용접결함의 형상인식을 위한 특징추출

김재열†·유신*·김창현**·송경석**·양동조**·이창선**

The Feature Extraction of Welding Flaw for Shape Recognition

Jae Yeol Kim†, Sin You*, Chang Hyun Kim**, Kyung Seok Song**,
Dong Jo Yang**, Chang Sun Lee**

Key Words : Feature Variable(특징변수), Nondestructive Test(비파괴검사), Shape Recognition(형상인식), Ultrasonic Inspection (초음파검사), Welding Flaw (용접결함)

Abstract

In this study, natural flaws in welding parts are classified using the signal pattern classification method. The storage digital oscilloscope including FFT function and enveloped waveform generator is used and the signal pattern recognition procedure is made up the digital signal processing, feature extraction, feature selection and classifier design. It is composed with and discussed using the distance classifier that is based on euclidean distance the empirical Bayesian classifier. Feature extraction is performed using the class-mean scatter criteria. The signal pattern classification method is applied to the signal pattern recognition of natural flaws.

1. 서 론

비파괴검사의 분야 중에서 초음파 탐상검사는 결함의 위치에 대한 정량적인 값을 판정할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 결함의 종류, 형상, 크기 판정에 있어서는 검사자의 경험 및 주관에 의존하여 신뢰성 및 재현성이 적은 결점이 있는 관계로 방사선 투과검사가 주로 이용되고 있다. 그러나, 방사선 투과검사는 탐상 표면에 평행하게 위치하는 슬래그 혼입 (slag inclusion) 및 기공 (porosity) 등의 체적결함에 대해서는 우수한 검출능력을 가지는 반면에, 탐상면에 수직한 융합불량 (lack of fusion), 용입부족 (lack of penetration), 균열(crack) 등의 선형결함에 대해서는 탐상이 어려운 단점이 있다. 그러므로, 초음파 탐상검사는 현장적용의 용이성과 정량적인 값의 취득이 가능하고, 방사선 투과검사로서는 기하학적인 형상 및 방향성 때문에 발견하기 어려운 체적결함과 선형결함을 동시에 탐상 할 수 있다는 관점에서 결함의 종류, 형상, 크기를 판정하기 위한 연구가 현재까지 지속적으로 진행되고 있으며, 특히 용접결함의 종류는 위와 같은 이유에서 그 중요성이 깊이 인식되어 첫 번째 단계로서 연구가 활발하게 진행되고 있다. 용접결함의 종류판별은 각 결함의 종류에 있어서도 형상과 크기 등이 상이하게 다르므로 실제의 결함을 분류하기 위해서는 먼저 가장 큰 특징이 될 수 있는 용접결함의 특징변수를 추출하고, 그 특징변수로부터 다시 세부적인 특징을 분류하는 단계를 거쳐야 하며, 사실상 가장 중요한 단계는 용접결함의 가장 큰 특징을 선택하는 특징변수의 추출로서 결함분석의 정확도에 가장 큰 영향을 미치게 된다.

이러한 과정들을 통하여 용접결함의 종류판별이 가능하게 된다면, 현재 용접부의 강도에 치명

† 조선대학교 기전공학과
E-mail : jykim@chosun.ac.kr
TEL : (062)230-7035 FAX : (062)230-7035
* 목포과학대학 메카트로닉스과
** 조선대 대학원 정밀기계공학과

적인 손상을 야기하는 균열은 물론, 용접부의 각 종결함의 종류를 판별함으로서 잔류수명의 예측과 안전성 문제의 해결을 위한 안전진단 분야에서 그 파급효과를 기대할 수 있으리라고 본다.

