

# 가보 펄스 기반 정합추적 알고리즘 : 웨이브가이드 결함진단에서의 응용

## Gabor Pulse-Based Matching Pursuit Algorithm : Applications in Waveguide Damage Detection

선경호\* · 홍진철\* · 김윤영\*\*

Kyung Ho Sun, Jin-Chul Hong, and Yoon Young Kim

**Key Words** : Guided-wave (유도초음파), Modulated-Gaussian pulse(변조 가우시안 펄스), Matching pursuit(정합추적)  
Longitudinal wave(종파), Damage (결함)

### ABSTRACT

Although guided-waves are very efficient for long-range nondestructive damage inspection, it is not easy to extract meaningful pulses of small magnitude out of noisy signals. The ultimate goal of this research is to develop an efficient signal processing technique for the current guided-wave technology. The specific contribution of this investigation towards achieving this goal, a two-stage Gabor pulse-based matching pursuit algorithm is proposed : rough approximations with a set for predetermined parameters characterizing the Gabor pulse and fine adjustments of the parameters by optimization. The parameters estimated from the measured signal are then used to assess not only the location but also the size of a crack existing in a rod. To validate the effectiveness of the proposed method, the longitudinal wave-based damage detection in rods is considered. To estimate the crack size, Love's theory for the dispersion of longitudinal waves is employed.

### 1. 서 론

유도초음파(guided-wave)를 이용한 검사방법은 효과적인 광범위 진단 방법으로서 널리 사용되고 있다.<sup>1) 3)</sup> 기존의 초음파 검사 기술과 비교하여, 유도초음파를 이용한 검사법은 파동의 전파 현상을 이용하기 때문에 웨이브가이드의 광범위 탐상을 단시간에 수행할 수 있으며, 접근이 어려운 부분에 대해서도 용이하게 사용될 수 있다.

일반적으로, 트랜스듀서(transducer)에 의해 측정된 신호에서 확인될 수 있는 반사 펄스들은 구조내의 결함의 존재 유무와 관련된 중요한 정보를 갖고 있다. 하지만 구조물에 존재하는 결함의 크기가 작을 경우, 특히 잡음이 혼재되어 있는 경우, 측정 신호로부터 직접적으로 결함의 정보를 추출하는 것은 쉽지 않다. 따라서, 구조물의 정확한 결함 위치나 크기를 예측하기 위해서는 수신된 신호에 대한 적절한 신호처리 과정이 요구된다. 이를 위해서는 상호상관

(cross correlation) 함수와 힐버트 변환(Hilbert transform)에 기반한 시간 영역 해석<sup>4) 5)</sup> 또는 스펙트럼 해석(spectral analysis)을 통한 주파수 영역 해석<sup>6)</sup>이 사용되고 있다. 하지만 이러한 방식들은 결함검출에는 부분적으로 용이하지만, 잡음에 대한 민감성과 탄성파의 분산(dispersion)현상에 심각한 영향을 받는다. 따라서, 정확한 결함 검출을 위해서는 보다 향상된 신호처리 기법이 요구된다.

본 연구에서는 수신 신호로부터 결함에 관한 정보를 효과적으로 추출하기 위한 신호처리 기법으로서, 두 단계의 정합추적(matching pursuit) 알고리즘을 제안한다. 이를 위해 발생신호가 분산현상에 의해 왜곡되는 것을 최소화함과 동시에, 정합추적 알고리즘을 적용적으로 이용하기 위해 초기 입사 신호로서 가보 펄스(Gabor pulse)를 사용한다. 가보 펄스는 주파수 변조된 가우시안 펄스(modulated-Gaussian pulse)로써 시간과 주파수 영역에 있어서 최적의 에너지 집중도를 갖는다고 알려져 있다.<sup>7)</sup> 가보 펄스는 다음과 같이 수식적으로 표현되는데

$$(f(t) = Ag\left(\frac{t-u}{\sigma}\right) \cos[2\pi f(t-u) + \phi], g(t) = \pi^{-1/4} e^{-t^2/2}),$$

다섯 개의 변수로 이루어진 변수 군  $\gamma = (A, \sigma, f, u, \phi)$ 로 그 형태가 결정된다. ( $A$  : 크기,  $\sigma$  : 시간 폭,  $f$  : 중심 주파

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : yykim@snu.ac.kr

Tel : (02)872-7154, Fax : (02) 872-5431

수,  $u$  : 시간 지연,  $\phi$  : 위상 변화)  
 만약 웨이브가이드(waveguide)에 입사되는 신호가 가보 펄스이면, 트랜스듀서에 의해 수신된 신호 역시 변조된 가보 계열의 펄스로 표시될 수 있다. 따라서, 수신된 가보 펄스의 위치 및 형태를 결정하는 변수 군  $\gamma$ 를 효율적으로 추정하기 위해서, 이 연구에서는 가보 펄스에 기반한 정합추적 알고리즘을 사용하였다.

