

파이프 내면용접 자동화장치 개발에 관한 연구

김 학 형 · 김 일 수

A Study on Development of the Automated System for In-pipe Welding

Hak-Hyoung Kim and Ill-Soo Kim

1. 서 론

원유 및 액화가스 수송을 위한 파이프라인의 제조와 시공공정에서 용접은 소재 자체의 품질과 더불어 가장 중요한 기술로 작업환경의 특수성으로 인해 많은 제약을 받고 있다. 예를 들어, 상하수도용 파이프의 경우 공사가 야간에 진행되고, 매일 되메우기를 반복해야 하므로 건설경비 상승으로 국제경쟁력 저하의 주원인이 되고 있다. 이러한 관계로 건설경비의 절감을 위하여 인공지능 기법이 탑재된 초고속/완전 자동화된 파이프 용접시스템의 기술 개발이 요구된다¹⁻⁵⁾.

특히, 배관작업 및 대구경 관의 외면을 용접하려면 관의 외면에 용접장치를 설치 및 구동할 수 있는 공간 확보가 요구된다. 따라서 이러한 공간 확보에 따른 시공기간 연장 및 비용 증대의 절감을 위하여 파이프 내면에서 용접을 수행할 수 있는 내면 용접자동화 장비 개발이 필요하다.

용접자동화 시스템과 관련된 소프트웨어의 수요와 기대는 꾸준히 증대되어 왔으며 소프트웨어의 개발은 관련 알고리즘 및 노하우(know-how) 부족으로 사용자의 요구를 충족시키는데 중요한 역할을 하지 못하고 있다. 국내의 용접관련 소프트웨어는 소프트웨어 분야의 기본적인 원리와 그 개발노력 미흡으로 하드웨어보다 변화 속도가 늦은 경향이 있다. 특히 국내의 경우는 자동화용접의 용접조건 선정은 전적으로 작업자의 경험에만 의존하는 관계로 안정적인 용접품질의 확보가 현실적으로 불가능하다. 단순히 경험에 의존하여 결정할 경우, 용접시간 및 단위시간당 용접량을 예측하기 어렵고 고가의 장비에서 적절한 용접조건을 사용하지 않음으로 인해 용접시간이 길어지거나 용접불량이 발생할 가능성이 높다. 특히 부적절한 용접조건에 의한 용접불량을 사전에 방지하여 고품질의 용접을 기대할 수 있는 용접 기술의 개발을 통하여 용접 비숙련자에 의한 용접공정의 운용이 가능한 용접 자동화시스템의 개발에 대한 연

구가 시급히 요구된다.

따라서 본 연구의 목표는 파이프 내면용접에서의 고품질 용접을 위한 최적 용접조건을 선정하고, 통합관리 시스템을 구축한 다음 이를 이용하여 파이프 내면접합을 위한 자동화장치 제작하고, 이를 감시 및 제어 가능한 모니터링 시스템을 개발하여 이를 통합한 파이프 내면용접 자동화장치 개발이다.

2. 사용재료 및 실험방법

파이프 내면용접시 용접품질은 용접자세, 홈 형상, 용접속도, 용접 와이어의 크기, 토치각도, 텡-모재간 거리 등에 따라 변화하며, 그 중에서 중요한 용접조건은 아크전압, 아크전압, 용접속도, 위빙방법이다. 또한 파이프 내면용접 시스템 개발에 필요한 최적의 용접조건을 선정하기 위하여 각 두께별로 패스수 설정이 필요하며, 용접품질에 크게 영향을 미치는 변수로 아크전압, 아크전압, 용접속도를 선정하였다. Table 1은 본 연구에서 사용된 모재두께, 용접자세, 패스 수 및 개선각의 값을 나타낸다. 용접시 용접부의 역학적 조건 및 시험편이 수축, 팽창을 받지 않는 무한평판의 역학적 조건인 최소크기로 선정하였으며, 개선각은 60°로 가공하였으며, 루트간격(root opening)은 현장 전문가의 자문 및 관련 자료를 근거로 실제 작업현장에서 많이 쓰고 있는 2mm로 설정하였다⁴⁻⁵⁾.

