

매립된 유체함입 강파이프의 파동전파 특성규명 Characteristics of Acoustic Waves That Propagate in Buried Iron Water Pipes

박 경 조
K. J. Park

Key Words : Acoustic Wave(파동), Water borne mode(수인성 모드), Buried water pipes(매립된 유체함입 파이프)

Abstract : A study of the possible axisymmetric modes that propagate at low frequencies in buried, water-filled iron 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. In this paper the predicted characteristics of these modes are presented.

1. 서 론

셀구조물을 따라 진행하는 유도파(guided wave)에 대한 연구가 최근 활발하게 이루어지고 있다. 진공 상태에 놓여있는 실린더의 조화파동에 대한 일 반해는 Gazis¹⁾에 의해 구하여졌다. 내부에 유체가 차있는 실린더에서의 파동전파는 Morse²⁾에 의해 시작되었고, 최근에는 Sinha et al.³⁾, Plona et al.⁴⁾ 그리고 Aristegui et al.⁵⁾ 등에 의해 유체에 잠겨있 거나, 내부에 유체가 차있는 파이프에 대한 연구가 수행되었다. 본 논문에서는 유체가 차있는 파이프가 토양에 묻혀있는 경우의 파동전파를 다루고자 한다. 즉 묻혀있는 유체파이프를 따라 누수잡음(leakage noise)이 일정 거리 이상을 전파할 때의 모드 형태를 분석하고자 한다. 분석결과는 음향신호해석에 의한 누수 위치탐사 기법을 개선하는데 사용될 수 있을 것이다.

Listons⁶⁾은 누수의 특성에 따라, 누수잡음의 가진 주파수 대역폭이 0.02에서 1kHz 사이에서 변화한다고 주장하였다. 측정점에서 누수위치까지의 거리 $d/2$ 는 누수잡음이 비분산속도 V 로 전파된다고 가정하면

쉽게 계산할 수 있다. 그러나 실제로는 파이프의 직 경이 커질수록 누수위치를 정확하게 탐지해내는 것 은 점점 더 어려워지고, 이로부터 누수잡음이 단일, 비분산모드로 전파된다고 가정하는 것은 합리적이지 않다는 사실을 알 수 있다. 누수잡음 상관기(leak noise correlator)를 사용할 때 발생하는 누수위치 탐지의 부정확성에 대해서는 Hunaidi et al.⁷⁾이 연구하였다. 이 연구결과로부터 신호의 분산특성을 고려하지 않으면 상관함수에 잡음이 섞이게 되어 확실한 피크를 구분해내지 못하는 효과를 유발한다는 사실을 알 수 있다.

Long et al.^{8,9)}은 땅 속에 묻혀있는 강철 수도관을 따라 전파되는 모드의 주요성분은, 저주파수에서 축 방향 수인성(water-borne) 변위를 갖는 모드임을 발견하였다. 현재 사용되고 있는 음향신호에 의한 누설위치 탐지방식은 저주파수에서의 이 수인성 분산모드의 점근속도(asymptotic velocity)를 갖는 단일 비분산모드가 전파된다고 가정하고 누설위치를 계산한다. 본 논문에서는 이 모드 외에 잘 알려지지 않은 두 개의 축대칭 모드를 발견하고 그 특성을 조사하고자 한다. 이 모드들은 파이프가 묻혀있는 외부 매체의 음향특성에 따라 존재여부가 결정되는 파동들이다. 이러한 모드들의 특성을 예측하고 묻혀 있는 수도관을 따라 어느 거리까지 전파할 수 있는 지를 살펴본다. 그리고 예측결과를 실험결과와 비교

접수일 : 2005년 8월 31일
박경조(책임저자) : 여수대학교 공과대학 기계자동차공학부
E-mail : kjpark@yosu.ac.kr

하여 본 논문에서 제시한 방법의 타당성을 검토하고자 한다.

