

비틀림 유도파를 이용한 토양 특성 규명 및 지하매설 배관 결함 검출

Identification of the Properties of Soils and Defect Detection of Buried Pipes Using Torsional Guided Waves

박경조*† · 김정엽**

Kyung-Jo Park* and Chung-Yup Kim**

(접수일 : 2012년 11월 27일, 수정일 : 2013년 02월 08일, 채택확정 : 2013년 02월 20일)

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 torsional mode that propagate along an embedded pipe, from which the acoustic properties of the surrounding medium are inferred. From the dispersion curve analysis, the feasibility of using fundamental torsional 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 are evaluated as a function of depths. Also the characteristics of the reflected signal from the defects are examined and the reflection coefficients are calculated for identifying the relation between defect sizes and the magnitude of the reflected signal.

Key Words : Mode Attenuation, Torsional Wave, Shear Velocity, Defect

1. 서 론

지하에 매설된 수도관이나 송유관에서의 누설 문제는 관련 업체에서 가장 시급하게 해결해야 할 문제로 대두되어 왔다. 누설위치를 탐지하기 위해서는 음향신호 분석방법을 사용하고 있는데, 이 방법은 누설 잡음이 단일, 비분산 유도파 형태로 전파되며 이때의 속도는 분산성을 갖는 수인성 모드에 접근하는 주파수와 관련이 있다고 가정한다¹⁾. 따라서 두 개 이상의 모드가 전파되고 관심

주파수영역에서 분산성이 존재하면 누설위치 계산결과가 부정확해지는 단점이 있다. 또한 지하에 매설된 배관의 경우 접근성이 열악하기 때문에 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 미친다²⁾.

유도파 모드의 위상속도(phase velocity)가 외부 토양의 벌크 속도(bulk velocity)보다 크면 배관 벽면의 변위가 토양의 변위와 연성되어 누설 벌크

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

**김정엽 : 전남대학교 기계자동차공학부

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

**Chung-Yup Kim : Department of Mechanical and Automotive Engineering, Chonnam University.

파동이 발생한다. 근지표면 토양의 종방향 속도는 토양의 종류에 따라 입사된 유도파의 위상속도보다 높거나 낮을 수 있기 때문에 종파(P파)의 누설 여부는 외부 토양의 조건에 따라 달라진다. 그러나 토양의 전단방향 속도는 항상 가진된 유도파의 위상속도보다 낮기 때문에 전단방향으로의 에너지 누설은 피할 수 없고 이 때문에 유도파 모드의 감쇠에 미치는 영향이 크다^{3,4)}. 따라서 토양의 음향 특성을 측정하여 가진된 유도파의 감쇠 및 전파 가능거리를 예측하는 것은 누설위치 탐지에 필수요소라 할 수 있다.

토양의 특성은 토양의 밀도와 벌크 전단속도를 알면 쉽게 계산할 수 있다. 현재 전단속도를 측정하기 위해 가장 널리 사용되고 있는 방법은 공내 탄성파시험(cross-hole test)이다⁵⁾. 이 방법은 일정 간격을 두고 동일 깊이에 장착된 두 수신기에서 수신된 신호의 시간차를 측정하고 두 수신기 사이의 거리를 측정한 시간차로 나누어 전단속도를 측정하는 방법으로, 종방향 모드와 전단 모드가 중첩되면 전단속도의 계산결과가 부정확해지는 단점이 있다.

본 논문에서는 배관의 축대칭 모드 중 전주파수에 걸쳐 비분산성을 갖는 비틀림 모드를 이용하여 근지표면의 토양 특성을 규명하고자 한다. 이를 위해 먼저 지하매설 배관의 분산선도를 계산하여 전파 가능한 모드의 위상속도 및 감쇠를 예측한다. 그리고 소규모 토조를 제작하여 젖은 모래의 적사 높이에 따른 감쇠변화를 측정하고 이로부터 토양의 벌크 전단속도를 계산하는 방법을 제시하고자 한다. 또한 지하매설 배관에 다양한 크기의 결함들이 존재할 때 이에 의한 반사특성을 살펴보고 이를 통해 결함 크기와 반사 신호 진폭 사이의 상관관계를 규명하고자 한다.

