

Ti-6Al-4V 합금의 전자빔 및 레이저용접 특성

안영남·김철희

Yb:YAG Laser and Electron Beam Welding of Ti-6Al-4V Alloy

Young-Nam Ahn and Cheolhee Kim

1. 서 론

Ti합금은 경금속이나 비강도가 높고 우수한 내식성을 가지고 있어 각종 플랜트, 항공기부품재료 등 다양한 산업에 이용되고 있다. 그러나 Ti합금은 상온에서 안정된 산화피막에 의해 부식이 방지되지만 600°C이상의 고온에서는 반응성이 매우 높아 산화 및 용접부 내 기공 등의 문제가 발생한다¹⁾.

Ti합금의 용접에는 GTAW, GMAW 및 플라즈마용접과 같은 아크용접기법과 전자빔 용접 및 레이저용접과 같은 고밀도에너지용접기법들이 이용된다. 아크용접에 비해 고밀도에너지 용접기법은 깊은 용입과 좁은 비드 형성이 가능하여 용접변형을 줄이면서도 높은 용접강도를 얻을 수 있다²⁾.

전자빔용접은 진공에서 작업이 이루어지므로 Ti합금에 적용 시 산화를 방지하지만 생산성이 낮은 단점으로 인해 대기중 작업이 가능한 레이저용접으로 전자빔 용접을 대체하려는 연구가 수행되어왔다²⁻⁶⁾.

본 기술보고에서는 Ti합금 중 $\alpha+\beta$ 형 합금으로 용접성과 성형성이 양호한 Ti-6Al-4V합금에 전자빔용접과 Yb:YAG 레이저용접을 적용하여 맞대기 및 겹치기 용접을 수행하고 용접부의 특성을 평가한 결과를 소개하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 소재는 Ti-6Al-4V합금이며 그 기계적 특성과 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다. 시편의 길이, 너비, 두께는 각각 120mm, 100mm 및 2mm이며 맞대기 및 겹치기용접에서는 길이방향으로 120mm 모두 용접을 수행하였다. 맞대기용접에서는 접합면을 기계가공 하였으며, 겹치기용접에서는 너비 방향의 겹침길이는 25mm이다.

레이저용접은 Fig. 1과 같이 6축으로 구성된 용접로

봇 및 4kW급 Yb:YAG disk레이저를 이용하여 구현하였다. 산화방지를 위하여 표면과 이면에 각각 아르곤 보호가스를 20 l/min의 유량으로 공급하였다. 레이저 빔은 200 μ m의 광파이버를 통해 전송되어 초점거리 220mm의 광학계를 통해 모재에 조사되었으며 이 때 빔의 최소 직경은 0.22mm로 측정되었다. 레이저는 모재에 수직으로 조사되었으며 겹치기 용접에서는 계면에서의 비드폭이 전단인장강도에 주는 영향이 크기 때문에 비드폭을 상대적으로 넓게 확보하기 위해 초점위치를 조정하였다. 계면 비드폭 및 레이저초점위치의 정의는 Fig. 2에 나타낸다.

Fig. 3은 실험에 사용된 전자빔장비 및 진공챔버를 보여주고 있다. 진공분위기에서 용접을 수행하였으며 장비의 최대 가속전압은 150kV이며 빔 전류의 범위는 0~100mA이다.

Table 1 Property of Ti-6Al-4V alloy used

Mechanical Property	Y.S. (MPa)			T.S. (MPa)			EL(%)	
	1,000			1,020			11	
Chemical Composition (wt%)	N	C	H	Fe	O	Al	V	Ti
	0.008	0.02	0.0012	0.11	0.12	5.98	4.02	Bal.

