

비틀림 유도파를 이용한 근지표면 전단속도 규명

Identification of the Shear Velocities of Near Surface Soils Using Torsional Guided Waves

박 경 조*·오 형 수*

Kyung-Jo Park and Hyung-Soo Oh

(2012년 5월 24일 접수 ; 2012년 7월 5일 심사완료)

Key Words : Near Surface(근지표면), Attenuation(감쇠), Torsional Wave(비틀림파), Soil Depth(적사 높이), Shear Velocity(전단 속도)

ABSTRACT

A technique is presented that uses a circular waveguide for the measurement of the bulk shear(S-wave) velocities of unconsolidated, saturated media, with particular application to near surface soils. The technique requires the measurement of the attenuation characteristics of the fundamental T(0,1) mode that propagates along an embedded pipe, from which the acoustic properties of the surrounding medium are inferred. From the dispersion curve analysis, the feasibility of using T(0,1) mode which is non-dispersive and have constant attenuation over all frequency range is discussed. The principles behind the technique are discussed and the results of an experimental laboratory validation are presented. The experimental data are best fitted for the different depths of wetted sand and the shear velocities as a function of depths are formulated using power law curves.

1. 서 론

지하에 매설된 수도관이나 송유관에서의 누설(leakage) 문제는 관련 업체에서 시급하게 해결해야 할 문제로 대두되어 왔다. 누설위치를 탐지하기 위해서는 음향신호 분석방법을 사용하고 있는데, 이 방법은 누설 잡음이 단일, 비분산(non-dispersive) 유도파 형태로 전파되며 이때의 속도는 분산성을 갖는 수인성 모드에 접근하는 주파수와 관련이 있다고 가정한다⁽¹⁾. 따라서 두 개 이상의 모드가 전파되고 관심 주파수영역에서 분산성이 존재하면 누설 위치 계산결과가 부정확해지는 단점이 있다. 또한 지하에 매설된 배관의 경우 접근성이 열악하기 때

문에 접근 가능한 한 지점에서 원거리 검사를 수행할 수 있는 유도파 검사방법이 필요한데 이때 입사한 유도파 모드가 전파할 수 있는 거리에 토양의 특성은 매우 큰 영향을 미친다⁽²⁻⁴⁾.

토양의 특성에 대한 연구는 지구물리학, 석유지질학 분야에서 활발히 연구가 진행되어 왔는데 특히 토양의 전단 탄성계수 G 가 가장 중요한 변수로 인식되고 있다. 이 계수는 토양의 밀도 ρ 와 벌크 전단속도 C_s 를 알면 쉽게 계산할 수 있다. 현재 전단속도를 측정하기 위해 가장 널리 사용되고 있는 방법은 ASTM에 기술되어 있는 공내탄성파시험(cross-hole test)이다⁽⁵⁾. 이 방법은 일정 간격을 두고 동일 깊이에 장착된 두 수신기에서 수신된 신호의 시간차를 수신기 사이의 거리로 나누어 전단속도를 측정하는 방법이다. 이때 종방향 모드도 동시에 가진되는데 이 모드가 전단 모드와 중첩되면 전단속도의 계산결과가 부정확해진다^(6,7).

† 교신저자; 정회원, 전남대학교 기계자동차공학부
E-mail : kjpark40@jnu.ac.kr

Tel : (061)659-7221, Fax : (061)659-7229

* 전남대학교 기계자동차공학부

또한 공내탄성파시험은 지하 10 m 이상의 토양을 대상으로 하는데, 수도관 등은 지하 1 m 이내에 매설된 경우가 대부분이므로 이 방법을 근지표면에 적용하기 위한 방법이 필요하다고 할 수 있다. 즉, 지표면에서 1 m 이내의 토양은 점토나 모래와 같은 매질로써 광물입자가 서로 강하게 결합되어 있는 암석과는 다른 특성을 갖는다. 따라서 근지표면의 비강화 토양(unconsolidated soil)의 음향 특성을 측정하고 계산할 수 있는 방법이 필요하다.

