

# 비틀림 유도파를 이용한 배관 축방향 결함 특성 규명

## Characterization of Axial Defects in Pipeline Using Torsional Guided Wave

김영완\*·박경조†  
Young-Wann Kim and Kyung-Jo Park

(Received March 6, 2015 ; Revised May 12, 2015 ; Accepted June 5, 2015)

**Key Words** : Mode Separation(모드분리), Chirplet Transform(칩릿변환), Torsional Mode(비틀림 모드), Axial Defect(축방향 결함), Arrival Time(도달시간)

### ABSTRACT

In this work we use 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. The mode decomposition technique is also used to estimate the time-frequency centers and individual energies of the reflection, which would be used to locate and characterize axial defects. The arrival times of the separated modes are calculated and the axial defect lengths can be evaluated by using the estimated arrival time. Results from an experiment on a carbon steel pipe are presented and it is shown that the accurate and quantitative defect characterization could become enabled using the proposed technique.

### 1. 서 론

유도파(guided waves)는 현재 비파괴검사의 중요한 수단으로 자리 잡게 되었으며, 많은 기술적 진보에 힘입어 석유화학, 철강, 발전설비에 쓰이는 배관의 검사에 자주 이용되고 있다<sup>(1~4)</sup>. 그러나 결함을 발견해도 그 크기를 정량적으로 평가하거나 이로 인한 배관의 위험성을 파악하는 것은 아직도 많은 연구가 필요한 분야라고 할 수 있는데, 그 이유는 결함에서 반사된 신호는 여러 신호들이 혼재되어 존재하는 매우 복잡한 양상을 갖기 때문이다<sup>(5)</sup>.

배관에서 발생하는 결함 중에서 특히 원주방향 단면적의 변화가 작은 축방향 결함의 경우 결함의 존재를 파악하기조차 어렵다. 원주방향으로 전파하

는 유도파는 축방향 결함에 민감하다고 알려져 있지만<sup>(6,7)</sup>, 이러한 유도파를 이용하여 유도파검사를 수행하면 검사에 소요되는 시간이 길어진다. 이는 원주방향 파동은 축방향 파동에 비해 축방향 파장이 짧기 때문에 배관 전체를 검사하기 위해서는 신호변환기를 옮겨가며 측정을 수행해야 하기 때문이다.

비틀림 유도파(torsional wave)를 이용하여 축방향 결함을 탐지하려는 시도도 꾸준히 진행되고 있다. 비틀림 유도파는 축방향으로 전파되고 입자의 변위는 전파 방향에 수직하기 때문에 축방향 결함에 민감하고 장거리 배관 탐사에 유리하다. Liu 등<sup>(8)</sup>은 실험을 통해 비틀림 유도파가 원주방향 결함뿐만 아니라 축방향 결함검출에도 유용함을 입증하였다. Kwun 등<sup>(9)</sup>은 축방향 결함의 깊이가 배관 두께의 70% 이상일 경우 비틀림 유도파에 의해 결함검출

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Design Engineering at Chonnam National University  
E-mail : kjpark40@jnu.ac.kr

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

‡ Recommended by Editor Il Kwon Oh

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

이 가능함을 보였다. Ratassepp 등<sup>(10)</sup>은 결함의 축방향 길이와 깊이, 가진주파수, 원주방향 길이 등이 첫 번째 비틀림 모드의 산란에 미치는 영향을 분석하였다. Fletcher 등<sup>(11)</sup>은 집중유도파(focused guided waves)를 이용하여 축방향 결함에 의한 반사계수의 민감도를 2~4배 정도 증가시킬 수 있음을 보였다. Kim 등은 자왜피치형 신호변환기(magnetostrictive patch transducer)를 이용하여 비틀림파를 가진하고 반사된 신호를 분석하여 축방향 결함을 검출할 수 있음을 보였고 이를 통해 종파보다 비틀림파가 축방향 결함검출에 유리함을 보였다<sup>(12-14)</sup>.

