



## 전자제품 Cu 방열 모듈 배관 접합을 위한 멀티 코어 레이저 용접 공정 연구

이찬양<sup>a,b</sup>, 오민철<sup>b</sup>, 고임현<sup>c,d</sup>, 안병민<sup>a,e\*</sup>Multi-core Laser Welding Process for Joining Cu Heat Dissipation  
Module Pipes in Electronic ProductsChanyang Lee<sup>a,b</sup>, Minchul Oh<sup>b</sup>, Imhyon Ko<sup>c,d</sup>, Byungmin Ahn<sup>a,e\*</sup><sup>a</sup> Department of Materials Science and Engineering, Ajou University<sup>b</sup> AI & Mechanical System Center, Institute for Advanced Engineering<sup>c</sup> Corporate Research Center, Samwon Dongwan<sup>d</sup> Department of Mechanical Systems Engineering, Gyeongsang National University<sup>e</sup> Department of Energy Systems Research, Ajou University

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 3 September 2024  
Revised 30 September 2024  
Accepted 2 October 2024

## Keywords:

Laser welding  
Multi core laser  
Heat dissipation module  
Microstructure analysis  
Peel strength

## ABSTRACT

As electronic components demand higher performance and greater density, the need for enhanced heat dissipation characteristics has increased. Currently, heat dissipation modules rely on soldered copper piping; however, the use of filler materials reduces both thermal efficiency and mechanical properties. This study investigates the process conditions for multi-core laser welding, aiming to reduce production costs and process times while maintaining energy efficiency. Through experimental analysis, the applicability of the process was evaluated by comparing the microstructure and mechanical properties of soldered joint pipes with those of laser-welded joint pipes used in actual electronic products. The heat dissipation pipes joined by laser welding exhibited approximately three times greater mechanical strength than their soldered counterparts, and it is anticipated that the shortened process will further reduce both costs and production time.

## 1. 서론

기술 발전과 함께 전자 부품의 고성능화, 고밀도화가 요구됨에 따라 전자 부품의 전력 소비 및 열 발생은 크게 증가하여 방열소재 개발의 필요성이 증가하고 있으며 특히 전자 기기의 고장의 56%는 과열로 인한 성능 저하 및 고장이 발생하는 것으로 보고되고 있다<sup>1-3</sup>. 현재 가전제품 열교환기에서는 공정 비용 감소 및 생산성 향상을 위해 고압배관(capillary tube)과 저압배관(suction pipe)에 401 W/(m·K)로 높은 열전도도를 가지고 있는 구리를 이용하

여 솔더링 접합이 사용되고 있다<sup>4</sup>. 솔더링은 기본 모재의 표면 사이에 용융된 용가재를 분산시키기 위해 모세관 현상의 원리를 이용하는 접합 공정이다<sup>5</sup>. 일반적으로 솔더링 용가재는 납, 주석, 아연(Pb, Sn, Zn) 등으로 구성되며 450°C 보다 낮은 온도에서 용해된다<sup>6</sup>. 하지만 솔더링에 경우 용가재 사용으로 인해 일반적으로 기본 모재의 기계적 강도보다 낮으며 구리와 구리 모재 사이에 금속간화합물의 형성으로 인해 취성파괴가 일어난다. 또한 상대적으로 용가재의 낮은 용융 온도로 인해 가전제품 고출력에서의 장기 신뢰성이 떨어지고 솔더 및 플럭스 사용으로 인한 공정비용 및 생

\* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-3531

E-mail address: byungmin@ajou.ac.kr (Byungmin Ahn).

