

# 지하매설 배관의 축대칭 파동 전파 가능성 해석

## Analysis on the Likelihood of Axisymmetric Wave Propagation in Buried Water Pipes

박 경 조  
Kyung-Jo Park

(접수일 : 2012년 05월 22일, 수정일 : 2012년 10월 31일, 채택확정 : 2012년 11월 06일)

**Abstract :** A study of the possible axisymmetric modes that propagate at low frequencies in buried, water-filled pipes is presented. It is well known that for a vacuum-pipe-vacuum system the sole non-torsional axisymmetric mode that exists at low frequencies is the fundamental  $L(0,1)$  mode. When a pipe is filled with water and still surrounded by a vacuum it is also known that another mode then appears which at low frequencies is characterized by predominantly axial water-borne displacements. In addition to these modes, this paper explores two other, less well known axisymmetric modes whose existence depends on the acoustic properties of the outer medium that surrounds a pipe. The predicted characteristics of these modes are presented and the likelihood of them propagating over any significant distance in a buried water pipe is discussed.

**Key Words :** Axisymmetric Mode, Attenuation, Phase Velocity, Soil Bulk Velocity

### 1. 서 론

석유나 가스, 화학공장에서 사용되는 배관에서 가장 주요한 문제점은 부식에 의한 구조물 결함이다. 전체적으로 두께가 얇아진다거나 국부적으로 부식에 의한 구멍이 발생하는 것은 배관의 안쪽 면 또는 바깥쪽 모두에서 발생할 수 있는데, 대부분의 배관들은 매우 잘 절연되어 있기 때문에 절연재를 제거하지 않는 한 통상적인 비파괴 검사법을 사용해서는 바깥쪽에서 발생하는 결함 조차 발견하기 어렵다.

지하에 매설된 배관의 경우 접근성이 더 열악하기 때문에 접근 가능한 한 지점에서 장거리 검

사를 수행할 수 있는 방법이 필요하고 이러한 방법으로 유도파 검사법이 대두되고 있다. 특히 지하매설 배관의 경우 수송유체의 누설 위치를 탐지하는 것이 가장 시급하게 해결해야할 문제인데, 이에 대한 연구는 Listons 에 의해 시작되어 현재도 활발히 연구가 진행되고 있다.<sup>1-5)</sup>

Long 등<sup>6,7)</sup>은 지하에 매설되어 있는 단조강 수도관을 따라 전파되는 모드의 주요 성분은, 저주파수에서 축방향 수인성(water-borne) 변위를 갖는 모드임을 발견하였다. 현재 사용되고 있는 누설위치 탐지방법은 저주파수에서의 이 수인성 분산모드의 점근속도(asymptotic velocity)를 갖는 비분산모드가 전파된다고 가정하고 누설위치를 계산한

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

Kyung-Jo Park(corresponding author) : Department of Mechanical and Automotive Engineering, Chonnam University.  
E-mail : kjpark40@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-7221

다. 박경조 등<sup>8)</sup>은 배관을 둘러싼 토양으로 에너지가 누설될 때 나타나는 감쇠 특성 및 배관의 조인트와 피팅에서의 모드산란에 대해 조사하였다.

본 논문에서는 선행연구<sup>8)</sup>를 바탕으로 유체가 차있는 지하매설 배관을 따라 누설 잡음의 전파가 가능한 축대칭 모드를 찾고 이에 대한 특성을 규명하고자 한다. 이를 위해 지하매설 배관의 분산선도를 계산하고 이를 통해 잘 알려진 L(0,1) 모드 이외에 분산성이 적은 다른 모드들을 찾고자 한다. 또한 모드형상 분석을 통해 축대칭 모드의 변위 분포도 고찰하고자 한다. 누설 특성은 배관이 매립된 토양의 특성에 의해서도 크게 영향을 받으므로 토양의 종방향, 전단방향 벌크 속도(bulk velocity)의 변화에 의해 배관의 위상속도 및 감쇠가 어떻게 달라지는지 분석하고자 한다.

