

마그네슘 합금 판재의 평면 DIC 측정을 위한 지그 개발과 이를 활용한 단축 변형 특성 분석

강정은¹ · 유지윤¹ · 최인규¹ · 유제형² · 이창환[†]

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과^{1,†}

서울과학기술대학교 기계디자인금형공학과²

Development of jigs for planar measurement with DIC and determination of magnesium material properties using jigs

Jeong-Eun Kang¹ · Ji-Yoon Yoo¹ · In-Kyu Choi¹ · Jae Hyeong YU² · Chang-Whan Lee[†]

Dept. of Mechanical System Design and Engineering, Seoul National University of Science and Technology^{1,†}

Dept. of Mechanical Design and manufacturing Engineering, Seoul National University of Science and Technology²

(Received May 07, 2021 / Revised June 28, 2021 / Accepted June 30, 2021)

Abstract: The specific strength of magnesium alloy is four times that of iron and 1.5 times that of aluminum. For this reason, its use is increasing in the transportation industry which is promoting weight reduction. At room temperature, magnesium alloy has low formability due to Hexagonal closed packed (HCP) structure with relatively little slip plane. However, as the molding temperature increases, the formability of the magnesium alloy is greatly improved due to the activation of other additional slip systems, and the flow stress and elongation vary greatly depending on the temperature. In addition, magnesium alloys exhibit asymmetrical behavior, which is different from tensile and compression behavior. In this study, a jig was developed that can measure the plane deformation behavior on the surface of a material in tensile and compression tests of magnesium alloys in warm temperature. A jig was designed to prevent buckling occurring in the compression test by applying a certain pressure to apply it to the tensile and compression tests. And the tensile and compressive behavior of magnesium at each temperature was investigated with the developed jig and DIC equipment. In each experiment, the strain rate condition was set to a quasi-static strain rate of 0.01/s. The transformation temperature is room temperature, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C. As a result of the experiment, the flow stress tended to decrease as the temperature increased. The maximum stress decreased by 60% at 250 degrees compared to room temperature. Particularly, work softening occurred above 150 degrees, which is the recrystallization temperature of the magnesium alloy. The elongation also tended to increase as the deformation temperature increased and increased by 60% at 250 degrees compared to room temperature. In the compression experiment, it was confirmed that the maximum stress decreased as the temperature increased.

Key Words: AZ31B, Digital Image Correlation (DIC), Tension-compression test

1. 서 론

최근 자동차 시장에서 판재의 경량화와 고강도화가 요구되고 있다. 마그네슘합금의 비강도는 철의 4 배이고, 비중은 철의 0.2배로 고강도의 경량소재로

주목받고 있다¹⁾. 마그네슘은 Hexagonal closed-packed (HCP) 구조로 Face-centered cubic (FCC)나 Body-centered cubic (BCC) 구조에 비해 슬립면이 적어 상온에서의 성형성이 낮지만²⁾ 성형온도가 증가함에 따라 다른 부가적인 슬립계가 활성화되어 성형성이 향상된다³⁾. 또한 비대칭 경화 모델로 인장과 압축의 항복응력이 다르다. 이러한 마그네슘의 특성으로 인해 인장시험만으로는 압축거동과 스프링백

1. 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

† 교신저자: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

E-mail: cwlee@seoultech.ac.kr

을 예측하기 어렵다. 따라서 인장, 압축 시험을 통하여 예측해야 한다. 한편, 압축 시험시에는 시편에 좌굴이 발생하는데 이때 시편에 가압력을 부과하여 좌굴을 방지할 수 있다. 기존 연구에서 시편의 좌굴을 방지하기 위해 사용한 방법은 다음과 같다.

