

지반의 수분 상태에 따른 매립 배관에서의 유도초음파 모드 감쇠 변화

이주원 · 신성우^{*†} · 나원배 · 김영상^{**}

부경대학교 해양공학과 · ^{*}부경대학교 안전공학부 · ^{**}전남대학교 건설환경공학부
(2010. 5. 17. 접수 / 2010. 7. 23. 채택)

Effect of Moisture Conditions in Soils on Mode Attenuation of Guided Waves in Buried Pipes

Juwon Lee · Sung Woo Shin^{†*} · Won-Bae Na · Young-Sang Kim^{**}

Department of Ocean Engineering, Pukyong National University

^{*}Division of Safety Engineering, Pukyong National University

^{**}Division of Civil and Environmental Engineering, Chonnam National University

(Received May 17, 2010 / Accepted July 23, 2010)

Abstract : Recently, many techniques have been developed for the inspection of pipelines using guided waves. However, few researches have been made on the application of those techniques for buried underground pipes. Guided wave motions in the buried pipes are somewhat different from those of on-ground pipes which have traction-free (air) boundary condition on outer pipe walls and thus are strongly affected by the mechanical property of the surrounding soils. Therefore, it should be investigated the effect of soil properties on the guided wave behavior in buried pipe. On the other hand, the mechanical property of soil is largely depending on its moisture conditions nevertheless of other influential factors such as void ratio. In this study, the effect of moisture conditions in soils on mode attenuation of guided waves in the buried pipe is investigated. To this end, numerical study is performed to characterize mode attenuation behavior in buried pipes and the effective mode which is suitable for long range inspection is identified.

Key Words : nondestructive inspection of buried pipes, guided wave, mode attenuation, soil conditions

1. 서론

유도초음파란 체적파가 파동 전파 경로의 양쪽 경계면에서 반사될 경우, 양쪽 경계면의 내부 경로에서 반사파들의 복잡한 중첩과 간섭에 의해서 형성되어 전파되는 독특한 파동을 의미한다¹⁾. 유도초음파의 가장 큰 장점은 전파 경로의 양쪽 경계가 자유 경계인 경우, 파동의 투과 손실이 없기 때문에 장거리를 전파할 수 있다는 것에 있다. 따라서, 배관과 같이 매우 장거리에 걸쳐서 설치되는 구조물을 유도초음파를 이용하여 검사하고자 할 경우에, 한번에 상대적으로 넓은 영역을 검사할 수 있어서 검사의 효율성이 제고된다¹⁾. 이러한 장점으로 인하여, 지상에 설치된 배관의 유지 관리에 유도초음파를 이용하는 다양한 검사 기술들이 개발되었으며, 특히 일부 기술은 실용적으로 사용할 수

있는 장비가 개발되어 실무에서도 이용하고 있다²⁾. 뿐만 아니라, 최근에는 이러한 유도초음파를 지반에 매립된 배관의 비파괴검사에 적용하는 실험적 연구가 수행되었으며, 이로부터 유도초음파 기반의 매립 배관 진단의 가능성이 검토되었다^{3,4)}.

지반에 매립된 배관의 유도초음파 기반의 진단 기술의 개발에 있어서 중요한 것은 지반에 매립된 배관에서의 유도초음파의 거동 특성에 대한 이해가 필요하다는 것이다. 이는 지반에 매립된 배관의 경우 지상 배관에서의 배관 외면 경계(자유 경계)와는 다른 외면 경계(지반 경계)를 가지고 있으며, 이에 따라 유도초음파 거동이 외면 경계인 지반의 특성에 따라서 매우 복잡한 양상이 나타날 수 있기 때문이다. 특히, 외면이 지반으로 둘러 쌓인 경우 파동에너지의 일부가 외부 지반으로 누설(leakage) 되는 현상이 발생하며, 누설되는 정도는 배관과 지반의 역학적 특성에 따라서 달라지게 된다¹⁾. 결과적으로 파동에너지의 누설에 의하여 배관을 따라

[†] To whom correspondence should be addressed.
shinsw@pknu.ac.kr

전파하는 유도초음파는 자유 경계인 경우보다 감쇠가 커지게 되고, 이에 따라 검사 영역의 크기에 대한 제한이 생기게 된다. 그러므로, 유도초음파를 매립 배관의 진단에 효율적으로 적용하기 위해서는, 감쇠가 가장 적게 발생하는 유도초음파 모드를 선택하여 이를 진단에 사용하여야 하며, 이를 위해서는 지반의 특성에 따라 달라지는 에너지 누설 특성, 즉 유도초음파 모드 감쇠 특성에 대한 분석이 이루어져야 한다.

