



배관 결함 반사 신호에 미치는 경사각의 영향

Effect of Inclination Angle on Reflection Signal from Defects in Pipes

김정엽* · 박경조**†
 Chung-Yeob Kim* and Kyung-Jo Park**†

(Received 27 March 2018, Revision received 05 June 2018, Accepted 06 June 2018)

Abstract: A quantitative study of the interaction of the T(0,1) torsional mode with oblique defects in a pipe is presented in this paper. A mode decomposition technique employing the chirplet transform is used to separate the multimodal signals reflected from the defects. Reflection signals are obtained from experiments on a carbon steel pipe. The influence of the crack length and inclination angle on the reflection is investigated. Results show that for an oblique crack, the reflection coefficient is linearly dependent on the equivalent circumferential extent of the defect and is independent of the axial length. In addition, it is shown that the coefficients for a steep defect are greater than those for a gentle defect.

Key Words : Inclination Angle, Chirplet Transform, Reflection Signal, Torsional Mode

1. 서 론

초음속 유도파는 결함에 대한 민감도가 우수하고 운전 중 검사가 가능한 장점 때문에 평판이나 배관의 결함검출에 사용될 수 있는 가능성이 크다.^{1,2)} 그러나 복잡한 파동 발생 메카니즘 때문에 유도파가 배관의 결함과 만났을 때 발생하는 현상은 아직 충분히 밝혀지지 않은 상태이다.^{3,4)} 배관의 결함에서 반사된 신호에는 모드변환(mode conversion) 등에 의해 원하지 않는 모드들이 존재하게 되어 파동의 형상이 매우 복잡해진다.

반사계수는 배관의 결함 크기를 정량적으로 평가하기 위해 널리 사용되어 왔는데, 이는 결함에

서 반사된 신호를 분리하여 축대칭 모드의 진폭에 대한 비축대칭 모드의 진폭 비를 구하여 계산할 수 있다.⁵⁾ 그러나 반사 신호에는 축대칭파와 비축대칭파가 혼재되어 있으므로 단일 모드들을 분리하는 것이 반드시 필요하며, 이를 위해 분산성을 갖는 다중 모드 신호를 해석할 수 있는 신호 해석 방법이 필요하다.

다중 모드 파동을 분리하기 위해 일반적으로 가장 널리 사용되는 방법이 STFT(Short Time Fourier Transform) 기법이다.⁶⁾ 이 기법의 분해능을 개선한 분산기반 STFT⁷⁾, 왜곡주파수변환⁸⁾, 정합추적⁹⁾ 등도 유도파 신호해석에 이용되고 있다. 최근에 이 논문의 저자들은 칩릿변환(chirplet

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

transform)을 이용한 모드 분리 기법을 개발하였고, 이를 원주방향 결함 크기 규명에 활용하여 반사 신호 진폭과 결함 크기와의 상관관계를 규명하였다.¹⁰⁾

그러나 지금까지의 연구들은 대부분 원주방향 결함 크기 규명에 초점을 맞추어 진행되어 왔으며, 경사결함(inclined defect)에 대한 연구는 거의 전무하다고 해도 과언이 아닐 정도로 이에 대한 연구결과를 찾기 어렵다. 경사결함의 특성을 정확하게 파악하지 않고 원주방향 결함 크기 판정에 적용하였던 방법을 그대로 사용할 경우 결함 크기를 실제보다 적게 판정할 가능성이 높다고 할 수 있다. 따라서 이 논문에서는 경사결함의 특성을 파악하고 경사결함의 크기를 정량적으로 파악할 수 있는 방법에 대해 연구하고자 한다.

2. 실험 장치와 모드분리

경사결함에 의한 반사 신호를 측정하고 반사 신호와 결함 형상 사이의 상관관계를 규명하기 위해 길이 2 m, 직경 4인치 배관(schedule 5, 보어 직경 101.6 mm, 두께 3.1 mm)에 대해 실험을 수행하였다. 실험장치 및 장비는 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 기본 비틀림 모드 T(0,1)을 가진하고 수신하기 위해 교차코일을 부착한 자왜센서를 사용하였고 자료의 수집 및 분석을 위해 MsSR-3030을 사용하였다. 자왜센서에서 입사되는 신호는 해닝윈 도우를 씌운 3사이클, 128 kHz 톤버스트(tone-bust)이고, 하나의 신호변환기에서 수신과 측정을 동시에 수행할 수 있는 펄스-에코 방식을 채택하였다.