R.K. Boger 등은 시편을 가압한 채로 비접촉식 레이저 익스텐서미터를 활용하여 두께방향으로 변형률을 측정하였다⁴⁾. Bac 등은 스프링과 controlling bar를 사용하여 두께방향으로 일정한 가압력을 부과하여 변형률을 측정하였다⁵⁾. Kim 등은 재료시험기와 가압장치 사이에 포크형 장치를 사용함으로써 시편의 그림부분에서의 좌굴을 방지하였다⁶⁾.

본 연구에서는 마그네슘 합금 판재의 인장, 압축 실험을 위해 온도 조절이 가능하며, 압축 실험에서 좌굴이 발생하지 않는 지그를 설계하였다. 그리고 개발한 지그를 사용하여 상온과 온간에서 인장, 압축 실험을 통하여 마그네슘 합금 판재의 물성을 분석하였다.

2. 연구내용

2.1. 좌굴 방지

기존 규격의 인장 시편을 이용하여 압축 시험을 수행하는 경우 시편에 좌굴(buckling)이 발생하고, 이는 압축 시험 시 정확한 압축 변위를 측정할 수 없는 문제가 있으므로 반드시 좌굴을 방지할 필요가 있다.

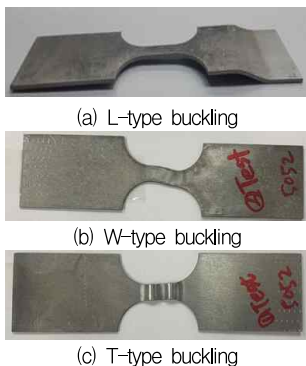


Fig. 1 Picture of compression test specimen following buckling mode

압축 시험 시 발생하는 좌굴의 종류는 Fig. 1에서와 같이 3 가지 종류의 좌굴이 있다. 이는 시편의

가압부와 그림부 사이의 두께 방향 좌굴이 발생하는 L형 좌굴, 시편의 가압부와 그림부 사이의 두께 방향 좌굴이 발생하는 W형 좌굴, 시편의 표점부의 두께 방향 좌굴이 발생하는 T형 좌굴이다. 이러한 좌굴을 방지하는 별도의 장치와 적절한 시편 치수가 요구된다.

일반적으로 L형 좌굴과 W형 좌굴은 적절한 시편의 치수를 결정하여 방지할 수 있으며, T형 좌굴은 시편의 두께 방향으로 가압력을 부과하여 방지할 수 있다.

2.2. 시편 설계

일반적으로 금속 재료의 압축 시험 시 시편 설계는 시컨트 식(secant formula)과 오일러 방법(Euler method)식을 사용하여 L형 및 W형 한계 압축 변형률을 유도하고, 이를 통해 시편의 치수를 결정하는 방법이 사용되고 있다. 이러한 방법으로 유도한 L형 및 W형 임계 좌굴 응력과 Swift 모델을 이용하여 유도한 L형 및 W형 좌굴 한계 압축 변형률은 다음과 같다.

$$\bar{\epsilon}_L = \left(\frac{B\epsilon_0^n}{KW} \right)^{\frac{1}{n}} - \epsilon_0 \quad (1)$$

$$\bar{\epsilon}_W = \frac{\pi^2 n W^2}{3G^2} - \epsilon_0 \quad (2)$$

여기서 B 는 시편의 그림부 폭, W 는 게이지부 폭, G 는 게이지부 길이, K , ϵ_0 , n 은 swift 식의 파라미터로 인장시험 결과를 근사하여 결정된다. 그러나 마그네슘은 인장 경화거동과 압축 경화거동이 다른 비대칭 재료이기 때문에 좌굴 한계 압축 변형률을 유도하기 위해 인장 시험 결과를 모사하는 경화모델을 사용할 수 없다. 본 연구에서는 W형 좌굴은 게이지부 폭에 비하여 길이가 너무 길지 않으면 방지할 수 있다는 점에 착안하여 선행연구⁶⁾의 세장비를 차용하였으며, 게이지부 길이 12 mm 이고, 게이지부 폭은 6 mm이다.

