니켈박판과 다공질니켈박판의 샌드위치 판넬 용접 특성

황찬연*, 양윤석⁺, 유영태⁺⁺

(Manuscript received: Mar, 7, 2012 / Revised: Mar, 23, 2012 / Accepted: May, 30, 2012)

Characteristics on Sandwich Panel Welding of a Ni Thin Plate and Porous Ni Thin Plate

Chan-Youn Hwang*, Yun-Seok Yang⁺, Young-Tae Yoo⁺⁺

Abstract

This paper focuses on the research of the anode and cathode in the Ni-MH secondary battery. In this paper, the proposed method employs a continuous wave Nd : YAG laser based on the pure Ni instead of the low carbon steel to improve the conductivity although the conventional secondary battery is based on the resistance spot welded with low carbon steel SS41. It welds a sandwich panel using the pure Ni and the porous thin plate, and the tested optimal conditions for the laser power and irradiation speed were 300 and 350 Watt, and 1.0~1.6m/min, respectively. Finally, we observed a ratio, heat input and cross-section and measured the conductivity of the welding section to test the weldability.

Key Words : Pure Ni(순수니켈), Porous Ni(다공질 니켈), Laser welding(레이저 용접), Thin plate(박판)

1. 서론

최근 자동차 산업에서는 배기가스로 인한 환경오염을 줄이기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 자동차의 생산량이 매년 증가하면서 자동차에서 배출되는 배기가스 때문에 환경오염이 해마다 증가하고 있어 전 세계 자동차 산업계에서는 배기가스의 배출량을 줄이고자 다양한 방법을 연구하고 있다⁽¹⁾.

자동차의 배출가스를 줄이는 방법으로 하이브리드 자동차와 전기자동차에 대한 관심이 집중되고 있다. 하이브리드 자동차와 전기자동차의 핵심부품으로는 전지가 중요한 부분을 차지하고 있다. 일반적으로 전지는 핸드폰, 노트북 등 휴대용 전자 기기로부터 하이브리드 자동차, 전기자동차, 로봇산업 분야에 다양한 에너지 저장장치에 이르기까지 여러 형태로 활용되면서 현대 산업사회의 핵심 분야로 자리 잡고 있다^(1,2).

이 중에서 전기자동차(Electric Vehicle)는 화석연료를 사용하지 않고 전지의 충·방전 시스템을 이용하는 것으로 배기가스가 방출되지 않는 대표적인 친환경 자동차이다. 전기자동차의 핵심부품인 전지는 무게가 가볍다면 가벼워야 하고, 에너지 밀도가 높은 전지개발이 전기자동차의 핵심경쟁력 중 하나이다. 현재 많이 사용되고 있는 전지는 니켈/수소(Ni-MH)전지와 리튬/이온(Li-ion)전지가 있다. 리튬/이온전지는 에너지 밀도가 높다는 장점 때문에 많은 각광을 받고 있지만 폭발의 위험성을 갖고 있어서 이 부분에 더 신경을 쓰고 있는 추세이다. 반면 니켈/수소전지는 리튬이온전지에 비해 에너지 밀도는 낮지만 폭발의 위험성이 적어 노트북, 캠코더, 전기자동차 등 안전성에 민감한 특수한 경우에 많이 사용되고 있다⁽³⁻⁵⁾.

이번 연구는 Ni-MH 이차전지 내에 극판으로 사용되는 다공질박판과 양극과 음극인 탭을 레이저용접 하여 전지의 전도특

* 조선대학교 첨단부품소재공학과

+ 조선대학교 첨단부품소재공학과

++ 교신저자, 조선대학교 메카트로닉스공학과 (ytyou@chosun.ac.kr)

주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지 조선대학교 공과대학1호관 8층 메카트로닉스공학과

성을 개선하고 생산성을 향상시키는데 기여하고자 한다. 전지 내 다공질박판과 탭을 접합하는 방법은 여러 방법이 있겠지만, 현재로서는 저항 점용접(Resistance Spot-welding)을 이용하여 수작업으로 용접하고 있다. 저항 점용접은 전극 사이에 용접할 소재를 끼우고 저항열을 이용해서 용접을 하는데, 이 용접 방법은 단시간에 용접이 가능해서 열변형이 적고 숙련도가 필요하지 않는 장점이 있다.

그러나 점용접은 가공 후 후열처리가 필요하고 박판을 용접했을 때 작은 외력에도 쉽게 분리되어 원하는 용접성을 갖지 못하는 가장 큰 단점을 가지고 있다.

이에 비해 레이저를 이용한 용접은 장비가 고가이며 공정변수가 민감하다는 단점이 있지만, 다른 용접에 비해 빠른 용접속도와 중형비가 크고, 용입깊이는 깊고, 열영향부가 작아 열변형이 적다는 장점이 있다. 또한 정밀한 부품의 용접이 가능하다. 이러한 이유로 레이저 용접은 일반 용접에 비해 금속조직이나 기계적 성질 측면에서 모재에 영향을 미치는 부분이 매우 작아 우수한 용접성을 평가받고 있다⁽⁶⁾.

