

수치해석과 모형실험을 통한 매립배관에서의 유도초음파 L(0,2) 모드의 감쇠 특성 평가

이주원 · 나원배
부경대학교 해양공학과

Attenuation Characterization of L(0,2) Guided Wave Mode through Numerical Analyses and Model Experiments with Buried Steel Pipe

Juwon Lee and Won-Bae Na

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

KEY WORDS: Buried pipe inspection 매립배관 탐상, Guided waves 유도파, Attenuation 감쇠, DISPERSE, L(0,2) Mode

ABSTRACT: By carrying out numerical analyses and model experiments, this paper presents the attenuation characterization of an L(0,2) guided ultrasonic wave propagating in a buried steel pipe. From this investigation, we first find that the L(0,2) mode has a better attenuation property. Second, it is shown from the numerical analyses that the attenuation increases with increases in the soil embedment length (0, 500, 1000, and 1500 mm) and degrees of saturation (0, 50, 99, and 100%). Third, it is also shown from the model experiment that the attenuation increases as the embedment lengths and soil moisture quantities (0, 10, 20, and 30 kg) increase. Finally, we find that an exponential extrapolation gives a better attenuation prediction because the extrapolation gives similar attenuation patterns between the numerical and experimental results.

1. 서 론

배관 또는 파이프라인은 석유나 천연가스 같은 화석연료의 수송을 위해 설치되는 구조물로, 지상, 지하, 수중과 같은 다양한 환경에 걸쳐 설치된다. 미국의 경우 걸프 만에서 시추된 화석연료는 수중에 매립된 배관에 의해 육지의 분배소까지 수송된 후 다시 지상 또는 매립 배관을 통해 정제시설까지 수송된다(Essandoh-Yeddu and Gülen, 2009). 이렇게 설치된 배관의 비파괴 검사법은 다양하지만 최근에는 파이프라인을 운용 중에도 사용할 수 있는 유도초음파(Guided ultrasonic waves) 검사법이 개발되어 현장에서 사용되고 있다(Kwun and Holt, 1995; Na et al., 2005; Rose et al., 2005).

여기서 유도초음파는 체적파(Bulk waves)가 파동 전파 경로의 경계면에서 반사될 경우, 경계면의 내부 경로에서 반사파들의 중첩과 간섭에 의해서 형성되어 전파되는 파동을 의미한다(Rose, 2004). 유도초음파는 전파되는 도파관(Wave guide)의 형상에 따라 다른 특성을 가진다. 그 중 배관과 같은 실린더 형태의 구조물에서 존재하는 유도초음파의 모드에는 축에 대칭인 종파 모드

(Longitudinal mode), 비틀림 모드(Torsional mode)와 축에 비대칭인 휨 모드(Flexural mode)가 있다. 각 모드를 기호로 나타내기 위해서 종축 방향에 대칭인 종파 모드는 $L(0,n)$, 비틀림 모드는 $T(0,n)$, 비대칭인 휨 모드는 $F(m,n)$ 으로 표기한다. 따라서 괄호 속의 0은 종축방향에 대칭을 의미하고, m 은 원주방향 차수(Circumferential order)를, n 은 해당 모드의 순서(Number of order)를 나타낸다. 한 개의 m 에 대해 무한개의 n 이 존재하여 하나의 모드군(Family of modes)을 이루는데, m 역시 무한개가 있으므로 결국 무한개의 모드군이 존재하게 된다(Silk and Bainton, 1979). 예를 들면, $L(0,2)$ 는 2번째 종파 모드를 의미한다.

유도초음파는 전파 경로의 경계가 자유 경계, 즉 대기 중에 노출되어 있는 경우 파동에너지를 손실이 작기 때문에 먼 거리에 걸쳐 전파될 수 있다. 이러한 유도초음파의 특성은 배관과 같이 긴 거리에 걸쳐 설치된 구조물의 비파괴검사에 적합하다. 그러나 배관이 매립되어진 경우 파동에너지를 일부가 지반으로 누설(Leakage)되는 현상이 발생하며, 누설되는 정도는 배관과 지반의 역학적 특성에 따라 달라진다(Rose, 2004). 결과적으로 매립배관의 경우 전파거리가 지상 배관에 비하여 매우 짧아지

Received 3 September 2012, revised 14 December 2012, accepted 14 February 2013

Corresponding author Won-Bae Na: 051-629-6588, wna@pknu.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

본 논문은 2012년 대구에서 개최된 한국해양과학기술협의회 공동학술대회에서 발표된 논문을 근간으로 하고 있음을 밝힙니다.

게 된다. 따라서 매립배관을 대상으로 한 유도초음파 기반 비파괴검사법에 대한 연구는 매립배관에서 전파되는 유도초음파의 모드와 매립된 지반의 특성에 초점이 맞추어져 있다.

Long et al.(2003)은 매립배관 내부의 유체를 통해 전파되는 모드를 대상으로 지반의 체적종파속도(Bulk longitudinal wave velocity)와 체적횡파속도(Bulk shear wave velocity)의 변화에 따른 전파 거리 및 감쇠 분석을 수행하였으며, Kwun et al.(2004)은 내부 유체에 영향을 받지 않고 비분산적인 비틀림 모드를 이용하여 매립배관에 대한 연구를 수행하였다. Lee et al.(2010b)은 포화도(Degree of saturation)를 변수로 하는 지반모델을 이용하여 유도초음파의 감쇠에 영향을 주는 지반의 음향학적 특성을 결정하고, 장거리 전파 후보 모드를 정하였다. 또한 Lee et al.(2010a)은 주변 흙의 특성이 물이 찬 매립된 배관에서 전파되는 기본 종파 모드 감쇠에 미치는 영향을 수치적으로 검토하였다.