실험에 사용된 용접와이어는 직경 1.1mm의 플럭스 코어 와이어이며, 용접전원은 Powerwave 455M을 사

Table 1 Welding Parameters and their limit

Variables	Value
Thickness(mm)	14, 16, 18
Pass No.	3, 4, 5
Welding Position(°)	0, 45, 90, 135, 180
Groove angle(°)	60

용하였다. 용접방법은 100%CO₂를 보호가스로 사용하여 FCA(Flux Cored Arc) 용접을 수행하였으며, 텡 높이는 15mm, 토치각, 워빙조건 및 Dwell time들은 각각의 용접조건별로 조절하였다. 또한 용접을 하기 전에 자중이나 작업 중 이동시에 변형을 방지하기 위하여 시편의 바닥부분에 보철물을 수동으로 가접하였다. Fig. 1은 본 연구에서 파이프 내면용접을 위해 설정한 용접자세(welding position)를 나타낸다. 구간을 45° 간격으로 5개로 분리하였으며 각각의 구간마다 용접자세(아래보기, 수평수직보기, 수평보기, 수평위보기, 위 보기 자세)를 달리하여 실험을 실시하였다. 용접실험 중 용접전류 및 아크전압을 계측하여 표준 용접조건을 산출하고 균일한 품질의 용접비드를 검출하기 위하여 아크모니터링시스템을 이용하였다.

용접수행 중 시험편의 적응은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 계단식으로 수행하여 두께별, 패스별로 육안으로 확인할 수 있도록 실험을 수행하였다. 특히 현재까지

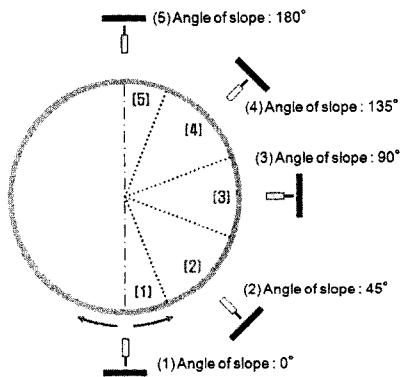


Fig. 1 Configuration of each welding positions for experiment

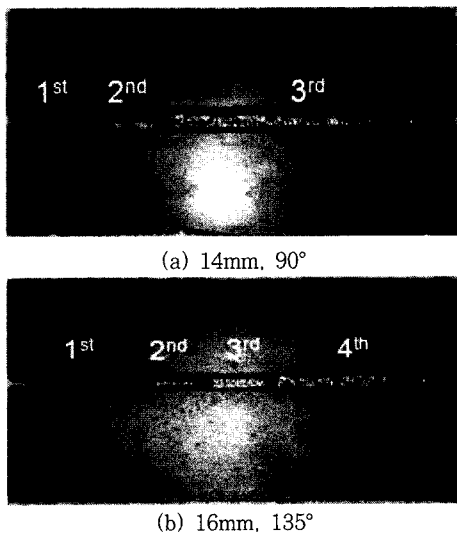


Fig. 2 Weld specimens after experiment for measuring the bead geometry

파이프 내면용접에 관한 표준화된 용접조건에 관한 자료가 전무한 관계로 현장 경험이 많은 작업자의 노하우와 관련 자료를 근거로 얻은 최적의 용접조건을 선정하였다. 용접 수행 후 비드형상을 보다 세밀하게 확인하기 위하여 3차원 스캐너를 이용하여 스캐닝 후 추출된 비드형상의 좌표 값을 2차원 데이터로 변환하여 표면비드폭 및 표면비드높이 값을 계측하였다.