전지의 용접방법 개선도 중요하지만 전지의 재질을 선택하는 것도 매우 중요하다. Ni-MH 이차전지의 경우 다양한 재질을 사용하는데 그 중 저탄소강인 SS41을 많이 사용한다. 이번 연구에서는 SS41 대신 전력 면에서 우수한 순수 니켈(purity nickel, Ni201)을 사용하고자 한다. 본 연구에 사용한 순수니켈은 니켈성분이 99% 이상이고 그 외에 다른 화합물들이 소량으로 포함되어 있는 소재이다. 니켈의 경우에는 탄소강보다 용접이 어렵다는 단점이 있지만, 부식성이 없고 이차전지의 중요요소인 전기전도도가 좋다는 우수한 성질을 가지고 있다.

니켈의 선행 연구 결과를 살펴보면, Y. T. Yoo⁽⁷⁾는 Ni과 Cr이 다량 함유된 인코넬600합금강을 용접하여, 레이저빔의 출력, 레이저빔의 이송속도를 공정변수로 하여 최적의 용접상태에서 조직사진과 인장강도, 내부결합의 유무 등을 판단하여 최적의 공정조건을 발표하였다. 이후 Y. T. Yoo⁽⁸⁾는 니켈 도금된 S45C강을 레이저 용접으로 겹치기용접을 실시하였는데 니켈의 경우는 철보다 반사율이 높아 레이저빔 흡수가 잘 되지 않아 용접 시 결함이 발생하는 다양한 형태를 분석하여 발표하였다. G. Phanikumar⁽⁹⁾는 고순도 구리와 니켈을 CO₂레이저와 루비레이저를 이용하여 맞대기용접을 실시하였고, X. B. Liu⁽¹⁰⁾는 니켈 초합금강 K418강과 42CrMo강을 3kW급 Nd:YAG레이저를 이용해서 맞대기 용접을 실시하였고 급냉에 의해 발생하는 덴드라이트 조직 형태를 발표하였다. Y. S. Lim⁽¹¹⁾은 Alloy600과 Alloy182 니켈 합금강을 서로 맞댄 후 아크용접을 실시하였다. 기존의 연구들과 같이 용접단면이 덴드라이트 조직으로 나타나는 현상을 설명하고 용접부에서 급냉 때문에 발생하는 조직특성을 발표하였다.

지금까지 연구동향을 살펴보면 레이저용접과 아크용접 등으로 니켈합금강을 용접하여 그 특성을 분석하였다. 하지만 본

연구에서는 니켈합금강이 아닌 순수니켈박판의 레이저용접 특성을 연구하고자 한다. 저탄소강 박판사이에 다공질박판을 샌드위치 판넬 형식으로 점용접 하는 방법을 순수니켈로 하고 레이저용접을 실시한 후 용접특성을 분석하고자 한다. 레이저용접 시 공정변수 선정을 위해 기초실험으로 박판만을 겹치기용접 하여 중형비, 입열량 등을 분석하고자 한다. 결과를 바탕으로 다공질박판을 삽입한 경우 최적의 공정 조건을 결정하고자 한다. 이를 통해 순수니켈의 용접성을 분석하고 점용접 시 쉽게 탈락되는 단점을 보완하는 전지극판 용접의 대체기술을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 레이저는 CW Nd:YAG레이저로 파장은 1.06 μ m이고, 최대출력은 2.8kW로 구성되어 있다. 레이저빔의 발산각은 25mrad이고 600 μ m의 광섬유를 통해 이동한다. 공작대는 광케이블과 연결되어 있고 LASMA 1054이다. 용접 시 대기 중에 있는 오염물질과의 상호작용을 방지하기 위해 아르곤(Ar)가스를 보호가스로 사용하였다. 보호가스의 조사각도는 45°이고, 가스압력은 1.5bar로 분사시켰다. Fig. 1은 이번실험에 사용된 레이저 실험장치의 개략도이다.

2.2 실험방법

본 연구의 목적은 기존에 사용된 SS41재질의 음극판과 양극판을 순수니켈로 대체하기 위하여 순수니켈박판과 다공질박판을 샌드위치 판넬 형식으로 레이저용접성을 평가하고자 한다. 현재 산업현장에서 사용하는 Ni-MH이차전지 중 접합형태는 Fig. 2에 나타난 것처럼 저항 점용접해서 사용하고 있다. 저항 점용접 및 재질의 단점을 개선하기 위해 이번 연구를 실시하였다.

