

研究論文

파이프의 가스메탈아크 용접에 있어 센서 시스템을 이용한 용융지 제어 및 용접선 추적에 관한 연구

배강열* · 이지형** · 정수원**

A Study on control of weld pool and torch position in GMA welding of steel pipe by using sensing systems

K. Y. Bae*, J. H. Lee** and S. W. Chung**

Key Words : GMAW(가스메탈아크용접), Short Circuit(단락), Weld Pool(용융지), Penetration Control(용입 제어), Weld Seam Tracking(용접선 추적), CCD Camera(CCD 카메라), Image Processing(영상처리), Fuzzy Logic(퍼지로지), Welding Variable(용접 변수), Gap Size(갭 크기), Pipe Welding(파이프 용접), Root Pass(루트패스), Fill Pass(필패스), Arc Sensor(아크센서)

Abstract

To implement full automation in pipe welding, it is most important to develop special sensors and their related systems which act like human operator when detecting irregular groove conditions. In this study, an automatic pipe Gas Metal Arc Welding(GMAW) system was proposed to full control pipe welding procedure with intelligent sensor systems.

A five-axes manipulator was proposed for welding torch to automatically access to exact welding position when pipe size and welding angle were given.

Pool status and torch position were measured by using a weld-pool image monitoring and processing technique in root-pass welding for weld seam tracking and weld pool control. To overcome the intensive arc light, pool image was captured at the instance of short circuit of welding power loop. Captured image was processed to determine weld pool shape. For weld seam tracking, the relative distance of a torch position from the pool center was calculated in the extracted pool shape to move torch just onto the groove center. To control penetration of

※ 1998년 6월 17일 접수

* 정희원, 진주산업대학교 산업자동화공학과

** 정희원, 현대중공업(주) 산업기술연구소

root pass, gap was calculated in the extracted pool image, and then weld conditions were controlled for obtaining appropriate penetration. Welding speed was determined with a fuzzy logic, and welding current and voltage were determined from a data base to correspond to the gap.

For automatic fill-pass welding, the function of human operator of real time weld seam control can be substituted by a sensor system. In this study, an arc sensor system was proposed based on a fuzzy control logic.

Using the proposed automatic system, root-pass welding of pipe which had gap variation was assured to be appropriately controlled in welding conditions and in torch position by showing sound welding result and good seam tracking capability. Fill-pass welding by the proposed system also showed very successful result by tracking along the offset welding line without any control of human operator.

1. 서 론

파이프 구조물은 해양구조물, 배관, 철탑, 의장 등에 수요가 증대되고 있고, 이를 제작하기 위한 생산성과 정밀성이 요구되고 있다. 파이프 간의 결합제작 공정은 주로 루트패스(root pass, 초층)와 필패스(fill pass, 두 번째 이상 층) 용접으로 구성되며, 루트패스는 결합발생 가능성 등으로 인해, 숙련된 작업자의 경험에 크게 의존하여, 가스 텀스텐아크(GTA) 공정에 의해 용접되고, 필패스에는 주로 반자동형태의 가스메탈아크(GMA) 용접방법을 적용하고 있다. 파이프 제작에서, 용접의 품질 및 생산성 향상과 작업여건 개선 등을 위해서는 용접공정의 완전 자동화가 요구된다. 파이프 용접에서 자동화 장치가 용접작업자를 대신하기 위해서는 숙련된 용접사가 용접현상을 관찰하고 판단하여 이를 적절한 용접조건으로 산출해 내는 지식과 기능을 갖추고 있어야 하고, 나아가 용접사가 가지지 못한 지식, 판단 및 제어 기능을 탑재할 수 있어야 한다. 용접위치 설정, 용접선 추적 및 용접조건 설정은 파이프 용접에서 특히 작업자가 가진 기능과 지식이라고 간주할 수 있다.

파이프 용접에서는 용접위치와 용접각도에 따라, 용융지의 이동효과로 인해, 용입의 깊이가 좌우됨으로 용접부재의 크기에 따라 적정 용접 위치 및 각도를 설정할 필요가 있다. 따라서 파이프 용접을 자동화하기 위해서는 파이프 크기에 따라 용

접위치, 용접각도 등이 용이하게 변경설정이 가능한 기구장치가 우선 요구된다.

파이프 용접에서 용접부의 기계적 특성 및 건전성을 크게 좌우하는 부분이 루트패스 용접이다. 파이프 용접 부재의 경우, 파이프의 개선가공 과정에서 오차가 발생할 수 있고, 용접을 위한 가접에서 용접선의 기울어짐이 발생할 수 있다. 또한 파이프를 회전하는 회전장치의 편심에 의한 용접선의 오차가 유발될 수 있다. 한편 용융지는 자체가 가지고 있는 온도와 주위 개선형태에 따라 용융부의 중력, 표면장력, 점성 등에 따라 다른 형태와 용입 깊이를 갖는다. 용입의 형태는 압력이나 기밀이 요구되는 파이프 용접의 경우 매우 중요하기 때문에 이와 같이 형성되는 용입형태를 실시간으로 제어해 적절한 용입형태를 유지해야 할 필요가 있다. 이로 인해, 현재 적용되고 있는 파이프 용접용 자동화 장치의 운용은 용접작업자가 용접 도중에 토치를 지속적으로 용접선으로 위치시켜 가고 갭의 크기에 따라 용접조건을 변화시켜 가는 작업이 병행되어야 한다. 따라서 루트패스 용접을 완전 자동화하기 위해서는, 파이프의 진원도와 비대칭 회전에 의해 유발되는 용접선의 변화, 그리고 개선(groove)에서 불가피하게 발생하는 루트 갭의 변화에 대응하여 원하는 형태의 용입을 얻기 위해 작업자가 실제 용접하는 상황처럼, 용융지와 용접선을 관찰하여 실시간으로 용접조건을 변화시키고 용접사가 동시에 할 수 없는 여러 조건의 배합으로도 제어가 가능하도록 하여야 한다. 특히 중요한 부분은 작업자를 대신하여 용융지

와 용접위치를 관찰하여, 실시간으로 용접상황을 판단하고, 제어할 수 있는 센서시스템의 개발이 선행되어야 한다. 작업자의 시각능력을 대신하기 위해서는 시각센서의 활용이 불가피하기 때문에, 용융지를 관찰하거나 제어하기 위한 분야에서도 시각센서를 연구한 사례가 점점증하고 있다. GTAW공정으로 bead-on-plate 용접한 경우에, 아크광의 강도를 저감하기 위해, 장과장 통과필터를 CCD카메라에 부착하고, 용융지와 아크 영상을 획득하여 용융지 폭을 제어하는 방법이 제안되었¹⁾, GTAW 공정에서, 시각센서를 이용하여 용융지를 계측한 후, 용입 깊이와의 관계를 규명하였²⁾, Pulsed MIG 용접공정을 적용하여, pulse의 base 전류를 순간적으로 낮추어서, 아크광이 약화되는 순간과 동기하여 영상을 획득하는 방법과 이를 이용, 용융지폭을 제어할 수 있는 제어기가 제안된 바 있다³⁾. 또한 용융지를 아크광으로부터 분리하여 관찰할 수 있는 광학필터계를 개발하여 용융지 모니터링용 장치⁴⁾와, 용융지의 형태를 관찰하고 제어하여 루트패스의 용접을 자동화한 용접장치⁵⁾ 등 용융지를 관찰해 용접공정에 활용되는 상용 시각센서들이 출현되고 있다.

파이프의 필패스 용접의 경우는 주로 간이 자동화 장치를 사용하여 자동용접을 하고 있고, 파이프 진원도와 용접선 등에 오차가 발생되면, 토치를 용접선 위치로 조정해 나가는 용접선 추적을 작업자가 수행하게 된다. 따라서 이를 완전 자동화하기 위해서는 작업자의 용접선 추적 기능을 대신할 수 있는 지능형 센서의 개발이 요구된다. 개선을 가진 용접선을 추적하는 방법은 접촉식 센서를 이용하는 방법, 아크센서를 이용하는 방법⁶⁾, 시각센서를 이용하는 방법⁷⁾ 등이 개발되어 있으며, 정밀성과 경제성 등을 고려하여 센서의 종류를 선정하게 된다. 지능형 센서의 경우, 센서의 원리는 유사할 수 있으나, 센서기구, 구조 및 알고리즘 등에 따라 성능이 판이함으로 규격화되기는 어렵고, 적용 대상에 따라서 알고리즘의 변경과 개선이 요구되는 기술분야이다.