## 2. 지하매설 배관의 축대칭 모드

지하에 매설되어 있는 유체 함유 배관에서 전파될 수 있는 실제 파동의 특성을 분석하기 위해 잘 알려진 파동해석 프로그램인 Disperse<sup>®</sup>를 사용하였다. 지하에 매설된 배관에서 전파되는 파동의 특성은 배관의 재료나 형상 그리고 외부 매체(토양)의 종방향, 전단방향 벌크속도와 감쇠 특성에 따라 달라진다. 본 논문에서는 토양의 벌크 종방향 속도  $C_{L\ soil} < V$  인 경우와  $C_{L\ soil} > V$  인 경우에 존재할 수 있는 종파 이외의 새로운 모드들을 찾아내고, 유도파 장거리 탐사에 대한 적용 가능성을 검토하고자 한다. 여기서  $V$ 는 비분산 누설잡음 속도로 다음과 같이 주어진다.

$$V = \frac{C_L}{\left[1 + \frac{B\nu r}{Et}\right]^{1/2}} \quad (1)$$

여기서  $C_L$ 은 유체의 종방향 벌크속도이고  $B$ 는 유체의 벌크 탄성계수(bulk modulus),  $E$ 와  $\nu$ 는 배관 재료의 영계수와 푸아송비(Poisson's ratio)이다.  $r$ 은 배관의 내경이고  $t$ 는 배관 두께이다.

유체가 차있는 지하매설 배관의 분산선도 계산에 사용된 재료의 특성은 Table 1에 나타내었다.

배관은 직경 10인치 단조강 배관(두께=16mm)을 사용하였다. 토양의 종방향 벌크속도  $C_{L\ soil}$  이 비분산 누설잡음속도  $V$ 보다 작을 때의 위상속도 분산선도를 Fig. 1에 나타내었다. 비교를 위해 그림에는 공기 중에 놓여있는 유체 함유 배관의 위상속도도 동시에 나타내었다. 그림의 명확성을 위해 배관에서 전형적으로 나타나는 휨파(flexural mode)와 비틀림파(torsional mode)의 위상속도는 그림에 나타내지 않았으며, 종방향 모드도 3차 이상의 고차 모드는 생략하였다.

먼저 유체 함유 지하매설 배관(w-p-s)의 L(0,1) 모드는 저주파수에서는 공기 중에 놓여있는 유체 함유 배관(w-p-v)의 곡선을 따라가지만, 최대 감쇠가 발생하는 주파수영역에서 L(0,2) 모드로 건너뛰어, 이후 주파수가 증가함에 따라 이 모드를 계속 따르는 것을 알 수 있다. 또한 종방향 모드 외에 세 가지 새로운 축대칭 모드  $\alpha 1, \alpha 2, \alpha 3$ 가 나타나는 것을 확인할 수 있다.  $\alpha 1$ 모드는 축대칭이고 저주파수에서의 변위는 축방향, 수인성(water-borne)

Table 1 Material properties

Material	Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Bulk $C_L$ (m/s)	Bulk $C_S$ (m/s)
Water	1,000	1,480	0
Cast iron pipe	7,100	4,500	2,500
Soil	1,900	700 to 2,000	80

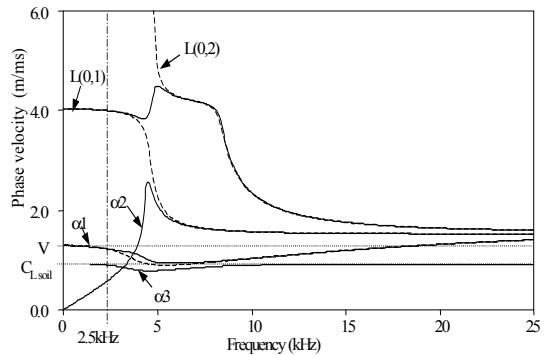


Fig. 1 Phase velocity dispersion curves (solid line: w-p-s( $C_{L\ soil} < V$ ), dashed line: w-p-v)

