

# 용접결함 검사 자동화 시스템 구축에 관한 연구

김창현\*, 유흥연\*, 홍성훈\*, 김재열<sup>+</sup>  
(논문접수일 2007. 7. 16, 심사완료일 2007. 9. 10)

## A Study on Construction of Automatic Inspection System for Welding Flaws

Chang-Hyun Kim\*, Hong-Yeon Yu\*, Sung-Hoon Hong\*, Jae-Yeol Kim<sup>+</sup>

### Abstract

The purpose of this research is stability estimation of plant structure through classification and recognition about welding flaw in SWP(Spiral Welding Pipe). And, In this research, we used nondestructive test based on ultrasonic test as inspection method, and made up 2-axes inspection robot in order to control of ultrasonic probe on the SWP surface, and programmed to image processing and probabilistic neural network(PNN) classifying code by MATLAB programming. Through this process, we proved efficiency on the system of SWP stability Estimation.

**Key Words** : 2-Axes Inspection Robot(2축 검사로봇), Ultrasonic Test(초음파탐상), Welding Flaw(용접결함), Feature Variables(특징변수), Pattern Classification(패턴분류)

## 1. 서론

용접은 두 대상재의 금속적 이음법으로 산업 현장에서 80~90% 이상을 차지할 정도로 그 의존도가 높다. 그러나 모재와 용가재의 용융으로 생성되는 용접부는 공정 중에 많은 변수로 인하여 결함의 발생율이 높으며, 특히 균열과 같은 선형 결함은 현저한 응력집중 현상을 일으켜 강도저하와 피로파괴의 직접적 원인이 된다. 따라서 용접부의 결함을 정량적으로 평가하는 것은 구조물 전체의 건전성 및 안정성 측면에서 대단히 중요하다<sup>(1)</sup>. 각종 배관라인 및 각종 플랜트 설비의 배관라인에 대해 안전성 및 수명연장을 위한 용접부

의 비파괴 평가는 공학적으로 대단히 중요하다<sup>(2,3,14)</sup>.

근래 들어 도시화 및 사회간접자본시설 투자확대에 따라 상수도용, 토목기초용, 건축용 등의 배관재의 수요가 증가하고 있으며 이러한 배관 제작에는 예전에는 용접부가 직선인 LWP(Linear Welding Pipe)를 사용하였으나 최근에는 직선 용접관의 단점을 보완한 SWP(Spiral Welding Pipe)가 많이 사용되고 있고, 앞으로 그 수요가 더욱 증대할 것으로 본다.

SWP의 용접부 결함 검출은 아직까지는 방사선에 의한 방법에 의존하고 있다. 그러나 방사선에 의한 방법은 피폭 등의 문제뿐만 아니라 실시간 처리의 어려움으로 제작되는 SWP

<sup>+</sup> 교신저자, 조선대학교 공과대학 메카트로닉스공학과 (jykim@chosun.ac.kr)  
광주광역시 동구 서석동 375 조선대학교  
<sup>\*</sup> 전남대학교 공과대학 전자컴퓨터공학부

의 전체를 탐상하기에는 역부족이며 이에 따른 경제적 손실과 용접결함 내포의 위험성을 완전히 해결하기는 어렵다<sup>(4,5,13)</sup>.

본 연구는 SWP의 결함검출을 X-선 대신 초음파를 적용하여 초음파 탐상이 가지는 장점을 살려 용접공정 중 실시간 탐상으로 제품의 신뢰성을 높이고자 함에 있다. 이를 위해서 용접 비드의 형상이 복잡한 SWP의 용접결함을 정량적으로 검출하기 위한 방법으로 스파이럴 용접 파이프의 용접 비드를 추종할 수 있는 2축 로봇 결함 검출 시스템을 설계 및 제작하고, PC-based 오실로스코프와 MATLAB을 이용하여 용접결함의 초음파 신호를 디지털 신호화하여 용접결함의 패턴인식과 분류율을 향상하기 위한 인공지능형 탐상 시스템을 개발하고자 한다.

