

디지털 화상처리에 의한 강·구조물의 용접부 치수 결함 검출의 자동화에 관한 연구

김재열*, 유신**, 박기형***

A study on the Automatic Detection of the Welding Dimension Defect of Steel Construct using Digital Image Processing

Jae Yeol Kim*, Sin You**, Ki Hyung Park***

Abstract

The inspection unit which is developed and used in this study, is processed the shape data from the CCD camera to seek welding bite section shape, and then calculated as a real dimension from measuring the value of each inspection item. The reason of measuring with the real in this study is came out from the image method which used for a long time, which is extricated the characteristic as the dimension of pixel by recognize pixel.

The measurement method of the section shape is that we decide the thresholding value after we drew the histogram to binarize the object. after that, we make flat the object to get rid of the noise and measure the shape of welded part through the boundarization of the object. The shape measurement is that measure the value of the welding part to adapt the actual operation program from using the ratio between the actual dimension of the standard specimen and the dimension of image, to measure the ratio between the actual product and the camera image. The inspection algorithm which estimates the quality of welded product is developed and also, the software GUI(Graphic User Interface) which processes the automatic test function of the inspection system is developed. We make the foundation of the inspection automatic system and we will help to apply other welding machine.

Keywords: thresholding value(문턱값), binarization(이치화), boundarization(윤곽선),

* 조선대학교 정밀기계공학과

** 조선대학교 기계공학과 대학원

*** 조선 이공대학 기계과

1. 서 론

각종 기계 구조물에 있어서 용접작업의 효율성은 국·내외에서 이미 인정받고 있는 관계로 산업 현장에서 많이 적용되고 있다.

그리고 이러한 연구들의 선행 단계로서 비파괴시험을 통한 용접결합들의 탐상이 중요한 관건으로 대두되고 있으며, 비파괴 검사 분야 중에서 디지털 화상 처리(Digital image processing)^{(1)~(4)}를 이용한 비전 검사 시스템(Vision inspection system)은 맞대기 용접의 비드 폭, 비드 깊이, 단차 등, 각종 용접부의 외관 형상에 대한 정량적인 측정이 가능하여질 경우 파급효과에 대한 기여로 인하여 지속적인 연구가 진행되고 있다⁽⁵⁾.

그러므로, 본 연구에서의 용접부 외관 치수 검사 시스템이 개발될 경우 강 구조물 및 소재의 고정도의 탐상을 통한 용접 부위의 품질관리 및 경제적 측면에서 그 의미를 찾을 수 있으며, 지능화된 시스템과 연결하므로서 무인자동화 생산라인에서 생산성이 향상되어 그 필요성이 증대될 것으로 본다. 본 연구에서는 탄산가스(CO₂) MAG(Metal Active Gas) 용접기⁽⁶⁾를 자체 제작하여 한가지 작업을 전문적으로 수행하는 용접전용의 첨단 기계를 용접 토치 직선운동 방식을 채택하여 시스템의 운용 적 편리성과 공간적인 융통성을 지닐 수 있게 하였다. 특히 본 연구에서 사용된 비전 보드(Vision Board)를 이용한 시각 검사장치는 조명장치, 화상 입력 장치, 화상처리 장치, 화상 출력 장치, 제어 장치 등으로 구성되어있다^{(7)~(12)}.

입력장치로 Image sensor인 Mono CCD카메라로부터 용접부의 화상을 입력받아 화상만을 전용으로 처리하는 비전 보드를 통해 처리된 후 결과를 모니터에 출력시킨다. 또한 영상 데이터를 처리하기 위해 화상 전처리 기법을 이용하고 운영 데이터를 운영프로그램을 C++로 작성하여 IBM PC로 제어하므로써 용접부의 치수를 검사하는 시스템을 구성한다. 위와 같은 검사 시스템을 이용하여 용접된 강 구조물의 용접부에 대한 화상처리 장치로 용접비드의 폭과 깊이 등을 측정하여 용접부위의 양부를 판단 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 실험장치 구성

