연 구 논 문

순티타늄판의 Nd:YAG 레이저 용접성에 관한 연구(I)

- 실드 조건에 따른 용접특성 -

김 종 도*,† · 곽 명 섭** · 김 창 수***

*한국해양대학교 기관시스템공학부
**대우조선해양(주) 산업기술연구소
***(주)동화엔텍 열유체연구소

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

- Weld Properties with Shield Conditions -

Jong-Do Kim*,†, Myung-Sub Kwak** and Chang-Soo Kim***

*Division of Marine System Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea
**Industrial application R&D institute, DSME. Co., LTD., Okpo 656-714, Korea
***R&D Center, DongHwa Entec, Busan 618-270, Korea

†Corresponding author : jdkim@hhu.ac.kr

(Received Apil 29, 2009 ; Revised July 20, 2009 ; Accepted September 21, 2009)

Abstract

Pure titanium and its alloys have good formability, excellent corrosion resistance and high strength to weight ratios. Therefore, it has been using to heat exchangers, offshore plants, sports equipments, and etc. As broad as its application fields, it also increases welding locations. Conventional GTAW and GMAW are very popular welding methods of titanium, but it has a high heat input and wide HAZ. It has a possibility of inducing Stress Corrosion Cracking. So, laser welding method has been using to get reliable welds by reducing heat input.

Weld beads change its color to silver, gold, brown, blue, and gray by shied conditions. And the closer to gray, the more oxidize, nitride and embrittlement. The most effective atom to embrittlement was nitrogen. And shield gas flow was not so effective over the constant flow rates.

In this study, weld properties of the pure titanium were investigated by pulsed & CW Nd:YAG lasers and evaluated by various shield conditions. And It is observed that nitrogen is more effective to oxidation and embrittlement of titanium compared with oxygen by oxygen and nitrogen quantitative analysis.

Key Words : Pure titanium, Laser welding, Shield conditions, Oxidation, Embrittlement

1. 서 론

티타늄(Ti)은 표준전극전위가 -1.63V로 대단히 활성한 금속이나 상온의 수중에서 H^+이온에 의한 산화로 부동태화하기 때문에 티타늄 및 티타늄합금은 내식성이 뛰어나고 특히 해수에 대해서도 공식을 발생시키지 않는다[1]. 또한, 비강도(강도/밀도)가 크고 고온 크리프 특성(creep property)이 우수하기 때문에 각종 열교환기, 화학 플랜트, 제트기 엔진 케이스, 우주항공 분야 등에 널리 이용되고 있다.

이와 같이 적용분야가 증가함에 따라 고품질의 용접에 대한 수요도 늘어나고 있다. 티타늄의 용접에는 종래의 용접 방법인 GTAW[2], GMAW, 저항용접 등과 어스펙트비가 크고 입열이 작은 고품위의 용접법인 전자빔용접 및 레이저용접에 이르기까지 다양한 방법이 사용되고 있다[3-4].

한편, 티타늄은 약 300℃이상의 고온에서 산소, 질

소, 수소 및 탄소 등의 침입형원소와 반응하여 쉽게 취화되므로[5] 이들로부터 용접부를 보호하는 것이 용접에 있어서 가장 중요하다. 이를 위하여 헬륨(He), 아르곤(Ar) 등의 불활성가스를 이용하여 다양한 방법으로 용접부를 실드하고 있다.

지금까지 보고된 자료들은 티타늄과 이종금속[6-7], 티타늄 합금[8]의 용접에 대한 것들이 대부분이었고 순티타늄(ASTM grade 1)에 대한 자료는 찾아보기 힘들었다. 또한 용접부의 색깔에 따라 경도, 산소 및 질소의 함량을 정량적으로 분석하여 비교·정리한 예는 없었다.

본 연구는 티타늄의 레이저용접 적용을 위한 기초실험으로서 용접시 비드 색깔에 따른 특성에 대하여 먼저 분석한 후에 펄스 및 연속 레이저를 사용하여 다양한 실드조건 및 용접방법에 대하여 용접특성을 평가하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

실험에는 순도 99.9%이상의 공업용 순티타늄을 사용하였으며 그 화학조성 및 사이즈를 Table 1과 Fig. 1에 각각 나타낸다. 재료와 레이저 열원간의 물성 평가를 위한 기초 실험에서는 두께 0.6mm의 판재를 주로 사용하였고, 겹치기 및 에지 용접으로의 적용을 위한 실험에는 주로 두께 0.8mm판을 사용하였다.

