

〈학술연구〉

마그네슘 합금 판재(AZ31B)의 온도 및 성형속도에 따른 2D-draw 굽힘 특성 분석

김현우* · 유제형* · 이창환†

Study on the 2D-draw Bending Characteristics of AZ31B Magnesium Alloy According to Various Temperatures and Forming Speed

Hyun-Woo KIM, Jaehyeong YU and Chang-Wan LEE

Key Words : Magnesium alloy(마그네슘 합금), Bending(굽힘), Strain rate(변형률 속도), Warm forming(온간 성형)

ABSTRACT

Recently magnesium alloy sheet has been used as a lightweight material in transportation area. Warm forming is a forming method that improves formability and reduces springback. The magnesium alloy sheet has a characteristic that large difference of flow stress increases depending on strain rate at high temperature. These characteristics cause low dimensional accuracy of formed products. In this study, experiments were performed on the 2D-draw bending with respect to the temperature and forming speed in order to investigate the effects of strain rate and temperature. It was found that as the temperature increases, springback of 2D-draw bending decreased and formability of AZ31B increased. Additionally, the effect of the punch speed was investigated. At 250°C, as the punch speed increased, the springback of 2D-draw bending decreased.

1. 서 론

최근 배기가스 배출로 인해 환경문제가 대두되면서 많은 자동차 업계에서 친환경자동차(Eco-friendly vehicle) 기술발전을 이루고 있다. 하지만 전기를 주 원동력으로 하는 친환경자동차는 배터리의 추가로 인해 기존 내연기관 자동차에 비해 차체 무게가 20 % 이상 높다. 무거워진 차체 무게로 인해 1회 충전 시 주

행가능 거리는 감소하게 되며, 이를 해결하기 위해 경량화소재를 적용함으로써 차체 무게를 감소시키는 차량 경량화 기술은 필수적이다.

마그네슘 합금 소재의 경우 밀도는 1.74 g/cm^3 로 철의 약 1/5이며 다른 금속재료들에 비해 높은 기계적 특성을 가지고 있어 경량화소재로 주목받고 있다. 하지만 마그네슘 합금 판재는 조밀 육방 격자(HCP) 구조를 가짐으로써 기존 금속 판재와는 상이한 기계적 거동을 나타내며 상온에서 성형성이 매우 낮고 많은 스프링백 발생으로 인해 치수정밀도의 불량을 발생시킨다.

온간 성형은 성형온도를 증가시켜 소재의 성형성을 향상시키고 스프링백을 감소하는 성형 공법 중 하나이다. 마그네슘 합금 판재는 온도가 상승함에 따라 연

Received : 2019.02.19.

Revised : 2019.03.09.

Accepted : 2019.04.10.

† Corresponding Author ; Member, Assistant Professor, Seoul National University of Science and Technology

E-mail : cwlee@seoultech.ac.kr

* Seoul National University of Science and Technology, Department of Mechanical Design and Manufacturing Engineering

신율이 상승하고 유동응력 이 낮아진다. 또한 높은 온도에서 변형률 속도(strain rate)에 민감한 특성을 가지고 있다^[1]. 기존 온도에 따른 마그네슘 합금 판재의 성형성 및 스프링백 특성에 관한 연구는 다음과 같다.

Bruni et al.^[2]는 반구형 펀치를 이용한 실험을 통해 온도에 따른 마그네슘 합금 판재의 성형성을 분석하였으며, Wang et al.^[3]은 마그네슘 합금 판재의 성형온도에 따른 중립축과 스프링백 특성에 관한 연구를 진행하였다. 이들의 연구에 따라 250 °C에서 마그네슘 합금 판재는 성형성이 최대가 되며, 스프링백을 최소화할 수 있다.

하지만 마그네슘 소재는 Fig. 1과 같이 온도가 증가할수록 변형률 속도에 따른 유동응력의 특성의 차이가 커지게 된다. Won et al.^[4] 등은 AZ31B압연 판재를 상온에서 200 °C까지의 성형온도 구간에서 인장 속도에 따른 유동응력에 관한 연구를 진행한바 있다. 이를 통해 고온에서 변형률 속도에 따라 유동응력 특성에 차이가 커짐을 확인하였다. Kim et al.^[5]는 V-굽힘 실험에서 AZ31B의 변형률 속도 및 온도에 대한 영향을 분석하였다.

