싱글모드 파이버 레이저를 이용한 SUS304와 Ti 이종재료의 용접속도에 따른 용접특성

이 수 진* · 카타야마 세이지* · 김 중 도**,*

*오사카대학교 접합연구소

**한국해양대학교 기관공학부

Weldability of SUS304 and Ti Dissimilar Welds with Various Welding Speed using Single Mode Fiber Laser

Su-Jin Lee*, Seiji Katayama* and Jong-Do Kim**,*

*Joining and Welding Research Institute, Osaka University, 11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, JAPAN

**Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, KOREA

†Corresponding author : jdkim@kmou.ac.kr

(Received September 24, 2013 ; Accepted October 24, 2013)

Abstract

The joining of Ti and SUS304 dissimilar metals is one of the effective measures to save rare metal. But Ti and SUS304 have differences in materials properties, and Ti and Fe intermetallic compounds such as TiFe and TiFe₂ are easily formed in weld fusion zone between Ti and SUS304. Nevertheless, in this study, full penetration lap dissimilar welding of Ti and SUS304 using single-mode fiber laser with ultra-high welding speed was tried, and it was found out that ultra-high welding speed could control the generation of intermetallic compound. To recognize the formation of intermetallic phase in the weld fusion zone and the compound zone of interface weld area were observed and analyzed using energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX). And it was confirmed that the ultra-high welding speed could reduce amount of intermetallic compounds, but the intermetallic compounds were existed in the weld fusion zone under the all conditions.

Key Words : Intermetallic compound, Ti, SUS304, Dissimilar welding, Single mode fiber laser

1. 서 론

최근 높은 내식성이 요구되고 있는 분야의 재료로써 티탄합금과 지르코늄의 사용이 검토되고 있으며 그 소재와 SUS304스테인리스 강과의 이종재료 용접이 필요시 되고 있다. 지금까지 여러 연구자들에 의해 보고된 SUS304와 티타늄(Ti)의 이종재료 용접시 Fig. 1의 Fe-Ti 상태도에서 확인되는 것과 같은 TiFe, TiFe₂ 금속간 화합물이 발생하기 쉽다. 따라서 두 금속을 용융용접할 경우에는 용접부에서 취약한 합금층이 생성되므로 양호한 용접결과를 얻기 어려웠다¹⁻⁴⁾. 그로인해

현재 용융용접이 거의 불가능하다고 생각되고 있다¹⁻⁵⁾. 따라서 폭발용접, 스폿용접, 마찰용접, 마찰교반용접, 확산용접 등 각종 고상용접법이 검토되고 있으며 그에 따른 연구가 진행되어 오고 있다^{1,2,5,6)}. 하지만 레이저를 이용한 SUS304-Ti의 이종재료 용접이 가능하다면, 더욱 쉽게 많은 분야에서 적용이 가능할 것으로 기대된다.

본 연구에서는 기존에 용접이 어려운 것으로 사료되어 온 SUS304와 Ti의 용융용접을 실시하여 용접 속도에 따른 용접 특성을 연구하였다. 특히, 아주 작은 빔 직경과 가우시안 빔 특성을 가지고 있는 매우 높은 에너지 밀도의 고품질 싱글모드 파이버 레이저⁷⁻¹²⁾를 이용하여 현재까지 실시할 수 없었던 초고속으로 겹치기

Fig. 1 Phase diagram of dissimilar metals having intermetallic compounds

관통 용접을 실시하여 그에 따른 용접특성 및 SUS304-Ti 용융용접의 가능성을 검토하는 것을 목적으로 하였다.

2. 사용 재료 및 실험 방법

본 연구에서 사용된 금속재료는 대표적인 오스테나이트계 스테인리스강인 SUS304와 가볍고 단단하며 내부식성이 뛰어난 티타늄 (Ti)으로 그 화학적 성분은 Table 1에 나타내었다. 또한 Fe, SUS304 및 Ti의 기본적인 물성을 Table 2에 나타내었다. SUS304보다 Ti의 녹는점이 약 200°C 가량 높으며, 열전도도와 열팽창계수가 더 낮은 것을 알 수 있다. 각 재료는 길이 70 mm, 넓이 30 mm, 두께 0.3 mm의 치수로 가공하여 사용되었다.