시험편은 용접전에 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

본 실험에 사용한 레이저는 모두 램프 여기방식의 Nd:YAG 레이저로 800W 펄스레이저, 1kW 및 4kW

Table 1 Chemical compositions of pure titanium

Elements(wt%) / Material	O	C	N	H	Fe	Ti
Pure titanium (ASTM Gr. 1)	0.05	0.01	0.01	0.001	0.04	Bal.

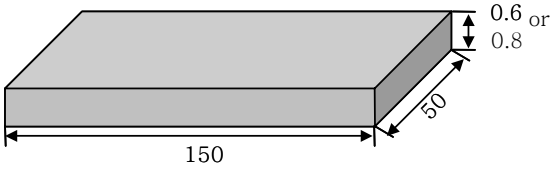
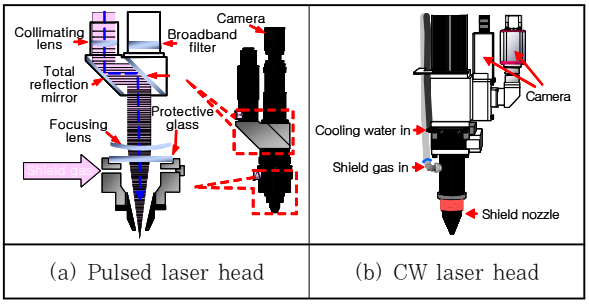


Fig. 1 Dimension of specimen(unit:mm)



(a) Pulsed laser head (b) CW laser head

Fig. 2 Laser optics for welding

연속레이저이다. Fig. 2에 800W 펄스레이저 및 1kW 연속레이저의 광학계를 나타낸다.

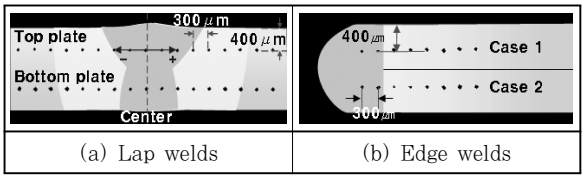
용접부의 전면실드는 4kW 연속레이저의 경우에는 사이드 실드가스 노즐을 사용하였고, 나머지 두 레이저는 동축 실드가스 노즐을 사용하여 실시하였으며 이면실드는 지그의 홈을 이용하여 실시하였다. 또한 필요한 경우에는 실드 노즐을 따로 설치하여 후방실드도 행하였다. 실드가스는 아르곤(Ar), 헬륨(He) 등을 사용하였고 용접전에 3초간 퍼지(purge)하여 실드가스 라인 내의 이물질 및 공기를 배제하였다.

용접비드의 색깔 및 실드가스의 종류에 따른 용접특성 평가시에는 형상인자를 배제하기 위하여 비드용접을 실시하였고, 산업현장에 적용을 위하여 겹치기 및 에지 용접도 실시하였다. 각 레이저별 용접 조건을 Table 2에 나타낸다.

용접부의 취화정도를 평가하기 위하여 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 하중을 0.3kgf/mm^{2}으로 10초간 가하였으며 용접부 중앙을 중심으로 오른쪽을 "+", 왼쪽을 "-"로 표시하였다. 겹치기 및 에지 용접에 대한 경도 측정부위는 Fig. 3과 같다. 산화 및 질화의 진행정도를 평가하기 위하여 용접 비드 및 용접부에 대하여

Table 2 Welding parameters

Laser type / Parameters	Pulsed wave	Continuous wave	
		2kW laser	4kW laser
Power	220V(4ms, 50Hz)	950W	2.0kW
f_d(mm)	0	-1	0
v(m/min)	1.5	2.5	2.0~3.5



(a) Lap welds (b) Edge welds

Fig. 3 Illustration of hardness measuring method

EDS 분석 및 산소·질소 정량분석기(LECO-TC600)를 사용하여 정량분석을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접부의 비드 색깔에 따른 특성

티타늄은 산화정도에 따라 용접비드의 색깔이 변하므로 이를 통하여 용접성을 간접 평가할 수 있다[9]고 보고되고 있으나 정량적인 평가는 이루어져 있지 않다. 따라서 티타늄판에 실드 조건을 여러 가지로 변화시켜서 비드용접을 하고 비드의 EDS 면분석, 용접부의 경도 및 산소·질소 정량분석을 통하여 이를 해명하고자 하였다.