이전 연구에서는 임의의 지반특성을 사용하였고(Long et al., 2003), 단일 모드만을 대상으로 연구를 수행(Kwun et al., 2004; Lee et al., 2010a)함으로써 매립배관에 대한 유도초음파 기반 검사법의 적용성을 확장할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 Lee et al.(2010b)이 제안한 지반모델과 비교적 다른 모드에 비해 저주파수 영역에서 감쇠가 적은 L(0,1), L(0,2), T(0,1) 모드를 대상으로 수치해석을 수행하여 대상모드를 선정하였다. 또한 모형실험을 통해 매립배관에서 전파되는 유도초음파의 감쇠를 분석, 예측하였다. 이를 위해 (1) 내부가 빈 매립배관의 매립길이(Embedment length)와 지반의 수분(Soil moisture)에 따른 신호강도의 변화를 관찰하였다. (2) Lee et al.(2010b)이 제안한 포화도를 변수로 하는 지반모델을 이용하여 지반의 음향학적 특성을 결정하고, 이 특성을 이용하여 내부가 빈 매립배관에 존재하는 축대칭 유도초음파 모드의 감쇠를 계산 및 분석함으로써 대상 모드를 선정하였다. (3) 수치해석과 모형실험 결과를 바탕으로 매립길이가 3000mm인 배관에서 전파되는 유도초음파의 감쇠를 예측하였다.

2. 수치해석

2.1 해석방법 및 모델링

Fig. 1과 같이 다층으로 이루어진 시스템을 모델링하기 위하여 다층시스템으로 확장된 전역행렬법(Global matrix method)을

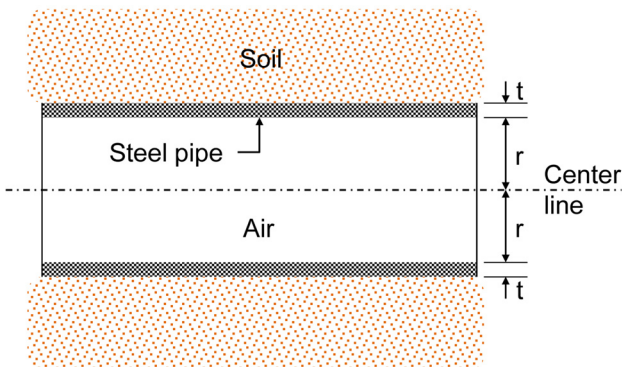


Fig. 1 Model of a pipe buried in soil

사용하였다. 이들 방법에 대해서는 Lee et al.(2010b)에 상세히 설명되어 있다. Fig. 1은 본 연구의 대상체인 매립된 배관을 나타낸다. 배관의 상하부에 존재하는 지반은 반무한 층으로 가정하였으며, 배관과 지반사이의 코팅 층은 무시하였다. 그리고 배관의 내부에 공기가 존재하는 경우를 고려하였다. 본 연구에서는 유도초음파 모드 감쇠 분산 곡선을 구하기 위하여 상용 해석 프로그램인 DISPERSE[®]를 이용하였다.

2.2 지반재료 모델

매립된 배관과 같이 배관의 경계가 지반인 경우에는, 지반의 음향학적 특성에 의해 배관에서 전파되는 유도초음파의 감쇠가 결정되어진다. 일반적인 탄성 재료의 체적종파속도와 횡파속도는 재료의 체적탄성계수, 전단탄성계수, 재료 밀도를 이용하여 결정할 수 있다. 흙의 공극률, 유효응력을 상수로 두면, 밀도, 체적종파속도, 체적횡파속도를 다음과 같은 포화도의 함수로 나타낼 수 있다(Lee et al., 2010b).

$$\rho_{soil}(S) = \rho_s(1-n) + \rho_w nS \tag{1}$$

$$C_{p,soil}(S) = \sqrt{\frac{\left(n \left(\frac{S}{B_w} + \frac{1-S}{B_a} + \frac{1-n}{B_g} \right)^{-1} \right) + G_{sk} \left(\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu} \right)}{\rho_s(1-n) + \rho_w nS}} \tag{2}$$

$$C_{s,soil}(S) = \sqrt{\frac{G_{sk}}{\rho_s(1-n) + \rho_w nS}} \tag{3}$$

여기서 n 은 공극률, S 는 포화도, ρ_s 는 흙 입자의 밀도, ρ_w 는 물의 밀도이다. B_w 는 물의 체적탄성계수($\approx 2.2\text{GPa}$), B_a 는 공기의 체적탄성계수($\approx 142\text{kPa}$), B_g 는 흙 입자의 체적탄성계수, G_{sk} 는 흙 입자의 연결구조에 따른 흙 뼈대의 전단탄성계수, ν 는 흙의 포와송 비이다. 지반의 음향학적 특성을 계산하기 위해 사용된 지반의 조건을 Table 1~3에 정리하였다. 이러한 조건은 Fratta et al.(2005)과 Qian et al.(1993)의 실험 결과를 통해 얻어진 값을 사용하였다.