본 연구에서는 작업자 없이도 동작 가능한 지능형 파이프 자동용접 장치를 개발함에 있어, 파이프의 크기, 용접 위치 및 각도에 대응 가능한 기구장치를 제안하였고, 이를 구현하기 위해 하나의 가스메탈아크(GMA) 용접토치로써 모든 패스의 용접을 수행하는 서보형 파이프 용접 장치를 제작

하였다. 또한 시각센서로써 루트패스의 용융지 크기를 계측하여 루트패스 용접선 추적과 용융지를 제어하고, 아크센서를 이용하여 필패스의 용접에서 용접선을 추적할 수 있는 방법을 제안하였다. 파이프의 루트패스 용접에서는 저 전류의 GMA 용접이 가능한 점과 저 전류에서 나타나는 단락현상에서 아크가 일시 소멸되는 점을 착안하여, 단락순간에 동기하여 용융지의 영상을 획득하고 처리하여 용융지 크기, 형태를 판단한 후, 용입위치를 적절하게 제어하고자 하였다. 또한 인식된 용융지의 크기와 용접조건과의 관계를 설정하여, 용융지 크기에 따라 용접조건을 실시간으로 제어하고자 하였다. 이를 위해, 용접속도 조건을 퍼지로지화하여, 갭의 크기에 따라 용접속도가 실시간으로 가변될 수 있게 하였다. 이때의 용접전류, 전압은 용접속도에 종속적으로 변화되게 하였다. 필패스를 위한 아크센서는 필패스에서의 위빙이 가능한 점을 착안하여, 파이프의 개선면 양단의 전류차를 계측하고 이를 퍼지로지화하여 용접선을 추적 가능하도록 하였다. 또한 장치의 유용성을 위해 카메라 및 토치의 각도를 사용자가 설정할 수 있고 사용자가 용접상황을 더욱 용이하게 모니터링할 수 있는 사용자 인터페이스 환경을 제안하였다.

2. 파이프 용접시스템의 구성

2.1 용접 장치

파이프 용접시스템은 파이프를 회전시키는 포지셔너, 카메라 및 용접토치를 장착한 토치이송장치, 용접기 및 주변장치, 그리고 이를 제어하기 위한 제어기 및 컴퓨터로 구성하였다. 토치이송장치는 토치가 일정위치에서 전후, 상하, 좌우 이동을 가능하게 하고, 파이프 크기에 따라 자동으로 용접위치를 찾고, 용융지의 촬영위치로 카메라를 이동할 수 있는 서보기구를 갖추어 설계하여, Fig. 1과 같이 제작하였다. 하나의 토치로써 루트와 필패스를 용접할 수 있는 시스템으로, 용접위치는 직교 3축으로 접근하게 하고 용접토치와 카메라는 파이프의 특성을 고려하여 곡랙(curved rack)으로 이동되게 하기 위해, 파이프 직경의 크기에 따른 대응축(X, Y축), 용접위치에 따른 각도 및 카메라 각도(A, B축)를 조정하기 위한 곡랙, 용접선 추적에

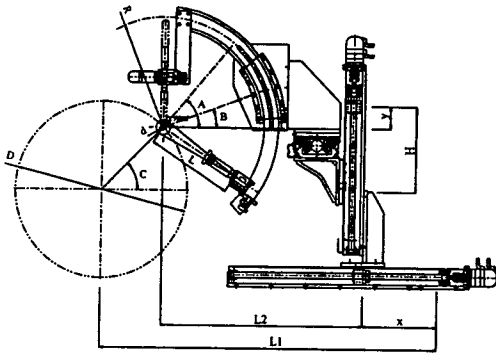


Fig. 1 Pipe welding system

따른 축(Z축), 파이프를 고정하고 회전하기 위한 포지셔너 축(C축)으로 구성하였다.

파이프 용접장치는, 파이프의 직경(D)과 용접 위치(c)가 주어지면 식(1)과 같은 좌표변환을 통해 용접토치가 용접위치(x, y)로 자동접근하고, 부재조건에 따라 산출되는 용접토치의 각도, 카메라의 각도로 자동 위치 설정된다.

$$\left. \begin{matrix} D \\ c \end{matrix} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} x = L1 - L2 - \frac{D}{2} \cos(c) \\ y = H - \frac{D}{2} \sin(c) \end{matrix} \right. \quad (1)$$

여기서, D : 파이프 부재의 직경, c : 용접 위치 각도, L1 : x축 원점에서 파이프부재의 중심점까지의 x방향 거리, L2 : y곡랙의 중심점에서 y축까지의 수직거리, H : y축 원점에서 파이프 부재의 중심점까지의 y방향 거리, x : 토치의 x방향 이동거리, y : 토치의 y방향 이동거리이다.

본 장치의 설계 및 제작에 앞서서는 Table 1에 나

Table 1. Specification for pipe welding equipment

Pipe Diameter	50~600 mm
Pipe Thickness	3.4~14 mm
Groove Angle	60°
Root Gap	3~5 mm
X-axis Stroke	600 mm
Y-axis Stroke	500 mm
Z-axis Stroke	200 mm
Torch Angle	15~90°
Camera Angle	-35~20°
Welding Position Angle	45~90°

타넨 바와 같이 철담용 파이프를 대상으로 파이프 용접장치의 적용사양을 설정하였다.

2.2 용접장치 제어

파이프 용접장치를 컴퓨터 제어하기 위한 제어 선도를 Fig. 2에서 보여주고 있다. 컴퓨터 제어기는, 용융지의 영상을 관측하고 영상 데이터를 기록하는 카메라 및 영상보드, 각 이송축의 서보제어를 위한 모션제어용보드, 용접전류를 계측하고 전류와 전압값을 설정하기 위한 AD/DA변환용보드, 용접기의 아크, 인칭 등을 위한 주변장치제어용 DIO 보드 등 주변장치를 제어하기 위한 보드와 이를 총괄 제어하는 컴퓨터, 교시반과의 인터페이스 부분, 셉트 신호를 처리하여 단락 신호를 추출하고 이를 카메라 및 영상 보드에 각각 영상촬영 및 영상획득 동기신호를 발생하는 단락감지회로보드 등으로 구성되어 있다. 컴퓨터 내에는, 공정의 순차적 처리를 위한 소프트웨어 기능, 루트패스 동안 용융지를 계측하고 영상 처리하여 용접조건 설정과 용접선 추적을 위한 알고리즘, 필패스 용접을 위해 워빙폭, 워빙주기 제어기능과 아크센서를 통한 용접선 자동추적 알고리즘을 탑재하였다. DA변환보드의 0~10V 아날로그 출력신호로써, 인버터 제어를 통해 포지셔너 즉 파이프의 회전속도를 가변 가능하게 하였고, 회전축의 엔코더 신호를 획득하여 회전 정도를 파악할 수 있게 하였다. 별도의 원격조작반을 두어, 이송장치, 용접기 등

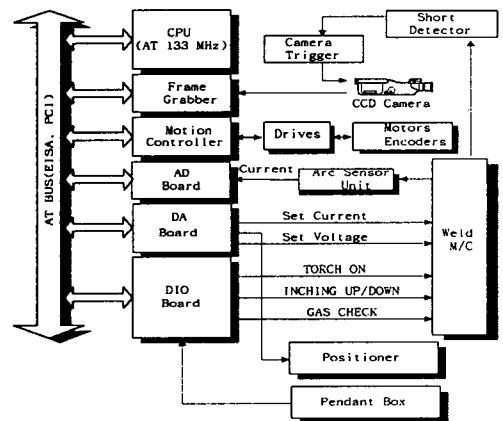


Fig. 2 Control system of torch position and weld pool

을 수동으로도 제어할 수 있게 하였다.

2.3 사용자 인터페이스 프로그램

사용자 인터페이스 프로그램은 용접조건 설정과 용접상태 메뉴를 표시하기 위한 모니터링 프로그램과 소프트웨어를 하드웨어와 인터페이스하기 위한 하드웨어 제어 프로그램으로 구성된다. 개발환경으로는 펜티움급 컴퓨터와 윈도우95를 이용하였고, 비주얼 C++ 4.0을 활용하여 인터페이스 프로그램을 작성하였다. 메뉴구성 화면상에, 용접위치 각도, 토치 각도 및 카메라 각도 등의 설정을 위한 부재조건 설정부와 용접조건 설정부를 두어 메뉴상에서 이들 조건이 직접 설정되게 하였고, 데이터 베이스를 활용한 설정도 가능하게 하였다. 제어 및 모니터링 화면에서는 테이블의 원점이동, 토치의 용접점 위치로의 이동, 용접기 제어 등을 가능하게 하였고, 용접전류, 전압, 속도, 용접진행정도 등 용접 중의 작업상황과 용융지를 동시에 모니터링하고, 용접조건을 실시간으로도 조정 가능하게 하였다.

