

첩릿변환을 이용한 배관 축방향 결함검출

Detection of Axial Defects in Pipes Using Chirplet Transform

김영완* · 박경조***†

Young-Wann Kim* and Kyung-Jo Park***†

(Received 7 April 2016, Revision received 25 July 2016, Accepted 25 July 2016)

Abstract: The implementation of chirplet transform to locate axially aligned defects in pipes has been investigated. The results are obtained from experiments performed on a carbon steel pipe using magnetostrictive sensors. Chirplet transform is applied to the reflected signal to separate the individual modes from dispersive and multimodal waveform. The separated modes are used to calculate reflection coefficients which would be used to characterize defects. It is found that the reflection from a defect consists of the wave pulses with gradually decaying amplitudes. Also the results show that the reflection coefficient initially increases with the crack length but finally reaches an oscillating regime.

Key Words : Axial Defect, Chirplet Transform, Mode Separation, Reflection Coefficient, Magnetostrictive Sensor

1. 서 론

초음속 유도파(guided wave)를 이용하여 석유나 화학공장의 배관 내부에 다양하게 존재하는 결함을 검출하기 위한 시도가 다양하게 이루어지고 있다.^{1,2)} 그 중 축대칭 모드인 비틀림 모드도 장거리 배관검사에 자주 이용되고 있는데,³⁾ 이는 파동의 구조가 간단하고 비분산(non-dispersive) 특성을 갖기 때문이다. 즉 파동의 형태가 왜곡되지 않고 장거리를 전파할 수 있으며 어떤 깊이의 결함도 검출이 가능한 특성을 갖고 있다.

기본 비틀림 모드(fundamental torsional mode)인 T(0,1) 모드를 이용하여 원주방향 결함의 특성을

조사한 결과 반사계수가 결함의 원주방향 길이에 대략적으로 비례한다는 사실이 밝혀졌다³⁾. 또한 결함의 원주방향 크기가 점점 작아지면 결함검출 가능성도 낮아진다는 사실도 알려졌다. 따라서 원주방향 길이가 매우 작은 슬롯 형태의 축방향 결함은 지금까지 크게 주목을 받아오지 못했다. 그러나 Liu 등⁴⁾은 두께관통 축방향 결함에 대한 반사계수가 동일한 길이의 원주방향 결함에 대한 반사계수보다 15배 크고 반사 신호의 꼬리가 길게 이어진다는 사실을 밝혀냈다. Kwun 등⁵⁾은 이러한 현상이 비틀림 모드와 원주방향 모드의 상호작용에 의한 모드 결합이 원인이라고 주장하였다. Ratssepp 등⁶⁾은 결함의 축방향 길이와 깊이,

*** 박경조(교신저자) : 전남대학교 기계설계공학부
E-mail : kjpark40@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-7221
*김영완 : 전남대학교 기계설계공학부

*** Kyung-Jo Park(corresponding author) : Department of Mechanical Design Engineering, Chonnam National University.
E-mail : kjpark40@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-7221
*Young-Wann Kim : Department of Mechanical Design Engineering, Chonnam National University.

가진주파수, 원주방향 길이 등이 첫 번째 비틀림 모드의 산란에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 Ratassepp 등⁷⁾은 평판의 수평전단파(shear horizontal mode)와 결함의 상호작용에 의해 반사와 회절이 발생하고 이로 인해 파동의 산란이 발생한다고 주장하였다. 비틀림 모드를 가진하기 위해 자왜센서(magnetostrictive sensor)를 주로 이용하는데 많은 연구를 통해 평판의 축방향 결함에 민감하다는 사실이 널리 알려져 있다^{8,9)}.

