

# 첩릿변환을 이용한 비틀림 유도파 모드분리

## Mode Separation in Torsional Guided Waves Using Chirplet Transform

김영완\*·박경조†

Young-Wann Kim and Kyung-Jo Park

(Received February 12, 2014 ; Revised March 28, 2014 ; Accepted March 28, 2014)

**Key Words** : Torsional Mode(비틀림 모드), Mode Separation(모드분리), Chirplet Transform(첩릿변환), Maximum Likelihood Estimation(최대가능추정), Magnetostrictive Sensor(자왜센서)

### ABSTRACT

The sensor configuration of the magnetostrictive guided wave system can be described as a single continuous transducing element which makes it difficult to separate the individual modes from the reflected signal. In this work we develop the mode decomposition technique employing chirplet transform based on the maximum likelihood estimation, which is able to separate the individual modes from dispersive and multimodal waveform measured with the magnetostrictive sensor, and estimate the time-frequency centers and individual energies of the reflection, which would be used to locate and characterize defects. Simulation results on a carbon steel pipe are presented, which show the accurate mode separation and more discernible time-frequency representation could become enabled using the proposed technique.

### 1. 서 론

초음속 유도파(ultrasonic guided waves)는 현재 비파괴검사의 중요한 수단으로 자리 잡게 되었으며, 많은 기술적 진보에 힘입어 석유화학, 철강 산업에 쓰이는 배관 검사에 자주 이용되고 있다<sup>(1)</sup>. 유도파 시험에는 종파(longitudinal wave)나 비틀림 모드(torsional mode)와 같은 축대칭 모드를 배관에 인가하는데, 종파 가진을 위해서는 다채널 시간지연 기능을 갖는 신호변환기 배열(transducer array)<sup>(2)</sup>을 이용하고, 비틀림 모드 가진에는 자왜센서(magnetostrictive sensor)<sup>(3)</sup>를 사용한다.

이 중 자왜센서는 하나의 연속된 신호변환 요소 즉 상자성 띠를 배관에 원주방향으로 부착하여 비틀림 모드를 가진하고 반사된 신호를 측정하는 장치이다. 이러한 구조를 갖는 신호변환기를 이용하면 다중 압전요소 신호변환기 링으로 구성된 시스템과 달리 결함에서 반사된 신호로부터 개별 모드를 분리하는 것이 어렵다. 따라서 유용한 신호해석 방법을 이용하여 신호를 분리하고 분리된 신호를 이용하여 반사계수를 계산할 수 있으면, 자왜센서를 이용하여 결함의 크기를 정량적으로 파악할 수 있다는 것을 알 수 있다.

유도파에 적용되는 신호처리 기법은 STFT(short time Fourier transform)와 같은 시간-주파수 표현법

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Design Engineering at Chonnam National University  
E-mail : kjpark40@jnu.ac.kr  
Tel : +82-61-659-7221, Fax : +82-61-659-7229

\* Member, Department of Mechanical Design Engineering at Chonnam National University

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

**Table 1** Operations for time-frequency atoms for the chirplet transform<sup>(10)</sup>

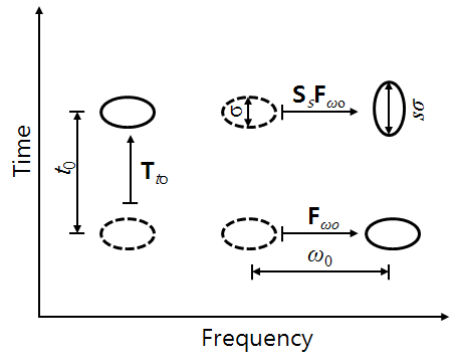
Operation		Corresponding coordinate transformation $(t, \omega) \rightarrow (\bar{t}, \bar{\omega})$	
Time shift $T_{t_0}$	$T_{t_0}h(t) = h(t - t_0)$	$\bar{t} = t - t_0$	$\bar{\omega} = \omega$
Frequency shift $F_{\omega_0}$	$F_{\omega_0}h(t) = e^{i\omega_0 t}h(t)$	$\bar{t} = t$	$\bar{\omega} = \omega - \omega_0$
Scaling $S_s$	$S_s h(t) = \frac{1}{\sqrt{s}}h\left(\frac{t}{s}\right)$	$\bar{t} = \frac{t}{s}$	$\bar{\omega} = s\omega$
Frequency Shear $Q_q$	$Q_q h(t) = h(t)\exp[iq/2t^2]$	$\bar{t} = t$	$\bar{\omega} = \omega - qt$
Time shear $P_p$	$P_p h(t) = (ip)^{-\frac{1}{2}}\exp\left[i\frac{t^2}{2p}\right] \times h(t)$	$\bar{t} = t - p\omega$	$\bar{\omega} = \omega$

