

웨이브렛 변환과 SH-EMAT을 이용한 배관 용접부 결함 검출

이진혁* · 김대현**†

* 서울과학기술대학교 에너지환경대학원, ** 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

Flaw Detection in Pipe-Welded Zone by Using Wavelet Transform and SH-EMAT

Jin-Hyuk Lee* and Dae-Hyun Kim**†

* Graduate School of Energy and Environment, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology,

** Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

(Received May 17, 2012 ; Revised September 3, 2012 ; Accepted September 5, 2012)

Key Words: Electromagnetic Acoustic Transducer; EMAT(전자기초음파탐촉자), Shear Horizontal wave; SH-wave(수평횡파), Wavelet Transform(웨이브렛 변환), Noncontact Ultrasonic Testing (비접촉 초음파검사)

초록: 배관설비는 용접이음으로 많은 부분이 구성되어 있으며, 이러한 배관 용접부의 건전성 평가를 위한 초음파 검사 시스템의 자동화 요구가 증대하고 있다. 전자기초음파탐촉자(Electromagnetic Acoustic Transducer; EMAT)는 비접촉 방식으로 초음파를 송·수신할 수 있고 다양한 초음파 모드의 발생이 가능하여 초음파 자동화 시스템 구축에 매우 유용하다. 본 연구에서는 수평횡파(Shear Horizontal wave; SH-wave) EMAT를 적용하여 배관의 용접부에 존재하는 결함의 검출을 수행하였다. 이때 수평횡파의 특정 모드(SH₀)의 신호해석을 위해 웨이브렛 변환(Wavelet Transform)을 이용한 신호의 시간-주파수 분석을 수행하였다. 웨이브렛 변환으로 해석된 SH₀ 모드 주파수의 반사 신호강도가 결함의 길이와 선형적 관계를 나타내어 효과적으로 용접부 결함 검출이 가능하였다.

Abstract: Pipe structures contain many welded zones, and ultrasonic tests are increasingly being performed by using automated testing devices in order to evaluate the weld integrity. An electromagnetic acoustic transducer (EMAT) is a noncontact transducer that can transmit or receive ultrasonic waves without a couplant. Furthermore, it can easily generate specific guided waves such as SH (shear horizontal) or Lamb waves by altering the design of the coil and magnet. Therefore, an EMAT should be useful for application to an automated ultrasonic inspection system. In this study, SH waves generated using an EMAT were applied to inspect the pipe-weld zone. To analyze the specific SH mode (SH₀) from the SH wave signals, wavelet transform was applied. It was found that flaws could be detected precisely because the intensity of the SH₀ mode-frequency, which is analyzed by using wavelet transform, is proportional to the length of the flaw.

- 기호설명 -

F : 로렌츠 힘
 J_e : 와전류
 B_0 : 정자기장
 H : 자장

E : 전기장
 $\Psi_{a,b}(t)$: 모 웨이브렛
 $F(a,b)$: 연속 웨이브렛
 a : 웨이브렛 스케일 파라미터
 b : 웨이브렛 위치 파라미터
 $f(t)$: 신호함수
 ω : 중심 주파수
 c_g : 군속도

† Corresponding Author, dkim@seoultech.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

발전설비나 대형 플랜트는 매우 많은 배관이 구성되어 있으며, 다수의 배관들은 용접이음으로 구조물을 구성하고 있다. 이러한 용접 구조물의 건전성 평가 및 신뢰도 확보를 위하여 비파괴 검사는 지속적으로 수요가 증가하고 있으며, 특히 초음파 비파괴 검사는 용접부 내부 결함의 정량적 검출에 가장 유용하다. 그러나 기존의 초음파 검사는 대부분 작업자의 수작업에 의존하고 있어 고온, 위험지역 등의 접근한계지역 구조물의 검사에 제약이 있으며, 특히 설비의 가동 중 검사에 한계가 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 로봇 등을 이용한 초음파 자동 검사 시스템이 요구되고 있으며 이를 위해서는 비접촉식 초음파 검사 기법 및 시스템의 개발이 필요하다.⁽¹⁻³⁾

전자기초음파탐촉자(Electromagnetic Acoustic Transducer; EMAT)는 비접촉식으로 자석과 코일의 형상과 배열을 조절하여 다양한 모드의 초음파를 발생시킬 수 있다. EMAT로 발생시킬 수 있는 수평형파(Shear Horizontal wave; SH-wave)는 박판에서 판파의 형태로 전파하여 배관과 같은 박판 재료의 평가에 유리하고 특히 탐촉자 전후이동 없이 두께 전 범위의 검사가 가능하여 자동화 검사 시스템 적용이 용이하다. 그러나 EMAT로 발생된 SH파는 여러 모드의 신호가 발생되고 모드가 중첩될 수 있어 단순히 전파시간(Time of Flight; TOF)을 이용하여 결함의 검출이나 위치확인이 단순하지 않다. 또한 SH파가 전파되는 판재의 두께 변화에 따라 모드, 주파수, 전파시간 등이 변화한다. 이러한 특성으로 SH-EMAT는 시험체의 두께 변화에 따른 모드의 속도변화를 이용하여 부식 등으로 발생하는 구조물의 두께감소 평가 연구에 제한적으로 적용되어 왔다.⁽⁴⁻⁸⁾ 그러나 용접 구조물의 파손은 주로 용접부에서 발생하며 따라서 대부분의 비파괴 검사는 용접부를 중심으로 이루어지고 있다.⁽¹⁾ 즉, 초음파 자동검사 시스템을 구축하고 용접 구조물의 건전성을 평가하기 위해서는 EMAT를 이용한 용접부 검사에 대한 연구가 요구된다.