선행 연구⁶⁾에 따르면 시편의 게이지부 폭을 6 mm, 두께 1 mm로 설정하는 경우 재료의 압축 응력이 약 685 MPa에 도달할 때까지 시편의 그림부에서 좌굴이 발생하지 않는다. 따라서 Fig. 2와 같이 게이지부 폭 6 mm, 길이 12 mm, 두께 1 mm로 시편의 치수를 결정하였다.

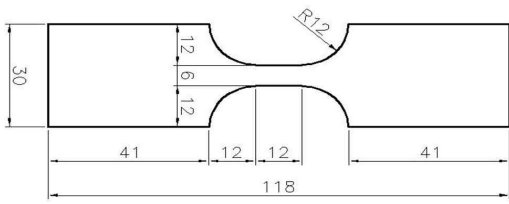


Fig. 2 Dimension of specimen

2.3. 마찰 및 이축 효과 보정

T형 좌굴을 방지하기 위하여 시편의 두께방향으로 가압력을 부가하기 때문에 압축 시험 시 측정되는 하중은 마찰력이 포함되어 실제 시편의 변형에 의한 하중보다 높게 측정되며, 이를 마찰 효과(frictional effect)라 한다. 가압이 시편의 두께 방향으로의 변형에 영향을 미치는 것을 이축 효과(biaxial effect)라 하며, 이 두 효과를 보정하여야 한다. 측정된 하중, 실제 시편의 변형에 의한 하중, 마찰력의 관계는 다음과 같다.

$$F_d = F_m - F_f \quad (3)$$

여기서 마찰력은 쿨롱의 법칙에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$F_f = 2\mu F_c \quad (4)$$

여기서 μ 는 마찰계수, F_c 는 가압력이다. 본 연구에서 지그의 가압력은 1.272 kN이며, 마찰계수는 세 가지 이상의 가압력조건에서 압축 시험 수행 후 하중 값을 직선으로 근사하여 그 기울기로 측정할 수 있다. 그러나 가압 장치가 없는 경우 압축 시험 시 좌굴이 발생하므로 본 연구에서는 인장 시험을 통한 마찰계수 측정을 수행하였다. 각각 1.207 kN, 1.908 kN, 3.180 kN의 가압력으로 인장시험 수행 후 가압 장치가 없는 경우의 인장 시험 데이터와 비교하였다. 실험을 통해 얻은 마찰계수는 0.064 kN/mm이며 이 값을 이용하여 시험 결과를 보정하였다.

이축 효과는 유효응력 식을 이용하여 보정할 수 있다. 압축 시험 중 시편과 지그의 접촉 면적의 변화가 매우 작기 때문에 시편의 접촉 면적은 초기값과 동일하다 할 수 있고 그 크기는 1059.611 mm²이다. 두께 방향의 응력은 가압력을 시편 접촉 면적으로 나누어 계산할 수 있고 그 값이 0.95 MPa로 매우 작은 값을 알 수 있다. 이는 가압에 의한 이축 효과가 미미함을 의미한다. 실제 마그네슘 합금의 소성 거동은 이방성을 보이기 때문에 이축 효과의 보

정 시 이방성 항복함수를 이용한 유효응력 식을 이용해야 하지만 이축 효과가 미미하기 때문에 편의성을 위하여 제일 간단한 유효응력 식인 von-Mises 식을 통하여 보정하였다.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_m - \sigma_t)^2 + \sigma_m^2 + \sigma_t^2]} \quad (5)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 측정된 응력이며 σ_m 는 가압에 의한 두께 방향의 응력이다.

2.4. 지그 설계

앞의 모든 사항을 고려하여 결정한 시편의 치수에 맞게 Fig. 3, 4, 5와 같이 지그를 설계하였다. 압축 코일 스프링을 이용하여 시편에 가압력을 주었으며 DIC 촬영을 위해 클램프 중앙부에 퀴츠를 장착할 수 있도록 설계하였다. 또한 L형 좌굴을 방지하기 위해 포크형 접촉판을 지그 구성에서 추가 제작하였다. 압축 시 포크형 접촉판이 가이드 홈을 따라 움직일 수 있도록 함으로써 L형 좌굴을 방지할 수 있도록 하였다.