이 논문에서는 배관의 축대칭 모드 중 전주파수에 걸쳐 비분산성을 갖는 T(0,1) 모드를 이용하여 근지표면의 토양 특성을 규명하고자 한다. 이를 위해 먼저 지하매설 배관의 분산선도를 계산하여 전파 가능한 모드의 위상속도 및 감쇠를 예측한다. 그리고 소규모 토조(soil box)를 제작하여 젖은 모래의 적사 높이에 따른 감쇠변화를 측정하고 이로부터 벌크 전단속도를 계산하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 가진모드의 선정

배관의 축방향으로 전파될 수 있는 유도파에는 세 가지 종류가 있다. 즉 종파, 횡파, 비틀림파가 있다. 각 모드의 특성을 결정하는 인자는 주파수, 위상속도 그리고 감쇠이다. Long 등⁽⁸⁾은 지하에 매설된 강관을 따라 전파되는 모드 중 축대칭 종파 모드의 특성을 규명하였는데 그 중에서도 특히 위상속도의 특성에 대해 자세히 조사하였다. 지상 배관의 경우 유도파 즉, 탄성파가 배관을 따라 전파할 때 모드의 특성은 배관의 형상과 재질에 따라 달라지고 감쇠는 무시할 만큼 작다. 그러나 배관이 지하에 매설된 경우 전파 모드의 표면 변위가 주변 매질 즉, 토양의 벌크 파동을 가진하게 된다. 이때 유도파의 위상속도가 토양의 벌크 속도보다 높으면 파동에 너지의 누설이 발생하고 가진된 벌크 파동은 배관으로부터 에너지를 흡수하여 멀리 떨어진 곳에 있는 매질로 전달하게 되고 따라서 모드의 감쇠가 발생한다. 특정 모드의 에너지 누설양은 배관의 재질뿐만 아니라 주변 매질의 종류에 따라 달라지고, 또한 일반적으로 주파수에 따라 변하는 특성을 갖는다. 가진된 모드의 위상속도가 주변 매질의 벌크 속도보다 낮으면 특성 누설각(characteristic leakage angle)이

허수가 되어 에너지 누설은 발생하지 않는다.

이 연구에서 대상으로 선정된 배관은 외경 25.4 mm, 두께 1.6 mm, 길이 1 m인 주조강 배관이다. 모드의 특성을 살펴보기 위해 잘 알려진 파동해석 프로그램인 Disperse[®]를 사용하였다. 지하매설 배관의 분산선도 계산에 사용된 재료의 특성은 Table 1에 나타내었다. 분산선도 계산 시 배관은 포화 토양에 매립되어 있다고 가정하였고 토양의 종방향, 전단방향 벌크 속도는 Long 등⁽⁸⁾의 연구결과를 참조하였다. 대상 배관에 대한 위상속도 및 감쇠를 Fig. 1에 나타내었다. 그림의 명확성을 위해 배관에서 전형적으로 나타나는 횡모드는 나타내지 않았고 종방향, 비틀림 모드도 4차 이상의 모드는 생략하였다.

그림에서 낮은 주파수에서도 위상속도를 갖는 모드는 L(0,1)과 T(0,1) 모드임을 알 수 있는데 L(0,1) 모드는 주파수에 따라 위상속도가 감소하는 경향을 보이지만 T(0,1) 모드는 전주파수영역에서 일정한 위상속도를 갖는 것을 알 수 있다. 이는 L(0,1) 모드의 모드형상은 주파수가 증가함에 따라 입자의 운동이 완벽하게 축방향으로만 발생하는 단순 확장모드에서 반경방향과 축방향 운동이 복합적으로 발생하는 모드로 변하지만, T(0,1) 모드는 모든 주파수에서 모드가 일정한 형상을 갖기 때문이다. 일반적으로 속도가 주파수에 따라 급격히 변하는 모드는 분산성이 높아 시간영역에서 유도파 신호가 넓게 퍼져서 나타나지만, 분산성이 적은 모드는 좁게 나타나기 때문에 다른 모드와 구별이 용이하고 주파수 변조도 발생할 가능성이 낮다. 따라서 유도파의 가진모드로 첫 번째 비틀림 모드인 T(0,1) 모드를 사용하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