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

다공질박판을 샌드위치 판넬 형식으로 Fig. 2와 같이 저항 점용접한 부분을 레이저용접 하고자 한다. Fig. 3은 박판 사이에 다공질박판을 삽입하여 용접한 Fig. 2를 도식적으로 나타낸 것이다. A와 C는 순수니켈 박판이고, B는 다공질박판으로 많은 기공이 수세미형태로 구성되어 있다. 순수니켈 박판과 다공질박판의 두께는 각각 0.1mm와 0.165mm이고, 화학적 성분은 Table 1과 같다.

순수니켈 박판과 다공질박판의 무게를 측정하여 구성비를 비교하였다. 시편으로 사용한 박판의 크기를 각각 45.5mm의 정사각형 크기로 무게를 측정한 결과, 다공질박판의 무게는 약

Fig. 2 Sample of the product (Spot welding)

Fig. 3 Pure Ni and porous thin plate Welding method

Table 1 Chemical composition of specimen (%)

Ni201 (wt %)			
Ni	99	Cu	0.25 max
Fe	0.4 max	Si	0.35 max
Mn	0.35 max	C	0.02
S	0.01 max		

0.9875g이고 박판의 무게는 약 2.271g이었다. 체적을 동일하게 하고 무게를 계산하여 보면, 박판의 경우 약 1.097g, 다공질박판의 경우 약 0.29g의 값을 갖는다. 이것을 기준으로 무게를 비교하여 보면 박판의 경우 다공질보다 약 3.8배 정도 더 무거움을 확인할 수 있다. 즉, 같은 크기일 경우 다공질박판이 니켈 박판보다 재질면에서 기공을 약 3.8배 가지고 있음을 의미한다.

일반적으로 레이저용접은 출력이 동일한 경우 초점위치에 따라 침투깊이와 열영향 등에 영향을 미친다. 그러므로 정확한 초점위치를 파악하는 것은 레이저용접에서 용접품질을 결정하는 중요한 요인으로 작용한다. 따라서 본 연구에서도 정확한 초점위치를 잡기 위해 레이저빔 초점 위치를 상·하로 이동시키면서 레이저빔의 출력을 300W로 하고 180ms 동안 조사한 다음 레이저빔이 이동한 위치에 따라 용융된 면적을 측정하여 Fig. 4에 도식하였다. Fig. 4에서 종축은 레이저빔을 조사하는 가공헤드의 초점위치를 0으로 했을 경우 아래(-)에서 위(+)방향으로 이동하면서 조사했을 때 형성된 용융면적의 반경이다. 횡축은 가공헤드를 이동했을 때 초점 면적이 가장 작게 형성된 위치를 0으로 하여 나타낸 것이다.

본 실험에서 초점 면적이 커지면 열영향부도 커지고 침투깊이는 작아지기 때문에 시편 3장을 겹치기용접하면 용접비드가 커질 수 있어 주로 실험은 초점 면적이 가장 작은 0의 위치를 중심으로 실험을 하였다. 물론 침투깊이는 초점 위치보다 약간 낮은 위치로 했을 때 깊어지지만 시편의 두께가 0.1mm의 박판이기 때문에 실험의 용이성을 위해 초점 면적이 가장 작은 위치를 중심으로 실험하였다.

본 연구에서는 박판 사이에 다공질박판을 삽입하여 샌드위치 판넬 형태로 용접을 해야 하기 때문에 3장의 박판이 겹치기용접 되어야 한다. 다공질박판이 삽입되었을 경우 열전도도나 레이저빔의 침투깊이가 달라지지만, 니켈박판을 3장 겹치기용접하는 형태와 흡사하여 다공질박판을 뺀 박판을 3장 겹치기용접하는 방법으로 기초공정변수를 결정하였다.

Fig. 4 Spot size according to focal positions of laser beam

니켈박판을 겹치기용접 할 때 박판사이의 간극이 발생하지 않도록 지그를 Fig. 5와 같이 제작하여 용접도중에 공간이 발생하지 않도록 밀착하여 고정시켰다.

3장의 박판이 관통용접 되지 않는 공정조건을 결정하기 위해 레이저빔의 출력과 레이저빔의 이송속도를 변화시키면서 실험하였다. 시편 3장을 겹치기용접 한 실험조건은 Table 2와 같다.

저항 점용접 된 용접부와 본 연구에서 실시한 순수니켈 박판과 다공질박판의 샌드위치 판넬 용접의 전기전도 특성을 판단하기 위해 용접부 전기저항측정을 하였다. 본 실험의 우수성 판단을 위해서는 이차전지 시제품을 제작하고 난 후 온도의 극한 사항과 진동에 대한 내구성 충·방전 시험 등을 고려한 실험을 해야 하지만, 이와 같은 실험은 실차에 직접 장착하여 산업현장에서 직접 하기로 하였다. 저항 측정 시 사용된 측정 장비는 마이크로저항측정기(Micro Ohm Meter)로 모델명은 34420이다.