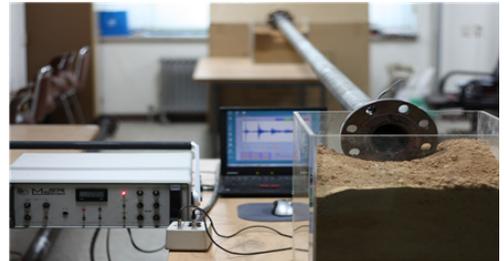
축방향 결함은 유도파가 반사되는 지점이 두 곳 이므로 전면 끝단(front edge)와 후면 끝단(rear edge)에서 반사되는 신호의 시간차를 측정하면 결함의 축방향 길이를 구할 수 있다. 그러나 측정된 신호에는 두 끝단에서 반사된 신호가 중첩되어 있으므로 이를 분리할 수 있는 신호해석 방법이 절대적으로 필요하다고 할 수 있다. 분리된 모드를 이용하여 결함의 축방향 길이뿐만 아니라 원주방향, 반경방향 크기도 알 수 있으므로, 결함의 특성을 규명하기 위해서는 모드분리가 매우 중요하다는 사실을 알 수 있다. Tse와 Wang<sup>(15)</sup>은 정합추적(matching pursuit) 기법을 이용하여 모드를 분리하는 방법을 개발하고 이를 이용하여 결함의 축방향 길이를 정확하게 추정할 수 있음을 보였다. 그러나 실험을 위해 가공된 결함의 원주방향 크기가 원주의 100% 즉, 원주와 동일한 축대칭 결함이므로 실제 축방향 결함과는 모드가 반사되는 양상이 매우 다르다. 실제 축방향 결함의 경우 원주의 일부분에만 결함이 존재하는 비축대칭 결함이 대부분이고, 이 경우 모드변환(mode conversion)에 의해 휨파(flexural wave)와 같은 비축대칭 모드가 발생하게 되어 측정된 신호의 모드분리가 어려워지는 문제점이 발생한다.

이 논문에서는 배관에 비축대칭 축방향 결함이 존재할 때 결함에서 반사된 신호로부터 모드를 분리하고, 분리된 모드를 이용하여 결함의 축방향 길이 및 원주방향 크기를 추정할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 이를 위해 먼저 자왜센서를 이용하여 실험을 수행하고, 측정된 신호를 선행 연구<sup>(16,17)</sup>에서 개발한 첩릿변환(chirplet transform)을 이용하여 모드를 분리한다. 그리고 분리된 모드들의 도달 시간차를 계산하여 축방향 길이를 구하고, 각 모드들의

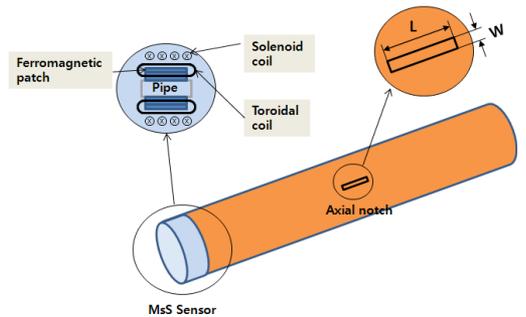
모달에너지 비를 이용한 반사계수를 구하여 결함의 원주방향 크기도 구할 수 있음을 보이고자 한다.

## 2. 축방향 결함 실험

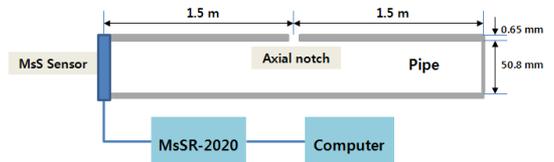
축방향 결함에 의한 유도파 반사신호를 측정하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 배관은 보어 직경 50.8 mm, 두께 0.65 mm, 길이 3 m 인 강관이다. 실험장치 및 구성은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 실험의 목적은 결함의 원주방향 크기는 일정하게 유지하고 축방향 길이만을 점차 증가시켰을 때 결함에서 반사되는 신호를 측정하고자 하는 것이다. 결함은 노치 형태로 가공하였는데, 노치는 3 mm 커터가 장착된 밀링머신을 이용하여 배관 끝단에서 1.5 m 되는 곳에 가공하였다. 가공된 노치의 깊이는



(a) Photo illustration



(b) Experimental setup for axial notch detection



(c) Schematic diagram for experimental setup

Fig. 1 Experimental setup

배관 두께를 완전히 관통하였으며 원주방향의 길이는 35 mm(원주의 22%)로 고정하고, 축방향 길이를 25, 50, 100, 200 mm로 증가시켜가며 변화시켰다. 배관을 지지하기 위해 V자 강철 블록을 사용하였는데 이는 이전의 연구결과로부터 지지부에서의 반사를 최소로 만들어 주는 구조물이라고 알려져 있기 때문이다<sup>(1)</sup>.

