자동차 이차전지 제조를 위한 알루미늄과 무산소동의 레이저 용접특성

강민정* · 박태순* · 김철희*,† · 김정환**

*한국생산기술연구원 용접접합연구그룹

***한국생산기술연구원 뿌리산업진흥본부

Laser Welding Characteristics of Aluminum and Copper Sheets for Lithium-ion Batteries

Minjung Kang*, Taesoon Park*, Cheolhee Kim*,† and Jeonghan Kim**

*Advanced Welding and Joining R&D group, Korea Institute of Industrial Technology,
Incheon 406-840, Korea

**Korea Ppuri Industry Center, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-840, Korea

†Corresponding author : chkim@kitech.re.kr

(Received October 16, 2013 ; Revised December 12, 2013 ; December 19, 2013)

Abstract

Several joining methods involving resistance welding, laser welding, ultrasonic welding and mechanical joining are currently applied in manufacturing lithium-ion batteries. Cu and Al alloys are used for tab and bus bar materials, and laser welding characteristics for these alloys were investigated with similar and dissimilar material combinations in this study. The base materials used were Al 1050 and oxygen-free Cu 1020P alloys, and a disk laser was used with a continuous wave mode. In bead-on-plate welding of both alloys, the joint strength was higher than the strength of O tempered base material. In overlap welding, the effect of welding parameters on the tensile shear strength and bead shape was evaluated. Tensile shear strength of overlap welded joint was affected by interfacial bead width and weld defect formation. The tensile-shear specimen was fractured at the heat affected zone by selecting proper laser welding parameters.

Key Words : Laser welding, Aluminum, Copper, Dissimilar metal joining, Lithium-ion battery

1. 서 론

최근 각광을 받고 있는 친환경 자동차인 전기 자동차와 하이브리드 자동차는 이차전지 팩(pack)을 내장하고 있다. 이차전지를 만들기 위해 전극과 탭(tab) 접합, 케이스 용접과 같은 셀(cell) 단위의 접합과 셀과 셀을 결합하는 모듈 단위 접합, 모듈과 모듈을 접합하는 팩 레벨 접합이 필요하다¹⁾. 이 중 모듈단위 접합에서는 셀의 탭과 탭 사이의 접합과 탭과 버스바 사이의 접합이 요구된다. 탭과 버스바에 이용되는 소재는 구리, 알루미늄 등이 있는데 이차전지의 종류 및 극성에 따라 선호되는 소재가 달라 동종 및 이종소재의 접합이 필요하다^{1,2)}.

이들 소재의 접합에서는 전기저항용접, 초음파용접,

레이저용접, 기계적 체결 등이 이용되고 있다. 이종소재의 접합에는 초음파용접이 가장 선호되고 있으나 적용 두께의 한계가 있고, 표면조건의 영향이 커서 레이저용접의 적용도 활발하다. 알루미늄과 구리의 동종 및 이종소재의 레이저용접에 1 μm 파장대의 Nd:YAG 레이저를 적용할 경우 흡수율이 높지 않아 펄스 레이저가 선호되었다^{3,4)}. 최근에는 빔품질이 우수한 1 μm 파장대의 연속파형 레이저를 이용한 용접결과가 다수 소개되고 있으며⁵⁻⁸⁾, 빔의 모듈레이션이나 하이브리드화한 연구도 활발하다⁹⁻¹⁵⁾.

전지 부품의 접합에서는 접합강도 외에도 전기전도도가 중요한 역할을 하는데 특히 Al-Cu를 용융용접하는 경우 접합부에 형성되는 취성이 강한 금속간화합물(Al_xCu_y)이 전기전도도를 떨어뜨린다고 보고하고 있다.

이러한 금속간화합물의 형성은 온도에 영향을 받으며, 금속간화합물의 두께가 증가할수록 전기전도도는 급격히 떨어진다^{2,13,16,17)}.