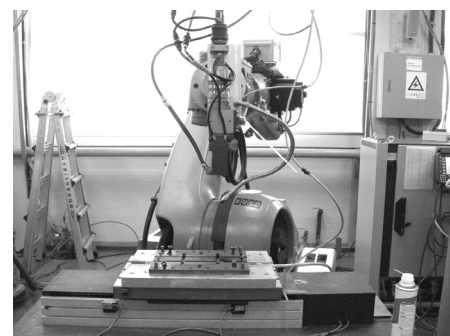


Fig. 1 Laser welding system used

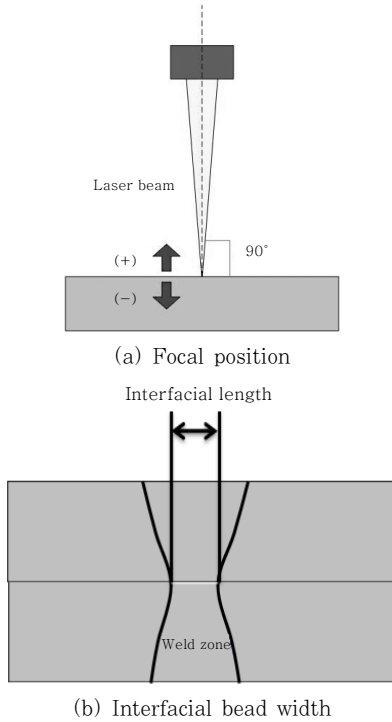


Fig. 2 Definition of focal position and interfacial bead width



Fig. 3 Electron beam welding system used

맞대기 및 겹치기 용접을 수행한 후 용접부를 비교, 분석하기 위해 용접비드외관, 단면분석 및 비커스 경도 시험을 수행하였다. 용접강도는 맞대기용접부의 경우 KS B 0801:2007 “금속재료 인장시험편”을 참고하여 인장시험을 수행하였으며, 겹치기용접부의 경우 시험의 크기는 너비 20mm, 길이 170mm 및 두께 2.0mm로 ASME Sec. IX, QW-197.1.2를 참고하여 전단인장 시험을 수행하였다.

3. 실험결과

3.1 맞대기용접 결과

레이저용접에 대한 맞대기용접조건을 Table 2에 나타내었고 전자빔용접에 대한 조건은 Table 3에 나타낸다. 두 공정에서 백비드가 형성되는 조건을 선정하고 입열량을 조절하여 실험을 진행하였다. 레이저용접에서

Table 2 Laser butt welding conditions

No.	Laser power (kW)	Welding speed (m/min)	Focal position (mm)	Shielding gas flow rate (l/min)
B1	3.0	2.0	+6	20
B2	3.0	3.0	+6	
B3	3.0	4.0	+6	

Table 3 Electron beam butt welding conditions

No.	Electron beam power (kV)	Current (mA)	Welding speed (m/min)	Focal position (mm)
B4	150	6.2	0.55	-60
B5	150	6.2	0.60	-60
B6	150	6.2	0.70	-60

노즐을 이용한 충분한 섀딩으로 표면비드와 이면비드에 대해 건전한 비드를 얻을 수가 있었으며 단면상 기공은 발견되지 않았다. 전자빔용접의 경우 진공중에서 용접이 이루어지기 때문에 레이저공정에서와 같은 보호가스 공급 없이 건전한 비드를 얻을 수 있었으며 단면상 기공은 발견되지 않았다. 두 공정에 대한 표면비드, 이면비드 및 단면사진을 Fig. 4, 5에 나타낸다.

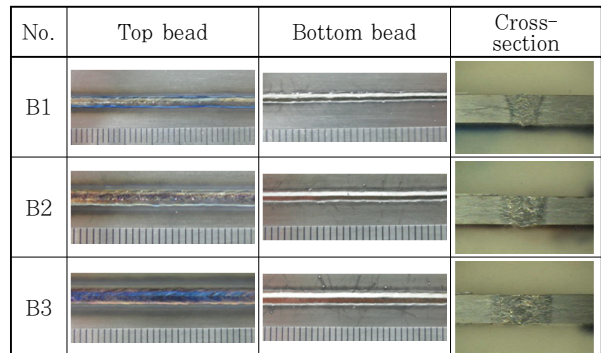


Fig. 4 Bead shapes for laser butt welding

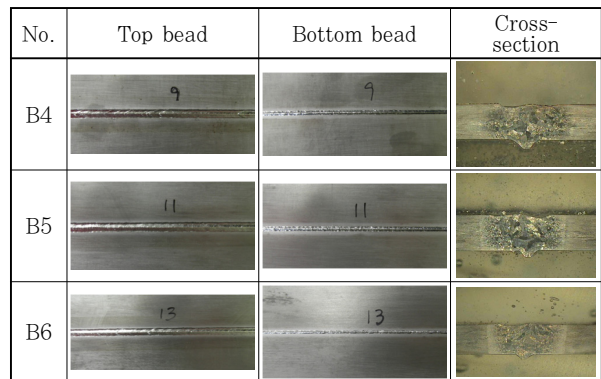
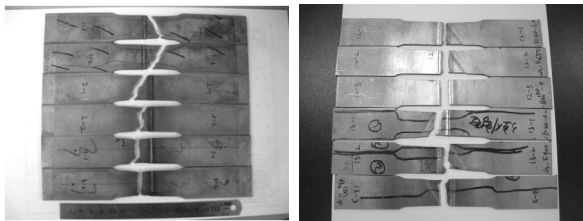


