



파이프 용접에서 이중 시각센서를 이용한 용접선 추적 및 용접결함 측정에 관한 연구

송형진* · 이승기** · 강윤희*** · 나석주**

*LG전자 생산기술원 정밀가공기술그룹

**한국과학기술원 기계공학과

***Biz4M

A Study on Seam Tracking and Weld Defects Detecting for Automated Pipe Welding by Using Double Vision Sensors

Hyeong-Jin Song* , Seung-Key Lee**, Youn-Hee Kang*** and Suck-Joo Na**

*Precision Laser & Material Processing Group, LG Production engineering Research Center, Pyungtaek-si 451-713, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

*** Biz4M, Suwon, Korea

Abstract

At present, welding of most pipes with large diameter is carried out by the manual process. Automation of the welding process is necessary for the sake of consistent weld quality and improvement in productivity.

In this study, two vision sensors, based on the optical triangulation, were used to obtain the information for seam tracking and detecting the weld defects. Through utilization of the vision sensors, noises were removed, images and 3D information obtained and positions of the feature points detected. The aforementioned process provided the seam and leg position data, calculated the magnitude of the gap, fillet area and leg length and judged the weld defects by ISO 5817.

Noises in the images were removed by using the gradient values of the laser stripe's coordinates and various feature points were detected by using an algorithm based on the iterative polygon approximation method. Since the process time is very important, all the aforementioned processes should be conducted during welding.

(Received January 16, 2002)

Key Words : Pipe welding, Bell end joint, Vision sensor, Seam tracking, Weld defect

1. 서 론

용접공정의 자동화를 위해서는 용접 전 용접선의 위치와 용접부에 존재하는 간극의 크기 등을 측정하여 용접변수를 자동으로 조절하고, 용접 후 품질검사를 위해 용접부 형상을 측정할 수 있는 센서의 개발이 필요하다¹⁾.

상하수관 등 직경이 큰 파이프의 파손사고는 파이프의 결합부위인 용접부에서 주로 발생하기 때문에 용접 시공에 세심한 주의가 필요하다. 또, 작업환경이 무척 열악하여 용접공들이 기피하는 작업으로 인건비와 인력의 부족문제가 심화되고 있다. 따라서 현재 수동용접으

로 이루어지는 파이프의 결합 용접공정의 자동화에 대한 요구가 절실하다.

결합부의 형태는 맞대기 이음과 겹치기 이음(lap joint)의 형태가 있는데, 겹치기 이음의 경우 자동화가 어렵고 V그룹 맞대기 용접에 비해 용접품질이 떨어지는 단점이 있지만 직경이 커질수록 맞대기 용접은 자중에 의한 찌그러짐이 크게 나타나 관의 정렬에 문제가 발생하게 된다. 따라서 국내 대형 상하수도 강관의 용접은 대부분 겹치기 이음으로 이루어지고 있다. 용접부인 파이프의 확관(outer pipe)과 직관(inner pipe)의 모습은 Fig. 1과 같다.

상하수관 등의 직경이 큰 파이프의 결합 공정이 센서

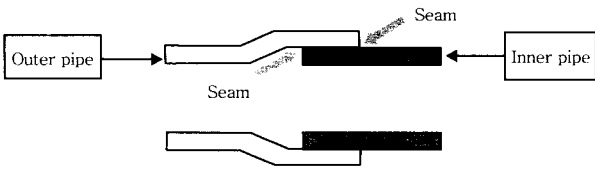


Fig. 1 Configuration of a pipe joint

와 전용기에 의해 자동화되면, 용접부의 품질이 용접공의 숙련도와 작업태도에 따라 변화하는 수동용접과 달리 용접부의 품질을 항상 일정한 수준에서 유지할 수 있고 작업시간의 단축과 작업단가의 감소 등을 통해서 생산성을 향상시킬 수 있다. 그러나 파이프의 용접 자동화를 위해서는 용접선을 자동으로 추적하고 용접조건을 결정하기 위해 간극의 크기를 측정해야 하며 용접 후 품질검사를 위해서 용접부 형상을 측정할 수 있는 센서의 개발이 필수적으로 요구된다²⁻³⁾.