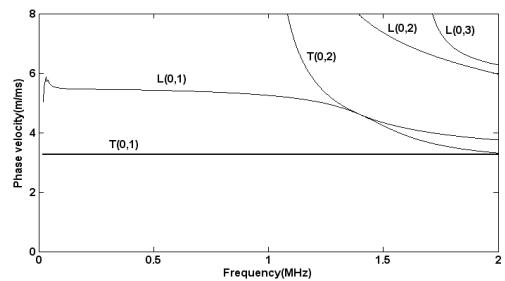
2. 가진 모드의 선정

배관의 축방향으로 전파될 수 있는 유도파에는 세 가지 종류가 있다. 즉 종파, 비틀림파, 횡파가 있다. 각 모드의 특성을 결정하는 인자는 주파수, 위상속도 그리고 감쇠이다. Long 등⁶⁾은 지하에 매설된 강관을 따라 전파되는 모드 중 축대칭 종파

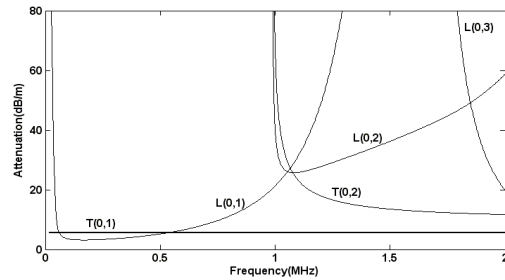
모드의 특성을 규명하였는데 그 중에서도 특히 위상속도의 특성에 대해 자세히 조사하였다. 지상 배관의 경우 유도파 즉, 탄성파가 배관을 따라 전파할 때 모드의 특성은 배관의 형상과 재질에 따라 달라지고 감쇠는 무시할 만큼 작다. 그러나 배관이 지하에 매설된 경우 전파 모드의 표면 변위가 주변 매질 즉, 토양의 벌크 파동을 가진하게 된다. 이때 유도파의 위상속도가 토양의 벌크 속도보다 높으면 파동에너지를 누설이 발생하고 가진된 벌크 파동은 배관으로부터 에너지를 흡수하여 멀리 떨어진 곳에 있는 매질로 전달하게 되고 따라서 모드의 감쇠가 발생하게 된다. 특정 모드의 에너지 누설량은 배관의 재질뿐만 아니라 주변 매질의 종류에 따라 달라지고, 또한 일반적으로 주파수에 따라 변하는 특성을 갖는다.

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



(a) Phase velocity



(b) Attenuation

Fig. 1 Dispersion curve for 25.4 mm pipe embedded in soil

본 연구에서 대상으로 선정한 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 등⁶⁾의 연구결과를 참조하였다. 대상 배관에 대한 위상 속도 및 감쇠를 Fig. 1에 나타내었다. 그림의 명확성을 위해 배관에서 전형적으로 나타나는 횡모드는 나타나지 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. 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 가진 모드로 첫 번째 비틀림 모드인 T(0,1) 모드를 사용하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

L(0,1) 모드는 주파수에 따른 감쇠의 변화도 급격하게 나타나는데 특히 100 kHz 이하에서 감쇠가 급격히 감소하였다가 이후 주파수가 증가함에 따라 다시 급격히 증가하는 양상을 보인다. 즉 가진 주파수의 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 가진 주파수에 의한 영향도 최소화 할 수 있음을 알 수 있다. 이는 종방향 모드는 변위가 반경방향과 축방향으로 모두 생기기 때문에 토양으로의 에너지 누설도 종방향과 전단방향으로 모두 발생하지만, 비틀림 모드는 원주방향과 축방향으로 변위가 발생하여 토양의 전단방향으로만 에너지 누설이 생

기기 때문이다. 이로부터 토양의 특성을 파악하기 위한 가진 모드로 비틀림 모드인 T(0,1) 모드가 가장 적합하다는 것을 알 수 있다.