이다. 그림에서 알 수 있듯이  $\alpha 1$ 모드는 주파수 0에서 비분산 누설잡음 속도  $V$ 에 접근하는 것을 알 수 있다. 주파수가 증가함에 따라 (w-p-v)의  $L(0,1)$  곡선을 따르는  $\alpha 2$ 모드가 나타나는 것도 그림으로부터 확인할 수 있다. 이 토양모델의 경우 저주파수에서  $\alpha 2$ 모드의 위상속도는 0이기 때문에, 이 영역에서 고감쇠(>100 dB/m)가 발생하고 따라서 실제로 파동이 전파될 수 없다는 사실도 알 수 있다. 이외에  $C_{L\ soil} < V$ 일 때만 나타나는 새로운 모드  $\alpha 3$ 도 그림에서 확인할 수 있다.  $\alpha 3$ 모드는 저주파수와 고주파수에서 모두  $C_{L\ soil}$ 에 접근하고 항상 속도의 크기가  $C_{L\ soil}$ 보다 작기 때문에 비누설 특성을 갖는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 1의 주파수 2.5 kHz일 때 전파되는 모드들의 모드형상을 Fig. 2에 나타내었다.  $\alpha 1$ 모드의 경우 (w-p-v)와 마찬가지로 변위는 주로 파이프 내의 유체에서 발생함을 알 수 있다. 배관 벽면을 벗어나 토양으로 전파되는 변위가 요동하는 것으로부터,  $\alpha 1$ 모드는 이 토양모델에 대해 누설 특성을 갖는다는 것을 알 수 있다. 누설에 의한 에너지손실은  $\alpha 1$ 모드가 감쇠특성을 갖게 만드는 가장 주요한 원인이다.  $\alpha 3$ 모드의 형상은  $\alpha 1$ 모드와 다르다는 것을 Fig. 2(b)에서 확인할 수 있다.

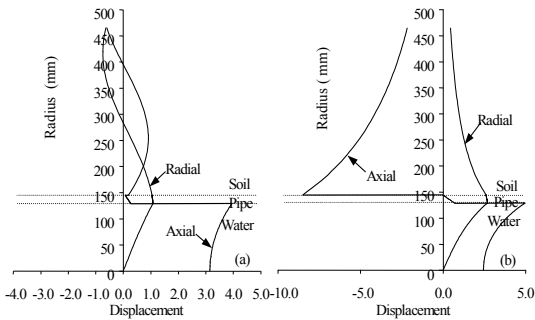


Fig. 2 Axial and radial mode shapes obtained from Fig. 1 at 2.5 kHz for (a) $\alpha 1$ , (b) $\alpha 3$

즉 배관 벽면을 벗어나 거리가 증가할수록 변위는 지수적으로 감소함을 알 수 있다. 이는 유체 하중을 받는 평판에서 관찰된 쇼트모드(Sholte mode)와 유사한 특성을 갖는다.

위상속도가 외부 매체의 벌크속도  $C_L$ 보다 작을 경우, 스넬의 법칙으로부터 에너지는 벌크 파동(bulk wave)의 형태로 외부 매체로 누설되지 않는다는 사실을 확인할 수 있다. 따라서  $\alpha 3$ 모드는 전주파수에 걸쳐 비누설 특성을 갖는다는 사실을 알 수 있다.  $\alpha 3$ 모드의 특성은 외부 매체의 성질에 의해 지배받는다. Fig. 1에서 저주파수에서 위상속도의 점근선이  $C_{L\ soil}$ 이라는 사실로부터 이를 확인할 수 있다. 따라서  $\alpha 3$ 모드의 감쇠는 외부 토양의 손실 특성에 의해 좌우될 것이다.

