

스테인리스강 배관의 효율적인 접합을 위한 용접 시스템에 대한 연구 (I) - 4축제어 자동 용접 시스템 개발 -

김종도^{1†} · 송무근² · 이창제³ · 문찬희⁴ · 이종열⁵

(Received August 16, 2017 ; Revised October 10, 2017 ; Accepted November 15, 2017)

Study on Welding Systems for Efficient Joining of Stainless Steel Pipes (I)

- Development of a Four-Axes Control Automatic Welding System -

Jong-Do Kim^{1†} · Moo-Keun Song² · Chang-Je Lee³ · Chan-Hee Moon⁴ · Jong-Ryul Lee⁵

요약: 조선 및 해양플랜트 분야에서의 배관용접에서 수동용접의 문제점을 해결하기 위하여 오비탈 용접기나 로봇 용접기 등을 통한 자동화 용접을 적용하기 위한 노력이 지속되고 있다. 이러한 노력으로 배관라인을 따라 용접을 실시하는 오비탈 용접기가 개발되어 실제 현장에서 적용되고 있지만, 오비탈 용접기의 경우에는 배관라인을 따라서 설치된 레일을 통해 용접 헤드부가 움직여야 하기 때문에 레일을 탈부착 및 교체해야 하는 불편함과 셋팅 시간 소모의 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 오비탈 용접기의 단점 보완을 목적으로 PC(personal computer) 기반의 4축제어 TIG(tungsten inert gas) 용접 시스템을 개발하여 배관 자동 용접을 실시하였다. 구축된 시스템은 용접 토치가 아래보기 자세를 유지하면서 배관이 회전하는 방식으로 용접이 진행된다. 시스템의 제어부는 AVC(automatic voltage control) 시스템과 PC-NC(personal computer based numerical control) 컨트롤러로 구분되어 각각 용접 제어와 시스템 구동을 담당한다. 개발된 용접 시스템을 이용하여 스테인리스 강재 STS304L의 배관에 대한 용접을 실시하였다. 용접 시작부분의 전류와 용접 겹침부분의 전류를 슬로프 제어하여 최적의 조건에서 용접을 실시한 결과, 덧살 높이 및 이면비드가 미려한 용접부를 형성하였으며, 이를 통해 용접 재현성 확보 및 용접 불량률 개선을 위한 효율적인 자동 용접 시스템을 확인하였다.

주제어: 배관용접, 오비탈 용접, 4축제어 용접 시스템, TIG 용접, 재현성

Abstract: There have been continuous efforts to automate welding through the use of orbital welding machines or robot welding machines in pipe welding for the ship-building and offshore plant industries to solve the issues associated with manual welding. As part of such efforts, an orbital welding machine has been developed and industrially applied that automatically performs all the welding procedures along a pipeline. However, the welding head moves through the rail that is installed along the pipeline during the use of such welding machines. Therefore, there are disadvantages associated with having to install/detach or replace the rail, which requires much time for setting up. In this study, automatic pipe welding has been conducted by developing a four-axes TIG welding system based on PC that supplements the issues associated with the orbital welding machines. This system was established and operated with rotating pipes, and welding proceeded through the maintenance of a flat position. The control part of the system was divided into an AVC system and a PC-NC controller that are in charge of welding control and system operation, respectively. The welding procedures on STS304L stainless steel pipes were performed using the above developed system. As a result of welding optimization through the control of the current slope at the start of welding and near the overlap part of the welding, welds with outstanding reinforcement heights and back beads were formed. It was confirmed to be an efficient automatic welding system that ensured weld reproducibility and reduced welding defect rates.

Keywords: Pipe welding, Orbital welding, Four-axes control welding system, TIG welding, Reproducibility

1 † Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2125-0426>): Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, South Korea, E-mail: jdkim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4253

2 Laser Advanced Machining Support Center, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: mksong@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4676

3 BEST F.A, E-mail: lab@bestfa.co.kr, Tel: 055-286-6060

4 Korea Industrial Complex Corp., E-mail: mchtree@kicox.or.kr, Tel: 070-8895-7846

5 Technorise, Inc., E-mail: webmaster@technorise.co.kr, Tel: 051-974-9367

1. 서론

배관 라인은 배관의 소재뿐만 아니라 배관을 연결하는 접합부의 신뢰도 역시 매우 중요하다. 이러한 배관 라인을 완성하기 위한 접합공정은 대부분 용접에 의해 이루어지고 있다. 용접품질 문제 해결을 위해 조선, 선박 분야의 배관 용접에서 오비탈용접기나 로봇 용접기 등을 통한 자동화 용접을 적용하기 위한 노력을 지속적으로 하고 있다.