본 연구에서는 2D-draw 굽힘 시험을 통해 온도와 성형속도와 같은 성형조건이 마그네슘 합금 판재의 굽힘 특성에 미치는 영향에 대해 분석하고자 한다. 다양한 공정 변수 중에 블랭크 홀딩력은 일정하게 두고, 재료의 성형 온도, 펀치의 이동속도를 변수로 두고 재료의 변형 특성을 분석하였다.

2. 2D-draw 굽힘 실험

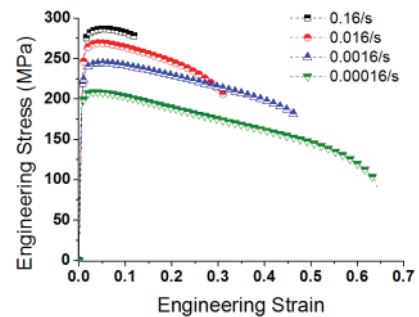
2.1 재료 특성

본 논문의 실험적 연구의 판재로는 마그네슘 합금 판재인 AZ31B를 사용하였다. AZ31B의 온도에 따른 기계적 물성은 Table 1과 같다.

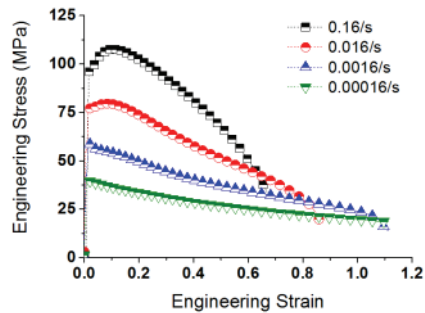
온도에 대한 응력-변형률 그래프 및 250 °C에서 변형률 속도에 따른 응력-변형률 특성은 각각 Fig. 1, Fig. 2와 같다^[6]. 마그네슘 합금 판재의 경우 고온에서 변형률 속도에 따라 유동응력의 차이가 크게 나타나기 때문에 이로 인해 판재의 온간 굽힘 성형 시 상온과는 다른 성형 형상을 나타낸다. 특히 마그네슘의 성형성이 극대화 되는 250 °C에서는 재료의 변형률 속도에 대한 민감성이 매우 커진다. Fig. 2에서와 같

Table 1 Material properties of AZ31B

Thermal Conductivity (W/m-K)	Specific heat capacity (J/g·°C)	Recrystallization Temp. (°C)	Poissons ratio	Density (kg/m ³)
96.0	1.00	150	0.35	1850
Temperature (°C)	Yield Stress (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Elongatio (%)	Max. Stress (MPa)
25	231.1	39.2	19.9	292.1
100	175.7	32.5	37.8	217.9
150	121.2	25.2	46.8	146.8
200	85.4	19.3	47.7	94.8
250	54.5	14.9	62.7	63.1



(a) 100 °C



(b) 250 °C

Fig. 1 Flow stress according to strain rate^[6]

이 재료의 변형률 속도 가 낮아짐에 따라 유동응력 곡선 역시 낮아지는 특성을 보인다.

2.2 2D-draw 굽힘 실험 장치

2D-draw 굽힘 공정은 NUMISHEET 93' Benchmark^[7] 문제로 제시되었던 조건을 동일하게 사용하였다. Fig. 3은 본 실험에서 사용한 2D-draw 굽힘 금형이다.

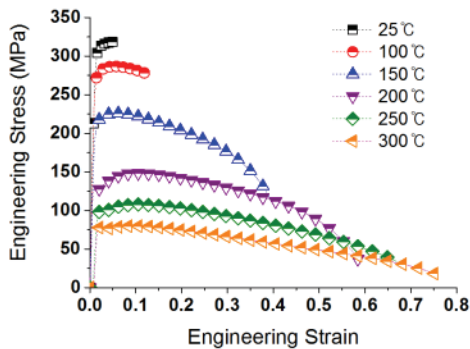


Fig. 2 Engineering stress - Engineering strain curve of AZ31 at various temperatures^[6]

