순 티타늄 박판의 파이버 레이저 용접시 결합 억제를 위한 연속의 출력 파형제어 특성(Ⅱ) - 중첩부 길이변화에 따른 영향 -

김 종 도^{*,†} · 김 지 성^{**}

^{*}한국해양대 해사대학 기관공학부

^{**}한국해양대 대학원 기관공학과

The Characteristics of Continuous Waveshape Control for the Suppression of Defects in the Fiber Laser Welding of Pure Titanium Sheet (Ⅱ) - The Effect According to Control of Overlap Weld Length -

Jong-Do Kim^{*,†} and Ji-Sung Kim^{**}

^{*}Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean Univ., Busan 49112, Korea

^{**}Graduate School, Korea Maritime and Ocean Univ., Busan 49112, Korea

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

(Received November 11, 2016 ; Revised December 9, 2016 ; Accepted December 12, 2016)

Abstract

Because the pure titanium has superior corrosion resistance and formability compared with different material, it is widely used as material of welded heat exchanger. When the welding of heat exchanger is carried out, certain area in which welding start and end are overlapped occurs. The humping of back bead is formed in the overlap area due to partial penetration. Thus in this study, the experiments were carried out by changing the length and wave shape of overlap area, and then the weldability was evaluated through the observation of microstructure, the measurement of hardness and tensile-shear strength test in the overlap area. When overlap length was 9.8 mm, humping bead was suppressed. The microstructure of overlap area coarsened and its hardness increased due to remelting. As a result of tensile-shear strength test in the overlap area according to applying the wave shape control, it was confirmed that the overlap area applied wave shape control had more excellent yield strength and ductility.

Key Words : Pure titanium, Laser welding, Fiber laser, Overlap length, Welded plate heat exchanger, Continuous waveshape control, Waveform, Humping bead, Crater

1. 서 론

열에너지 관리기술에서 핵심 부품인 열교환기는 에너지 및 동력 시스템의 성능 향상에 큰 영향을 미치는 요소 중 하나이다¹⁾. 열교환기의 구조는 대부분 금속으로 제작되므로 해수, 화학 약품 등과 같은 부식성 환경에 노출되는 경우 부식으로 인한 문제가 발생할 수 있다. 특히 판형 열교환기의 전열판 두께는 0.5~1 mm 정도

로 매우 얇기 때문에 연간 최대 0.05 mm 정도의 부식만을 허용한다. 이로 인해 해수 분위기에서 거의 부식되지 않으며 다른 어떤 재료보다도 화학약품에 대한 내부식성이 우수한 티타늄이 장기간 사용되는 열교환기에 적합한 소재라고 할 수 있다²⁻⁴⁾.

열교환기의 종류로는 가스켓형, 쉘 튜브형, 광폭형, 콤팩트형, 플레이트 코일형, 베이스 라인 판형, 클립 라인 판형 등이 있으며 기존 열교환기의 사용압력과 온도를 보완하기 위하여 용접식 열교환기가 개발되고 있다⁵⁻⁸⁾.

용접 시에 발생하는 중첩구간은 용접 시작부에 끝단부가 중첩되는 구간으로, 부분 용입으로 인하여 비드이면에서 험핑비드가 발생할 수 있다. 이러한 용접 결함은 용접 끝단부가 용접 시작부의 부분 용입된 영역을 관통 용접함으로써 억제할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 균일한 전면 및 이면 비드를 가진 용접 중첩부를 얻기 위하여 중첩부 길이변화에 대한 실험을 진행하였으며 중첩부의 파형제어 적용유무에 따른 용접특성을 비교하였다.

2. 실험 재료 및 방법

본 연구에는 가로 150 mm, 세로 100 mm, 두께 0.5 mm의 순 티타늄 박판을 사용하였다. 재료의 항복강도는 193 MPa, 인장강도 300 MPa, 연신율은 33 %이며 시험편은 용접 전에 아세톤과 메탄올을 사용하여 불순물을 최대한 제거하였다.

Fig. 1에 레이저 용접 장치와 지그의 사진을 나타낸다. 실험에 사용된 최대 출력 6.3 kW의 연속 파이버 레이저는 용접로봇 시스템과 연동되며 레이저 집광광학계를 외팔보 로봇에 장착하여 용접을 실시하였다. 겹치기 용접 시 시험편 겹침부의 간극을 최소화하기 위하여 실험 전에 브러시를 이용하여 시험편 표면의 이물질 제거 후 지그로 강하게 고정하였다.

또한 용접부의 산화를 방지하기 위하여 사이드 실드 노즐을 사용하여 실드를 하였다.

