

주변 흙의 특성이 물이 찬 매립된 배관에서 전파되는 기본 유도 종파 모드 감쇠에 미치는 영향

이주원* · 나원배* · 신성우** · 김재민***

*부경대학교 해양공학과

**부경대학교 안전공학부

***전남대학교 건설환경공학부

Effect of Surrounding Soil Properties on the Attenuation of the First Guided Longitudinal Wave Mode Propagating in Water-filled, Buried Pipes

Juwon Lee*, Won-Bae Na*, Sung Woo Shin** and Jae-Min Kim***

*Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**Division of Safety Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

***Department of Civil and Environmental Engineering, Chonnam National University, Yeosu, Korea

KEY WORDS: Degree of saturation 포화도, Compaction 다짐, Guided ultrasonic waves 유도초음파, Buried pipe 매립된 배관, First longitudinal wave mode, 기본종파모드, Attenuation 감쇠, Frequency range 주파수 대역

ABSTRACT: This study presents the attenuation characteristics of the first guided longitudinal wave mode propagating in water-filled, buried steel pipes in order to investigate the effects of soil saturation and compaction on the attenuation patterns. For numerical calculation of attenuation, 10 different combinations of S-wave velocity, P-wave velocity, and soil densities were considered. From the attenuation dispersion curves, which were obtained using Disperse software, we determined that the attenuation decreases as saturation increases, whereas it increases as compaction increases. Over the frequency range from 0.2 to 0.4 MHz, the first longitudinal wave mode has attenuations that are relatively lower than for other ranges, is faster than the first flexural wave mode, and is sensitive to defects aligned in the axial direction. Hence, the first longitudinal wave mode over the mentioned frequency range would be the proper choice for long-range buried pipelines that transport water.

1. 서 론

흙에 전파되는 체적파(Bulk waves)의 속도는 흙의 포화도(Degree of saturation)와 다짐(Compaction)에 영향을 받는다(Adamo et al., 2010; Lu et al., 2004). 여기서 포화도는 흙 속의 간극(Void) 체적에 대한 물 체적의 비율로 정의되며 다짐은 기계적 에너지로 흙 속의 공기를 간극에서 제거하여 단위중량을 증대시키는 것을 의미한다(Das, 2002). 이들 연구는 식물의 성장에 영향을 미치는 흙의 포화도와 다짐의 정도를 현장에서 측정된 종파(P-wave)와 횡파(S-wave)의 속도로부터 예측하고자 하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다. (1) 흙의 포화도를 측정하기 위해서는 횡파의 속도를 사용하는 것이 유리하며 포화도의 균질성을 측정하기 위해서는 종파와 횡파의 속도를 사용하는 것이 유리하다. (2) 포화도가 증가되면 종파와 횡파의 속도는 감소한다. (3) 흙의 다짐의 정도를 측정하기 위해서는 종파의 속도를 사용할 수 있으며 다짐이 커질수록 종파의 속도

는 증가한다. 이상의 결과는 흙에 전파되는 체적파의 속도와 흙의 포화도 및 다짐의 관계를 정립하였다.

최근 지반에 매립된 배관의 비파괴검사에 장거리 검사에 용이한 유도초음파(Guided ultrasonic waves) 기술 이용이 시도되고 있다(이주원 등, 2010; Kwun et al., 2004; Long et al., 2003). 매립된 배관의 비파괴검사를 위한 유도초음파 활용기술의 정립을 위해서는 파이프를 둘러싸고 있는 지반의 특성이 중요하다. 즉, 다양한 형태의 지반이 유도초음파 전파에 미치는 영향을 적절히 분석하여 감쇠(Attenuation)가 작고 결함에 민감한 유도초음파 모드(mode)와 주파수 대역(Frequency range)을 선정해야 한다. 이를 위해서는 먼저 특정 모드의 주파수별 감쇠 특성을 계산하여야 하는데 이는 감쇠 분산곡선(Dispersive curve)으로 파악될 수 있다. 감쇠 분산곡선을 계산하기 위해서는 주변 지반 또는 흙의 밀도, 탄성계수, 프와송 비를 알아야 한다. 달리 말하면 흙의 밀도, 흙에서 전파되는 종파와 횡파의 속도가 주어지야 하는데 이들 특성은 앞서 설명한대로 흙의 포화도와 다짐과 밀

접한 관련이 있다.

따라서 다양한 특성(포화도, 다짐)을 갖는 흙으로 둘러싸인 매립 파이프에 전파되는 유도초음파의 감쇠 분산특성을 이해하는 것은 유도초음파를 활용한 매립 배관의 비파괴검사법 개발을 위해 필요하다. 이런 연유로 최근 매립된 배관의 비파괴검사를 위해 이주원 등(2010)은 흙의 포화도와 다짐이 매립된 배관의 유도초음파 전파에 미치는 영향을 분석하였다. 이 때 이주원 등은 배관의 내부를 진공으로 고려하여 문제를 단순화하였으며, 흙의 포화도와 다짐을 두 가지 종류의 밀도와 여섯 가지 종류의 체적파 속도로 나타내어 해석을 수행하였다.

