

# AZX311 마그네슘 합금과 마르텐사이트 강의 V-bending 이후 전류 인가에 따른 스프링백 각도 변화 평가

박주원<sup>1</sup> · 정혜진<sup>1</sup> · 진성우<sup>2</sup> · 김문조<sup>3</sup> · 한흥남<sup>1#</sup>

## Evaluation of Springback Angle Change with Applying Electric Current After V-bending Test on AZX311 Magnesium Alloy and Martensitic Steel

J.-W. Park, H.-J. Jeong, S.-W. Jin, M.-J. Kim, J.J. Kim, H.N. Han

(Received April 4, 2018 / Revised April 17, 2018 / Accepted April 20, 2018)

### Abstract

The influence of electric current on the springback characteristics of AZX311 magnesium alloy and martensitic steel after V-bending test is investigated. Various pulsed electric currents are applied into the specimens followed by a V-bending test, and the changes in the springback angle are measured. In order to evaluate not only the thermal effect but also the athermal effect of electric current on the springback angle, the temperature rises resulting from the applied electric current are measured for all test conditions. As a result, it was found that the springback is significantly decreased as the current density increases. As for the martensitic steel, since the dislocation recovery immoderately occurs at a high electric current density condition of 80A/mm<sup>2</sup>, the optimal current density condition should be required.

**Key Words** : AZX311 magnesium alloy, martensitic steel, electric current, springback

### 1. 서 론

최근 고유가 및 환경규제의 강화에 따라 고강도 경량소재에 대한 수요가 증가하는 추세이다. 특히, 자동차 부품업계에서는 차체 경량화를 실현하기 위해 초고강도, 초경량 합금 소재를 적용하고자 하는 시도를 활발히 진행 중이다. 하지만, 성형 시 제품이 정교해지고 복잡해짐에 따라 스프링백 현상 문제에 대한 중요성이 커지고 있다. 스프링백은 성형 공정에서 가공이 완료된 후 금형에서 제거될 때 잔류응력에 의해 탄성회복을 일으키는 현상으로 제품의 정밀도에 큰 영향을 미친다[1~3]. 특히 굽힘이나 스트레칭 공정에서 큰 문제가 되고 있다. 스프링백을 제어하기 위해 기계적으로 압인가공이나 과급힘

을 실시하여 최종 형상에 가깝게 설계하는 방법이 있다[4, 5]. 또는, 금형을 제거하기 전에 열처리를 하여 잔류응력을 제거하는 방법이 이용되고 있다. 하지만, 압인가공이나 과급힘은 최종 형상 예측이 어려운 문제가 있다. 열처리를 이용하는 방법은 승온과 유지를 위해 추가적인 시간이 필요하고, 열적 영향으로 인해 금형 수명에 영향을 미쳐 한계가 따른다. 이러한 기존 공정들의 단점들을 극복하기 위해 새로운 처리 기술이 필요하다.

통전성형법에 대해 1959년 최초로 보고가 이루어진 이후[6], 전류가 재료의 기계 및 미세구조 거동에 미치는 영향을 평가하는 연구가 지속적으로 이루어졌다[7-9]. 2000년대 이후에는 성형뿐만 아니라 변형없이 재료에 고밀도 전류를 인가하여 재료의 미세구조 변화를 제어하고 가속화시킬 수 있는 통전처리법에 대한 연구도 활발하게 진행되었다[10-

1. 서울대학교 재료공학부, 신소재공동연구소  
2. 현대자동차  
3. 한국생산기술연구원

# Corresponding Author : Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, E-mail:hnhan@snu.ac.kr

20]. Conrad 등은 전류가 순수 구리의 재결정 속도에 큰 영향을 미친다고 보고하였다[10, 11]. Wang 등은 Sn/Pb 이원계 합금의 응고 시 전류가 수지상 성장에도 영향을 줄 수 있다고 언급하였다[12]. 또한 최근 저자들은 알루미늄 합금의 일축 인장 시험 도중 펄스 전류를 인가함으로써 시효가 가속화 되는 현상에 대해 보고하였다[14].

