

초음파 에코파형의 웨이브렛 변환과 비파괴평가에의 응용

Wavelet Analysis of Ultrasonic Echo Waveform and Application to Nondestructive Evaluation

박익근*, 박은수*, 안형근*, 권숙인**, 변재원**

Ik-Keun Park*, Un-Su Park*, Hyung-Keun Ahn*, Sook-In Kwun** and Jai-Won Byeon**

초 록 초음파 에코파형의 시간-주파수해석법으로 Wigner 분포와 웨이브렛 변환 등과 같은 새로운 신호처리 기법이 비파괴평가 분야에 널리 응용되고 있다. 본 연구에서는 웨이브렛 변환(wavelet transform)에 의한 음속과 감쇠계수의 주파수의존성과 초음파 결합신호의 잡음제거의 유용성 유무를 실험적으로 검증하였다. Gabor 함수를 웨이브렛의 기본 함수로 사용하였다. 초음파의 에코파형에 포함된 각 주파수성분의 속도와 감쇠계수의 주파수의존성을 추정할 수 있었으며, 초음파탐상에서 결함의 검출능 향상과 결함크기 산정의 정량화에 접근하기 위해 웨이브렛 변환에 의한 S/N비 신호처리 시뮬레이션 결과를 오스테나이트강 스테인레스 용접부에 가공한 EDM 노치의 초음파 결합신호에 적용한 결과 입상에코를 저감하고 S/N비를 개선하는 것이 가능하였다.

주요용어: 초음파 비파괴평가, 신호처리, 웨이브렛 변환, 군속도, 감쇠계수, 신호대잡음비

Abstract Recently, advanced signal analysis which is called "time-frequency analysis" has been used widely in nondestructive evaluation applications. Wavelet transform(WT) and Wigner Distribution are the most advanced techniques for processing signals with time-varying spectra. Wavelet analysis method is an attractive technique for evaluation of material characterization nondestructively. Wavelet transform is applied to the time-frequency analysis of ultrasonic echo waveform obtained by an ultrasonic pulse-echo technique. In this study, the feasibility of noise suppression of ultrasonic flaw signal and frequency-dependent ultrasonic group velocity and attenuation coefficient using wavelet analysis of ultrasonic echo waveform have been verified experimentally. The Gabor function is adopted the analyzing wavelet. The wavelet analysis shows that the variations of ultrasonic group velocity and attenuation coefficient due to the change of material characterization can be evaluated at each frequency. Furthermore, to assure the enhancement of detectability and flaw sizing performance, both computer simulated results and experimental measurements using wavelet signal processing are used to demonstrate the effectiveness of the noise suppression of ultrasonic flaw signal obtained from austenitic stainless steel weld including EDM notch.

Keywords: ultrasonic nondestructive evaluation(UNDE), signal processing, wavelet transform(WT), group velocity, attenuation coefficient, signal to noise ratio(SNR)

1. 서 론

초음파에 의한 결합검출 및 재료평가를 음파물성론으로 고려하면 각각 음파와 결합파의 상호작용 및 음파와

전파매체의 미세조직과의 상호작용을 수학적 모델링으로 이해할 수 있다. 이 때 음파의 산란현상, 흡수현상 등의 기본적인 메커니즘을 이용하여 초음파의 전파과정을 모델화하고, 수신된 초음파에 포함되어 있는 정보로부터 결

함 및 전파매체의 미세조직의 기하학적 형상·크기 및 그 분산을 정량적으로 구한다.

초음파에 의한 비파괴평가에서 탐촉자에 수신된 펄스파의 주파수에 대한 에너지 분포의 시간적 변화와 결합 신호의 신호대잡음비(S/N비) 향상은 재료내부의 상태변화 등의 정보를 얻는데 매우 중요하다. 펄스반사법에서는 두께를 알고 있는 재료 내에 초음파펄스를 입사시키고, 다중 반사한 후의 에코의 발생시간과 진폭을 측정함으로써 그 재료의 속도나 감쇠계수를 측정하는 것이 일반적이다. 고체내부를 전파하는 탄성파는 일반적으로 분산성(dispersion)을 가지고, 재료의 점탄성이나 미시적 구조에 따라서 분산성이 현저해지는 경우도 있다. 고체내부에서 탄성파의 감쇠계수는 주파수에 의존한다. 초음파펄스는 어떤 유한의 대역폭을 갖고 그 대역에 포함되어 있는 여러 주파수성분으로 구성되기 때문에 에코전체의 발생시간이나 진폭으로 계산한 속도나 감쇠계수는 에코파형에 포함되어 있는 여러 주파수성분에 대한 평균적인 값이 된다. 따라서, 초음파펄스반사법에서 초음파 에코 파형에 포함된 각주파수성분에 대한 속도와 감쇠계수의 고정밀도계측, 결합의 검출능(detectability) 향상과 결합크기 산정(length and depth sizing)의 정량화에 접근하기 위한 결합신호의 S/N비 향상에 신호처리가 필요하다.

초음파탐상 시험에서 디지털 파형측정 기기 및 컴퓨터 등의 발전과 함께 초음파 펄스 파형의 시간 영역의 데이터를 주파수영역의 데이터로 변환하는 데는 고속푸리에변환(fast fourier transform; FFT)에 의한 신호처리 기법이 광범위하게 이용되고 있으나 여러 면에서 한계가 있다. FFT에 의한 신호처리는 시간영역에서의 국부적인 신호의 변화가 주파수 영역에서 전체 주파수로 펼쳐지기 때문에 시간영역에서의 국부적인 정보를 잃어버리게 된다.

파형데이터해석법으로 단시간푸리에변환(short time Fourier transform; STFT)이나 Wigner-Ville분포 등의 시간-주파수해석법(time-frequency analysis)이 알려져 있다.[1-3] 시간-주파수해석법은 파형 데이터를 분해하여 시간과 주파수의 2차원평면상에 파형의 에너지분포를 구하는 해석방법으로 음향신호의 해석 등에 널리 적용되고 있다.[4-8] 탄성파의 데이터해석에 시간-주파수해석법을 적용하면 탄성파의 전파거동을 각주파수성분마다 분해할 수 있기 때문에 분산관계를 용이하게 분석할 수 있다. 탄성파의 데이터해석에 대한 시간-주파수해석법의 적용례는 그리 많지 않다. Hodges 등은 STFT를 적용하여 현의 과도진동에 시간-주파수해석의 적용을 시도하였다. Wahl 등은 Wigner-Ville분포를 적용하여 붕의 중충격과 횡충

격에 대한 응답의 시간-주파수해석을 하였다[9]. 그러나, STFT는 시간-주파수분해능이 일정하기 때문에 광범위한 주파수에 대한 해석에 어려움이 있고, 또, Wigner-Ville분포는 정확한 시간-주파수분포를 얻기 위해 평활화 처리가 필요하는 등 단점이 있다. 이와 같은 단점들을 보완하기 위한 새로운 신호처리 기법으로 웨이브렛 변환(wavelet transform; WT)이 사용되고 있다.