Fig. 5 Bead shapes for Electron beam butt welding

Table 4 Results of tensile strength in laser welding and electron beam welding

No.	Tensile strength (MPa)	Note
B1	1,036	Laser
B2	1,018	
B3	1,028	
B4	1,008	
B5	1,014	Electron beam
B6	1,012	



(a) Laser (b) Electron beam

Fig. 6 Fractured specimens after tensile test

두 공정에 대한 인장시험 결과를 Table 4에 나타낸다. 인장시험의 시험 속도는 분당 5mm의 속도로 인장시험을 진행하였다. 같은 조건에서 각각 2번의 시험을 하였으며 입열이 많고 적음에 관계없이 모든 조건에서 모재에서 파단이 되는 것을 확인할 수 있었으며 그 결과를 Fig. 6에 나타낸다.

3.2 겹치기용접 결과

실험에 사용한 레이저 겹치기용접조건을 Table 5에 나타내고, 전자빔 겹치기용접조건은 Table 6에 나타낸다. 두 공정 모두 완전용입을 기준으로 용접조건을 선정하였으며 계면의 비드 폭을 증가시키기 위하여 초점 위치를 모재표면에서 레이저조사 반대방향으로 설정하

Table 5 Laser overlap welding conditions

No.	Laser power (kW)	Welding speed (m/min)	Focal position (mm)	Shielding gas flow rate (l/min)
L1	3.5	1.2	-6	20
L2	3.5	1.3	-6	
L3	3.5	1.4	-6	
L4	4.0	0.8	-9	
L5	4.0	0.9	-9	
L6	4.0	1.0	-9	

Table 6 Electron beam overlap welding conditions

No.	Electron beam power (kV)	Current (mA)	Welding speed (mm/min)	Focal position (mm)
L7	120	15	0.60	-65
L8	120	15	0.63	-65
L9	120	15	0.65	-65
L10	120	15	0.68	-65
L11	120	15	0.70	-65
L12	120	15	0.73	-65