전류의 영향에 관하여 일부 연구자들은 출발열에 의한 열적 효과로 완전히 설명된다고 하였다[15, 16]. 그러나, 전하이동이론(electromigration)과 같이 출발열 이외에 전류 자체의 효과가 있다고도 보고되었다[19-22]. 저자들은 전류의 비열적 효과에 의해 전위 소멸이 가속화 된다고 보고하였고, 이는 전류가 결합과 상호작용하여 전위 소멸 가속화를 유도하였다고 밝힌 바 있다[22]. 하지만, 전류의 비열적 효과의 정확한 메커니즘은 지금까지 밝혀지지 않아 더 깊은 연구가 필요한 상황이다.

본 연구에서는 경량 소재인 AZX311 합금과 고강도 소재인 마르텐사이트 강에 대해 굽힘 시험 이후 하중을 제거하지 않은 상태에서 다양한 전류밀도 조건 하에서 펄스 전류를 인가함에 따라 스프링백에 전류가 미치는 영향에 대해 조사하였다. 또한 전류 인가의 급속 가열 특성을 이용하여 기존 방법보다 처리 시간을 단축하는 공정 개발 가능성에 대해서도 고찰하였다.

## 2. 실험 방법

포스코에서 생산한 상용 마그네슘 AZX311(Mg-3Al-1Zn-1Ca) 소재와 마르텐사이트 강(Fe-0.18C-3.6Mn-0.04Ni)이 이 실험에 사용되었다. AZX311 판재의 두께는 1 mm고, 마르텐사이트 강의 판재 두께는 1.4 mm다.

굽힘 시험은 인스트론 복합 시험기(Instron 5582, USA)를 이용하였고, 굽힘 시험 시 AZX311의 경우 0.3 mm/s, 마르텐사이트 강의 경우 0.1 mm/s의 하강 속도로 실험을 진행하였다. 전류 인가가 가능한 굽힘 시험을 위해 Fig. 1 (a)와 같이 3점 굽힘 시험 지그를 제작하였다. Vadal SP-1000U 전원 공급 장치(Hyosung, South Korea)를 이용하여 DC 펄스를 인가할 수 있도록 하였으며, 전류 인가 시 장비로의 누

전을 막기 위해 펀치 윗부분과 아래쪽의 2점 받침대는 절연체인 베이클라이트로 제작하였다. 반경 1 mm, 각도 70°인 펀치를 이용하여 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 시편은 폭 20 mm, 길이 110 mm로 제작하였고, 시편에 전선을 직접 연결하여 전류를 인가할 수 있도록 Fig. 1 (b)와 같이 시편에 나사홈이 있는 모양으로 설계하였다. 또한, 전류 인가 시 출발열에 의해 발생하는 온도 상승을 측정하기 위해, FLIR-E40 적외선 열화상 카메라(FLIR, Sweden)를 이용하여 시편 옆면의 온도를 측정하였다. 측정 시에는 방사율을 보정하기 위해 열화상 스프레이를 시편에 도포하였고, K-type 열전대를 이용하여 온도 교정을 실시한 이후 온도 분석을 실시하였다.