본 연구에서는 Gabor 함수를 웨이브렛의 기본 함수로 사용하고 음속과 감쇠계수의 주파수의존성의 고정밀도계측과 초음파탐상에서 결합의 검출능 향상과 결합크기 산정의 정량화에 접근하기 위해 결합신호의 S/N비 향상에 웨이브렛 변환의 새로운 신호처리 기법을 시뮬레이션하고 그 유용성 유무를 실험적으로 검증하고자 한다.

2. 웨이브렛 변환

웨이브렛 변환은 이공학의 여러 분야에서 최근 주목받고 있는 새로운 신호처리기법으로 신호, 시스템, 프로세스의 모델을 「특수한 신호」의 집합으로 구성하는 것에 관한 수학이다. 이 특수한 신호를 「wavelet」이라 부르고, 국부적으로 존재하는 어떤 하나의 '작은 파(wave-let)'를 기본 패턴으로 하고 그것을 이동(shifting)이나 확대·축소(scaling)에 의해 임의의 파형으로 표현한 것이다. 웨이브렛 변환은 수학, 물리학, 신호처리 분야 등에서 각기 독립적으로 발전되어오던 이론들을 1980년 중반부에 이르러 Daubechies[10,11], Morlet[6] 등의 여러 학자들에 의해 그 이론이 체계화되고 동시에, 다양한 목적에서 그 유용성이 확인되었다. 현재에는 음향·영상·진동 등의 신호처리로부터 미분방정식이나 적분방정식의 수치해석법 등에 이르기까지 다양하게 응용되어 Matlab 제품의 Toolbox로 만들어질 정도로 발달되었다. 웨이브렛 변환은 전통적으로 신호처리에 사용되어온 기존의 FFT가 N개의 이산자료에 대해 $O(N \log_2 N)$ 연산이 필요한 반면에 웨이브렛 변환은 $O(N)$ 연산을 필요로 하기 때문에 계산속도가 빠르다. 또한 원신호에 빠르게 접근하고 신호의 평활성을 잘 분석하며, 주어진 신호에 대한 시간과 주파수영역에서의 정보를 균형적으로 국소화 시킬 수 있는 장점이 있다[11].

진폭과 주파수가 시간 t 와 함께 변화하고 있는 신호의 일부분을 취하면 각각의 부분은 웨이브렛을 중형으로 확대·축소하고, 신호의 크기와 국소적인 주파수를 나타낼 수 있다. 부분을 취하기 위해서는 웨이브렛 $\psi(t)$ 의 변수 t 를 $(t-b)/a$ 로 치환하고, $\psi((t-b)/a)$ 가 신호의 국소적

인 모양을 나타내도록 실수 a와 b를 선택한다. 이와 같이 웨이브렛은 신호를 부분적으로 취할 때의 단위로 사용된다. 본래(original)의 웨이브렛은 최초의 작은 파인 모웨이브렛(mother-wavelet) 또는 analyzing wavelet라 부르고 웨이브렛 변환의 핵이 된다.

웨이브렛으로 잘라낸 신호의 부분은 각각 시간축 상에서의 위치와 그 부분의 국소적인 주파수를 나타낸다. 주파수를 나타내는 좌표축을 새로 설정하고 시간축과 주파수축으로 하는 2차원면을 생각한다. 이것을 시간-주파수 평면(time-frequency plane) 또는 신호평면(signal plane)이라 부른다. 이 신호평면 위에 각각의 성분을 배치하여 보면 웨이브렛 성분으로부터 본래 각 신호의 주파수가 어떠한지를 잘 알 수 있다.

푸리에변환에 근거하여 사용되는 지수함수, $e^{-i\omega t}$ 는 시간영역에서 무한히 넓기 때문에 푸리에변환에서는 신호의 시간적 정보가 상실된다. 이 결점을 보완하기 위해 창함수(window function), $w(t)$ 를 사용하여 $w(t)e^{-i\omega t}$ 와 같이 국부적으로 존재하는 함수를 만든다. 이것을 사용하여 수정한 푸리에변환을 STFT라 부른다. Gabor는 1946년 창함수로 가우스함수, e^{-t^2} 을 사용하여 다음과 같은 STFT를 고려했다[4].

$$\hat{f}(\omega, b) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-b)^2}{\sigma^2}} e^{-i\omega t} f(t) dt \quad (1)$$

여기서 실수, σ 는 미리 선정하여 놓는다. 이것을 Gabor 변환이라 부르고, $\hat{f}(\omega, b)$ 는 신호 $f(t)$ 의 신호평면으로 표현된다. 그러나, Gabor 변환에서는 창의 폭이 주파수에 의존하지 않고, σ 에 고정되고 앞에서 기술한 신호의 최소단위의 관점에서 효율이 나쁘고 이 결점을 피하기 위해 모웨이브렛을

$$\psi(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{t^2}{\sigma^2}} e^{-it} \quad (2)$$

으로 하는 웨이브렛 변환을 고려하는 것이 가능하다. 이 함수 ψ 를 Gabor의 모웨이브렛이라 부른다. 함수 $f(t)$ 의 모웨이브렛 $\psi(t)$ 에 의한 시간 t 의 함수 $f(t)$ 의 적분 웨이브렛 변환은 다음 식으로 정의된다.[4,13-16]

$$\begin{aligned} (W_{\psi}f)(b, a) &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \\ &= \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(\omega) e^{ib\omega} \overline{\hat{\psi}(a\omega)} d\omega \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

여기서, $a > 0$, $\bar{}$ 은 $\psi(t)$ 의 복소공역을 나타낸다. 함수 $\psi(t)$ 는 허용조건

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (4)$$

를 만족하는 함수이고 기본 웨이브렛이라 불린다. 여기서, $\hat{}$ 은 $\psi(t)$ 의 푸리에변환을 나타내고

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (5)$$

이다.

