

AZ31B 마그네슘 합금판재의 성형특성 평가를 위한 실험적·해석적 연구

이명근¹ · 김형중[#]

Experimental and Analytical Evaluation of Forming Characteristics for AZ31B Magnesium Alloy Sheet

M. G. Lee, H. J. Kim

(Received December 21, 2010 / Revised March 8, 2011 / Accepted March 11, 2011)

Abstract

This study aimed at providing an experimental database for the mechanical properties of AZ31B magnesium alloy sheet such as stress-strain curve, yield stress, R-value and forming limit diagram(FLD) at various strain-rates and temperatures. Tensile tests were carried out on specimens having the orientations of 0°, 45° and 90° to the rolling direction with different crosshead speeds in the range between 0.008 and 8 mm/s at temperature from 25(room temperature) to 300 °C. The influence of the specimen gage length on the tensile properties was investigated. FLD tests were performed at punch speed of 0.1 and 1.0 mm/s in the same temperature range as that of the tensile tests. Swift cup tests were conducted to verify the usefulness of the material database and the reliability of the finite element analysis(FEA). The effects of strain-rate as well as temperature were taken into account in these simulations. It was shown that the FLD-based failure was reasonably well predicted by the thermal-deformation coupled analysis for this rate-sensitive material.

Key Words : AZ31B Magnesium Alloy Sheet, Material Test, R-value, Forming Limit Diagram, Swift Cup Test, Finite Element Analysis, Strain-rate Effect

1. 서론

마그네슘 합금은 철강재에 비해 1/5에 불과한 밀도를 가진 경량소재이지만, 비강도가 뛰어나고 전자파차폐성, 진동흡수성, 부식저항성이 우수하여 최근 자동차, 전자기기의 구조재료로서 각광 받고 있다. 그러나 특유의 조밀육방(HCP) 조직으로 인하여 상온에서의 성형성이 나쁘기 때문에 판재의 프레스 가공에서는 성형온도를 높인 온간 성형법이 주를 이루고 있다. 일반적으로 마그네슘 합금판재는 150°C 이상의 온간 영역에서 비저면

(non-basal plane) 슬립계의 활성화와 쌍정(twinning)의 발생 등 복합적인 현상으로 성형성이 증가한다고 알려져 있다. 이렇듯 예측하기 어렵고 복잡한 변형 특성을 가진 마그네슘 합금 판재는 온도와 변형속도에 따른 물성시험이나 성형성 시험, 해석적·이론적 변형거동의 예측 등 다양한 접근을 통하여 국내외에서 활발한 연구의 대상이 되어왔다[1~5]. 그러나 온도와 변형률속도 등 성형조건에 매우 민감한 재료임에도 시간과 비용, 장비 구축 여건 등의 문제로 실험적 연구는 제한적으로 이루어지고 있는 실정이다.

1. 강원대학교 대학원

교신저자: 강원대학교 기계의용공학과,

E-mail: khjong@kangwon.ac.kr

본 연구에서는 AZ31B 마그네슘 합금판재에 대한 광범위한 시험을 통해 기본 물성과 성형한계에 관한 데이터베이스를 구축함으로써 온간 성형특성을 평가하기 위한 실험적 기반을 제공하고자 하였다. 이를 위해 0.5mm 두께의 AZ31B 합금판재를 대상으로 온도, 변형률속도, 압연방향에 대한 각도, 표점거리 등을 변수로 한 인장시험을 수행하여 응력-변형률 곡선과 이방성계수를 측정하였으며, 성형온도와 성형속도에 따른 성형한계도 시험을 통해 재료의 성형성을 평가하였다. 또한, 원형킵 디프드로잉 공정에 대한 실험과 유한요소해석을 수행하고 공정변수와 성형성에 대한 비교·검토를 통하여 온도와 변형률속도 및 열전달을 고려한 해석 기술을 확보하고자 하였다.

2. 기본물성 및 성형성 시험

2.1 인장 시험

AZ31B 마그네슘 합금판재에 대해 온도별, 속도별, 방향별 인장시험을 수행하여 기초 물성을 확보하고 각 변수에 대한 변형거동을 평가하였다. 재료는 0.5mm 두께의 일본 N사 소재를 사용하였고, 인장시험은 최고 330℃까지 시험 가능한 챔버가열식 만능재료시험기(INSTRON 5882)를 이용하였다. 챔버에는 영상처리 기술을 통해 변형률을 측정하는 자동신율계(auto video extensometer, AVE)가 설치되어 있다. Table 1에 인장시험의 기본 조건을 명시하였다.