2. 축대칭 모드

물려있는 유체함입 파이프를 전파하는 실제 파동의 특성은 영국 Imperial College에서 개발한 파동 해석 소프트웨어 Disperse^{®10)}를 사용하였다. 물려있는 파이프의 경우 전파되는 파동의 특성은 파이프의 재료나 형상 그리고 외부 매체의 음향특성에 따라 달라진다. Fig. 1은 대상 파이프(직경 10인치 단조강 파이프(벽두께=16mm))의 예측된 위상속도 선도를 나타내고 있다. 그림에서 점선은 파이프 내, 외부가 모두 진공상태에 놓여져 있는($v-p-v$), 잘 알려진 위상속도 선도를 나타낸다. 그림에서 $L(0,1)$ 은 첫 번째 축대칭 모드를, $L(0,2)$ 는 두 번째 축대칭 모드를 나타낸다.

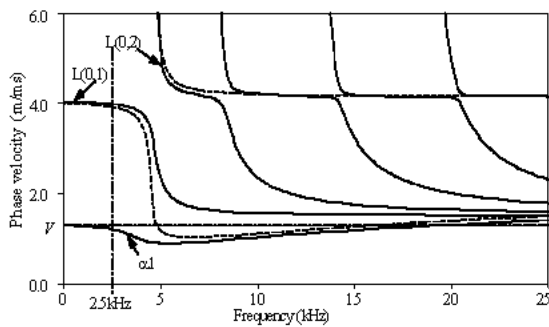


Fig. 1 Phase velocity dispersion curves (solid line : w-p-v, dashed line : v-p-v)

내부에 유체가 함유되어 있고 외부는 진공으로 둘러싸인($w-p-v$) 파이프에 대한 분산속도는 Fig. 1에 실선으로 나타내었다. $L(0,1)$ 모드는 ($v-p-v$)의 경우와 유사한 특성을 갖지만, ($v-p-v$)에서는 나타나지 않았던 새로운 모드 $\alpha 1$ 이 나타나는 것을 볼 수 있다. $\alpha 1$ 모드는 축대칭이고 저주파수에서의 변위는 축방향, 수인성이다. Fig. 1의 아래쪽에 점선으로 표시한 수평선은 $\alpha 1$ 모드 위상속도의 저주파수 점근선 (V)을 나타내는데, 속도 V 는 Pinnigton과 Briscoe¹¹⁾가 유도한 비분산 누수잡음속도에 해당된다.

$$V = \frac{C_L}{\left[1 + \frac{Bva}{Eh}\right]^{1/2}} \quad (1)$$

여기서 C_L 은 유체의 종방향 벌크속도(longitudinal

bulk velocity)¹²⁾이고, B 는 유체의 벌크 탄성계수(bulk modulus), E 와 v 는 파이프 구성 재료의 영계수와 포와송비이다. a 는 파이프의 내경이고 h 는 파이프의 두께이다. 수식으로부터 V 는 진공으로 둘러싸인 유체함입 파이프의 축방향을 따라 전파되는 장파장(long wavelength), 수인성 평면파(plane wave)에 관련된 속도임을 알 수 있다. 주파수 2.5kHz에 나타난 수직 일점쇄선은 신호측정 시, 허용 가능한 신호잡음비(signal-to-noise ratio)를 갖는 신호의 주파수 상한선을 나타낸다.

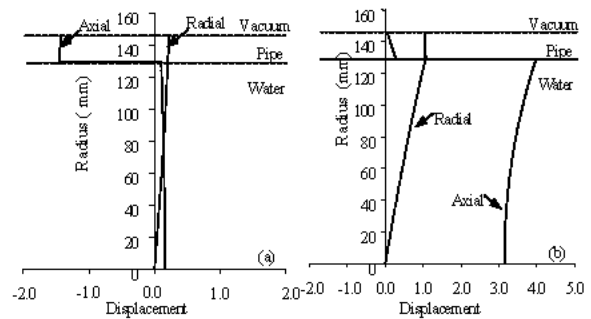


Fig. 2 Axial and radial mode shapes obtained from Fig. 1 at 2.5 kHz for (a) $L(0,1)$, (b) $\alpha 1$

