

# 통전압접을 활용한 알루미늄 소재 간 고상접합에 관한 연구

최호욱<sup>1</sup> · 이시환<sup>1</sup> · 김이재<sup>1</sup> · 홍성태<sup>2</sup> · 한흥남<sup>3, #</sup>

## Study on Electrically Assisted Pressure Solid State Joining Between Aluminum Alloys

H. Choi, S. Lee, Y. Kim, S.-T. Hong, H. N. Han

(Received August 2, 2022 / Revised September 13, 2022 / Accepted September 14, 2022)

### Abstract

Electrically assisted pressure joining (EAPJ) utilizes electric current-induced kinetic enhancement to achieve solid state diffusion bonding within a short time. In this study, aluminum alloy specimens, which are known as a hard-to-weld metal, were successfully solid-state joined through EAPJ. The bonding process was performed in two ways: continuous direct current (CDC), which applies relatively low current density, and pulsed direct current (PDC), which applies high current density. It was observed that the bonding strength was higher in PDC than in CDC. The microstructure of the joint was characterized using 3D X-ray microscopy (XRM) and electron backscatter diffraction (EBSD).

**Keywords:** Electrically assisted pressure joining, Electropulsing, Electric current-induced kinetic enhancement, Aluminum alloy.

### 1. 서론

일반적인 금속의 접합 방식은 용접 (Fusion welding) 과 고상접합 (Solid state joining)으로 나눌 수 있다. 용접은 금속의 용점 이상의 온도로 가열시켜 액체 상태에서 접합하는 방법으로, 일반적으로 아크나 레이저 등의 강한 열원이 필요하다. 이러한 용접은 매우 짧은 시간 안에 이루어질 수 있어서 금속을 접합할 때 가장 널리 쓰이는 방식이다. 그러나 용접으로 접합하기 어려운 난용접 (hard-to-weld) 금속들도 존재한다.

난용접 금속은 용접 시 고온 균열이 발생하거나, 접합면에 산화층이 형성되어 접합 강도를 떨어트리거나, 특정 원소가 편석되어 접합부의 물성이 저하되는 등의 문제가 있다 [1-3]. 특히 알루미늄은 잘 알려진 난용접 금속으로, 온도에 따른 수소 용해도

차이가 크다고 알려져 있다. 일반적으로 사용되는 아크 용접의 경우, 아크 직하에서의 수소 용해도와 용접에서의 수소 용해도 차이가 철의 약 4 배 정도로 상당히 크기 때문에, 액상에 과용해된 수소는 용접부 응고 시 기공이나 고온 균열을 형성하여 결국 용접부를 취약하게 만드는 주 원인이 된다 [4-7].

따라서, 이러한 난용접 금속의 접합은 경우에 용접보다는 마찰교반접합이나 확산접합등의 고상접합방법을 활용하여 이루어진다. 마찰교반접합은 고속으로 회전하는 공구를 접합체에 삽입하여 재료의 큰 소성유동에 의해 접합을 이루는 방식으로, 접합체의 형상에 대한 제한이 있고 공구흔이 남는다는 단점이 있다 [8]. 확산접합은 금속 재료를 밀착시켜 접합면 사이에서 발생하는 원자의 확산을 이용하는 방법으로, 견고한 접합부 형성이 가능하나 접합시간이 상대적으로 오래 걸린다는 단점이 있다 [9, 10].

최근 금속 재료에 일정 밀도 이상의 전류가 인가되었을 때 원자확산이 가속화되는 전류유기 키네틱 향상 (Electric current-induced kinetic enhancement) 효과