3. 축토양의 벌크 전단속도

유도파를 이용하여 토양의 특성을 파악하기 위한 실험장치 사진 및 구성도를 Fig. 2에 나타내었다. 실험에 사용된 배관은 분산선도 계산 시 사용한 배관과 동일한 규격을 갖고 있다. 모래나 흙을 담고 배관을 지지하기 위한 토조(soil cistern)는 길이 1 m, 폭과 높이는 각각 50, 60 cm이고 아래 부분에 파이프를 장착할 수 있는 직경 5 cm의 구멍이 가공되어 있다. 실험 대상 토양으로는 모래를 사용하였고 감쇠와 하중을 증가시키기 위해 물을 살포하여 포화 토양의 조건을 만족하도록 하였다.

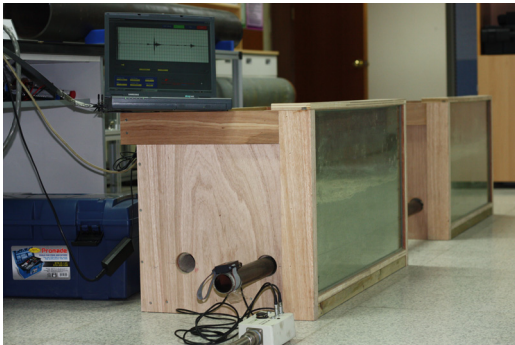
비틀림과 가진 및 수신을 위해서 미국 SwRI에서 개발한 MsSR-2020 장비를 사용하였다. 본 장비는 자왜 또는 자기변형(magnetostriction) 현상을 이용하여 재료 내에 초음파를 발생시키고 그 역으로 반사된 신호를 감지할 수 있는 장비이다⁷⁾. 이 장치를 이용하여 원통형 구조물의 반사 신호를 측정할 경우, 배관의 원주를 자왜 특성이 우수한 코발트 스트립(cobalt strip)으로 둘러싸고 원주방향으로 자화시킨 뒤 리본형 코일에 자장을 가하면 Wiedemann효과에 의해 비틀림 모드가 발생하게 된다. 실험에서는 중심주파수 128 kHz인 3 사이클 톤버스트(tone-burst)를 입사하여 비틀림 모드를 가진하였고 가진에 사용된 동일 신호변환기(transducer)를 이용하여 반사 신호를 수신하는 펄스-에코(pulse-echo) 방식을 채택하였다.

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

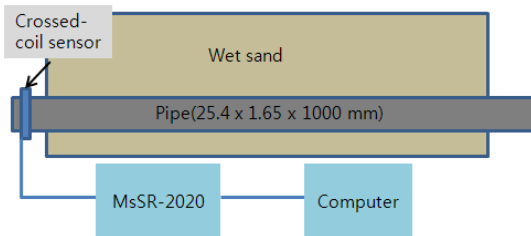
주파수에 따른 T(0,1) 모드의 감쇠 특성 $\alpha(\omega)$ 는 아래의 식으로부터 구할 수 있다.

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

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.