박판 3장을 겹치기용접 한 다음 종횡비와 용접부의 조직 및 결합 판단을 위해 다이아몬드 절단기로 용접부를 절단하여 마운팅 한 후 연마기(Polisher)로 연마하였다. 연마한 후 증류수(10ml), 질산(38ml), 아세트산(100ml)으로 이루어진 부식액으로 부식처리 하고, 광학현미경으로 용접부, 종횡비, 입열량 등을 측정하여 용접공정변수에 대한 변화를 관찰하였다.

Fig. 5 Schematic of Welding Jig

Table 2 The Experimental Conditions

Power (W)	Beam speed (m/min)
300	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0
350	
400	

3. 결과 및 고찰

3.1 공정변수 선정을 위한 선행실험

박판 용접의 경우에는 레이저출력이 너무 크거나 빔 이송속도가 너무 느릴 경우 과입열에 의한 커팅 현상이 나타난다. 따라서 순수니켈박판과 다공질박판을 샌드위치 판넬 용접하기 전 공정조건을 선정하기 위해서 순수니켈박판 3장을 겹치기 용접 하였다.

레이저출력은 300W, 350W, 400W로 하고 레이저빔의 이송속도는 출력별로 1.0m/min에서 2.0m/min까지 0.2m/min씩 증가시켰다. 레이저출력을 더 크게 하면 커팅이 되거나 용접 시 결합이 많이 발생하였다. 이 때문에 처음에는 출력을 300W, 400W만 하였지만 중간 출력에 최적의 조건이 있을 수 있다는 판단에 350W를 추가하여 실험하였다. 이때 용접 길이는 35mm로 실시하였다.

레이저용접은 키홀(Key hole)용접으로 초기에 매우 높은 에너지 밀도가 시편에 조사되면 금속 표면으로부터 용융부가 형성되는데, Fig. 6에서 출력이 300W일 경우에는 레이저빔 출력이 낮아 충분한 에너지를 얻지 못하였고, 키홀이 마지막 장까지 형성되지 않아 3장 전부 관통 용접된 공정은 본 실험조건 내에는 없었다. 1.0m/min일 경우 후면비드가 생성된 것처럼 보이는 것은 상부 박판 2장이 용접되면서 마지막 박판에 열이 전도되어 약간 부풀린 열흔적이다. 300W에서 박판 3장의 관통용접이 어려운 이유는 반사율이 높은 니켈박판에 레이저빔이 이동할 경우 시편과 레이저빔이 관통용접이 이루어 질 수 있을 만큼 충분히 상호작용하지 못하고 반사되면서 나타난 결과이다. 출력이 400W일 경우에는 레이저빔의 이송속도가 1.2m/min까지 용접후면비드가 형성되었다.

샌드위치 판넬 용접을 위한 최적의 공정조건을 결정하기 위해 Fig. 6의 용접단면을 절단하여 Fig. 7에 나타내었다. 용접성을 판단하기 위해 총 용접길이 35mm의 중간부분을 커팅한 후 관찰하였다.

용접단면을 분석한 결과 두께가 0.1mm로 박판을 3장 겹치기 용접하였기 때문에 기포가 생성됨을 관찰 할 수 있었다. 기포가 발생하는 이유는 크게 두 가지로 나누어 생각해 볼 수 있다. 그 하나는 시편의 조성성분 중에 대부분의 성분을 차지하고 있는 니켈의 용융온도가 1455℃인 반면 비록 조성성분의 양은 적지만 용융온도가 1083℃인 Cu, 115.2℃인 S과 1244℃인 Mn은 키홀이 형성되면서 기화되어 증발하지만 일부 날아가지 못한 성분들이 키홀이 닫히면서 용융물에 포획되어 기포로 생성되어 나타난 것으로 판단된다. 다른 하나의 이유는 3장의 박판을 겹치기 용접할 때 각 박판 사이의 간극에 있는 공기가 용융물에 흡수되면서 기포가 포획된 것으로 판단된다.

Fig. 7을 전체적으로 관찰해보면 레이저빔의 출력이 크거나 빔 이송속도가 느릴수록 용접비드 단면이 크게 성장하고, 레이

저빔의 출력이 작고 빔 이송속도가 빠를수록 용접단면의 비드가 작게 형성됨을 나타내고 있다. 이는 출력이 크면 초기 에너지 밀도가 높아져 니켈박판의 더 큰 영역의 용융풀을 형성하게 되고 고체보다 액체일 때 부피가 커지기 때문에 용접단면도 커지는 것으로 판단된다. 또 빔 이송속도가 느릴수록 레이저 빔과 시편의 상호작용 시간이 길어져 빔 이송속도가 빠른 경우보다 시편의 조직이 성장할 시간이 길어져 용접단면도 커지는 것으로 판단된다.