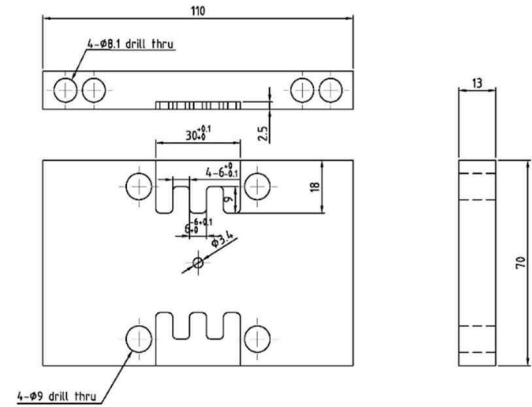


Fig. 3 Front clamp

인장 실험은 Fig. 6과 같이 진행하였다. 전면 클램프의 중앙부에 퀴츠가 위치하여 정면에서 DIC 측정이 가능하도록 하였고 후면 클램프 중앙의 구멍을 통해 시편의 뒷면에 온도센서가 접촉하도록 하였다. 가압판의 뒷면에 스프링을 위치시켜 스프링을 통해 시편에 면압을 부가하고 DIC장비를 이용하여 퀴츠 면을 통해 변형률을 측정한다. 지그 가열 시 온도센서를 통해 측정되는 시편의 현재 온도가 온도조절기의 목표 온도에 도달할 때까지 가열 후 인장 및 압축 시험을 수행하였다.

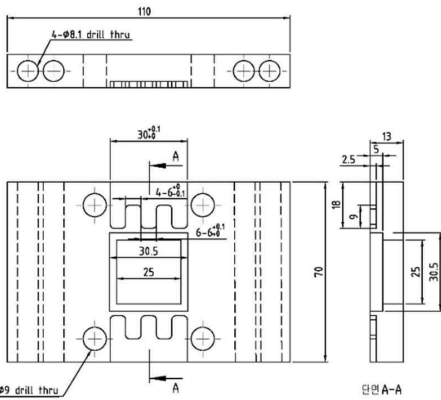


Fig. 4 Back clamp

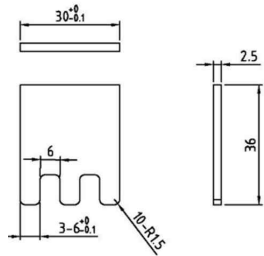


Fig. 5 Fork type slider

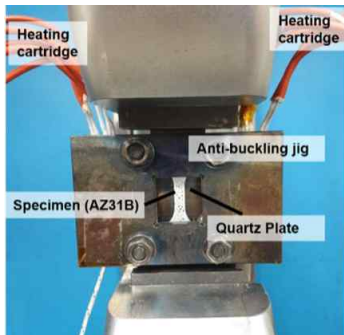


Fig. 6 Experiment set-up

2.5. 열-연성 해석

인장 및 압축 시험 이전에 ABAQUS를 통해 열-연성 해석을 수행하였다. 해석 모델링의 경우 실제 시험과 동일하게 모델링하였다. 온도의 경우 히트 카트리지가 삽입되는 위치에 270°C의 온도를 주었으며 이에 따른 시편의 온도 분포를 확인하였다. 해석 조건에 따른 온도 해석 결과, 퀴즈에서의 응력 해석 결과는 Fig. 7, 8과 같다. 소재의 물성은 일반적으로 널리 알려진 값을 사용하였고, 온도 경계 조건은 실제 지그 가열 후 측정되는 값을 경계 조건으로

지정하였다. 해석 결과 다음과 같이 온도 분포와 응력 분포를 얻었고, 퀴즈의 파손 없이 안정적으로 재료에 압축 응력이 부가됨을 확인했다.

