

PDF Estimation 과 Dempster-Shafer theory 를 이용한 레이저용접 결함검출 기법

A Fault Detection Method of Laser Welding based on PDF Estimation and Dempster-Shafer Theory

저자 (Authors)	오록규, 김덕영 Rocku Oh, DuckYoung Kim
출처 (Source)	한국CDE학회 학술발표회 논문집 , 2014.2, 1011-1016 (6 pages)
발행처 (Publisher)	(사)한국CDE학회 Society for Computational Design and Engineering
URL	http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE02496058
APA Style	오록규, 김덕영 (2014). PDF Estimation 과 Dempster-Shafer theory 를 이용한 레이저용접 결함검출 기법. 한국 CDE학회 학술발표회 논문집, 1011-1016.
이용정보 (Accessed)	울산과학기술원 114.70.11.*** 2018/09/03 10:50 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독 계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

PDF Estimation 과 Dempster-Shafer theory 를 이용한 레이저용접 결함검출 기법.

오록규 · 김덕영[†]

울산과학기술대학교 디자인 및 인간공학부

A Fault Detection Method of Laser Welding based on PDF Estimation and Dempster-Shafer Theory

Rocku Oh, DuckYoung Kim[†]

School of Design and Human Engineering, UNIST

ABSTRACT:

Although laser welding has many advantages such as fast processing time and single-sided access, the requirement of tight part-to-part gap control has been a main obstacle to maintaining the quality of laser welding. Traditionally, various stochastic anomaly detection methods have been developed for on-line weld defect detection, so that physical signals during the welding process can be monitored and classified. In order to improve the accuracy of weld defect detection, in this research paper, plasma intensity, weld pool temperature and back reflection signals are monitored, and their nominal trends are estimated by PDF estimation methods. We then aggregate these information, based on Dempster-Shafer theory. The performance of the proposed method is compared to the commercially available solutions of PRECITEC's LWMTM and Hotelling's T^2 method that are widely used in the literature. The proposed method reveals better performance in terms of Type I and Type II errors.

Key Words: Laser Welding, Fault detection, PDF Estimation, Dempster-Shafer theory

1. 서 론

레이저는 매우 높은 빛 에너지 밀도를 가진다. 이를 용접의 열원으로 이용하면 가공속도가 빠르며 다양한 소재에 사용이 가능하기 때문에 그 활용범위가 계속 확장되는 추세이다. 하지만 레이저용접은 상하 모재간 간격 제어(part-to-part gap control)의 어려움 등으로 안정적인 용접부 품질의 신뢰성을 보장하기 힘든 단점이 있다. 일반적으로 아연이 도금된 철판의 용접은 모재간 간격은 용접시에 중요한 파라미터 중 하나이다. 도금된 아연의 기화점(1180K)이 상대적으로 다른 금속 성분들(철의 경우 1809K) 보다 낮기

때문에 용접시에 다른 화학성분보다 먼저 기화하여 용접 품질에 영향을 미친다[1]. 모재간 간격이 최소요구간격보다 좁을 경우 아연기체가 다른 정상적인 곳이 아닌 용접부분(용융풀)으로 배출된다. 이때 시편에 스패터(spatter)가 발생하며 용접 접합부(seam)가 일정하지 못하고 용접부 너비(seam width)의 변동이 커진다. 위와 같은 결함을 검출하기 위해 현재 산업현장에서는 용접 부위 절단면 분석과 인장력 분석 방법과 같은 오프라인 샘플 검사를 시행하고 있다. 하지만 위와 같은 품질검사는 모든 용접 결과물에 대한 결함검출이 불가능하기 때문에 용접 중 발생하는 물리 현상 신호를 계측하고 분석하여 실시간으로 용접품질을 확인하고자 하는 많은 연구들이 진행되고 있다[2, 3]. 본 연구에서는 결함

[†] Corresponding Author, dykim@unist.ac.kr

© Society of CAD/CAM Engineers

검출 정확도를 향상시키고자, 플라즈마 세기, 용접 풀의 온도, 반사광 신호를 실시간으로 수집하고, 그 신호들의 PDF Estimation 을 수행하며 Dempster-Shafer Theory 를 기반으로 수집 정보를 분석하였다. 현재 상용화 되어있는 PRECITEC LWM™ 시스템에 탑재된 기법, 그리고 널리 사용되고 있는 Hotelling's T^2 기법과 제안하는 결합검출방법의 성능을 1 종 오류와 2 종오류를 기준으로 비교하였다.