1. 서울대학교 재료공학부, 대학원생

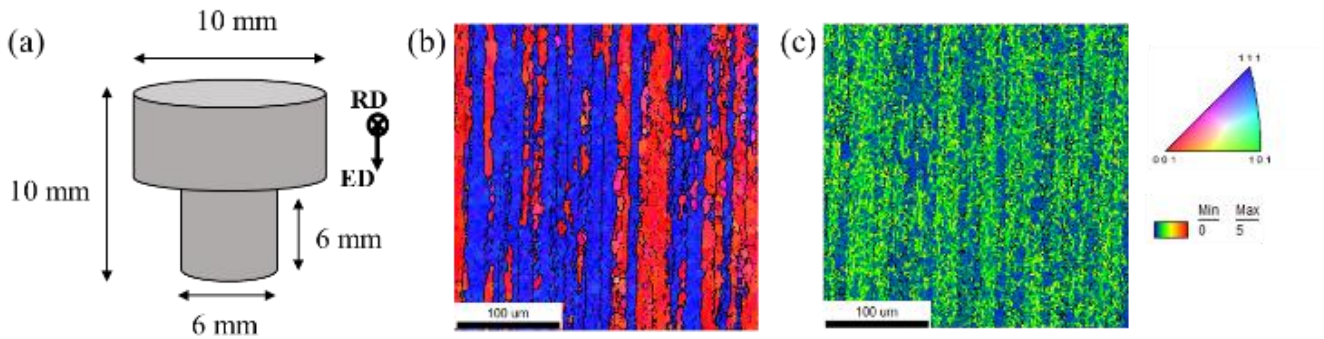
2. 울산대학교 기계공학부, 교수

3. 서울대학교 재료공학부, 교수

# Corresponding Author: Professor, Seoul National University, Materials

Science and Engineering, E-mail: hnhan@snu.ac.kr

ORCID: 0000-0001-5271-9023



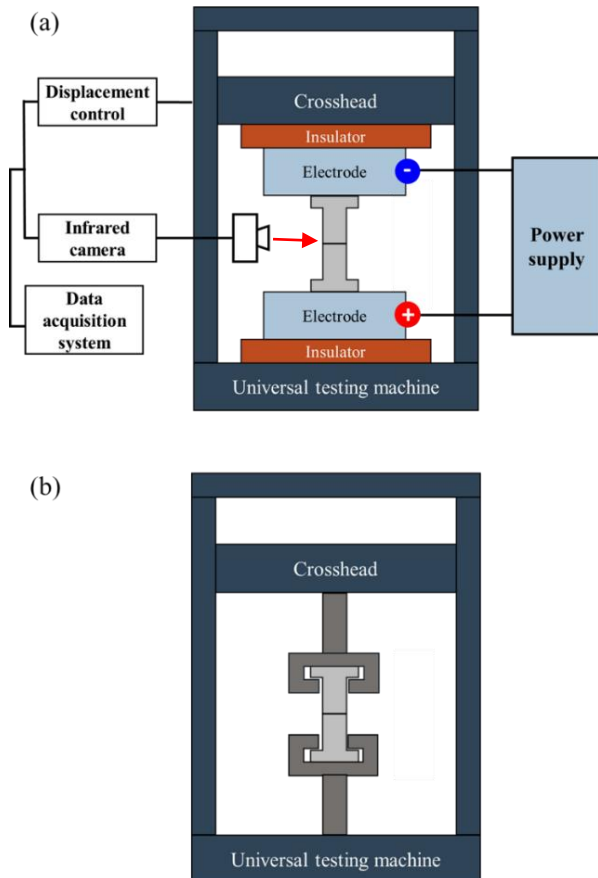
**Fig. 1** (a) Specimen shape and dimensions for electrically assisted pressure joining. (b) EBSD ED map and (c) KAM map of initial microstructure.

는 많은 연구에서 보고되고 있다 [11-17]. 이를 활용하여 짧은 시간에 고밀도 전류를 인가하여 고상확산 접합을 유도하는 통전압접 (Electrically assisted pressure joining, EAPJ) 방법이 개발되었고, 이미 난용

접 금속인 티타늄 동종접합 [18], 고엔트로피합금 동종접합 [19]등이 이 통전압접 방식을 통해 성공적으로 이루어졌다고 보고된 바 있다. 본 연구에서는 또 다른 난용접 금속으로 알려진 알루미늄 합금을 통전접합방식으로 고상접합하고, 전류 인가 방식에 따라 접합 강도 및 미세구조를 비교·분석하고자 한다.

## 2. 재료 및 실험방법

본 연구에 쓰인 알루미늄 합금은 AA6061 로, 접합 전 상태는 T6 열처리된 상용합금이다. 해당 합금의 조성을 Table 1 에 기재하였고, 접합 시험에 사용된 시편의 형상과 치수를 Fig. 1(a)에 나타내었다. 이 시편의 형상은 접합 강도 평가를 용이하게 하기 위해 고안되었다.



**Fig. 2** Schematic diagram of (a) electrically assisted pressure joining and (b) measurement of joining strength.

**Table 1** Composition of AA6061 (weight %)

Mg	Si	Fe	Cu	Cr	Mn	Al
0.81	0.79	0.45	0.23	0.18	0.13	Bal.