2. 신호형상분류 및 특징변수 추출

2.1 신호형상 분류

초음파 탐상기를 사용하여 얻은 각 결함에 대한 반사신호의 아날로그 데이터를 디지털 오실로스코.프에 입력하여 디지털 데이터를 취득함으로서, 결함의 종류 판별을 위한 초음파 신호처리를 수행하여 특징의 정보군을 형성한다. 데이터의 처리과정은 원래의 데이터를 수학적 변환식을 사용한 패키지와 각 파형의 변환회로가 내장된 디지털 오실로스코프를 이용하여 다른 영역으로 변환하며, 이를 통하여 결함종류를 구별할 수 있는 특징변수를 얻어내는 과정이다. 이 과정에서 특징들 사이의 상호비교를 동일한 차원에서 처리하기 위해 적절한 방법을 사용하여 정규화하고, 서로 다른 분류군에 대하여 거리오차를 계산한다. 이 오차가 허용할 수 없을 정도로 크게되면, 다음의 과정은 무의미해지며, 다른 측정법 또는 특징값 추출법을 사용하여 데이터를 얻어야 한다. 이러한 과정을 통하여 용접부 결함을 분류하기 위한 초음파 신호의 형상분류에 적용하여 다음의 과정으로 연구를 수행하였다.

2.2 특징변수 추출

결함으로부터 반사된 초음파의 형상적인 특징변수를 이용하여 결함을 분류하는 경우, 초기단계에서는 시간축상의 원파형을 이용하였다. 그러나, 결함의 크기, 형태, 경사도 등 많은 정보를 얻어내기 위해서는 시간축상의 데이터만으로는 한계가 있다. 따라서, 초음파 신호와 결함 사이에 상관관계를 통하여 결함의 종류를 판별하기 위하여, 본 연구에서는 최근에 주목받고 있는 디지털 신호처리 기술을 응용하여 초음파 신호를 처리하고, 신호의 형상분류에 적용하여 다음의 과정으로 연구를 수행하였다.

2.2.1 포락선 파형에서의 특징변수 추출

본 논문에서의 용접결함의 분류대상 중의 한 가지인 선형결함은 일반적으로 체적결함과 비교할 때, 결함으로부터 반사된 초음파 신호 형상은 Gaussian 형태의 분포를 이루는 것으로 보고되고 있으며, 이를 근거로 하여 초음파 신호의 형상분류를 위한 가장 기본적인 파형의 매개변수인 상승시간 (rise time), 상승경사 (rise slope), 하강시간 (fall time), 하강경사 (fall slope), 펄스폭 (pulse duration)을 특징변수로 하여 포락선 파형으로부터 각 특징변수 선정에 대한 타당성 여부를 검토하였다.

2.2.2 주파수 영역에서의 특징변수 추출

결함에 의해 분산된 초음파 신호의 주파수 스펙트럼은 반사체의 크기, 형태, 방위 등에 대한 정보를 가지고 있음이 보고된 바 있으며, 이러한 연구들에 의하면 결함의 종류에 따라 주파수 영역상에서 다른 특징을 가진 신호를 얻을 수 있다는 근거에서 다음과 같은 신호처리를 통하여 특징변수를 추출하였다.

먼저, 시간축상의 데이터를 주파수 영역으로 변환하기 위하여 행하는 Fourier 변환은 시간영역상의 신호의 주기성을 특징으로 얻어낼 수 있다. 또한, 신호의 전달함수를 구하기 위한 방법으로 사용되기도 하며, 평균화하기도 하고, 위상을 구하기도 하는 등 가장 활용 범위가 넓은 신호처리법이다.

Fourier 변환의 정의는 식(1)과 같다.

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-j2\pi ft} dt \qquad (1)$$

식(1)을 디지털 데이터에 적용하면 식(2)와 같다.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(k) \cdot W_N^{nk} \qquad (2)$$

$$W_N^{nk} = e^{(-j2\pi nk/N)}$$

N은 데이터 샘플수, W_N^{nk}는 윈도우 함수이다.

이상의 과정에서 얻은 주파수축상의 데이터로부터 특징변수를 얻기 위해 파형 특징변수를 추출하도록 하였다. 즉, 분석하고자 하는 주파수 대역을 사용자가 정의한 방법으로 나눈 후, 대역폭과 중심주파수를 취득하였다. 그리고, 경우에 따라서는 사용자의 정의 함수, 레벨 등을 바꿈으로써 무한대의 특징변수를 추출할 수 있다.