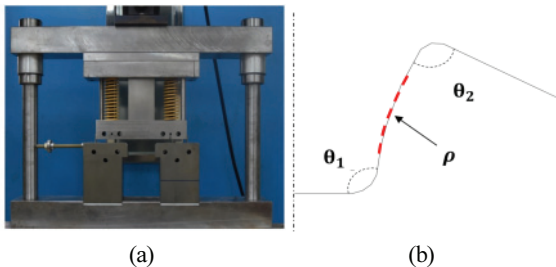


Fig. 3 (a) Punch, die and Binder for 2D-draw bending process, (b) Measuring points of springback

2D-draw 굽힘 공정은 바인더와 다이에 의해 소재가 고정된 후 펀치의 상하운동을 통해 모자형상으로 성형되는 공정이다. 실험의 일관성을 위해 가이드 포스트에 따라 성형이 진행되도록 제작하였다. 금형 소재의 경우, 펀치, 다이, 바인더 모두 온간성형의 재료로 많이 사용되는 열간 금형용공구강인 SKD-61을 사용하였다. 소재에 블랭크 홀딩력을 가하기 위해 스프링 상수 10.9 N/mm를 가진 길이 90 mm의 스프링을 사용하였다. 실험에서 블랭크 홀딩력에 대한 효과를 제외하기 위해 모든 실험 조건에서 같은 스프링을 사용하여 블랭크 홀딩력을 가하였다.

펀치와 다이의 틈새는 1 mm, 펀치 코너반경 10 mm, 다이 코너반경 6 mm로 가공하였으며 펀치 각도는 90°로 제작하였다. 금형과 소재를 가열하기 위하여 다이 및 바인더에 원통형 홀을 만들어 카트리지 히터를 삽입할 수 있도록 하였다. 온도제어기를 금형에 부착하여 시편의 온도가 250 °C로 유지될 수 있도록 금형의 온도를 제어하였다. 가열된 금형의 열이

프레스로 전달되지 않도록 상형 금형과 하형 금형 연결부에 단열판을 사용하였다.

재료의 스프링백 후 변형 형상은 NUMI SHEET 93' Benchmark^[7]의 측정방법과 동일한 방법을 사용하였다. 2D-draw 굽힘 후 재료는 모자 형상에서 Fig. 3(b)와 같이 안쪽이 벌어지고, 곡률이 발생한다. 이때, 바닥부와 옆 벽면의 각도를 θ_1 , 벽면의 곡률을 ρ , 그리고 벽면과 플랜지 부분의 각도를 θ_2 로 정의하였다.

2.3 실험 조건

2D-draw 굽힘 시 성형온도에 따른 마그네슘 합금 판재의 성형성 및 스프링백의 영향을 확인하기 위해 성형온도 상온, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C에서 성형을 진행하였다. 본 굽힘 실험의 경우 각 조건에 따른 5세트 실험 결과의 평균값으로 나타내었다. 펀치의 성형속도는 2 mm/s이며 성형이 종료될 때까지의 스트로크는 70 mm이다. 블랭크 홀딩력으로 0.7 kN의 초기하중을 소재에 가한 이후 성형이 진행되도록 하였다.

변형률 속도에 따른 유동응력의 차이가 소재의 최종형상에 미치는 영향을 알아보기 위해 성형온도 100 °C, 250 °C 각각의 경우에 대해 펀치속도 5 mm/s, 2 mm/s, 1 mm/s, 0.1 mm/s에서 2D-draw 굽힘 성형을 진행하였다.

3. 2D-draw 굽힘 결과

3.1 온도에 따른 스프링백 발생 특성

성형온도에 따른 소재의 θ_1 , θ_2 , ρ 값을 Table 2에 나타냈다. 또한 성형 이후 소재의 최종형상은 Fig. 4와 같다. 상온의 경우 펀치 코너반경부에서 파단이 발생하였다.