Fig. 2(a), (b)에는 2.5kHz에서의 $L(0,1)$ 과 $\alpha 1$ 모드의 정규화된 모드형상(power normalized mode shape)을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 $L(0,1)$ 모드의 축방향 변위는 주로 파이프 벽면에서 발생한다. $L(0,1)$ 모드의 감쇠는 파동이 조인트(joint)나 피팅(fitting)을 만났을 때 발생하는 파동산란(wave scattering)에 부분적으로 기인하고, 또 파이프가 토양에 의해 둘러싸였을 때 발생하는 에너지누설에 의해서도 발생한다. 유도파의 위상속도가 토양의 벌크속도보다 클 때 에너지누설이 발생하는데, $L(0,1)$ 모드의 경우 실제의 모든 토양에 대해 이 조건을 만족한다. $\alpha 1$ 모드의 축방향 변위는 주로 파이프 내부를 채우고 있는 유체에서 발생하는 것을 알 수 있다.

유체를 함유하고 있는 파이프가 토양에 의해 둘러싸여있을 때 ($w-p-s$)의 분산선도를 조사하였다. 이때 토양은 전단력을 지지하지 못하는 것으로 가정하였다. 분산선도 예측에 사용된 재료의 특성은 Table 1에 나타내었다. 표에서 p 는 밀도, C_L 는 종방향 속도, C_S 는 전단속도(shear velocity)를 나타낸다. 토양의 종방향 벌크속도가 $\alpha 1$ 모드의 저주파수 점근속도보다 작을 때($C_{L, soil} < V$)의 위상속도 선도는 Fig. 3에 나타내었다. 진공상태에 놓여있는 경우와

마찬가지로 $\alpha 1$ 모드가 나타나게 되고 $C_{L\ soil}$ 의 전범 위에 걸쳐 존재하는 것을 알 수 있다.

Table 1 Material properties

Material	Density ρ (g/cm ³)	C_L (m/s)	C_S (m/s)
water	1.0	1480	0
Cast iron pipe	7.1	4500	2500
$C_{L\ soil} < V$	1.0	900	0
$C_{L\ soil} > V$	1.0	1750	0

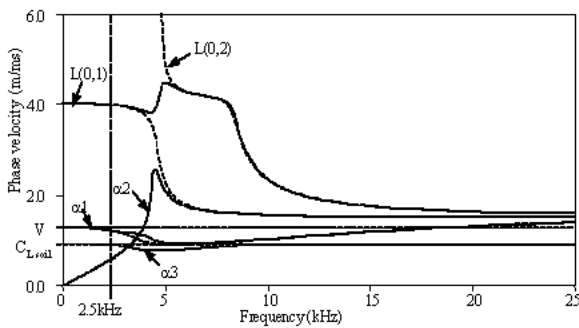


Fig. 3 Phase velocity dispersion curves (solid line : $w-p-s$ ($C_L\ soil < V$), dashed line : $w-p-v$)

한편 $L(0,1)$ 모드는 저주파수에서는 ($w-p-v$)의 곡선을 따라가지만, 최대 감쇠가 발생하는 주파수 영역에서는 $L(0,2)$ 모드로 건너뛰어, 이후 주파수가 증가함에 따라 $L(0,2)$ 모드를 따르는 것을 알 수 있다. 고주파수에서 ($w-p-v$)에 대한 $L(0,1)$ 곡선을 따르는 $\alpha 2$ 모드가 나타나는 것을 그림으로부터 확인할 수 있다. 이 토양모델의 경우 저주파수에서 $\alpha 2$ 모드의 위상속도는 0이 되기 때문에, 이 영역에서 고감쇠가 발생하고 따라서 실제로 파동이 전파될 수 없다는 사실을 알 수 있다. 위상속도가 $C_{L\ soil} < V$ 일 때 새로운 모드 $\alpha 3$ 가 나타나게 된다. 저주파수와 고주파수에서 $\alpha 3$ 의 위상속도는 $C_{L\ soil}$ 에 점근적으로 접근함을 알 수 있다.