본 연구의 목표는 직경이 큰 파이프를 접합하기 위한 자동용접기에 사용될, 두 개의 시각센서를 이용하는, 앞의 시각센서를 통해서 용접선 추적 및 간극의 크기 측정을 하고, 뒤의 시각센서를 이용하여서는 용접 후 외관의 형상으로부터 용접비드의 결합을 검출하는 시스템의 개발이다.

본 연구의 대상 용접부는 대형 강관의 접합부로 용접은 벨 엔드(Bell end) 용접으로 이루어지고, 간극의 크기에 따라 용접조건이 바뀌어야 하기 때문에 용접선 추적 및 간극의 크기 측정이 정확하게 이루어져야 한다. 그리고 용접품질의 평가를 위해서는 정확한 각장의 위치측정이 필요하므로 본 연구에서는 비파괴 검사방법 중 외부 검사법으로 구조화된 빔(Structured light)을 이용한 비전 센서를 이용하여 외관의 형상으로부터 용접 비드의 결합 검출을 하려고 한다. 따라서 이를 위한 영상처리, 용접선 추적 및 간극의 크기 측정 알고리즘, 특징점(Feature point) 추출 알고리즘, 용접결합 판별 알고리즘 등이 제시되어야 하며, 다층 용접 시에는 용접조건 설정을 위한 용접부 필릿 면적의 측정이 이루어져야 한다.

2. 시각센서의 설계

본 연구에서 사용되는 시각센서는 구조화된 빔을 보

조광으로 이용하여 광삼각법에 의해 계산된 물체의 거리정보를 얻을 수 있는 것으로, 용접 공정에서 일반적으로 사용되는 시각센서들과 같다^{1,6-8)}. 여러 가지 설계 변수들을 고려하여 설계한 결과 Table 1의 측정범위와 분해능을 가지는 시각센서를 제작하였다⁴⁻⁵⁾.

3. 시각센서의 적용

3.1 영상처리(image processing) 알고리즘

대상물에 레이저 띠가 조사될 때의 실제 영상은 레이저 띠가 여러 픽셀에 걸쳐 나타나게 된다. 따라서 레이저가 조사된 대상물의 위치를 얻기 위해서는 화면에 나타난 레이저 띠의 위치를 결정하고, 찾아낸 레이저 띠의 정보로부터 레이저 띠의 중심을 찾는 영상처리과정을 거쳐야 한다. 레이저 띠를 추출하고 세선화하기 위해서 본 연구에서 사용한 방법은 레이저 강도와 레이저 띠의 두께를 이용한 방법으로, 계산이 간단하면서 레이저 띠의 두께가 비슷할 경우 좋은 성능을 보인다.

레이저 띠의 두께에 해당하는 칼럼 윈도우를 만들어 한 픽셀씩 아래로 이동시키면서 칼럼 윈도우 내의 그레이 레벨 값을 적산하여 적산한 값이 최대가 되는 위치에 레이저 띠가 위치한다고 본다. 레이저 두께가 S_d 라고 하면 첫 번째 윈도우 내의 그레이 레벨의 합 W_0 와 n 번째 윈도우 내의 그레이 레벨의 합 W_n 은 식(1), (2)와 같다.

$$W_0 = G_r(0) + G_r(1) + \dots + G_r(S_d - 1) \quad (1)$$

$$W_n = W_{n-1} - G_r(n-1) + G_r(n+S_d-1) \quad (2)$$

이 때 값이 최대가 되는 칼럼 윈도우의 중심을 레이저 띠의 중심으로 인식하여, 대상물의 위치를 계산할 수 있다.

3.2 선행 시각센서

선행 시각센서의 역할은 용접선 추적과 간극의 크기 측정이며, 이를 위해서는 영상을 받아들여서 노이즈를 제거하고, 특징점을 찾은 후 용접선의 위치 및 간극의

Table 1 Field of view and resolution

	Depth field of view(mm)	Average lateral field of view(mm)	Resolution(Depth) (mm/pixel)	Resolution(Lateral) (mm/pixel)
Front sensor	60	27.3	0.12	0.03
Rear sensor	94	43.5	0.19	0.05

크기를 영상에서의 좌표에서 실제 좌표로 변환시켜서 나타내어야 한다.

