

Mg 합금 온간 판재 성형시 공정 변수의 영향에 관한 연구

이영선¹, 권용남¹, 김민철¹, 최상운², 이정환¹

An Effect on the Process Parameter of Mg Alloy at Warm Sheet Forming

Y. S. Lee¹, Y. N. Kwon¹, M. C. Kim¹, S. W. Choi², J.H. Lee¹

Abstract

Since the sheet metal forming of Mg alloy is performing at elevated temperature, the effect of process conditions related with the forming temperature is very important factor. Therefore, the investigation for process variables is necessary to design the tools and process conditions. In this study, the effects of process variables were studied by the experimental and FE analysis using the square cup deep drawing. The temperature, forming speed, and lubricant condition were investigated. When forming temperature was 250°C, speed forming was low, and teflon sheet was used as lubricant, the formed parts were good without defects.

Key Words: Deep Drawing(디프드로잉), Strain-Rate Sensitivity Exponent(변형률속도민감도지수), Coulomb Friction Coefficient(쿨롱마찰계수), Keeler Equation(킬러식), F.E.M(유한요소해석)

1. 서론

마그네슘 합금의 판재 성형은 상온에서의 낮은 성형성 때문에 성형성이 향상되는 온간에서 주로 이루어진다. 이는 마그네슘 합금이 조밀 육방 격자 구조(HCP)로 되어 있어 변형이 매우 어렵기 때문에 온도를 상승시켜 슬립계(slip system)와 쌍정(twin)에 의한 성형성 향상 효과를 이용하기 위한 것이기 때문이다. 따라서, Mg 합금의 판재 성형을 위한 많은 연구들이 진행되어 오고 있다.

통상의 판재성형과는 달리 승온 상태에서 성형이 이루어지는 만큼, 온도에 따른 물성 변화[1-3], 다양한 온도에서의 성형성 연구[4-7], 그리고 AZ31 합금 판재의 디프 드로잉 공정에서의 성형한계[6-8] 등 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 AZ31 합금의 온간 성형시 공정 변수의 영향력을 실험적으로 분석하고, 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 성형 결함의 예측 가능성을 분석하였다. 소재의 고온 변형 특성을 이용하는 만큼, 소재의 물성치와 함께 온도에 따라 변화되는 다양한 공정 변수의 영향을 분석해야 하기 때문에 실험과 해석 모두 정량적 분석이 상대적으로 복잡해지기 때문에 실험과 해석을 병행하여 디프 드로잉의 공정 변수에 따른 영향을 분석하고자 하였다.

성형성 영향 인자 분석을 위해 마찰계수와 성형 속도 그리고 성형온도에 따른 성형성을 실험에 의해 분석하였으며, 유한요소 해석프로그램인 LS-DynaTM를 이용하여 성형해석과 결함을 예측하였다. 유한요소해석에서는 고온 변형시 고

1. 한국기계연구원 소재성형연구센터
2. POSCO 신사업개발실
교신저자: 한국기계연구원 소재성형연구센터
E-mail: lys1668@kmail.kimm.re.kr

려해야 하는 변수인 변형률 속도의 영향 또한 분석하였다. 결국, 온간 판재 성형시에 존재하는 변수인 성형 온도, 변형 속도, 윤활 특성 등에 따른 영향을 분석하고자 하였다.

2. 기계적 특성 평가 실험

2.1 고온 변형 특성 분석

고온에서의 기계적 특성을 분석하기 위해 압연 방향에 대하여 200°C, 250°C, 300°C, 350°C 그리고 400°C 에서의 고온 인장시험을 수행하였다. 또한 고온에서의 응력과 변형률 속도의 관계를 분석하기 위해 Strain Rate 를 0.1^{-s}, 0.01^{-s} 그리고 0.001^{-s} 의 변형률 속도로 변화시켜 유동응력을 측정하였다. 한 일정 변형률 이용하여 각 변형 응력을 대입하여 변형률 민감도 지수를 구하고 이를 각각의 온도에 대한 민감도 지수의 평균값을 계산하였다. 변형률 속도가 10⁻¹/sec. 일때 각 온도에 따른 고온 인장 곡선은 그림 1 에 나타내었고, 변형률 민감도 지수(Strain-Rate Sensitivity Exponent: m)는 표 1 에 나타내었다.