세 개의 배관에 각각 30°, 60°, 90° 경사각을 갖는 결함을 가공하였다. 결함은 좁은 너비를 갖는 노치 즉 슬롯 형태로 가공하였는데, 가공을 위해 1.5 mm 커터가 장착된 밀링머신을 사용하였다. 경사 결함은 자왜센서가 부착된 배관 끝단에서 1 m 되는 지점에서 시작하여 점차 반대편 끝단으로 길이를 확장시켰다. 가공된 슬롯의 깊이는 배관 두께의 80%(2.5 mm)를 유지하였으며, 결함의 폭과 두께도 2.5 mm, 2.4 mm로 일정하게 유지하였고, 결함 길이는 15 mm에서 120 mm까지 15 mm 씩 증가시켜 가며 변화시켰다.

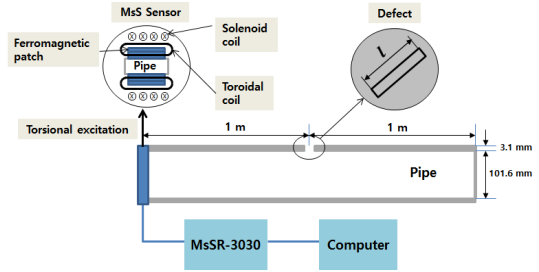


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

결함에서 반사된 신호에는 다양한 분산 모드들이 서로 혼재하거나 중첩되어 나타난다. 그러나 반사계수를 구하기 위해서는 독립된 단일 모드들이 필요하므로 결함 반사 신호를 분리하여 단일 모드를 추출할 수 있는 방법이 절대적으로 필요하다. 이 논문의 저자들은 최근 칩릿 변환을 이용하여 모드를 분리하는 방법을 개발하였다.¹⁰⁾ 이 논문에서는 이 방법을 경사결함 반사 신호에 적용하여 방법의 유용성을 입증하고, 분리된 모드를 이용하여 반사계수를 구할 수 있음을 보이고자 한다. 모드분리 방법을 요약하여 정리하면 다음과 같다.

칩릿은 시간, 주파수 천이(translation)와 확대(scaling), 전단(shear)을 통해 연산된 Gabor함수로 구성되며 다음과 같이 정의된다.

$$s_{t,\omega,c,d} = s(n;t,\omega,c,d) = (\sqrt{2\pi}d)^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\left(\frac{n-t}{2d}\right)^2 + j_2^c(n-t)^2 + j\omega(n-t)\right\} \quad (1)$$

여기서 t, ω, c, d 는 각각 시간영역, 주파수영역에서의 위치, 칩변화율(chirp rate), 지속시간을 나타내고 $s(\cdot)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\|s_{t,\omega,c,d}\|^2 = \sum_n |s(n;t,\omega,c,d)|^2 = 1 \quad (2)$$

이산화된 신호 $x(n)$ 이 주어졌을 때 이 신호를 다음과 같이 가중치를 갖는 칩릿의 합으로 표현하고자 한다.

$$x(n) = \sum_{i=1}^q A_i e^{j\phi} s(n;t_i,\omega_i,c_i,d_i) + w(n) \quad (3)$$

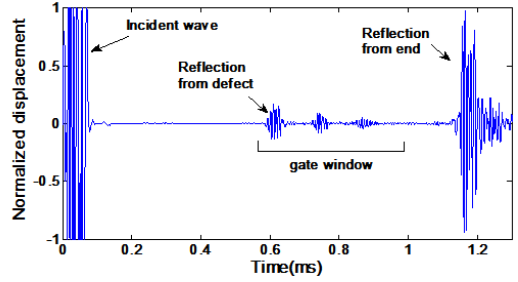
여기서 $w(n)$ 은 평균이 0이고 σ^2 의 분산을 갖는 백색 가우스 잡음이다.

