

본 연구는 1992년도 교육부 학술연구조성비의 지원에 의한 것임.

SH-EMAT에 의한 Digital 신호처리에 관한 연구

김재열*, 박환규*, 조영태**

A Study on the Digital Signal Processing by Shear Horizontal-Electro Magnetic Acoustic Transducer

Jae-Yeol Kim*, Hwn-Kyu Park*, Young-Tae Cho**

ABSTRACT

In this study, by using EMAT (electro magnetic acoustic transducer) the artificial slit is installed on 12B-SUS pipe test piece. By making 4 cycle SH-burst (EMA) incidence to 45° angle, the signal data of pulse, received from EMAT are translated into digital-signal-processing-method SSP (Split Spectrum Processing) and Deconvolution method. The main conclusions obtained are as follows; (1) the signal data received from EMAT are translated with digital signal processing of SSP-method and Deconvolution-method and this method shows excellent results more than Ultrasonic testing method does; (2) noise can well be removed by SSP with signal data, and resolution and S/N ratio are advanced; (3) when used with Ultrasonic wave general stainless steel has properties of multiscattering and reflection phenomena, but resolution is progressed by using Deconvolution method; and (4) as addition-averaging-processing number is increasing, the resolution and S/N ratio are improved and the satisfactory signal is obtained.

Key Words : Electro Magnetic Acoustic Transducer (EMAT : 전자초음파탐촉자), Split Spectrum Processing (SSP : 분할스펙트럼처리), Deconvolution (디컨벌루션), Resolution (분해능), S/N ratio (신호대 잡음비).

1. 서 론

오래전부터 사용되어 오고 있는 초음파를 이용한 탐상장치는 여러 분야에 응용되어 의료분야의 단층촬영장치, 레이더(radar)를 이용한 탐사, 반도체패키지의 결함검사, 전기·전자부품의 결함검사, 금속 또는 복합재료의 미소결합 검사등에 다양하게 이용되어 오고 있다.

특히 공학에서 금속 또는 비금속 재료의 건전성 평가나 구조물의 안정성 평가를 위한 Pulse-echo 반사법을 이용한 결함탐상법이 널리 보급되어 결함의 크기 및 위치 등 내부손상의 검출 및 구조물의 잔여수명 평가 (remaining life estimation) 등의 탐상기술로 발전되었다.

그러나, 각종 산업설비의 안전진단 방법중의 하나인

* 조선대학교 공과대학 정밀기계공학과

** 조선대학교 대학원 기계설계공학과

초음파 응용계측으로써 초음파탐상법은 접촉 매체를 필요로 하는 아날로그적 탐상법으로 정확하고 정량적인 정보(결합의 종류, 모양, 크기 및 위치 등)를 얻기가 어려웠다.

최근들어 전자초음파 탐촉자(Electro Magnetic Acoustic Transducer : 이하 EMAT로 약칭)을 이용한 설비의 안전진단 기술은 기존의 초음파법과는 달리 접촉 매체가 필요없이 금속재료에 대해서 비접촉으로 초음파를 송·수신할 수 있는 특성을 가지고 있기 때문에 철강재료들의 두께측정 및 음향적 불연속 부분의 탐지를 고속으로 실행할 수 있는 잇점이 있고 철강재료의 제조 라인 및 철강플랜트들의 비파괴검사 기술에 이용된다

(1). 또한, EMAT는 범용 초음파응용계측기으로써 각종 구조물의 예방·진단 등의 보호기술에 이용되며 기존의 초음파 계측기술에 비해서 대폭적인 작업성의 개선이 기대된다. 그러나 전자파는 초음파에 비해 속도가 빠르기 때문에 동일 주파수에서 파장이 길어 분해능이 떨어지며 초음파에 비해 고체나 액체중에서 감쇄가 크고 출력신호의 이득(gain)이 낮으며 측정 시간영역에서 불감대가 길어진다는 단점이 있다.

특히 불감대나 노이즈(noise)내에 다중저면이코우가 묻히기 때문에 4mm 이하의 박판두께 측정이 곤란한 문제점 등이 발생하며(2), 본 연구에서 사용한 스테인레스강은 재료의 특성상 초음파가 결정립 경계로부터 강한 다산란 및 반사현상이 일어나기 때문에 이러한 문제점들을 보완하고 결합의 정량적인 평가를 위해서는 데이터처리를 위한 다양한 신호처리방법과 화상처리 기능의 강화가 요구된다(3)-(10).

