

동축 파이프 이음부의 레이저용접 공정변수에 관한 연구

김 용, 박기영, 이경돈

고등기술연구원 로봇/생산기술센터

Study on the Process Parameters for Laser Welding of Coaxial Circular Pipe Inner Flange

Yong Kim, Ki-Young Park and Kyoung-Don Lee

Institute for Advanced Engineering

Abstract

The laser welding was performed for the flange joint of two overlapped coaxial circular pipes which serve as the inlet and connector pipes of STS 316L. The laser welding test finally resulted in a good penetration depth of 1.8 to 2.0 mm. On the way to get the good welding quality, two important parameters were found to be optimized. One is the focal positioning which is the offset of the laser beam focus to the exact welding seam line, which is more critical in the inner flange laser welding. When the beam spot size was deviated more than 200 μm from the seam line, welding of two pipes is failed. The other is a gap size since a certain amount of gap is inevitable due to fabrication tolerance, or artificial allowances for smooth insertion of a pipe. However, it is required to restrict the gap allowance within 0.2mm to avoid undesirable undercut on a welding bead.

Key Words: Circular Pipe, Laser welding, Gap tolerance, Beam focal position, Flat plate

1. 서론

플랜트 시스템을 구성하는 파이프의 용접은 예로부터 많은 연구자 및 현장 엔지니어로부터 꾸준히 개발 및 개선되어 왔다. 이러한 파이프는 거의 대부분이 맞대기 용접 이음 형상을 기본으로 하고 있으며, 직경 및 소재, 그리고 적용환경에 따라 GMAW, GTAW, SMAW 등 용융용접부터 리벳 등의 기계적 접합까지 다양한 용접공정을 이용한다. 최근에는 파이프용접 전용 장비의 지속적 개발에 힘입어 오비탈(orbital)용접기의 개발 및 레이저 용접까지 적용되고 있는 추세이다.¹⁻⁴

이와 같이 용접된 파이프는 사용 환경에 따라 부식이나 균열 등으로 인해 유지보수를 해야 하는 경우가 많으며 대부분 작업자는 큰 어려움 없이 대상 파이프를 직접 절단 후 동일한 규격으로 교체하여 현장에서 재용접을 실시한다. 그러나 이러한 일련의 작업들이 방사능에 노출되어 있는 특수한 환경에 놓이게 되면 유지보수 작업들이 접근성

이 제한된 채 원격조작으로 이뤄져야 하는 특수성에 직면하게 된다.⁵

본 연구에서는 이에 따라 원격조작으로 유지보수가 가능한 적정 용접공정 및 용접 이음부 도출하기 위해 레이저를 적용한 파이프 용접을 실시하여 그 가능성을 확인하였다. 레이저는 자동화가 유리할 뿐만 아니라, 재현성 정밀도, 그리고 품질 측면에서 좁고 깊은 용입을 얻을 수 있어 타 용접공정에 비해 우수성을 나타내며 렌즈 규격에 따라 500 mm 이상의 거리에서도 용접이 가능하다. 뿐만 아니라 오염에 따른 유지보수 영역에 대해 이음부 설계를 플랜지 이음으로 할 경우, 오비탈 장비 등의 복잡한 장치 없이도 간단하게 용접될 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 방사능 노출 구조물에 적용되는 냉각수 연결모듈 파이프에 대한 레이저용접 공정조건에 대해 살펴보았다. 파이프 플랜지 용접에서 레이저 용접품질에 영향을 미치는 인자들을 파악하고 유지보수가 고려된 이음부를 도출하는 것을 목표로 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 파이프 연결부를 용접하기 위해 사용된 레이저는 빔 직경이 600 μm , 초점거리 200 mm 인 최대 3 kW의 CW Nd:YAG로 레이저 헤드는 6축 로봇에 장착하였으며, 모든 용접 조건에서 초점위치는 재료 상부표면을 기준으로 하였다. 대상 파이프는 모두 STS 316L로 이루어져 있으며, 외경 $\varnothing 60.5$ mm, 두께 5.85 mm 를 갖는 연결파이프(Connector pipe)에 외경 $\varnothing 48.6$ mm, 두께 2.0 mm의 안쪽 파이프(Inlet pipe)를 끼워맞추하였다. 안쪽 파이프의 2 mm 두께를 기준하여 목표 용입깊이는 2 mm로 하였다. 기타 내외면 파이프의 크기 및 두께, 설정된 실험변수에 대한 모식도는 Fig. 1과 같다. 레이저 빔 입사각은 초점거리 200 mm 렌즈에서 $\varnothing 48.6$ mm 파이프가 선형적으로 용접될 수 있는 $\tan^{-1}(24.3 \text{ mm} / 200 \text{ mm}) = 6.93^\circ \approx 7^\circ$ 로 고정하였다. 노즐의 접근성을 고려하여 보호가스는 사용하지 않았으며, 생산성이 요구되는 작업이 아니므로 출력을 2 kW 이하로 제한하고 용접속도 조절을 통해 2 mm 근방의 용입깊이를 갖는 용접조건을 도출하였다.