2. 관련 연구

2.1 단일 센서에 의한 고장감지

용접불량을 감지하기 위한 모니터링 시스템은 대표적으로 음향(acoustic), 빛의 방출, 용접시 방출되는 플라즈마의 세기, 반사광의 크기 신호등을 이용한다[2]. 음향신호를 이용하면 비용이 저렴하며 가공 특성과도 관련 있어 쉽게 적용 할 수 있다. 하지만 주변의 잡음 신호의 발생이 쉬워 일반 산업 현장에서는 이용하기 어려운 단점이 있다[4]. 광 신호를 이용하는 방법으로는 포토다이오드와 분광기를 이용하며 이는 레이저 용접시의 적외선과 자외선 파장을 구분해 용접 불량 검출에 이용하는 방법이다. 적외선 신호는 용융풀의 온도를 감지하며, 자외선 신호는 플라즈마 플럼(plume)의 상태를 모니터링하여 각각의 결함을 찾아 낸다. 현재 상용화에 있는 레이저용접 결합 검출 모니터링 시스템은 이러한 단일 신호에 대한 한계(threshold)를 정한 후 그 범위를 초과하였을 시에 용접 불량이라 판단한다. Fig. 1 에서와 같이 용접 신호가 정해져 있는 한

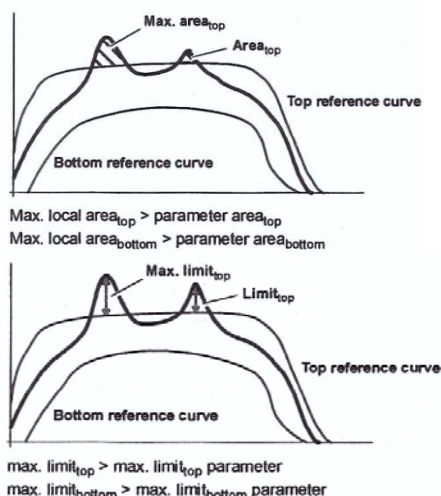


Fig. 1 Stochastic anomaly detection methods in laser welding quality monitoring - 1012 - (PRECITEC)

계선을 벗어나거나 한계점을 벗어난 영역의 크기가 기준값을 초과하였을 경우 결함이라 판단한다.

2.2 멀티센서에 의한 고장감지

일반적으로 한 시스템의 결합 검출에는 다수의 센서들이 사용된다. 그러므로 앞선 단일 센서에 의한 용접불량 검출은 다수의 센서정보를 대변하지 못하며 이러한 경우에 다수의 센서를 이용하는 용접 불량 기법을 사용하여 검출한다. 이를 위해 다수의 센서에서 수집된 정보를 축소하거나 결합하여 처리할 필요가 있는데, 대표적으로 Hotelling's T^2 method 를 이용한 주성분 분석 방법이 사용된다.

2.2.1 주성분 분석(Hotelling's T^2) 를 이용한 결합 검출

경제성과 연산의 효율성을 고려하였을 경우에 고차원의 데이터의 크기를 축소하여 분석하는 경우가 있다. 원본의 정보손실을 최소화하면서 저차원으로 차원을 축소시키는 방법이 주성분 분석(Principle component analysis)이다. 식(1)에서 데이터(X)는 특이값분해(Singular vector decomposition)에 의하여 스코어행렬(T, score matrix)와 가중치행렬(P, loading matrix)로 분해될 수 있다. 이를 기반으로 가중스코어의 제곱합을 고려하여 주성분의 부분공간(Principle component subspace)의 변동을 확인하는 것이 Hotelling's T^2 기법이다[5].