비틀림 모드 가진 및 수신을 위해 교차코일(crossed-coil) 구조를 갖는 자외센서를 사용하였고, 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<sup>(18)</sup>. 실험에서는 중심주파수 128 kHz인 3사이클 톤버스트(tone-burst)를 입사하여 비틀림 모드를 가진하였고, 가진에 사용된 동일 신호 변환기(transducer)를 이용하여 반사 신호를 수신하는 펄스-에코(pulse-echo) 방식을 채택하였다.

두께관통 노치의 원주방향 길이를 원주의 22%로 고정하고 축방향 길이를 변화시켜가며 측정된 신호를 Fig. 2에 나타내었다. 측정시간을 충분히 길게 설정하였으므로 한 번의 측정에 의해 노치 및 배관 끝단에서의 반사 신호를 동시에 측정할 수 있었다. 노치의 축방향 길이는 자외센서가 부착된 방향으로 확장하였으므로 축방향 길이가 증가할수록 결함 반사 시간이 짧아지게 되고, 따라서 축방향 길이가 200 mm일 때 결함 반사신호 도달시간이 25 mm일 때에 비해 약 0.06 ms 빨라진 것을 알 수 있다.

결함에서 반사된 신호의 진폭은 원주방향 단면적 변화율에 비례한다고 알려져 있다<sup>(9)</sup>. 이 논문에서 대상으로 하는 결함의 원주방향 크기는 일정하므로 결함 반사신호의 진폭도 변화가 없을 것으로 예상되고, 이는 Fig. 2의 결과로부터도 확인이 가능하다. 즉, 결함에서 반사된 신호는 도달시간의 차이만 있을 뿐 진폭의 크기는 크게 달라지지 않는다는 것을 알 수 있다. 이를 확인하기 위해 각각의 반사신호에

대한 반사계수(reflection coefficient)를 구하였다. 반사계수는 반사된 신호의 진폭과 결함 크기 사이의 상관관계를 규명하기 위해 도입된 계수로 결함이 없을 때 측정한 배관 끝단 반사신호의 진폭에 대한 결함 반사신호의 진폭 비로 정의된다<sup>(11)</sup>. 각 신호의 스펙트럼을 구한 후 최댓값의 비교를 통해 구한 반사계수를 Fig. 3에 제시하였다. 그림에서 결함의 축방