본 연구에서 사용된 시각검사시스템은 조명장치, 화상입

력장치, 화상처리장치, 출력장치, 측정장치로 구성된다. 조명장치는 형광 램프를 이용하여 간단하게 구성한다. 화상 입력장치로 CCD Camera를 사용하고 화상처리장치는 삼성전자의 흑백화상처리보드인 FARA MVB를 사용하여 화상입력장치로부터 입력받은 화상을 처리한다. 출력장치는 처리 화상을 출력해주는 비디오 모니터와 운용 프로그램을 처리해주는 컴퓨터 모니터, 화상의 하드카피를 위해 Laser Jet 4 프린터를 사용하였다. 또한 시각검사시스템에서 측정된 길이와 비교하기 위한 측정장치로는 분해능이 1 μ m이고 측정범위가 1,050mm인 TRIMOS사의 길이측장기(TELMN1000)를 사용하여 검사대상물체의 길이를 측정하였다. Photo. 1은 시각검사시스템의 구성을 보여준다.

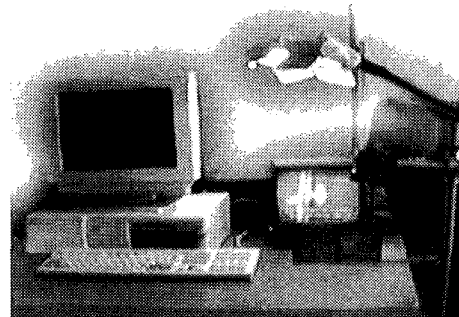


Photo. 1 Visual inspection system

2.2 기준시편의 측정

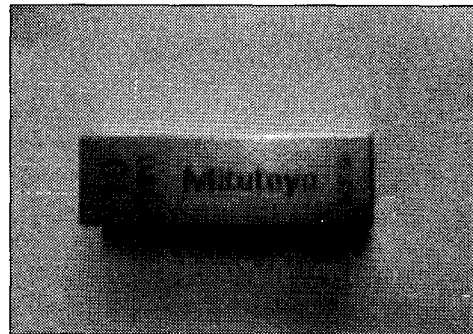


Photo. 2 10mm Gauge block

실제 용접부와 화상에 잡힌 길이는 카메라와 실제 대상물체와의 거리, 카메라의 분해능 등에 의해 서로 다르게 나타난다. 본 연구에서는 카메라 렌즈 중심에서 대상물체까지의 거리측정이 어렵기 때문에 기준시편을 사용하여

화상과 용접부 길이비율을 구해 실제 용접부 치수측정에 응용하고자 한다. 기준시편으로는 Mitutoyo사의 Gauge block set 중에서 10mm의 Gauge block을 사용하였다. 카메라와 기준시편과의 거리를 70mm ~ 95mm까지 5mm씩 변화시키면서 가로 및 세로의 길이비율을 측정하였다. Photo. 2는 10mm Gauge block이다.

2.2.1 가로 길이비율 측정

경계선 추출까지 처리된 화상으로부터 화상의 농도값이 255(흰색)인 점을 인식하여 길이계산 프로그램에 의해 Gauge block의 길이를 구한다. 여기에서 구한 Gauge block의 길이는 화상에서의 길이이므로 실제 Gauge block의 길이가 아니다. 때문에 화상의 길이를 Gauge block의 길이로 나누어주면 Gauge block과 화상의 비율이 구해지게 된다.

Table 1 은 이와 같은 방법으로 구한 길이 계산 및 가로 길이 비율 측정치의 값을 나타낸것이다.