## 2. 시스템 구성

용접배관 자동 탐상 시스템은 용접 비드를 추종하여 스캐닝 할 수 있는 2축 로봇 시스템과 로봇 제어 및 PC-based 초음파 시스템으로 구성되어 있다. 로봇 시스템은 파이프를 회전시키기 위한 모듈과 초음파 탐촉자를 움직이기 위한 스캐닝 모듈로 구성된다. Fig. 1은 스파이럴 용접 파이프 자동 탐상 시스템의 개략도이다.

### 2.1 2축 로봇 시스템

스파이럴 용접 파이프는 제작 특성상 직경에 따라 일정한 피치의 용접 비드를 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 이를 이용하여 파이프의 회전에 따른 용접비드의 추종을 2 자유도를 가지는 로봇을 설계 제작하여 구현하였다.

본 시스템의 구동부를 구성하는 종축 구동부는 길이 1200 mm의 스트로크와 고정밀도의 속도, 위치결정 및 동기운전을 목적으로 하고 있기 때문에 동력전달이 확실하고 구조상의 복잡함을 피하기 위하여 스크류 방식의 구동방식을 사용하였다. 종축 구동부에 사용되는 액츄에이터는 AC 서보모터로써 LG사의 FMA시리즈의 모터로서 세부적인 모델명은

FMA-LN03- BB00이다. 마이크로 컨트롤러로 전용드라이버를 제어하여 모터의 위치와 속도를 제어한다.

SWP를 회전시키는 주축은 실제 파이프의 용접속도를 구현하기 위하여 주축에 사용되는 액츄에이터로 1kW의 기어 드 모터를 사용하였고 감속비는 1/60이다. 주축은 SWP와 직렬로 연결되어 있어 정역회전시 백래시의 문제가 발생하므로 서보 모터가 아닌 일반 기어 드 모터를 사용하였다.

센서로는 5000 펄스 로타리 엔코더와 파이프의 위치를 제어하기 위한 근접센서를 이용하였다. 접촉매질은 자흡식 펌프를 이용하여 글리세린을 사용하였고 유량은 5 l/min로 하였다. 그리고 SWP의 고정은 3 조인트의 연동축을 사용하여 파이프의 내부를 지지하도록 하였다.

Fig. 2에 자동 탐상용 2축 로봇 시스템의 사양을 나타내었다. 본 시스템에서 사용된 센서는 파이프의 회전을 검출하는

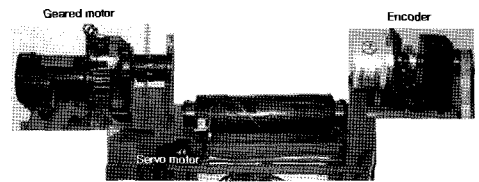


Fig. 2 2-Axes Inspection Robot

Table 1 Specification of AC servo motor

FMA AC servo motor series		Specimen
Rating power [W]		100
Rating torque	[N · m]	0.32
	[kgf · cm]	3.25
Instantaneous maximum torque	[N · m]	0.96
	[kgf · cm]	9.75
Rating rotation speed [rpm]		3000
Maximum rotation speed [rpm]		5000
Rotor inertia	[gf · cm · s <sup>2</sup> ]	0.061
	[kg · m <sup>2</sup> × 10 <sup>4</sup> ]	0.06
Accuracy burden inertia rate (rotator comparison)		30배 이하
Rating power rate [kW/s]		17.0
Encoder	standard	Incremental 2000
	option	Absolute 11/13bit 2048[p/rev]
Weight [kg]		1.43

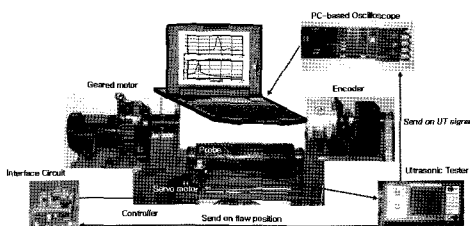


Fig. 1 PC-based UT system on real time

로터리 엔코더와 리미트 스위치, 그리고 파이프의 원점 수형을 위한 근접센서이다.

