

이차전지 전극용 Al-Cu의 레이저 용접

황승준 · 김태완 · 전옥상 · 정재필[†]

서울시립대학교 신소재공학과

Al-Cu Electrode Laser Welding for Rechargeable Battery

Seung Jun Hwang, Tae Wan Kim, Wook Sang Jeon, and Jae Pil Jung[†]

Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul, 163, Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Korea

(Received December 6, 2019; Corrected December 26, 2019; Accepted December 28, 2019)

Abstract: Recently, as electric vehicles and hybrid vehicles are widely used, the use of rechargeable batteries is increasing. Electric and hybrid cars are made up of hundreds to thousands of electric cells depending on the car model. And the assembly process of the cells and modules requires a variety of bonding process. Meanwhile, in order to connect several cells in series, Cu used as a cathode and Al of an anode must be bonded. In this paper, the characteristics of Al and Cu metals, laser types, characteristics and principles of welding lasers for welding of Cu and Al electrodes are introduced.

Keywords: laser welding, Al-Cu electrode, rechargeable battery, electric and hybrid vehicle

1. 서 론

최근 전기자동차와 하이브리드 자동차가 확대 보급되면서 이차전지의 활용이 증가하고 있다. 더욱이 2차전지는 사용 후 재충전이 가능하여 지속적으로 사용이 가능하다. 그래서 이차전지인 리튬이온 배터리 제조에 세계적으로 많은 R&D가 집중되고 있다. 전기차 및 하이브리드 자동차는 차종에 따라 수백 개에서 수천 개의 셀로 구성되어 있다.¹⁾ 그리고 셀과 모듈의 조립과정에는 다양한 접합 과정이 필요하다. 따라서 여러 개의 셀을 직렬로 연결하기 위해 음극으로 사용되는 Cu와 양극으로 사용되는 Al을 접합해야 한다.

구리와 알루미늄을 접합하는 방법으로는 초음파 및 레이저 용접기술이 사용된다. 고상 용접인 초음파 용접은 가장 보편적으로 사용된다.²⁾ 초음파 용접의 장점은 값싼 설비 투자비와 이종재료 접합간 생성되는 금속간 화합물(Intermetallic compound)이 최소로 형성되는 것이다. 그러나 초음파 용접은 접합부의 소재변형과 접합 두께가 제한적이다. 그렇기 때문에 최근에는 빠른 접합공정, 비접촉가공, 소재의 적은 열 변형 등의 장점을 가진 레이저 용접이 선호된다.

이종재료에 주로 사용되는 레이저는 IR 파장을 갖는

disk 레이저와 fiber 레이저이다. Disk 레이저는 용접 중 표면에 플라즈마가 생성된다. 이 플라즈마는 모재의 증발입자에 의한 산란, 밀도 구배에 의한 빔의 굴절 현상 등 빔의 흡수를 방해해 레이저 에너지 손실을 유발한다. 또한 이러한 현상이 재료가공에 악영향을 끼친다. 또한 Cu의 경우 레이저 흡수율이 상온에서 약 4%정도로 매우 낮아, 키홀이 형성되기 전 용융풀이 불안정하고 스패터가 많이 발생되어 고형물이 생성된다. 그리고 표면상태(전해연마, 샌딩처리, 일반판)에 따라 용접 품질이 달라 재현성이 좋지 않은 특성을 가지고 있다. 본 저자 등은 상기한 문제점들을 해결하기 위해 스캐너 타입의 헤드를 이용해 빔 오실레이션 공법을 적용하였다. 또한 키홀을 안정화하기 위해 듀얼빔 공법을 사용하였다.

