

전류펄스 인가된 T자형 Mg 합금 시편의 온도 구배 변화

송종한¹ · 박동준¹ · 천세호² · 유진영² · 이성호² · 이태경^{3,#}

Thermal Gradient Change of T-shaped Mg Alloy Specimen Exposed to Electropulses

J.H. Song, D.J. Park, S. Cheon, J. Yu, S.H. Lee, and T. Lee

(Received June 26, 2024 / Revised July 8, 2024 / Accepted July 9, 2024)

Abstract

Electropulsing treatment (EPT) has been developed as an alternative to furnace heat treatment (FHT) to exploit its engineering advantages in rapidly annealing metallic materials. Conventionally, the separation of thermal and athermal effects of EPT has been attempted by comparing EPT and FHT specimens processed under identical temperature and duration. However, this method inherently introduces experimental and measurement errors. This study proposes a novel approach to distinguish the thermal and athermal effects of EPT-processed metals using T-shaped specimen with two observation points, namely 'C' and 'D'. For verification, the thermal gradient of T-shaped Mg alloys was examined under various EPT conditions. The points C exhibited higher temperatures compared to those at points D at a given electric current density, because only the former received both thermal and athermal effects. It was confirmed from twelve specimens that the point C at an electric current density of 65 A·mm⁻² and point D at 70 A·mm⁻² exhibited similar temperatures. This developed method is expected to reduce measurement errors in distinguishing thermal and athermal effects, thus providing a deeper understanding of their quantitative contributions in future studies.

Keywords : Electropulsing, Magnesium, Thermal gradient, Temperature distribution, Measurement

1. 서론

전류펄스 인가법(electropulsing treatment, EPT)은 금속 소재에 전류를 펄스 형태로 인가하여 줄 열(Joule heating)을 통한 친환경·고효율·급속 가열을 유도하는 공정이다[1, 2]. EPT는 당초 전통적인 열처리 방식인 노 열처리(furnace heat treatment, FHT)의 단점을 극복하고자 제안되었으나 관련 연구가 진행되면서 EPT 고유의 특성, 이를테면 통전 소성(electroplasticity) 및 통전 이방성 (electropulsing anisotropy) 등이 보고되며 더욱 주목받고 있다[3-5].

특히 최근 연구에 따르면 금속 소재에 EPT를 적용 시 열 효과(thermal effect)와 더해 비열 효과(athermal effect)의 존재가 보고되고 있다[6, 7]. 비열 효과란 줄 열에 따른 열 에너지 이외의 방식으로 소재에 영향을 미치는 현상을 의미한다. 예를 들어 Oh 등[4]은 EPT 및 FHT 공정을 사용하여 Mg 합금을 각 1시간 동안 가열 후 재결정 거동을 분석하였다. 즉, 각 시편은 유사한 수준의 열 에너지를 전달 받았다. 그럼에도 불구하고 EPT를 적용한 합금은 완전 재결정에 가까운 93.4%의 재결정 분율을 기록한 반면, 동일 온도에서 동일 시간 FHT 처리된 합금의 재결정 분율은 84.4%에 불과하다는 사실이 확인되었다. 이는 EPT 공정에만 존재하는 비열 효과의 존재를 시사하는 사례이다.

상기 이유로 EPT에 따른 열 효과와 비열 효과를

1. 부산대학교 기계공학부, 석사과정

2. 부산대학교 기계공학부, 박사과정

3. 부산대학교 기계공학부, 부교수

#Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Pusan

National University, E-mail: taeklee@pnu.edu,

ORCID: 0000-0002-1589-3900

구별하는 것이 중요한 과제로 떠올랐으나, 그 방법에 있어서 획기적인 진전은 없는 실정이다.

대부분의 선행 연구[8-13]는 EPT와 FHT의 온도 및 적용 시간을 일치시키는 형식으로 이 문제를 해결하고자 하였다. 예를 들어 Li 등[11]은 전류 밀도 $40\text{--}60\text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ 구간에서 EPT를 수행하고 가열 온도를 측정 후, 동일 온도에서 FHT를 수행하여 두 그룹을 비교하였다.