본 연구에서는 기본 웨이브렛으로 다음의 Gabor함수를 채택하였다[12-15].

$$\begin{aligned} \Psi_g(t) &= \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\omega_0}{\gamma}} \cdot \\ \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\omega_0 t}{\gamma}\right)^2\right] \exp(i\omega_0 t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Psi_g(\omega) &= \frac{\sqrt{2\pi}}{4\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\gamma}{\omega_0}} \cdot \\ \exp\left[-\frac{(\frac{\gamma}{\omega_0})^2}{2} (\omega - \omega_0)^2\right] \end{aligned} \quad (7)$$

Gabor 함수는 허용조건(admissible condition) 식(4)를 엄밀히는 만족하지 않지만 $\gamma = \pi\sqrt{2/\ln 2}$, $\omega_0 = 2\pi[\text{rad/s}]$ 로 하면 근사적으로 만족함으로 기본 웨이브렛으로 사용 가능하다. 웨이브렛 변환은 1변수함수에서 2변수함수의 적분변환이고, 변수 t 가 시각을 나타내는 경우, 파라미터 b 는 시간이동 매개변수(shifting parameter), 파라미터 a 는 팽창매개변수(dilation parameter) 또는 축척매개변수(scaling parameter)로 주기의 크기를 나타낸다. 적분핵의 함수 $\psi(t)$ 는 허용조건을 만족하는 함수이면 자유로 선택이 가능하고, ω_0/a 값은 각주파수 ω 의 값과 일치하도록 $\omega_0 = 2\pi$ 로 한다.

초음파 에코파형의 웨이브렛 변환에 의한 시간-주파수 해석법은 전파속도가 주파수에 의존하여 다른 분산성 파동을 나타내는 경우 초음파펄스에 포함되어 있는 각 주파수성분의 전파속도는 전파와 함께 변화하고 펄스 발생 시각이 불명료하게 되기 때문에 결합위치의 해석이나 전파속도의 측정 등이 곤란하게 된다. 웨이브렛 변환에 의한 분산성 파동의 시간-주파수해석을 위해 다음과 같이 약간 다른 각주파수, ω_1 과 ω_2 를 갖고, x방향으로 전파

하는 조화진행파를 고려한다.

$$u(x, t) = e^{-i(k_1 x - \omega_1 t)} + e^{-i(k_2 x - \omega_2 t)} \\ = 2 \cos(\Delta k x - \Delta \omega t) e^{-i(k_c x - \omega_c t)} \quad (8)$$

여기서, k_1 과 k_2 는 각각 파수(wave number)이고

$$k_c = (k_1 + k_2)/2, \quad \omega_c = (\omega_1 + \omega_2)/2 \quad (9)$$

$$\Delta k = (k_1 - k_2)/2, \quad \Delta \omega = (\omega_1 - \omega_2)/2 \quad (10)$$

이다. $\Delta \omega$ 가 충분히 작으면 각주파수 ω_c 에서 위상속도(phase velocity), c_p 와 군속도(group velocity), c_g 는 다음 식으로 정의된다.

$$c_p = \omega_c / k_c, \quad c_g = \Delta \omega / \Delta k \quad (11)$$

그리고, Gabor 웨이브렛을 이용한 경우 조화진행파 $u(x, t)$ 의 웨이브렛 변환의 절대값은 다음 식으로 표시된다[4].

$$|(Wu)(x, a, b)| = \sqrt{a} \{ [\hat{\psi}_g(a\omega_1)]^2 + [\hat{\psi}_g(a\omega_2)]^2 + 2\hat{\psi}_g(a\omega_1)\hat{\psi}_g(a\omega_2)\cos(2\Delta kx - 2\Delta \omega b) \}^{1/2} \quad (12)$$

$\Delta \omega$ 가 충분히 작고 $\hat{\psi}_g(a\omega_1) \approx \hat{\psi}_g(a\omega_2) \approx \hat{\psi}_g(a\omega_c)$ 로 간주하는 경우에는 식(12)는 다음 식으로 근사화 된다.

$$|(Wu)(x, a, b)| \approx \sqrt{2a} |\hat{\psi}_g(a\omega_c)| \cdot [1 + \cos(2\Delta kx - 2\Delta \omega b)]^{1/2} \quad (13)$$

윗 식으로부터 웨이브렛 변환의 절대값은 $a = \omega_0 / \omega_c$, $b = (\Delta k / \Delta \omega)x = x / c_g$ 에서 극대가 된다. 다시 말해, 웨이브렛 변환의 절대값을 시간-주파수평면상에 플롯하면 군속도 c_g 로 전파하는 각주파수 ω_c 의 파동이 위치 x 에 도달하였을 때 시간 b 에서 극대가 된다. 이것을 이용하면 파동의 데이터를 시간-주파수 해석함으로써 파동의 각 주파수성분의 군속도의 분산관계를 조사할 수 있다.

3. 웨이브렛 변환을 이용한 신호처리

시간 의존적인 비정상 초음파신호의 해석에서 STFT와 같은 신호처리 기법은 신호의 시간 영역과 주파수 영역의 동시 정보를 정확히 제공해 준다. 신호 $s(t)$ 의 STFT $F_\omega(\tau, f)$ 는 다음과 같이 나타낸다[16,17,18].

$$F_\omega(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot \omega(t - \tau) \cdot e^{-2\pi i f t} dt \quad (14)$$

여기서, $\omega(t)$ 는 시간영역에서의 창함수이고 가우시언(gaussian)형이면 Gabor 변환이 되고 신호 $s(t)$ 의 웨이브렛 계수 $W_s(a, b)$ 는 다음과 같이 정의된다[16,17].

$$W_s(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot h_{a,b}^*(t) dt \quad (15)$$

여기서,

$$h_{a,b}(t) = a^{-1/2} h\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (16)$$

이며, *는 공액복소수이며, $h(t)$ 를 모웨이브렛 함수, $h_{a,b}(t)$ 를 자웨이브렛(daughter wavelet) 함수라고 부른다. 함수 $h_{a,b}(t)$ 의 FFT는 다음 식으로 주어진다.

$$H_{a,b}(f) = \sqrt{a} \cdot H(af) \cdot e^{i2\pi f b} \quad (17)$$

식(15)과 식(17)은 시간영역에서 팽창을 나타내는 t/a 가 주파수 영역에서 주파수 변화인 af 로 표시되는 웨이브렛의 중요한 개념을 보여주고 있다. 따라서 모웨이브렛 함수의 팽창과 압축에 의해 만들어지는 웨이브렛은 filter bank를 이루게 되며, 팽창을 나타내는 모웨이브렛은 신호 $f(t)$ 의 저주파 성분을 처리하며 웨이브렛의 압축부분은 고주파성분을 처리하게 된다.