최근에는 구리소재에 레이저 고 흡수율을 자랑하는 그린레이저가 개발되었다.³⁾ 그린레이저는 구리에 대한 레이저 흡수율이 상온에서 40%정도 되기 때문에 열전도 용접과 키홀용접 모두 가능한 장점이 있다. 그리고 구리의 표면 상태(전해연마, 샌딩처리, 일반판)에 관계없이 모두 같은 조건으로 비슷한 용접품질이 나오며, 재현성이 높은 특성을 지닌다. 그래서 이차전지 용접에 많이 적용되고 있다.⁴⁾

본 논문에서는 Al-Cu의 특성, 일반적으로 Al-Cu

[†]Corresponding author
E-mail: jjjung@uos.ac.kr

© 2019, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

electrode를 용접할 때 쓰이는 레이저의 종류와 원리, 기술, 동향에 대해 기술하고자 한다.

2. Al-Cu 특성

2.1 Al 합금의 용접성

순수 알루미늄은 강도가 낮은 특성이 있다. 그러므로 Cu, Mn, Si, Mg 등의 원소를 첨가하여 주로 가공경화 또는 석출 경화에 의하여 강도를 향상시킨다. 알루미늄은 자성이 없는 특성을 지니며 탄소강과 비교하였을 때 전기 전도도는 약 4배 크고, 선 팽창계수는 약 2배 정도 커서 용접성이 까다로운 재료다. 이로 인하여 접합 계면에 기공과 균열이 발생한다.

2.1.1 용접균열

Al 합금에 발생하는 균열은 일반적으로 2가지이다. 첫째는 응고 균열이고 둘째는 용해 균열이다. 이 균열들은 용접시 접합계면 근처에 존재하는 열영향부(heat affected zone)에서 나타난다. 대부분의 균열은 고온 균열이고, 주로 grain boundary에서 발생하며 합금원소의 편석이나 저용점 금속에 의해 발생한다.

접합계면에 존재하는 용접 금속이 응고할 때, 수축응력 또는 외부의 힘이 작용하면 응고 균열이 발생한다. 용해 균열은 고온으로 인해 가열된 grain boundary가 용융할 때 팽창하면서 발생된다.

2.1.2 모재, 용접 재료와 용접 균열

Al 순도 99.0% 이상인 1xxx계열, Al-Mn 계 합금인 3xxx계열, Al-Si 계 합금인 4xxx계열, Al-Mg 계 합금인 5xxx계열 Al은 균열 발생에 대한 저항성이 높고 용접성이 우수한 재료이다.⁵⁾ Al-Cu 계 합금인 2xxx계열은 열처리에 따라 강도는 높지만 내식성 및 용접성이 떨어지는 것이 많다. 5xxx계열의 Al-Mg 합금은 Mg 함량이 증가함에 따라 강도가 증가하지만, 가공성과 고온 내식성 등이 저하되는 특성을 지닌다.⁶⁾ 6xxx계열의 Al-Mg-Si 합금은 동종 재료와 용접할 때, 균열이 발생할 가능성이 높다. 이러한 이유로 Al-Mg계, Al-Si계의 용접 재료를 이용해 균열 발생을 억제시킨다. 또한 6xxx계열의 모재는 Mg, Si 때문에 입열량이 증가되면 용접부에 미세균열이 발생하는 단점이 있다.⁷⁾ 그렇기 때문에 적절한 용접 조건이 필요하다.

2.1.3 기공

Al 합금을 용접할 때 많은 기공이 발생하는 특징이 있다. 만약 용접부에 기공이 균일하게 분산된다면 강도에 큰 영향을 주지 않는다. 그러나 기공이 집중되거나, 크기가 큰 기공이 발생하면 강도에 영향을 미친다. 기공의 발생은 주로 수소에 의해 발생된다.⁸⁾ Al 합금 용접시, 용융과 응고 과정 중에 수소의 용해도가 변한다. 이러한 용해도 차이로 인하여 빠져나온 수소는 외부로 방출되지 못

하고 조직 내부에 남아서 기공이 된다.⁸⁾ 또한 수소가 발생하는 원인으로는 모재 표면의 수분, 유기물 및 산화막에 의한 수분, 대기 중의 수분 등이 있다.⁸⁾ 대기 중의 수분의 침입은 이중 가장 큰 문제가 되는 수소 발생원이다.⁸⁾

