

Nd:YAG 레이저를 이용한 순티타늄판의 겹치기 용접성

김중도† · 광명섭*

(원고접수일 : 2007년 12월 31일, 심사완료일 : 2008년 2월 27일)

Lab Weldability of Pure Titanium by Nd:YAG Laser

Jong-Do Kim† · Myung-Sub Kwak*

Abstract : Titanium and its alloys have excellent corrosion resistance, high strength to weight ratios and creep properties in high temperature, which make them using many various fields of application. Especially, pure titanium, which has outstanding resistance for the stress corrosion cracking, crevice corrosion, pitting and microbiologically influenced corrosion, brings out to the best material for the heat exchanger, ballast tank, desalination facilities, and so on. Responding to these needs, welding processes for titanium are also being used GTAW, GMAW, PAW, EBW, LBW, resistance welding and diffusion bonding, etc. However, titanium is very active and highly susceptible to embrittlement by oxygen, nitrogen, hydrogen and carbon at high temperature, so it needs to shield the weld metal from the air and these gases during welding by non-active gas. In this study, it was possible to get sound beads without humping and spatter with a decrease of peak power according to increase of pulse width, change of welding speed and overlap rate for heat input control, and shield conditions at pulsed laser welding of titanium plates for Lap welding.

Key words : Pure titanium(순티타늄), Laser welding(레이저용접), Pulse width(펄스폭), Heat input control(입열 제어), Overlap rate(중첩률)

1. 서 론

티타늄 및 티타늄합금은 내식성이 탁월하고 저탄성계수, 우수한 고온 크립특성(Creep property)^[1], 높은 비강도(강도/밀도)^[2] 및 비인성(인성/밀도)을 가지기 때문에 각종 화학 플랜트, 제트기 엔진 케이스, 자동차용 배기밸브, 군사용 방호설비 등의 우주항공, 자동차 및 군사설비 분야 등에 널리 사

용되고 있다. 또한 인체에 대하여 세포독성이 없고 생체친화성(Biocompatibility)이 좋으며 내마모성, 피로강도도 뛰어나기 때문에 임플란트, 인공관절 등의 의료분야에 이르기까지 그 사용 영역이 확대되고 있다. 특히 해수환경에서 응력부식균열(Stress Corrosion Cracking), 틈부식(Crevice Corrosion), 공식(Pitting) 및 미생물부식(Microbiologically Influenced Corrosion)

† 교신저자(한국해양대학교 기관시스템공학부), E-mail : jdkim@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4253

* 한국해양대학교 대학원

에 대한 저항성이 탁월하고, 성형성이 좋은 순티타늄⁽¹⁾은 열교환기, 벨러스트 탱크, 담수화설비 등의 제작에 최적의 재료로 부각되고 있다.

이러한 수요에 발맞추어 티타늄의 용접방법 또한 일반적으로 가장 많이 사용되는 TIG⁽³⁾에서부터 MIG, 플라즈마 아크, 전자빔, 레이저⁽⁴⁾, 저항용접 및 확산접합^{(5), (6)}에 이르기까지 다양하다. 그러나, 티타늄은 고온에서 부동태피막(TiO₂)이 깨어지면 대단히 활성화한 상태로 되어⁽⁷⁾ 대기 중의 산소, 질소, 수소 및 탄소 등의 침입형원소와 반응하여 쉽게 취화되므로⁽³⁾ 이들로부터 용접부를 보호하기 위하여 불활성가스인 헬륨(He), 아르곤(Ar) 등에 의한 실드가 필요하다.

본 연구에서는 고온, 고압 및 해수 환경에서 사용되는 LPG선의 LPG 재응축기 제작을 위하여 순티타늄판을 펄스 Nd:YAG 레이저로 용접하고 그 특성을 파악하고자 하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

실험에 사용한 티타늄은 불순물이 거의 함유되어 있지 않은 ASTM Grade 1의 순티타늄이며 그 화학조성을 Table 1에 나타낸다. 시험편은 가로 50mm, 세로 150mm, 두께 0.6 및 0.8mm의 판재를 사용하였으며 실제 제품에 적용될 두께 0.8mm 판 2장의 완전용입(full penetration) 용접부를 얻고 두께 및 갭(gap)에 의한 영향을 알아보고자 0.6mm의 판도 여러장 겹쳐 사용하였다. 시험편에 수분이 남아있을 경우, 용접 중 수소와 산소로 해리되어 용접부를 산화 및 취화시켜 기계적 성질을 저하시키므로 다른 금속재료보다 더욱더 엄격한 관리가 필요하다. 따라서 시험편은 아세톤과 메탄올을 사용하여 유분 및 수분을 완전히 제거하였다.