주축을 회전시키는 구동부는 정역회전에 의한 백래쉬의 영향으로 정확한 위치제어가 어려워 해결방안으로 모터 회전의 검출 대신 실제 파이프의 회전을 검출하기 위하여 파이프로 체결하였으며 5000펄스의 엔코더를 4배하여 60 $\mu$ m의 분해능을 가지도록 하였다.

**2.2 제어시스템**

제어 시스템은 Fig. 3과 같으며 여기서 제어기는 마이크로 컨트롤러 FR-E520-1.5K로 하고 각각의 센서에서 입력되는 포트와 기어드 모터, 서보 모터와 펌프를 구동시키는 출력포트로 구성된다.

2축 로봇의 제어는 Visual Basic을 이용하여 사용자 인터페이스를 Fig. 4와 같이 구현하였고 로봇의 초기화, 검사 수행 속도, 스캐닝을 위한 검사 스텝 거리 검사 구간 정의를 사용자가 입력할 수 있도록 하였으며, 파이프의 외경에 따른 탐촉자의 위치선정은 사용하는 탐촉자의 굴절각과 외경, 파이프의 두께에 의해서 자동으로 설정할 수 있도록 하였다.

또한, 로봇의 수동제어와 자동제어 기능을 동시에 제공함으로써 검사 시 편리하게 세팅할 수 있도록 하였으며 Fig. 4에 나타내었다.

**2.3 PC-기반 초음파 탐상 시스템**

SWP 용접결함의 분류를 실시간으로 처리하기 위한 PC 기반 검사 시스템은 포터블 탐상기인 SM-300과 A/D 보드 그리고 제어 프로그램으로 구성된다. 포터블 탐상기에서 펄스를 발생시켜 결함에서 반사되어 탐촉자로 돌아온 초음파 신호를 A/D 보드로 수신한다. A/D 보드로 수신된 신호는 A-Scope 탐상 소프트웨어에서 디지털화된 GUI 환경으로 표시해 주고, A-Scope 신호의 화상변환에 의하여 결함의 유무를 시각적으로 보여주며, PNN(Probabilistic Neural Network) 패턴 분류기에 의해 결함의 종류를 판별하게 된다.

본 연구에서 사용한 PC-기반 초음파 탐상 시스템은 기존의 포터블 장비의 탐상기가 수행할 수 있는 모든 기능을 포함함은 물론이고 실시간으로 디지털 신호처리를 할 수 있다. 또한 다른 해석 프로그램과 연동이 가능하여 보다 효과적인 결함 분석의 수행이 가능하다.

Fig. 5는 PC-기반 초음파 탐상 시스템, Fig. 6은 PC-기반 오실로스코프(A/D 보드)를 나타낸다.

