

순티타늄판의 Nd:YAG 레이저 용접성에 관한 연구(II)

- 맞대기 용접 특성 -

김종도^{*†} · 광명섭^{**} · 송무근^{***} · 박성하^{****}

^{*}한국해양대학교 기관시스템공학부

^{**}대우조선해양(주) 산업기술연구소

^{***}한국해양대학교 대학원

^{****}(주)동화엔텍 열유체연구소

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

- Welding Properties of Butt Welding -

Jong-Do Kim^{*†}, Myung-Sub Kwak^{**}, Moo-Keun Song^{***} and Seung-Ha Park^{****}

^{*}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

^{****}R&D Center, DongHwa Entec, Busan 618-270, Korea

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

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

Abstract

Recently, as titanium and titanium alloys are being increasingly used in wide areas, there are on-going researches to obtain high quality weld zone. In particular, growing interest is being drawn to laser welding, which involves low heat input and large aspect ratio in various welding processes and can facilitate shield in atmospheric condition compared with electron beam welding.

The first report covered the analysis of embrittlement by the bead color of weld zone through quantitative analysis of oxygen and nitrogen and measurement of hardness as basic experiment to apply laser welding to titanium. Results indicated that the element that affect embrittlement the most was nitrogen, and as embrittlement and oxygenation go on, bead color changed to silver, gold, brown, blue and gray.

This study performed butt welding of pure titanium and STS304 by using 1kW CW Nd:YAG laser, and to find out basic physical properties, evaluated welding performance by laser output, welding speed, root gap and misalignment etc, and examined mechanical properties through tensile stress and Erichsen test. The reason particles of pure titanium welded metal and HAZ are greater than STS304 is because they are pure metal and do not include many impure elements that work as nuclei in case of resolidification, thus becoming coarse columnar crystals eventually. In addition, the reason STS304 requires more energy during welding than pure titanium is because the particle size of base metal is smaller.

Key Words : Pure titanium, STS304, Nd:YAG laser, Butt welding, Surface tension, Grain size

1. 서 론

최근 티타늄의 사용범위가 넓어짐에 따라 고품위의

용접부를 얻기 위한 연구가 계속되고 있다¹⁻²⁾. 특히 여러 가지 프로세스 중에서 입열이 적고 용접부가 좁아서 실드가 양호한 레이저 용접에 대한 관심이 커지고 있다³⁻⁵⁾.

제 1보⁶⁾에서는 티타늄의 레이저용접 적용을 위한 기초 실험으로서 펄스 레이저를 사용하여 용접부의 비드 색깔에 따른 취화 정도를 산소·질소 정량 분석과 경도 측정을 통하여 비교·분석하였다. 또한 연속 레이저를 사용하여 실드가스로 Ar과 He를 사용하였을 때의 용입 깊이와 겹치기 및 에지 용접시의 경도 분포에 대하여 평가하였다.

본 연구에서는 맞대기 용접에 대한 기초적인 물성을 알아보기 위하여 1kW 연속레이저를 사용하여 레이저 출력, 용접 속도, 루트 갭(root gap), 단차(misalignment)에 따른 용접성과 인장 및 에릭슨 테스트를 통한 기계적 특성을 평가하였다. 또한 티타늄과의 비교 실험을 위하여 청수에서 내식성이 뛰어난 STS304에 대해서도 용접을 실시하고 차이점을 분석 하였다.

2. 사용 재료 및 실험 방법

2.1 사용 재료

본 연구에는 ASTM grade 1의 공업용 순티타늄과 오스테나이트계 스테인리스강인 STS304를 150(L) × 50(W)×0.8(H)(단위:mm)의 시험편으로 만들어 사용하였으며, 그 화학조성은 Table 1에 나타낸것과 같다.

루트 갭을 0mm로 유지하기 위하여 시험편의 맞닿는 부분은 밀링하였고 아세톤과 메탄올로 수분과 유분을 제거하였다.

2.2 실험 장치 및 방법

실험에 사용한 레이저는 최대 출력 1.0kW인 램프(lamp)여기방식의 연속레이저로 빔 품질(beam quality)은 30mm·mrad이다. 집광광학계의 초점 길이는 200mm, 동축 노즐 끝단에서 시험편까지의 작동거리(working distance)는 용접부의 실드를 용이하게 하기 위하여 3mm로 고정하였다. 실험을 위한 레이저 광학계와 지지의 설치모습을 Fig. 1에 나타낸다.