Table 1 Length factor (horizontal)

거리 횟수	70mm	75mm	80mm	85mm	90mm	95mm
1 회	3.13	2.85	2.52	2.32	2.10	1.96
2 회	3.14	2.85	2.52	2.32	2.10	1.97
3 회	3.14	2.85	2.52	2.32	2.10	1.97
4 회	3.14	2.85	2.52	2.32	2.10	1.97
5 회	3.14	2.85	2.52	2.32	2.10	1.97
6 회	3.14	2.85	2.52	2.32	2.10	1.97
7 회	3.14	2.85	2.52	2.32	2.10	1.96
8 회	3.14	2.85	2.52	2.32	2.10	1.97
9 회	3.14	2.84	2.52	2.32	2.10	1.97
10 회	3.14	2.85	2.52	2.32	2.10	1.97
평균	3.139	2.848	2.52	2.32	2.10	1.968

2.2.2 세로 길이비율 측정

세로 길이비율의 측정방법은 가로길이비율의 측정방법과 동일하다. Table 2는 길이계산 및 세로 비율측정치의 값을 보여준다. 본 실험에서는 여기에서 구한 가로 및 세로의 길이비율을 이용하여 용접부 치수검사를 한다.

Table 2 Length factor (vertical)

거리 횟수	70mm	75mm	80mm	85mm	90mm	95mm
1 회	3.08	2.80	2.45	2.29	2.07	1.89
2 회	3.08	2.80	2.45	2.29	2.07	1.89
3 회	3.08	2.80	2.45	2.29	2.07	1.89
4 회	3.08	2.80	2.45	2.29	2.07	1.89
5 회	3.08	2.80	2.45	2.29	2.07	1.89
6 회	3.08	2.80	2.45	2.28	2.07	1.89
7 회	3.08	2.80	2.45	2.28	2.07	1.89
8 회	3.08	2.80	2.45	2.28	2.07	1.89
9 회	3.08	2.80	2.45	2.28	2.07	1.89
10 회	3.09	2.80	2.45	2.28	2.07	1.89
평균	3.081	2.80	2.45	2.285	2.07	1.89

2.3 용접부 치수 측정

자체 제작한 용접기에서 용접된 강 구조물의 용접 결합의 종류 및 특성에 대한 연구 데이터를 기초로 결합 시험편을 제작한후, 용접부 외관 치수 불량검사를 위해 구체적인 화상처리의 전처리 알고리즘을 이용하여 구체적인 외관검사 항목을 선정해서 그 항목의 검사를 위한 알고리즘을 구축한다. 여기에 GUI(Graphic User Interface) 및 검사자동화의 일환으로 자동 양·부 판정알고리즘을 추가해서 전체 외관검사 알고리즘을 링크하고 이에 대한 적용성을 검증하기 위한 실제 현장 용접부에 대한 시험을 수행 한다

본 연구에서는 용접부의 외관 치수 결합 검출을 위해 카메라로부터 용접된 시편의 화상을 취득하고 이치화 화상을 얻기 위해 문턱값 결정한다.

문턱값 결정을 위해 화상의 히스토그램을 얻은 다음 Mode법을 이용하여 문턱값에 의해 화상을 이치화 시키고 이치화된 화상은 3 * 3 Mexican hat filter를 사용하여 평활화 처리를 한다.

평활화 처리로 고주파 성분(잡음)이 제거된 화상은 Laplacian Filter를 통해 용접부위의 윤곽선 추출이 행해진다. 실제 용접부위 검사에는 기준 시편(Block gauge 10mm)을 사용한 비율값(Factor value)을 측정해서 카메라와 실제 용접부위와의 거리 오차에서 나타날 수 있는 치수 오차를 제거한다. 또한, 카메라 렌즈의 중심으로부터 용접된 대상 물체까지의 정밀한 측정이 어렵기 때문에

화상 취득 시 TRIMOS사의 길이 측정기 위에 카메라를 고정시켜 용접부위를 검사한다.