이 널리 사용되고 있다<sup>(4,5)</sup>. 이 방법은 이동창(sliding window)을 사용하여 전체 신호를 여러 개의 구간으로 나누고 이로부터 각 구간별로 시간의 함수로 표현되는 에너지 스펙트럼을 얻는 방법이다. STFT기법을 좀 더 개선하고 확장하여 과도신호인 유도파 신호의 해석을 좀 더 정밀하고 효과적으로 수행할 수 있는 방법들이 개발되어 왔는데, 재할당 스펙트럼(reassigned spectrum)<sup>(6)</sup>, 유도파 분산성에 기반한 STFT<sup>(7)</sup>, 정합추적(matching pursuit)<sup>(8)</sup>, 왜곡 주파수 변환(warped frequency transform)<sup>(9)</sup> 등을 예로 들 수 있다. 이 방법들은 강한 분산성에 의해 나타나는 유도파 모드 사이의 간섭을 약화시켜 에너지 분포의 분해능을 향상시킨 방법들이다.

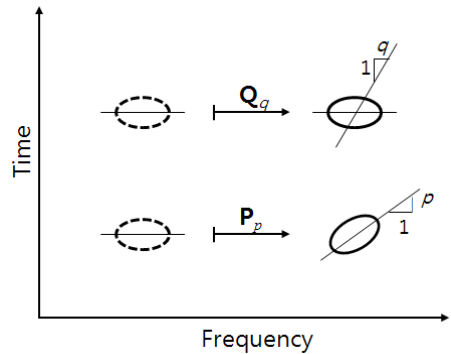
첩릿변환은 웨이블릿변환(wavelet transform)과 STFT 모두를 일반화한 개념으로, 이를 이용하여 특정한 순간 주파수와 군속도를 갖는 신호에서 개별 모드 성분을 추출할 수 있다. 이 논문에서는 최대가능추정(maximum likelihood estimation)방법에 기반한 첩릿변환을 소개하고 이를 이용하여 모드를 분리하고자 한다. 결함에서 반사된 신호를 얻기 위해 유도파 해석 프로그램을 이용하고, 개발된 첩릿변환 알고리즘을 결함 반사 신호에 적용하여 신호에 포함되어 있는 시간-주파수 성분을 추출한다. 또한 분산성을 갖는 신호로부터 개별 모드를 분리하고, 이로부터 비대칭 결함에 의한 모드변환에 의해 횡모드가 발생하는 것을 확인한다.

## 2. 첩릿변환

첩릿변환은 시간-주파수 표현법을 일반화시킨 개념으로 Mann과 Haykin에 의해 도입되었다<sup>(10)</sup>. 기저



(a) STFT and wavelet transform



(b) Chirplet transform

**Fig. 1** Representation of time-frequency atoms

함수(basis function)는 천이(shift), 전단(shear), 확대(scaling) 연산자에 의해 조절이 가능하며, 따라서 에너지밀도를 5차원의 매개변수 공간으로 표현한다. 이때 에너지밀도는 STFT(시간과 공간의 천이)로부터 구한 에너지밀도와 웨이블릿변환(시간 천이와 확대)에 의한 에너지밀도로 구성된다. 이에 대한 비교는 Fig. 1에 자세히 표시하였다.

2.1 첩릿변환의 정의

첩릿변환의 표준적인 정의는 식 (1)과 같이 기저 함수  $g(t)$ 와 신호  $x(t)$  사이의 내적에 의해 정의될 수 있다.

$$C^{ct}(t_o, \omega_o, s, p, q) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g_{t_o, \omega_o, s, q, p}^*(t)dt$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)G_{t_o, \omega_o, s, q, p}^*(\omega)d\omega$$
(1)

여기서 \*는 공액복소수를 나타낸다. 기저함수  $g(t)$ 와 기저함수의 푸리에 변환  $G(\omega)$ 는 식 (2)와 같이 첩신호 군에 속해 있다.

$$G_{t_o, \omega_o, s, p, q}(\omega) = T_{t_o} F_{\omega_o} S_s Q_q P_p H(\omega)$$

$$g_{t_o, \omega_o, s, p, q}(t) = T_{t_o} F_{\omega_o} S_s Q_q P_p h(t)$$
(2)

여기서  $T_{t_o}$ ,  $F_{\omega_o}$ ,  $S_s$ ,  $Q_q$ ,  $P_p$ 는 Table 1과 같은 연산을 수행하는 연산자들이다.

