순 티타늄 박판의 파이버 레이저 용접시 결합 억제를 위한 연속의 출력 파형제어 특성(I) - 슬롭 업 & 다운 적용에 따른 영향 -

김 중 도^{*,†} · 김 지 성^{**}

^{*}한국해양대 해사대학 기관관공학부

^{**}한국해양대 대학원 기관공학과

The Characteristics of Continuous Waveshape Control for the Suppression of Defects in the Fiber Laser Welding of Pure Titanium Sheet (I) - The Effect According to Applying Slope Up & Down -

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

Laser welding has superior characteristic such as low distortion, high welding speed, easy automation and real time control. But it is easy to occur weld defects such as porosity, crater, humping bead in the area of welding start and end. These weld defects can be suppressed by applying the wave shape control. In this study CW fiber laser was used for welding of 0.5 mm^t pure titanium. Penetration properties were evaluated with the time of slope up and down. After then the bead shape was observed, and the maximum depth and the area of crater were measured. The bead shape of welding start area changed to be sharp with increase of slope up time and non-weld area of welding start increased. The crater and humping bead were suppressed with slope down time. The cooling rate of crater area was understood through measure of the hardness. Also, The distribution tendency of alloying elements was observed by EPMA and EDS. When wave shape control didn't applied to weld, the hardness of end weld increased due to rapid cooling rate and the hardness of rear part in the crater was higher than that of fore part. On the other hand, when the wave shape control was used for end weld, the increase of hardness in the end weld couldn't be found due to gradual cooling rate.

Key Words : Pure titanium, Laser welding, Fiber laser, Continuous waveshape control, Slope up, Slope down, crater, Humping bead, Tailing power

1. 서 론

내식성과 비강도가 우수하며 다양한 산업 분야에서 사용되고 있는 티타늄 합금은 여러 가지 용접기술을 이용하여 접합이 이루어지고 있다¹⁾. 아크 용접은 운용비용이 저렴하지만 높은 입열량으로 인해 열변형이 발생한다. 또한 용가재 선정이 부적절할 경우 편석, 희석 및

균열과 같은 결함이 용접부 내에 발생할 수 있다²⁻³⁾. 확산 접합 및 교반 용접과 같은 방법들도 연구가 진행되고 있으나 확산 접합은 충분한 접합시간이 요구되며 교반 용접은 그라인딩과 같은 용접 후 공정이 필요하므로 생산성이 떨어지는 문제점이 있다⁴⁻⁵⁾. 반면 레이저 용접은 아크용접보다 상대적으로 입열량이 적어 좁은 영역을 정밀하게 용접할 수 있으며 열변형이 거의 발생하지 않는다. 이 뿐만 아니라 빠른 용접속도로 인해 생산

성을 증가시킬 수 있으며, 실시간 제어 및 자동화가 용이하다⁶⁻⁷⁾. 하지만 레이저 용접 시 레이저 빔 조사가 시작되는 용접 시작부와 레이저 빔 조사가 정지되는 용접 끝단부에서는 다른 용접부보다 기공, 크레이터, 험핑비드 등과 같은 용접 결함이 발생하기 쉽다⁸⁻¹⁰⁾. 이러한 용접 결함은 레이저의 출력 파형제어 특성을 이용하여 억제할 수 있다¹¹⁾.

따라서 본 연구에서는 용접 시작부와 끝단부에서 발생하는 용접결함을 억제하기 위하여 시작부분과 종료부분에 레이저 출력 파형제어에 대한 연구를 실시하였다.

2. 실험 재료 및 방법

본 연구에서 사용된 재료는 두께 0.5 mm, 순도 99.9%의 순 티타늄이며 시험편의 크기와 화학적인 조성을 Fig. 1과 Table 1에 나타낸다. 모든 시험편은 겹치기 용접되었으며 실험에서 사용한 용접장치는 가우시안 빔 모드의 최대 출력 6.3 kW CW 파이버 레이저이다. 파형제어 시 레이저 출력을 시간에 따라 변화시킬 수 있으며 조정 가능한 최소 출력 및 시간은 1 W, 1 ms이다. 전면 비드는 아르곤 20 l/min를 용접방향의 뒤편에서 공급하여 실드하였으며 이 때, 직경이 8 mm인 사이드 노즐을 사용하였다. 이면 비드는 지그홀을 통해 아르곤 10 l/min를 공급하여 실드하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 슬롭 업 & 다운 적용에 따른 용입특성

Fig. 2와 같이 용접 시작부 및 끝단부의 용접결함을 억제하기 위한 목적으로 용접 중 레이저 출력을 변화시

Fig. 2 Wave shape control of slope up and down in lap welding

키는 것을 파형제어 또는 파형가변이라고 하며, 특히 레이저 조사 시작부와 종료부에서 출력을 선형적으로 증가 또는 감소시키는 방법을 슬롭 업(slope up), 슬롭 다운(slope down)이라고 한다.