통전압접 및 접합강도평가 시험의 모식도를 Fig. 2 에 나타내었다. 통전압접은 재료만능시험기(Universal testing machine, INSTRON 5582, INSTRON, USA) 의 압축 모드를 활용하여 이루어졌으며, 접합에 필요한 전류는 직류전원공급장치 (VADAL SP-400MTP, HYOS UNG, South Korea)를 통해 공급되었다. 접합 도중의 온도 이력은 시편 표면에 흑체 스프레이를 도포한 후, 적외선열화상카메라 (FLIR T430sc, FLIR, Sweden) 로 측정되었다. 시편끼리 접촉하는 계면에서는 계면

저항으로 인해 줄 발열이 더욱 크게 일어나는데, 가장 높은 온도가 측정되는 접합면의 온도 이력을 기록하였다. 접합된 시편의 접합 강도는 맞춤 제작된 지그를 장착한 재료만능시험기 (INSTRON 5584, INSTRON, USA)의 인장모드에서 측정되었다.

초기 시편과 접합 이후 시편들의 물성을 비교하기 위해 접합면을 가로질러 경도가 측정되었다. 경도 측정은 비커스 경도 측정 방식으로 수행되었고, 0.3kg의 힘으로 압입 후 10초간 유지하였다.

미세구조 분석은 전계방출 주사전자현미경 (Field emission scanning electron microscope (FE-SEM), SU70, Hitachi, Japan) 에서 전자후방산란회절 (Electron backscatter diffraction (EBSD), EDAX/TSL, Hikari, USA) 장비를 활용하여 이루어졌다. 미세구조 분석 시편은 사포 연마 후 최종적으로 콜로이달 용액 ( $0.02\mu\text{m}$ )을 사용하여 기계적 연마되었다. 또한, 3차원 X선 단층 촬영 이미징 (3D X-ray microscopy (XRM), Xradia 620 Versa, Carl Zeiss, USA) 장비를 활용하여 접합부를 시각화하였다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에 쓰인 AA6061 시편은 압출로 제작되었기 때문에, Fig. 1(b)에 나타난 초기 조직의 IPF (Inverse pole figure) ED (Extrusion direction) map 을 보면, 압출 (ED) 방향으로 결정립들이 길게 늘어서 있고 (100) 과 (111) 방위 집합조직이 주로 발달하였음을 확인할 수 있다. Fig. 1(c)에서 초기 조직의 KAM (Kernel average misorientation) 을 확인한 결과, 아직 풀림 (annealing)이 완벽히 일어나지 않은 압출 조직으로 보인다.

본 연구에서는 통전접합 시 전류 인가 방식을 CDC (Continuous direct current)와 PDC (Pulsed direct current) 두 가지로 설정하고, 이 두 방식의 온도 이력이 유사하도록 PDC 의 인가 시간 및 전류 밀도를 설정하였다. 이 두가지 방식은 접합 시간, 접합 시 변형 속도 및 변형량은 모두 같지만, 전류 밀도와 인가 형태가 다르도록 고안되었다. 두 방식 모두 접합 전 200MPa 의 압축 응력 하에서 시작하여 13mm/min 의 속도로 가압하며 30 초간 전류를 인가하여 접합하였으나, 상대적으로 전류 밀도가 낮은 CDC 의 경우  $74.8\text{A}/\text{mm}^2$ 의 전류 밀도의 전류를 인가하여 승온시킨 후  $37.4\text{A}/\text{mm}^2$ 로 전류 밀도를 감소시켜

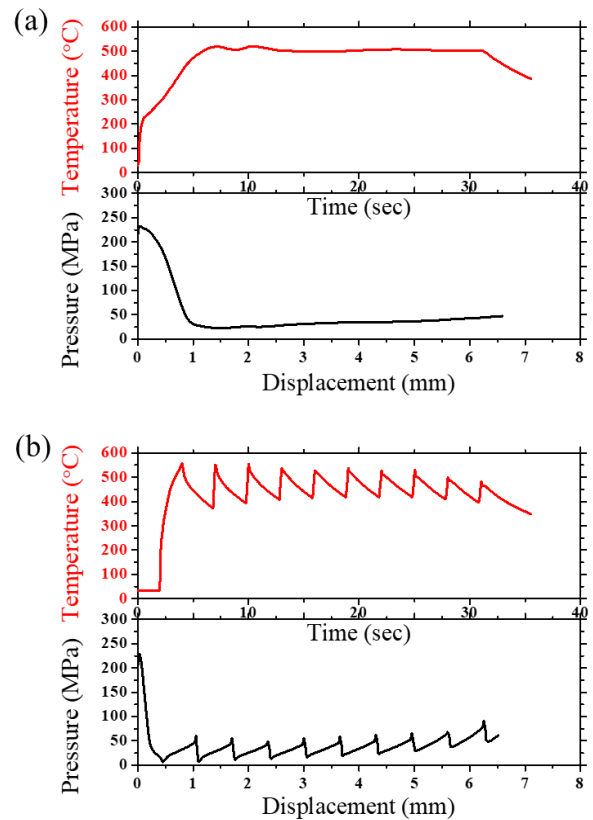


Fig. 3 Temperature and pressure history during electrically assisted pressure joining: (a) CDC and (b) PDC.

