

알루미늄과 구리 간 통전고상접합 연구

박주원¹, 최호욱¹, 이시환¹, 정혜진¹, 홍성태², 한흥남^{3,#}

A Study on Electrically Assisted Solid State Joining of Aluminum and Copper

J. W. Park, H. Choi, S. Lee, H. J. Jeong, S. T. Hong, H. N. Han

(Received December 20, 2019 / Revised December 30, 2019 / Accepted December 30, 2019)

Abstract

The influence of electric current on the joining properties of aluminum and copper was investigated. Various pulsed electric current conditions were set to the joining specimens followed by pressure. The shear strength of the joint area between aluminum and copper was measured by the lab shear test. In addition, the microstructures of the joint area were observed through a field emission scanning electron microscope, energy dispersive X-ray, and electron backscatter diffraction. The mechanical properties of each phase in the joint region were measured by nano-indentation. As a result, it was confirmed that electrically assisted solid state joining of copper and aluminum could be applied in various industrial fields.

Key Words : Aluminum, Copper, Electric Current, Joining, Electrically Assisted Solid State Joining

1. 서 론

최근 전자기기나 자동차 업계 등 다양한 분야에서 산업 기술의 발전이 이루어짐에 따라 고경량, 고기능성 소재의 수요가 증가하고 있다. 이에 따라 알루미늄, 구리, 마그네슘 등 여러 가지 재료를 사용하는 부품들이 크게 증가하고 있다. 다양한 합금들이 부품으로 쓰임에 따라 이종 금속 간의 접합의 필요성이 커지고 있다[1-3]. 하지만, 용점 차이가 큰 금속간의 접합에서 액상 접합을 실시할 경우 녹는 점이 상대적으로 낮은 금속에서는 액화가 잘 일어나지만 높은 금속에서는 액화가 일어나지 않아 접합성이 매우 떨어지게 된다[4]. 브레이징과 같은 접합 방법은 접합성이 뛰어나 수 있으나, 소재에 맞는 적절한 필러 재료의 연구가 필요하다[5]. 반면, 고상

확산 접합, 마찰교반용접 등의 고상 접합을 할 경우에는 재료에 응고 조직이 존재하지 않아 결함층이 없는 장점이 있다. 하지만, 확산 접합은 시간이 오래 걸린다는 단점이 있으며, 마찰교반용접은 쓰이는 재료의 형상이 제한적이고 용접 후 끝부분의 마감성이 떨어진다. 이러한 기존 접합 공정의 단점을 극복하면서 이종 금속 간의 접합을 실시 할 수 있는 새로운 접합 기술이 필요하다.

전류 인가를 통해 전도성 소재의 원자 확산을 가속화 시켜 재료의 미세구조 변화를 제어하는 통전처리 공정에 대한 연구가 최근 많이 이루어지고 있다[6-18]. 전류 인가에 의해 금속 재료의 재결정 속도를 가속화시켰다고 보고된 바 있다[7-8]. Wang 등은 Sn/Pb 이원계 합금의 용고에서 전류 인가에 의해 수지상 성장이 영향 받았다고 언급하였다[10]. Kim 등은 알루미늄 합금의 일축 인장 시험 도중 펄스 전류를 인가함으로써 전위 회복이 가속화 된다고 보고하였다[15]. 난접합 소재인 Ti에 대해 통전접합을 통해 고상 접합을 실시한 사례가 보고되고 있다[17].

1. 서울대학교 재료공학부, 신소재공동연구소, 대학원생

2. 울산대학교 기계공학부, 교수

3. 서울대학교 재료공학부, 신소재공동연구소, 교수

Corresponding Author : Seoul National University, Materials Science and Engineering, E-mail:hnhan@snu.ac.kr, ORCID: 0000-0001-5271-9023

고상 확산 접합은 접합면에서 원자들의 상호 확산에 의해 접합이 이루어지는 공정이기 때문에 전류의 확산을 가속화시키는 특징을 활용하면 기존의 열처리를 이용한 고상 확산 접합에 비해 짧은 시간 내에 접합이 가능해 적용 가능성이 매우 크다고 할 수 있다.