Fig. 7은 프로그램의 실행화면으로서 A/D 보드를 통하여 취득된 초음파 탐상 신호와 이러한 신호를 기반으로 결함신

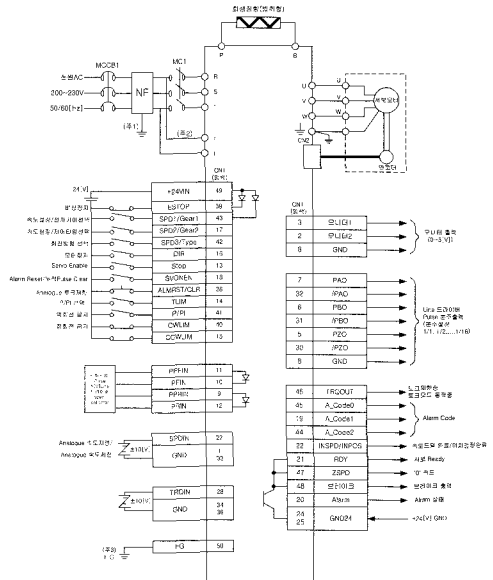


Fig. 3 Wiring diagram of servo driver

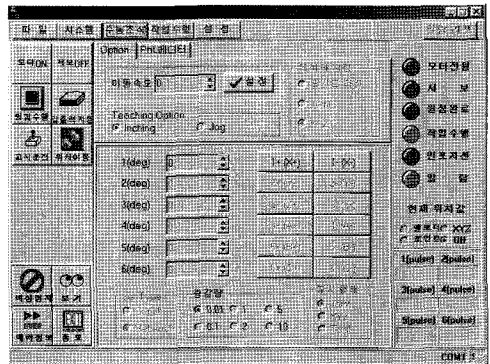


Fig. 4 Programming window for robot control

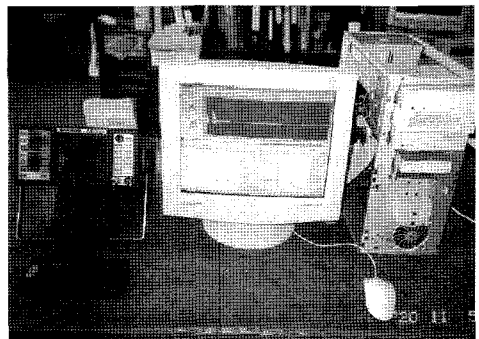


Fig. 5 PC-based UT system including A/D board

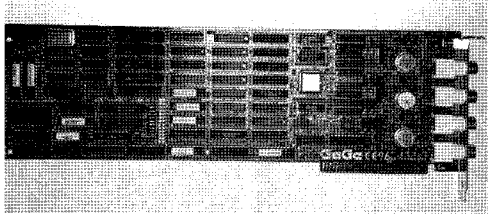


Fig. 6 PC-based oscilloscope (A/D board)

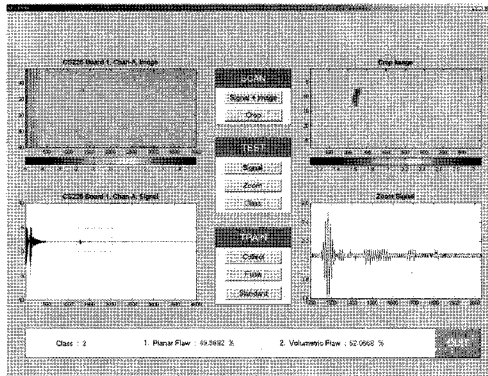


Fig. 7 Executing display of test program

호만을 취득한 결과를 Fig. 7의 CS225 Board 1. Chan-A. Signal과 Zoom Signal의 영역에 표시하였고, 결함의 형태 분석을 위하여 영상으로 변환한 결과와 변환된 영상을 기반으로 결함의 영상만을 취득한 결과를 Fig. 7의 CS225 Board 1. Chan-A. Image와 Crop Image에 표기하였다. 또한 결함의 분류결과를 Class로 나타내었으며, 다른 분류기에 비하여 PNN의 장점인 결함의 분류확률을 수치로서 표기하였다.

### 2.4 인터페이스 회로

로봇 구동시 정밀 탐상을 위한 용접결함 위치 검출을 위하여 초음파 탐상기(SM-300)의 출력 단자에서 게이트 출력 신호를 받아 자동탐상 로봇 컨트롤러에 인터페이스하기 위한 회로를 Fig. 8 및 Fig. 9와 같이 구성하였다.

컨트롤러 내부의 접점을 스위칭하기 위한 방법으로 릴레이(IN4002)를 사용하였다.