초음파탐상 시험에서 결함으로부터의 반사 신호의 웨이브렛 변환은 다음과 같은 웨이브렛 역변환(inverse wavelet transform)을 통하여 시간 영역의 신호 함수로 재구성 할 수 있으며 이로부터 결함 부분을 추출할 수 있다.

$$s^R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_s(a, b) h_{a,b}(t) db \frac{da}{a^2} \quad (18)$$

$s^R(t)$ 는 웨이브렛 역변환으로 잡음신호를 제거한 결함 신호이며, 펄스에코 초음파탐상법에서 결함신호의 잡음 제거를 위해 얻어진 신호 $s(t)$ 는 다음 두 요소의 합으로 나타낼 수 있다.

$$s(t) = y(t) + n(t) \quad (19)$$

$s(t)$ 는 노이즈 $n(t)$ 가 포함되어 있는 초음파 결함신호이다. 따라서, 신호 $s(t)$ 는 한정된 대역을 갖고 노이즈에 의해서 변형된 신호이다. 연구의 목적은 $n(t)$ 의 영향을

최소화하고 가능한 한 $y(t)$ 에 가까운 신호 $s^R(t)$ 를 구하는 것이다.

신호처리이론에서 백색가우시언잡음(white Gaussian noise)에 묻혀있는 펄스를 검출하는데 최적한 수신필터는 검출된 펄스와 같은 형태의 임펄스응답을 갖는 Matched filter의 주파수 응답 특성을 갖는다.

$$h_{opt}(f) = K \frac{Y^*(f)e^{-j\omega T}}{N(f)} \quad (20)$$

여기서, K 는 상수, $*$ 는 공액복소수, $Y(f)$ 는 검출된 펄스 $y(t)$ 의 주파수스펙트럼이다. T 는 도착펄스와 출력 피크 사이의 임의의 시간지연이고, $N(f)$ 는 노이즈의 주파수스펙트럼이다. 백색가우시언 또는 랜덤 잡음의 경우 $N(f)$ 는 관심을 갖는 주파수 범위 내에서 일정하고, 식 (20)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{opt}(t) = K \cdot Y^*(f) e^{-f\omega T} \quad (21)$$

시간영역에서 이 결과는 다음과 같다.

$$h_{opt}(t) = K \cdot y(T-t) \quad (22)$$

식 (22)에서 $h_{opt}(t)$ 은 시간, T 만큼의 이동과 반전 이외에는 펄스의 형태는 같다. 웨이브렛은 $H(a,f)$ 의 주파수 응답을 가진 여러 개의 Matched filter를 사용할 수 있다. 입력신호 $s(t)$ 가 하나의 Matched filter로 검출될 때, 이것은 신호의 팽창계수와 시간이동을 나타낸다. 따라서, 웨이브렛은 시간 분해능이나 정확도(accuracy)의 손실없이 SNR을 향상시킬 수 있는 Matched filter bank로 노이즈 감소 도구의 역할을 할 수 있다.

4. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험에 사용된 초음파 비파괴평가 계측시스템의 구성도이다. A-scan 초음파탐상기는 USD 15 (KrautKramer; 35 MHz), 탐촉자는 수직탐촉자(5MHz/0.5"), 종파사각탐촉자(5 MHz/0.25", 78° L-Wave Wedge), 디지털 스토리지 오실로스코프(Lecroy 9374M), 접촉매질은 독일제(ZG-F)를 사용하고 일정한 압력을 가하였다. 실험 방법은 탐촉자에 수신된 초음파 에코파형은 오실로스코프의 CRT상에 RF-signal로 표시하고, 오실로스코프의 디지털 스토리지 장치로부터 데이터를 수집한다. 채취한 초음파신호는 MathWorks(사) MATLAB ver. 5.2 Toolbox

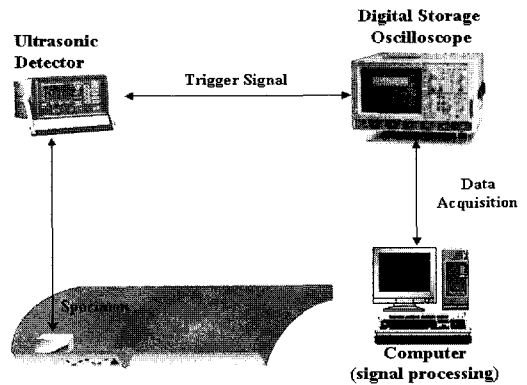


Fig. 1 Schematic diagram of UNDE measuring system

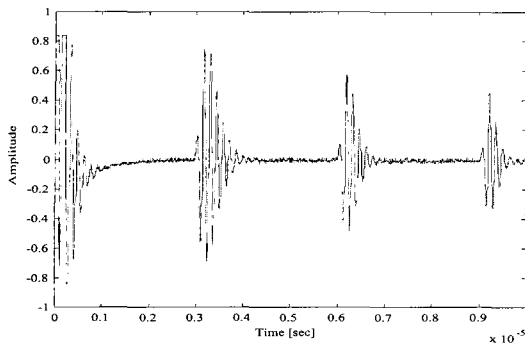
Wavelet을 사용하여 Wavelet해석이 가능한 M-file을 구축하고 사용자 편의를 위한 GUI 환경의 해석 알고리즘을 개발하여 활용하였다.