2. 4 이치화

농담화상, 칼라 화상등의 다치 화상으로부터 이치화상을 얻는 처리를 이치화라 한다. 이치화는 화상내의 대상물을 배경으로부터 분단한 대표적인 처리이고 화상의 영역 분할의 일종이다. 화상의 이치화를 목적으로 하는 가장 간단한 형식의 문턱값 결정처리는 농담화상 $f(x, y)$, 문턱값 t 에 관계하고 관계식은 식(1)로 표현된다.

$$f_t(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) \geq t \text{일때} \\ 0 & f(x, y) < t \text{일때} \end{cases} \quad (1)$$

처리결과 $f_t(x, y)$ 는 0, 1의 이치화상으로 된다^{(13), (14)}.

문턱값 결정에 있어 대상물을 바르게 추출하는 것은 문턱값 t 의 결정이 중요하다. 문턱값의 결정방법에는 화상의 대표적인 특징을 이용하는 것이 많다. 그 대표적인 것이 농도 히스토그램이다. 농도히스토그램을 이용한 방법에는 P-tile법, Mode법, 판별문턱값 선정 방법등이 있고 문턱값 처리는 대상물 및 배경의 농도치를 인지 하는 경우에는 경험적으로 지정한 문턱값을 사용할 수 있다. Fig. 1은 히스토그램의 일반적인 경우를 나타낸다^{(15), (16)}.

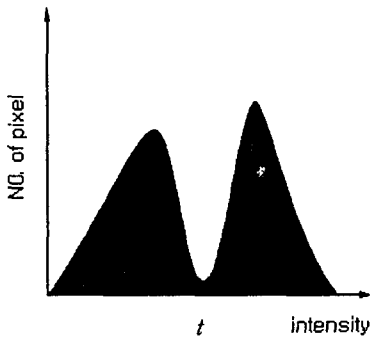


Fig. 1 Example of histogram

본 연구에서는 가장 직감적으로 생각할 수 있고 잘 사용되어지는 히스토그램의 골곡을 보이는 곳을 문턱값으로 하는 Mode법을 사용한다.

2. 5 평활화

이치화된 화상은 잡음(Noise)을 많이 포함하고 있다. 평활화 처리는 영상에서 고주파 성분(Noise)을 감소시키고 저주파 성분을 보존시키는 역할을 한다. 평활화 처리는 보통 필터를 이용한 처리가 주로 이용되고 있다. 이러한 필터를 마스크(Mask)라고도 하고 3×3, 5×5, 7×7등의 크기를 갖는다. 평활화 처리에는 Lowpass filter, Median filter 등을 이용하고 있다. Fig. 2는 일반적인 3×3 Mask를 보여준다.

W ₁	W ₂	W ₃
W ₄	W ₅	W ₆
W ₇	W ₈	W ₉

Fig. 2 A 3×3 mask with arbitrary coefficients (weights)

공간영역의 기본적인 식은 식(2)로 표현된다.

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) \quad (2)$$

$f(x, y)$ 는 원화상을 나타내고 $g(x, y)$ 는 합성에 의해 변환된 화상을 나타내고 $h(x, y)$ 는 position invariant operator이다.

식(2)는 식(3)이 된다.

$$h * f(x, y) = \sum_{i=0}^{x-1} \sum_{j=0}^{y-1} h(i, j) \cdot f(x-i)(y-j) \quad (3)$$

식(2)는 다음 식(4)에 의해 식(5)으로 표현된다.

$$h(t) = (f * g)(t) = \int_0^t f(t) \cdot g(t-\tau) d\tau \quad (4)$$

$$G(u, v) = H(u, v) \cdot F(u, v) \quad (5)$$

여기서 $F(u, v)$ 는 평활화하기 위한 Fourier 변환이고, $H(u, v)$ 는 Filter 변환 함수이다.

본 연구에서는 평활화 필터 중에서 Lowpass filter의

침예도를 잃는 결점을 보완한 Mexican hat filter를 사용하였다.

2. 6 경계선 추출

어떤 점에서의 first order derivative는 그 점에서의 Gradient 크기를 나타내고 어떤 점에서의 second order derivative는 Laplacian을 의미한다. 함수 $f(x, y)$ 에 대해 좌표 (x, y) 에서 f 의 Gradient는 식 (6)과 같이 벡터로 정의된다.