Table 1 Chemical composition of pure titanium

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

2.2 실험 장치 및 방법

본 실험에 사용한 레이저는 램프(lamp) 여기방식의 평균출력(E_a) 800W, 첨두출력(peak power) 20kW, 최대 펄스에너지 150J의 펄스 Nd:YAG 레이저이며 3축의 CNC와 연동한다. 시험편은 겹치기 용접하였으며 이 때의 주요 용접매개변수를 Table 2에, 그 셋팅 사진을 Fig. 1에 각각 나타낸다. 전면실드가스는 직경 5mm인 노즐에서 레이저빔과 동축으로 분사하고 이면실드가스는 지그의 흡을 통하여 공급하였으며 용접전에 3초간 프리퍼지(pre-purge)하여 라인내의 수분, 이물질 및 공기를 배제하였다. 용접된 시험편은 조건별로 각각 4개씩 샘플을 채취, 연마하여 광학현미경으로 용접부 단면을 관찰하고 용입깊이(D_p) 및 비드폭(W_b)을 계측하였으며, 마이크로 비커스경도계를 사용하여 상판과 하판의 비드표면에서 400 μ m 떨어진 지점으로부터 300 μ m간격으로 0.3kgf/cm²의 하중을 10초간 가하여 경도(hardness)를 측정하였다.

Table 2 Parameters for Lap welding

| Parameter | Value |
|-----------------------------|------------------|
| Defocused distance(f_d) | -3.0 ~ +3.0 |
| Pulse width(τ_p) | 1 ~ 6ms |
| Lamp voltage(V) | 200 ~ 300V |
| Welding speed(v) | 200 ~ 1400mm/min |
| Shield gas | Ar |

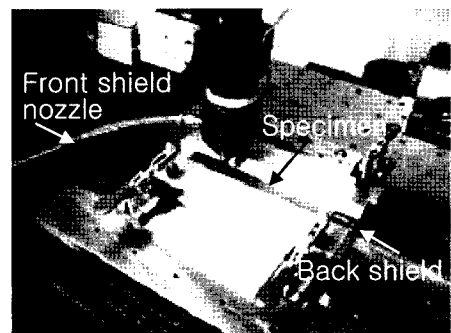


Fig. 1 Experimental setup for Lab welding

3. 실험결과 및 고찰

가장 적절한 용접조건이다.

3.1 초점거리에 따른 용접성

3.2 펄스폭 및 램프전압에 따른 용접성

초점거리(f_0)에 따른 용입깊이 및 비드폭의 변화를 알아보기 위하여 두께 0.8mm의 시험편을 3장 겹치고 펄스폭(τ_p) 5ms, 램프전압 200V, 펄스반복률(R_p) 50Hz, 용접속도(v) 600mm/min, 전면 실드가스유량(Q_{ts})은 아르곤 가스를 25 l/min으로 분사하여 시행하였다. 실드가스는 용접부의 산화를 방지하기 위하여 가능한 많은 양을 흘렸다. 이 때 비드 및 단면 사진은 Fig. 2(a)와 같으며 초점 변화에 따른 입열의 차이로 비드의 색깔이 변하는 것을 확인할 수 있다. 티타늄은 대기중에서 가열하면 산화 및 취화되며 그 정도에 따라 은백색, 황금색, 갈색, 청색, 자색, 회색으로 변하는 독특한 성질이 있다. 또한 300°C이하에서는 산화되지 않은 은백색을 나타낸다고 알려져 있다⁸⁾.