Table 2 Springback occurrence with respect to the forming temperature

(Punch speed = 2 mm/s)			
Temp. (°C)	θ_1 (degree)	θ_2 (degree)	ρ (mm)
25	Fracture		
100	131.84	77.33	608
150	113.95	80.56	1001
200	108.08	86.377	2340
250	92.74	88.64	9742

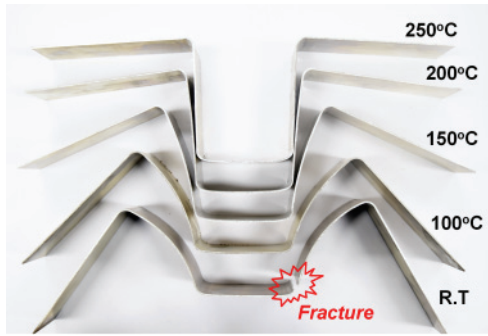


Fig. 4 Material shape according to forming temperature

성형온도 100 °C 이후 성형이 가능하였으며 성형 온도가 증가할수록 스프링백의 감소로 인해 θ_1 및 θ_2 값은 각각 성형온도 100 °C에 대해 131.84°, 77.33°에서 성형온도 250 °C에 대해 92.74°, 88.64°로 원하는 성형 각도인 90°에 가까워지며 ρ 값은 성형온도 100 °C에 대해 608 mm에서 성형온도 250 °C에 대해 9742 mm로 점차 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 5는 온도에 따른 형상을 나타낸 그래프이다. 성형온도가 증가할수록 마그네슘 합금 판재의 유동응력은 낮아지게 되며 연신율은 증가하게 된다. 상온에서 성형한 경우 소재는 펀치 코너 반경부에서 파단이 발생하였다. 이후 성형온도가 증가할수록 소재의 성형성은 향상되며 성형 이후 스프링백은 감소함을 알 수 있다.

재료의 성형 온도가 상승할수록 Fig. 1과 같이 유동응력 커브가 낮아진다. 이에 따라 스프링백 발생이 감소한다. 또한 온도가 증가함에 따라 마그네슘 판재

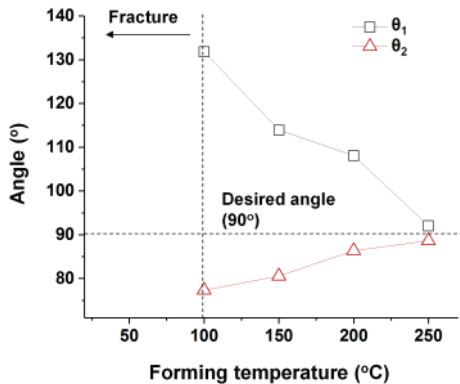


Fig. 5 Angle of θ_1 and θ_2 after springback

의 성질인 인장-압축 비등방성 효과 역시 감소하고 재료는 등방성 특성을 보인다^[8]. 이와 같은 이유로 온도가 증가함에 따라 재료의 스프링백 발생이 감소한다.

3.2 성형 속도에 따른 스프링백 발생 특성

250 °C에서 펀치 속도(0.1 mm/s, 1 mm/s, 2 mm/s, 5 mm/s)에 따른 소재의 θ_1 , θ_2 , ρ 값을 Table 3에 나타냈다. 또한 성형 이후 소재의 최종형상은 Fig. 6과 같다.

펀치속도 0.1 mm/s의 경우 최종 소재 형상의 θ_1 , θ_2 값은 92.04°, 89.52°이며 ρ 값은 11572 mm이다. 반면 펀치속도 5 mm/s의 경우 최종 소재 형상의 θ_1 , θ_2 값은 98.76°, 85.34°이며 ρ 값은 3018 mm이다. 펀치 속도가 느릴수록 최종 소재 형상의 펀치 및 다이 코너반경부 각도는 90°에 가까워짐을 알 수 있다. 또한 측벽부의 곡률반경은 직선의 형태에 가까워지며 ρ 값이 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다.

성형온도 100 °C에서 펀치 속도에 따른 소재의 θ_1 , θ_2 , ρ 값을 Table 4에 나타내었다. 또한 성형 이후 소재의 최종형상은 Fig. 7과 같다.

펀치속도 0.1 mm/s의 경우 최종 소재 형상의 θ_1 , θ_2 값은 123.96°, 80.73°이며 ρ 값은 3874 mm이다. 펀치속도 5 mm/s의 경우 최종 소재 형상의 θ_1 , θ_2 값은 126.24°, 78.33°이며 ρ 값은 2809 mm이다. 펀치속도 0.1 mm/s 및 5 mm/s에 대해 θ_1 값은 2.28°, θ_2 값은 2.4° 차이가 발생함을 알 수 있다.