한편, 지반은 고체 부분인 흙입자와 유체 부분인 수분과 공기로 이루어진 다상 재료이며, 지반의 역학적 성질은 특히 수분의 함유 정도에 따라서 매우 다른 양상이 나타나게 된다. 본 연구에서는 수분의 함유 상태에 따라 변화하는 지반의 역학적 특성이 유도초음파에 미치는 영향을 분석하고자 하며, 이를 위해서 다양한 수분 상태에 대한 유도초음파 모드 해석을 수행하고, 이로부터 감쇠가 가장 작게 일어나는 모드를 분석 및 판정하였다.

2. 매립 배관에 대한 유도초음파 모드 감쇠 해석 방법

2.1. 모델링 및 해석 방법

매립된 배관에서의 유도초음파 모드 감쇠 해석을 위해서, 매립된 배관을 Fig. 1과 같이 배관 축 방향으로 무한하고, 배관 내부 층은 진공 상태이며, 배관 양쪽으로 반무한한(half-space) 지반층을 가지는 다층 시스템으로 모델링 하였다.

지표에서의 반사파가 배관에 미치는 영향을 배제하기 위하여 배관의 상부와 하부 지반은 각각 동일한 역학적 성질을 가지는 반무한층으로 가정하였으며, 이는 일반적으로 배관의 매립 깊이가 지표에서 1.5m 정도이고 지반에서 초음파의 감쇠가 매우 크다는 점을 감안한 것이다. 또한 유도초음파 모드 해석임을 감안하여 배관 축 방향으로는 무한한 길이를 가지는 것으로 가정하였고, 배관과 지반의 경계에서는 상대변위가 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 한편, 배관 내부에 물, 석유 등과 같은

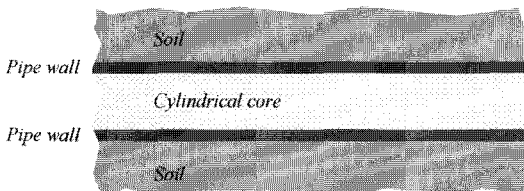


Fig. 1. Modeling of Pipe Buried in Soils.

수송 유체가 가득 차 있는 경우에는 유체의 흐름이 정상 상태인 것으로 가정하고, 배관에서 유체로 전달되는 파동까지 고려할 수 있는 여러 모델이 있으나⁵⁾, 유체를 해석에 포함하면 경우에 따라 유체 모드의 존재로 인하여 해석이 매우 복잡해지게 된다. 뿐만 아니라, 1MHz 이하의 주파수 대역에서는 배관에서의 유도초음파 종파 모드의 감쇠에 유체가 미치는 영향이 매우 낮은 것으로 알려져 있다⁵⁾. 이에 따라 본 연구에서는 유체의 간섭에 의한 영향을 배제하고, 지반의 특성에 대한 영향만을 순수하게 분석하고자 배관 내부를 진공 상태로 가정하였다.