본 연구에서는 난접합 소재인 알루미늄과 구리 간의 접합을 통전고상접합 방법을 활용하여 시도하였다. 소재가 심하게 변형하지 않을 정도의 가압 상태에서 다양한 전류 밀도의 펄스형 전류를 인가하며 고상접합을 실시하였다. 접합면의 전단력을 평가하여 접합성을 평가하고, 미세조직 관찰을 통해 접합부 전단력에 영향을 미치는 여러가지 요인을 평가하였다. 이를 통해 접합에 전류가 미치는 영향을 조사하고, 통전 접합 공정의 적용 가능성에 대해서도 고찰하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용된 소재는 순 구리와 순 알루미늄이었다. 폭 10 mm, 길이 20 mm, 두께 1 mm의 시편을 실험에 이용하였다. 접합이 이루어지는 면은 1 μm 까지 기계적인 연마를 이용하여 실험을 진행하였다.

통전 접합 시험은 복합 시험기 (DTU900-MH, Daekyoung, South Korea)를 이용하였다. 시편에 가해지는 압력 및 압축 속도를 조절할 수 있으면서, 전류를 인가할 수 있는 전극이 연결된 스테이지를 제작하였다 (Fig. 1 (a)). 장비와 전극 사이에 베이크라이트 절연체를 삽입하여 시험 도중 장비로의 전류 누설이 일어나지 않도록 설계하였다. 전극 소재는 SKD-11 냉간 합금 공구강을 이용하였다. 전극이 시편과 닿는 부분은 Fig. 1 (b)와 같이 설계하였다.

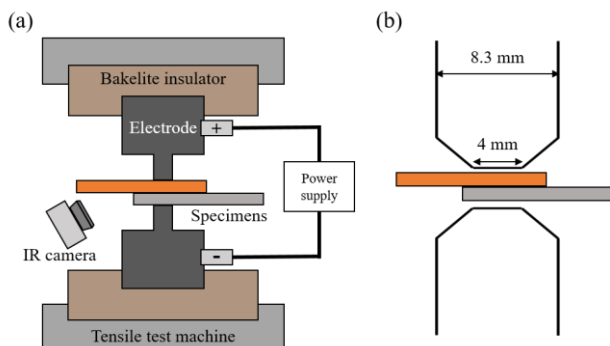


Fig. 1 Schematics of (a) the electrically assisted joining machine, and (b) electrodes

전극에 연결된 전원 장치는 효성에서 용접기를 개조하여 제작한 장비를 이용하였다 (Vadal SP-1000 U, Hyosung, South Korea). 이 장비는 펄스 직류를 인가할 수 있는 장비로 10,000 A 이상 인가될 수 있도록 설계되었다. 전극의 (+) 쪽에 구리, (-) 쪽에 알루미늄이 연결되도록 설정하였다.

전단 시험은 통전 접합을 실시한 복합시험기와 다른 복합 시험기 (DTU-900HHN, Daekyoung, South Korea)를 활용하였다. 접합한 시편의 양쪽 끝을 시험기의 인장 지그에 결합시키고, 인장 시험을 실시하여 접합면의 전단력을 평가하였다 (Fig. 2). 이 때, 전단면에 돌림힘이 작용하는 것을 방지하기 위해 Fig. 2와 같이 인장 지그에 결합시킬 때 같은 두께의 시편을 삽입하였다.

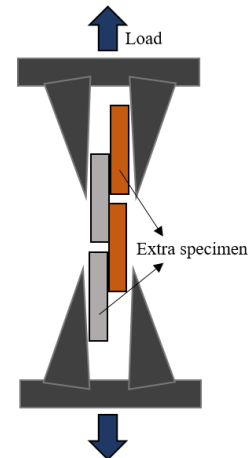


Fig. 2 Schematic of shear strength measurement test

전류 인가 시 출발열에 의해 상승하는 온도를 측정하기 위해, 적외선 열화상 카메라 (FLIR-T621, 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.