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (6)$$

에지 검출에서는 일반적으로 이 벡터의 크기를 사용한다. 이 벡터의 크기는 ∇f 로 나타내고 Gradient라 한다. 식(7)은 이것을 나타낸다(17).

$$|\nabla f| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (7)$$

이것은 ∇f 의 방향에서 단위 거리당 ∇f 의 증가의 최대비와 같고 식(8)으로 표현할 수 있다.

$$|\nabla f| \approx |G_x| + |G_y| \quad (8)$$

2차원 함수 $f(x, y)$ 의 Laplacian은 second order derivative로 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (9)$$

Laplacian의 일반적인 응용은 영교차점(Zero-crossings property)을 이용하여 에지의 위치를 찾는 것이다. 이것은 2차 Gaussian 함수의 형태를 기초로 하고 식 (10)은 2차 Gaussian 함수의 형태를 나타낸다.

$$h(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (10)$$

여기에서 σ 는 표준편차를 나타내고 $r^2 = x^2 + y^2$ 이다.

식(10)에서 h Laplacian은 식(9)에 대입하여 식 (11)의 결과를 얻는다.

$$\nabla^2 h = \left(\frac{r^2 - \sigma^2}{\sigma^4}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (11)$$

본 연구에서는 Fig. 3과 같은 3×3 Laplacian 필터를 사용하였다.

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

Fig. 3 3×3 Laplacian Filter

2. 7 용접 폭 깊이계산

구하고자 하는 폭과 깊이를 계산하기 위해 경계선 추출이된 화상의 점들을 인식하고 그 점을 지나는 직선의 방정식을 구한다. 두 직선이 교차하는 새로운 점을 인식하여 그 점을 기준으로 구하고자 하는 곳(화소)까지의 거리를 계산한다. 윤곽선 추출이 된 화상에서 임의의 점을 인식하고 그 인식된 두 점 (x_1, y_1) (x_2, y_2) 을 지나는 직선의 방정식은 아래 식(12)과 같다.

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) \quad (12)$$

또한 두 직선은 한 점을 지나게 된다. 한 교차점의 좌표를 인식하고 두 점 사이의 거리를 구하게 된다.

식(13)은 두 점 (x_1, y_1) (x_2, y_2) 사이의 거리를 나타낸다.

$$D = ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

본 연구에서는 위의 계산식들을 이용하여 물체의 화소를 인식, 폭과 깊이를 길이로 계산하게 되고 기준 시편을 이용한 비율값을 적용하여 실제 길이 값으로 계산한다.

Fig. 4는 본 논문 실험에 사용된 프로그램의 순서도를 나타낸다

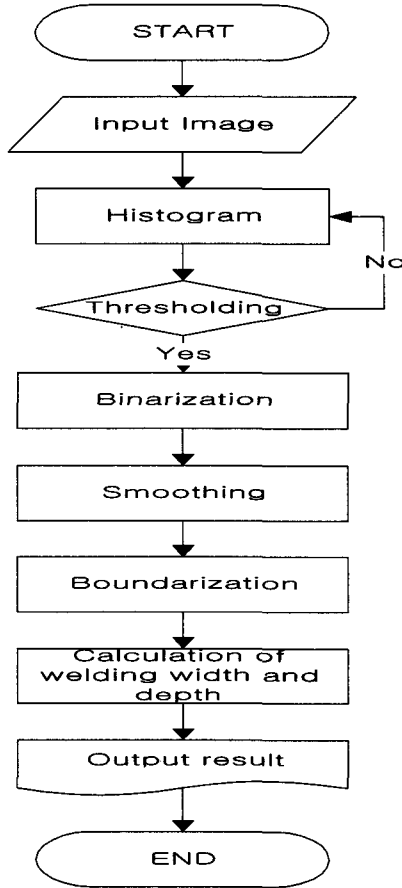


Fig. 4 Flowchart of program

다음 Photo. 3은 용접부 비이드 외부결합검출을 위한 용접 시험편을 나타내고 있다.