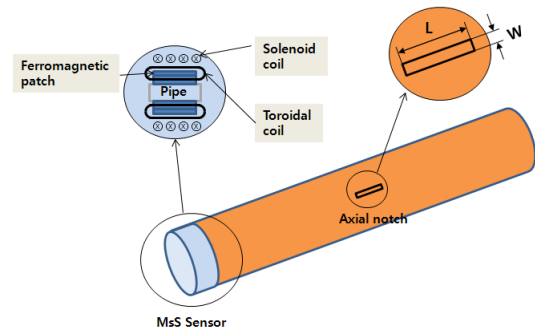
이 논문에서는 슬롯 형태의 축방향 결함에서 반사되는 신호로부터 모드를 분리하고 이를 이용하여 축방향 결함의 특성을 규명하고자 한다. 이를 위해 먼저 자왜센서를 이용하여 축방향 결함에서 반사된 신호를 측정하고 나타나는 신호의 특성을 파악한다. 그리고 측정된 신호를 칩릿변환(chirplet transform)¹⁰⁾을 이용하여 모드를 분리하고, 분리된 모드들의 반사계수를 계산하여 결함의 크기를 정량적으로 파악할 수 있는 방법을 제시한다.

2. 축방향 결함 실험

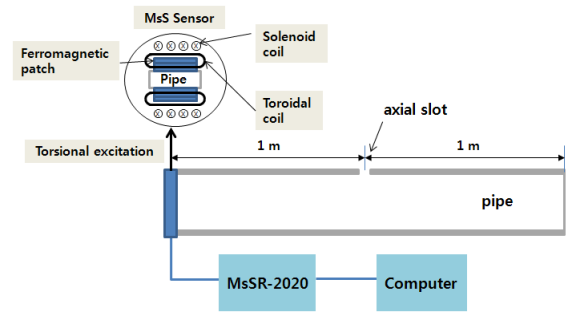
축방향 결함에 의한 유도파 반사신호를 측정하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 배관은 보어 직경 101.6 mm, 두께 3.1 mm, 길이 2 m 인 강관이다. 실험장치 및 구성은 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 실험의 목적은 결함의 원주방향 크기는 일정하게 유지하고 축방향 길이만을 점차 증가시켰을 때 결함에서 반사되는 신호를 측정하고자 하는 것이다. 결함은 슬롯 형태로 가공하였는데, 1.5 mm 커터가 장착된 밀링머신을 이용하여 배관 끝단에서 1 m 되는 곳에 가공하였다. 가공된 슬롯의 깊이는 배관 두께의 80%(2.5 mm)를 유지하였으며, 원주방향 길이는 2.5 mm(원주의 0.17%)로 고정하고, 축방향 길이를 15 mm에서 120 mm까지 15 mm씩 증가시켜가며 변화시켰다.

비틀림 모드 가진 및 수신을 위해 교차코일(crossed-coil) 구조를 갖는 자왜센서를 사용하였고, 측정장비는 미국 SwRI사에서 개발한 MsSR-2020을 사용하였다. 이 장비는 자왜 또는 자기변형 현상을 이용하여 배관에 비틀림파를 가진하고 반사

된 신호를 측정할 수 있는 장비이다¹¹⁾. 실험에서는 중심주파수 128 kHz인 3 사이클 톤버스트(tone-burst)를 입사하여 비틀림 모드를 가진하였고, 가진에 사용된 동일 신호변환기(transducer)를 이용하여 반사 신호를 수신하는 펄스-에코(pulse-echo) 방식을 채택하였다.



(a) Experimental setup for axial notch detection

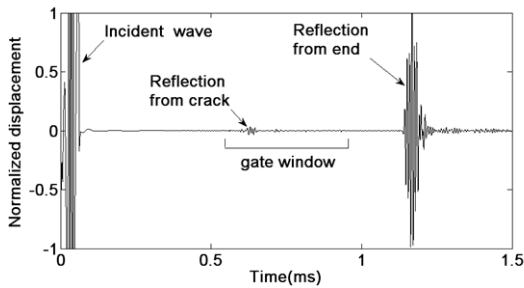


(b) Schematic diagram for experimental setup

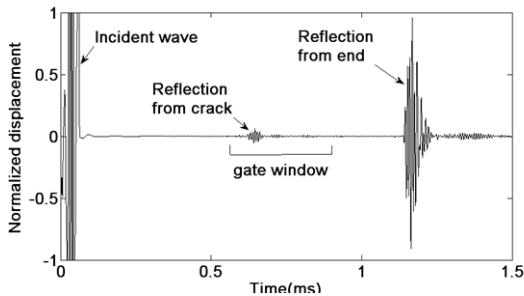
Fig. 1 Experimental setup

축방향 길이가 30, 60 mm일 때 측정된 신호를 Fig. 2에 나타내었다. 측정시간을 충분히 길게 설정하였으므로 한 번의 측정에 의해 노치 및 배관 끝단에서의 반사 신호를 동시에 측정할 수 있었다. 실험 결과는 배관 끝단 반사 신호의 크기로 정규화 하여 나타내었다. 그림으로부터 결함에서 반사된 신호가 일련의 펄스들로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 길이 30 mm의 축방향 결함에서 반사된 신호를 확대하여 나타낸 Fig. 3(a)에서 분명하게 알 수 있다. 그림에 나타낸 펄

