

순티타늄판의 Nd:YAG 레이저 용접성에 관한 연구(IV)

- 접이기 용접 및 실물 열교환기로의 적용 -

김종도^{*,†} · 광명섭^{**} · 이창제^{***} · 길병래^{*}

^{*}한국해양대학교 기관시스템공학부

^{**}대우조선해양(주) 산업기술연구소

^{***}한국해양대학교 대학원

A Study of Weldability for Pure Titanium by Nd:YAG Laser(IV)

- Lap Welding and Application for Heat Exchanger -

Jong-Do Kim^{*,†}, Myung-Sub Kwak^{**}, Chang-Je Lee^{***} and Byung-Lea Kil^{*}

^{*}Division of Marine System Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

^{**}Industrial Application R&D Institute, DSME. Co., LTD., Okpo 656-714, Korea

^{***}Graduate School, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

[†]Corresponding author : jdkim@hhu.ac.kr

(Received October 27, 2009 ; Revised November 17, 2009 ; Accepted November 23, 2009)

Abstract

With large specific strength and outstanding corrosion resistance and erosion resistance in sea water, titanium and titanium alloy are widely used in heat exchanger production. In particular, pure titanium demonstrates outstanding molding performance and may be considered optimal for production of heat exchanger. Since titanium is very vulnerable to oxidation and embrittlement during welding, processes with less heat input are widely used, and laser welding is widely applied by considering production performance and shield etc in atmosphere.

So far, 1st report and 2nd report compared and analyzed embrittlement degrees by bead colors of weldment through oxygen and nitrogen quantitative analysis and hardness measurement, and evaluated welding performance and mechanical properties of butt welding.

This study evaluated field applicability of lap welding to heat exchange plate of LPG re-liquefaction device for ships through tensile stress test, hardness test and internal pressure test etc after deducing optimal welding condition and applying to actual heat exchange plate. In bead overlap area, the experiment produced sound welds with no porosity or defect by increasing and decreasing laser power, and tensile-shear test results indicated virtually the same tension and yield strength as base metal. As a result of measuring hardness at lateral cross section and bead overlap zone of actual heat exchanger welds, hardness difference within 20Hv was produced at base metal, HAZ and weldment, and as a result of pneumatic and hydraulic pressure test, no leakage occurred.

Key Words : Pure titanium, Nd:YAG laser, Tensile-shear strength test, porosity, Slope up & down

1. 서 론

티타늄 및 티타늄 합금은 해수에 대한 내식성이 탁월하고^{1,2)} 비강도가 크기 때문에 열교환기에 많이 사용

되고 있다. 특히 순티타늄은 성형성³⁻⁴⁾이 좋아서 열교환기의 제작에는 최적이라고 할 수 있다.

지금까지 1보⁵⁾와 2보⁶⁾에서는 티타늄의 레이저 용접성 평가를 위한 기초 실험으로서 용접부의 비드 색깔에

따른 취화 정도를 산소·질소 정량 분석과 경도 측정을 통하여 비교·분석하고 맞대기 용접에 대한 용접성 및 기계적 특성을 평가하였다.

3보⁷⁾에서는 에지 용접부에 대하여 레이저 및 GTA 용접기를 이용하여 다양한 조건에서 용접하고 인장 시험을 통하여 기계적 강도를 평가하였다.

본 연구에서는 선박용 LPG 재액화 장치의 열교환판에 겹치기 용접을 적용하기 위하여 겹치기 용접의 최적 조건을 도출 후에 실물 열교환판에 적용하여 기계적 특성, 경도, 내압 시험 등을 통하여 현장적용 가능성을 평가하였다.

2. 사용 재료 및 실험 방법

2.1 사용 재료

본 연구에는 150(L)×50(W)×0.8(H) 사이즈의 공업용 순티타늄(순도 99.9%)을 사용하였으며 그 기계적 특성은 Table 1과 같다.

시험편은 용접 전에 아세톤과 메탄올을 사용하여 유분 및 수분을 완전히 제거하여 유분의 혼입에 의한 용접부의 오염 방지 및 수소와 산소의 해리로 인한 용접부의 산화 및 취화를 방지하고자 하였다.