접합면의 미세구조를 전계방출 주사전자현미경 (Field emission scanning electron microscope (FE-SEM), SU70, Hitachi, Japan), 에너지분산형 분광 분석 (Energy dispersive X-ray (EDS), E-max, Horiba, Japan), 전자후방산란회절 (electron backscatter diffraction (EBSD), EDAX/TSL, Hikari, USA) 장비를 활용하여 확인하였다. 시편은 1 μm 까지 기계적인 연마를 진행한

이후에 10% 퍼클로릭 산과 90% 에탄올을 섞은 용액을 이용하여 전해연마 하였다. SEM의 가속 전압은 15 kV였고, EBSD 관찰 시 10° 이상 결정 방위가 차이 날 때 결정립계로 인식되도록 설정하였다.

3. 결과 및 토의

전류 밀도 25 A/mm², 인가 시간 (t_d) 1 sec, 휴지 시간 (t_p) 0.8 sec 조건으로 순 구리와 순 알루미늄의 통전고상접합을 실시하였다.

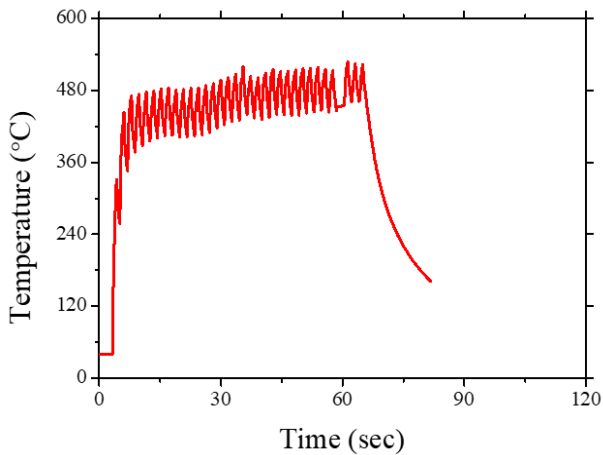


Fig. 3 Maximum temperature history of electrically assisted joining condition of 25 A/mm², t_a= 1 sec, and t_p= 0.8 sec

전류 인가 시 두 시편 사이에 이격이 있을 경우 전류가 원활히 인가되지 않을 수 있기 때문에, 완전히 접촉시키기 위해 전류 인가 전 압력을 20 MPa 가하였다. 전류 인가 도중에는 추가적인 압축은 가하지 않았다. 전류 인가에 따른 시편의 최대 온도 변화는 Fig. 3에 도시되어 있다. 펄스 인가 될 때 온도가 급격하게 상승하고, 휴지 시간 동안 약 100°C 온도가 낮아졌다. 450°C까지 6초만에 도달하였고, 이후 온도는 천천히 상승하여 1분동안 520°C까지 상승하였다. 접합 후 시편의 lab shear 시험을 통해 전단력을 측정된 결과는 26 MPa로 측정되었다. 재결정 처리 된 순 알루미늄의 경우 인장 강도가 80 MPa 정도이고 순 구리의 인장 강도는 150 MPa이므로 상대적으로 강도가 약한 알루미늄과 비교하였을 때, 접합면의 전단력이 26 MPa로 측정된 결과는 접합이 잘 이루어졌음을 의미한다.