실험에 앞서 레이저 광학계의 상태를 알아보기 위해

Table 1 Chemical composition of specimens

Element(wt%)	H	O	N	Fe	C	Ti
Titanium	0.001	0.05	0.01	0.04	0.01	Bal.

(a) Pure titanium(Grade 1)

Element(wt%)	Cr	Ni	Mn	C	Si	Fe
STS304	18.38	8.06	1.124	0.622	0.408	Bal.

(b) STS304

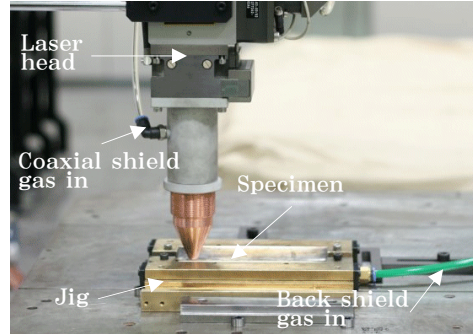


Fig. 1 Experimental setup for butt welding

Table 2 Welding parameters for butt welding

Parameter	P_L (W)	f_d (mm)	v (m/min)	Shield gas
Titanium	950	-1	2.0~4.0	Ar
STS304	950	-1	1.5~2.5	Ar

여 번패턴(burn pattern)을 찍은 결과, 초점에서 스폿 사이즈(spot size)가 0.64mm로 가장 좁았고 비초점 거리(defocused distance, f_d) -1mm와 +1mm에서는 0.65mm로 큰 차이가 없었다.

또한, 티타늄에 대하여 레이저를 조사했을 때에는 초점에서 용입이 가장 깊고 비드폭이 좁았다. 재료 안쪽에 초점이 맺혀 플라즈마(plasma)에 의한 레이저빔 손실이 가장 적을 것으로 판단되는 -1mm를 비초점거리로 선정하였다.

용접을 위한 재료별 주요 매개변수는 Table 2에 정리하여 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 비드 용접특성

티타늄의 맞대기 용접을 위한 개략적인 조건을 알아보기 위하여 출력(P_L) 950W, 비초점거리(f_d) -1mm, 동축 실드가스유량(Q_{cs}) 및 이면 실드가스유량(Q_{bs})을 10 l/min으로 하여 용접하였고 그 결과를 Fig. 2에 나타낸다.

용접속도(v) 2.0m/min에서는 입열과다로 인한 용락(burn through)이 발생하였고, 2.5~3.5m/min의 조건에서는 완전용입(full penetration) 용접이 되었으며 용접속도의 증가에 따라 선형적으로 전면비드 및 이면비드의 폭이 감소하다가 4.0m/min에서는 이면비드가 형성되지 않았다. 이 모든 조건에서 스패터와 기공 등의 결함은 발생되지 않았으며 이면비드는 모두 산화가

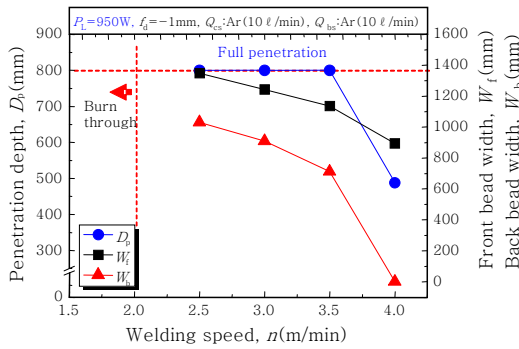


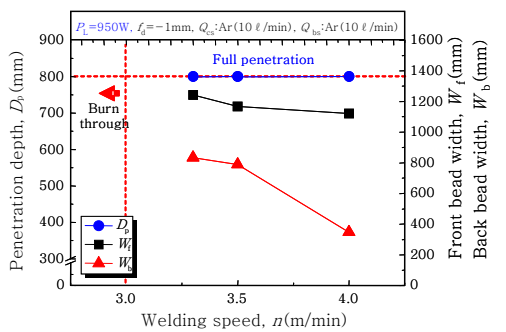
Fig. 2 Penetration properties of BOP(Titanium)

방지된 은백색을 나타내었다. 전면비드는 3.5m/min까지는 황금색과 갈색이 섞여 있었고 4.0m/min에서는 은백색만 관찰되었는데, 그 이유는 4.0m/min의 경우에는 빠른 용접속도로 인하여 입열이 감소하였기 때문에 냉각속도가 빨라져서 상대적으로 공기와 접촉할 수 있는 시간이 짧아졌기 때문이다.