Fig. 2는 지반의 물성치를 식 (1)~(3)와 Table 1~3의 조건을 이용하여 포화도의 함수로 나타낸 결과이다. 먼저 밀도는 포화도가 증가함에 따라 점차적으로 증가하는 반면, 체적횡파의 속도는 서서히 감소한다. 체적종파의 속도는 포화도가 증가할 때 서

Table 1 Stiffness (or bulk modulus) (Pa)

Air (B_a)	Water (B_w)	Sand mineral (B_g)	Shear modulus of soil skeleton (in small strain condition) (G_{sk})
1.42×10 ⁵	2.19×10 ⁹	3.50×10 ⁹	2.50×10 ⁷

Table 2 Density (kg/m³)

Sand mineral (ρ_s)	Water (ρ_w)
2650	1000

Table 3 Volumetric ratio

Porosity (n)	Poisson ratio of soil (ν)
2650	0.15

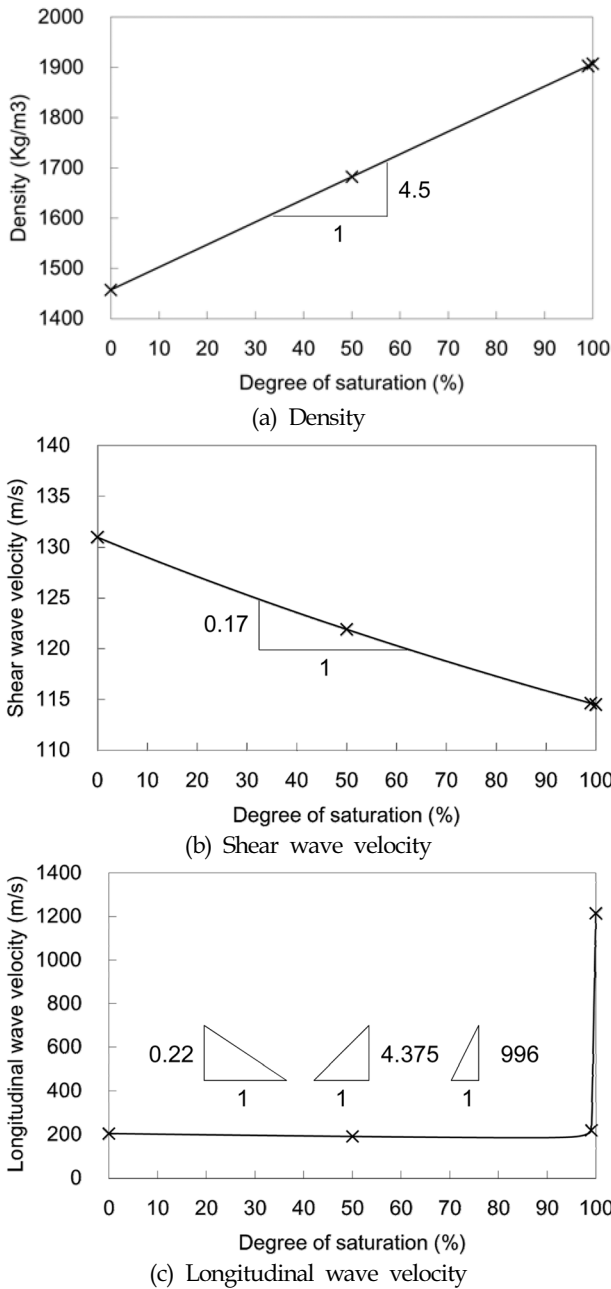


Fig. 2 Acoustic properties of soil versus degree of saturation

Table 4 Acoustic properties of soil at the selected degree of saturation

Degree of saturation (%)	Density (kg/m ³)	Longitudinal wave velocity (m/sec)	Shear wave velocity (m/sec)
0	1458	205	131
50	1683	191	122
99	1903	220	115
100	1908	1216	114

서히 감소하다(기울기 0.22/1) 포화도가 91%를 넘어서면 다시 증가한다(기울기 4.375/1). 그리고 포화도가 100%가 될 때 급격

히 증가한다(기울기 996/1). 지반의 포화도가 100%가 아니면 그 공극에는 물과 공기가 같이 존재한다. 따라서 낮은 포화도에서는 공기가 체적중파의 속도를 결정하며, 높은 포화도에서는 물이 체적중파의 속도를 결정한다고 말할 수 있다. 이를 바탕으로 지반의 공극에 공기만 있을 때(0%), 부분적으로 포화되었을 때(50%), 포화되기 직전(99%), 공극이 물로만 채워져 있을 때(100%)의 지반에 매립된 배관에서 전파되는 유도초음파의 감쇠를 수치해석 하였다. 이때 지반의 음향학적 특성을 Table 4와 같이 정리하였다.

2.3 지반포화도에 따른 종파모드의 감쇠 변화

일반적으로 관심주파수 범위가 높아질수록 유도초음파 모드의 개수는 증가한다. 따라서 적절한 주파수 범위를 선택하는 것이 모드 해석에 중요하다. 배관 진단에서는 재료감쇠를 고려하여 250 kHz보다 낮은 주파수 대역을 주로 사용하고 있다(Lowe, 1995). 본 연구에서는 감쇠가 큰 지반이 대상인 점을 고려해 200kHz까지를 관심주파수 범위로 선택하였으며, Table 5와 6과 같은 치수와 특성을 가지는 내부가 비어있는 매립배관에 존재하는 축대칭 유도초음파 모드의 감쇠분산곡선을 Fig. 3에 나타내었다. L(0,1) 모드는 16kHz 주위에서 감쇠가 급격하게 변화한다. 하지만 지반이 완전히 포화되지 않은 상태(0, 50, 99% saturated)에 비해 완전포화된 경우(100% saturated)의 감쇠 증가 폭이 작은 것을 Fig. 3(a)를 통해 확인 할 수 있다. L(0,2) 모드는 포화도가 증가할수록 그 감쇠 또한 증가하는 것을 Fig. 3(b)를 통해 확인 할 수 있다. 16kHz 주변에서 L(0,1) 과 L(0,2) 모드의 감쇠가 급격히 변화하는 원인은 배관의 음향학적 임피던스(Acoustic impedance)가 지반의 임피던스에 근접하여 배관 경계에서의 파동 투과율이 높아지기 때문이다(Rose, 2004). 또한 16kHz 이하에서 L(0,2) 모드는 배관의 전체에 진동현상이 야기되는 구조진동모드를 발생시켜 유도초음파의 전파가 이루어지지 않는 단절모드(Cut-off mode)이다. 따라서 16kHz 이하에서 L(0,2) 모드는 존재하지 않는다(Cho, 2001).