그러나 이러한 시험 방식은 내재적 한계 탓에 일정 정도의 엄밀성을 포기할 수밖에 없다. 상술한 연구에서 EPT와 FHT 간 온도 범위는 15°C 이내로 비교적 작은 편이나, 두 공정 간 가열 양상 차이로 인해 다소의 오차 발생이 불가피하다. 일례로 FHT는 소재를 전기로에 투입 후 목표 온도까지 가열하는데 시간이 소요되며, 시편 크기가 증가할수록 이 시간은 기하급수적으로 증가한다. 반면 EPT는 특유의 높은 에너지 효율 덕에 단시간 내에 목표 온도에 도달한다. ZK60 Mg 합금을 대상으로 수행된 연구[14]에 따르면 $73\text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ 급 전류펄스 인가 시 평균 가열 속도는 $40^\circ\text{C}/\text{s}$ 이상으로 측정되었다. 또 한 가지 고려해야 하는 점은 두 공정의 온도 측정 방법 간 불일치이다. FHT의 경우 전기로에 포함된 온도 센서를 사용하거나, 보다 정밀한 측정이 필요할 경우 접촉식 온도계를 전기로 내부로 삽입한다. 반면 EPT는 공정 특성상 적외선 카메라와 같은 비접촉식 온도계를 사용하여야 하며 그 결과 측정 방법에 따른 오차가 발생할 수 있다.

상기 문제를 해결하기 위해, 본 연구진은 새로운 EPT 분석 방법을 최초로 제시한다. 이 방법은 비대칭 형상을 가지는 T자형 시편에 전류펄스를 인가함으로써 특정 영역만 전류가 통과하여 비열 효과를 선택적으로 적용하도록 설계하였다. 이를 통해 동일 소재 및 조건에서 열/비열 효과가 동시에 작용하는 영역과 열 효과만 작용하는 영역이 공존하게 함으로써 종래 대비 더욱 정밀한 연구가 가능하도록 의도하였다.

T자형 시편을 활용한 EPT 시험은 본 연구진이 최초로 제안하는 방법이므로 관련 연구가 전무하다. 따라서 본 연구는 T자형 시편에 전류펄스를 인가함으로써 형성되는 온도 구배에 대한 기초 데이터를 제시하는 것을 목표로 한다. 다양한 전류 밀도에 따른 각 시편의 가열 양상 및 측정 위치별 온도 분포를 분석하였다. 또한 열/비열 효과가 작용하는 영역

과 열 효과만 작용하는 영역이 동일한 온도를 유지하도록 하는 시험 조건을 탐색하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 소재는 상용 AZ31 Mg 합금 열연재이며 치수는 $57 \times 41 \times 16\text{ mm}^3$ 와 같다. 잔류 응력을 제거하고 용질을 균일하게 분포시키기 위해 해당 압연재를 400°C 에서 10시간 동안 균질화 처리 후 공냉하였다. 이 소재는 $60 \times 30 \times 20\text{ mm}^3$ 크기의 직육면체 형태로 가공되어 냉간 변형을 적용 받았다. 이때 소재의 압연 방향을 따라 10^{-3} s^{-1} 변형률로 6.0%의 누적 압축 변형을 적용하였다.

EPT는 직류 전원을 특정 조건에서 펄스 형태로 인가할 수 있도록 자체 제작된 장비를 통해 수행하였다. EPT 시험에 본 연구진이 개발한 T자형 시편을 활용하였으며, 이에 대해서는 3장에서 상세히 설명하였다. 시험 중 시편 온도는 열화상 카메라를 통해 실시간으로 측정하였다. 정확한 온도 측정을 위해 EPT시편 측정면에 흑색 내열성 페인트를 도포하였다. 시편 양 끝은 이동식 절연 그림에 고정하여 열 응력을 최소화하였다. 본 연구에 활용한 전류펄스의 경우, 펄스 시간 및 휴지 시간을 각 0.01 s로 고정하였으며 전류 밀도를 펄스 형태 변인으로 설정하였다. 본 연구의 시편은 J55, J58, J60, J65, J70, J77로 명명되었으며 각 숫자는 시편에 적용된 전류 밀도를 $\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$ 단위로 표기한 것이다. 각 조건의 전류 펄스를 3000회 반복 적용하며 온도 변화 양상 및 그 분포를 실시간 관측하였다.