시간-주파수 영역에서 매개변수  $t_o, \omega_o, s, q, p$ 에 의해 특정된 위치에 집중되어 있는 신호 성분은 첩릿변환을 통해 추출할 수 있다. 스펙트로그램과 스칼로그램과 마찬가지로 첩릿변환의 에너지 분포는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$P^{\alpha}(t_o, \omega_o, s, p, q) = |C^{ct}(t_o, \omega_o, s, p, q)|^2$$
(3)

기본 창이 주어질 때 첩릿변환의 결과는 가시화하기 어려운 5차원 매개변수로 표현된다. 따라서 전체 5차원 공간을 계산하는 대신 2개의 매개변수로 표현된 평면에 변환결과를 표시하는데 스펙트로그램 처럼 시간-주파수 공간에 표시하는 것이 가장 일반적이다.

2.2 신호분리 알고리즘

신호를 분해하여 가중치를 갖는 Gabor함수의 합 형태로 표현하기 위해 O’neill은 최대가능추정방법을 사용하였다<sup>(11)</sup>. 이 방법은 정합추적과 유사하게 시간영역에서의 신호를 분리된 형태로 나타낼 수 있도록 만들어준다. 그렇지만 첩함수의 매개변수를 이산화(discretize)하는 것이 아니라 추정하기 때문에 정합추적과 달리 함수사전(dictionary)에 포함된 함수의 수가 무한대라는 특징을 갖는다. 최대가능추정

방법을 사용할 경우 계산시간이 과도하게 걸리는 단점이 있으므로 첩 매개변수를 추정할 수 있는 차선(suboptimal)의 추정자를 제안하고 첩함수를 추정하는 새로운 방법을 제안하였다. 이 논문에서는 이 방법을 사용하여 분산성을 갖는, 다중 모드를 포함하고 있는 신호를 개별 모드로 분리하고자 한다.

이산화된 신호  $x(n)$ 이 다음과 같이 주어질 때, 이 신호를 시간영역에서 충분히 분리되어 있는, 가중치를 갖는 Gabor함수의 합 형태로 나타내고자 한다.

$$x(n) = Ae^{j\phi} s(n; t, \omega, c, d) + w(n) \quad n = 1, 2, \dots, N$$
(4)

여기서  $w(n)$ 은 평균이 0이고  $\sigma^2$ 의 분산을 갖는 복소수, 백색 가우스 잡음이다. 매개변수  $t, \omega, c, d$ 는 각각 시간영역에서의 위치, 주파수영역에서의 위치, 첩변화율(chirp rate), 지속시간을 나타낸다. 따라서 추정하고자 하는 미지의 매개변수는 총 7개이다.

$$\theta = [\sigma^2 \ A \ d \ c \ t \ \omega \ \phi]$$
(5)

로그가능함수는 다음과 같이 주어지고

$$\log(\mathbf{x}; \theta) = -N \log(2\pi\sigma^2) - \frac{1}{2\sigma^2} \|\mathbf{x} - Ae^{j\phi} \mathbf{s}_{t, \omega, c, d}\|^2$$
(6)

최대가능추정자(MLE)는 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{\theta}_{ml} = \arg \max \log p(\mathbf{x}; \theta)$$
(7)

위 문제는 2개의 독립된 MLE로 분리될 수 있고 이를 구성하는 3개의 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \hat{t}_{ml} \\ \hat{\omega}_{ml} \\ \hat{c}_{ml} \\ \hat{d}_{ml} \end{bmatrix} = \arg \max \langle \mathbf{x}, \mathbf{s}_{t, \omega, c, d} \rangle^2$$
(8)

$$\mathbf{z} = \mathbf{s}_{\hat{t}_{ml}, \hat{\omega}_{ml}, \hat{c}_{ml}, \hat{d}_{ml}}$$
(9)

$$\begin{bmatrix} \hat{\sigma}_{ml}^2 \\ \hat{A}_{ml} \\ \hat{\phi}_{ml} \end{bmatrix} = \arg \max \left( -N \log(2\pi\sigma^2) - \frac{1}{2\sigma^2} \|\mathbf{x} - Ae^{j\phi} \mathbf{z}\|^2 \right)$$
(10)

두 번째 MLE인 식 (10)은 해를 구하는데 직접 적

용할 수 있지만 첫 번째 MLE인 식 (8)은 직접 적용하기 어렵기 때문에 차선의 해를 찾는 방법이 필요하다.