2.3 특징변수 평가법

각각의 관측공간에서 취득한 파형을 형상분류에 이용하는 것은 너무 높은 차원을 가지고 있으므로 관측공간을 형상분류를 위한 특징공간으로 변환하고 이 특징공간에서의 분류가 필요하며, 취득한 특징변수를 모두 사용하는 것도 문제가 있으므로 계산상의 복잡성을 줄이고, 원파형이 가지고 있는 정보를 유지하면서 적절한 방법으로 특징변수를 선택하여 이를 분류에 사용하도록 하는 절차가 필요하다. 이러한 특징변수의 선택을 위한 방법으로, 본 논문에서는 Euclidean 거리를 근거로 데이터 사이의 거리와 분류군 사이의 거리식을 이용하여 각 특징변수의 분류율을 확인하고, 분리도의 순위를 결정하는 분류군 평균치 분산 원리를 사용하여 특징변수를 선정한다.

여기서, 수학적으로 두 개의 분류군 사이의 거리(interclass distance)는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$D_{Inter} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} D^2 (x_1^i, x_2^j) \qquad (3)$$

또한, 하나의 분류군 속에 있는 N개의 표본들 사이의 거리(intra class distance)를 구하기 위해 고정된 점 x^i로부터 N-1개의 다른 표본들까지의 평균제곱거리는 다음식으로 주어진다.

$$D_{Intra} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{1}{(N-1)^2} \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{N} D^2 (x_k^i, x_k^j) \right] \quad (4)$$

이러한 분류군 사이의 거리와 분류군 내의 표본들 사이의 거리식을 근거로 분류율을 결정하고, 특징변수의 순위를 결정하기 위한 식은 다음식으로 주어진다.

$$R_C = \frac{D_{Inter} - D_{Intra}}{D_{Inter}} \qquad V_R = \frac{D_{Intra}}{D_{Inter}} \qquad (5)$$

3. 실험장치

3.1 용접시험편

용접결함의 탐상을 위한 용접시험편을 제작하기 위해서 사용한 재료는 일반 구조용 압연강재(SB41)로 평판에 아크 용접을 사용하여 용접결함 시험편을 제작하는 과정에서 제작상의 난점으로 인하여 Sonaspection Co, England 에 제작을 의뢰하여 용접결함 시험편을 제작하였으며, 본 실험에서 사용된 용접결함 시험편에 내재된 결함의 종류 및 크기에 관한 사항들은 Table 1에 정리하여 나타내었다.

Table 1 Configuration of welding flaws

Joint Method	Groove Type	Flaw Name (Specimen No)	Flaw Length [mm]	Distance from Datum [mm]
Butt Joint	V Groove	Porosity (90)	19	10
		Porosity (88)	40	250
		Slag Inclusion (89)	25	66
T Joint		Slag Inclusion (85)	23	64
	K Groove	Lack of Penetration (86)	20	15
Butt Joint	V Groove	Lack of Fusion (91)	11	30
		Side Crack (91)	21	69
		Center Crack (94)	22	25
		Toe Crack (93)	25	45
		Root Crack (92)	26	47

3.2 실험장치

본 실험에서 사용된 초음파 측정 및 분석장비의 전체적인 시스템 구성은 Fig.1과 같다.