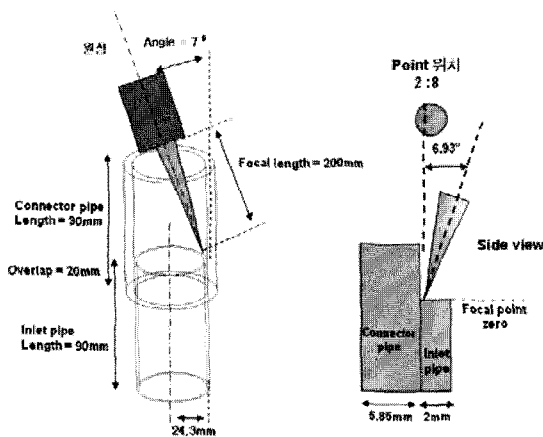


Fig. 1 Schematic diagram of the welding test.

파이프 내면 이음부 용접에서 가장 중요한 변수는 목표로 하는 용입깊이에 필요한 입열량과 함께 정확한 용접선 터칭과 이에 따른 빔 조사위치, 그리고 구조물의 관점에서는 이음부의 정렬(갭) 상태가 있다. 이에 따라 용접실험은 입열량, 빔 조사위치 및 갭 크기 이렇게 세 가지 관점에서 실험하여 최종 공정조건을 도출하였다. 공정실험은 일단 파이프 용접에 앞서 동일 소재의 평판(flat plate)로 예비실험 하였다. 또한 품질 확인 측면에서 최종 용접 후 단면 관찰 및 헬륨 기밀 시험(He leak test)을 통해 그 건전성을 확인하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 평판을 이용한 플랜지 용접

3.1.1 입열량에 따른 용입깊이

두께 2 mm 평판을 접친 후 목표 용입깊이가 나오는 용접조건을 도출하기 위해 다양한 출력-속도 조건에서 용접한 후 실제 깊이를 측정하였다. 속도는 로봇의 원형이동(circle moving)을 고려하여 3 m/min 이하로 제한하였으며, 이에 따라 출력도 2.0 kW 이하를 적용하였다. 빔 분할 비율은 Fig. 1과 같이 2 : 8을 유지하였으며 모든 조건에서 No gap 상태를 유지하였다. 결과는 Fig. 2와 같이 2 kW - 3 m/min의 조건 또는 1.5 kW - 1.5 m/min 두 조건에서 2 mm 정도의 용입깊이가 확보되었다.

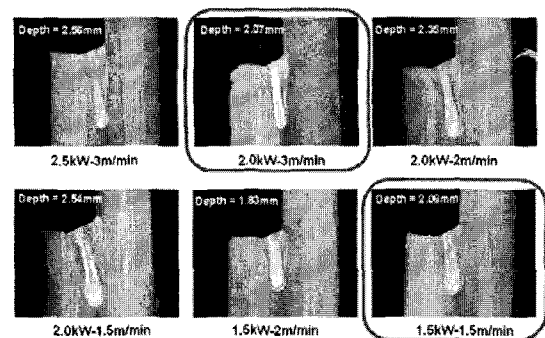


Fig. 2 Penetration depth for various conditions of laser power and welding speed.

3.1.2 빔 조사위치에 따른 영향

시험으로부터 도출한 조건 중 1.5 kW-1.5 m/min 조건으로 빔 조사위치를 측벽(connector pipe)기준 2 : 8, 5 : 5 및 8 : 2로 달리하여 용접을 실시하였다. 빔 분할의 수치는 600 μm 빔 크기에 대해 육안 상 판단한 기준으로 절대치는 되지 않는다. 그 결과는 Fig. 3과 같이 빔 조사위치가 측벽으로 치우칠수록 측벽 쪽에 포커싱 되기 전의 레이저 빔이 일부 접촉하여 에너지 손실로 인한 용입깊이의 두드러진 감소와 함께 외관 또한 그늘음이 심한 결과로 나타났다. 이에 따라 빔 조사위치가 용접품질에 매우 민감하게 반응하며 향후 용접시 정확한 용접선 터칭이 요구됨을 확인하였다.