니켈박판 2장이 용접된 경우는 300W일 때, 레이저빔의 이송속도가 1.0m/min에서 1.6m/min까지 용접이 되었다. 350W인 경우에는 2.0m/min까지 박판 2장이 용접되었다. 그러나 출력

Fig. 6 Bead shape of lap welding using Ni thin plate

Fig. 7 Cross-sectional area of lap welding using Ni thin plate

이 400W일 경우에는 레이저빔의 이송속도가 1.0m/min으로 비교적 느린 경우에는 겹치기용접 시 가장 아래의 박판까지 완전 관통용접 되면서 마지막장이 녹아 후면비드가 크게 형성되었다. 레이저빔의 출력이 400W로 본 실험 조건 중 비교적 높은 출력에서는 이송속도가 1.6m/min까지 박판 3장이 관통용접 되었다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 레이저용접 시 키홀이 형성되어 키홀 용접이 이루어지는데 출력이 크고, 빔 이송속도가 느릴수록 시편에 전달되는 에너지와 입열량이 커져 더 깊은 키홀이 형성되면서 나타나는 현상으로 판단된다.

Fig. 7은 용접단면의 전체적인 용접부를 나타낸 것으로 레이저빔의 출력이 높고 빔 이송속도가 낮을수록 기공이 많이 발생하였다. 용접단면의 기공크기를 측정된 결과 직경은 약 60~230μm정도 되지만 전체적으로 기공면적보다는 용접단면적이 더 크게 형성되면서 용접되었다. 이는 시편에 전달되는 에너지와 입열량이 크면 더 많은 용융풀을 형성하게 되면서 시편사이 간극에서 흡수되는 공기와 시편의 니켈성분 이외의 용융온도가 상대적으로 낮은 조성분들이 기화가 더 활발하게 이루어지면서 기공이 크게 형성된 것으로 판단된다.

박판 3장을 겹치기용접 했을 때 용입 침투깊이에 대한 시편 표면에 형성된 용접비드 폭을 기준으로 종횡비를 계산하였다. 일반적으로 박판을 겹치기용접 했을 때 전면비드면의 폭에 대한 후면비드면의 폭에 대한 비로 용접특성을 분석하지만, 본 연구에서는 3장을 겹치기 용접했을 때 일부만 관통용접이 되고 그 나머지 일부는 관통용접이 되지 않아야 하기 때문에 레이저빔이 시편 주위로 확산되는 비율에 대한 침투깊이를 분석하기 위해 종횡비로 계산하였다. 이와 같은 특성을 분석한 이유는 본 연구에서 니켈박판과 다공질박판을 샌드위치 판넬 형태로 박판을 용접해야 하는데 3장을 관통용접 된 공정조건보다는 2장이 겹치기용접 된 공정이 더 최적의 공정조건이라고 판단되기 때문이다. 그 이유는 다공질박판은 박판 1장의 경우보다 유효체적이 더 작기 때문에 적은 입열량으로도 용접이 가능하기 때문이다. 그래서 박판 3장이 관통용접 된 공정조건은 과도한 입열량이 될 수 있다고 판단하였다. 종횡비 계산은 다음과 같은 식 (1)을 이용하였다.

$$\delta = \frac{Depth}{Width} \quad (1)$$

Fig. 8은 박판 3장을 겹치기용접 했을 때 식 (1)을 이용해 계산한 그래프로 종축은 종횡비, 횡축은 레이저빔의 이송속도를 나타낸 것이다. 레이저빔의 출력이 400W로 본 실험 조건에서 비교적 레이저빔의 출력이 높고 저속인 경우 3장이 관통용접 되면서 종횡비가 크게 나타났다. 이송속도가 1.0m/min, 1.2m/min으로 저속일 때는 완전 관통용접 되었기 때문에 정확한 종횡비는 아니지만, 전체적으로 레이저빔이 표면에 조사되었을 때 표

면에서 에너지가 시편 주위로 전달되는 에너지 크기에 비해 적은 양의 레이저빔 에너지가 내부로 침투되면서 손실되는 양이 많기 때문에 하부에서 에너지가 급속히 감소하여 에너지가 전달되지 않는 특성을 나타내고 있다.

레이저빔의 이송속도가 빠르거나 출력이 클 때, 박판의 계면에서 발생하는 반사와 작지만 미소한 공기층에 의한 열전도의 장애로 인하여 내부로 침투되지 못하고 2장만 용접된 형태가 나타나고 있다. 출력이 300W일 경우에는 레이저빔의 이송속도를 변화시키면서 측정한 중형비가 평균 0.6이고 출력 350W일 경우에는 평균 중형비가 0.8정도 되었다. 레이저용접을 할 경우 대부분 중형비가 1이상인 점을 고려하면 박판 두께가 0.1mm인 시편을 3장 겹치기용접 했을 때 니켈에 레이저빔이 조사되면 깊이방향으로 열전도보다는 시편주변으로 열전달량이 상대적으로 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 레이저빔의 출력이 400W인 경우에는 레이저빔의 이송속도가 1.4m/min일 경우에는 레이저빔의 에너지가 시편주위로 확산되는 것보다 내부로 침투되는 에너지양이 많아 중형비가 1이상이었다.