실험에 사용된 레이저는 최대출력 2 kW의 싱글모드 파이버 레이저로 14 μm 직경의 파이버를 이용하여 레이저 헤드로 전송하고 전송된 레이저는 렌즈를 통과하여 시편 표면에 초점위치 (f_d : 0 mm) 조건으로 조사되었

Table 1 Chemical compositions of materials

Metal	SUS304	Ti
Fe	72.175 wt.%	0.02 wt.%
Ti		99.919 wt.%
Ni	8.06 wt.%	
C	0.06 wt.%	0.01 wt.%
Si	0.45 wt.%	
Mn	1.12 wt.%	
Cr	18.10 wt.%	
S	0.004 wt.%	
O		0.04 wt.%
N		0.01 wt.%
H		0.001 wt.%
P	0.031 wt.%	

Table 2 Physical properties of materials used

	Fe	Ti	SUS304
Melting point (°C)	1538	1668	1400-1427
Boiling point (°C)	2862	3287	
Density (g/cm ³)	7.874	4.506	8.03
Thermal conductivity (W/m·K)	80.4	21.9	
Thermal expansion ($\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) (25 °C)	11.8	8.6	16.5
Vapor pressure (°C) (1kPa)	2346	2692	
Vickers hardness (Mpa)	608	970	
Poisson ratio	0.29	0.32	0.29

(a) Schematic experimental set-up

(b) Schematic specimens set-up

Fig. 2 Schematic experimental set-up for 2 kW single-mode fiber laser welding of SUS304 and Ti dissimilar metals

다. 시료에 집광된 빔의 직경은 약 20 μm 이며 빔품질을 나타내는 BPP는 약 1.05 mm·mrad이다. 레이저 헤드는 약 10도의 입사각을 주어 실험을 실시하였다. 사용된 용접 실험장치와 시료셋팅 모식도를 Fig. 2에 나타내었다. 시편두께 0.3 mm의 SUS304와 Ti의 위치를 바꾸어가며 겹치기 관통 용접을 실시하였다. 그 용접부의 기계적 특성을 평가하기 위해서 인장실험을 실시하고 EDX를 이용하여 파단부의 조성을 연구하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 SUS304와 Ti의 고속도 이종용접 비드면 관찰

매우 작은 빔 직경을 가지고 있는 싱글모드 파이버 레이저를 사용한 초고속 SUS304-Ti의 이종재 용접의 특성 및 가능성을 평가하기 위해 실험을 실시하였다.

Fig. 3 Photographs of top and bottom surface appearances of SUS304 and Ti dissimilar welds made with single-mode fiber laser at different welding speeds

SUS304-Ti 이종재료의 겹치기 용접성을 확인하기 위하여 레이저 출력 1 kW, 레이저 초점거리 0 mm, 아르곤 실드가스 유량 30 ℓ/min 의 용접조건에서 용접속도와 시료의 겹치기 위치를 용접조건인자로 사용하여 용접을 실시하였으며 용접된 시료의 표면과 이면의 비드면을 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3 (a) SUS304(upper)-Ti(lower)의 비드사진을 보면 10~50 m/min 용접속도의 모든 조건에서 SUS304 상부 비드측에 균열이 발생한 것을 확인할 수 있다. 특히, 20 m/min 이하의 용접속도에서는 이면 Ti 측에도 균열이 발생하였다. 또한 용접속도가 빨라질수록 상부에 발생한 균열이 줄어드는 경향을 보였다. 반면, Fig. 3 (b) Ti(upper)-SUS304(lower)의 비드면에는 용접속도 10 m/min의 조건에서 Ti면의 상부 비드에서 미세한 균열이 발견되고 그 외에는 균열이 없는 용접비드가 얻어졌다. 따라서 이종재료의 겹치기 관통 용접의 경우 재료의 상하 위치와 용접 속도에 따라서 균열 발생등의 용접성이 변화하는 것을 알 수 있다. 본 실험에서는 Ti(upper)-SUS304(lower) 겹치기 조건에서 레이저 출력 1 kW 용접속도 20 m/min 이상의 용접 조건이 표면 및 이면비드에 균열이 발생하지 않는 비교적 양호한 용접 조건이라는 것을 확인할 수 있다.

즉, 용접속도가 빠를수록 그리고 Ti이 상부에 있는 경우 더욱 양호한 용접비드 결과가 얻어졌다. 이는 앞의 Fig. 1의 상태도에서 알 수 있듯이 비교적 다량의 Fe 안에 비교적 소량의 Ti의 함유조건에서 그 반대의 조건보다 금속간 화합물이 발생하기 쉽고 Ti의 고용체 범위가 Fe의 고용체 범위보다 넓기 때문으로 사료된다.