여기서 주목해야 할 것은 흙의 포화도 및 다짐과 흙의 밀도 및 체적파의 속도와의 관계가 단순하지 않다는 것이다(Fratta et al., 2005). 다시 말하면 흙의 포화도와 다짐이 서로 연결된 현상임으로 포화도와 다짐을 밀도, 종파 속도, 횡파 속도로 정확히 모사하기가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 이주원 등(2010)이 수행한 연구와 달리 흙의 다짐이 밀도에 주된 영향을 주고, 포화도는 흙에서의 체적파의 속도에 주된 영향을 미친다는 가정을 하였다. 또한, 실제로 매립 파이프는 다양한 유체를 수송하고 있으므로 본 연구에서는 매립된 배관이 물을 수송하고 있다는 가정 하에 물이 찬 매립된 배관에서 전파되는 유도초음파 모드 중 기본종파모드(Fundamental longitudinal wave mode, L(0,1))의 분산 특성이 지반 특성에 따라 어떻게 변하는지 파악하고자 하였다. 여기서 L(0,1)을 선택한 것은 일반적으로 L(0,1)가 감쇠가 적은 저주파수 영역에 존재하는 가장 기본적인 유도초음파 모드이기 때문이다(Na et al., 2005).

따라서 본 연구에서는 먼저, 흙의 포화도와 다짐을 나타내는 열 가지 종류의 흙에서의 종파와 횡파 속도, 그리고 밀도를 가정하였다. 다음으로, 가정된 종파와 횡파 속도 그리고 밀도를 입력 자료로 사용하여 물이 찬 강관(Steel pipe)에 전파되는 기본종파모드의 분산곡선을 계산하였다. 마지막으로, 이들 분산곡선으로부터 유도초음파를 활용한 매립 배관의 비파괴검사에 적절하게 사용될 수 있는(분산이 비교적 작은) 후보 주파수(Candidate frequency)를 선정하고, 기본종파모드가 후보 주파수 영역에서 가지는 특성(군속도, 결함민감도)을 조사하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서 고려한 강관의 재질은 철로써 내부는 물로 채워져 있고 외부는 흙으로 둘러싸여 있으며 개념도는 Fig. 1과 같다. 즉, 강관의 경계조건(Boundary conditions)은 내부는 고체-유체 이며 외부는 고체-고체이다. 강관, 물, 그리고 흙의 물성치(Material properties)를 밀도, 종파, 그리고 횡파의 속도로 Table 1에 나타내었다. 유도초음파의 분산곡선 중 감쇠분산곡선을 계산하기 위해 'Disperse'를 이용하여(Na et al., 2005; Lee et al., 2008) 수치계산을 하였다.

강관의 내부반경(r)과 두께(t) 비는 10:1이며 수치모델은 축방향으로 무한히 길다고 가정하였으며, 주변 흙도 무한매질로 가정하였다. Table 1과 같이 총 10개의 Cases를 고려하였는데, Cases 1~4는 밀도는 동일하나 종파의 속도와 횡파의 속도를 변

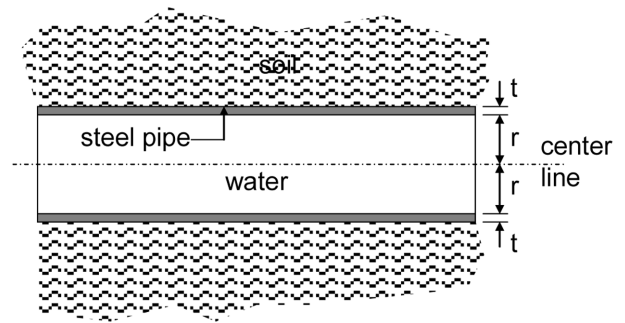


Fig. 1 Schematic view of target system

Table 1 Material properties of steel pipe, water, and soils

Case	Material	Density (kg/m ³)	P-wave speed (m/sec)	S-wave speed (m/sec)
All	Steel	7932	5960	3260
All	Water	1000	1500	-
Case 1	Soil 1	1500	1000	100
Case 2	Soil 2	1500	750	75
Case 3	Soil 3	1500	500	50
Case 4	Soil 4	1500	250	25
Case 1b	Soil 1b	1650	1000	100
Case 1c	Soil 1c	1800	1000	100
Case 2b	Soil 2b	1650	750	75
Case 2c	Soil 2c	1800	750	75
Case 3b	Soil 3b	1650	500	50
Case 3c	Soil 3c	1800	500	50

화시켰고, Cases 1b와 1c는 Case 1과 체적파의 속도는 동일하나 밀도를 증가시켰으며, Cases 2b와 2c, 그리고 Cases 3b와 3c는 각각 Case 2와 Case 3과 체적파의 속도는 동일하나 밀도를 증가시킨 것이다.