250 °C에서는 펀치 속도 5 mm/s 및 0.1 mm/s 실험조건에서 소재의 최종형상을 비교하였을 때 변형률

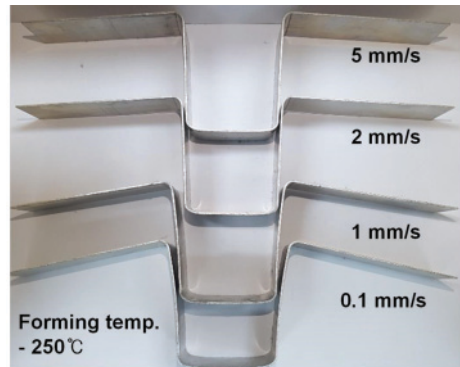


Fig. 6 Material shape according to punch speed at 250 °C

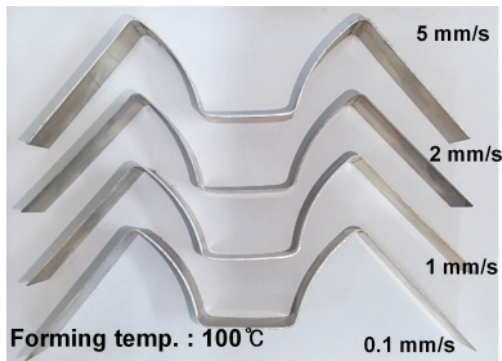


Fig. 7 Material shape according to punch speed at 100 °C

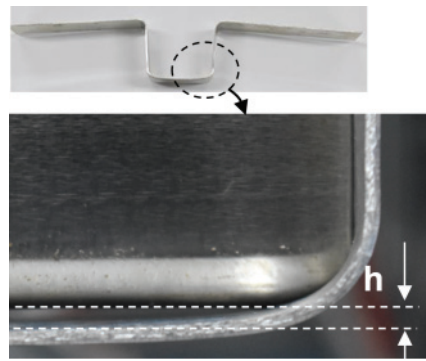


Fig. 8 Clearance between punch bottom surface and sheet (h)

Table 3 Springback occurrence with respect to the forming speed at 250 °C

Punch speed (mm/s)	θ_1 (degree)	θ_2 (degree)	ρ (mm)
0.1	98.76	85.34	3018
1	93.04	85.6	3291
2	92.74	86.37	9742
5	92.04	89.52	11572

Table 5 Value of h (mm) according to punch speed at 100 °C, 250 °C

Temp. (°C)	Punch speed (mm/s)			
	0.1	1	2	5
100	0.35	0.40	0.40	0.40
250	0.40	0.45	0.45	0.55

Table 4 Springback occurrence with respect to the forming temperature at 100 °C

Punch speed (mm/s)	θ_1 (degree)	θ_2 (degree)	ρ (mm)
0.1	123.96	80.73	3874
1	124.74	79.16	3597
2	125.67	78.77	3318
5	126.24	78.33	2809

속도가 스프링백 발생에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 하지만 100 °C에서는 펀치 속도가 스프링백 형상에 큰 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있다.

4. 고찰 - 성형 속도에 따른 변형 특성

성형온도 및 펀치 속도에 따른 변형 형상을 분석하기 위해 소재가 금형에서 제거되기 전 형상을 분석하였다. 성형온도 100 °C, 250 °C에서 펀치속도에 따른 펀치 하단부와 재료 사이 간격(h)을 Table 5에 나타냈다. 하사점에서 펀치 바닥부와 소재의 윗면의 틈새는 Fig. 8과 같다. 펀치와 재료의 틈새는 0.05 mm 갭 게이지를 이용하여 측정하였다.

성형온도 100 °C의 경우 펀치속도 0.1 mm/s에서 h는 0.35 mm이며 펀치속도 5 mm/s에서 h는 0.40 mm로 0.01 mm/s와 비교하여 14.3 % 증가하였다. 성형온도 250 °C의 경우, 펀치속도 0.1 mm/s에서 h는 0.40 mm이며 펀치속도 5 mm/s에서 h는 0.55 mm이며, 0.01 mm/s와 비교하여 37.5 % 증가하였다. 성형온도가 증가함에 따라 h값이 증가하고, 같은 온도에서는 펀치 속도가 증가함에 따라 h값이 증가하였다.

