

# 가속도 센서를 사용한 마그네슘 합금 판재의 변형 및 파손 분석

이서준<sup>1</sup> · 김지선<sup>1</sup> · 정완진<sup>1</sup> · 이창환<sup>1,†</sup>  
서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과<sup>1,†</sup>

## Deformation and fracture analysis of magnesium alloy sheets using acceleration sensor

Seojun Lee<sup>1</sup>, JiseonKim<sup>1</sup>, Wan-JinChung<sup>1</sup>, Chang-WhanLee<sup>1,†</sup>

Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology<sup>1,†</sup>

(Received March 06, 2024 / Revised March 08, 2024 / Accepted March 31, 2024)

**Abstract:** Acceleration sensors can be used to detect failure and measure deformation in metal forming processes. In this study, the applicability of acceleration sensors for analysis of the metal forming process was studied. Magnesium alloy sheets (AZ31B-H24) with the thickness values of 1 mm, 2 mm, and 3 mm were used to perform the three most basic processes in the metal forming process such as tensile, bending, and 2D-draw bending test. The sensors were attached to the material. Acceleration signals occurring during material deformation were measured. For each experiment, we analyzed the changes in the acceleration of the sensor. In tensile deformation, a large acceleration occurred at the point of material failure. In bending, there was no significant acceleration at the point of material failure. The bending angle of the material was measured using the acceleration components. It was found that acceleration sensors can be used to detect fracture and measure deformation angles in the metal forming process.

**Key Words:** Acceleration sensor, Magnesium Alloy AZ31, Material fracture, Metal forming

### 1. 서론

금속 성형 공정의 중요성은 생산기술만큼이나 공정의 안정성과 품질 관리에 있다. 제조과정에서 센서를 활용해 이상치를 감지하는 것은 생산 효율성을 높이고 제조 중 발생할 수 있는 결함을 방지하는데 핵심적인 역할을 한다. 센서의 도입은 생산라인에서 실시간 모니터링과 조정을 가능케 하고 부품의 품질을 보다 일관되게 유지 향상시킬 수 있다. 따라서 센서를 사용한 공정 분석은 제품의 품질 및 생산성 향상에 필수적이다<sup>1)</sup>.

금속 성형 공정에서 발생하는 공정 변수에 대해 다양한 방법으로 측정 가능하다. 하중과 변위를 측

정할 수 있는 인장/압축 시험, 소재의 미세한 신호를 감지하는 음향 방출 신호 측정과 진동, 가속도 신호 측정 등의 방법들이 존재한다<sup>2)</sup>.

그 중 진동, 가속도 센서는 금속 성형 공정에서 가속도 및 이상치를 검출하는데 사용될 수 있다. 특히 아두이노 기반 가속도 센서는 센서 측정 과정이 간편하고 데이터 용량이 경량화 되어 데이터 저장 및 가공이 용이하다. 다른 고성능 진동 센서에 대해 상대적으로 정밀도가 낮지만, 범용성이 좋고 다양한 분야에 적용 가능하며, 경제적이다. 본 연구에서는 가속도와 각속도를 측정할 수 있는 가속도-자이로 센서<sup>3)</sup>를 사용하여, 가속도와 각속도를 금속 성형 공정 중 측정하였다.

분석 재료로 마그네슘 합금 판재 (Magnesium alloy, AZ31B-H24)를 사용하였다. 마그네슘 합금은 경량성, 높은 강도, 우수한 가공성, 부식 저항성 등의 특징을 가지고 있어 자동차 및 항공기 부품 등에

† 교신저자: cwlee@seoultech.ac.kr

\* 본 논문에 대한 저작권은 저자들에게 있으며 CC BY-NC-SA를 만족하는 조건으로 이용할 수 있습니다.

널리 사용되고 있다. 이러한 마그네슘 합금 재료는 다른 금속 재료에 비해 성형성이 낮아 판재 성형 공정의 적용이 어려운 실정이다<sup>4, 5)</sup>.

본 연구에서는 파손 검출을 위해 가속도 센서를 사용하였다. 마그네슘 소재 두께 1 mm, 2 mm, 3 mm를 이용해 금속 성형 공정에서 가장 기본적인 3 가지 공정 (인장 시험, 굽힘 시험, 2D-draw bending 실험)를 진행하였다. 실험에서는 가속도, 각속도를 측정할 수 있는 자이로 센서를 사용하여, 각 공정에서 어떤 신호 특성이 발생하는지 분석하였다. 각 실험을 통해 센서의 가속도 및 자이로 값의 변화를 분석하였다. 그리고 굽힘 시험에서는 가속도, 자이로 센서를 사용하여, 재료의 굽힘 각도를 측정하였다.