현재 아크차단막과 대역통과필터를 부착하여 아크광, 스퍼터 등의 노이즈를 제거하고 있지만 실험결과 약간씩의 노이즈가 발생함을 알 수가 있었다. 본 연구에서 최종적으로 얻고자 하는 용접선 위치 및 간극의 크기의 정확성을 위해서는 노이즈의 제거가 중요하고, 이를 위해서 세션화 후 영상처리를 통하여 노이즈를 제거하였다. 본 연구에서는 기준점을 중심으로 일정값(threshold) 이상 차이를 보이는 점을 노이즈로 인식하게 하는 방법으로 노이즈를 제거하였다.

용접 중 연속적으로 정보를 전달해 주어야 하기 때문에 위의 여러 조건들 중 특히 탐색 시간이 중요하게 된다. 용접 대상체의 구조가 비교적 간단하기 때문에, 본 연구에서는 모서리 탐색 알고리즘으로 일반적으로 곡선으로 된 영상에서 폴리곤 근사화된 정보를 추출하는 반복 폴리곤 근사화(iterative polygon approximation)^{9,10}를 연구 대상에 적합하게 변형하여 적용하였다. 반복 폴리곤 근사화는 곡선의 양 끝 점을 잇는 직선을 긋고 곡선내의 점들 중에서 직선에서 가장 먼 거리를 가진 점을 찾는 방법으로 곡선을 폴리곤 근사화하는 방법이다. 본 연구에서 사용된 방법은 파이프와 같은 벨엔드 용접부 뿐 아니라 다른 용접부에도 적용 가능하며, 실제 측정 결과 올바른 모서리의 위치를 정확하게 찾아내었다. 다음의 순서로 용접선 추적에 필요한 특징점들을 찾는다.(Fig. 2)

(1) 검색 기준점(점①,점②)을 찾고, 최소 자승 오차법을 이용하여 직선㉔, 직선㉕의 식을 구한다. 직선㉔는 왼쪽 끝점과 점①사이의 점들의 좌표값을, 직선㉕는 오른쪽 끝점과 점②사이의 점들의 좌표값을 이용하여 구한다.

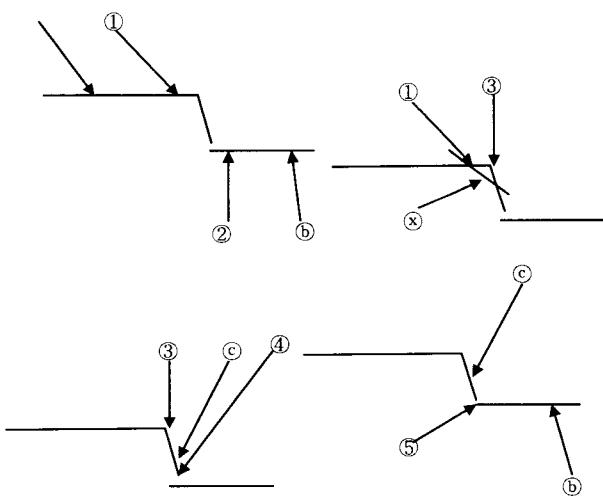


Fig. 2 Seam tracking method

(2) 점①보다 큰 점들 중에서 점①을 지나고 기울기가 1인 직선㉘로부터 거리가 가장 먼 점을 찾는다. 이 점이 확관의 모서리 끝점(점③)이다.

(3) 점③과 점④(노이즈 제거 과정에서 구한 확관의 끝점) 사이의 점들의 좌표를 이용한 최소 자승 오차법으로 직선㉙의 식을 구한다.

(4) 직선㉙와 직선㉕의 교점을 구한다. 이 점⑤이 토치 방향의 기준이 되는 용접선이다.

(5) 확관의 끝점(점④)과 직선㉕ 사이의 거리가 용접부 간극의 크기이다.

