

비틀림파를 이용한 석유화학 파이프의 결함탐지 Flaw Detection of Petrochemical Pipes using Torsional Waves

박경조 · 강우석 · 강대진

K. J. Park, W. S. Kang and D. J. Kang

(접수일 : 2009년 12월 16일, 수정일 : 2010년 3월 19일, 채택확정 : 2010년 3월 30일)

Key Words : Torsional Waves(비틀림파), Defect Detection(결함검출), Magnetostrictive Sensor(자왜센서), Pipe Inspection(파이프 검사)

Abstract : A torsional guided wave was applied to detect a defect in petrochemical pipes. Phase and group velocity dispersion curves for the longitudinal and torsional modes of the inspected pipe were presented for the theoretical analysis. It was found through mode shape analysis that there was mode conversion when torsional wave is incident at an asymmetric defect. An artificial notch was fabricated in the pipe and the detectability was examined from the distance 2m of the end of the pipe by using magnetostrictive sensors. The relativities between the amplitude of the reflected signal and the size of the defect was examined. It was shown that the T(0,1) mode could be used for the long range inspection for the petrochemical pipes

1. 서 론

석유나 가스, 화학공장에서 널리 사용되는 파이프의 안전성을 확보하고 사고발생 시 환경에 미치는 영향을 최소화하기 위해 정기적인 안전검사를 수행하고 있다. 정기적인 안전검사에는 육안 검사뿐만 아니라 다양한 비파괴검사 기법이 널리 활용되고 있지만 검사 속도가 느리고 전체 시스템을 모두 검사하는데 많은 비용이 소요된다. 따라서 검사 초기 단계에서 검사에 소요되는 시간이 짧고 심각한 부식에 의한 결함을 효과적으로, 그리고 정확하게 찾아낼 수 있는 방법을 도입하는 것이 필요하다.

파이프검사를 빠르게 수행할 수 있는 방법으로 유도파(guided wave) 검사방법이 새롭게 대두되고 있다¹⁻⁴⁾. 전통적인 피그(pig)를 사용하는 방법에 비해 탐사거리는 짧지만 탐촉자(probe)를 파이프 내부로 이송시킬 필요가 없고 상대적으로 검사비용이 짝한 장점이 있다. 파이프가 절연재로 둘러 싸여 있을 경우 신호변환기(signal transducer)를 설치할 때 매우 작은 부분(통상적으로 20cm 이내)만 절연재를

제거하면 되므로 유도파 검사가 끝난 뒤 절연재 보수에 소요되는 시간 및 비용도 최소화할 수 있다. 이 방법을 이용하면 부식에 의해 전체 단면의 5~10%가 손실된 부식결함까지 검출할 수 있다. 원래 이 방법은 직경이 5~60cm인 파이프를 대상으로 개발되었지만 이보다 직경이 크거나 작은 파이프도 사용되는 신호변환기의 개수를 조절하여 충분히 검사할 수 있다.

이와 같은 파이프 유도파 검사에 사용되는 유도파는 크게 종파(longitudinal wave), 휨파(flexural wave), 비틀림파(torsional wave)의 세 가지 형태로 나눌 수 있다. 휨파는 모드형상이 비대칭성을 갖기 때문에 유도파 검사에 거의 사용되지 않고 있으며 최근까지 종파를 이용한 유도파 검사가 널리 사용되어 왔다. 그러나 전자기 음향파(EMAT)나 자왜센서(magnetostrictive sensor)에 의한 진동모드 제어기술이 발전하면서 비틀림파를 이용한 유도파 검사 기술도 크게 각광을 받고 있다^{5,6)}. 비틀림 모드는 대칭성 모드이고 분산성이 적으며, 토양이나 유체와 같은 주변 매질로의 누설이 다른 모드에 비해 적기 때문에 장거리탐사에 유리하다고 알려져 있다.