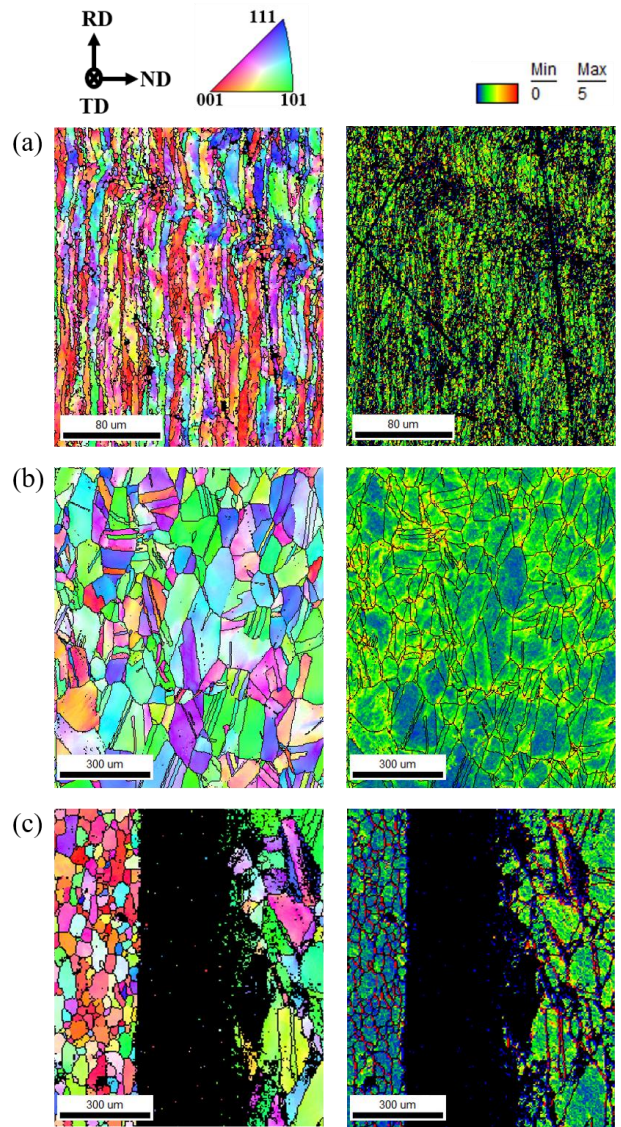


Fig. 4 EBSD inverse pole figure TD maps (left) and kernel average misorientation maps (right) of (a) as-received Al, (b) as-received Cu, and (c) electrically assisted joint specimen

이 시편의 접합면의 EBSD 역극점도 (inverse pole figure, IPF), KAM (Kernel average misorientation) 분석한 결과가 Fig. 4에 도시되어 있다. 알루미늄 초기 시편의 경우에는 결정립 크기가 매우 작아 400배로 관찰하고 나머지 시편들의 경우에는 100배에서 관찰하였다. 알루미늄의 초기 시편의 경우 변형을 많이 받은 압연 조직으로 관찰되었고 (Fig. 4 (a)), 결정립 크기는 6 μm로 측정되었다. 구리의 경우에는 재결정이 된 미세조직이 나타나지만 KAM 분석 결과

를 보았을 때, 내부에 전위 밀도가 여전히 높은 것으로 보아 재결정 처리 이후 추가적인 압연이 있었을 것으로 예상된다 (Fig. 4 (b)). 구리 시편의 결정립 크기는 $60\ \mu\text{m}$ 로 나타났다. 접합한 시편의 경우 알루미늄이 왼쪽, 구리가 오른쪽이다 (Fig. 4 (c)). 알루미늄은 접합 도중 완전히 재결정된 것으로 분석되었고, 구리는 미세조직 변화가 크게 일어나지 않은 것으로 분석되었다. 접합면 부근에서는 Kikuchi 패턴이 제대로 인식이 되지 않았다. 접합면에 대해 SEM 분석을 실시하였고, 결과는 Fig. 5에 도시되어 있다. 관찰 결과, 접합면에 이상 영역이 관찰되었다. 알루미늄과 가까운 부분에 층상구조처럼 생긴 조직이 관찰되었고, 구리와 가까운 부분에 알루미늄 쪽으로 자라는 조직이 관찰되었다. 이 영역들에 대해 EDS 분석 결과, 구리와 가까운 부분의 중간상은 Al_2Cu 상으로 확인되었다. 이상 영역은 SEM 상으로는 확연하게 구분되지는 않았지만, TEM 분석을 실시한 문헌에서 Al_2Cu 상과 알루미늄이 공존하는 영역임을 밝힌 바가 있다[19]. 일반적으로 열처리를 통한 고상확산접합에서는 알루미늄과 구리 상호간의 확산에 많은 시간이 걸린다고 알려져 있다[20]. 하지만, 통전고상접합을 이용했을 경우에는 약 1분만에 확산이 빠르게 일어나 접합을 시킬 수 있는 것을 확인하였다.