산 시간이 증가한다. 이러한 복합적인 이유들로 인해 현재는 연결 부 부품 간 레이저 용접이 연구되고 있다<sup>[7-12]</sup>. 하지만 산업용 응용 분야에서 레이저 용접을 사용할 시, 구리의 높은 레이저 반사율과 열전도율은 레이저 용접에서 낮은 용접 효율과 불안정한 용접 품질을 야기하고 용접 깊이의 불균일성으로 인해 접합부의 신뢰성이 떨어지는 문제점이 있다<sup>[13-14]</sup>. 이를 해결하기 위해 Hess<sup>[15]</sup>는 그린 레이저(515 nm)와 적외선레이저(1030 nm) 빔을 결합하여 용접을 하였다. 그린 레이저를 이용하여 재료를 가열 시키고 적외선 레이저 빔으로 용접 시, 용접 모재의 온도가 상승함에 따라 레이저 빔의 에너지가 효과적으로 흡수되는 것을 확인하였다. 또한, Maina<sup>[16]</sup>는 구리와 같이 고반사 재료인 알루미늄 합금을 대상으로 하여 듀얼 빔을 조사하는 방식인 Adjustable ring mode(ARM) 파이버 레이저를 사용하였고 센터와 링 빔의 출력을 독립적으로 조절하여 용접을 하였다. 외곽의 링 빔이 온도를 올려 주어 레이저 파장의 흡수율을 높여주고 이어서 빔의 중심이 키홀을 형성하며 이는 링 빔의 예/후열효과로 인해 스페터, 균열 및 품질 면에서 전체적으로 균일하고 안정적인 비드를 형성하는 것을 확인하였다. 하지만 구리 동종 소재 배관을 대상으로 한 레이저 용접 연구는 현재 부족한 실정이며 레이저 용접 공정 최적화를 위한 연구가 필요한 상황이다. 따라서, 본 연구에서는 용가재를 사용하지 않은 레이저 용접으로 공정비용 및 생산시간을 줄이고 최소한의 레이저 출력 조건으로 에너지 효율 확보 및 용접부의 건전성을 동시에 확보하고자 멀티코어 레이저 용접 공정 조건을 연구하였다. 기초 연구를 통하여 용접 조건을 도출하였으며, 결과를 바탕으로 실제 전자제품에 사용 중인 S-pipe와 C-tube 대상 레이저 용접을 수행하였다. 그리고 기존 제품에 사용 중인 솔더링 접합 배관과 레이저 접합 배관의 미세조직과 기계적 분석을 통하여 멀티코어 레이저 공정 적용 가능성을 검토하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험장비 및 실험조건

실험은 IPG 사에 공랭식 Single Mode - Adjustable Mode Beam (SM-AMB) 장비인 YLS-1000/1000을 사용하여 멀티 코어 레이저 용접을 진행하였고 레이저 스펙은 다음 Table 1과 같다. 용접속도는 300 mm/s로 고정하고 Table 2와 같이 센터 빔과 링 빔의 레이저 출력을 변수로 하여 기존 냉동 싸이클에 사용되고 있는 C1020P 소재를 대상으로 Bead on plate(BOP) 용접을 하였다. 구리의 경우 레이저 빔 흡수율(약 4%)이 낮아 저 출력 조건에서 용접이 되지 않으며 기초 실험을 통해 용입이 형성되는 출력조건인 400 W를 시작점으로 하여 용접을 하였다. 소재의 두께는 1 mm로 BOP 기초실험을 통해 Cu 판재의 용입거동을 확인 하였으

Table 1 Specification of AMB laser

Model	YLS-1000/1000-SM-AMB	
Type	Center	Ring
Max. laser power	1000 W	1000 W
Fiber cable size	14 um	100 um
Actual spot size	32 um	228 um
Laser delay time	150 us	
Laser wavelength	1070 nm	

Table 2 Laser welding conditions

Laser power		Laser speed (mm/sec)
Center beam (W)	Ring beam (W)	
400	400	300
600		
800		
1000		
400	600	
600		
800		
1000		
400	800	
600		
800		
1000		
400	1000	
600		
800		
1000		

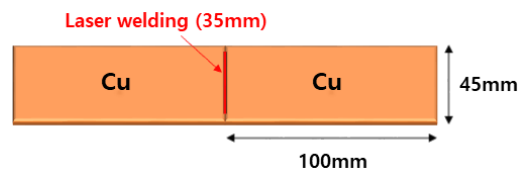


Fig. 1 C1020P material butt welded test specimen

며 용입깊이가 0.6 mm 이상인 레이저 출력 조건을 기준으로 맞대기 용접을 하였다. 그 후 Fig 1과 같이 맞대기 시험편을 제작하여 인장강도와 미세조직 분석을 통해 최적의 용접조건을 도출하였으며, Fig. 2와 같이 기존 제품에 사용 중인 SAC305솔더(Sn-0.7Cu)를 이용한 솔더링 용접 배관과 레이저 용접 배관과의 미세조직과 접합강도 비교분석을 통해 레이저 용접 배관의 적용가능성 여부를 확인하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 멀티코어 레이저 BOP 용접부 형성