본 연구에서는 비틀림파를 이용하여 파이프의 결함을 탐지하는 방법에 대해 살펴보고자 한다. 이를 위해 먼저 분산선도(dispersion curves)를 이용하여

박경조(교신저자) : 전남대학교 기계자동차공학부
E-mail : kjpark40@chonnam.ac.kr, Tel : 061-659-3221
강우석 : 전남대학교 대학원
강대진 : 조선대학교 대학원

파이프에서 나타나는 모드의 전파특성을 살펴본다. 그리고 가진할 비틀림 모드의 주파수 및 입사신호를 선정하고, 결함이 있는 파이프에 대한 실험을 통해 제안된 방법의 타당성을 검토하고자 한다.

2. 비틀림파의 전파특성

본 연구에서 대상으로 선정한 파이프는 SPPS 370 SCH 40 ERW 강파이프(steel pipe)로 외경은 76.3mm, 두께는 5.2mm, 전체 길이는 6m 이다. 전파특성을 살펴보기 위해 영국 Imperial College에서 개발한 파동해석 프로그램인 Disperse^{®7)}를 사용하였다.

파이프에서 나타나는 유도파 전파특성은 매우 복잡한 양상을 갖는다. 대상 파이프에 대한 0~300kHz 주파수영역에서의 위상속도(phase velocity), 군속도(group velocity) 분산선도를 Fig. 1에 나타내었다. 쉘 형태의 구조물에서는 원주를 따라 n 개 ($n=0,1,2,3,\dots$)의 파장이 존재한다. $n=0$ 이면 파동은 축대칭 모드를 갖고 $n \geq 1$ 이면 전파되는 파동은 원주방향과 축방향 성분을 모두 갖는다. 모드는 Silk와 Bainton⁸⁾이 표시했던 것과 마찬가지로 $L(0,m)$, $T(0,m)$, $F(n,m)$ 으로 표시하였는데, 여기서 n , m 은 정수이고 L, T, F는 각각 종방향, 비틀림, 휨모드를 나타낸다. 실제 이 주파수 영역에서 나타나는 휨모드는 50개 이상이지만 그림에는 $F(1,3)$ 모드까지만 표시하였다.

종방향 모드는 파동의 진행방향과 입자의 운동방향이 평행한 파로 밀한 부분과 소한 부분이 팽창과 압축을 반복하면서 파동에너지가 전달되므로 압축파라고도 불린다. 휨모드는 입자의 운동방향과 파동의 진행방향이 수직한 파로 축방향에 대해 모드형상이 비대칭성을 갖는다. 기본 휨모드는 주파수 0에서 순수한 굽힘 모드(bending mode)이다. 비틀림 모드는 변위가 원주방향으로 발생하는 파로 평판의 수평전단(horizontal shear) 모드에 해당된다.

모드를 표시할 때 모드의 명칭과 더불어 두 개의 지수를 사용하여 모드를 구별한다. 첫 번째 지수는 모드의 원주방향 차수를 나타내는 것으로 원통의 원주에 따른 정수 파장을 표시한다. 예를 들어 0차 모드의 변위는 원주방향 각도에 상관없이 일정하지만 1차 모드의 변위는 원주를 따라 한 주기의 정현파 형태로 변화한다. 따라서 원통의 한 위치에서의 변위는 그 위치와 180° 떨어진 위치에서의 변위와 180°의 위상차를 갖게 된다. 이로부터 모든 종방향

모드의 원주방향 차수는 0이고 모든 휨모드의 원주방향 차수는 1 이상이 되는 것을 알 수 있다.

두 번째 지수는 일련번호이다. 기본 모드(주파수 0에서 존재할 수 있는 모드)의 지수는 1이고 그 보다 차수가 높은 모드들에는 순차적으로 일련번호가 부여된다. 이 지수는 대개 원통 벽면에서 발생하는 진동 모드의 차수와 일치한다.

