용접 후열처리에 따른 Ti-6Al-4V 합금의 레이저 용접부 미세조직과 인장특성

변 율* · 이상원* · 박찬희* · 엄종택* · 강남현** · 홍재근*,†

*한국기계연구원 부설 재료연구소 타이타늄연구실

**부산대학교 재료공학과

The Effects of PWHT on Tensile Properties and Microstructures for Laser Welds of Ti-6Al-4V Alloys

Yool Byun*, Sangwon Lee*, Chanhee Park*, Jongtaek Yeom*,
Namhyun Kang**, and JaeKeun Hong*,†

*Titanium Department, Korean Institute of Materials Science, Changwon, 51508, Korea

**Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

†Corresponding author : jkhong@kims.re.kr

(Received July 14, 2017 ; Revised July 28, 2017 ; Accepted August 8, 2017)

Abstract

The annealing condition dependence on the weldability of Ti-6Al-4V ELI alloy was studied by means of the tensile test, hardness and microstructure analysis. The Ti-6Al-4V ELI plate with 1 mm plates were joined by the fiber laser welding under 2 kw laser power and 100 mm/s welding speed condition. Various PWHT (Post-weld heat treatment) conditions were used to improve the formability of the welded titanium alloy. The results showed the solution treatment for the PWHT contributes on the homogeneous strength distribution from fusion zone to base material. This PWHT conditions were expected to minimize the degradation of the formability caused by the welding.

Key Words : Fiber Laser welding, Ti-6Al-4V ELI, Titanium weldments, Weldability, PWHT

1. 서 론

타이타늄은 높은 비강도와 우수한 내식성, 생체적합성 등으로 우주항공, 바이오, 해양플랜트, 자동차, 발전기 터빈 등 다양한 산업분야에서 사용량이 증가하고 있다¹⁾. Ti-6Al-4V (ASTM Gr.5) 합금은 우수한 강도, 가공성 및 용접성으로 타이타늄 합금 중 가장 많은 분야에 적용되는 대표적인 $\alpha+\beta$ 형 타이타늄 합금이다. 특히, Ti-6Al-4V ELI (Extra Low Interstitial, ASTM Gr.23) 합금은 Gr.5에 비해 침입형원소 (O,C,N)와 Fe 함량이 낮아서, 약간의 강도저하가 있으나 우수한 파괴인성, 피로특성을 나타내어 항공 부품 및 정형외과용 임

플란트 등에 적용되고 있다^{2,3)}.

타이타늄 합금을 다양한 산업분야 부품제조에 적용하기 위해서는 동종 및 이종 재료간의 용접기술이 필수적으로 요구된다. 타이타늄은 고온(673K 이상)에서 산소와 반응성이 크기 때문에⁴⁾ 타이타늄 용접에서 건전한 용접부를 얻기 위해서는 용융지(weld pool)와 열영향부(HAZ)를 실딩(shielding)할 방법과 장치가 매우 중요하다⁵⁾. 따라서 타이타늄 용접에서는 실딩가스로 아르곤 및 헬륨을 사용하고, 용접토치 노즐부에서의 1차 실딩(용융부,HAZ), 용접이 완료된 용융 후 냉각되는 용접부의 2차 실딩(trailing shield) 및 후면 실딩(backup shielding)의 3가지 용접부 차폐기술이 요구된다⁶⁾.

레이저용접은 고밀도 에너지 용접으로 열변형과 입열량이 적고 정밀용접이 가능하여 타이타늄 부품용접에 각광을 받고 있다. 특히, 아크용접에 비해 좁은 비드폭을 형성하여 용융지(Weld pool)와 열영향부의 면적이 줄어들게 되고, 산소와의 접촉면적을 줄일 수 있다⁷⁾.

따라서, 본 연구에서 파이버 레이저를 이용하여 Ti-6Al-4V ELI 합금 용접 시 초기 원소재 미세조직이 최종 용접부 강도 및 경도에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 또한, 용접후열처리 (PWHT) 조건에 따른 용접부 기계적 특성 및 미세조직 제어를 위하여 응력제거열처리(SRA, Stress relief annealing)와 용체화처리+시효열처리(STA, Solution heat treatment followed by aging)를 실시하였다. 응력제거열처리는 용접부를 530℃에서 4시간 유지 후 공냉(Aging)시키는 것으로 잔류응력 제거를 목적으로 실시하며, STA는 Solution과 aging을 하여 미세조직을 제어를 위해 실시한다^{8,9)}. 용접후열처리 후 미세조직 및 경도분석을 통해 최적 용접후열처리 조건을 도출하고자 하였다.