기존의 정합추적 알고리즘<sup>8) 11)</sup>은 신호압축 문제에 주로 사용되어 왔지만, 본 연구에서는 펄스의 위치와 모양을 나타내는 변수들의 정확한 추정을 위해 사용된다. 추정된 변수들은 결합의 위치 및 크기 추정에 직접적으로 이용될 수 있다.

제안된 방법의 성능을 실험적으로 검증하기 위해서 다양한 크기의 국부적인 결합을 지닌 봉(cylindrical rod)에서 종파(longitudinal wave)를 이용한 결합진단을 수행하였다. 또한, 실험적으로 얻어진 신호로부터 결합의 크기를 추정하기 위해 Love의 보 이론을 사용하였다. 신호 발생 및 검출을 위해서는 자기기계(magnetostrictive) 트랜스듀서<sup>12) 13)</sup>가 사용되었다.

## 2. 제안된 유도초음파 검사 신호처리 기법

### 2.1 초기 펄스 형태의 선택

유도초음파를 이용한 대부분의 결합진단에서는 유한한 지지 구간을 갖는 사인파를 입력 펄스로 사용한다. 그러나, 높은 에너지의 탄성파를 전달할 수 있다는 장점에도 불구하고, 사인파는 몇 가지 바람직하지 못한 특성을 갖고 있다. 파의 형태가 시간 지지구간에 균일하게 분포하기 때문에 시간 해상도가 상대적으로 좋지 않고, 주파수 영역에서 파의 에너지가 중심주파수에 집중되지 못하기 때문에, 파가 전파할 때 분산현상으로 인해 파형의 왜곡이 심각해진다.

따라서, 본 연구에서는 초기 입사 신호로 시간, 주파수 영역에서 에너지 집중도가 우수한 가보 펄스를 이용하였다.

$$f_{G\phi}(t) = e^{-t^2/2\sigma^2} \cos(2\pi ft + \phi) \quad (1)$$

여기서,  $\sigma$ 는 신호의 시간 폭을 조절한다. Fig. 1은

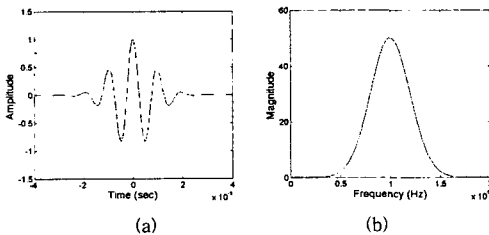


Fig. 1 (a) The shape of the modulated-Gaussian pulse  $f_{G\phi}(t)$  in the time domain,

(b) The magnitude of its Fourier transform  $F_{G\phi}(\omega)$   
 $\sigma = 8 \times 10^{-6}$  sec,  $f = 100$  kHz,  $\phi = 0$  rad 일 때의 가보 펄

스의 형상이다. Fig. 1에서 보이는 것처럼 가보 펄스는 펄스의 중심에 에너지가 집중되어 있기 때문에 시간영역의 해상도가 우수하고, 주파수 관점에서 에너지가 중심주파수에 집중되어 있기 때문에 분산의 영향을 최소화 할 수 있다.

만약 웨이브가이드에 초기 가보 펄스  $s_{in}(t)$ 가 입사되고, 전파 중에 결합 등의 반사체에 의해 반사된다 가정하면, 측정된 반사파  $s_{ref}(t)$ 는 다음과 같은 형태로 표현될 수 있다.

$$s_{ref}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R(\omega) S_{in}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2)$$

$S_{in}(\omega)$ 는  $s_{in}(t)$ 의 푸리에 변환이며, 주파수 영역에서 반사 계수(reflection coefficient)  $R(\omega)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$R(\omega) = |R(\omega)| e^{j\theta(\omega)} \quad (3)$$

여기서,  $\theta(\omega)$ 는 주파수에 따른 위상의 변화량을 의미한다.