$$X = TP^T + \tilde{X} \quad (1)$$

$$T^2 = x^T P \Lambda^{-1} P^T x \quad (2)$$

$$UCL = \frac{p(n-1)}{n-p} F_{\alpha(p, n-1)} \quad (3)$$

Hotelling's T^2 의 통계량은 수식(2)와 같다. 전체 n 개의 성분 중 차원축소를 위해 p 개의 주성분을 선택한다. 그에 대칭되는 고유값(Eigen value)들의 대각행렬이 Λ 이며, 정량적으로 스코어값(T)들의 Mahalanobis 거리를 나타낸다. 이는 주성분이 형성되는 공간에서의 거리를 나타내는 것으로 기준점으로부터의 거리를 나타낸다. 용접 결함 판단의 통계적 관리 상한선(Upper control limit)은 수식 (3) 과 같으며 $100(1-\alpha)\%$ 의 신뢰구간을 갖는다[6].

3. Fault Detection Method 및 실험

3.1 문제 정의

일반적으로 결함 및 불량 감지에는 단일 센서 데이터에 대한 한계값(threshold) 또는 경향성을 이용한다. 하지만 단일 센서를 이용하는 기법으로는 다양한 용접 불량을 검출하기 힘들고 다른 센서들의 정보를 반영하기 힘들다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 다수의 센서를 이용하는 고장감지 기법이 필요하다.

주성분 분석법을 이용하는 경우, 신호의 특정한 변동을 결함으로 검출할 수 있다[7]. 또한 이는 다수의 센서 정보를 반영한 결과이기 때문에 단일 센서를 이용한 검출방법이 비하여 보다 정확하게 시스템의 불량을 정의할 수 있다. 하지만 레이저 용접 신호와 같이 특정한 경향성을 가지는 신호의 결함 검출에 있어서 Hotelling's T^2 기법은 정상구간을 결함이라고 검출하는 “제 2 종 오류”의 수치가 높은 결과를 가진다. 따라서 레이저 용접 신호를 분석하는 경우, 경향을 반영하면서 다수의 센서정보를 포함 할 수 있는 기법이 필요하다. 위와 같은 한계를 보완하기 위하여 본 논문에서는 PDF(Probability Density Function) Estimation 기법과 Dempster-Shafer Theory 를 적용한 용접 결함 검출 기법을 제안한다.

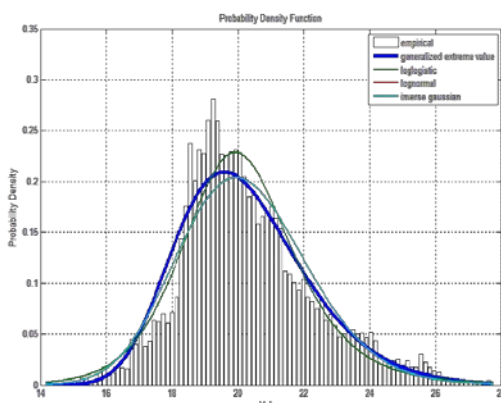


Fig. 2 PDF estimation of Temperature sensor data

3.2 PDF Estimation

데이터로부터 추출된 확률 함수가 가설에 적합한 지를 나타내는 것으로 적합도(goodness of

fit)이라 하며 이는 현재의 데이터 분포가 어떠한 확률밀도함수와 가장 근접한 지를 나타내며 그에 따른 매개변수의 추정 값을 제공한다. 수집된 데이터와 적합한 확률밀도함수를 찾기 위해 NLogL(Negative of the Log Likelihood), AIC(Akaike Information Criterion), AICc(AIC with a correction for finite sample sizes), BIC(Bayesian Information Criterion)와 같은 척도를 이용한다[6]. AIC, AICc, 와 BIC 모두 값이 작을수록 해당 확률분포 모델과 가깝다고 정의하며 NLogL의 경우, 그 값이 0에 가까울수록 적합한 모델이라 할 수 있다. 예를 들어 Fig. 2에서와 같이 레이저 용접신호 중 용융풀의 온도를 측정한 데이터의 분포를 PDF estimation 한 결과, generalized extreme value 분포가 가장 적합함을 알 수 있다. 이와 같이 센서들에 대한 확률모델을 추정 후 레이저 용접 신호들의 분포를 확인하고 이를 evidence theory에 적용하였다.