2.2 Cu 합금의 용접성

구리는 일반적으로 산소를 함유한 구리와 산소를 함유하지 않은 탈산 구리로 분류된다. 산소를 0.02-0.04 wt% 정도 함유한 구리를 정련 구리라고 한다. 또한 수소기류 또는 진공중에서 용해, 주조하여 만들고, 수소를 함유하지 않으며 전기 전도율이 높은 동을 무산소동이라고 한다. 구리의 용점은 1,083°C이다. 순구리의 열전도도는 연강의 8배 이상이고 알루미늄의 약 2배이다. 그렇기 때문에 높은 열전도도로 인하여 용접시 충분한 용입을 얻으려면 예열과정 또는 빠른 용접이 필요하다.⁹⁾

3. 레이저 원리와 종류

3.1 레이저 발진 원리 및 역사

레이저(LASER)는 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation이다. 레이저를 만들기 위해서는 3가지 조건을 만족해야 한다.¹⁰⁾ 첫째로는 매질(Active medium)이 필요하다. 매질은 전자파 스펙트럼의 광학 구역에서 전자파를 방출시킨다.¹⁰⁾ 두 번째는 활성화된 매질 내에서 밀도 반전이 있어야 한다.¹⁰⁾ 이는 펌핑 Energy에 의해서 여기가 되며 수행된다. 세 번째로는 레이저 기구 내에 공진기이다.¹⁰⁾ 이 레이저 공진기 내에는 end mirror인 100% 반사 미러, output mirror인 일부 투과 미러가 있다. 이 공진기는 유도 방출된 레이저를 증폭하는 역할을 한다.¹⁰⁾

실제 LASER는 매질에서 나오는 파장외에 다른 흡수 파장을 갖는 펌핑 에너지를 사용한다. 펌핑에너지의 예시로는 램프(lamp)를 이용하거나, 방전에 의하여 자유전자에 에너지를 주어 원자에 충돌시켜 바닥상태에서 들뜬 상태로 올리는 등의 다양한 펌핑 방식을 사용한다. CO₂ 레이저는 분자 기체 레이저이다. 레이저 발진 과정중에 분자는 4가지 진동 모드를 보이며, 그 진폭을 바닥 및 들뜬 상태로 사용하는 여러 가지 예가 있다.

레이저를 만들기 위해 유도방출, 펌핑소스가 필요하다. 또한 광자가 증폭 과정 중에 미러를 수회 왕복하여 지나가며, 증폭된 매질의 들뜬 상태에 있는 원자나 분자를 바닥상태로 유도방출 시키며 증폭 과정이 잘 이루어질 수 있도록 하는 장치가 필요하다. 이 장치는 광학계로 구성되며, 이것은 레이저 발진기 또는 공진기라고 불린다. Fig. 1과 같이 공진기는 보통 증폭할 매질을 가운데 두고, 양 끝단에 두 개의 거울로 이루어진다.

이 공진기에서 증폭되어 방출된 레이저 빔은 공진기 내의 거울 사이를 왕복하며 증폭 과정이 일어나고, 이 방출된 레이저는 직진성과 간섭성이 우수하다. 실제 레이저

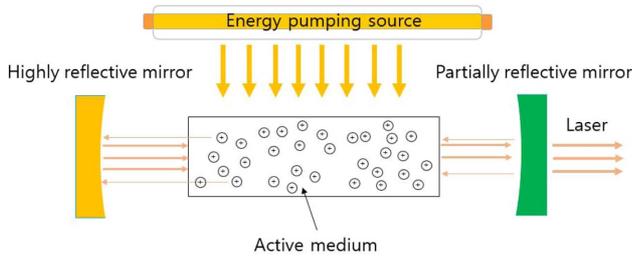


Fig. 1. Composition of laser resonator.

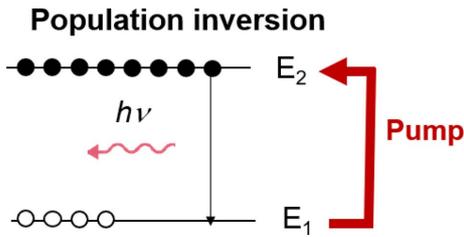


Fig. 2. Principle of population inversion.

