

태양열 집열판의 레이저용접을 위한 공정변수 평가

김용^{*☒}, 박기영^{*}, 김부환^{**}

^{*}고등기술연구원, ^{**}(주)Fasweld풍산레이저

Evaluation of Process Parameter to Laser Welding of Solar Panel

Yong Kim^{*}, Ki-Young Park^{*} and Bu-Hwan Kim^{**}

^{*}Institute for Advanced Engineering, ^{**}Fasweld Co., LTD.

Abstract

The solar panel that consists of copper plate and copper tube was successfully welded by ultrasonic seam welding. However it was not only expensive the copper material but also ultrasonic welding has many problem such as high error rate, difficulty of dissimilar material welding, noise, etc. At this study, the laser welding of solar panel with aluminum plate instead of copper. The welding were carried out with the pulsed Nd:YAG laser and the weld bead geometry was measured with the variation of pulse energy. Consequently, there was no difference between the ultrasonic and the laser welding on the performance of heat transfer capacities. Also the formation of intermetallic compound such as CuAl₂ was increased with the pulse energy.

Keywords: solar panel(집열판), laser welding(레이저용접), heat conductivity(열전도도), Nd:YAG laser(야그 레이저), ultrasonic welding(초음파용접)

1. 서론

현대 문명은 에너지와 물질의 대량소비를 전제로 해서 성립되었고, 지금까지 국민 1인당 연간 에너지 소비량이 그 나라의 풍요를 나타내는 파라미터가 되어왔다. 그러나 에너지 자원은 유한하고, 환경용량에도 제약이 있다는 것이 인식되면서, 대체에너지 및 환경문제가 전 국가적인 과제가 되었다. 이에 대한 연구가 “저탄소녹색성장”이라는 슬로건과 함께 활발한 연구가 진행되고 있다.

태양열 이용 시스템도 그 중 하나로 우리나라를 포함한 대부분의 나라에서 신재생 에너지 이용 시스템에 대한 의무화제도를 시행하여 강제하거나, 지원 제도를 통해 소비자의 부담을 줄이는 방법 등으로 보급하고 있다.¹

이러한 태양열시스템은 Fig. 1과 같이 태양열을 모으는 구리로 된 집열판(solar panel)과 그 하부에는 집열기와 축열조 간에 유체를 유동시키는 순환

시스템으로서 동일 소재인 동관(Cu tube)을 용접하게 되어 있다. 그러나 구리 소재를 집열판으로 사용 시 열전도성은 우수하지만 대체 가능한 알루미늄에 비해 소재 및 제조 단가가 최소 2배 이상 비싸며, 거의 대부분을 수입에 의존하기 때문에 가격 경쟁력이 떨어지는 단점이 있다.

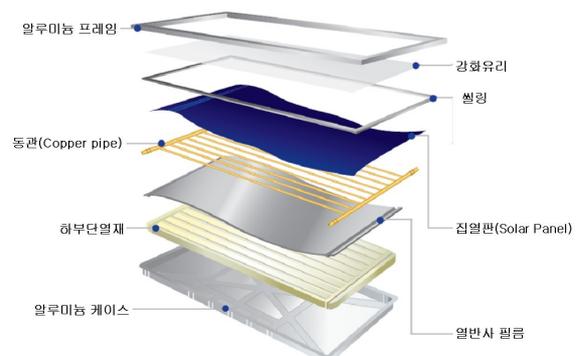


Fig. 1 Schematic design of flat solar panel.

한편 동관의 용접방법으로는 주로 초음파 용접법이 적용되나 국내에는 초음파 용접기에 대한 상

투고일 : 2011년 10월 13일 심사완료일 : 2011년 12월12일

계재승인일 : 2011년 12월 23일

교신저자 : 김 용 ☒ welding@iae.re.kr

용화 제작이 이뤄지지 않아 고가의 용접기 및 집열판 접합시스템을 거의 전량 수입하여 사용하고 있으며, 또한 작업 시 발생하는 소음이 상당하여 작업장의 소음공해를 유발한다. 뿐만 아니라 초음파 용접을 이용한 구리+구리 간 동종금속의 용접에는 양호한 용접성능을 보이지만 알루미늄과 구리의 이종재료 용접 시 용접품질이 저하되는 문제점이 있다.