약  $510^{\circ}\text{C}$ 로 유지하였다. 반면 상대적으로 전류 밀도가 높은 PDC 의 경우 첫 펄스는  $118\text{A}/\text{mm}^2$ 을 2 초간 인가한 후, 이후  $213\text{A}/\text{mm}^2$ 의 펄스를 0.2 초간 인가하였다. 총 10 번의 펄스 전류를 인가하였고, 매 펄스 간 간격 (휴지 시간)은 2.8 초였다. 온도 및 압력 이력을 Fig. 3 에 도시하였다.

다음으로, 이 두가지 방식으로 접합된 시편의 접합 강도를 측정하였다. Fig. 4(a) 에 나타내었듯이, CDC 와 PDC 두 가지 방식으로 접합한 시편 모두 탄성변형 영역을 지나 소성변형 영역에서 파단이 일어났음을 확인할 수 있었다. 동일 조건으로 접합 강도를 3 회 이상 측정하여 평균값을 구한 결과, CDC 의 접합 강도는  $33.7\pm 1.8\text{MPa}$  였고, PDC 의 접합 강도는 이 보다 높은  $75.6\pm 21.3\text{MPa}$  였다.

CDC 의 경우가 PDC 보다 접합 강도가 낮게 측정되었는데, 이 원인을 분석하기 위해 XRM 을 활용하

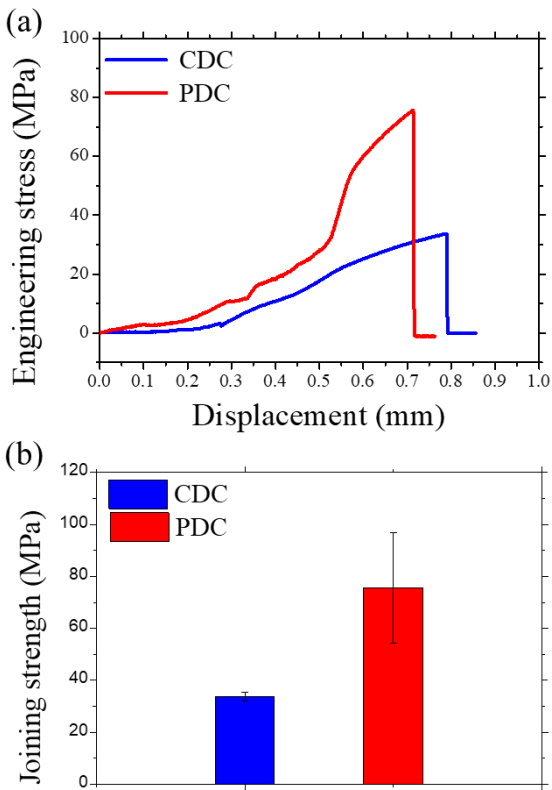


Fig. 4 (a) Displacement-stress curve and (b) average joining strength of CDC and PDC

여 접합부를 단층촬영 하였고, ED 방향 투영 이미지 및 RD (Radial direction) 방향 투영 이미지를 Fig. 5 에 도시하였다. Fig. 5 의 일부분에서 어두운 영역이 관찰되었는데 (붉은색으로 표시됨), 이는 X 선이 빈 공간을 통과하며 신호 강도가 낮아져 보이는 것으로, CDC 의 경우 접합이 완전히 이루어지지 않은 부분이 존재하고, 이로 인해 접합 강도가 낮게 측정되었다고 판단된다.

다음으로 접합부에서 접합면을 기준으로 ED 방향을 따라 경도를 측정하였다 (Fig. 6). CDC 와 PDC 모두 접합면으로부터의 거리와 관계없이 경도는 비슷한 값을 보였고, 초기 시편 ( $114.6 \pm 5.2$  Hv)에 비하여 상당히 연화되었음을 ( $< 80$ Hv) 확인할 수 있었다. 또한, PDC 의 경우, CDC 보다 경도 저하가 크게 일어났다. 이를 설명하기 위해, EBSD 를 활용하여 CDC 및 PDC 접합부의 미세구조를 분석하였다.