자동화 용접 장비의 적용은 용접의 재현성 확보 및 용접 불량률 개선을 통한 생산성 확보를 고려할 때 향후 산업 현장에서 주된 용접 방식이 될 전망이다[1]-[6].

국내 주요산업인 조선, 자동차 산업 등에서 용접 자동화는 40~45% 정도 이루어지고 있다. 배관 이음부 용접 자동화의 노력으로 배관라인을 따라 용접을 하는 오비탈 용접기가 개발되었으나, 오비탈 용접기의 경우 배관라인을 따라 설치된 레일을 통해 용접 헤드부가 트래킹(tracking)하는 시스템으로, 이는 배관에 따라 레일을 탈부착 및 교체해야 하는 불편함과 기기 세팅 등의 비용접시간이 길어진다는 단점이 있다[7]-[11].

또한 오비탈 용접의 각 위치별 용접 특성은 배관 원주 용접 시에는 배관의 각 구간에 따라 용접 형상이 변하게 된다. 오비탈 용접 위치의 정의는 고정 배관의 원주 용접시 일반적으로 Figure 1과 같다. 배관을 시계라고 생각했을 때 12시 방향에서는 아래보기자세(flat position), 3시 방향에서는 수직하진자세(vertical down position), 6시 방향에서는 위보기자세(overhead position), 9시 방향에서는 수직상진자세(vertical up position)가 된다. 따라서 용접 위치에 따라서 용접 전류, 전압과 용접 속도 등의 매개변수의 영향을 고려하지 않으면 안 된다. 용접시 용융 풀에 영향을 주는 인자는 중력, 표면장력, 아크력, 액상·고상의 계면장력 등의 인자가 있으며, 배관 용접 시 용융풀에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 중력과 표면장력, 아크력 등이다[12]-[15].

본 연구에서는 오비탈 용접의 단점을 보완하고 보다 효율적인 자동 용접 시스템을 개발하고자 아래보기 자세를 유지할 수 있는 배관 회전용 용접 시스템을 제작하였다. 또한 제작된 시스템을 사용하여 배관의 용접을 실시하여 자동 용접의 재현성을 확인하였다.

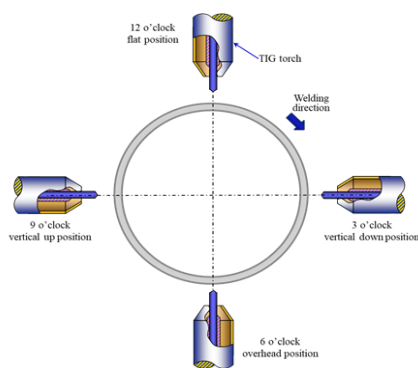


Figure 1: Orbital welding position

2. 4축제어 TIG 자동용접 시스템의 구성

본 연구에서 개발된 TIG 자동 4축 제어 시스템은 PC-NC 제어 기술을 적용하여 수치적인 3D CAM 데이터를 통해 동시제어 함으로써 작업자의 위험 동작을 구현하고, 회전과 틸팅 시스템을 결합함으로써 숙련된 전문 용접사와 같은 작업을 할 수 있도록 구성하여 제작하였다. 시스템의 구성은 배관 회전 방식을 채택하였다. 배관을 로딩(loading), 언로딩(unloading) 및 클램핑 시스템(clamping system)으로 고정하고 4축의 NC 자동축과 1축의 수동축을 사용하여 TIG 용접이 진행되도록 하였다.

2.1 기구부 및 용접부 시스템

자동 용접 시스템을 구성하기 위한 3축의 기구부는 배관을 고정하기 위한 베이스 위에 배관 길이의 다양함에 대응하고자 Figure 2와 같이 X축 슬라이드를 설계하였으며, 그 끝단에 Y, Z축 슬라이드를 부착하였다. X축 슬라이드와 Y, Z축 슬라이드는 PC-NC로 제어되며, 배관을 회전시켜주기 위한 롤러와 연동 가능하게 설계하였다. 동일한 사양 및 성능을 적용한 Y, Z축 슬라이드는 주행정밀도 및 시스템 반복정밀도의 오차를 $\pm 50 \mu\text{m}$ 이하로 제작하기 위해 고정밀 볼베어링을 적용하였으며, 수직축으로 장착되어 있어도 각 축에 대한 하중을 견디기 위한 브레이크 시스템을 적용하였다.