종파모드는 주파수에 따라 그 감쇠의 정도가 다른 반면(Dispersive), 비틀림모드는 주파수에 독립적(Non-dispersive)이며 포화도가 증가함에 따라 감쇠가 증가하는 것을 Fig. 3(c)를 통해 확인할 수 있다. 감쇠가 급격히 변화하는 16kHz 근처와 관심주파수 범위의 상한인 200kHz를 고려하여, 30~200kHz에서 각 모드의 최소 감쇠와 최소 감쇠가 발생하는 주파수를 Table 7과 같이 정리하였다. Table 7에서 L(0,2) 모드는 전반적으로 낮은 감

Table 5 Dimensions of steel pipe (mm)

Length	Outside diameter	Inside radius	Wall thickness
3000	114	53	4

Table 6 Material properties of steel and air (at 20°C)

Material	Density [Kg/m ³]	Longitudinal wave velocity [m/sec]	Shear wave velocity [m/sec]
Steel	7932	5960	3260
Air	1.205	344	-

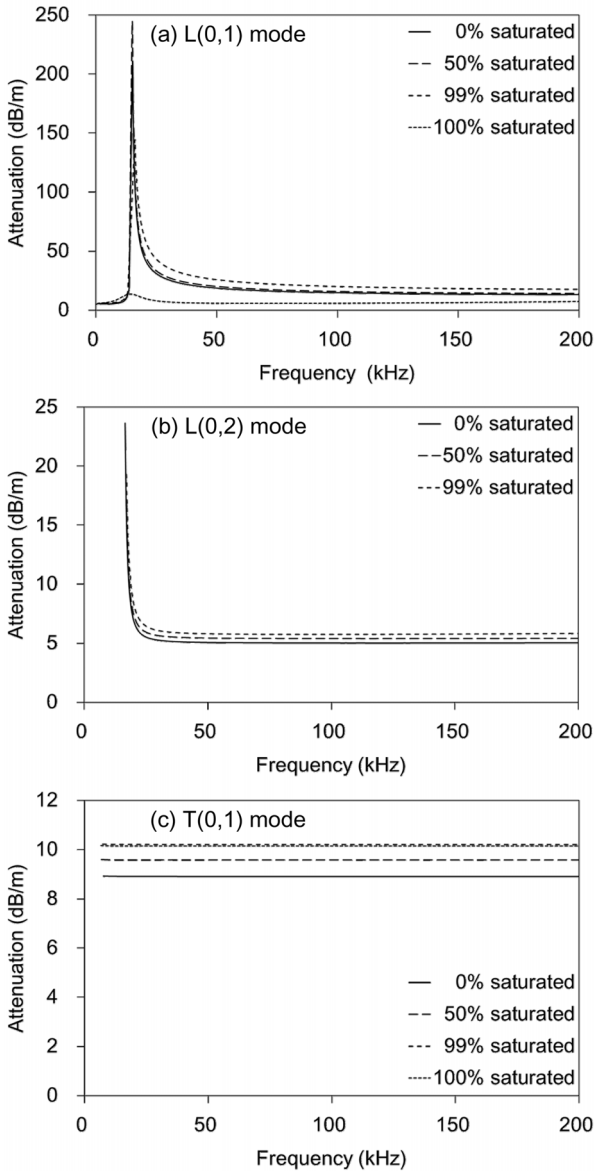


Fig. 3 Attenuation dispersion curves of air-filled and soil-surrounded steel pipes: (a) L(0,1), (b) L(0,2), and (c) T(0,1) mode

Table 7 Minimum attenuation and its frequency of each mode with respect to the degree of saturation

Mode	Degree of saturation (%)			
	0	50	99	100
L(0,1)	13.1dB/m 200kHz	14.09dB/m 200kHz	17.68dB/m 200kHz	5.7dB/m 65~78kHz
L(0,2)	5.01dB/m 100~130kHz	5.39dB/m 88~160kHz	5.76dB/m 76~120kHz	- -
T(0,1)	8.91dB/m	9.58dB/m	10.21dB/m	10.15dB/m
	All frequency range			

쇠를 가지며, 낮은 감쇠를 가지는 주파수 대역 또한 넓어 내부가 비어있는 매립배관에서는 가장 긴 전파거리를 가지며 가진

Table 8 Characteristics of used equipments

Center frequency of sensor (kHz)	Wedge velocity (m/sec)
100	2720

주파수의 선택에 여유가 있는 모드임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 L(0,2) 모드를 대상 모드로 선정하였다.

3. 모형실험

3.1 실험설정

본격적인 실험에 앞서 부분적인 매립 및 지반에 존재하는 수분이 유도초음파의 감쇠에 어떤 영향을 주는지 기초적인 실험을 수행하였다.

Fig. 4와 같이 기초실험을 구성하였다. Table 5와 6과 같은 치수와 특성을 가지는 KSD 3507 규격의 탄소 강관에 경사입사법 (Oblique incidence method)과 가진과 수신센서를 사용하는 Pitch-Catch법으로 유도초음파 신호를 가진 및 수신하였다. 이때 센서 간의 거리는 2000mm이다. 실험에 사용한 센서의 중심주파수와 wedge의 초음파 전파속도를 Table 8에 나타내었다. 매립되지 않은 상태의 배관에서 기저신호(Reference signal)를 취득한 후, 길이 300mm, 폭 200mm, 높이 250mm인 토조를 사용하여 배관의 일부를 모래(Dry sand)로 매립한 후 신호를 취득하였다. 그 후 모래에 물을 공급하여 지반에 수분이 존재할 경우의 신호를 취득하였다. 토조를 구성함에 있어서 각 경계를 배관의 직경과 동일한 구멍이 있는 나무판을 이용하여 분할하였다. 이때 다음과 같은 가정으로 실험을 수행하였다. 배관의 불연속이 발생하지 않았으므로 생성된 유도초음파는 계속 진행된다. 경계면에서 발생할 수 있는 유도초음파 반사는 Pitch-Catch법을 이용하기 때문에 초기 수신신호에 포착되지 않는다. 배관과 접촉하는 경계면을 통한 누설은 매립도에 의한 누설보다 크지 않다.