스들은 일정한 간격을 유지하며 시간신호에 나타나는데, 그 주기는 T(0,1) 모드가 배관의 원주를 한 바퀴 진행하는데 소요되는 시간과 거의 일치한다. 이러한 현상은 결함에서의 회절 때문인데, 평판에 수평전단파를 입사하여 결함에서의 반사현상을 고찰한 Ratassepp 등⁷⁾의 논문에 자세히 설명되어 있다. 즉, 평판의 결함에서 산란되는 파동은 결함에서 직접 반사되는 파동과 결함 방향으로 수직한 방향으로 발생하는 회절 파동이 중첩되어 나타나게 된다. 이러한 현상이 배관에서도 나타나는데 원주방향으로 진행하는 비틀림파가 축방향 결함과 연속적으로 상호작용하여 에코 형태의 반사현상을 발생하게 되고, 이때 배관의 직경이 충분히 작고 튜버스트의 지속시간이 충분히 길면 반사된 신호들 사이에서 중첩이 발생하여 파동의 보강이나 간섭이 일어난다.



(a) 30 mm axial defect



(b) 60 mm axial defect

Fig. 2 Time traces for a 4 in. pipe with T(0,1) mode incident at 128 kHz

3. 모드분리 및 반사계수

결함의 축방향 길이가 30 mm일 때 측정된 결함 반사 신호를 Fig. 3(a)에 나타내었다. 이 신호에 칩릿변환을 적용하여 모드들을 분리하고 STFT기법을 적용하여 구한 스펙트로그램을 Fig. 3(b)에 나타내었다. 스펙트로그램은 최댓값에 대한 상대 크기인 dB 단위를 사용하여 색깔로 표시하였다. Fig. 3(b)에서 분리된 모드들은 진폭만 다를 뿐 매우 유사한 특성을 보임을 알 수 있다. 즉, 세 모드 모두 중심주파수가 입사 주파수 128 kHz와 일치하고, 모드의 기울기(주파수/시간)도 거의 동일한 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 모드의 기울기가 증가하면 분산성이 증가하는 것으로 알려져 있는데, 세 모드의 분산성은 미약한 수준으로 입사 모드인 T(0,1) 모드와 매우 유사한 특성을 보인다고 할 수 있다. 그러나 결함에서의 반사가 진행될수록 비축대칭 모드인 휨모드(flexural mode)로의 모드변환(mode conversion)이 진행되어 세 번째 모드의 경우 다른 두 모드에 비해 기울기가 증가하여 분산성이 커진 것을 확인할 수 있다.

Table 1 Parameters for the separated signals

Mode	Amp.	Time loc.(ms)	Freq. loc.(kHz)	Chirp rate.(kHz/ms)	Time dur.(ms)
1st	0.814	0.5847	128.6	1.58	0.077
2nd	0.155	0.6756	128.4	-3.79	0.091
3rd	0.027	0.7684	128.8	-7.85	0.116

이러한 사실들은 분리된 모드들의 칩릿 변수들을 나타낸 Table 1에서 확실하게 확인할 수 있다. 입사 T(0,1) 모드가 배관의 원주를 일주하는데 걸리는 시간은 $\pi d/c_g$ 를 이용하여 계산할 수 있는데, 여기서 d 는 배관의 직경, c_g 는 T(0,1) 모드의 군속도(group velocity)이다. 실험에 사용된 배관 경우 $d=101.6$ mm, $c_g=3,420$ m/s 이므로 T(0,1) 모드가 원주를 일주하는데 소요되는 시간은 0.094 ms이다. 이는 처음 두 모드 사이의 시간 간격 0.0959 ms, 나중 두 모드 사이의 간격 0.0963 ms와 거의 동일한 것을 확인할 수 있다. 두 모드 사이의 시간 간격이 약간 크게 나타나는 것은 원주방향 파동이

크랙에서 반사될 때 전파 경로가 길어져 위상 지연(phase delay)이 발생하기 때문인 것으로 추정할 수 있다.