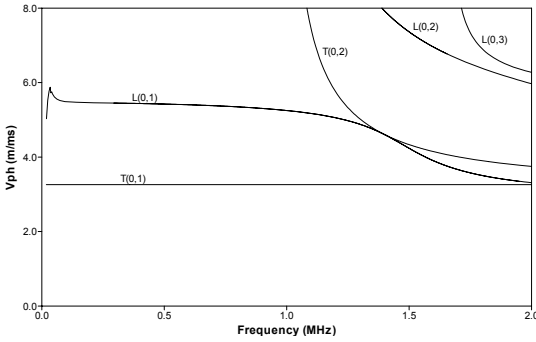
L(0,1) 모드는 주파수에 따라 감쇠의 변화도 급격하게 나타나는데 특히 100 kHz 이하에서 감쇠가 급격히 감소하였다가 이후 주파수가 증가함에 따라 다시 급격히 증가하는 양상을 보인다. 즉, 가진주파수의 선정에 따라 감쇠가 민감하게 변화하기 때문에 일관된 토양 특성을 파악하기 어렵다는 것을 알 수 있다. 반면에 T(0,1) 모드는 감쇠도 전 주파수영역에서 일정하게 나타나기 때문에 가진주파수에 의한 영향도 최소화할 수 있음을 알 수 있다. 이는 종방향 모드는 변위가 반경방향과 축방향으로 모두 생기기 때문에 토양으로의 에너지누설도

Table 1 Material properties

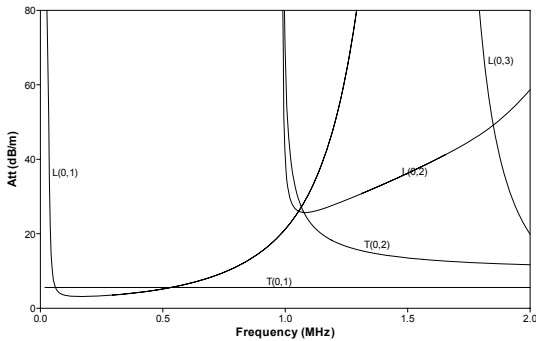
Material	Density ρ (kg/m ³)	Bulk C_L (m/s)	Bulk C_S (m/s)
Cast iron pipe	7,100	4,500	2,500
Soil	1,900	1,500	40

종방향과 전단방향으로 모두 발생하지만, 비틀림 모드는 원주방향과 축방향으로 변위가 발생하기 때문에 토양의 전단방향으로만 에너지 누설이 발생하기 때문이다.

토양의 벌크 전단속도를 임의로 증가시켰을 때의 위상속도와 감쇠를 Fig. 2에 나타내었다. 위상속도는 변화가 없지만 감쇠는 벌크 전단속도가 증가함에 따라 상승하는 것을 알 수 있다. 그러나 특정 벌크 속도에서의 감쇠는 주파수에 따라 일정한 값을 나타내므로 실험결과를 이용하여 감쇠를 계산할 때 복잡한 수식이 아닌 상수로 표현할 수 있음을 알 수 있다. 이상의 분석 결과를 종합해 볼 때 토양의 특성을 파악하기 위한 가진모드로 비틀림 모드인 T(0,1) 모드가 가장 적합하다는 것을 알 수 있다.



(a) Phase velocity



(b) Attenuation

Fig. 1 Dispersion curves for 1 inch pipe embedded in soil

유도파를 이용하여 토양의 특성을 파악하기 위한 실험장치 및 구성도를 Fig. 3에 나타내었다. 실험에 사용된 배관은 분산선도 계산 시 사용한 배관과 동일한 규격을 갖고 있다. 모래나 흙을 담고 배관을 지지하기 위한 토조는 길이 1 m, 폭과 높이는 각각 50, 60 cm이고 아래 부분에 파이프를 장착할 수 있는 길이 5 cm의 구멍이 가공되어 있다. 실험대상 토양으로는 모래를 사용하였고, 감쇠와 하중을 증가시키기 위해 물을 살포하여 포화 토양의 조건을 만족하도록 하였다.