2. 사용 재료

본 연구에 사용된 사용된 재료는 Ti-6Al-4V ELI 1mm 판재로 그 조성을 Table 1에 나타내었다. Ti-6Al-4V ELI 합금은 ASTM B265을 만족하도록 설계 및 제조되었으며, VAR(vacuum arc remelting)을 통해 대형 잉곳을 제작하였다. 이후 $\alpha + \beta$ 영역에서 단조 공정을

을 통해 주조 조직을 파괴하였다. 이후 열처리 공정은 Fig. 1(a) 과 같이 진행하였다. 모재의 미세조직 차이에 따른 용접부의 강도를 비교하기 위해서, 먼저 787℃에서 6시간 열처리 후 공랭 하였고(Mill), 925℃에서 1시간 유지 후 수냉(Solution), 530℃에서 4시간 후 공랭(Aging)하였다. 용접 전 각 열처리(Mill 과 Solution)된 2종의 시편을 준비하여 용접후열처리를 Fig. 1(b) 과 같이 진행하였다. 본 연구에서 실험한 6 종류의 시편을 Table 2에 순서대로 나타내었다. 모재 열처리 조건은 Fig. 1(a), 용접후열처리 조건은 Fig. 1(b)와 같으며, 모든 열처리 조건은 Table 2에서의 조건으로 설명하였다.

3. 실험 방법

Laser 용접은 CW 5kW Fiber Laser 장비에서 2 kW, 100 mm/s 조건으로 용접하였고, Ar 가스를 용접 비드 정면, 후면에 직접 분사하며 모두 BOP(Bead on plate) 용접하였다.

광학현미경(Olympus GX-51)을 통해 원소재 미세조직 및 용접부 미세조직을 촬영 하였다. 조직 분석을 위하여 Kroll 용액($H_2O : HNO_3 : HF = 96 : 2 : 2$)와 Keller 용액($H_2O : HCl : HNO_3, HF = 95 : 1.5 : 2.5 : 1$)으로 에칭하였다. 인장시험은 ASTM E-8의 시편규격(Width 6mm, Gauge lengths 25mm)으로 용접부는 Gauge length 중간 부분에 오도록 제작하였다. 인

Table 1 Chemical composition of Ti-6Al-4V ELI alloy (wt %)

Elements	Ti	Al	V	O	Fe	H	C	N
Gr. 23	Balance	5.5 ~ 6.5	3.5 ~ 4.5	0.13(max)	0.25 (max)	0.0125 (max)	0.08 (max)	0.03 (max)
Alloy	Balance	6.01	4.15	0.123	0.16	0.0028	0.019	0.008

Fig. 1 A schematic describing heat treatment procedure of (a) base metal and (b) PWHT

Fig. 2 Welding bead shape and cross section (a) C - No. 1, (b) C - No. 2 and (c) C - No. 3 Ti-6Al-4V ELI alloy

장시험 시 변형속도(strain rate)는 10^{-3} s^{-1} 으로 진행하였다. 미세경도시험은 Vickers 경도기(HM-211)에서 하중 0.2(1.96N) 을 가하였고 압흔 간격은 150 μm 를 유지하여 측정하였다.

4. 실험 고찰

4.1 용접 시험

용접한 시편의 비드 형상 및 용접부 단면을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2의 모든 조건에서 비드폭은 전면부 0.891~0.754 mm 후면부 0.908~0.857 mm로 측정되었고, 적절한 Ar 가스 쉴딩으로 표면의 산화는 발견되지 않았다¹⁾. 그리고 비드 후면부에는 스패터가 소량 발생하였으나, 용접부에서의 결함은 관찰되지 않았다. 용접부 단면을 분석한 결과 모든 조건에서 완전 용입이 이루어진 것을 관찰할 수 있었다.