## 2. 가속도 센서

### 2.1. MPU-6050

MPU-6050은 MEMS (Microelectromechanical Systems) 기술을 사용한 가속도계와 자이로스코프를 통합한 6축 센서 모듈이다. 이 모듈은 3축 가속도와 축별 각속도의 변화를 감지하고 측정할 수 있어 자세추적, 운동감지 등에 활용 가능하며 드론, 로봇, 자동차 등 다양한 분야에서 활용되고 있다<sup>6)</sup>. I2C (Inter-Integrated Circuit) 통신을 통해 데이터 통신을 지원하고, 디지털 출력을 제공하여 데이터를 처리한다. AD0핀을 다르게 설정해 I2C 주소를 변경해 2개 센서를 병렬 연결한 후 실험을 진행했다. 센서의 구성은 Fig. 1과 같다.

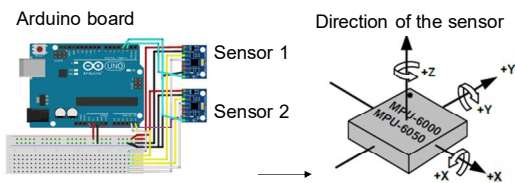


Fig. 1 Arduino board and MPU-6050 acceleration and gyro sensor

MPU-6050 센서의 상세 성능은 Table 1과 같다. 센서의 분해능은 측정된 물리량의 최소변화량을 의미한다. 정밀도는 측정된 값들의 정확도와 일관성과 관련이 있다. 감도가 높을수록 측정범위는 좁아지지만, 더 낮은 수준의 가속도 변화를 감지할 수 있고, 가속도 감도가 높을수록 센서의 분해능이 증가하게

된다. 높은 감도와 분해능을 선택하면 센서의 정밀도가 향상되며, 해당 연구에서는 높은 정밀도를 고려하여 굽힘 시험과 2D draw bending 실험에서는 가속도 센서의 측정 범위를  $\pm 2g$ 로 설정했다. 또한 인장 시험에서는 시험의 특성 상 가속도가 더 크게 발생하여, 가속도의 범위를 센서가 측정 가능한 최대 범위인  $\pm 16g$ 로 설정하였다.

Table 1 Specifications of MPU-6050 (LSB: Least significant bit)

specifications	Gyro-sensor	Accelerometer
Interface	I2C interface	I2C interface
Startup	100 ms	100 ms
Max range	$\pm 2000$ °/s	$\pm 16G$
Min range	$\pm 250$ °/s	$\pm 2G$
Resolution (Max)	131 LSB(°/s)	16384 LSB/g
Resolution (Min)	16.4 LSB(°/s)	2048 LSB/g
Frequency (Hz)	256~8000 Hz	4~1000 Hz

### 2.2. 가속도 데이터 처리 방법

소재 파단시 발생하는 진동은 가속도 변화로 검출된다. Arduino 센서로 측정된 데이터는 CoolTerm<sup>7)</sup>을 사용하여 데이터를 PC에 저장하였다. CoolTerm은 시리얼 통신 프로그램으로 시리얼 포트와 USB 포트를 사용해 컴퓨터와 장치 간의 데이터 통신을 수행하는데 사용된다. 모든 데이터는 100ms 단위로 소수점아래 4자리까지 측정 하고, Arduino 코드 내에서 시작점을 보정하여 오프셋 후 측정하였다.

MPU-6050 센서를 보드에 연결 후 시리얼 프로그램인 CoolTerm을 사용하여 데이터를 수집하고 데이터 후처리를 통해 분석하였다. 가속도 센서의 경우, 초기값 설정이 중요하다. 초기값 설정은 다음의 순서로 진행한다. 측정에 사용할 2개의 센서를 재료에 부착하기 전에, 정지상태에서 데이터를 측정한다. 각 센서를 시험에 부착하고 정지상태에서 10초씩 데이터를 수집 후 평균값을 구해 raw data를 오프셋 해준다. 이 과정을 통해 센서의 초기값을 0으로 설정 해 줄 수 있으며, 측정의 정밀도를 향상시킬 수 있다.

### 2.3. 가속도센서로부터 회전 각도 측정 방법

MPU-6050 센서는 자이로 센서를 포함하기 때문에 해당 센서로부터 회전 각도를 측정할 수 있다. 하지만 자이로 센서로부터 측정된 회전 각도는 측

정 오차가 커, 재료의 굽힘 각도를 측정하기 적합하지 않다. 본 연구에서는 중력 가속도의 방향을 통해 회전 각도를 측정하였다. 가속도 변화가 크지 않은 경우, 센서에 작용하는 가속도는 중력가속도이다. 각 방향의 가속도 합은 중력가속도가 되는데, 센서가 y 축을 기준으로 회전하는 경우, z 방향으로 작용하는 가속도 크기를 기준으로 센서의 회전 각도를 Eq. (1)과 같이 구할 수 있다(8). 본 연구에서는 가속도 변화가 크지 않은 V-굽힘에서 센서를 재료에 부착하여 굽힘 각도를 측정하였다. 2개 센서의 상대 각도를 사용하여 재료가 굽혀진 굽힘 각도를 측정하였다.