3.2 파이프 내면 용접

3.2.1 레이저 출력 및 용접속도 조정

앞서 평판용접실험을 통해 도출된 용접조건(1.5

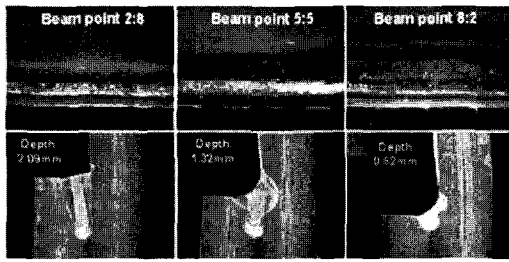


Fig. 3 Result of beam focus offset test.

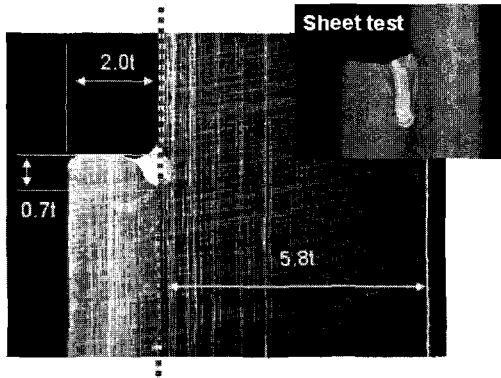


Fig. 4 Decreased penetration depth of pipe welded joint with 1.5 kW-1.5 m/min condition.

kW - 1.5 m/min)을 적용하여 파이프 내면 이음부에 대한 정확한 로봇 티칭 후 용접하였다. 용접 후 단면 관찰 결과 Fig. 4와 같이 용입이 약 0.7 mm 밖에 이뤄지지 않은 것이 확인되었다. 이와 같이 동일 용접조건(입열조건)에서 평판과 파이프 간의 용입깊이 차이가 나타난 이유는 정확히 판단하기 어려우나 파이프 내면 용접의 경우 용접부 사방이 파이프로 인해 차폐되어 플라즈마의 발생이 더욱 과도하게 나타나고 그 결과 레이저 빔 에너지가 모재로 충분히 전달되지 못해 용입이 얕아진 것으로 사료된다. 일반적으로 레이저 용접시 이와 같은 현상을 방지하기 위해 Ar 또는 He 등의 보호가스를 이용하여 플라즈마를 제거하지만 본 실험의 경우 구조적 특성 상 보호가스 노즐의 접근이 어려워 플라즈마 제거가 불가능하다.

따라서 파이프 용접에서 충분한 용입량을 얻기 위하여 레이저 출력과 용접속도의 상향 조정을 통한 입열량 실험을 재 실시하였다. 그에 따른 최종 결과로서 2 mm 근방의 용입깊이를 갖는 최종 조건을 도출하였으며 이때의 조건은 출력 1.8 kW, 속도 1.0 m/min, 빔 분할비율 2:8로 하였다. 용접 후 Fig. 5와 같이 임의의 세 곳을 절단하여 용입깊이를 확인하였고, 전체적으로 1.8 mm - 2.0 mm 깊이에서 안정적인 용입이 형성된 것을 확인하였다.

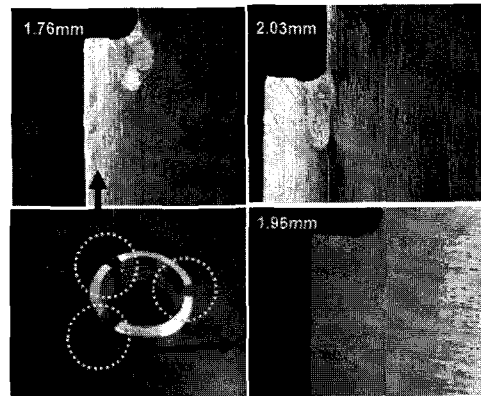


Fig. 5 Penetration depth with 1.8 kW-1.0 m/min condition.