여기서 창함수  $h(n)$ 을 갖는 신호  $x(n)$ 의 스펙트로그램을  $S_x(t, \omega; h)$ 로 표시하면 첫 번째 MLE를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{t}_{ml} \\ \hat{\omega}_{ml} \\ \hat{c}_{ml} \\ \hat{d}_{ml} \end{bmatrix} = \operatorname{argmax}_x S_x(t, \omega; \mathbf{s}_{0,0,c,d}) \quad (11)$$

따라서 첫 번째 MLE를 직접 계산하는 대신 다음과 같은 계산과정을 이용하여 차선의 해를 구할 수 있다.

- (1) 신호의 전체 영역에서 첩변화율과 지속시간을 추정한다.
- (2) 추정된 첩변화율과 지속시간을 이용하여 시간, 주파수영역에서의 위치를 추정한다.
- (3) 국부적인 영역에서 첩변화율과 지속시간을 다시 추정한다.
- (4) 해가 수렴할 때까지 2,3의 과정을 반복한다.

단계 1은 다의함수(ambiguity function)을 이용하여 수행할 수 있는데, 계산의 편리를 위해 첩변화율과 지속시간을 중립화할 수 있는 값으로 선택한다. 단계 2는 현재의 첩변화율과 지속시간의 추정값에 해당하는 창함수를 갖는 스펙트로그램의 최대값을 찾으면 알 수 있다. 추정한 첩변화율과 지속시간이 완벽한 것이라면 이 값은 최대가능추정자가 될 것이다. 시간과 주파수 영역에서의 위치를 어느 정도 정확하게 추정하였다면 국부적으로 추정한 첩변화율과 지속시간은 전체 영역에서 추정한 값보다 정확할 것이다. 이러한 과정은 단계 3에서 수행되는데 이때 Wigner분포에 기반한 국부적인 다의함수를 국부적인 첩변화율과 지속시간을 추정하는데 사용한다.

### 3. 모드 분리

유도 초음파를 구조물의 비파괴검사에 적용할 때 구조물 표면에서의 입자의 변위나 속도를 측정하는 것이 일반적인 실험방법이다. 이때 입자의 변위(또는 속도)에는 구조물을 따라 전파되는 모든 모드들

의 에너지가 포함되어 모드들이 중첩되어 나타나기 때문에 측정된 신호로부터 개별 모드들의 에너지 성분을 분리하는 것이 매우 어렵다고 할 수 있다. 따라서 측정된 다중 모드 유도파 신호로부터 이러한 개별 모드들의 에너지 성분을 정확하게 분리할 수 있다면 현재의 구조물 건전성 검사나 비파괴검사의 수준을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다. 이 논문에서는 첩릿변환을 이용하여 다중 모드 신호로부터 개별 모드의 에너지 성분을 추출하고자 한다. 이를 위해 보어 직경 25.4 mm, 두께 1.6 mm, 길이 1 m 인 배관에 Hanning창을 씌운 중심주파수 128 kHz, 10 사이클 T(0,1) 비틀림 모드를 입사한 경우를 고려해보자.

대상 배관의 위상속도, 군속도를 계산하기 위해 영국 Imperial College에서 개발한 유도파 해석프로그램인 Disperse를 사용하였고<sup>(12)</sup> 그 결과를 Fig. 2(a)와 (b)에 나타내었다. 여기서 위상속도는 배관 내에서 단일 주파수의 단일 위상을 갖는 파동이 동시에 진행되는 속도를 나타내고, 군속도는 여러 가지 위상속도를 갖는 파동들이 합성되어 형성되는 파군(wave packet)이 이동하는 속도를 말한다. 그림에서 알 수 있듯이 종방향 모드와 달리 첫 번째 비틀림 모드인 T(0,1) 모드의 속도 선도는 전주파수에

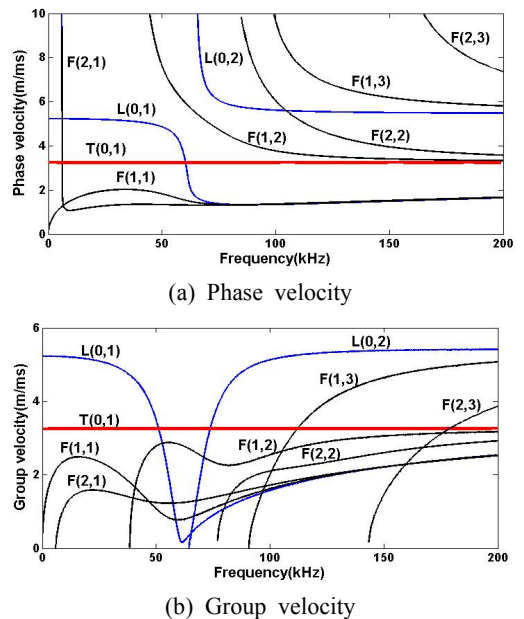


Fig. 2 Dispersion curves for a 25.4 mm bore pipe

결쳐 일정한 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 즉 T(0,1)모드의 모드형상은 주파수에 따라 달라지지 않으며 따라서 모든 주파수에서 완벽한 비분산 특성을 갖는다는 것을 알 수 있다. 따라서 중심주파수 (여기서는 128 kHz)에서 T(0,1) 모드의 모드형상을 갖도록 가진하면 순수 모드 가진이 가능하다.