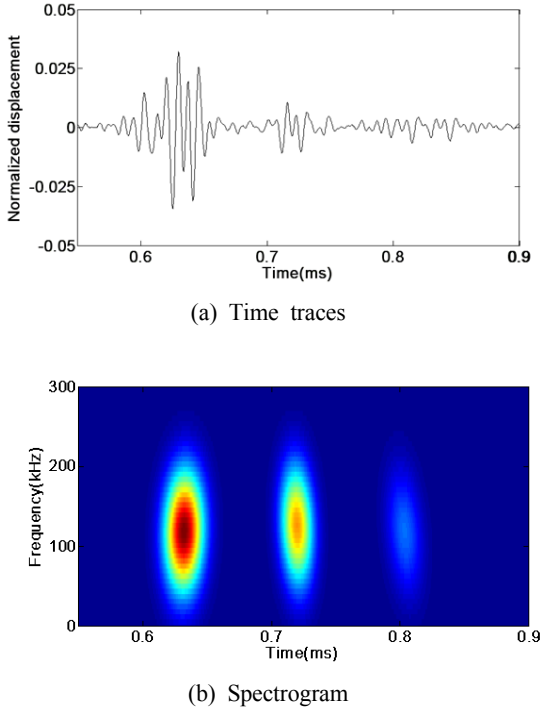


Fig. 3 Time traces and spectrogram for the reflection signal from 30 mm axial defect

첩변화율(chirp rate)은 파동의 시간 진행에 따른 주파수 변화율 파악할 수 있는 변수로 파동의 순간적인 주파수 변화율로 정의된다. 따라서 첩변화율은 파동의 분산성이 증가하면 증가하는 양상을 보인다. 즉 비분산 특성을 갖는 비틀림 모드의 첩변화율은 분산성을 갖는 휨 모드보다 작으며 거의 0에 가깝다¹⁰⁾. Table 1에 보인 세 모드들의 첩변화율은 모두 10 kHz/mm 이하로 그 값이 0에 가까운 것을 확인할 수 있다. 즉 세 모드들은 분산성이 없는 입사 T(0,1) 모드의 특성을 나타낸다고 판단할 수 있다. 다만 반사된 신호가 결함과 연속적으로 상호작용 하면서 첩변화율이 조금씩 증가하는 것도 알 수 있는데, 이는 축대칭 파동이 비축대칭 구조인 결함을 만나면 비축대칭 파동으로

모드 변환되기 때문이다. 비록 결함의 원주방향 길이가 매우 작아(원주의 0.7%) 한 번의 반사에 의해 모드변환이 크게 발생할 가능성은 낮지만, 반사가 반복되면서 작은 양이지만 모드 변환도 매번 발생하여 파동의 비축대칭성 또는 분산성이 증가한다고 할 수 있다.