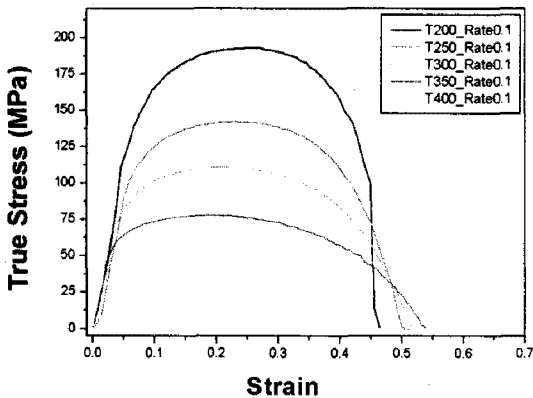


Fig. 1 Flow stress curve at various temperature

2.2 표면 조도 측정 및 마찰계수

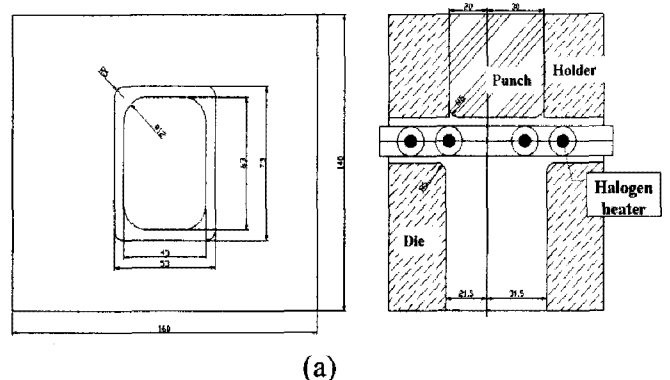
고온에서의 Mg 합금의 성형 시 발생하는 공정 변수 중 윤활제에 따른 마찰 계수의 변화를 확인 하기 위해 무윤활, Areodag(Graphite 계), 보론 나이트라이드(Boron Nitride) 그리고 Teflon sheet 의 표면 조도를 측정하였다. 측정된 마찰계수를 기준으로 문헌 [10]상의 결과를 이용해 마찰계수를 환산한 결과 무윤활 상태에서는 0.1, Aerodag 에서는 0.13, 보론나이트라이드에서는 0.125 그리고 Teflon sheet 에서는 0.02 의 쿨롱 마찰 계수(Coulomb Friction Coefficient) 값을 나타내었다.

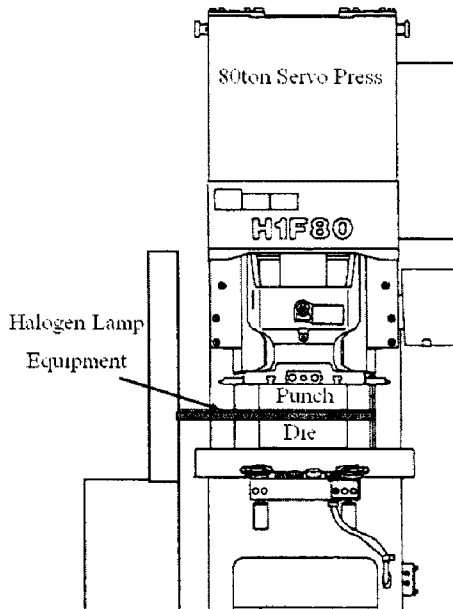
Table 1 Constitutive equation at various temperature

Temperature (°C)	Strain rate (/sec.)	$\sigma = k\epsilon^n \text{ (MPa)}$		Strain-rate sensitivity Exponent(m)
		k	n	
200	0.1	239.6	0.12	0.08
	0.01	263.3	0.24	
	0.001	223.7	0.25	
250	0.1	180.2	0.12	0.09
	0.01	168.0	0.18	
	0.001	96.5	0.10	
300	0.1	142.7	0.13	0.12
	0.01	108.1	0.14	
	0.001	70.3	0.08	
350	0.1	99.1	0.12	0.14
	0.01	70.5	0.09	
	0.001	43.5	0.06	
400	0.1	65.6	0.07	0.18
	0.01	47.0	0.05	
	0.001	25.3	0.05	

2. 사각컵 디프드로잉 실험

온간에서의 사각형 컵 디프 드로잉 실험은 80-ton servo press 를 이용하여 성형 속도를 변화시키면서 수행되었다. 금형 예열은 할로겐 램프를 이용하여 급속 가열을 하였으며, 소재는 윤활 후 가열로를 이용하여 60 분간 예열하였다. 성형 온도는 200, 250, 300, 350, 400 °C 에 대해, 성형속도는 펀치속도를 100mm/s, 10mm/s, 1mm/sec 의 속도로 변화시켰다. 그림 2 에는 금형과 서보 프레스 그리고 가열 장치의 모식도를 나타내었다.