축대칭 결함을 갖는 배관에 축대칭 모드를 인가하면 축대칭 모드만이 전파되기 때문에 축대칭 신호만이 측정된다. 가진주파수 128 kHz는 대상 배관의 두 번째 비틀림 모드인 T(0,2) 모드의 차단주파수 (cutoff frequency) 314 kHz보다 아래에 놓여 있으므로 축대칭 결함에서 모드변환(mode conversion)이 발생하지 않으며 T(0,1) 모드만이 결함에서 반사되거나 전달된다. 그러나 배관 내에 비축대칭 특성을 갖는 구조물이 있을 경우 T(0,1) 모드는 F(1,2)나 F(2,2)와 같은 휨모드로 모드변환 될 수 있다.

이러한 모드변환은 입사 모드와 모드변환된 모드의 입자운동이 유사하면 발생할 가능성이 높다. Fig. 3에 128 kHz에서 T(0,1), F(1,2), F(2,2) 모드의 모드형상을 나타내었다. 이 모드형상도 분산선도를 구하는데 사용한 프로그램인 Disperse를 이용하여 구하였다. 모드형상으로부터 T(0,1) 모드는 배관의 두께방향을 따라 접선방향의 변위만을 갖는다는 것을 알 수 있다. 즉 축방향이나 반경방향의 변위는 나타나지 않는다. F(1,2), F(2,2) 모드도 접선방향 변위성분이 주요하게 나타나고, 따라서 T(0,1) 모드가 이 두 모드로 모드변환 될 가능성이 매우 높다는 것을 알 수 있다. 특히 F(2,2) 모드는 접선방향, 종방향 변위성분이 모두 크게 나타나기 때문에 이 주파수에서 비틀림 거동과 확장 거동이 모두 나타날 수 있다.

비틀림 유도파를 인가할 수 있는 신호변환기를 대상 배관에 장착하고, 중심주파수 128 kHz에서 T(0,1) 모드를 가진한 경우 입력 신호는 Fig. 4(a)에 나타낸 경우와 같다. 축방향을 따라 0.5 m 전파한 후 입사된 T(0,1) 모드는 결함을 만나게 되고 일부 에너지가 반사되어 신호변환기에 반사 신호가 도달하게 된다. 따라서 T(0,1) 모드는 총 1 m 거리를 전파한 후 신호변환기에 수신되는데 이때 수신된 신호를 Fig. 4(b)에 나타내었다.

유도파검사의 신호해석 시 통상적으로 자주 사용되는 방법은 시간-주파수 표현법이다. 잘 알려진 푸리에변환은 신호에 포함된 주파수성분에 대해 포괄

적 정보를 제공하기 때문에 정상 주파수성분을 갖는 신호(주파수성분이 시간에 따라 변하지 않는 신호) 해석에 적합한 반면, 시간-주파수 표현법은 국부적인 주파수성분에 대한 정보를 제공하기 때문에 유도파 신호와 같은 비정상 신호해석에 매우 유리하다. 이 표현법의 가장 간단한 예가 STFT인데, 이 기법은 측정된 신호를 여러 개의 구간신호들로 나누고, 여기에 변조창을 씌운 다음 푸리에변환을 구하여 시간에 따른 주파수성분의 변화를 살펴보는 방법이다.