4.2 인장 시험

용접 전 각 열처리 조건에 따른 모재의 인장시험 결과를 Fig. 3 (a)로 나타내었다. 모재의 인장시험 결과

1번 조건, 2번 조건 그리고 3번 조건 순서로 인장 강도가 증가하였다. 용접 전 원소재의 미세조직 분석결과를 Fig. 4에 나타내었다. 1번 조건 소재(Fig. 4(a))는 구상화된 α 상과 층상구조의 $\alpha+\beta$ 상으로 구성되어 있었다. 3번 조건 소재(Fig. 4.(b))는 구상화된 α 상 뿐만 아니라, 수냉 중에 생성된 마르텐사이트(α')에 의하여 1번 조건 소재 대비 강도가 증가했음을 알 수 있었다.

Fig. 3 Tensile behaviors of Ti-6Al-4V ELI alloy (a) base metal and (b) after welding

Table 2 Heat treatment conditions of base metal and PWHT specimen

Condition No.	Heat treatment of base metal	PWHT
C - No.1	Mill annealed	-
C - No.2	Solution	-
C - No.3	STA	-
C - No.4	Mill annealed	Solution
C - No.5	Mill annealed	STA (Solution & Aging)
C - No.6	Solution	Aging

Fig. 4 Optical micrographs of (a) C - No. 1, (b) C - No. 2 and (c) C - No. 3 Ti-6Al-4V ELI alloy

3번 조건 소재(Fig. 4(c))는 구상화 된 α 상과 Aging 중 잔류 β 상으로부터 생성된 미세한 2차 α 상(α_s)이 생성되어 가장 높은 경도를 나타내었다고 판단된다. 각 열처리 조건에서 용접 한 후의 인장시험 결과를 Fig. 3(b)에 나타내었다. 용접 후 강도는 용접 전 열처리조건에 따른 인장특성 경향과 동일하게 나타났고, 용접 후 인장시험편은 모두 모재에서 파단이 발생하였다.

4.3 경도 시험

용접후열처리 전·후 시험편의 경도 시험결과를 Fig. 5(a)과 (b)에 각각 나타내었으며, 각 경도 평균값을 Table 3에 표기하였다. 용접후열처리 전 시험편의 경우 열처리 조

건과 관계없이 용접부에서 가장 높은 경도 값을 가지며 HAZ부에서 모재로 갈수록 값이 감소함을 볼 수 있다. 용접부 경도와 모재 간에 큰 경도 값 차이를 가지는데 이로 인하여 변형 중 국부변형을 유발시켜 성형성을 감소시키는 요인이 될 수 있다. 이를 방지하기 위하여, 용접후열처리를 이용하여 잔류응력 감소와 더불어 모재와 용접부 간의 경도 차이를 감소시키는 것이 중요하다. 용접후열처리 후 경도 값을 살펴보면, 1번 조건 소재와 대비하여 4번 조건의 용접부 경도가 약 20 Hv 감소함을 볼 수 있다, 이는 용접부의 조직에 있던 잔류응력이 Solution 중 제거 되어 감소한 것으로 풀이 된다. 5번 조건과 6번 조건의 용접부 경도는 약 390 Hv로, 다른 용접부보다 높은 값을 보여주었다.

Fig. 5 Vickers hardness profile: after (a) welding and (b) PWTH

Table 3 Average hardness values of weld, HAZ and Base area of each experimental conditions

	C - No. 1	C - No. 2	C - No. 3	C - No. 4	C - No. 5	C - No. 6
Weld	359.7 Hv	374.3 Hv	378.5 Hv	352.3 Hv	394.6 Hv	390.3 Hv
HAZ	347.2 Hv	369.2 Hv	369.5 Hv	339.5 Hv	361.2 Hv	364.5 Hv
BASE	325.0 Hv	329.2 Hv	345.6 Hv	339.3 Hv	352.1 Hv	352.5 Hv

Fig. 6 Weldments microstructure of (a) C - No. 3, (b) C - No. 4, (c) C - No. 5 and (d) C - No. 6