비틀림파 가진 및 수신을 위해 미국 SwRI사에서 개발한 MsSR-2020 장비를 사용하였다. 이 장비는 자왜 또는 자기변형(magnetostriction) 현상을 이용하여 재료 내에 초음파를 발생시키고 그 역으로 반사된 신호를 감지할 수 있는 장비이다. 이 장치를 이용하여 원통형 구조물의 반사 신호를 측정할 경우, 배관의 원주를 자왜 특성이 우수한 코발트 스트립(cobalt strip)으로 둘러싸고 원주방향으로 자화시킨 뒤 리본형 코일에 자장을 가하면 Wiedemann 효과에 의해 비틀림 모드가 발생하게 된다. 실험에서는 중심주파수 128 kHz인 3사이클 톤버스트(tone-burst)를 입사하여 비틀림 모드를 가진하였고 가진에 사용된 동일 신호변환기(transducer)를 이용하여 반사 신호를 수신하는 펄스-에코(pulse-echo) 방식을 채택하였다.

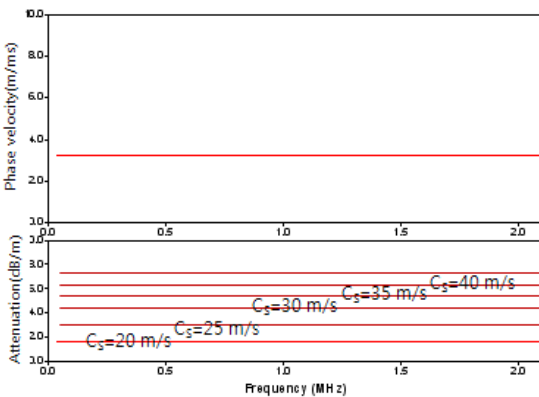


Fig. 2 Phase velocity and attenuation curves as soil shear velocities

가진된 T(0,1) 모드는 배관을 따라 전파되면서 주변토양으로 에너지를 누설한다. 배관 종단면까지 전파된 신호는 다시 반사하여 신호변환기로 되돌아 오고 이 과정에서 다시 토양으로 에너지를 누설한다. 신호변환기에 되돌아온 기계적 진동신호는 전기 신호로 변환되어 모니터 화면에 나타난다.

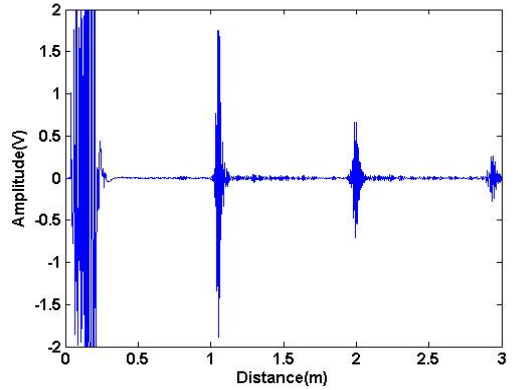
주파수에 따른 T(0,1) 모드의 감쇠 특성 $\alpha(\omega)$ 는 아래의 식으로부터 구할 수 있다.

$$\alpha(\omega) = 20 \log \left(\frac{A(\omega)_S / A(\omega)_A}{2L} \right) \quad (1)$$

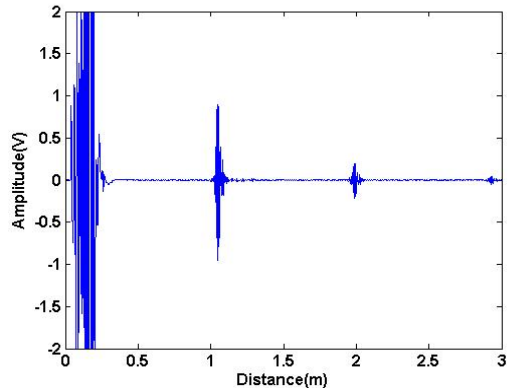
여기서 $A(\omega)_S$ 는 토양에 매립된 배관의 종단면 반사 신호의 FFT 값이고 $A(\omega)_A$ 는 공기 중에 놓여 있는 배관 종단면 반사 신호의 FFT 값이다. 식(1)에서 L 은 배관이 토양에 묻혀 있는 길이이므로 $2L$ 은 비틀림파가 토양 내에서 진행한 총 거리에 해당한다.