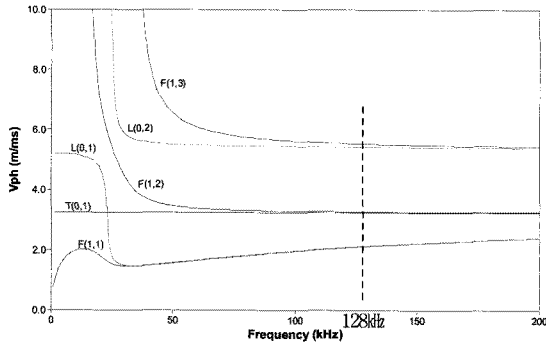
종방향 첫 번째 모드인 $L(0,1)$ 모드는 주파수 0에서 시작하고, 이때의 위상속도는 $\sqrt{E/\rho}$ 와 같음을 알 수 있다. 여기서 E 는 영계수(Young's modulus), ρ 는 밀도이다. 즉, 강파이프의 영계수는 $E=200 \text{ GN/m}^2$ 이고 밀도는 $\rho=7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 이므로 주파수 0에서 위상속도는 5.12 m/ms임을 알 수 있다. 그러나 주파수가 증가하면 위상속도는 급격히 감소하여 평판의 비대칭 모드인 A_0 모드와 비슷한 거동을 보인다. 종방향 두 번째 모드인 $L(0,2)$ 모드는 0이 아닌 주파수에서 ∞ 의 위상속도를 갖고 시작한다. 이 모드도 위상속도가 급격히 감소하여 $\sqrt{E/\rho(1-\nu^2)}$ 에 접근하는 것을 볼 수 있다. 강파이프의 영계수, 밀도 및 포아송비($\nu=0.28$)을 대입하면 무한대 주파수에서 위상속도는 5.33 m/ms임을 알 수 있다.

횡방향 1차 모드인 $F(1,1)$ 은 주파수 0, 위상속도 0에서 시작한다. 매우 낮은 주파수에서 $F(1,1)$ 모드는 전체 파이프의 굽힘 모드(bending mode)를 나타낸다. 이 모드는 속도가 약간 증가하였다가 다시 감소하여 $L(0,1)$ 모드와 비슷한 경로를 따라가는 것을 볼 수 있다. 비록 $F(1,1)$ 모드와 $L(0,1)$ 모드 모두 평판의 A_0 모드와 비슷한 양상을 보이지만 두 모드 사이에는 중요한 차이점이 있다. $F(1,1)$ 모드인 경우 파이프의 상부면과 하부면의 변위는 180°의 위상차를 보이지만 $L(0,1)$ 모드는 동일 위상을 갖는다는 점이다.

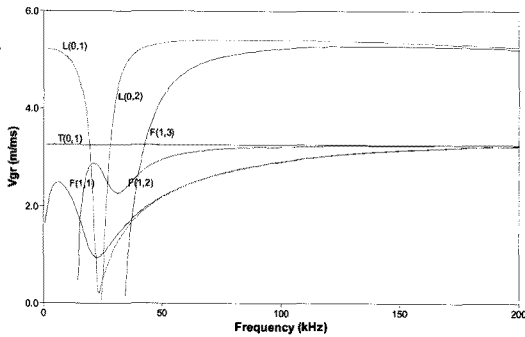
원주방향 차수가 0인 $T(0,1)$ 모드는 모든 주파수 영역에서 위상속도 및 군속도가 일정한 특성을 나타낸다. 즉 $T(0,1)$ 모드는 분산성이 없는 유도파 모드로 주파수가 변하더라도 속도 변화가 없이 일정하며 군속도는 입체 전단파 속도(bulk shear velocity)와 동일하다. 군속도가 주파수에 따라 급격히 변화하는 모드는 분산성이 높아 시간영역에서 유도파의 신호가 넓게 퍼져서 나타나게 되고, 분산성이 적은 모드는 좁게 나타난다.