반자동 틸팅 및 배관 회전 제어 시스템은 원형 배관을 로딩과 언로딩 및 클램핑하기 위한 것으로서, Figure 3의 틸팅부는 용접품질의 향상을 위하여 배관과 플랜지 용접부의 내측, 외측 용접시 용접부 모서리가 중력방향을 향하여 기울일 수 있도록 제작하였다. 기울인 상태에서 배관을 회전시켰을 경우에도 배관의 미끄러짐이나 진동 등이 발생하지 않도록 롤러의 표면을 우레탄 소재로 적용하였다. Figure 4의 배관 회전부는 배관의 크기, 용접량에 따라 회전속도를 조절하고 3축 자동용접 시스템과 연동하여 시작 및 종료위치 등을 조절할 수 있도록 제작하였다. 상부의 롤러는 최대 2,000 kg의 하중으로 배관을 고정시킨 후 회전을 하게 하는 역할을 하며, 하부 두 개의 롤러는 배관이 회전하는 것을 돕는 역할로써 배관의 크기에 따라서 좌우 거리가 조절이 되며 웍기어 방식을 사용하여 유격을 최소화 시킨다.

C축은 기구부의 베이스 아래 부분에 장착되어 있는 서보 모터에 의해 양방향으로 회전이 가능하게 설계되어 배관의 기울기를 조절할 수 있도록 제작되었다.

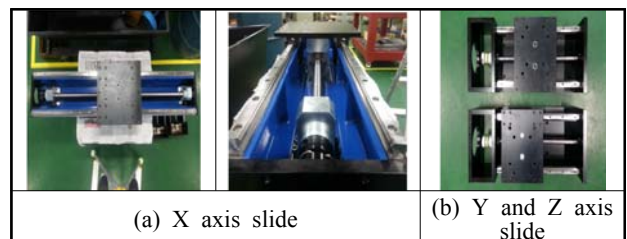


Figure 2: Photographs of X, Y and Z axis slide

최종적인 기구부의 구성을 Figure 5에 나타낸다. 각각의 축에 대해서는 PC-NC 기반의 서보모터가 장착되어 축을 구동하며, 다양한 크기의 배관을 적용하기 위한 지그가 장착되어 있다. 또한 AVC 시스템을 적용하여 위빙폭 및 아크 길이에 대한 정밀제어가 가능하도록 하였다.

기구부와 함께 주된 시스템을 구성하는 자동 용접기에 장착된 장비는 TIG DC 인버터 용접기, 냉각장치, 콜드와이어 송급장치, 호스팩 및 TIG DC 자동 용접토치 등이 있다. TIG DC 인버터 용접기의 기본 원리는 마이크로 프로세스에 의해 제어되는 완전 디지털 인버터 용접기이며, 운용중인 용접기 처리기는 디지털 시그널 프로세서와 연결되어 있어 용접시 양호한 용접 상태를 항상 유지할 수 있게 하였다. 또한 실제 데이터가 연속 측정되므로 변경사항이 발생하면 용접기가 즉각 반응하여 컨트롤 알고리즘에 의해 특정 상태를 항상 유지할 수 있다. 따라서 용접 프로세서가 매우 정교하고 용접 결과를 정확하게 재연할 수 있으므로 용접성을 극대화할 수 있도록 시스템을 구축하였다.