2.2 실험 장치 및 방법

실험에 사용한 1kW CW YAG 레이저는 3축 CNC와 연동하고 레이저 집광광학계는 CNC의 Z축에 장착되며 시험편은 테이블위에 고정되어 있고 레이저 헤드가 X, Y, Z축 방향으로 이동된다. 집광광학계의 초점 길이는 200mm, 동축 노즐끝단에서 시험편까지의 작동 거리는 3mm이다. 끝단 직경이 5mm인 동축 노즐을 사용하여 용접시 자유도를 높였고 실드가스는 전면 및 이면 모두 아르곤을 사용하였다. Fig. 1에 실험을 위한 레이저 및 지그의 설치 모습을 나타낸다.

레이저 광학계의 초점을 확인하기 위하여 Fig. 2와 같이 번패턴(burn pattern)을 찍었다. 이 때 레이저 파워는 10W, 펄스폭은 펄스모드에서 최소인 10ms로 하여 레이저를 조사하였으며 비초점을 -5 ~ +5mm까지 변화시켰다. 초점에서 스폿사이즈가 0.64mm인 가장 좁은 번패턴이 얻어졌고 비초점 -1과 +1mm에서는

Table 1 Mechanical characteristics of material

Mechanical characteristics	Y. S (MPa)	T. S (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
Material				
Titanium	255	325	51	100

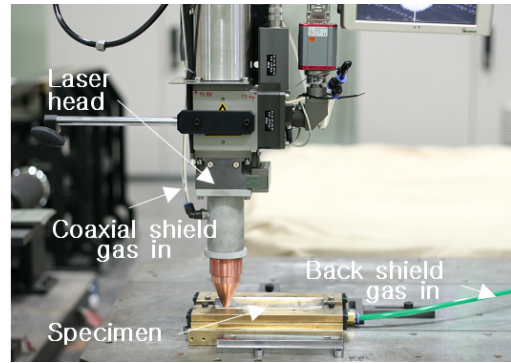


Fig. 1 Experimental setup for lap welding

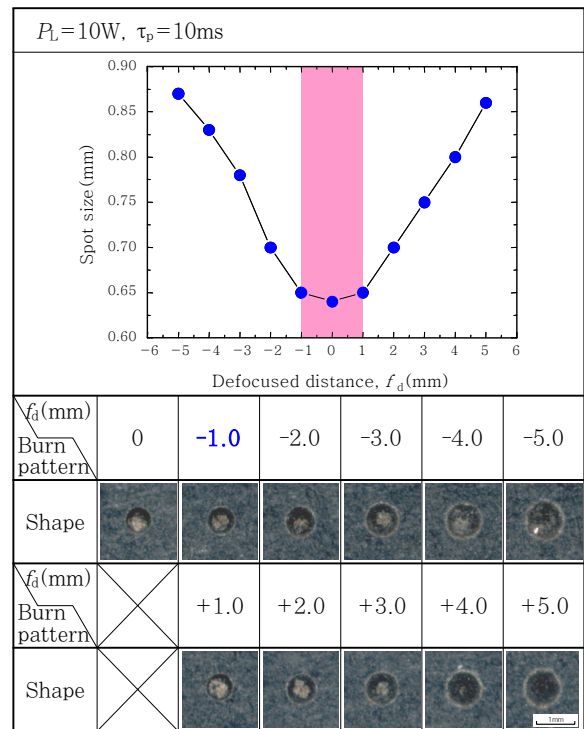


Fig. 2 Variation of spot size with defocused distance

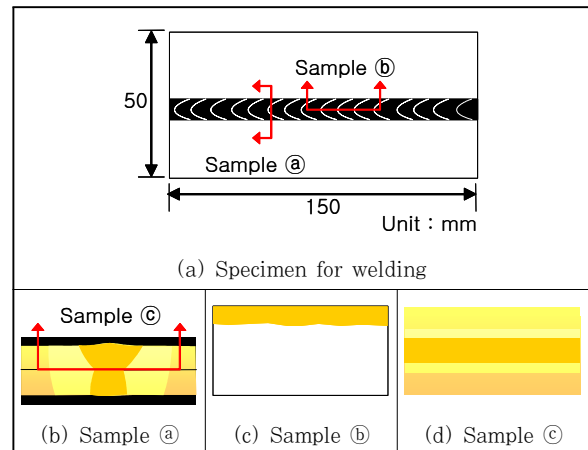


Fig. 3 Sampling method of specimen

0.65mm로 큰 차이는 없었으며 비초점거리가 커짐에 따라 스폿사이즈가 증가하는 전형적인 경향을 보였다.