3.2 대상 모드의 가진

위상속도 분산곡선과 Snell의 법칙을 이용하여 L(0,2)모드를 가진하였다. Fig. 5(a)는 DISPERSE[®]를 이용하여 계산한 내부가 비어 있는 매립배관에 존재하는 축대칭 유도초음파 모드의 위상속도 분산곡선이다. 센서의 중심주파수 100kHz에서 L(0,2) 모드의 위상속도와 웨지(Wedge)의 초음파 전파속도를 식 (4)와 같

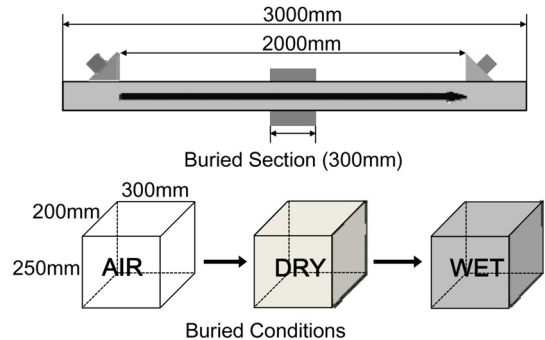


Fig. 4 Preliminary experiment set-up

은 Snell의 법칙에 대입하여 입사각을 결정할 수 있다.

$$\frac{V_1}{\sin\alpha} = \frac{V_2}{\sin\beta} \quad (4)$$

여기서 V_1 과 V_2 는 웨지의 초음파 전파속도와 가진 모드의 위상속도를 각각 나타낸다. 또한, α 와 β 는 입사각과 전파방향($=90^\circ$)을 나타낸다. L(0,2) 모드의 위상속도와 웨지의 초음파 전파속도를 이용하여 계산된 입사각 α 는 30° 이다.

3.3 수신 신호의 모드 판별

시간 영역에서 얻어진 신호는 Fig. 6과 같이 여러 모드가 중

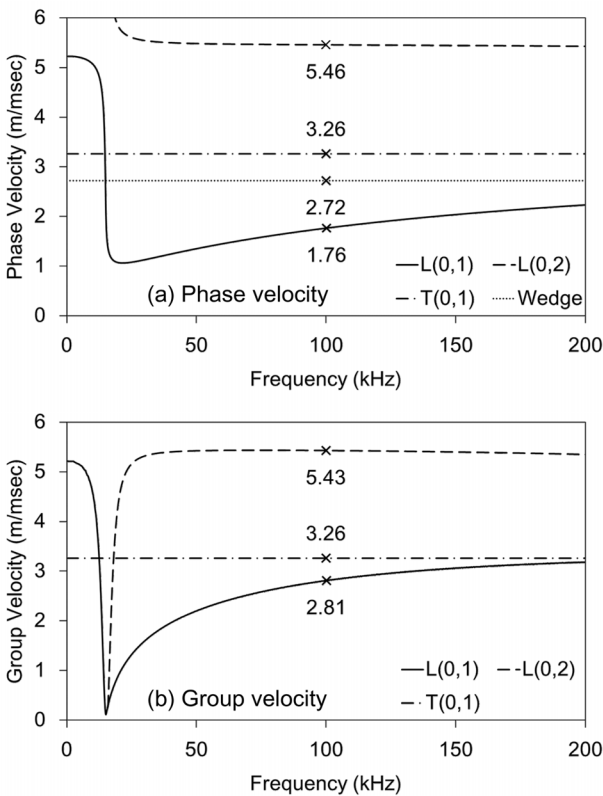


Fig. 5 Dispersion curves of axisymmetric modes propagates on air-filled and soil-surrounded steel pipe

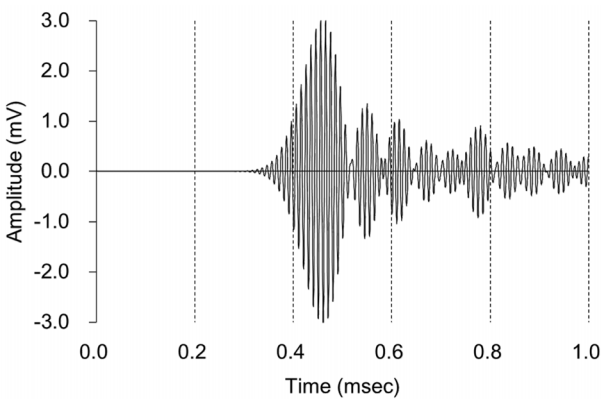


Fig. 6 Received signal obtained from the preliminary experiment on steel pipe without soil embedment

첩되어 있어 대상 모드의 변화를 관찰하기 위해서는 모드의 판별이 필요하다. 이를 위해 Fig. 4와 5의 센서간의 거리와 군속도 분산곡선을 이용하여 도달시간을 계산하였다. L(0,2), T(0,1), L(0,1) 모드 각각의 도달시간은 0.369msec, 0.615msec, 0.71msec로서, 처음으로 도달하는 신호를 L(0,2) 모드로 판단할 수 있다. Fig. 6은 매립토가 없는 경우에 얻어진 기저신호이다.