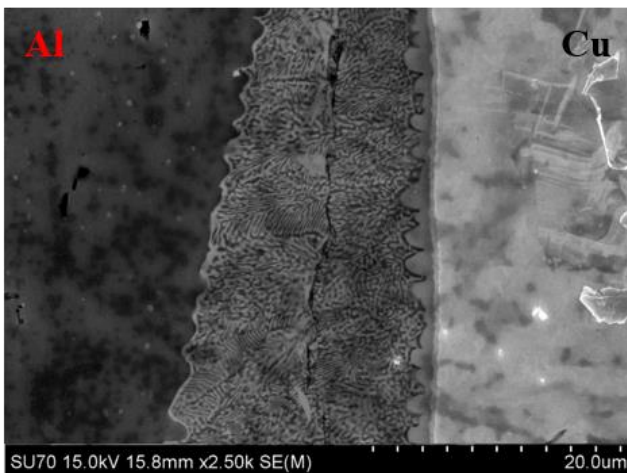


Fig. 5 SEM image of specimen electrically-assisted joint under $25\ \text{A}/\text{mm}^2$, $t_a= 1\ \text{sec}$, and $t_p= 0.8\ \text{sec}$

위의 접합 조건보다 전류 밀도가 높은 조건인 $37.5\ \text{A}/\text{mm}^2$, $t_a= 1\ \text{sec}$, $t_p= 0.8\ \text{sec}$ 로 접합을 실시하였다. 접합 전 압력은 $20\ \text{MPa}$ 가하였고, 접합 도중에는 $0.03\ \text{mm}/\text{min}$ 의 속도로 가압하였다. 전류 인가에 따

른 시편의 최대 온도 변화는 Fig. 6에 도시되어 있다. 전류가 인가됨에 따라 온도가 급격히 상승하여 약 30초만에 500°C 를 넘는 것이 관찰되었다. 이 시편의 경우에는 lab shear 시험을 위해 장비에 체결할 때 발생하는 응력으로 인해 접합면이 분리되는 현상이 발생하여 전단력 측정은 하지 못하였다.

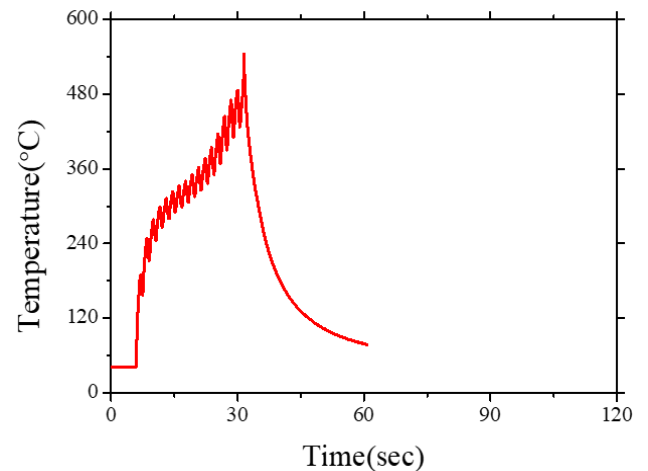


Fig. 6 Maximum temperature history of electrically assisted joining condition of $37.5\ \text{A}/\text{mm}^2$, $t_a= 1\ \text{sec}$, and $t_p= 0.8\ \text{sec}$

이 시편에 대해 SEM을 통해 미세조직을 관찰한 결과, Al_2Cu 상이 알루미늄 쪽으로 $10\ \mu\text{m}$ 이상 성장한 것을 알 수 있었다. 저항이 큰 Al_2Cu 상이 크게 자람에 따라 줄 발열이 증가하여 온도가 급격하게 상승했음을 알 수 있다.