결과적으로 식 (2)의 반사 신호  $s_{ref}(t)$ 는 입사된 신호와 비교하여 진폭과 위상이 변화된 형태를 갖는다. 분산의 영향이 크지 않다고 가정하면, 결합에 의해 반사된 펄스는 초기 입력 가보 펄스의 형상을 결정하는 변수를 변화시킴으로 효과적으로 근사할 수 있다. 이런 근사과정을 체계적으로 수행하기 위해 본 연구에서는 가보 펄스를 기저 함수로 사용하는 정합추적 알고리즘을 이용한다.

### 2.2 가보 펄스 기반 정합추적 알고리즘

정합추적 알고리즘<sup>10)</sup>은 해석하고자 하는 신호를 반복적으로 주어진 함수집단(dictionary)에 투영하여, 각각의 반복 단계마다 가장 적합한 원소함수(elementary atom)를 선택하는 신호처리 기법이다. 대상 신호의 특성을 잘 표현하는 함수 집단이 선택된다면, 적은 수의 원소를 가지고 신호를 효과적으로 표현할 수가 있다. 그러므로 본 연구에서와 같이 분석하고자 하는 신호가 가보 펄스에 기반 한다면, 가보 펄스로 구성된 함수 집단을 사용하여 정합추적을 수행하는 것이 가장 효율적일 것이다.

가보 함수집단  $D = \{g_\gamma\}_{\gamma \in \Gamma}$  ( $\Gamma$  : 가능한 변수 군)를 구성하는 실수 가보 함수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} g_\gamma(t) &= \frac{1}{\sqrt{\sigma}} w\left(\frac{t-u}{\sigma}\right) \cos(2\pi f(t-u) + \phi) \\ &= \frac{1}{\sqrt{s\Delta t}} w\left(\frac{t-u}{s\Delta t}\right) \cos(2\pi f(t-u) + \phi) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $w(t) = \pi^{-1/4} e^{-t^2/2}$ 는 가우시안 창이며, 시간 폭  $\sigma$ 는  $s\Delta t$ 로 표현할 수 있다. 식 (4)의 변수 군  $\gamma = (u, s, f, \phi)$ 는 가보 함수의 위치 및 형상을 결정한다.

일반적으로 정합추적 기법은 다음과 같은 과정을 통해 수행된다. 분석하고자 하는 신호를  $f(t)$ 라 하면, 이 신호는  $M$ 회의 반복과정을 거쳐 다음과 같은 선형 조합으로 분해된다.

$$f = \sum_{r=1}^M A_i g_{r,i} + R^{M+1} f$$

$$= \sum_{r=1}^M \frac{\langle R^i f, g_{r,i} \rangle}{\|g_{r,i}\|^2} g_{r,i} + R^{M+1} f \quad (5)$$

계수  $A_i$ 는 전개 과정에서 펄스의 크기를 의미하며,  $R^{(M+1)}$ 는  $M$ 회 반복 후의 나머지(residual)이다.  $i$ 번째 단계에서 최적의 가보 함수는 다음과 같이 결정된다.

$$g_{r,i} = \arg \max_{g_{r,i} \in D} \frac{\langle R^i f, g_{r,i} \rangle}{\|g_{r,i}\|^2} \quad (6)$$

이론적으로 가보 함수의 변수 공간은 무한하기 때문에 무한공간 내에서 직접적으로 변수를 찾는 것은 계산적으로 효율적이지 않다. 따라서 본 연구에서는 최적의 변수를 신속하게 찾기 위해서 다음과 같은 두 단계의 탐색 방법을 이용한다.

### 단계 1

단계 1에서는 적절하게 부공간(subspace)을 선택하고, 그 공간으로부터 펄스를 근사하기 위한 준최적(suboptimal)의 변수 군을 얻는다. 위상 변화를 효율적으로 구하기 위해서 실수 가보 함수  $g(u, s, f, \phi)$  대신에 다음과 같은 복소 가보 함수  $\tilde{g}(u, s, f)$ 를 사용하는 것이 편리하다.

$$\tilde{g}(u, s, f) = \frac{1}{\sqrt{s \Delta t}} w\left(\frac{t-u}{s \Delta t}\right) e^{2\pi i f(t-u)} \quad (7)$$

준최적의 변수 군은 다음과 같은 부공간  $\Gamma(u, s, f)$ 에서 탐색된다. 변수  $u$ 는 신호의 샘플링 시간  $u$ 로부터 선택되며,  $s_i$ 는 입력되는 펄스의 폭을 고려하여 선정된 적절한 이산값  $s$ 내에서 결정된다. 또한 분석 신호가 유도 초음파 신호이기 때문에  $f_i$ 는 입력 신호의 중심주파수  $f$ 로 간주할 수 있다. 준최적 가보 함수  $\tilde{g}$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$\tilde{g}(u, s, f) = \arg \max_{\tilde{g}(u, s, f) \in \Gamma} \frac{\langle R^i f, \tilde{g}(u, s, f) \rangle}{\|\tilde{g}(u, s, f)\|^2} \quad (8)$$