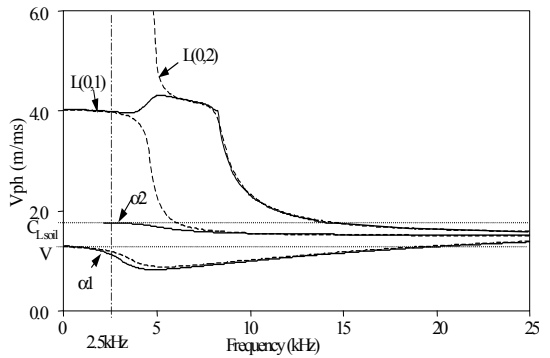


Fig. 3 Phase velocity dispersion curves (solid line: w-p-s( $C_{L\ soil} > V$ ), dashed line: w-p-v)

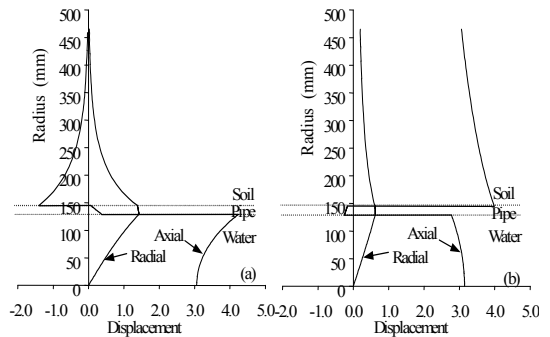


Fig. 4 Axial and radial mode shapes obtained from Fig. 3 at 2.5 kHz for (a) $\alpha 1$ , (b) $\alpha 2$

토양의 특성이  $C_{L\ soil} > V$ 일 경우 위상속도 분산선도를 Fig. 3에 나타내었는데 그림으로부터  $L(0,1)$ 모드와  $\alpha 1$ 모드의 특성은 Fig. 1에 보인  $C_{L\ soil} < V$  토양모델에 대한 경우와 매우 유사하

다는 것을 알 수 있다. 그러나 위상속도가 항상  $C_{L \text{ soil}}$  보다 작은  $\alpha_3$ 모드는 나타나지 않는데 이는  $C_{L \text{ soil}}$  이 누설잡음 속도  $V$ 보다 크기 때문이다. 한편 이 토양모델의 경우 저주파수에서  $\alpha_2$ 모드가  $C_{L \text{ soil}}$  에 접근하는데 이때 이 모드의 주파수 0에서의 속도도 0으로 감소하지 않기 때문에 전파가능한 모드라고 생각할 수 있다. 그리고  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ 모드 모두 전주파수영역에서 위상속도가  $C_{L \text{ soil}}$  보다 작기 때문에 비누설 모드이다.

주파수 2.5 kHz에서 전파되는 모드들의 모드형상은 Fig. 4에 제시하였다. 토양모델이 달라졌지만 배관이나 유체 내에서의 모드의 형상은 크게 달라지지 않았음을 알 수 있다. 다만 외부 토양에서의 변위가 요동하지 않는 것으로부터  $\alpha_1$ 모드는 비누설 특성을 갖는다는 것을 확인할 수 있다.  $\alpha_2$ 모드의 형상은 솔트 형태의  $\alpha_3$ 모드와 유사하게 토양 내에서 변위가 지수적으로 감소하는 특성을 나타낸다. 따라서  $C_{L \text{ soil}} > V$ 일 경우  $\alpha_2$ 모드도 항상 비누설 특성을 갖는다는 것을 알 수 있다. 감쇠는 토양의 손실 특성에 의해 좌우될 것이다. 또한  $\alpha_2$ 모드의 경우  $\alpha_1$ 모드에 비해 배관 벽면에서의 변위가 크기 때문에 산란에 의한 감쇠가 큰 문제로 대두될 수 있다.

