

첩릿변환을 이용한 배관 결함 특성 규명

Characterization of Pipe Defects in Torsional Guided Waves Using Chirplet Transform

김 정 업* · 박 경 조†
Chung-Youb Kim and Kyung-Jo Park

(Received June 18, 2014 ; Revised August 8, 2014 ; Accepted August 8, 2014)

Key Words : Mode Separation(모드분리), Chirplet Transform(첩릿변환), Reflection Coefficient(반사계수), Defect Characterization(결함 특성규명), 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, which is able to separate the individual modes from dispersive and multimodal waveform measured with the magnetostrictive sensor, and to estimate the time-frequency centers and individual energies of the reflection, which would be used to locate and characterize defects. The reflection coefficients are calculated using the modal energies of the separated mode. Results from experimental results on a carbon steel pipe are presented, which show that the accurate and quantitative defect characterization could become enabled using the proposed technique.

1. 서 론

반사계수는 배관에 존재하는 결함을 정량적으로 특성화 할 수 있는 개념으로 현재 배관 유도과검사에 널리 사용되고 있는 방법이다. 관련된 주제에 대한 연구도 실험적 방법이나 유한요소 방법 모두 활발히 진행되고 있다. 일례로 Alleyne 등⁽¹⁾과 Demma 등⁽²⁾은 각각 L(0,2) 종파 모드와 T(0,1) 비틀림 모드를 배관에 입사하였을 때 결함에서의 반사 신호의 크기는 결함의 원주방향 길이와 반경 방향 두께의 선형함수로 표현할 수 있음을 보였

다. Bai 등은 효과적인 수치해석 방법을 적용하여 3차원 배관의 반사 신호 해석에서 원주방향 결함의 길이와 깊이가 배관의 산란 특성에 어떤 영향을 미치는지 해석하였다⁽³⁾. 최근에 Carandente와 Cawley⁽⁴⁾는 다양한 형상을 갖는 3차원 결함에 T(0,1) 비틀림 모드를 입사하여 결함에서 반사된 특성을 살펴보았는데 그 결과 반사계수의 최대값은 원주방향 길이에 선형으로 비례하지만 결함의 형상과는 무관함을 발견하였다.

유도과시험에서 비틀림 모드를 가진하기 위해 자왜트랜스듀서(magnetostrictive transducer)가 널리 사용되고 있는데, 이 트랜스듀서는 압전트랜스

† 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

* Department of Mechanical Design Engineering at Chonnam National University

‡ Recommended by Editor SungSoo Na

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

듀서에 비해 곡면에 적용이 용이하고 구조가 간단하며 가격이 저렴하다는 장점이 있고, 전자기음향 트랜스듀서(EMAT)에 비해 더 큰 진폭의 유도초음파를 발생시킬 수 있다는 장점이 있다⁽⁵⁾. 그러나 자왜트랜스듀서는 하나의 연속된 신호변환 요소 즉 상자성 띠(ferromagnetic strip)를 배관에 원주방향으로 부착하여 비틀림 모드를 가진하고 반사된 신호를 측정하는 장치로, 이러한 구조를 갖는 신호변환기를 이용하면 결함에서 반사된 신호로부터 개별 모드를 분리하기 어렵고, 반사계수를 정량적으로 파악하기 어렵다는 단점을 갖는다.

한 번의 측정에 의해 얻은 신호에서 개별 유도파 모드들을 분리하기 위해 Huang 등은 실험적 모드분해 방법을 시도하였지만⁽⁶⁾, 불행하게도 훌륭한 결과를 얻을 수 없었는데 그 이유는 동일한 주파수 대역 내에 다중 모드들이 존재하고 시간적으로 서로 교차하고 있기 때문이다. 적응 칩릿변환(adaptive chirplet transform) 방법도 개발되어 개별 모드 분리에 효과적이라는 것이 증명되었는데 이 방법은 다중 모드 신호로부터 소위 칩릿이라는 시간-주파수 원자(atom)를 분리해내고 분리된 모드의 에너지를 정량화 할 수 있는 방법이다⁽⁷⁾. Raghaven과 Cesnik⁽⁸⁾은 칩릿 정합추적과 모드 상관관계를 이용하여 서로 중첩되는 다중 모드 신호를 분리하는 새로운 방법을 제안하였다.