3. 용접조건 통합관리 시스템 개발

3.1 파이프 내면용접조건 최적화를 위한 신경회로망 구성

파이프 내면용접조건 선정시스템은 내면용접에 필요한 기본정보를 입력하면 기존의 실험 및 관련 자료를 기초로 구축한 용접조건 선정용 데이터베이스 시스템으로부터 최적의 내면 파이프 용접용 조건을 결정한다. 하지만 데이터베이스에 포함되지 않은 최적의 용접조건을 선정하기 위하여 인공지능 예측 알고리즘을 개발하였으며, Fig. 3에 나타낸다. 이 시스템은 용접표준조건 선정용 신경망 모델, 용접품질용 신경망 모델, CNN(Corrective Neural Network) 모델로 구성되었으며, 관련된 기본값만 입력하면 자동적으로 최적의 용접조건 선정하도록 하였다.

개발된 파이프 내면용접조건 선정시스템은 기본정보 입력으로부터 최적의 용접조건을 결정하기까지 3단계로 구성하였다. 1단계는 기존 데이터베이스에 저장된 기본값(모재, 강관의 두께, 개선각, 패스수, 와이어 종류, 와이어 두께)을 기초로 신경회로망을 이용하여 최적의 용접조건을 결정하는 과정이며, 2단계는 초기 용접조건 결정시 고려되는 요소들(이음부 종류, 그루브 종류, 보호가스 종류, 가스용량, 아크길이, 토치각도)의 영향을 고려하기 위하여 신경회로망을 이용한 보정과정이며, 3단계는 선정된 파이프 용접용 용접조건이 만족하는지를 체크하는 off-line 시뮬레이터 과정으로 구성하

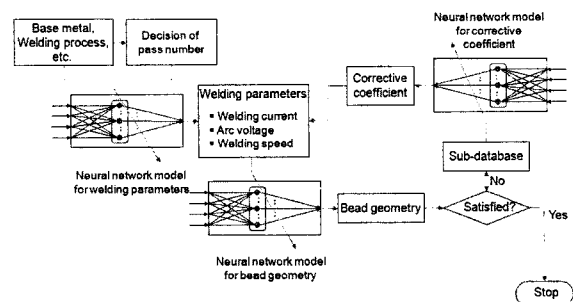


Fig. 3 Flowchart of an intelligent system for selecting the optimal welding conditions

었다.

용접조건 검색 및 예측 단계에서는 실험결과를 기초로 일차적인 최적의 용접조건을 검색한다. 그러나 데이터베이스에 저장되어 있지 않은 경우에는 신경회로망을 이용한 시스템에서 최적의 용접조건을 선정한다. 이용된 신경회로망의 모델 입력구조는 6개의 입력값, 각각 3개의 출력값(아크전류, 아크전압 및 용접속도)과 1개의 은닉층으로 구성되어 있다.

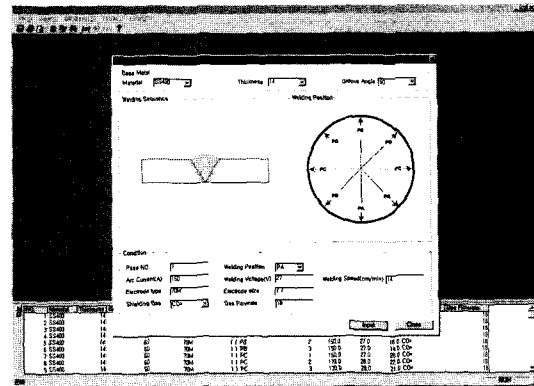
용접품질을 위한 신경회로망 모델에서의 입력데이터는 앞서 선정된 최적의 용접조건값을 통해 결정된 각 패스수 및 용접위치별 용접전류, 아크전압, 용접속도로 3개이며 표면비드폭, 표면비드높이, 이면비드폭, 이면비드높이 값을 용접품질 출력값으로 선정하였고 은닉층은 1개로 구성하였다.