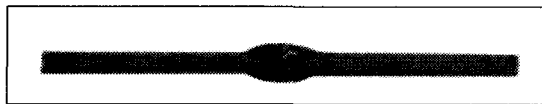


Photo. 3 Specimen of Welding

Photo. 4는 용접 시험편의 히스토그램을 나타내고 다음 Photo. 5는 평활화 처리된 윤곽선을 나타낸다.

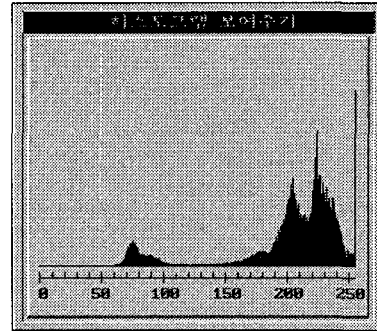


Photo. 4 Histogram of a Weld Specimen

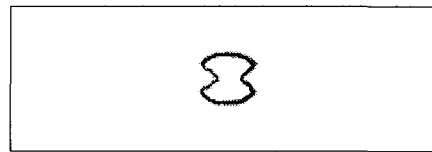


Photo. 5 Boundary detection of a weld Specimen

Fig. 5는 판재의 맞대기 용접 비이드 모양의 외관검사 항목을 나타내고 있고 자체 제작된 용접기를 이용하여 피 용접 판재의 맞대기 판재가 용융되어 비이드가 형성된다.

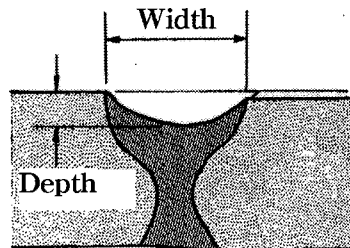


Fig. 5 Item of the out-side inspection

외관 검사의 항목은 용접 비이드의 깊이, 폭, 항목이다. 이들의 개략적인 크기는 피 용접재의 판 두께로 결정되고 이번의 경우 각각 기준 용접 시험편의 목표 정도는 Table 3과 같다.

Table 3 List of the out-side inspection

Inspection item	Require value
Width	25mm
Depth	10mm

본 용접 결함검사용 시각검사시스템의 개발에서 자동 용접기에 의해 용접된 시험편을 사용하여 용접 비드의 폭과 깊이를 10회 씩 측정해서 검사를 하였다. Table 4는 카메라 거리 70mm에서 용접제품 5개의 폭을 그리고 Table 5는 용접제품 5개의 깊이검사 결과를 나타내었다.

Table 4 Width of a weld Specimen (Distance 70mm)

거리 횟수	Spec 1	Spec 2	Spec 3	Spec 4	Spec 5
1 회	25.38	25.69	24.84	24.53	26.28
2 회	25.31	25.49	24.23	24.54	26.28
3 회	25.31	25.69	24.23	24.53	26.28
4 회	25.31	25.86	24.23	24.54	26.28
5 회	25.38	25.86	24.84	24.53	26.28
6 회	25.30	25.69	24.84	24.54	26.28
7 회	25.37	25.69	24.84	24.53	26.24
8 회	25.31	25.69	24.84	24.53	26.24
9 회	25.31	25.69	24.84	24.53	26.24
10 회	25.30	25.69	24.84	24.53	26.24
평균	25.328	25.769	24.657	24.533	26.264

Table 5 Depth of a weld specimen(Distance 70mm)