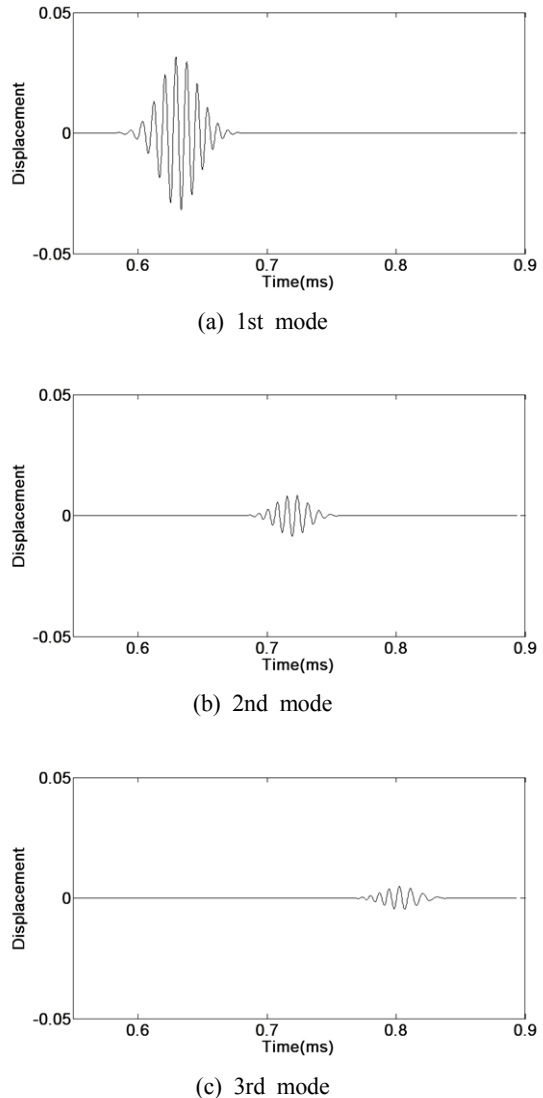


Fig. 4 Time traces for the separated modes

첩변화율을 이용하여 결함에서 반사된 신호로부터 분리한 각 모드들의 시간 신호를 Fig. 4(a),

4(b), 4(c)dp 나타내었다. 축방향 결함에서 반사된 모드들이 정확하게 분리된 것을 확인할 수 있다. 분리된 모드들의 모달 에너지 분포는 Fig. 5와 같다. 모달 에너지는 첫 번째 모드의 에너지로 정규화 하여 나타내었다.

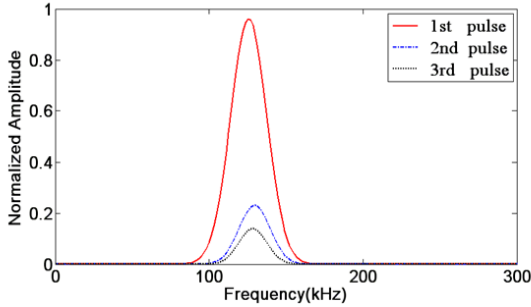


Fig. 5 Spectra of the separated waveforms for the pipe with 30 mm axial crack

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 진폭으로 정의되는데, 이 논문에서는 입사 모드의 에너지에 대한 반사 모드의 에너지 비로 정의한다. 이는 모드의 에너지가 넓은 주파수에 걸쳐 분포하는 경우 단순히 진폭만을 고려하여 반사계수를 구하면 실제 결함의 크기와 정량적으로 차이를 보일 수 있기 때문이다.

결함의 축방향 길이 변화에 따른 반사계수의 크기를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 축방향 길이는 T(0,1) 모드의 파장에 대한 비로 나타내었다. 대상 배관의 경우 T(0,1) 모드의 파장은 48 mm이다. 첫 번째 모드의 반사계수는 0에서 출발하여 결함의 길이가 증가할수록 어느 정도까지는 증가하지만, 그 이후에는 결함의 크기가 증가하여도 오히려 감소하다 몇 번의 증감을 반복한 후 일정한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 이 결과는

평판에 대한 실험결과와 매우 유사한 양상을 갖는데, Ratssepp 등은 축방향 결함의 전면 끝단(front edge)과 후면 끝단(rear edge)에서 반사되는 신호의 간섭 때문에 반사계수의 최대, 최소는 파장의 1/4, 2/4, 3/4, 1, ... 배에서 나타나야 한다고 주장하였다. 즉 전면 반사 신호와 후면 반사신호의 중첩에 의해 파동의 보강과 소멸이 반복되기 때문에 반사계수의 최대, 최소는 $\lambda/4$ (여기서 λ 는 T(0,1) 모드의 파장)의 배수에서 발생할 것으로 예측하였다. 그러나 실험 결과로부터 피크(peak)는 $\lambda/2$ 보다 작은 크기에서 발생하고 골(trough)도 $3\lambda/4$ 보다 작은 크기에서 생기며, 두 번째 피크도 λ 보다 작은 크기에서 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 첫 번째 모드에서 분리할 수 없는 작은 진폭의 비축대칭파가 결함의 표면을 전파하면서 생기는 간섭현상 때문으로 파악할 수 있다.