3. 결과

Fig. 1에 본 연구진이 개발한 T자형 시편을 도시하였다. 해당 시편에는 A, B, C, D로 표기한 네 군데의 지점이 존재한다. A점 및 B점에 EPT 장비의 절연 그림이 연결되어 전류펄스가 인가되었다. 따라서 C점은 전류펄스의 영향을 직접적으로 받을 것으로 판단된다. 반면 전기회로 내 전류는 전기 저항이 최소화되는 경로를 따라 흐르는 경향을 가지므로, D점에는 전류펄스 인가에 기인한 줄 열 대신 전도열의 영향이 주도적일 것으로 사료된다. 즉, C점의 온도, 미세조직, 기계적 특성 변화는 EPT의 열/비열 효과에 모두 영향받는 반면, D점의 특성들은 열 효과에

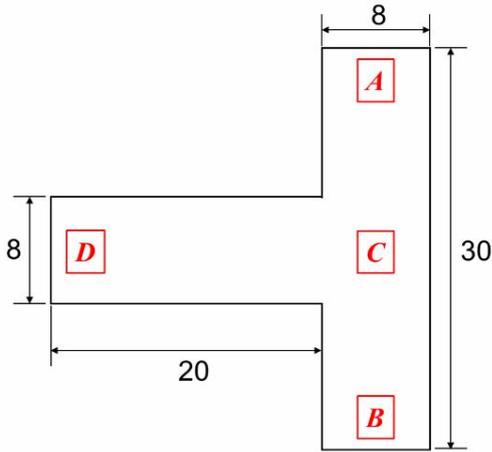


Fig. 1 Graphical scheme of T-shaped specimen developed in this study (unit: mm)

주도적으로 지배될 것으로 예상된다. 이 점은 향후 EPT에 따른 재료 특성 분석 연구에서 중요하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 2는 EPT 시편 중 J60의 온도 구배를 적외선 카메라를 활용하여 촬영한 결과이다. 전류 밀도와 무관하게 모든 시편은 유사한 온도 구배 양상을 보였다. A점 및 B점의 경우 상온에 가까운 온도를 유지하며, 이는 EPT 시험 중 해당 영역이 사실상 가열되지 않았음을 나타낸다. 이러한 결과는 해당 영역이 EPT 장비의 절연 그림에 연결되어 있기 때문이다. 절연 그림은 전류펄스 인가에 따른 줄 열의 영향을 받지 않을뿐더러 시편 대비 수십 배의 체적을 가지고 있어 전도열의 영향도 미미하다. 결과적으로 시편의 ACB 구간을 놓고 볼 때 C점이 최고 온도에 도달하며 A점 및 B점 방향으로 온도가 감소하는 포물선 형태의 온도 구배를 나타내게 된다. 이는 EPT 시험에 일반적으로 사용되는 I자형 시편에서도 관측되는 현상이다[10].

한편, T자형 시편의 CD 구간은 열전달 모델에 따른 전형적인 단방향 온도 구배를 보인다. C점은 시편 전 구간을 통틀어 최고 온도를 기록하였으며, J60 시편의 경우 그 값은 262°C이다. 해당 영역으로부터 D점까지 온도가 서서히 감소하여, D점의 경우 C점 대비 15% 낮은 온도인 221°C를 기록하였다. 상기 온도 분포는 열 효과에 따른 열전달에 기인하는 것으로 판단된다. 이는 각 지점의 최고 온도에 도달하는 시간을 통해서도 뒷받침된다. C점은 전류펄스 인가 후 55초 시점에 최고 온도에 도달한 반면, D점은

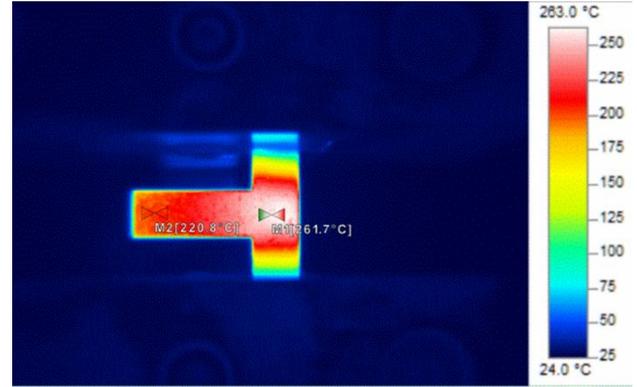


Fig. 2 Thermal gradient of T-shaped specimen subjected to EPT after 55 s. The EPT condition involved a direct current at an electric current density of $60 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ and a frequency of 50 Hz

61초에 최고 온도인 240°C를 기록하였다. 이 6초 간의 차이가 CD 구간의 열전달에 따른 지연으로 판단된다.