인장전단시험은 ASME SECTION IX(2015), QW-464.1의 규격을 적용하고 Fig. 2와 같이 인장시험편을 제작하여 실시되었다. 시험편 상판과 하판의 겹치는 폭은 16 mm이며, 겹치기 용접 된 인장 시험편의 전체 크기는 가로 134 mm, 세로 16 mm이다. 시험편의 인장전단특

Fig. 1 Experimental setup for laser welding

Fig. 2 Schematic illustration of tensile-shear test specimen

성을 서로 비교하였으며 파단면의 SEM관찰을 통해 파단의 종류와 형태를 확인하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 중첩부 길이변화에 따른 용접특성

Fig. 3의 상단 그래프는 중첩부 길이변화 실험의 출력파형 그래프를 나타낸다. 레이저 출력 500 W, 용접 속도 2.5 m/min 조건에서 용접을 총 2번 실시하여 실선으로 나타낸 첫 번째 용접부에 점선으로 나타낸 두 번째 용접부를 중첩시키는 실험을 진행하였다. 첫 번째 용접은 슬롭 업 기능을 적용하지 않은 구형파(Square wave)를 사용하였고, 두 번째 용접은 슬롭 다운 기능을 적용하여 슬롭 다운 시간 250 ms에서 테일링 파워가 100 W일 때, 레이저 빔 조사가 정지되도록 하였다. 즉, 첫 번째 용접의 용접 시작부와 두 번째 용접의 용접 끝단부가 중첩되도록 하였으며, 이 때 중첩부 길이를 8.3~12.8 mm까지 1.5 mm 간격으로 변화하였다.

중첩부 길이변화에 따른 전면 및 이면 비드와 종단면의 사진을 Fig. 3(a)~(d)에 나타낸다. Fig. 3(a)는 두 번째 용접이 첫 번째 용접부와 중첩하는 동시에 슬롭 다운을 시작하는 파형이다. 이면비드를 살펴보면 슬롭 다운 시작 지점부근에서 험핑비드가 발생한 것을 관찰할 수 있다. 첫 번째 용접부는 용접동안 용융 후 응고되면서 부피가 팽창하므로 두께가 증가하게 된다. 슬롭 다운을 시작하게 되면 출력이 감소하므로 모재보다 두께가 두꺼워진 첫 번째 용접부를 관통용접하지 못하기 때문에 용입불량으로 인한 험핑비드가 발생하는 것으로 생각된다.

Fig. 3(b)에서 이면비드의 험핑비드가 억제된 것을 확인할 수 있다. 중첩부 길이가 9.8 mm일 때는 두 번째 용접부가 첫 번째 용접부를 1.5 mm 중첩한 뒤 슬롭 다운을 시작하는 파형이다. 따라서 첫 번째 용접의 부

Fig. 3 Various bead appearance and longitudinal section with overlap length in lap welding ($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=2.5$ m/min)

분 용입된 영역을 두 번째 용접이 관통 용접하므로 험핑비드가 억제된 것으로 판단된다. 결과적으로 중첩부 길이가 9.8mm일 때 험핑비드가 없는 균일한 이면비드를 얻을 수 있음을 확인하였다.

3.2 출력 파형제어 적용유무에 따른 중첩부의 특성비교

3.2.1 중첩부의 경도분포 및 미세조직

Fig. 4은 파형제어 적용 유무에 따른 크레이터의 경도특성을 각각 비교하여 나타낸다. 점선은 횡단면이 채워진 절단위치를 나타내며 파형제어를 적용하지 않은 경우 전면 및 이면 비드에 발생하는 크레이터와 험핑비드로 인해 횡단면 사진에서 위·아래 부분이 움푹 파인

것을 볼 수 있으며 파형제어를 적용한 경우 크레이터 및 험핑비드가 억제되어 움푹 파인 정도가 크게 완화된 것을 볼 수 있다. 횡단면의 경도값을 비교해보면 파형제어를 적용하지 않은 경우 용융부 평균 경도값이 200 Hv로 나타났으며 파형제어를 적용한 경우 176 Hv으로 파형제어를 적용하지 않은 경우가 약 30 Hv정도 높은 것을 볼 수 있다. 이 결과를 통해 파형제어 유무에 따른 크레이터의 냉각속도를 파악할 수 있으며 파형제어를 적용하지 않을 경우 용접끝단부가 급속으로 냉각되어 경도가 상승한다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5은 용접 중첩부의 종단면 경도측정결과를 나타낸다. 파형그래프는 이전의 실험에서 도출된 최적의 조건을 적용하여 첫 번째 용접은 슬로 업 기능을 적용하

Fig. 4 Comparison of hardness on cross section of no-slope down and slope down weld in lap welding ($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=2.5$ m/min)