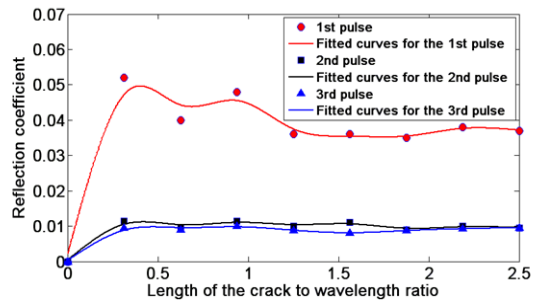


Fig. 6 Reflection coefficients for the axial crack

Fig. 6에서 알 수 있듯이 두 번째, 세 번째 모드의 결함 크기에 따른 반사계수의 변화는 첫 번째 모드의 반사계수 변화와 매우 유사하고, 그 크기만 약 1/4로 감소한 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 5의 모달 에너지 분포 결과와 일치한다. 그러나 두 번째, 세 번째 모드 반사계수의 변화폭은 매우 작고 뚜렷한 최대, 최소값도 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 그 이유는 T(0,1) 모드가 부분적으로 횡모드로 변환되고 변환된 횡모드가 결함의 끝단에서 반사하고 회절하면서 서로 간섭을 일으키기 때문으로 파악된다.

4. 결 론

이 논문에서는 배관에 축방향 결함이 존재할 때 결함에서 반사되는 신호로부터 모드를 분리하고, 분리된 모드를 이용하여 축방향 결함의 특성을 규명할 수 있는 방법을 제시하였다.

이를 위해 먼저 자왜센서를 이용하여 슬롯 형태의 축방향 결함에서 반사되는 신호를 측정하고 분석하였다. 분석 결과 결함에서 반사된 신호가 진폭이 점진적으로 감소하는 일련의 펄스들로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 칩릿변환을 이용하여 결함 반사 신호로부터 모드들을 분리하고, 분리된 모드들의 반사계수를 계산하여 결함의 축방향 길이와의 상관관계를 규명하였다. 즉, 반사계수는 결함 길이가 커지면 따라서 증가하지만 일정한 값에 수렴함을 알 수 있었다.

이로부터 결함 반사 신호에 무시할만한 분산성을 갖는 일련의 모드들이 나타날 때 슬롯 형태의 축방향 결함이 존재한다고 파악할 수 있으며, 결함의 크기는 분리된 첫 번째 모드의 반사계수를 이용하여 정량적으로 파악할 수 있음을 알 수 있었다.

References

1. P. Cawley, M. S. Lowe, D. N. Alleyne and P. Wilcox, 2003, "Practical long range guided waves testing: Application to pipe and rail", *Material Evaluations*, Vol. 61, No. 1, pp. 66-74.
2. K. J. Park, 2014, "Characterization of chemical sludge inside pipes using torsional guided waves", *Journal of The Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 29-35.
3. A. Demma, P. Cawley and M. S. Lowe, 2003, "The reflection of the fundamental torsional mode from cracks and notches in pipes", *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 114, No. 3, pp. 611-625.
4. Z. Liu., C. He, B. Wu, X. Wang and S. Yang, 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.
5. H. Kwun, S. Y. Kim, H. Matsumoto and S. Vinogradiv, 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.
6. M. Ratssepp, S. Fletcher and M. S. Lowe, 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.
7. M. Ratssepp, M. S. Lowe and P. Cawley, 2008, "Scattering of the fundamental shear horizontal mode in a plate when incident at a through crack in the propagation direction of the mode", *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 124, No. 5, pp. 2873-2882.
8. H. Kwun, S. Y. Kim and M. Light, 2003, "The magnetostrictive sensor technology for long range guided wave testing and monitoring of structures", *Material Evaluations*, Vol. 61, No. 1, pp. 80-84.
9. M. Tang, X. Wu, M. Cong and K. Guo, 2016, "A method based on SVD for detecting the defect using the magnetostrictive guided wave technique", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 70, No. 6, pp. 601-602.
10. C. Y. Kim and K. J. Park, 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.
11. Y. G. Kim, H. S. Moon and K. J. Park, 2011, "Generating and detecting torsional guided waves using magnetostrictive sensors of crossed coils. *NDT & E International*, Vol. 44, No. 2, pp. 145-151.