실험결과로부터 니켈박판을 레이저용접 할 때 레이저빔의 출력이 낮아도 레이저빔 이송속도에 따라 키홀을 형성하지만, 니켈의 높은 열전도도 때문에 내부로 침투되는 양이 작아 전도용접특성에 가깝게 나타나고, 레이저빔의 출력이 커지면 전도되는 양보다 침투되는 양이 많아져 키홀 용접 특성이 강하게 나타남을 알 수 있다.

박판 3장을 겹치기용접 했을 때의 입열량은 식 (2)로 계산하였다.

$$E = \frac{P}{w \times v} \quad (2)$$

식 (2)에서 E는 입열량, P는 레이저출력, w는 레이저빔을 니켈박판에 조사했을 때 생성된 용접비드의 폭이고, v는 레이저

빔의 이송속도이다. Fig. 9는 실험한 결과를 식 (2)로 계산하여 그래프로 나타내었다.

레이저빔의 이송속도가 증가하면서 시편표면에 생성된 용접비드의 단면 폭이 감소하는 경향을 보이면서 입열량이 감소하고 있다. 레이저빔의 이송속도가 1.0m/min이고, 레이저빔의 출력이 300W일 때는 입열량이 $0.296 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$, 350W일 때는 $0.344 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$, 400W일 때는 $0.447 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 이었다. 레이저빔의 이송속도가 2.0m/min로 증가하면 300W일 때 입열량은 $0.131 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$, 350W일 때는 $0.178 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$, 400W일 때는 $0.189 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 나왔다. 따라서 이송속도가 1.0m/min보다 2.0m/min일 때 300W는 44.4%, 350W는 51.8%, 400W는 42.4%로 각각 감소하였다.

400W, 1.0m/min의 경우 입열량이 $0.447 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 인데, 이 경우 3장의 박판이 완전 관통용접 되었다. 이는 과도한 입열량으로 하부 박판의 일부가 녹아 탈락할 것 같은 후면비드를 생성하였다. 1.2m/min인 경우에는 3장의 박판이 용접되었고, 이 때 입열량은 $0.267 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 이었다. 앞에서 언급한 바와 같이 레이저빔 출력이 크고 이송속도가 느리면 용접단면적이 크게 형성되었는데 입열량 계산을 통해서 정량적으로 비교하여 확인할 수 있었다.

3.2 다공질박판을 이용한 겹치기용접

기초실험을 바탕으로 박판 사이에 다공질박판을 넣고 샌드위치 판넬 형태로 겹치기용접을 하였다. 이에 대한 모식도는 Fig. 10에 나타내었다. 다공질박판은 박판에 비해 많은 에너지가 필요하지 않기 때문에 Fig. 6에서 3장이 모두 관통용접 되는 용접공정은 배제하였다. 박판 사이에 다공질박판을 삽입한 샌드위치 판넬 형태로 용접될 수 있는 공정조건으로는 출력이 300W, 350W를 선택하였다. 이 때 레이저빔의 이송속도는 1.0m/min에서 2.0m/min까지 0.2m/min씩 증가시키면서 겹치기용접을 하였다.

Fig. 8 Aspect ratio of lap welding using Ni thin plate

Fig. 9 Heat input of lap welding using Ni thin plate

박판과 다공질박판을 샌드위치 판넬 용접 했을 때 실험결과를 Fig. 11에 나타내었다. 선행실험을 토대로 공정변수를 선정하였고, 이를 비교하기 위해 용접길이도 전과 같은 35mm로 하였다. 전체적으로 샌드위치 판넬 용접 후 전면비드에서 간헐적인 기공이 관찰되었다. 이것은 앞에서 언급한 기공이 발생할 수 있는 원인 외에도 다공질박판 소재 내에 있는 재질이 용융되면서 다공질 주변에 있는 공기가 용융풀에 포함되며 생성된 것으로 판단된다. Fig. 6과는 다르게 다공질박판을 삽입했을 때 이송속도가 1.6m/min부터는 시편 주위로 에너지 손실이 많아 내부로 에너지가 침투하지 못하여 용접이 되지 않았다. 출력이 350W일 때는 1.8m/min부터 용접이 되지 못했다. 같은 조건에서 박판 3장 겹치기 용접했을 때는 2장이 용접되었고, 가장 아래에 있는 박판은 용접되지 않았지만 박판 사이에 다공질박판을 삽입하고 겹치기용접 했을 때는 레이저빔의 출력이 300W일 때는 레이저빔의 이송속도가 1.4m/min까지, 350W일 때는 이송속도가 1.6m/min까지 다공질박판과 함께 샌드위치 판넬 용접이 가능했다.