를 발진하기 위해서는 Fig. 2와 같이 pumping energy가 있어야 한다.

레이저의 역사는 유도 방출에 대한 이론을 1916년에 적립한 Albert Einstein에 의해 시작되었으며, 1953년에는 메이먼에 의하여 유도 방사에 의한 빛의 증폭을 성공시켰다. 그것은 Microwave의 파장을 사용한 MASER이고 메이먼에 의해 제작되었다. LASER를 만드는데 필요한 이론적배경은 1958년 Towns와 Schawlow에 의하여 만들어졌다. 마침내 1960년 Hughes Research에서 최초의 레이저가 처음으로 만들어졌다. 1964년 Nd:YAG와 CO₂ 레이저가 제작되었다. 그리고 현재에는 새로운 종류의 레이저인 Disk, Fiber, Green laser등 빠르게 개발되고 있으며 응용이 매우 빨라 다양한 분야에 적용되고 있다.

3.2 레이저 종류

3.2.1 디스크 레이저 (Disk laser)

Al-Cu 용접에 사용된 디스크 레이저의 레이저 매질은 Yb:YAG로 구성된 얇은 결정 디스크이다. 직경이 15 mm 미만이고 두께는 200 μm이다. 디스크는 히트 싱크(heat sink) 상에 얹혀 있으며, 이 히트 싱크가 열을 방출시켜 디스크를 냉각한다. 디스크의 냉각된 뒤쪽 측면에는 반사면이 있어서 레이저 빔과 펌프 광선을 반사한다.^{11,12)}

이 레이저의 설계는 간단하다. Fig. 3을 보면 다이오드 레이저에서 나오는 레이저 광(970 nm)을 펌프 광선으로 사용한다. 몇 mm의 직경으로 초점을 맞춘 후 디스크를 겨냥한다. 이때, 디스크가 너무 얇아서 통과하는 펌프 방사선의 일부만 흡수한다. 따라서, 흡수 길이를 늘리기 위해 여러 쌍의 벤딩 미러(bending mirrors) 후방 거울, 포물면 거울을 사용하여 총 48회에 걸쳐서 디스크를 통해 펌프 빔을 보낸다.¹³⁾

디스크 레이저는 작업에 따라 작동 모드를 유연하게 선

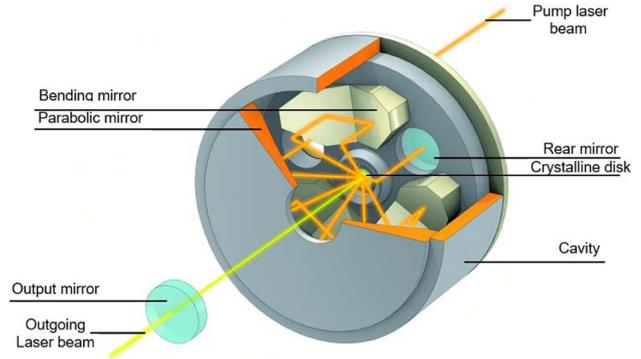


Fig. 3. Disk laser resonator.¹⁹⁾

택할 수 있는 장점이 있다. 사용 가능한 작동 모드는 continuous wave(CW) 모드, 펄스모드이며, 이러한 작동 모드는 용접, 드릴링, 커팅 등 폭 넓은 분야에서 사용된다. 최근 레이저는 자동차, 관금, 반도체 산업과 듀얼빔 공법의 개발에 따라 고출력 레이저가 요구된다.