3.2 겹치기 이종재료 용접부의 품질평가

SUS304와 Ti의 고속도 겹치기 용접의 용접품질을 평가하기 위해 용접속도 및 재료의 겹치기 위치를 바꾸어 가며 용접을 실시하고 인장실험장비(AG-10kNE)를 이용하여 1 m/min의 속도로 인장전단실험을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 4에 그래프로 나타내었다.

세로축은 인장강도를 표시하며 가로축은 용접속도의 변화를 지시한다. 그래프의 검정색 사각표시는 Ti의 동종 겹치기 용접의 인장실험 결과이며, 빨간색 원표시는 SUS304의 동종 겹치기 용접 인장결과를 의미한다. 또한 파란색의 세모와 분홍색의 역세모표시는 각각 Ti(upper)-SUS304(lower)와 SUS304(upper)-Ti(lower)의 이종재 겹치기 용접부의 인장시험결과를 의미한다.

SUS304의 동종 겹치기 용접부의 인장강도가 가장 강한 것을 알 수 있다. 그 다음으로는 Ti의 겹치기 용

Fig. 4 Results of tensile shear test for SUS304 and Ti dissimilar welding

접부가 강한 것이 확인된다. SUS304와 Ti의 이종재료 겹치기 용접결과를 확인해 보면, 전반적으로 Ti(upper)-SUS304(lower)의 인장강도가 SUS304(upper)-Ti(lower)의 인장강도보다 높은 것을 알 수 있다. 다만 용접속도 5m/min의 조건에서 유사한 인장강도를 가지며 50m/min의 용접속도 조건에서는 SUS304(upper)-Ti(lower)의 인장강도가 Ti(upper)-SUS304(lower)보다 강해지는 것이 확인 되었다.

인장강도 그래프 곡선의 특성을 보면, 동종용접의 경우 용접속도가 빨라질수록 인장강도가 저하되는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 3의 비드사진에서 보이듯이 용접속도가 빨라질수록 용접비드가 좁아지는 특성에 의해 접합부 면적이 감소하기 때문이라고 고찰된다.

반면, 이종재료 용접의 인장강도 그래프 곡선의 특성을 보면 동종용접의 결과와 다르게 용접속도가 빨라짐에 따라 인장강도도 함께 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 비록 비드의 넓이가 줄어들어 접합부의 면적이 좁아짐에도 불구하고 취성이 강한 금속간 화합물의 생성

이 급속히 감소하기 때문으로 추측이 가능하며 이러한 현상에 관한 고찰은 다음 아래에서 자세히 관찰하였다.

3.3 겹치기 이종재료 용접부의 인장시험편 파단면 관찰

3.2절에서 실시된 인장시험편 중에서 용접속도 10, 20, 30 및 50 m/min 조건의 파단부 단면을 Fig. 5에 비교하여 나타내었다. 10 m/min와 20 m/min의 비교적 느린 용접속도의 조건에서는 시편의 위치와 관계없이 용접비드의 접합면을 포함하여 용접비드 전체의 넓은범위에 파단이 일어났으며 이는 좁은 접합부에 걸리는 하중에 의한 파단뿐만 아니라 용접비드의 균열에 의해 파단이 쉽게 이루어졌기 때문이다.

30 m/min의 용접속도에서는 겹치기 용접의 접합면에서 하중이 집중되어 접합면을 중심으로 파단이 되었으며, SUS304(upper)-Ti(lower)의 재료 겹치기 조건에서는 비드면 균열에 의해 파단되는 부위가 SUS304측 비드로 발전되는 것이 보인다. 이는 Fig. 3에서 관찰되듯이 SUS304(upper)-Ti(lower)의 시료 위치에 조건에서 상부 비드측에 균열이 쉽게 발생하였으며, 이 균열이 영향을 미친 것으로 확인된다.

매우 빠른 용접속도인 50 m/min의 조건에서는 어떠한 겹치기 시료위치의 조건에 관계없이 적은 면적의 접합면에 하중이 집중되어 파단이 일어난 것을 확인할 수 있다. 이 용접속도 조건에서는 균열이 쉽게 발생하는 취약한 금속간 화합물의 생성이 제어되었기 때문으로 고려된다.