Fig. 3는 EPT 시 전류 밀도에 따른 C점 및 D점의 온도 변화를 나타낸다. 거시적인 온도 변화 양상의 경우 EPT 조건 및 측정 위치와 무관하게 전반적으로 유사한 가열-냉각 거동을 보인다(Fig. 3(a)). 모든 시편은 전류펄스 인가와 함께 최대 20초까지 급격히 가열된 후 상대적으로 완만한 가열 상태를 유지한다. 한편 전류펄스를 중단하면 각 가열 온도로부터 상온까지 지수함수 형태로 냉각되는 경향을 보인다. 이는 여러 선행연구[1-4, 14]에서 공통적으로 확인된 EPT 고유의 가열-냉각 거동이다.

전류 밀도와 측정 위치 변수는 EPT 시편의 최고 온도에도 밀접한 영향을 미친다(Fig. 3(b)). 먼저, 각 시편의 최고 온도는 전류 밀도에 비례하여 단조 증가한다. 이는 4.2절에서 상세히 논의되었다. 다음으로, 모든 전류 밀도 조건에서 C점이 D점 대비 높은 최고 온도를 기록하였으며 그 격차 또한 전류 밀도에 비례하여 증가한다. 이는 Fig. 2와 함께 논의한 대로 D점의 가열이 C점으로부터의 열전달에 영향받은 결과이기 때문이다.

4. 고찰

4.1 열/비열 효과 분리 조건 탐색

상기 분석을 통해 T자형 시편의 C점 및 D점에서 동일 수준의 가열 양상을 보이는 조건을 탐색하는

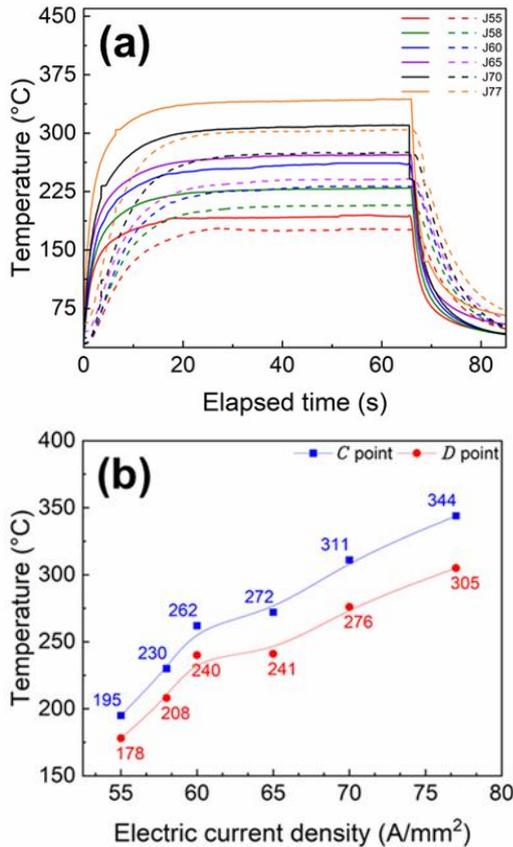


Fig. 3 Temperature variation of the investigated specimens: (a) temperature profiles; (b) maximum temperatures as a function of current density. In Fig. 3(a), the solid and dotted lines indicate the data obtained at the points C and D, respectively

데 성공하였다. 두 점 간 최고 온도 격차가 10°C 이하인 조건은 총 3쌍으로, J58의 C점과 J60의 D점, J65의 C점과 J70의 D점, J70의 C점과 J77의 D점에 해당한다. Fig. 4는 이중 두 번째 그룹의 온도 곡선을 강조하여 나타낸다. 해당 조건의 두 시편은 최고 온도 편차가 3.4°C로 가장 작았으며 가열 온도가 안정적으로 유지되는 구간(이하 ‘안정 구간’)도 전체 시험 시간의 74%에 달한다. 안정 구간의 평균 온도 또한 상당히 유사한 수준으로, J65 C점은 270°C, J70 D점은 271°C 를 기록하였다. 이는 통상적인 EPT-FHT 비교분석 대비 매우 적은 오차일 뿐 아니라, 1절에서 언급한 대부분의 측정 오차를 제거할 수 있는 조건이다. 따라서 추후 연구에서 상기 두 시편을 비교함으로써 열/비열 효과를 정량적으로 구분하는 체계적인 분석이 가능할 것으로 사료된다.