높은 출력과 높은 빔 특성을 요구하는 적용 분야에는 고체 레이저인 디스크 레이저의 활용도가 높다. 높은 출력이 요구되면 많은 온도 차가 발생한다. Fig. 4는 로드 타입 레이저와 디스크 타입 레이저를 나타낸 자료이다. 로드 타입의 레이저는 집중된 온도 분포 때문에 빔 품질을 저하시키기도 한다. 반면에 디스크 레이저는 빔이 단면적에 일정하게 분포되기 때문에 온도가 일정하고 빔 품질이 높다.¹⁴⁾ 디스크 레이저는 두가지의 빔 소스의 장점을 결합하여 만든 것이다. 하나는 다이오드 레이저의 고효율성이고, 다른 하나는 디스크의 높은 빔 특성이다.

또한, 디스크 레이저는 레이저 출력을 두가지 방식으로 조절할 수 있다. 하나는 펌프 스팟(pump spot)을 확대시키는 방법이다. 이 방식은 디스크 안에 Ytterbium 이온들을 활성화시켜 더 많은 여기가 일어나게 만든다. 그에 따라 더 많은 광자들이 방출되기 때문에 레이저 출력이 증가한다. 다른 방법은 1개 이상의 캐비티를 결합하는 방법이다. 이 방식은 결합된 모든 디스크의 출력을 1개의 레이저 빔에서 이용할 수 있는 방법이다.

본 저자 등은 Table 1, 2에 나타난 6k W급 CW형 Yb:YAG laser와 평균출력 400 W의 Green laser를 이용해 질소 가스 분위기에서 0.2 mm 두께의 Cu와 0.4 mm 두께의 Al을 용접하였다. 레이저 출력은 2 kW, 빔은 직경 100 μm으로 진행하였다.

Fig. 5를 보면, 용접 에너지가 80%인 시편번호 A-X-3은 전체적으로 양호한 비드를 얻을 수 있었다. 그러나 용접 에너지가 60%, 40%, 20%로 낮아질 경우 용입 불량 현역하게 나타남을 확인할 수 있었다.

3.2.2 CO₂ 레이저

CO₂ 레이저는 CO₂ 분자에 의해 레이저 광이 방출된다. CO₂ 분자는 1개의 탄소 원자와 2개의 산소 원자로 구성되어 있다. CO₂ 분자는 산소 원자 사이에 위치하는 탄소

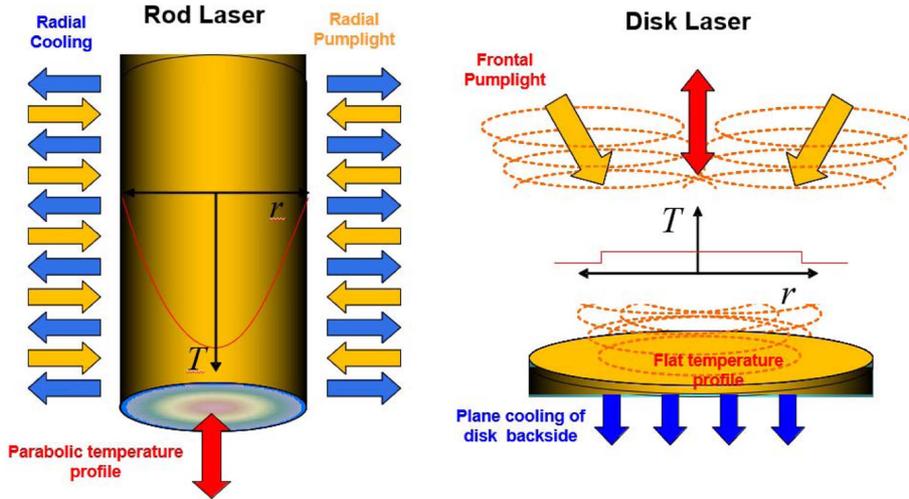


Fig. 4. Solid state laser active medium heat problem.

Table 1. Specifications for 6000W CW Yb:YAG laser

Maker	Trumpf
Model	Trudisk 6001
Wavelength	1,030 nm
Maximum. Laser power	6,000 W

Table 2. Specifications for 400 W pulse green laser

Maker	Trumpf
Model	TrudiskPulse 421
Wavelength	515 nm
Average. Laser power	400 W



Fig. 5. Cu upper front bead shapes.