단면 관찰용 시험편은 비드가 안정적으로 얻어지는 용접이 30mm 이상 진행된 지점에서 Fig. 3(a)와 같이 횡단면과 종단면을 채취하였다. 또한 겹치기 용접에서 실제로 접합되는 부분인 접합면을 살펴보기 위하여 Fig. 3(b)와 같은 샘플도 채취하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 겹치기용접 특성

3.1.1 출력 및 속도에 따른 용입 특성

연속레이저에서는 출력(P_L) 및 속도(v)가 용접시 가장 중요한 매개변수이기 때문에 레이저 출력에 따른 적절한 용접속도를 알아보고기 위하여 완전용입용접이 되는 조건에서 용접속도를 변화시켰다.

비초점 거리는 Fig. 2의 결과와 제3보의 비초점 거리에 따른 용입 특성을 바탕으로 용입이 가장 깊고 비드폭이 좁으며 초점이 재료 안쪽에 맺히기 때문에 플라즈마에 의한 레이저빔 손실이 가장 적을 것으로 판단되는 -1mm로 하였다.

동축 실드가스 유량(Q_{cs})은 25 l/min, 이면 실드가스 유량(Q_{bs})은 10 l/min을 사용하였다.

레이저 출력이 850W일 경우, 용접속도 0.6m/min에서는 과도한 입열에 의해서 전면비드가 산화되고 전면 및 이면 비드폭이 각각 3.5mm, 2.5mm로 매우 넓었으며 속도의 증가에 따라 비드폭이 선형적으로 감소하다가 1.2m/min에서는 부분용입이 되었다. 모든 용접조건에서 비드폭이 너무 넓고 용접속도 또한 느렸다. 950W에서는 모든 용접조건에서 건전한 비드를 얻었고 1.0m/min에서는 입열과잉으로 인하여 용접부가 산화되었다. 접합길이, 전면 비드폭 및 이면 비드폭을 Fig. 4에 나타낸다.

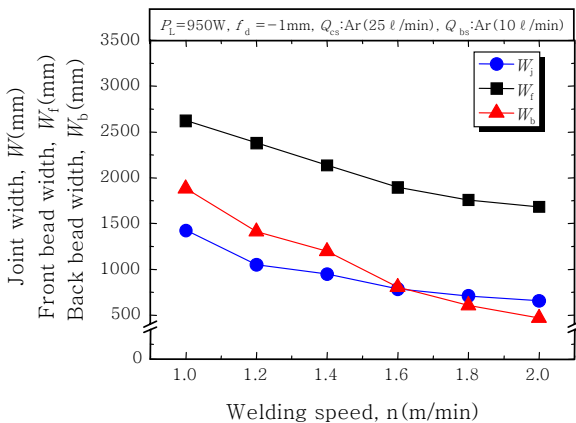


Fig. 4 Penetration properties of lap welding

3.1.2 슬롭 업과 다운에 따른 용접 특성 비교

열교환관에 적용시 35bar 이상의 압력에 견뎌야 하기 때문에 겹치기용접에서 용접강도를 결정하는 접합폭이 넓고 전면비드 폭이 좁은 조건을 선택하기 위하여 우선 1.4와 1.6m/min 두가지를 선정하여 비드중첩부에서 슬롭 업(slope up)과 슬롭 다운(slope down)시의 용접성을 평가하였다.

용접속도 1.4m/min일 경우의 실험결과를 Fig. 5에 나타낸다. 용접은 모식도와 같이 ①에서 시작하여 슬롭 업을 한 후 950W로 진행하다가 끝단에서 슬롭 다운을 하였으며, 다시 돌아와 ②와 같이 ①과 동일한 방법으로 용접을 하여 950W로 겹치기는 구간은 7mm, 슬롭 다운 구간을 2.3mm가 되게 하였다. 처음 용접한 ①의 경우 레이저 출력을 실선으로, ②의 경우를 점선으로 표시하였다.

슬롭 업 구간을 살펴보면 0에서 950W로 슬롭 업을 한 경우에는 비드외관 및 용입깊이에서도 출력의 점진적인 증가를 확인할 수 있다. 슬롭 업을 하지 않고 처음부터 출력을 950W로 하여 용접한 경우에는 단시간에 완전용입에 이르고 슬롭 업을 한 경우에는 완전용입을 위해 시간이 조금 필요하다.