(a) Photo illustration of experimental setup

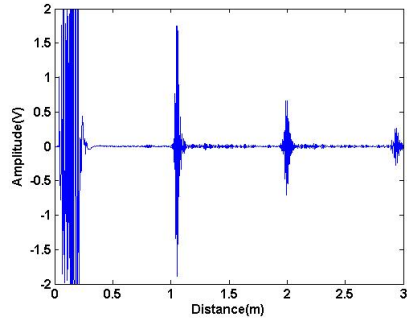


(b) Schematic diagram of experimental setup

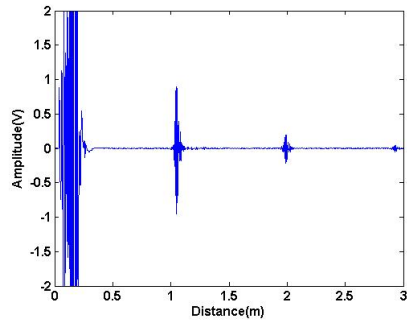
Fig. 2 Experimental setup

젖은 모래의 적사 높이에 따른 종단면 반사 신호를 Fig. 3에 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 입사 측 종단면에서 반사되고 토양에 묻혀있는 종단면에서 반

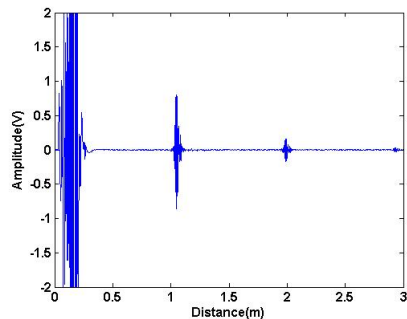
사된 신호를 측정된 결과이다. 공기 중에 노출된 경우(Fig. 3(a))에 비해 모래의 높이가 증가할수록 반사 신호의 진폭이 감소하는 것을 알 수 있으며 모래의 적사 높이가 50 cm 일 때 세 번째 반사 신호는 잡음 신호와 거의 구별하기 어려울 정도로 감소하는 것을 확인할 수 있다.



(a) air



(b) sand depth = 30 cm



(c) sand depth = 50 cm

Fig. 3 Reflected signals from pipe end at different sand depth

측정된 실험결과를 분석하기 위해 Disperse를 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.

실험결과를 식 (1)에 대입하여 구한 모래의 적사 높이 증가에 따른 감쇠의 변화를 주파수에 따라 Fig. 4에 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 알 수 있고 이로부터 특정 값으로 접근하는 것을 확인할 수 있다. 그림 옆에는 적사 높이에 해당되는 토양의 벌크 전단속도를 Disperse를 이용하여 구하고 그 결과를 표로 정리하여 나타내었다.

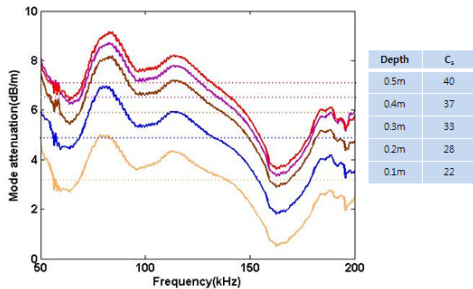


Fig. 4 Mode attenuation characteristics at different depth of wet sand: experimental results(—) and fitted dispersion curves(⋯)

젖은 모래의 적사 높이에 따른 토양 전단속도 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 적사 높이와 전단속도 사이의 상관관계를 수식으로 유도하기 위해 Matlab[®]의 먹급수를 사용하여 커브피팅 하였다. 적사 높이를 z 라 할 때 전단속도는 $51.2z^{0.364}$ 에 비례함을 알 수 있다.

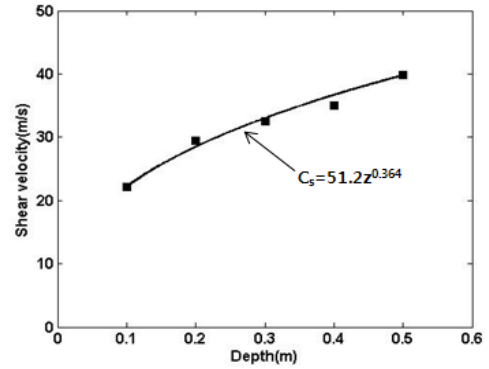
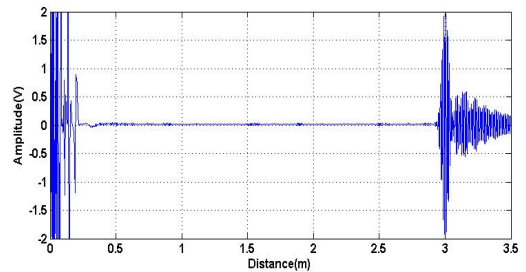