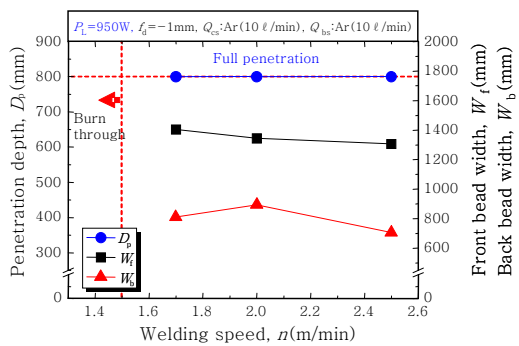
3.2 맞대기 용접 특성

3.2.1 속도에 따른 특성

비드 용접에서 얻은 조건을 바탕으로 I개선(루트 갭 0mm)의 맞대기 용접을 실시한 결과를 Fig. 3에 나타낸다. 티타늄의 경우에는 용접속도 3.0m/min에서 용



(a) Titanium



(b) STS304

Fig. 3 Penetration properties with welding speed for butt welding

락이 발생하였고 3.3~4.0m/min에서는 완전용입용접이 되었으며 결함은 발생하지 않았다. 전면비드는 황금색과 갈색을, 이면비드는 은백색을 나타내었다.

이에 반해 STS304의 경우에는 티타늄의 경우보다 2배 느린 1.5m/min에서 용락이 발생하였고 1.7~2.5m/min까지 완전용입용접되었으며 전체적으로 티타늄의 경우와 비슷한 양상의 그래프를 나타내었다. 그러나 티타늄의 경우 보다는 용접을 위해 보다 많은 에너지를 필요로 하였다.

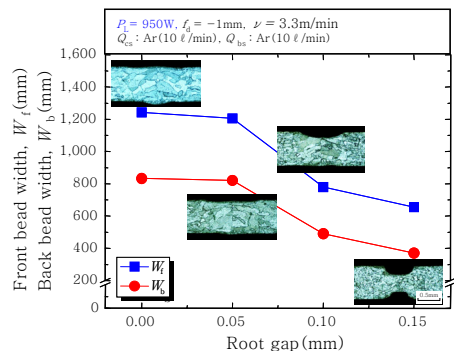
3.2.2 루트 갭에 따른 특성

루트 갭을 달리하여 티타늄과 STS304를 Fig. 4와 같이 맞대기 용접하였다. 티타늄의 경우에는 용접속도 3.3m/min에서 갭을 0~0.15mm로 하여 용접을 실시한 결과, 0.05mm에서부터 전면 비드에 약간의 언더컷(under cut)이 발생하기 시작하여 0.1mm에서는 확연히 드러났고 0.15mm에서는 이면비드에서도 언더컷이 발생하였다.

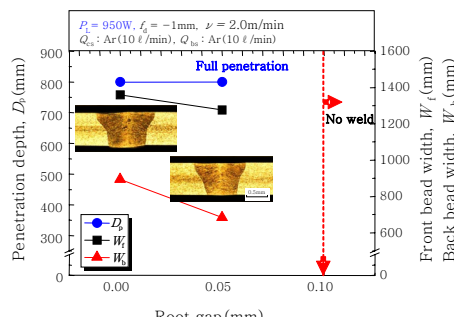
STS304의 경우에는 루트 갭 0.05mm에서 전면 비드에 약간의 언더컷이 발생하였고 0.1mm에서는 티타늄과 달리 접합이 되지 않았다.