본 연구에서는 EMAT로 발생시킨 SH파를 적용하여 배관 용접부의 초음파 검사를 하고자 하였다. SH파의 모드 분산과 음속 차에 의한 신호의 중첩을 해결하고 그룹 형태로 수신되는 모드 신

호의 분석을 위하여 웨이브렛 변환 신호처리 방법을 적용하였다. 이를 통해 용접부 반사 신호의 특정 모드 주파수 신호를 분석하여 결함의 위치와 크기를 보다 명확하게 확인할 수 있었다.

2. EMAT의 SH-wave 송·수신

EMAT를 도체에 접근시켜 코일에 교류전류를 흘려주면 재료 표면에는 와전류 J_e 가 유도되며, 여기에 정자기장 B_0 를 가하면 재료 표면의 입자들은 식 (1)과 같이 Lorentz 힘 F 를 받는다.

$$F = J_e \times B_0 \quad (1)$$

여기서, J_e 는 도체 내에 발생하는 와전류이고 변위전류를 무시한 맥스웰의 식($J_e = \text{rot}H$)으로부터 얻을 수 있다.

로렌츠 힘을 이용하여 SH파를 발생하는 경우 진행 방향에 대해 수직인 면내의 힘을 일정 간격(반파장 주기)마다 힘의 방향을 180° 반전하여 피검체에 전달해야 한다. 따라서 Fig. 1과 같이 자석의 극성을 반전시킨 배열형 자석이 필요하다. 또한 코일을 구조물 표면에 근접시켜 교류전류를 흘려주면 전류의 방향에 따라 로렌츠 힘의 방향이 전환된다. 이 로렌츠 힘은 초음파 발생의 구동력이 되어 SH파를 송신한다. 이때 각 자석의 간격은 SH파의 반파장이 된다.

EMAT의 자석에 의해서 자화된 영역에 초음파가 들어오게 되면 도체내의 자장은 초음파의 위상 u 에 의해 설명되고, 이것을 통해 다음식의 부가적인 전자장 E , B 가 도체 내에 여기 된다.

$$E = \sigma^{-1} J + \frac{\partial u}{\partial t} \times B_0 \quad (2)$$

$$B = \mu_0 \mu \cdot (H - M_0 \nabla \cdot u) + e \cdot \epsilon \quad (3)$$

이때, 맥스웰의 방정식 $\text{rot}E = \partial B / \partial t$, $\text{rot}H = J_e$ 를 사용하면 도체내의 자장 H 와 전기장 E 를 얻을 수 있다. 이것은 아래쪽에서 진동하는 도체표면에 대한 경계조건을 만족하고, EMAT의 코일이 위치하는 공기 중의 전기장 E^{air} 와 자장 H^{air} 로 변환된다.

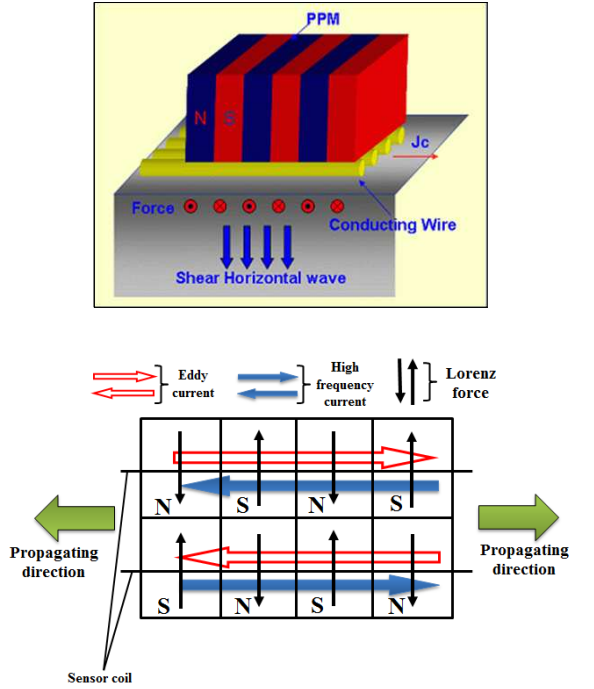


Fig. 1 Structure of the Lorenz type EMAT for generating SH wave

$$n_0 \times (E^{air} - E) = V_n (B_0^{air} - B_0) \quad (4)$$

$$n_0 \times (H^{air} - H) + n' \times (H_0^{air} - H) = 0 \quad (5)$$

여기서, n_0 와 n' 은 각각 초기상태와 초음파에 의한 진동의 도체표면에 대한 법선방향이 되고, V_n 은 표면에 대해 수직방향의 입자속도가 된다. 즉, 초음파의 진동은 E^{air} 와 H^{air} 로 최종적으로 EMAT의 코일에 수신된다.⁽⁴⁻⁸⁾