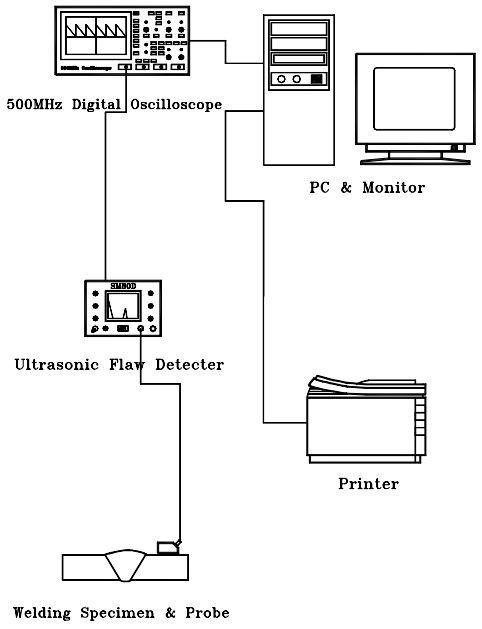

Fig. 1 Signal acquisition and processing system

초음파 탐촉자(5Z 10×10 A70)는 공진주파수 5MHz의 고감도형 경사각 탐촉자로서 플라스틱 쐐기의 각도는 70°형을 사용하였으며, 초음파 탐상기는 동경계기의 SM80D를 사용하였다. 결함으로부터 반사된 초음파 신호를 취득하고, 데이터 신호의 처리를 수행하기 위해서 사용한 장비는 LeCroy사의 dual 500MHz digital oscilloscope로서 데이터의 샘플링 능력은 100MS/s로서 real time에 가까운 고분해능이다. 또한, 디지털 오실로스크프 자체에 내장된 함수기능 즉, FFT 변환 함수를 사용하여 주파수 영역에서 초음파 신호의 분석이 가능하고, 포락선 파형을 생성할 수 있는 회로가 내장되어 있으며, PC분석을 위한 데이터 파일의 생성이 가능하다.

4. 실험결과 및 해석

4.1 신호형상의 분류과정

본 논문에서는 각종 용접부에서 결함의 심각성을 나타내는 척도로 결함의 크기, 종류, 장소 등이 있지만, 이 중에서 특히 결함의 종류는 파괴역학을 적용하여 안정성 여부와 잔류수명의 예측에 있어서 매우 중요한 변수이며, 특히, 면적결함과 체적결함의 분류는 절대적이라 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 체적결함으로 분류될 수 있는 기공, 슬래그 혼입과 면적결함으로 분류가 가능한 용입부족, 융합불량, 사이드균열, 센터균열, 토우균열, 루트균열에 대하여 분류를 실시하였다.

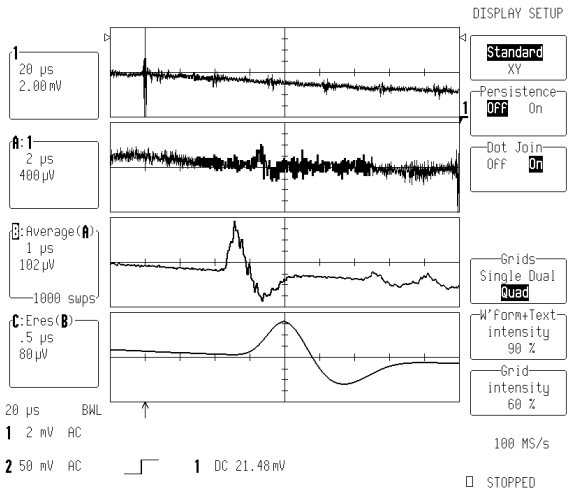

Fig. 2 Signal processing (Volumetric flaw)

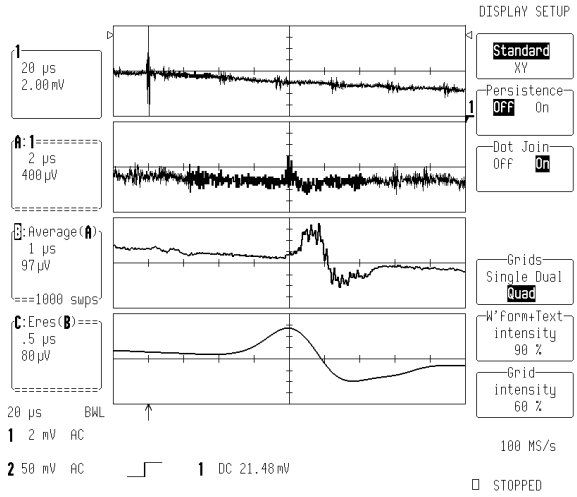

Fig. 3 Signal processing (Planar flaw)