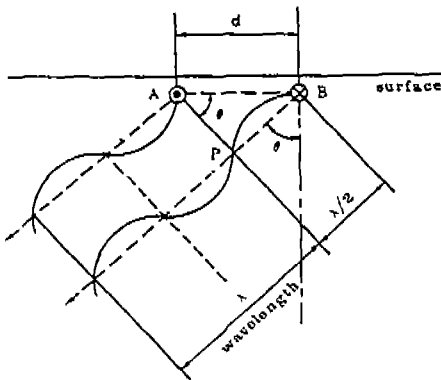


Fig.1 Principle of applying the directivity

최근에 측정기기의 디지털화와 연산처리 기술의 고속화, 고정도화가 요구됨에 따라 시간영역에서 수신한 입력신호파형을 주파수 영역으로 변환하여 필요한 정보만을 추출하거나 처리할 수 있도록 요구되고 있다.

본 연구에서는 신호처리법과 화상처리기능을 강화시키기 위해 시험체인 12B-SUS(Stainless steel) 배관시험체의 결합부분에 음속전파방향성이 강한 전자초음파(Electro Magnetic Acoustic : 이하 EMA로 약칭)인 SH-EMA를 입사시켜 결합으로 부터 반사되는 디지털의 EMA를 가산평균 처리하여 수신한 후에 분할스펙트럼처리법(split spectrum porcessing method : 이하 SSP로 약칭)과 Deconvolution법을 적용하여 분해능(resolution)과 S/N비(signal and noise ratio)를 향상시키고자 한다.

2. 전자초음파(SH-EMA)의 발생 원리

전자기파인 비접촉탐상파(SH-EMA)는 코일에 고주파 전류를 흘려 보낼때 발생하는 과전류와 영구자석의 정자장(static magnetic field)과의 상호작용에 의한 로렌쯔 힘(Lorentz Force)에 의해서 발생된다.

초음파 빔(beam)이 일정한 진행방향을 갖을 경우 이 빔을 진행방향에 대해서 수직한 임의의 단면에서 관찰하면 진동의 위상은 일정하다. 이 위상이 일정한 빔의 단면을 파형이라 한다. Fig.1에 나타난 것처럼 거리 d를 경계로하여 지면에 수직한 방향으로 주파수 f로 진동하는 음원 A, B를 가정한다. 또한 음원에 의해 발생하는 초음파의 위상이 서로 180° 차이가 난다.

이 경우 이들의 음원으로부터 발생하는 초음파 각도(굴절각)θ 방향에 일정한 지향성을 갖기 위해서는 음원 B로부터 P점에 초음파가 도달할 때 음원 A에서 발생한 초음파도 P점에 도달한 초음파와 위상이 같아야 한다. 음원 A와 B의 위상이 180° 다르므로 BP사이의 거리는 음파의 위상이 180° 변화한 거리 즉, 1/2 파장과 같다. 그래서 AB사이의 거리 d, 굴절각 θ와 초음파의 파장 λ 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$\sin \theta = \frac{\lambda / 2}{d} \quad (1)$$

또 파장과 주파수 f 사이에는

$$\sin \theta = \frac{C}{2 d f} \quad (2)$$

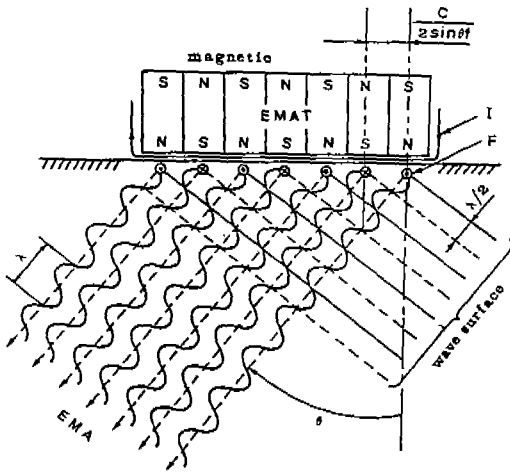


Fig. 2 Directivity of angle SH-EMAT

인 관계가 있다.

식 (1)에 식 (2)를 대입하면

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad (C : \text{음속}) \quad (3)$$

인 관계가 얻어진다.

Fig. 1에서는 2개의 음원만을 가정했지만 Fig. 2처럼 다수의 음원이 등간격으로 존재할 경우도 같은 형태로서 위의 식이 성립하며, 사각 EMAT의 자극 밑에는 각각 1개의 음원이 존재하므로, 가정된 모델의 초음파 경사 입사의 원리를 나타내고 있다. 단, 초음파는 EMAT를 전후로 대칭적인 지향성을 갖고 발생되지만 그림에서는 그중의 1방향만 표시했으며 진동방향은 실제로 지면 방향이지만 그림에서는 편의상 지면과 평행하게 나타내었다.

3. EMA의 탐상

3.1 SH-EMAT의 구조

EMAT는 Fig. 3처럼 코일과 그위에 주기적으로 변하는 영구자석으로 구성되어 있다. Table 1은 EMAT의 사양을 표시한다.

여기서, B는 정자계, J는 과전류, F는 로렌즈 힘, I는 코일내의 전류 그리고 θ는 굴절각을 나타낸다.