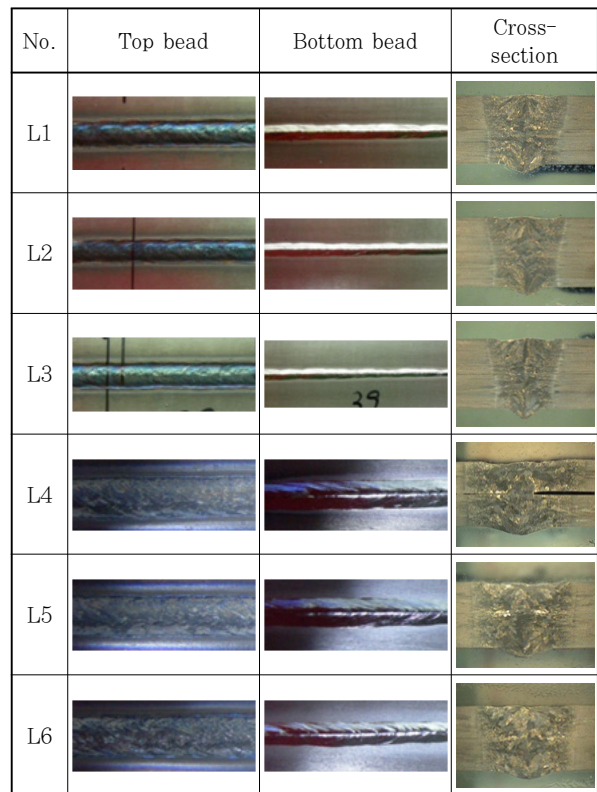


Fig. 7 Bead shapes for laser overlap welding

여 실험을 진행하였다. Fig. 7은 레이저 오버랩용접의 표면과 이면비드, 단면사진을 보여주는데 일부 조건에서 입열이 과해지거나 보호가스가 불충분할 경우 산화로 인해 변색이 일부 확인되었다. 백비드의 경우 충분한 아르곤 실딩으로 인하여 건전한 비드를 얻을 수가 있었으며 기공을 확인하고자 단면분석을 하였는데 일부 변색에도 불구하고 기공은 관찰되지 않았다. 그 이유는 디포커싱으로 인해 백비드의 폭이 충분히 넓기 때문에 금속증기의 배출이 용이하여 기공이 발견되지 않은 것으로 생각된다. 전자빔 오버랩용접의 표면과 이면비드, 단면사진을 Fig. 8에 나타낸다. 진공 중에 용접이 이루어지는 전자빔의 경우 입열에 관계없이 산화가 발생되

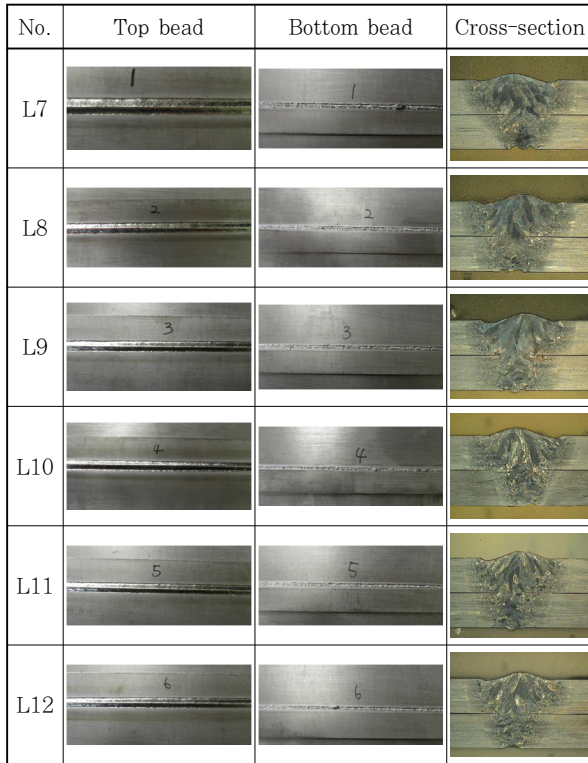


Fig. 8 Bead shapes for electron beam overlap welding

지 않는 미려한 비드를 얻을 수가 있었으며 단면상 기공은 발견되지 않았다.

두 공정에 대한 계면 비드폭과 20mm 너비 시험편에 대한 전단인장하중을 Table 7에 나타낸다. 계면길이의 길이가 짧을 경우 전단인장하중 값이 다소 낮은 경향을 보이고 있으며, 계면의 길이가 증가함에 따라 하중 값도 함께 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9는 계면

Table 7 Measured shear-tensile strength and interfacial length

No.	Shear strength (N)	Interfacial bead width (mm)	Fracture position	Note
L1	16,056	1.4	Interface	Laser
L2	15,567	1.3		
L3	15,462	1.2		
L4	19,892	1.6		
L5	17,398	1.5		
L6	16,940	1.5		
L7	20,704	2.0	Interface	Electron beam
L8	20,468	1.9		
L9	20,416	1.8		
L10	20,817	1.8		
L11	18,704	1.7		
L12	18,635	1.7		

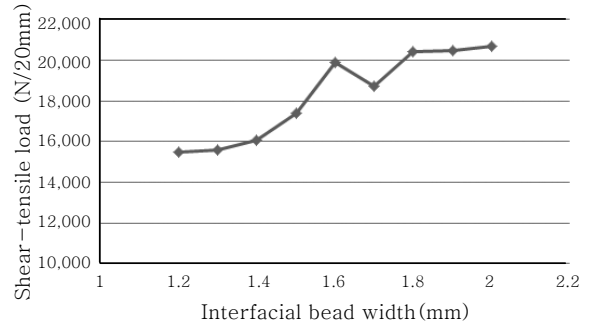
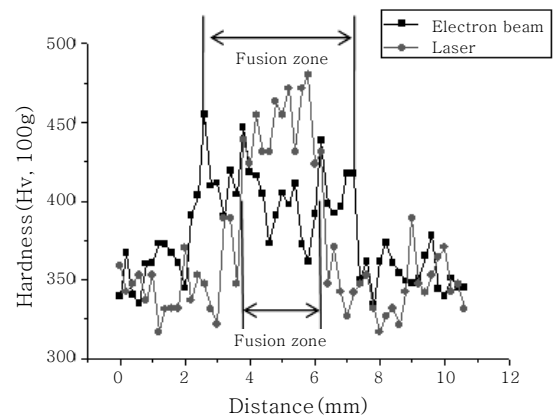