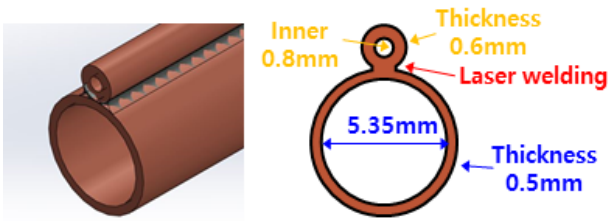


Fig. 2 Copper-copper soldering piping schematic diagram

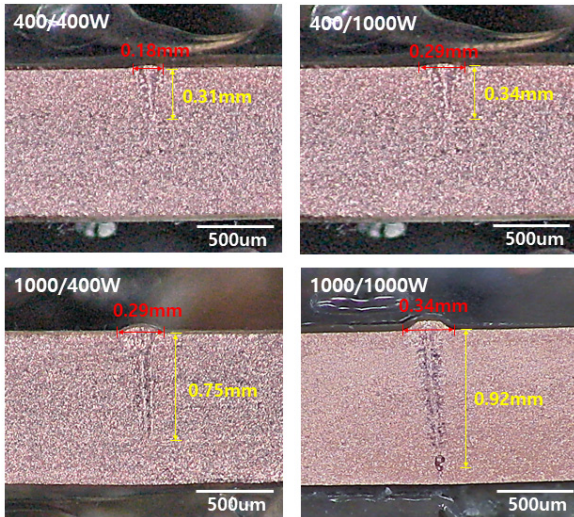


Fig. 3 Cross-section of Cu/Cu specimens welded with varying core/ring power

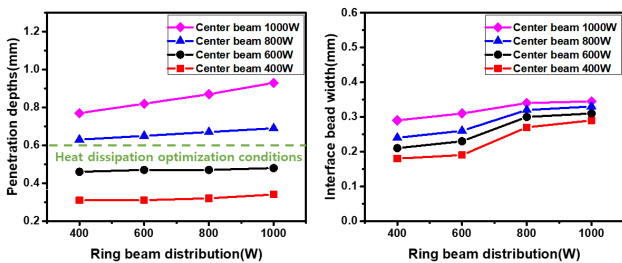


Fig. 4 Bead width and penetration depth according to center/ring beam output conditions

Table 2에 제시된 조건으로 BOP 용접을 하였으며 센터와 링 빔의 출력조건에 따른 미세조직 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 단면 분석 결과 센터 빔의 출력이 증가함에 따라 용입이 증가하였으며, 최대 출력인 1000/1000 W에서는 용입깊이가 0.89 mm로 완전 용입에 가까운 것을 확인하였다. 링 빔의 출력이 동일 할 때 센터 빔의 출력 증가에 따라 용입깊이가 증가하는 것을 확인할 수 있으며 센터 빔의 출력이 동일 할 때 링 빔의 출력 증가에 따라 비드 폭이 증가하며 링 빔 800 W 이상에서는 비드 폭이 거의 동일한 것을 확인할 수 있다. 센터/링 빔 출력에 따른 비드 폭 및 용입깊이는 Fig. 4와 같으며 링 빔의 직경은 228 um로 기존 센터 빔 32 um에 비하여 매우

조대하여 같은 출력조건에서 집중되는 에너지 밀도가 낮기 때문에 링 빔 출력 600 W이하 에서는 균일하고 안정적인 비드 형성에 영향만을 미쳤으나, 800 W이상 출력에서는 비교적 높은 에너지 밀도로 구리를 용융시켜 계면부의 비드 폭을 확보한 것으로 판단된다. 링 빔의 출력이 높아질 경우 구리부분의 넓은 영역을 용융시켜 비드 폭을 증가시키며 이로 인해 접합 강도의 증가가 예상된다. 또한 현재 사용되고 있는 구리 배관의 경우 접합부의 면적이 증가함에 따라 열전달 계수가 증가하며 방열 효율 최적화를 위해 0.6 mm 이상의 접합부 형성이 요구되고 있다. 그러나 센터 빔 600 W 이하에서는 용입깊이가 0.6 mm 이하로 저출력으로 인한 에너지 밀도 부족으로 용입깊이를 확보하지 못한 것으로 판단되며 센터 빔 800 W 이상에서는 높은 에너지 밀도로 인해 적합한 용입깊이를 형성한 것으로 확인된다.