샌드위치 판넬 용접한 결과를 나타낸 Fig. 11의 시편을 절단하여 용접단면을 Fig. 12에 나타냈다. 박판만을 겹치기 용접한

Fig. 10 Schematic of lap welding using Ni and porous thin plate

Power		300W	350W
Speed			
1.0m/min	전면비드		
	후면비드		
1.2m/min	전면비드		
	후면비드		
1.4m/min	전면비드		
	후면비드		
1.6m/min	전면비드		
	후면비드		

Fig. 11 Bead shape of lap welding using Ni and porous thin plate

Fig. 7의 결과에 비해 기공을 많이 포함하고 있지만 다공질박판이 삽입되었다는 것을 고려하면 대체적으로 양호하게 용접된 결과를 나타내고 있다.

샌드위치 판넬 용접을 하고 전면비드의 용접폭 W_1 에 대한 후면비드 W_2 비, 비드폭비 BW (Bead Width ratio)를 다음 식 (3)으로 계산하였다.

$$BW = \frac{W_1}{W_2} \quad (3)$$

식 (3)으로 계산한 결과 레이저 출력이 300W일 때는 레이저빔의 이송속도가 1.0m/min과 1.2m/min일 때 2.213과 2.298이었고, 350W이고 레이저빔의 이송속도가 1.0m/min과 1.2m/min일 때는 1.06, 1.229로 출력이 300W일 때보다 약 50% 정도 적게 나타났다. 출력이 300W, 350W일 때 이송속도가 1.4m/min과 1.6m/min에서는 후면비드가 형성되지 않았다. 위와 같은 공정은 박판을 3장 겹치기 용접했을 때 2장이 용접된 공정이지만 실제로 박판 사이에 다공질박판 있을 경우 용접은 다공질 내의 공기층으로 에너지가 급속히 손실되어 입열량 부족으로 마지막 아래에 있는 시편까지 용접이 되지 않았다.

Fig. 13은 박판과 다공질박판 판넬 용접에서 입열량을 나타낸 그래프이다. 이송속도가 1.0m/min이고 출력이 300W, 350W일 때 각각 입열량은 각각 $0.21277 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 과 $0.29058 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 이었다. 이는 Fig. 9에서 같은 공정조건과 비교하면 입열량이 약 15%정도 작게 나타났다. 즉, 다공질박판이 삽입된 샌드위치 판넬 용접을 할 때는 박판만을 겹치기용접 할 때 보다

Magnification : $\times 10$, Scale size : 100 μm		
Power Speed	300W	350W
1.0m/min		
1.2m/min		
1.4m/min		
1.6m/min		

Fig. 12 Cross-sectional area of lap welding using Ni and porous thin plate

Fig. 13 Heat input of lap welding using Ni and porous thin plate

입열량이 작아도 용접이 가능함을 나타내고 있다.

3.3 저항 점용접과 레이저용접의 저항 측정

본 연구의 목적은 산업현장에서 사용하고 있는 저항 점용접의 결함을 보완하고 생산성이 높은 용접방법을 제시하고자 함이다. 저항 점용접의 용접부가 쉽게 탈락되는 현상은 레이저용접 용접단면의 관찰에서 유효면적이 많아 양호하게 접합되었다고 판단하였다. 두 번째 판단근거는 저항 점용접 용접부에서의 저항값과 본 연구에서 제시하고자 하는 레이저용접에서의 저항값을 비교하고자 한다.

시제품의 경우 한쪽은 극주와 연결이 되고, 다른 한쪽은 전해질 물질이 있는 부분에 담겨져 전력이 발생하게 된다. 이렇게 발생한 전력이 극주를 통해 전달되는데, 극주에서 전달될 때 저항손실이 작을수록 전지의 유효수명이 길어진다. 이를 판단하기 위해 Fig. 14와 같이 저항 점용접 된 것과 레이저용접부의 저항값을 측정하고 비교하였다.

마이크로 저항기를 이용하여 각각 저항측정 결과를 Table 3에 나타내었다. 저항측정 방법은 동일 방법으로 각각 4번씩 측정을 하고, 평균값을 기록하였다.

점용접의 경우 저항값이 1.752mΩ이고 레이저용접에 의한 저항값은 0.592mΩ~0.631mΩ범위 내로 측정되었다. 저탄소강으로 이루어진 저항 점용접보다 순수니켈로 이루어진 레이저용접의 경우 저항값이 약 33~37%정도 감소하였다. 300W, 1.4m/min의 경우에는 입열량 부족으로 아래쪽 박판이 용접되지 않아 저항값이 크게 떨어진 것으로 판단된다.