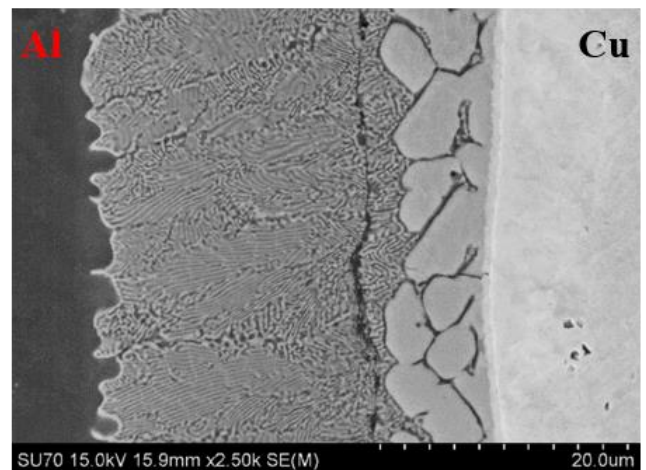


Fig. 7 SEM image of specimen electrically-assisted joint under $37.5\ \text{A}/\text{mm}^2$, $t_a= 1\ \text{sec}$, and $t_p= 0.8\ \text{sec}$

나노 인덴터 장비를 활용하여 접합면에 존재하는 다양한 영역에 대해 경도 분석을 실시하였다 (Fig. 8). 알루미늄과 구리 영역에서는 경도가 각각 1.0와 2.5 GPa로 측정되었다. 하지만 Al_2Cu 상은 8.5 GPa로 매우 높은 경도를 가짐을 알 수 있었다. Al_2Cu 상에 의해 접합면의 취성이 커질 수 있어 통전고상접합 시 공정조건설정에 유의해야 한다는 것을 확인하였다.

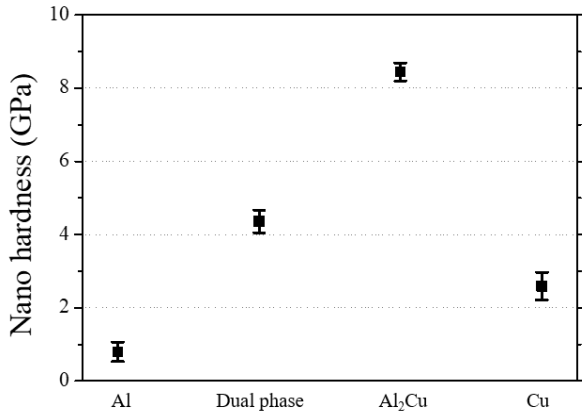


Fig. 8 Nano hardness measurement according to phase of joint area

펄스 전류를 인가함에 따라 이중 소재인 구리와 알루미늄을 접합할 수 있다는 것을 확인하였다. 접합면 미세조직 관찰을 통해 전류 인가 접합 시 알루미늄과 구리 상호 확산을 통해 접합면에서 중간상이 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 그 중간상은 전류 밀도가 증가할수록 빠른 시간 내에 크게 생성되었다. 중간상은 모상에 비해 경도가 매우 높고 취성이 크기 때문에 접합 시에 전류 밀도를 조절하여 중간상 생성을 제어해야 할 필요가 있다.

4. 결론

통전고상접합을 이용하여 난접합 소재인 구리, 알루미늄 소재를 접합하는 연구를 수행하였다. 직류 전류를 펄스 형태로 인가하여 접합을 실시하였고, 전단력 측정을 통해 접합이 잘 이루어졌음을 확인하였다. 미세조직 관찰 결과 전류 인가에 의해 알루미늄과 구리 사이에 빠른 확산이 일어나 Al_2Cu 중간상이 생성된 것을 알 수 있었다. 전류 밀도가 높은 조건에서는 확산이 더 빠르게 일어나 Al_2Cu 생

성이 가속된다는 것을 확인하였다. 나노 경도 측정 결과 Al_2Cu 상은 알루미늄과 구리 모상과 비교하여 매우 높은 경도 값이 측정되었다. 펄스형 전류 인가를 통해 고상 확산을 촉진시켜 접합을 빠르게 시킬 수 있어, 효율이 높은 고상접합공정 개발의 가능성을 확인하였다. 하지만, 고 전류밀도하에서는 중간상 생성이 가속화 될 수 있기 때문에, 고상접합공정 시 적당한 전류 범위의 설정이 요구된다.