본 연구에서는 모듈단위 접합에서 탭과 탭 사이의 접합과 탭과 버스바 사이의 접합공정을 모사하기 위해 알루미늄과 구리 소재를 대상으로 동종 및 이종소재 조합에 대해 레이저 용접을 수행하고 접합특성 평가 및 접합계면에서의 금속간화합물의 형성을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 조건

본 연구에서는 적용한 소재는 순수 Al 합금인 Al 1050H와 무산소동 C1020P-1/2H으로 화학적 성분과 물성은 Table 1과 2와 같다. Al 1050 합금의 경우 두께 0.2 mm, 무산소동 C1020P 소재의 경우 두께 0.2 mm와 1.0 mm의 판재를 각각 이용하였다.

실험을 위하여 디스크레이저를 적용하였으며, 적용소재의 높은 레이저빔 반사율을 고려하여 초점거리 220 mm 레이저 광학계의 각도를 10도 기울여 용접을 진행하였다. 용접변수로는 용접속도와 레이저 출력을 선정하였다. 빔은 시편의 상판 표면에 초점을 두고 조사되었으며 보호가스는 적용하지 않았다.

용접부의 기초물성을 파악하기 위한 비드(bead-on-

Table 1 Chemical compositions of base materials¹⁸⁻²⁰⁾ (wt. %)

	Cu				O ₂			
C1020P	>99.96				<10 ppm			
	Cu	Fe	Si	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
Al 1050	0.03	0.30	0.11	0.00	0.002	0.004	0.01	Bal.

Table 2 Properties of base materials^{20,21)}

Property	C1020P	Al 1050
Density (kg/m ³)	8,940	2,705
Electrical resistivity (nΩ*m)	17.1	28.1
Thermal conductivity (W/m*K)	391	231
Thermal expansion coefficient (10 ⁻⁶ /°C)	17.0	21.8
Melting point (°C)	1,083	646
Specific heat capacity (J/kg*K)	385	900

Fig. 1 Specimen configuration

plate, BOP)용접과 실제 이차전지에 적용되는 겹치기 용접을 수행하였다. 각 시험편은 길이 130 mm, 너비 70 mm로 가공하였으며, 겹치기 용접을 하는 경우에는 Fig. 1과 같이 겹침부가 25 mm가 되도록 시험편을 배치하고 겹침부의 중심에서 용접을 수행하였다.

겹치기 시험편의 전단인장시험에서는 Fig. 1과 같이 제작한 시험편을 40 mm 폭으로 절단하여 5 mm/min의 속도로 시험편이 파단될 때까지 하중을 인가하여 파단하중의 평균값을 산출하였다. 용접부의 비커스 경도는 25 gf 하중에서 10 s의 유지시간으로 100 μm 간격을 두고 측정되었다. 용접시험편의 계면은 폴리싱 후 광학현미경과 SEM을 이용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 BOP 레이저 용접

소재별 용접특성을 파악하기 위하여 0.2 mm 두께의 C1020P 소재와 Al 1050 합금에 대해 완전용입이 달성되도록 BOP 용접을 수행하였다. 두 가지 소재가 동일한 두께를 가지고 있음에도 불구하고 Table 2에 나타난 바와 같이 서로 다른 물성을 가지고 있어 레이저 용접변수를 상이하게 적용하였다. C1020P 소재의 경우 1700 W의 레이저 출력과 5 m/min의 용접속도 조건에서 완전용입이 달성되었으며, Al 1050 합금은 상대적으로 낮은 입열 조건인 1000 W의 레이저 출력과 11 m/min의 용접속도에서 완전용입이 달성되었다.

제작된 BOP 용접시험편을 대상으로 소재별 인장실험을 실시하였으며, 시험전후의 비드표면 사진을 Fig. 2에 나타내었다. 실험 결과 C1020P 소재의 BOP 용접시험편의 경우, 측정된 인장강도가 245 MPa로 파단

Fig. 2 Bead appearances for BOP welds

Fig. 3 Hardness profiles for BOP welds

은 열영향부에서 발생하였다. 용접부 강도가 O재 강도 (195 MPa)^{18,19)} 이상으로 측정되었다. Al 1050 합금의 BOP 용접시험편의 경우 인장강도가 110 MPa로 측정되었다. 파단은 Fig. 2와 같이 용접부에서 발생하였으나, 용접부 강도가 O재의 인장강도(76 MPa)²⁰⁾ 이상으로 측정되었다.