그림에 나타낸 128kHz는 실제 실험에서 사용될 가진 주파수를 나타낸다. 비틀림 모드인 $T(0,1)$ 모드

의 모드형상을 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 (a)는 3차원 격자 형태로 모드형상을 나타낸 것이고, (b)는 파이프 벽면의 두께를 따라 반경방향(U_r), 원주방향(U_θ), 축방향(U_z) 변위를 나타낸 것이다. 모드형상에서 알 수 있듯이 반경방향이나 축방향의 변위는 나타나지 않고 오직 원주방향, 즉 접선방향의 변위만 존재하는 것을 볼 수 있다.



(a) Phase velocity

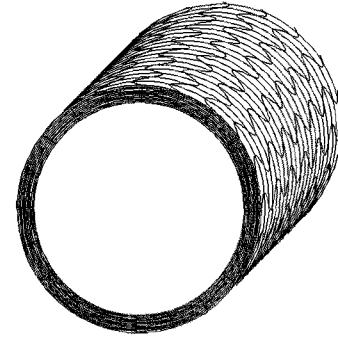


(b) Group velocity

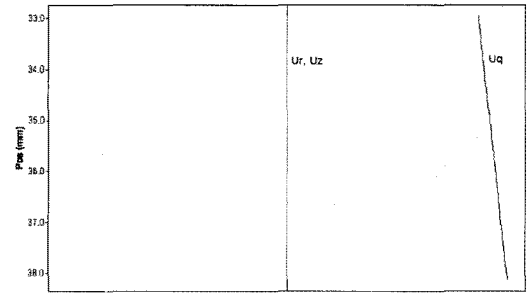
Fig. 1 Dispersion curves for the inspected pipe

또한 파이프의 두께를 따라 원주방향 변위가 거의 일정하게 분포하는 것도 알 수 있다. 이는 파이프 유도파 검사 시 단면의 어느 위치에 결함이 발생하여도 검출이 가능하며, 결함의 크기도 예측이 가능함을 알 수 있다. 또한 T(0,1) 모드가 전 주파수영역에서 동일한 모드형상을 가지므로 중심주파수에서 모드형상을 인가하면 순수 모드 가진이 가능함을 알 수 있다.

축대칭 결함을 갖는 파이프에 축대칭 모드가 입사되면 관심 주파수에서 나타나는 모드는 순수한 축대칭 모드만 나타난다. 실제 실험에서 가진할 주파수는 비틀림 2차 모드인 T(0,2) 모드의 차단주파수보다 낮은 영역에 위치하므로 축대칭 결함에서 모드변환 (mode conversion)이 발생하지 않고 순수



(a) Grid

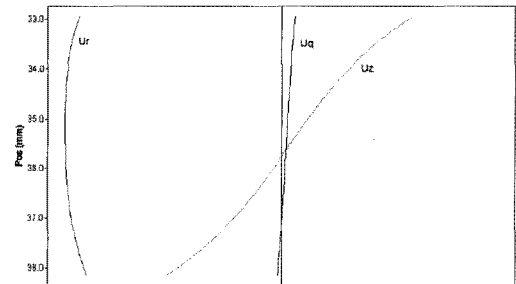


f = 0.128741 MHz Vph = 3.28 m/ms

(b) Lines

Fig. 2 Mode shape of T(0,1) mode at 128kHz

한 T(0,1) 모드만 결함에서 반사되거나 전달된다. 그러나 파이프에 비축대칭 결함이 존재하면 T(0,1) 모드는 F(1,1), F(1,2) 또는 F(1,3) 모드로 변환될 수 있다. 이러한 모드변환은 입사파와 모드변환된 반사파의 입자운동 유사성에 따라 그 형태가 달라진다. Fig. 3에 F(1,1) 모드의 모드형상을 나타내었는데 그림에서 알 수 있듯이 이 모드는 원주방향 변위를 갖고 있으므로 T(0,1) 모드가 모드변환될 가능성이 높다. 따라서 비축대칭 결함이 있는 파이프에서 결함에 의한 반사 신호에 T(0,1) 모드뿐만 아니라 F(1,1) 모드도 동시에 나타나게 될 것이라는 것을 예측할 수 있다.