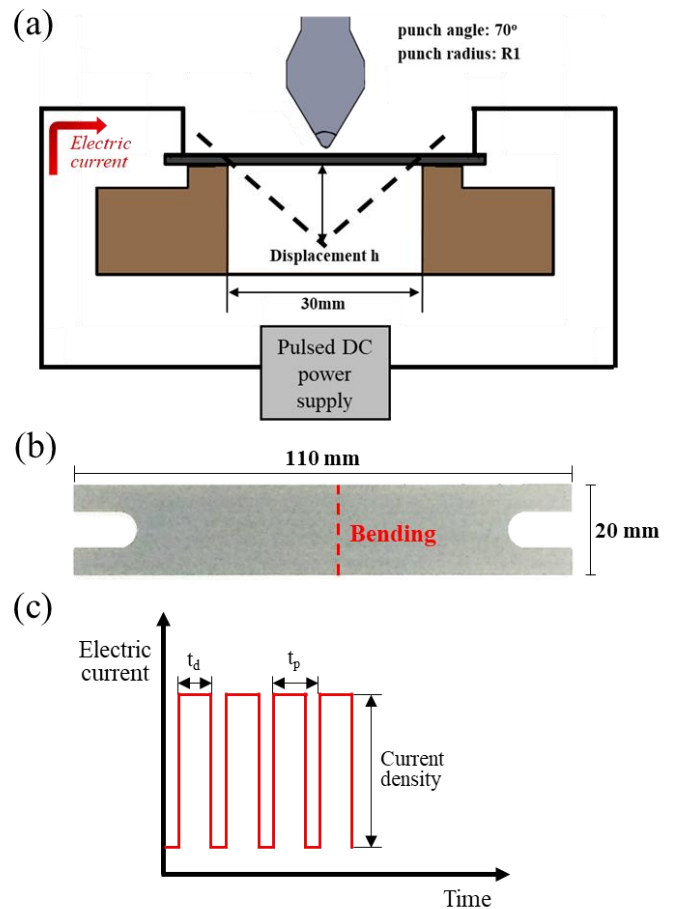


Fig. 1 (a) Schematic diagram of the electrically-assisted V-bending machine, (b) specimen dimensions, (c) schematic diagram of electric pulsing.

스프링백에 전류가 미치는 영향을 평가하기 위해 AZX311 합금의 경우 14.5 mm, 마르텐사이트 강의 경우 15 mm까지 굽힘 시험을 진행한 이후 (displacement h) 하중을 제거하지 않은 상태에서 펄스 전류를 인가하였다. 이 때 펄스 전류 인가 시간 ( $t_d$ )과 주기( $t_p$ ), 인가 횟수는 각각 0.1초, 1초, 10회로 고정하였고, 전류 밀도를 10 A/mm<sup>2</sup> 간격으로 50~80 A/mm<sup>2</sup>까지 변화시키며 실험을 실시하였다. 또한 AZX311 합금의 경우에는 고밀도 전류인 120, 160 A/mm<sup>2</sup>에서 인가 시간과 주기는 위와 동일하게 한 상태로 인가 횟수만 1~3회로 50~80 A/mm<sup>2</sup> 조건에 비해 줄여 전류 밀도가 스프링백에 미치는 영향을 보고자 하였다. 이 후 하중을 제거하지 않은 상태에서 각도와 하중 제거한 이후의 각도를 비교하여 스프링백 정도를 평가하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 AZX311의 통전 스프링백 특성

AZX311 합금의 전류에 따른 스프링백 특성 변화에 대한 결과가 Fig. 2에 나타나 있다. 굽힘 시험 이후 하중을 제거하지 않은 상태에서 서로 다른 밀도의 전류를 인가하였다. 전류 인가에 따른 굽힘 시험 결과가 Fig 2 (a)에 나타나 있다. 전류를 인가하지 않은 비통전 시편에서는 24.05°의 스프링백이 발생하였다 (Fig. 2 (b)). 하지만 전류를 인가하게 되면 비통전 조건과 비교하여 스프링백 발생 각도가 감소한 것을 확인할 수 있다. 전류 밀도가 50 A/mm<sup>2</sup>인 조건에서는 17.36°의 스프링백이 발생하였으며, 전류 밀도가 커질수록 점점 스프링백 각도가 감소하여 가장 큰 조건인 80 A/mm<sup>2</sup>에서는 7.28°의 스프링백만 발생하였다. 전류 인가에 따른 온도 변화는 Fig 2 (c)에 나타나 있다. 50 A/mm<sup>2</sup> 조건에서는 1 펄스 당 약 13°C의 온도가 상승하여 최대 온도는 156°C로 관찰되었고, 전류 밀도가 커질수록 온도 상승 폭이 커지고 최대 온도가 높게 나타났다. 전류 밀도가 가장 큰 조건인 80 A/mm<sup>2</sup> 조건에서는 1 펄스 당 약 40°C의 온도가 상승되어 최대 온도는 377°C로 관찰되었다. 굽힘 시험 이후 하중을 제거하지 않은 상태에서 전류를 인가하면 AZX311 합금의 스프링백 특성을 저감시킬 수 있으며 그 효과는 전류 밀도가 커질수록 증가한다.