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{A_z}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}}\right) \dots (1)$$

### 3. 재료의 인장 변형에서 파손 측정

#### 3.1. 인장 시험 및 시험 결과

인장 시험은 만능재료시험기를 사용하였으며 헤드 속도는 5mm/min으로 하였다. 센서 설치 위치는 Fig. 2와 같이 한 개의 센서 (Sensor 1)는 인장 시편에, 다른 한 개의 센서 (Sensor 2)는 그림에 부착하였다. 센서는 인장 방향이 x 방향이 되도록 시편에 부착하였다. 마그네슘 시편의 규격은 두께 1 mm, 2 mm, 3 mm이고, 길이(L)은 20mm로 진행하였다. 시편의 게이지 부 길이는 25mm 이고, 해당 구간의 폭은 12.5 mm 이다. 게이지 부분의 길이는 45 mm 이고, 폭은 26.5 mm 이다.

인장 시험에서 시간에 따른 하중 그래프는 Fig. 3과 같다. 인장, 굽힘, 드로잉 시험에서 재료의 파손은 재료가 완전히 2 개의 부분으로 나누어지는 시점으로 정하였다. 소재가 두꺼울수록 재료의 파손이 빨리 발생하며, 연신율이 감소한다. 두께 1 mm의 파손 시점은 77.0 s, 2 mm는 68.6 s, 3 mm는 61.4 s로 소재가 두꺼울수록 재료의 파손이 빨리 발생하며 연신율이 감소하는 것을 확인했다. 인장에서 최대 하중은 두께 1 mm가 3.52 kN, 2 mm가 6.88 kN, 3 mm가 9.53 kN이다. 또한 인장에서 파손이 발생함과 동시에 재료가 2개로 분리되므로, 하중이 크게 감소한다.

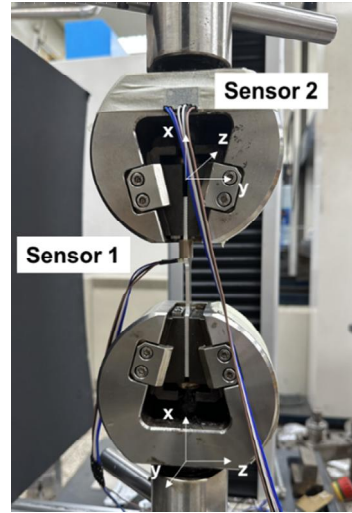


Fig. 2 Picture of the tensile test with acceleration sensors

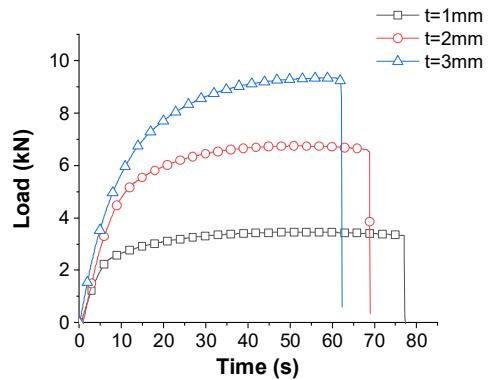


Fig. 3 Time-Displacement curve of AZ31-H24 sheets with different thickness

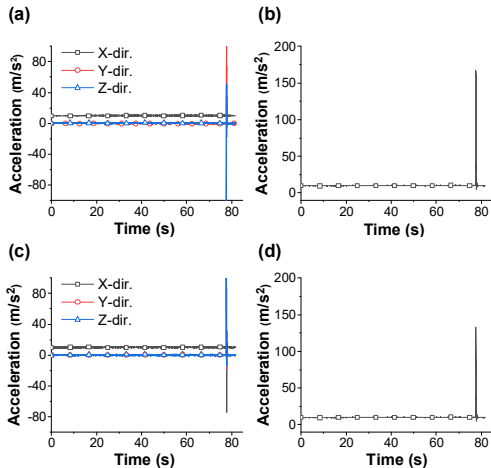
#### 3.2. 가속도 측정 결과

Fig. 4는 1축 굽힘 시험에서 측정한 sensor 1과 sensor 2의 가속도 측정 결과이다. Sensor 1은 재료에 직접 부착하였고, sensor 2는 인장 시험의 그림에 장착하여 가속도를 측정하였다. Fig. 4(a)와 (b)는 sensor 1의 가속도 측정 결과이다. 굽힘 시험이 진행되는 중에는 각 방향의 가속도 값, 가속도 크기가 변하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이 때, 높이 방향으로 9.8 m/s<sup>2</sup>의 가속도가 측정되는데, 이는 중력 가속도이다.

이 후, 파손이 발생함에 따라 모든 방향의 가속도 측정값이 증가 후 감소한다. 가속도의 크기는 167.4

m/s<sup>2</sup>까지 증가한다. 인장 시험에서 재료의 파손이 발생함에 따라, 자유 변형이 발생하고, 이 때 큰 가속도 값이 관측된다.