원자와 사슬을 형성하고, 여기되었을 때, 분자가 진동한다.¹⁵⁾ CO₂ 레이저는 4개의 에너지 준위를 이동하며 4번의 진동 단계를 거친다. CO₂ 레이저의 활성 매질(laser active medium)은 CO₂로만 구성된 것이 아니다. 이 활성 매질은 CO₂, He, N₂의 혼합물이다. 헬륨과 질소는 보조가스로 사용된다.

고압직류나 고주파수 교류가 가스 혼합물에 있는 질소 분자와 부딪혀서 자유전자(free electron)를 생성하고 질소 분자는 진동한다. Fig. 6처럼, 이 질소 분자가 CO₂ 분자와 충돌하면 CO₂ 분자의 에너지 준위가 높게 상승한다. 이러한 진동상태에서 CO₂ 분자의 원자들은 움직이고 있는 상태이다. 그 후, 낮은 에너지 준위로 안정화될 때 CO₂

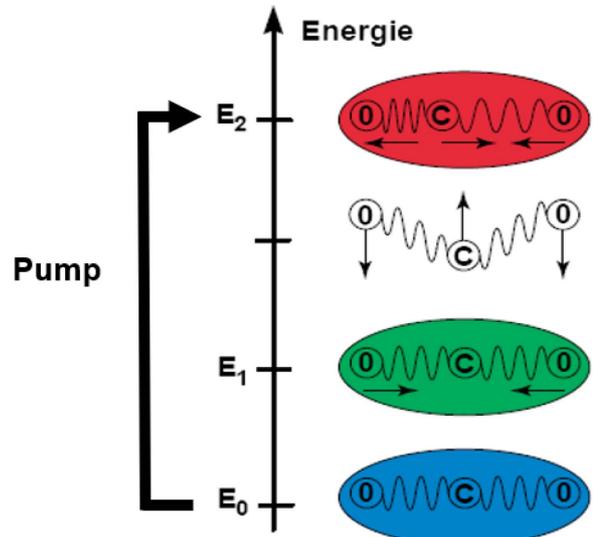


Fig. 6. Excited energy level of the CO₂ molecules.

분자는 10.6 μm 파장의 레이저 광을 발산한다.¹⁶⁾

이때 다시 기저상태로 되돌아가고 공정 중에 열을 방출한다. 여기에서 불활성기체 헬륨의 원자가 작동하기 시작한다. CO₂ 분자와 헬륨기체가 부딪힘으로써 헬륨 원자가 낮은 레이저 준위의 과소화를 촉진시키고, 열을 흡수하고 방출하는 과정을 돕게 된다.¹⁶⁾ Fig. 7은 CO₂ 레이저의 resonator를 나타낸다.

3.2.3 반도체 레이저(다이오드 레이저, semiconductor laser)

레이저 다이오드는 여러 개의 결정 레이어로 구성되어 있다. P-유형 레이어와 N-유형 레이어가 코어를 형성한다. 이러한 레이어들 간에 발광성 재결합이 발생한다. 다른 빔 소스와 마찬가지로 레이저 다이오드 공진기를 이용하여 빛의 유도방출(stimulated emission)을 가능하게 하고 레이저 공정을 시작한다.¹⁷⁾ 발광 영역과 직접적으로 인접해 있는 레이어들이 낮은 굴절률을 보이기 때문에,



Fig. 7. CO₂ laser resonator.

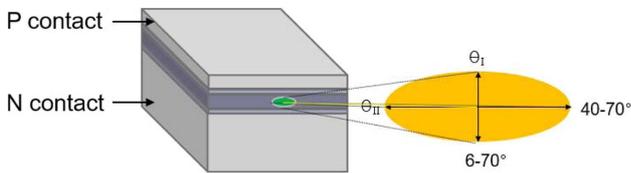


Fig. 8. Diode laser.