그러나 일반적으로 STFT를 이용하여 다중 모드가 서로 중첩되어 있는 신호를 분리하는 것은 불가능하다고 알려져 있다. 또한 서로 중첩된 모드들을 분해하기 위해 개선된 시간-주파수 표현법을 사용할 경우 계산에 소요되는 시간이 매우 길어지는 단점이

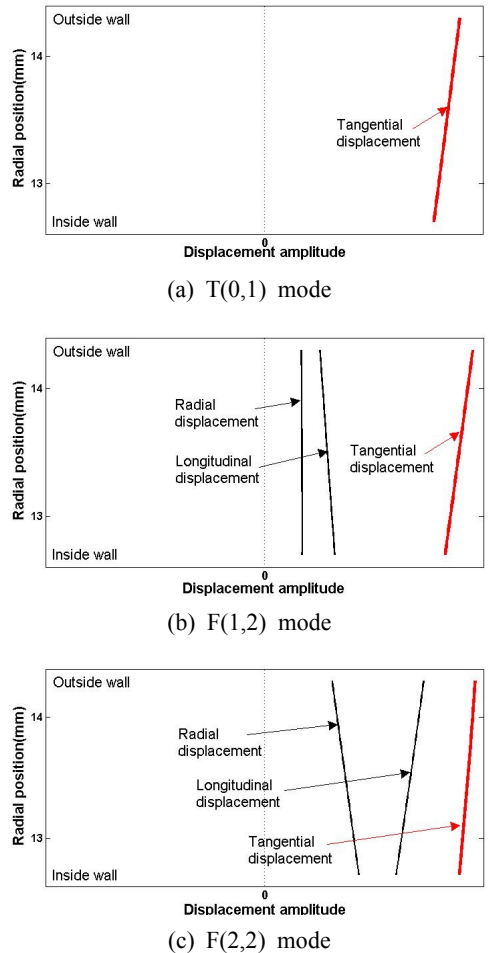


Fig. 3 Displacement mode shapes at 128 kHz

있다. 시간-주파수 표현법의 또 다른 단점으로는 후처리 기능을 자동화하기 어렵다는 점을 들 수 있다. 또한 시간-주파수 표현법은 광대역 신호에 적합한데, 유도파를 이용한 비파괴검사에서 사용되는 신호는 협대역 신호가 주로 사용된다. 그 이유는 분산에 의해 신호가 퍼지는 현상을 최소화하기 위해서이다. 따라서 유도파 신호해석에 시간-주파수 표현법을 사용하는 것은 적절하지 않은 것으로 생각된다. 이에 비해 첩릿변환을 이용하면 시간-주파수의 위치, 시간-주파수 영역에서 신호의 지속시간 그리고 각 모드의 에너지를 쉽게 파악할 수 있고 후처리 과정도 필요하지 않다는 장점이 있다. 이러한 과정을 자동화하는 것도 매우 쉬우며, 이 논문에서 제시한 알고리즘을 사용하면 기존의 시간-주파수 표현법에 비해 계산시간의 단축 및 비용의 감소를 기대할 수 있다.

앞의 Fig. 4(b)에 제시한 다중 모드가 포함되어 있는 결함 반사 신호에 첩릿변환을 적용하여 개별 모드를 분리한 결과를 Fig. 5(a), (b), (c)에 나타내었다. 그림에서 T(0,1) 모드와 유사한 모드형상을 갖는 F(1,2), F(2,2) 모드가 반사된 신호에 섞여 있음을 알 수 있다. 또한 각 모드가 나타나는 시간도 분산 선도를 이용하여 구한 도달시간( $=d/C_g$ ,  $d$ : 전파거리,  $C_g$ : 각 모드의 군속도)과 정확하게 일치하는 것을

알 수 있다. 따라서 제안된 첩릿변환 알고리즘을 이용하여 다중 모드가 중첩된 신호에서 개별 모드를 정확하게 분리해낼 수 있으며, 이로부터 결함의 존재 유무 및 위치를 명확히 파악할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 결함이 존재하지 않으면 반사 신호에 F(1,2)나 F(2,2)와 같은 횡모드가 나타나지 않기 때문에, 신호 분리를 통해 결함의 유무를 판별할 수 있다.

앞의 Fig. 4(b)에 제시한 다중 모드가 포함되어 있는 결함 반사 신호에 STFT와 첩릿변환을 적용하여 구한 시간-주파수 성분을 Fig. 6에 나타내었다. 스펙트로그램은 최댓값에 대한 상대 크기인 dB단위를 사용하여 색깔로 표시하였다. Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이 STFT기법을 사용하면 결함에서 반사된, 다중