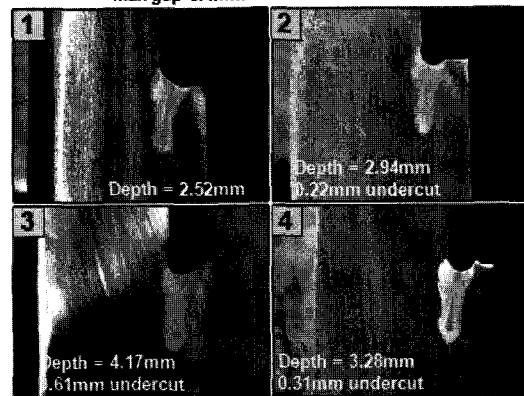
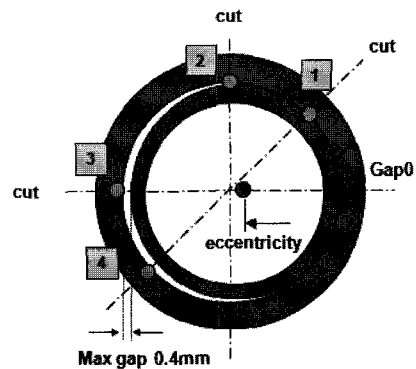


Fig. 6 Gap test results.

3.2.2 갭에 따른 용접성

레이저 용접에서 이음부 갭 관리는 최우선 해결 과제이다. 특히 파이프 용접에서 실제 용접 시 규격 파이프의 편심, 가공오차 등 여러 가지 문제로 인해 파이프의 진원도가 유지되지 않고 한쪽 면에 갭이 발생할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 인위적으로 0.4 mm까지 갭 영향을 살펴보기 위해 내경 파이프를 0.2 mm 외경 선반가공을 하였다. 이후 Fig. 6 과 같이 내경 파이프를 연결 파이프에 끼워 넣고 한쪽을 밀착시킨 후 용접하고 세 부분을 와이어커팅 후 각 위치에서의 용입깊이를 측정하였으며 그 결

과 또한 Fig. 6에 제시하였다. 분석 결과 갭 크기에 비례하여 언더컷 결함의 정도 및 용입깊이가 증가 되는 경향을 나타내었다. 본 용접 파이프의 헬륨 기밀시험 결과는 초 기밀성을 유지하여 0.4 mm 갭에서도 레이저에 의한 용융접합은 가능하였지만 0.2 mm 이상의 갭에서는 언더컷이 심하게 발생된 결과가 나타났다. 언더컷 결함은 실제 구조물에 장착되면 반복적인 수충격(water hammer)과 진동 등에 의해 노치효과로 작용하여 파손의 위험이 있으므로 갭 허용수준은 용접품질 기준 0.2 mm 이하로 관리되어야 함을 확인하였다.

5) R. Haange, "Remote handling maintenance of ITER," *Nuclear Fusion* 39(1999), 2043-2050.

4. 결 론

본 연구에서는 파이프 내면 레이저용접에서 공정변수가 용접품질에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 그 결과, 동일 용접조건에서 파이프 용접이 평판 용접보다 더욱 얇은 용입을 형성하는 것을 확인하였다. 또한 빔 조사위치가 용접 품질에 매우 민감하게 반응하며 정확한 용접경로의 티칭이 요구되며, 마지막으로 가공공차 및 정렬 불량으로 인한 갭 허용수준(가공공차)은 0.2 mm 이하로 관리되어야 함을 확인하였다.

참고문헌

- 1) C. M. Kim "Advanced Welding Processes for Line Pipes and Their Prospects", *Journal of KWS*, 20-5(2002), 588-594 (in Korean).
- 2) Dye. S. A., "New automatic machine for pipe welding", *Metal Construction and British Welding Journal*, 2-3(1979), 111-114.
- 3) H. J. Song, S. K. Lee, Y. H. Kang, S. J. Na, "A study on Seam Tracking and Weld Defects Detecting for Automated Pipe Welding by Using Double Vision Sensors", *Journal of KWS*, 21-1 (2003), 60-65 (in Korean).
- 4) Y.I. Son, K.Y. Park, K.D. Lee, "T-joint Laser Welding of Circular and Square Pipes Using the Vision Tracking System", *Journal of Korean Society of Laser Processing*, Vol. 12, No. 1 (2009), 19-24 (in Korean).