3. 용융지 모니터링

3.1 시각센서

아크광의 경우 세기분포는 광범위한 파장대역을 갖는다. 용융지의 경우, 근적외선 영역의 파장대역을 갖고 있으나, 아크의 크기에 비해 매우 낮은 세기를 나타내고 있다⁸. 따라서 용융지를 관측하기 위해서는 아크광을 차단할 수 있는 광학기구가 요구된다. 본 연구에서는 용융지를 촬영하기 위한 시각센서의 구조를 제안하였고, 아크광과 스파터로부터 센서를 보호하기 위한 내열창, 근적외선 이상의 광을 선택하여 투과하는 적외선필터, 아크광의 투과율을 조절하기 위한 neutral density필터, 렌즈, 핀트를 조절하기 위한 접사링, 그리고 CCD카메라로 구성하였다. 용융지를 관측하기 위한 설계사양으로는 계측거리를 240mm, 계측가능범위를 35mm x 26mm, 용융지 예상 직경을 10mm, 카메라의 초점거리를 50mm, 근접촬영을 위한 접사링의 크기를 10mm로 설정하였다. CCD 카메라는 가로 768화소 (8.8mm), 세로 493화소 (6.6mm) 인 2/3"형으로, 시

야범위에서 분해능은 가로 0.04557mm/pixel, 세로 0.05355mm/pixel로 설정되었다.

3.2 단락 감지 회로

아크광을 차단하기 위한 광학계를 사용함에도 불구하고 아크광의 세기에 비해 용융지의 광은 매우 작아 용융지의 크기를 용이하게 추출하기는 어렵다. 한편 루트패스의 용접 특성상 저 전압과 저 전류의 용접조건을 사용함으로써 와이어가 모재와 주기적으로 접촉하게 되고, 따라서 전류의 크기가 주기적으로 상승하는 파형이 발생하게 되며, 아크가 소멸되는 단락현상을 보이게 된다⁹. 본 연구에서는 아크광의 영향을 최소화하기 위한 광학 필터의 선정과 동시에, 루트패스의 GMA 용접 공정에서, 단락순간에는 아크의 영향을 받지 않고 용융지의 관찰이 가능할 것으로 판단하여, 단락발생 순간을 포착하고자 하였다. 아크단락을 감지하기 위해서 Fig. 3과 같은 논리를 적용하였다⁷. 우선 셉트에서 계측된 0~5V의 전류신호를 3부분으로 분기하여, 첫 번째에서는 미분기를 이용하여 전류 상승부와 하강부의 폭을 정하고, 미분 결과를 반전시키고, 단락의 후반부가 구별되도록 조작한다.

두 번째 부분에서는 비교기를 이용하여 2.5V 이상의 단락영역을 비교기를 통해 구별하고, 이를 반전기로 반전시킨다. 세 번째 부분에서는 3.5V 이상의 부분을 구별해 낸다. 첫째와 둘째의 결과를 조합하여 단락의 전반부를 식별하고, 이를 셋째의 결과와 비교하여 단락의 전반 중앙부에서 단락감지 펄스가 발생하게 하였다. 컴퓨터에서 영상을 획득하고, 처리하고 제어명령을 내리는 등에 시간이 소요되기 때문에, 별도의 래치회로를 두어

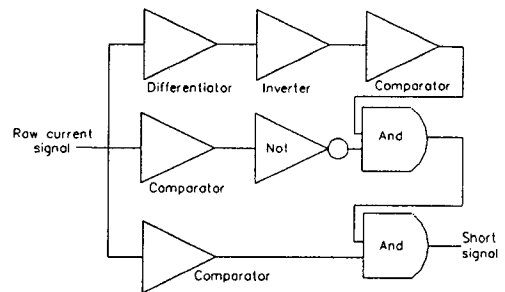


Fig. 3 Logic for short-arc detection

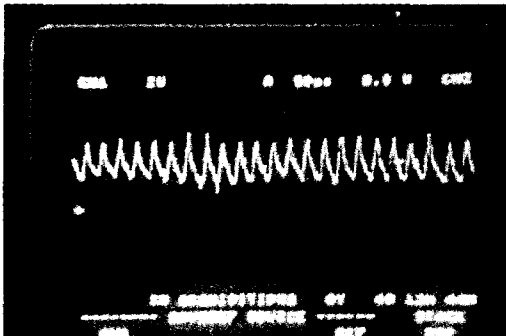
단락펄스가 생성되면 래치되게 하여 더 이상의 단락신호는 무시하고, 래치된 동안은 영상처리가 수행되고, 컴퓨터가 제반 영상처리 프로그램 수행 후, 다음 영상 샘플링 순간에 컴퓨터 DIO 보드에서 리셋신호를 발생하여 래치를 리셋하여 단락펄스가 다시 인가되어 유효하게 하였다. 컴퓨터 보드 출력과 단락감지회로 사이의 신호분리를 위해 광커플러(Photo Coupler)를 이용하였다. Fig. 4는 오실로스코우프로 측정한 원래의 전류신호와 전류신호로부터 추출한 단락순간의 펄스 신호를 보여주고 있다.

카메라의 촬영 트리거펄스로는 1H(수평동기 주기: $63.5\mu\text{s}$)~10H($635\mu\text{s}$)의 low신호펄스가 요구된다. 단락은 10~150Hz의 주기⁹⁾를 나타낼 것으로 예상되는 바, 이를 구현하기 위해 단락 감지회로에서 단락펄스에 의해 신호가 래치되면, 신호를 반전하여, 지연회로를 통과시켜 신호가 $300\mu\text{s}$ 지연되게 하

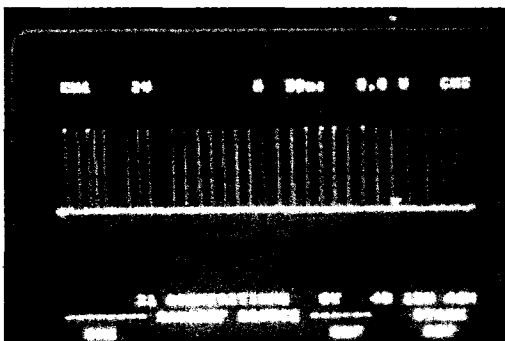
고 재차 반전시켜, 원 신호의 반전된 신호와 논리합하였다. 합성된 신호를 카메라의 촬영 트리거 신호로 활용하여 카메라의 셔터를 여닫게 함으로써, 단락시에 용융지의 촬영이 이루어지게 하였다. 영상보드에서 영상을 획득하기 위해서는 카메라의 촬영 트리거신호에 동기하여 $300\mu\text{s}$ 의 펄스 열을 발생하여 영상보드가 영상획득을 개시할 수 있게 하였고, 펄스 트리거 모드와 비동기(async.) 모드에서 NEXT Field 영상을 획득할 수 있게 하였다. 카메라는 프레임 리셋 모드의 field integration mode로 비디오 신호를 발생하게 된다. Field integration 모드에서 획득된 영상은 컴퓨터 메모리의 홀수열에만 영상이 저장됨으로, 짝수열은 홀수열의 영상과 동일한 값을 갖도록 영상획득 프로그램에서 설정하였다.

3.3 용융지 탐색

단락 순간에 용융지의 영상을 획득한 후, 영상으로부터 용융지의 실제 크기와 모양을 인식하기 위한 알고리즘을 개발하고자 하였다. 카메라에서 촬영한 영상 데이터를 실시간으로 처리하기에는 많은 시간이 요구된다. 본 연구에서는 이를 최소화하기 위한 영상처리법을 적용하였다. 용융지의 크기를 인식하는 방법은, 먼저 영상을 획득한 후 종방향으로 25 화소 간격으로 횡방향의 영상을 모두 합하여 최대 값을 갖는 횡을 선정하고, 다음에는 동형을 25개의 창(window)으로 나누어 각 창에서의 영상 평균값을 산출하여, 최대 값을 용융지 인식용 문턱값(threshold)으로 설정하였다. 각 창의 영상 세기 합에 대해 횡방향으로 미분을 취해 최대 미분 값을 갖는 창의 초기 화소 위치를 용융지 탐색 시작위치로 정하였다. 영상탐색은 탐색 시작위치에서 반시계방향으로 진행되는 것을 기반으로³⁾ 용융지의 경계에 접한 화소 위치를 찾고자 한 것으로, 7방향 방사형 윤곽선 추출방법으로 명명할 수 있다. 현재 위치에서 다음 위치의 탐색은 현재 점을 측정한 방향에서 45° 씩 반시계 방향으로 이동하면서 처음으로 문턱값 이상의 세기를 가진 화소를 만나면 이를 용융지의 경계로 인식하는 규칙을 적용하여 수행하였다.