3.1.1 슬롭 업 시간 변화

슬롭 업 시간에 따른 전면 비드 및 종단면의 사진을 Fig. 3에 나타낸다. 전면비드를 살펴보면 슬롭 업 시간 0ms는 파형 제어를 적용하지 않은 경우로, 이 때 용접 시작부의 끝단에서 둥근모양의 비드 형상을 확인할 수 있다. 반면에 슬롭 업 기능을 적용하여 슬롭 업 시간이 증가할수록 용접 시작부 끝단의 비드 형상이 날카롭게 변화하는 것을 관찰할 수 있다. 또한 종단면을 통해 슬롭 업 시간에 비례하여 레이저 빔 조사 시작점으로부터 완전 용입이 이루어진 지점까지의 거리가 증가하는 것을 알 수 있다. 이 영역은 미 용접부이며, 향후 용접 시작부와 끝단부가겹치는 중첩부를 고려하면 용접 시작부의 미 용접부 구간이 증가할수록 이 구간에 대한 제어가 어려워진다. 또한 슬롭 업 기능을 적용하지 않았을 때, 용접 시작부에 험핑 비드, 균열 등의 용접결함이 발생하지 않았으므로 향후 실험에서 슬롭 업 기능을 적용하지 않는 것이 적절하다고 판단된다.

Table 1 Chemical composition of specimens

Element(wt%) Material	C	H	N	O	Fe	Ti
Pure titanium (Grade 1)	0.003	0.0008	0.007	0.043	0.023	Bal.

Fig. 1 Schematic illustration of specimen size

Fig. 3 Various bead shapes and longitudinal section with the time of slope up in lap welding ($f_a=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=2.5$ m/min)

3.1.2 슬롭 다운 시간 변화

슬롭 다운 시간에 따른 전면 및 이면 비드 사진을 Fig. 4에 나타낸다. 슬롭 다운 시간이 0 ms일 때 용접 끝단부의 전면 및 이면 비드에 각각 크레이터와 험핑비드가 발생한 것을 관찰할 수 있다. 크레이터와 험핑비드가 발생하게 되면 이 부분의 두께가 감소하게 되므로 재료의 내구성은 저하된다. 따라서 이러한 결함을 억제하기 위해 슬롭 다운을 적용하였으며, 슬롭다운 시간이 50ms일 때 전면비드의 크레이터는 옆으로 길게 늘어지며 이면비드의 험핑비드는 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 슬롭 다운 시간이 증가함에 따라 크레이터는 더욱 더 옆으로 늘어지는 형상이 나타났으며 슬롭 다운 시간 250 ms일 때비드 끝단부에 용입이 거의 없는 날카로운 비드가 형성되었다. 슬롭 다운 시간이 크레이터의 형상에 미치는 영향을 보다 더 구체적으로 확인하기 위해, 크레이터의 최대깊이와 면적을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타낸다. 크레이터 최대 깊이는 슬롭 다운 기능을 적용하지 않았을 경우 100 μm 이상으로 측정되었으나 슬롭 다운 기능을 적용하여 시간이 증가함에 따라 크레이터의 최대깊이가 감소하여 슬롭 다운 시간 250 ms 이상에서는 50 μm 이하로 측정되었다. 크레이터의 면적은 슬롭 다운 기능을 적용하지 않았을 경우를 100 %로 설정하였을 때, 슬롭 다운 시간이 증가함에 따라 면적이 감소하여 슬롭 다운 시간 250 ms 이상에서 40 % 이하로 측정되었다.

따라서 크레이터 최대깊이 및 면적을 고려하여 크레이터 최대 깊이가 50 μm 이하이고 크레이터 면적이 60 % 이상 감소한 슬롭 다운 시간 250 ms를 최적의 조건으로 선정하였다. 용접시 크레이터 및 험핑비드의 억제는 파형제어의 적용을 통해 용접속도를 감소시켜 용액이 움푹 파인부분을 채워주는 것이 핵심이다. 따라서 용접속도가 감소할수록 최적의 슬롭 다운 시간은 감소하고 용접속도가 증가할수록 최적의 슬롭 다운 시간은 증가할 것으로 판단된다.