웨이브렛 변환에 의한 초음파 속도와 감쇠의 주파수의존성의 고정밀도 계측의 유용성을 실험적으로 검증하기 위해 2.25Cr-1Mo 강(건전재, 630°C에서 1000시간 열화재)을 사용하였다. 초음파 에코 파형의 노이즈 제거 시뮬레이션에는 직경 50mm, 두께 35mm의 SN20C 원통형 강블럭에 횡구멍(side-drill hole;SDH)의 인공결함을 가공한 블록을 사용하였다[18]. 그리고, 실제 초음파탐상 시험에서 결함신호의 잡음제거 실험을 위해 원자력발전소 플랜트에 사용되고 있는 오스테나이트계 스테인레스강 용접부에 EDM 노치(notch)를 가공하고 Near-Side Access로 탐상하였을 때 최대결함을 코를 채취하였다.

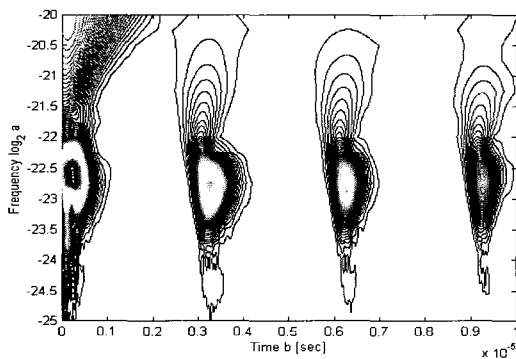
5. 결과 및 고찰

5.1. 음속 및 감쇠계수의 주파수의존성 평가

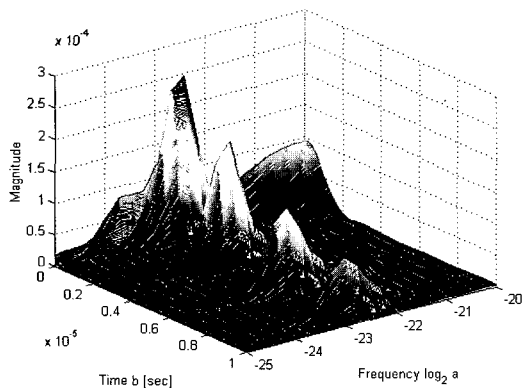
웨이브렛 변환으로부터 초음파펄스의 발생시각을 주파수마다 구하면 초음파의 전파속도의 주파수의존성을 알 수 있다. Fig. 2(a)는 중심주파수 5MHz의 종파 고분해능 초음파탐촉자를 이용하여 2.25Cr-1Mo 강(건전재, 1000시간 열화재)의 두께(9mm)방향으로 전파시켰을 때 건전재의 에코파형을 나타내고 있으며, Fig. 2(b)는 웨이브렛 변환에 의한 시간축과 주파수축에 대한 contour plot, 그리고 Fig. 2(c)는 웨이브렛 변환 결과를 나타내고 있다. Fig. 2(c)의 주파수축방향은 스케일 변수 a 의 값을 \log_2



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 (a) Ultrasonic echo waveform, (b) contour plot and (c) wavelet transform

의 값으로 나타나고 있으며, 주파수(Hz)값(1/a)에 대응한다. Fig. 2(c)에는 각각의 에코에 상응하는 봉우리로 나타

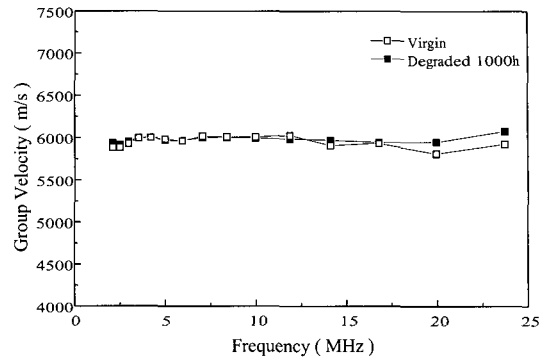


Fig. 3 Group velocity identified by the wavelet analysis

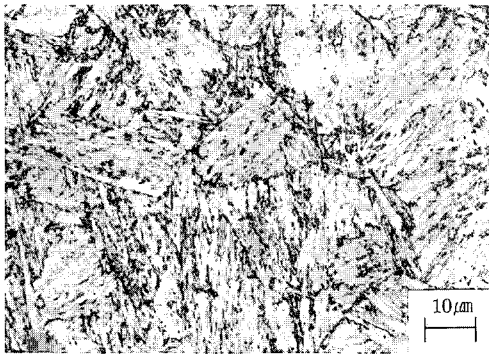
나고, 각각의 주파수에 대한 봉우리의 피크시각이 에코펄스의 발생시각이 된다. 이와 같이 하여 검출된 제 1저면 에코와 제 2저면에코의 발생시각의 차에 근거하여 초음파 전파속도를 계산할 수 있다. 그림에서 x축은 초음파의 전파시간, y축은 $\log_2 a$ 주파수, 종축은 웨이블릿 변환의 절대값을 각각 표시하고 있고 입사펄스 및 제 1저면에코로부터 제 3저면에코까지 각각 대응하는 피크가 명료하게 나타나고 있다.

각각 $\log_2 a$ 값에서 피크의 발생시각과 그 시각에서 크기는 각 주파수에서 에코의 도달시각과 진폭에 상당하기 때문에 이들로부터 각 주파수에서 속도와 감쇠계수의 고정밀도 측정이 가능하다.

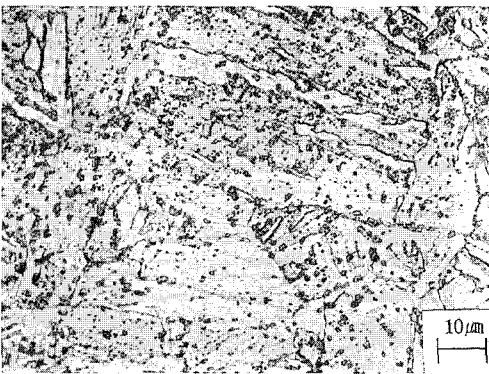
Fig. 3은 웨이블릿 변환에 의한 제 1저면에코와 제 2저면에코에 대응하는 피크의 발생시각으로부터 군속도의 주파수의존성 측정 결과를 나타내고 있다. 본 실험에 사용한 2.25Cr-1Mo강 건전재와 열화재의 경우 초음파의 군속도(group velocity)의 변화와 주파수의존성이 거의 나타나지 않고 있는데, 이 점에 대해서는 열화 조건을 달리한 시험재를 확보하여 추후 계속적인 검토가 필요하다.