4.2 특징변수의 추출 및 선정

결함의 위치와 파형의 크기 정보는 매우 중요하지만, 본 연구에서는 두가지 부류의 신호파형을 동일한 진폭상에서 형태상의 차이만을 가지고 분리를 수행하기 위해 초음파 탐상기의 감도레벨을 동일진폭으로 정규화하여 취득한 원신호 파형을 포락선 파형과 주파수 파형으로 변환하여 특징변수를 추출하고, Fig.2와 Fig.3에 나타내었다. Fig.2와 Fig.3의 3번째 윈도우는 초음파 신호의 원파형을 zooming한 파형으로 신호의 최대값 영역을 관찰할 때, 체적결함은 날카로운 형태를 취하는 반면에, 면적결함은 평탄한 형태를 나타냄으로서 초음파 반사면의 형태를 알 수 있다. 그러나, 이 원파형 영역에서는 본 논문에서 사용하는 특징변수인 상승시간, 상승경사, 하강시간, 하강경사, 펄스폭을 분석하기 위한 시작점과 끝점을 구별하기 어려운 관계로 관측공간을 Fig.2와 Fig.3의 4번째 윈도우의 포락선 파형의 영역으로 변환하여 특징변수의 값을 측정하면, 파형들 사이에는 정량적인 값의 차이 및 일관성이 있음을 알 수 있었으며, 관측공간을 주파수 영역으로 변환하여 특징변수인 대역폭과 중심주파수를 측정하였다. 위의 관측공간들에서의 특징변수를 Table 2에 나타내었다. 또한, 특징변수의 선정에 따른 유효성을 정량적으로 확인하여 특징변수를 적절한 방법으로 선택하기 위하여 특징값-특징값 공간에서의 분포상태로서 Fig.4부터 Fig.7에 도시하였으며, 그 결과인 수치 데이터를 Table 3에 정량적으로 나타내었다.

Table 2 Feature Variables

Welding Flaw	Rise Time [μsec]	Rise Slope [mV/μsec]	Fall Time [μsec]	Fall Slope [mV/μsec]	Pulse Duration [μsec]	Band-width [MHz]	Center Frequency [MHz]
Porosity Inclusion (90)	0.375	0.584	0.495	-0.725	0.770	0.680	0.808
Porosity Inclusion (88)	0.370	0.522	0.460	-0.827	0.710	0.680	0.808
Slag Inclusion (99)	0.375	0.485	0.455	-0.657	0.745	0.720	0.808
Slag Inclusion (85)	0.380	0.437	0.458	-0.623	0.740	0.740	0.808
Lack of Penetration (86)	0.569	0.196	0.475	-0.512	0.929	0.580	0.408
Lack of Fusion (91)	0.480	0.302	0.585	-0.414	0.895	0.420	0.408
Side Crack (91)	0.510	0.302	0.595	-0.503	1.075	0.360	0.408
Center Crack (94)	0.550	0.270	0.505	-0.596	0.970	0.380	0.408
Toe Crack (93)	0.510	0.295	0.650	-0.434	1.030	0.360	0.408
Root Crack(92)	0.525	0.269	0.560	-0.534	0.985	0.420	0.408

Table 3 Result of classification

Feature Variables	Intra Class Distance	Inter Class Distance	Rank Value	Classification Rate	Rank
Rise Time / Rise Slope	0.875702	0.809624	0.072978	0.927022	2
Rise Time / Pulse Duration	0.862627	0.809343	0.130872	0.869328	4
Rise Time / Bandwidth	0.135193	0.809742	0.064853	0.935334	1
Fall Time / Fall Slope	0.867696	0.810315	0.237468	0.762516	6
Fall Time / Pulse Duration	0.872466	0.811228	0.164965	0.848029	5
Fall Time / Bandwidth	0.129321	0.811628	0.093808	0.906998	3