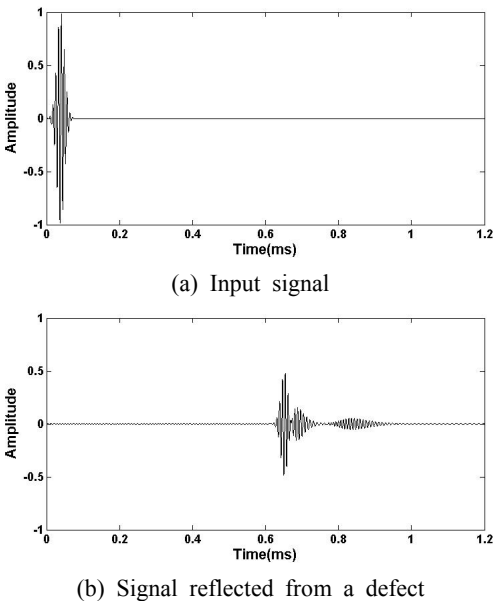


Fig. 4 Input and reflection signals after 1 m propagation

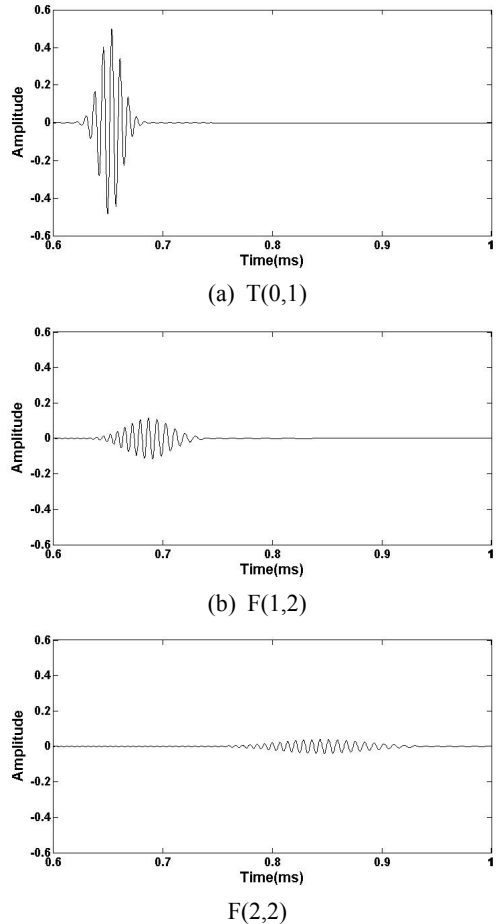


Fig. 5 Separated wave forms using the chirplet transform

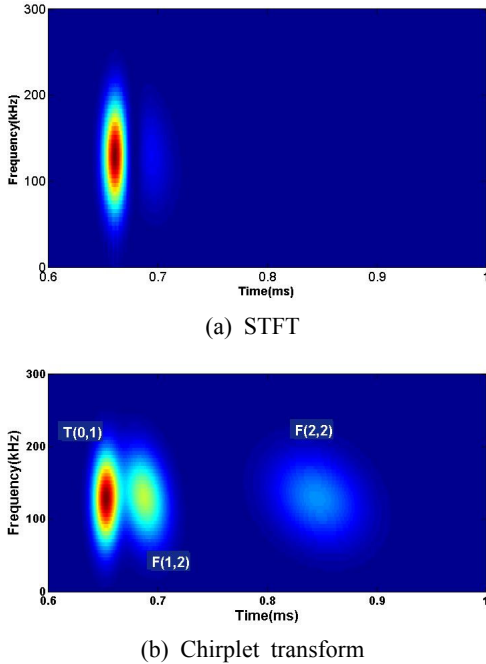


Fig. 6 Spectrogram of the signal in Fig. 4(b)

모드들이 겹쳐있는 신호에서 개별 모드들을 분리할 수 없음을 알 수 있다. 즉, 이 방법을 사용하면 각 모드들에 실려 있는 에너지를 정확히 분리하지 못하기 때문에 각 모드 성분들이 중첩되어 나타나고 따라서 스펙트로그램이 손상된 형태로 나타나게 된다. 웨이블릿변환은 STFT기법에 비해 이동 창의 크기 조절이 가능하고 잡음제거에 유리한 장점이 있지만, STFT와 마찬가지로 시간과 주파수의 전단 기능이 없기 때문에 첩변화율을 정확하게 구할 수 없고 따라서 STFT와 동일한 스펙트로그램을 얻게 된다. 이로부터 이 논문에서는 좀 더 널리 사용되는 STFT 기법에 의한 결과를 제시하였다.