3.2.3 단차에 따른 특성

단차를 달리하여 실험을 하였을 때 티타늄의 경우는 Fig. 5와 같이 0.6mm까지 험핑(humping)이나 용락



(a) Titanium



(b) STS304

Fig. 4 Penetration properties with root gap for butt welding

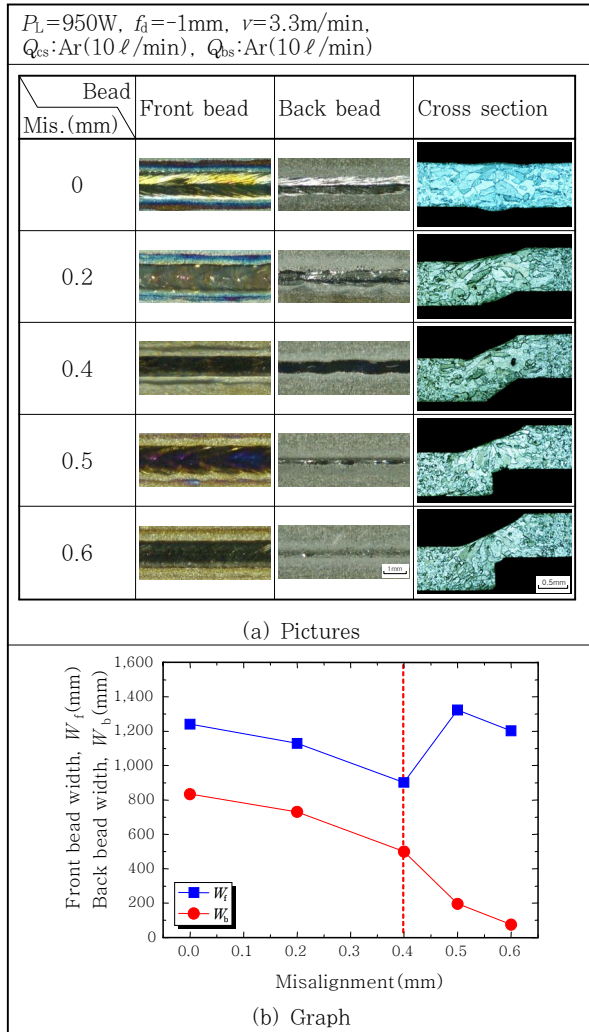


Fig. 5 Welding properties with misalignment for butt welding(Titanium)

이 없이 용접되었다. 단차 0.4mm까지는 전면 비드폭이 줄어들다가 종단면으로 보았을 때 개선의 이면이 용융되지 않은 0.5mm에서부터는 전면 비드폭이 오히려 증가하였다.

이에 반해 STS304의 경우에는 단차 0.3mm까지 전면 비드폭이 점차 증가하다가 0.4mm에서는 용락이 발생하여 티타늄보다 단차의 허용범위가 좁았다. 그 결과를 Fig. 6에 정리하여 나타낸다.

갭 및 단차가 커짐에 따른 용락의 유무는 모재 사이에서 용액이 중력에 의해 아래로 떨어지지 않고 형태를 얼마나 잘 유지하느냐와 관계가 있고 이것은 Table 3에 나타낸것과 같이 티타늄이 STS304 보다 액체 상태에서의 표면 장력이 크기 때문이다.

또한, 용접부의 종단면을 살펴보면 입열이 큰 STS304의 용접부가 티타늄의 용접부보다 오히려 조직이 미세하고 HAZ도 거의 눈에 띄지 않는다. 두 금속의 열전도도가 $16(W/m \cdot K)^9$ 로 같음에도 불구하고 이와 같

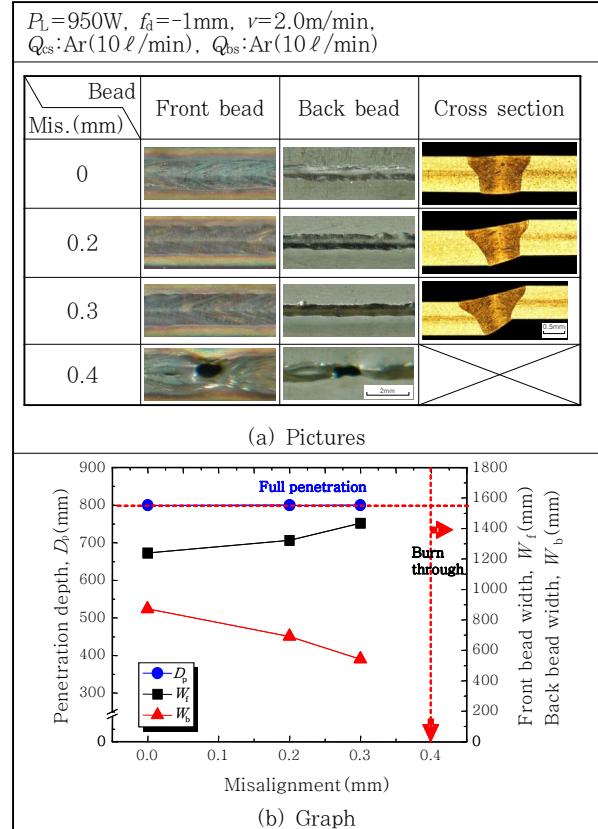


Fig. 6 Welding properties with misalignment for butt welding(STS304)