지 않은 구형파를 사용하였으며 두 번째 용접은 첫 번째 용접부를 1.5 mm 중첩한 뒤 슬롭 다운을 시작하여 테일링 파워가 100 W일 때 레이저 빔 조사가 정지하도록 하였다. 종단면을 관찰해보면 A(두 번째 용접부)와 D(첫 번째 용접부)가 한 번 용접한 부분이며 B(슬롭 다운 시작 전 중첩부)와 C(슬롭 다운 부분)는 두 번 용접한 중첩부이다. 경도측정은 하중 100 g/mm², 유지시

Fig. 5 Hardness distribution on longitudinal section of overlap weld in lap welding ($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=2.5$ m/min)

간은 10초로 하였으며 경도측정 위치는 종단면의 중심부를 기준으로 100 μ m 간격으로 측정하였다. 각 구간의 평균 경도값을 계산하여 비교하였으며, A구간 175 Hv, B구간 175.2 Hv, C구간 168.1 Hv, D구간 172.2 Hv로 한 번 용접한 부분보다 중첩한 부분의 경도값이 다소 감소하였다.

Fig. 6은 Fig. 5의 종단면 사진을 확대하여 나타낸

Fig. 6 Microstructures of longitudinal section in overlap weld ($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=2.5$ m/min)

다. 종단면 사진은 A, H(한번 용접한 영역)와 B~G(중첩부 영역)으로 나눌 수 있으며 중첩부 영역은 슬롭 다운 시작 전에 중첩한 부분과 슬롭 다운 부분으로 나눌 수 있다. 이 때 B는 두 번째 용접부와 슬롭 다운을 하지 않은 중첩부의 경계이며 G는 슬롭 다운부와 첫 번째 용접부의 경계를 나타낸다. A, H 한 번 용접한 부분을 관찰해보면 조직의 모양이 뚜렷하지 않고 크기가 작은 반면, B~G 중첩한 부분은 조직의 모양이 뚜렷하며 재용융으로 인해 조직이 조대화되어 상대적으로 크기가 증가한 것을 볼 수 있다. 따라서 중첩부에서 조직의 크기가 증가하였기 때문에 경도값이 다소 감소한 것으로 사료된다.

3.2.2 중첩부의 인장전단특성

Fig. 7은 인장전단 시험결과로 파단위치 및 파단면 SEM사진을 나타낸다. 비교시험편은 파형제어를 적용하지 않은 중첩부와 중첩을 하지 않고 한 번만 용접한 용접부 총 2개의 시험편을 사용하였다. 파단위치를 관찰해보면 중첩을 하지 않고 한 번만 용접한 용접부와 파형제어를 적용한 중첩부에서는 모재에서 파단이 발생하였으며, 파형제어를 적용하지 않은 중첩부는 용접부에서 파단이 발생하였다. 모재에서 파단이 발생한 경우 파단면 각도가 인장축의 45°도 방향이었으며 넥킹이 존재하였다. 용접부 파단이 발생한 파형제어를 적용하지 않은 중첩부를 관찰해보면 겹치기 용접부의 하판에서 파단이 발생하였으며 상판과 하판일부는 용접된 상태로 남아있었다.

파단면의 SEM 이미지를 관찰해보면, 파형제어를 적용한 중첩부와 중첩을 하지 않은 용접부의 파단면은 딴플구조가 관찰되므로 연성파단의 형태를 나타내는 것을 확인하였다. 반면, 파형제어를 적용하지 않은 중첩부의 파단면은 상부에서는 연성파단, 하부에서는 취성파단의 형태가 나타나므로 연성과 취성이 혼합된 파단형태를

Fig. 7 Results of tensile-shear test according to applying wave shape control for overlap weld in lap welding ($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=2.5$ m/min)

나타내었다. 하부에서 취성파단이 관찰되었으므로 이 부분에서 파단이 처음 시작된 것으로 사료된다. 이는 파형제어를 적용하지 않을 경우 용접끝단부가 급속으로 냉각되어 취화되고 이면비드에서 발생하는 험핑비드가 노치로 작용하여 용접부에서 파단이 발생한 것으로 판단된다.

Table 1에 각 시험편에 대한 인장전단강도, 항복강도 및 연신율을 나타낸다. 중첩부에 파형제어를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우를 비교해보면 인장전단강도는 유사하나 파형제어를 적용한 경우가 항복강도와 연신율이 우수하였다.