Fig. 3에서 주파수 2.5kHz일 때 전파되는 모드들의 모드형상을 Fig. 4에 나타내었다. $\alpha 1$ 모드의 경우 Fig. 2(b)의 ($w-p-v$)와 마찬가지로 변위는 주로 파이프 내의 유체에서 발생함을 알 수 있다. 파이프 벽면을 벗어나 토양으로 전파되는 변위가 요동하는 것으로부터, $\alpha 1$ 모드는 이 토양모델에 대해 누설 특성을 갖는다는 것을 알 수 있다. 누설에 의한 에너

지손실은 $\alpha 1$ 모드가 감쇠특성을 갖게 만드는 가장 주요한 원인이다. $\alpha 3$ 모드의 형상은 $\alpha 1$ 모드와 다르다는 것을 Fig. 4(b)에서 확인할 수 있다. 즉 파이프 벽면을 벗어나 거리가 증가할수록 변위는 지수적으로 감소함을 알 수 있다. 이는 유체하중을 받는 평판(plate)에서 관찰된 쇼트 모드(Sholte mode)¹²⁾와 유사한 특성을 갖는다.

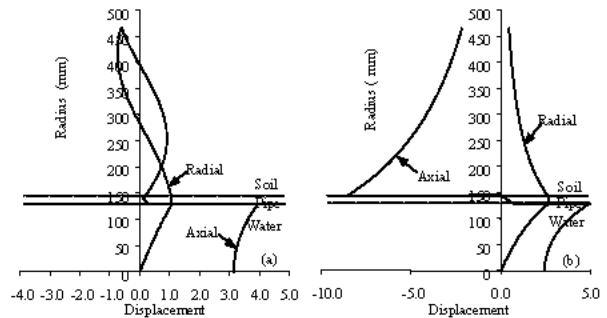


Fig. 4 Axial and radial mode shapes obtained from Fig. 3 at 2.5 kHz for (a) $\alpha 1$, (b) $\alpha 3$

위상속도가 외부 매체의 벌크속도 C_L 보다 작은 경우, 스넬의 법칙(Snell's Law)¹²⁾으로부터 에너지는 벌크파동(bulk wave)의 형태로 외부 토양으로 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 지배된다. Fig. 3에서 저주파수에서 위상속도의 점근선이 $C_{L\ soil}$ 이라는 사실로부터 이를 확인할 수 있다. 따라서 $\alpha 3$ 모드의 감쇠는 외부 토양의 손실특성에 의해 좌우될 것이다.

토양의 특성이 $C_{L\ water} > C_{L\ soil} > V$ 일 경우 $L(0,1)$ 모드의 특성은 Fig. 3에 보인 $C_{L\ soil} < V$ 토양모델에 대한 경우와 매우 유사하다. $\alpha 1$ 모드는 존재하겠지만 $\alpha 3$ 모드는 나타나지 않을 것이다. 이는 $C_{L\ soil} > V$ 이기 때문이다. $\alpha 2$ 모드의 위상속도는 주파수가 0으로 접근하면 Fig. 3의 경우와 마찬가지로 0으로 접근할 것이다. 왜냐하면 $C_{L\ soil} < C_{L\ water}$ 일 경우 항상 이러한 현상이 나타나기 때문이다.

토양의 종방향 속도가 유체의 종방향 속도보다 클 때($C_{L\ soil} > C_{L\ water}$) 나타나는 위상속도 분산선을 Fig. 5에 나타내었다. $\alpha 1$ 모드는 나타나지만 $\alpha 3$ 모드는 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 앞의 두 경우에는 $\alpha 2$ 모드가 저주파수에서 속도 0으로 접근하였지만, Fig. 5에서는 $C_{L\ soil}$ 로 접근하는 것을 확

인할 수 있다. 주파수 2.5kHz에서 전파되는 모드들의 모드형상은 Fig. 6에 제시하였다. 토양모델이 달라졌지만 파이프나 유체 내에서의 $\alpha 1$ 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 나타내었다. $\alpha 2$ 모드가 저주파수에서 전파할 때는 항상 비누설 특성을 갖는다. 감쇠는 토양의 손실 특성에 의해 좌우될 것이다. 또한 $\alpha 2$ 모드의 경우 $\alpha 1$ 모드에 비해 파이프 벽면에서의 변위가 크기 때문에 산란에 의한 감쇠가 큰 문제로 대두된다.