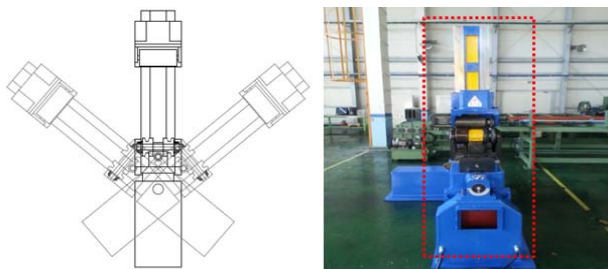


Figure 3: Semiautomatic tilting system

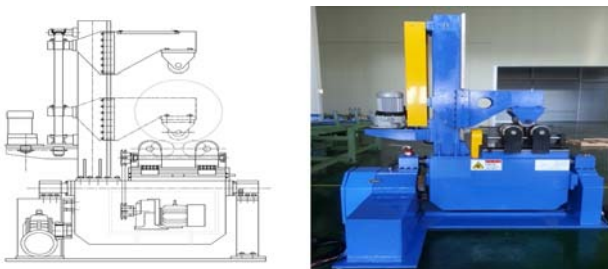


Figure 4: Pipe rotate system

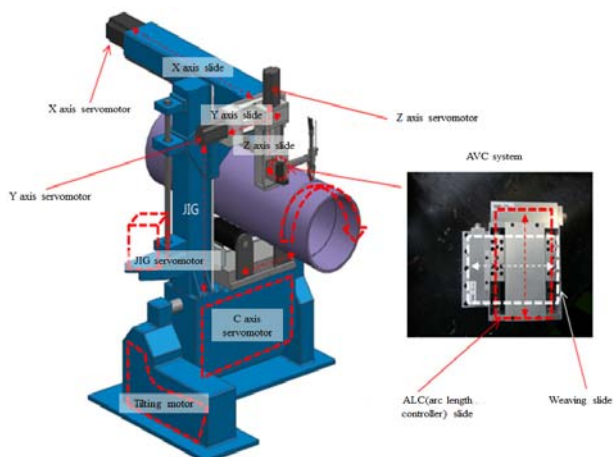


Figure 5: Schematic illustration of mechanical section

2.2 제어부 시스템

본 연구에 사용된 장비의 최적 구현을 위한 제어부는 크게 AVC 시스템과 PC-NC 컨트롤러로 구분할 수 있다. AVC 시스템은 배관 용접시 미려한 비드를 형성하기 위한 용접 제어부이며, PC-NC 컨트롤러는 모터 제어 입출력 신호에 따른 제어시스템 구성을 완료하여 자동 용접기의 전체 구동을 위한 제어부이다. AVC 시스템의 구현을 위해서 하드웨어를 디지털 제어방식으로 설계하고, 내부의 매개변수를 시각화하기 위한 디지털 LCD 제어 모듈을 내장하였다. 일반적으로 제어모터와 컨트롤러는 직접적인 결선을 통해 제어가 이루어져 과도한 케이블 무게 및 그에 따른 전선의 길이 제한이 문제가 되지만, 본 실험에 사용된 AVC 시스템은 AVC와 위빙축의 제어를 위해 RS-422 통신을 사용하여 매우 가볍고 간단한 결선으로 원격거리를 조정할 수 있으며, 유지보수 또한 매우 편리하게 제작하였다.

Figure 6에 보이는 바와 같이 통신을 이용한 모터 제어 방식으로 매우 작은 크기의 컨트롤러를 확인할 수 있다. AVC 시스템 구현시 용접위빙은 위빙 슬라이드에 의하여 용접 토치가 좌측에서 우측으로 반복적으로 움직이게 되며, 이때 움직이는 속도를 설정하여 토치가 설정 시간 동안 정지한 후 움직이게 된다. AVC 동작시 전류를 달리하여 용접하게 되면 토치 전압 및 전류가 변화하게 되므로 AVC의 기준전압 또는 전류도 함께 변화를 주어야 정상적인 AVC 기능이 작동하게 된다. 위빙을 AVC와 동기화하여 용접을 진행하면 보다 효과적인 용접시임을 얻을 수 있다. AVC가 작동하는 상황에서 위빙을 단순히 좌우로만 작동을 시키면 비드 높이가 높아지고 토우 앵글(toe angle)도 높아져 중첩부에서 결함이 발생하기 쉽지만 위빙시 유지시간에 따른 전류값을 다르게 세팅함으로써 매우 미려하고 결함이 없는 시임을 얻을 수 있다. AVC 시스템은 TIG 용접에서 와이어 송급기의 송급속도와도 동기화하여 용접을 진행할 수 있기 때문에 이와 같은 자동 동기식 용접을 위해서는 용접 장치의 인터페이스 출력신호 중 SYNC I/O 단자의 신호를 용접기 전류제어 및 와이어 송급기의 송급속도를 제어하여야 한다.