결함반사 신호를 분해하여 가중치를 갖는 Gabor함수 형태로 표현하기 위해 최대가능추정법(maximum likelihood estimation)이 사용된다. 첩릿의 매개변수들을 추정하는 과정은 다음과 같다. 먼저 전체 신호를 분석하여 첩변화율과 신호의 지속시간을 추정한다. 다음으로 추정된 변수들을 이용하여 시간, 주파수영역에서의 위치를 추정한다. 그리고 이를 이용하여 국부적인 관점에서 첩변화율과 지속시간을 재추정한다. 마지막으로 quasi-Newton 방법을 사용하여 가장 근접한 최대가능추정치를 찾는다.

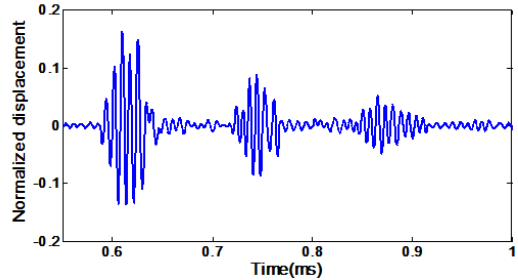
3. 실험 결과 검토

경사각이 30°이고 결함의 길이가 30 mm일 때 결함과 배관 끝단에서 반사된 신호를 Fig. 2(a)에 나타내었다. 결함에서 반사된 신호의 특성을 명확하게 살펴보기 위해 결함반사 신호만 확대하여 나타낸 결과가 Fig. 2(b)에 제시되어 있다. 축방향 결함에서 반사되는 신호¹¹⁾와 유사하게 경사결함에 의해서도 일련의 펄스들이 반사 신호에 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 첩릿변환을 이용하여 결함반사 신호를 분해하면 첫 번째 펄스는 두 개의 모드로 구성되어 있다는 것을 알 수 있다. 두 모드 중 첫 번째 모드는 T(0,1) 모드로 판명되는데, 그 이유는 지속시간과 첩변화율이 이 모드와 매우 근접하기 때문이다. 그러나 두번째 모드는 파동이 전파하면서 신호가 퍼지는 현상이 발생하고 첩변화율도 T(0,1) 모드보다 큰 값을 갖는다. 즉 첫 번째 모드의 첩변화율은 1.69 kHz/ms로 10 kHz/ms보다 매우 낮으며 0에 가까운 값을 갖지만, 두 번째 모드의 첩변화율은 -15.8 kHz/ms로 F(1,2) 모드의 첩변화율에 해당됨을 알 수 있다.¹¹⁾

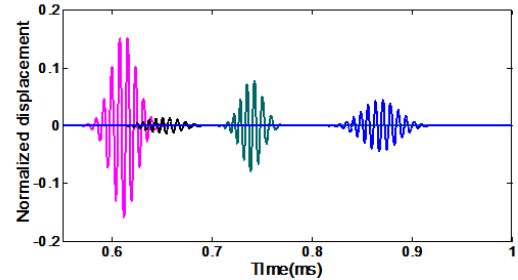
따라서 경사각이 30°로 증가하면 축방향 결함에서는 나타나지 않았던 모드변환이 발생하였다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 반사 신호의 스펙트로그램을 나타낸 Fig. 2(d)에서 더욱 명확하게 확인할 수 있다. 즉, 두 번째 모드에 대한 스펙



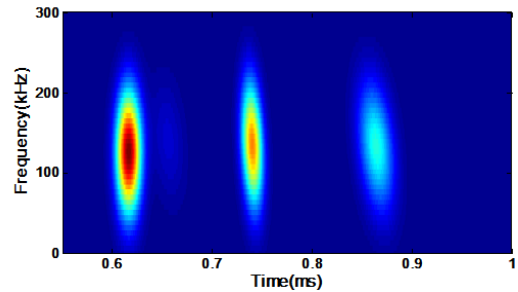
(a) Reflections from the defect and the pipe end



(b) Reflection signals from the defect



(c) Separated waveforms



(d) Spectrogram

Fig. 2 Time traces and spectrogram for the 30° inclined defect with 30 mm long

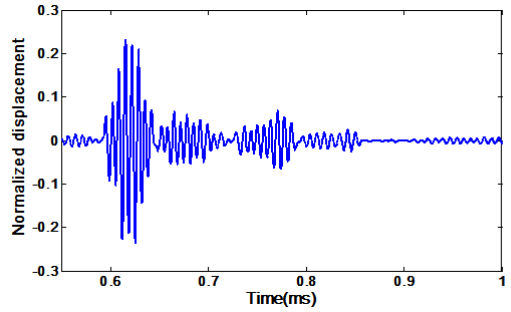
트로그램의 중심선이 뒤쪽으로 기울어져 있는데, 이는 분산성을 갖는 모드의 스펙트로그램에서 전