Fig. 4는 이상의 초음파시험의 결과와 열화에 의한 관계를 조사하기 위해 열화시간에 따른 미세조직의 변화 모습을 광학현미경($\times 1000$ 배)을 통해 관찰한 것이다. 열화가 진행됨에 따라 결정립계 부근에서 석출물의 양이 증가하며, 탄화물이 구상화되었다. 또한 열화가 진행됨에 따라 탄화물의 석출 및 구상화로 인하여 인장강도 및 파괴 인성치와 같은 기계적 성질에 영향을 줄 것으로 사료된다.

Fig. 5는 감쇠계수(attenuation coefficient)의 주파수의존성 측정결과를 나타내고 있다. 초음파의 감쇠계수는 속



(a) Virgin



(b) Degraded(1,000hr)

Fig. 4 Optical micrograph of 2.25Cr-1Mo specimens

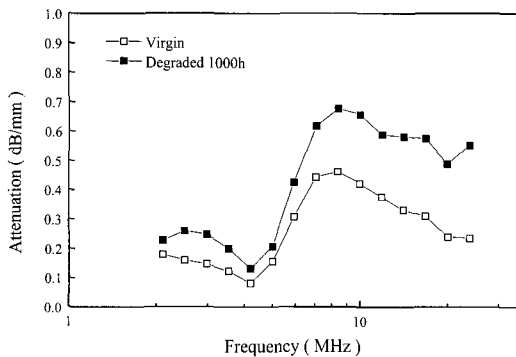


Fig. 5 Attenuation coefficient identified by the wavelet analysis

도와 함께 각종 재료의 특성 등을 비파괴적으로 평가하기 위한 유효한 파라미터이다.

일반적으로 감쇠계수는 주파수에 의존하지만 초음파

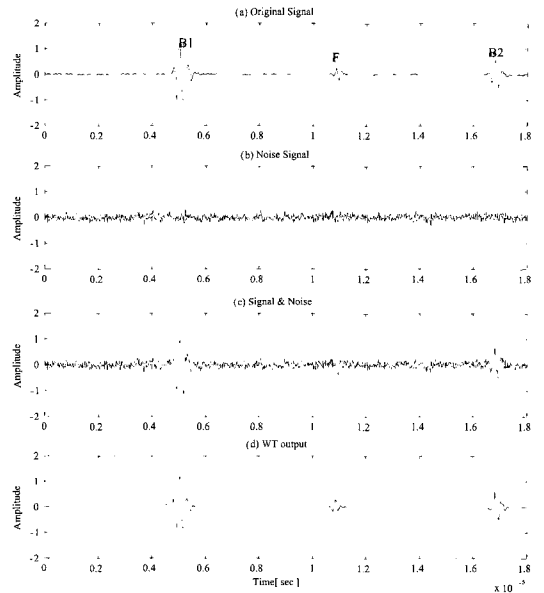


Fig. 6 UT original signal and de-noised signal (SN20C block)

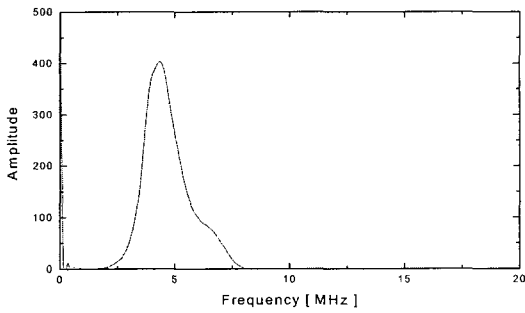
스는 어떤 유한한 주파수대역폭을 갖기 때문에 에코펄스의 발생시각과 진폭으로부터 산정한 감쇠계수는 이 주파수대역에 대한 평균적인 값이 된다. 감쇠계수를 보다 정확하게 평가하고 감쇠계수의 주파수의존성을 평가하기 위해서는 웨이브렛 변환에 의한 시간-주파수해석을 적용하여 감쇠계수를 주파수마다 계산하는 것이 필요하다. Fig. 2(c)에서 각각의 에코에 해당하는 피크 시각을 에코펄스의 발생시각으로 하고, 피크 높이는 에코의 크기로 한다. 이 피크의 높이는 각각의 에코에 대해 주파수마다 산정하는 것이 가능하다. Fig. 5에서 건전재와 열화재의 2.25Cr-1Mo 강이 모두 주파수가 증가함에 따라 감쇠계수 값이 커짐을 알 수 있다. 열화재가 건전재 보다 감쇠계수의 주파수의존성이 큰 것을 알 수 있다.

5.2. 웨이브렛 변환에 의한 S/N비 개선

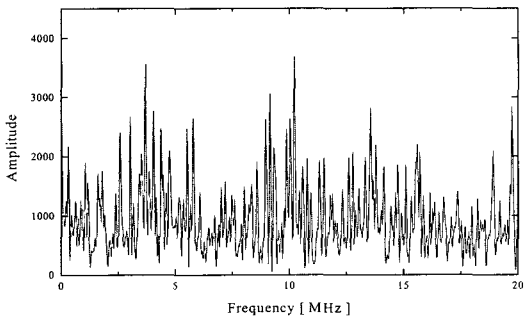
웨이브렛 변환에 의한 초음파 에코파형의 노이즈 제거법의 유효성을 검증하기 위한 컴퓨터 시뮬레이션에는 다음의 3단계로 신호처리를 하였다. 1) 탐상신호를 웨이브렛 변환하고 시간정보를 남긴 채로 시간-주파수성분으로 분해한다. 2) 탐촉자의 주파수대역을 기초로 특정의 주파수 성분만을 추출 대역필터처리를 한다. 그리고 3) 재구성 (decomposition)하여 파형을 복원하는 단계이다. 이산

(discrete) 웨이블릿 변환은 본래 신호를 저주파수 성분과 고주파수성분으로 분해하고 그리고 그 저주파수성분을 다시 저주파수성분과 고주파수 성분으로 분해한다

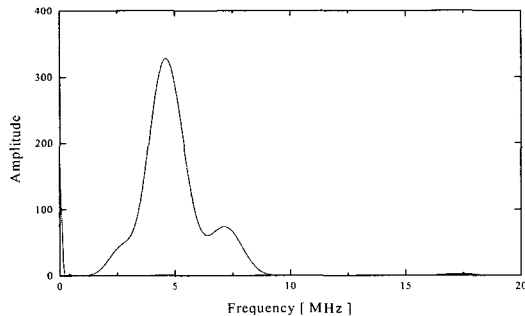
Fig. 6(a)는 SN20C 블럭의 SDH 인공결합신호($y(t)$)를 나타내고 있다. Fig. 6(b)는 백색가우시안잡음 $n(t)$ 신호이며, Fig. 6(c)는 $y(t)$ 에 $n(t)$ 를 더한 신호 $s(t)$ 이다. 노