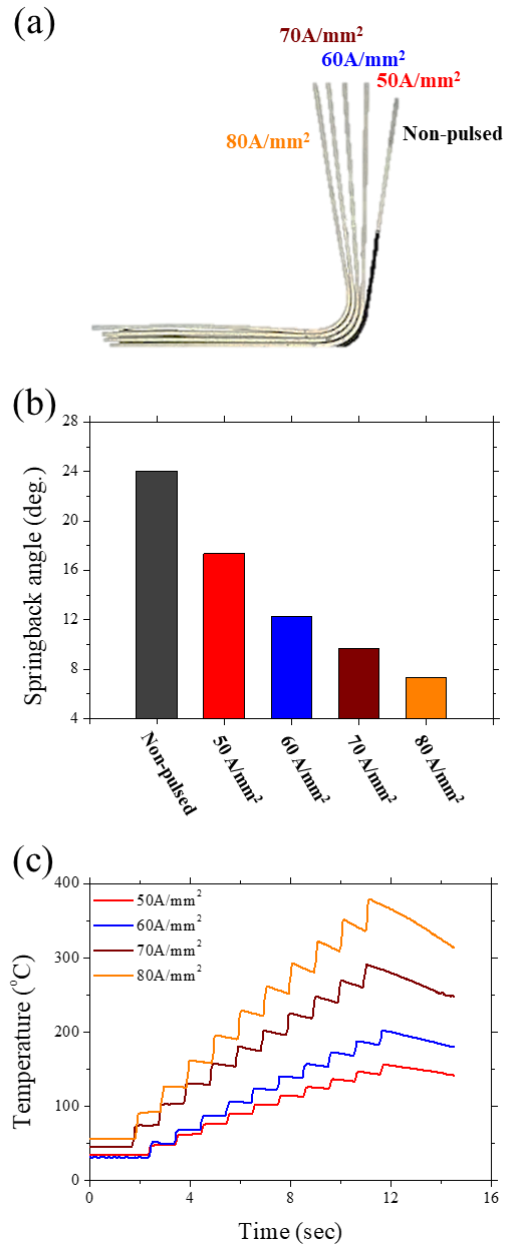
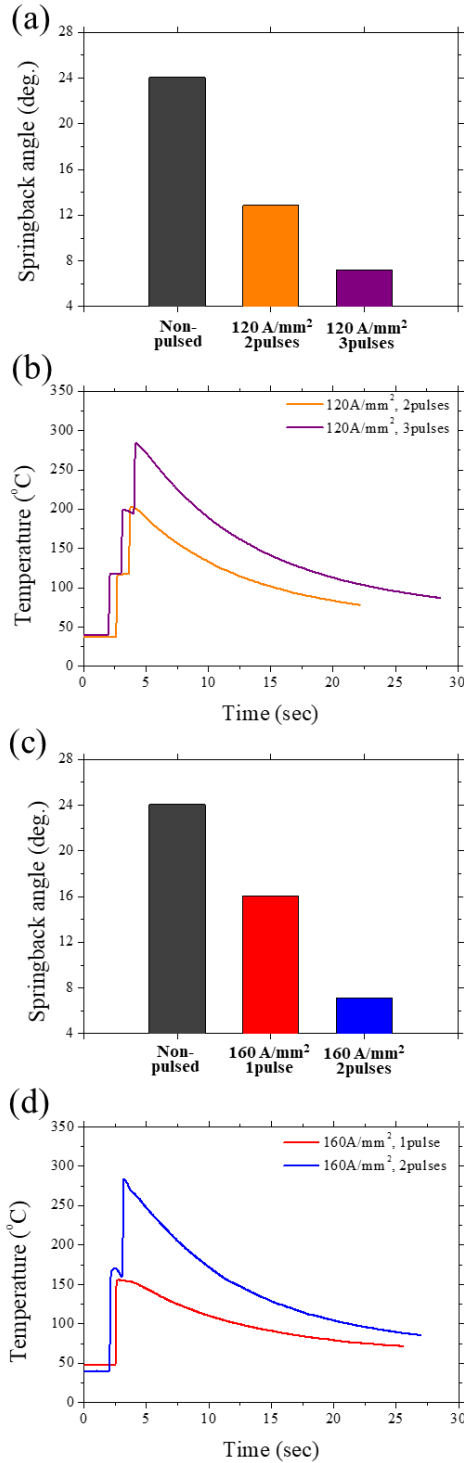


Fig. 2 The effect of electric current density for AZX311 on (a) results of V-bending, (b) springback angle, (c) temperature history.

록 증가한다.