펄스레이저에 의한 가공에 큰 영향을 미치는 것은 침투출력과 펄스폭이나 침투출력은 펄스폭을 길게함에 따라 낮추는 것이 가능하고, 펄스폭의 변화에 따라 용융가공에서 제거가공에 이르기까지 다양한 프로세스가 가능하기 때문에 펄스폭이 가장 주된 가공인자라 할 수 있다. 펄스폭 및 램프전압의 변화에 따른 용입깊이의 변화를 알아보기 위하여 두께 0.6mm의 판을 4장 겹치고 초점에서 용접하였으며 램프전압이 220V일때의 대표적인 사진을 Fig. 3(a)에, 펄스폭 및 램프전압에 따른 비드폭과 용입깊이의 변화를 Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)에 각각 나타낸다.

Fig. 2(b)의 초점거리에 따른 용입깊이 및 비드폭의 그래프는 초점거리 -1~0에서 용입이 깊고 초점거리가 멀어질수록 용입깊이가 감소하는 비드천이(bead transition)를 나타내고 있다. 초점거리 -0.5에서 가장 용입이 깊으나 청색의 비교적 산화가 진행된 비드를 가지므로 황금색과 갈색으로 산화가 적게 진행되고 비드폭이 가장 좁은 초점이

펄스폭 1~3ms에서는 거의 모든 용접조건에서 험핑비드(humping bead), 스패터(splatter) 및 용락(burn through)이, 일부 용접부에서는 기공(porosity)이 발생하였는데 이는 높은 침투출력에 따른 용융금속의 폭발적인 증발에 의한 증발반력(evaporating reaction force)때문이라고 생각된다. 펄스폭 4ms 이상에서는 침투출력의 제어로 건전한 비드가 얻어지는 것을 확인 할 수 있다. 비드폭을 살펴보면 펄스폭 1~3ms에서는 험핑비