우선 먼저 Fig. 7 (a)와 (b)를 보이듯이, 뚜렷한 집합 조직의 변화가 관찰된다. (100)과 (111)방위가 주로 발달했던 초기 압출 조직에서, 접합 이후에는 특정

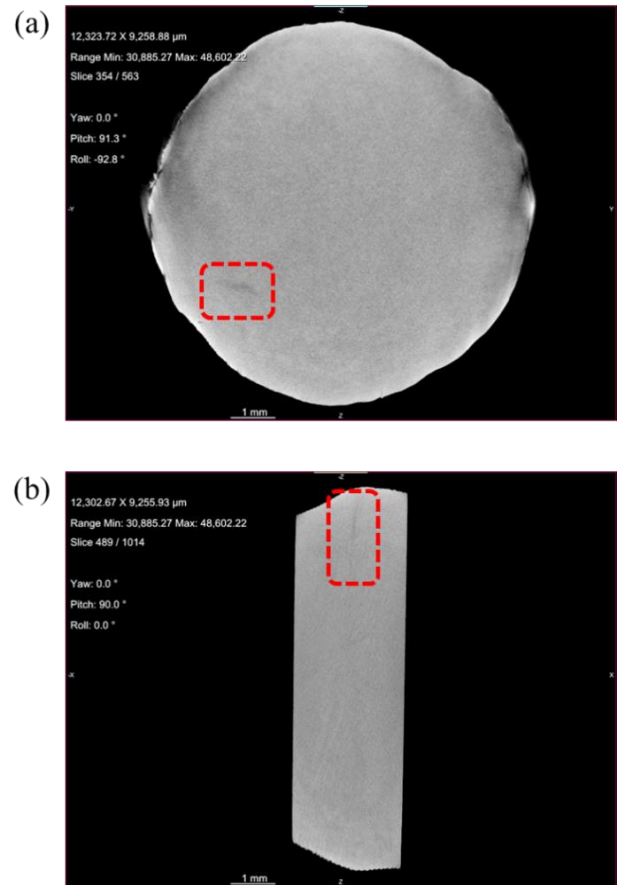


Fig. 5 (a) ED and (b) RD projection image obtained by XRM.

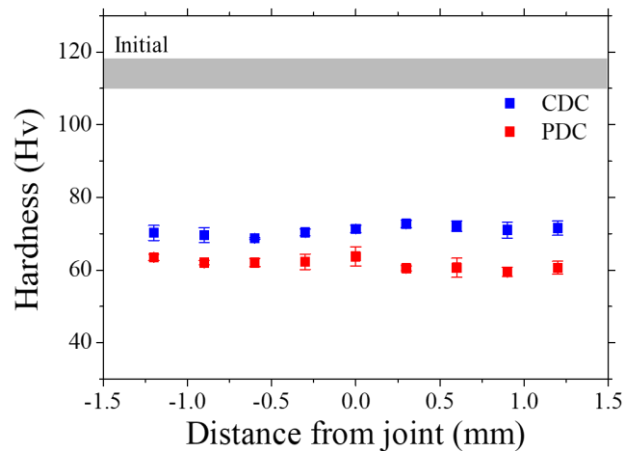


Fig. 6 Hardness profile of CDC and PDC across the joint line.