3.4 매립상태에 따른 신호강도 변화

매립상태에 따른 신호강도 변화를 기저신호를 기준으로 정규화 하여 Fig. 7에 나타내었다. 기초실험의 경우, 모래로 부분 매립되었을 때(Dry) 약 8% 신호강도가 감소했고, 매립토에 수분이 존재할 때(Wet) 약 18% 신호강도가 감소했다. 수치해석 결과 또한 마른 모래로 부분 매립된 경우(0%)와 매립토에 수분이 존재할 경우(99%) 각각 12%와 15%의 신호강도 감소가 발생했다. 기초실험과 수치해석 모두 매립토에 수분이 존재할 경우 신호강도가 더 크게 감소했다.

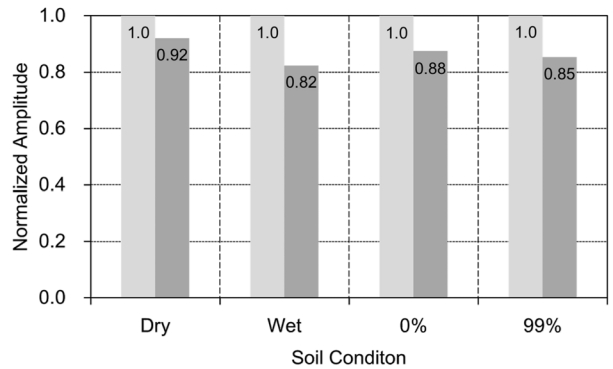


Fig. 7 Normalized amplitude with respect to buried condition

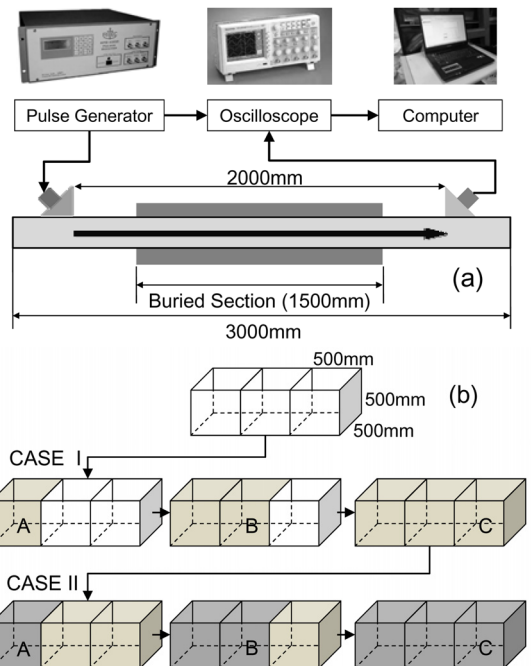


Fig. 8 Experimental design: (a) setup and (b) buried conditions

3.5 모형실험

앞서 수행된 기초실험을 바탕으로 매립길이와 지반의 수분에 따른 신호강도의 변화를 면밀히 관찰하기 위해 Fig. 8과 같이 모형실험을 구성하였다. 이때 Fig. 8(a)와 같이 실험을 설정하고 매립구간을 1500mm로 증가시켰다. Fig. 8(b)와 같이 길이 1500 mm, 폭 500mm, 높이 500mm인 토조를 3개의 구간으로 분할하고 모래가 채워지지 않은 상태에서 기저신호를 취득하였다. 다음으로 매립길이에 따른 변화를 관찰하기 위해 CASE I 과 같이 각 구간을 모래(Dry sand, 50kg)로 매워서 매립길이를 500mm (CASE I A), 1000mm(CASE I B), 1500mm(CASE I C)로 늘여가며 신호를 취득하였다. 지반의 수분에 따른 변화를 관찰하기 위해 CASEII와 같이 CASE I C 상태에서 각 구간에 물(10kg)을 공급하여(CASEIIA, CASEIIB, CASEIIC) 지반의 포화도가 증가하는 경우를 묘사하였다.

4. 결과 비교 및 신호강도 예측

매립길이와 지반의 수분에 따른 신호강도 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 매립길이의 증가(CASE I)에 따른 신호강도의 변화를 나타낸 Fig. 9(a)에서 실선은 모형실험 결과를, 점선은 수치해석결과를 나타내며 기저신호를 기준으로 정규화 하였다. 지반의 포화도 증가(CASEII)를 나타낸 Fig. 9(b)에서 막대는 모형실험 결과를, 점선은 수치해석 결과를 나타내며 CASE I C를 기준으로 정규화 하였다. 수치해석과 모형실험 모두 매립길이가 증가하고 지반의 수분이 증가하면 신호강도가 감소하였다. 하지만 CASE I 과 CASEII 모두 수치해석보다 모형실험의 신호강도 감소가 더 크게 나타났다. 수치해석과 모형실험 결과를 바탕으로 매립길이가 3000mm일 때의 신호강도를 Fig. 10, 11과 같이 선형 및 지수적으로 예측하였다. 모형실험을 선형적으로 예측한 Fig. 10에서 CASE I 과 CASEII 모두 2200mm 이상 신호가 전파되지 않는다고 예상되었다. 하지만 모형실험을 지수적으로 예측한 Fig. 11에서는 3000mm에서도 신호가 수신되는 것으로 예상되었다. 여기서 주목해야 할 것은 다음과 같다.

Fig. 9(b)의 실험 CASEIIC에 대응하는 수치해석 결과는 존재하지 않는다. 이는 완전 포화된 상태(100%)에서 관심주파수 영역 내에 L(0,2)모드가 수치적으로는 나타나지 않기 때문이다. 이와 같은 현상은 실험에서의 수분상태(CASEIIA, CASEIIB, CASEIIC)와 수치해석에서의 포화도(50%, 99%, 100%)가 매립토의 물 함유량을 달리 묘사한다는 관점에서는 일치하지만, 이들이 서로 같은 물리량을 의미하지는 않기 때문이다. 예를 들면 CASEIIA가 포화도 50%를 의미하지는 않는다. 따라서 매립토의 양과 수분 함량의 증가에 따른 신호강도의 예측에서도 실험결과와 수치해석 결과의 차이는 극히 당연한 것이다.