이에 따라 집열판 소재를 알루미늄으로 변경하고 레이저용접을 적용할 경우 원가절감에 큰 기여를 함은 물론 생산성 향상에 크게 도움이 될 것이다. 뿐만 아니라 레이저 용접을 적용할 경우 다양한 소재 선택성 및 열변형이 무시할 정도로 적어서 소재의 변형을 방지하고 고품질의 용접이 가능해지는 이점이 있다.

집열판과 동관의 접합은 최종적으로 에너지 전달손실을 최소화 할 수 있는 공정이 적용되어야 한다. 본 연구에서는 구리 혹은 알루미늄 재질을 갖는 집열판과 동관의 접합에 레이저 용접을 적용하고 그 품질을 분석하여 최종적으로 적합성 여부를 판단하고자 하였다. 이를 위해 우선적으로 용접 방식에 따른 집열판의 용접품질 및 최종적인 집열성능을 비교분석하였으며, 이후 레이저 용접 시 공정변수에 따른 용접부의 특성 및 이종접합부의 특성을 비교하였다.

2. 용접방식에 따른 집열판 분석

해외 태양열 관련 일부 선진업체는 이미 레이저 용접을 적용하여 알루미늄 집열판과 구리 파이프 간 접합된 제품을 공급하고 있으며, 국내의 경우 전량 초음파 용접으로 제작되고 있다. 이에 따라 두 방식 간 용접부의 비교분석 및 최종적으로 집열판 성능에 미치는 영향을 조사하고자 하였다.

일단 Fig. 2는 초음파 용접방식으로 제작된 구리 집열판의 분석 결과를 나타낸다. Fig. 2(a)와 같이 집열판의 일부를 채취하여 접합형상 및 단면을 분석하였다. 초음파 용접의 공정변수는 크게 진폭(frequency), 가압력 및 이동속도가 있는데, Fig. 2(b)와 같이 가압력에 따라 이면 비드가 널링(knurling) 형태로 나타나며 그 폭은 진폭의 정도에 따라 대략 2.2-2.5mm 정도로 나타나게 된다. Fig. 2(c)는 마크로 단면형상을 나타낸 것으로 구리 파이프

의 접선에 집열판이 선접촉되어 있으며, 이 때 구리 파이프의 직경은 8Φ, 두께는 0.6mm이며 집열판의 두께는 0.2mm이다. Fig. 2(d)는 접합부를 확대한 것으로 초음파 용접의 특성 상 용융용접이 아닌 고상접합이 되어 있는 것을 볼 수 있으며 집열판은 가압에 따른 소성변형이 일어난 것을 확인할 수 있다.

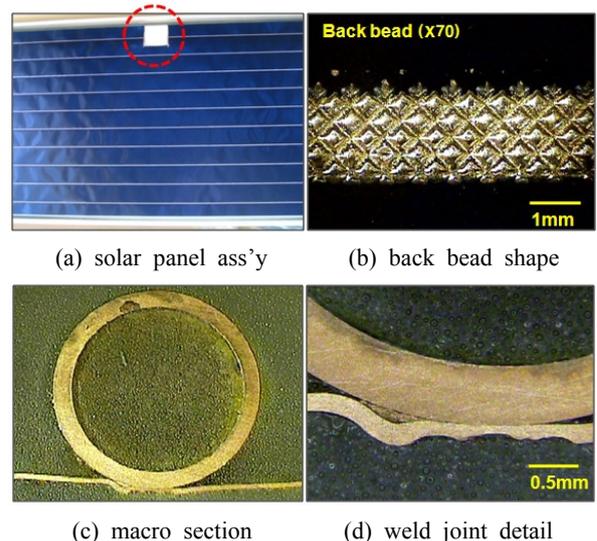


Fig. 2 The analysis of solar panel welded by ultrasonic.