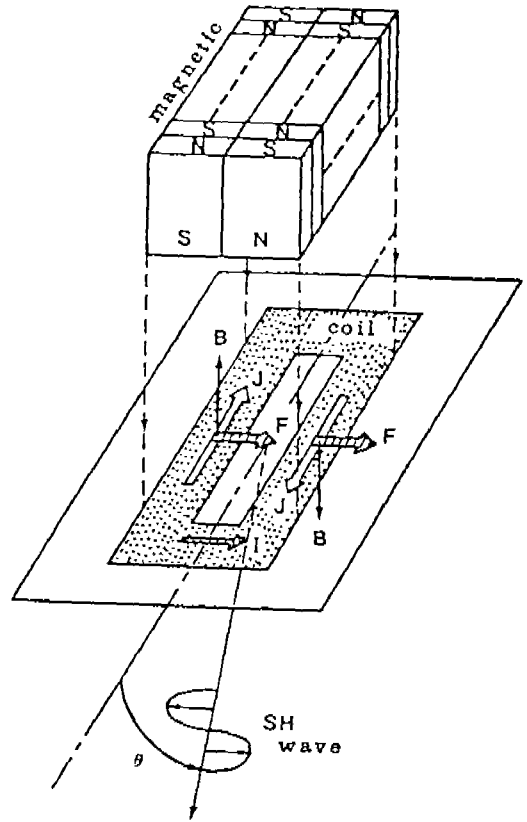


Fig. 3 Structure of SH-EMAT

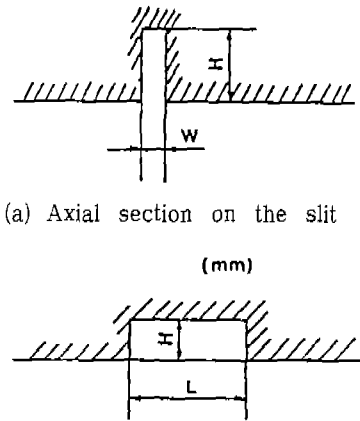
Table 1 Specifications of EMAT

Frequency	2 MHz
Angle of reflection	45°
Number of magnetic	7 EA
Width of magnetic	1.1 mm
Length of sensor surface	약 8mm

3.2 시험체

Fig. 4에는 본 연구에서 사용한 전자초음파 탐상용인 12B-SUS 배관 시험체에 방전가공법을 이용하여 인공슬릿의 결함형상을 만든 슬릿의 단면도를 나타내었다.

일반적으로 스테인레스강은 재료의 특성상 결정립 경계로부터 강한 다산란 및 반사현상이 일어난다. 그러므로 기존의 아날로그적 초음파탐상법으로는 정확한 결함의 평가는 힘든 일이다. Table 2에 인공슬릿의 규격을 나타내었다.



(a) Axial section on the slit

(mm)

(b) Circumferential section on the slit

Fig. 4 Dimension of artificial slit ($5.3^H \times 12.0^L \times 0.3^W$)

Table 2 Specifications of slit

(mm)

Specimen type	Slit position	H	L	W
12B-SUS	direction of 6 hour	5.3	12.0	0.3

3.3 인공슬릿의 결함 탐상

Fig. 5와 같이 인공슬릿의 결함탐상은 2개의 센서 (EMAT)의 중심과 시험체의 주방향 중심을 일치시키고 슬릿으로부터 1.5skip 위치에서 SH-EMAT를 입사한 후 2.5skip 위치에서 전자초음파를 수신한다. 이때 주사폭치는 2mm이다.

파형 데이터는 증가산치를 기록하고 있으며 가산횟수로 나누어 평균화 한다.

3.4 탐상기의 설정

SH-EMAT용 탐상기의 규격은 Table 3과 같다.

Table 3 Characteristics of detector

Frequency	2 MHz
Pulse number	4 Wave
Current of output	30 App
Gain of receive	100 dB
Central frequency of band pass filter	2 MHz

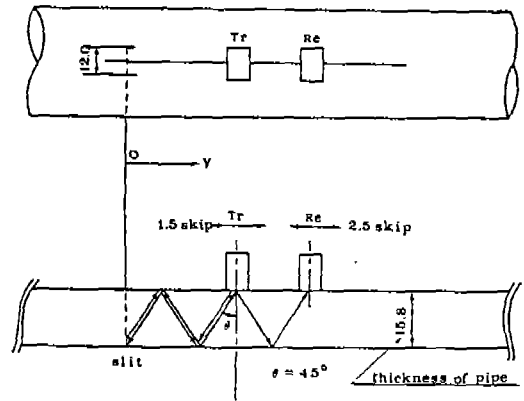


Fig. 5 Flaw detect method of artificial slit

3.5 수집데이터의 조건

(1) 송신 데이터

- 송신측 센서의 위치
- 송신파형의 데이터(170점)

(2) 수신 데이터

- 송신측 센서의 위치
- 수신측 센서의 위치
- 수신파형의 데이터(1024점)

(3) 파형 조건

- 수신파형 지연시간(송신파형의 지연시간 $0(\mu s)$) : $30\mu s$
- 파형 1점당의 시간 : $0.05 \mu s/\text{점}$

4. 데이터의 신호처리 및 분석

4.1 데이터 처리장치의 구성

Fig. 6에 EMAT로 부터 수집되는 디지털 수신파형 데이터의 디지털신호처리장치를 블록선도(block diagram)으로 나타내었다.