F(1,1) f = 0.128111 MHz Vph = 2.12254 m/ms

Fig. 3 Mode shape of F(1,1) at 128kHz

3. 실험결과 및 검토

본 연구에서 사용된 파이프는 석유화학 배관용으로 사용되는 강파이프로 길이는 6m 이다. 파이프에 결함이 있는 경우와 없는 경우를 비교하기 위해 동일한 규격의 파이프 2분을 준비하여, 한 개의 파이프에는 유도파 신호변환기로부터 2m인 지점에 폭 1.6mm, 원주방향 길이 45mm의 크기를 갖는 원주방향 결함을 가공하였다(Photo. 1). 결함의 깊이는 두께의 약 2/3에 해당되는 3.6mm이다.

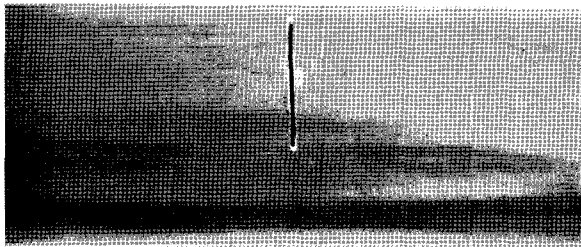


Photo. 1 Artificial defect in the pipe

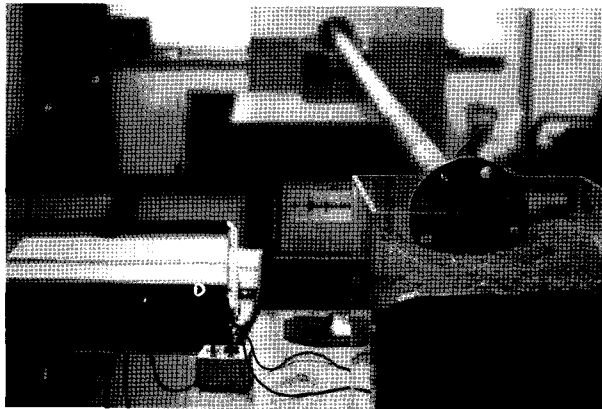


Photo. 2 Experimental setup

Photo. 2에 본 연구에서 사용된 유도파 검사장치(미국 SwRI, 모델명: MsSR-2020)를 나타내었다. 본 장치는 자왜 또는 자기변형(magnetostriction) 현상을 이용하여 재료 내에 초음파를 발생시키고 그 역으로 초음파신호를 감지할 수 있는 장비이다. 이 장치를 이용하여 원통형 구조물의 결함을 측정할 경우, 파이프의 원주를 자왜 특성이 우수한 Ni-Strip으로 둘러싸고 원주방향으로 자화시킨 뒤 리본형 코일에 자장을 가하면 Wiedemann효과에 의해 비틀림 모드가 발생하게 된다. 실험에서는 중심

주파수 128kHz인 5 cycle tone-burst를 입사하여 비틀림 모드를 가진하였고, 가진에 사용된 동일 신호 변환기를 이용하여 반사 신호를 수신하는 pulse-echo 방식을 채택하였다.