3. 웨이브렛 변환

SH-EMAT의 신호는 시험체의 두께와 주파수에 따라 군속도가 다른 다양한 모드가 전파된다. 이에 따라 SH-EMAT를 이용한 용접부 결함평가는 신호의 시간에 따른 주파수 분석을 통해 원하는 특정 모드의 신호해석이 필요하다. 웨이브렛 변환은 주파수의 변화에 따라 변환시간 영역의 크기가 변화하는 특징이 있다. 즉, SH-EMAT의 신호는 웨이브렛 변환을 적용하여 시간에 따른 주파수 분석이 가능하여 특정 주파수를 가지는 모드의 신호 추출 및 분석이 가능해진다.⁽⁸⁾

연속 웨이브렛 변환(Continuous Wavelet Transform; CWT)은 다음 식 (6)과 같이 신호 $f(t)$ 가 웨이브렛 함수 $\Psi_{a,b}$ 에 의하여 분석되는 변환 함수 $F(a,b)$ 로 정의 된다. 이때 Ψ^* 는 Ψ 의 공액복소 함수이다. $\Psi_{a,b}$ 는 모 웨이브렛(mother wavelet)으로 스케일파라미터 a 와 위치파라미터 b 에 따라 신호를 시간-주파수의 함수로 변환한다. 모 웨이브렛은 식 (7)과 같이 정의된다.⁽⁸⁻¹¹⁾

$$F(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi_{a,b}^*(t) dt \quad (6)$$

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a > 0 \quad (7)$$

복소함수 형태의 신호 처리에는 모 웨이브렛으로 가우시안 함수(Gaussian Function)인 Morlet 웨이브렛이 가장 많이 적용된다.⁽⁹⁾ Morlet 웨이브렛은 식 (8)과 같이 정의 되며 이때 이 함수는 발산하지 않고 일정영역의 값을 가져야 하므로 식 (9)의 허용조건을 만족해야 한다. Morlet 웨이브렛은 $\omega_0 \geq 2\pi\beta$ 일 때 식 (10)과 같이 변환 되어 식 (9)의 조건을 만족한다.⁽⁹⁾

$$\Psi(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-\beta^2 t^2 / 2} \quad (8)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (9)$$

$$\Psi(\omega) = \frac{1}{\beta} e^{-(\omega - \omega_0)^2 / (2\beta^2)} > 0 \quad (10)$$

수평회파와 같이 분산특성의 파형 해석에서 웨이브렛 변환을 사용하기 위해서는 분산성과 웨이브렛 상수와의 관계를 고려해야 한다. SH-wave는 중심주파수 ω , 판파의 속도 성분인 군속도 c_g , 이동 거리 x 일 때, 웨이브렛 최고 강도를 나타내는 파라미터는 각각 식 (11)과 같이 계산된다. 이때, 시간과 진폭 두 가지 성분을 가지는 이항신호의 웨이브렛(Dyadic Wavelets)은 다음 식 (12)와 같이 스케일파라미터 a 와 주파수 ω 를 적용하여 분석할 수 있다.⁽⁹⁻¹²⁾

$$a = \frac{\omega_0}{\omega}, \quad b = \frac{x}{c_g} \tag{11}$$

$$a_m = 2^m, \quad \omega = \frac{\omega_0}{a} = 2^{-m} \omega_0 \tag{12}$$

즉, 신호 $f(t)$ 가 현재의 스케일파라미터 a 에 해당하는 주파수 성분을 가지고 있다면, 신호의 해당 주파수 성분이 존재하는 위치영역 b 에서 웨이브렛 변환의 결과 진폭이 큰 값을 나타내게 되어 주파수 성분 분석이 가능해진다.^(9,10)

4. 배관 용접부 평가

SH-EMAT을 이용한 배관 용접부 결함 평가를 위하여 다음과 같이 시험편을 제작하고, EMAT 초음파 검사 시스템을 적용하였다.

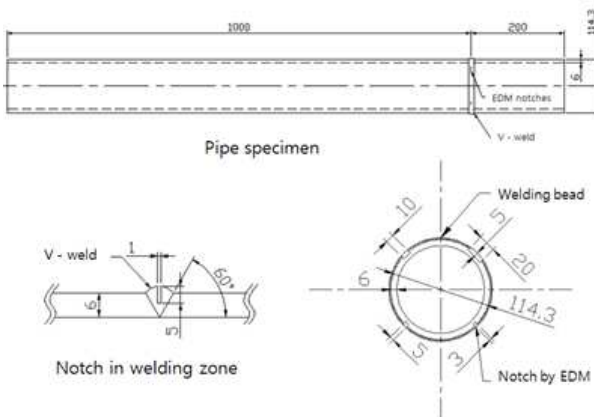


Fig. 2 Drawing of a pipe specimen and notches in welded zone



Fig. 3 Pictures of a pipe specimen and 20mm notch in welded zone

4.1 배관 용접 시험편

배관 용접이음의 건전성 평가를 위하여 배관을 용접한 후 용접부 내의 모의 결함을 가공하여 결함 시험편을 제작하였다. 시험편은 발전설비에 많이 사용되는 KS D 3570 4" 두께 6mm의 고온용 배관을 사용하여 제작하였다. 용접부의 신호와 배관 끝단부의 신호가 겹치지 않도록 배관의 길이를 200, 1000mm로 하여 용접하였다. 모의 결함은 방전가공을 이용하여 노치형태로 길이를 각각 3, 5, 10, 20mm, 용접표면으로부터 깊이 5mm로 가공하였다. Fig. 2는 배관 용접 시험편의 도면이며, Fig. 3은 제작된 배관 시험편의 사진이다.