(a) Current signal



(b) Short signal

Fig. 4 Short detection from raw current signal

4. 용접선 추적 및 용입 제어

4.1 용접선 추적 제어

용융지 영상에는 와이어의 그림자가 나타나게 된다. 용접 중 용접선을 추적하는 방법으로는, Fig. 5와 같이 와이어를 기준으로 용융지의 비대칭성을 갭의 이동 즉 용접선의 오차에 따른 결과로 간주하여, 용융지의 비대칭을 제거하는 방향으로 토치를 움직이는 방법을 적용하였다. 이를 위해 용융지의 면적 중심이 용접선의 중앙이라고 간주하여 용접선의 중앙위치를 산출하고, 용융지 영상으로부터 와이어의 중심위치를 탐색하여, 와이어의 중심위치, 즉 토치를 용접선의 중앙으로 이동하게 하였다.

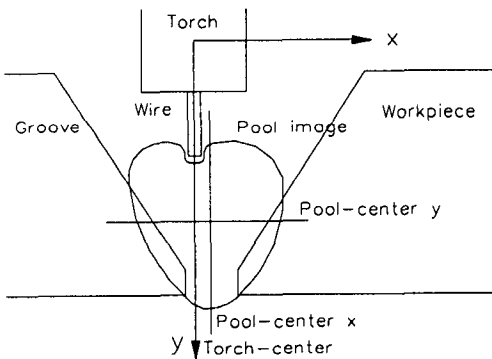


Fig. 5 Feature extraction in weld pool image

용융지 영상에서 와이어의 위치를 탐색하기 위해, 우선 가로축에서 영상 시작과 영상 중앙위치의 중간위치와, 영상 중앙과 영상 가로축 최대 위치와의 중간 위치 사이의 행들에서, 각 행의 영상 세로축 시작위치에서 세로축 중앙위치까지의 세기를 합하였다. 각 행의 영상 세기를 비교하여 최소 값을 찾고, 최소 값을 나타낸 행 위치를 토치의 임시 중앙 위치로 설정하였다. 토치 임시 중앙 위치에서 좌우 설정 위치까지 각각 이동하면서 합산된 영상 크기를 미분하여, 최대 최소 값이 나타난 위치들을 와이어의 각 가장자리로 설정하고, 이를 평균하여 와이어의 중앙위치를 산출하였다. 영상으로부터 용융지의 형상을 분리하여, 면적중심법으로 중심

을 구하였고, 용접 시작 순간에는 토치가 용접선의 중앙에 놓여진 상태로 간주하여, 초기 3회의 용융지 가로축 중심을 평균하여 용융지의 기준 중심위치로 설정하였다. 영상의 중심인 용접선까지 와이어의 중앙 위치를 옮김으로써 용접선의 추적이 수행되도록 하였다.

4.2 용입 제어

용접 현상은 비선형적이며, 또한 각각의 용접변수들은 상관관계를 가지고 있어, 용접 비드형성 과정의 수학적 모델링과 모델결과의 해석은 매우 어렵다. 따라서 용융지 제어를 실현하기 위해서는, 종래의 고전적 제어방법으로는 어렵고, 비선형적인 상관관계를 정성적으로 선형화하여 표현할 수 있는 대안 알고리즘이 요구된다.

파이프 용접의 경우, 용접사는, 용접 수행 중, 갭이 확대되면 속도와 전류를 줄이고, 갭이 축소되면 속도와 전류를 증가하는 방법을 적용한다. 갭의 크기가 증가되는 것으로 판단된 경우, 속도를 줄여야 용접이 양호하다는 것이고, 한편 속도 감소로 인하여 덧살(reinforcement, 비드의 높이)의 크기가 증가되고 이는 용입의 추가적 증가를 유발하므로, 전류를 줄여 이를 억제하고자 하는 것이다. 반대로 갭의 크기가 감소되는 것이 감지되는 경우, 전류를 증가시켜 용입을 유지하게 한다. 이때 전류의 증가로 인해 덧살의 증가가 유발됨으로 이는 속도를 증가함으로써 억제할 수 있다. 용접사가 가진 지식은 용접도중의 상황에 따른 판단 조정능력이기 때문에 이와 같은 용접사의 지식을 체계화하고 정량화하기 위해서는 많은 경우에 대한 실험을 통해서 가능하다. 따라서 갭의 변화에 따라 용접작업자가 행하는 조정기능은 매우 적절한 것이고 이를 기계장치에서 구현하는 것이 공정을 자동화하기 위한 가장 바람직한 아이디어로 판단하였다. 이를 위해 우선 본 연구에서는, 용접작업자가 용접 중 용융지 하단의 갭의 크기를 관찰하듯이, 시각센서로써 갭의 크기를 계측하고자 하였다. 센서 영상에서 추출된 용융지에서, 최하단으로부터 높이방향으로 10화소 높이(0.5mm)에 걸쳐 존재하는 용융지의 폭을 각각 구해, 평균 폭을 산출하고, 이를 용융지에서 직접 계측한 갭 크기로 설정하였다. 용융지 최하단의 용입부는 갭 내에 존재하므로, 용융

지 영상에서 계측된 갭 크기는 실제 갭의 크기와 밀접한 관련성을 가진다고 가정하고, 그에 상응하는 적합한 용접조건을 실시간으로 설정함으로써, 갭의 변화에 대응하도록, 용융지를 제어하고자 하였다. 용융지 영상으로부터 계측된 갭의 크기와 부재의 실제 갭의 크기에 대한 상관 관계는 용입 제어 실험(6.2 절)을 통해 규명할 수 있었다.

갭의 크기와 용접조건 사이의 적절한 관계를 구하기 위해, 본 연구에서는 갭이 각각 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0mm일 때의 각각에 대해 이면 비드가 정상적으로 형성되는 표준 용접조건을 구하는 실험을 행하여, Table 2와 같이 갭의 크기 별로 용입 깊이가 양호하게 형성되는 용접조건을 얻었다. 실험의 결과에서, 갭의 크기가 증가하면 속도와 전류가 동시에 감소되는 결과를 보이고 있어, 전술한 용접사의 지식이 정량적으로 표현되었음을 알 수 있다. 본 연구에서는 용융지를 계측하고 용융지 최하단에서 부재의 갭을 추정하여 갭의 크기가 변화될 때, 용융지 형태를 갭에 적합하게 유지하기 위해서, 즉 갭의 크기 변화에도 불구하고 용입 형태를 적절하게 유지하기 위해, 이에 대응되는 용접조건이 Table 2에 근거하여 실시간으로 재설정될 수 있는 알고리즘을 적용하였다.

Table 2. Suggested welding conditions for producing good back-bead shapes

Gap size, mm	Speed, mm/sec	Current, A	Voltage, V
2.0	2.4	190	20
2.5	2.2	185	20
3.0	2.1	180	20
3.5	1.8	175	19
4.0	1.7	170	19

갭 변화와 용접속도 변화의 관계 설정을 위해서는 퍼지론적의 적용을 제안하였다. 제안된 퍼지론적에서는 두 가지 변수를 퍼지 집합화하였다. 첫째는 기준 갭 크기(r)와 특정 순간(n)에 계측된 갭 크기($x(n)$)와의 차, 즉 오차 $e(n)$ 이고, 둘째는 오차의 변화량 $\Delta e(n)$ 이다. 퍼지규칙은 다음과 같은 정성적 해석에 기반을 두었다.

- 1) $e(n) > 0$ 이면, 갭은 작은 상태이다.
- 2) $\Delta e(n) > 0$ 이면, 갭은 작아지고 있는 상태이다.

3) $e(n) < 0$ 이면, 갭은 큰 상태이다.

4) $\Delta e(n) < 0$ 이면, 갭은 커지고 있는 상태이다.

이와 같은 해석을 기준으로 하여, 퍼지 제어규칙을 설정하기 위해, 다음과 같은 정성적인 제어 방향을 설정하였다.

1) 갭이 작고($e(n) > 0$ 이고), 갭이 작아지고 있으면 ($\Delta e(n) > 0$ 이면), 속도를 많이 높여라($\Delta u \gg 0$).

2) 갭이 크고 ($e(n) < 0$ 이고), 갭이 커지고 있으면 ($\Delta e(n) < 0$ 이면), 속도를 매우 낮추어라($\Delta u \ll 0$).

3) 갭이 크고 ($e(n) < 0$ 이고), 갭이 작아지고 있으면 ($\Delta e(n) > 0$ 이면), 속도를 조금 낮추어라($\Delta u < 0$).

4) 갭이 작고 ($e(n) > 0$ 이고), 갭이 커지고 있으면 ($\Delta e(n) < 0$ 이면), 속도를 조금 높여라($\Delta u > 0$).

이러한 정성적 제어방법을 Table 3과 같이 퍼지 규칙화하였다. 규칙 베이스의 가로축은 오차의 변화율을, 세로축은 오차를 나타낸다.