### 3. 축대칭 모드의 전파 가능성험

#### 3.1 토양의 벌크 종방향, 전단방향 속도

2장에서 구한 축대칭 모드는 외부 토양의 벌크 전단속도  $C_s$ 가 0일 경우에 대한 결과이다. 분산선도를 구할 때도 매우 작은  $C_s$  값을 사용하여 계산하였다. 그러나 축대칭 모드가 전단파 형태로 누설될 때는 토양의 전단속도의 크기에 따라 감쇠가 영향을 받는다. 본 장에서는 여러 문헌들을 참고하여 실제 토양에서 나타날 수 있는 다양한 크기의 벌크 종방향, 전단방향 속도를 고려하여 위상속도 및 감쇠가 어떻게 달라지는지 살펴보고자 한다. 토양으로 많은 양의 에너지를 잃어버리는 누설파의 경우 누설에너지가 감쇠되어도 배관에서 전파되는 파동은 거의 영향을 받지 않는다.

그러나 비누설파의 경우 전파되는 파동에너지가 토양-배관-유체 시스템에 갇히게 되기 때문에 토양의 감쇠는 배관에서 파동이 전파될 수 있는 가능성에 큰 영향을 미치게 된다. 축대칭 모드의 전파 가능성을 조사하기 위해 Table 1의 재료 특성을 사용하여 지하매설 유체 함입 배관의 위상속도 및 감쇠에 대한 분산선도를 계산하였다.

지질학 분야에서 토양 특성을 연구할 때는 지하 깊은 곳의 토양이 연구대상이지만 수도관은 지표면으로부터 1m 이내에 매립되어 있는 경우가 대부분이다. 지표면 근처의 모래나 토양에 대한 연구는 Bowles<sup>9)</sup>와 Bachrach 등<sup>10)</sup>에 의해 수행되었는데 이들은 토양의 종방향, 전단방향 속도는 위에서 누르는 가압(overburden pressure)의 크기에 의해 좌우된다는 사실을 밝혔다. 즉 종방향 속도는 수분의 포화 정도에 따라 달라진다는 것이다. 지표면 근처의 수분이 많이 함유된 비강화 포화 토양(unconsolidated saturated soil)일 경우 종방향 속도는 1,750 m/s 이지만 마른 모래일 경우 속도는 250 m/s 감소한다. 전단속도는 토양의 가압, 또는 포화 정도에 크게 영향을 받지 않는데 이는 전단방향 운동은 접촉에 의해 발생하기 때문이다. 따라서 Table 1에 나타난 토양모델은 1m 깊이에 묻혀있는 배관의 평균적인 토양 특성을 나타내는 경우에 해당하며 벌크 종방향 속도  $C_L$ 만이 포화 정도에 따라 달라진다. 본 논문에서는 배관의 원주방향을 따라서는 토양의 특성이 동일하다고 가정하였으며, 배관에서 멀리 떨어진 곳의 토양 특성 변화도 파동이 배관을 따라 전파하는데 미치는 영향이 작기 때문에 무시하였다.

#### 3.2 축대칭 모드의 파동 전파 특성

토양의 종방향 벌크 속도가 700에서 2,000 m/s 사이에서 변할 때 유체 함입 지하매설 배관의  $\alpha_1$  모드의 위상 속도와 감쇠를 Fig. 5(a)와 (b)에 각각 나타내었다.  $C_{L \text{ soil}} < V$ (Table 1의 재료 특성을 고려하면  $V=1,290$  m/s)일 때 저주파수에서  $\alpha_1$ 모드의 감쇠는 작은 것을 알 수 있는데, 이는 파동의 운동이 축방향 성분이 우세하고 수인성이기 때문이다. 그러나 주파수가 증가하면 배관 외부 표면

에서의 변위가 수인성 축방향 변위에 비해 상대적으로 커지기 때문에 누설에 의한 감쇠가 증가하게 된다.