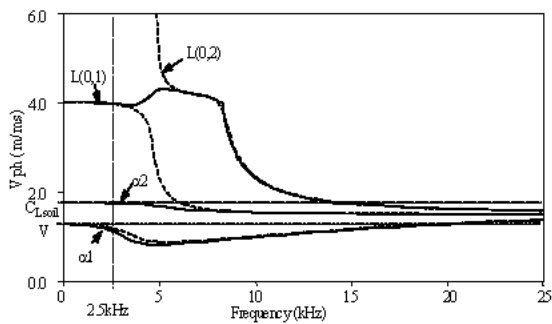


Fig. 5 Phase velocity dispersion curves (solid line : w-p-s(C_L soil > C_L water), dashed line : w-p-v)

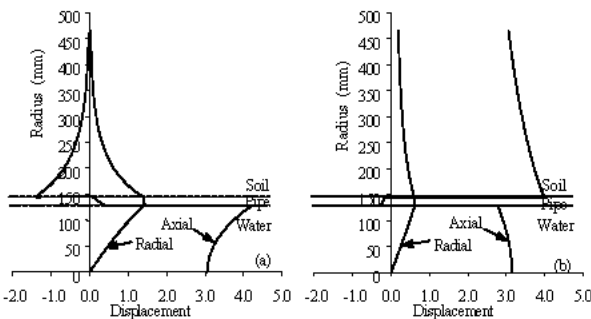


Fig. 6 Axial and radial mode shapes obtained from Fig. 5 at 2.5 kHz for (a) $\alpha 1$, (b) $\alpha 2$

3. 예측 및 실험결과의 비교, 검토

앞의 2장에서 예측한 산란선도의 타당성을 검토하기 위해 세 장소의 묻혀있는 수도관에 대한 실험을 수행하였다. Fig. 7에 실험장치의 개략도를 제시하였다. 파이프에 가진장치 및 센서를 설치하기 위해 각 실험장소에서는 세 군데에서 파이프 주변의 토양을 제거하였다. 그림에서 보듯이 이 중 한 위치

에 파이프 벽면에서의 저주파수 모드(LF mode)를 가진할 수 있는 태퍼(tapper) 장치를 파이프 벽에 부착하였다. 파이프 원주방향으로 각각 네 개의 가속도계가 동일 간격으로 부착되어 있는 다른 두 위치에서 전파되는 파동을 측정하였다. 각 가속도계에서 에버리징된(averaged) 신호를 모두 더하여 한 위치에 전달되는 신호를 계산하였는데 이는 원치않는 비대칭 진동신호를 제거하기 위한 것이다. 그리고 이들 신호를 바탕으로 위상속도는 다음 식으로 계산할 수 있다⁸⁾.

$$V_{ph} = \frac{\omega}{k} = \frac{z\omega}{\Delta\phi(\omega)} \tag{2}$$

여기서 ω 는 주파수, k 는 파동수이다. 또한 z 는 두 측정위치 사이의 거리이고, $\Delta\phi(\omega)$ 는 입력과 출력 사이의 교차 스펙트럼(cross spectrum)의 주파수에 따른 위상을 나타낸다.

각 실험장소에서 측정한 토양특성을 Table 2에 제시하였다. 장소 1과 2에서의 토양 특성은 C_L soil < V 이고, 장소 3에서는 C_L soil > V 이다. 세 실험장소 모두 토양밀도 ρ 와 토양 전단속도 C_S 는 매우 유사한 특성을 갖는다.

Table 2 Soil material properties

Test site	Density ρ (g/cm ³)	C_L soil(m/s)	C_S soil(m/s)
1	1.95	900	80
2	2.10	350	72
3	1.95	1900	84

실험장소 1에서 수신한 시간신호를 Fig. 8에 나타내었는데 이 때 측정위치 사이의 거리 $z=9.9m$ 이었다. 이 경우처럼 파동의 전파거리가 상대적으로 짧으면 $L(0,1)$ 모드가 수신신호에 뚜렷하게 나타나게 되고 또 가장 먼저 도착하는 것을 알 수 있다. 그러나 이 모드는 측정거리가 10m 이상이 되면(Fig. 9~11) 감지할 수 없다는 것을 알 수 있다. 모든 측정결과에서 $\alpha 1$ 모드와 $\alpha 3$ 모드가 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. $\alpha 3$ 모드의 속도는 토양의 벌크속도 C_L 과 그 크기가 일치하는데 그 값은 900%이다. 같은 실험장소에서 측정위치 사이의 거리가 175m인 경우의 수신신호가 Fig 9에 제시되어 있다. 그림에서 거리가 멀리 떨어져도 $\alpha 1$ 모드가 주요하게

나타나며, α_3 모드도 뚜렷하게 존재하는 것을 알 수 있다.