식 (8)을 만족하는 준최적의 변수 군  $\tilde{\gamma}_i = (u_i, s_i, f_i)$ 가 구해지면, 위상차  $\phi_i$ 는 다음과 같이 손쉽게 추정될 수 있다.

$$\phi_i = \arg(\langle R^i f, \tilde{g}(u_i, s_i, f_i) \rangle) \quad (9)$$

그리고, 크기  $A_i$  역시 정의로부터 간단히 구해진다.

$$A_i = \frac{\langle R^i f, \tilde{g}(u_i, s_i, f_i) \rangle}{\|\tilde{g}(u_i, s_i, f_i)\|^2} \quad (10)$$

### 단계 2

단계 2에서는 단계 1에서 추정한 준최적 변수값  $(\tilde{\gamma}_i, \phi_i, A_i)$ 을 초기 변수로 사용하는 비선형 최소 자승법(nonlinear least square algorithm)을 이용하여 최적(optimal)의 변수값  $\gamma_i$ 와  $A_i$ 를 추정하게 된다. 비선형 최소 자승법으로서는 일반적으로 알려진 가우스-뉴턴법(Gauss-

Newton method)이 이용되었다. 따라서  $(\gamma_i, A_i)$ 는 다음과 같이 근사 오차를 최소화함으로써 얻어진다.

$$(\gamma_i, A_i) = \arg \min_{\gamma_i \in \Gamma, A_i \in \bar{R}} \|Rf^{i+1}\| \quad (11)$$

위 두 단계의 탐색 과정은 각각의 가보 펄스를 근사하는 동안 반복적으로 수행된다.

결과적으로,  $M$ 개의 가보 펄스로 구성된 신호  $f(t)$ 는 최종적으로 선택된  $M$ 개의 가보 함수들의 선형 조합으로 근사될 수 있다. 이런 적응적 해석은 본 정합추적 기법이 신호 내의 펄스에 기반한 기저 함수를 사용하기 때문이다.

$$f(t) \approx \sum_{i=1}^M A_i g(u_i, s_i, f_i, \phi_i)(t) \quad (12)$$

이런 과정을 통해 결정된 변수 군  $\{A_i, u_i, s_i, f_i, \phi_i\}_{i=1, \dots, M}$ 을 이용하여 신호내의 입사파와 반사파의 위치 및 형상에 대한 정보를 효과적으로 추출할 수 있다. 특히 본 연구에서는 결함의 위치와 크기를 추정하기 위해 두 개의 변수, 시간 지연  $u_i$ 과 펄스 크기  $A_i$ 를 직접적으로 사용하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 정합추적 기법을 이용한 결함 검출

추정된 신호로부터 결함의 유무와 정확한 위치를 파악하기 위해서는, 잡음 속에 숨겨진 작은 펄스 에코(echo)를 검출할 수 있어야 한다. 본 절에서는 웨이브가이드 결함 진단에서의 정합추적 기법의 효율성을 확인하기 위해 결함 위치 추정 문제를 고려한다. Fig. 2에서 실험을 위해 사용된 시편 및 유도 초음파 검사 실험 장치가 소개되었다. 신호의 발생 및 수신은 각각  $\bar{A}$ 와  $\bar{B}$ 에 위치한 자기기계 트랜스듀서를 통하여 이루어진다. 가전을 위해  $s = 40$  ( $\Delta t = 2 \times 10^{-7}$  sec),  $f = 100$  kHz,  $\phi = 0$  rad 인 가보펄스를(Fig. 1 참조) 사용하였다. 그러나, 실제 파워 앰프로부터는 Fig. 3과 같이 조금 변형된 파형의 가보 펄스가 발생된다. 앞 절에서 설명된 부공간을 적절히 선택함과 동시에 측정신호를 보다 정확하

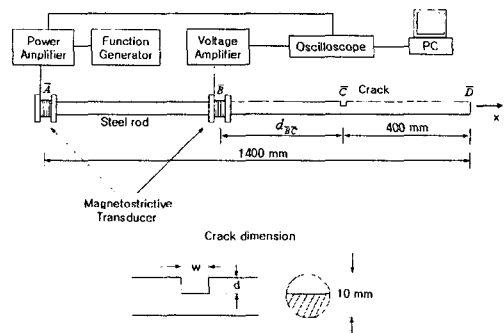


Fig. 2 The schematic diagram of the experimental setup and the dimensions of the test rods