그 빛은 바로 활성 영역으로 되돌아가게 된다.¹⁷⁾ 이와 같이 레이저들은 광진기의 별과 같은 기능을 하게 된다. 남은 레이저들은 출력을 공급하고 열을 방출하는데 사용된다. 뒤쪽 다이오드 벽에 있는 반사면은 뒤쪽 광진기 거울 역할을 한다. 한편으로, 전면 다이오드 벽은 부분적으로 투과되는 코팅을 하는데, 이것이 최적의 반사 정도를 제공하고 반도체를 보호한다.¹⁷⁾ Fig. 8은 다이오드 레이저를 나타낸다.

개별 레이저 다이오드는 일반적으로 최대 15 W 출력까지 생산할 수 있는 능력이 있다. 그러나 재료가공을 하거나 고출력 고체 레이저를 펌핑하기엔 출력이 상당히 낮은 수준이다. 재료가공을 하거나 고출력 고체 레이저를 펌핑하려면 수백, 수천 W가 필요하다. 출력이 높을수록 더 많은 방출 과정이 필요하며, 결과적으로 재결합이 발생할 수 있는 큰 면적이 필요하다.

3.2.4 Nd:YAG laser

네오디뮴(Nd)는 최초의 로드 유형 고체 레이저다. 그러나 최근 여러 적용 분야에서는 수년에 걸쳐 이 레이저를 이테르븀(Yb) 기반 디스크와 광섬유 레이저로 대체하였다. Nd:YAG 레이저의 결정내 Nd 농도는 일반적으로 약 1%이다. Nd ion은 투명한 yttrium aluminum garnet(YAG)을 붉은 빛의 결정체로 전환시킨다.

Nd:YAG 레이저는 4개의 에너지 준위가 레이저 공정에 관여한다. 아크램프나 다이오드 레이저에서 나오는 광선은 Nd ion의 전자들을 매우 들뜬 상태로 여기하는 데 사용되며, 이때 전자들이 높은 에너지 준위에서 낮은 에너지

준위로 떨어지며 에너지를 열 형태의 결정 호스트(crystalline host)로 방출한다. 이 광의 파장은 1.06 μm이다. 레이저의 에너지 준위가 낮은 상태가 되면 전자는 빠르게 기저 상태로 붕괴되어 열을 발산시킨다. Nd ion의 낮은 레이저 준위는 기저상태보다 상당히 높다. 그 결과 낮은 레이저 준위는 결정이 기저상태에 있을 때 밀도가 조밀하지 않아서 밀도 반전분포(population inversion)를 생성하기가 쉬워진다.¹⁸⁾

5. 결 론

최근 친환경 전기자동차와 하이브리드 자동차에 대한 관심이 커지며, 재충전이 가능한 리튬이온 등의 이차전지들의 수요가 증가하고 있다. 이차전지는 수백, 수천개의 셀로 구성되어 있으며, 이 셀을 직렬로 연결하기 위해 양극으로 사용되는 Al과 음극으로 사용되는 Cu의 접합 방법이 필수적이다. 본 논문에서는 Al, Cu의 특성과 용접성, 레이저의 원리와 역사 및 Al-Cu 디스크 레이저 용접을 다루었다. 본 저자들은 0.2 mm 두께의 Cu와 0.4 mm 두께의 Al을 디스크 레이저를 이용해 용접하였고, 용접 에너지가 80%일 때 용접부 비드 형상이 양호한 것을 확인할 수 있었다. 향후 열손실 및 냉각기술 개선 연구를 진행한다면 전기자동차, 배터리 등의 친환경 산업에 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 2019년도 중소기업 기술개발 지원사업 산학연 Collabo R&D의 재원으로 중소벤처기업부의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 S2731280).