4.2 배관 용접부 검사 시스템

배관 용접부 검사를 위하여 기존의 초음파 검사 방법으로 사용되는 2탐촉자 펄스-반사법(pulse-echo)을 적용하였다. 즉, 송신 EMAT에서 발생된 초음파가 용접부에서 반사된 후 수신 EMAT에서 초음파 신호를 수집하고 이를 해석하여 결함을 검출하고자 하였다.⁽⁵⁾ 이때 60mm×40mm×30mm(길이×폭×높이)의 직육면체형태의 EMAT를 적용하였다. 과장을 고려하여 12.5mm×2.6mm×12.5mm(길이×폭×높이)의 자석을 10×2개의 배열로 사용하였다. EMAT를 이용한 초음파 검사를 위한 시스템은 초음파 발생 및 수신을 위한 펄서/리시버(Ritec, PRP-4000), 임피던스 매칭 시스템, 신호의 증폭을 위한 프리앰프(WIS, EMAT pre-Amplifier) 그리고 오실로스코프(Lecroy, wavesurfer 434)로 구성된다.^(4,5) Fig. 4, Fig. 5는 초음파 검사 시스템의 구성도와 사진이다.

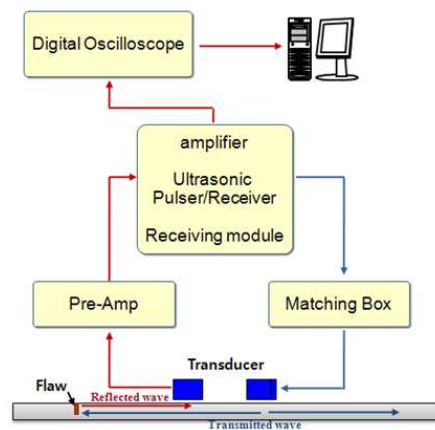


Fig. 4 Schematic Diagram of the EMAT Experimental systems

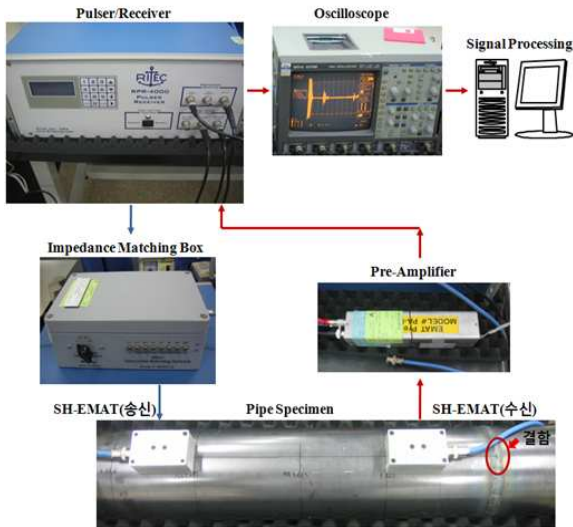


Fig. 5 Picture of the SH-EMAT experimental systems

4.3 배관 용접부 검사

SH파는 다양한 모드와 각 모드별 분산특성을 가지며, 이 분산특성은 주파수와 시험체의 두께에 따라 다양한 음속을 가지게 한다. 특히, 용접부의 비드는 시험체의 두께 변화를 야기하여 모드의 속도변화가 발생할 수 있어 정확한 결함의 검출과 위치해석이 어렵게 된다. 그러나 두께에 따른 속도변화가 없는 SH₀모드를 이용하면 기존의 초음파검사와 같이 결함의 검출 및 위치해석이 가능하다. 이를 위해서 분산선도에서 파장과 위상속도의 관계로부터 SH₀모드가 발생되도록 가진 주파수를 선정하여 실험 하였다.^(4,5)

일반적으로 초음파가 검출할 수 있는 결함의 크기는 파장에 비례하며 실험으로 검출 가능한 결함의 크기는 SH파 파장의 1/2 정도로 알려져 있다. 본 연구에서는 3mm 길이의 결함 검출을 위하여 파장 6mm이하의 SH-EMAT을 고려하여 파장 5.2mm의 SH-EMAT을 적용하였다. SH₀모드를 발생하기 위하여 Fig. 6의 분산선도에서 파장 5.2mm와 위상속도가 만나는 점의 주파수를 확인하여 597kHz로 펄서를 가진 하였다. 이때, 실제 판에서 전파되는 SH₀모드의 군속도를 확인하여 펄서에서 발생하는 최초 신호와 수신 신호의 분리, 신호에서 모드의 구분 및 반사 신호의 감도를 고려하여 송신 탐촉자와 용접부 거리 390mm, 수신 탐촉자와 용접부 거리 100mm, 탐촉자 중심 거리 290mm로 하여 검사를 수행하였다.