젖은 모래의 적사 높이에 따른 종단면 반사신호를 Fig. 4에 나타내었다. 모든 그림에서 거리 0 m일 때 나타나는 신호는 입사 신호를 나타내고 배관의 길이에 해당하는 1 m에서 나타나는 신호는 종단면 반사 신호이다. 토양에 의한 감쇠 효과를 자세히

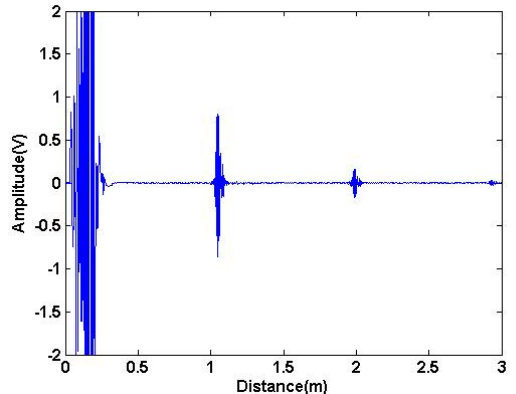
살펴보기 위해 2, 3 m에서의 반사 신호도 측정하였는데 이 신호는 가진된 비틀림 모드가 종단면에서 반사된 다음 다시 입사측 종단면에서 반사되고 토양에 묻혀있는 종단면에서 반사된 신호를 측정한다



(a) Air

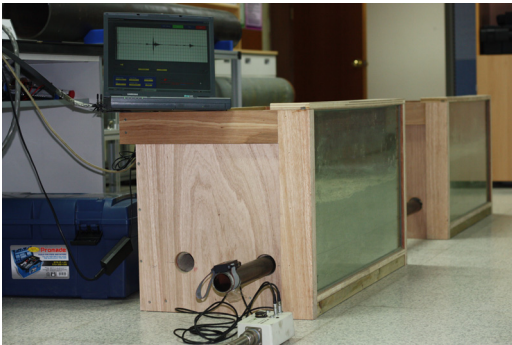


(b) Sand depth = 30 cm

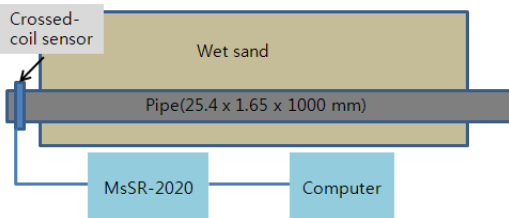


(c) Sand depth = 50 cm

Fig. 4 Reflected signals from pipe end at different sand depth



(a) Photo illustration of experimental setup



(b) Schematic diagram of experimental setup

Fig. 3 Experimental setup

결과로 파동의 진행 거리는 각각 4, 6 m에 해당된다. 공기 중에 노출된 경우(Fig. 4(a))에 비해 모래의 높이가 증가할수록 반사 신호의 진폭이 감소하는 것을 알 수 있으며 모래의 적사 높이가 50 cm일 때 세 번째 반사 신호는 잡음 신호와 구별하기 어려울 정도로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

측정된 실험결과를 분석하기 위해 Disperse[®]를 이용하여 다양한 토양 특성, 특히 벌크 전단속도를 변화시켜 가며 분산선도를 계산하였다. 분산선도 계산 시 모든 재료는 등방성이고 재료의 내부 감쇠는 없는 것으로 가정하였다. 측정된 실험결과를 식 (1)에 대입하여 구한 모드 감쇠와 분산선도로부터 계산한 감쇠를 서로 비교하여 실험결과를 가장 잘 묘사할 수 있는 토양의 벌크 전단속도 C_s 를 구하였다.