이 중 칩릿변환은 웨이블릿변환(wavelet transform)과 STFT(short time Fourier transform) 모두를 일반화한 개념으로, 이를 이용하여 특정한 순간 주파수와 군속도를 갖는 신호에서 개별 모드 성분을 추출할 수 있다. 이 연구에서는 선행연구⁽⁹⁾를 바탕으로 실험적 연구를 통해 칩릿변환을 이용하여 결함의 크기를 정량적으로 판별할 수 있음을 보이고자 한다. 이를 위해 먼저 결함에서 반사된 신호를 얻기 위해 자왜센서를 배관에 부착하여 다양한 크기의 결함들로부터 반사된 신호를 측정하였다. 개발된 칩릿변환 알고리즘을 실험 신호에 적용하여 분산성을 갖는 신호로부터 개별 모드를 분리하고, 분리된 모드의 모드에너지를 이용하여 반사계수를 계산한다. 그리고 최종적으로 원주방향 길이의 변화에 따른 각 모드들의 반사계수 변화로부터 결함의 크기를 정량적으로 정확하게 판별할 수 있음을 보인다.

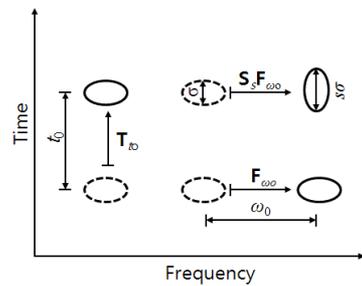
2. 칩릿변환

칩릿변환은 시간-주파수 표현법을 일반화시킨 개념으로 Mann과 Haykin에 의해 도입되었다⁽¹⁰⁾. 기저함수(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.

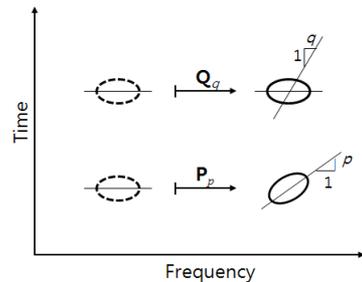
칩릿변환의 표준적인 정의는 식 (1)과 같이 기저함수 $g(t)$ 와 신호 $x(t)$ 사이의 내적에 의해 정의될 수 있다.

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

여기서 *는 공액복소수를 나타낸다. 기저함수 $g(t)$ 와



(a) STFT and wavelet transform



(b) Chirplet transform

Fig. 1 Representation of time-frequency atoms

기저함수의 후리에 변환 $G(\omega)$ 는 식 (2)와 같이 칩 신호 군에 속해 있다.

$$G_{t_o, \omega_o, s, p, q}(\omega) = T_{t_o} F_{\omega_o} S_s Q_q P_p H(\omega) \tag{2}$$

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

여기서 T_{t_o} , F_{ω_o} , S_s , Q_q , P_p 는 연산을 수행하는 연산자들이다⁽⁷⁾.

시간-주파수 영역에서 매개변수 t_o, ω_o, s, q, p 에 의해 특정된 위치에 집중되어 있는 신호 성분은 칩릿변환을 통해 추출할 수 있다. 스펙트로그램, 스칼로그램과 마찬가지로 칩릿변환의 에너지 분포는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

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

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

신호를 분해하여 가중치를 갖는 모드들의 합 형태로 표현하기 위해 Park 등은 최대가능추정방법을 사용하였다⁽⁹⁾. 이 방법은 정합추적과 유사하게 시간 영역에서의 신호를 분리된 형태로 나타낼 수 있도록 만들어준다. 그렇지만 칩함수의 매개변수를 이산화(discretize)하는 것이 아니라 추정하기 때문에 정합추적과 달리 함수사전(dictionary)에 포함된 함수의 수가 무한대라는 특징을 갖는다. 최대가능추정방법을 사용할 경우 계산시간이 과도하게 걸리는 단점이 있으므로 칩 매개변수를 추정할 수 있는 차선(suboptimal)의 추정자를 제안하고 칩함수를 추정하는 새로운 방법을 제안하였다. 이 논문에서는 이 방법을 사용하여 분산성을 갖는, 다중 모드를 포함하고 있는 실험신호를 개별 모드로 분리하고자 한다.