소재별로 다른 파단위치는 Fig. 3에 나타난 용접부 경도분포에 기인한다. C1020P 소재의 경우 Al 1050 합금에 비해 더 높은 입열이 가해졌음에도 불구하고 용접부가 좁으며, 열영향부에서 가장 낮은 경도값이 측정되었다. 열영향부의 낮은 경도는 인장시험에서의 열영향부 파단의 원인으로 판단된다. 반면에 Al 1050 합금의 경우 용접부에서 가장 경도가 낮게 측정되었다. 열영향부가 용접부 주위로 넓게 분포하고 있으나 경도값이 용접부 보다 높아서 인장시험 시 용접부 파단이 발생한 것으로 판단된다.

3.2 동종소재 겹치기 레이저 용접

C1020P 소재를 대상으로 레이저 출력을 3 kW로 고정한 조건에서 용접속도를 변화시켜가며 동종소재 겹치기 용접을 수행하였다. 0.2 mm 시험편의 동종두께 조합과 0.2 mm 시험편과 1.0 mm 시험편의 이종두께 조합에 대해 각각 겹치기 용접을 실시하였으며, 이종두께 조합의 경우 0.2 mm 시험편을 위쪽에 위치시켰다.

0.2 mm 동종두께 시험편의 겹치기 용접은 용접속도를 6~15 m/min으로 가변하면서 실시되었으며, 그 때 용접비드의 형상과 전단인장하중은 각각 Fig. 4와 5와 같다. 전단인장하중은 실제 현장에서 요구되는 하중 기준과 비교가 용이하도록 용접길이 10 mm 당 kgf로 표시하였다. 이 범위의 용접속도에서 전단인장 시험 시 시험편은 모두 열영향부에서 파단이 발생하였으며 이는 시험편의 두께에 비해 용접시험편의 계면 비드폭이 충분하여 경도가 가장 낮은 열영향부에서 파단한 것이 그 원인으로 판단된다.

Fig. 4 Bead shapes for overlap welds (C1020P, 0.2 mm + 0.2 mm)

Fig. 5 Measured tensile-shear strength and interfacial bead width (C1020P, 0.2 mm + 0.2 mm)

Fig. 6 Bead shapes for overlap welds (C1020P, 0.2 mm + 1.0 mm)

Fig. 7 Measured tensile-shear strength and interfacial bead width (C1020P, 0.2 mm + 1.0 mm)

Fig. 8 Longitudinal cross-sections for different welding speeds (C1020P, 0.2 mm + 1.0 mm)

이종두께 시험편의 겹치기 용접은 용접속도를 5~11 m/min로 가변하면서 실시되었으며, 그 때 용접비드의 형상과 전단인장하중은 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 과입열 조건인 용접속도 5 m/min에서는 용접부에 언더필 현상과 함께 변형이 관찰되었으나 전단인장시험에서는 BOP 시편과 마찬가지로 열영향부에서 파단하였다. 용접속도가 증가하면서 용접부 강도가 감소하는 경향을 보여주며, 접합계면의 비드폭 또한 입열의 감소로 인해 좁아진다. 용접속도 9 m/min 이상에서는 파단 모드가 열영향부 파단에서 용접부 파단으로 전환되었으며, 용접비드 외관에서의 결함도 점차 증가하였다. 이에 따라 9 m/min 이상의 용접속도에서는 속도 증가에 따라 전단인장강도가 저하된다. 그러나 Fig. 8의 종단면 형상을 통하여 확인할 수 있듯이 용접속도가 빠른 경우에도 안정된 용입을 보여주고 있으며, 용접부 내부결함은 발견되지 않았다.