3.1.3 테일링 파워 제어

테일링 파워는 레이저 출력파형 그래프에서 슬롭다운시 선형적으로 감소하는 출력을 말한다.

레이저 빔 조사가 정지하는 테일링 파워에 따른 전면 및 이면 비드의 사진을 Fig. 6에 나타낸다. 테일링 파워가 0 W일 경우 비드 끝단부에서 용입깊이가 거의 없는 날카로운 형상을 확인할 수 있다. 반면 테일링 파워가 100 W의 경우 비드 끝단부의 날카로운 비드가 억제되었으나 200 W 이상으로 증가시켰을 때, 크레이터의 정도가 다시 심해지는 것을 알 수 있다.

Fig. 4 Various bead shapes and longitudinal section with the time of slope down in lap welding($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=2.5$ m/min)

Fig. 5 Maximum depth and area of crater with time of slope down

테일링 파워에 따른 최대 크레이터 깊이와 면적을 측정한 결과를 Fig. 7에 나타낸다. 테일링 파워가 증가할수록 크레이터의 최대깊이는 증가하며, 크레이터의 면적은 0~100 W 구간에서 다소 감소하였다가 출력이 100 W 이상일 때 다시 증가하였다. 테일링 파워가 0~100 W일 때 테일링 파워가 증가함에 따른 크레이터의 깊이 증가 폭보다 슬롭 다운 구간 길이 감소에 따른 크레이터 길이 감소 폭이 더 크기 때문에 크레이터의 면적이 감소하는 것으로 판단된다.

따라서 테일링 파워를 조절하여 비드 끝단부의 형상을 제어할 수 있었으며, 테일링 파워 100 W를 최적의 조건으로 선정하였다. 용접속도와 테일링 파워의 관계

Fig. 6 Various bead shapes with tailing power in lap welding($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=2.5$ m/min)

Fig. 7 Maximum depth and area of crater with time of slope down

를 고찰해보면 슬롭 다운 구간의 길이가 길어질수록 용입깊이가 거의 없는 날카로운 비드가 형성되기 쉬우므로 용접속도가 증가할수록 최적의 테일링 파워는 증가하고 용접속도가 감소할수록 최적의 테일링 파워는 감소할 것으로 판단된다.

3.2 출력 파형제어 적용유무에 따른 특성 비교

3.2.1 용접부의 경도특성

Fig. 8과 Fig. 9는 레이저 출력 500 W, 용접속도 2.5 m/min 조건에서 파형제어 적용유무에 따른 용접 끝단부의 경도분포를 나타낸다. 경도 시험 조건은 하중

Fig. 8 Hardness distribution of end weld not applied slope down($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=2.5$ m/min)

Fig. 9 Hardness distribution of end weld applied slope down ($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=2.5$ m/min)

100 g/mm², 유지시간 10초로 하였으며 경도측정 위치는 상부 표면으로부터 250 μ m 아래이며 압흔 간 간격은 100 μ m이다.

Fig. 8은 용접끝단부에 슬롭다운을 적용하지 않았을 경우의 종단면 사진 및 경도분포를 나타낸다. 종단면 사진을 살펴보면 용접끝단부에 슬롭 다운을 적용하지 않았으므로 크레이터와 험핑비드가 발생한 것을 볼 수 있다. 각 영역별 평균 경도값은 용접부 175.1 Hv, 모재 146 Hv를 나타내었으며, 크레이터 부분은 189.3 Hv으로 용접부보다 증가하였다. 이것은 용접 끝단부에서 레이저 빔 조사가 정지함에 따라 용접부가 급속으로 냉각되어 경도값이 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 9는 용접 끝단부에 슬롭 다운을 적용한 경우의 종단면 사진 및 경도분포를 나타낸다. 종단면 사진을 살펴보면 용접 끝단부에 크레이터와 험핑비드가 억제된 것을 볼 수 있으며 각 영역별 평균 경도값은 용접부 177.3 Hv, 모재 141 Hv를 나타내었으며, 크레이터 부분은 용접부보다 감소하여 163.8 Hv이었다. 이것은 용접 끝단부에서 슬롭다운을 적용함으로써 레이저 빔 조사 정지가 지연되며 그로 인해 용융액이 급속으로 냉각되지 않고 보다 점진적으로 응고되었기 때문으로 판단된다.