파이프 내면용접에서는 용접상태 및 품질에 영향을 미치는 변수들이 상당히 많이 존재하기 때문에 완벽한 시스템을 구축하기에는 방대한 데이터량이 요구된다. 따라서 최적의 용접조건 결정시 고려되지 않은 변수의 영향을 고려하기 위하여 신경회로망 모델에 휴리스틱(Heuristic) 공정을 추가하였다. 여기에서 신경회로망 기법을 이용하여 기준값에 포함되지 않은 이음부 종류, 그루브 종류, 보호가스 종류, 가스용량, 아크길이, 토치각도의 변화 등의 영향을 반영하여 최적의 용접조건 수정을 위한 보정계수를 구하여 보정하였다.

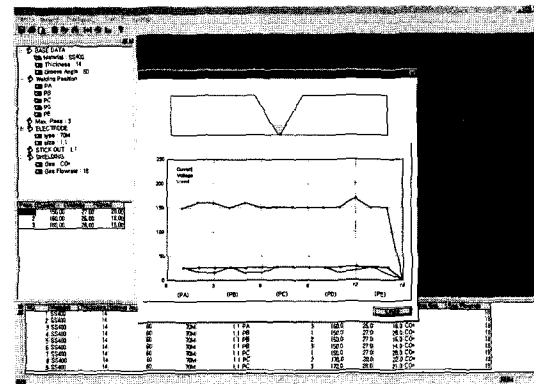
3.2 파이프 내면용접조건 통합관리시스템 개발

급격히 변화하는 H/W 및 S/W 환경에 대한 충분한 검토를 기초로, PC의 운영체제인인 Windows 기반 Visual C++를 이용하여 개발환경을 구축하였다. 개발된 시스템의 화면구조는 Menu 영역, Graphic 영역, Report 영역으로 분류하였다. Menu 영역은 Main-menu와 Sub-menu로 표시하며, 작업자가 메뉴를 선택하면 그에 해당하는 작업 메시지가 표시되거나 다이얼로그 박스가 나타난다. Graphic 영역에서는 본 시스템의 핵심 구성부분으로 파이프 내면용접조건 선정에 관한 사항을 화면을 표시하고, Report 영역에서는 개발된 시스템을 이용하여 선정한 최적의 용접조건에 대한 전체적인 결과를 Fig. 4와 같이 나타낸다.

이 시스템의 운영은 시스템에 관한 전문지식이 없는 작업자도 쉽게 이용할 수 있도록 대화식을 이용하였으며, 기존 데이터베이스 시스템과 독립적으로 수행할 수 있도록 구성하여 시스템의 효율성을 높였다. 특히 인공지능 기법인 신경회로망 이론을 이용하여 기존의 데이



(a) Input window for welding parameters



(b) Analysis and simulation window for welding conditions

Fig. 4 A typical sample for selection of the optimal welding conditions using the developed system

터베이스 시스템으로 용접조건 선정이 불가능한 다양한 입력변수와 출력변수와의 상관관계를 연동시켜 유기적인 결합체를 형성하였다.

용접을 수행하기 전 개발된 시스템으로 선정된 용접조건을 컴퓨터 off-line 상에서 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 구성하였다. 개발된 시뮬레이터를 이용하면 각 패스별, 용접자세별로 용접조건(용접전류, 아크전압, 용접속도)에 관한 전반적인 흐름 확인이 가능하며, 실질적으로 시뮬레이션을 수행함으로 파이프용접시 소요되는 시간뿐만 아니라 용접전류, 아크전압, 용접속도의 변화를 확인할 수 있다. 또한 이 선정된 값은 on-line 상에서 기준값으로 사용됨으로 피드백 제어가 이용한 특징을 갖고 있다.