## 3. 확률신경망 패턴분류기

PNN은 취득한 데이터로부터 특징값의 분포특성을 확률 밀도함수(Probabilistic Density Function)의 형태를 추론하는 특징을 가지고 있다. PNN의 구조를 살펴보면 Fig. 10과

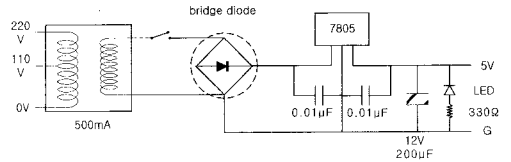


Fig. 8 Power transducer of interface circuit

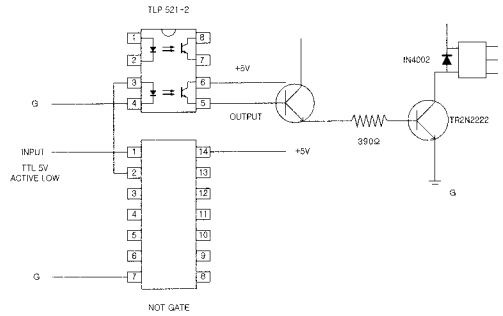


Fig. 9 Interface circuit

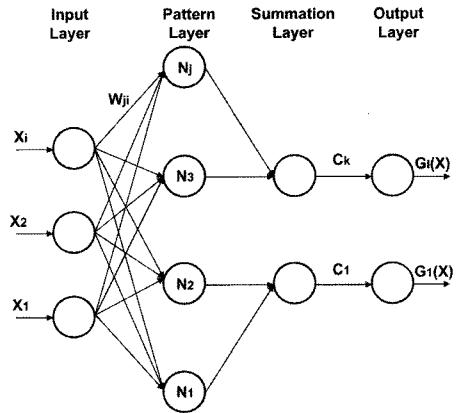


Fig. 10 Probabilistic neural network

같은 계층구조를 갖는다<sup>(10,11)</sup>.

Fig. 10은 입력유형을 두 개의 클래스로 분류하는 PNN 구조를 나타내고, 입력층은 모든 훈련유형에 동일한 입력유형을 입력하는 일종의 분배층이며, 패턴층은 각 훈련패턴에 대하여 가중치 벡터와 입력유형의 내적을 구한 후, 비선형 활성화 함수에 입력하여 비선형 연산을 수행한다. 합산층은 패턴층에서 계산된 비선형 출력결과를 합산한다.

확률 신경망은 역전파 신경망에서 사용되는 시그모이드 활성화함수 대신에 비선형 연산자를 사용한다. 이와 같은 내용을 정규화 하면 식(1)로 정의된다.

$$G(z_i) = \exp[(Z_i - 1) / \sigma^2] \quad (1)$$

식 (1)에서  $Z_i$ 는  $X_i$ 의 내적으로 식 (2)으로 표현된다.

$$Z_i = \sum X_i \cdot W_{ji} \quad (2)$$

합산층은 식 (1)과 식 (2)에 의한 결과들을 단순히 합산하는 역할을 수행하여 식 (3)과 같이 정의된다.

$$G_c(z_j) = \sum_{j=1}^N \exp[(Z_i - 1) / \sigma^2] \quad (3)$$

위의 수식들에 의하여 학습이 완료되면 사용자 정의 파라미터  $C_k$  ( $k=1,2,3$ )와 평활화 계수  $\sigma$ 를 선택하여야 하며  $C_k$ 는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$C_k = \frac{h_k l_k}{n_k} \quad (4)$$

여기서,  $h_i$ 는  $i$ 번째 범주의 사전확률,  $l_i$ 는 손실계수,  $n_i$ 는  $i$ 번째 범주내의 학습표본수이다. 사용자가 균열과 같은 어떤 특정한 범주에 더 큰 비중을 두고 싶을 때는  $l_i$ 에 큰 값을 지정할 수 있으며, 특별히 특정범주에 비중이 필요없다면 -1로 설정하면 된다. 본 연구에서는 -1로 설정하였다. 그러므로 출력층의 출력함수는 식(5)로 정의된다.

$$F_l(z_j) = \sum_{j=1}^N \exp[-(Z_i - 1) / \sigma^2] \quad (5)$$

평활화 계수  $\sigma$ 는 패턴층 내에 있는 각 패턴들의 분류에 있어서 개별적인 중요도를 조절하는 파라미터로서 이론적인 근거로부터 결정이 아닌 시행착오법에 의하여 적절한 값을 선택하여 주어야 한다.