한편 Fig. 3은 현재 시판되고 있는 레이저용접 적용 알루미늄 집열판의 용접부 분석 결과를 나타낸다. 집열판의 임의 부분을 채취한 후 용접부를 분석하였으며 접합형상은 Fig. 2(a)와 같다. 레이저 점용접을 하였으며 용접 사이 간격은 측정결과 Fig. 2(c)와 같이 약 4.3mm로 나타났다. 용접은 Fig. 5와 같이 레이저 빔을 분할한 후 양쪽에서 동시에 조사하여 용접하였으며 용접된 단면은 Fig. 2(d)와 같이 나타났다. 알루미늄 집열판은 순수 알루미늄을 사용하였으며 이는 합금에 비해 열전도도가 좋고 물성저하가 적기 때문으로 알려져 있다.^{2,3} 또한 집열판의 두께도 구리의 0.2mm와 비교할 때 0.4mm 정도로 두꺼웠는데 그 이유는 구리의 열전도도(384W/mK)와 비교할 때 알루미늄의 열전도도(220W/mK)가 더 낮기 때문에 이를 두께로서 보상하기 위한 것으로 보고되어 있다.⁴ Fig. 2(d)의 단면을 좀 더 자세히 관찰해보면 구리 쪽의 용융이 거의 없으며 금속간화합물(intermetallic compounds)이 거의 생성되지 않은 것으로 볼 때 레이저 빔을 약간 알루미늄 쪽으로 조사한 뒤 다중반사(multi reflection) 효과를 통해 구리와 접합한 것으로 사료된다.

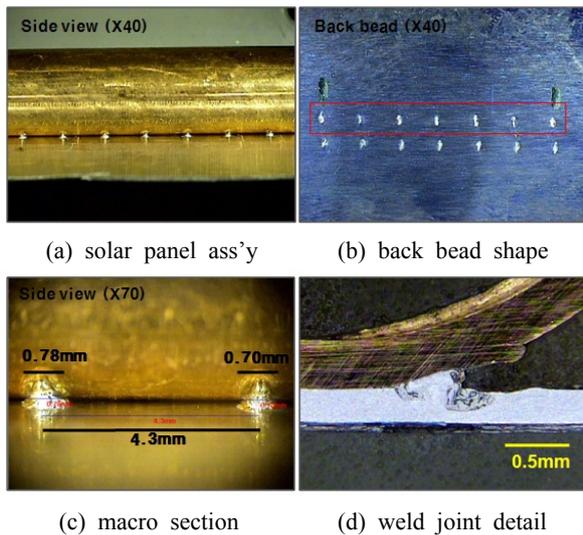


Fig. 3 The analysis of aluminum solar panel welded by laser.

한편 Table 1은 각각 레이저와 초음파용접 된 집열판의 성능을 나타내는 것으로 구리에서 알루미늄으로 바뀌더라도 최대효율 및 열손실을 등에 대한 차이가 거의 나지 않음을 알 수 있다. 또한 접합부의 강도는 정량적으로 평가할 수는 없었지만 강제 파단시 초음파 용접은 Fig. 4(a)와 같이 접합부가 쉽게 분리되는 형태로 나타났다. 반면 레이저 용접부의 경우 열영향부가 찢겨지며 파단된 것을 볼 때 레이저 용접부의 강도가 더욱 우수한 것으로 판단된다.

Table 1 Comparison of the solar panel performance according to welding type

Performance	Unit	Laser	Ultrasonic
Max. efficiency	%	75 ± 3	76.05
Solar radiation	Kcal/m ² day	2221.26	2274.86
Emissivity	%	4 ± 2	4.477

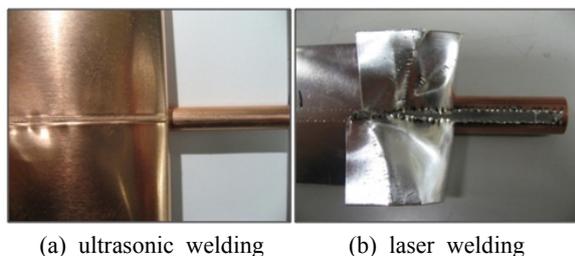


Fig. 4 Separation from panel sheet to Cu tube according welding type.