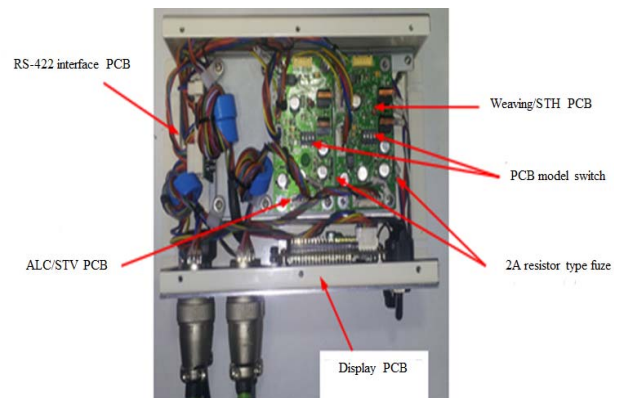


Figure 6: Composition of AVC controller

전체적인 용접기의 구동 제어는 PC_NC 컨트롤 시스템에서 담당한다. Figure 7에 자동 용접기 구동 메커니즘을 나타낸다. 그리고 자동 용접 시스템의 전체적인 순서는 Figure 8과 같이 진행하게 된다. 최초 자동 용접기를 구동하기 위하여 전원을 공급하고, 메인 컨트롤러, NC, 용접기, AVC, 각 축 서보 드라이브 등을 동기화시켜 용접 시작하기 전 각 기구부 및 제어부의 상태를 점검하게 된다. 동기화가 완료된 후 3개의 롤러 사이에 용접하고자 하는 배관을 세팅하고 X, Y, Z 축을 구동하여 용접 토치를 배관의 용접 부위에 위치시킨다. 용접 세팅이 완료되면 PC 컨트롤러 메인화면에 각 제어부의 가동 조건을 입력한 후 최종적으로 용접을 시작하게 된다.

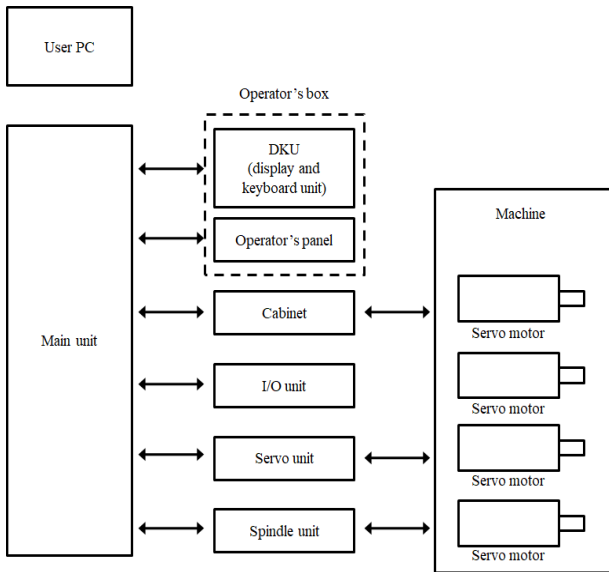


Figure 7: Actuation mechanism of automatic welding system

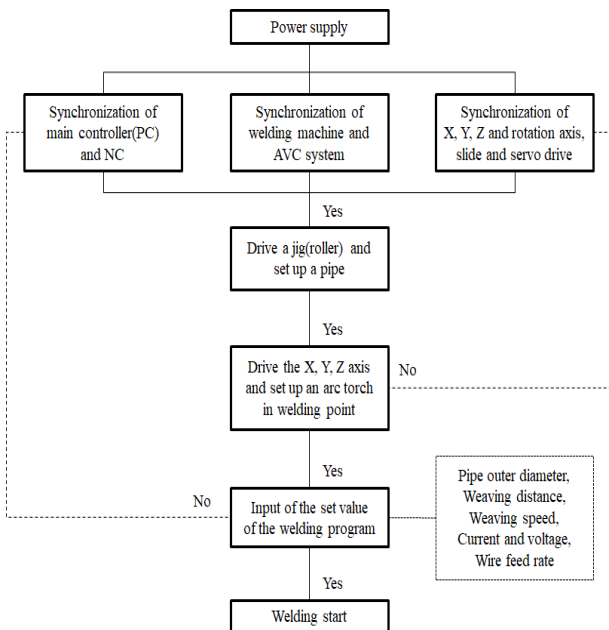


Figure 8: Flow chart of automatic welding system

3. 4축제어 시스템을 이용한 자동용접

연구를 통해 구축된 Figure 9의 4축제어 자동용접 시스템을 이용하여 배관을 용접하였다. 배관 회전식의 용접 방법으로, 피용접물인 배관을 회전체에 고정하고 용접 토치를 중력의 방향과 아크력의 방향이 일치되는 아래보기 자세를 유지하면서 배관을 회전시키며 용접을 진행하였다. 수평으로 이동이 조정되는 한 쌍의 수평롤러와 승강되는 수직롤러에 의해 배관을 클램핑하고 장착된 몸체를 소정각도로 틸팅(tilting) 시킴으로써 배관의 용접 각도를 확보하였다. 이러한 장비의 특성으로 인해 배관의 크기에 상관없이 용접이 가능하며, MIG, TIG 등 다양한 용접 프로세스를 적용할 수 있다.