#### 4. 시험결과 및 해석

Fig. 11은 본 연구에서 적용된 분류기인 PNN 분류기에 적용된 학습데이터로써 선형결합의 대표신호로서는 균열(Crack)을 사용하였으며, 체적결합의 대표신호로서는 슬래그 혼입(Slag inclusion)과 기공(Prosity)을 사용하였다.

Fig. 12는 본 연구에서 적용된 PNN 분류기의 성능에 영향을 미치는 확률밀도함수의 너비 파라미터의 선정을 나타내었다. 0.03을 기준으로 그 이상의 너비 파라미터에서는 각 클래스의 구분에 있어서 확률의 분포가 정분류 및 오분류 모두 높은 확률을 나타냄으로서 적절치 않은 분류율을 보여

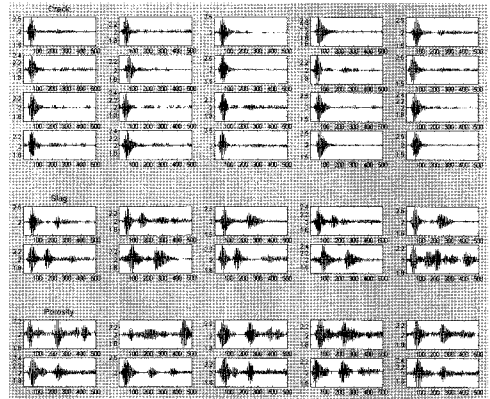
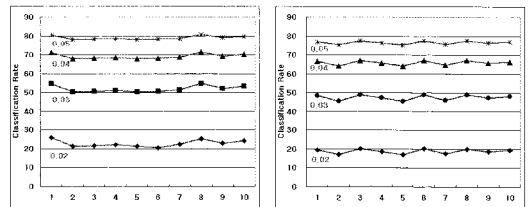


Fig. 11 Train signals in PNN classifier



(a) Correct accept

(b) False reject

Fig. 12 Selected width parameter of PNN

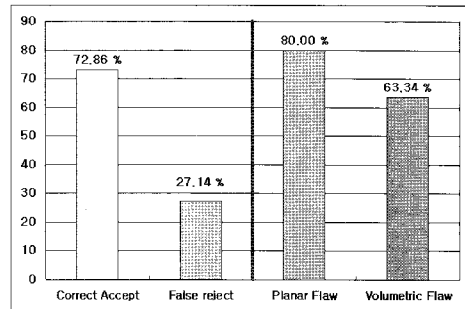


Fig. 13 Classification results

주고 있으며, 0.03 이하에서도 정분류 및 오분류가 전체적으로 낮은 확률을 나타냄으로서 적절하지 않는 결과를 도출함을 확인할 수 있으며, 0.03의 경우에 분류를 위한 확률을 가장 적절하게 나타냄을 확인할 수 있다.

PNN은 각각의 데이터 간의 거리에 의한 확률밀도함수에 기반을 두는 관계로 Fig. 13에서처럼 충분한 확률밀도가 구성되는 선형결합(즉, 균열과 용합불량의 2종류의 결함만이 존재하는 경우)에 대하여서는 높은 분류율을 보인 반면에 확

률밀도가 낮은(즉, 용입부족, 슬래그 혼입, 기공의 3종류의 결함이 존재할 경우는 확률밀도 함수가 분산되므로) 분류율을 도출함을 확인하였다.