4. 결론

저탄소강을 저항 점용접 하여 사용하고 있는 문제점을 개선하기 위하여 순수니켈의 레이저용접 방법을 연구하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

Fig. 14 Schematic of Spot welding and Laser welding Resistance measurement method

Table 3 Spot welding and Laser welding Resistance measurement result

Spot welding			1.752mΩ
Laser-welding	300W	1.0m/min	0.593mΩ
		1.2m/min	0.592mΩ
		1.4m/min	0.331mΩ
	350W	1.0m/min	0.631mΩ
		1.2m/min	0.654mΩ
		1.4m/min	0.592mΩ
		1.6m/min	0.579mΩ

- (1) 다공질박판 내부는 대부분 기공이지만 소량의 소재가 용융되어 용접되었고, 용접부를 관찰하였을 때 용접부에도 다공질박판의 특성을 보유하고 있다.
- (2) 겹치기용접 시 중형비가 1에 가까우면 박판 3장이 용접되었고, 중형비가 0.6~0.8의 값을 갖을 때 본 연구에 타당한 용접조건이 되었다. 이 때 입열량 값은 $0.29 \sim 0.35 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 값을 갖을 때 양호한 용접상태를 확인할 수 있었다.
- (3) 다공질박판과 샌드위치 판넬 용접을 했을 때 비드폭 비는 1.1~2.3의 값을 가졌고, 입열량 값은 $0.20 \sim 0.29 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$ 값을 가졌다.
- (4) 니켈박판 3장을 겹치기용접 했을 때의 입열량값과 다공질박판과의 샌드위치 판넬 용접 시 입열량 값의 차이는 약 15% 정도 차이가 나는데, 더 적은 입열량으로도 용접이 가능함을 확인할 수 있었다.
- (5) 샌드위치 판넬 용접 시 최적의 공정변수로는 출력이 300W 일 때는 이송속도가 1.0m/min이고, 350W일 때에는 1.0~1.2m/min일 때 용접성이 좋음을 확인할 수 있었다.
- (6) 저탄소강 SS41 저항 점용접과 순수니켈 박판과 다공질박판의 샌드위치 판넬 용접된 것의 저항측정 결과 레이저용접의 경우 저항 측정값이 약 33~37% 감소된 것으로 확인할 수 있었다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 제시한 레이저를 이용한 샌드위치 패널 용접방법이 현장에서 사용하고 있는 방법과 비교하여 전기전도특성이 개선되어 전지의 유효수명이 개선될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

References

- (1) Electronics Information Center, 2011, *2011 Secondary Battery Industry Prospect*, Korea Electronics Technology Institute, Korea.
- (2) Sun, Y. K., 2009, "Battery Technology for HEV," *Auto Journal Special Edition 4*, Vol. 31, No. 1, pp. 49~54.
- (3) Electronics Information Center, 2008, *Lithium Secondary Battery Industry Trend*, Korea Electronics Technology Institute, Korea.
- (4) Electronics Information Center, 2005, *Secondary Battery Technology and Trend*, Korea Electronics Technology Institute, Korea.
- (5) Mukherjee, R., Krishnan, R., Lu, T. M., and Koratkar, N., 2012, "Nanostructured Electrodes for High-power Lithium Ion Batteries," *J. of Nano Energy*, Vol. 1, Issue. 4, pp. 1~16.
- (6) Mo, Y. W., Yoo, Y. T., Shin, H. J., and Shin, B. H., 2007, "The Characteristics of Butt Welding Nd:YAG Laser with a Continuous Wave of Nickel Coated S45C Steel," *J. of KSMTE*, Vol. 16, No. 4, pp. 1~12.
- (7) Yoo, Y. T., Shin, H. J., and Lim, K. G., 2004, "Welding Characteristics of Inconel 600 using a High Power CW Nd:YAG Laser," *J. of KSMTE*, Vol. 13, No. 6, pp. 119~126.
- (8) Yoo, Y. T., and Shin, H. J., 2007, "Characteristics of CW Nd:YAG Laser Lap Welds of Nickel Coated S45C Steel," *J. of KWJS*, Vol. 25, No. 3, pp. 18~27.
- (9) Phanikumar, G., Dutta, P., and Chattopadhyay, K., 2005, "Continuous Welding of Cu-Ni Dissimilar Couple using CO₂ Laser," *J. of Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 10, No. 2, pp. 158~166.
- (10) Liu, X. B., Yu, G., Guo, J., Gu, Y. J., Pang, M., Zheng, C. Y., and Wang, H. H., 2008, "Research on Laser Welding of Cast Ni-based Superalloy K418 Turbo Disk and Alloy Steel 42CrMo Shaft," *J. of Alloys and Compounds*, Vol. 453, No. 1-2, pp. 371~378.
- (11) Lim, Y. S., Kim, H. P., Cho, H. D., and Lee, H. H., 2009, "Microscopic Examination of an Alloy 600/182 Weld," *J. of Materials Characterization*, Vol. 60, No. 12, pp. 1496~1506.