먼저, 펄스 레이저를 사용하여 집광광학계의 비초점거리(defocused distance, f_d) 변화에 따른 비드천이(bead transition)를 알아보기 위하여 실험을 실시하였다[10]. f_d=-0.5mm에서 가장 깊은 용입을 나타내었고 비초점거리가 증가할수록 용입깊이가 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 f_d=-0.5mm에서는 청색의 비드를 얻은데 반하여, 초점(f_d=0mm)에서는 황금색과 갈색이 섞여있고 비드폭이 가장 좁은 용접부를 얻을 수 있었으므로 초점을 용접조건으로 선정하였다[11].

비드용접에서는 완전용입용접(full penetration welding)이 이루어지는 조건에서 실드 조건만을 변화시켰다. 산화가 완전히 방지된 은백색의 이면비드를 얻기 위하여 이면실드(back shield, Q_{bs})에는 Ar(10ℓ/min)을 사용하여 이면비드의 산화에 의한 용접부 물성의 변화를 배제하였다. 전면비드에는 다양한 색깔을 얻기 위하여 동축실드(coaxial shield, Q_{cs})와 후방실드(after shield, Q_{as})를 Ar과 He을 사용하여 행하였고 산화된 비드를 얻기 위하여 공기중에 노출도 시켰다.