## 5. 결론

배관용접부 결함검사 자동화 시스템 개발에 따른 성능 분석 결과는 다음과 같다.

- (1) 2축 로봇 시스템은 탐상 알고리즘을 변화시키면 용접비드가 스파이럴 방향뿐만 아니라 원주방향과 축방향의 용접비드를 갖는 파이프도 탐상이 가능하므로 스파이럴 파이프 전용이 아닌 범용 파이프 용접결함 탐상 시스템으로써 적용이 가능하다.
- (2) 확률신경회로망 분류기를 용접결함 분류에 적용한 결과 용입불량, 기공, 슬래그 혼입은 체적결함으로 분류되었으며, 용합불량과 크랙은 선형결함으로 분류되었으며, 전체적으로 72.96%의 분류가 가능하였다.
- (3) PNN은 작은 학습률에 대하여서는 불안정한 결과를 도출하였으나, 확률밀도가 충분히 형성되는 경우에는 안정된 분류율을 도출함을 확인하였으며, 학습속도 및 분류율에 있어서 타 분류기에 비하여 우수성을 나타내었다.

## 참고 문헌

- (1) International Institute of Welding, 1987, *The Evaluation of Ultrasonic Signals*, Welding Institute for International Institute of Welding, Cambridge, England.
- (2) Rose, J. L., 1999, *Ultrasonics Waves in Solid Media*, Cambridge University press, England.
- (3) Zhu, W., Rose, J. L., Barshinger, J. N. and Agarwala, V. S., 1998, "Ultrasonic guided wave NDT for hidden corrosion detection," *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 10, No. 4, pp. 205~225.
- (4) Liu, L., Avioli, M. J. and Rose, J. L., 2001, "Incident angle selection for the guided wave inspection of

- pipe defects," *Journal of Insight*, Vol. 43, No. 2.
- (5) Hay, T. R., Luo, W., Rose, J. L. and Hayashi, T., 2003, "Rapid Inspection of Composite Skin-Honeycomb Core Structures with Ultrasonic Guided Waves," *Journal of Composite materials*, Vol. 37, pp. 929~939.
- (6) Yoon, S. U., Kim, C. H. and Kim, J. Y., 2006, "The Performance Comparison of Classifier Algorithm for Pattern Recognition of Welding Flaws," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 3, pp. 39~44.
- (7) Vinay, K. I. and John, G. P., 1998, *Digital Signal Processing*, Sigma-press Pub., pp. 353~428.
- (8) Rutkowski, L., 2004, *New Soft Computing Techniques for System Modeling, Pattern Classification and Image Processing*, New York, Springer Verlag.
- (9) Lee, H. Y. and Moon, K. I., 1999, *Fuzzy-Neuro using Matlab*, A-Jin Pub., South Korea.
- (10) Song, S. J., 1999, "Nondestructive Flaw Classification by Pattern Recognition Approach," *Journal of KSNT*, Vol. 19, No. 5, pp. 378~391.
- (11) Ganchev, T., Fakotakis, N. and Kokkinakis, G., 2002, "Text-Independant Speaker Verification based on Probabilistic Neural Networks," *Proceedings of the Acoustics*, pp. 159~166.
- (12) Rutkowski, L. and Cpalka, K., 2003, "Flexible Neuro-Fuzzy System," *Transactions of IEEE : Neural Network*, Vol. 14, pp. 554~574.
- (13) Park, I. K., Park, U. S., Kim, Y. W., Kang, S. C., Choi, T. H. and Lee, J. H., 2001, "Models of Reliability Assessment of Ultrasonic Nondestructive Inspection," *Journal of KSNT*, Vol. 21, No. 6, pp. 607~611.
- (14) Yi, W. and Yun, I. S., 1998, "A Study on defect Classification and Evaluation in Weld Zone of Austenite Stainless Steel 304 Using Neural Network," *Journal of KSPE*, Vol. 15, No. 7, pp. 149~159.