이는 성형온도가 증가할수록 성형속도에 따라 소재의 최종형상에 미치는 영향이 커지며 변형률 속도에 따른 유동응력 특성이 굽힘 변형에 미치는 영향이 주요 원인을 알 수 있다.

이와 유사한 변형으로, 다이 코너부에서의 변형이 있다. Fig. 9는 다이의 코너 부분에서 펀치 속도에 따른 재료 변형의 차이를 보여주고 있다. 펀치속도가 0.1 mm/s 인 경우 재료와 다이 사이의 간극이 크게 발생하지 않고 재료가 직선을 이룬다. 하지만 펀치속도가 빠른 경우, 다이와 재료 사이에 간격이 발생하고 재료는 역굽힘 (reverse deflection)이 발생한다.

펀치 속도가 느린 경우, 재료의 변형률 속도 역시 낮다. 이 때, 낮은 변형률 속도로 재료의 유동응력이 Fig. 2와 같이 감소한다. 이 경우, 유동응력이 소성

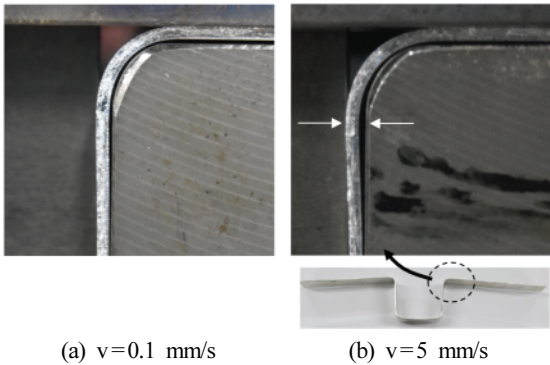


Fig. 9 Deformed shape at the die corner with respect to the punch speed

변형률이 증가해도 크게 증가하지 않는다. 따라서 한 부분에서 변형이 집중하여 발생하기 용이하다^[5]. 이에 따라 Fig. 8, Fig. 9와 같이 접촉하는 부분에서 변형이 집중되어 발생한다.

하지만 펀치 속도가 빠른 경우, 재료의 변형률 속도가 높고, 소성 변형률에 대한 재료의 항복응력이 차이를 보인다. 이 경우, 재료의 소성 변형이 일부분에 발생하기보다, 분산되어 발생하는 것이 전체 에너지가 적게 소모되기 때문에 변형이 분산되어 발생한다. 따라서 앞의 결과와 같은 역급힘이 발생하는 원인이 된다.

성형 온도가 낮은 경우, 변형률 속도에 대한 유동응력에 대한 차이가 적다. 따라서 펀치 속도가 느린 경우와 빠른 경우 재료의 변형 특성이 크게 차이나지 않는다. 하지만 마그네슘의 최적 성형온도인 250 °C에서는 Fig. 2와 같이 변형률 속도 민감성이 매우 높아 펀치 속도에 대한 차이가 발생한다.

하지만 스프링백 특성은 위 변형특성으로만 정의하기 어렵다. 보통 마찰계수의 경우 온도, 재료 상대 이동 속도에 영향을 받는다. 온도가 증가함에 따라, 재료 상대 이동 속도가 감소함에 따라 마찰계수는 상승한다^[9]. 또한 마그네슘 합금 판재의 경우 일반적인 등방성 거동이 아닌 인장-압축 비등방성 거동을 보인다^[8]. 정확한 스프링백의 예측을 위해서는 온도 및 속도에 따른 마찰 계수, 재료의 비등방성, 금형내부, 금형과 재료의 열전달 등을 고려한 해석 모델을 적용한 유한요소 해석이 필요하며, 현재 이에 대한 연구를 진행 중이다.

5. 결 론

2D-draw 굽힘 실험을 통해 성형 속도 및 가열 조건에 따른 유동응력 차이가 최종 제품 형상에 미치는 영향을 확인하였다. 2D-draw 굽힘 실험을 통해 AZ31B의 굽힘 성형 시 성형온도가 증가할수록 성형성은 향상되고 스프링백은 감소함을 확인하였다.