3. 결 과

먼저 Cases 1~4의 L(0,1) 감쇠분산곡선을 Fig. 2에 나타내었다. Case 별로 경향이 분명하지 않은 1MHz 미만의 저주파수대를 Fig. 3에 나타내었다. 그리고 Cases 1, 1b, 1c의 L(0,1) 감쇠분산곡선을 Fig. 4에, Cases 2, 2b, 2c의 L(0,1) 결과를 Fig. 5에, Cases 3, 3b, 3c의 L(0,1) 결과를 Fig. 6에 각각 나타내었다. 그리고 Fig. 4, 5, 6에서 1MHz 미만의 저주파수대에 해당하는 분산곡선을 Fig. 7, 8, 9에 각각 나타내었다.

Fig. 2와 3로부터 흙의 종파와 횡파의 속도가 감소할수록(흙의 포화도가 증가할수록) 유도초음파 중 기본종파모드, L(0,1) 모드의 감쇠가 감소하는 것을 알 수 있다. 반면에 Fig. 4, 5, 6로부터 흙의 밀도가 증가할수록(다짐이 증가할수록) L(0,1) 모드의 감쇠가 증가한다는 것을 알 수 있다. 저주파수대에서도(Fig. 7, 8, 9)에서도 동일한 결과를 얻을 수 있다. 또한 이들 결과로부터 주파수 영역에 따라 다소 국부적인 증감을 나타내지만 일반적