이러한 파단부의 특성으로 추측할 수 있듯이, 용접속도에 따른 균열 및 금속간 화합물의 생성량의 변화로 인해 용접속도가 상승함에 따라 감소하는 접합 면적에도 불구하고 이종재 용접의 경우 인장강도가 상승하는

Fig. 5 Fractured cross-sectional SEM photos after tensile shear test of SUS304 and Ti dissimilar welds at 1 kW laser power by various specimens location and welding speed

Table 3 EDX analysis results of marked area in Fig. 6 fractural cross section of SUS304-Ti dissimilar welds under 10 m/min and 50 m/min welding speed conditions

	Phase	Atomic percentage	
		Ti(%)	Fe(%)
1	Fe + TiFe ₂	25.32	74.68
2	Fe + TiFe ₂	25.37	74.63
3	TiFe ₂ + TiFe	39.27	60.73
4	Ti + TiFe	69.06	30.94
5	Fe	8.12	91.88
6	Ti + TiFe	68.32	31.68
7	TiFe + Ti	55.53	44.47
8	Ti	99.80	0.20

것을 알 수 있다. 또한 50 m/min의 용접속도에서는 금속간 화합물이 생성되지 않는 동종용접의 인장강도와 유사해지는 것을 알 수 있다. 본 연구에 사용된 스테이지의 속도한계로 더 빠른 속도의 용접연구를 진행하지 못했지만, 레이저 출력밀도가 더 높은 레이저장비와 더 빠른 속도가 구사 가능한 스테이지를 이용한다면 더욱 좋은 이종재 용접 결과가 얻어질 것으로 기대할 수 있다.

3.4 이종재료 용접부의 파단부 조직분석

SUS304(upper)-Ti(lower) 겹치기 시료조합의 용접속도 10 m/min와 50 m/min의 파단부를 EDX 분석장비를 이용하여 어떤 조직에서 파단이 이루어 졌는지를 상세히 분석하였다. 분석부분의 SEM 사진은 Fig. 6에, SEM 사진에 표시되어있는 '1'~'8'부분의 조직분석 결과는 Table 3에 각각 나타내었다.

Fig. 6 SEM photos and EDX analysis of fractural cross section of SUS304 - Ti dissimilar welds under 10 m/min and 50 m/min welding speed conditions

Fig. 6의 'A'와 'B'는 용접속도 10 m/min에서 용접을 실시한 시편의 인장전단실험으로 파단된 파단부의 상부 SUS304측과 하부 Ti측의 관찰영역을 각각 나타내고 있다. 용접속도 50 m/min의 조건에서 파단된 부분을 'C'에 표시하였다. 용접속도 10 m/min의 상부 시편 'A'영역에서 파단된 부분의 조직은 Fe와 $TiFe_2$ 가 함께 존재하는 상으로 검출되었다. 하부의 Ti측 'B'영역에서는 $TiFe$ 와 $TiFe_2$ 등의 금속간 화합물이 존재하는 것이 확인 되었다. 반면 용접속도가 50 m/min의 파단면을 관찰하여 보면 '5'와 '8'영역에서는 일부 Ti이나 Fe가 함유 되어있는 Fe 혹은 Ti 고용체가 관찰된다. 이는 용접속도가 빨라지면 용접시 재료가 용융부에서 섞이는 것이 제어되어 금속간 화합물의 생성 또한 줄어든 것으로 사료된다. 또한 파단면인 '6'과 '7'영역에서는 Ti와 $TiFe$ 가 존재하는 조직인 것으로 확인 된다. 따라서 매우 빠른 속도의 용접조건에는 금속간 화합물의 생성이 제어되고 용접속도가 상승함에 따라 이종재료 용접부의 인장강도가 Ti의 동종용접결과에 가까워 지는 것이 확인되었다.

4. 결 론

본 연구는 2 kW의 연속발진형 고품질 싱글모드 파이버 레이저를 이용하여 금속간 화합물이 쉽게 생성되어 이종재 용접이 곤란했던 SUS304와 Ti의 이종재료 용접을 실시하고 그 용접가능성과 기계적 특성 및 용접부 조직을 분석하였다. 특히 이종재료 용접에 있어서 일반적으로 맞대기 용접이나 부분관통 용접공정을 이용하여 두 재료가 섞이는 비율을 조정하여 금속간 화합물이 발생하지 않도록 하는 것이 일반적인 이종재료 용접의 연구방법이다. 하지만 본 연구에서는 높은 파워밀도를 가지고 있는 레이저를 이용하여 기존에 구사하지 못했던 초고속도 용접을 이용하여 재료의 관통용접을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) SUS304(upper)-Ti(lower) 재료위치의 겹치기 조건에서는 10~50 m/min 용접속도의 모든 조건에서 상부 SUS304 비드측에 균열이 발생하였다. 또한 20 m/min 이하의 용접속도에서는 이면 Ti측에도 균열이 발생하였다. 그러나 용접속도가 빨라질수록 상부에 발생한 균열이 줄어드는 경향을 보인다.