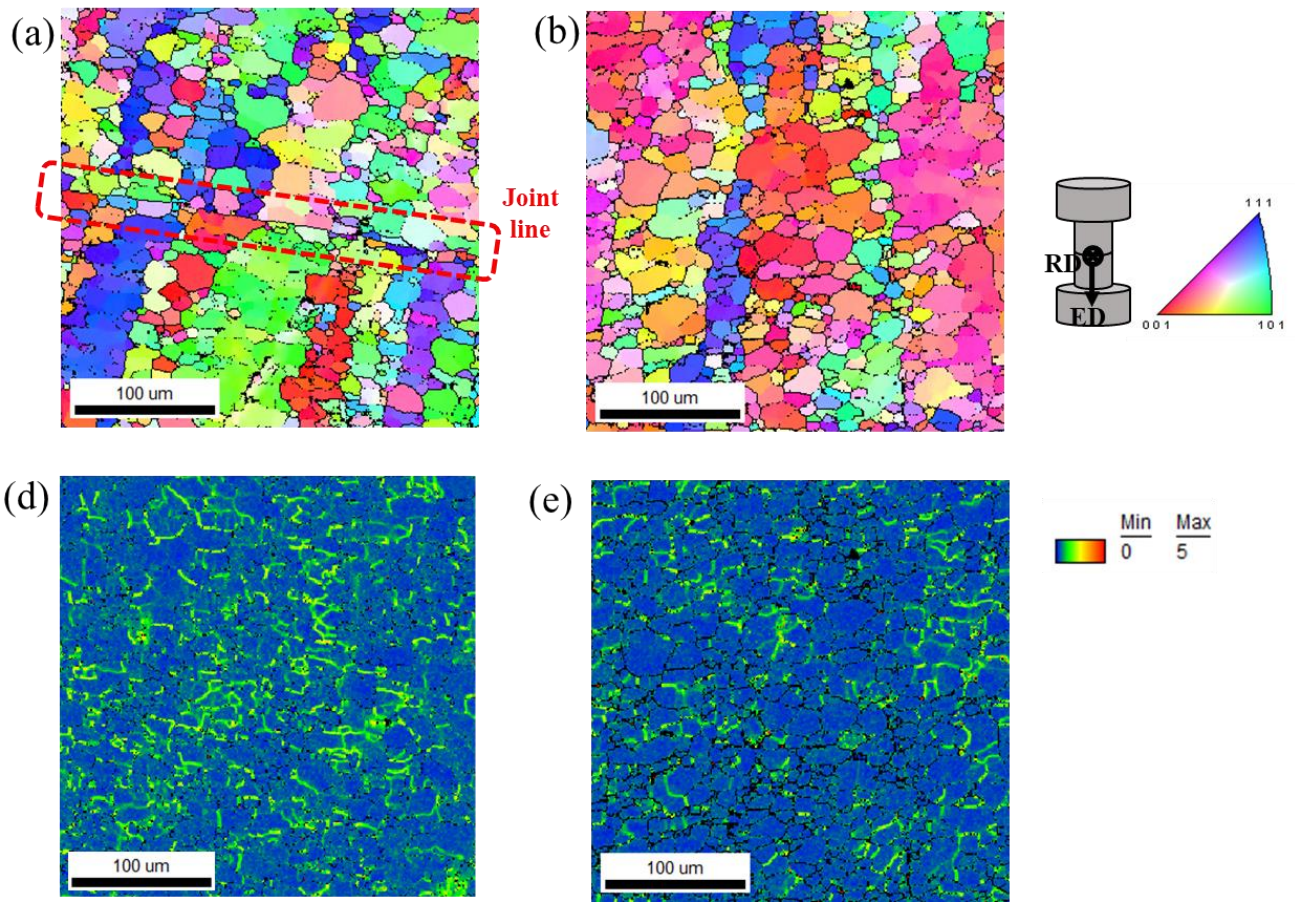


Fig. 7 IPF ED map of (a) CDC and (b) PDC. KAM map of (c) CDC and (d) PDC.

방위가 거의 발달하지 않은 무질서한 (random) 집합 조직으로 변화하였다. 이는 접합부에서 재결정이 일어난 결과이며, ED 방향으로 길게 늘어서 있던 결정립 모양이 ED 방향으로 약간 압축된 등축정 (polygonal) 형상에 가깝게 변화하였다. 이는 재결정과 ED 방향으로의 압축변형이 동시에 영향을 미친 결과라고 사료된다.

Fig. 7 (a)에서 CDC 접합부의 경우 경계면이 일부에서 관찰되는데, Fig. 5에서 분석했듯이 접합이 완벽히 이루어지지 않았기 때문으로 생각된다. PDC 접합부에서는 경계면이 잘 구분되지 않는 것으로 보아, PDC 방식이 CDC 보다 더욱 견고한 접합을 이루었다고 할 수 있다. 더하여, CDC 와 PDC 방식의 KAM map (Fig. 7 (c), (d))을 보면, 두 경우 모두 초기 조직보다 KAM 이 감소했는데, PDC 방식에서 상대적으로 더 많이 감소하였음을 확인할 수 있다. 이것은 접합 시의 평균 온도는 저전류밀도를 인가한 CDC 방식이 다소 높음에도 불구하고, 상대적으로 고전류밀도를

인가한 PDC 방식에서 미세구조의 풀림이 더욱 활발하게 일어났음을 의미한다. 이는 전류유기 키네틱향상에 의한 결과로 판단할 수 있다.