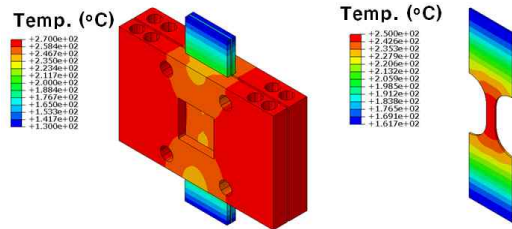


Fig. 7 Temperature distribution of jig and specimen

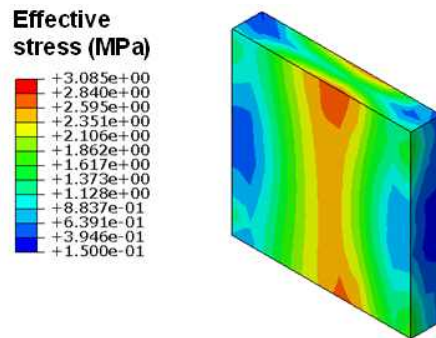
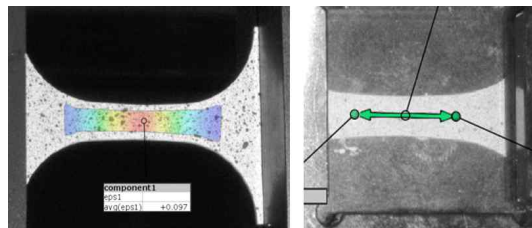


Fig. 8 Stress distribution of quartz



(a) Surface component (b) 2-Point distance
Fig. 9 Stress distribution of specimen measured through the quartz.

2.6. 변형률 측정

본 연구에서 시편의 변형률은 디지털 이미지 상관 기법(Digital Image Correlation)으로 측정하였다. DIC를 통해 Fig. 9와 같이 재료의 평면 변형률의 측정이 가능하지만, 퀴즈를 통해 투과되는 재료의 경우 모든 면적의 변형률 측정이 제한되어 다음과 같이 게이지부의 두 점을 지정하여 두 점의 거리 변화를 통해 인장 및 압축 시험에서의 변형률을 계산하였다.

3. 연구 결과

3.1. 인장 시험

0.01/s의 변형률 속도로 온도별 인장 시험 결과는 Fig. 10 및 Table 1과 같다.

Table 1 Result of tensile test data

Temperature (°C)	Yield strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
20	195	44
100	135	30
150	108	20
200	64	14
250	40	12

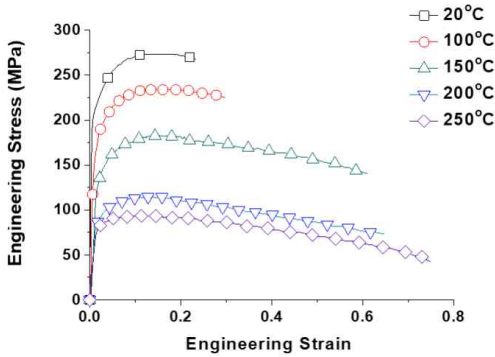


Fig. 10 Tensile test result by temperature

인장시험에서 온도가 상승할수록 유동응력은 감소하는 경향을 보였다. 최대응력의 경우 상온 대비 250°C에서 60% 낮아졌다.

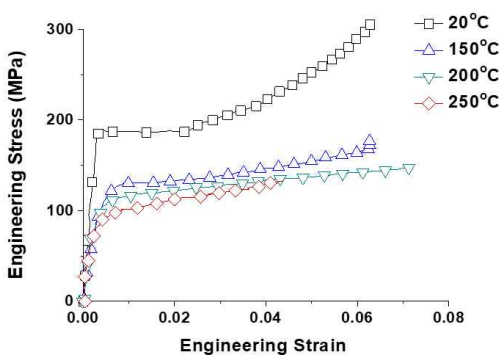


Fig. 11 Compression test result by temperature

3.1. 압축 시험

압축 시험은 인장 시험과 동일한 변형률 속도로 각 온도별로 수행하였고 그 결과는 Fig. 11 및 Table 2와 같다. 시험 결과 인장과 마찬가지로 온도가 상승할수록 유동응력이 감소하는 경향을 보였다.