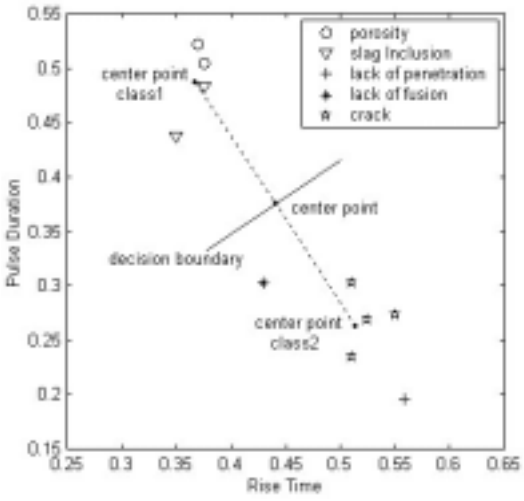

Fig. 4 Cluster plot (RT / RS)

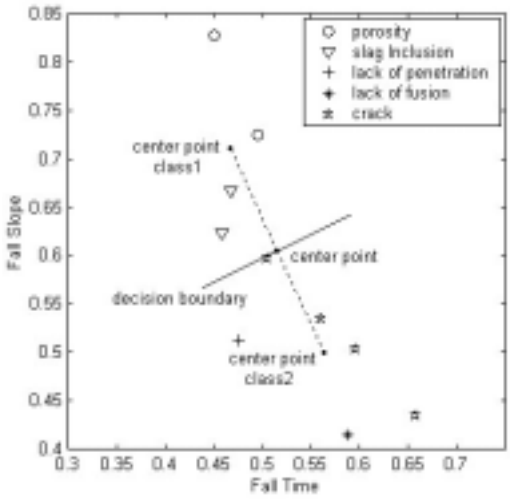

Fig. 5 Cluster plot (FT / FS)

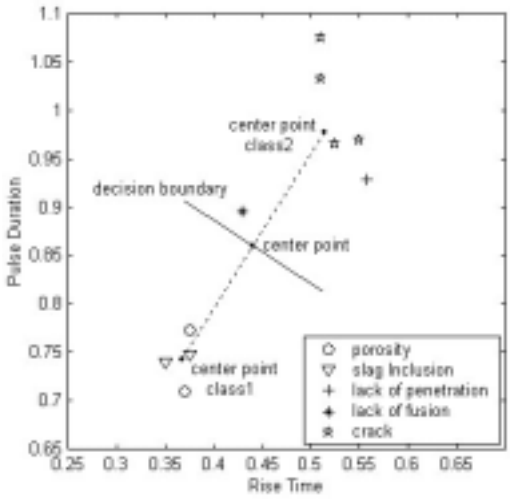

Fig. 6 Cluster plot (RT / PD)

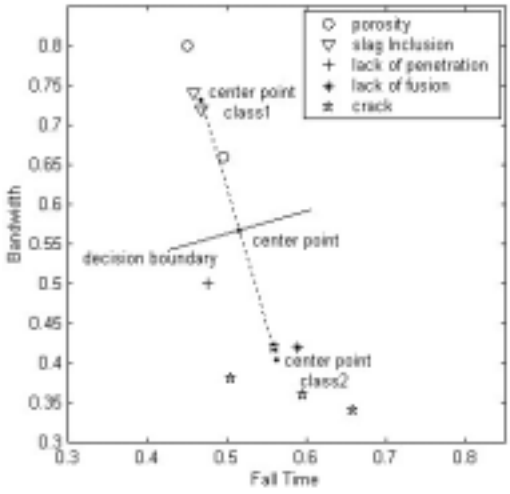

Fig. 7 Cluster plot (FT / BW)