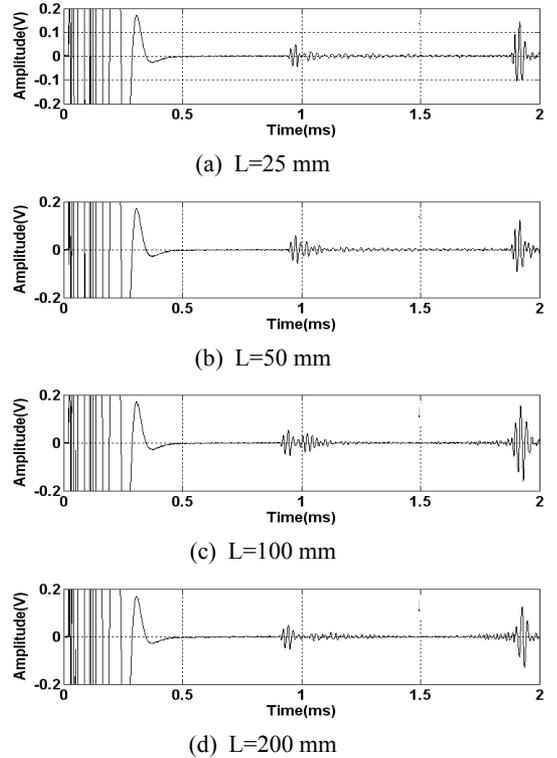


Fig. 2 The measured signals for various notch lengths with width fixed as 35 mm

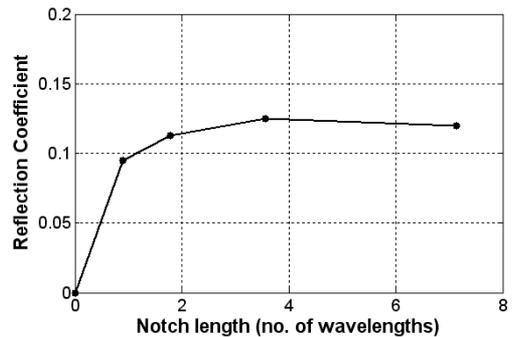


Fig. 3 Reflection coefficients for axial notches

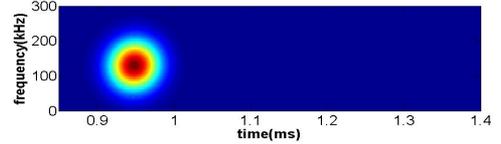
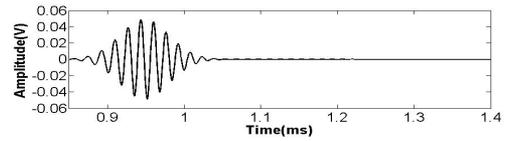
향 길이는 입사모드인 T(0,1) 모드의 파장의 비로 나타내었다. 주파수 128 kHz에서 T(0,1) 모드의 파장은 28 mm이다. 반사계수가 0.1을 중심으로 크게 변화하지 않음을 확인할 수 있다. 즉, 결함의 축방향 길이가 증가해도 반사계수는 단순 증가하거나 단순 감소하지 않으므로 이를 이용하여 결함의 축방향 길이를 정량적으로 파악하는 것은 어렵다는 사실을 확인할 수 있다.

### 3. 축방향 결함길이

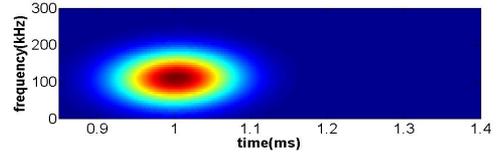
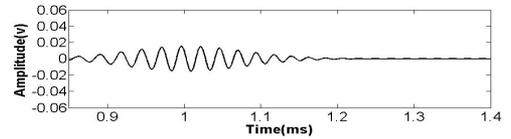
노치로부터 반사된 신호에 포함되어 있는 모드들을 분리하기 위해 첩릿변환을 사용하였다. 첩릿변환은 시간-주파수 표현법을 일반화시킨 개념으로 기저함수(basis function)는 천이(shift), 전단(shear), 확대(scaling) 연산자에 의해 조절이 가능하며, 따라서 에너지밀도를 5차원의 매개변수 공간으로 표현한다. 이때 에너지밀도는 STFT(시간과 공간의 천이)로부터 구한 에너지밀도와 웨이블릿변환(시간 천이와 확대)에 의한 에너지밀도로 구성된다.

신호를 분해하여 가중치를 갖는 모드들의 합 형태로 표현하기 위해 Park 등은 최대가능추정방법을 사용하였다<sup>(13,14)</sup>. 이 방법은 정합추적과 유사하게 시간영역에서의 신호를 분리된 형태로 나타낼 수 있도록 만들어준다. 그렇지만 첩릿함수의 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 첩릿 매개변수를 추정할 수 있는 차선(suboptimal)의 추정자를 제안하고 첩릿함수를 추정하는 새로운 방법을 제안하였다. 이 논문에서는 이 방법을 사용하여 분산성을 갖는, 다중 모드를 포함하고 있는 실험신호를 개별 모드로 분리하고자 한다.

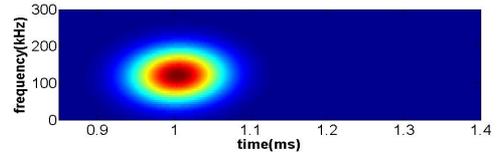
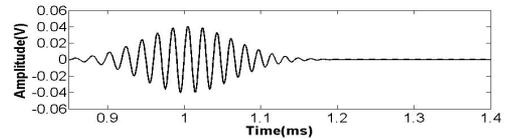
노치의 축방향 길이가 100 mm일 때 측정된 결함 반사신호를 Fig. 4(a)에 나타내었다. 이 신호에 첩릿