이 방법의 계산과정은 다음과 같다.

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

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

3. 실험 결과

제안된 칩릿변환 알고리즘의 효용성을 입증하기 위해 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 배관은 보어 직경 25.4 mm, 두께 1.6 mm, 길이 2 m인 강관이다. 실험장치 및 구성은 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 실험의 목적은 원주방향 결함의 원주방향 크기를 점차 증가시켰을 때 결함에서 반사되는 신호를 측정하고자 하는 것이다. 결함은 노치 형태로 가공하였는데, 노치는 직경 1.5 mm 드릴 커터를 이용하여 배관 끝단에서 1 m 되는 곳에 가공하였다. 커터 축의 방향은 배관의 축방향에 일치시켰으며 노치는 배관을 축방향에 대해 회전시켜서 길이를 확장하였다. 가공된 노치의 깊이는 배관 두께의 절반에 해당하고, 원주방향 길이는 배관 전체 원주의 5, 10, 20, 30, 40, 50, 75, 90, 100 %로 확장시켜 가며 변화시켰다. 배관을 지지하기 위해 V자 강철 블록을 사용하였는데 이는 이전의 연구결과로부터 지지부에서의

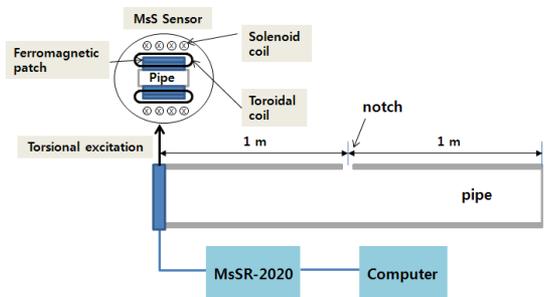
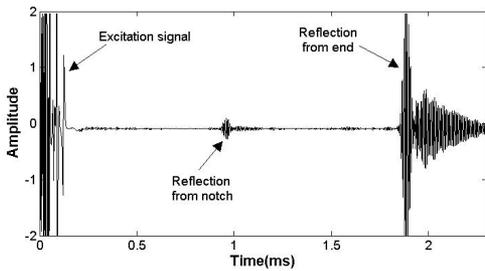


Fig. 2 Schematic diagram for experimental setup

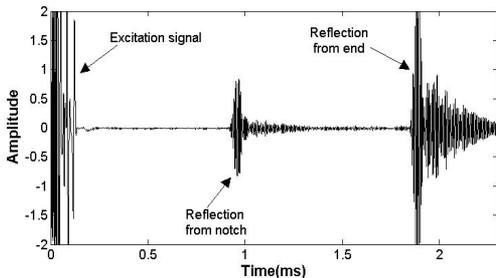
반사를 최소로 만들어 주는 구조물이라고 알려져 있기 때문이다.

비틀림 모드 가진 및 수신을 위해 교차코일(crossed-coil) 구조를 갖는 자왜센서를 사용하였고⁽¹¹⁾, 측정 장비는 미국 SwRI사에서 개발한 MsSR-2020 장비를 사용하였다. 이 장비는 자왜 또는 자기변형(magnetostriction) 현상을 이용하여 재료 내에 초음파를 발생시키고 그 역으로 반사된 신호를 감지할 수 있는 장비이다. 이 장치를 이용하여 원통형 구조물의 반사 신호를 측정할 경우, 배관의 원주를 자왜 특성이 우수한 상자성 코발트 스트립(cobalt strip)에 토로이달 코일(toroidal coil)을 감고 배관 원주방향으로 부착한 다음 솔레노이드 코일(solenoid coil)에 자장을 가하면 Wiedemann 효과에 의해 비틀림 모드가 발생하게 된다. 실험에서는 중심주파수 128 kHz인 3사이클 톤버스트(tone-burst)를 입사하여 비틀림 모드를 가진하였고, 가진에 사용된 동일 신호변환기(transducer)를 이용하여 반사 신호를 수신하는 펄스-에코(pulse-echo) 방식을 채택하였다.