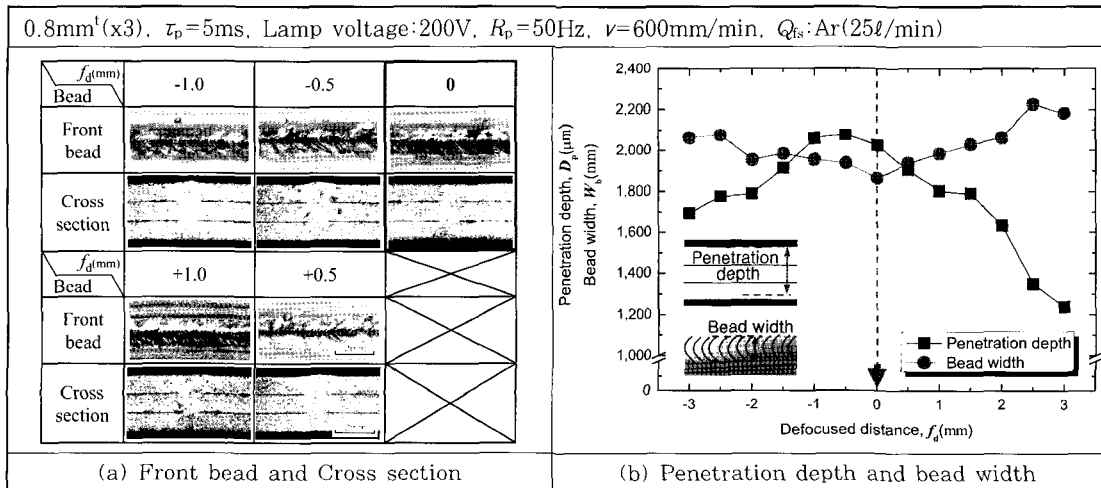


Fig. 2 The effect of a defocused distance on the weldability

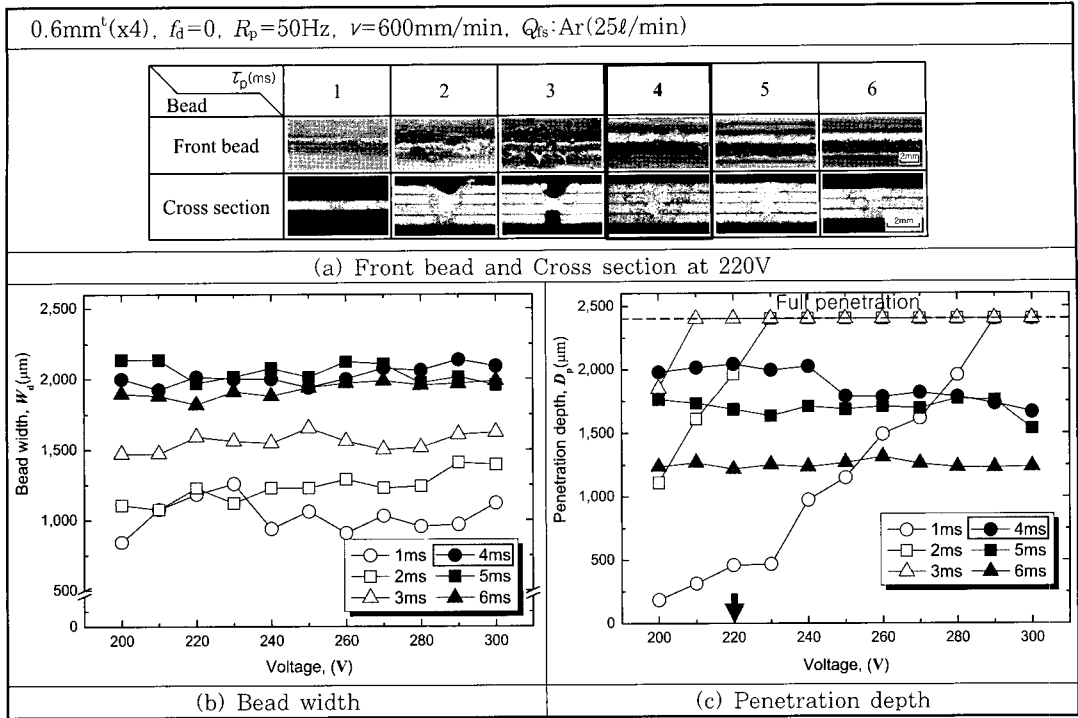


Fig. 3 The effect of a pulse width and lamp voltage on the weldability

드 및 용락에 의해 전체적으로 비드폭이 좁고 특히 1ms에서는 그 변화폭이 가장 크고 4ms이상에서는 비교적 편차가 작다.

펄스폭 1ms에서는 램프전압이 증가함에 따라 거의 선형적으로 용입깊이가 증가하다가 완전용입이 되고, 펄스폭이 2ms와 3ms로 증가함에 따라 점점 낮은 램프전압에서도 완전용입용접이 되고 있다. 펄스폭 4ms에서부터 큰 편차가 없는 일정한 값을 나타내었다. 따라서 용입깊이가 가장 깊고 비드폭이 좁으며 램프전압이 낮은 조건인 펄스폭 4ms, 램프전압 220V가 적절한 용접조건이다.

3.3 용접속도 및 중첩률에 따른 용접성

용접속도에 따른 용접성을 살펴보기 위해 펄스폭 및 램프전압을 고정하고 용접속도를 200~1,000mm/min으로 변화시켰을 때의 비드 및 단면 사진을 Fig. 4(a)에, 용입깊이 및 비드폭의 변화를 Fig. 4(b)에 각각 나타낸다. 모든 용접조건에서 완전용입용접이 되었으나 600mm/min에서

가장 건전한 용접부가 얻어졌고 이보다 느린 속도에서는 입열과잉으로 인해 조대한 조직 및 넓은 비드폭을 가지는 용접부가 얻어졌으며 이보다 빠른 속도에서는 입열저하에 따른 키홀(keyhole)의 불안정으로 인해 험핑비드 및 스파터가 발생하였다. 특히 200mm/min에서는 약 2.3mm의 매우 넓은 비드폭과 함께 모재가 휘는 변형도 발생하였다. 비드폭은 용접속도가 증가함에 따라 선형적으로 감소하고 있고 비드색갈도 청색에서 은백색으로 변하고 있다.

용접속도 800mm/min에서부터 험핑비드가 발생하는 것을 제어하기 위하여 중첩률(overlap rate, R_0)을 도입하였으며 그 계산식을 Eq. 1에 나타낸다⁽⁹⁾.

$$R_0 = \left(1 - \frac{v}{d \times R_p \times 60}\right) \times 100 (\%) \dots \text{Eq. 1}$$

여기에서, v 는 용접속도(mm/min), d 는 빔스폿 직경(mm), R_p 는 펄스반복률(Hz)이다.