본 논문의 연구결과는 두 가지 부류의 신호파형을 동일한 진폭 상에서 형태상의 차이만을 가지고 분류를 수행하였으므로 동일한 설정진폭(탐상기의 감도레벨 60%)으로 데이터를 취득하게 되면, 정성적으로 동일한 파형 데이터 취득의 재현이 가능하며, 용접 대상물 소재가 바뀌게 되더라도 용접결함으로부터 반사된 초음파 신호 파형의 형태는 본 논문의 결과와 유사한 형태를 취하게 될 것으로 판단된다. 그러나, 본 논문은 용접결함의 종류를 분류하기 위한 특징변수 추출의 유효성을 검증하였으므로 본 논문의 결과를 실제의 용접부에 적용하기 위해서는 유효성이 검증된 특징변수를 기본으로 하여 특징변수 및 분류방법의 선정에 있어서 더욱 진보된 연구가 지속되어야 한다.

5. 결 론

용접결함의 종류분류를 위하여 자연결함 시험편에 내재된 결함으로부터 반사된 초음파 신호의 형상분류에 관한 연구를 실시한 결과는 다음과 같다.

(1) 용접결함의 종류분류를 위하여 포락선 파형에서 상승시간, 상승경사, 하강시간, 하강경사, 펄스폭의 5개 특징변수와 주파수 영역에서 대역폭, 중심주파수의 2개 특징변수의 추출에 대한 유효성을 검증하였다.

(2) 본 실험에서 대상으로 한 기공, 슬래그 혼입은 체적결함으로 분류되었으며, 용입부족, 융합불량, 사이드균열, 센터균열, 토우균열, 루트균열은 면적결함으로 분류되었다.

(3) 위의 특징변수를 사용하여 용접결함의 종류를 분류한 결과 87.93%의 분류가 가능하였으며, 분류도가 낮은 fall time / fall slope을 제외하고 분류를수행한 결과, 90.27%의 분류도를 얻었다.

후 기

본 논문은 과기부 과학재단지정 지역협력 연구센터인 레이저응용신기술연구센터의 2002년도 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

(1) David Broek, 1986 "Elementary Engineering Fracture Mechanics" Martinus Nijhoff Publishers, pp.33- 116

(2) David Broek., 1988 "The Practical Use of Fracture Mechanics" Kluwer Academic Publishers, pp.123 -167

(3) E. Oran Brigham., 1988 "The Fast Fourier Transform and Its Applications" Prentice-Hall, pp.131-166

(4) Gordon S. Kinond., 1987 "Acoustic Waves" Prentice- Hole, pp.1-14, pp.92-110

(5) R. B. Randall, B. Tech., 1977 "Frequency Analysis" Brüel & Kjær, pp.49-67, pp.165-171

(6) O. R. Gericke., 1980 "Ultrasonic Spectroscopy" Army Materials & Mechanics Reesearch Center, pp.299 -320

(7) Fredric J. Harris., 1978 "On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform" IEEE, Vol.66, No.1

(8) O. R. Gericke., 1975 "Determination of the Geometry of Hidden Defects by Ultrasonic Pulse Analysis Testing", The Journal of Acoustical Socity of America, Vol.35, No.3

(9) J. L. Rose, J. B. Nestleoroth and K. Banlasu bramanian, 1988 "Utility of Feature Mapping in Ultrasonics Non-Destructive Evaluation", Ultrasonics, Vol.26, pp.124-131

(10) J. L. Rose., T. H. Jeong., E. Alloway., and C. T. Cooper., 1984 "A Methodlogy for Reflector Classification Analysis in Complex Geometric Welded Structures", Materials Evaluation, Vol.42, No.1, pp.98-106

(11) J. L. Rose., 1984 "Element of a Feature Based Ultrasonic Inspection System", Materials Evaluation, Vol.42, No.2, pp210-218

(12) S. Serabian., 1981 "Ultrasonic Size Determinations of Inclined Flaw-Use of Response Envelope Width", British J. of NDT, Vol.23, No.9, pp. 281-285

(13) H. L. Whaley., 1971 "Flaw Characterization by Ultra- sonic Frequency Analysis", Materials Evaluation, Vol. 29, No.8, pp.182-188