노치의 깊이가 0.8 mm(배관 두께의 절반)이고 원주방향 길이가 배관 전체 원주의 20, 50 %일 때 결함에서 반사된 신호를 각각 Fig. 3(a), (b)에 나타내



(a) Notch extended over 20 % of circumference



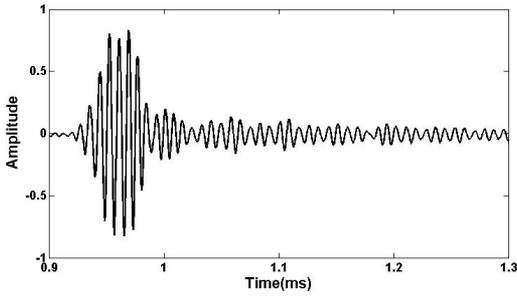
(b) Notch extended over 50 % of circumference

Fig. 3 Time traces of the reflection signal

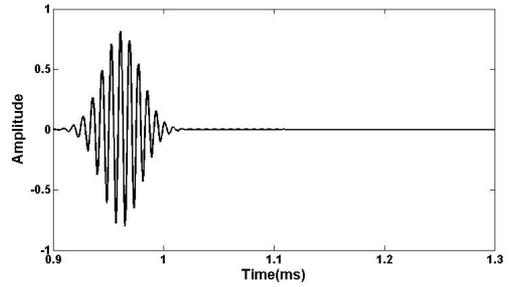
었다. 측정시간을 충분히 길게 설정하였으므로 한번의 측정에 의해 노치 및 배관 끝단에서의 반사 신호를 동시에 측정할 수 있었다. 실험결과로부터 원주방향 길이가 원주의 50 %일 때 노치에서의 반사 신호의 크기가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 반사 신호의 크기는 원주방향 길이가 작아질수록 감소한다는 것도 알 수 있다. 두 경우 모두 배관 끝단에서의 반사 신호는 매우 크게 나타난다는 사실도 확인할 수 있다.

원주방향 50 % 결함에서 반사된 신호의 시간 신호와 이에 대한 스펙트로그램을 Fig. 4에 나타내었다. 스펙트로그램은 최대값에 대한 상대 크기인 dB 단위를 사용하여 색깔로 표시하였다. Fig. 4(b)에서 STFT기법을 사용하면 결함에서 반사된, 다중 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. 동일한 반사 신호에 대해 첩릿변환을 이용하여 구한 스펙트로그램을 Fig. 4(c)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 확실히 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⁽⁹⁾.

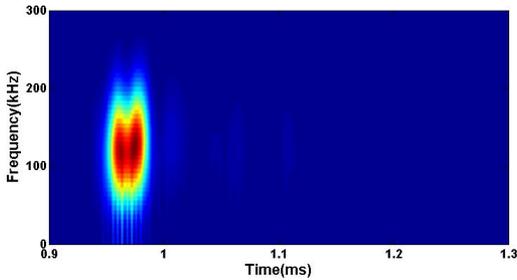
첩릿변환을 이용하여 결함에서 반사된 신호로부터 분리한 T(0,1), F(1,2), F(2,2) 모드의 시간 신호를 각각 Fig. 5(a), (b), (c)에 나타내었다. T(0,1) 모드의 진폭이 F(1,2), F(2,2) 모드보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있으며 시간 영역에서 신호의 퍼짐 현상도 적게 나타나는 것을 알 수 있다. 신호의 퍼짐 현상은 F(2,2) 모드가 가장 심한데 이는 분산선도에서 알 수 있듯이 이 모드의 군속도가 주파수에 따라 크게 변하는 성질 즉, 분산성이 가장 심하기 때문이다. 이상의 결과로부터 제안된 첩릿변환 알고리즘을 이용하여 결함 반사 신호에 포함되어 있는 개별 모드들을 정확하게 분리해 낼 수 있으며 이로부터 결함의 위치를 정확하게 파악할 수 있음을 알 수 있다.