한편, 매립된 배관에서의 유도초음파 모드 감쇠 해석은 다층시스템의 유도초음파 모드 해석법인 전역행렬법을 이용하였으며⁶⁾, 여기에서 전역행렬법을 이용한 모드 해석 방법을 간단히 소개하도록 하겠다. 다층시스템의 유도초음파 모드 해석을 수행하기 위한 전역행렬법은 다층 시스템의 각 층에 대한 파동장(wave field)을 부분파(partial wave) 행렬 방정식으로 구성하고, 각 층마다 구성된 부분파 행렬방정식을 각 계면에서의 경계조건이 만족되도록 조합하여 전체 시스템에 대한 하나의 행렬 방정식(전역행렬 방정식)으로 다음 식과 같이 구성한다.

$$[G]\{A\} = \{0\} \quad (1)$$

여기서 $[G]$ 는 다층시스템에 대한 전역행렬이고, 전역행렬의 열은 각 층의 부분파의 크기에 대응하는 값이며, 각 층의 재료 및 기하학적 특성 등이 반영된 함수이다. 또한 $\{A\}$ 는 각 층에서의 부분파에 대한 벡터이다⁶⁾. 식 (1)을 만족하기 위해서는 전역행렬의 행렬식 값이 "0"이 되어야 하며, 전역행렬의 행렬식 값은 주파수(frequency), 파수(wave number), 감쇠(attenuation)의 함수로 나타난다. 따라서 해를 만족하는 주파수, 파수, 감쇠를 반복 계산에 의해 찾으면, 이로부터 시스템 상에 존재하는 모든 모드에 대한 위상 속도, 군속도, 감쇠 분산 곡선을 구할 수 있게 된다. 본 연구에서는 유도초음파 모드 감쇠 분산 곡선을 구하기 위한 전역행렬의 해는 상용 해석 프로그램인 DISPERSE[®]를 이용하여 구하였다⁷⁾.

2.2. 배관 및 지반 물성

해석에 사용된 배관은 매립 배관으로 많이 사용하는 API 5L-41/2 규격의 강철 배관을 이용하였으며, 사용된 배관의 치수와 물성은 Table 1과 같다⁸⁾.

Table 1. Sizes and Mechanical Properties of Pipe Analyzed

Dimensions		Material Properties		
Outside diameter	Wall thickness	Density	Longitudinal wave velocity	Shear wave velocity
114.3mm	6.4mm	7,932kg/m ³	5,960m/sec	3,260m/sec

지반의 특성은 지반을 구성하는 흙의 종류 및 흙 내부 상태에 따라 매우 다른 특성을 나타내지만, 일반적으로 배관 매립 시공 시에 사질토와 같은 양질의 흙을 매립토로 사용하는 감안하여⁹⁾, 사질토로 이루어진 지반으로 고려하였다. 사질토 지반의 수분 함유 상태(수분 포화도)에 따른 물성은 다음과 같이 앞선 연구의 결과를 바탕으로 결정하였다. Adamo et al.은 지반의 수분 포화도와 체적파 속도의 상관관계에 대하여 연구하였으며¹⁰⁾, 공극비가 일정할 경우에 수분이 불균일하게 포화된 지반에서 수분포화도가 증가할수록 체적 종파 속도는 빠르게 증가하고, 반면에 체적 횡파 속도는 감소한다는 결과를 얻었다. 뿐만 아니라 그들의 연구에서는 공극비의 감소로 지반의 밀도가 증가할 경우에, 포화도가 낮은 지반보다 포화도가 높은 지반의 체적 종파 속도의 증가가 현저함을 보였다. 본 연구에서는 Adamo et al.의 연구 결과를 토대로 지반의 포화도에 따른 물성을 Table 2와 같이 결정하였다.

2.3. 해석 모드

배관과 같은 실린더 형태의 구조물에서 존재하는 유도초음파의 모드에는 종파 모드(Longitudinal Mode), 비틀림 모드(Torsional Mode), 휨 모드(Flexural Mode)가 있으며¹⁾, 일반적으로 유도초음파를 이용한 배관 탐상에서는 초음파의 가진(excitation)과 신호 분석이 다른 모드에 비하여 상대적으로 용이한 축대칭 모드인 종파 모드가 주로 사용된다. 이에 따라 본 연구에서는 유도초음파 기반 배관 탐상에서 많이 사용하는 모드인 축대칭 종파 모드를 해석 대상 모드로 선정하였다.