4.2 신호처리법의 적용

4.2.1 Deconvolution

시각 $t=0$ 에서 탐촉자로부터 x방향으로 송신되는 초음파 펄스가 어떤 반사면(반사계수 ρ)에서 반사되어 다시 탐촉자로 수신되는 반사파 신호를 이용하여 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

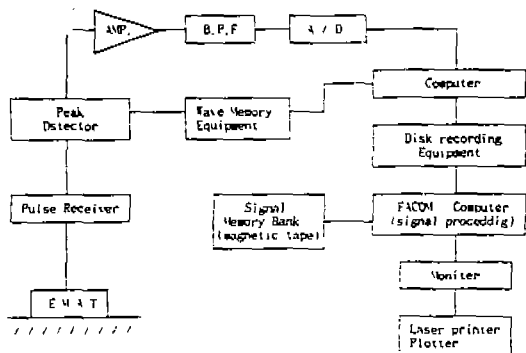


Fig. 6 Block diagram of signal processing

$$S_R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho(x) S_T \left(t - \frac{2x}{v} \right) dx \quad (4)$$

여기서,

시간을 t , 반사방향의 거리 x , 송신파형을 $S_T(t)$, 수신파형을 $S_R(t)$, 매질내의 반사계수의 분포를 $\rho(x)$, 초음파의 속도를 v 라 한다.

식 (4)는 송신펄스파형 S_T 가 중첩되어 있어 거리분해 능이 저하기 때문에 본래 관측하고자 하는 $\rho(x)$ 의 정보를 알아볼 수 없게 된다. 따라서 시험체내에 존재하는 결함등의 실제형태를 알아보기 위한 목적을 이루기 위해 ρ 의 형을 확실하게 하는 수 밖에 없다.

그래서 식 (4)의 $\tilde{S}_T(f)$, $\tilde{S}_R(f)$, $\tilde{\rho}(u)$ 를 각각 $S_T(t)$, $S_R(t)$, $\rho(x)$ 의 Fourier 변환식으로 나타내면

$$\tilde{S}_R(f) = \tilde{\rho} \left(-\frac{2f}{v} \right) \tilde{S}_T(f) \quad (5)$$

그러므로

$$\tilde{\rho} = \frac{\tilde{S}_R}{\tilde{S}_T} \quad (6)$$

$\tilde{\rho}$ 를 역변환하면 송신파형에 의존하지 않고 반사계수의 분포를 알 수 있다.

다전별루션하기전에 먼저 처리되지 않은 B-scope상을 얻는다. 이것을 빔 방향에 수직인 다수의 선으로 분할하여 각각에 대하여 deconvolution처리를 실시한다. 이들 결과를 다시 2차원 화상으로 완성한 것이다. 식 (6)의 분모에 적합하도록 점반사체를 측정할때의 횡방향의 신호강도(빔 강도분포)의 스펙트럼을 이용한다.

이것을 수식으로 표시하면 빔에 수직인 선에 있어서 진반사계수(true reflection coefficients) 분포를 $r(y)$, 빔의 강도분포를 $f(y)$, 측정된 신호강도 분포를 $m(y)$ 라 하면

$$m(y) = \int f(y - y') r(y') dy' \quad (7)$$

에 의해서 k 의 공간주파수 $\tilde{r}(k)$, $\tilde{f}(k)$, $\tilde{m}(k)$ 를 각각 r , f , m 의 푸리에변환(Fourier transform)이라 하면

$$\tilde{r}(k) = \frac{1}{\tilde{f}(k)} \tilde{m}(k) \quad (8)$$

여기서, $1/\tilde{f}(k) = \tilde{F}_0(k)$ 를 kernel이라 한다. k 가 클 경우에는 $f(k)$ 에는 노이즈만이 존재하기 때문에 이와 같은 k 에 있어서는 kernel이 큰 피크(peak)를 갖게 된다.

이것에 의한 deconvolution의 결과로 큰 노이즈가 나타난다.

그러므로 kernel에는 저역통과필터(low pass filter)를 걸 필요가 있으며, 문제는 어떤 필터가 좋은가 하는 것이다. 여기서는 Gaussian-filter가 양호한 결과가 얻어지게 된다.

$$\tilde{F}(k) = \tilde{F}_0(k) \cdot \exp \left(- (k/k_0)^2 \right) \quad (9)$$

k_0 는 차단주파수이다.