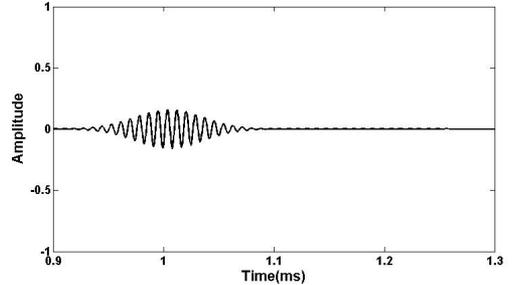
(a) Time traces



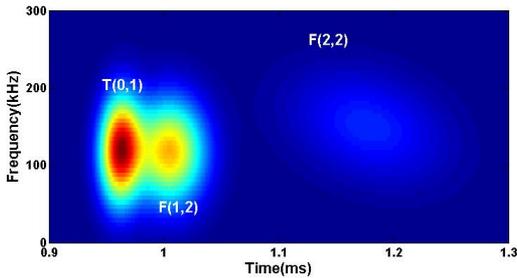
(a) T(0,1)



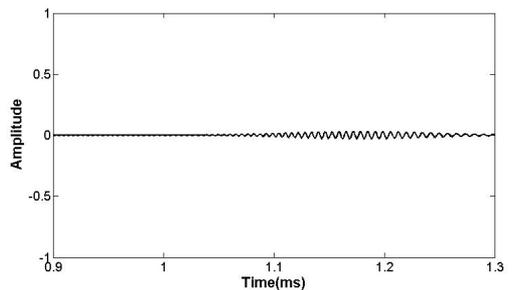
(b) Spectrogram using STFT



(b) F(1,2)



(c) Spectrogram using chirplet transform



(c) F(2,2)

Fig. 4 Time traces and spectrogram of the signal reflected from the defect

결함의 위치는 결함에서 반사된 신호가 신호변환기에 도달한 시간을 측정하여 알 수 있지만 결함의 크기를 정량화하는 것은 매우 어려운 일이다. 반사계수를 이용하여 결함에서 반사된 신호의 진폭과 결함 크기 사이의 상관관계를 규명하려는 시도도 이와 같은 결함 크기의 정량화 수단 중의 하나이다. 반사계수는 입사 신호의 진폭에 대한 반사 신호의 진폭 비로 정의된다. 진폭은 시간 영역에서 피크-피크 측정치로 단순하게 구하거나⁽¹²⁾, 반사계수 스펙트럼의 최대값으로 구하는 방법⁽⁴⁾ 등이 있다. 그러나 Fig. 5에 나타난 각 모드들의 에너지를 구한 결과를 살펴보면 Fig. 6과 같이 넓은 주파수 범위에 걸쳐 나타

Fig. 5 Waveforms separated by using chirplet transform

나는 것을 확인할 수 있다. 특히 F(2,2) 모드 경우 에너지 분포선도에 뚜렷한 피크가 나타나는 것이 아니라 넓은 주파수 범위에 걸쳐 모드의 에너지가 분포하는 것을 알 수 있다. 따라서 단순히 진폭의 최대값만을 고려하여 반사계수를 계산하고 이를 이용하여 결함의 크기를 정량적으로 파악하는 것은 실제와 많은 차이를 보일 수 있다.