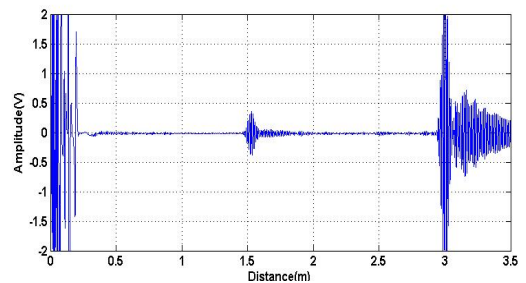
Fig. 5 Evaluated bulk velocity of wet sand as a function of depth: experimental points(▪) and best fit curve(—)

4. 결함 반사 계수

배관 내에 결함이 존재할 때 반사 신호의 특성을 규명하고 결함의 크기와 반사 신호 진폭 사이의 상관관계를 규명하기 위해 지하매설 배관에 인공 결함을 가공하고 결함 및 배관 종단면에서



(a) no defect



(b) 75% circumferential defect

Fig. 6 Time history of reflected signal

의 반사 신호를 측정하였다. 모래의 적사 높이는 30 cm로 일정하게 유지하였고, 실험에 사용된 배관의 재질과 직경, 두께는 토양의 전단속도 규명을 위해 사용된 경우와 동일하고, 배관의 길이를 3 m로 다르게 하였다.

결함이 없을 경우 종단면에서 반사된 신호를 Fig. 6(a)에 나타내었고 원주방향으로 원주의 75%, 깊이방향으로 두께의 1/3에 해당되는 결함이 존재할 때 반사 신호를 Fig. 6(b)에 나타내었다. 결함의 축방향 위치는 배관 길이의 1/2(종단면에서 1.5 m) 지점에 설정하였다. 반사 신호의 위치는 실험에서 측정된 시간 신호에 T(0,1) 모드의 군속도 3.25 km/s를 곱하여 구할 수 있다.

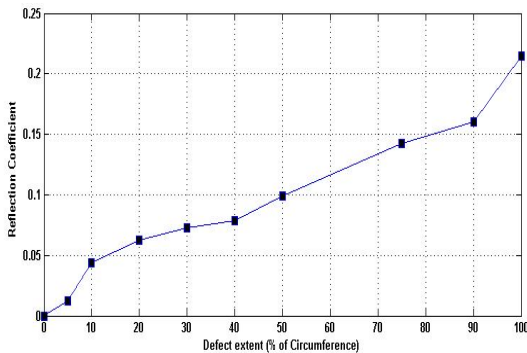


Fig. 7 Reflection coefficient for 1/3 thickness deep defect as a function of percentage circumferential extent

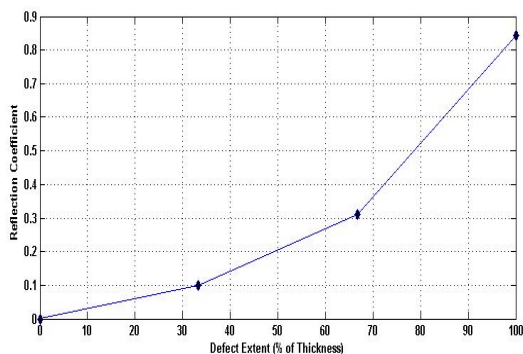


Fig. 8 Reflection coefficient as a function of the depth for a defect of 75% of the circumference