Fig. 10와 Fig. 11은 파형제어 적용유무에 따른 크레이터 부분의 경도특성을 세밀하게 분석한 결과로, 경도시험은 전 시험과 동일한 조건으로 진행하였다. 측정된 경도값은 표에서와 같이 색으로 변환하여 각 부분별로 표현하였다. 색깔은 검은색에서 흰색까지 명도차이

Fig. 10 Hardness distribution of crater where wave shape control is not applied($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=2.5$ m/min)

Fig. 11 Hardness distribution of crater where wave shape control is applied($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=2.5$ m/min)

로 구분하였으며 검은색이 211 Hv이상, 흰색이 150 Hv이하이고 검은색과 흰색사이의 각 색깔별 차이는 10 Hv이다.

Fig. 10은 파형제어를 적용하지 않은 경우 크레이터 부분의 경도특성을 나타낸다. 모재 140~150 Hv, 용접부 170~180 Hv의 경도값을 나타낸 반면 크레이터 부분은 190Hv이상이었으며 부분적으로는 최대 211 Hv 이상을 나타내었다. 211 Hv의 높은 경도값은 크레이터의 뒷부분에 집중되는 경향을 확인할 수 있으며, 이러한 경도분포를 통해 응고 시 각 영역별 냉각속도의 차이를 간접적으로 파악할 수 있다. 응고 시 냉각속도는 경도값이 상대적으로 낮은 영역은 느리게, 경도값이 상

대적으로 높은 영역은 빠르다고 할 수 있으며, 211 Hv의 경도값이 나타난 크레이터의 뒷부분이 앞부분보다 빠르게 냉각되었음을 알 수 있다. 각 영역을 확대한 사진을 각각 A, B, C에 나타내며 A영역보다 B영역의 조직의 크기가 더 작은 것을 확인할 수 있다. 또한 C영역에서는 급속응고로 인해 덴드라이트 형상의 조직이 관찰되었다. 따라서 크레이터부분은 용접부보다 빠른속도로 냉각되므로 경도값이 상승하였으며 크레이터가 가장 깊은 부분을 중심으로 크레이터의 앞부분보다 뒷부분의 경도값이 높으므로 크레이터의 뒷부분에서 균열감수성이 가장 높은 것으로 판단된다.

Fig. 11은 파형제어를 적용한 경우의 크레이터 경도 측정 결과로, 모재 140~150 Hv, 용접부 170~180 Hv의 경도값을 나타내었으며, 크레이터 부분은 용접부와 유사한 것을 확인할 수 있었다. 슬롭 다운을 적용하게 되면 레이저 출력이 0 W에 이르기까지 서서히 감소하다가 빔 조사가 정지하므로 크레이터는 용접부와 비슷한 냉각속도로 응고되며 따라서 파형제어를 적용할 경우 크레이터부분의 균열감수성이 감소할 것으로 사료된다.

3.2.2 용접부의 EDS 및 EPMA 성분분석

응고속도에 따른 용접부의 성분분포 경향을 조사하기 위하여 성분분석을 실시하였다. Fig. 12와 Fig. 13은 파형제어를 적용하지 않았을 경우에 크레이터 부분의 성분분석 결과를 나타낸다. Fig. 12의 EDS 점분석 결과 티타늄, 산소 및 질소 3가지 원소가 검출되었으며 전면 및 이면 비드의 표면인 No.1과 No.4에서 산소와 질소량이 보다 높은 것을 확인할 수 있다. Fig. 13의 EPMA 맵핑 결과를 살펴보면 EDS 점분석 결과와 유사하게 전면 비드 표면인 No.1에서 산소와 질소량이 높았으며 No.2~5는 성분 분포가 서로 유사하였다.

Fig. 14와 Fig. 15는 파형제어를 적용한 경우의 크레이터 부분 성분분석 결과를 나타낸 것으로 EDS 점분석 결과에서 티타늄, 산소 및 질소 3가지 원소가 검출되었으며 성분량은 서로 유사하였다. EPMA 맵핑을 실시한 결과 No.1~3 모두 성분분포가 유사하였으며 비드표면의 산소량이 높게 검출되었다. Fig.13과 Fig.15의 티타늄 성분 맵핑결과를 비교해보면 파형제어를 적용한 경우가 보다 티타늄 함량이 높게 나타났다. 이 결과는 파형제어를 적용할 경우 출력감소로 인해 입열량이 감소하여 상대적으로 산화 및 질화가 적게 되기 때문으로 판단된다.

따라서 파형제어를 적용할 경우 파형제어를 적용하지 않을 경우보다 티타늄 함량이 높았으며 두 경우 모두 전면비드 표면에서 산소함량이 높게 검출되었다.