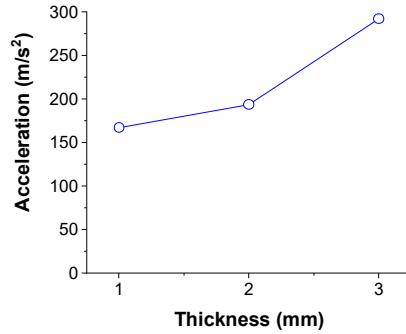
Fig. 4(c)와 (d)는 그림에 장착한 sensor 2의 방향별 가속도, 가속도 크기 그래프이다. 해당 그래프에서도 sensor 1의 가속도와 마찬가지로, 변형 중에는 가속도가 변하지 않으며, 파손이 발생하는 시점에서 가속도가 크게 증가 후 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 sensor 1과 sensor 2의 가속도 크기는 각각 167.37 m/s<sup>2</sup>, 132.97 m/s<sup>2</sup>으로 큰 차이를 보이지 않는다. 해당 실험을 통해 인장시험에서 항복, 소성 변형, 네킹 등에서는 가속도가 발생하지 않으며, 재료의 파손에서는 큰 가속도가 발생함을 확인할 수 있었다.



**Fig. 4** Acceleration of the material with the thickness of 1 mm; (a) each direction of the sensor 1, (b) the magnitude of the sensor 1, (c) each direction of the sensor 2 and (d) the magnitude of the sensor 2

인장에 의한 재료의 파단에서 가속도 변화가 재료 파단시점에서 강한 가속도가 측정되었다. Table 2는 재료 두께 및 센서 부착 위치에 따른 가속도 값이다. 상대적으로 질량이 큰 인장 시험 그림 보다 재료에 직접 부착한 센서 1의 가속도가 더 크게 나타남을 확인할 수 있다. Table 2에서 두께가 얇은 1t의 가속도 절대치 신호가 167.37 m/s<sup>2</sup>으로 가장 작게 나타났으며, 두께 2 mm, 3 mm 각각 193.86 m/s<sup>2</sup>, 292.42 m/s<sup>2</sup>로 측정되었다. Fig. 5에서 재료의 두께가

증가함에 따라, 파단에서 발생한 가속도가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 재료의 두께가 증가함에 따라, 파손에서 발생한 에너지가 증가하여 재료의 가속도가 증가한다.



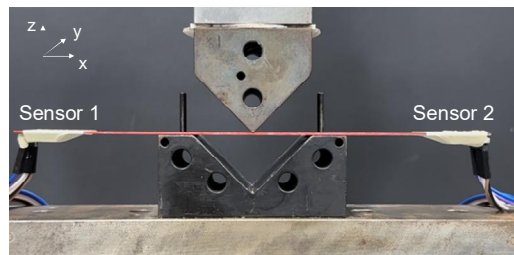
**Fig. 5** Measured acceleration with different thickness values

**Table 2** Absolute magnitude of accelerations [m/s<sup>2</sup>] in the tensile with different thickness values [mm]

Thickness	Sensor 1	Sensor 2
1 mm	167.37	132.97
2 mm	193.86	277.17
3 mm	292.42	169.88

## 4. 재료의 굽힘 시험에서 파손 및 굽힘 각도 측정

### 4.1. 굽힘 시험



**Fig. 6** Picture of the V-bending experiments

V-굽힘 시험은 기존 연구에서 사용한 금형<sup>9)</sup>을 사용하였다. 펀치 굽힘 반경은 1 mm 이다. 그리고 펀치 및 다이의 각도는 90°이며, 다이의 굽힘 반경은 1 mm 이다. 굽힘 시험은 재료의 파손이 발생하는 펀치 스트로크까지 진행하였으며, 센서 설치 위치는 Fig. 6과 같이 시편의 양단 끝에 설치하였다.

펀치의 속도는 5 mm/min 이며, 시편의 크기는 길

이 200 mm, 폭 30mm이다. 두께 1 mm, 2 mm, 3 mm 를 사용하여 실험을 진행하였다.

#### 4.2. 굽힘 시험 결과

굽힘 시험에서 시간-하중 선도는 Fig. 7과 같다. 각 실험에서 1 mm시편의 파손시점은 264.5 s, 2 mm 시편의 파손시점은 224 s, 3 mm시편의 파손시점은 140.7 s였다. 두께 1 mm와 2 mm는 재료의 굽힘이 진행되면서 한번에 파손이 발생하였다, 반면에 두께 3 mm는 굽힘 변형이 진행됨에 따라 재료의 크랙이 발생하고, 크랙이 전파되며 파손이 발생하였다. 이에 따라 하중이 감소하면서 파단이 발생한다. 소재가 두꺼울수록 파손까지 이르는 시간이 짧게 나타난다. 재료의 두께가 증가함에 따라, 굽힘 성형성이 감소한다.