3. 변수에 따른 레이저 용접 특성

레이저 용접 변수 별 집열판의 이중금속 용접특성을 평가하고자 하였다. 실험에 사용된 소재는 0.4mm 두께의 순수 알루미늄과 구리관은 0.2mm 두께를 적용하였으며, 구리관은 인탈산동 소재로 외경 10mm, 내경 9.2mm의 크기로 하였다. 레이저 용접기는 최대출력 450W 용량의 펄스형 Nd:YAG 레이저 1분기를 사용하였으며, 조사각도는 15도로 고정하였다. 보호가스는 사용하지 않았으며, 빔이 정확한 위치에 조사되도록 모니터링 카메라를 통해 조사 위치를 확인하였다. 레이저 용접을 위한 이음부 형상 및 장비 설치상태를 Fig. 5에 나타내었다.

실험은 주파수를 3Hz, 용접속도를 5m/min로 고정하고 최대출력(peak power) 및 펄스폭(pulse duration)을 조절하여 최종적으로 펄스에너지를 가변해가며 용접하였으며, 구체적인 실험 조건은 Table 2에 나타내었다. 또한 용접 후 건전성을 판단하기 위해 용접단면에 대한 OM 분석 및 SEM 분석을 실시하였다.

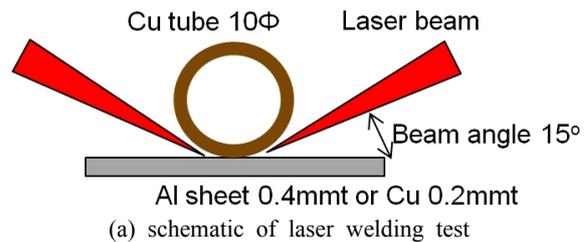


Fig. 5 Complete welding setup with 450W Nd:YAG laser.

Table 2 laser welding conditions

No	Peak power (kW)	Pulse duration (msec)	Energy (Joule)	Material
1	6	2	11.6	Al + Cu
2	5	3	15	Al + Cu
3	6	3	17.8	Al + Cu
4	6	4	24	Al + Cu
5	6	5	30	Al + Cu
6	5	6	30	Cu + Cu
7	7	5	35	Cu + Cu

이상의 Table 2의 조건으로 용접한 결과는 Table 3에 제시하였으며, 각 조건에서의 측면 비드 및 단면을 관찰한 결과를 나타낸다. 분석 결과 측면 비드의 형성은 용접 에너지가 증가할수록 0.95mm의 폭에서 1.43mm까지 비례적으로 증가되는 경향을 나타내었으며, 용접속도 및 주파수가 모두 동일한 조건이기 때문에 용접 간 간격은 모두 2.7mm 정도로 일정하게 형성되었다. 일반적으로 보고된 바에 의하면 집열판에서 구리 파이프 내 유체로의 열전달은 접촉면(용접)의 전도에 의한 가열이 주요 메커니즘인데 이에 따라 접촉부를 되도록 크게 하기 위해 약 2-3mm 간격으로 레이저 용접하는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 실험에 사용된 고정변수인 주파수 및 용접속도는 적절하다고 판단된다.

한편 비드 단면을 관찰하게 되면 펄스 에너지 값이 증가할수록 구리의 용융이 증가하여 알루미늄과 금속조직이 서로 혼재된 양이 증가되는 것을 볼 수 있다. 이는 알루미늄과 구리 간 CuAl₂와 같은 금속간화합물을 형성한다는 말인데, 금속간화합물의 형성은 용접강도 및 품질에 나쁜 영향을 미치므로 가급적 에너지 값을 작게 할 필요가 있다. 금속간화합물을 억제하는 다른 방법은 앞서 언급한대로 레이저빔을 알루미늄 쪽으로 조사하여 다중반사에 의한 계면접합을 유도하는 방법이 있으며, 11.6J로 용접된 결과를 보면 적절한 조건에서는 금속간화합물의 형성이 거의 일어나지 않는 것을 관찰할 수 있다. 빔을 구리 쪽으로 조사할 경우 Nd:YAG 레이저 파장에서 구리의 빔 흡수율이 매우 낮으므로 결과적으로 레이저의 효율을 떨어뜨리는 결과로 나타난다. 이에 조사 위치에 대한 정확도가 품질을 결정짓는 주요 인자가 될 것이라 판단된다.