위의 방법에 의해 측정된 간극의 크기는 실험을 통해 구한 간극의 크기와 용접조건과의 관계식을 통해 용접 조건을 결정하는데 사용된다. 관련식은 한국해양대에서 개발한 간극의 크기에 따른 용접조건 설정 프로그램을 이용하였다¹¹. 간극을 측정하여 필요한 용착면적을 구한 후, 이에 따른 전류와 용접속도를 조절해 주는 방법을 이용하였다.

3.3 후행 시각센서

후행 시각센서의 역할은 용접 후, 용접부 표면을 관찰하여 시각적으로 탐지 가능한 여러 가지 용접결함들을 찾아내고 그 크기를 측정하는 것이다. 노이즈를 제거한 후 3차원 변환을 한 다음 특징점들의 좌표를 얻게 되는데, 이 때 얻어진 특징점들의 좌표값들을 이용하여 여러 가지 결함들의 발생여부와 그 크기, 그리고 필릿 면적을 측정하도록 하였다. 본 연구에서 결함의 판정기준은 ISO 6520-1, ISO 5817^{12,13}을 참고하였고, 자세한 특징점 추출과정은 다음과 같다(Fig. 3).

(1) 검색 기준점(점①,점②)을 찾고, 최소 자승 오차법을 이용하여 직선㉔, 직선㉕의 식을 구한다.

(2) 점①보다 큰 점들 중에서 점①을 지나고 기울기가 1인 직선㉘로부터 거리가 가장 먼 점을 찾는다. 이 때 점①의 좌표를 $[X(0), Y(0)]$ 라고 하고 레이저 띠 위의 점의 좌표를 $[X(i), Y(i)]$ 라고 하면 $abs(X(i)-Y(i)-X(0)+Y(0))/\sqrt{(2)}$ 의 값이 최대가 되는 점을 찾으면 된다. 이 점이 확관의 모서리 끝점(점③)이다.

(3) 검색 기준점인 점④를 정하고 점②와 점④를 잇는 직선㉙의 식을 구한다. 점④와 점② 사이의 점들 중에서 직선㉙보다 크고 직선㉙로부터 거리가 가장 먼 점을 찾는다.

(4) 점③과 점⑤를 잇는 직선㉚의 식을 구한 후, 점③과 점⑤ 사이의 점들 중에서 직선㉚보다 크면서 직선㉚로부터 거리가 가장 먼 점을 찾는다.

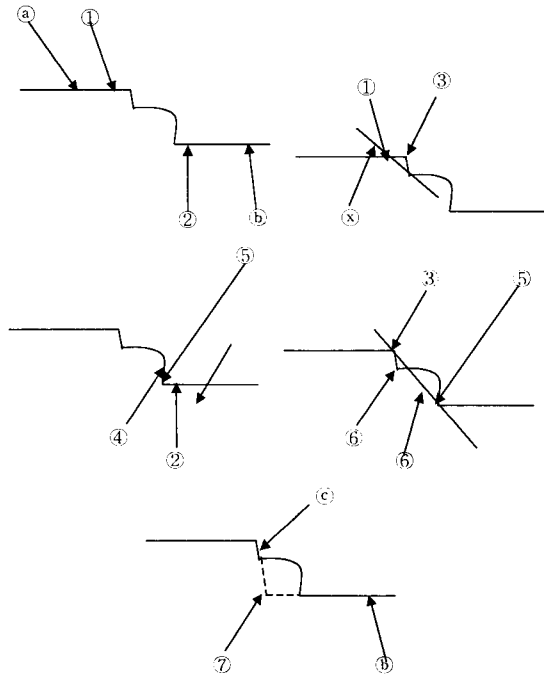


Fig. 3 Detecting feature points after welding

(5) 점③과 점⑥ 사이의 점들을 이용한 최소 자승 오차법으로 직선③의 식을 구한 후, 직선⑥과 직선③의 교점인 점⑦의 좌표를 얻는다.