가속도 측정 결과는 Fig. 8(a)와 같다. 방향 별 가속도 값은 펀치 스트로크가 증가함에 따라 변화하는데, 이는 재료의 각도가 굽힘 과정에서 변하기 때문이다. 가속도의 크기는 굽힘시험에서 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 인장 시험에서와 달리, 굽힘 시험에서는 가속도의 크기가 중력가속도에서 큰 값으로 변하지 않는 것을 확인할 수 있다.

인장 변형에서는 파손이 발생할 때 두께 방향으로 짧은 순간에 파손이 발생한다. 하지만 굽힘 변형에서는 파손 발생 지점에서 하중이 완만하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 재료의 파손이 인장에서처럼 한번에 발생하는 것이 아니라, 인장 변형이 발생하는 바깥쪽에서부터 천천히 파손이 발생하여, 내측으로 전파되기 때문이다. 굽힘시험에서는 가속도 변화가 적기 때문에 가속도를 사용하여 파손을 측정하기는 어렵다고 판단하였다.

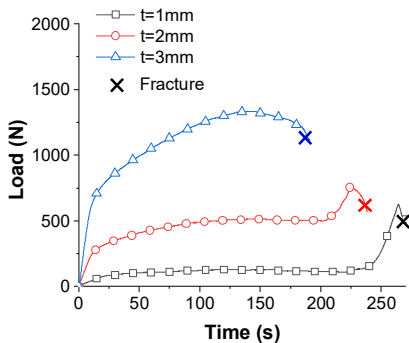


Fig. 7 Time-Displacement of the V-bending with different thickness values

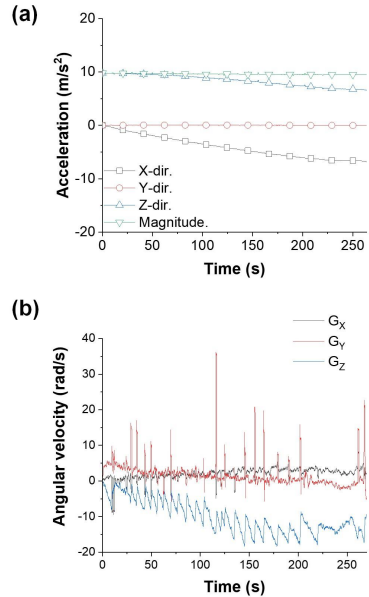


Fig. 8 Measured Acceleration and angular velocity of the sensor 1 for the material thickness of 1 mm  
(a) acceleration of each direction and magnitude,  
(b) angular velocity of each direction

#### 4.3. 굽힘 각도 측정 결과

본 연구에서 사용한 센서는 가속도 및 각속도 측정이 가능한 자이로 센서이다. 해당 센서는 각속도 측정이 가능하며, 이를 적분하는 경우 굽힘 각도를 구할 수 있다. Fig. 8(b)는 각속도 측정 데이터로, 각속도를 측정하는 경우, 각속도 데이터의 오차가 많아, 이를 적분하면 굽힘 각도의 오차가 증가한다.

가속도의 크기는 중력가속도로 일정하다. 하지만, Y, Z 방향 가속도 값은 굽힘 변형이 진행됨에 따라 감소하는 경향을 보인다. 초기에는 중력 가속도의 방향이 센서의 수직 방향이지만, 굽힘이 진행하면서, 가속도의 방향이 변화한다. 이를 이용하여 재료의 굽힘 각도를 식 (1)을 이용하여 측정할 수 있다.

Fig. 9는 두께 1mm 시편의 굽힘 시험의 센서 1과 센서 2에서 측정한 각도이다. Fig. 9(a)는 재료 두께 1 mm에서 각 센서에서 측정한 회전 각도이다. 각 선세에서 발생한 회전 각도를 더하면 굽힘 공정에서 시편에 상대 각도를 알 수 있으며, 이는 재료의

굽힘 각도가 되며, 그 결과는 Fig. 9(b)와 같다. Fig. 10은 재료 두께 2 mm와 3 mm의 굽힘 각도이다.

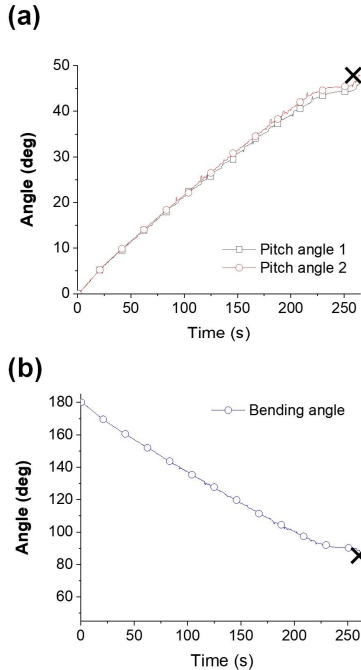


Fig. 9 In 1mm of thickness, (a) Pitch angle of the sensor 1 and sensor 2 and (b) Bending angle

두께 1 mm 시편은 268.66 s에서 파손이 발생했으며, 이 때 내측 굽힘 각도는 83.67°이다. 두께 2 mm 시편은 225.31 s에서 파손이 발생하였고, 이 때 내측 굽힘 각도는 88.87°이다. 두께 3 mm 시편은 143.42 s에서 파손이 발생하였고, 이 때 내측 각도는 115.91°이다. 해당 내용에서, 가속도 센서를 사용하여 재료의 굽힘 각도를 실시간으로 측정 가능함을 알 수 있었다.