Fig. 1은 변형률속도 0.016/s에서 각 온도에 대해 얻은 응력-변형률 곡선들을 나타낸 것으로, 온도가 증가할수록 항복응력과 인장강도는 낮아지고 연신율은 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 낮은 온도에서는 압연방향에 대해 90° 방향의 시편이 항복응력과 인장강도가 높게 나타나는 등 시편 방향에 따른 차이를 보이지만 온도가 증가할수록 그 차이가 줄어드는 것으로 나타났다.

Table 1 Basic condition for tensile tests

Material	AZ31B Mg alloy sheet (t 0.5)
Specimen	KS B0801 13B (gage length 50mm)
Temperature	25, 100, 150, 200, 250, 300℃
Strain-rate	0.00016, 0.0016, 0.016, 0.16/s
Dir. to RD	0°, 45°, 90°

Fig. 2는 0°방향(압연방향) 시편에 대해 여러 가지 온도와 변형률속도에서 시험한 결과이다. 대체로 변형률속도가 느릴수록 응력은 낮아지고 연신율은 증가하며, 온도가 상승함에 따라 연신율의 증가는 큰 폭으로 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 3은 소성유동 거동을 대표하는 항복응력이 온도와 변형률속도에 따라 변하는 양상을 종합적으로 보여주고 있다. Fig. 2와 Fig. 3으로부터 100℃ 이상의 온도에서 변형률속도에 민감한 점소성 거동이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

한편, 마그네슘 합금 판재는 온·열간에서 단축인장시험 시 확산 넥이 발생하면서 유동응력이 감소하는 변형연화(strain-softening) 거동을 보이는 것으로 알려져 있는데, 거시적으로 표점거리 내의 불균일한 변형이 연화 현상을 과장할 수 있다는 판단으로부터 표점거리 변화에 따른 유동 거동을 조사하였다. 0° 방향 시편에 미리 2×2mm의 정방형 격자를 인쇄하고 온도 250℃, 변형률속도 0.016/s의 시험조건으로 공칭변형률을 5%씩 증가시키며 인장한 후 변형된 격자로부터 표점거리별(6, 14, 26, 50mm)로 변형률을 측정하였다. 이를 Fig. 4(a)와 같이 표점거리 50mm 일 때, AVE로 측정한 기본 데이터와 대응하는 다항식으로 근사하여 각 표점거리에 따른 유동응력곡선을 구하였다. Fig. 4(b)로부터 표점거리를 작게 할수록, 즉 보다 균일한 변형률 구간으로 유도할수록 응력과 변형률이 함께 증가하여 변형연화 현상을 완화시키는 것을 알 수 있다. 따라서 마그네슘 합금과 같이 광범위한 확산 넥이

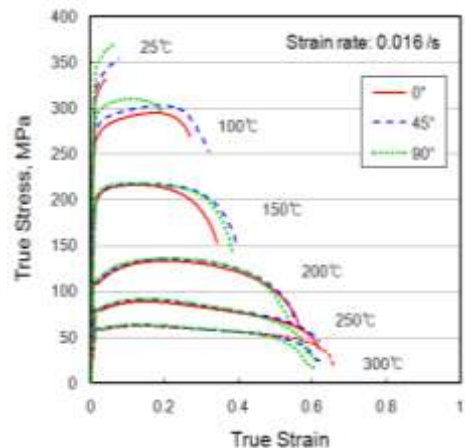


Fig. 1 Stress-strain curves at various temperatures

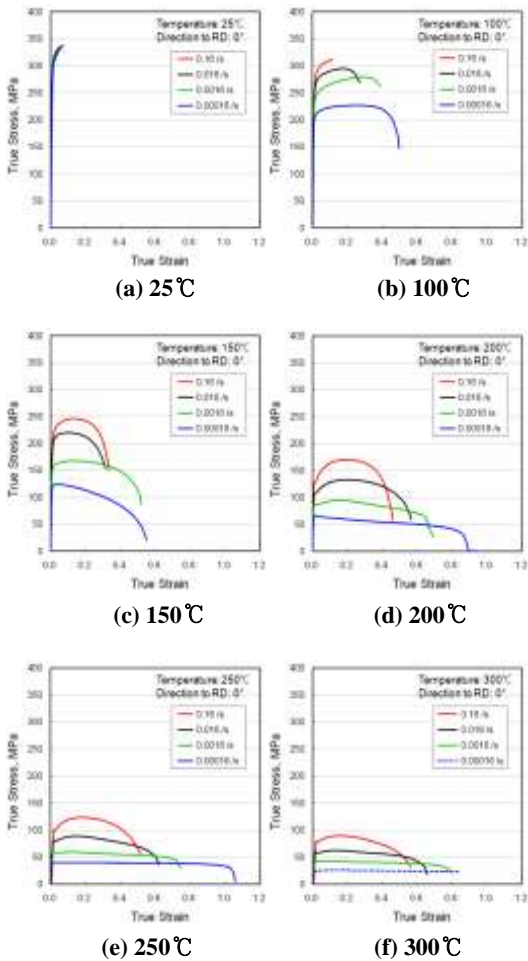


Fig. 2 Stress-strain curves of 0° specimens at various strain-rates and temperatures