Table 2 Result of compression test data

Temperature (°C)	Yield strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
20	201.6	46.8
100	137	32
200	112.5	15
250	97.6	14

3.3. 인장-압축 시험

Fig. 12에서 상온에서의 인장시험 결과와 압축 시험 결과를 한 개의 그래프에 나타내었다. Table 3에서는 상온에서의 인장시험 결과와 압축시험 결과에서 산출된 Yield strength와 Elastic modulus를 비교하였다. 인장 시 항복강도는 195MPa, 압축 시 129MPa로 압축 시 발생하는 항복강도가 인장에 비해 낮았으며, 인장과 압축 시 거동이 다르게 나타났다.

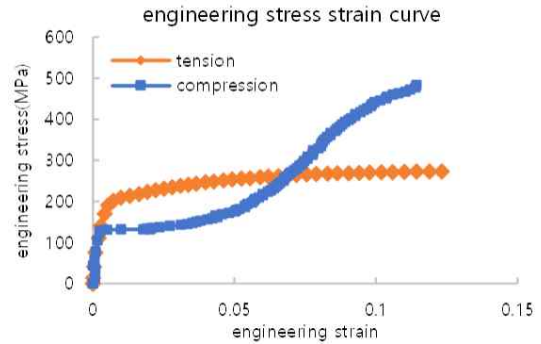


Fig. 12 Comparison tensile and compression test result

Table 3 Result of tensile and compression test result in room temperature

Test mode	Yield strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
Tensile	195	44
Compression	129	43

상온에서의 인장 후 압축 시험결과는 다음과 같다. 상온에서 1.2mm 인장 후 1.2mm 압축을 수행하였다. Fig. 13은 1.2mm 인장 후 1.2mm 압축을 수행한 시험의 응력 변형률 선도이다.

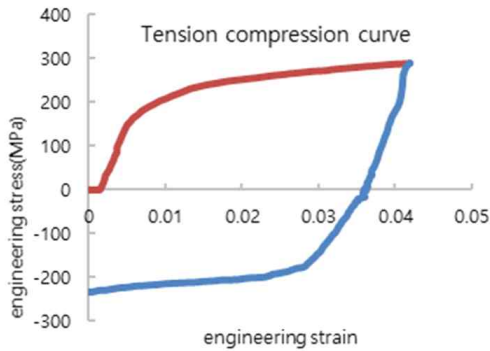


Fig. 13 Result of compression test after tensile

3.3. 인장-압축 시험

DIC를 재료 표면에서 측정하였기 때문에 온도별 인장 시험 데이터에서 이방성 계수를 측정할 수 있다. 폭 방향의 변형률, 두께방향의 변형률, 소성 이방성 계수 R의 관계는 다음과 같다.

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (6)$$

여기서 두께 방향의 변형률은 길이방향과 폭 방향의 변형률을 통해 유도할 수 있다.

$$\epsilon_t + \epsilon_w + \epsilon_t = 0 \quad (7)$$

DIC를 통해 길이 방향 변형율, 폭 방향 변형율을 측정된 결과는 Fig. 14와 같다. 여기에서 변형율 10%에서 20%의 영역에서 식 (6)을 사용하여 R 값을 측정하였다. 이방성 계수를 측정된 결과는 Table 4와 같다. 온도가 상승할수록 감소하는 경향을 보였고, 상온대비 250℃에서 약 43% 낮아졌다. 250도 근처에서는 R이 1에 수렴하였는데, 이는 재료가 등방성 거동을 보이기 때문이다.