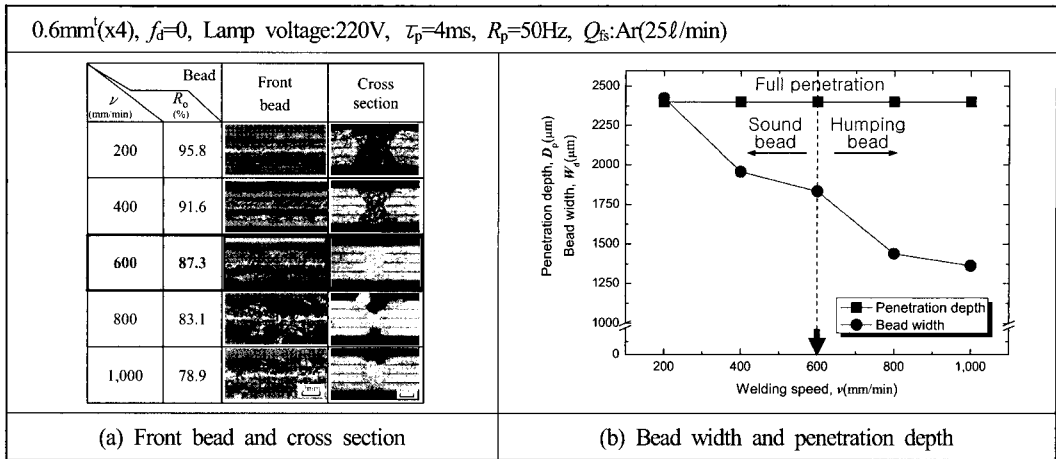


Fig. 4 The effect of a welding speed on the weldability

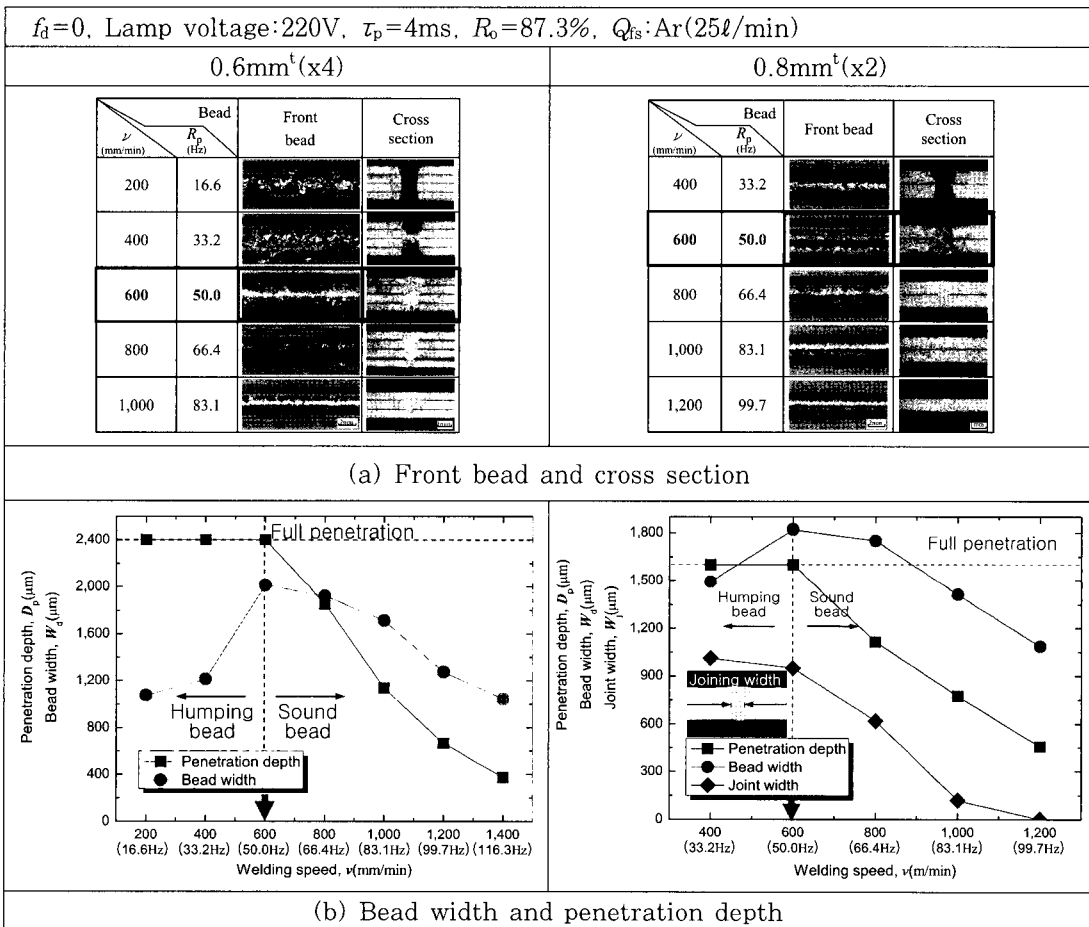


Fig. 5 The effect of the overlap rate on the weldability

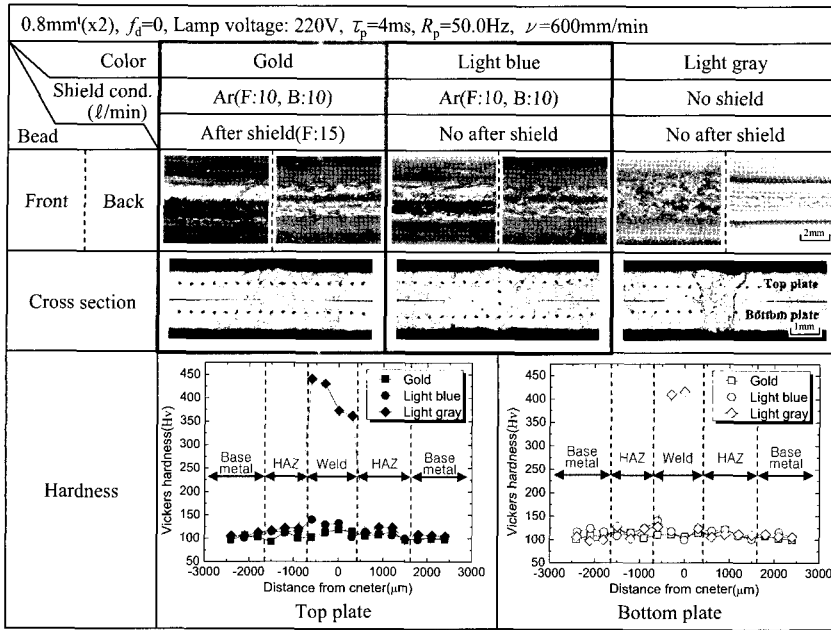


Fig. 6 Hardness distributions with shield conditions

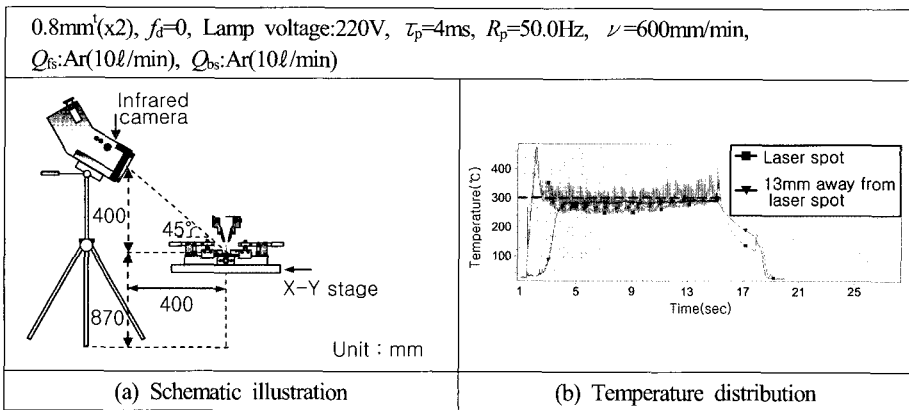


Fig. 7 Real time temperature measurement with an infrared camera

스패터가 중첩률 83.1%에서부터 발생하였으므로 중첩률을 87.3%로 고정하고 용접속도와 펄스반복률을 변화시켰으며 대표적인 비드 및 단면사진을 Fig. 5(a)에, 용입깊이 및 비드폭의 변화를 Fig. 5(b)에 나타낸다. 두께 0.6mm의 판을 4장 겹쳤을 때와 0.8mm의 판을 2장 겹쳤을 때 모두 용접속도 600mm/min에서 완전용입용접된 건전한 용접부를 얻었고 이보다 느린 속도에서는 입열과잉으로 험핑 및 용락이 발생하였으며 이보다 빠른 속도

에서는 입열부족으로 용입깊이 및 비드폭이 감소하고 있다. 그러나 800mm/min이상의 속도에서 험핑 및 스패터는 발생하지 않았다.