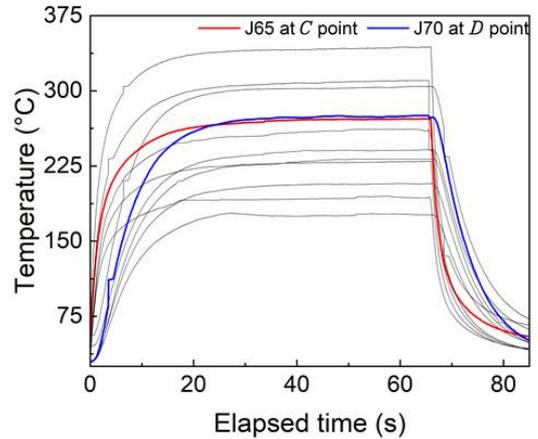


Fig. 4 Temperature profiles obtained at the point C of J65 sample and point D of J70 sample

4.2 전류 밀도 및 온도 간 정량 관계

3절에서 관측된 최고 온도와 전류 밀도 간 양의 상관 관계는 줄의 법칙(Joule’s law)에 기반하여 설명 가능하다. 전기 저항으로 작용하는 합금 시편을 따라 직류 전류가 흐를 때 줄 열에 의한 열 에너지 밀도(q_j)가 발생한다. 이 값이 $\eta(<1)$ 의 효율로 시편을 ΔT 만큼 가열하는 데 필요한 열 에너지 밀도(q)로 전환될 경우, 다음과 같이 표현 가능하다[4]:

$$q = \eta q_j \tag{1a}$$

$$\Delta T = \eta \frac{\rho_c \Delta t}{c\rho} J^2 \tag{1b}$$

ρ_c 는 소재의 비저항, Δt 는 전류인가 시간, c 는 비열, ρ 는 밀도, J 는 상술한 EPT 전류 밀도를 의미한다.

다른 접근법으로, 에너지 전환 효율 대신 열 손실(q_L)항을 고려할 수도 있다. 이는 다음과 같이 표현 가능하다:

$$q = q_j - q_L \tag{2a}$$

$$\Delta T = \frac{\rho_c \Delta t}{c\rho + hA_s} J^2 \tag{2b}$$

h 는 열 관류율, A_s 는 시편의 외피 면적을 의미한다. 식 (1) 및 식 (2) 모두 EPT에 의한 온도 상승분이 전류 밀도의 자승과 양의 상관관계를 지님을 나타내며, 이를 통해 Fig. 3(b)에서 제시된 결과를 설명할 수 있다.

구체적으로, 본 연구에서 사용한 모든 시편은 동

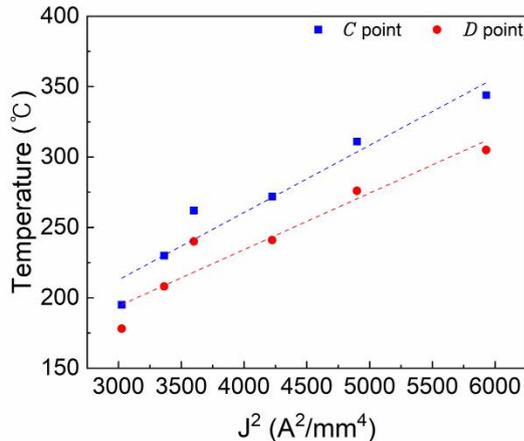


Fig. 5 The maximum temperature of the investigated alloys as a function of J^2 . The lines indicate the linear regression of data collected at points C and D, respectively