형적으로 나타나는 현상이다. 이로부터 결함의 경사각이 증가하면 비축대칭 모드로 모드 변환되기 쉽다는 것을 알 수 있다. 두 번째, 세 번째 펄스도 분산성이 증가하지만 아직까지는 T(0,1) 모드의 특성을 그대로 유지하고 있다.

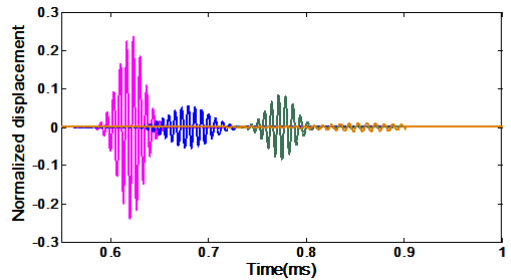
Fig. 2(a)로부터 세 펄스 간의 시간간격이 축방향 결함반사 신호보다 약간 증가한 것을 확인할 수 있다. 즉 축방향 결함에 T(0,1) 모드가 입사되었을 때 평균 시간간격은 0.096 ms인데 비해¹¹⁾, 30° 경사결함의 경우 첫 번째와 두 번째 펄스 간의 간격은 0.101 ms, 두 번째와 세 번째 펄스 사이의 간격은 0.104 ms로 측정되었다. 이는 결함의 전면부에서 반사된 파동이 경사결함과 다시 만나기 위해서는 배관의 원주에 경사결함 길이의 원주방향 성분($C_{eq} = l \sin \theta$)을 더한 만큼을 진행해야 하기 때문이다. 즉 T(0,1) 모드의 지속시간은 $(\pi d + C_{eq})/c_g$ 로 계산된다. 여기서 l 은 결함의 길이, θ 는 경사각, c_g 는 군속도이다. 경사각이 30°이고 길이가 30 mm인 경사결함의 경우 파동 진행 거리는 15 mm이고 T(0,1) 모드의 군속도는 3.2 km/s이므로 처음 두 펄스 간의 시간간격은 0.099 ms로 계산된다. 그러나 실제 측정된 시간간격은 0.101 ms로 약간의 차이를 보이는데, 이는 파동이 결함을 통과할 때 전파경로가 길어져 위상 지연이 발생하기 때문인 것으로 추정할 수 있다.

경사결함에 의한 반사 신호의 특징을 자세히 파악하고 경사각의 크기와 모드변환 사이의 상관 관계를 규명하기 위해 60° 경사결함에 대한 실험을 수행하였다. 경사결함의 길이가 30 mm일 때 60° 경사결함에서의 반사 신호를 Fig. 3(a)에 나타내었다. 칩릿변환을 이용하여 반사 신호를 분리한 결과를 Fig. 3(b)에, 분리된 신호의 스펙트로그램을 Fig. 3(c)에 각각 나타내었다.

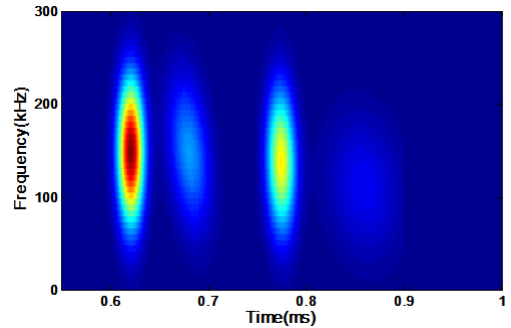
분리된 모드 중 첫 번째와 세 번째 모드의 칩릿변화율은 각각 1.72, 1.81 kHz/ms로 측정되어 T(0,1) 모드에 해당된다는 것을 알 수 있다. 또한 첫 번째와 세 번째 모드 사이의 시간간격도 0.126 ms로 나타났는데, 이는 계산결과인 0.119 ms(이 경우 $C_{eq} = 26$ ms)와 매우 비슷한 값이라는 것을 알 수 있다. 전파경로가 길어지는 현상을 고려하



(a) Reflection signals from the defect



(b) Separated waveforms



(c) Spectrogram

Fig. 3 Time traces and spectrogram for the 30° inclined defect with 30 mm long

면 두 모드는 60° 경사결함에서 연속적으로 반사된 T(0,1) 모드임을 확인할 수 있다.