Table 3 The surface tension and viscosity of molten structural steel⁷⁾

Property	Surface tension (N/m)	Viscosity (MPa)
Material		
Structural steel	1.44	4.6
Titanium	1.65	5.2
Austenitic stainless steel	1.55	5.6

Table 4 Material absorptivity by laser wave length⁸⁾

Material	Absorptivity	
	1.06 μ m (Nd:YAG)	10.6 μ m (CO ₂)
Al	0.06	0.02
Fe	0.1	0.03
Ti	0.26	0.08
Carbon steel	0.09	0.03
Stainless steel	0.31	0.09

* Data are for room temperature

이 용접부 및 HAZ의 미세조직 크기에 차이가 나는 이유는 순금속과 합금의 차이로 STS304에서는 재용고시 핵으로 작용할 수 있는 불순물 원소가 많아 그것을 시

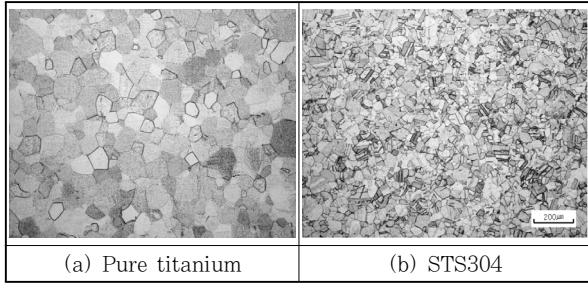


Fig. 7 Magnification photos for each base metal

작으로 조직이 성장하여 미세화된 것이고, 이에 반해 순티타늄은 핵으로 작용할 불순물 원소가 없어서 조대한 주상정이 형성된 것으로 판단된다.

티타늄과 STS304의 레이저 흡수성(Table 4 참조)과 용점, 열전도도 등을 고려할 때 STS304가 티타늄보다 용점도 100℃ 이상 낮고 Nd:YAG 레이저에 대한 흡수성도 더 좋아서 더 깊은 용입을 얻을 수 있을 것이라고 추정하였으나 실제 용접에서는 티타늄에서 더 깊은 용입을 얻었다. 이것은 Fig. 7에 나타낸 것과 같이 STS304가 티타늄보다 모재의 결정립이 더 미세하여 결정립의 전체 길이가 길고 경도가 높아 모재를 용융시키는데 더 많은 에너지를 필요로 하기 때문이며, 또한 용접시 발생하는 플라즈마에 의한 레이저의 산란 등에 의한 영향도 있다고 생각된다¹⁰⁾.

3.2.4 기계적 강도 평가

지금까지 용접한 티타늄 시험편의 기계적 강도를 평가하기 위하여 인장강도 시험과 에릭슨 커팅시험을 실

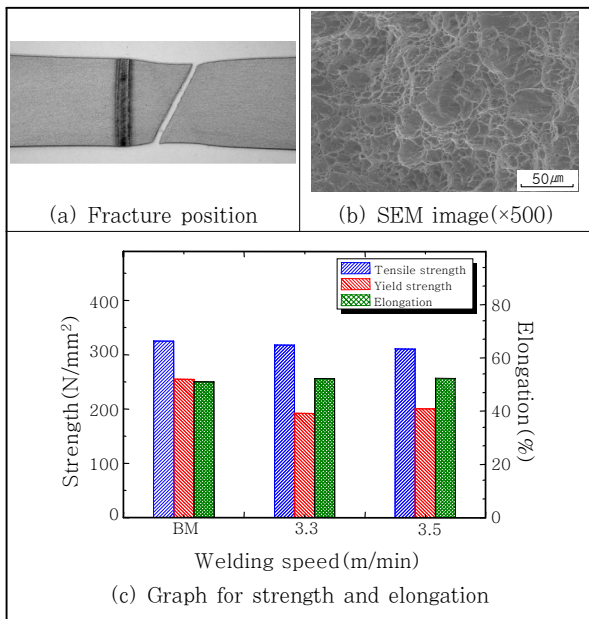


Fig. 8 Tensile strength test results of butt welds (Titanium) ($P_L=950W$, $f_d=-1mm$, $Q_{cs}:Ar(10\ell/min)$, $Q_{bs}:Ar(10\ell/min)$)