Fig. 12 Results of EDS spot analysis of crater where wave shape control is not applied($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=2.5$ m/min)

Fig. 13 Results of EPMA analysis of crater where wave shape control is not applied($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=2.5$ m/min)

Fig. 14 Results of EDS spot analysis of crater where wave shape control is applied($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=2.5$ m/min)

Fig. 15 Results of EPMA analysis of crater where wave shape control is applied($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=2.5$ m/min)

4. 결 론

두께 0.5 mm의 순 티타늄 박판 용접 시 파이버 레이저를 이용하여 출력 파형제어를 적용하였으며 그 결과를 다음에 정리한다.

1) 용접 시작부에 슬로프 업 시간을 변화하여 용접을 실시한 결과, 슬로프 업 시간이 증가함에 따라 미 용접부가 증가하였으며 파형제어의 유무에 관계없이 기공, 균열 등 용접결함이 발생하지 않았으므로 슬로프 업을 적용하지 않는 것이 적절하다고 판단된다.

2) 용접 끝단부에서 슬롭 다운 시간을 변화하여 용접을 실시한 결과, 슬롭 다운 시간이 증가함에 따라 크레이터 및 험핑비드 결함이 억제되었으며 크레이터의 최대깊이 및 면적이 감소하였다.

3) 용접 끝단부에 슬롭다운 적용 시 레이저 빔 조사가 정지하는 테일링 파워를 조절함으로써 비드끝단부의 형상을 제어할 수 있었다.

4) 용접 끝단부의 슬롭 다운 적용유무에 따른 종단면의 경도특성을 평가한 결과, 슬롭 다운을 적용하지 않을 경우 용접부가 급속으로 냉각되어 경도가 증가하였으나 슬롭 다운을 적용할 경우 경도상승을 억제할 수 있었다.

5) 용접 끝단부의 슬롭 다운 적용유무에 따른 종단면의 성분분포 경향을 비교한 결과, 파형제어를 적용할 경우 입열량이 감소하여 불순물 혼입이 적으므로 티타늄 함량이 보다 더 높게 나타났다.

References

1. Jong-Do Kim, Ji-Sung 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)
2. Sadek A Alber, Abass Mahmoud, Zaghloul Bahaa, Elrefaey Ahmed, Ushio Masao, Investigation of dissimilar joints between low carbon steel and Monel 400, *Trans JWRI*, 29 (1) (2000), 21-8
3. Figert John, Rybicki Dan, Developing a welding procedure for joining Monel 400 to 316L stainless steel. *NASA M&P Update (NMPU) NASA M&P Update Newslett*, 2 (1) (1998)
4. HIRAISHI, M., Laser Lap-Welding of Stainless Steel to Cu Alloy, *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 17 (3) (1999), 420-425. (in Japanese)
5. Young-Pyo Kim, Cheol-Hee Kim, Young-Gon Kim, Sung-Min Joo, Trends of Technology Development of Friction Stir Welding Machine, *J. of Welding and Joining*, 34 (3) (2016), 1-5 (in Korean)
6. Jae-Do Kim, Ju-Hong Moon, C-ring stress corrosion test for Inconel 600 and Inconel 690 sleeve joint welded by Nd:YAG laser, *Corrosion Science*, 46 (4) (2004), 807-818
7. A. Vandewynckélea, E. Vaamondea, M. Fontána, P. Herwigb, A. Masciolettic, Laser welding head tailored to tube-sheet joint requirements for heat exchangers manufacturing, *Physics Procedia*, 41 (2013), 144-152
8. Hossain Ebrahimzadeh, Seyed Ali Asghar Akbari Mousavi, Investigation on pulsed Nd:YAG laser welding of 49Ni-Fe soft magnetic alloy, *Materials and Design*, 38 (2012), 115-123
9. M.H. Mahdich, M. Nikbakht, Z. Eghlimi Moghadam, M. Sobhani, Crater geometry characterization of Al targets irradiated by single pulse and pulsen trains of Nd:YAG laser in ambient air and water, *Applied Surface Science*, 256 (2010), 1788-1783
10. Yousuke Kawahito, Takeshi Terajima, Hisamich Kimura, Toshio Kuroda, Kazuhiro Nakata, Seiji Katayama, Akihisa Inoue, High-power fiber laser welding and its application to metallic glass Zr55Al10Ni5Cu30, *Materials Science and Engineering B*, 148 (2008), 105-109
11. J.D.Kim, J.S.Kim, S.W.Kim, C.K.Chun, S.J.Lee, I.D. Park and J.Seo, Crater Control by the Solidification Rate Adjustment in the Fiber Laser Welding of Pure Titanium, *2016 Spring Conference of the Korean Welding and Joining Society*, 46 (2016) (in Korean)