3.3 이종소재 겹치기 레이저 용접

3.3.1 용접속도에 따른 이종소재 접합특성

버스바와 탭 사이의 접합공정을 모사하기 위하여 0.2 mm의 Al 1050 합금과 1.0 mm의 C1020P 소재를 겹치기 레이저 용접을 수행하였다. 용접입열에 따른 용접특성을 비교하기 위하여 레이저 출력과 용접속도를 변수

로 선정하였다. 겹치기 용접은 두께 0.2 mm의 Al 1050 합금 시험편을 위쪽에 위치시켰으며 보호가스는 적용하지 않았다.

이종두께 이종소재 시험편을 대상으로 레이저 출력을 1250 W로 고정하고 용접속도를 8~14 m/min으로 가변하면서 용접을 실시하였다. 이 때 용접비드의 단면 및 표면은 Fig. 9와 같다. 접합계면에서 부분 용입이 발생하면서 접합이 이루어지며 용접속도가 빠른 경우에는 비드의 가장자리에 언더컷이 존재한다. 비드 표면의 경우에는 모든 용접속도에서 블로우홀이 존재한다.

각 용접속도별 시험편에서 측정한 계면 비드폭과 전단인장강도는 Fig. 10과 같다. 전단인장하중은 용접길이 10 mm 당 kgf로 표시하였다. 용접속도가 증가함에 따라 전단인장시험에서 파단모드는 열영향부 파단에서 용접부 파단으로 전환된다. 용접속도가 증가할수록 계면 비드폭이 줄어드는 경향을 보이고 있으나 계면 파단이 아닌 용접부 파단이 발생하였다. Fig. 9의 용접부

Fig. 9 Bead shapes for overlap welds for various welding speeds (Al 1050 0.2 mm + C1020P 1.0 mm)

Fig. 10 Tensile-shear strength and interfacial bead width for various welding speeds (Al 1050 0.2 mm + C1020P 1.0 mm)

단면에서 볼 수 있는 것과 같이 고속용접 시에는 충분한 양의 용융풀이 형성되지 못하고 언더컷이 발생하여 용접부 파단이 발생하는 것으로 판단된다.

3.3.2 레이저출력에 따른 이종소재 접합특성

용접출력별 용접특성을 파악하기 위하여 용접속도는 11 m/min으로 고정하고 레이저 출력을 1000~1500 W으로 가변하면서 용접을 실시하였다. 겹치기 용접부의 단면 및 표면을 Fig. 11에 나타내었다. 레이저 출력 1000 W에서는 브레이징 형태의 접합이 이루어지며 더 출력이 높은 조건들에서는 부분용입이 관찰되었다. 비드 표면 기공의 경우 부분용입이 형성된 조건들에서 거의 유사한 정도로 발생하였다.

각 조건에 대한 계면비드폭 및 전단인장하중을 Fig. 12에 나타내었다. 1000 W의 레이저 출력에서 접합계면이 넓게 형성되었으나 접합강도는 가장 낮게 측정되었다. 부분용입이 형성된 다른 조건들에서는 레이저 출

Fig. 11 Bead shapes for overlap welds for various laser powers (Al 1050 0.2 mm + C1020P 1.0 mm)

Fig. 12 Tensile-shear strength and interfacial bead width for various laser powers (Al 1050 0.2 mm + C1020P 1.0 mm)

력이 증가함에 따라 계면 비드폭은 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 접합강도의 경우에는 증가하였다가 감소하는 추세를 나타낸다. 전단인장 시험 시 레이저 출력이 증가함에 따라 파단모드는 계면파단, 열영향부 파단, 용접부 파단으로 전환된다. 앞서 언급한 바와 같이 낮은 출력 조건에서는 브레이징과 유사한 접합계면을 형성하면서 용융금속과 C1020P 소재 사이의 결합력 부족하거나 계면 비드폭이 좁아 계면파단 하는 것으로 판단된다. 여기에서 레이저 출력을 높일 경우에는 충분한 접합강도를 확보하여 Al 1050 합금의 열영향부 파단이 발생하였다. 그러나 더 출력을 높일 경우 Fig. 11의 용접비드 단면에서 확인할 수 있는 것과 같이 언더컷이 발생하고 이로 인해 용접부 파단으로 파단모드가 변한다. 최대 전단하중은 레이저 출력 1150~1250 W 범위 내에서 얻을 수 있었다.