(b)

Fig. 2 (a) Die-set, (b) 80ton servo-press and heating equipment by using experiment

3. 유한요소해석

3.1 사각 디프 드로잉 유한요소해석

온간에서의 사각 디프 드로잉 공정의 유한요소해석을 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 LS-Dyna970 을 이용하였다. 그림 3 은 유한요소 해석 모델과 400°C 에서 성형할 경우 발생하는 결함 예측 결과들, 표 2 에는 해석에 사용된 물성치를 나타내고 있다.

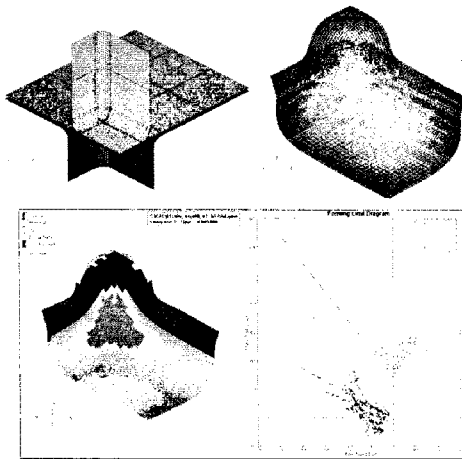


Fig. 3 FE model and analysis examples for square cup deep drawing

Table 2 Materials and process properties

Elastic modulus (GPa)	32.5(200°C)
	31.5(250°C)
	26.5(300°C)
	20.0(350°C)
	10.0(400°C)
Coulomb friction coefficient (μ)	0.02
	0.1
	0.125
	0.13
Strain-rate sensitivity exponent (m)	0.08
	0.09
	0.12
	0.14
	0.18

고온 변형에서 고려해야 할 온도의 영향을 고려하기 위해 변형율 속도와 탄성계수를 온도의 함수로 고려하여 유한요소해석을 수행하였으며, 요소 크기는 1mm, 요소종류는 4-Node-Shell 로서 총 1,452 개의 요소가 사용되었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실험 결과에 따른 공정변수의 영향

온간 사각 디프 드로잉 공정에서의 성형성에 영향을 미치는 요인들 중 성형속도와 마찰계수에 따른 영향력을 실험과 해석을 통하여 분석하였다. 그림 4 는 성형온도 200°C 에서 파단 된 성형품과 250°C 의 건전한 성형품 그리고 400°C 에서의 네킹 발생 직전의 성형품을 나타내었다. 각 공정 조건별 시험 결과는 표 3 과 같다.

성형 온도에 따른 영향에 대해 분석하면, 200 °C 온도의 경우는 성형 속도와 윤활제 특성에 관계없이 코너부에서 결함이 발생되었으며, 250°C 이상에서는 모든 경우에 대해 결함 발생 없는 좋은 성형 결과를 나타내었다. 300°C 와 350°C 에서는 성형속도 100mm/sec 고속에서 윤활 특성이 저화되어 파단이 발생되었으며, 400°C 에서는 100mm/sec 와 10mm/sec 에서 파단이 발생되었다. 결국 성형속도가 증가되면 액상 윤활제의 경우는 금형과 소재 사이에 윤활제의 유지가 어려워짐으로써 마찰이 증가되고 파단 발생의 가능성이 높아지는 것으로 판단된다. 따라서, 공

정 변수에 대한 성형 결함 발생 여부에 대한 분석이 필요함으로 재확인 해주고 있다. 그림 5 는 실험에서의 공정변수에 대한 영향력을 3 차원 그래프에 나타내었다.

결국, 성형온도는 역시 250°C 에서 가장 우수한 성형성을 나타내고 있었으며, 성형 속도는 빠를수록 성형 결함 발생 가능성이 높아지고 윤활 특성으로는 정적 마찰계수 값 보다는 동적 특성, 다시 말해 성형 동안에 금형과 소재 접촉면 사이에선 유지가 가능하도록 하는 윤활제 특성이 필요함을 알 수 있었다.

