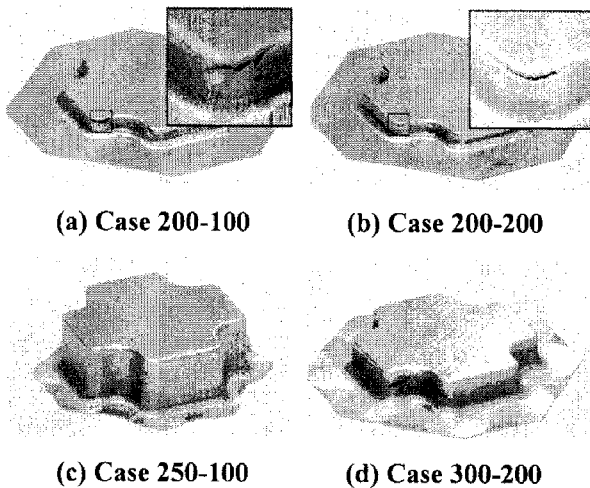


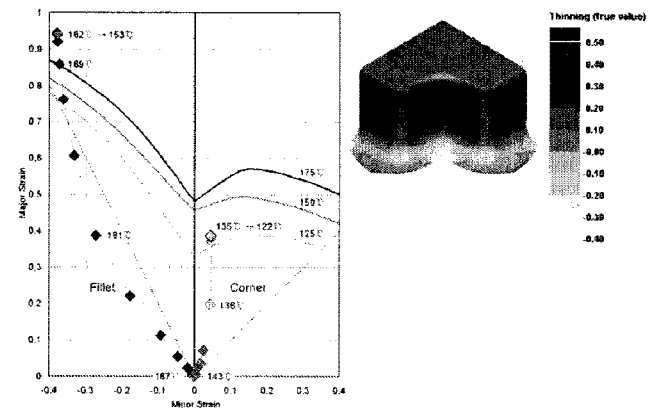
Fig. 3 Photographs of the drawn cups in temperature conditions

용하였고, 3단계까지 요소세분화(mesh refinement)를 적용하였다.

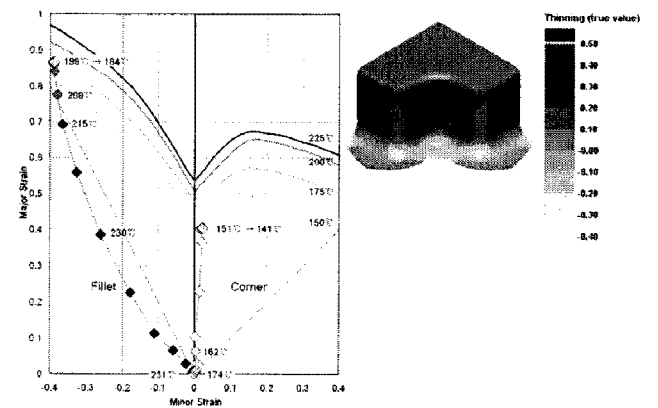
실험에서 파단은 항상 펀치 어깨 코너(이하 '코너') 또는 필렛 반경에 가까운 벽 부근(이하 '필렛')에서 발생하였다. 따라서 이 두 부분의 요소에 초점을 두어 변형률 경로와 온도를 추적하여 해당 온도의 성형한계선과 비교하여 파단 여부를 판단하였다. Fig. 4는 2가지 온도조건에 대하여 성

형한계도 상에 각 요소의 변형률 경로와 온도를 나타낸 그림이다. Case 200-100의 경우 성형 깊이 6.0 mm 일 때 코너부 요소가 성형 한계에 도달하며, Case 250-100의 경우 성형 깊이 25 mm까지 파단이 발생하지 않을 것으로 판단되었다. Case 250-100의 코너부 요소의 경우 175°C 성형한계선에 매우 근접해 있어 '파단'으로 판단하기 쉬우나, 199°C 일 때 이미 성형이 완료되었고, 그 이후에는 변형률속도가 0인 상태에서 온도만 184°C로 내려갔기 때문에 '안전'으로 판단하는 것이 타당하다. 실험과 해석의 모든 결과를 Table 2에 요약하여 비교하였으며, 두 결과가 대체로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

펀치의 냉각으로 인해 변형이 진행되는 동안 코너와 필렛부 요소는 펀치와 점차 가까워지면서 온도가 점점 감소하게 된다. 펀치가 10 mm 이상 진행하여 코너와 필렛 부분이 일단 성형된 후에는 형상이 기하학적으로 구속될 뿐만 아니라 온