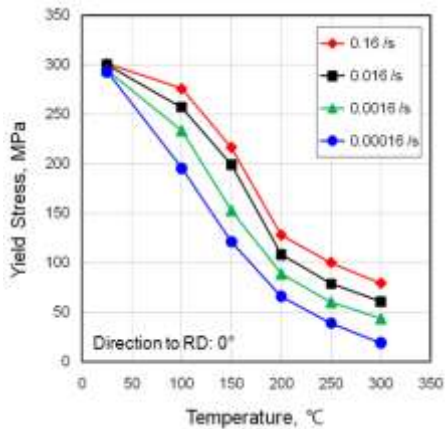


Fig. 3 Variation of yield stress with temperature and strain-rate

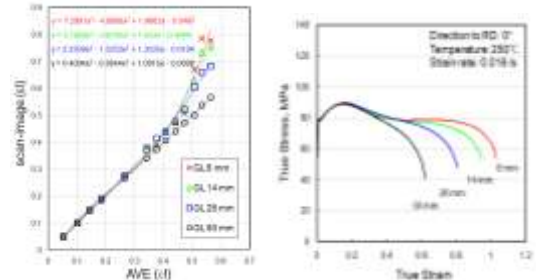


Fig. 4 Influence of gage length on stress-strain curve

발생하는 재료의 경우에는 유한요소해석에 입력되는 응력-변형률 곡선을 구할 때 특히 표점거리의 선택이 중요하며, 수치적으로 표점거리의 효과를 보정하기 위한 방법[6]도 효율적인 것으로 판단된다.

2.2 이방성계수 측정 시험

이방성계수 측정시험은 변형률속도 0.016/s(크로스헤드 속도 0.8mm/s)로 0°, 45°, 90° 시편에 대해 온도별로 실시하였으며, 250°C에 대해서는 변형률속도 0.16/s 및 0.0016/s 시험을 추가하였다. 시험은 시편에 2x2mm의 격자를 미리 인쇄하고 균일연신 구간 내에서 공칭변형률 5~30%(온도에 따라 다르게) 간격으로 단속적으로 인장한 후, 변형된 격자로부터 길이방향 변형률과 폭방향 변형률을 표점거리별로 측정하여 이를 Fig. 5에 표시한 기울기, 즉 두께방향 변형률에 대한 폭방향 변형률의 증분비로 환산함으로써 R값을 계산하였다. Fig. 5는 온도 250°C, 변형률속도 0.016/s 조건에서의 0° 방향 시편에 대한 시험 결과로, 표점거리가 작을수록 기울기, 즉 이방성계수가 큰 값을 보이는 것을 알 수 있으며, 이러한 경향은 온도가 낮을 때 두드러지는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 온도에 따른 방향별 R값의 변화를 나타낸 것이다. 방향별로는 90° 방향 시편이 가장 크고 0° 방향 시편이 가장 작은 값을 나타냈으며, 온도가 증가할수록 R값이 전체적으로 감소하여 1에 가까워지고 방향별 편차도 고온에서 현저히 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 250°C에서 변형률속도에 따른 결과를 비교한 것으로, 변형률속도가 느릴수록 이방성계수가 감소하며 방향별 편차도 역시 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 200°C 이상의 고온에