본 연구에서는 STS304L 재료의 직경 50mm 배관을 TIG 용접하였다. 배관의 두께는 3mm였으며, 용접시 사용된 용접봉은 $\phi 3.2$ 의 직경을 가졌다. Figure 10에 최적조건에서의 용접 장비 사진과 용접 동안의 사진을 나타낸다. 비드솔림의 영향과 함께 중력의 영향을 최소화하기 위하여 용접 토치는 전진각 10°를 유지하고 배관 기울기를 20°를 준 후 용접을 진행하였다. 아래보기 자세에서 힘의 방향은 중력의 방향과 아크력의 방향이 일치하기 때문에 용융금속이 하부의 이면비드 쪽으로 큰 힘이 작용하므로 이면비드가 쉽게 블록해지거나 심하면 용락이 발생할 수 있다. 따라서 배관을 고정한 후 장비를 기울여 건전한 이면비드를 형성하고자 하였다.

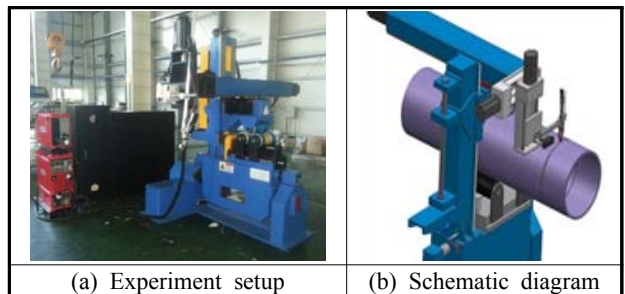


Figure 9: Constitution of 4-axes control automatic welding system

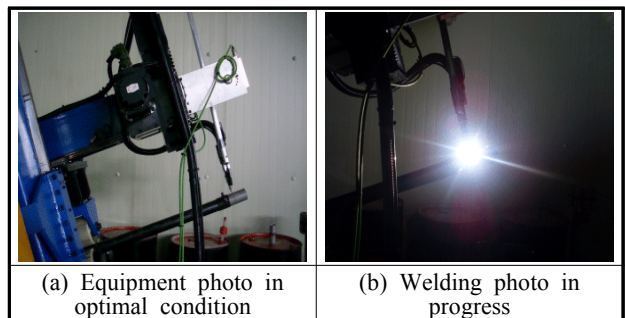


Figure 10: Welding pictures in TIG welding optimal condition

본 연구에서 사용한 용접기는 용접 시작부분의 전류와 종료 부분의 전류를 **Figure 11**과 같이 슬로프 제어할 수 있는 특징을 가지고 있다. 그림에 나타난 변수들은 배관 용접 시 용접부의 용입 및 비드 형상을 제어하고 용접 시작부분과 종료부분의 중첩부 결함 유무를 결정하기 때문에 다양한 실험을 통하여 신중하게 선정되어야 한다. 따라서 각각의 매개변수에 대한 실험을 진행하였으며, 결과적으로 배관 시험편에 대한 가장 적합한 용접 매개변수를 **Table 1**에 나타낸다. **Table 1(a)**의 시작부분과 종료직전까지의 배관 용접시 주전류는 242A이며, 40%의 시작전류에서 주전류까지의 상승 시간은 1초에 걸쳐 진행되었다. 용접 시작부와 종료부의 중첩부에서는 용입을 제어하기 위하여 **Table 1(b)**의 조건으로 변경하여 용접을 진행하였다. 전류가 226A로 변경되어 진행된 후 종료 직전에 0.3초간 20%의 전류로 하강하고 0.6초 지속된 후 용접이 종료되었다. 시험편은 그루브 없이 I형 맞대기 용접을 실시하였으며, 원패스 관통용접을 진행하였다.

최적의 조건에서 용접된 시험편의 표면과 이면 비드 그리고 용접부 단면 형상을 **Figure 12**에 나타낸다. 제시된 사진은 용접 시작 위치와 종료 위치의 겹침부(0°), 배관의 중간 용접부(180°) 그리고 용접의 종료 직전 위치(300°)에서 관찰된 용접 형상이다. **Figure 13**은 용접 시작부와 종료부의 겹침 영역의 종단면을 나타낸 사진이다.