일한 모재에서 동일한 크기로 가공한 것이므로 식 (1) 및 식 (2)의 c , ρ_e , ρ , h , A_s 변인은 상수로 간주할 수 있다. 또한 전류펄스 인가 시간을 동일하게 유지 하였으므로 Δt 또한 상수(= 65 s)가 된다. 따라서 식 (1b) 및 (2b)는 전류 밀도의 자승에 대한 일차함수로 단순화할 수 있다. Fig. 5는 상기 추론에 따라 본 연구에서 획득한 각 시편의 최고 온도를 전류 밀도의 자승(J^2)에 대해 재배열한 것이다. C점 및 D점의 최고 온도 데이터를 선형 회귀 시 R^2 값은 각각 0.937 및 0.918로 측정되었다. 표준편차의 경우 두 그룹 모두에서 13°C로 산출되었다. 상기 결과를 볼 때 EPT의 최고 온도를 예측하고자 전류 밀도의 자승 수치를 활용하는 것은 타당성이 있다고 할 수 있다.

그럼에도 불구하고 식 (1) 및 식 (2)를 통해 EPT에 의한 전 구간 비선형 온도 변화를 예측하는 것은 무리가 있다. 먼저, 상술한 가정과 달리 각 변수들은 온도에 따라 변화하게 된다. 예를 들어 Yang 등[15]은 AZ31 Mg 합금의 밀도, 비열, 열 전도도 등의 물리량이 온도에 직접적인 영향을 받는다고 보고하였다. 해당 연구에서 측정 온도가 96°C부터 113°C까지 상승할 때 열 전도도는 $25 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{C})^{-1}$ 에서 $400 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{C})^{-1}$ 으로 급증하였다. 다음으로, 전류를 펄스 형태로 인가하는 EPT 공정 특성 상 단순한 모델로 복잡한 비선형 온도 곡선을 해석하는 데엔 한계가 있다. 이에 대한 대안의 하나로, 기계학습을 도입하여 EPT 공정에 따른 복잡한 가열-냉각 거동을 예측하는 방안이 제안된 바 있다[14]. 같은 맥락에서,

EPT에 의한 온도 구배 역시 기계학습과 수치해석을 결합하여 예측 및 분석하는 전략이 유효할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구는 EPT 공정에 의해 야기되는 열 효과와 비열 효과를 구분하기 위한 새로운 방안으로, T자형 시편을 활용하는 분석을 제시하였다. 해당 개념에 대한 기초 연구를 수행하기 위해 전류 밀도에 따른 시편 내 위치별 온도 변화 및 온도 구배를 관측하였다. T자형 시편의 A점 및 B점은 절연 그림과 연결되어 가열에서 배제된다. C점은 전류펄스의 직접적인 영향을 받아 시편 내 최고 온도에 도달하며 열/비열 효과에 모두 노출된다. 반면 D점은 C점으로부터의 열 전달에 의해 가열되므로 최고 도달 온도 및 가열 속도가 상대적으로 낮으며 비열 효과를 배제할 수 있을 것으로 사료된다. 모든 시편은 전류펄스 인가와 동시에 고속 가열되어 목표 온도에서 안정적으로 유지되다가, 전류펄스 중단 이후 상온까지 지수함수 형태로 냉각된다. 전류 밀도와 비례하여 각 시편의 최고 온도는 증가하며 이는 줄의 법칙을 통해 정량적으로 해석 가능하다. C점의 최고 온도는 항상 D점보다 높고 그 격차 또한 전류 밀도에 비례한다. J65 C점 및 J70 D점은 매우 유사한 가열 거동을 보이므로, 향후 열 효과 및 비열 효과를 분리 분석하는 데 유용할 것으로 기대된다.