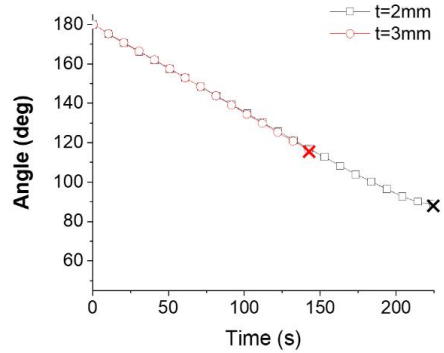


Fig. 10 Distribution of bending angles with different thickness values

## 5. 2D 드로우 벤딩 시험에서 재료의 파손 측정

### 5.1. 2D 드로우 벤딩 시험 장비

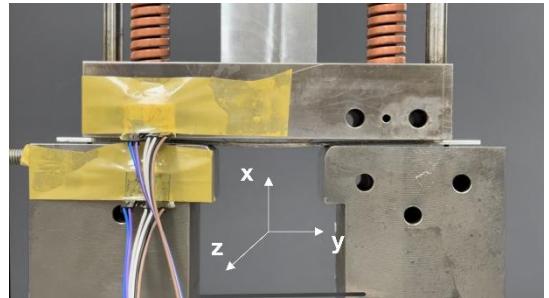


Fig. 11 Picture of the 2D draw bending experiments, sensor 1 on the punch and sensor 2 on the blank holder

2D 드로우 벤딩 시험은 기존 연구에서 사용한 금형<sup>10)</sup>을 사용하였다. 펀치와 다이의 틈새는 1 mm, 펀치 코너반경 10mm, 다이 코너반경 6 mm로 가공하였고 펀치 각도 90°로 제작하였다. 또한 스프링 상수는 10.9 N/mm 이다. 2D draw bending에서는 재료가 홀더 사이로 이동하기 때문에 센서는 앞의 시험에서와 같이 직접 재료에 부착하지 못하였다. 따라서 센서는 Fig. 11에서와 같이 홀더 (Sensor 1)와 다이 (Sensor 2)에 각각 부착하였다.

### 5.2. 2D 드로우 벤딩 시험 결과

시험 결과 시간-하중 선도는 Fig. 12와 같다. 또한 각 두께 별 시편의 파손 형상은 Fig. 13과 같다. 두

께 1 mm 시편은 312.3 s 에서 하중이 감소하기 시작하였고, 2 mm와 3 mm는 각각 67.5 s와 92.7 s에서 하중이 감소하기 시작하였다. 시편이 얇을수록 드로잉 변형이 잘 발생하여, 인장 변형에 의한 파손이 발생한다. 두께 1 mm 시편은 시편 어깨부에서 굽힘 변형이 발생한 후 드로잉 변형이 발생하는 과정에서 파손이 발생하였다. 두께 2 mm, 3 mm 시편은 굽힘 변형이 발생하는 과정에서 파손이 발생하였다.

Fig. 14는 각 재료의 성형 공정에서 발생한 진동 크기이다. 초기에 발생한 진동은 홀더와 재료의 마찰에 의해 발생한 진동 신호이다. 이후 일정한 가속도를 유지하다가, 재료의 파손이 발생한다.

두께 1 mm 시편은 약 313.9 s에서 큰 진동 신호가 발생한다. 두께 1 mm 시편은 굽힘 변형 이후 드로잉 변형에서 파손이 발생하는데, 이 때 주로 인장 응력이 발생한다. 이 경우, 1축 인장과 유사하게 큰 진동이 발생하였다.

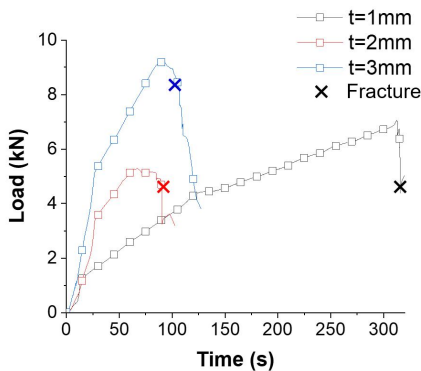


Fig. 12 Time-Displacement of the 2D draw bending with different thicknesss



Fig. 13 Pictures of the fractured specimens with different thickness values (a) 1 mm, (b) 2mm, and (c) 3mm