두 경우 모두 완전용입 직후에 기공이 관찰되었는데 이는 용접 시작점에서는 중간부와는 달리 열 축적에 의해서 예열이 되지 않았기 때문에 급랭에 의해서 기공이 빠져나갈 시간이 없었기 때문으로 생각된다. 슬롭 다운

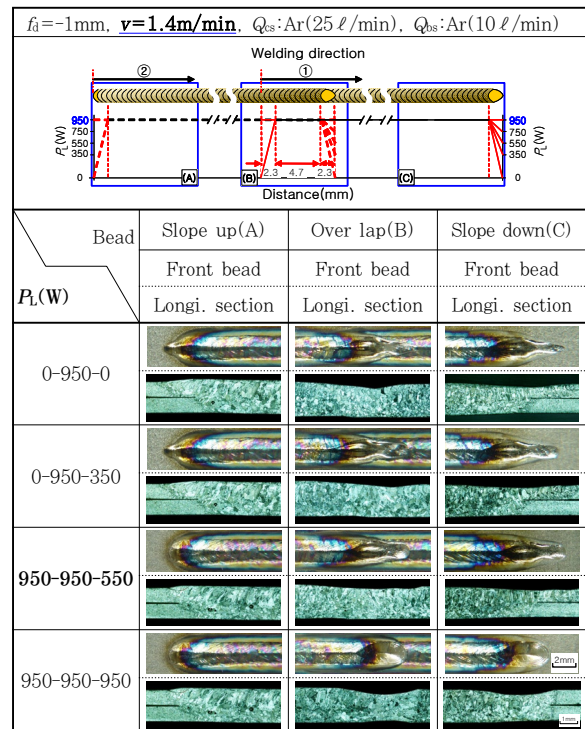


Fig. 5 Slope up & down of power in lap welding

구간에서도 슬롭 업 구간과 마찬가지로 출력의 변화를 전면비드 및 종단면에서 확인이 가능하며 슬롭 다운시에 출력이 높아질수록 비드가 점차 얇고 길어지는 것이 사라지고 크레이터의 크기가 증가한다. 특히 750W와 950W에서는 크레이터의 크기가 지나치게 커서 실제 용접에 적용이 불가능할 것으로 생각된다. 크레이터를 남기지 않고 슬롭 업시에 생성된 기공을 제거하기 위해서 비드 중첩부와 슬롭 다운 구간에서의 예열을 생각하면 슬롭 다운을 550W로 하였을 때가 가장 적당하다고 생각된다.

용접속도 1.6m/min의 경우에는 용접속도가 1.4m/min 보다는 빠르기 때문에 동일한 슬롭 업 및 다운 시간인 0.1초에 대하여 그 구간은 2.6mm이고 950W로 겹치는 부분은 7mm로 동일하게 하였다. 전체적으로 1.4m/min 과 유사한 결과를 나타내었고 종단면의 관찰에서는 기공이나 기타 결함이 관찰되지 않았기 때문에 실제 열교환판의 용접에도 용접속도 1.4m/min과 1.6m/min을 적용하였다.

3.1.3 인장강도 평가

인장특성을 평가하기 위하여 ASME SECTION IX(2001), QW-464.1의 규정에 의거하여 인장-전단 시험을 행하였다.

티타늄의 인장-전단 시험결과를 Fig. 6에 나타낸다. 용접속도 1.4 ~ 1.6m/min의 경우에는 모재에서 파단이 일어났고 이보다 빠른 속도에서는 용접부에서 파단되었다. 파단면을 SEM으로 분석한 결과 모재에서의