(a) Original signal $y(t)$



(b) Signal & noise



(c) Wavelet transform output

Fig. 7 Power spectrum density of (a) the original signal $y(t)$, (b) $s(t)$ added to noise $n(t)$, (c) WT output

터링해서 재구성한 결과가 Fig. 6(d)이다. 시뮬레이션 결과, 노이즈로 인해서 변형된 $s(t)$ 에서는 제 2제면에코 B_2 및 결합에코의 식별이 어렵지만 웨이블릿 변환 후에는 B_1 , B_2 및 결합에코를 명확하게 식별할 수 있다.

Fig. 7은 초음파 에코 파형의 주파수 분석 결과이다. Fig. 7(a)는 원신호 $y(t)$ 에서는 저주파 영역(중심주파수 5 MHz)에서 제한적으로 주파수가 분포하는 반면, Fig. 7(b)에서는 노이즈를 포함한 $s(t)$ 의 주파수는 넓은 영역에 걸쳐서 분포하고, 노이즈로 인해서 원신호의 주파수 특성을 알기 어렵다. 반면, Fig. 7(c)의 웨이블릿 출력의 주파수 분포는 $s(t)$ 가 웨이블릿 변환에 의해서 거의 원신호 $y(t)$ 에 가깝게 재구성되었음을 알 수 있다.

Fig. 8에서 Fig. 10까지는 웨이블릿 변환에 의한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과를 근거로 초음파 에코 파형의 노이즈 제거법의 유효성을 검증하기 위해서 오스테나이트계 스테인레스강 용접부의 초음파탐상 시험에서 결함의 검출능 향상과 결함크기 산정의 정확화에 접근하기 위해 초음파 결합신호의 S/N비 개선의 실험적 검증 결과이다. Fig. 8은 용접부의 루트(root)부가 인접해 있는 부위에 가공한 EDM 노치로부터 Near-Side Access로 검출한 탐상파형을 5레벨까지 분해한 결과이다. 웨이블릿 변환하여 고주파수성분과 저주파수성분으로 분해한 결과가 a1에서 a5와 나란히 d1에서 d5라 표기한 파형이고 횡축과 종축은 각각 시간(샘플링 데이터 수)과 진폭을 나타

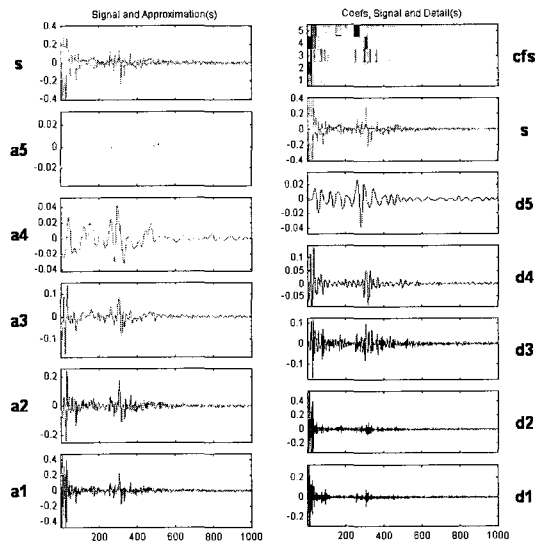


Fig. 8 Discrete wavelet analysis(5 level wavelet decomposition)

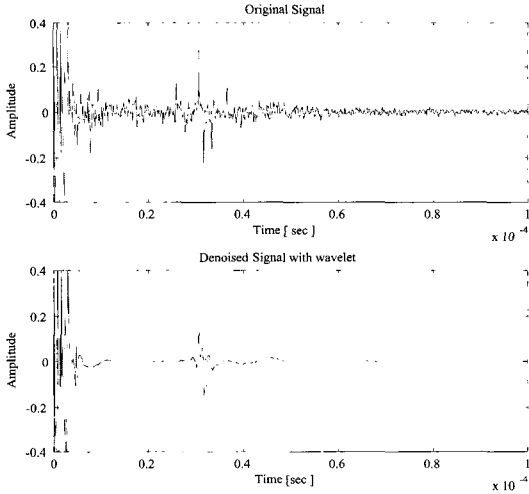


Fig. 9 Results of UT original signal and de-noised signal

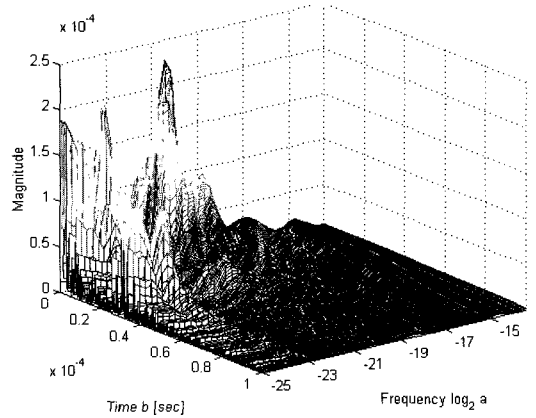
내고 있다. 여기서, a_1 과 d_1 는 각각 원신호 S 를 저주파성분과 고주파성분으로 분해한 파형이다. 이 저주파성분(a_1)을 다시 분해한 것이 a_2 와 d_2 이다. 이와 같이 5단계 까지 분해를 계산한 결과를 나타내고 있다. 또, 그림 중에 cfs 라 기록한 화상은 종축에 d_1 에서 d_5 의 파형을 횡축에 시간을 잡고 강도의 절대치를 gray scale로 표시한 것이고, 시간-주파수해석 결과를 화상으로 표시한 것이다.

Fig. 9로부터 웨이브렛 변환에 의한 S/N비 신호처리 시뮬레이션 결과를 오스테나이트강 스테인레스 용접부에 가공한 EDM 노치 초음파 결합신호에 적용한 결과로 임상에코(grass echo)를 저감하고 S/N비를 개선하는 것이 가능함을 알 수 있다. Fig. 10은 Fig.9의 신호의 웨이브렛 변환 결과를 3차원으로 표현한 것으로, 고주파수 영역의 노이즈들이 제거된 것을 확인할 수 있다.