그러나 Fig. 9, 10, 11의 결과는 수치해석과 실험에서 매립토의 양과 수분 함량이 증가할수록, 신호강도가 감소한다는 중요한 사실을 나타낸다. 아울러 매립길이가 증가함에 따라 선형적인 예측에서는 실험과 수치해석 결과의 차이가 증가하는 반면에, 지수적인 예측에서는 이들의 차이가 작으며 일정한 패턴을 가진다는 것을 알 수 있다. 또한 유도파의 감쇠가 지수적으로 발생한

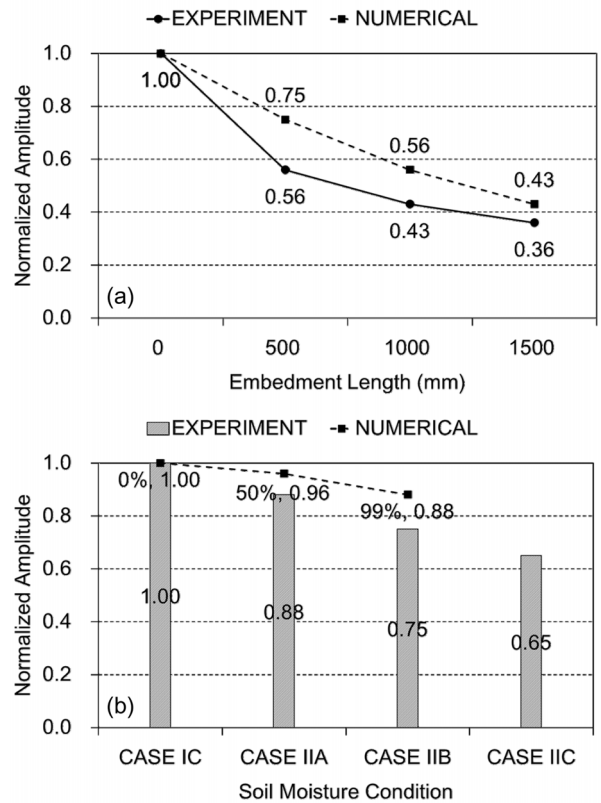


Fig. 9 Normalized amplitude of numerical experimental results with respect to (a) embedment length and (b) moisture change

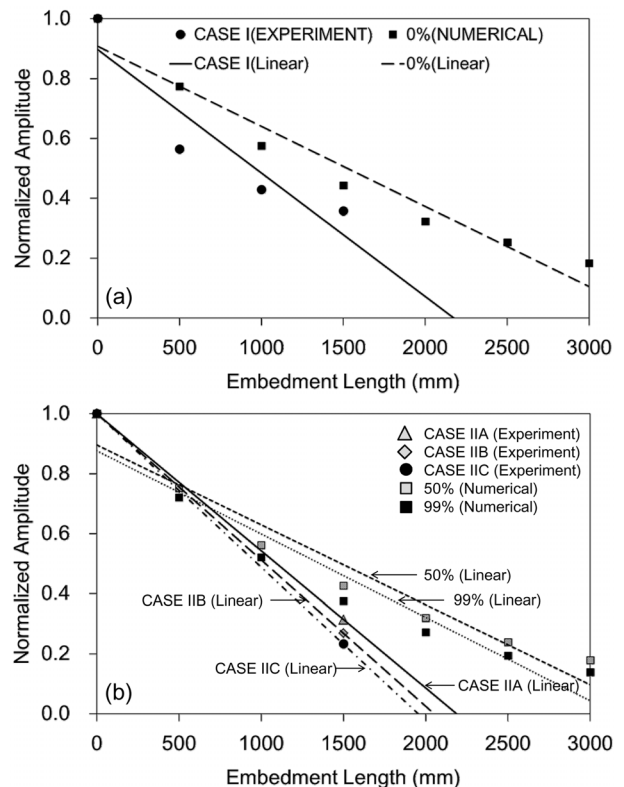


Fig. 10 Linear prediction of normalized amplitude with respect to embedment length: (a) w/o water and (b) w/ water

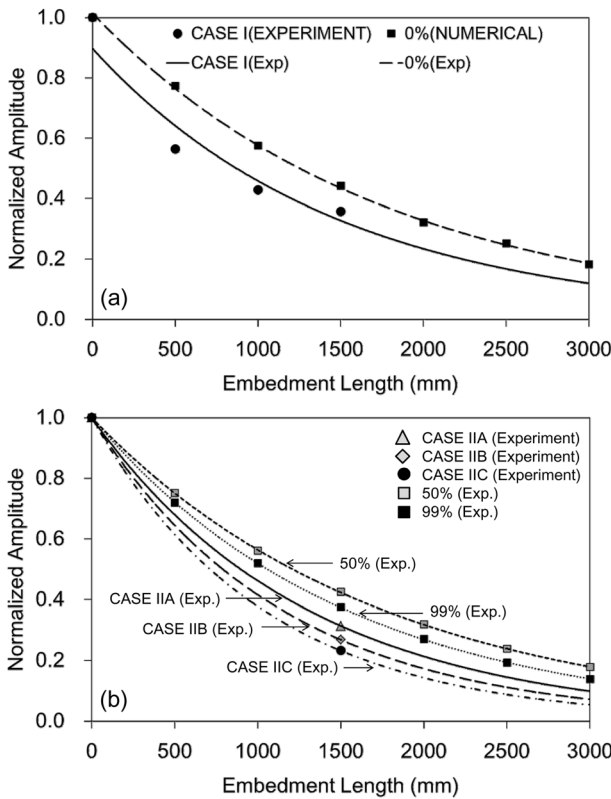


Fig. 11 Exponential normalized amplitude with respect to embedment length: (a) w/o water and (b) w/water