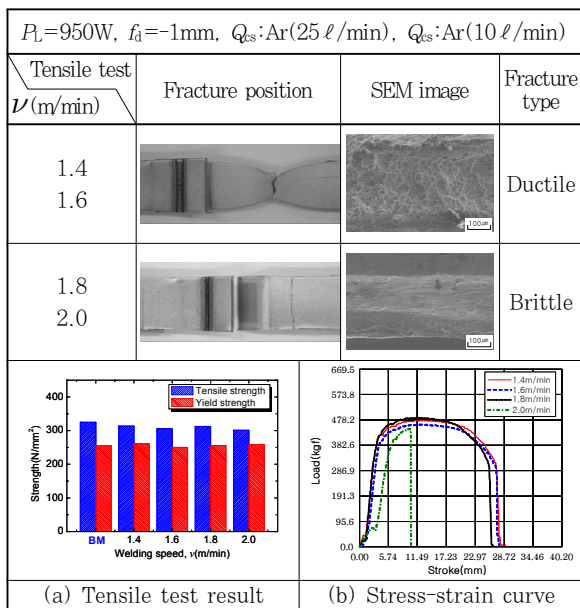


Fig. 6 Tensile-shear test of lap weldment

파단은 모두 연성파단(ductile fracture)이었고 용접부에서 파단된 경우에는 취성파단(brittle fracture)의 형태를 나타내었다. 그러나 변형-응력 곡선과 인장시험 결과를 살펴보면 인장 및 항복강도 값은 모재와 크게 차이가 나지 않았다. 인장 및 항복강도가 크면서도 취성파면을 나타낸 것은 급랭에 의한 영향과 산소 또는 질소에 의해 취화된 부분이 마지막에 파단되었기 때문이라고 추정된다.

3.2 실물 열교환기로의 적용

3.2.1 용접성 평가

지금까지의 실험에서 얻어진 용접조건을 적용하여 실제 열교환판을 용접하였다. 슬롭 업과 다운 구간은 2.3mm, 비드 중첩부는 7mm 이며 출력은 950-950- 550W이다. Fig. 7에 용접된 실제 열교환판의 사진과 용접성 평가를 위한 용접 시험편의 샘플링 위치 및 방법을 나타낸다. 샘플링 방법 중 A의 경우에는 횡단면을 관찰하면 비드 중첩부 전체를 볼 수 없기 때문에 판과 판사이 접합부의 상면을 연마하여 Fig. 3(d)와 같이 접합부를

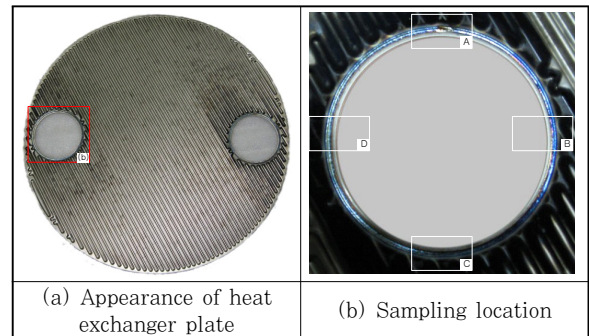


Fig. 7 Sampling location and method of lap weldment for heat exchanger plate

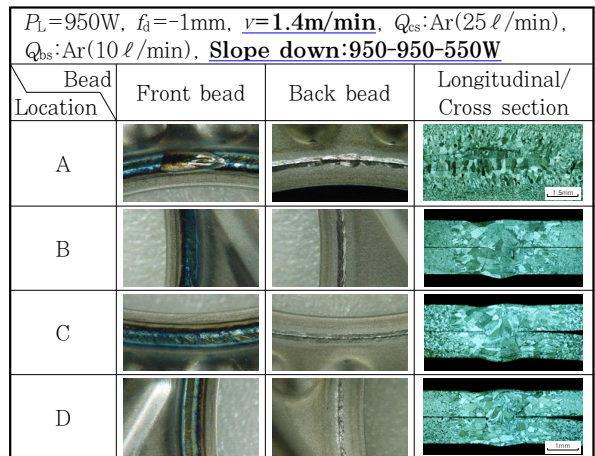


Fig. 8 Lap welds for heat exchanger

길이방향으로 관찰하였고 나머지 B, C, D의 경우에는 횡단면을 관찰하였다.

용접속도가 1.4m/min일 때의 용접결과를 Fig. 8에서 살펴보면, 전면비드는 청색과 황금색이 섞여있는 건전한 비드를, 이면은 은백색의 산화가 완전히 방지된 비드를 나타내고 있고 비드 중첩부 또한 전면 및 이면 비드가 양호하게 형성되어 있다. 용접부의 종단면 및 횡단면에서도 기공 또는 기타 결함이 전혀 관찰되지 않았고 접합부 길이가 일정하게 유지되는 것을 위치 A의 종단면에서 확인할 수 있다.

이에 반해 용접속도 1.6m/min일 경우에는 비드외관은 양호하나 종단면 및 횡단면에서 접합부를 따라 크고 작은 기공이 다수 발생하였다.