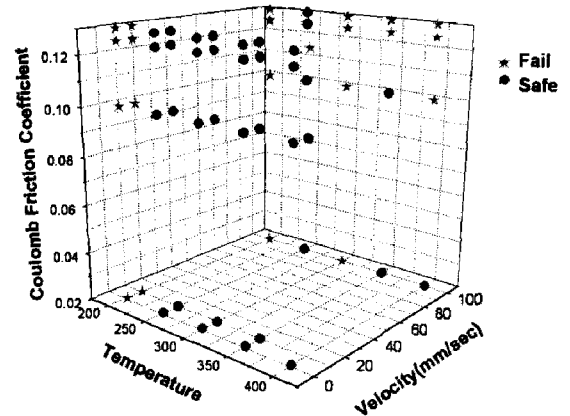


Fig. 5 Fractures according to the process variables

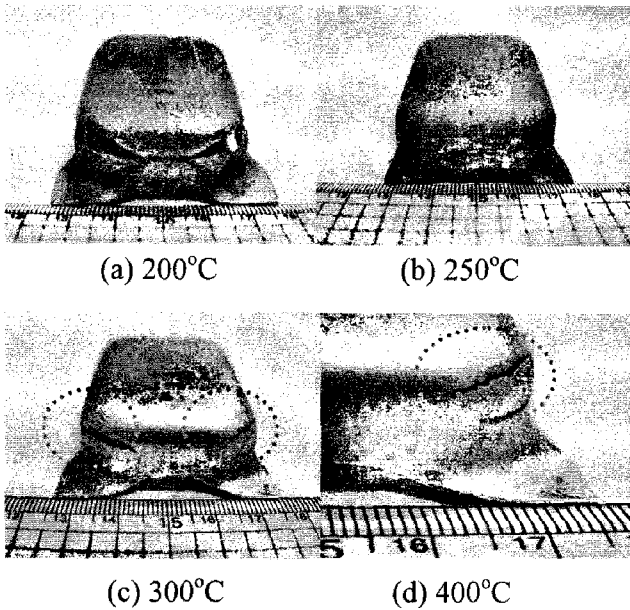


Fig. 4 Formed part according to the forming temperature

4.2 유한요소해석을 통한 결함 예측

온도에 따른 영향을 고려하여 분석된 유한요소해석 결과와 Keeler 식에 의해 예측된 결함 발생 여부는 그림 6 에 나타내었는데, 실험 결과와는 다소 다른 경향을 나타내었다. 250°C 에서 가장 좋은 성형 결과를 보인 실험 결과와는 달리 해석 결과에서는 200°C 에서 결함 발생이 없는 결과를 250°C 에서는 결함이 발생하는 예측 결과를 나타내었으며, 350°C 이상에서는 실험과 동일한 결과를 나타내었다. 두께와 가공경화 지수를 기준으로 성형 한계의 기준을 설정해주는 Keeler 식으로는 다양한 변형율 속도에 대한 변형 양상을 예측해주는데는 부족한 결과를 보이고 있음을 확인하였다.

Table 3 Experimental results of square cup deep drawing at each process condition

Temperature (°C)	Tool Speed (mm/s)	Aerodag ($\mu = 0.13$)	Boron nitrate ($\mu = 0.125$)	Dry ($\mu = 0.1$)	Teflon sheet ($\mu = 0.02$)
200	100	X	X	X	X
	10	X	X	X	X
	1	X	X	X	X
250	100	●	●	●	●
	10	●	●	●	●
	1	●	●	●	●
300	100	X	X	X	X
	10	●	●	●	●
	1	●	●	●	●
350	100	X	X	●	●
	10	●	●	●	●
	1	●	●	●	●
400	100	X	X	X	●
	10	X	●	X	●
	1	●	●	●	●