또한 개발된 시스템에 입력된 초기의 기본값 외에 이음부, 그루브, 보호가스, 가스용량, 아크길이, 토치각도의 변화에 따라 영향을 고려하기 위하여 용접조건, 각종 주요변수, 확장변수를 입력이 가능할 수 있도록 구성하였다. 또한 휴리스틱 알고리즘을 이용하여 보정한 값을 기존의 용접조건들과 각 용접자세에 따른 각 패스

수의 용접조건을 일괄적으로 분석할 수 있도록 하였다. 따라서 실시간으로 윈도우 상에서 용접조건을 확인하기 위한 시뮬레이터(Simulator)로 용접 패스 및 용접 자세별 용접조건을 변화를 단계적으로 확인할 수 있었으며, 비드형상에 가장 중요한 영향을 미치는 초충비드의 크기를 확인할 수 있도록 구성하였다. 또한 계산된 데이터 값들의 출력창으로 화면의 축소 및 확대, 차후의 on-line 시스템으로 활용하기 위하여 문서의 형태로 출력 가능하며, 외부로의 파일 전송이 가능하도록 구성하였다.

4. 파이프 내면용접 감시/제어시스템 개발

직경 500mm를 기준으로 설계한 파이프 내면용접용 자동화장치는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 rail clamp, carriage, torch holder, torch mount, weaving unit로 구성하였으며 정격출력 100W의 주행모터와 30W의 토치 워빙모터를 장착하였다. 구동부 guide는 작업성을 고려하여 파이프 내면 중심을 기준으로 원주운동을 할 수 있도록 원형의 링 2개가 한 세트로 파이프 내면에 6점 지지방식의 연동척 형태로 구성하였다. 또한 구동부 guide 내면에는 기어-렉크 방식 선정을 통해 구동장치가 용접시 진동발생 억제 및 체결력을 적절히 유지하도록 하였다.

구동장치는 구동부 guide에 보다 정확하게 체결할 수 있도록 6개의 휠로 제작하였고, 휠 표면을 톱니형태로 구성하여 체결성을 향상시키고자 하였다. 또한 구동부를 servo motor로 구성하고 베벨기어를 이용한 동력 전달방식 선정으로 구동력을 원활하게 분산시켜 정·역회전시 제어가 용이하도록 구성하였다. 구동장치에 장착되는 torch holder는 상·하 스트로크를 60mm 범위로 조절할 수 있도록 구성하였으며, 구동부 torch holder를 장착하는 torch mount의 스트로크 범위는 100mm로 설정하였다.

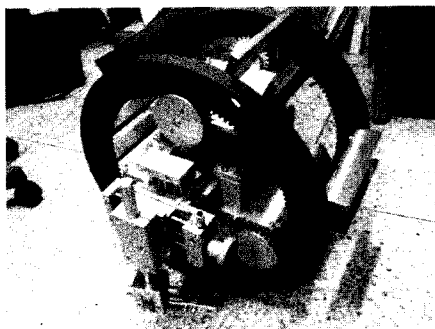


Fig. 5 Developed in-pipe welding equipment

일반적인 용접용 캐리지의 경우 구동축 모터와 연결되어 weaving 폭이 커지는 경우 용접속도가 상대적으로 느려지는 단점을 보완하기 위해 weaving 전용 servo motor를 따로 장착하고 타이밍 벨트-폴리 조합에 의한 motor의 정·역회전 및 아크 기동시 용접 중심선 조정을 위한 jog 운전을 용이하게 할 수 있도록 구성하였고, 제어할 수 있는 워빙폭의 범위는 $\pm 0 \sim 20\text{mm}$ 으로 선정하였다.

파이프 내면용접의 작업환경 특성상 용접중심선을 작업자가 직접 인지하여 용접중심과의 보정량을 직접 제어하기는 불가능하다. 따라서 용접선 추적을 위하여 용접 중 발생하는 용접조건 즉 용접전류 및 아크전압 신호의 변화를 감지하여, 이 신호를 실제 캐리지를 구동하는데 필요한 모터제어 신호로 변화시켜서 제어하도록 아크 센싱시스템을 구성하였다. 용접조건 계측은 두 개의 센서(전류센서, 전압센서)를 사용하여 계측신호를 수집하고, 필터링을 통해서 캐리지 주행 및 워빙 모터에 제어신호를 전달해줌으로써 캐리지 동작제어에 필요한 모터제어를 수행할 수 있도록 구성하였다. 아크신호 검출을 위하여 두 개의 센서를 용접전원과 토치 케이블 사이에 연결하여 용접조건을 실시간 계측할 수 있도록 구성하였으며, 아크신호는 PCI-6251, UMI-7774를 이용하여 수집하며, 수집된 신호는 PC로 전송되고 LabView VI를 이용하여 처리할 수 있도록 구성하였다⁶⁻⁸⁾.