다는 것을 감안할 때 신호강도를 지수적으로 예측하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 수치해석과 모형실험을 통해 매립배관에서 전파되는 유도초음파의 감쇠 또는 신호강도 특성을 분석 및 예측하였다. 이를 위해 포화도를 변수로 하는 지반모델을 이용하여 지반의 음향학적 특성을 결정하고, 수치해석을 통해 내부가 비어있는 매립배관에서 전파되는 축대칭 유도초음파 모드의 감쇠를 계산함으로써 T(0,1)과 L(0,1) 모드보다 상대적으로 낮은 감쇠를 가지는 L(0,2) 모드를 대상 모드로 선정하였다. 여기서 주목할 것은 분산의 관점에서는 T(0,1) 모드가 L(0,2)보다 더 유리하지만 L(0,2) 모드가 T(0,1) 모드보다 감쇠가 적고 그 주파수 영역 또한 넓은 것을 알 수 있다. 즉, L(0,2) 모드가 관심 주파수영역에서 장거리 검사에 유리하다. 지반의 상태에 따른 대상 모드의 감쇠를 관찰하기 위해 매립길이(0, 500, 1000, 1500mm)와 지반이 함유하는 수분 양(0, 10, 20, 30kg)을 실험변수로 선택하였다. 수치해석과 모형실험의 신호강도 변화를 기저신호를 기준으로 정규화하여 분석하였고, 수치해석과 모형실험 결과를 바탕으로 매립길이가 3000mm인 배관에서 전파되는 L(0,2) 모드의 신호강도를 선형 및 지수적으로 예측하였다.

이와 같은 수치해석과 모형실험을 통해 매립길이와 매립토의 수분이 증가하면 L(0,2) 모드의 신호강도가 감소하는 사실을 확

인하였다. 또한, 모형실험이 수치해석보다 신호강도의 감소는 크지만, 지수적으로 예측한 경우 수치해석과 유사한 신호강도 감소 추세를 나타냄을 확인하였다. 이때 실험과 수치해석 결과의 감소 특성 차이는 실험에서의 수분상태와 수치해석에서의 포화도의 정의가 상이하며, 수치해석이 지반을 균질한 탄성재료로 가정한다는 것에 기인한다. 향후 배관의 두께와 직경의 변화가 L(0,2) 모드의 전파특성에 미치는 영향을 수치적으로 실험적으로 검토하고자 한다.

후 기

이 논문은 2010학년도 부경대학교 연구년 교수 지원사업에 의하여 연구되었음(PS-2010-0358).

참 고 문 헌

- Cho, Y., 2001. Understanding and Applications of Ultrasonic Guided Waves. *Journal of the Korean Society for Non-destructive Testing*, 21(4), 446-460.
- Essandoh-Yeddu, J., Gülen G., 2009. Economic Modeling of Carbon Dioxide Integrated Pipeline Network for Enhanced Oil Recovery and Geological Sequestration in the Texas Gulf Coast Region. *Energy Procedia*, 1, 1603-1610.
- Fratta, D., Alshibli, K.A., Tanner, W.M., Roussel, L., 2005. Combined TDR and P-wave Velocity Measurements for the Determination of In Situ Soil Density - Experimental Study. *Geotechnical Testing Journal*, 28(6), 1-11.
- Kwun, H., Holt, A.E., 1995. Feasibility of Under-lagging Corrosion Detection in Steel Pipe using the Magnetostrictive Sensor Technique. *NDT&E International*, 28, 211-214.
- Kwun, H., Kim, S.Y., Choi, M.S., 2004. Torsional Guided -Wave Attenuation in Coal-Tar-Enamel-Coated, Buried Piping. *NDT&E International*, 37, 663-665.
- Lee, J., Na, W.B., Shin, S.W., Kim, J.M., 2010a, Effect of Surrounding Soil Properties on the Attenuation of the First Guided Longitudinal Wave Mode Propagating in Water-filled, Buried Pipes. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 24(4), 32-37.
- Lee, J., Shin, S.W., Na, W.B., 2010b. Attenuation of Longitudinal Fundamental Guided Wave Mode in Steel Pipe Embedded in Soil. *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 30(6), 539-547.
- Long, R., Lowe, M., Cawley, P., 2003. Attenuation Characteristics of the Fundamental Modes That Propagate in Buried Iron Water Pipes. *Ultrasonics*, 41, 509-519.
- Lowe, M.J.S., 1995. Matrix Technique for Modelling Ultrasonic Waves in Multilayered Media. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 42(4), 525-542.
- Na, W.B., Ryu, Y.S., J.T. Kim, 2005. Attenuation of Fun-

- damental Longitudinal Cylindrical Guided Wave Propagating in Liquid-Filled Steel Pipes. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 19(5), 26-33.
- Qian, X., Gray, D.H., Woods, R.D., 1993. Voids and Granulometry : Effects on Shear Modulus of Unsaturated Sands, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 119(2), 295-314.
- Rose, J.L., 2004. *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge University Press.
- Rose, J.L., Li, Z., Avioli, M., Mudge, P.J., 2005. A Natural Focusing Low Frequency Guided Wave Experiment for the Detection of Defects Beyond Elbows. *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, 127, 310-316.
- Silk, M.G., Bainton, K.F., 1979. The Propagation in Metal Tubing of Ultrasonic Wave Modes Equivalent to Lamb Waves. *Ultrasonics*, 17, 11-19.