이 논문에서는 반사계수를 입사 모드의 에너지에 대한 반사 모드의 에너지 비로 정의한다. 각 모드의 에너지는 첩릿변환을 이용해 분리한 신호의 에너지 스펙트럼 밀도함수를 구하고 이 스펙트럼을 주파수에 대해 적분하여 구하였다. 주파수 128 kHz에서

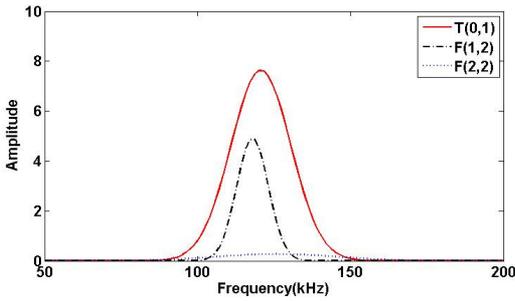


Fig. 6 Spectra for the separated waveforms

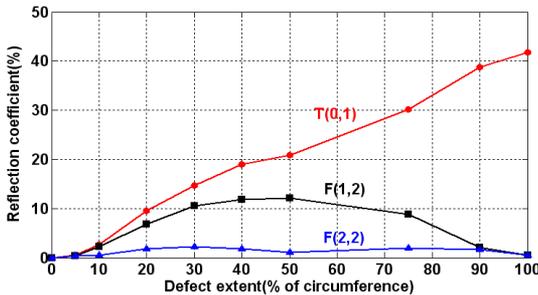


Fig. 7 Reflection coefficients for a half wall thickness notch at 128 kHz

구한 각 모드의 반사계수를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 T(0,1) 모드의 반사계수는 결함의 원주방향 길이에 거의 선형으로 비례한다는 것을 알 수 있다. 이는 진폭의 최대값을 고려하여 반사계수를 구한 결과와도 일치하는 현상이다⁽²⁾. 다만 진폭의 최대값을 이용한 경우에 비해 각 원주방향 길이에서 반사계수가 크고 직선에서 벗어난 정도도 증가하는데, 이는 일정 대역의 주파수에 분포하고 있는 모드의 에너지를 모두 더했기 때문이라고 생각된다⁽¹³⁾. 즉 입사 신호의 주파수 대역이 반사 신호의 주파수대역보다 상대적으로 좁기 때문에, 반사계수를 모드 에너지의 비로 계산할 경우가 진폭의 최대값을 고려한 경우에 비해 상대적으로 큰 값을 갖게 된다.

모드 F(1,2)의 반사계수는 정류 반정현파(rectified half-sine) 형태를 가지며 F(2,2) 모드의 반사계수는 정현파 형태를 갖는다는 것을 알 수 있다. 실험결과로부터 구한 반사계수는 직관적인 예측과도 일치하는 것을 확인할 수 있다. 즉 결함이 없거나 축대칭 결함을 가질 경우(100 % 원주방향 결함) 횡모드인

F(1,2), F(2,2) 모드의 반사는 나타나지 않아야 하는데 반사계수의 계산결과에서 이를 확인할 수 있다. 또한 비축대칭 특성이 가장 심한 50 % 원주방향 결함을 가질 때 F(1,2) 모드의 반사가 가장 크게 나타나야 하는데 Fig. 7의 결과로부터 결함의 원주방향 길이가 원주의 50 %일 때 이 모드의 반사계수가 가장 크게 나타나는 것도 확인할 수 있다.

5. 결 론

이 논문에서는 선행연구에서 제안한 칩릿변환 방법의 응용 가능성 및 유용성을 입증하기 위해 자왜 센서를 이용한 유도파실험을 수행하였고, 실험결과를 제안된 칩릿변환을 이용하여 분석하였다. 분석결과로부터 칩릿변환에 의해 구한 반사계수를 이용하여 결함의 특성을 정량적으로 정확하게 파악할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 기존의 STFT기법으로는 탐지가 어려웠던 횡모드도 정확하게 찾아내는 것을 확인할 수 있었다. 이로부터 개발된 칩릿변환을 이용하여 분산성을 갖는 다중 모드 신호에서 개별 유도파 모드를 정확하게 추출할 수 있음을 확인할 수 있었다.