비드색깔에 따른 비드의 모양과 경도 분포를 Fig. 4에 나타낸다. 황금색, 갈색, 청색에서 모두 건전한 비드

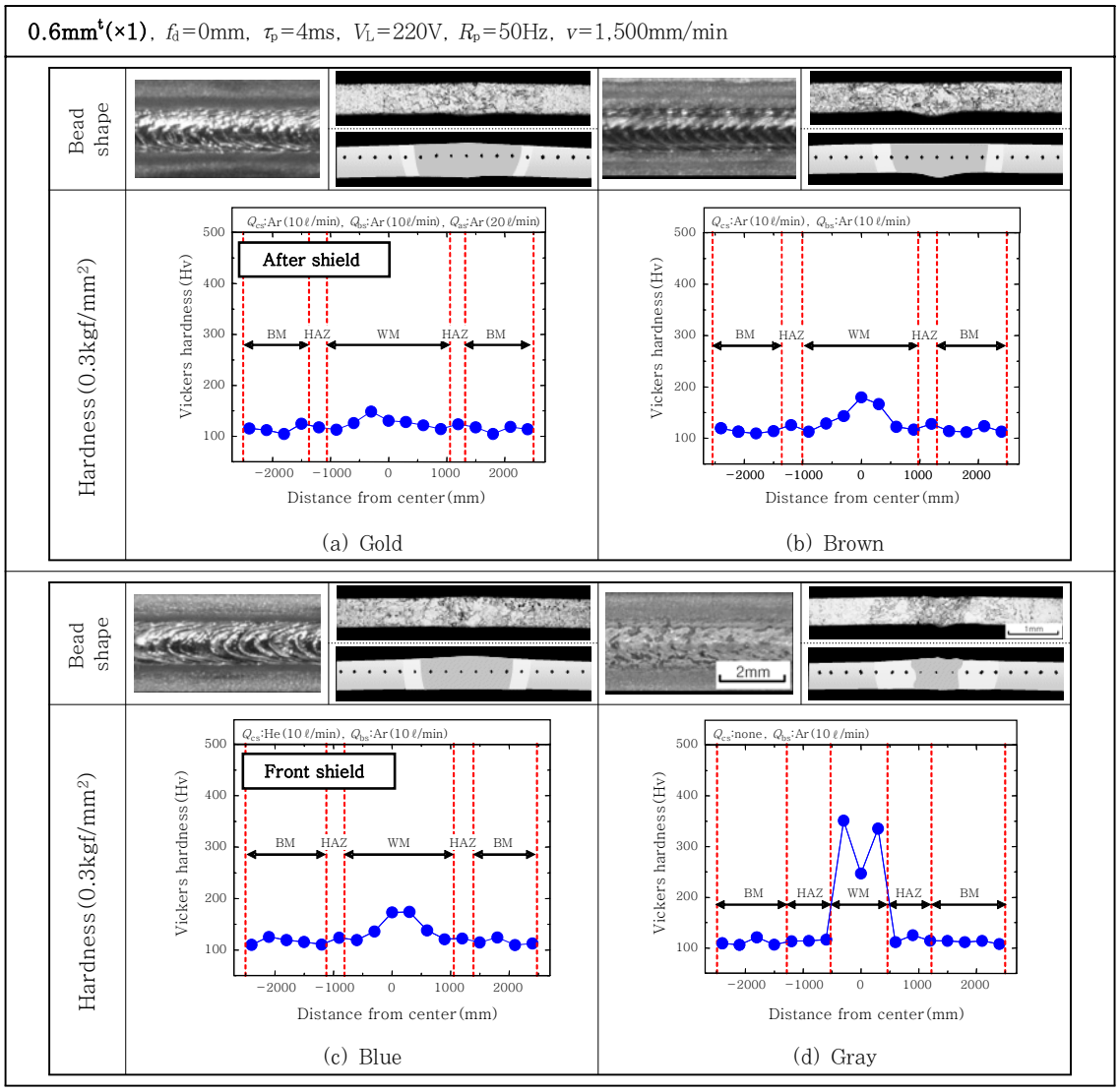


Fig. 4 Bead shapes and hardness distributions with shield conditions

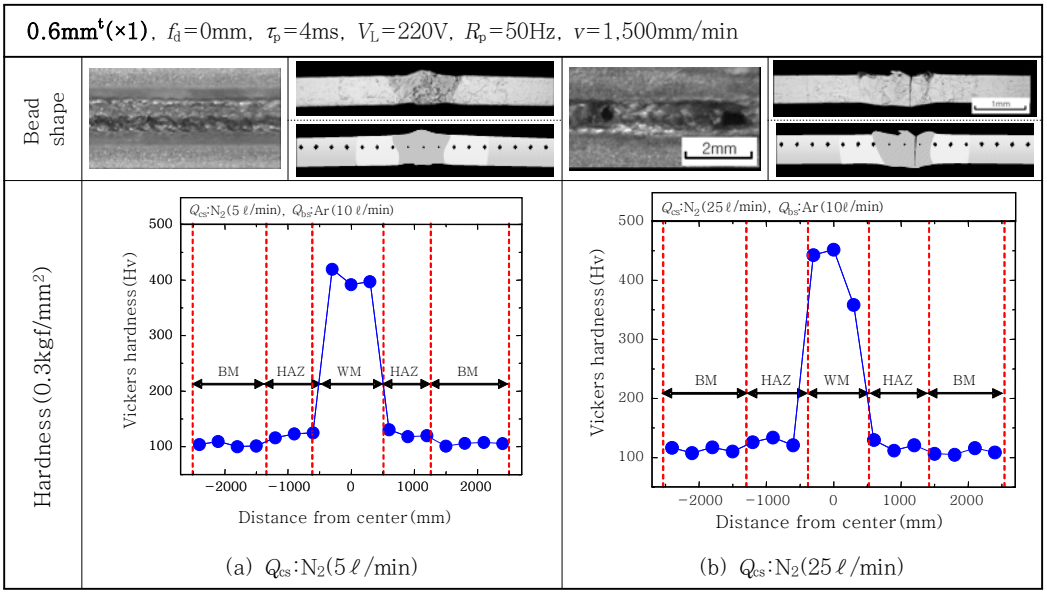


Fig. 5 Bead shapes and hardness distributions with N2 gas

를 얻었고 황금색에서 갈색, 청색으로 갈수록 미세하나마 HAZ부가 넓어지는 반면 용융부가 좁아지는 경향을 보였다. 이것은 첫째, 산화가 진행됨에 따른 발열 둘째, 모재에서 Ti가 증발하면서 공기중의 O_2와 결합하여 생성된 TiO_x의 산화물인 퓸(fume)의 레이저 차단 셋째, O_2의 유입에 의한 융액 표면장력의 변화에 의한 영향이라고 생각된다. 융액에 O_2가 유입되면 고온부에서 표면장력이 증가하여 융액의 대류방향이 가운데로 몰리고 깊은 용입을 얻을 수 있기 때문이다. 모재의 경도가 100 ~ 105Hv이고 황금색, 갈색, 청색으로 갈수록 조금씩 높아지다가 회색에서 약 350Hv 정도로 매우 높아지는데 이것은 용접부의 취화에 의한 것이다.