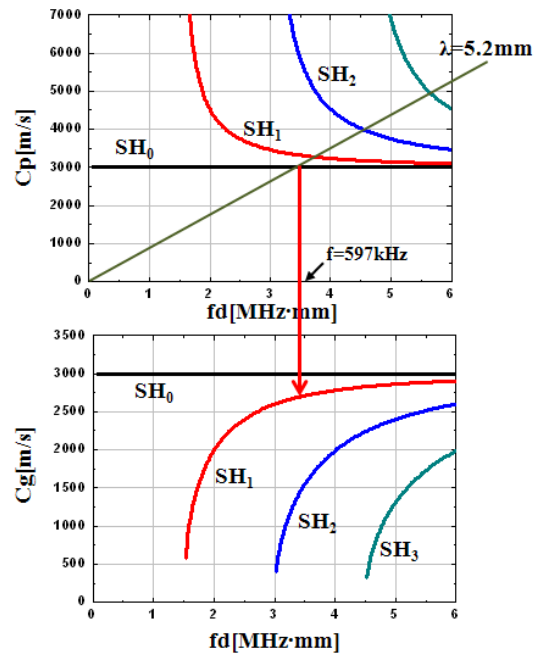


Fig. 6 Modes and fd from wave-length on velocity dispersion curves of SH-wave for a steel

5. 배관 용접부 결함 평가 결과

SH-EMAT를 적용한 배관 검사 후 취득된 신호를 해석하여 용접부의 결함을 검출하고 결함의 크기를 평가하고자 하였다. 용접부 검사 신호를 해석을 통한 결함 평가와 웨이브렛 변환을 이용한 신호처리 및 해석결과는 다음과 같다.

5.1 배관 용접부 검사 신호

Fig. 7은 노치 길이 0, 3, 5, 10, 20mm의 결함 시험편에서 파장이 5.2mm인 SH파의 송·수신된 초음파 신호를 나타낸다. SH파가 송신 탐촉자에서 수신 탐촉자로 직접 전파된 신호와 송신된 초음파가 용접부에서 반사되어 수신 탐촉자로 전파된 신호가 수집됨을 확인할 수 있다.

SH₀모드의 신호가 용접부에서 반사되어 수신될 수 있는 시간영역의 진폭 신호를 확인한 결과 결함 길이 10mm 이상의 결함 신호는 높은 진폭이 수신되어 쉽게 결함의 유무를 확인할 수 있다. 그러나 길이 3, 5mm의 결함은 기본적인 잡음 신호와 진폭의 차가 크지 않아 결함 신호로 확인하기 어려우며 특히, 결함이 없는 용접부에서도 미약하지만 반사 신호가 발생한다. 이러한 특성은

SH파가 판 두께 전체영역의 영향을 받는 판파 모드로 전파하여 용접부의 불규칙한 비드면에서 초음파의 반사 신호가 발생하고 이에 따라 단순한 반사 신호의 진폭을 이용한 결함 판정이 불확실하다는 점을 보여준다. 반사 신호의 진폭만을 이용한 결함판정은 다소 불확실하지만, 용접부 검사 신호 해석을 위해 반사 신호의 진폭과 결함 길이와의 상관관계를 확인해보았다.

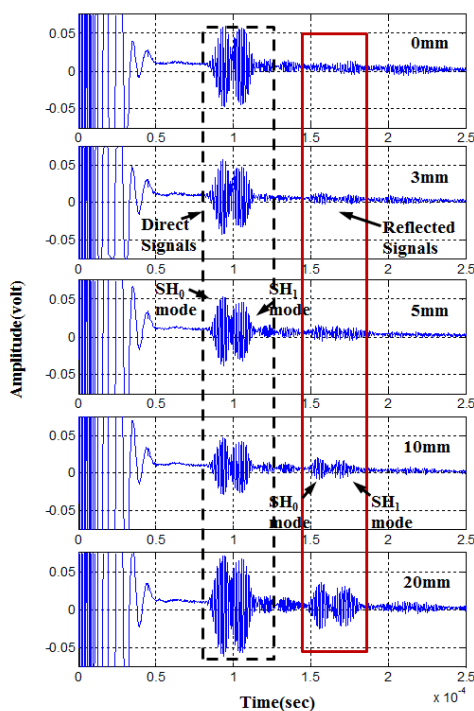


Fig. 7 SH waves time histories in the pipe with the defect-free and the 3~20mm notch flow