계 해석하기 위해서는 입력 펄스를 결정하는 변수값의 정확하게 추정하는 것이 중요하다. 이를 위해 Fig. 3의 신호에 대해 정합추적 알고리즘을 적용하여, 다음과 같은 세 개의 변수 값을 추출하였다.

$$u = 2.552 \times 10^{-6} \text{ sec}, \quad s = 40.25, \quad \phi = 1.608 \text{ rad}$$

위 결과에서 알 수 있듯이 현저한 위상변화가 관찰된다.

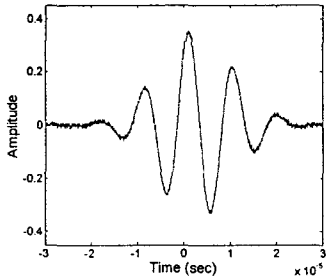


Fig. 3 The actual Gabor pulse coming from the power amplifier

깊이  $d$ 가 1, 2, 3 mm인 부분 결함을 갖는 봉의  $\bar{B}$ 지점에서 측정된 신호를 Fig. 4(a), 5(a), 6(a)에 도시하였다. 잡음에 대한 제안된 방법의 강건성을 확인하기 위해 각 신호는 평균화 과정을 거치지 않고 얻어졌다.

측정된 신호에 두 단계 정합추적 알고리즘을 적용하여 추출한 신호들은 Fig. 4(b), 5(b), 6(b)에 도시하였다. 각 그림에서 나타난 세 개의 펄스 중에서 첫 번째 펄스는  $\bar{A}$  위치에서 발생한 입사 신호이고, 두 번째의 작은 펄스는  $\bar{C}$ 에 위치한 결함에 의해 반사된 신호이며, 세 번째 펄스는 봉의 끝단  $\bar{D}$ 에서 반사된 신호이다.

그림에서 볼 수 있듯이 제안한 신호처리 과정을 통해서, 극도의 잡음에 묻혀 원 신호로부터 파악하기 곤란한 미소한 결함 관련 신호도 정확하게 추출할 수 있음을 확인할 수 있다. 이 중에서  $d=2 \text{ mm}$  때의 신호에 대해서 정합추적 기법을 이용해 추출한 변수값을 Table 1에 요약하였다. 추출된 변수 중  $u$ 로부터 다음과 같은 식에 의해서 결함 및 끝단의 위치를 추정하였다.

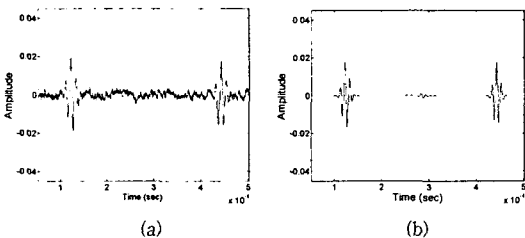


Fig. 4 The approximation of the non-average signal measured in the rod with the crack of  $d=1 \text{ mm}$   
(a) The measured signal and (b) the approximated signal

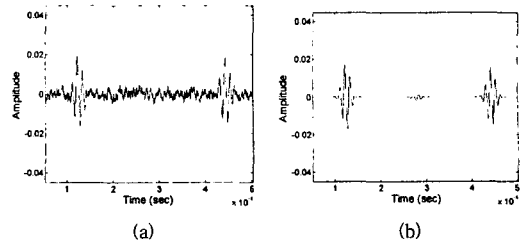


Fig. 5 The approximation of the non-average signal measured in the rod with the crack of  $d=2 \text{ mm}$   
(a) The measured signal and (b) the approximated signal

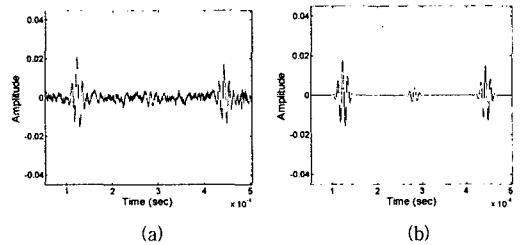


Fig. 6 The approximation of the non-average signal measured in the rod with the crack of  $d=3 \text{ mm}$   
(a) The measured signal and (b) the approximated signal

$$\begin{aligned} d_{\bar{BC}} &= C_g \times \frac{1}{2} (u | 2nd \text{ pulse} - u | 1st \text{ pulse}) \\ d_{\bar{BD}} &= C_g \times \frac{1}{2} (u | 3rd \text{ pulse} - u | 1st \text{ pulse}) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,  $C_g$ 는  $f=100 \text{ kHz}$ 에서 종파의 군속도(group velocity)이며, 실험적으로 구해진 값은  $C_g=5018 \text{ m/s}$ 이다. Table 2에서 알 수 있듯이 실제 값과 매우 정확하게 일치한다.