후 기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No. NRF-2015R1A5A1037627)의 지원 및 삼성전자의 글로벌기술센터의 지원을 받아 수행된 연구임. 또한, 포스코청암재단의 포스코사이언스 펠로십의 지원을 받아 수행한 연구임.

REFERENCES

- [1] J. Ouyang, E. Yarrapareddy, R. Kovacevic, 2006, Microstructural Evolution in the Friction Stir Welded 6061 Aluminum Alloy (T6-Temper Condition) to Copper, J. Mater. Process. Technol. Vol. 172, No. 1, pp. 110~122.
- [2] M. Abbasi, A. K. Taheri, M.T. Salehi, 2001, Growth Rate of Intermetallic Compounds in Al/Cu Bimetal Produced by Cold Roll Welding Process, J. Alloys Compd. Vol. 319, No. 1~2, pp. 233~241.
- [3] T.A. Mai, A.C. Spowage, Characterisation of Dissimilar Joints in Laser Welding of Steel-kovar, Copper-steel and Copper Aluminium, 2004, Mater. Sci. Eng. A Vol. 374, No. 1~2, pp. 224~233.
- [4] W.-B. Lee, K.-S. Bang, S.-B. Jung, 2005, Effects of Intermetallic Compound on the Electrical and Mechanical Properties of Friction Welded Cu/Al Bimetallic Joints During Annealing, J. Alloys compd. Vol. 390, No. 1~2, pp. 212~219.
- [5] Brazing handbook [M], 2007, USA: American Welding Society, pp. 378~379.
- [6] E.S. Machlin, 1959, Applied Voltage and the Plastic Properties of "Brittle" Rock Salt, J. Appl. Phys. Vol. 30, No. 7, pp. 1109~1110.
- [7] H. Conrad, N. Karam, S. Mannan, A. Sprecher, 1988,

- Effect of Electric Current Pulses on the Recrystallization Kinetics of Copper, *Scr. Metall.* Vol. 22, No. 2, pp. 235~238.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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, No. 4, 042601.
- [11] 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.
- [12] 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 $Mg_{17}Al_{12}$ Phases in As-extruded AZ91 Magnesium Alloy, *Mater. Sci. Eng. A* Vol. 684, pp. 668~676.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] J.-I. Kim, S.-W. Jin, J. Jung, H.-M. Sung, H.-J. Jeong, S. Park, J.-W. Park, H.N. Han, 2017, Growth Behavior of Intermetallic Compound in Dissimilar Al-Cu Joints under Direct Current, *Kor. J. Met. Mater.* Vol. 55, No. 6, pp. 372~378.
- [17] Y.-F. Li, H. Das, J.-W. Park, H. N. Han, S.-T. Hong, 2018, Electrically Assisted Pressure Joining of Titanium Alloys, *J. manuf. Processes.* Vol. 35, pp. 681~686.
- [18] J.-W. Park, H.-J. Jeong, S.-W. Jin, M.-J. Kim, J.J. Kim, H.N. Han, 2018, Evaluation of Springback Angle Change with Applying Electric Current after V-bending Test on AZX311 Magnesium Alloy and Martensite Steel, *Trans. Mater. Process.* Vol. 27, No. 3, pp. 177~183.
- [19] Q. Lei, B.P. Ramakrishnan, S. Wang, Y. Wang, J. Mazumder, A. Misra, 2017, Structural Refinement and Nanomechanical Response of Laser Remelted Al-Al₂Cu Lamellar Eutectic, *Mater. Sci. Eng. A* Vol. 706, pp. 115~125.
- [20] A. Elrefaey, W. Tillmann, 2009, Solid State Diffusion Bonding of Titanium to Steel Using Copper Base Alloy as Interlayer, *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 209, No. 5, pp. 2746~2752.