Table 2. Mechanical Properties of Sandy Soils Analyzed

Cases	Density	Longitudinal wave velocity	Shear wave velocity	Degree of Water Saturation
1	1,900kg/m ³	250m/sec	100m/sec	0%
2	1,900kg/m ³	480m/sec	98m/sec	20%
3	1,900kg/m ³	760m/sec	94m/sec	60%
4	1,900kg/m ³	900m/sec	91m/sec	90%
1b	2,400kg/m ³	600m/sec	240m/sec	0%
4b	2,400kg/m ³	1,215m/sec	123m/sec	90%

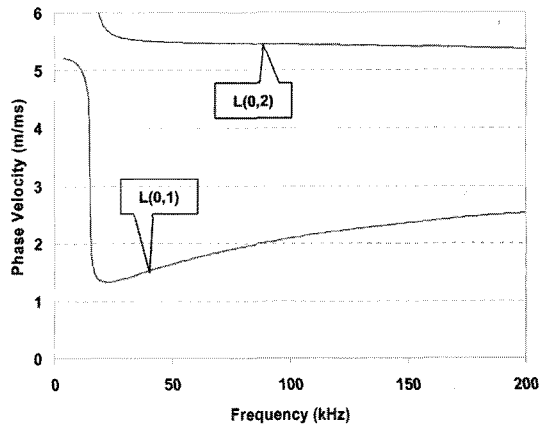


Fig. 2. Typical Result for Phase Velocity Dispersion in Buried Pipe(Case 1).

3. 해석 결과 및 토의

본 연구의 주요한 목적은 매립된 배관에서의 유도초음파 모드 감쇠에 지반의 수분 함유 정도가 미치는 영향에 대한 분석에 있다. 이를 위하여 전역행렬법으로 모델링된 매립 배관에 대한 방정식의 해를 DISPERSE[®]를 이용하여 구하였다. 일반적으로 유도초음파 모드는 주파수 범위가 증가하면 모드의 개수도 증가하며, 따라서 적절한 주파수 범위를 선택하는 것이 모드 해석에서는 중요하다. 배관 진단에서는 유도초음파의 재료감쇠를 고려하여 250kHz보다 낮은 주파수 대역을 주로 사용하고 있다¹⁾. 본 연구에서는 대상이 지반인 점을 고려하여 200kHz까지의 주파수 범위에서 나타나는 유도초음파 모드를 분석 대상으로 고려하였다. Fig. 2에서는 본 연구에서의 전형적인 위상 속도 분산 곡선 결과를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 200kHz의 주파수 범위에서는 L(0, 1)과 L(0, 2) 모드만이 존재하며, 따라서 이 두 모드를 감쇠 분석 모드로 선정하였다.

지반의 수분 포화도가 모드 감쇠에 미치는 영향을 분석하기 위하여 L(0, 1)과 L(0, 2) 모드에 대한 감쇠 해석 결과를 Fig. 3과 4에 각각 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 L(0, 1)과 L(0, 2) 모드의 감쇠 특성이 서로 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히, L(0, 2) 모드는 L(0, 1) 모드에 비하여 매우 낮은 감쇠 값을 보이며, cut-off 주파수부터 130 kHz 부근까지는 포화도의 변화에 의한 감쇠의 변화가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 반면에 L(0, 1) 모드의 경우는 L(0, 2)모드에 비하여 감쇠의 크기가 평균적으로 10배 이상의 값을 가지며, 최대 감

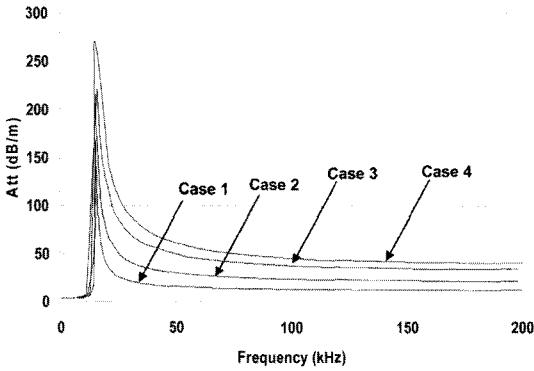


Fig. 3. $L(0, 1)$ Mode Attenuation Results (according to degree of water saturation).