### 3.2 멀티코어 레이저 맞대기 용접부 미세조직 및 인장강도 평가

BOP용접을 통해 용입깊이를 측정하였으며, 방열 효율 최적화를 위해 용입깊이 0.6 mm이상 출력 조건인 센터 빔 800 W이상으로 구리 관재의 맞대기 용접을 한 후 센터/링 빔 출력에 따라 미세조직 및 인장강도를 분석하였다. Fig. 5와 같이 센터 빔 800 W의 경우 링 빔 세기의 증가에 따라 기계적 물성이 증가하며 센터/링 빔 800/800 W에서 가장 높은 171.7 MPa 인장강도 값을 얻었다. 이는 계면 비드 폭의 증가에 따라 인장강도가 비례하여 증가하는 것으로 보이며 링 빔 출력 800 W이상에서는 계면 비드 폭이 거의 동일하여 인장강도 또한 유의미한 차이를 보인 것으로 판단된다. 또한 센터 빔 1000 W의 경우 링 빔 세기의 증가에 따라 동일하게 인장강도가 증가하나 센터 빔 800 W의 비해 강도가 감소하는 것을 확인하였다. 링 빔과 달리 레이저 출력 증가에 따른 재료의 강화

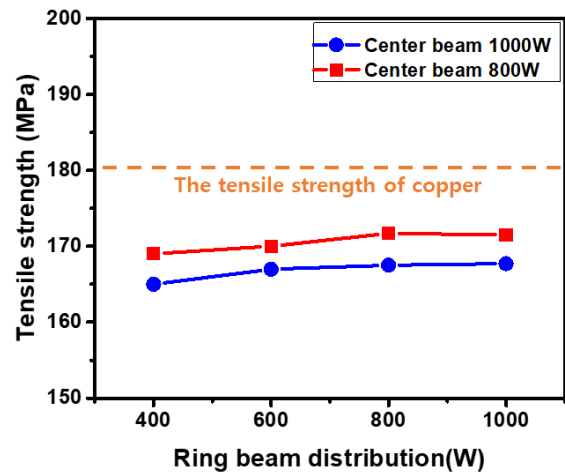
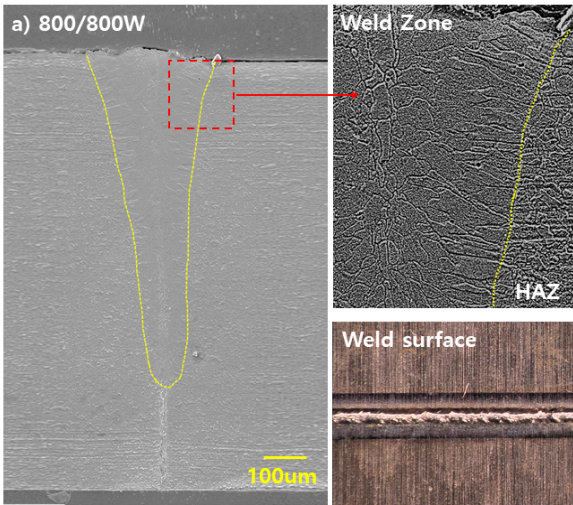
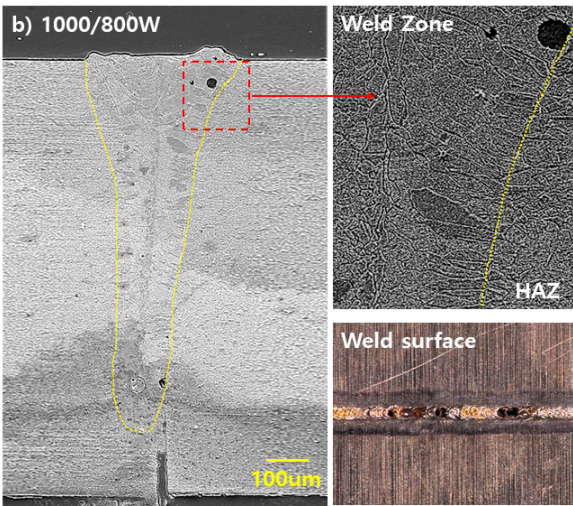