Table 3. Rule base for pool control

	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	ZO
NS	NB	NS	NS	ZO	PS
ZO	NS	NS	ZO	PS	PS
PS	NS	ZO	PS	PS	PB
PB	ZO	PS	PS	PB	PB

여기서 N은 음의 크기, P는 양의 크기를 의미하고, B는 큼, S는 작음, ZO는 영임을 나타낸다. 퍼지 제어 규칙에서는 갭의 크기 오차와 오차의 변화량으로써, 속도의 크기 변화량을 설정하게 된다. 퍼지집합의 종속도를 표현하기 위한 멤버십 함수는 삼각형 형태를 선정하였다. 멤버십 함수의 선정은, Table 2의 용접조건을 적용하고, 제어 파라미터의 가변영역을 균등하게 나누어 설정하였다. 오차의 퍼지집합은 오차의 크기가 0, ± 0.5 , ± 1.0 mm인 경우를 설정하였고, 오차의 변화량은 크기가 0, ± 0.125 , ± 0.25 mm를 퍼지집합화하였으며, 속도의 증감은 크기가 0, ± 0.2 , ± 0.4 mm/sec 를 각각 퍼지집합화하였다. 갭 크기 오차와 오차 변화량의 각 포함정도가 교집합하여, 산출된 정도가 제

어량의 포함정도를 결정하게 하는 Min 기법과 각 퍼지집합의 연산결과와 합을 퍼지제어량으로 하는 Max 기법을 이용한 Min-Max 기법으로 추론하고 연산하였고, 면적중심법으로 defuzzy화하여 퍼지 연산 결과를 도출하였다. 퍼지 연산결과에 의거, 정량적인 속도의 변화량을 구하고, 이에 따라 다음 제어단계에서의 속도 설정값이 변화되게 하였다.

용접전류와 전압은 갭 변화에 대하여, Table 2의 결과를 근거로, 선형적 관계를 갖도록 설정하였다. 따라서 갭의 크기가 변화되면, 갭의 크기에 적합한 용접속도가 퍼지논리에 의해 새로이 설정되고, 갭의 크기에 따라 용접전류 및 전압이 동시에 변화되어, 용접사의 기능처럼, 속도변화로 인한 용착량의 변화를 적절히 조절하게 된다.

본 연구에서의 파이프 용접은 루트패스와 필패스로 대별되고, 루트패스에서만 용융지 제어가 이루어지게 된다. 단락신호가 설정되면 용융지의 영상을 촬영하고 영상처리를 하고 제어 알고리즘을 거쳐 제어변수를 내게 된다. 영상처리 및 변수제어에 필요한 시간을 포함하는 제어 주기는 0.3초로 설정하였다.

5. 필패스 용접선 추적 제어

루트패스의 용접 자동화가 실현되면 다음 단계로 필패스를 자동화할 수 있는 시스템이 요구된다. 필패스는 토치를 위빙하게 되는 사실에 착안하여, 아크센서 시스템을 구성함으로써 용접선을 자동추적하고자 하였다. 이에 필요한 아크 모니터링 회로는 션트(shunt)에서 나타나는 미소 전위차를 증폭기 및 저주파통과필터를 제작하여 계측하고, 이를 컴퓨터의 아날로그 디지털 변환기에 인가함으로써 아크전류신호를 처리할 수 있게 하였고, 용접선을 추적할 수 있는 알고리즘을 설계하고 프로그래밍하였다.

아크 모니터링을 위한 션트는 0.1mΩ의 저항체로, 용접기 전원의 (-)극과 모재 사이 직렬로 결선되어 500A통전시 50mV가 검출되게 하였다. 증폭기는 이를 100배 증폭시키고, 용접전류 상의 고주파 노이즈를 제거하기 위해 5Hz의 저주파통과필터를 적용하였다. 개선면(groove)의 크기에 대응하여 위빙 폭을 설정한 다음, 0.2sec 시간 동안 위빙

을 행하면서 용접하게 하고, 위빙의 좌우 양단에서는 각각 0.3sec의 dwell 시간을 두었다. 아크센서를 이용하여 용접선을 추적하기 위해, Fig. 6과 같이, 좌측 위빙시는 고정 폭의 위빙을 수행하게 하고, 우측 위빙시는 일정 위빙시간(0.2sec) 동안 위빙 중심축을 이동하게 하여 용접선의 중앙에 위빙중심이 위치하도록 위빙 속도를 제어하였다.

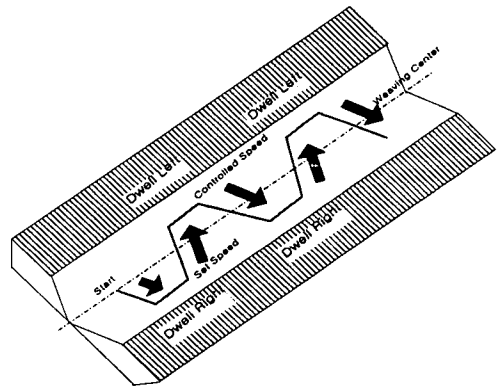


Fig. 6 Weaving and control pattern of fill pass welding

위빙 중심이동 제어를 위해, 좌측 끝점에서의 dwell 시간 동안에 좌우측 양단의 전류차를 비교하여 이를 위치오차로 환산하고, 이를 속도신호로 변환함으로써 속도가 가변되게 하였다. Dwell 시간 동안의 전류 샘플링 시간은 0.03sec로 설정하였고, 샘플한 총 전류 값을 단순 평균하여 dwell 위치에서의 대표 전류치로 취하였다.

용접선 추적에 있어 용접사의 용접선 추적 지식을 모사하기 위해, 퍼지제어방법을 도입하여 용융접선을 추적할 수 있는 제어량을 산출하게 하였다⁹⁾. 퍼지규칙베이스는 양단의 전류차(오차)와 전류차(오차)의 변화량을 이용하여 작성하였다. 파이프 용접의 경우 용접선의 급작스런 변화없이 특정의 방향성을 유지하게 됨으로, 전류오차의 변화량을 퍼지입력으로 이용하였다.

$$E \equiv \Delta I = I_{left} - I_{right} \quad (2)$$

$$S \equiv \Delta I + \Delta I^p$$

여기서 E: 오차, S: 오차의 변화량, ΔI^p : 전 단

계에서의 오차, ΔI : 양단 전류차이다.

제어규칙은 Table 3과 같이 설정하였고, 멤버십 함수는 삼각형함수를 적용하였다. 오차는 0, 2, 4, 6A의 경우를 각각 Zero, Small, Medium, Big으로 퍼지분할하고, 오차변화량은 0, 6, 12A의 경우를 Zero, Small, Big으로 퍼지분할하였다. 제어입력은 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4mm/s의 속도변화를 각각 Zero, Small, Medium, Big, Very Big으로 퍼지분할하였다.

멤버십함수의 설정에서는 토치 높이 차가 1mm이면 4.5A의 전류 오차가 발생한다고 가정하였다¹⁰. 퍼지추론은 Min-Max법을 적용하였고, 퍼지제어입력을 생성하기 위한 defuzzy화는 영역의 중심을 취하는 방법을 이용하였다. Fig. 7은 용접선 추적이 수행되는 프로그램의 순서도이다. 루트패스 용접이 종료되면, 필패스의 용접이 수행되는 프로그램 루프로 제어 절차가 이행되어, 초기 반 쪽의 이동(위빙)이 수행되고, 부재의 우측 개선면에서 dwell이 이루어진다. Dwell 기간 중에 전류를 계속하고 평균하여 대표 전류값을 설정하게 된다. 좌측 dwell의 경우는 일정 속력으로 설정되어 우측으로의 위빙을 하고, 우측 dwell에서 전류를 계속한다.

우측 dwell에서, 전류계측 후에는 좌우 측의 전류를 비교 연산하는 퍼지제어 로직에서 속도를 재설정하게 된다. 이러한 방법이 용접 종료까지 연속

되어 용접선을 추적해 나가게 된다. 설계된 아크 센서는 6mm/sec의 용접속도에서, 위빙속도가 최대 0.4mm/sec까지 보정되고 보정주기가 1Hz임으로, 1.1°까지의 용접선 오차추적이 가능할 것으로 예측되었고, 4mm/sec의 용접속도에서는 1.7°까지의 추적성을 보일 것으로 기대하였다.

6. 실험

파이프 용접공정을 완전 자동화하기 위해 본 연구에서 제안한 용접장치, 센서시스템, 제어알고리즘 등을 시험하고 검증하기 위해 연강 파이프 시험 부재를 대상으로 용접성 시험을 실시하였다. 부재의 사양은 직경 192mm, 두께 15mm, 개선각도 60°이었고, 용접공정은, 루트패스와 필패스 공히 100% CO₂ 가스를 보호가스로 하고, 직경 1.2mm의 SM70을 용접 와이어로 한 GMAW이었다. 토치가 고정된 위치에 있고, 파이프 시험 부재의 한 쪽을 고정하고 있는 포지쇼너가 회전함으로써 용접이 진행되게 하였다. 용접방향은 토치가 상대적으로 경사면을 따라 아래로 용접해 내려오는 자세가 되게 하였다. 용접 위치는 45° 반경 방향, 토치 각도는 50°, 카메라각도는 -15°로 각각 설정하였다. 하나의 파이프 시험 부재는, 길이 150mm인 파이프 부재 양단에 개선 가공을 한 후, 파이프 원주 방향 4곳에 각각 10mm길이를 가접을 하여, 길이 방향으로 5개 파이프를 연속하여 이어 붙여 제작한 것이었다. 따라서 한 파이프 부재에서는 150mm 간격으로 4곳의 용접선을 만들어 낼 수 있었다.