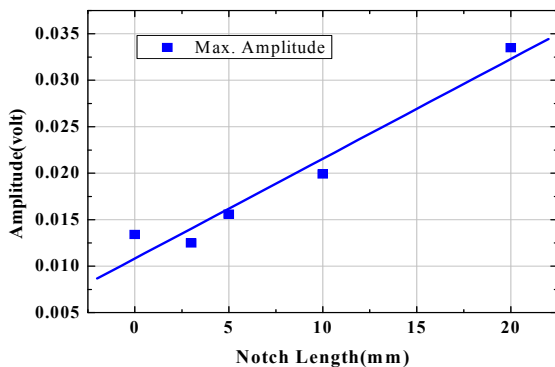


Fig. 8 The relationship between the reflected signals maximum amplitude and the notches length

Fig. 8은 SH₀모드 반사 신호의 최대 진폭과 결함 길이와의 비율을 보여준다. 이 결과 결함의 길이 증가에 따라 반사 신호 진폭이 선형에 가깝게 증가하는 것으로 보인다. 그러나 정확한 선형 관계로 해석하여 결함 크기를 정량적으로 판정하기에는 무리가 있다. 특히 결함이 없는 용접부의 반사 신호 진폭이 길이 3mm의 결함 반사 신호 진폭보다 높게 나타나는 큰 오류를 보인다. 이는 SH₁모드의 음속이 SH₀모드의 음속과 차이가 크지 않고 더욱이 각 모드의 신호는 Fig. 7에서와 같이 그룹 형태로 전파하여 특정시간의 진폭을 SH₀모드의 신호로 확정하여 결함 평가를 하는 것은 오류를 발생시킬 수 있다. 또한 용접부에서는 시험체의 두께가 증가하고 이로 인해 SH₁모드 속도가 증가하여 SH₀모드와 중첩 현상이 발생한 것으로 보인다. 따라서 신호의 진폭이 높아져 결함 판정에 오류가 발생하는 것으로 추정된다. 그러나 EMAT의 특성상 SH₀모드만 제한적으로 발생하는 것은 불가능하며 이에 따라 다양한 모드의 신호가 중첩될 수밖에 없다. 이러한 특성으로 단순히 반사 신호의 진폭을 이용해 결함의 크기를 판정하는 것은 매우 불확실하며 따라서 이를 극복하기 위한 별도의 신호처리가 요구된다.

5.2. 배관 용접부 검사 신호의 웨이브렛 변환

SH-EAMT는 주파수와 속도가 다른 다양한 모드를 전파하며 수신 신호에는 여러 모드의 신호가 중첩되어 있다. 이와 같이 다양한 속도와 주파수 성분을 가지는 신호를 이용하여 결함판정하기 위해서는 신호의 시간에 따른 주파수 분석을 통해 원하는 특정 모드의 신호해석이 필요하다. 이를 위해 앞의 3절의 내용과 같이 연속 웨이브렛 변환을 사용하여 시간-주파수 영역의 신호 분석을 하였다. 웨이브렛 변환은 MATLAB Soft-Ware를 이용하여 변환 프로그램을 작성하여 수행하였다. 이때, 10kHz에서부터 1.2MHz까지의 주파수 범위에서 신호를 분석하기 위해 식 (12)에서 $\log_2(\omega_m/\omega_0)$ 의 함수로부터 m 값을 도출하고 이 값을 이용하여 스케일파라미터 a 값이 계산되도록 반복문을 사용하였다. 그리고 위치파라미터 b 는 신호의 전체 시간길이 2.5×10^{-4} sec를 적용하였다. 그러나 수신 신호에는 높은 강도의 펄스가 가진 신호와 송신 탐촉자에서 수신 탐촉자로 직

접 전파되는 신호를 포함하고 있어 신호 전영역의 웨이브렛 변환으로는 용접부 반사 영역의 신호를 해석하기 어렵다. 이에 따라 웨이브렛 변환은 용접부 반사 신호가 수신될 수 있는 최소 시간부터 제한적으로 설정하여 변환을 수행하였다. Fig. 9는 배관 시험편의 길이 5mm의 결함에서 수신된 신호의 연속 웨이브렛 변환 결과이며 시간에 따른 주파수 성분의 강도를 확인할 수 있다. 즉, 원 신호에 특정 주파수 성분이 많을수록 웨이브렛 변환 신호의 강도가 높게 나타나며, 반사 신호에서 SH₀모드에 해당하는 주파수 강도가 가장 높을 때 반사된 SH₀모드가 지배적으로 수신되었음을 나타낸다.