실물 열교환기 용접부의 취화정도를 판단하기 위하여 비커스 경도계를 사용하여 Fig. 9와 같이 상판과 하판 중앙부의 경도를 측정하였다. 용접부, HAZ 및 모재의 경도에는 큰 차이가 없었다.

중첩된 부분의 경도변화를 알아보기 위하여 Fig. 10과 같은 방법으로 경도를 측정하였다. 수평으로 상·하의 HAZ와 수직 방향의 경도 측정에서 접합부와 HAZ 및 모재의 경도 또한 큰 차이가 없으므로 레이저 중첩에 의한 영향은 없으며 실드가 잘된 매우 건전한 용접부라고 판단된다.

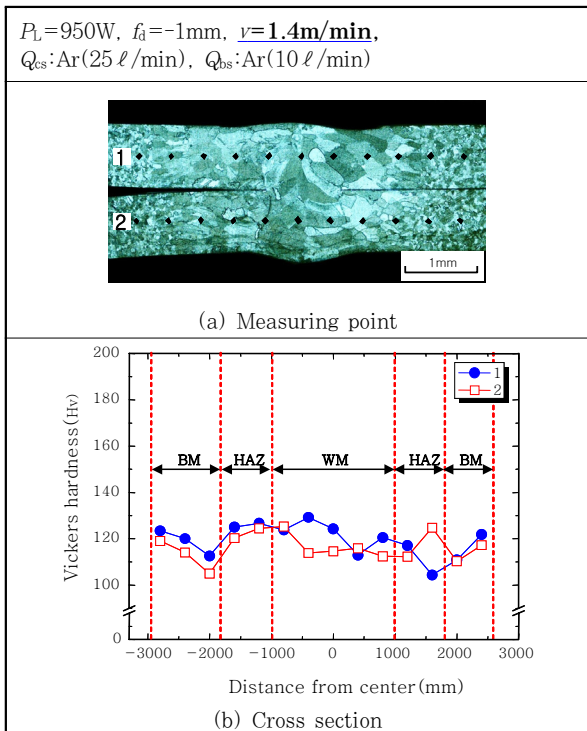


Fig. 9 Hardness of lap weldment for heat exchanger (location C)

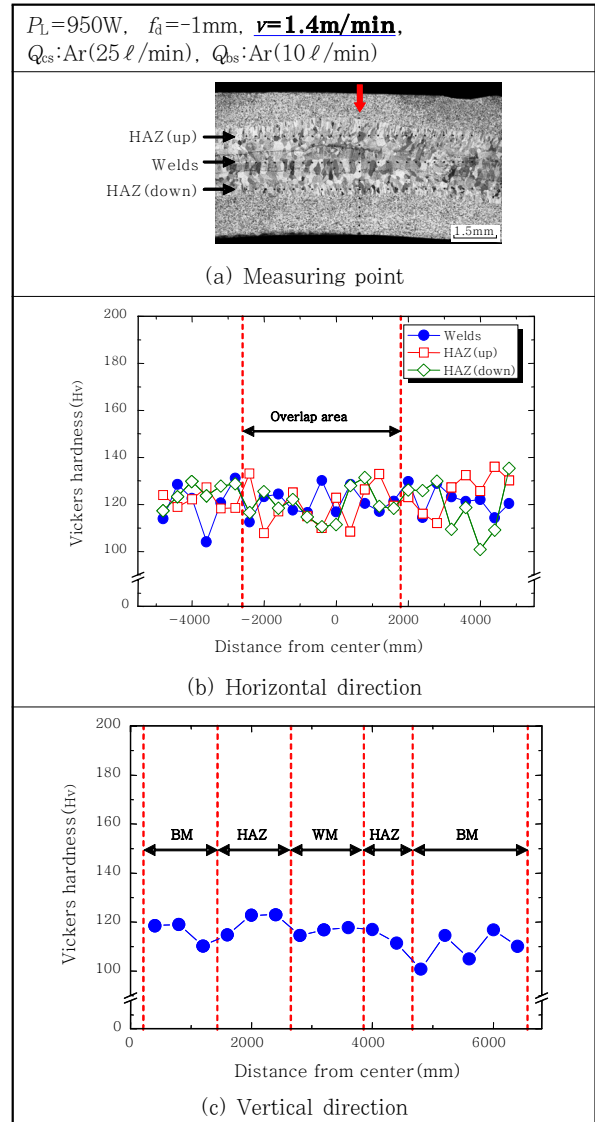


Fig. 10 Hardness of lap weldment for heat exchanger (location A)