이렇게 처리된 신호를 이용하여 Fig. 6에서 보는 바와 같이 개발된 파이프 내면용접장치를 구동하는데 필요한 제어변수 즉, 주행속도, 토치위치, 워빙폭 및 워빙속도 및 용접선추적 모드를 개발하였다. 제어부는 워빙, 주행, 토치동작을 제어하기 위한 각종 모터구동의 제어와 전류, 전압 데이터 수치의 제어를 담당하고, 구동부에서는 모터구동, 제어부와의 통신 및 설정값의 입·출

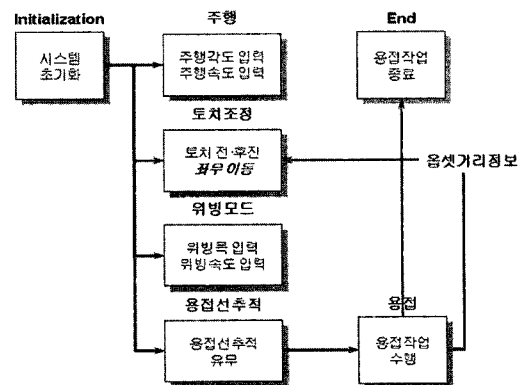


Fig. 6 Flowchart for controlling the developed in-pipe welding equipment

력값 제어를 수행하게 된다. 주행거리, 주행방향, 주행 속도를 입력하면 각도값을 펄스수로 계산하여 주행하게 된다. 만약, 용접작업 중 정지신호가 들어오면 용접작업은 중단하도록 구성하였고 위빙모드에서는 위빙폭 및 위빙속도값이 받아들여져 용접 시작신호를 보내면 용접을 수행하게 되는데 용접작업 수행 중 받아들여진 아크 센서의 신호에 따라 토치와 용접중심과의 거리가 변화하게 되면 초기에 설정된 토치정보를 수정하여 변화된 거리만큼을 보정할 수 있도록 하였다.

파이프 내면용접장치의 감시/제어시스템은 가상도구 기반의 자동제어 및 계측용 프로그램인 LabView를 사용하여 작성되었다. 현장에서 사용하는 작업자들의 이해가 쉬운 범용 프로그램 형태로 구성하여 데이터의 흐름에 따라서 프로그램이 구성되는 방식을 채택하도록 하였고, 작성된 코드를 타 프로그래밍 언어와 연동하여 사용 가능하기 때문에 응용성의 범위가 확대될 수 있는 특징을 가지고 있다. 파이프 내면용접의 특성상 거리를 각도(°)의 형태로 입력하게 구성하였고 각도입력은 범위는 0~180°의 범위를 숫자 또는 버튼을 jogging함으로써 설정할 수 있게 하였다. 주행속도의 경우 최대 1200mm/min 위빙속도는 0-10mm/s 범위 내에서 설정이 가능하도록 구성하였다.

개발된 파이프 내면용접장치의 구동테스트를 위한 용접실험을 수행하였다. 실험은 SS400 재질의 500×200×16mm의 크기로 45°의 개선을 가진 FCA 맞대기 용접을 수행하였다. 팁 간격은 모재 바닥면을 기준으로 20mm로 일정하게 유지하였으며 650A급 용접전원을 사용하였다. Fig. 7은 용접이 완료된 용접시편편을 보여주고 있으며, Fig. 8은 용접 중 파이프 내면용접장치 감시/제어시스템을 통해 취득된 용접신호를 나타낸다. 위빙 1주기 동안의 위빙신호가 나비모양(butterfly-shape)을 가지고 있는 것을 확인할 수 있었으며, 결론적으로 오프셋거리의 변화로 인한 보정량 적용 및 토치 위치 보정제어를 통해 개발된 장치의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