6.1 루트패스 용접선 추적실험

파이프의 가공오차, 가접오차, 진원도오차 등에 의한 용접선 오차를 모사하고, 또 이에 대한 기계 장치의 대응성을 시험하고자, 파이프의 90° 원주길이(140mm)를 루트패스의 용접장으로 설정하고 이때 용접선의 최종위치가 2mm 벗어난 부재와 -2mm 벗어난 부재의 각각에 대해 용융지를 관측하여 용접선을 자동추적하는 실험을 실시하였다.

6.2 용입 제어 실험

갭의 변화를 계속하여, 갭의 크기에 적합한 용접조건을 설정하는 알고리즘의 구현을 위해서는

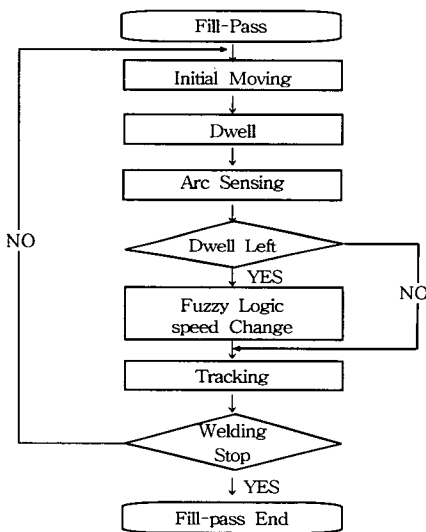


Fig. 7 Flow chart of seam tracking with arc sensor

실제 갭의 크기와 시각센서에서 계측되는 크기와 관계 설정이 필요하다. 이를 위해 갭 3.0mm의 표준 용접 조건인 속도 2.1mm/sec, 전류 180A, 전압 20V에서, 파이프 용접선의 갭이 각각 2.0mm, 3.0mm, 4.5mm인 부재들을 용접하면서 시각센서로써 용융지 하단의 크기를 계측하였다.

파이프 부재의 갭이 균일하지 않을 경우, 시각센서가 이에 대응하여 용접조건을 실시간으로 제어할 수 있는지를 시험하기 위해, 갭 3.0mm의 표준 용접조건을 기준 값으로 설정한 상태에서 각각 갭 2.5mm, 4.0mm를 가진 파이프 부재의 용접을 실시하여 갭 크기에 대응하여 속도, 전류, 전압 등 용접 조건의 제어여부를 실험하였다. 이와 비교하고자 갭 3.5mm 부재의 경우는 제어를 실시하지 않고 용접을 실시하였다.

6.3 필패스 용접선 추적 실험

파이프의 필패스 용접을 자동화하기 위해서 제안한 자동화장치 및 센서시스템의 성능을 검증하기 위해, 파이프 부재의 루트패스 용접 후, 필패스 용접을 행하면서 아크센서를 탑재한 용접장치의 추적성을 시험하였다. 용접 전에 계측한 용접선의 오차는 최대 2mm이었다. 용접은 속도 3.3mm/sec로써 파이프를 0°에서 180°까지 회전시키면서 수행하였다. 용접조건은 전류 200A, 전압 23V로 설정하였다.

7. 결과 및 고찰

용접 시험 과정에서, 본 연구에서 설계 및 제작한 파이프 용접장치의 기구는 용접위치의 설정, 파이프의 크기에 대응한 토치 위치설정, 카메라 위치설정 등이 사용자 인터페이스 프로그램과 연동하여 매우 용이하게 수행되어, 용접작업자의 용접자세 및 토치의 이송을 대신할 수 있을 뿐만 아니라 더욱더 유연성을 갖춘 시스템임을 보여 주었다.

용접 시 아크광은 광범위한 광장대에 걸쳐 나타나기 때문에 아크를 포함한 영상으로는 용접선의 정보나 용융지의 정보를 얻는 것은 불가능하다. Fig. 8은 단락감지 회로 및 논리를 이용하여 포착한 용융지 영상을 모니터링 및 제어 화면에 나타낸 것으로서, 아크의 소멸 시에 나타나는 전형적 용융지를 명확하게 추출한 결과를 보이고 있다. 이로써 본 연구에서 제안한 용융지 추출 방법과 모니터링 방법은 이와 관련된 연구분야에 매우 효과적

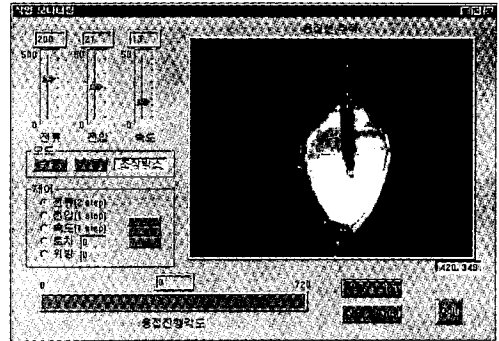
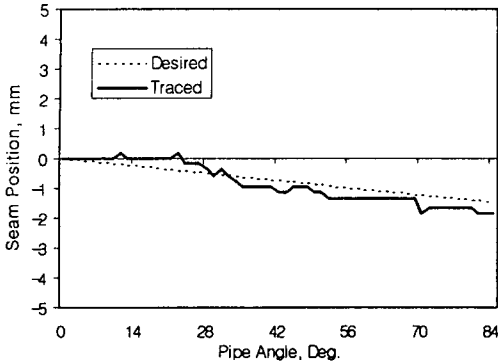


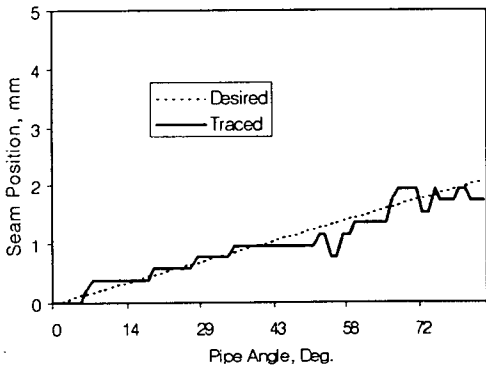
Fig. 8 Weld pool image

으로 이용될 수 있음을 보여 주었다. 또한 모니터링된 용융지의 영상에서, 본 연구에서 제안한 영상처리 및 용융지 탐색 알고리즘을 적용하여, 와이어의 상대 위치와 갭의 크기에 대한 특징을 용이하게 추출할 수 있었다.

용융지와 와이어의 상대 위치 차를 추출하고 제안된 영상처리 알고리즘을 적용하여, 루트패스의 용접선을 추적한 결과를 Fig. 9에 보여 주고 있다. 원주 방향 140mm의 용접선을 2mm 정도 기울여 두고, 또한 -2mm 정도 기울여 두고, 각각 행한 용접선 추적결과, 용접선이 치우친 방향에 무관하게 양호한 추적성을 보이고 있어 약 1°의 용접선 추적이 가능함을 보였다. 실제 파이프 부재의 용접선 오차는 1°를 상회하지는 않을 것이나, 영상 처리시간이 0.3sec이고, 갭 3mm의 경우 속도가 2.1mm/sec임으로, 위치보정은 0.63mm 용접 진행길이마다 이루어지고 시각센서의 가로방향 시야범위가 30mm임으로 오차가 시험대상보다 더 크게 발생하여도 충분히 대응 가능하리라 판단된다. 다만 본 연구에서는 알고리즘의 오차 유발 가능성을 감안하여 연속되는 두 영상 처리 단계에서 토치의 상대이동을, 즉 각 샘플링 구간에서 용접선 추적한도를 최대 0.5mm로 제한하였다. 이와 같은 용접선 추적 결과에서 나타난 바와 같이, 부재의 가공오차나 편심에 의해 발생할 수 있는 용접선 오차를 용융지의 형상계측을 통해 추적하며 용접을 가능하게 할 수 있었다. 용접선을 추적한 경우와 추적기능을 적용하지 않은 경우의 용접 결과의 관찰결과, 추적기능이 적용되지 않은 경우는 비드가 편심되어 나타났고, 이면 비드의 형성도 양호하지 않음을 확인하였다. 종래의 시각센서는 실제 용접 위치보다 상당 길이(아크광의 영향을 받지 않는 최소 길이) 앞선 위치에서 갭을 계측하기 때문에,



(a) Negative offset



(b) Positive offset

Fig. 9 Torch trace during seam tracking of weld with offset

용접 도중의 변형 등에 의해, 실제 용접 위치에 있어서의 갭의 위치는 예측된 정보와 다를 수 있다. 본 연구에서는 용접 위치에서의 토치와 갭의 상대 위치를 예측하여 용접선을 추적하는 방식을 적용한 것인 바, 용접선 추적이 더 양호하게 수행될 것으로 판단되었다. 다만 본 연구의 결과는 연구에서 목표한 바대로 V-홈을 가진 초층 용접부의 용접선 추적에만 적용 가능한 제한성을 가지게 된다.