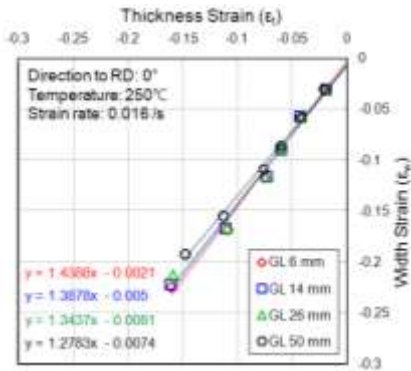


Fig. 5 Slope of thickness strain vs. width strain

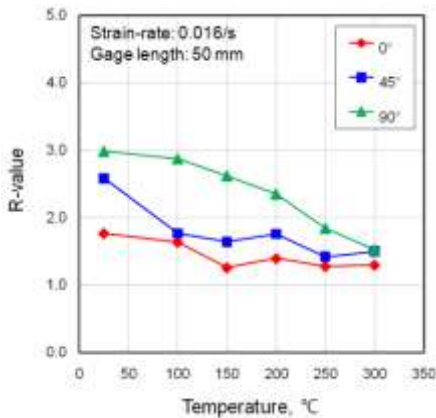


Fig. 6 Influence of temperature on stress-strain

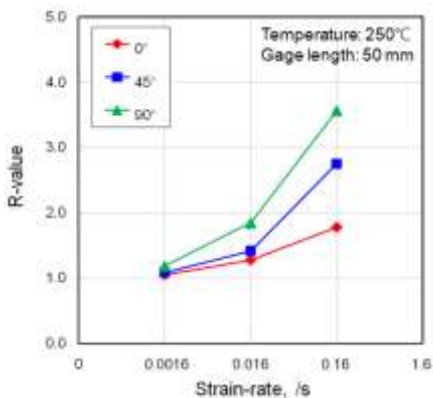


Fig. 7 Influence of strain-rate on R-value

서 0.01/s 이하의 느린 변형률속도로 성형할 때 수직이방성과 평면이방성을 모두 무시할 수 있는 것으로 판단된다.

2.3 성형한계도 시험

성형한계도 시험은 각 온도(25, 100, 150, 200, 250, 300°C)에 대해 0.1mm/s와 1.0mm/s로 펀치 속도를 달리하여 실시하였다. 시편은 가운데가 잘록한 (dog bone) 형상의 Nakajima 시편을 사용하였으며, 클램핑비드(clamping bead)가 없는 금형을 사용하여 비드부에서 생기는 조기 파단을 방지하였다. 시편에 지름 0.9mm의 점을 2mm 간격으로 인쇄하고, 광학식 자동변형률측정장비 ARGUS[7]를 이용하여 변형률을 측정하였다. 이 장치는 최근에 제정된 국제표준 ISO12004-2[8]에 의거하여 성형한계도를 작성한다. 이 규정에 의하면 Fig. 8에 나타난 바와 같이 파단부를 가로지르는 변형률 분포를 종모양곡선(bell-shaped curve)으로 근사하여 한계 주변형률과 부변형률을 결정하므로 ASTM[9] 등 기존 방식에서와 같이 네킹(necking)과 안전(safe) 영역 사이에서 성형한계를 판단할 때보다 성형한계가 다소 낮게 평가될 수 있다. 그러나 파단 정도나 격자 크기에 따른 영향과 측정자의 주관적 판단을 최소화할 수 있어 보다 객관적인 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 9에 각 온도에 대한 성형한계도를 성형속도별로 도시하였다. 온도에 따라 상당한 차이가 나타났으며, 200°C 이상의 온도에서 성형 성이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 성형속도가 느릴수록 좋은 성형성을 보였고 온도가 낮을 때 그 편차는 더욱 크게 나타났다.

한편, 성형온도 300°C의 경우 단축인장외의 변형모드에서는 성형성이 떨어져 오히려 250°C에서보다 전반적으로 낮은 성형성을 보였으며,

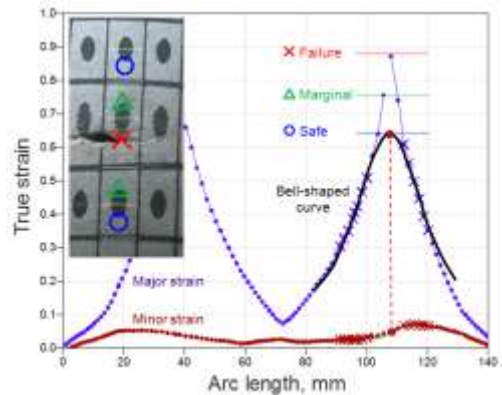
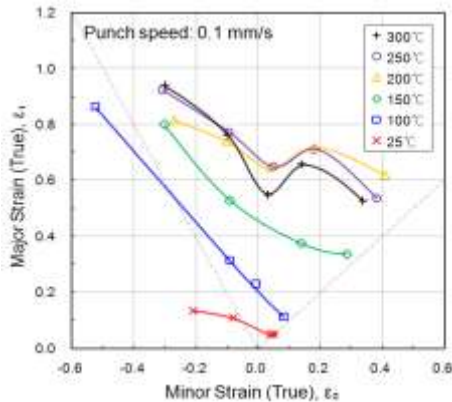
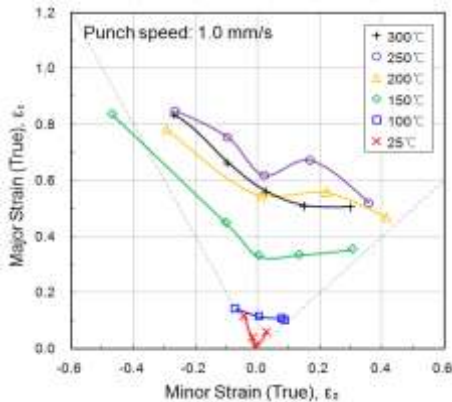