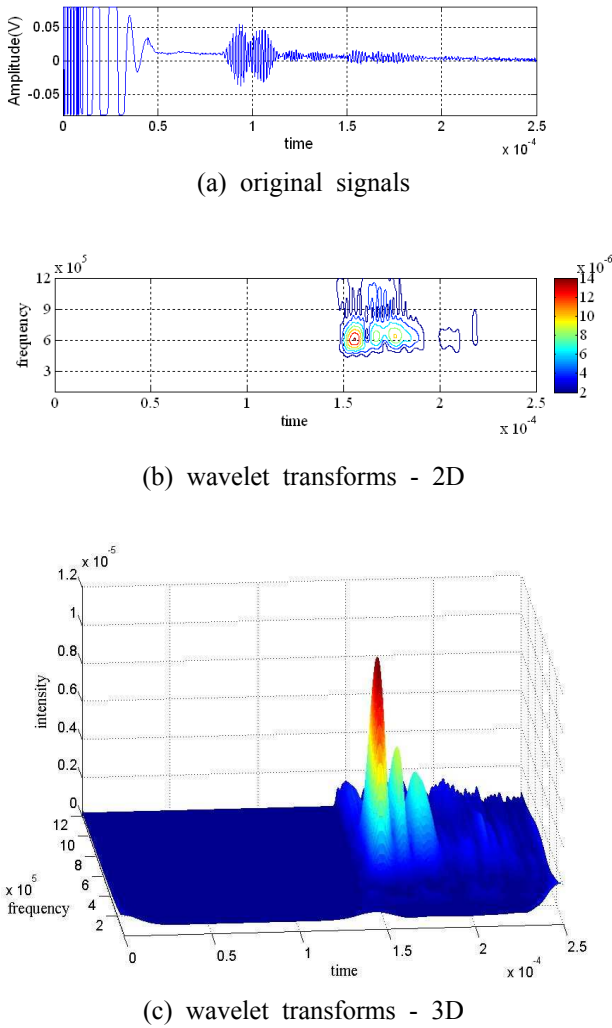


Fig. 9 Wavelet transform of the SH-wave signals from the pipe specimen with 5mm notch flaw. (a) original signals, (b) wavelet transform - 2D, (c) wavelet transform - 3D

Fig. 10은 SH파의 파장 5.2mm, 노치 길이 0, 3, 5, 10, 20mm의 결함 시험편에서 수신된 신호를 웨이브렛 변환을 이용한 분석 결과이다. 주파수 분석 결과 SH₀모드 발생을 위하여 가진된 597kHz 영역의 신호뿐만 아니라 최대 1.2MHz에 해당되는 다양한 주파수의 신호가 중첩되어 있음을 확인할 수 있었다. 이때 반사 신호의 주파수 범위가 폭넓게 나타나지만 SH₀모드의 음속에 해당하는 반사 시간영역에서 주파수 약 597kHz의 신호의 강도가 가장 높게 나타났다. 또한 결함 길이의 증가에 따라 597kHz의 반사 신호의 강도가 증가함을 확인할 수 있다. 즉, SH₀모드가 지배적으로 수신될 때 SH₀모드의 주파수 강도가 높게 나타나고, 결함의 길이 증가에 따라 반사 신호 강도의 증가뿐만 아니라 신호내의 SH₀모드의 주파수 성분도 증가함을 나타낸다. 그러나 결함이 없는 용접부의 반사 신호에서는 주파수 약 630kHz의 SH₁모드의 신호의 강도가 더 높게 나타난다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 SH₁모드의 속도 변화와 신호의 중첩에 의해 나타나는 현상으로 분석된다.

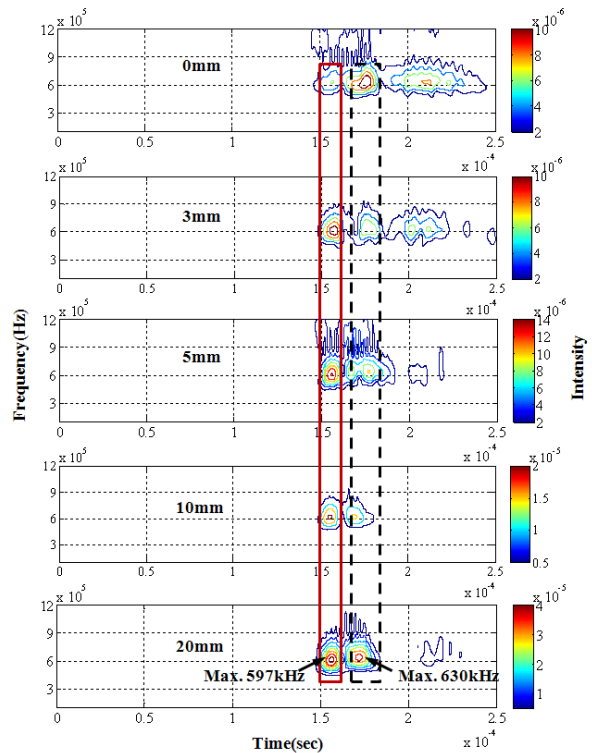


Fig. 10 Wavelet transform of the SH-wave signals from pipe welded zone with 0~20mm notch flaw

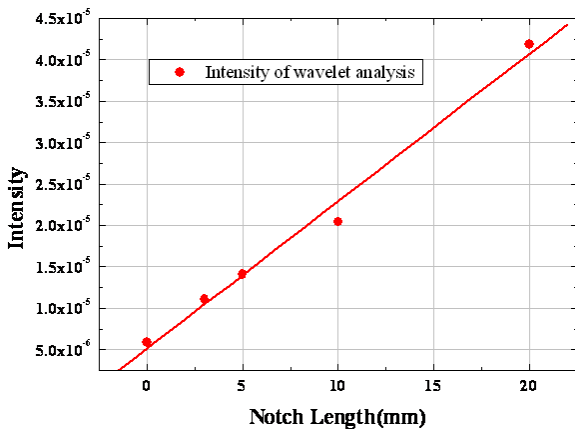


Fig. 11 The relationship between the wavelet transform's maximum intensity at 597kHz and the notches length