계산된 반사주파수 분포는 다음과 같다.

$$r'(y) = \int f(y - y') m(y') dy' \quad (10)$$

Kernel을 작게 변환하기 때문에 $r'(y)$ 는 진(true)의 $r(y)$ 와는 다르다. 그래서 양호한 근사가 된다. Fig. 7은 deconvolution 처리과정의 일례로서 k_0 가 서로다른 3가지의 경우로서 2개의 센서에 의해 검출한 예이다. k_0 가 변화할때의 kernel, 필터, kernel의 공간영역표현, 그리고 $r'(y)$ 의 형태로 나타낸다.

Fig. 7을 보면 진(true)중의 $k_0=1.2\text{Cm}^{-1}$ 의 경우 50%의 분해능이 향상된 면에서나, 노이즈가 작은 면에서 우수하다고 할 수 있다.

이 그림은 탐촉자로부터 75mm 정도의 거리에 있으며 서로 4mm 떨어진 2개의 탐촉자(transducer)이다. 이 지점에서는 탐촉자의 빔폭이 7mm가 된다.

다음단계로 다른 선에 대해서도 처리를 실시하여 화

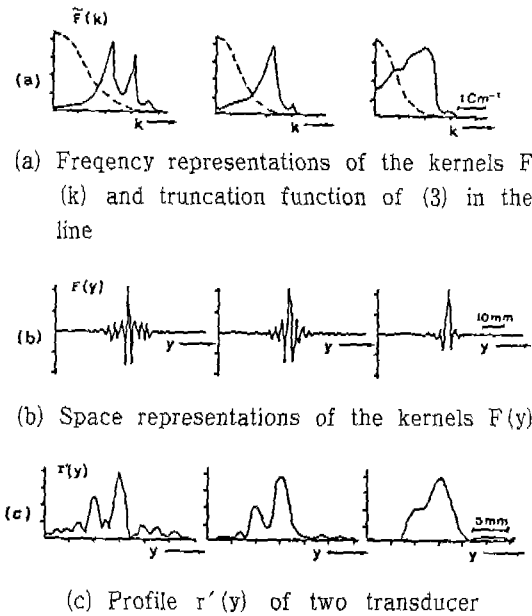


Fig.7 Optimizations of filter for low noise and high resolution

상전체에 대하여 향상을 도모한다. 단, kernel은 75mm의 지점에서 이용한 것과 같은 것을 사용한다. 그 결과 탐촉자로 부터 65mm-100mm의 지점에서는 이것으로 충분하리라 판단된다. Fig. 8에 센서로부터 75mm의 지점에서 결정한 kernel을 45mm-120mm의 범위에서 이용한 경우의 처리전·후의 빔폭, 분해능의 향상도, 노이즈의 강도를 표시한다.

Fig. 7과 Fig. 8은 최적의 Kernel로 필터링(filtering)된 결과이다.

4.2.2 분할 스펙트럼 처리(SSP)

분할스펙트럼처리를 이용한 초음파탐상 방법은 확실한 목표 이외의 산란파가 목표에서의 반사파에 비해서 주파수 의존성을 강하게 가지는 특성을 이용하고 있다.

수신신호의 스펙트럼을 서로 겹치(overlap)도록 한 다수의 대역통과필터(band pass filter)를 겹쳐서 각각의 결과를 다시 시간축상으로 변환한다. 목표로부터의 반사파만이 이들 파형 모두를 통과하고 거의 같은 강도를 갖게 된다. 특히 어느 시간에 있어서 각 파형상의 값이 모두 같은 부호를 갖을 확률도 목표로부터 반사파

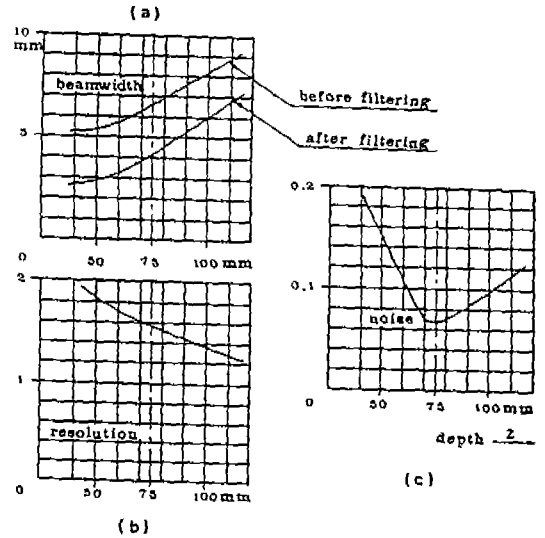


Fig.8 Filtering with one Kernel for increasing depth shows high stability

- (a) Beamwidth before and after filtering.
- (b) Resolution defined as ratio of beamwidth before and after filtering.
- (c) Noise and ratio of highest disturbance to signal amplitude shown as function of depth.