Fig. 5 Tensile strength of center/ring beam distribution



(a) 800/800W



(b) 1000/800W

Fig. 6 Microstructure and surface analysis according to laser welding power

거동의 차이를 분석하기 위해 미세조직 분석을 진행하였으며, 구리의 경우 과도한 열을 받을 경우 표면산화로 인해 외관품질의 영향을 미치게 되고 고온에서의 불균일한 열 분포는 급격한 냉각이나 구리 내에 내부 응력을 만들어 기공 및 균열을 발생시킨다<sup>[17]</sup>. Fig. 6과 같이 Center beam 1000 W의 높은 출력으로 용접을 하였을 때 용접 풀의 안정성이 낮아져 스패터가 발생하고 불균일한 열 분포로 인한 기공형성으로 인해 기계적 특성에 영향을 준 것으로 판단된다. 또한 레이저 출력 세기에 따른 용접부의 기계적 특성 및 결정립크기에 대한 상관관계 분석을 위해 Planimetric법을 이용하여 단위 면적당 결정의 수를 계산하여 결정 입도를 측정하였을 때 레이저 출력 800/800 W에서 평균 결정립 크기가 12.5  $\mu\text{m}$ 인 반면, 1000/800 W에서는 평균 결정립 크기가 16.4  $\mu\text{m}$ 로 평균 결정 입도가 커지는 것을 확인하였다. 레이저 출력이 높을

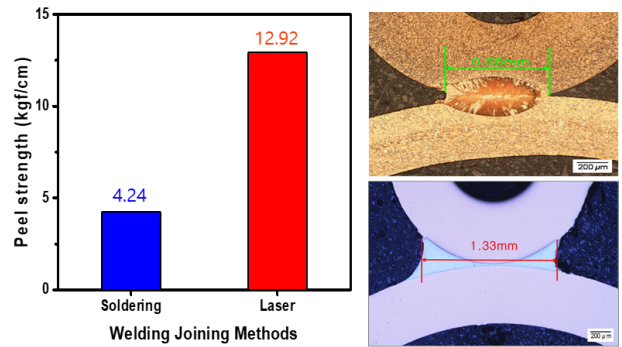


Fig. 7 Solder and laser welding macro structure and joint strength analysis

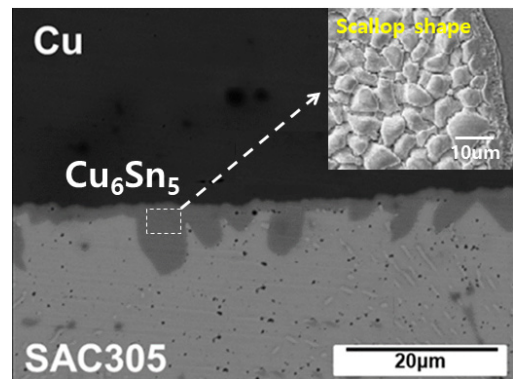


Fig. 8 IMC and IMC crystal structure of Cu and SAC305 binding interface

경우, 용접 열에 의한 영향을 받아 응고시간이 길어지고 결과적으로 결정립 크기를 증가시키게 되며 Hall-Petch식에 따라 입자 크기의 증가에 따라 전위의 이동이 비교적 자유로워져 금속의 인장 강도가 낮아진 것으로 판단된다.