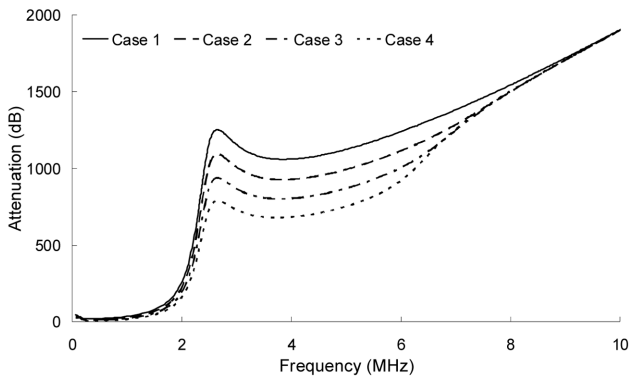


Fig. 2 Attenuation dispersion Curve for cases 1 to 4

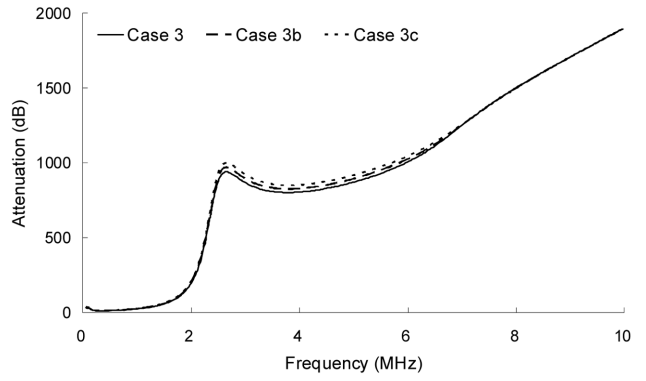


Fig. 6 Attenuation dispersion curves of Cases 3, 3b, and 3c

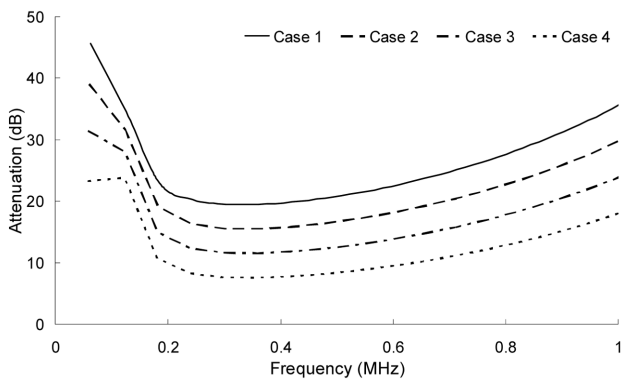


Fig. 3 Detail view of Fig. 2 over the frequency less than 1 MHz

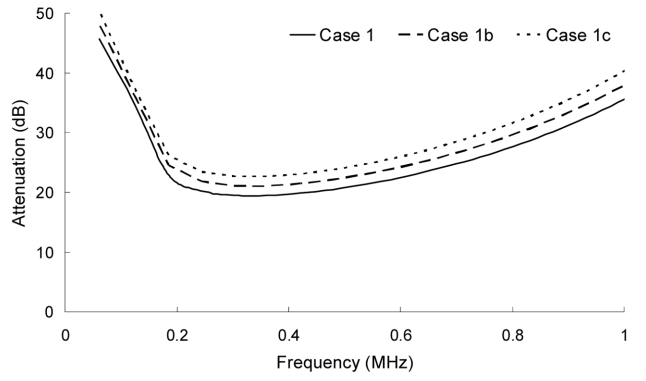


Fig. 7 Detail view of Fig. 4 over the frequency less than 1 MHz

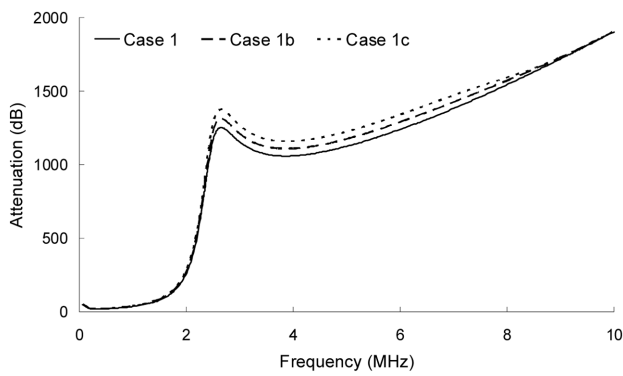


Fig. 4 Attenuation dispersion curves of Cases 1, 1b, and 1c

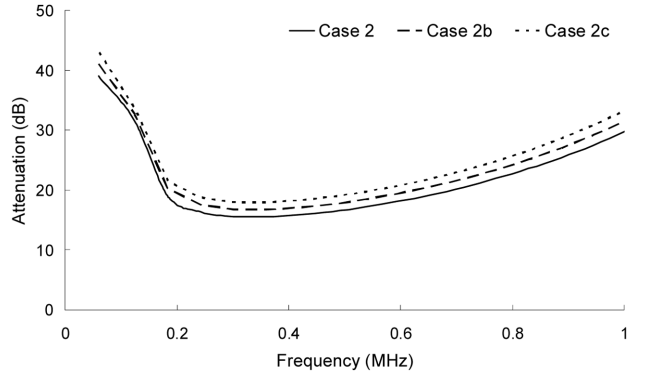


Fig. 8 Detail view of Fig. 5 over the frequency less than 1 MHz

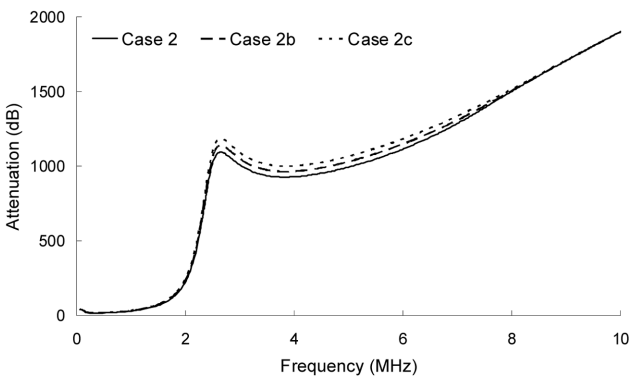


Fig. 5 Attenuation dispersion curves of Cases 2, 2b, and 2c

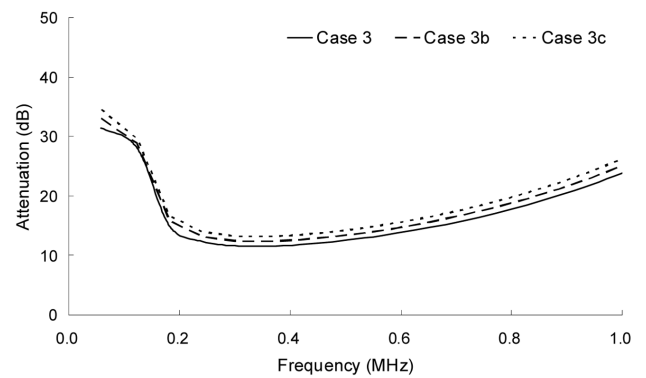


Fig. 9 Detail view of Fig. 6 over the frequency less than 1 MHz

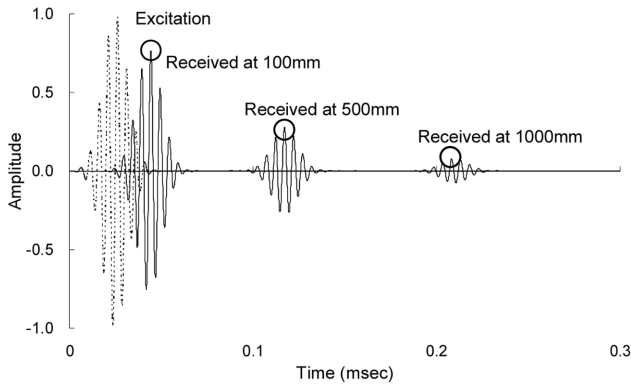


Fig. 10 L(0,1) mode at distances (100, 500, and 1000 mm) from the excitation point in the Case 1, at 0.2 MHz