그림에서 각장의 길이는 각각 점⑤와 점⑦사이의 거리, 그리고 점⑥과 점⑦사이의 거리이다. 이 각장의 위치 및 크기를 이용하면 ISO 5817의 판정기준에 의해서 목두께 과다(excessive throat thickness), 목두께 부족(insufficient throat thickness), 비대칭 과다(excessive asymmetry)의 판정을 할 수 있다. 점⑥과 점⑤사이의 점들과 점⑥과 점⑤를 잇는 직선 사이의 거리를 측정하여 볼록도 과다(excessive convexity)를 판정하며, 모서리 근처에 있는 점들을 대상으로 직선⑥과 직선③로부터 떨어진 거리를 측정하고 방향성을 고려하여 언더컷(undercut)을 판정한다. 필릿 면적의 계산은 점⑤와 점⑥사이의 프로파일을 적분한 뒤 직선⑥과 직선③이 기울어져 있음으로써 발생하는 오차를 보정하도록 하였다. Fig. 4는 위의 영상 처리 결과를 나타낸 것이다. 그림을 보면 각각 각장의 크기와 위치, 필릿면적이 측정되었고, 용접결합 발생시 용접결합의 종류와 크기를 등급별로 측정해내었음을 볼 수 있다.

후행 시각센서의 영상처리 시간은 120ms로 선행 시각센서의 영상처리 시간인 110ms를 합하면 총 230ms의 시간이 소요된다. 따라서 본 연구에서 용접선의 정보를 용접토치 구동부에 전달하는 주기가 450ms이므로 영상처리가 충분한 속도로 이루어짐을 알 수가 있다.

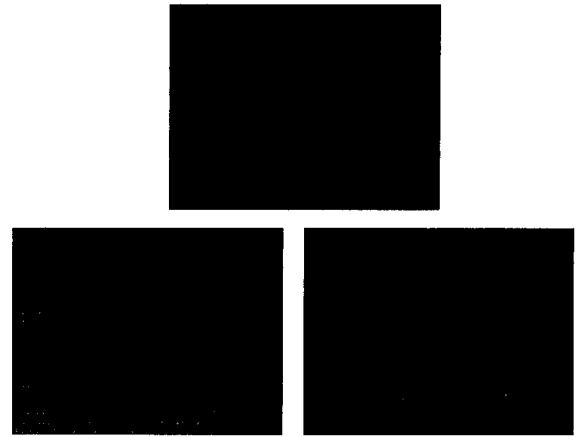


Fig. 4 Results of detecting weld defects

3.4 다층 용접에의 적용

파이프의 두께가 두꺼운 경우, 단층용접으로는 요구되는 용접부를 얻는 것이 불가능하기 때문에 다층 용접을 행하여야 한다. 루트패스의 경우 간극의 크기와 용접선의 위치를 찾는 알고리즘을 사용하여 용접선 추적을 행하게 되고, 루트패스가 아닌 경우 용접선의 위치는 용접부와 파이프의 경계, 즉 각장의 위치(Fig. 3에서 점⑤, 점⑥)를 기준으로 하게 된다. 따라서 후행 시각센서의 각장위치 측정 방법을 사용하여 각장의 위치를 찾은 후, 그 각장의 위치정보를 기준으로 용접선 추적을 행하게 된다. 즉 측정된 각장의 위치를 중심으로 다층용접을 행하게 된다. 원래 용접조건은 루트패스에서 항상 같은 필릿 면적을 갖게 설정하도록 되어있지만 실제로는 약간의 오차가 존재하게 된다. 따라서 다층용접시 선행시각센서는 용접선의 위치와 함께 필릿 면적을 측정하여 용접조건(용접전류, 용접전압)에 반영시킨다.

4. 실험결과 및 고찰

전체적인 시스템은 Fig. 5와 같으며, 실험장치는 구동부와 구동부의 이송부에 이용되는 가이드 레일(guide rail), 그리고 시각센서로 이루어진다.