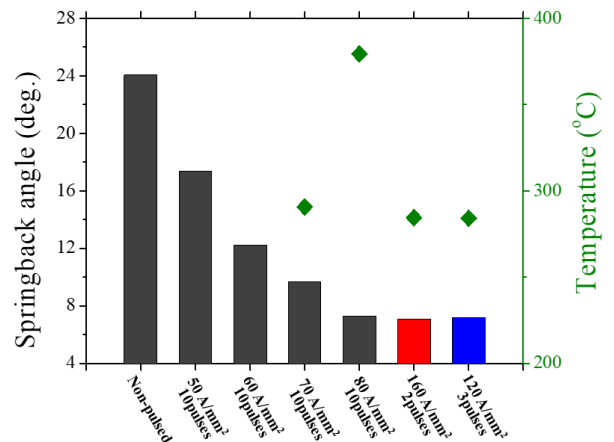
온도의 영향을 최소화 하고 전류 밀도에 따른 스프링백 특성을 평가하기 위해 Fig. 2의 실험과 동일하게 굽힘을 진행한 이후 고 밀도의 전류인 120 A/mm<sup>2</sup>의 전류를 기존 10 회보다 적은 횟수인 2~3



**Fig. 3 (a) Springback angle, (b) temperature history under the current density of 120 A/mm<sup>2</sup>, (c) springback angle, (d) temperature history under the current density of 160 A/mm<sup>2</sup> for AZX311.**

회만 인가하였다. 비통전 시편과 비교하여 120 A/mm<sup>2</sup>의 전류를 2 회 인가하였을 때, 스프링백 각도가 12.85° 나타났고, 3 회 인가하게 되면 7.2°만 나타났다(Fig. 3 (a)). 120 A/mm<sup>2</sup>의 전류를 인가하게 되면 1 펄스 당 약 90°C의 온도가 상승하였고, 3 펄스를 인가한 조건에서 최대 온도가 284°C로 관찰되었다(Fig. 3 (b)). 또한 160 A/mm<sup>2</sup>의 전류 밀도 조건에서 1~2 회의 펄스만 인가하였을 때 스프링백 각도 변화에 대해서도 분석을 실시하였고, Fig. 3 (c)에 나타내었다. 160 A/mm<sup>2</sup>의 조건에서는 2 회의 펄스만 인가되어도 스프링백 각도가 7.1°로 크게 감소되었다. 160 A/mm<sup>2</sup>의 전류가 인가되면 1 펄스당 약 125°C의 온도가 상승되어 2 펄스가 인가된 조건에서 최대 온도가 284°C로 관찰되었다(Fig. 3 (d)).

전류 밀도가 스프링백 각도에 미치는 영향을 평가하기 위해 50~80 A/mm<sup>2</sup>의 전류를 10 회 인가한 조건과 120 A/mm<sup>2</sup>의 전류를 3 회, 160 A/mm<sup>2</sup>의 전류를 2 회 인가한 조건에서의 스프링백 각도 변화를 Fig. 4에 도시하였다. 120 A/mm<sup>2</sup>의 전류를 3 회 인가된 조건과 160 A/mm<sup>2</sup>의 전류를 2 회 인가된 조건의 온도는 70 A/mm<sup>2</sup>의 전류를 10 회 인가한 조건에서의 온도인 290°C와 비슷하게 상승하였지만 (Fig. 2 (c), Fig. 3 (b), Fig. 3 (d)), 스프링백 저감 정도가 더 크게 나타났고, 최대 온도가 380°C로 나타난 80 A/mm<sup>2</sup>의 전류를 10 회 인가한 조건과 비교하여 100°C 정도 낮은 조건임에도 불구하고 스프링백 저감 정도가 비슷하게 나타났다.



**Fig. 4 Springback angle with current density and number of pulses.**

줄발열에 의한 열적 효과 이외에 전류 고유의 효과에 의해 스프링백 특성이 영향을 받는다는 것을 확인하였고, 전류 밀도가 커질수록 스프링백에 미치는 전류의 효과가 증가하여 2~3 펄스만 인가하더라도 스프링백을 크게 저감시킬 수 있음을 알 수 있다.