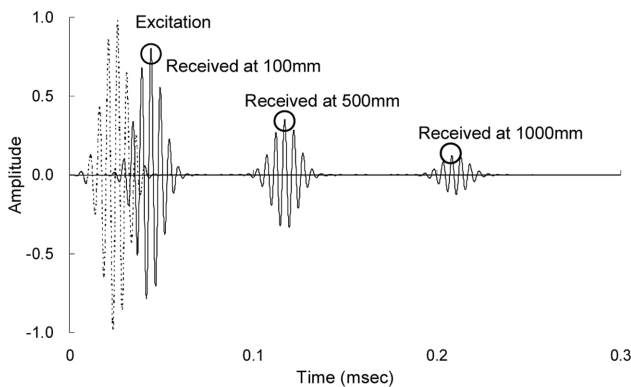


Fig. 11 L(0,1) mode at distances (100, 500, and 1000 mm) from the excitation point in the Case 2, at 0.2 MHz

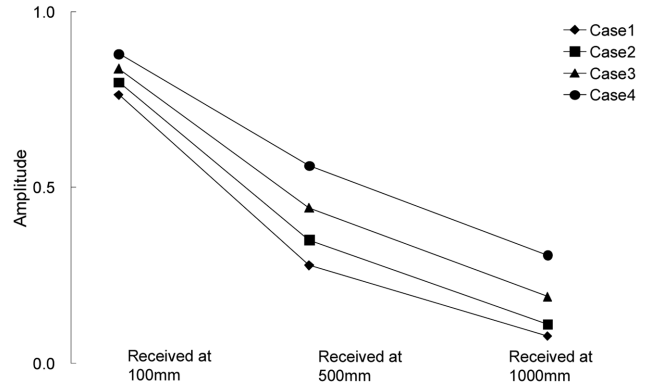


Fig. 12 Amplitude at different reception points (100, 500, 1000 mm) in the cases 1, 2, 3, and 4

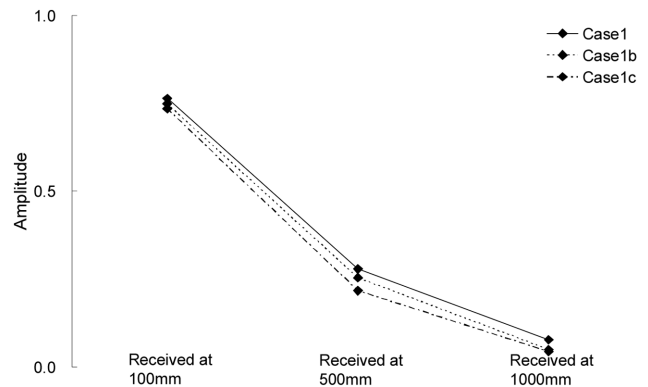


Fig. 13 Amplitude at different reception points (100, 500, 1000 mm) in the cases 1, 1b, and 1c

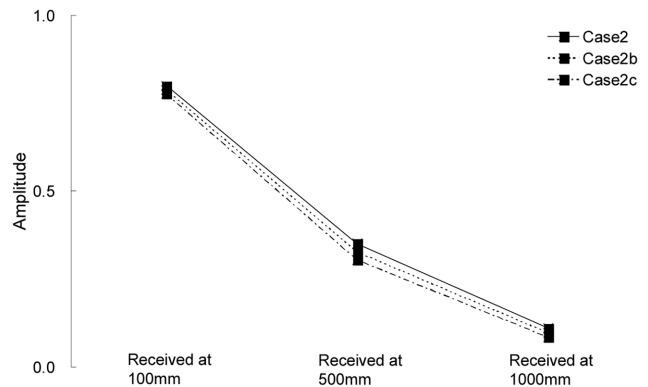


Fig. 14 Amplitude at different reception points (100, 500, 1000 mm) in the cases 2, 2b, and 2c

으로 주파수가 증가할수록 L(0,1)의 감쇠가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

유도파의 분산과 감쇠 정도를 보다 시각적으로 나타내기 위해 Fig. 10과 Fig. 11에 가진 점(Excitation point)으로부터 100, 500, 1000mm 거리에서 수신된 수신 신호를 각각 나타내었다. 여기서 해당 주파수는 0.2MHz이며 Fig. 10은 Case 1을 Fig. 11은 Case 2의 결과를 각각 나타낸다.