### 3.3 솔더링 및 레이저 용접 배관 접합계면 및 접합강도 분석

맛대기 용접부 미세조직 및 인장강도를 분석한 결과 800/800 W에서 비드표면 및 기계적 특성이 향상된 것을 확인 할 수 있으며, 해당 조건을 바탕으로 기존제품에 사용 중인 Cu-Cu 배관을 대상으로 레이저 용접 진행 및 솔더링 배관과의 비교 분석을 진행하였다. 접합면 분석 결과 레이저 용접 배관의 경우 Fig. 7과 같이 용입깊이가 0.66 mm로 열전달 계수가 충분히 확보되는 조건인 것을 확인하였으며 접합강도 분석 결과 솔더링 배관의 접합강도인 4.24 kgf/cm보다 약 3배 정도 높은 12.92 kgf/cm를 확보하였으며 솔더링의 경우 계면에서 파단이 일어난 반면 레이저 배관의 경우 HAZ부 에서 파단이 일어난 것을 확인하였다. 상용 솔더 소재인 SAC305를 이용하여 솔더링한 배관의 미세조직 분석 결과 Fig. 8과 같이 Cu와 솔더 접합계면에  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  금속간화합물이 형성되는 것을 확인하였다. 일반적으로 금속간 화합물은 자체의 brittle한

성질로 인하여 화합물 내에 또는 솔더/금속간 화합물 계면에 결합이 발생하여 접합부의 기계적 특성을 저하시키며 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>는 주로 조개껍질(scallop shape) 모양의 불규칙한 형태로 형성되며 이러한 형태는 계면에서 응력 집중을 일으키는 원인이 된다. 이러한 결합 및 응력 집중 발생으로 인해 레이저 용접에 비해 낮은 접합 강도를 얻은 것으로 판단된다. 반면 레이저 용접의 경우 용접부와 모재가 동일한 화학적 조성을 가져 용접 과정에서 비교적 균일한 미세조직이 형성되며 동종 소재의 동일한 열팽창계수를 가지므로 용접 및 냉각 과정에서의 내부 응력이나 미세 균열을 최소화 할 수 있어 솔더링에 비해 기계적 강도가 우수한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

1) BOP 및 맞대기 구조에서의 멀티코어 레이저를 적용하여 센터 빔과 링 빔의 레이저 출력을 변수로 하여 레이저 용접을 하였으며 최적의 용접 조건 선정 후 배관을 대상으로 레이저 용접을 하여 기존 솔더링 배관과의 비교평가를 하였다.

2) 레이저 출력이 증가함에 따라 용입깊이가 증가하였으나, 고출력 조건에서는 비드 외관의 품질이 저하와 결정립 크기 증가로 인한 기계적 특성이 감소하는 것을 확인하였다.

3) 최적용접 출력조건인 800/800 W을 기준으로 상용 솔더링 배관과 비교하였을 때 접합강도가 약 3배 증가하는 것을 확인하였으며, 솔더링 배관의 경우 솔더와 구리 배관 접합부의 금속간화합물에 의해 취성이 증가하고 결정 구조의 형태에 따른 응력 집중으로 인해 접합강도가 저하 되는 것으로 판단된다.

4) 레이저 용접에 경우 금속간화합물의 형성이 없어 취성을 억제하여 접합강도를 증가시킬 수 있으며 모재 자체를 용융하여 접합을 하기 때문에 별도의 용가재를 사용하지 않아 추가적인 공정 단계를 줄이고 이러한 공정 단축으로 인해 공정 비용의 절감과 생산 시간을 단축 할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 2024년도 중소벤처기업부의 기술개발사업(00270517) 연구비 지원에 의한 연구결과로 수행되었습니다.

#### References

[1] Engler, S., Ramsayer, R., Poprawe, R., 2011, Process Studies on Laser Welding of Copper with Brilliant Green and Infrared Lasers, Phys. Procedia, 12:B 339-346, <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.142>.

[2] Hosking, F. M., Stephens, J. J., Rejent, J. A., 1999, Intermediate Temperature Joining of Dissimilar Metals, Weld. J., 78:4 127-136.

[3] Alawadhi, E. M., Amon, C. H., 2000, Performance Analysis of an Enhanced PCM Thermal Control Unit, ITHERM 2000. The Seventh Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 283-289, <https://doi.org/10.1109/ITHERM.2000.866837>.

[4] Messler, Jr., R. W., 2008, Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy, John Wiley & Sons, New York.

[5] Olson D. L., Siewert, T. A., Liu, S., Edwards, G. R., 1993, ASM Handbook Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering, ASM International, USA, <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v06.9781627081733>.