지금까지 얻어진 최적의 조건에서 겹치기 용접은 레이저로, 옛지용접은 수동 GTAW를 사용하여 실시한 후 조립하여 공압 및 수압 테스트를 실시하였다. 공압과 수압 테스트를 위하여 각각 3kgf/cm²와 33kgf/cm²의 압력을 30min분간 유지하였다. 이 실험으로 누설 혹은 압력의 강하는 관찰되지 않았으므로 LPG 재액화시스템에 적용하여도 문제가 없을것으로 판단된다.

4. 결 론

1kW의 연속 Nd:YAG 레이저를 이용하여 두께 0.8mm의 순티타늄판을 겹치기 용접한 후 최적 조건을 실물 열교환기에 적용하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 최적의 겹치기 용접 조건은 $P_L=950W$, $f_d=-1mm$, $v=1.4m/min$, $Q_{cs}:Ar(25\ell/min)$, $Q_{bs}:Ar(10\ell/min)$ 이다.

2) 비드 중첩부의 슬롭 업과 다운 구간은 2.3mm, 중첩부는 길이는 7mm, 출력은 950-950-550W에서 기공 또는 결함이 없는 건전한 용접부를 얻었다.

3) 인장-전단 시험결과 용접속도 1.4, 1.6m/min에서는 모재에서 연성 파괴, 1.8, 2.0m/min에서는 용접부에서 취성 파괴가 일어났으나 인장 및 항복강도가 모재와 거의 동등하였다.

4) 실물 열교환기에 용접을 실시하고 용접부의 횡단면 및 비드 중첩부에 대하여 경도를 측정한 결과 모재, HAZ, 용접부에서 20Hv 이내의 차이가 나타났으므로 매우 건전한 용접부라고 판단된다.

5) 실물 열교환기의 공압 및 수압 시험에 모두 통과하였으므로 현장 적용에 문제가 없을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구 결과로 수행되었음
“(NIPA-2009-C1090-0903-0007)”

참 고 문 헌

1. Hitoshi Wake, Hiromichi Takahashi, Toshihiro Takimoto, Hirokazu Takayanagi, Kinichi Ozawa,

Hideo Kadoi, Mina Okochi, Tadashi Matsunaga : Development of an Electrochemical Antifouling System for Seawater Cooling Pipelines of Power Plants Using Titanium, *Biotechnology and Bioengineering*, **95**(2006), No.3

2. Toshikatsu Asahina and Yosuke Itoh : Structures and Mechanical Properties of Butt Welded Pure Titanium Sheet Using Pulsed YAG Laser, *Journal of Japan Institute of Light Metals*, **55-8** (2005), 337-342 (in Japanese)
3. Chen, F.K. ; Chiu, K.H., Stamping formability of pure titanium sheets, *Journal of materials processing technology*, **170-1/2**,(2005), 181-186
4. Harada Yasunori, Furukawa Yosuke, Murao Takuji, Mori KenOichiro, Tsuchida Noriyuki, Fukaura Kenzo : Formability and Improvement of Surface Roughness in Multistage Deep Drawing Processes of Beta Titanium Alloy Sheet, *Journal of Japan Society for Technology of Plasticity*, **47-528**(2006), 850-854 (in Japanese)
5. Jong Do Kim, Myung Sub Kwak, Chang Soo Kim : A Study of Weldability for Pure Titanium by Nd:YAG Laser(I) - Weld Properties with Shield Conditions -, *Journal of KWJS*, **27-5**(2009), 55-61 (in Korean)
6. Jong Do Kim, Myung Sub Kwak, Moo Keun Song, Seung-Ha Park : A Study of Weldability for Pure Titanium by Nd:YAG Laser(II) - Welding Properties of Butt Welding -, *Journal of KWJS*, **27-6** (2009), 68-73 (in Korean)
7. Jong Do Kim, Myung Sub Kwak, Moo Keun Song : A Study of Weldability for Pure Titanium by Nd:YAG Laser(III) - Welding Properties of Edge Welding -, *Journal of KWJS*, **27-6** (2009), 74-79 (in Korean)