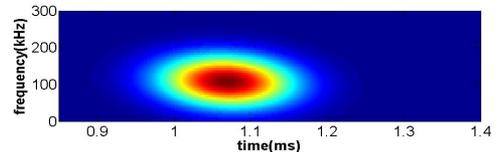
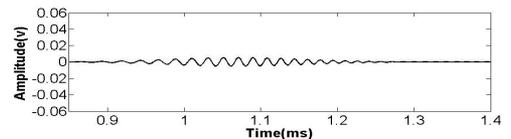
(b) Time traces and spectrogram for T(0,1) mode reflected from front edge



(c) Time traces and spectrogram for F(1,2) mode reflected from front edge

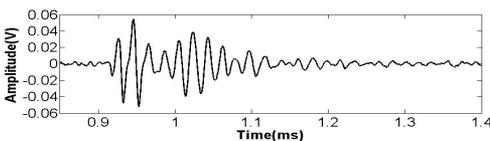


(d) Time traces and spectrogram for T(0,1) mode reflected from rear edge



(e) Time traces and spectrogram for F(1,2) mode reflected from rear edge

Fig. 4 Time traces and spectrogram for the separated modes



(a) Time traces for signals reflected from notch

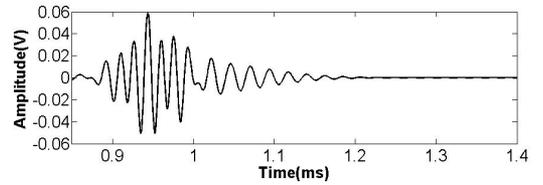
변환을 적용하여 분리한 모드들의 시간신호 및 이에 대한 스펙트로그램을 Fig. 4(b), (c), (d), (e)에 제시하였다. 노치의 전면 끝단은 가진 위치에서 1.5 m 떨어진 곳에 위치하므로 노치의 전면 끝단에서 반사된 파동의 왕복거리는 3 m이고 비틀림 모드의 군속도는 3200 m/s이므로, 0.95 ms에서 나타나는 신호는 전면 끝단에서 반사된 신호 중 첫 번째 비틀림 모드 T(0,1)에 해당됨을 알 수 있다. T(0,1) 모드는 전주 파수영역에서 군속도가 일정한 비분산성 모드로 이 모드에 대한 스펙트로그램에서도 이를 확인할 수 있다. 즉, 다른 모드들에 비해 시간영역에서 신호의 퍼짐 현상이 적게 나타나는 것으로부터 제일 먼저 신호변환기에 도달하는 모드가 T(0,1) 모드임을 알 수 있다.

배관에 가공된 노치는 비축대칭 결함이므로 축대칭 모드인 비틀림 모드를 가진 해도 모드변환에 의해 비축대칭 모드인 휨파(flexural wave)가 발생한다. 대상 파이프에 대한 군속도(group velocity) 분산선도를 Fig. 5에 나타내었다. 이 분산선도로부터 가진 주파수가 128 kHz일 때 모드변환에 의해 발생할 수 있는 모드는 F(1,2) 모드와 F(2,2) 모드임을 알 수 있다. 이 주파수에서 F(1,2) 모드의 군속도는 2900 m/s이므로 1.03 ms에서 나타나는 신호는 노치 전면 끝단에서의 모드변환에 의해 발생하는 F(1,2) 모드임을 알 수 있다. 이 모드는 분산성이 크게 나타나는 모드인데 스펙트로그램의 시간영역에서도 신호가 넓게 퍼져 나타나는 것을 확인할 수 있다. 노치의 원주방향 크기가 작아 F(2,2) 모드는 검출되지 않았다.

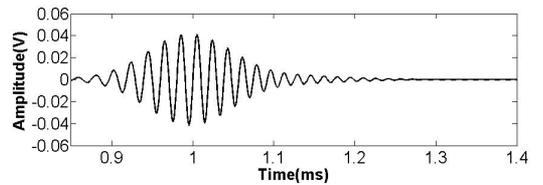
노치의 후면 끝단에서도 결함 반사신호가 발생한다. 노치의 축방향 길이가 100 mm이므로, 비틀림 모드의 경우 0.031 ms 이후에 비틀림 모드가 발생

해야 하지만 실험결과 0.036 ms 이후에 비틀림 모드가 발생하는 것을 확인하였다. 이에 대한 시간신호 및 스펙트로그램은 Fig. 4(d)에 나타난 바와 같다. 후면 끝단에서의 모드변환에 의해 다시 F(1,2) 모드도 발생하는데 이에 대한 그림은 Fig. 4(e)에 나타내었다.