2 mm, 3 mm 시편의 경우, 시편 어깨부에서 굽힘이 시작되면서 굽힘에 의한 파손이 발생하였다. 2 mm, 3 mm 시편은 굽힘 성형성이 낮아, 굽힘 변형이 시작되면서 파손이 발생한다. 3 mm 시편은 펀치가 재료의 중심부에서 큰 곡률 반경이 발생한다. 펀치가 이동함에 따라 큰 굽힘 변형이 발생하여, 굽힘 변형이 점진적으로 발생한다. 또한 하중-변위 선도에서 하중이 감소하기 시작한 이후, 재료가 완전히 분리되기 까지 32.3 s가 소요된다. 재료의 파손이 한 번에 발생하지 않고, 점진적으로 발생하기 때문에, 가속도가 크게 발생하지 않는다. 하지만 두께 2 mm 시편의 경우, 중심부가 펀치와 접촉하여 직선인 것을 확인할 수 있다. 2 mm 시편은 89.6 s에서 하중 감소가 크게 발생한다. 이 경우, 재료에 인장 변형이 더 크게 작용하며, 진동 신호가 크게 발생하였다.

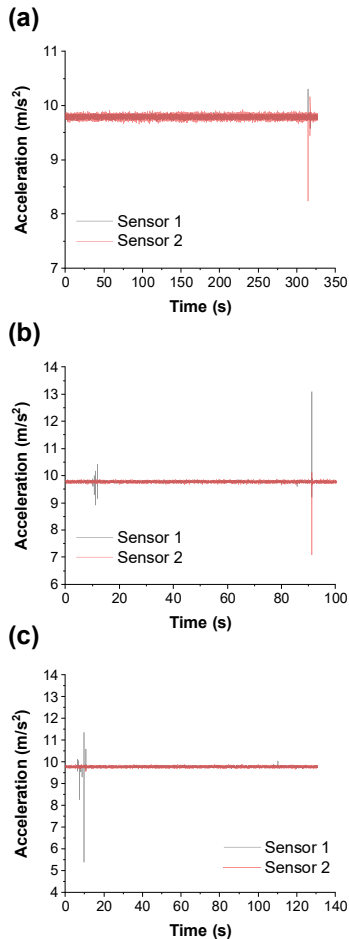


Fig. 14 Accelerations of sensor 1 and sensor 2 in the 2D draw bending tests with different thickness values (A) 1 mm, (B) 2mm, and (C) 3mm

## 6. 고찰

본 연구에서는 마그네슘 파손에서 발생하는 진동 신호의 특징을 분석하는 연구를 진행하였다. 인장에 의한 파단에서는 큰 에너지가 파단에서 방출되는데, 이 때 가속도 변화가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 인장 변형에 의한 파단에서는 가속도 센서를 통해 이상 발생을 검출 가능하다.

굽힘 시험에서는 특징적인 가속도 변화가 관찰되지 않았지만 가속도 센서를 통해 굽힘 각도 측정이 가능하다. 진동 센서를 부착함으로써, 공정 중 실시간으로 제품의 굽힘 각도를 측정할 수 있다. 본 연구에서는 파손까지 실험을 진행하였지만, 파손 전

공정을 멈춘다면, 스프링백이 발생하는데, 센서를 부착함으로써, 스프링백 전과 후의 제품 각도를 정확하게 측정할 수 있다.

2D 드로우 벤딩 시험에서는 두께에 따라 굽힘에 의한 파손과 인장에 의한 파손이 다르게 발생하였다. 두께 1 mm 시편은 드로잉 변형에서 파단이 발생하였는데, 이 때는 큰 가속도 변화가 발생하였다. 두께 3 mm 시편은 굽힘에서 파손이 일어났고 가속도 변화가 작게 나타났다. 이는 재료의 파손이 점진적으로 오랜 시간동안 발생하였기 때문이다. 두께 2 mm 시편은 같은 굽힘 변형임에도, 가속도의 증가가 발생하였는데, 하중 변화가 크게 발생하였기 때문이다.

이와 같은 실험 결과를 통해, 가속도 센서를 통해 소성 가공 공정에서 다양한 분석 및 측정이 가능하다는 것을 알 수 있다. 먼저 가속도 변화가 크지 않은 경우, 방향 별 가속도분석을 통해 굽힘, 변형 각도를 측정할 수 있다. 또한 하중 변화가 크게 발생하는 경우, 가속도 변화도 크게 발생함을 알 수 있다. 현재 본 연구에서 사용한 가속도 센서보다 더 높은 감도를 갖는 가속도 센서를 사용한 연구를 진행중이며, 이를 통해 다양한 소성 가공 공정에 가속도 센서의 적용 및 변형 측정에 대한 연구를 진행하고 있다.

## 7. 결론

가속도 센서는 다른 센서에 비해 경제적이고 접근성이 우수하다. 본 연구에서는 아두이노 3축 가속도, 자이로 센서를 이용한 인장 파단시점의 이상치 신호 발생을 확인하였다. 본 연구에서는 마그네슘 합금판재 (AZ31B-H24)의 인장, 굽힘, 2D 드로우 벤딩 실험에 적용하였으며, 결과는 다음과 같다.