Fig. 8 Determination of the limit strains



(a) Punch speed of 0.1 mm/s



(b) Punch speed of 1.0 mm/s

Fig. 9 Forming limit diagram

250°C에서는 성형속도에 대해서도 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 사용된 판재의 경우 250°C 부근의 온도에서 가장 좋은 성형성을 나타내는 것으로 판단된다.

3. 원형컵 디프드로잉 실험 및 해석

3.1 실험

원형컵 디프드로잉 시험은 앞서 수행한 성형한계도 시험 결과를 바탕으로 다이와 블랭크홀더 온도를 250°C로 설정하였다. 그리고 성형 취약부로 예측되는 컵 모서리 및 벽면의 파단을 방지하기 위해 펀치에 수냉식 냉각채널을 설치하여 100°C의 온도를 유지함으로써 펀치와 접하는 성형 취약부의 강도를 높이고자 하였다. 펀치 온도는 기존의 연구결과 [10]를 반영하여 설

정하였다. Fig. 10 은 다이와 펀치의 표면 온도 및 펀치 냉각수의 온도를 시간에 따라 측정한 결과로 각 금형의 설정온도를 잘 유지하는 것을 알 수 있다.

Fig. 11 은 본 시험에 사용된 금형 사진으로 펀치 직경 50mm, 펀치모서리반경(R_p) 및 다이모서리반경(R_d) 6.35mm, 간극(clearance) 0.8mm 로 제작하였다. 시편은 직경 100mm 의 원형 형상을 사용하였다.

성형된 시편의 변형을 분포를 측정하기 위해서는 시편에 미리 균일한 격자를 인쇄하는 작업이 요구된다. 디프드로잉과 같이 격자가 인쇄된면이 금형과 직접 접촉하는 공정의 경우 격자의 손실을 최소화하기 위해 전기·화학적 부식법(electrochemical etching)이 주로 사용되고 있다.

그러나 마그네슘 합금 전용 전해액이 시판되고 있지 않아 선명한 격자망을 얻기 어려운 실정이며, 광학적 방법을 이용하는 변형을 측정 장비로는 측정 자체가 불가하거나 큰 오차를 유발할 가능성이 있다. 본 연구에서는 레이저 마킹을 이용하여 보다 선명하고 정확한 격자를 인쇄하였으며, 5~10 μ m 정도의 마킹 깊이로 노치효과를 최소화 하였다.

시편과 다이 간의 윤활은 고온용 테플론(teflon) 박막을 사용하였으며, 펀치와 소재 사이에는 윤활을 하지 않았다. 0.5mm/s 의 일정한 펀치속도에서 블랭크홀더가압력(blank holding force, BHF)을 12~24kN 범위에서 변화시키면서 시험을 실시하였다. 또한, 20kN 의 일정한 BHF 에서 펀치속도별 (0.1, 0.5, 1.0, 1.5mm/s) 시험을 추가로 수행하였다.

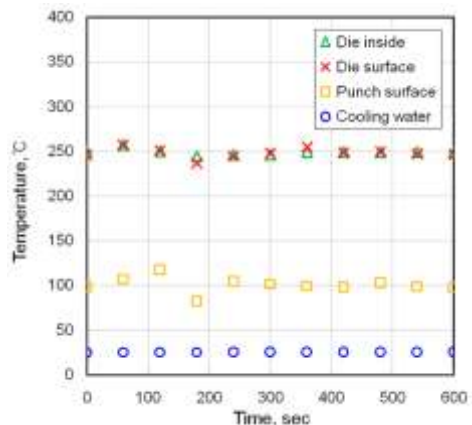
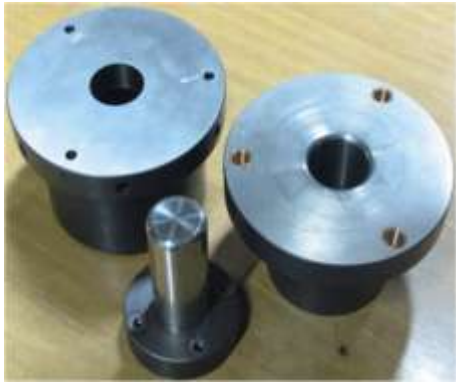
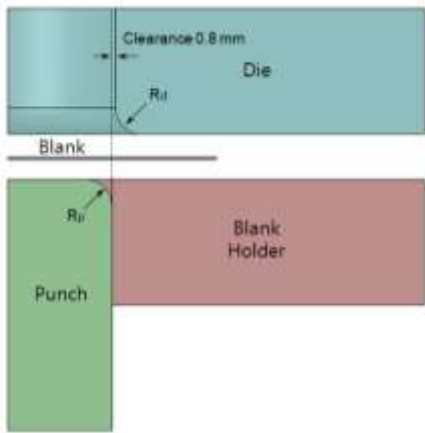