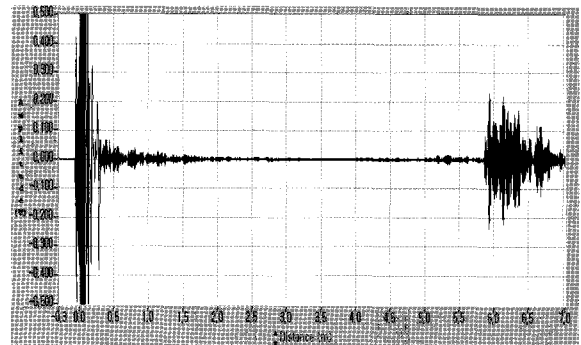


Fig. 4 Measured signals for normal pipe

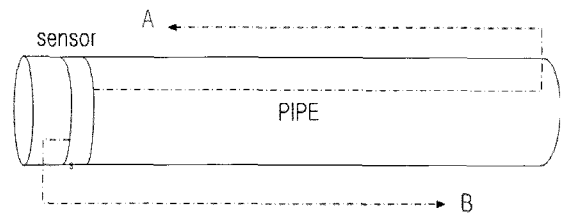


Fig. 5 Propagational direction

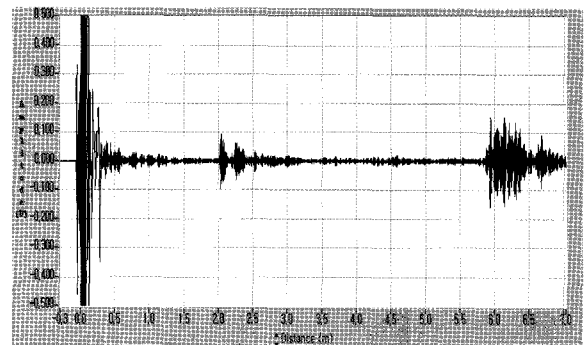


Fig. 6 Measured signals for cracked pipe

Fig. 4에 결함이 없는 파이프에서 측정된 신호를 나타내었다. 결함이 없을 경우 입사신호와 파이프 종단면에서 반사된 신호만이 나타나는 것을 알 수 있다. 그림에서 파이프 종단면인 6m 지점보다 좀 더 일찍 반사가 나타나는 것을 알 수 있는데, 이는 신호변환기를 정확히 파이프 왼쪽 종단면에 부착한 것이 아니고 종단면으로부터 0.2m 떨어진 위치에 부착하였으므로 5.8m 지점에서 종단면을 맞고 돌아온 반사파가 수신되는 것을 나타낸다(Fig. 5의 A). 그리고 6m 지점에서 반사파가 다시 나타나는 것은 센서의 반대방향으로 가진되었던 비틀림파가 반대

방향의 종단면에서 반사되어 다시 반대방향으로 가진되었기 때문에 거리 차이에 의해 6m 지점에 나타나게 된 것이다(Fig. 5의 B). 신호변환기의 부착위치 및 파동 전파방향은 Fig. 5에 자세히 나타내었다. 결함이 있는 파이프에서 측정된 응답신호를 Fig. 6에 나타내었다. 결함 및 종단면에서의 반사신호가 모두 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉 인공 결함이 위치한 2m 지점에서 정확하게 반사파가 수신되는 것을 확인할 수 있다. 결함의 길이는 전체 원주의 21%에 해당되지만 결함에서 반사된 신호의 진폭은 종단면 반사 신호 진폭의 약 55%로 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 그림에서 2.2m 지점에 나타난 반사 신호는 결함이 없는 파이프와 마찬가지로 반대방향으로 가진된 신호가 결함에 반사되어 나타나는 신호이다.

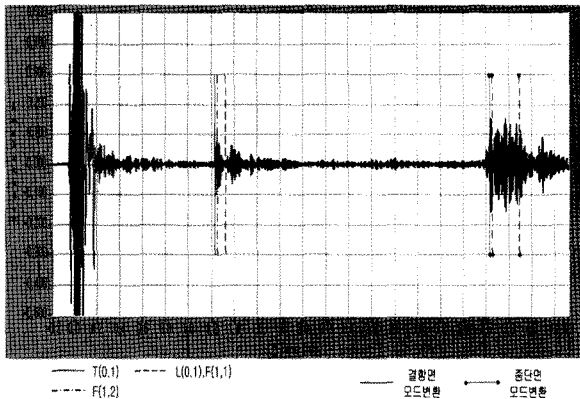


Fig. 7 Measured signals of the cracked pipe(time axis)