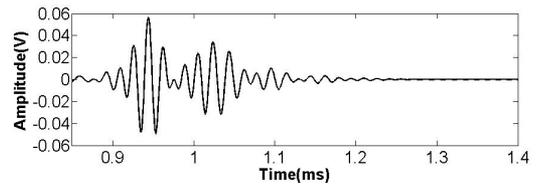
Fig. 4(c)에 제시한 전면 끝단의 휨파와 비슷하게 신호의 퍼짐 현상이 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.



(a) The reconstructed signals reflected from front edge



(b) The reconstructed signals reflected from rear edge



(c) The reconstructed signals reflected from axial notch

Fig. 6 The reconstructed defect reflection signals

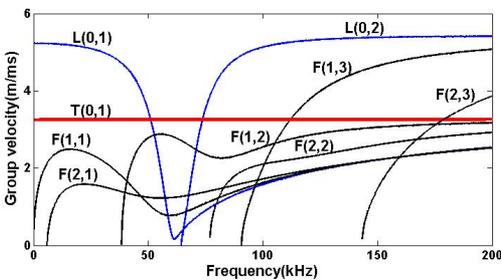


Fig. 5 Group velocity dispersion curves

Table 1 Evaluation results of notch axial length

	Actual length(mm)	Evaluated length(mm)	Relative error(%)
Case 1	25	22.3	-10.8
Case 2	50	53.2	6.4
Case 3	100	112.1	12.1
Case 4	200	221.5	10.7

분리된 모드들을 합성하여 재구성한 노치의 전면 끝단에서 반사된 신호 및 후면 끝단에서 반사된 신호 그리고 두 신호를 합성한 결합 반사신호를 Fig. 6에 제시하였다. 노치의 전면 끝단에서 반사된 신호의 왜곡이 후면 끝단에서 반사된 신호보다 심한데 이는 전면 끝단에서 비축대칭 모드인 F(1,2) 모드가 크게 나타나기 때문인 것으로 해석된다. 전면, 후면 끝단의 신호를 합성하여 재구성한 신호를 원래 측정된 신호와 비교하면 매우 유사한 형태를 갖는다는 것을 알 수 있다. 다만 실제 측정신호에서 나타났던 잡음 신호들이 사라졌기 때문에 상대적으로 신호의 잡음비가 많이 개선된 것을 확인할 수 있다.

노치의 원주방향 크기는 Fig. 3에 제시된 반사계수로부터 확인할 수 있지만 축방향 길이는 분리된 신호의 도달시간(arrival time)으로부터 계산할 수 있다. 이를 위해 전면 끝단에서 반사된 비틀림 모드와 후면 끝단에서 반사된 비틀림 모드의 도달시간을 비교하여 축방향 길이를 계산하였다. 이에 대한 결과를 Table 1에 나타내었다. 평균적으로 10%의 오차 범위 내에서 실제 노치의 축방향 길이를 예측할 수 있었고, 이로부터 첩릿변환을 이용하여 측정된 신호에서 모드를 분리하고, 분리된 모드를 이용하여 결합의 축방향 길이를 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

이 논문에서는 배관에 비축대칭 축방향 결합이 존재할 때 결합에서 반사된 신호로부터 모드를 분리하고, 분리된 모드를 이용하여 결합의 축방향 길이를 추정할 수 있는 방법을 제시하였다.

이를 위해 먼저 선행연구에서 제안한 첩릿변환 방법을 이용하여 결합 반사신호로부터 모드들을 분리하고, 분리된 모드들의 도달시간을 계산하여 결합의 축방향 길이를 추정할 수 있음을 입증하였다. 즉, 결합에서 반사된 신호에는 모드변환에 의해 비축대칭 모드도 포함되어 있지만, 첩릿변환에 의해 축대칭 모드와 쉽게 분리가 가능하고, 분리된 축대칭 모드의 도달시간을 이용하여 결합의 길이를 계산할 수 있음을 보였다.