Fig.10 Variation of tool temperatures with time



(a) Photograph of the tool set

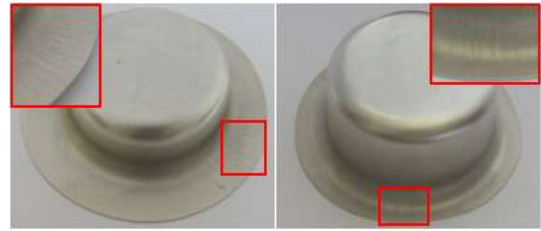


(b) Schematics of tool geometry

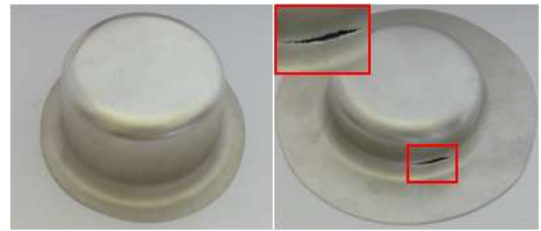
Fig.11 Tools for Swift cup deep drawing test

Fig. 12는 4가지 BHF로 성형한 시편 사진으로, H_p 는 성형높이를 나타낸다. BHF 12kN과 16kN에서는 각각 성형높이 20mm와 30mm에서 플랜지 및 다이모서리 부에서 주름이 발생하였고, BHF 24kN의 경우 성형높이 20mm에서 파단이 발생한 것을 볼 수 있다. BHF에 따른 시험 결과는 20kN에서 파단이나 주름의 발생 없이 30mm까지 안전하게 성형되어 가장 좋은 결과를 보였다.

Fig. 13과 Fig. 14는 각각 BHF 20kN에서 여러 가지 펀치속도로 시험한 시편의 사진과 두께감소율의 분포를 나타낸다. 펀치속도가 느릴수록 재료가 연화되어 플랜지 유입량이 감소하고 컵벽면 부에서의 주변형률과 두께감소율이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 특히 펀치속도 0.1mm/s의 경우에 확연한 차이를 볼 수 있다.



(a) BHF=12kN, H_p =20mm (b) BHF=16kN, H_p =30mm



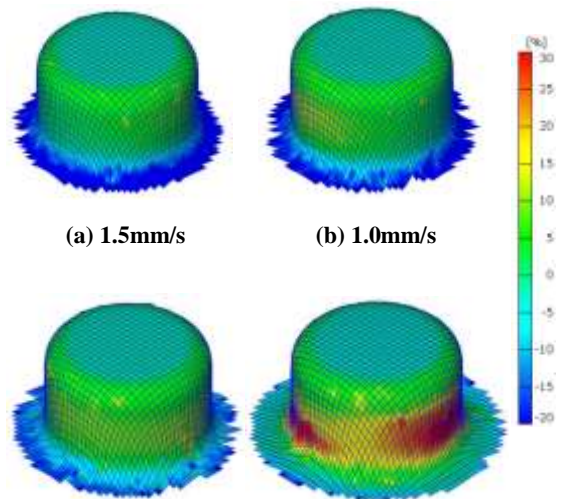
(c) BHF=20kN, H_p =30mm (d) BHF=24kN, H_p =20mm

Fig.12 Photographs of drawn cups under four different BHF conditions



(a) 1.5mm/s (b) 1.0mm/s (c) 0.5mm/s (d) 0.1mm/s

Fig.13 Drawn cups for different punch speeds



(a) 1.5mm/s (b) 1.0mm/s (c) 0.5mm/s (d) 0.1mm/s

Fig.14 Distribution of thickness reduction

3.2 유한요소해석

앞서 수행한 시험 결과를 토대로 원형컵 온간 디프드로잉 공정에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 특히, 열전달 및 변형률속도를 동시에 고려한 해석을 통해 실제 성형에 보다 근접한 수치적 접근을 시도하였다. 외연적(explicit) 코드 PAM-STAMP 2G 2009[11]를 사용하여 4 절점 사각형 셀 요소로 구성된 1/4 모델의 해석을 수행하였다.