Fig. 10은 갭의 크기를 각각 일정하게 두고 실제 갭의 크기와 영상처리로 예측된 갭의 크기를 비교한 결과를 보여 주고 있다. 갭의 크기를 측정된 결과에서, 갭이 좁은 경우는 예측치가 다소 크게 나타나고, 갭이 커짐에 따라 실제 값과 예측치가 유사하게 나타났다. 갭이 좁은 경우, 갭 사이로 용융지가 용이하게 흘러내리지 못함으로 갭을 관통한

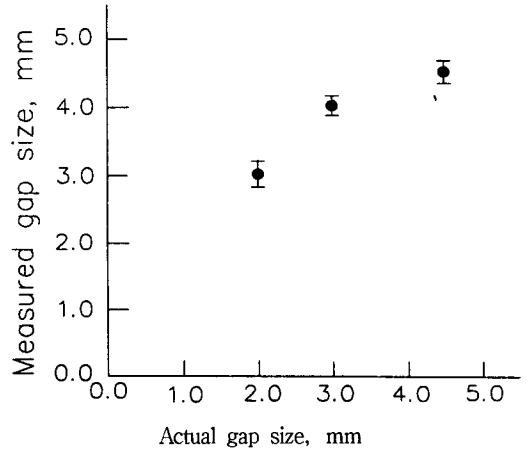
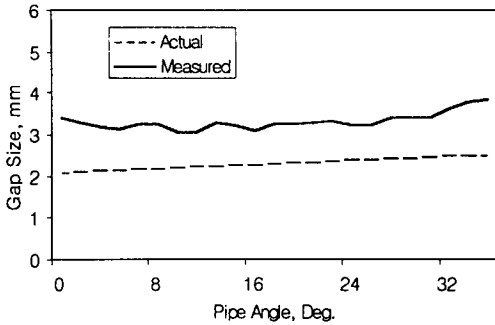


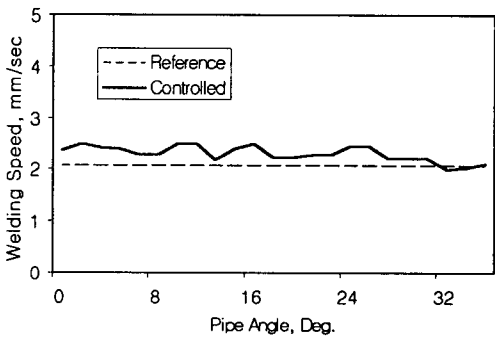
Fig. 10 Comparison between actual and measured gap sizes

용융지 보다는 갭을 포함한 용융지 하부의 평균크기가 예측되는 것으로 판단되고, 실제 갭의 크기가 넓어지면 용융지가 갭 사이로 용입을 형성한 부분이 뚜렷해지기 때문에 용융지로부터 갭의 형태를 정확히 인식해 낼 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 이러한 예측결과를 고려하여 예측된 갭의 크기를 실제 값으로 환산할 수 있는 관계를 설정하여 예측된 갭의 크기에 따라 적절한 용접변수가 설정될 수 있도록 하였다. 한편, 파이프 용접의 경우에, 사용되는 용접재료, 가스, 용접공정 등의 여러 요소에 의해 용융지의 형태가 영향을 받을 수 있기 때문에, 본 연구에서 결과로 나타난 용융지의 갭 크기와 부재의 실제 갭 크기와 상관관계는 별도의 실험을 통해 새로이 설정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

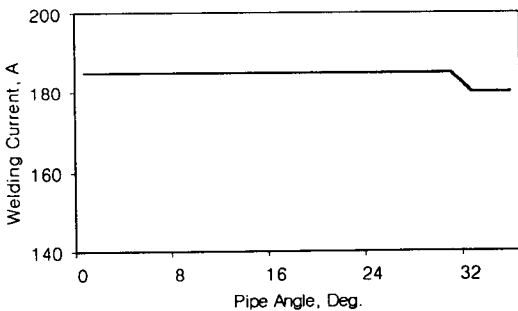
갭의 크기가 2mm에서 2.5mm로 선형적으로 변화되는 파이프 부재의 초기 용접조건을, 갭이 3.0mm일 때의 용접조건으로 설정하여 용접을 시작하고, 용융지의 크기에 따라 용접조건이 실시간으로 제어되도록 한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 예측치가 실제보다 크게 3mm 정도가 나타나나, 예측 알고리즘에서 이를, 실제와 예측치 관계에 근거하여, 실제 갭의 크기로 환산하게 된다. 실험 결과에서는, 용융지 제어 알고리즘에 의해, 속도와 전류가 용접 개시 후 바로 변경되어, 실제 3mm 표준조건 2.1mm/sec보다 속도가 크게 유지되었고, 전류도 표준전류 180A보다 높게 유지되었



(a) gap size



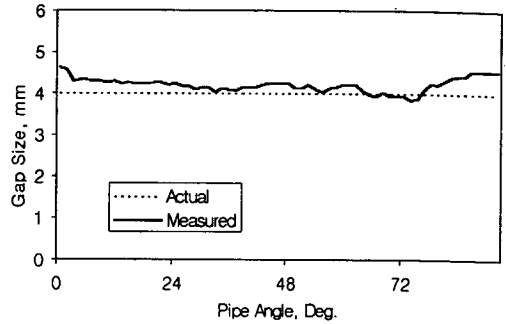
(b) welding speed



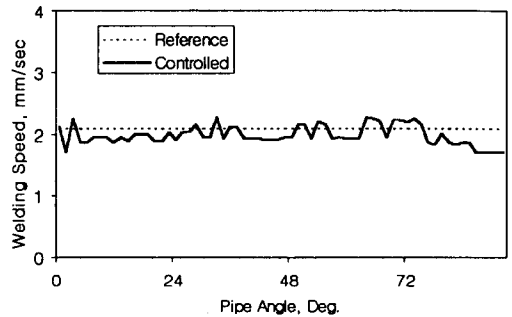
(c) welding current

Fig. 11 Response of welding conditions to gap size of 2.0-2.5mm

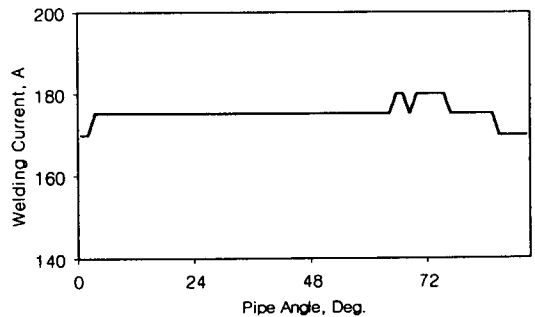
음을 보여 주고 있다. Fig. 12는, 갭이 3.0mm일 때의 용접조건을 초기조건으로 두고, 실제 갭이 4.0mm인 부재의 용접에서 용접조건이 제어되는 결과를 보이고 있다. 예측된 값과 실제 갭의 크기 차이가 적고, 실제 갭의 크기가 초기 설정값 3mm보다



(a) gap size



(b) welding speed



(c) welding current

Fig. 12 Response of welding conditions to gap size of 4.0mm

크기 때문에, 속도가 낮게 유지되고, 전류도 낮게 유지되어 제어됨을 알 수 있다. 이와 같은 용접 조건의 제어 결과는 갭의 변화에 대응하여 용접사가 행하는 조작 지식과 동일한 결과를 나타낸 것이다. 이로써, 용접 중 용융지의 크기를 예측하고 갭의 크

기가 변화함을 판단하여 해당 갭의 크기에 적합한 용접 조건을 실시간으로 재설정하는 방법이 자동화 장치에 의해 구현 가능함을 확신할 수 있었다.