결함으로부터 반사되는 신호가 미약한 경우, 잡음이 혼재된 신호로부터 결함에 대한 정보를 파악하기는 것은 매우 어렵거나, 거의 불가능하다. 하지만, 제안하는 정합추적 기

Table 1. The estimated values of the parameters of the three pulses ( $f=100 \text{ kHz}$ )

$d=2 \text{ mm}$	$A(\times 10^{-2})$	$u(\times 10^{-6} \text{ sec})$	$s$	$\phi(\text{rad})$
Pulse 1	1.7716	1.24627	42.94	1.37201
Pulse 2	0.1648	2.81427	38.99	-0.13540
Pulse 3	1.5921	4.44423	44.36	0.90166

Table 2. The estimated distance  
( $(d_{\bar{BC}})_{\text{exact}} = 400 \text{ mm}$ ,  $(d_{\bar{BD}})_{\text{exact}} = 800 \text{ mm}$ )

	$d=1 \text{ mm}$	$d=2 \text{ mm}$	$d=3 \text{ mm}$
$(d_{\bar{BC}})_{\text{est}} (\text{mm})$	414.9	393.4	396.4
Error (%)	3.7	1.7	0.9
$(d_{\bar{BD}})_{\text{est}} (\text{mm})$	802.8	802.3	803.4
Error (%)	0.4	0.3	0.4

법을 통해서 단면적의 5%에 해당하는  $d=1$  mm인 아주 작은 결함도 성공적으로 검출할 수 있었다.

### 3.2 정합 추적 기법을 이용한 결함의 크기 추정

#### (1) 이론적 모델

결함의 크기를 추정하기 위해서는 신호의 검출 뿐만 아니라 파동 전파와 관련된 정확한 분산 관계 및 결함부에서 반사와 전달에 관한 이론적 해석과정이 필요하다. 봉에서 종파에 관한 엄밀한 분산 관계는 Pochhammer-Chree 방정식<sup>[4], [5]</sup>으로부터 구할 수 있지만, 효율적인 해석을 위해 본 연구에서는 단순화된 Love 보 이론을 사용하였다. Love 이론에 의한 종파의 변위 방정식은 식 (14)로 표현되는데,

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu^2 \rho J \frac{\partial^2 \dot{u}}{\partial x^2} - \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (14)$$

$E, A, \nu, \rho, J$ 는 각각 영률, 봉의 단면적, 포아송 비, 밀도, 단면의 극관성 모멘트를 나타낸다. 식 (14)로부터  $k$ (wave number)와  $\omega$ (angular frequency)의 관계 및 군속도(group velocity)  $C_g(\omega)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$k = \omega \sqrt{\frac{\rho A}{EA - \nu^2 \rho J \omega^2}} \quad (15a)$$

$$C_g(\omega) = \sqrt{\frac{E}{\rho} [1 - \nu^2 \frac{\rho J \omega^2}{EA}]^{\frac{3}{2}}} \quad (15b)$$

본 실험에서 사용되는 입력 펄스의 중심 주파수(100 kHz) 근처에서, Love의 이론에 따른 분산관계가 실제 분산관계를 비교적 정확하게 모사함을 확인할 수 있지만, 지면상 생략한다.

결함부에서의 파동의 반사와 전달 현상을 해석을 위해서 Fig. 7에서와 같은 1차원 해석과정을 이용하였다. Fig. 7에서 처럼 봉의 각 부분에서 두 개의 파가 좌우로 전파된다고 가정하면, 각 단면의 종방향 변위  $u_i$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$u_i(x, t) = A_i e^{-j(kx - \omega t)} + B_i e^{j(kx + \omega t)}, (i=1,2,3) \quad (16)$$

상수  $A, B$ 는 각각 입사되는 파 및 반사되는 파의 크기이며,  $k$ 와  $\omega$ 의 관계는 식 (15a)를 따르게 된다.