결함의 위치는 반사 신호가 측정되는 시간으로부터 쉽게 알 수 있고, 결함의 크기는 결함이 없을 때의 종단면 반사 신호의 진폭에 대한 결함 반사 신호의 진폭비로 결정되는 반사계수(reflection coefficient)로부터 구할 수 있다^{8,9)}. 이를 위해 결함의 깊이는 두께의 1/3로 일정하게 유지하고 원주방향 크기를 증가시켜 가면서 반사 신호를 측정하고, 이때 결함에서 반사된 신호의 진폭을 종단면 반사 신호의 진폭으로 나누어서 구한 반사계수를 Fig. 7에 나타내었다. 그림으로부터 T(0,2) 모드 반사 신호의 크기는 결함의 원주방향 크기에 따라 거의 선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있다. 다만 결함의 크기가 원주의 20% 이하인 구간에서는 선형성이 보장되지 않는데 이는 결함의 비축대칭성에 의해 T(0,1) 모드가 비축대칭 모드인 F(1,3) 모드로 모드 변환(mode conversion)되기 때문이다.

Fig. 8은 결함 깊이를 변화시켜 가면서 해석한 결과이다. 그림으로부터 결함 깊이가 두께의 50%를 초과하면 반사계수는 급격히 증가하는 반면, 결함 깊이가 작을 때는 증가율이 작은 것을 알 수 있다. 즉 두께방향 결함 깊이에 따른 반사계수는 2차 곡선의 형태를 갖는다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 토양의 벌크 전단속도를 측정할 수 있는 방법을 제시하였다. 가진 모드로는 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 위상 속도 및 감쇠를 계산하였고 이를 이용하여 실험으로부터 측정된 감쇠 자료를 커브피팅하여 적사 높이에 따른 감쇠 값을 구하였다. 그리고 적사 높이에 따른 전단속도 사이의 상관관계를 수식으로 유도하였다. 실험결과는 예측된 결과와 잘 일치하였으며 이로부터 본 논문에서 제시한 방법을 이

용하여 토양의 종류나 깊이가 달라질 경우에도 전단속도 변화를 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

또한 지하매설 배관의 결함을 탐지하기 위해 결함 반사 신호로부터 반사계수를 구하고 이를 이용하여 결함의 크기를 판별하는 방법을 제시하였다. 해석결과로부터 T(0,1) 모드의 반사계수는 결함의 원주방향 크기에 선형으로 비례하고, 배관 두께에 대한 결함 깊이 비의 2차 함수임을 알 수 있었다. 이로부터 결함이 있는 배관의 반사 신호 진폭을 측정하여 결함의 크기를 규명할 수 있음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 2012년 지식경제부 지원 중화학설비 안전진단 센터사업의 일부 지원에 의해 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

1. R. Long, K. Vine and M. Lowe, 2001, "Monitoring Acoustic Wave Propagation in Buried Cast Iron Water Pipes", Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 20B, pp. 1202-1209.
2. K. J. Park, W. S. Kang and Y. G. Kim, 2009, "Attenuation Characteristics of the Buried Steel Water Pipes", Journal of Korea Society for Power System Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 39-45.
3. H. Kwun, S. Y. Kim, M. S. Choi and S. Walker, 2004, "Torsional Guided Wave Attenuation in Coal-Tar-Enamel-Coated Buried Piping", NDT&E International, Vol. 37, pp. 663-665.
4. J. Hua, J. Mu and J. Rose, 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. 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.
7. K. J. Park, W. S. Kang and D. J. Kang, 2010, "Flaw Detection of Petrochemical Pipes Using Torsional Waves", Journal of Korea Society for Power System Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 46-51.
8. 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.
9. J. W. Cheng and S. K. Yang, 2006, "Torsional Guided Wave Attenuation in Buried Pipe", Materials Evaluation, Vol. 64, pp. 412-416
10. J. L. Rose, 2000, "Ultrasonic Waves in Solid Media", Cambridge University Press, London, pp. 154-176.