$C_L \text{ soil} < V$  일 때와  $C_L \text{ soil} > V$  일 때를 비교하면 위상속도와 감쇠가 갑자기 도약하는 현상이 발생하는 것을 알 수 있는데, 이는 위상속도가  $C_L \text{ soil}$  보다 클 경우  $\alpha 1$  모드는 종방향, 전단방향으로 모두 에너지를 누설하기 때문이다. 그러나 위상속도가  $C_L \text{ soil}$  보다 작을 경우  $\alpha 1$  모양의 종방향 벌크 속도가 1,600에서 2,000 m/s 모드는 전단방향으로만 에너지를 누설하기 때문에 감쇠가 작게 나타난다. 따라서  $C_L \text{ soil} < V$ 의 특성을 갖는 토양에서는 반사되는  $\alpha 1$  모드를 검출하기 어렵고 따라서 장거리 탐사에 적합하지 않다는 것을 알 수 있다.

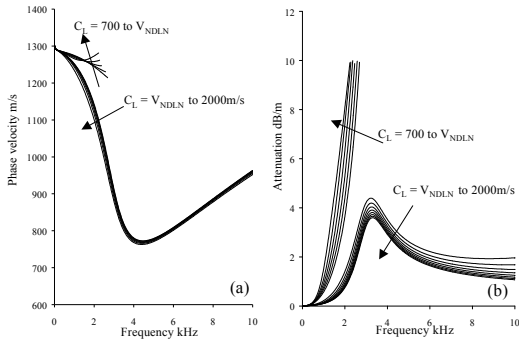


Fig. 5  $\alpha 1$  mode dispersion curves as  $C_L = 700$  to 2,000 m/s (a) phase velocity, (b) attenuation

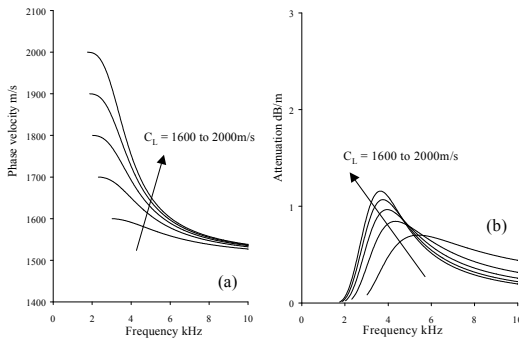


Fig. 6  $\alpha 2$  mode dispersion curves as  $C_L = 1,600$  to 2,000 m/s (a) phase velocity, (b) attenuation

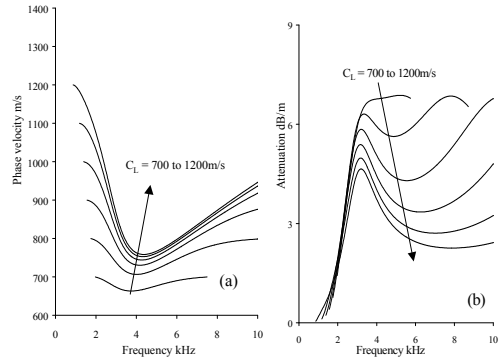


Fig. 7  $\alpha 3$  mode dispersion curves as  $C_L = 700$  to 1,200 m/s (a) phase velocity, (b) attenuation

사이에서 변할 때 유체 함입 지하매설 배관의  $\alpha 2$  모드의 위상 속도와 감쇠를 Fig. 6(a)와 (b)에 각각 나타내었다. 이 경우  $\alpha 2$  모드의 위상속도는 항상  $C_L \text{ soil}$  보다 작기 때문에 누설은 전단방향으로만 발생한다. 유체 함입 지하매설 배관에서  $C_L \text{ soil} > V$  일 때  $\alpha 2$  모드의 모드형상은 Fig. 4(b)에서 이미 살펴보고있고 비누설파라는 것도 확인하였다. 주파수 2.5 kHz에서  $\alpha 2$  모드의 수인성 축방향 변위는 Fig. 4(a)의  $\alpha 1$  모드와 유사하다. 외부 토양에서의  $\alpha 2$  모드의 축방향 변위는 배관 내에서의 변위보다 훨씬 크고, 거리가 증가함에 따라 감소하는 비율도  $\alpha 1$  모드에 비해 매우 작다. 따라서  $\alpha 2$  모드의 전파 특성은 외부 토양의 손실 특성에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 잘 알려진 L(0,1) 모드 외에 지하 매설 유체 함입 배관에서 파동이 전파될 수 있는 축대칭 모드를 찾고 그 특성을 규명하였다.  $\alpha 1$  모드는 기본 모드인 L(0,1) 모드와 마찬가지로 주변 토양특성에 상관없이 항상 존재하는 것을 확인하였다.  $\alpha 2$  모드는  $C_L \text{ soil} > V$  일 때 저주파수에서 나타나는 반면  $\alpha 3$  모드는  $C_L \text{ soil} < V$  일 때 존재하는 것을 확인하였다.