실제품에 적용될 두께 0.8mm 판의 경우 겹치기 용접에서 용접강도를 결정하는 접합폭(joining width)을 추가적으로 측정하였으며 입열량의 감소에 따라 그 폭이 선형적으로 감소하고 있다.

동일 레이저 조사조건에서 두께 0.8mm를 2장 겹쳐 용접한 것이 0.6mm를 4장 겹쳤을 경우 보다 용

입이 더 깊지않고 0.6mm에서와 비슷한 경향을 나타내는 것은 두께 및 갭에 의한 영향이라고 생각된다.

3.4 실드조건에 따른 용접성

실드조건 및 비드색깔변화에 따른 용접성을 평가하기 위해 경도를 측정하였고 그 결과를 Fig. 6에 나타낸다.

전면 및 이면 실드를 하지 않았을 경우, 완전히 산화된 회색의 비드를 얻었다. 전면실드유량을 변화시켰을 때, 10 l/min에서부터 열린 청색의 비교적 산화가 적게된 비드가 얻어졌으며 유량이 증가함에 따라 색깔의 변화는 없고 용액의 밀림에 의해 언더필(underfill)이 발생하였으므로 10 l/min이 적정 실드량으로 생각된다. 이면실드가스량(Q_{bs})의 경우, 5 l/min에서부터 은백색의 산화가 완전히 방지된 비드가 얻어졌고 유량의 증가에도 색깔의 변화는 없었으나, 이 경우 유량이 너무 적어 외부공기유입이 염려되므로 10 l/min이 적절하다고 판단되며 전면비드에 비해 가스 유량이 적음에도 불구하고 완전히 산화가 방지된것은 입열이 전면비드보다 적기 때문이다. 실드노즐을 추가로 설치하여 레이저 조사지점에 후방실드를 한 경우 15 l/min에서 산화가 거의 방지된 황금색의 비드를 얻었다.