앞 절의 레이저 출력 1250 W, 용접속도 14 m/min의 실험 조건과 해당 실험결과의 레이저 출력 1000 W, 용접속도 11 m/min 실험 조건의 경우 단위길이당 입열이 거의 동일함에도 불구하고 용입의 형상과 파단의 모드가 서로 다르게 나타난다. Al 합금의 경우 반사율이 높고 열전도도가 높기 때문에 동일 입열일 경우 높은 출력 및 빠른 용접속도가 용접강도 확보에 유리하다.

Fig. 13에 레이저 출력 1250 W, 용접속도 11 m/min 조건으로 용접을 실시한 시험편의 이종소재 접합계면을 확대하고 선정 위치에서의 성분분석결과를 나타내었다. Fig. 13(a)의 1 영역은 용접부와 Al 1050 합금의 계면으로서 레이저 빔에 의해 용융된 용융금속으로부터

Fig. 13 SEM images of interfacial surface between Al 1050 and C1020P

간접적인 열을 공급받는 지점에 해당된다. Fig. 13(b)에서와 같이 성분분석을 진행한 결과 C1020P 소재의 용융으로 인하여 용접부 내부에 미량의 Cu 원소가 검출되는 것을 확인하였다.

Fig. 13(a)의 2, 3 영역은 용접부와 C1020P 소재의 접합계면으로 레이저 빔에 의한 직접적인 열을 공급받는 지점에 해당된다. SEM 이미지를 통해 두 영역 모두 두 개의 층으로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 Cu 원소의 확산에 의한 영향으로 사료된다. 특히 Fig. 13(a)의 2 영역(Fig. 13(c))의 경우 넓은 영역에서 공정조직이 발견되어 Fig. 13(a)의 3영역(Fig. 13(d))과 구별된다. 그림에 나타난 바와 같이 용접부에 가까운 층에서는 Cu 원소가 1.5 wt% 내외로 낮은 함량으로 검출되었으며, C1020P 소재에 가까운 층에서는 7.4 wt%의 높은 함량의 Cu 원소가 검출되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 리튬-이온 배터리에 적용되는 Cu와 Al 소재를 대상으로 디스크레이저를 적용하여 동종/이종 레이저 용접을 수행하였다.

1) 각 소재를 대상으로 BOP 용접을 수행한 결과 무산소동의 경우 열영향부에서 가장 낮은 용접부 경도를 가지며 알루미늄의 경우 용접부에서 가장 낮은 경도가 측정되었다.

2) C1020P 동종소재에 대한 겹치기 시험을 수행한 결과 0.2 mm 동종두께 시험편의 경우 본 연구에서 적용한 용접조건에서 안정적인 강도확보가 가능하였으며 모두 열영향부에서 파단하였다. 0.2 mm 소재와 1.0 mm 소재의 이중두께 시험편의 경우 용접속도가 증가함에 따라 열영향부 파단에서 용접부 파단으로 파단 위치가 변화하고 이는 비드 표면에서 용접결합의 증가와 계면 비드폭의 감소에 기인한다.

3) Al 1050 합금과 C1020P 소재의 이중소재 겹치기 용접을 수행한 결과 적정용접조건에서는 Al 합금의 열영향부 파단이 발생하여 적정한 용접강도 확보가 가능하였다. 적정조건 보다 용접속도가 증가하거나 용접출력이 증가할 경우에는 용접부에 언더컷이 발생하고 용접부에서 판단된다.