Fig. 7은 결함에 의해 모드변환이 일어날 수 있기 때문에, 측정된 신호의 속도와 군속도 분산선도를 비교하여 모드를 확인함으로써 모드변환에 의해 나타날 수 있는 모드를 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 결함에서 반사된 신호에 여러 모드가 혼재되어 있는 것을 확인할 수 있는데, 이는 축대칭 모드인 비틀림 모드가 비축대칭 결함을 만나 모드변환이 발생한 결과라 생각할 수 있다. 즉 결함이 비축대칭이므로 모드도 비축대칭 모드인 휨파로 변환된 것을 알 수 있다. 모드변환 되어 나타나는 모드의 정확한 신호해석은 유도초음파를 진동수-시간 영역에서 분석하는 Wavelet Transform 이나 Short Term Fourier Transform과 같은 신호해석 기법을 이용해야 하나, 본 연구에서는 측정된 신호와 군속도 분산선도를 비교하여 모드변환을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 비틀림파를 이용하여 석유화학 파이프의 결함을 원거리에서 탐지하기 위한 유도파 탐상기법을 제시하였다. 이를 위해 대상 파이프의 위상속도와 군속도 분산선도를 제시하였고, 모드형상 분석을 통해 비축대칭 결함이 파이프에 존재할 경우 모드변환에 의해 비축대칭 모드인 휨파가 발생할 수 있음을 보였다.

자외센서를 이용하여 인공 결함이 있는 파이프에 비틀림파를 가진하여 결함과 반사 신호 진폭과의 상관관계를 규명하였으며 이로부터 결함의 원주방향 길이 측정이 가능함을 보였다. 또한 비축대칭 결함에 의한 모드변환이 실제 실험에서 발생함을 확인하였고 이는 차후 정밀 진단을 위한 요인이 될 수 있음을 시사한다. 모드변환에 의해 나타나는 휨파에 대한 정확한 규명은, 비틀림파를 이용하여 유도파 검사를 더욱 정밀한 비파괴탐상에 이용하기 위해 계속해서 연구되어야 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 2009년도 지식경제부 지원 중화학설비 안전진단 지역혁신센터사업과 교육과학기술부 지원 지역혁신인력양성사업의 일부 지원에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

참고 문헌

1. D. N. Allene and P. Cawley, 1996, "The Effect of Discontinuities on the Long Range Propagation of Lamb Waves in Pipes", Proc. I. Mech. E., part E, v.210, pp. 217~226.
2. C. Aristegui, P. Cawley and M. Lowe, 1999, "Guided Waves in Fluid-Filled Pipes Surrounded by Different Fluids", Review of the Progress in Quantitative NDE, v.18A, pp. 159~166.
3. R. Long, M. J. S. Lowe and P. Cawley, 2003, "Acoustic Wave Propagation in Buried Iron Water Pipes", Proceedings of Royal Society, London, pp. 351~356.
4. D. N. Allene and P. Cawley, 1996, "The

- Excitation of Lamb Waves in Pipes Using Dry Coupled Piezoelectric Transducers", J. NDE, v.15, pp. 1~20.
5. J. Ma, F. Simonetti and M. Lowe, 2006, "Scattering of the Fundamental Torsional Mode by an Axisymmetric Layer Inside a Pipe", J. Acoust. Soc. Amer., v.120, pp. 1871~1880.
 6. 정용무, 김상수, 2004, "자왜 탐촉자를 이용한 소구경 배관에 대한 비틀림 모드 유도 초음파 검사", 2004 한국비파괴검사학회 추계학술대회 논문집, pp. 71~77.
 7. B. N. Pavlakovic, M. J. S. Lowe and P. Cawley, 1997, "DISPERSE: A General Purpose Program for Creating Dispersion Curves", Review of the Progress in Quantitative NDE, Vol. 16A, pp. 185~192.
 8. M. G. Silk and K. F. Bainton, 1979, "The Propagation in Metal Tubing of Ultrasonic Modes Equivalent to Lamb Waves", Ultrasonics, Vol. 17, No. 1, pp. 11~9.
 9. 박경조, 2006, "매립된 유체함입 강파이프의 파동전파 특성규명", 한국동력기계공학회지, 제10권 제1호, pp. 65~70.
 10. J. L. Rose, 1999, Ultrasonic Waves in Solid Media, Cambridge University Press, UK.