이 때의 경도 측정결과, 모재가 100~105Hv, 열영향부가 110~115Hv, 용접부에서는 회색일 경우 최대 441Hv, 열린 청색의 경우 최대 140Hv, 황금색의 경우 최대 121Hv였으며 열린 청색과 황금색의 경우 큰 차이가 나지 않았고 전체적으로 상판과 하판의 경도차 또한 크지 않았다. 따라서 황금색과 청색의 비드를 가지는 용접부는 비교적 산화가 적게 되어 취성이 크지않은 건전한 용접부이며 이는 일본용접협회에서 티타늄의 TIG용접시 적용하고 있는 용접품질 기준에 만족하며 이 기준을 레이저에도 그대로 사용할 수 있음을 나타낸다^[1].

3.5 최적 실드범위 지정

필요에 따라서 산화가 완전히 방지된 보다 신뢰성 있는 은백색의 용접부를 얻기 위해서는 300℃

이하의 온도까지 용접부를 실드하여야 하며, 그 범위를 정하기 위하여 동축 및 이면 실드로 아르곤 가스를 사용하여 각각 10 l/min로 용접시 비드의 온도를 적외선카메라를 이용하여 실시간으로 측정 한 결과를 Fig. 7에 나타낸다.

레이저 조사지점에서 300℃까지 온도가 떨어지는 지점이 13mm이었으므로 레이저 조사지점에서 13mm까지 후방실드를 하면 은백색의 용접비드를 얻을 수 있을것으로 판단된다.