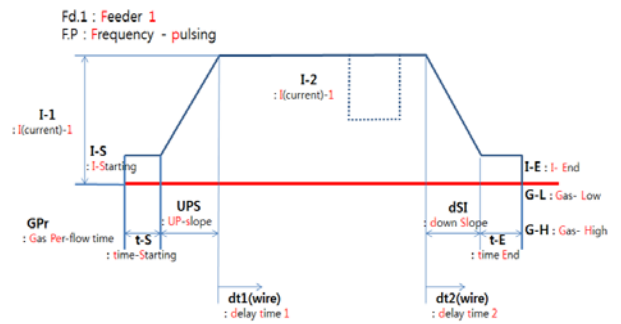


Figure 11: Parameter setting method of TIG welding

Table 1: Optimal parameter setting in pipe welding

(a) Start and middle part

I-S	UPS	I-1	dSI	I-E
40%	1.0s	242A	off	off
GPr	G-L	F.P.	Fd.1	t-S
0.1s	5.0s	off	0.8m/min	off
t-E	dt1	dt2		
off	0.3s	0.4s		

(b) Overlap part of end

I-S	UPS	I-1	dSL	I-E
100%	off	226A	0.3s	20%
GPr	G-L	F.P.	Fd.1	t-S
0.2s	10.0s	off	0.8m/min	off
t-E	dt1	dt2		
0.6s	off	0.4s		

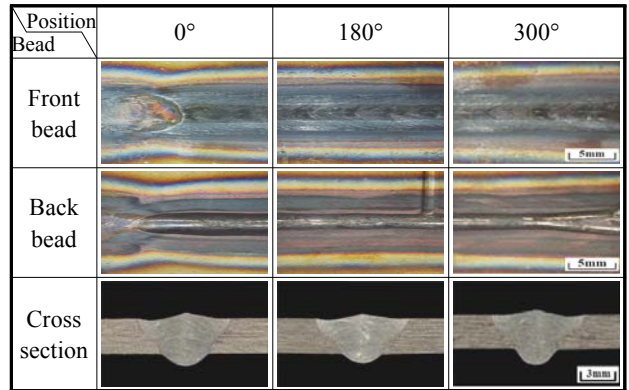


Figure 12: Bead appearance and cross section of optimal condition in pipe welding

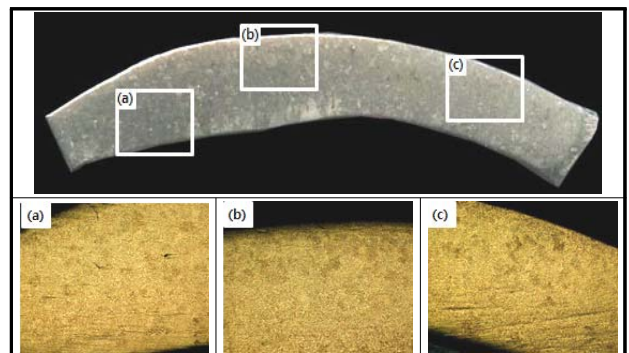


Figure 13: Longitudinal section in overlap welded part

비드 형상을 살펴보면, 표면 비드는 용접 토치에서 나오는 실드가스를 통하여, 그리고 이면 비드는 배관 양쪽을 거의 차폐하고 실드가스를 채운 후 약간씩 흘러보내면서 산화를 방지하여 표면 및 이면 비드 모두 건전한 비드가 형성되었다. 단면 형상을 통해 험핑 비드 및 언더컷과 같은 비드 결함이 없다는 것을 확인할 수 있다. 배관 용접시 내부결함으로 가장 취약할 수 있는 겹침부의 매크로 사진과 광학현미경 25배 확대 사진을 살펴본 결과 어떠한 기공과 균열은 발견되지 않았다.

결과적으로 원패스 관통용접임에도 불구하고 덧살 높이와 이면비드 모두 적당하며 결함이 없는 매우 건전한 용접부를 얻을 수 있었다. 4축제어 시스템을 이용한 반복적인 자동용접 실험을 통해 재현성 또한 확인할 수 있었으며, 이와 더불어 용접 불량률을 현저하게 감소시킬 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 배관 자동용접 기술의 단점을 보완하여 효율적인 용접 시스템을 구축하고자 PC 기반의 4축 제어 용접 시스템을 제작하고 자동용접을 실시하였으며, 그 결과를 다음과 같이 정리한다.

- 1) 구축된 시스템은 배관 회전 방식으로, 원통 플랜지 제품을 로딩, 언로딩 및 클램핑 시스템으로 고정하고 4축의 NC 자동축과 1축의 수동축을 사용한다.