4.4 용접후열처리 후 미세조직 분석

용접후열처리 전·후 열처리 조건에 따라서 용접부의 물성이 크게 달라짐을 알 수 있었다. 먼저 용접부의 물성에 영향을 미칠 수 있는 인자로, 1) α 상 분율, 2) 용접부 잔류응력 3) 시효 중 생성된 α_s 상 분율 등 크게 3가지가 있다. Aging 이 포함된 용접후열처리 소재의 용접부 경도가 가장 높음을 알 수 있으며 용접후열처리 이전 소재와 4번 조건에서 비교적 작은 경도 차이를 확인할 수 있었다. 4번 조건의 경도 감소 원인을 확인하기 위하여 용접후열처리 전·후 미세조직을 Fig. 6에 나타내었다. 용접후열처리 전 용접부 (Fig. 6(a))와 비교하여, 용접 후 생성된 α' 상이 Solution 중 성장하였음을 알 수 있다 (Fig. 6(b)). 그리고 Aging 중 잔류 β 상에서 α_s 상이 생성(Fig. 6(c)와 6(d))되었음을 확인할 수 있었다. 결과적으로, 용접후열처리에서 Solution 중 α' 상의 성장과 더불어 용접부의 잔류 응력이 감소하여 경도가 감소하나 Aging 중 α_s 상이 생성되어 경도가 다시 증가함을 알 수 있었다¹⁰⁾.

이러한 시효(Aging) 용접후열처리에서의 α_s 생성은 용접부와 모재의 경도 차이를 더욱 증가시켜 성형성 저하를 유발하는 반면, 용체화처리(Solution) 용접후열처리는 용접부에서 모재까지 경도차이가 용접후열처리 전 소재보다 작기 때문에 성형성 감소를 최소화시킬 것으로 예상된다.

5. 결 론

Ti-6Al-4V ELI합금을 Laser 용접 실험에서 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 2.0 kW, 100 mm/s 용접조건에서 실시한 인장 시험은 모재에서 파단이 발생하였고, 모재보다 더 높은 인장강도와 감소한 연신율을 갖는다.

2) 용체화 처리(solution) 용접후열처리를 통해, 모재의 강도는 유지하면서 용접부와 모재의 경도 차이는 감소되었다. 용접부의 미세조직은 α' 상의 두께가 증가하면서 용접부 경도가 감소하였다. 4번 조건의 모재와 용접부간 경도 차이는 기존 1번 조건대비 69.4 % 감소, 5번 조건 대비 62.5 % 감소된 값이 나타났다.

3) 시효(Aging) 용접후열처리 이후 용접부 미세조직은 α' 상의 분율은 증가하지 않으며, α_s 상이 생성되어 용접부 경도가 상승하였다. 그 값은 용접후열처리 전 소재와 비교하여 22.4% 증가하였다.

4) 용접후열처리 후 α' 상 두께가 커질수록 그리고 잔류응력이 감소할수록 용접부 경도는 낮아지며 α_s 상이 생성되면 경도가 상승하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 핵심방산기술개발사업 (10043804) 및 민군겸용기술개발사업 (16-CM-MA-10)의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

References

1. BH Yoon, SH Kim, WS Chang, *Journal of KWJS*, 25(5) (2007), 22-28 (in Korean)
2. M. Geetha, A.K. Singh, R. Asokamani, A.K. Gogia, Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants A review, *Progress in Materials Science*, 54 (2009), 397425
3. M. Peters and C. Leyens, AEROSPACE AND SPACE MATERIALS, *MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING*, 3 (2011)
4. Gang Lu, Steven L. Bernasek, Jeffrey Schwartz, Oxidation of a polycrystalline titanium surface by oxygen and water, *Surface Science*, 458 (2000), 80-90
5. X. LI, J. XIE, Y. ZHOU, Effects of oxygen contamination in the argon shielding gas in laser welding of commercially pure titanium thin sheet, *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE*, 40 (2005), 3437-3443
6. Eugene G. Hornberger, The practical reference guide for welding titanium, *AWS*, (1999), 3-4
7. J.D.Kim, J.S.Kim, The Study for Improving the Weldability of Pure Titanium Sheet by Using Fiber Laser-The Effect of Shielding Gas Nozzle Variable -, *J. of Welding and Joining*, 34(5) (2016), 6-12 (in Korean)
8. Titanium information group, Welding Titanium, *TWI*, (1999)
9. A.S.H. Kabir, X.J. Cao, J. Gholipour, P. Wanjara, J. Cuddy, A. Birur, M. Medraj, Effect of postweld heat treatment on microstructure, hardness, and tensile properties of laser-welded Ti-6Al-4V, *Metall Mater Trans A*, 43 (2012), 4171-4184
10. S.W. Lee, C. H. Park, J. K. Hong, J.T. Yeom, Effect of solution treatment and aging conditions on tensile properties of Ti-Al-Fe-Si alloy, *Materials Science & Engineering A*, 697 (2017), 158-166