Reference

1. S. S. Lee, T. H. Kim, S. J. Hu, W. W. Cai and J. A.

Abell: Joining Technology for Automotive Lithium-Ion battery manufacturing - a Review, Proceedings of the ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC 2010), 2010, MSEC2010-34168

2. P. A. Schmidt, M. Schweier, M. F. Zaeh: Joining of Lithium-Ion Batteries using Laser Beam Welding: Electrical Losses of Welded Aluminum and Copper Joints, Proceeding of 31st International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics (ICALEO 2012), 2012, 915-923

3. Y. Kawahito, S. Katayama: In-Process Monitoring and Feedback Control during Laser Microspot Lap Welding of Copper Sheets, Journal of Laser Application, **16-2** (2004), 121-127

4. M. Weigl, M. Schmidt.: Modulated Laser Spot Welding of Dissimilar Copper-Aluminum Connections. Proceedings of 4 M/ICOMM Conference, 2009

5. K.-B. Kwon, J.-W. Kim and C.-H. Kim: Analysis of Welding Distortion for Laser Welded Sheet Metal Structures of Aluminum alloy, Journal of Korean Welding and Joining Society, **27-3** (2009), 276-283

6. C. Kim and D.-C. Ahn: Influence of Process Parameters on Welding Quality during Lap Welding of Aluminum Sheets using High Brightness Disk Laser, Advanced Materials Research, **264-265** (2011), 361-366

7. C. Kim, Y.-N. Ahn and H.-S. Lim, Laser welding of automotive aluminum alloys, Journal of Korean Welding and Joining Society, **29-4** (2011), 383-388

8. A. Springer, P. Kallage, M. Hustedt, S. Barcikowski, V. Wesling and H. Haferkamp: Development of New Processes for Welding of Thermal Al-Cu Solar Absorbers using Diode Laser, Journal of laser applications, **24-5** (2012), 052002-1-7

9. B.-H. Kim, N.-H. Kang, Y.-H. Park, Y.-N. Ahn, C.-H. Kim and J.-H. Kim: A Study to Improve Weld Strength of Al 6k21-T4 Alloy by using Laser Weaving Method, Journal of KWJS, **27-4** (2009), 393-397 (in Korean)

10. K.-D. Choi, Y.-N. Ahn and C.-H. Kim: Crack Susceptibility Reduction and Weld Strength Improvement for Al Alloy 5J32-T4 by using Laser Weaving Method, Journal of KWJS, **27-4** (2009), 370-375 (in Korean)

11. K.-D. Choi, Y.-N. Ahn and C.-H. Kim: Weld Strength Improvement for Al alloy by using Laser Weaving Method, Journal of Laser Applications, **22-3** (2010), 116-119

12. D.-C. Ahn, C. Kim and J. Kim: Prevention of Back Side Humping in Laser Welding of Al 5J32 Alloy by using Laser Power Modulation, Journal of KWJS, **29-4** (2011), 442-446 (in Korean)

13. 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, Physics Procedia, **20** (2011), 142-149
14. A. Heider, A. Hess, R. Weber and T. Graf: Stabilizing Copper Welding Combining Power Modulated IR And Green Laser Beams, Proceeding of 30th International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics (ICALEO 2011), 2011, 395-402
 15. C. Kim, M. Kang and N. Kang: Solidification Crack and Morphology for Laser Weave Welding of Al 5J32 Alloy, Science and Technology of Welding and Joining, **18-1** (2013), 57-61
 16. M. Abbasi, A. Karimi Taheri, M. T. Salehi: Growth Rate of Intermetallic Compounds in Al/Cu Bimetal Produced by Cold Roll Welding Process, Journal of Alloys and Compounds, **319-1-2** (2001), 233-241
 17. R. Xiao, P. Dong: Laser Penetration Brazing of Dissimilar Alloys, Proceeding of 30th International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics (ICALEO 2011), 2011, 308-314
 18. JIS H 3100, Copper and Copper Alloy Sheets, Plates and Strips, 2012
 19. KS D 5530, Copper Bus Bars, 2009
 20. ASM International: Aluminum and Aluminum Alloys, ASM Specialty Handbook, 1993
 21. ASM International: Copper and Copper Alloys, ASM Specialty Handbook, 2001