Fig. 9 Relationship between interfacial bead width and shear-tensile load

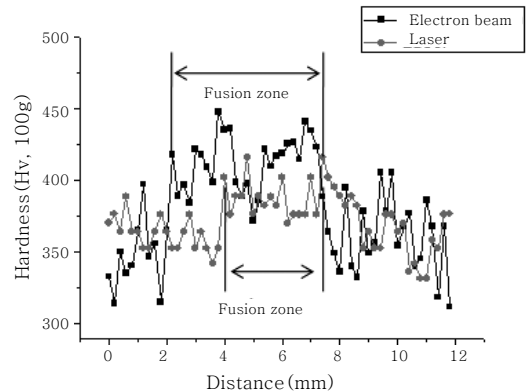
비드폭에 따른 전단인장하중의 경향을 보여준다. 전단인장시험결과 계면파단이 발생하였는데 이는 용접부의 강도가 충분하기 때문에 용접부의 강도저하가 아니라 순수 전단모드 파단에 유사한 파단이 발생하는 것이 계면파단의 원인으로 판단된다.

3.3 경도측정 결과

Fig. 10는 두 공정에 대한 형상 별 비커스경도 결과



(a) Butt joint



(b) Overlap joint

Fig. 10 Vickers hardness distribution

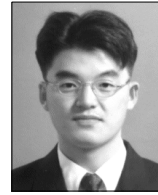
를 보여준다. 모재의 평균 경도 값은 약 320~370Hv, 오버랩 용접부는 약 380~440Hv, 맞대기 용접부는 약 420~470Hv 로 용접부가 모재에 비해 더 경한 특성을 보여준다. 맞대기 형상보다 오버랩 형상의 용접부가 입열량이 더 많기 때문에 용접부의 경도 값이 다소 낮은 경향을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 실험은 산화에 매우 취약한 소재인 Ti 합금에 대하여 전자빔공정 및 고휘도 레이저공정을 적용하여 용접성을 평가하였다. 진공에서 용접이 이루어지는 전자빔용접이 레이저용접보다 산화 측면에서는 더 유리하였으나, 적절히 보호가스를 공급할 경우 레이저 용접에서도 산화방지가 가능하였다. 고휘도 레이저 용접시험편의 기계적 특성도 전자빔공정의 수준과 동등하게 나왔으며 Ti 합금에 대해 대기중 작업이 가능한 레이저용접공정의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.



- 안영남
- 1982년생
- 한국생산기술연구원 용접·접합연구그룹
- 용접시공 및 공정최적화
- e-mail : welding@kitech.re.kr



- 김철희
- 1973년생
- 한국생산기술연구원 용접·접합연구그룹
- 용접공정해석 및 자동화
- e-mail: chkim@kitech.re.kr

후 기

본 연구의 전자빔 용접실험을 도와주신 RIST 김숙환 박사님과 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 대한용접학회편: 용접·접합편람, 1998, 278-280 (in Korean)
2. ASM International: ASM Handbook - Vol. 6: Welding, Brazing and Soldering, 1993, 783-786
3. J. Mazumder and W. M. Steen: Welding of Ti-6Al-4V by a Continuous Wave CO₂ Laser, Metal Construction, **12-9** (1980), 423-427
4. J. Mazumder and W. M. Steen: Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded Titanium 6Al-4V, Metallurgical Transactions A, **31A-5** (1982), 865-871
5. P. E. Denney and E. A. Metzbowser: Laser Beam Welding of Titanium, Welding Journal, **68-8** (1989), 342s-346s
6. J. P. Bergmann: Mechanical Behaviour of Overlap Joint of Titanium, Science and Technology of Welding and Joining, **10-1** (2005), 50-60