제안된 방법은 기존의 STFT방법에 비해 시간-주파수 분해능이 우수하고 분산성이 심한 다중 모드를 개별 모드로 정확하게 분리할 수 있을 뿐만 아니라, 2차원 FFT와 같이 여러 위치에서 신호를 측정해야 하는 단점도 갖고 있지 않다. 따라서 자왜센서를 이용한 유도파 시험에서 결함의 크기를 정량적으로 파악할 수 있는 유용한 방법이 될 것으로 판단된다.

후 기

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

References

- (1) Alleyne, D., Lowe, M. and Cawley, P., 1998, The Reflection of Guided Waves from Circumferential Notches in Pipes, Transaction of ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 65, No. 3, pp. 635~641.

(2) Demma, A., Cawley, P., Lowe, M., Roosenbrand, A. G. and Pavlakovic, B., 2004, The Reflection of Guided Waves from Notches in Pipes: a Guide for Interpreting Measurements, *NDT & E International*, Vol. 37, No. 3, pp. 167~180.

(3) Bai, H., Shah, A. H., Popplewell, N. and Datta, S. K., 2001, Scattering of Guided Waves by Circumferential Cracks in Steel Pipes, *Transaction of ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 68, No. 4, pp. 619~631.

(4) Carandente, R. and Cawley, P., 2012, The Effect of Complex Defect Profiles on the Reflection of the Fundamental Torsion Mode in Pipes, *NDT & E International*, Vol. 46, No. 3, pp. 41~47.

(5) Lee, J. K., Kwon, Y. E., Lee, H. S., Seung, H. M., Kim, K. Y., Lee, J. K., Kim, H. W., Lee, H. C. and Kim, Y. Y., 2014, Development and Application of Phased Array System for Defect Imaging in Plate-like Structures, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 123~130.

(6) Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zhang, Q., Yen, N., Tung, C. C. and Liu, H. H., 1998, The Empirical Mode Decomposition and Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis, *Proceeding of Royal Society of London, Series A*, Vol. 454, No. 1971, pp. 903~995.

(7) Kuttig, H., Niethammer, M., Hurlbauss, S. and Jacobs, L. J., 2006, Model-based Analysis of Dispersion Curves Using Chirplets, *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 119, No. 4, pp. 2122~2130.

(8) Raghaven, A. and Cesnik, C., 2007, Guided-Wave Signal Processing Using Chirplet Matching Pursuits and Mode Correlation for Structural Health Monitoring, *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 2, pp. 355~366.

(9) Kim, Y. W. and Park, K. J., 2014, Mode Separation in Torsional Guided Waves Using Chirplet Transform, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 24, No. 4, pp. 324~331.

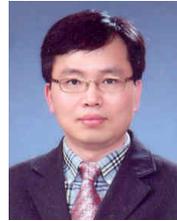
(10) Mann, S. and Haykin, S., 1995, The Chirplet Transform: Physical Considerations, *IEEE Transactions*

on Signal Processing, Vol. 43, No. 11, pp. 2745~2761.

(11) Kim Y. G., Moon, H. S., Park, K. J. and Lee, J. K., 2011, Generating and Detecting Torsional Guided Waves Using Magnetostrictive Sensors of Crossed Coils, *NDT & E International*, Vol. 44, No. 2, pp. 145~151.

(12) Lowe, M., Alleyne, D. and Cawley, P., 1998, The Mode Conversion of a Guided Wave by a Part-circumferential Notch in a Pipe, *Transaction of ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 65, No. 3, pp. 649~656.

(13) Lowe, M. and Cawley P., 2006, Long Range Guided Wave Inspection Usage- Current Commercial Capabilities and Research Directions, Imperial College London, available at <http://www3.imperial.ac.uk/pls/protallive/docs/1/55745699.pdf>



Chung-Youb Kim received the B.S. degree in Dept. of Mechanical Engineering from Korea 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 fatigue strength evaluation of mechanical structures and thin film materials.



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.