가이드 레일은 파이프의 내·외부에 장착되어 각각 파이프의 내부/외부 용접에 사용된다. 구동부를 가이드 레일을 따라 움직이게 하고 용접토치를 용접선에 위치시키고 위빙을 하게 하기 위해서 3개의 서보모터(servo motor)를 사용하였다. 그밖에 영상처리용 비전보드, 절연보드, A/D D/A 변환기, 위치 제어보드, 영상처리와 모터구동 및 용접기 제어를 위한 PC, 100% 이산화탄소(CO₂) 가스로 이루어져 있다. 실험에 사용된 파이프의 재질은 STWW400(KS D 3565 상수도

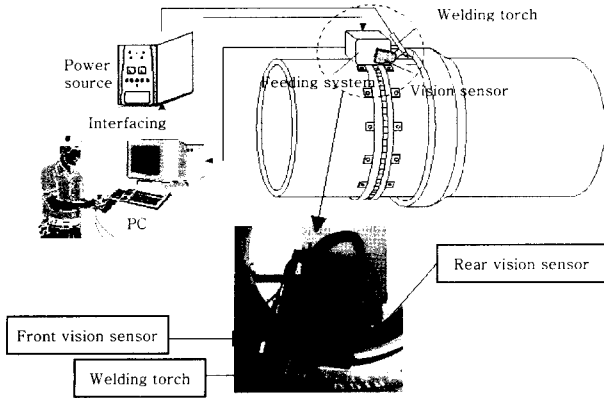
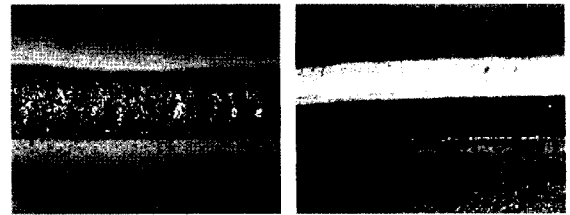


Fig. 5 Pipe welding system

용 도복장강관)으로 두께는 8mm이고 직경은 1m이다. 본 연구에서 사용된 용접 방법은 FCAW(Flux Cored Arc Welding)로 아래보기자세, 수직자세, 위보기자세 등 용접 시에 나타날 수 있는 모든 용접자세가 필요한 본 연구의 특성에 적합하다. 와이어 직경은 1.4mm, CTWD는 20mm, 용접속도는 3mm/sec, 위빙폭(weaving width)은 3mm, 위빙주파수(weaving frequency)는 1.3Hz이며, 용접전류와 용접전압은 각각 200A~260A, 20V~28V사이에서 간극의 크기와 용접토치의 위치에 따라 변화하도록 하였다.

외부용접에서는 대부분 간극이 존재하는 반면 내부용접에서는 간극이 거의 존재하지 않는다. 간극이 존재하지 않는 경우 수직자세, 위보기자세 용접의 경우 좋은 용접부 형상을 얻기가 간극이 존재하는 경우에 비해서 어려웠다. 이것은 간극이 존재하지 않는 경우 용융부의 용입이 적절하게 일어나지 않고 상대적으로 중력의 영향을 크게 받기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 여러 가지 용접조건들(용접전류, 용접전압, 용접속도, 위빙폭 등)을 바꾸어가면서 실험을 하였고, 그 실험들을 통하여 간극이 존재하지 않는 경우 용접전류, 용접전압을 크게 하고 용접속도를 빠르게 하는 조건을 선정하였다. 개선된 용접조건으로 실험결과 적절한 용접부 형상을 얻을 수 있었다. 또, 초기 토치의 지향이 용접부의 치우침에 큰 영향을 주기 때문에 초기 토치의 위치선정을 적절하게 하는 것도 중요하다.

Fig. 6은 내부 및 외부용접 실험결과 용접 비드형상 중 용접이 가장 어려웠던 수직자세의 용접결과를 나타낸 것이다. 사진에서 알 수 있듯이 용접위치와 간극의 크기에 관계없이 비교적 일정한 각장 길이를 갖으면서 적절한 모양의 용접 비드형상을 얻을 수 있었다. Fig. 7은 다층용접의 결과를 나타낸 사진이다. 용접부의 비드형상을 통해 용접선 추적이 잘 이루어졌으며, 용접



(a) Inner welding(vertical) (b) Outer welding(vertical)

Fig. 6 Results of welding



(a)After root pass (b)After second pass (c)After third pass

Fig. 7 Results of multi-pass welding

조건도 적절하게 주어졌음을 알 수 있다.