3.3 Dempster-Shafer Theory

Dempster-Shafer 이론은 전통적인 확률이론의 한계를 극복하고자 불확실성의 개념으로 개발되었다. 또한 서로 다른 소스(센서)에서 수집된 정보들을 결합하는 fuser 로도 적합하다[8].

Dempster-Shafer theory에서 서로 배타적이고 빠짐이 없는 요소들의 집합을 “The frame of discernment, Θ ”라 한다. Θ 의 부분집합을 $A_i \in 2^\Theta$ 라고 정의하며 정보 소스에 따른 mass value가 할당된다. 만약 서로 다른 부분집합들에 대해 정보 소스가 구분할 수 없다면 mass value는 두 부분집합의 합집합에 할당된다. Mass function(value)에 대한 성질은 다음과 같다.

$$0 \leq m(A_i) \leq 1 \quad (1)$$

$$m(\emptyset) = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{A_i \in 2^\Theta} m(A_i) = 1 \quad (3)$$

$$m(A_i) + m(A_i') \leq 1 \quad (4)$$

$$m^{1,2}(A_i) = \frac{\sum_{A_p \cap A_q = A_i} m^1(A_p) m^2(A_q)}{1 - \sum_{A_p \cap A_q = \emptyset} m^1(A_p) m^2(A_q)} \quad (5)$$

서로 다른 정보 소스의 mass distribution m_1 과 m_2 는 Dempster의 직교 규칙(orthogonal rule)으로 서로 결합할 수 있다. 그 결과 생성되는 새로운 distribution $m^{1,2} = m_1 \oplus m_2$ 가 생성된다.

식 (5)의 분모식은 일반적으로 정규화요소(normalization factor)로서 얼마나 두 정보 소스가

대립되는가를 알려주는 지표이다. 그러므로 분포의 값이 클수록 두 소스는 더욱 대립되며, 융합한 mass function 값이 감소함을 알 수 있다.

Mass distribution function 으로부터 두 가지의 불확실성(uncertainty) 요소를 정의 할 수 있으며 이는 belief function(Bel)과 Plausibility function(Pls)이다. $Bel(A_i)$ 는 A_i 에 대한 최소한의 불확실성의 정량적 값이며, $Pls(A_i)$ 는 불확실성의 최대값이다. 두 요소는 신뢰구간(confidence interval) $[Bel, Pl]$ 로 표현 할 수 있으며 가설 결정의 척도로 이용할 수 있다.

$$Belief(A_i) = \sum_{A_j \subset A_i} m(A_j) \quad (6)$$

$$Plausibility(A_i) = \sum_{A_j \cap A_i \neq \emptyset} m(A_j) \quad (7)$$

3.4 PDF estimation 과 Dempster-Shafer theory 를 이용한 레이저 용접 결함검출 기법

반복 실험을 통해 정상적인 용접 결과를 가지는 신호를 중첩하여 PDF Estimation 을 진행하였으며, negative log likelihood 값이 0에 가장 가까운 결과값을 이용하여 센서 데이터의 분포(distribution)를 결정한다. Fig. 2 과 같이 온도신호에 대한 분포를 결정한 후 각각의 함수에 대해서 2.5%, 25%, 50%, 75%, 97.5% 구간에 해당하는 실제 기준값을 결정한다. 수집되는 데이터들은 각각의 기준값에 대한 거리값을 가지며 그 거리값의 역수를 정규화하여 mass function (value)에 할당(Table 1)하였다.

3.5 실험 환경 및 실험 방법

IPG사의 2KW Fiber Laser(YLS-2000AC)가 레이저 광원으로 사용되었고, PRECITEC LWM(Laser Welding Monitor)에서 실시간으로 수집되는 용융풀의 온도(Temperature), 플라즈마의 세기(Plasma), 반사광의 세기 신호(Back Reflection)를 이용하여 결함 검출에 이용하였다. 신호의 수집 Sampling rate은 5kHz이며 10Hz 저역통과 필터링(low-pass filtering)된 신호를 이용하였다. 용접시편의 화학조성과 두께는 Table 2와 같고, 1.4mm 아연도금강판을 상판, 1.8mm 아연도금 강판을 하판으로 하여 30mm 겹치기 용접하였다.