### 3.2 마르텐사이트 강의 통전 스프링백 특성

마르텐사이트 강의 전류 인가에 따른 스프링백 특성 변화 결과가 Fig. 5에 도시되어 있다. 15 mm까지 굽힘 시험을 진행한 이후 하중을 제거하지 않은 상태에서 50, 60, 70, 80 A/mm<sup>2</sup>으로 전류 밀도만 다르게 하여 인가하였다. 하중 제거에 따른 굽힘 시험 결과는 Fig. 5 (a)에 도시하였고, 전류를 인가하지 않은 비통전 시편과 비교하여 전류 밀도가 커질수록 스프링백이 적게 나타난 것을 확인할 수 있다. 전류를 인가하지 않은 시편에서는 24.05°의 스프링백이 발생한 것에 비해 50 A/mm<sup>2</sup> 조건에서는 17.36°가 발생하였고, 전류 밀도가 커질수록 스프링백 특성이 저감되어 80 A/mm<sup>2</sup> 조건에서는 7.28°의 스프링백만 발생하였다. Fig. 5 (c)에서 확인할 수 있듯이, 50 A/mm<sup>2</sup>에서는 1펄스당 약 15°C 정도 온도가 상승하여 최대 온도가 128°C로 나타났다. 가장 전류 밀도가 큰 80 A/mm<sup>2</sup> 조건에서는 펄스당 약 60°C의 온도가 상승하여 최대 428°C까지 온도가 상승하였다. 이를 통해 전류 인가에 의해 마르텐사이트 강의 스프링백 특성이 저감 될 수 있고, 그 효과는 전류 밀도가 증가할수록 커진다는 것을 알 수 있다.

전류 인가에 의한 마르텐사이트 강의 물성 변화 여부를 평가하기 위해서 통전 굽힘 시험 이후 굽힘부의 인장 변형이 일어난 부분의 비커스 경도 분석을 실시하였다. 굽힘 시험을 하지 않은 초기 시편의 경우 약 410 Hv 정도의 경도값을 나타내었다. 비통전 굽힘 시험을 진행한 시편은 굽힘부가 변형을 받았기 때문에 경도가 약 450 Hv 까지 증가하였다. 전류 밀도가 50, 60 A/mm<sup>2</sup> 인 경우에는 경도값이 각각 457, 441 Hv로 나타나 전류를 인가하지 않은 경우와 비교하여 강도의 저해 없이 스프링백 특성만을 저감시킨 것을 알 수 있다. 70 A/mm<sup>2</sup>의 조건의 경우에는 300°C 이상의 온도에서 10 초 이내로 머물렀지만 경

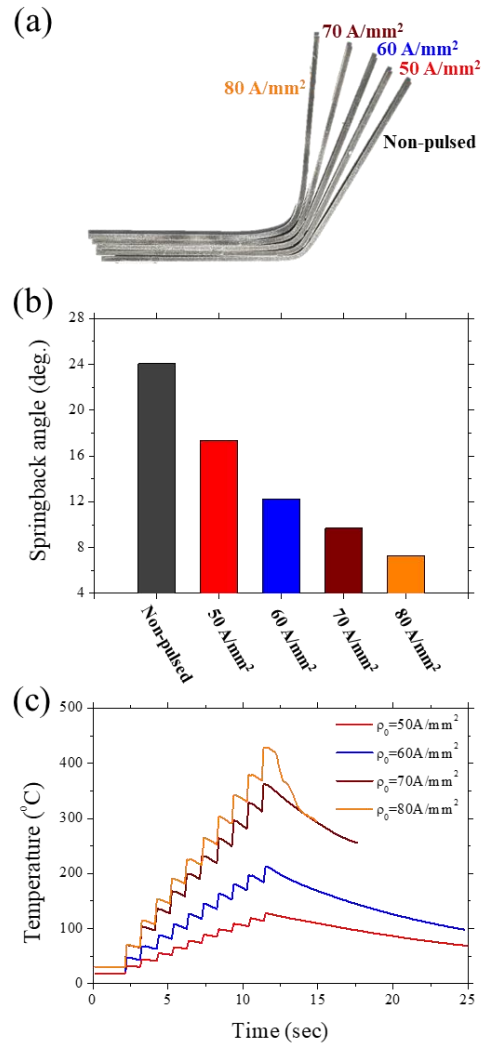
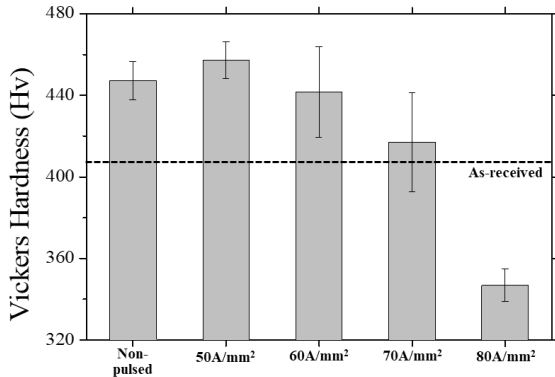


Fig. 5 The effect of electric current density for martensitic steel on (a) results of V-bending, (b) springback angle, (c) temperature history.