References

1. M. Kang, W. S. Choi, and S. Kang, "Ultrasonic and Laser Welding Technologies on Al/Cu Dissimilar Materials for the Lithium-Ion Battery Cell or Module Manufacturing", *Journal of Welding and Joining*, 37(2), 52 (2019).
2. M. Kraetzsch, J. Standfuss, A. Klotzbach, J. Kaspar, B. Brenner, and E. Beyer, "Laser beam welding with high-frequency beam oscillation: welding of dissimilar materials with brilliant fiber lasers", *Phys. Procedia.*, 12, 142 (2011).
3. M. Murayama, Y. Nakayama, K. Yamazaki, Y. Hoshina, H. Watanabe, N. Fuutagawa, H. Kawanishi, T. Uemura, and H. Narui, "Watt?Class Green (530nm) and Blue (465nm) Laser Diodes", *Phys. Status Solidi A*, 215, 1 (2018).
4. N. Speker, P. Haug, S. Feuchtenbeiner, T. Hesse, and D. Havrilla, "BrightLine weld-spatter reduced high speed welding with disk lasers", *Proc. High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems VII*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 10525, 105250C (2018).
5. R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction Stir Welding and Pro-

- cessing”, Materials Science and Engineering: R: Reports, 50, 1 (2005).
6. D. H. Jung and J. P. Jung, “Aluminum alloys and their joining methods”, J. Microelectron. Packag. Soc., 25(2), 9 (2018).
 7. S. J. Lee, K. D. Choi, B. H. Park, J. D. Kim, and J. Suh, “Weldability of aluminum alloys laser welding for with high-power disk laser”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 41(7), 638 (2017).
 8. C. Huntington and T. W. Eagar, “Laser welding of aluminum and aluminum alloys”, WELDING J., 62(4), 105 (1983).
 9. M. Schweier, J. F. Heins, M. W. Haubold, and M. F. Zaeh, “Spatter formation in laser welding with beam oscillation”, Phys. Procedia., 41, 20 (2013).
 10. D. H. Kim, “Waveability and plane wave of light”, Laser Processing, pp.77, Kyungmoon, Seoul (2005).
 11. A. Lisiecki, “Welding of titanium alloy by Disk laser”, Laser Technology 2012: Applications of Lasers, 8703, 87030T (2013).
 12. S. Katayama, “Characteristics of laser welding”, Handbook of laser welding technologies, pp.3–16, Woodhead Publishing, Oxford (2013)
 13. R. S. Sharma and P. Molian, “Weldability of advanced high strength steels using an Yb: YAG disk laser”, Journal of Materials Processing Technology, 211(11), 1888 (2011).
 14. D. Janicki, “Disk Laser Welding of Armor Steel/Spawanie Laserem Dyskowym Stali Panczernej”, Archives of Metallurgy and Materials, 59(4), 1641 (2014).
 15. A. Matsunawa, N. Seto, J. D. Kim, M. Mizutani, and S. Katayama, “Dynamics of keyhole and molten pool in high-power CO2 laser welding”, High-Power Lasers in Manufacturing, 3888, 34 (2000).
 16. M. Kutsuna and L. Chen, “Interaction of both plasmas in CO2 laser-MAG hybrid welding of carbon steel”, First International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing, 4831, 341 (2003).
 17. W. W. Chow, S. W. Koch, and M. I. Sargent, “Semiconductor Laser Diodes”, Semiconductor-laser physics, pp.1–33, Springer Science & Business Media, Berlin (2012).
 18. W. Koechner, “Thermal lensing in a Nd: YAG laser rod”, Applied optics, 9(11), 2548 (1970).
 19. K. Löffler, “4-Developments in disk laser welding”, Handbook of laser welding technologies, pp.73–102, Woodhead Publishing, Oxford (2013).



- 황 승 준(黃昇準)
 - 서울시립대학교 신소재공학과
 - 마이크로전자패키징, 브레이징
 - e-mail: hs6136@uos.ac.kr
-



- 김 태 완
 - 서울시립대학교 신소재공학과, TRUMPF Korea
 - 분야: 레이저 접합, 응용기술
 - e-mail: taewan.kim@trumpf.com
-



- 전 옥 상
 - 서울시립대학교 신소재공학과
 - 분야: 용접 및 접합, LME
 - e-mail: wsjeon88@uos.ac.kr
-



- 정 재 필
 - 서울시립대학교 신소재공학과
 - 분야: 전자패키징, 접합
 - e-mail: jujung@uos.ac.kr
-