질소에 의한 용접부의 질화정도를 알아보기 위하여 Fig. 5와 같이 N_2를 실드가스로 사용하여 상기와 동일한 조건에서 용접하였다. Q_{cs}=5 ℓ/min에서부터 전면비드가 건전하지 못하고 용접부가 좁았으며 HAZ의 크기가 대기에 노출되어 완전히 산화된 경우와 비슷하다. 25 ℓ/min에서는 용접부에 용락이 발생하였다. 용접중 퓸(fume)의 발생에 의하여 레이저가 차단되어 입열이 다소 감소하였음에도 불구하고 용접부가 좁고 HAZ부의 면적이 넓으며, N_2를 25 ℓ/min 사용한 경우에 용락이 발생한 것은 질화에 의한 발열이 원인이라고 생각된다. N_2를 실드가스로 사용하였을 때 대기중에서 보다 경도가 60 ~ 100Hv 정도 더 상승하였고 25 ℓ/min을 사용한 경우에는 용접부의 취화에 의한 균열도 발생하였다.

Fig. 6과 같이 비드 색깔에 따른 비드 표면의 산화

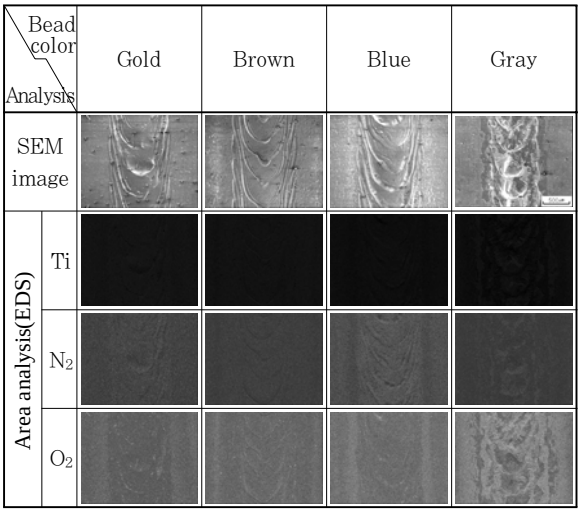


Fig. 6 SEM image and EDS analysis results of weld bead with shield conditions

및 질화 정도를 평가하기 위하여 EDS 면분석을 실시하였다. 비드 색깔이 회색으로 변함에 따라 N_2는 큰 차이가 없으나 O_2는 눈에 띄게 증가하고 있다. 대기중에는 O_2가 약 21%, N_2가 약 78%로 N_2가 O_2보다 더 많이 포함되어 있음에도 불구하고 산소량이 더 많이 검출된 것은 O_2가 N_2보다 티타늄과의 반응성이 더 좋기 때문이라고 생각된다.

청색까지는 모재와 비교하여 O_2는 큰 변화가 없고 N의 양은 점점 증가하다가 회색에서 O_2는 모재의 약 3배, N는 모재의 100배가 함유되어 있는 것을 Fig. 7에서 확인할 수 있다. Fig. 4의 경도 계측 결과와 같이 생각하였을 때 용접부의 취화에는 N_2가 가장 큰 영향

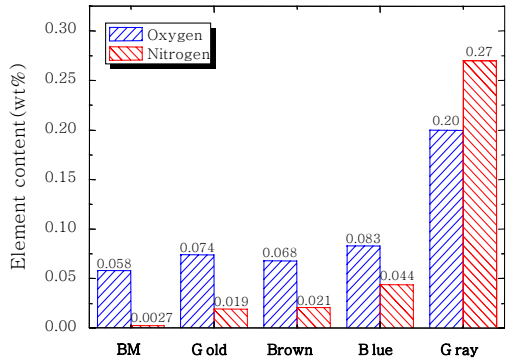


Fig. 7 Oxygen and nitrogen quantitative analysis results with bead colors

을 미치는 것이 명확하다. 그 이유는 N_2의 원자반경은 0.53Å, O_2는 0.61Å으로 N_2가 O_2보다 원자반경이 87%정도로 작아서 침입형 원자로 작용하기가 쉽기 때문으로 사료된다.

3.2 실드가스 종류에 따른 용접성

실드가스의 종류 및 유량에 따른 용입특성을 평가하기 위하여 1kW 연속레이저의 비드용접에서 일반적으로 많이 사용하는 순도 99.8%와 고순도 99.999%의 Ar, He 가스를 사용하여 전면실드를 하였고 이면은 지금까지와 같이 순도 99.8%의 Ar을 10ℓ/min흘려서 실드하였다.