특정 모드가 장거리를 전파할 수 있는지를 확인하기 위해 누설에 의한 분산 모드형상을 조사

하였다.  $L(0,1)$  모드는 배관 벽면에서 축방향 변위가 주요하게 나타나는 모드로 에너지 분산에 의해 쉽게 감소되어 사라지는 반면  $\alpha_1$  모드는 유체 내에서 축방향 변위가 주요하게 나타나기 때문에 토양 감쇠의 영향을 덜 받는 것을 확인하였다.  $\alpha_2$  모드와  $\alpha_3$  모드는 외부 토양에서의 변위가 크게 나타나는 모드로, 평판의 솔트 모드와 유사하게 외부 토양의 특성에 크게 영향을 받는다는 사실을 검증하였다.

## 후 기

본 연구는 2011년 지식경제부 지원 중화학설비 안전진단 센터사업의 일부 지원에 의해 수행되었음을 밝힙니다.

## 참고문헌

1. D. A. Liston and J. D. Liston, 1992, "Leak Detection Techniques", Journal of the New England Water Works Association, Vol. 106, pp. 103-108.
2. O. Hunaidi, W. Chu, A. Wang and W. Gaun, 1999, "Leak Detection Methods for Plastic Water Distribution Pipes", AWWA Conference, Florida, pp. 234-247.
3. A. Demma, D. Alleyne and B. Pavlakovic, 2005, "Testing of Buried Pipelines Using Guided Waves", 3rd MENDT Conference, Bahrain, pp. 169-175.
4. R. Caradente, J. Ma and P. Cawley, 2010, "The Scattering of the Fundamental Torsional Mode from Axi-symmetric defects with Varying Depth Profile in Pipes", Journal of Acoustic Society of America, Vol. 127, pp. 3440-3448.
5. A. Velichko and P. D. Wilcox, 2010, "Efficient Finite Element Modeling of Elastodynamic Scattering from Near Surface and Surface-Breaking Defects", Review of the Progress in Quantitative NDE, Vol. 30A, pp. 59-66.
6. R. Long, K. Vine and M. Lowe, 2001, "Monitoring Acoustic Wave Propagation in Buried Cast Iron Water Pipes", Review of the Progress in Quantitative NDE, Vol. 20B, 1202-1209.
7. R. Long, M. Lowe and P. Cawley, 2003, "Attenuation Characteristics of the Fundamental Modes that Propagate in Buried Iron Water Pipes", Ultrasonics, Vol. 41, pp. 509-519.
8. K. J. Park, W. S. Woo and Y. G. Kim, 2009, "Attenuation Characteristics of the Buried Steel Water Pipes", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 39-45.
9. F. A. Bowles, 1997, "Observations on Attenuation and Shear-Wave Velocity in Fine-Grained, Marine Sediments", Journal of Acoustic Society of America, Vol. 101, pp. 3385-3397.
10. R. Bachrach, J. Dvorkin and A. Nur, 1998, "High-Resolution Shallow-Seismic Experiments in Sand, Part II: Velocities in Shallow Unconsolidated Sand", Geophysics, Vol. 63, pp. 1234-1240.
11. K. J. Park, 2006, "Characteristics of Acoustic Waves that Propagate in Buried Water Pipes", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 65-70.