사 사

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음

REFERENCES

- [1] M. Kim, S.H. Lee, J. Yu, S. Cheon, S. Byun, C.S. Lee, T. Lee, 2023, Enhanced kinetics of microstructural evolution in Ti-6Al-4V through electropulsing treatment, *J. Mater. Res. Technol.* Vol. 26, pp. 8500~8508. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.170>
- [2] S.H. Lee, J. Yu, S. Cheon, J.G. Kim, T. Lee, 2024, Exploiting Electropulses to Optimize Microstructure

- in Ti-6Al-4V Fabricated by Selective Laser Melting, *Met. Mater. Int.* Vol. 30, pp. 886~894.
<https://doi.org/10.1007/s12540-023-01544-1>
- [3] M. Lee, J. Yu, M.H. Bae, J.W. Won, T. Lee, 2021, Accelerated recrystallization behavior of commercially pure titanium subjected to an alternating-current electropulse, *J. Mater. Res. Technol.* Vol. 15, pp. 5706~5711.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.045>
- [4] S.J. Oh, J. Yu, S. Cheon, S.H. Lee, S.-Y. Lee, T. Lee, 2023, Anisotropic microstructural evolutions of extruded ZK60 Mg alloy subjected to electropulsing treatment, *J. Mater. Res. Technol.* Vol. 26, pp. 3322~3331.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.103>
- [5] H.-J. Jeong, M.-J. Kim, S.-J. Choi, J.-W. Park, H. Choi, V.T. Luu, S.-T. Hong, H.N. Han, 2020, Microstructure reset-based self-healing method using sub-second electric pulsing for metallic materials, *Appl. Mater. Today* Vol. 20, p. 100755.
<https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100755>
- [6] M.-J. Kim, S. Yoon, S. Park, H.-J. Jeong, J.-W. Park, K. Kim, J. Jo, T. Heo, S.-T. Hong, S.H. Cho, Y.-K. Kwon, I.-S. Choi, M. Kim, H.N. Han, 2020, Elucidating the origin of electroplasticity in metallic materials, *Appl. Mater. Today* Vol. 21, pp. 100874~100874.
<https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100874>
- [7] G. Zhao, J. Fan, H. Zhang, Q. Zhang, J. Yang, H. Dong, B. Xu, 2018, Exceptional mechanical properties of ultra-fine grain AZ31 alloy by the combined processing of ECAP, rolling and EPT, *Mater. Sci. Eng. A* Vol. 731, pp. 54~60.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.112>
- [8] Y. Liu, J. Fan, H. Zhang, W. Jin, H. Dong, B. Xu, 2015, Recrystallization and microstructure evolution of the rolled Mg-3Al-1Zn alloy strips under electropulsing treatment, *J. Alloy. Compd.* Vol. 622, pp. 229~235.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.10.062>
- [9] Z. Lu, C. Guo, P. Li, Z. Wang, Y. Chang, G. Tang, F. Jiang, 2017, Effect of electropulsing treatment on microstructure and mechanical properties of intermetallic Al3Ti alloy, *J. Alloy. Compd.* Vol. 708, pp. 834~843.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.085>
- [10] K. Chen, L. Zhan, W. Yu, 2021, Rapidly modifying microstructure and mechanical properties of AA7150 Al alloy processed with electropulsing treatment, *J. Mater. Sci. Technol.* Vol. 95, pp. 172~179.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.03.060>
- [11] X. Li, B. Hu, Q. Guo, X. Wu, H. Sui, L. Xiang, H. Luo, 2024, Characterizing changes in microstructures, mechanical and magnetic properties of non-oriented silicon steel due to pulsed current, *Mater. Charact.* Vol. 211, p. 113904.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.113904>
- [12] C. L. Yang, H. J. Yang, Z. J. Zhang, Z. F. Zhang, 2018, Recovery of tensile properties of twinning-induced plasticity steel via electropulsing induced void healing, *Scr. Mater.* Vol. 147, pp. 88~92.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.01.008>
- [13] Z. Deng, X. Li, S. Wang, X. Li, X. Xiao, 2022, Improved mechanical properties of Mg-1Gd alloy by cold rolling and electropulse treatment, *Mater. Lett.* Vol. 327, p. 133012.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133012>
- [14] J. Yu, M. Lee, Y. H. Moon, Y. Noh, T. Lee, 2020, Prediction of Electropulse-Induced Nonlinear Temperature Variation of Mg Alloy Based on Machine Learning, *Korean J. Met. Mater.* Vol. 58, pp. 413~422.
<http://doi.org/10.3365/KJMM.2020.58.6.413>
- [15] H. Yang, L. Huang, M. Zhan, 2010, Coupled thermo-mechanical FE simulation of the hot splitting spinning process of magnesium alloy AZ31, *Comput. Mater. Sci.* Vol. 47, pp. 857~866.
<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.11.014>