제안된 방법은 기존의 정합추적 방법에 비해 시간-주파수 분해능이 우수하고 분산성이 심한 다중

모드를 개별 모드로 정확하게 분리할 수 있을 뿐만 아니라, 집속유도파 방법과 같이 여러 위치에서 신호를 측정해야 하는 단점도 갖고 있지 않다. 따라서 자왜센서를 이용한 비틀림 유도파 시험에서 결합의 축방향 크기를 정량적으로 파악할 수 있는 유용한 방법이 될 것으로 판단된다.

#### 후 기

이 연구는 2014년 지식경제부 지원 중화확실비 안전진단센터 사업의 일부 지원에 의해 수행되었음을 밝힙니다.

#### References

- (1) Lowe, M., Alleyne, D. H. and Cawley, P., 1998, Defect Detection in Pipes Using Guided Waves, *Ultrasonics*, Vol. 36, No. 2, pp. 147~154.
- (2) Hirao, M. and Ogi, H., 1999, An SH-wave EMAT Technique for Gas Pipeline Inspection, *NDT & E International*, Vol. 32, No. 3, pp. 127~132.
- (3) 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.
- (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) Satyarnarayan, L., Chandrasekaran, J. and Maxfield, B., 2008, Circumferential Higher Order Guided Waves Modes for the Detection and Sizing of Cracks and Pinholes in Pipe Support Regions, *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 41, No. 1, pp. 32~43.
- (6) Cheong, Y., Lee, D. and Jung, H., 2004, Ultrasonic Guided Wave Parameters for Detection of Axial Cracks in Feeder Pipes of PHWR Nuclear Power Plants, *Ultrasonics*, Vol. 42, No. 8, pp. 883~888.
- (7) Luo, W., Rose, J. L. and Kwun, H., 2005, Circumferential Shear Horizontal Wave Axial-crack Sizing in Pipes, *Research on Nondestructive Evaluation*,

Vol. 15, No. 4, pp. 149~171.

(8) Liu, Z., He, C., Wu, B., Wang, X. and Yang, S., 2006, Circumferential and Longitudinal Defect Detection Using T(0,1) Mode Excited by Thickness Shear Mode Piezoelectric Elements, *Ultrasonics*, Vol. 44, No. 8, pp. e1135~e1138.

(9) Kwun, H., Kim, S. Y., Matsumoto, H. and Vinogradiv, S., 2008, Detection of Axial Cracks in Tube and Pipe Using Torsional Guided Waves, *Review of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 27, No. 1, pp. 193~199.

(10) Ratssepp, M., Fletcher, S. and Lowe, M., 2010, Scattering of Fundamental Torsional Mode at an Axial Crack in a Pipe, *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 127, No. 2, pp. 730~740.

(11) Fletcher, S., Lowe, M., Ratssepp, M. and Brett, C., 2012, Detection of Axial Cracks in Pipes Using Focused Guided Waves, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 31, No. 1, pp. 56~64.

(12) Kim, H. W., Cho, S. H. and Kim, Y. Y., 2011, Analysis of Internal Wave Reflection within a Magnetostrictive Patch Transducer for High-frequency Guided Torsional Waves, *Ultrasonics*, Vol. 51, No. 6, pp. 647~652.

(13) Kim, H. W., Lee, J. K. and Kim, Y. Y., 2013, Circumferential Phased Array of Shear-horizontal Wave Magnetostrictive Patch Transducers for Pipe Inspection, *Ultrasonics*, Vol. 53, No. 2, pp. 423~431.

(14) Kim, H. W., Lee, H. J. and Kim, Y. Y., 2012, Health Monitoring of Axially-cracked Pipes by Using Helically Propagating Shear-horizontal Waves, *NDT & E International*, Vol. 46, No. 2, pp. 115~121.

(15) Tse, P. and Wang, X., 2013, Characterization of Pipeline Defect in Guided-waves Based Inspection through Matching Pursuit with the Optimized Dictionary, *NDT & E International*, Vol. 54, No. 3, pp. 171~182.

(16) 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.

(17) Kim, C. Y. and Park, K. J., 2014, Characterization of Pipe Defects in Torsional Guided Waves Using Chirplet Transform, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 24, No. 8, pp. 636~642.

(18) 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.



**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.