전류유기 키네틱향상 현상이란, 금속 재료에 고밀도 전류를 인가하였을 때, 풀림, 재결정, 석출 등이 상당히 빠르게 진행되는 현상으로 정의된다 [20-23]. 이는 전류 인가 시 결합 부근의 전하 불균형이 생겨 원자 결합력이 약화되기 때문에 일어난다고 밝혀졌다 [24]. 이러한 전류유기 키네틱 향상은 활성화 에너지 감소량이나 유효온도 (Effective temperature) 상승량이 전류밀도의 제곱근에 비례한다는 최근 연구 결과 [25]에서 알 수 있듯이, 전류 밀도와 양의 상관관계를 가진다. 결국, PDC 의 경우 CDC 방식에 비해 평균 온도는 낮지만 전류 밀도가 크기 때문에 전류유기 키네틱향상 효과가 주요하게 작용하여 접합면에서 구성 원자의 확산이 더욱 활발하게 일어나 접합 강도가 더 높고 미세구조의 풀림도 더 많이 일어난 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 난용접 소재인 알루미늄 합금 AA6061 을 통전압접 방식으로 30 초만에 고상접합에 성공하였다. 통전압접 시 인가한 전류의 형태에 따라 상대적으로 낮은 전류밀도의 일정한 전류를 인가하는 CDC 와, 상대적으로 높은 전류밀도의 펄스 전류를 인가하는 PDC, 두 가지 방식으로 나누어 접합 강도 및 미세구조를 비교하였다. 이 두 방식의 온도 이력이 유사하도록 전류밀도와 인가시간이 설계되었다. CDC 의 경우, PDC 보다 접합강도가 낮으며 일부의 영역에서 접합이 잘 이루어 지지 않은 것을 XRM 단층촬영과 EBSD 분석을 통해 확인하였다. 반면, 접합 강도가 높은 PDC 의 경우에는 접합 계면이 거의 구분되지 않았고, KAM 도 CDC 보다 더욱 낮아진 것을 확인하였다. 위와 같은 결과는 상대적으로 높은 전류 밀도를 인가하는 PDC 방식에서 전류유기 키네틱 향상이 더 활발히 일어났기 때문으로 판단된다.

#### 후 기

이 논문은 포스코청암재단의 포스코사이언스펠로우십의 지원을 받아 수행하였으며, 또한 정부의 재원으로 한국산업기술평화지원의 지원(P0002019) 및 한국연구재단의 지원 (2020R1A5A6017701, 2021R1A2C3005096)으로 이루어짐.

#### REFERENCES

- [1] A.P. Costa, L.s. Quintino, M. Greitmann, 2003, Laser beam welding hard metals to steel, *J. of Mater. Process. Technol.* Vol. 141, No. 2 pp. 163-173.  
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00954-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00954-8)
- [2] Y Y.B. Zhang, D.Y. Ren, 2003, Distribution of strong carbide forming elements in hard facing weld metal, *Mater. Sci. and Technol.* Vol. 19, No. 8, pp. 1029-1032.  
<https://doi.org/10.1179/026708303225004567>
- [3] J. Xu, Y. Ding, Y. Gao, H. Wang, Y. Hu, D. Zhang, 2021, Grain refinement and crack inhibition of hard-to-weld Inconel 738 alloy by altering the scanning strategy during selective laser melting, *Mater. & Design* Vol. 209 pp. 109940.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109940>
- [4] C. H. Lee, R. W. Chang 1992, Weldability of Al Alloys, *J. of the Kor. Welding Society* Vol. 10, No. 3, pp. 1-12.
- [5] J. H. Kim, D. H. Park, 1994, Porosity in Thick Aluminium Alloy Welds (Causes and Prevention), *J. of the Kor. Welding Society* Vol. 12, No. 1, pp. 7-15.
- [6] M.M. Atabaki, M. Nikodinovski, P. Chenier, J. Ma, M. Harooni, R. Kovacevic, 2014, Welding of Aluminum Alloys to Steels: An Overview, *J. for Manufacturing Sci. and Production* Vol. 14, No. 2, pp. 59-78.  
<https://doi.org/10.1515/jmsp-2014-0007>.
- [7] C.-J. Lee, S.-K. Lee, S.-B. Lee, B.-M. Kim, 2010, Characteristic of Mechanical Clinching for Al5052 to High-Strength Steel, *Trans. of the Kor. Society of Mechanical Eng. A* Vol. 34, No. 8, pp. 997-1006.  
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2010.34.8.997>
- [8] S. J. Kim, C. K. Lee, S. S. Kim, 2003, Development and Application of Friction Stir Welding Technology, *Trans. of Mater. Process.* Vol. 12, No. 6, pp. 529-535.  
<https://doi.org/10.5228/KSP.2003.12.6.529>
- [9] E. Catalano, D.L. Ornellas, 1975, Diffusion bonding of gold to gold, United States.
- [10] C.E. Cataldo, 1963, Diffusion bonding of dissimilar metals, NASA Technical Memorandum pp. 3-6.
- [11] H. Conrad, 2000, Electroplasticity in metals and ceramics, *Mater. Sci. and Eng.: A* Vol. 287, No. 2, pp. 276-287.  
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00786-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00786-3)
- [12] H. Conrad, A.F. Sprecher, W.D. Cao, X.P. Lu, 1990, Electroplasticity—the effect of electricity on the mechanical properties of metals, *JOM* Vol. 42, No. 9, pp. 28-33.  
<https://doi.org/10.1007/BF03221075>
- [13] H.-D. Nguyen-Tran, H.-S. Oh, S.-T. Hong, H.N. Han, J. Cao, S.-H. Ahn, D.-M. Chun, 2015, A review of electrically-assisted manufacturing, *Int. J. of Precision Eng. and Manufacturing-Green Technol.* Vol. 2, No. 4, pp. 365-376.  
<https://doi.org/10.1007/s40684-015-0045-4>
- [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. of Plasticity* Vol. 94, pp. 148-170.