2) Ti(upper)-SUS304(lower), 용접속도 10 m/min의 조건의 경우, Ti면의 상부비드에서 미세한 균열이 발견되고 그 외의 용접 속도에서는 균열이 없는 용접비드가 얻어졌다.

3) 따라서 이종재료의 겹치기 관통 용접성의 경우 재

료의 상하 위치와 용접 속도에 따라서 균열발생 등의 용접성이 변화하는 것을 알 수 있다.

4) SUS304와 Ti의 이종재료 겹치기 용접부의 인장실험을 실시한 결과, 전반적으로 Ti(upper)-SUS304(lower)의 인장강도가 SUS304(upper)-Ti(lower)의 인장강도 보다 높은 것을 알 수 있다. 다만 용접속도 5 m/min의 조건에서 유사한 인장강도를 가지며 50 m/min의 용접속도 조건에서는 SUS304(upper)-Ti(lower)의 인장강도가 Ti(upper)-SUS304(lower)보다 강해지는 것이 확인 되었다.

5) 인장강도 그래프 곡선의 특성을 보면, 동종용접의 경우 용접속도가 빨라질수록 인장강도가 저하된다. 반면, 이종재료 용접의 인장강도 그래프 곡선은 용접속도가 빨라짐에 따라 인장강도도 함께 증가하는 것을 알 수 있다.

6) 이러한 인장강도의 특성은 파단면을 관찰한 결과 비록 비드의 면적이 좁아짐에도 불구하고 취성이 강한 금속간 화합물의 생성이 감소하기 때문인 것으로 사료된다.

7) 결론적으로, 매우 빠른 속도의 용접조건에는 금속간 화합물의 생성이 제어되고 용접속도가 상승함에 따라 이종재료 용접의 인장강도가 Ti의 동종 용접결과에 가까운 범위까지 개선되었다.

Reference

1. Z.Sun and R.Karppi : The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overview, *Journal of Materials Processing Technology*, **59** (1996), 257-267
2. Osamu Ohashi, Kazuo Ei and Hirosada Irie : Diffusion Welding of SUS304 Stainless Steel to Titanium, *Japan Welding Society*, **13-3** (1995), 390-394 (in Japanese)
3. M. Naeem, R. Jessett and K. Withers : Fiber laser welding of dissimilar materials, *Industrial Laser Solutions*, <http://www.industrial-lasers.com/articles/2012/03/fiber-laser-welding-of-dissimilar-materials.html>, (2012)
4. John F. Ready : LIA Handbook of Laser Materials Processing, Laser Institute of America Magnolia Publishing Inc., (2001)
5. S. D. Meshram, T. Mohandas and G. Madhusudhan Reddy: Friction welding of dissimilar pure metals, *Journal of Materials Processing Technology*, **184** (2007), 330-337
6. Y. ARATA, F. MATSUDA and S. HARADA : Electron Beam Welding of Carbon Steel and Titanium Sheets Using Ag Insert Metal, *Transactions of JWRI*, **4-2** (1975), 71-75

7. S. Katayama : Laser Welding, Journal of the Japan welding society, **78-2** (2009), 124-138
8. Y. Kawahito and S. Katayama : In-Process Monitoring and Adaptive Control in Micro Welding with a Single-Mode Fiber Laser, Transactions of JWRI, **38-2** (2009), 5-11
9. Su-Jin Lee, Hiroshi Nakamura, Yousuke Kawahito and Seiji Katayama : Weldability of Ti and Al Dissimilar Metals Using Single-Mode Fiber Laser, Proceedings of LPM2012 - the 13th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, #12-67, (2012), 1-6
10. Chang-Je Lee, Jong-Do Kim, Yu-Chan Kim : Characteristics of Plasma Emission Signals in Fiber Laser Welding of API Steel (II) - The Relationship between Welding Conditions and Emission Signals - , Journal of KWJS, **30-4** (2013), 314-320(in Korean)
11. Chang-Je Lee, Jong-Do Kim, and Yu-Chan Kim : Characteristics of Plasma Emission Signals in Fiber Laser Welding of API Steel (III), Journal of KWJS, **31-3** (2013), 60-65(in Korean)
12. Jong-Do Kim, Chang-Je Lee, and Jeong Suh : Characteristics of Plasma Emission Signals in Fiber Laser Welding of API Steel (IV) - Correlation of Keyhole's Periodic Motion and FFT Analysis Results -, Journal of KWJS, **31-4** (2013), 28-33(in Korean)