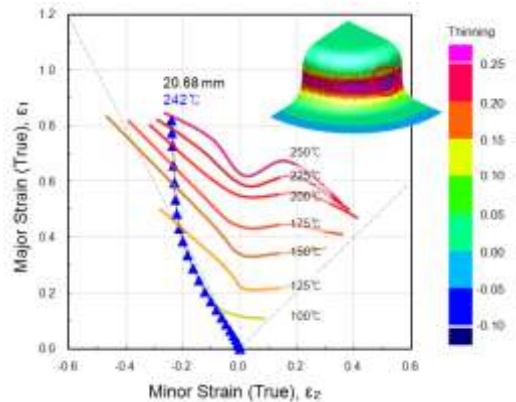
온도와 변형률속도 효과를 동시에 고려한 성형 해석을 위해 인장시험으로부터 얻은 결과에서 균일연신으로 판단되는 지점인 변형률 0.2 까지의 데이터를 입력하였다. 주 변형부의 온도가 250℃에 가깝고 150℃ 이상의 온도에서 방향별 유동응력곡선이 거의 일치하고 있다는 점에 근거를 두어, 각 온도에 대한 변형률속도별 유동응력곡선은 0°방향 시편에 대한 결과를 사용하였다. 열전달 해석을 위한 대류 열전달계수 및 열적 물성은 선행 연구[12,13]를 참조하였으며, Table 2에 나타낸 바와 같다.

금형과 소재간의 마찰은 본 연구에서 수행한 실험 조건에 따라 테플론 박막으로 윤활한 다이와 소재간의 마찰계수는 0.02를 부여하였고, 윤활하지 않은 펀치 및 블랭크홀더와 소재 사이의 마찰계수는 0.1을 사용하였다. 해석시간의 단축을 위하여 펀치속도를 실험에서보다 1,000배 빠른 0.5mm/ms로 설정하였으며, 이에 따라 열전달과 변형률속도에 영향을 미치는 점소성속도보정(viscoplasticity velocity correction, VVC) 값을 0.001로 입력하였다. 파단 예측에는 시험을 통해 얻은 성형한계도를 이용하였으며, 시험 결과가 없는 온도 영역에 대해서는 보간을 통해 성형한계도를 추정하였다.

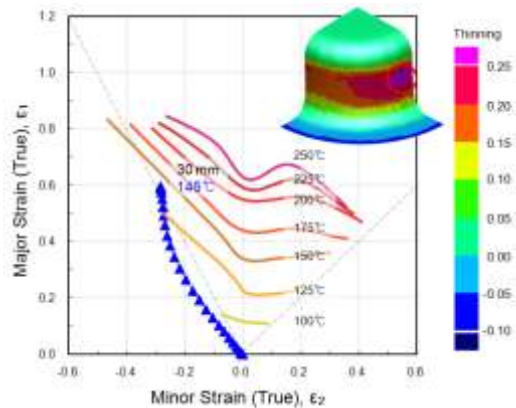
Fig. 15는 각 BHF에 따른 해석 결과로, 두께 감소에 취약한 요소의 변형률 경로(strain path)를 성형한계도상에 나타내었다. BHF 24kN의 해석 결과는 성형높이 20mm 근처에서 파단이 발생하여 실험 결과와 일치했으며, BHF 20 kN에서도 성형높이 30mm까지 안전하게 성형되어 역시 실험과 일치하는 결과를 보였다.

Table 2 Thermal properties for FEA

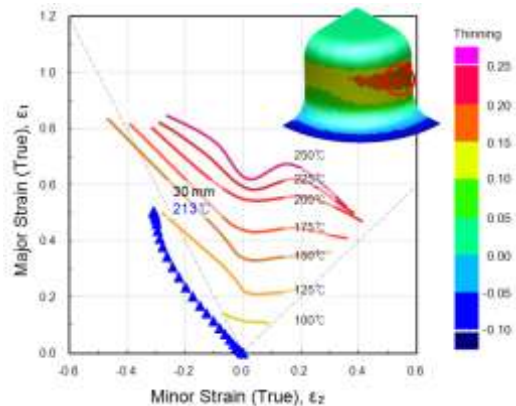
Heat capacity	1000 J/(kg·℃)
Thermal conductivity	96 W/(m·℃)
Heat transfer coefficient	2.95 W/(m ² ·℃)