- 2) X, Y, Z 및 C 축 등 각각의 축에 대해서는 PC-NC 기반의 서보모터가 장착되어 축을 구동하며 다양한 크기의 배관을 적용하기 위한 지그를 장착하였다.
- 3) 두께 3mm 스테인리스 강재의 직경 50mm 배관을 회전체에 고정하고 아래보기 자세를 유지하면서 I형 맞대기 원패스 TIG 자동용접을 실시하였으며, 이때의 용접 전류는 용접 시작부와 중첩부에 걸쳐 슬로프 제어를 하였다.
- 4) 최적의 조건에서 자동용접을 실시한 결과, 비드 결함 및 내부 결함이 없는 건전한 용접부를 얻을 수 있었으며, 자동 용접의 재현성을 확인할 수 있었다.

References

- [1] L. Portelette, Jean-Christophe Roux, V. Robin, and E. Feulvarch, "A Gaussian surrogate model for residual stresses induced by orbital multi-pass TIG welding," *Computers and Structures*, vol. 183, pp. 27-37, 2017.
- [2] J. Naumanna, and T. Michler, "Hydrogen environment embrittlement of orbital welded austenitic stainless steels at-50°C," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 35, pp. 6478-6483, 2009.
- [3] L. A. Hughes, B. P. Somerday, D. K. Balch, and C. S. Marchi, "Hydrogen compatibility of austenitic stainless steel tubing and orbital tube welds," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 35, pp. 20585-20590, 2014.
- [4] C. H. Kim, Y. D. Park, S. K. Lee, and J. W. Son, "A study on TIG automated welding technology of Pipe butt joint," *The 2012 Autumn Annual Meeting of Korean Welding and Joining Society*, p. 200, 2012 (in Korean).
- [5] J. D. Kim, M. K. Song, C. J. Lee, and C. H. Moon, "The characteristics of welding current control of overlap position in butt welding of STS316L pipe," *Proceedings of th 40th KOSME Spring Conference*, p. 72, 2016 (in Korean).
- [6] I. C. Jung and D. N. Shim, "The use of orbital TIG welding process for the construction and the repair of field piping," *The 2004 Spring Annual Meeting of KWS*, pp. 27-29, 2004 (in Korean).
- [7] W. J. Back, J. W. Lee, J. Y. Lee, and D. H. Lee, "Development of the orbital TIG welding robot control system," *Proceedings of KSPE 2013 Spring Conference*, pp. 501-502, 2013 (in Korean).
- [8] K. J. Kim, J. W. Kim, Y. B. Kang, and S. M. Cho, "Heat input control in orbital GTA welding to stainless steel and mild steel pipes," *Machinery Association Symposium of The Korean Society of Mechanical*

- Engineers*, pp. 2881-2885, 2002 (in Korean).
- [9] J. Katcuyama, Y. Yamaguchi, Y. Li, and K. Onizawa, "Effect of cyclic loading on the relaxation of residual stress in the butt-weld joints of nuclear reactor piping," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 278, pp. 222-228, 2014.
- [10] G. Lothongkum, E. Viyanit, and P. Bhandhubanyong, "Study on the effects of pulsed TIG welding parameters on delta-ferrite content, shape factor and bead quality in orbital welding of AISI 316L stainless steel plate," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 110, no. 2, pp. 233-238, 2001.
- [11] H. M. Shalaby, "Failure investigation of 321 stainless steel pipe to flange weld joint," *Engineering Failure Analysis*, vol. 80, pp. 290-298, 2017.
- [12] M. H. Park, I. S. Kim, J. H. Lee, J. P. Lee, Y. S. Kim, and S. O. Na, "An experimental study on prediction of bead geometry for GTA multi-pass welding in underhead position," *Journal of Welding and Joining*, vol. 32, no. 1, pp. 53-60, 2014 (in Korean).
- [13] H. W. Kim and S. M. Cho, "A study on back bead formation in inclined-up position of plasma arc orbital welding," *Journal of the Korea Welding and Joining Society*, vol. 27, no. 1, pp. 71-78, 2009 (in Korean).
- [14] W. S. Kim, Y. P. Kim, and C. M. Kim, "Development of girth automatic welding procedure of gas pipeline," *Journal of the Korea Welding and Joining Society*, vol. 28, no. 6, pp. 1-3, 2010 (in Korean).
- [15] K. M. Moon, S. Y. Lee, Y. H. Kim, M. H. Lee, and J. G. Kim, "Evaluation of corrosion characteristics on welding zone of leakage seawater pipe welded by underwater welding electrode," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 32, no.8, pp. 1240-1247, 2008 (in Korean).