동일한 반사 신호에 대해 첩릿변환을 이용하여 구한 스펙트로그램을 Fig. 6(b)에 제시하였다. 그림으로부터 첩릿변환을 이용하면 중첩된 신호로부터 개별 모드를 명확하게 추출해 낼 수 있음을 알 수 있다. 즉, STFT를 이용하여 구한 스펙트로그램에서는 서로 혼재된 형태로 존재했던  $T(0,1)$  모드와  $F(1,2)$  모드를 확실하게 구분할 수 있을 뿐만 아니라, 모드의 에너지가 작아 검출할 수 없었던  $F(2,2)$  모드도 시간-주파수 표현법을 이용하여 정확히 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

이 논문에서는 첩릿변환을 이용하여, 자외센서를 이용한 유도파시험에서 자주 측정되는 다중 모드를 갖는 반사 신호로부터 개별 모드를 분리하는 방법을 개발하였다. 이를 위해 먼저 최대가능추정 방법을 이용하여, 신호를 Gabor함수의 합으로 표현하는 방법을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 차선의 해를 구하는 방법이지만 수치적으로 다루기 쉬운 추정자를 사용하기 때문에 개별 신호의 순간적인 첩변화율이나 지속시간을 정확하게 추정할 수 있는 장점을 갖고 있다.

개발된 첩릿변환 알고리즘을 결함반사 신호에 적용한 결과 모드를 명확히 분리할 수 있었을 뿐만 아니라, 기존의 STFT기법으로는 탐지가 어려웠던 휨 모드도 정확하게 찾아내는 것을 확인할 수 있었다. 이로부터 개발된 첩릿변환을 이용하여 분산성을 갖는 다중 모드 신호에서 개별 유도파 모드를 정확하게 추출할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 후 기

이 연구는 2013년 지식경제부 지원 중화학설비 안전진단센터 사업의 일부 지원에 의해 수행되었음을 밝힙니다.

## References

- (1) Alleyne, D., Pavlakovic, B. and Cawley, P., 2001, Rapid Long Range Inspection of Chemical Plant Pipework Using Guided Waves, Review of Progress in Quantitative NDE, New York Plenum, Vol. 20, pp. 180~187.
- (2) Li, J. and Rose, J. L., 2001, Implementing Guided Wave Mode Control by Use of a Phased Transducer Array, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 48, No. 3, pp. 761~ 768.
- (3) Park, K. J. and Kim, C. Y., 2013, Sludge Detection inside Pipes Using Torsional Guided Waves, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 282~290.

(4) Prosser, W. H., Seale M. D. and Smith B. T., 1999, Time-frequency Analysis of the Dispersion of Lamb Modes, *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 105, No. 5, pp. 2669~2676.

(5) Cohen, L., 1989, Time-frequency Distributions-a Review, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 77, No. 7, pp. 941~981.

(6) Kotte, O., Niethammer, M. and Jacobs, L. J., 2006, Lamb Wave Characterization by Differential Reassignment and Nonlinear Anisotropic Diffusion, *NDT & E International*, Vol. 39, No. 2, pp. 96~105.

(7) Hong, J. C., Sun, K. H. and Kim, Y. Y., 2005, Dispersion-based Short-time Fourier Transform Applied to Dispersive Wave Analysis, *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 117, No. 5, pp. 2949~2960.

(8) Touze, G. L., Nicolas, B. and Mars, J. I., 2009, Matched Representations and Filters for Guided Waves, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 57, No. 5, pp. 1775~1783.

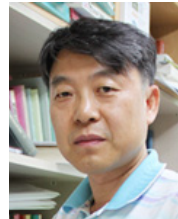
(9) Marchi, L. D., Marzani, A., Caportale, S. and Speciale, N., 2009, Ultrasonic Guided-waves Characterization with Warped Frequency Transforms, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 56, No. 10, pp. 2232~2240.

(10) Mann, S. and Haykin, S., 1995, The Chirplet Transform: Physical Considerations, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 43, No. 11, pp. 2745~2761.

(11) O'Neill, J. C., Flandrin, P. and Karl, W., 2000, Sparse Representations with Chirplets via Maximum Likelihood Estimation, *IEEE Transactions on Signal*

*Processing*, Vol. 40, No. 5, pp. 1842~1853.

(12) Pavlakovic, B., Lowe, M., Alleyne D. and Cawley, P., 1997, *Disperse: a General Purpose Program for Creating Dispersion Curves*, *Review of Progress in Quantitative NDE*, New York Plenum, Vol. 16, No. 16A, pp. 185~192.



**Young-Wann Kim** received his Ph.D. degree from Chungnam National University in 1997. He is a professor of department of mechanical design engineering, Chonnam National University. His research interest includes the structural dynamics & vibration, FSI problems.



**Kyung-Jo Park** received the B.S. degree in Dept. of Mechanical Engineering from Seoul National University in 1986, and the M.S. and the Ph.D. degrees from KAIST in 1988 and 1993, respectively. He is currently working in Chonnam National University as a professor of the mechanical design engineering. His research interests include the NDE using the guided waves, acoustic emissions, signal processing and backup bearing design for high-speed energy storage systems.