(a) Case 200-100



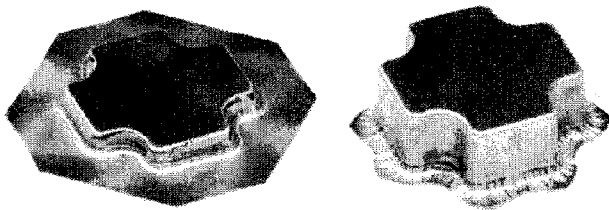
(b) Case 250-100

Fig. 4 Strain paths on the FLD and distribution of thinning

Table 2 Comparison between FEA and experimental results

Case	Fillet			Corner			FEA-Exp. correlation
	Thinning	Depth at failure, mm		Thinning	Depth at failure, mm		
		FEA	Exp.		FEA	Exp.	
200-50	0.41	10.1	(Safe)	0.16	5.1	< 6.0	Good
200-100	0.60	10.1	(Safe)	0.18	6.0	< 6.0	Good
200-150	0.84	10.1	(Safe)	0.51	6.0	< 6.0	Good
200-200	0.04	(Safe)	(Safe)	0.89	5.1	< 6.5	Good
250-50	0.70	10.1	(Safe)	0.13	7.0	(Safe)	Poor
250-100	0.53	(Marginal)	(Safe)	0.15	(Safe)	(Safe)	Good
250-150	0.60	(Marginal)	< 12.5	0.17	(Safe)	(Neck)	Poor
250-200	1.17	10.1	(Safe)	0.47	7.0	< 6.0	Good
300-50	1.22	9.1	< 14.5	0.10	(Marginal)	(Safe)	Good
300-100	1.10	10.1	< 12.5	0.10	(Safe)	(Safe)	Good
300-150	1.21	10.1	< 10.5	0.13	(Safe)	(Neck)	Good
300-200	1.17	10.1	(Safe)	0.16	(Safe)	< 6.0	Poor

도 하강과 함께 소재의 유동응력이 증가하여 더 이상의 변형이 발행하지 않는다. 이러한 점을 이용하여 온간성형 시 성형시간을 줄일 수 있는 실험을 진행하였다. 앞서 실험에서 가장 좋은 결과를 보인 Case 250-100 조건에서 펀치속도를 2.3 mm/s로 빠르게 성형할 경우 성형 깊이 약 5.0 mm에서 파단이 발생하였다. 반면에 0.15 mm/s의 펀치속도로 11 mm까지 성형한 후에 3.4 mm/s로 갑자기 증가시킨 경우, 파단 없이 28 mm까지 성형하는데 성공하였다. 이 방법으로 앞서 0.15 mm/s의 펀치속도로 성형할 때보다 성형시간을 1/4정도로 단축할 수 있었다. 위의 두 가지 경우의 실험 결과를 Fig. 5에 나타내었다.



(a) Fast uniform speed forming (b) Non-uniform speed forming

Fig. 5 Comparison of fast uniform and non-uniform speed forming

4. 결론

본 연구에서는 십자형컵 디프드로잉 공정에서 AZ31B 마그네슘 합금판재의 성형한계를 극대화

할 수 있는 최적 금형 온도를 구하기 위하여 유한요소해석과 실험을 수행하고, 그 결과를 비교 분석하였다. 주요 연구 내용은 다음과 같다.

(1) 모두 12가지의 금형 온도 조건에서 디프드로잉 실험을 실시한 결과, 다이와 블랭크홀더는 250°C로 가열하고, 펀치와 패드는 50°C 또는 100°C로 냉각하는 2가지 조건에서만 깊이 25 mm까지 성형하는데 성공하였다.

(2) 실험에서와 같은 금형 온도 조건에서 수행한 온도-변형 해석에서, 변형률 경로와 온도를 고려하여 성형한계도를 근거로 파단 여부를 판단하는 방법을 적용하였으며, 그 결과는 실험과 잘 일치하였다. 따라서 이 파단 기준이 유한요소해석에서 소재의 파단 한계를 결정하는데 유용한 방법임을 확인하였다.

(3) 펀치속도를 0.15 mm/s로 하여 11 mm 깊이까지 성형한 후에 3.4 mm/s로 증가시키는 방법으로 온간 디프드로잉 성형시간을 1/4 정도로 줄일 수 있음을 실험적으로 검증하였다.

참고 문헌

[1] T. Naka, G. Torikai, R. Hino, F. Yoshida, 2001, The effects of temperature and forming speed on the forming limit diagram for type 5083 aluminum-magnesium alloy sheet, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 113, pp. 648-653.
 [2] K. Siegert, S. Jager, M. Vulcan, 2003, Pneumatic bulging of magnesium AZ31 sheet metals at elevated

- temperatures, *CIRP Annals-Manu. Tech.*, Vol. 52, pp. 241~244.
- [3] C. Yasumasa, I. Hajime, M. Mamoru, 2007, Stretch formability of AZ31 Mg alloy sheets at different testing temperatures, *Mat. Sci. Eng. A*, Vol. 466, pp. 90~95.
- [4] F. K. Abu-Farha, N. A. Shuaib, M. K. Khraisheh, K. J. Weinmann, 2008, Limiting strains of sheet metals obtained by pneumatic stretching at elevated temperatures, *CIRP Annals-Manu. Tech.*, Vol. 57, pp. 275~278.
- [5] 김홍규, 김기덕, 2007, AZ31 판재의 온간 사각 컵 디프드로잉에서 금형 설계에 대한 성형성 민감도의 평가, *한국소성가공학회지*, 제16권 제2호, pp. 120~125.
- [6] 윤덕재, 김응주, 이용신, 2007, AZ31 마그네슘 합금의 온간 후방압출에서 변형특성과 결합성장에 관한 유한요소해석, *한국소성가공학회지*, 제16권, 제8호, pp. 614~620.
- [7] H. Y. Kim, S. C. Choi, H. J. Kim, S. M. Hong, Y. S. Shin and G. H. Lee, 2008, *9th AEPA Conf.*, Daejeon, Korea (in press).
- [8] 최선철, 김현영, 김형종, 홍석무, 유수열, 신용승, 2008, Mg 온간성형을 위한 십자형상 금형의 가열/냉각 채널 설계, *한국소성가공학회 춘계 학술대회논문집*, pp. 370~373.
- [9] 황상희, 최선철, 김현영, 김형종, 홍석무, 신용승, 이근호, 2008, 십자형상 금형의 디프드로잉에서 AZ31B 마그네슘 합금판재의 성형 한계, *한국소성가공학회 춘계 학술대회논문집*, pp. 374~377.