도값이 약 420 Hv로 다른 조건과 비교하여 약간 낮아졌다. 김문조 등의 연구로 보았을 때, 전류 인가에 의해 전위 회복이 일어나는 소둔 현상이 가속화되어 경도값이 줄어들었다는 것을 알 수 있다[22]. 80A/mm<sup>2</sup>의 조건에서도 300°C 이상의 온도에서는 10 초 이내로 머물렀음에도 불구하고, 경도값이 350 Hv 정도로 크게 감소하였다. 마르텐사이트 강재는 고강도 특성을 필요로 하는 강이기 때문에 전류 인가를 이용하여 스프링백 특성을 향상시키고자 한다면 전류 밀도 범위를 전위 회복이 크게 일어나지



**Fig. 6 Hardness change according to current density after electrically-assisted springback test.**

않는 범위 내로 설정하는 것이 필요하다.

펄스 전류를 인가함에 따라 마르텐사이트 강의 스프링백 현상을 제어할 수 있다는 것을 확인하였고, 그 효과는 전류 밀도가 증가할수록 커진다. 하지만, 전류가 전위 회복을 가속화 시킬 수 있는 특성에 의해 마르텐사이트 강의 강도를 저해할 수 있어 전류 인가 기법을 이용하여 스프링백을 제어할 경우에는 온도 구간에 대한 고려가 필요하다.

#### 4. 결론

AZX311 마그네슘 합금과 마르텐사이트 강에 대하여 굽힘 시험을 실시하고 전류 인가에 따른 스프링백 저감에 대해 전류가 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 전류 밀도가 커질수록 AZX311 합금의 스프링백이 더 크게 저감된 것을 확인하였고, 전류 밀도를 크게 증가시키고 인가 횟수를 줄인다면 낮은 전류 밀도에서보다 낮은 온도에서도 스프링백을 비슷한 수준으로 저감시킬 수 있다. 이를 통해 열적 효과 이외에 전류의 효과에 의해 스프링백이 영향을 받을 수 있음을 알 수 있다. 또한, 마르텐사이트 강 역시 전류 인가에 의해 스프링백이 저감되는 것을 확인하였고, 전류 밀도가 커질수록 그 효과가 증가한다. 하지만, 70 A/mm<sup>2</sup> 이상의 전류 밀도 범위에서는 전류 인가에 의해 경도가 감소하는 것을 확인하였고, 고 밀도의 전류 인가에 의해 전위 회복이 가속화 될 수 있기 때문에 전류 범위를 고려하여 전류 인가를 시행할 필요가 있다. 금속 소재의 스프링

백 저감에 전류 밀도가 미치는 영향을 평가하였고, 짧은 시간의 전류 인가를 통하여 스프링백을 크게 저감시킬 수 있는 특성을 이용하여 기존 방법보다 효율이 높은 공정 개발 가능성을 확인하였다.

#### 후 기

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No. NRF-2015R1A5A1037627)의 지원 및 포스코(2016Z026), (2015Z078)의 지원을 받아 수행된 연구임.

#### REFERENCE

- [1] J. Yanagimoto, T. Oya, S. Kawanishi, N. Tiesler, T. Koseki, 2010, Enhancement of bending formability of brittle sheet metal in multilayer metallic sheets, *CIRP Annals – Manuf. Technol.* Vol. 59, pp. 287~290.
- [2] F. Chen, T. Huang, 2003, Formability of stamping magnesium-alloy AZ31 sheets, *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 142, pp. 643~647.
- [3] C. Chen, 2014, Experimental study on punch radius and grain size effects in V-bending process, *Mater. Manuf. Processes* Vol. 29, pp. 461~465.
- [4] D. Leu, C. Hsieh, 2007, The influence of coining force on spring-back reduction in V-die bending process, *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 196, pp. 230~235.
- [5] J. Zhao, P. Zhan, R. Ma, R. Zhai, 2012, Control strategy of over-bending setting round for pipe-end of large pipes by mould press type method, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* Vol. 22, pp. 329~334.
- [6] E.S. Machlin, 1959, Applied voltage and the plastic properties of “brittle” rock salt, *J. Appl. Phys.* Vol. 30, pp. 1109~1110.
- [7] J.T. Roth, I. Loker, D. Mauck, M. Warner, S.F. Golovashchenko, A. Krause, 2008, Enhanced formability of 5754 aluminum sheet metal using electric pulsing, *Trans. NAMRI/SME* Vol. 36, pp. 405~412.
- [8] H. Conrad, 2000, Electroplasticity in metals and