Fig. 11은 웨이브렛 변환을 통해 분석된 신호의 주파수 597kHz에서 반사 신호의 최대 강도와 결함의 길이의 상관관계를 나타낸 그래프이다. 이때, 결함 길이 0, 3, 5, 10, 20mm에서 각각 신호 강도를 선형 피팅(linear fitting)하였다. 이 결과 10mm 결함의 경우 오차가 다소 보이지만 결함의 길이에 따른 반사 신호의 최대 강도는 매우 선형에 가까운 관계를 나타냄을 확인할 수 있었다. 즉, SH-EMAT을 이용한 배관 용접부 결함 검사는 신호의 웨이브렛 변환을 이용한 시간-주파수 분석 방법으로 결함 평가가 가능함을 확인하였다.

6. 결론

본 연구에서 비접촉 초음파 기법인 EMAT를 이용하여 SH-wave를 발생하고 배관 용접부의 결함 검출을 수행하였다. SH-EMAT으로 용접부의 결함을 검출하고 위치 및 크기 평가를 수행하기 위하여 음속의 변화가 없는 SH₀모드를 적용하였다. 배관 용접부 결함을 검출하기 위하여 모의 결함 시험편을 제작하여 검사를 수행하고 신호 해석한 결과는 다음과 같다.

(1) SH-wave를 배관 용접부에 펄스 반사법을 적용하여 용접부 반사 신호를 성공적으로 취득할 수 있었다.

(2) SH-EMAT의 용접부 신호는 SH₀모드 뿐만

아니라 다양한 속도와 주파수의 신호가 혼합되어 있고 특히 모드 중첩으로 미소한 결함의 검출이 불가능하여 웨이브렛 변환을 이용한 시간-주파수 분석을 적용하였다.

(3) 용접부 검사 신호의 웨이브렛 변환 결과 단순한 신호의 진폭으로 확인 할 수 없는 SH₀모드에 해당하는 특정 주파수 영역의 신호를 효과적으로 검출하고 해석할 수 있었다.

(4) 웨이브렛 결과로 얻어진 SH₀모드에 해당하는 주파수 성분을 갖는 반사 신호의 최대 강도와 결함 길이와의 상관관계를 확인한 결과 결함의 길이 증가에 따라 SH₀모드 반사 신호의 강도가 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부 원자력기금으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 (No. 2010-1620100110) 및 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (No.2011-0005351).

참고문헌

- (1) Rose, J. L., 1999, "Ultrasonic Waves in Solid Media," Cambridge University Press, UK.
- (2) Achenbach, J. D., 1984, "Wave Propagation in Elastic Solids," North-Holland, New York.
- (3) Lee, J.-H., Lim, S.-J., Park, I.-K. and Kim, D.-H., 2010, "Development of Automated Ultrasonic Testing System for Partial Joint-Weld of Heat Exchanger's Header to Tube in Power Plant," *J. of KSNT*, Vol. 30, No. 4, pp. 367~372.
- (4) Lee, J.-H., Park, I.-K., Kim, Y.-K. and Kim, D.-H., 2011, "Evaluation of Thickness Reduction in Steel Plate by Using SH-EMATs," *J. of KSNT*, Vol. 31, No. 1, pp. 38~43.
- (5) Park, I. K., Kim, H. M., Park, T. S., Kim, Y. G., Cho, Y. S. and Song, W. J., 2006, "Non-Contact Ultrasonic Inspection Technology of Fillet Weldments Monitoring," *Key Engineering Materials*, Vol. 321-323, pp. 513~517.
- (6) Hirao, M. and Ogi, H., 2003, "EMATs for Science and Industry Noncontacting Ultrasonic Measurements," Kluwer Academic Publisher, Boston.

- (7) Fujisawa, K., 2002, "Application of EMAT to Steel and Nonferrous Metal," *J. of JSNDI*, Vol. 51, No. 2, pp. 68~73.
- (8) Varma, V. K., Tucker, R., Kerckel, S., Rose, J., Luo, W. and Zhao, X., 2004, "Pipeline Flaw Detection Using Shear EMAT and Wavelet Analysis," GTI's Natural Gas Technologies II, Phoenix, AZ, February 8-11.
- (9) Mertins, A., 1999, "Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms, and Applications," J. WILEY, Chichester, England.
- (10) Park, I. K. and Ahn, H. K., 2001, "Time-Frequency Analysis of Lamb Wave Mode," *J. of KSMTE*, Vol. 10, No. 1, pp. 133~140.
- (11) Park, I. K., Park, U. S., Ahn, H. K., Kwun, S. I. and Byeon, J. W., 2000, "Wavelet Analysis of Ultrasonic Echo Waveform and Application to Nondestructive Evaluation," *J. of KSNT*, Vol. 20, No. 6, pp. 501~510.
- (12) Büssow, R., 2007, "An Algorithm for the Continuous Morlet Wavelet Transform," *Mechanical System and Signal Processing*, Vol. 21, pp. 2970~2979.