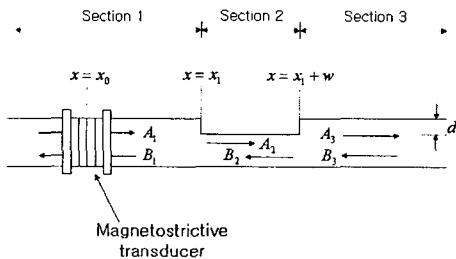


Fig. 7 1-D model for incident, reflected and transmitted waves in a rod having a crack width  $w$  and depth  $d$

$R(w;d) = B_1/A_1$  ( $w$ : 결함의 너비,  $d$ : 결함의 깊이)는 부분 2의 두 경계에서 변위 및 응력의 연속 조건을 만족시킴으로써 얻어진다. 여기서 Love 이론에 의한 응력은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma = E \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \nu^2 \rho r^2 \frac{\partial \dot{u}}{\partial x} \quad (17)$$

결함의 크기는 이론적 모델에 의해 구해진 비율  $R(w;d) = B_1/A_1$ 을 실험적으로 얻어진 결과와 비교함으로써 추정할 수 있다.

자기기계 트랜스듀서로 탄성파를 검출하는 원리는 빌라리(Villari) 효과로 설명된다. 일차원적 해석을 가정하고 비선형성 및 히스테리시스 효과를 무시할 수 있다면, 자기기계 트랜스듀서에 의해 측정된 전압 신호  $V(x, t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$V(x, t) = D(x) \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (18)$$

여기서  $D(x)$ 는 트랜스듀서의 위치에 따른 상수이다.(자세한 내용은 [16],[17] 참조)

자기기계 트랜스듀서에 의해 측정된 전압신호  $V(x_0, t)$ 는 정합추적 과정을 통해 입사파 및 반사파에 관련된 신호  $V_{inc}(x_0, t)$  및  $V_{ref}^{crack}(x_0, t)$ 로 분해된다. 따라서, 입사파  $u_{inc}(x, t) = A_1 e^{-j(kx - \omega t)}$ 에 의한 전압 신호  $V_{inc}(x_0, t)$ 는 식 (17) 및 (18)을 통해서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{inc}(x_0, t) = D(x_0) [EK \omega_1 - \frac{1}{2} \nu^2 \rho r^2 k_1 \omega_1^3] A_1 e^{-j(kx_0 - \omega t)} \quad (19)$$

유사한 방법으로 반사파  $u_{ref}^{crack}(x, t) = B_1 e^{j(kx + \omega t)}$ 에 의한 전압 신호  $V_{ref}^{crack}(x_0, t)$ 는 식 (20)과 같이 표현된다.

$$V_{ref}^{crack}(x_0, t) = -D(x_0) [EK \omega_1 - \frac{1}{2} \nu^2 \rho r^2 k_1 \omega_1^3] B_1 e^{j(kx_0 + \omega t)} \quad (20)$$

따라서, 정합추적에 의해 추정되는 신호의 크기  $A_i$  (식 (12) 참조)는 다음과 같이 직접적으로  $|R(w;d)|$ 를 예측하는데 사용될 수 있다.

$$\frac{|V_{ref}^{crack}(x_0, t)|_{\max}}{|V_{inc}(x_0, t)|_{\max}} = \frac{|B_1|}{|A_1|} = |R(w;d)| \quad (21)$$

#### (2) 실험 결과

결함의 크기를 추정하기 위해 앞서 얻어진 신호를 포함하여  $d=1$  mm에서 5 mm까지 크기의 결함을 갖는 봉에 대해 신호를 획득하였다. 각 신호에 대해 정합추적 기법을 통해 구해진 펄스의 크기  $A_i$ 로부터 식 (21)을 통해 계산된  $|R(w;d)|_{exp}$  값이 Fig. 8에 실선으로 도시되어 있다. Table 3에서  $|R(w;d)|_{exp}$ 과 Love의 이론에 의해 추정된  $|R(w;d)|_{theory}$ 를 비교함으로써 얻어진 결함 크기의 추정치가 요약되었다. 결과로부터 알 수 있듯이 가보 펄스 기반 정합추적 알고리즘은 결함의 크기를 예측하는 데 중요한 역할을 한다.