- <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2016.09.010>
- [15] K.-H. Yeom, S.-T. Hong, Y.-H. Jeong, K.-S. Han, N. Han Heung, M.-J. Kim, 2015, 5 Evaluation of Effect of Electric Energy Density on the Electroplasticity of 5052-H32 Aluminum Alloys, *Trans. of the Kor. Society of Mechanical Eng. A* Vol. 39, No. 7, pp. 659-663.  
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.7.659>
- [16] J. Feng, C. Hang, Y. Tian, B. Liu, C. Wang, 2018, Growth kinetics of Cu6Sn5 intermetallic compound in Cu-liquid Sn interfacial reaction enhanced by electric current, *Scientific Reports* Vol. 8, No. 1, pp. 1775.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-20100-1>
- [17] S. Deng, T. Yuan, R. Li, M. Zhang, S. Xie, M. Wang, L. Li, J. Yuan, Q. Weng, 2018, Influence of electric current on interdiffusion kinetics of W-Ti system during spark plasma sintering, *Int. J. of Refractory Metals and Hard Mater.* Vol. 75, pp. 184-190.  
<https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2018.04.014>
- [18] Y.-F. Li, H. Das, S.-T. Hong, J.-W. Park, H.N. Han, 2018, Electrically assisted pressure joining of titanium alloys, *J. of Manufacturing Processes* Vol. 35, pp. 681-686.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.09.015>
- [19] M.-G. Jo, T.A.N. Nguyen, S. Park, J.-Y. Suh, S.-T. Hong, H.N. Han, 2020, Electrically Assisted Solid-State Joining of CrMnFeCoNi High-Entropy Alloy, *Metallurgical and Mater. Trans. A* Vol. 51, No. 12, pp. 6142-6148.  
<https://doi.org/10.1007/s11661-020-06035-1>
- [20] 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, *Scripta Mater.* Vol. 75, pp. 58-61.  
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.11.019>
- [21] J.-W. Park, H.-J. Jeong, S.-W. Jin, M.-J. Kim, K. Lee, J.J. Kim, S.-T. Hong, H.N. Han, Effect of electric current on recrystallization kinetics in interstitial free steel and AZ31 magnesium alloy, *Materials Characterization* 133 (2017) 70-76.  
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.09.021>
- [22] 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 Mg17Al12 phases in as-extruded AZ91 magnesium alloy, *Mater. Sci. and Eng.: A* Vol. 684, pp. 668-676.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.12.103>
- [23] J.E. Garay, U. Anselmi-Tamburini, Z.A. Munir, 2003, Enhanced growth of intermetallic phases in the Ni-Ti system by current effects, *Acta Mater.* Vol. 51, No. 15, pp. 4487-4495.  
[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00284-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00284-2)
- [24] 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, *Applied Mater. Today* Vol. 21, pp. 100874.  
<https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100874>
- [25] K. Jeong, S.-W. Jin, S.-G. Kang, J.-W. Park, H.-J. Jeong, S.-T. Hong, S.H. Cho, M.-J. Kim, H.N. Han, 2022, Athermally enhanced recrystallization kinetics of ultra-low carbon steel via electric current treatment, *Acta Mater.* Vol. 232, pp. 117925  
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.117925>