두 번째, 네 번째 모드는 비틀림 모드가 모드 변환된 횡파로 판단할 수 있다. 이는 Fig. 3(b)와 3(c)에서 시간신호의 칩릿변화율과 스펙트로그램의 중심선 경사가 크게 증가한 것으로부터 확인할 수 있다. 또한 60° 경사에서 모드 변환된 신호의 진폭이 30° 경사에서 모드 변환된 신호의 진폭보다 매우 크다는 사실도 발견할 수 있다. 이러한

사실로부터 경사각이 증가함에 따라 모드변환이 더 쉽게 발생하고 변환된 모드의 진폭도 증가한다는 것을 알 수 있다. 경사각 60° 결함의 경우 축방향 길이가 30° 경사결함에 비해 짧아 두 번의 반사만 발생하였다.

경사각이 90°로 증가하면 경사결함은 순수한 원주방향 결함이 된다.¹²⁾ 이 경우 반사는 한 번만 발생하고 비축대칭 결함에 의해 비틀림 모드에서 휨 모드로의 변환도 명확하게 일어난다. 원주방향 결함에 의한 반사 신호와 스펙트로그램은 선행연구에 자세히 기록되어 있다¹²⁾. 연구결과에서 결함반사 신호에는 T(0,1), F(1,2), F(2,2) 모드가 중첩되어 나타나고, 칩릿변환을 이용하여 신호를 분리한 결과 모드 변환된 휨 모드의 진폭이 30°, 60° 경사결함의 휨 모드 진폭보다 크다는 사실을 확인할 수 있다.

첫 번째 T(0,1) 모드의 반사계수를 배관의 바깥 원주에 대한 결함의 등가 원주방향 길이의 비에 대해 나타낸 그림이 Fig. 4에 제시되어 있다. 순수 원주방향 결함의 경우 실제 결함의 길이와 등가 원주방향 길이는 일치한다. 먼저 반사계수가 결함의 실제 길이가 아닌 등가 원주방향 크기에 비례한다는 흥미로운 사실을 발견할 수 있다. 이는 결함의 축방향 길이의 변화가 반사계수에 미치는 영향이 작다는 것을 의미한다. 이는 이전의 연구 결과와도 일치하는 현상이다. Carandente와 Cawley¹³⁾는 배관에 다양한 형태의 3차원 결함이 존재할 때의 T(0,1) 모드의 반사 특성을 규명하였는데 연구결과로부터 반사계수는 결함의 형상과 무관하고 계수의 크기는 축방향 길이의 변화나 결함 깊이의 최대 위치에 무관하다는 사실을 밝혀냈다. 이러한 사실로부터 결함의 깊이가 일정할 경우 반사계수는 결함의 등가 원주방향 크기에 비례하고 축방향 길이와는 무관하다는 사실을 알 수 있다.

또한 경사각이 증가함에 따라 반사계수도 증가한다는 사실을 Fig. 4로부터 확인할 수 있다. 이는 결함의 경사가 커질수록 등가 원주방향 길이가 따라서 증가하기 때문이다. T(0,1) 모드의 반사계

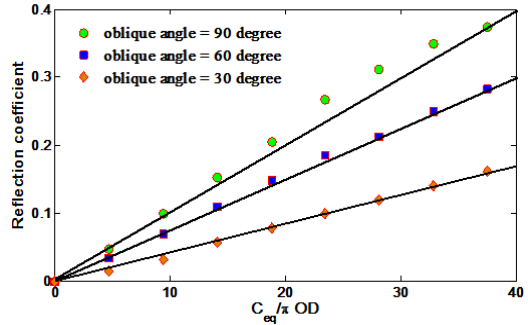


Fig. 4 Reflection coefficients for the first T(0,1) mode for the oblique defects

수는 결함의 원주방향 길이에 비례한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서 경사가 큰 결함의 반사 신호 진폭이 경사가 작은 반사 신호 진폭보다 크다는 사실을 알 수 있다.