Table 3와 같은 조건으로 34회 실험 하였으며, PRECITEC LWM에 내장된 단일 센서 각각의 threshold fault detection 과 Hotelling's T^2 기법을 이용한 통계적 fault detection, 그리고 본 논문에서 제시하는 PDF estimation 과 Dempster-Shafer

theory 를 이용한 용접 불량 감지 기법을 “제 1종 오류”(결함결과를 정상이라 분석하는 오류)와 “제 2종 오류”(정상결과를 결함이라 분석하는 오류)의 수치로 비교하였다.

Table 1 Mass function of temperature sensor data

m_T	Pdf value	Temperature
\emptyset		0
X1 (fault)	2.5%	$k^*(1/d1)$
X1,X2	25%	$k^*(1/d2)$
X2	50%	$k^*(1/d3)$
X2,X3	75%	$k^*(1/d4)$
X3 (fault)	97.5%	$k^*(1/d5)$
X1,X3		0

Table 2 Chemical composition of welding experiment specimen (galvanized steel)

Material	Width (mm)	C	Si	Mn	P	S
SGAFC 590DP	1.8	0.09	0.26	1.79	0.03	0.003
SGARC 440	1.4	0.08	0.02	1.38	0.02	0.003



Fig. 3 Visual inspection of good welded and bad welded samples

Table 3 Laser welding experiment parameter

Weld length	Weld Speed	Laser Power	Gap
-------------	------------	-------------	-----

30mm	2100 mm/min	2kW	0.2 mm
------	----------------	-----	--------

Table 4 Experiment result

	Correction rate	Type1 error rate (False Alarm)	Type 2 error rate (Miss)
Precitec LWM	11.77%	84.62%	100%
Hotelling's T^2	70.59%	26.29%	37.5%
Dempster- shafer theory	88.24%	15.38%	0%

4. 결함 검출 결과 분석

4.1 실험 결과

외관검사는 용접선 주변의 스패터(spatter)의 유무, 용접선의 일정함, 용접선(seam)에 홈(hole)의 유무를 기준으로 결함을 판단하였다. 총 34개의 시편 중 8개의 시편에서 위와 같은 결함을 발견하였고 이를 용접 결함으로 분류하였다.

실험의 결과는 Table 4 와 같다. PRECITEC LWM의 경우 용접불량 감지에 우선사항이 기준곡선(reference curve)을 먼저 설정하는 것이다. 다수의 정상 용접데이터를 이용하여 용접불량 감지 시행의 이전에 정상범위(threshold) 곡선을 결정한다. 이는 다수의 정상 용접 데이터들이 필요로 하며 그 양이 많아질수록 용접 불량 감지의 정확성이 높아지지만 정확한 용접불량 감지를 위해서는 다수의 선행실험 및 파라미터 조정이 필수적이다.

정확성 면에서 Dempster-Shafer 센서 융합 알고리즘을 이용하여 하나의 지표로 용접 불량 감지를 하였을 경우 정확성이 88.24%로 가장 높았고, 제 2종 오류가 0%로 모든 결함 용접시편을 검출하였다. Hotelling's T^2 를 이용한 검출에서는 먼저 전처리 과정으로 용접 시작과 끝부분의 센서데이터를 제외하고 분석에 사용하였다. “제 1종 오류”가 약 26.3%로 본 논문에서 제안하는 용접 불량 검출 알고리즘의 1종오류 수치(15.38%)보다 높았으며, 이는 레이저 용접 신호와 같이 특정한 경향을 가진 데이터에 대해서는 효율성이 높지 못한 것으로 판단할 수 있다.