거리 횟수	Spec 1	Spec 2	Spec 3	Spec 4	Spec 5
1 회	8.72	10.50	10.10	10.39	10.23
2 회	8.72	10.50	10.10	10.39	10.22
3 회	8.72	10.54	10.10	10.39	10.28
4 회	8.72	10.50	10.10	10.39	10.28
5 회	8.72	10.50	10.10	10.39	10.27
6 회	8.62	10.50	10.11	10.39	10.28
7 회	8.61	10.50	10.10	10.39	10.28
8 회	8.61	10.50	10.10	10.36	10.28
9 회	8.61	10.50	10.10	10.36	10.28
10 회	8.61	10.50	10.10	10.36	10.28
평균	8.666	10.504	10.101	10.387	10.268

Fig.6은 맞대기 용접부 비이드 외관검사용 양부판정을 위한 초기화면으로서 비 숙련자도 쉽게 양·부 판정을 할 수 있도록 본문에서 정의한 알고리즘을 이용해 Module로 작성해서 프로그램화 하였다.

먼저 Data화를 위해 아래와 같이 기준 값과 허용오차를 정의했다.

1. 기준 폭 : 25mm (변수값을 조정할 수 있다.)
2. 기준깊이 : 10mm (변수값을 조정할 수 있다.)
3. 허용오차 : 5.0% (변수값을 조정할 수 있다.)

Fig.7은 Visual Inspection 화면에서는 자동검사대상 화상의 합격된 수치값의 양·부 판정화면을 나타내 보이고 있다.

1. 측정폭 : 24.5mm
(오차율 : 2.0%) -----> Good
2. 측정깊이 : 10.3%
(오차율 : 3.0%) -----> Good

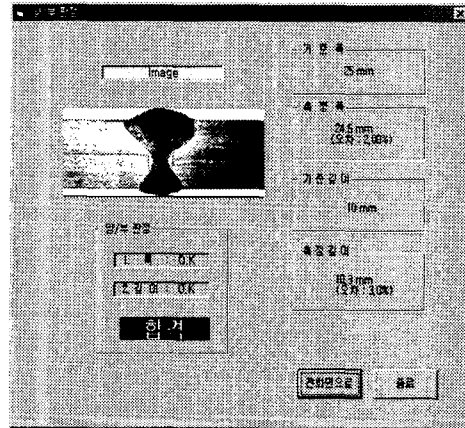


Fig. 6 The initial display for the Whether good or bad (good)

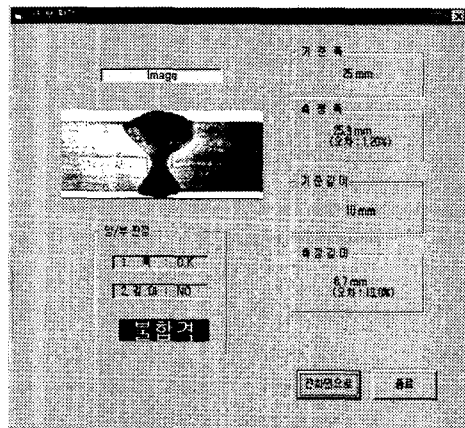


Fig. 7 The initial display for the Whether good or bad (bad)