Fig. 13은 속도 및 전류제어를 한 용접결과와 제어 기능을 설정하지 않은 용접결과를 보이고 있다. 용접조건이 제어되는 경우(a)는 4mm갭의 경우에도 용접이 양호하게 이루어짐을 보여 주고 있고, 제어가 수행되지 않은 경우(b), 3.5mm 갭의 경우 비드가 불안하게 형성되고 와이어가 갭 내로 관통하여 용접이 불가능하게 된 현상을 보여 주고 있다. 따라서 파이프 용접을 자동화하기 위해서는 루트패스의 용접제어가 반드시 필요하였고, 본 연구에서는 용융지를 관찰하여 갭을 계측하고 갭 변화에 대응하여 용접조건을 변화시켜 제어하는 방법으로써 이를 실현할 수 있음을 보여 주었다.

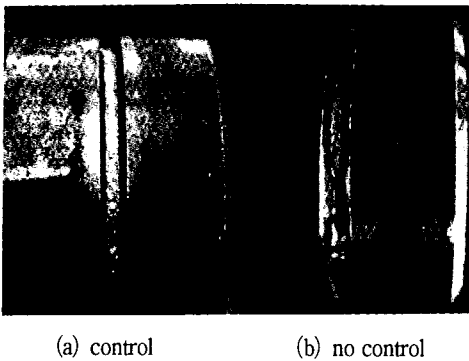


Fig. 13 Result of weld pool control

루트패스 용접 후, 필패스의 용접을 자동화하기 위해서는 아크센서를 이용한 용접선 추적방법을 채용하였고, 용접선의 좌우 치우침이 존재하는 부재의 필패스 용접선 추적결과를 Fig. 14에 보였다. 추적결과는 다소 오차가 발생된 것처럼 나타났으나, 외관상 용접품질에 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다. 특히 중간 부분의 오차는 포지셔너(turn table)에 외팔보처럼 거치된 파이프가 가접된 상태로 길이방향으로 연속적으로 연결된 것이었기에 용접도중 용접에 의해 갭과 용접부가 수축되면서, 시험 파이프 부재의 용접 중 변형이 초기 용접선 오차에 부가적으로 나타나, 실제 요구되는 용접선이 이동되었기에 이를 추적한 결과로 보여진다. 이는 용접부 외관에서 매우 양호한 추적결과를 나

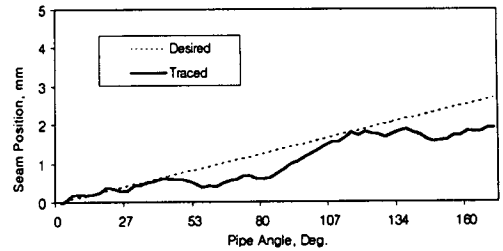


Fig. 14 Torch trace during seam tracking of inclined weld line

타낸 사실에서도 유추할 수 있다. Fig. 15(a)는 추적없이 용접을 행한 결과이고, Fig. 15(b)는 용접과 동시에 추적을 실시한 결과이다. 추적을 수행하지 않은 경우는 외관 상 뚜렷이 용접결과가 불량함을 판단할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 아크센서를 이용한 자동용접장치는 파이프의 필패스 용접선을 추적하며 용접이 가능함을 보여 주었다.

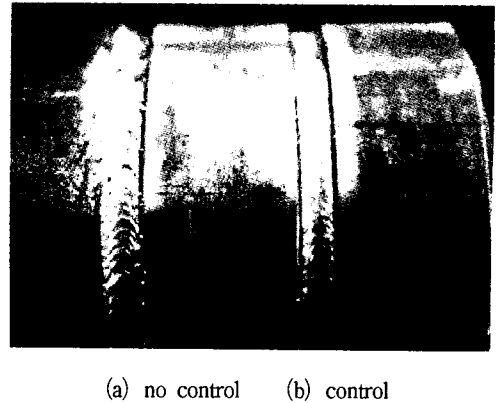


Fig. 15 Result of torch position control with arc sensing during fill pass welding

8. 결 론

파이프 용접을 완전 자동화하기 위해서는, 특히 충분하고 일정한 용입형태가 요구되는 루트패스의 자동용접을 실현하기 위해서는, 파이프 자체의 진원도, 가공오차로 인한 용접선 치우침, 부재 준비의 부정확함에 의한 갭 크기 변화, 그리고 단차 등에 실시간으로 대응할 수 있는 방법이 요구된다. 이와 같은 요구에 부응하기 위하여, 본 연구에서

는 GMA 용접공정으로 파이프를 완전 자동으로 용접할 수 있는 방법을 제안하였다. 우선, 루트패스의 용융지 형상을 관찰하여 실시간으로 용접선 추적과 용융지의 크기를 제어하여, 갭의 크기 변화에 대응하여 용접할 수 있는 방법과 알고리즘을 제안하였고, 파이프의 크기와 용접위치에 자동으로 대응할 수 있는 파이프 용접장치의 기구를 설계 및 제작하여, 실험을 통해, 제안한 자동용접 기법과 알고리즘을 검증하였다. 또한 파이프의 가공오차, 회전편차 등에 기인한 필패스에서의 용접선 오차에 대응하여 용접선을 추적할 수 있는 아크센서 시스템을 설계 및 제작하여 필패스의 용접과정을 자동화하였고, 파이프용접 도중에 실시한 용접선 추적시험으로 이를 검증하였다. 이와 같은 제안과 검증의 결과에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 파이프 형상 및 용접 위치에 자동 대응할 수 있는 기구는 효과적으로 용접 시작위치에 용접토치를 설정하였다.
- 2) 용접 아크의 단락순간을 포착하기 위한 단락 감지 회로는 실시간으로 단락현상을 계측할 수 있었고, 단락 시작 시점을 분리하고자 제작된 논리 회로는 단락순간에 펄스를 정확히 발생하였다.
- 3) 단락시점에 동기하여 카메라의 촬영을 트리거함으로써 단락순간에만 영상이 획득될 수 있었다.
- 4) 카메라의 촬영에 동기하여 영상보드의 영상 획득이 이루어지게 한 로직은 영상획득에 효과적이었다.
- 5) 용융지의 형상을 추출하기 위한 7방향 방사형 윤곽선 추출방법은 영상처리 시간을 단축할 수 있었고, 정확하게 용융지를 분리할 수 있었다.
- 6) 용융지의 비대칭성을 이용한 용접선 추적알고리즘은 용접선의 추적알고리즘으로 적합하였다.
- 7) 관찰된 용융지 하단부의 갭 크기를 제어 대상으로 설정한 퍼지 제어기는 갭의 크기에 따라 용접 조건을 효과적으로 제어할 수 있었다.
- 8) 용접변수의 실시간 제어와 용융지의 형상을 관찰하기 위해 개발된 사용자 인터페이스 프로그램은 파이프를 자동으로 용접하는 모니터링 및 제어시스템으로 활용될 수 있었다.
- 9) 파이프 용접부재의 좌우 개선면에서 전류 신호를 계측하고 퍼지연산을 이용한 아크센서시스템은 파이프의 필패스 용접자동화에 있어 용접선 추적장치로서 적합하였다.
- 10) 본 연구에서 제안한 자동화시스템이 상용성

을 갖기 위해서는 추가적인 실험을 통해 다양한 데이터가 구축되어야 하고 또 알고리즘의 지속적 보완이 필요할 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 김동철, 이세헌, 엄기원 : 화상처리에 의한 Gas Tungsten Arc 용접에서의 용융지 폭 제어에 관한 연구, 대한기계학회논문집(A), 제 20권, 제 9호, (1996), pp. 2760-2769
2. R. Kovacevic, Y.M. Zhang and L. Li : Monitoring of weld joint penetration based on weld pool geometrical appearance, Welding Journal, Vol. 74, No. 10, (1996), pp. 317s-329s
3. K. Ohshima, M. Morita, K. Fujii, M. Yamamoto and T. Kubota : Sensing and digital control of weld pool in pulsed MIG welding, Transaction of the Japan Welding Society, Vol. 23, No. 1, (1992), pp. 36-42
4. Reference Manual, Stenning vision, Stenning Vision Ltd., CANADA.
5. Reference Manual, Rotoweld2000 pipe welding workstation, Tecnar Automation Ltd., CANADA.
6. J.-W. Kim and S.-J. Na : A self-organizing fuzzy control approach to arc sensor for weld joint tracking in Gas Metal Arc Welding of butt joints, Welding Journal, Vol. 71, No. 2, (1993), pp. 60s-66s
7. 신정식 : 겹치기 이음에서의 용접선 추적과 아크데이터 모니터링 시스템에 관한 연구, 한국과학기술원 석사학위논문, (1991)
8. H. Wata, Y. Manabe, Y. Hiromoto and H. Yoritaka : Group-control system for narrow-gap MIG welding, Sensors and Control System in Arc Welding Edited by H. Namura, Chapman & Hall, (1994), pp. 176-181
9. John Weston, Advanced welding systems(2), Chap. 6, IFS Ltd., UK.
10. 김수영 : FCA 용접용 아크센서의 개발 및 이를 이용한 로봇 용접에 관한 연구, 한국과학기술원 석사학위논문, (1992)