상의 점에서 매우 높게 된다. 이렇게 하여 coherent noise를 제거하는 방법이다. SSP처리는 스펙트럼의 분할(split), 최소화(minimization), 부호판정(polarity thresholding)의 3단계로 실시된다.

먼저, 수신파형의 스펙트럼 분할은 Fig. 9처럼 표현된다. 분할처리에 이용되는 Gaussian-band-pass-filter의 갯수를 n , 수신파의 스펙트럼의 1/2 밴드폭을 B , 중심주파수의 간격을 T 라 하면 식 (11)과 같다.

$$n = B/\Delta f$$

단, 양끝의 필터의 중심주파수는 수신파형 스펙트럼이 정확히 반값을 가지는 주파수와 일치시킨다. 또 필터의 대역폭은 필터들 사이의 중심주파수의 간격이 작기때문에 3~4배로 한다.

이렇게 해서 분할한 스펙트럼을 각각 시간영역으로 변환한 후 최소화처리(minimization)를 실시한다. 최소화는 식 (12)와 같이 정식화 된다.

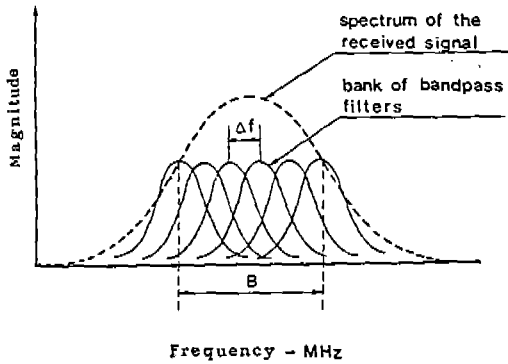


Fig. 9 Spectrum of the received signal and the filtering scheme

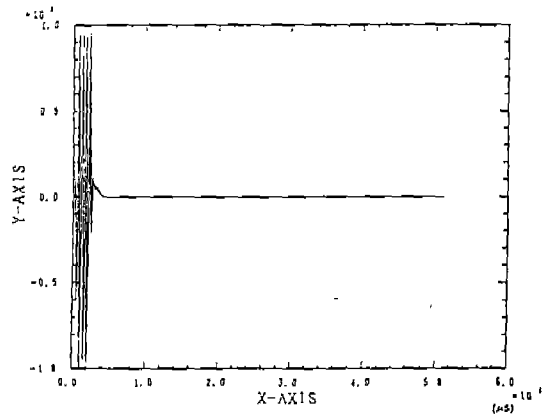


Fig. 10 Transmitted pulse

$$Z(\tau) = |X_j(\tau)| \quad (12)$$

여기서 $|X_j(\tau)| = \min. of (X_1(\tau), \dots, X_i(\tau), \dots, X_n(\tau))$, $X_i(\tau)$ 는 분할된 시간영역신호의 시각 τ 에 있어서 진폭이다.

최소화처리는 S/N비의 향상에 우수한 효과를 나타낸다. 분해가 불가능한 산란원에 의한 클러터(clutter)는 주파수에 의해 달라지는 것에 비해서, 검사체내의 결함에 의한 반사 피크는 주파수에 의해 거의 변화하지 않는다.

최소화에 가해진 부호판정처리(polarity thresholding)를 실시함에 따라 보다 양호한 결과가 얻어진다.

클러터는 목표로부터의 반사파에 비해서 주파수 의존성을 강하게 갖는다. 그러므로 확실한 목표가 존재하지 않을때에 주어졌던 τ 에 있어서 n개의 시간신호 모두가 같은 부호를 취할 확률은 매우 작다. 역으로 목표로부터의 반사의 경우 그 확률은 크게 된다.

따라서 다음과 같이 처리를 실시한다.

$$Y(\tau) = Z(\tau), \text{ if all } X_i(\tau) < 0, \text{ for if } i = 1, \dots, n,$$

$$Y(\tau) = Z(\tau), \text{ if all } X_i(\tau) > 0, \text{ for if } i = 1, \dots, n, \text{ or}$$

$$Y(\tau) = 0, \text{ otherwise} \quad (13)$$

여기서,

$Y(\tau)$ 는 출력, $Z(\tau)$ 는 최소화처리의 출력이다.