용접조건은 완전용입이 되도록 선정하였고 전면 비드폭(W_f)과 이면 비드폭(W_b)으로 용입특성을 평가하여 Fig. 8에 나타내었다.

Ar을 실드가스로 사용한 경우, 순도에 관계없이 거의 비슷한 경향을 나타내었고 유량이 5ℓ/min이상에서는 전면비드폭과 이면비드폭이 거의 일정하게 유지되었다. 비드색깔에서는 순도 99.8%의 경우 20ℓ/min이상에서 갈색과 황금색이 섞여있는 동일한 색깔을 나타내었고 순도 99.999%의 경우에는 15ℓ/min이상에서 순도 99.8%와 같은 비드색깔을 보였다. 순도가 높은 99.999%가 적은 유량에서도 실드 효과가 뛰어난 것을 확인 할 수 있었다.

순도 99.999%의 He을 실드가스로 사용한 경우에는 Ar의 경우와 달리 10ℓ/min에서부터 완전용입되었고 15ℓ/min이상에서는 황금색에 가까운 비드를 나타내었기 때문에 실드에는 He이 조금 더 유리하다고 생각된다. 그 이유는 He과 Ar의 물리적 성질의 차이에 의한 것으로 Ar에 비하여 He은 비중이 10배 작고 열전도도가 8.5배 크기 때문에 주위의 열에너지를 쉽게 뺏어 달아나서 냉각효율이 좋기 때문이다. 이온화에너지는 1.5

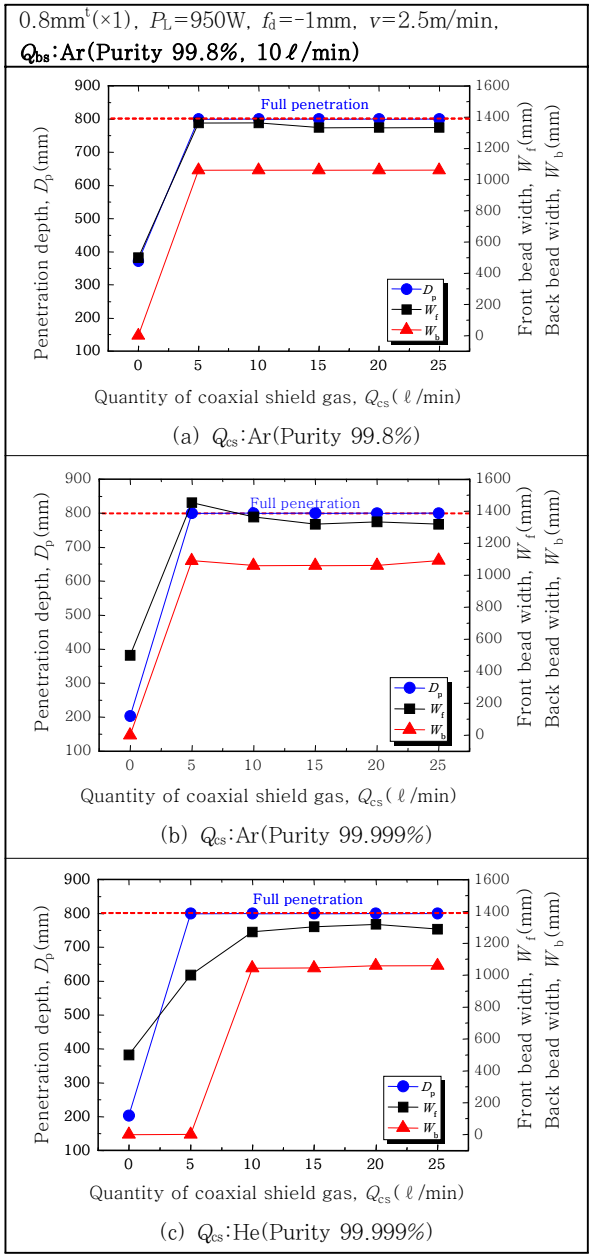


Fig. 8 Penetration properties with shield conditions

배 커서 Ar보다 쉽게 전리되지 않는다. 대출력의 레이저용접시에 Ar보다 He을 많이 사용하는 이유는 Ar은 쉽게 플라즈마화 되어 레이저를 산란 및 반사시켜 효율을 떨어뜨리기 때문이다[12].