4. 토양의 벌크 전단속도

실험결과를 식 (1)에 대입하여 구한 모래의 적사 높이가 증가에 따른 감쇠의 변화를 주파수에 따라 Fig. 5에 나타내었다. 주파수에 따라 증감은 있지만 모든 적사 높이에서 일정한 형태를 보이고 있음을 알 수 있다. Matlab[®]을 이용하여 각 적사 높이에서의 감쇠를 커브피팅한 결과는 그림에 점선으로 표시하였다. 적사 높이가 증가할수록 감쇠의 증가율이 점차 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 감쇠는 특정 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. Table 2에는 적사 높이 또는 감쇠에 해당되는 토양의 벌크 전단 속도를 Disperse[®]를 이용하여 구한 결과를 표로 정리하여 나타내었다.

젖은 모래의 적사 높이에 따른 토양 전단속도 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 적사 높이와 전단 속도 사이의 상관관계를 수식으로 유도하기 위해 Matlab의 먹급수를 사용하여 커브피팅 하였다. 적사 높이를 z 라 할 때 전단속도는 $51.2z^{0.364}$ 에 비례함을 알 수 있다. 이때 커브피팅의 평균오차는 2.1%이다. 비교를 위해 전단속도가 $51.2z^{1/3}$ 인 경우도 그림에 표시하였다.

근지표면의 토양 깊이 또는 가압 조건에 따른 전단속도 변화에 대한 연구결과는 찾아보기 어렵다. 동일한 구를 임의로 쌓아올린 Hertz-Mindlin 모델의 경우 전단속도는 z 의 1/6제곱에 비례한다고 알려져 있다. Bachrach 등은 마른 해변 모래에 대한

실험을 수행하여 Hertz-Mindlin 모델의 결과가 타당하다는 사실을 입증하였다⁽⁹⁾. 입자가 고운 마른 모래에 대한 실험결과로부터 Roesler는 등방성 응력 ($5\sim 15\text{ N/cm}^2$)이 가해질 때 전단속도는 가해진 응력의 1/4제곱에 비례함을 밝혔다. Bowles는 다양한 연구 논문을 조사하여 포화 토양의 깊이에 따른 전단속도의 변화는 대부분 깊이의 0.25에서 0.45제곱에

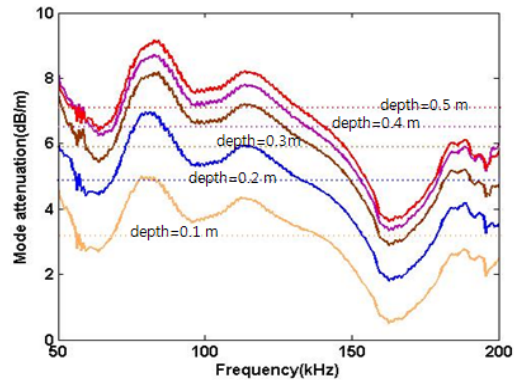


Fig. 5 Mode attenuation characteristics at different depth of wet sand: experimental results(-) and fitted dispersion curves(---)

Table 2 Shear velocity as varying sand depth

Wet sand depth(m)	Soil bulk shear velocity C_s (m/s)
0.5	40
0.4	37
0.3	33
0.2	28
0.1	22

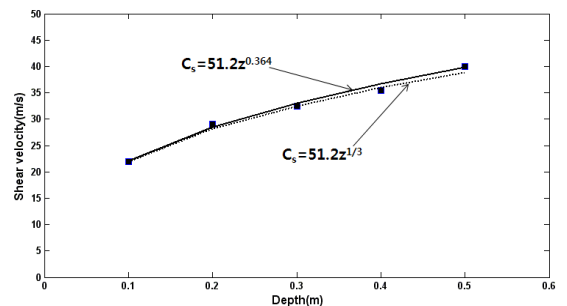


Fig. 6 Evaluated bulk velocity of wet sand as a function of depth: experimental points(•), best fit curve(-) and $z^{1/3}$ curve(---)