(a) BHF 24 kN



(b) BHF 20 kN



(c) BHF 16 kN

Fig.15 Distribution of thinning and strain path

BHF 16kN의 경우 해석에서는 30mm까지 안전하게 성형되는 것으로 판단되나, 실험에서 나타난 주름을 예측하는 데는 판단기준이 모호하여 어려움이 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 AZ31B 마그네슘 합금판재에 대한 광범위한 시험을 통해 기계적 물성과 성형성을 평가하고 이를 데이터베이스화 하여 온간 성형에 관한 실험적 기반을 제공하고자 하였다. 또한, Swift 컵 디프드로잉 공정을 대상으로 물성 및 성형성 데이터를 활용한 유한요소해석과 실험 결과의 비교·분석을 통해 데이터베이스의 유용성과 해석 기술의 신뢰성을 검증하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 상온~300℃ 범위의 온도, 0.00016~0.16/s 범위의 변형률속도에 대해 단축인장시험을 수행하여, 응력-변형률 곡선과 이방성 계수 등에 대한 광범위한 데이터베이스를 구축하였다. 또한, 표점거리의 선택이 이방성이나 가공연화 거동 등 물성 데이터에 미치는 효과를 조사하였다.

(2) 상온~300℃ 범위의 성형온도 및 2가지 성형 속도 조건에 대한 성형한계도 시험을 수행하여 온간 성형성을 평가하였다. 본 재료의 경우 250℃ 근처에서 가장 좋은 성형성을 나타냈다.

(3) 250℃에서 원형컵 디프드로잉 시험을 수행하여 성형속도와 블랭크홀더가압력에 따른 디프드로잉 성형성(deep-drawability)을 조사하였으며, 광학식 자동 변형률 측정과 관련한 실험적 기술에 대하여 논하였다.

(4) 변형률속도와 열전달을 고려한 온간 디프드로잉 공정의 유한요소해석을 통하여 성형한계도에 바탕을 둔 과단예측 방법이 유용함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-313-D00054).

참 고 문 헌

[1] E. Doege, K. Droder, 2001, Sheet metal forming of magnesium wrought alloy formability and process technology, J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 115, pp. 11~19.

- [2] C. Bruni, A. Forcellese, F. Gabrielli, M. Simoncini, 2010, Effect of temperature, strain rate and fibre orientation on the plastic flow behavior and formability of AZ31 magnesium alloy, J. of Mat. Proc. Tech, Vol 210, pp. 1354~ 1363.
- [3] A. Wahab, E. Morsy, K. Manabe, Finite element analysis of magnesium AZ31 alloy sheet in warm deep-drawing process considering heat transfer effect, Materials Letters, Vol. 60, pp. 1866~1870.
- [4] S. C. Choi, H. Y. Kim, H. J. Kim, 2009, Prediction of the forming limit diagram for AZ31B sheet at elevated temperatures considering the strain-rate effect, Proc. Fall Conf. KSTP, pp. 235~238.
- [5] H. Takuda, T. Morishita, T. Kinoshita, N. Shirakawa, 2005, Modelling of formula for flow stress of a magnesium alloy AZ31 sheet at elevated temperature, J. of Mat. Proc. Tech, Vol. 164-165, pp. 1258~1262.
- [6] M. G. Lee, T. Park, K. Chung, H. Y. Kim, H. J. Kim, 2010, Basic material properties and forming limit of AZ31B magnesium alloy sheet, Proc. Fall Conf. KSTP, pp. 290~293.
- [7] ARGUS, GOM mbH., <http://www.gom.com>
- [8] International Standard, ISO 12004-2:2008(E)
- [9] ASTM International, 2002, Standard test method for determining forming limit curves, ASTM E2218-02, pp. 2~7.
- [10] S. C. Choi, H. Y. Kim, S. M. Hong, Y. S. Shin, G. H. Lee, H. J. Kim, 2009, Evaluation and prediction of the forming limit of AZ31B magnesium alloy sheet in a cross-shaped cup deep drawing process, Met. Mater. Int, Vol. 15, No. 4, pp. 575~584.
- [11] PAM-STAMP 2G 2009, ESI-GROUP
- [12] H. K. Kim, W. R. Lee, S. K. Hong, J. D. Kim, B. K. Han, 2006, Finite-element analysis of warm square cup deep drawing process of magnesium alloy AZ31 Sheet, KSTP, Vol. 15, No. 3, pp. 232~240.
- [13] M. H. Lee, H. Y. Kim, H. J. Kim, H. K. Kim, S. I. Oh, 2007, Forming analysis for warm deep drawing process of magnesium alloy sheet, KSTP, Vol. 16, No. 5, pp. 401~405.