4. 결 론

두께 0.6 및 0.8mm의 순티타늄판을 펄스레이저를 사용하여 접치기용접 하였으며 용접 가공변수에 따른 비드색깔, 용입깊이, 비드폭의 변화 및 경도 측정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초점거리(f_d) 0 에서 비드폭이 가장 좁고 산화가 비교적 적게된 건전한 갈색의 비드를 얻었다.
- 2) 펄스폭(τ_p)의 증가에 따른 침투출력의 감소로 펄스폭 4ms에서 험핑비드, 스패터 및 기공이 없는 건전한 용접부를 얻었으며 펄스폭이 용접매개변수 중 가장 지배적인 인자임을 확인하였다.
- 3) 중첩률(R_o)을 87.3%로 하였을 때 용접속도(v)에 상관없이 결함이 없는 미려한 용접비드를 얻었다.
- 4) 아르곤을 실드가스로 사용하여 전면실드를 10 l/min로 하였을때 열린 청색의 언더필이 발생하지 않은 건전한 비드를 얻었고 이면실드의 경우에는 5 l/min에서부터 은백색의 산화가 되지않은 건전한 용접부를 얻었으나 주위공기 유입에 의한 산화를 완전히 배제하기 위해 10 l/min으로 용접부를 실드하여 최적의 결과를 얻었다.
- 5) 레이저 조사지점에서 13mm 떨어진 부분의 비드 표면 온도가 300℃ 이었기 때문에 이 영역까지만 실드해 주면 은백색의 건전한 용접부를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지역산업기술개발사업과

제번호:10027454)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 이용태, 김승언, 현용택, 정희원, 꿈의 신소재 타타늄, 한국철강신문, 2003.
- [2] S. Lathabai, B. L. Jarvis and K. J. Barton, "Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium", Materials Science and Engineering A299, pp. 81-93, 2001.
- [3] 藤井 信之, 福原 祥雅, 日向 輝彦, 安田 克彦, "純チタン材の熔融特性と溶接施工條件の検討 - 純チタン材の溶接と継手性能 (第1報)-", 溶接學會論文集, 第20卷, 第1号, pp. 20-25, 2002.
- [4] 篠田 剛, 松永 憲一, 新原 基衛, "チタン合金のレーザー溶接", 輕金屬溶接, 第28卷, 第2号, pp. 49~56, 1990.
- [5] 大橋 修, 穎娃 一夫, 入江 宏定, "SUS304Lステンレス鋼とチタンとの擴散接合", 溶接學會論文集, 第13卷, 第3号, pp. 390-394, 1995.
- [6] 瀬戸佐智生, 大脇 桂, 小口 徹, 入澤 敏夫, "異種金屬の短時間擴散接合に関する研究, 溶接學會論文集", 第10卷, 第2号, pp. 246-251, 1992.
- [7] 김주우, 유정희, 이규복, 이오연, "순Ti 및 Ti-6Al-4V합금의 기계적 성질에 미치는 용접 조건의 영향", 대한용접학회 특별강연 및 학술 발표대회 개요집 1998년, 제2권, pp. 228-230, 1998.
- [8] チタニウム協會, チタンの加工技術, 日刊工業新聞, 1992.
- [9] 朝比奈敏勝, 時末 光, 伊藤久敬, 田口成一, "マグネシウム合金パルスレーザー溶接部の諸性質", 日本大學生産工學部研究報告A, 第38卷, 第2号, pp. 1-9, 2005.

저 자 소 개



김종도 (金鍾道)

1963년 1월생, 1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1993~1997년 일본오사카대학 생산가공공학과 응용고온공학코스(공학석사 및 공학박사), 2003년 1월~현재, 대한용접학회 사업이사겸 고에너지연구위원회 위원장, 2004년 1월~한국레이저가공학회 운영이사, 1998년 3월~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, 당학회 편집이사, 관심분야: 레이저용접, 가공현상의 고분해능 계측과 실시간 해석



광명섭 (郭明燮)

1980년 3월생, 2003년 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업, 2006년 한국해양대학교 기관시스템공학과 재료전공(공학석사), 2006년~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학과 석사과정, 관심분야: 레이저용접, 용접야금학