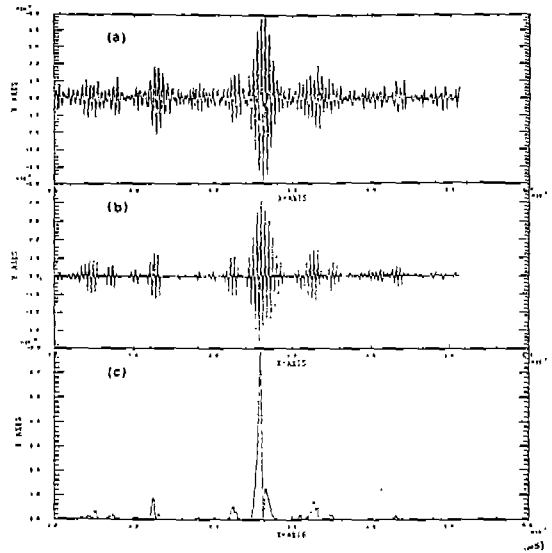


Fig. 11 Results of digital signal processing (in the case of addition number, 156)

4.3 EMA 실험데이터의 처리 및 분석

EMAT에 의해 입사한 송신파는 Fig. 10과 같다. EMA(입사파)의 주파수는 2MHz이고 파수가 4사이클인 'SH-burst wave'로써 배관 시험체의 인공결함으로부터 1.5skip 떨어진 지점에서 입사각 45°로 입사시켜 2.5skip 지점에서 EMAT(receiving transducer)로 에코우를 수신하였다. 수신파형은 중심주파수가 2MHz인 대역통과필터(band pass filter)를 통한다.

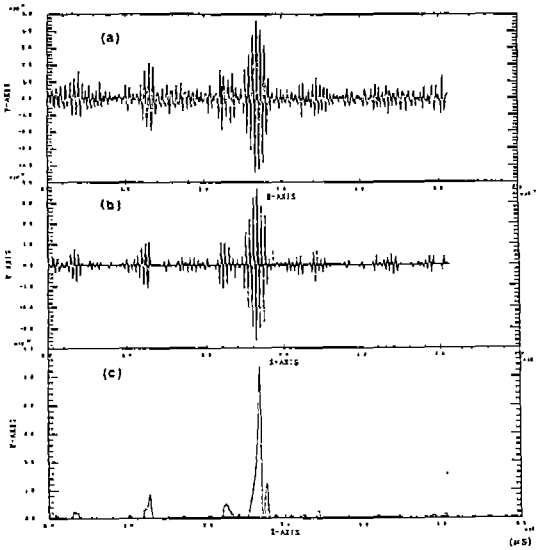


Fig.12 Results of digital signal processing
(in the case of addition number, 174)

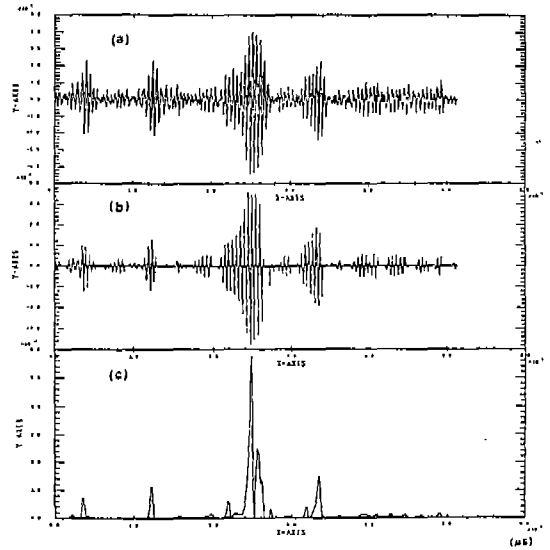


Fig.14 Results of digital signal processing
(in the case of addition number, 210)

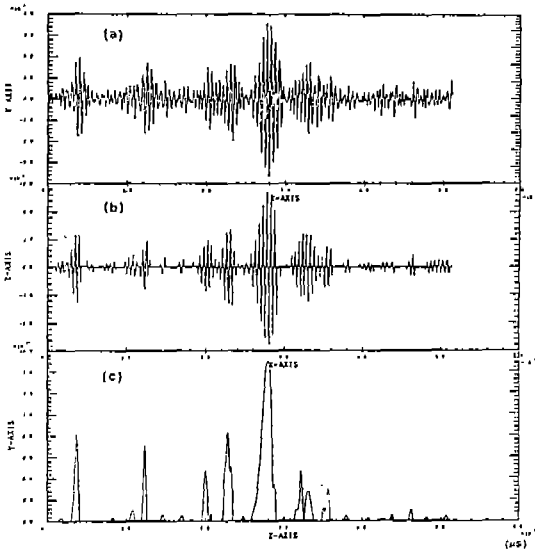


Fig.13 Results of digital signal processing
(in the case of addition number, 192)

Fig. 11(a) ~ Fig. 14(a)은 필터를 통과한 파형의 가산 횟수를 각각 156회, 174회, 192회 그리고 210회로 달리하여 가산평균처리를 실시한 후의 수신데이터 결과 파형이다.

신호처리에 사용한 데이터는 파형 1점당 시간이 0.05 μ s/점 이고, 본 실험은 사각탐상 이므로 수신파형에 많은 에코우가 보임을 알 수 있다. 또한 입사파가 4사이클 이므로 이 수신파를 그대로 이용하여 B-Scope상과 합성시키면 화상이 흐릿하게 얻어진다.