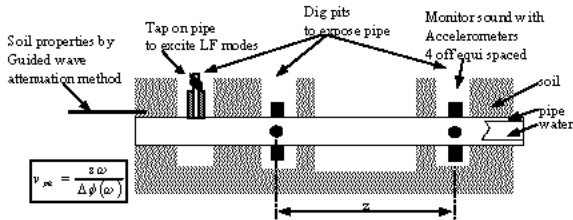


Fig. 7 Experimental setup for buried water pipes

두 번째 실험장소에서 측정위치 사이의 거리가 21.6m일 때 측정된 결과를 Fig. 10에 제시하였다. α_1 모드와 α_3 모드가 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있으며 이때 토양의 C_L 은 350%로 측정되었다. Fig. 11에는 세 번째 장소에서, 측정위치 사이의 거리가 16.5일 때의 결과를 나타내었다. 이 경우 α_1 모드만 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 장소에서의 C_L 은 1900%로 측정되었고, 따라서 수신 신호에 α_2 모드가 뚜렷하게 나타날 것을 예측하였다. 그러나 $L(0,1)$ 모드와 마찬가지로 α_2 모드도 파이프 조인트에서의 분산에 의한 감쇠 때문에 대부분의 신호가 소멸되어 나타나지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

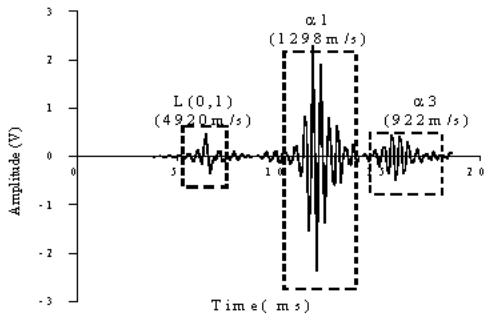


Fig. 8 Time trace for site 1 where $z=9.9m$

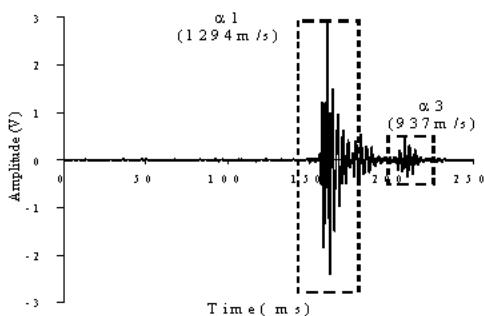


Fig. 9 Time trace for site 1 where $z=175m$

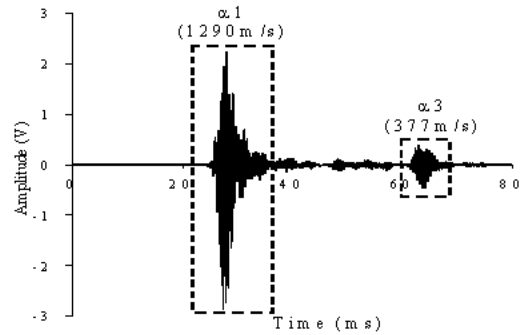


Fig. 10 Time trace for site 2 where $z=21.6m$

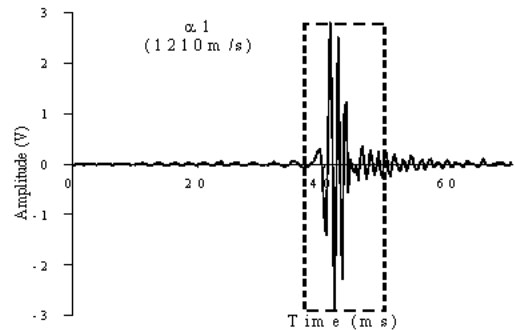


Fig. 11 Time trace for site 3 where $z=16.5m$

4. 결 론

토양 속에 묻힌 유체함입 강파이프의 축대칭모드 특성을 규명하였다. 기본 모드인 $L(0,1)$ 모드와 α_1 모드는 주변 토양특성과 상관없이 모든 유체함입 파이프에서 관찰되었다. α_2 모드는 $C_{L\ soil} > V$ 일 때 저주파수에서 나타나는 반면, α_3 모드는 $C_{L\ soil} < V$ 일 때 존재하는 것을 확인하였다. 즉 이 두 모드는 평판의 솔트 모드와 유사하게 주변 매질에 크게 영향을 받는다는 사실을 검증하였다.

특정 모드가 저주파수에서 장거리를 전파할 수 있는지를 확인하기 위하여 누설에 의한 분산 모드 형상을 조사하였다. $L(0,1)$ 모드는 파이프 벽면에서 축방향 변위가 주요하게 나타나는 모드로 에너지 분산에 의해 쉽게 감쇠되어 사라지는 반면, α_1 모드는 유체 내에서 축방향 변위가 주요하게 나타나기 때문에 감쇠의 영향을 덜 받는 것을 확인하였다.

실제 토양에서 어떤 모드가 전파되고 그 때의 분산속도 예측결과를 증명하기 위하여 세 실험장소에서 실험을 수행하였다. 실험결과로부터 각 모드의 전파 가능거리도 예측할 수 있었다.

후 기

본 연구는 여수대학교 2004년도 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. D. C. Gazis, 1959, "Three Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders I", *Journal of the Acoustic Society of America*, Vol. 31, No. 5, pp. 568~578.
2. P. M. Morse, 1939, "Some Aspects of the Theory of Room Acoustics", *Journal of the Acoustic Society of America*, Vol. 11, No. 1, pp. 205~210.