3.3 겹치기 및 에지 용접시의 경도 특성

지금까지의 기초 실험을 바탕으로 현장에서 많이 사용되는 겹치기 및 에지 용접부에 대한 특성을 알아보기 위하여 추가 실험을 행하였다. 현장에서의 생산성 및 레이저 가격을 고려하여 4kW의 연속레이저에서 2kW의 출력으로 용접하였다.

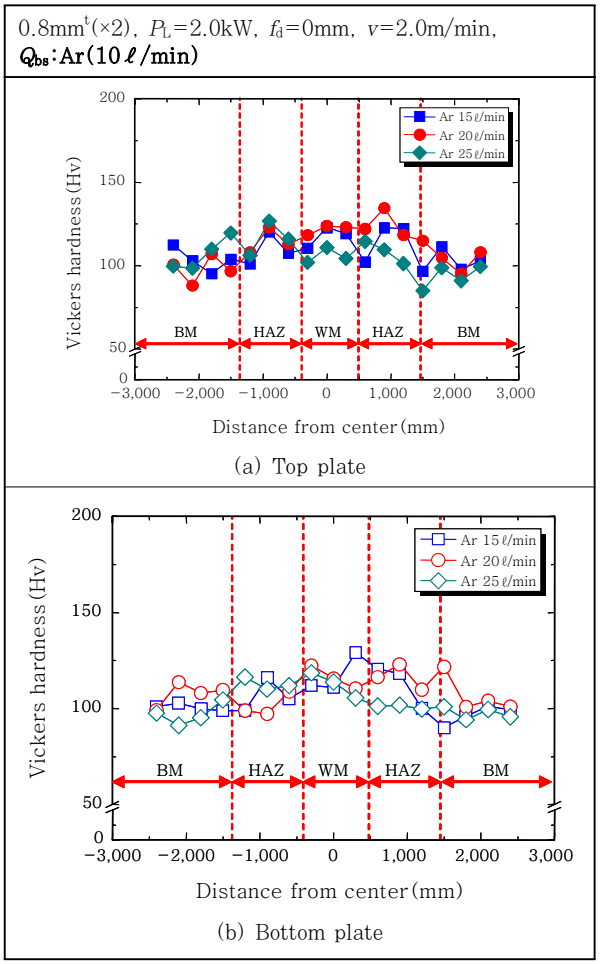


Fig. 9 Hardness distribution of lap welds with gas flow rate by 4kW CW laser

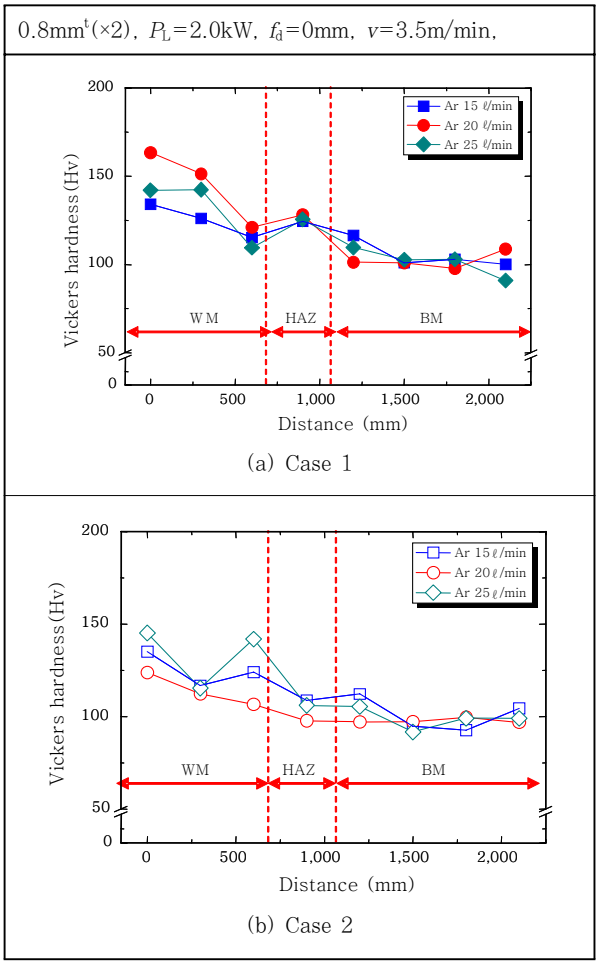


Fig. 10 Hardness distribution of edge welds with gas flow rate by 4kW CW laser

Fig. 9와 Fig. 10에 겹치기 및 에지용접시의 실드가스 유량변화에 따른 용접부의 경도분포를 Fig. 3과 같이 측정하여 나타낸다. 용접부, HAZ, 모재순으로 경도가 낮아지는 경향을 나타내고 유량 15ℓ/min 이상에서는 큰 차이를 나타내지 않았다.