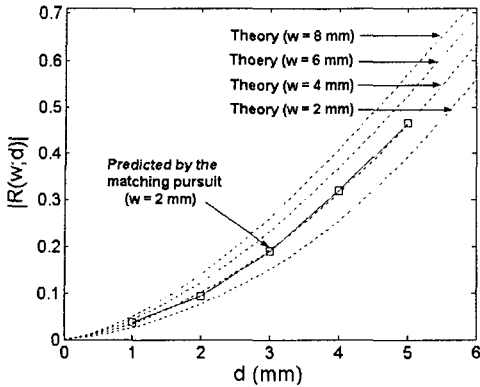


Fig. 8 The comparison of the reflection coefficients found by experiments ( $w=2mm$ ) and those by the theory

Table 3. The estimated crack sizes by the proposed approach

	$d=1mm$	$d=2mm$	$d=3mm$	$d=4mm$	$d=5mm$
$(d)_{est}(mm)$	1.25	2.25	3.40	4.50	5.45

#### 4. 결론

본 연구에서 두 단계의 정합추적 알고리즘을 이용한 효과적인 웨이브가이드 진단 기법을 제안하였다. 초기 입사 펄스로서 시간과 주파수 영역에서 최적의 에너지 집중도를 갖는 가보 펄스를 사용하였고, 신호로부터 의미 있는 펄스를 효율적으로 추출하기 위해 가보 펄스 기반 정합추적 알고리즘을 이용하였다. 가보 펄스를 특징짓는 변수, 특히 시간지연과 크기에 관련된 변수들은 직접적으로 결함의 위치 및 크기를 추정하기 위해 사용되었다. 제안한 방법을 통해서 심각한 잡음 환경에서 매우 작은 크기의 결함도 검출할 수 있음을 확인하였다.

#### 참고 문헌

- 1) J. L. Rose, J. J. Ditre, A. Pilarski, K. Rajana, and F. T. Carr, 1994, "A guided wave inspection techniques for nuclear steam generator tubing", *NDT and E Int.*, 27, 307-330
- 2) P. Cawley and D. Alleyne, 1996, "The use of Lamb waves for the long range inspection of large structures", *Ultrasonics*, 34, 287-290
- 3) T. Ghosh, T. Kundu, and P. Karpur, 1998, "Efficient use of Lamb modes for detection defects in large plates", *Ultrasonics*, 36, 791-810
- 4) D. Hertz, 1986, "Time delay estimation by

combining efficient algorithms and generalized cross-correlation methods", *IEEE, Trans. Acoust. Speech, and Sig. Pross.*, 34(1), 1-7

5) A. Grennberg and M. Sandell, 1994, "Estimation of subsample time delay differences in narrowband ultrasonic echoes using the Hilbert transform correlations", *IEEE Trans. Ultra. Ferro. Freq. Con.*, 41(5), 588-595

6) Y. T. Li and A. L. Kurkjian, 1983, "Arrival time determination using iterative signal reconstruction from the phase of the cross spectrum", *IEEE. Trans. Acoust. Speech, and Sig. Pross.*, ASSP-31(2), 502-504

7) D. Gabor, 1946, "Theory of communication", *J. IEE*, 93, 429-457

8) S. Mallat and Z. Zhang, 1993, "Matching pursuits with time-frequency dictionaries", *IEEE Trans. Signal Process.*, 41, 3397-3415

9) G. Zhang, S. Zhang, and Y. Wang, 2000, "Application of adaptive time-frequency decomposition in Ultrasonic NDE of highly scattering materials", *Ultrasonics*, 38, 961-964

10) N. Ruiz, P. Vera, J. Curpian, D. Martinez, and R. Mata, 2003, "Matching pursuit-based signal processing method to improve ultrasonic flaw detection in NDT applications", *Electro. Letters*, 39(4), 413-414

11) R. Demirli and J. Saniie, "A high fidelity time-frequency representation for ultrasonic signal analysis", 2003 *IEEE Ultrasonic symp.*, 1376-1379

12) H. Kwun and C. M. Teller, 1994, "Magnetostrictive generation and detection of longitudinal, torsional, flexural waves in a steel rod", *J. Acoust. Soc. Am.*, 96(2), 1202-1204

13) H. Kwun and K. A. Batel, 1998, "Magnetostrictive sensor technology and its applications", *Ultrasonics*, 36, 171-178

14) J. Miklowitz, 1978, *Elastic Waves and Waveguides*, North-Holland, New York

15) K. F. Graff, 1999, *Wave Motion in Elastic Solids*, Ohio-State Univ. Press

16) H. C. Lee, Y. Y. Kim, 2002, "Wave selection using a magnetomechanical sensor in a solid cylinder", *J. Acoust. Soc. Am.*, 112(3), 953-960

17) S. H. Cho, Y. Kim, and Y. Y. Kim, 2003, "The optimal design and experimental verification of the bias magnet configuration of a magnetostrictive sensor for bending wave measurement", *Sensors & Actuators A: Physical*, 107(3), 225-232