3. B. K. Sinha, T. J. Plona, S. Kostek and S. K. Chang, 1992, "Axisymmetric Wave Propagation in Fluid-Loaded Cylindrical Shells. I: Theory", *Journal of the Acoustic Society of America*, Vol. 92, No. 5, pp. 1132~1143.
4. T. J. Plona, B. K. Sinha, S. Kostek and S. K. Chang, 1992, "Axisymmetric Wave Propagation in Fluid-Loaded Cylindrical Shells. I: Theory versus Experiment", *Journal of the Acoustic Society of America*, Vol. 92, No. 5, pp. 1144~1155.
5. C. Aristegui, P. Cawley and M. Lowe, 1999, "Guided Waves in Fluid-Filled Pipes Surrounded by Different Fluids: Prediction and Measurement", *Review of the Progress in Quantitative NDE*, Vol. 18a, 159~166.
6. D. A. Liston and J. D. Liston, 1992, "Leak Detection Techniques", *Journal of the New England Water Works Association*, Vol. 106, No. 2, pp. 103~108.
7. O. Hunaidi, W. Chu, A. Wang and W. Gaun, 1999, "Leak Detection Methods for Plastic Water Distribution Pipes", *AWWA Research Foundation Technology Transfer Conference, Florida*, pp. 234-247.
8. R. Long, K. Vine, M. Lowe and P. Cawley, 2001, "Monitoring Acoustic Wave Propagation in Buried Cast Iron Water Pipes", *Review of the Progress in Quantitative NDE*, Vol. 20b, 1202~1209.
9. R. Long, K. Vine, M. Lowe and P. Cawley, 2002, "The Effect of Soil Properties on Acoustic Wave Propagation in Buried Iron Water Pipes", *Review of the Progress in Quantitative NDE*, Vol. 21, 1310~1318.
10. M. J. S. Lowe, 1995, "Matrix Techniques for Modelling Ultrasonic Waves in Multilayered Media", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 42, pp. 525~542.
11. R. J. Pinnington and A. R. Briscoe, 1994, "Externally Applied Sensor for Axisymmetric Waves in a Fluid-Filled Pipe", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 173, No. 4, pp. 503~516.
12. J. L. Rose, 1999, "Ultrasonic Waves in Solid Media", Cambridge University Press(Chapter 2).