X : fail, ● : safe

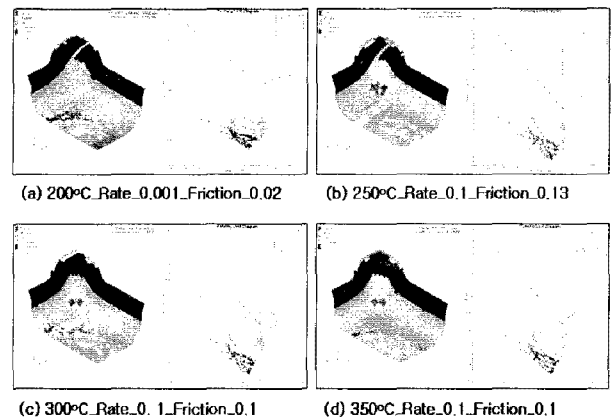


Fig. 6 Fractures estimated by the FEM analysis

4. 결론

Mg 합금의 온간 판재 성형 공정에 존재하는 변수들의 영향을 분석함으로써 연속 작업시에 결함 발생없는 성형을 위한 공정설계를 위해 4 각컵 디프 드로잉을 이용해 실험과 해석을 수행하였다. 분석 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 성형온도는 동적 재결정이 가장 활발이 나타나는 250°C 에서 변형속도는 느릴 수록, 윤활제는 변형속도가 증가됨에 따라 금형과 소재간에 유지 능력이 중요함을 확인하였다.

(2) 온도의 영향을 고려한 유한요소해석을 통해 공정 변수들의 영향을 분석하고 결함 발생을 예측하기 위해 수행된 결과 민감 온도 영역(200~250°C)에서는 결함 예측에 대한 신뢰도가 부족하였다.

따라서, 향후 온간 판재 성형에서 중요한 요소인 온도 변화에 따른 물성치를 고려할 수 있는 해석 기법에 대한 연구가 진행될 예정이다.

후 기

본 연구는 “한국기계연구원 기본 연구 사업(고비강도 소재 Fusion 성형 기술 개발)”으로 진행된 결과로서 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Shyong Lee, Yung-Hung Chen, Jian-Yi Wang, 2002, "Isothermal sheet formability of a magnesium alloy AZ31 and AZ61." *Journal of Materials Processing Technology* Vol.124, pp. 19~24
- [2] Fuh-Kuo Chen, Tyng-Bin Huang 2003, "Formability of stamping magnesium-alloy AZ31 sheets." *Journal of Materials Processing Technology* Vol.142, pp. 643~647.
- [3] 이용길, 김종호, 이종섭 2003, "마그네슘 합금 판재의 온간 디프드로잉성에 관한 연구." 한국소성가공학회지, 추계학술대회 pp. 117~120
- [4] K. Iwanaga, H. Tashiro, H. Okamoto, K. Shimizu, 2004, "Improvement of formability from room temperature to warm temperature in AZ-31 magnesium alloy." *Journal of Materials Processing Technology*
- [5] Fuh-Kuo Chen, Tyng-Bin Huang, Chih-KunChang, 2003, "Deep drawing of square cups with magnesium alloy AZ31 sheet." *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol. 43, pp. 1553~1559
- [6] 김민철, 이영선, 권용남, 이정환, 2004, "AZ31 합금의 온간 디프 드로잉에 관한 연구" 한국소성가공학회지, 춘계학술대회 pp. 47~52
- [7] 김민철, 이영선, 권용남, 이정환, 2004, "AZ31 합금의 온간 디프 드로잉에 관한 연구" 한국소성가공학회지, 추계학술대회 pp. 175~179
- [8] H. Takuda, T.Yoshii, N.Hatta, 1999, "Finite-element analysis of the formability of a magnesium-based alloy AZ31 sheet." *Journal of Materials Processing Technology* Vol.89-90, pp. 135~140.
- [9] 김민철, 이영선, 권용남, 이정환, 2004, "판재 성형품의 탄성회복예측 정밀도 향상을 위한 모델 연구" 한국소성가공학회지, 춘계학술대회 pp. 47~52
- [10] S. Zhang, P.D. Hodgson, M.J. Cardew-Hall, S. Kalyanasundaram, 2003, "A finite element simulation of micro-mechanical frictional behaviour in metal forming" *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 81~91.
- [11] Laurent Duchene, Anne Marie Habraken, "Analysis of the sensitivity of FEM predictions to numerical parameters in deep drawing simulations" *European Journal of Mechanics A/Solids* 2005, pp. 614~629.
- [12] L.Fratini, S.Lo Casto, E. Lo Valvo, "A technical note on an experimental device to measure friction coefficient in sheet metal forming" *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, pp. 16~21.