Fig. 8에 각 시험편에 대한 응력-변형 곡선을 나타낸다. 그래프 모양을 관찰해보면 파형제어를 적용한 중첩부와 중첩을 하지 않은 한 번 용접한 용접부는 넥킹현상이 나타나는 전형적인 연성 파단의 그래프 형태를 나타내며, 파형제어를 적용하지 않은 중첩부는 넥킹현상이 나타나지 않는 전형적인 취성파단의 그래프 형태를 나타낸다. 파형제어를 적용한 중첩부와 중첩을 하지 않은 한 번 용접한 용접부의 그래프를 비교해보면 한 번 용접한 용접부의 넥킹 시작지점이 보다 왼쪽에 위치하고 있

Table 1 Average tensile test results of overlap weld and no overlap weld

Properties		Tensile-shear strength(Mpa)	Yield strength (Mpa)	Elongation (%)
Specimen				
Overlap weld	Wave shape control	308.1	202.3	19.7
	No wave shape control	308.8	194.3	15.4
No overlap weld		305.8	201	20.5
Base metal		316.3	218.5	32.6

Fig. 8 Tensile stress-strain curves of overlap and no-overlap weld

다. 또한 파단이 발생하는 지점은 비슷하며, 중첩을 하지 않은 한 번 용접한 용접부가 보다 낮은 응력에서 파단되었다. 이것은 한 번 용접한 용접부가 보다 짧은 스트로크(stroke)에서 넥킹현상이 시작되어 시험편이 더 길게 늘어지다가 파단된 것을 의미하는 것으로 사료된다. 따라서 중첩부에 파형제어를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 인장전단특성을 비교해보면 인장전단강도는 유사하나 파형제어를 적용한 경우가 항복강도와 연신율이 높으므로 인장전단특성이 더 우수하다는 것을 알 수 있다. 이 결과는 파형제어를 적용하지 않을 경우 용접끝단부가 급속으로 냉각되며 이면비드에 발생하는 험핑 비드가 노치로 작용하였기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

파이버 레이저를 이용하여 두께 0.5 mm의 순티타늄을 겹치기 용접한 결과를 다음에 정리한다.

1) 용접 시작부와 끝단부가 겹치는 중첩부의 길이를 변화시켜, 중첩부 길이=9.8 mm일 때 균일한 전면 및 이면 비드를 얻을 수 있었다.

2) 중첩부의 파형제어 적용유무에 따른 크레이터의 경도특성을 비교한 결과, 파형제어를 적용하지 않을 경우 용접부가 급속으로 냉각되어 경도가 증가한 반면 파형제어를 적용할 경우 냉각속도를 감소하므로 경도 상승을 억제할 수 있었다.

3) 중첩부의 미세조직 및 경도 특성을 평가한 결과, 중첩부는 재용융으로 인하여 조직이 조대화되었으며 이로 인해 경도가 다소 감소하는 경향을 나타내었다.

4) 중첩부의 파형제어 적용유무에 따른 인장전단시험을 실시한 결과, 파형제어를 적용하지 않을 경우 용접

부에서 파단이 발생한 반면 파형제어를 적용한 경우 모재에서 파단이 발생하였으며 보다 우수한 인장전단특성을 나타내었다.

References

1. H. Schonenborn, E. Ebert, B. Simon and P. Storm, Thermo mechanical Design of a Heat Exchanger for a Recuperative Aero Engine, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2004*, GT2004-53696, Conference, Vienna, Austria, (2004)
2. M. J. Donachie, Titanium A Technical Guide, ASM, (1988)
3. Christoph Ieyens, Manfred Peters, Titanium and Titanium Alloys, Fundamentals and Applications, (2003)
4. G. Lütjering, J.C. Williams, Titanium, Springer-Verlag, Berlin, (2007)
5. Caner Turk, Selin Aradag, Sadik Kakac, Experimental analysis of a mixed-plate gasketed plate heat exchanger and artificial neural net estimations of the performance as an alternative to classical correlations, *International Journal of Thermal Sciences*, 109, (2016), 263-269
6. Long Liu, Ning Ding, Junho Shi, Na Xu, Weimin Guo, Chi-Man, Lawrence Wu, Failure analysis of tube-to-tube sheet welded joints in a shell-tube heat exchanger, *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 7, (2016), 32-40
7. Jun-Tae Kim, Hoe-Jun Heo, Hyeon-Jun Kim, Chung-Yun Kang, Effect of Heating Rates on Microstructures in Brazing Joints of STS304 Compact Heat Exchanger using MBF 20, *J. of Welding and Joining*, 34 (2), (2016), 46-53 (in Korean)
8. Ae-Jeong Jeon, Tae-Jin Yoon, Sang-Ho Kim, Hyeon-Jun Kim, Chung-Yun Kang, Effect of Bonding Temperature and Bonding Pressure on Deformation and Tensile Properties of Diffusion Bonded Joint of STS304 Compact Heat Exchanger, *J. of Welding and Joining*, 32 (4), (2014), 46-54 (in Korean)