실험 및 검증을 위해 Matlab 을 이용하여 데이터를 분석하였다. 실험 시에 수집한 plasma, temperature, back reflection 센서 신호를 분석에 이용하였다. 고장 감지 기법을 선택할 수 있도록 하였고 결함이 발생한 구간을 알 수 있도록 그래프와 실제 용접 결과 사진을 화면에 출력하였다. 실제로 용접 품질이 좋지 않은 불량 구간을 분석 소프트웨어가 감지함을 알 수 있었다.

5. 결론 및 향후 연구

레이저 용접의 활용 범위가 넓어짐에 따라 용접부 품질검사 및 신뢰성이 중요한 문제가 되고 있다. 이에 본 논문은 전 시편에 대한 용접부 품질검사 기법들을 비교하고, 특정 경향을 가지는 신호에 대해 취약했던 통계적 고장검출 방법의 단점을 보완하고자 용접 신호 분석에 적합한 기법을 제안하였다.

정상 용접 신호를 기반으로 정상 용접 구간에 대한 분포를 추정하고 다수의 센서정보를 하나의 지표로 통합하였다. 또한 그 지표를 불확실성의 개념으로 접근하였고, 널리 사용되는 통계적 고장진단 방법과 비교하였다. 비교결과 본 논문에서 제안하는 용접결함 검출 기법이 용접 검출 정확성과 더불어 제 1종오류와 2종오류의 수치를 낮추었다.

보다 정확한 용접 품질 검사를 위해서는 제안된 기법에서 pdf estimation 으로부터 얻어진 mass function 을 정의하는 부분이 중요하다. 현재 결함 검출기법에서는 정상 시편 데이터를 중첩하여 얻어진 분포를 이용하였다. 이는 불확실성의 면에서 정상임을 판별하는 데에 의의가 있지만 엄밀하게는 시편이 불량임을 확인하는 지표로 볼 수 없다. 이에 향후 과제에서는 용접 불량량의 데이터를 이용하여 분포를 산출한 후, 불량량의 가능성에 대한 mass function 을 정의하고 효율성을 비교 확인하고자 한다. 실시간 용접 모니터링과 용접 불량률을 낮추는 연구의 일환으로 용접 불량 검출뿐만 아니라 용접 신호에 대한 물리적 이해[9]를 바탕으로 용접 불량 원인을 파악하여야 한다. 또한 이를 적용하여 용접 파라미터를 재조정하는 피드백 용접 컨트롤이 요구된다.

감사의글

본 연구는 한국산업기술진흥원 “2011 년도 다
자간 국제 공동연구개발사업(EU FP-M0000224)”
의 지원을 받아 수행된 것임.

참고문헌

1. Kim, J.-D. and C.-J. Lee, 2010, Study on the Relationship Between Emission Signals and Weld Defect for In-Process Monitoring in CO₂ Laser Welding of Zn-Coated Steel, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*. 34(10), pp. 1507-1512.
2. Shao, J. and Y. Yan, 2005, Review of techniques for On-Line Monitoring and Inspection of Laser Welding, *Journals of Physics*, (Conference Series 15), pp. 101-107.
3. Saludes Rodil, S., et al., 2009, Laser welding defects detection in automotive industry based on radiation and spectroscopical measurements, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 49(1-4), pp. 133-145.
4. Park, Y., 2012, Weld Process Monitoring Technology in Laser Welding, *Journal of KWJS*. Vol.30(No.1), pp. 27-32.
5. MacGregor, J. and T. Kourti, 1995, Statistical process control of multivariate processes, *Control Engineering Practice*. 3(3), pp. 403-414.
6. Baek, S.J., Y.J. Lee, and D.Y. Kim, 2012, Intelligent Discretization Methods for Failure Pattern Analysis, *Proceeding of Industrial Engineering & Management Systems*, pp. 581-585.
7. Qin, S.J., 2012, Survey on data-driven industrial process monitoring and diagnosis, *Annual Reviews in Control*.
8. Kaftandjian, V., et al., 2003, Uncertainty modelling using Dempster-Shafer theory for improving detection of weld defects, *Pattern Recognition Letters*. 24.
9. Kim, J., 2002, Fundamental Study on the Weld Defects and its Real-time Monitoring Method, *Journal of KWS*. Vol.20(No.1), pp. 26-33.