따라서 일정량 이상의 실드가스 유량만 확보되면 용접부의 실드에는 문제가 없을 것으로 생각된다.

4. 결 론

두께 0.6 및 0.8mm의 순티타늄판을 펄스 및 연속 Nd:YAG레이저를 사용하여 용접하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용접부의 비드 색깔에 따른 경도, 질소와 산소의 함유량을 정성적으로 정리하면 아래의 표와 같으며 용접부의 취화에는 산소보다 질소가 더 큰 영향을 미친다는 것을 알았다.

	BM	Gold	Brown	Blue	Gray
Hardness(Hv)	115	148	173	179	350
Nitrogen(wt%)	0.0027	0.019	0.021	0.044	0.27
Oxygen(wt%)	0.059	0.074	0.069	0.083	0.20

2) 물리적 성질에 의해 He이 Ar보다 실드효과가 더 뛰어남을 확인 하였다.

3) 겹치기 및 에지용접에서는 Ar 15ℓ/min이상으로 충분한 전면실드 효과를 얻었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지역산업기술개발사업(과제번호:10027454)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 下平 三郎 : 腐食・防食の材料科學, アグネ技術センタ, 1995 (in Japanese)
2. Woong-Seong Chang, Mok-Young Lee, Byoung-Hyun Yoon : High Current Keyhole GTAW for Stainless Steels and Ti Alloys, Journal of KWS, 22-6(2004), **6-9** (in Korean)
3. 上瀧洋明 : チタンの溶接技術, (社)日本チタン協會, 日刊工業新聞, 2000 (in Japanese)
4. Byoung-Hyun Yoon, Suk-Hwan Kim, Woong-Seong Chang : Recent Trends of Welding Technology for Ti and Ti Alloys, Journal of KWS, **25-5**(2007), 22-28 (in Korean)
5. Fujii Nobuyuki, Fukuhara Yoshimasa, Hinata Teruhiko and Yasuda Katsuhiko : Examination of Melting Characteristics of Pure Titanium and Welding Procedure conditions -Welding or Pure Titanium and Joint Performance (Report 1)-, Journal of Japan Welding Society, **20-1**(2002), 20-25 (in Japanese)
6. B. Majumdar, R. Galun, A. Weisheit, B. L. Mordike : Formation of a crack-free joint between Ti alloy and Al alloy by using a high-power CO_2 laser, Journal of materials science, **32**(1997), 6191-6200 (in Japanese)
7. S. CHATTERJEE, T. A. ABINANDANAN, K. CHATTOPADHYAY : Microstructure development during dissimilar welding - Case of laser welding of Ti with Ni involving intermetallic phase formation -, Journal of materials science, **41**(2006), 643-652 (in Japanese)
8. Takeshi Shinoda, Kenichi Matsunaga, Motoei Shinhara : Laser Welding of Titanium Alloy, The Japan Institute of Light Metals, 28-2(1990), 49-56 (in Japanese)
9. チタンの加工技術, (社)日本チタン協會, 日刊工業新聞, 1992 (in Japanese)
10. Jong-Do Kim, Myung-Sub Kwak : Lap Weldability of Pure Titanium by Nd:YAG Laser, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, **32-2**(2008), 315-322 (in Korean)
11. Jong-Do Kim, Myung-Sub Kwak, Chang-Je Lee, Chang-Soo Kim : Weldability of Pure Titanium Thin plate for LPG Re-Condenser by Nd:YAG Laser -Physical Constant and Welding Parameters-, Proceedings of the 2007 Annual Autumn Meeting of Korean Welding Society, **48**(2007), 363-365 (in Korean)
12. A. Matsunawa, T. Ohnawa : Beam-Plume Interaction in Laser Materials Processing, Transactions of JWRI in Osaka University, **20-1**(1991), 15-39