5. 결론 및 향후 과제

두 개의 시각센서를 이용한 용접선 추적 및 용접결함 측정에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 시각센서를 설계 제작한 후 비전보드를 통한 영상처리를 통하여 노이즈가 제거된 레이저 띠의 3차원 위치 정보를 얻었다.
- (2) 반복 폴리곤 근사화(iterative polygon approximation) 알고리즘을 용접부 형상에 적합하게 적용하여 정확한 특징점들의 좌표를 얻을 수 있었다.
- (3) 얻어진 특징점들을 이용하여 용접선 추적을 행하였고, 간극의 크기를 측정하여 용접조건 결정에 이용하였으며, 용접결함의 종류와 크기 및 필릿 면적을 측정해 내었다.
- (4) 용접선 추적 결과를 이용하여 파이프의 내부용접과 외부용접을 성공적으로 수행하였으며 용접 후 용접결함을 측정하였다. 그리고 이것을 다층용접에 적용하여 성공적으로 용접을 수행하였다.

본 연구의 환경은 실제 상하수도관 용접 현장 환경보다 양호하다고 생각되며, 용접선 추적 시 빠르고 정확한 탐색을 위해 검색 기준점을 정하였는데, 열악한 환경 하에서는 검색기준점을 정하지 않고 양 끝점을 이용한 반복 폴리곤 근사화 알고리즘을 통해 용접선 추적을 행하는 것이 좋을 것으로 사료된다. 이것은 검색 기준점을 정하지 않는 경우 검색 속도가 느려지고 용접선의 위치정밀도가 떨어지지만 열악한 환경에는 좀 더 적합하기 때문이다. 또한 실제 환경에 대한 적응을 위해서

현장 적응 실험이 필요하고, 용접결합 측정 결과를 용접변수 결정 및 용접선 추적에 반영시키기 위해서는 결합에 따른 보정 방법에 관한 연구도 이루어져야 할 것이다.

후 기

본 논문은 한국건설기술연구원의 위탁을 받은 산·학·연 연구개발사업의 일환으로 진행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J.E. Agapakis, J.M. Katz, J.M. Friedman and G.N. Epstein : Vision-aided robotic welding : An approach and a flexible implementation, The International Journal of Robotics Research, **9-5**(1990), 17-34
2. J. Wu, J.S. Smith and J. Lucas : Welding bead placement system for multi-pass welding, IEEE Proc. - Sci. Meas. Technol., **143-2**(1996), 85-90
3. R.J. Beattie, S.K. Cheng and P.S. Logue : The use of vision sensors in multi-pass welding applications, Welding Journal, **67-11**(1988), 28-33
4. W.S. You : A study on the vision sensor using scanning beam for welding process automation, M.S. Thesis, 1995(in Korean)
5. S.K. Lee : Laser welding system for bellows using vision sensor, M.S. Thesis, 1998(in Korean)
6. J.S. Sin, J.W. Kim, S.J. Na and C.Y. Choi, "A study on vision seam tracking system at lap joints, J. of KWS, **9-2**(1991), 20-28
7. H.J. Park, J.Y. Yu, S.J. Na, S.J. Hong and H.S. Kang : A study on development of automatic welding system for compressor case using vision sensor, J. of KWS, **14-5**(1996), 299-307
8. S.K. Lee, C.D. Yoo and S.J. Na : A study of development of laser welding system for bellows outside edge using vision sensor, J. of KWS, **17-3**(1999), 219-226
9. R.C. Golzalez and R.E. Woods : Digital Image Processing, Addison Wesley, 1992
10. Y.T. Sohn : Visual recognition and tracking of weld joints for robotic arc welding process, M.S. Thesis, 1995(in Korean)
11. S.J. Na : A study on the pipe welding technology for water service and sewerage, Report, 2001(in Korean)
12. ISO 6520-1, 1998
13. ISO 5817, 1992