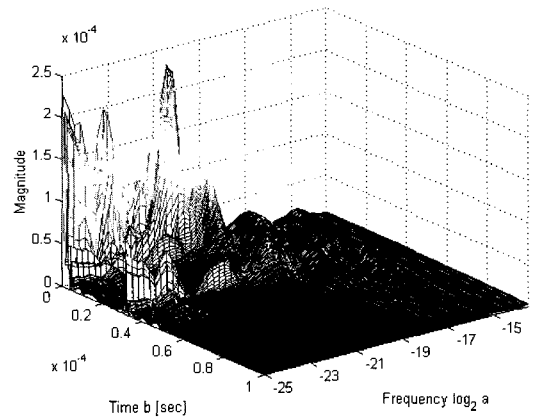
6. 결론

초음파 에코파형의 시간-주파수해석법으로 Wigner 분포와 웨이브렛 변환 등과 같은 새로운 신호처리 기법이 비파괴평가 분야에 널리 응용되고 있다. 본 연구에서는 웨이브렛 변환에 의한 음속과 감쇠계수의 주파수의존성과 초음파 결합신호의 잡음제거의 유용성 유무를 실험적으로 검증한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 웨이브렛 변환에 의한 시간-주파수해석을 이용하면 재료내부를 전파하는 초음파의 전파거동을 각주파수 성분마다 조사하는 것이 가능하고 초음파의 군속도와 감쇠계수의 분산관계를 광범위한 주파수에 대해 정확한 동시



(a) Original signal



(b) De-noised signal

Fig. 10 Results of 3-D Wavelet transform of ultrasonic flaw signal (EDM notch)

에 용이하게 추정할 수 있었다.

2) 2.25Cr-1Mo강 건전재와 열화재의 경우 초음파 군속도는 주파수의존성이 나타나지 않았으나 감쇠계수는 주파수가 증가함에 따라 감쇠계수값이 커지는 주파수의존성이 있음을 추정할 수 있었다.

3) 초음파 탐상에서 결합의 검출능 향상과 결합크기 산정의 정량화에 접근하기 위해 황구멍(SDH)을 가공한 SN20C 강블럭의 인공결합신호 해석에 웨이브렛 변환에 의한 시간-주파수해석 방법이 유용함을 수치적 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

4) 웨이브렛 변환에 의한 S/N비 신호처리 시뮬레이션 결과를 오스테나이트강 스테인레스 용접부에 가공한

EDM 노치 초음파 결함신호에 적용한 결과 임상예코를 저감하고 S/N비를 개선하는 것이 가능하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구비(과제번호 1999-2-301-009-3) 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] P. Flandrin, "Nondestructive evaluation in the time-frequency domain by means of the Wigner-Ville Distribution", *Signal Processing and Pattern Recognition in Nondestructive Evaluation of Materials*, edited by C. H. Chen, Springer-Verlag, (1988)
- [2] C. H. Chen and J. C. Guey, "On the use of Wigner distribution in ultrasonic NDE", in *Review of Quantitative NDE*, Vol. 11A, Plenum Press, (1992)
- [3] 武捨貴昭, 川浦淳一, "ウィグナー分布とその超音波非破壊 評価への応用", *非破壊検査*, Vol. 40, No. 9, pp. 587-591, (1991)
- [4] 井上 裕嗣, 中西智明, 岸本喜久雄, 涉谷壽一, "ウェーブレット変換による分散性応力波の時間-周波数解析(群速度の同定と超音波材料評価への応用)", *日本機械學會論文集, A編*, Vol. 61, No. 581, pp. 153-160, (1995)
- [5] H. Inoue, "Experimental wavelet analysis of flexural waves in beams", *Experimental Mechanics* Vol. 36, No. 3, pp. 212-217, (1996)
- [6] J. Morlet, G. Arens, E. Fargeau and D. Giard, "Wave Propagation and sampling theory-Part II", *Sampling theory and complex waves*, *Geophysics*, Vol. 47, No. 2, pp. 222-236, (1982)
- [7] S. E. Moubarik, D. De Vadder and P. Benoist, "Wavelets and nondestructive evaluation", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 12, pp. 727-734, (1993)
- [8] J. Chao, L. Udpa and S. S. Udpa, "Ultrasonic signal analysis using wavelet transform", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 12, pp. 735-742, (1993)
- [9] T. J. Wahl, J. S. Bolton, "The Application of the Wigner Distribution to the Identification of Structure-borne Noise Components" *J. Sound Vib.*, 163-1, pp. 101-122, (1993)
- [10] I. Daubechies, "Orthonormal basis of compactly supported wavelets", *Comp. Pure Appl. Math.*, Vol. 46, pp. 909-996, (1988)
- [11] I. Daubechies, "The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis", *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 36, pp. 961-1005, (1990)
- [12] M. Misiti, "Wavelet Toolbox User's Guide, For use with MATLAB", The MATH WORKS, (1997)
- [13] 이 정순, 박 익근, 이해무, "초음파 에코파형의 Wavelet 해석과 비파괴평가에의 응용", *한국비파괴 검사학회 '98춘계학술대회논문집*, pp. 39-47, (1998)
- [14] 井上 裕嗣, "ウェーブレットの基礎と超音波波形解析への応用", *非破壊検査*, 45(1), pp. 40-51, (1996)
- [15] 井上 裕嗣, "エコー波形のウェーブレット解析による超音波の速度と減衰", *非破壊検査*, Vol. 46, No. 3, pp. 206-213, (1997)
- [16] A. Abbate, "Signal detection and noise suppression using a wavelet transform signal processor : application to ultrasonic flaw detection", *IEEE transaction on ultrasonics, Ferroelectrics, and frequency control*, Vol. 44, No. 1, pp. 1-25, (1997)
- [17] M. W. Malik and J. Saniie, "Generalized Time-Frequency Representation of Ultrasonic Signals", *Proc. IEEE Ultrasonic. Symp.*, Publ. No. 1051-0117/93, pp. 691-695, (1993)
- [18] 박익근, 안형근, "Wavelet 변환을 이용한 초음파 결함신호의 잡음제거에 관한 연구", *한국비파괴검사학회 '99춘계학술발표회논문집* pp. 121-130, (1999)