Fig. 10과 11로부터 가진신호(Excitation signal)가 어떻게 감쇠되는 것을 알 수 있으며 최대 진폭 1을 기준으로 하였을 때 가진 점으로부터 1000mm(1m)에서 수신한 신호의 진폭이 급격하게 적어짐을 알 수 있다. 이들 수신신호의 진폭을 Case별로 명확하게 나타내기 위해서 각 수신점에서 수신된 신호의 최대 진폭(Fig. 10과 11에 원형으로 표시됨)을 Fig. 12에서 15까지 나타내었다. Fig. 12는 Cases 1, 2, 3, 4에서의 수신신호의 진폭을 나타내는데, 동일한 밀도(1500kg/m³)에서 종파 속도와 횡파 속도가 감소하면 수신신호의 진폭이 증가하는 것을 알 수 있다. 즉 흙의 함수비가 증가하면 유도파의 감쇠가 줄어든다.

Fig. 13은 Cases 1, 1b, 1c에서의 수신신호의 진폭을 나타내는데, 동일한 체적과 속도(종파 속도 1000m/sec, 횡파 속도 100m/sec)에서 밀도가 증가하면 수신신호의 진폭이 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 흙의 다짐이 증가하면 유도파의 감쇠가 증

가한다. Fig. 14는 Cases 2, 2b, 2c에서의 수신신호의 진폭을 나타내는데, 동일한 체적과 속도(종파 속도 750m/sec, 횡파 속도 75m/sec)에서 밀도가 증가하면 수신신호의 진폭이 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 흙의 다짐이 증가하면 유도파의 감쇠가 증가한다. Cases 3, 3b, 3c에서의 수신신호(Fig. 15)도 동일한 양상을 나타내며, Soil 4(Case 4)에서 밀도를 증가시킨 경우(논문에서 나타내지 않음)에도 동일한 양상을 나타내는 것으로 확인되었다.

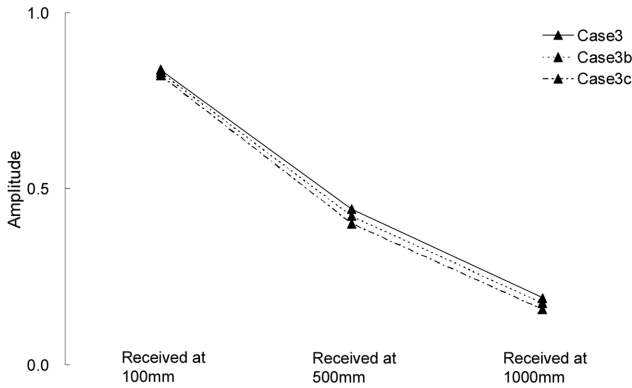


Fig. 15 Amplitude at different reception points (100, 500, 1000 mm) in the cases 3, 3b, and 3c

이들 결과로부터 기본종파모드 L(0,1)를 활용한 물을 수송하는 매립된 배관의 비파괴 검사를 위해서는 Fig. 2~9에서 나타난 바와 같이 0.2에서 0.4MHz의 저주파수 영역을 사용하는 것이 바람직함을 알 수 있다. 이 영역에서 L(0,1)의 감쇠가 작기 때문이다. 하지만 이 주파수 영역에서 L(0,1)가 유도초음파를 활용한 비파괴검사에 적절한지를 판단하기 위해서는 몇 가지 조건을 추가적으로 만족해야 한다. 첫째, 해당 주파수 영역에서 다른 유도초음파 모드의 특성을 파악하고 L(0,1)의 군속도가 해당 주파수 영역에서 다른 모드에 비해 빠른지를 확인해야 한다. 유도초음파의 특성상 다양한 모드가 중첩되어 수신되므로 모드 분리를 쉽게 하기 위해서 빠른 모드를 사용하는 것이 유리하기 때문이다. 둘째, 해당 주파수 영역에서 L(0,1)의 특정 결함에 관한 민감성이다. 즉, L(0,1) 모드가 어떤 결함에 민감한지를 파악할 필요가 있다.

이를 위해 Fig. 16과 17에 Case 1의 위상속도 및 군속도 분산 곡선을 나타내었다. 이들 그림으로부터 해당 주파수 영역(0.2~0.4MHz)에 나타나는 모드는 L(0,1)와 F(1,1) 모드이며 L(0,1) 모드의 군속도가 F(1,1) 모드보다 빠른 것을 알 수 있다. 즉, 해당 주파수 영역에서 발생하는 유도초음파 모드는 기본종파모드와 기본굽힘모드(Fundamental flexural mode)이며 기본종파모드의 속도가 기본굽힘모드보다 빠르다.