4. 결 론

이 논문에서는 배관의 경사결함에 대한 T(0,1) 모드의 반사 특성을 해석하고 이로부터 경사결함의 크기 및 경사각을 판정할 수 있는 방법을 제시하였다. 경사결함에서 반사된 신호의 모드를 분리하기 위해 원주방향 결함반사 신호해석에 사용하였던 칩릿변환을 사용하였고 경사결함 신호분리에도 유용하다는 사실을 입증하였다.

경사결함 반사 신호를 분석한 결과 결함의 깊이가 일정할 때 반사계수는 바깥 원주에 대한 등가 원주방향 길이에 비례한다는 사실을 발견하였다. 또한 반사계수의 크기는 결함의 축방향 길이 변화에 영향을 받지 않으며, 경사각이 커질수록 모드변환도 쉽게 발생하고, 반사되는 신호의 진폭도 증가한다는 사실을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2017년 전남대학교 연구년 학술연구비 지원사업(과제번호 2106-2736)의 지원에 의해 수행되었음을 밝힙니다.

References

1. J. Li and J. L. Rose, 2001, "Implementing guided wave mode control by use of a phased transducer array", *IEEE Transactions Ultrasonic Ferroelectric Frequency Control*, Vol. 48, No. 3, pp. 761-768.
2. A. Demma, P. Cawley, M. Lowe, A. G. Roosenbrand and B. N. Pavlakovic, 2004, "The reflection of guided waves from notches in pipes: a guide for interpreting corrosion measurements", *NDT&E International* Vol. 37, No. 1, pp. 167-180.
3. M. Lowe, D. N. Alleyne and P. Cawley, 1998, "The mode conversion of a guided wave by a part-circumferential notch in a pipe", *Journal of Applied Mechanics* Vol. 65, No. 4, pp. 649-656.
4. D. N. Alleyne, M. Lowe and P. Cawley, 1998, "The interaction of guided waves from circumferential notches in pipes", *Journal of Applied Mechanics* Vol. 65, No. 4, pp. 635-641.
5. D. N. Alleyne, B. N. Pavlakovic and P. Cawley, 2001, "Rapid long range inspection of chemical pipes using guided waves", *Review of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 20, pp. 180-187.
6. W. H. Prosser, M. D. Seale and B. T. Smith, 1999, "Time-frequency analysis of the dispersion of Lamb modes", *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 105, No. 2, pp. 2669-2676.
7. J. C. Hong, K. H. Sun and Y. Y. Kim, 2005, "Dispersion-based short-time Fourier transform applied to dispersive wave analysis", *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 117, No. 3, pp. 2949-2960.
8. L. D. Marchi, A. Marzani, S. Caporale and N. Speciale, 2009, "Ultrasonic guided-waves characterization with warped frequency transform", *IEEE Transactions on Ultrasonic Ferroelectric Frequency Control*, Vol. 56, No. 4 pp. 2232-2240.
9. P. Tse and X. Wang, 2013, "Characterization of pipeline defect in guided waves based inspection through matching pursuit with the optimal dictionary", *NDT&E International*, Vol. 54, No. 2, pp. 171-182.
10. C. Y. Kim and K. J. Park, 2015, "Mode separation and characterization of torsional guided wave signals reflected from defects using chirplet transform", *NDT&E International*, Vol. 74, No. 1, pp. 15-23.
(DOI:10.1016/j.ndteint.2015.04.006)
11. Y. W. Kim and K. J. Park, 2016, "Detection of axial defects in pipes using chirplet transform", *Journal of The Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 26-31.
(DOI:10.9726/kspse.2016.20.4.026)
12. Y. W. Kim, K. J. Park and W. S. Kang, 2011, "Identification of reflection coefficients for overground pipes using finite element method", *Journal of The Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 18-24.
(DOI:http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2011.15.3.018)
13. R. Carandente and P. Cawley, 2012, "The effect of complex defect profiles on the reflection of the fundamental torsional mode in pipes", *NDT&E International*, Vol. 46, No. 1, pp. 41-47.