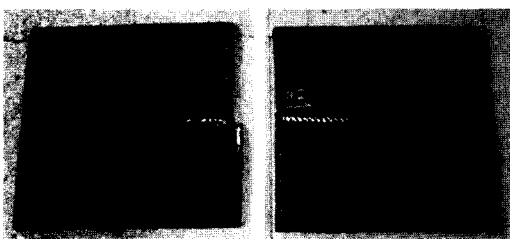


Fig. 7 Weld Specimens using developed in-pipe welding equipment

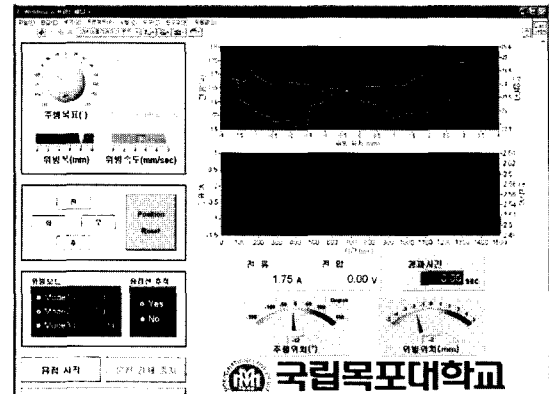


Fig. 8 Monitoring and control of welding conditions using the developed system

5. 결 론

파이프 내면접합을 위한 자동화장치 제작하기 위하여 모재두께, 개선각, 패스수, 용접자세 변화에 따른 용접 실험을 실시하고 표준용접조건을 선정하였고, 최적의 용접조건을 선정하기 위한 신경망 모델로 구성된 파이프 내면용접조건 선정 시스템을 개발하였다. 파이프 내면용접 작업특성상 발생할 수 있는 용접부의 왜곡을 용접선 추적을 위한 아크센서 시스템을 도입하고 PC를 이용한 감시/제어로 용접상태의 실시간 확인 및 제어를 통해 다층용접에도 적용이 가능한 고품질의 용접부 형상을 얻을 수 있는 통합시스템을 구축하였다.

향후에 실제 파이프 내면용접의 열악한 작업환경에 적요하기 위해서 가능한 많은 현장 데이터가 필요하고 용접시작/끝점 인식 및 용접품질 검사를 위한 비전 기반 자동화시스템의 도입이 필요한 것으로 사료되며 이를 위한 추가연구가 수행 중에 있다.

참 고 문 헌

1. C.M. Kim : Advanced Welding Process for Line Pipes and Their Prospects, Journal of KWS, 20-5 (2002), 588-594. (in Korean)
2. H. Masuda : New Technologies for Transmission Pipelines, IIW Document XII-1488-97, 1977
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. S. Nakamura, Y. Furukawa, Y. Ikuno, S. Kodoma and T. Maeda : Automatic Control Technology of Welding Machine MAG-II for Onshore Pipelines, Nippon Steel Technical Report, 92 (2005), 51-55
5. D.J. Widgery : Mechanized Welding of Pipelines, The

ESAB Welding and Cutting Journal, **60-1** (2005), 23-26

6. 광두영 : 컴퓨터 기반의 제어와 계측 - LabView, Ohm Inc., 2005

7. P.A. Laplante : Real-time Systems Design and Analysis, IEEE Press, 1997

8. R.C. Dorf : Modern Control System, Addison-Wesly Publishing Company Inc., 1992



- 김학형
- 1977년생
- 목포대학교 대학원 기계공학과
- 용접공정 및 용접자동화
- e-mail : kimhyoung@mokpo.ac.kr



- 김일수
- 1958년생
- 목포대학교 기계·선박해양공학부
- 용접공정 및 용접자동화
- e-mail : ilsookim@mokpo.ac.kr