그러므로 수신파형의 분해능과 S/N비를 향상시킬 필요가 있으므로 분할스펙트럼처리 및 deconvolution처리를 실시하여 분해능 및 S/N비를 향상시켰다.

SSP법은 입사파의 파장보다 충분히 크며 목표 이외에서의 산란파의 강도가 목표로부터 반사파에 비해서 입사파의 주파수 부근에서 주파수 의존성을 강하게 갖는 것을 이용하였다. 앞에서 기술된 Fig. 7과 같이 수신신호 스펙트럼이 서로 겹치도록 여러개의 필터를 걸어 각각의 결과를 시간축(x축) 상으로 변환하였다.

그래서 Fig. 11(b) ~ Fig. 14(b)은 SSP법을 적용하여 목표 이외에서의 coherent noise를 제거한 결과이다.

그리고 SSP의 결과 파형을 deconvolution할때 파형이 정(+) · 부(-)의 값을 가지거나 걸쳐있게 되므로 양호한 결과를 얻을 수가 없다. 그래서 SSP후의 파형을 2승화하고, 저역통과필터(low pass filter)를 통과시킨후에 deconvolution 처리를 하였다. 그 결과 앞에서 서술된 Fig. 7의 deconvolution kernel로서 입사파형이나 수신파형을 처리하여 얻은 것보다 여기서는 입사

파와 거의 같은 폭을 갖는 파형을 얻었다. 이와같이 수신신호를 데이터화하여 신호처리를 실시하므로써 분해능 및 S/N비가 향상된 결과의 파형을 얻었다. 이상의 최종 처리결과 파형이 Fig. 11(c) ~ Fig. 14(c)이다.

5. 결 론

본 연구에서는 EMAT를 사용하며, 12B-SUS 배관시험체에 인공슬릿을 만들어서 4 사이클의 SH-burst wave(EMA)를 45° 경사로 입사시켜 수신한 입사펄스의 신호데이터를 디지털신호처리법인 SSP법과 deconvolution법에 의해 처리하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

1. EMAT로부터 수신한 신호의 데이터를 SSP법과 deconvolution법에 의한 디지털 신호처리의 결과가 기존의 아날로그 방식의 초음파탐상법 보다도 양호한 신호를 얻을 수 있었다.
2. 수신된 신호데이터에 SSP법을 실시하여 노이즈(noise)가 잘 제거되었으며 분해능 및 S/N비가 향상되었다.
3. 스테인레스강의 일반적인 성질상 초음파가 다산란 또는 반사현상이 일어남에도 불구하고 deconvolution 처리의 실시로 분해능이 향상되었다.
4. 또한 가산평균처리 횟수가 많아짐에 따라 분해능 및 S/N비가 향상되었고 입사파형에 가까운 폭의 펄수가 얻어졌다.

참고문헌

1. 戸田裕己, 福岡秀和, 山崎友裕, 竹内博之, “電磁超音波素子による薄板の應力測定”, 日本機械學會論文集, 第55卷, 第518號, pp. 2178~2183, 1989.
2. 本壓克彦, 順藤佳一, 増田順一, “電磁超音波法による薄鋼板の厚さ測定技術”, 日本非破壊検査,

- 第41卷, 第1號, pp.11~17, 1984.
3. Whaley H. L. and Adler L., “Flaw Charaterization by Ultrasonic Frequency Analysis”, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 56, No. 6, pp.1776~1781, 1974.
4. R. B. Thompson, “Quantitative Ultrasonic Nodestrutive Evaluation methods”, Journal of Applied Mechanic, Vol. 50, pp.1191~1201, 1983.
5. W. E. Glenn and J. Hirshman, “High Resolution Ultrasonic System for the real-time video Imageing of Internal Flaws”, Materials Evaluation, 40, pp.96~100, 1982.
6. Robert F. Wanger, Stepem W. Smith, John M. Sandrik and Hector Lopez, “Statics of Spekel in ultrasound B-scans”, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. 30, No. 3, pp.156~163, 1983.
7. I. Sugimoto, T. Kikuta, Y. Hayash, and M. Takagi, “Compact underground radar system”, The 6th Scandinavian Conference on Image Analysis, 1989.
8. E. E. Hundt and E. A. Trautedberg, “Digital processing of Ultrasonic data by deconvolutin”, IEEE Trans. SU-27, Vol. 5, p.249, 1980.
9. P. Karpur, P. M. Shanker, J. L. Rose and V. L. Newhouse, “Split Spectrum Processing-Optimizing the processing parameters using minimization”, Ultrasonic, Vol. 25, July, 1987.
10. 김재열, “초음파를 이용한 반도체패키지의 미소결함 검출을 위한 화상처리에 관한 연구”, 한양대학교 박사학위논문, 1990.