또한 온도와 펀치 속도에 따른 마그네슘 합금 판재의 2D-draw 굽힘 변형 특성을 분석하였다. 높은 성형온도에서 펀치 속도가 빠를수록 형상의 스프링백이 감소하였다. 250 °C에서 펀치 속도 5 mm/s 인 경우 플랜지의 각도(θ_2)는 89.52 °이고, 펀치 속도 0.1 mm/s 인 경우의 각도(θ_2)는 85.34 °이다. 펀치 속도가 빠를수록 스프링백이 감소하는 것을 확인하였다. 그리고 100 °C에서는 펀치속도에 따른 영향이 감소함을 확인하였다. 또한 250 °C에서 0.1 mm/s 로 성형을 진행한 경우 펀치와 소재의 간격은 0.4 mm이고, 5 mm/s로 성형을 진행한 경우 0.55 mm로 37.5 % 증가하였다. 또한 다이 코너부에서 역급힘이 발생하여 간격이 발생하였다. 이는 온간성형 시 성형속도가 소재의 굽힘 변형 및 스프링백에 큰 영향을 미치는 것을 의미한다.

후 기

본 연구는 정부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행 되었습니다. (과제 번호: NRF-2017R1C1B5017648)

References

- [1] T. Naka, T. Uemori, R. Hino, M. Kohzu and K. Higashi, "Effects of strain rate, temperature and sheet thickness on yield locus of AZ31 magnesium alloy sheet," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, Issues 1-3, pp. 395-400, 2008
- [2] C. Bruni, A. Forcellese, F. Gabrielli and M. Simoncini, "Effect of temperature, strain rate and fibre orientation on the plastic flow behaviour and formability of AZ31 magnesium alloy," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, Issue 10, pp. 1354-1363, 2010

- [3] L. Wang, G. Huang, H. Zhang, Y. Wang and L. Yin, "Evolution of springback and neutral layer of AZ31B magnesium alloy V-bending under warm forming conditions," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, No. 6, pp. 844-850, 2013
- [4] S. Y. Won, S. K. Oh, O. Kozo, J. K. Park, and Y. S. Kim, "Evaluation of Mechanical Properties for AZ31 Magnesium Alloy(1)," *KSTP*, pp. 53-56, 2004
- [5] H.W. Kim, J.H. Yu and C.W. Lee, "Study of V-bending deformation Characteristics of Magnesium alloy sheet in Warm Forming," *Journal of Physics: Conf. Series*, 2018
- [6] K. Chung, T. Kuwabara, R. K. Verma, T. Park, H. Huh, and G. Bae, "Simulation of the Cross-shaped Cup Deep-drawing Process," *NUMISHEET 2011 benchmark problem No. 2*, 2011
- [7] A. Makinouchi, E. Nakamachi, E. Onate, R. H. Wagoner, "Simulation of 2D Draw Bending," *NUMISHEET93 benchmark problem No. 3*, 1993
- [8] N. T. Nguyen, O. Seo, C. Lee, M. G. Lee, J. Kim and H. Kim, "Mechanical Behavior of AZ31B Mg Alloy Sheets under Monotonic and Cyclic Loadings at Room and Moderately Elevated Temperatures," *Materials*, Vol. 7, Issues 2, pp. 1271-1295, 2014
- [9] S. H. Chang, Y. M. Heo, K. H. Shin, H.K. Kim and Y. J. Jeon, "Study on Friction Characteristics for Drawing Mold of AZ31," *KSTP spring conf.*, pp. 349-351, 2010



Hyun-Woo KIM is graduate student in department of mechanical design and manufacturing engineering in Seoul national university Science and Technology. His interests are Sheet metal forming and process design based on CAE.



Jaehyeong YU is graduate student in department of mechanical design and manufacturing engineering in Seoul national university Science and Technology. His interests are sheet metal forming and process design based on CAE.



Chang-Whan LEE received Ph. D. in mechanical engineering in KAIST. He has been an assistant professor at Seoul National University of Science and Technology since 2016. His research interests include simulation and development of the metal forming process, lightweight materials such as magnesium alloy sheets.