[6] Bath, J., 2007, Lead-Free Soldering, Springer, New York, <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68422-2>.

[7] Vianco, P. T., 2017, Understanding the Reliability of Solder Joints Used in Advanced Structural and Electronics Applications: Part 1 – Filler Metal Properties and the Soldering Process, Welding Journal, 96 SAND2017-1069J.

[8] Jeong, S.-E., Jung, S.-B., Yoon, J.-W., 2022, High-temperature Stability of Ni-Sn Intermetallic Joints for Power Device Packaging, J. Alloy. Compd., 890 161778, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161778>.

[9] Sonawane, P. D., Raja, V. K. B., 2020, An Overview of Corrosion Analysis of Solder Joints, AIP Conference proceedings, 2311:1 080003, <https://doi.org/10.1063/5.0034377>.

[10] Leong, Y. M., Haseeb, A. S. M. A., 2016, Soldering Characteristics and Mechanical Properties of Sn-1.0Ag-0.5Cu Solder with Minor Aluminum Addition, Materials, 9:7 522, <https://doi.org/10.3390/ma9070522>.



[11] Song, C. S., Ji, H. S., Kim, J. H., Kim, J. H., Kim, J. H., 2008, Flip-chip Bonding Using Nd:YAG Laser, Trans. Korean Soc. Mach. Tool Eng., 17:1 120-125.



[12] Mo, Y. W., Yoo, Y. T., Shin, H. J., Shin, B. H., 2007, The Characteristics of Butt Welding Using Continuous Wave Nd Laser with Nickel Coated S45C Steel, Trans. Korean Soc. Mach. Tool Eng., 16:4 1-12.

[13] Chen, H.-C., Bi, G., Nai, M. L. S., Wei, J., 2015, Enhanced Welding Efficiency in Laser Welding of Highly Reflective Pure Copper, J. Mater. Process. Technol., 216 287-293,

[https://doi.org/ 10.1016/j.jmatprotec.2014.09.020](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.09.020).

- [14] Heider, A., Stritt, P., Hess, A., Weber, R., Graf, T., 2011, Process Stabilization at Welding Copper by Laser Power Modulation, Phys. Procedia, 12:part A 81-87, <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.011>.
- [15] Hess, A., Schuster, R., Heider, A., Weber, R., Graf, T., 2011, Continuous Wave Laser Welding of Copper with Combined Beams at Wavelengths of 1030 nm and of 515 nm, Phys. Procedia, 12:part A 88-94, <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.012>.
- [16] Maina, M. R., Okamoto, Y., Okada, A., Närhi, M., Kangastupa, J., Vihinen, J., 2018, High Surface Quality Welding of Aluminum Using Adjustable Ring-Mode Fiber Laser, J. Mater. Process. Technol., 258 180-188, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.03.030>.
- [17] Mrowec, S., Stoklosa, A., 1971, Oxidation of Copper at High Temperatures, Oxid. Met., 3 291-311, <https://doi.org/10.1007/BF00603530>.

	<p><b>Chanyang Lee</b> Graduate Student in Department of New Materials Engineering, Ajou University. Researcher, Advanced Institute of Technology. His research interest is Laser Welding and Materials Microstructure Analysis. E-mail: cksdid9927@iae.re.kr</p>
	<p><b>Minchul Oh</b> Senior Researcher, Advanced Institute of Technology. His research interest is Alloy Design and New Material Development. E-mail: mc0715hj@iae.re.kr</p>

	<p><b>Imhyon Ko</b> Director of Samwon Copper Tube Manufacturing. Graduate Student in Department of Mechanical Systems Engineering, Gyeongsang National University. His research interest is Manufacturing of Pipe. E-mail: ihko@swcopper.co.kr</p>
	<p><b>Byungmin Ahn</b> Professor in the Department of Materials Science and Engineering, Ajou University. His research focuses on the Metallic Materials and Composites Specifically including High Entropy Alloys, Nanostructured Alloys, Advanced Powder Metallurgy Processes, Experimental Mechanics, and Metal Additive Manufacturing. E-mail: byungmin@ajou.ac.kr</p>