- 1) 마그네슘 합금 판재의 인장실험에서, 파손 시점에 큰 가속도가 발생하였다. 두께 1 mm 시편의 경우 167.4 m/s<sup>2</sup>의 가속도가 발생하였으며, 두께가 증가함에 따라 발생한 가속도의 크기가 증가하였다.
- 2) 굽힘 변형에서는 재료 파손시점에서 큰 가속도가 발생하지 않았다. 하지만 가속도 방향의 변화를 측정하여, 제품의 굽힘 각도를 실시간으로 측정할 수 있었다.
- 3) 2D draw bending에서는 두께에 따라 다른 변형 특성이 발생하였다. 두께 1 mm는 드로우 변형에서



인장에 의한 파단이 발생하였으며, 이때 높은 가속도 값이 발생하였다. 두께 2 mm, 3 mm는 굽힘 변형에서 파손이 발생하였으며, 하중이 급속하게 감소한 2 mm는 가속도 값이 증가하였으나, 3 mm는 굽힘 변형에 의해 높은 가속도 값이 발생하지 않았다.

가속도 센서를 사용하면 금속 성형 공정에서 금형 또는 재료에서 발생하는 신호 파형을 비교하고 파손 발생 유무와, 신호 변화를 통한 파단 예측이 가능하다고 판단된다. 성형 공정에서 제품의 빠른 파손 감지는 불량품의 과다 생산으로 인한 경제적 손실 발생을 줄일 수 있다. 또한 금속 성형 공정에서 이상 감지, 변형 각도 측정 등에 진동 센서가 활용될 수 있을 것이다.

## 후기

본 연구는 정부의 재원으로 한국연구재단 (NRF)의 지원 (과제번호: RS-2023-00249455) 을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 1) J.M. Allwood, S.R. Duncan, J. Cao, P. Groche, G. Hirt, B. Kinsey, T. Kuboki, M. Liewald, A. Sterzing, A.E. Tekkaya, Closed-loop control of product properties in metal forming, *CIRP Annals*, 65 (2016) 573-596.
- 2) N. Chuan Huat, A.A. Suhaimi, Study on Hot Press Forming Die Condition by using Vibration Monitoring System, *Research Progress in Mechanical and Manufacturing Engineering*, 1 (2020) 153-159.
- 3) I. Rifajar, A. Fadlil, The path direction control system for lanange jagad dance robot using the MPU6050 gyroscope sensor, *International Journal of Robotics and Control Systems*, 1 (2021) 27-40.
- 4) E. Doege, K. Dröder, Sheet metal forming of magnesium wrought alloys – formability and process technology, *Journal of Materials Processing Technology*, 115 (2001) 14-19.
- 5) Q. Wang, B. Jiang, D. Chen, Z. Jin, L. Zhao, Q. Yang, G. Huang, F. Pan, Strategies for enhancing the room-temperature stretch formability of magnesium alloy sheets: a review, *Journal of Materials Science*, 56 (2021) 12965-12998.
- 6) C. Liu, M. Al Alif, G. He, Shoulder Motion Detection Algorithm Based on MPU6050 Sensor and XGBoost Model, in: *2022 International Conference on Computing, Communication, Perception and Quantum Technology (CCPQT)*, IEEE, 2022, pp. 356-360.
- 7) B. Chanv, S. Bakhru, V. Mehta, Structural health monitoring system using IOT and wireless technologies, in: *2017 International Conference on Intelligent Communication and Computational Techniques (ICCT)*, IEEE, 2017, pp. 151-157.
- 8) X. Lu, J. Li, W. Liu, A study of complementary filter algorithm for four-rotor helicopters attitude control system, *Sensors & Transducers*, 174 (2014) 298.
- 9) J.-H. YU, C. LEE, Analysis of Springback Characteristics of Magnesium Alloy Sheet (AZ31B) Considering Time-Dependence in Warm Bending, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 37 (2020) 201-207.
- 10) H. W. Kim, J.-H. YU, C. LEE, Study on the 2D-draw Bending Characteristics of AZ31B Magnesium Alloy According to Various Temperatures and Forming Speed, *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, 21 (2019) 221-227.

## 저자 소개

### 이 서 준(Seojun LEE)

[정회원]



- 2024년 2월 : 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (공학학사)

< 관심분야 >  
프레스성형 및 금형

### 이 창 환(Chang-Whan LEE) [정회원]



- 2014년 8월 : KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2014년 8월~2016년 8월 : KIST 연료전지연구소 Post-Doc.
- 2016년 8월~현재: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 부교수

< 관심분야 >  
관재 성형, 프레스 금형, FEM, 관재접진성형

### 김 지 선(Jisun Kim)

[정회원]



- 2024년 2월 : 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (공학학사)

< 관심분야 >  
프레스성형 및 금형

### 정 완 진(Wan-Jin Chung) [정회원]



- 1989년 : KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 1990년 3월 ~ 1998년 2월 : 삼성종합기술원 수석연구원
- 1998년~현재 : 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 교수

< 관심분야 >  
FEM, 관재 성형 해석