이에 대한 근거로서 구리와 구리 간 동종금속에 대한 용접결과를 또한 Table 2에 제시하였다. 용접결과 흡수율의 차이에 따라 30J의 비교적 높은 에너지에서도 용접 비드가 크게 형성되지 않았다. 이를 극복하기 위해 펄스 에너지를 35J로 더욱 증가시킨 경우 집열판 부분에 심한 손상이 나타났는데, 그 이유는 집열판의 두께가 0.2mm로 매우 얇기 때문이다.

한편 용융부 형태를 보다 자세히 관찰하기 위해 실험 결과 중 가장 양호한 품질로 판단되는 11.6J의 단면을 Fig. 6과 같이 OM 관찰하였다.

Table 3 Photograph of cross section and side view depend on welding conditions

Energy (J)	Side view	Cross section
11.6		
15		
17.8		
24		
30		
30		
35		

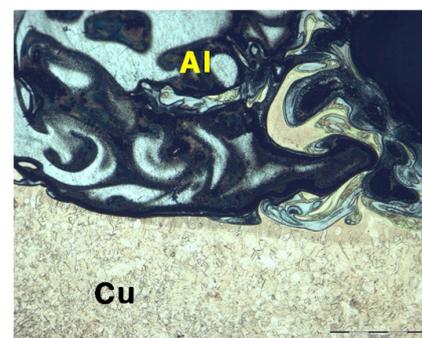


Fig. 6 Details of laser welded interface.

밝은 쪽이 구리 파이프를 나타내며 어두운 쪽이 알루미늄 부분이다. 미세조직 상 특이점이나 결합

등은 발견되지 않았으며, 검은 부분이 파도와 같이 심하게 요동친 조직 형태를 볼 때 많은 양의 알루미늄이 용융되어 구리와 혼재된 것을 볼 수 있다. 구리의 용점은 약 1,083℃로 알루미늄의 용점보다 훨씬 높을 뿐만 아니라 앞서 언급한데로 레이저 빔의 흡수율 또한 매우 낮기 때문에 알루미늄에 비해 용융이 덜 일어난 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 구리 또는 알루미늄 재질을 갖는 집열판과 동관 사이의 접합에 레이저용접을 적용하고자 초음파 용접 제품과의 품질 비교 및 공정 변수에 따른 레이저 용접을 실시하였으며, 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 레이저와 초음파용접 된 집열판의 성능을 비교한 결과, 용접공정 및 재질이 구리에서 알루미늄으로 바뀌더라도 최대효율 및 열손실을 등에 대한 차이가 거의 나지 않음을 확인하였다.

(2) 용접 후 강제 파단 시 초음파 용접은 접합부가 쉽게 분리되는 형태로 나타난 반면 레이저 용접부의 경우 열영향부가 찢겨지며 파단 되었다.

(3) 비드 단면 관찰 결과 펄스 에너지 값이 증가할수록 구리의 용융이 증가하여 알루미늄과 금속조직이 서로 혼재된 양이 증가되는 것을 확인하였으며, 본 실험에서는 11.6J의 펄스에너지 조건에서 가장 우수한 용접성을 나타내었다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No.20103060080010)입니다.

참고문헌

- 1) Y.D. Yu, G.D. Kim and S.H. Kim, "Application of solar collector to roof sheathings in steel house," RIST Research Journal, Vol. 16, No. 1, pp. 11-16, 2002.
- 2) D. Dovic. "Experimental and numerical study

of collector with corrugated absorber," Doctoral thesis, University of Zagreb, 2005.

- 3) D. Dovic, "Estimating heat losses in solar collectors by IR thermography and numerical simulations," 9th Int. Conf. on QIRT2008, 2008.
- 4) U. Duerr, "Welding thermal solar absorbers," Application report, Industrial Laser Solutions, pp. 12-14, 2006.