Fig. 18은 0.2MHz에서 L(0,1)의 반지름방향 변위(U_r), 축방향

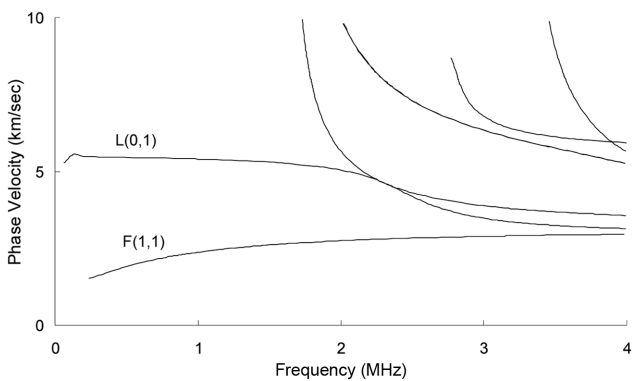


Fig. 16 Phase velocity dispersion curve of Case 1 model

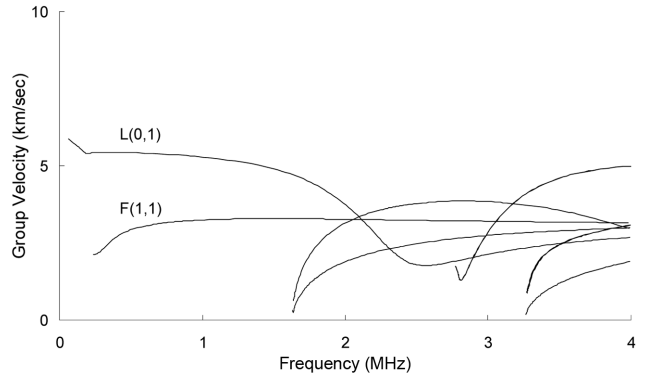


Fig. 17 Group velocity dispersion curve of Case 1 model

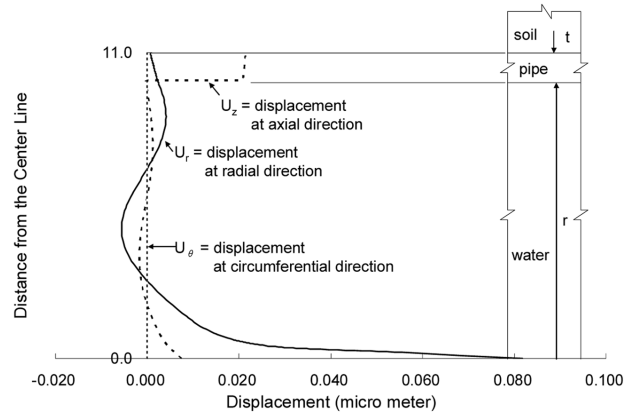


Fig. 18 L(0,1) Displacements vs. distance from the center line of the target system for Case 1 model

변위(U_z), 원주방향 변위(U_θ)를 각각 나타낸다. 이것으로부터 L(0,1)는 강관 부분에서 원주방향 변위는 없으며, 반지름방향 변위가 작으며, 축방향 변위는 최대가 되는 것을 알 수 있다. 따라서 축방향으로 생성된 결함에 민감하나 반지름방향으로 생성된 결함에는 덜 민감하고 원주방향으로 생성된 결함에는 반응하지 않음을 예측 할 수 있다. 이와 같은 양상이 0.2MHz 뿐만 아니라 저주파수 영역이 0.2에서 0.4MHz까지 동일함을 확인하였다.

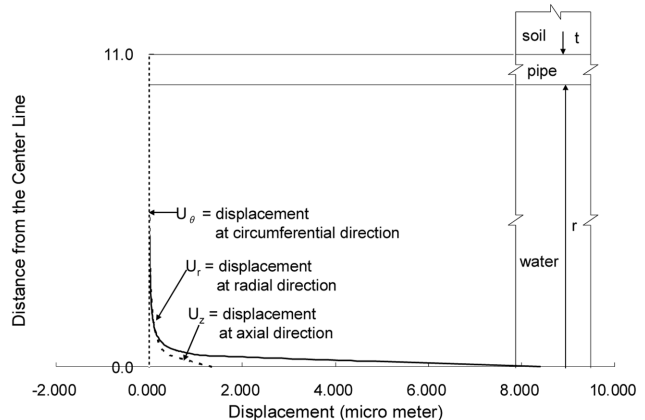


Fig. 19 F(1,1) Displacements vs. distance from the center line of the target system for Case 1 model