비례함을 확인하였다. 또한 입자가 굵은 토양의 전단속도는 $C_S = 62.52z^{0.354}$ 로 표현할 수 있고, 입자가 가는 토양에서는 $C_S = 62.52z^{0.354}$ 임을 밝혔다. 이 결과는 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 포화 토양의 전단속도는 깊이의 1/3제곱에 비례한다는 Buckingham의 결과⁽¹⁰⁾와도 일치한다고 할 수 있다. 이상의 여러 연구자들의 결과를 참고할 때 이 논문에서 젖은 모래를 사용하여 구한 전단속도와 적사 높이의 관계식은 타당하다고 생각할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 근지표면의 비강화 포화 토양의 벌크 전단속도를 측정할 수 있는 방법을 제시하였다. 가진모드로는 분산성이 적고 전주파수영역에서 일정한 감쇠를 갖는 비틀림 모드를 사용하는 것이 유리함을 보였고, 젖은 모래를 이용하여 적사 높이 증가에 따른 종단면 반사 신호를 측정하여 토양의 감쇠와 전단속도를 예측하였다.

토양의 특성을 다양하게 변화시켰을 때의 위상속도 및 감쇠를 계산하였고 이를 이용하여 실험으로부터 측정된 감쇠 자료를 커브피팅하여 적사 높이에 따른 감쇠 값을 구하였다. 그리고 적사 높이와 전단속도 사이의 상관관계를 수식으로 유도하고 이를 다른 연구결과와 비교하여 타당성을 입증하였다. 실험결과는 예측된 결과와 잘 일치하였으며, 이로부터 이 논문에서 제시한 방법을 이용하여 토양의 종류나 깊이가 달라질 경우에도 전단속도 변화를 예측할 수 있음을 알 수 있다.

후 기

이 연구는 2011년 지식경제부 지원 중화학설비 안전진단센터 사업의 일부 지원에 의해 수행되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

(1) Lee, Y. S., 2010, Comparison of Window Functions for the Estimation of Leak Location for Underground Plastic Pipes, Transactions of the

Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 67, pp. 568~576.

(2) Allene, D. N., Pavlakovic, B. and Cawley, P., 2001, Rapid, Long Range Inspection of Chemical Plant Pipework Using Guided Waves, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 20A, pp. 180~187.

(3) Kwun, H., Kim, S. Y., Choi, M. S. and Walker, S., 2004, Torsional Guided Wave Attenuation in Coal-tar-enamel-coated Buried Piping, NDT&E International, Vol. 37, pp. 663~665.

(4) Hua, J., Mu, J. and Rose, J., 2011, Guided Wave Propagation in Single and Double Layer Hollow Cylinders Embedded in Infinite Media, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 129, pp. 691~700.

(5) ASTM Standard D-4428/D-4428-94, 1994, Standard Test Methods for Cross-hole Seismic Testing, American Society for Testing Materials, pp. 885~898.

(6) Caradente, R., Ma, J. and Cawley, P., 2010, The Scattering of the Fundamental Torsional Mode from Axisymmetric Defects with Varying Depth Profile in Pipes, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 127, pp. 3440~3448.

(7) Cheng, J. W. and Yang, S. K., 2006, Torsional Guided Wave Attenuation in Buried Pipe, Materials Evaluation, Vol. 64, pp. 412~416.

(8) Long, R., Lowe, M. and Cawley, P., 2003, Attenuation Characteristics of the Fundamental Modes that Propagate in Buried Iron Water Pipes, Ultrasonics, Vol. 41, pp. 509~519.

(9) Bachrach, R., Dvorkin, J. and Nur, A., 1998, High-resolution Shallow-seismic Experiments in Sand, Part II: Velocities in Shallow Unconsolidated Sand, Geophysics, Vol. 63, pp. 1234~1240.

(10) Buckingham, M., 2000, Wave Propagation Stress Relaxation and Grain-to-grain Shearing in Saturated Unconsolidated Marine Sediments, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 108, pp. 3561~3568.