- ceramics, Mater. Sci. Eng. A Vol. 287, pp. 276~287.
- [9] J.-H. Roh, J.-J. Seo, S.-T. Hong, M.-J. Kim, H.N. Han, 2014, The mechanical behavior of 5052-H32 aluminum alloys under a pulsed electric current, Int. J. Plast. Vol. 58, pp. 84~99.
- [10] H. Conrad, N. Karam, S. Mannan, A. Sprecher, 1988, Effect of electric current pulses on the recrystallization kinetics of copper, Scr. Metall. Vol. 22, pp. 235~238.
- [11] H. Conrad, N. Karam, S. Mannan, 1983, Effect of electric current pulses on the recrystallization of copper, Scr. Metall. Vol. 17, pp. 411~416.
- [12] T. Wang, J. Xu, T. Xiao, H. Xie, J. Li, T. Li, Z. Cao, 2010, Evolution of dendrite morphology of a binary alloy under an applied electric current: An in situ observation, Phy. Rev. E Vol. 81, 042601.
- [13] H.-J. Jeong, M.-J. Kim, J.-W. Park, C.D. Yim, J.J. Kim, O.D. Kwon, P.P. Madakashira, H.N. Han, 2017, Effect of pulsed electric current on dissolution of Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> phases in as-extruded AZ91 magnesium alloy, Mater. Sci. Eng. A Vol. 684, pp. 668~676.
- [14] M.-J. Kim, M.-G. Lee, K. Hariharan, S.-T. Hong, I.-S. Choi, D. Kim, K.H. Oh, H.N. Han, 2017, Electric current-assisted deformation behavior of Al-Mg-Si alloy under uniaxial tension, Int. J. Plast. Vol. 94, pp. 148~170.
- [15] J. Magargee, F. Morestin, J. Cao, 2013, Characterization of flow stress for commercially pure titanium subjected to electrically assisted deformation, J. Eng. Mater. Technol. Vol. 135, 041003.
- [16] S. Lin, X. Chu, W. Bao, J. Gao, L. Ruan, 2015, Experimental investigation of pulse current on mechanical behaviour of AZ31 alloy, Mater. Sci. Technol. Vol. 31, pp. 1131~1138.
- [17] Y.J. Lee, H.-M. Sung, Y. Jin, K. Lee, C.R. Park, G.-H. Kim, H.N. Han, Improvement of mechanical property of air plasma sprayed tungsten film using pulsed electric current treatment, Int. J. Refract. Met. Hard Mater. Vol. 60, pp. 99~103.
- [18] W. Ye, R. Le Gall, G. Saindrenan, 2002, A study of the recrystallization of an IF steel by kinetics models, Mater. Sci. Eng. A Vol. 332, pp. 41~46.
- [19] P.S. Ho, T. Kwok, 1989, Electromigration in metals, Rep. Prog. Phys. Vol. 52, No. 3, pp. 301~348.
- [20] J.-W. Park, H.-J. Jeong, S.-W. Jin, M.-J. Kim, K. Lee, J.J. Kim, S.-T. Hong, H.N. Han, 2017, Effect of electric current on recrystallization kinetics in interstitial free steel and AZ31 magnesium alloy, Mater. Charact. Vol. 133, pp. 70~76.
- [21] L. Dong, S. Youkey, J. Bush, J. Jiao, 2007, Effects of local Joule heating on the reduction of contact resistance between carbon nanotubes and metal electrodes, J. Appl. Phys. Vol. 101, 024320.
- [22] M.-J. Kim, K. Lee, K.H. Oh, I.-S. Choi, H.-H. Yu, S.-T. Hong, H.N. Han, 2014, Electric current-induced annealing during uniaxial tension of aluminum alloy, Scr. Mater. Vol. 75, pp. 58~61.