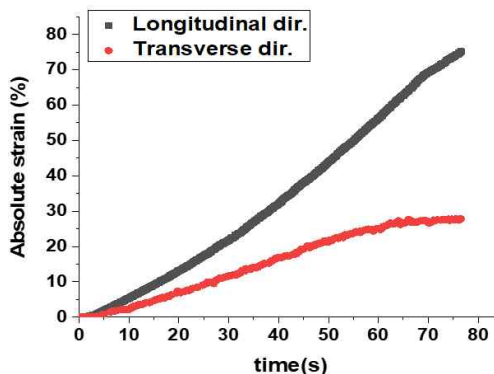


Fig. 14 Comparison of the strain in the longitudinal direction and the transverse direction

Table 4 R-value by temperature

Temperature(℃)	R-value
20	1.89
100	1.84
150	1.68
200	1.52
250	1.07

4. 결론

본 연구에서는 좌굴을 방지하면서 평면상에서 변형률 측정이 가능한 지그를 활용하여 마그네슘의 물성을 분석해보았다.

시험 결과 온도가 상승할수록 유동응력과 탄성계수가 감소하고, 연신율은 증가하는 경향을 보였다.

압축시험에서도 온도가 증가할수록 최대 응력이 감소하는 것을 확인하였다. 온도가 상승할수록 이방성 계수가 감소하며, 250℃에서 1에 근접하였다. 마그네슘의 재결정 온도 이상에서 결정립이 미세화되면서 이방성 계수가 감소하고, 등방성 거동을 보이는 것을 확인하였다.

후기

본 연구는 정부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행되었습니다. (과제 번호: NRF-2020R1C1C1014412)

참고문헌

- 1) H. Friedrich, S. Schumann, Research for a “new age of magnesium”, in the automotive industry, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 117, No. 3, pp. 276-281, 2001.
- 2) K. F. Zhang, D. L. Yin, D. Z. Wu, “Formability of AZ31 magnesium alloy sheets at warm working conditions”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, No. 11, pp. 1276-1280, 2006.
- 3) F. K. Chen, T. B. Huang, “Formability of stamping magnesium-alloy AZ31 sheets”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 142, pp. 643-647, 2003.
- 4) R. K. Boger, R. H. Wagoner, F. Barlat, M. G. Lee, K. Chung, “Continuous, large strain, tension /compression testing of sheet material”, Int. J.

Plasticity, Vol. 21, pp. 2319-2343, 2005.

- 5) G. H. Bae and H. Huh, "Tension/compression test of auto-body steel sheets with the variation of the pre-strain and the strain rate", Transactions on engineering Sciences, Vol. 72, pp. 213-225, 2011.
- 6) M. Kim and H. Huh, "Asymmetric hardening behavior of az31b magnesium alloy sheet with large strain at various strain rates", International Journal of Automotive Technology, Vol. 20, No. 4, pp. 645-653, 2019.

저자 소개

강 정 은(Jeong-Eun Kang)

[학생회원]



- 2021년 2월: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (공학사)

< 관심분야 >
금형, 성형해석

최 인 규(In-Kyu Choi)



- 2021년 2월: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과(공학사)

< 관심분야 >
금형, 성형해석

유 제 형(Jae-Hyeong Yu)



- 2019년 8월: 서울과학기술대학교 기계디자인금형공학과 (공학석사)
- 2019년 9월~현재: 서울과학기술대학교 기계디자인금형공학과 (박사과정)

< 관심분야 >
소성가공, 성형해석

유 지 윤(Ji-Yoon Yoo)



- 2021년 2월: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (공학사)

< 관심분야 >
금형, 성형해석

이 창 환(Chang-Whan Lee)

[정회원]



- 2014년 8월: KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2014년 9월~2016 8월: KIST 연료전지 연구센터 박사 후 연구원
- 2016년 9월~현재: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 조교수

< 관심분야 >
소성 가공, 접진 성형, 마그네슘 합금 판재