3. 결론

디지털 화상처리를 이용하여 용접제품의 비이드 폭과

깊이 검사를 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 자체 제작된 용접기를 이용하여 용접 시편을 제작하고 용접된 강 구조물의 용접 비드면의 폭과 깊이검사에 디지털 화상처리를 이용하여 시각검사시스템 개발에 적용하였다.
2. 화상의 전처리 과정에서 평활화 값을 높이면 본래 목적인 길이 측정을 할 수 없을 정도로 대상체가 라운딩 되므로 이에 따른 필터값 조절을 적당히 하여야 하며 더 막강한 필터 처리가 요구된다.
3. 본 시각검사시스템은 조명에 민감한 시각검사시스템으로 카메라의 거리에 따라 달라지는 값과 오차를 가로·세로 길이 비율값을 이용하였고 길이 측정기를 이용하여 카메라와 대상체의 거리를 정확히 하여 오차를 최소화하였으며 기준이 되는 폭과 깊이를 미리 구한 후, 화상처리에 의한 값을 구하여 비교하여 양·부 판정에 이용하였다.
4. 디지털 화상처리를 이용한 용접시편의 폭과 깊이 치수 검사용 시각검사시스템을 구축하였고 시각검사시스템의 최대오차는 0.55mm이다.
5. 본 논문의 용접시편의 비이드 폭과 깊이 검사용 시각검사시스템은 화상처리 라이브러리를 이용하여 C++ 언어로 구성되어 있어 간단한 변환으로 타 용접 시험편의 비이드 폭과 깊이 검사에도 응용할 수 있다.
6. 검사 시간은 IBM Pentium II 233 MHz을 사용한 화상처리 보드의 메모리 버퍼로부터 PC의 RAM에 화상정보를 Fetch하는 시간이 포함되어 있고 약 4.5초 정도의 연산시간이 필요하였다. 그러나 실시간 자동화를 위해서는 처리속도를 줄이기 위해서는 Program 및 화상 데이터 저장을 위한 Memory가 구비되고 Vision Board의 성능이 향상된다면 검사 속도가 빨라질 수 있을 것이다. 또한 용접 토치부에 용접시 발생하는 스파터 등의 조건을 극복할 수 있는 카메라를 부착하면 실시간 자동화 검사 시스템 구축이 가능하리라 본다.

본 연구는 한국전력공사(연구기간:1997.8 ~1998.7)의 지원에 의하여 기초전력공학 공동 연구소 주관으로 수행 되었음.

참 고 문 헌

1. Adrian Low : Introductory Computer Vision and Image Processing : McGraw-Hill, 1991, pp.68~69, pp.88~94.

2. Craig A. Lindley : Practical Image Processing in C : John Wiley & Sons, 1991, pp.351~421.
3. Ioannis Pitas : Digital Image Processing Algorithms : Prentice Hall, 1993, pp.223~230.
4. M. A. Sid-Ahmed : Image Processing : McGraw-Hill, 1995, pp.87~98.
5. Osamu Ozeki, "Visual inspection system for welded point of automotive panel", 日本화상 센싱 기술 심포지움 강연 논문집, No. 7, 1991.
6. 김재열, "상용차용 액셀 케이스의 너트부 용접공정 자동화 시스템 개발," Journal of The Korean Society of Precision Engineering, pp 810-814, 1996.
7. 유신 외 2명, "비전 시스템을 이용한 사출제품의 길이 측정용 시각검사 시스템 개발," Journal of The Korean Society of Precision Engineers, pp 126-130, 1997.
8. 구기준 : 화상정보처리 : 기문사, 1993, pp.38~40.
9. 이문호 : 퍼스컴을 이용한 화상처리 : 도서출판 기다리, 1992, pp.4~5.
10. 일본공업기술센터 : 컴퓨터화상처리 입문 : 기전연구사, 1993, pp.214~255.
11. 편집부 : 화상처리 회로기술의 모든 것 : 도서출판 세운, 1992, pp.190~193.
12. KETI전자부품종합기술연구소 : "PCB패턴의 고속정밀 Vision검사 시스템 개발," 1994 보고서.
13. R. C. Gonzalez, R. E. Woods : Digital Image Processing : Addison-Wesley, 1992, pp.162~163, pp.191~195, pp.202~203, pp.413~414, pp.416~423.
14. R. M. Haralick, L. G. Shapiro : Computer and Robot Vision I, II : Addison-Wesley, 1993, pp.13~15, pp.346~351.
15. J. M. S. Prewitt, M. L. Mendelsohn : "The analysis of cell image," Ann. N.Y. Acad. Sci., 128, pp.1035-1053, 1966.
16. J. S. Weszka : "A survey of threshold selection techniques," CGIP, 7, 2, pp.259-256, 1978.
17. 畫像處理ハンドブック編輯委員會 : 畫像處理ハンドブック : 昭晃堂, 1988, pp.62~69.