Conditions	Base metal	$v=3.3m/min$	$v=3.5m/min$
Pictures			
$IE_{21}(mm)$	10.92	10.8	10.67

Fig. 9 Erichsen cupping test results for titanium ($P_L=950W$, $f_d=-1mm$, $Q_{cs}:Ar(10\ell/min)$, $Q_{bs}:Ar(10\ell/min)$)

시하였다. 그 결과를 Fig. 8 및 Fig. 9에 각각 나타낸다.

용접속도 3.3과 3.5m/min에서 용접한 시험편 모두 인장시험시 모재에서 연성 파단되었다. 인장강도는 모재의 325MPa과 비슷하였고, 항복강도는 모재보다 50MPa 정도 작은 200Mpa을 나타내었으며 연신율은 모재와 비슷한 매우 우수한 특성을 나타내었다.

에릭슨 시험은 “금속 박판 및 강대의 에릭슨 커팅 시험 방법(KS B ISO 20482:2004)”에 따라 관통균열(through crack)이 발생할때 까지 동일 조건에서 3회 실시였다. 평균한 에릭슨 커팅 지수(IE21)는 모재와 비슷한 값을 나타내었다.

인장 및 에릭슨 시험을 통하여 기계적 강도가 매우 우수한 용접부임을 확인하였다.

4. 결 론

순티타늄과 STS304의 맞대기 용접에서 얻어진 결과를 정리하면 아래와 같다.

- 1) 용접시에 STS304가 순티타늄보다 높은 에너지를 필요로 하는데 그 이유는 모재의 결정립 크기가 작기 때문이다.
- 2) 순티타늄의 용접부 및 HAZ의 결정립이 STS304보다 더 큰 이유는 순금속이기 때문에 재응고시 핵으로 작용할 불순물 원소가 많지 않아 조대한 주상정이 생성되기 때문이다.
- 3) 두께 0.8mm 순티타늄의 맞대기 용접에서 950W, 3.3~3.5m/min의 조건에서 우수한 기계적 강도를 얻었다.

후 기

- 1) 본 연구는 산업자원부 지역산업기술개발사업(과제번호:10027454)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.
- 2) 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구 결과로 수행되었음 (“NIPA-2009-C1090-0903-0007”)

참 고 문 헌

1. C. Leyens and M. Peters : Titanium and Titanium Alloys, Fundamentals and applications, Wiley-VCH, 2003
2. 이용태, 김승언, 현용택, 정희원 : 꿈의 신소재 티타늄, 한국철강신문, 2003(in Korean)
3. 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)
4. Hiraga Hitoshi, Fukatsu Ken-ichi, Ogawa Kohsaku, Nakayama Mitsuru and Mutoh Yoshiharu : Nd:YAG Laser Welding of Pure Titanium to Stainless Steel, Journal of Japan Welding Society, **19-4**(2001), 717-726 (in Japanese)
5. B. Majumdar, R. Galun, A. Weisheit and B. L. Mordike : Formation of a Crack-Free Joint Between Ti Alloy and Al Alloy by Using a High-Power CO₂ Laser, Journal of Materials Science, **32**(1997), 6191-6200
6. 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 KWS, **27-5**(2009), 55-61 (in Korean)
7. Lida. T. and Guthrie R.I.L. : The Physical Properties of Liquid Metals, American Society for Metals(ASM), 1982
8. W. W. Duley : Laser Welding, A wiley-Interscience Publication, 1998
9. John A. Mountford : Titanium-properties, advantages and applications solving the corrosion problems in marine service, CORROSION 2002, NACE International, Paper #02170, 2002
10. A. Matsunawa, T. Ohnawa : Beam-Plume Interaction in Laser Materials Processing, Transactions of JWRI in Osaka University, **20-1**(1991), 15-39