F(1,1)가 존재하는 최소 주파수는 0.22MHz이므로 이 주파수에서의 F(1,1) 변위를 Fig. 19에 나타내었다. L(0,1)과 다르게 F(1,1)은 강관 영역에는 모든 변위가 영임을 알 수 있고 시스템의 중앙에 반지름방향 변위와 축방향 변위가 집중되어 있음을 알 수 있다. 따라서 감쇠가 작은 주파수 영역에서 L(0,1)가 F(1,1)보다 군속도가 빠르고 결함에 민감함을 예측 할 수 있다. 이상의 결과로부터 L(0,1)가 0.2에서 0.4MHz 저주파수 대에서 감쇠가 비교적 작으며 F(1,1)보다 군속도가 빨라 모드 분리가 용이하며, 축방향 변위에 민감함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 물을 수송하며 흙에 매립된 배관에 전파되는 유도초음파의 기본종파모드인 L(0,1)의 감쇠분산 특성을 고찰하였다. 흙의 포화도와 다짐을 적절한 가정 하에 흙에서 전파되는 종파 속도, 횡파 속도, 그리고 흙의 밀도로 나타내었으며 이들 인자가 기본종파모드의 감쇠에 미치는 영향을 분석하였다. 다른 종류의 흙을 모사하기 위해 흙의 종파속도, 횡파속도, 그리고 밀도를 구별하여 총 10가지 Cases를 고려하였다. 수치계산을 통하여 각 경우에 관한 기본종파모드의 분산곡선을 계산하여 나타내고 다음의 결과를 얻었다.

(1) 흙의 종파와 횡파 속도가 감소할수록(흙의 포화도가 증가할수록) 기본종파모드, L(0,1)의 감쇠가 감소한다. 반면에 흙의 밀도가 증가할수록(다짐이 증가할수록) 기본종파모드의 감쇠가 증가한다.

(2) 기본종파모드의 감쇠는 주파수 영역에 따라 다소 국부적인 증감을 나타내지만 일반적으로 주파수가 증가할수록 L(0,1)의 감쇠가 증가하는 것을 확인할 수 있고, 최소 감쇠는 0.2~0.4MHz에서 발생한다.

(3) 0.2~0.4MHz 영역에서는 기본종파모드와 기본굽힘모드가 존재하며 기본종파모드의 군속도가 빠르다. 기본굽힘모드의 변위는 시스템의 중심인 물에 집중되고 강관 부분에는 존재하지 않으나 기본종파모드의 변위는 강관에 존재하거나 집중된다. 특히 기본종파모드의 축방향 변위가 강관에 집중되어 있어 축방향으로 존재하는 결함에 민감함을 알 수 있다.

(4) 따라서 물을 수송하며 흙에 매립된 강관의 유도초음파를 활용한 비파괴검사에서는 0.2~0.4MHz 주파수 영역의 기본종파모드가 축방향 결함을 진단하는데 유리함을 알 수 있다.

본 연구 결과는 석유화학산업 및 수자원 산업에서 화석연료 및 수자원을 수송하기 위해 빈번히 사용되는 매립된 배관의 유도초음파 기반 건전성 모니터링에 활용될 것으로 판단된다. 특히, 주변 흙의 특성에 따른 기본 종파 모드의 감쇠특성을 파악함으로써 매립된 배관에서 전파되는 유도초음파의 전파거리를 산정하는데 중요한 자료를 제공하는데 그 중요성이 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지정 전남대학교 중화학설비안전진단 센터의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- 이주원, 신성우, 나원배, 김재민 (2010). "매립된 파이프에서 유도초음파의 종파 모드 특성", 한국전산구조공학회 정기학술대회, pp 674-677.
- Adamo, F., Attivissimo, F., Fabbiano, L., Giaquinto, N. and Spadavecchia, M. (2010). "Soil Moisture Assessment by Means of Compressional and Shear Wave Velocities: Theoretical Analysis and Experimental Setup", Measurement, Vol 43, pp 344-352.
- Das, B.M. (2002). Principles of Geotechnical Engineering, Brooks/Cole.
- Fratta, D., Alshibli, K.A., Tanner, W.M. and Roussel, L. (2005). "Combined TDR and P-Wave Velocity Measurements for the Determination of In Situ Soil Density-Experimental Study", Geotechnical Testing Journal, Vol 28, No 6, pp 1-11.
- Kwun, H., Kim, S.Y., Choi, M.S. and Walker, S.M. (2004). "Torsional Guided-Wave Attenuation in Coal-Tar-Enamel-Coated, Buried Piping", NDT&E International, Vol 37, pp 663-665.
- Lee, J., Na, W.B., Kim, J.T. and Cho, H.M. (2008). "Mode Selection of Leaky Lamb Waves in Steel Plate", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol 22, No 1, pp 6-12.
- Long, R., Lowe, M. and Cawley, P. (2003). "Attenuation Characteristics of the Fundamental Modes that Propagating in Buried Iron Water Pipes", Ultrasonics, Vol 41, pp 509-519.
- Lu, Z., Hickey, C.J. and Sabatier, J.M. (2004). "Effects of Compaction on the Acoustic Velocity in Soils", Soil Science Society of America Journal, Vol 68, pp 7-16.
- Na, W.B., Ryu, Y.S. and Kim, J.T. (2005). "Attenuation of Fundamental Longitudinal Cylindrical Guided Wave Propagating in Liquid-Filled Steel Pipes", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol 19, No 5, pp 26-33.

2010년 5월 24일 원고 접수

2010년 7월 12일 심사 완료

2010년 8월 16일 게재 확정