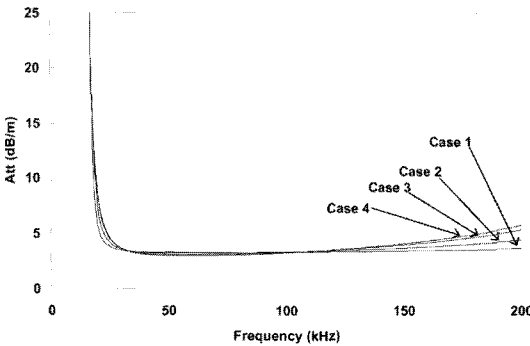
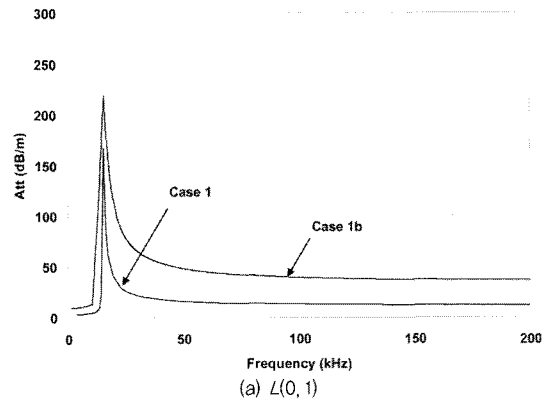


Fig. 4. $L(0, 2)$ Mode Attenuation Results (according to degree of water saturation).

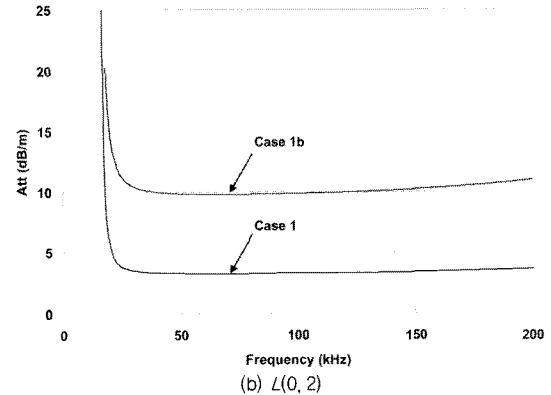
쇠의 크기와 주파수의 위치가 포화도의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. 뿐만 아니라, 최대 감쇠를 나타내는 주파수 보다 큰 주파수 범위에서도 포화도의 증가에 따라 감쇠가 전반적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 한편, $L(0, 1)$ 모드에서 최대 감쇠가 나타나는 주파수 보다 아래의 주파수에서는 $L(0, 2)$ 모드보다 낮은 감쇠를 보이는데, 이는 저주파수 대역에서 $L(0, 1)$ 모드가 배관의 반경 방향으로의 변위가 거의 없는 순수한 확장 (extensional) 모드이기 때문이며, 이러한 결과는 앞선 연구자들의 결과와 잘 일치 한다¹²⁾. 파동에너지가 포화도의 증가에 따라 주변 지반으로 누설이 증가하는 현상은, 배관 경계에서의 파동 투과율이 높아지는 것을 의미하며, 이러한 투과율은 주변 지반의 음향학적 임피던스(acoustical impedance)가 배관의 임피던스에 근접하게 될 때 더 크게 발생하게 된다¹⁾. 이로부터 수분 포화도가 증가할 때, 지반의 임피던스가 증가되고, 이에 따라 유도초음파의 에너지 누설이 증가하는 것이라고 판단할 수 있다. 그러나, 비록 수분포화도의 증가가 전반적으로 유도초음파

의 감쇠를 증가시키지만, 감쇠의 증가 정도는 모드 별로 서로 다르게 나타나므로, 장거리 전파가 가능한 유도초음파 모드의 선택을 위해서는 현장 지반의 물성을 반드시 고려하여야 한다고 볼 수 있다.

한편, 배관 매립 시공 과정에서, 흙 되매우기 작업 후에 지반을 롤러 등으로 다짐을 실시하며, 이때 공극비가 감소하여 지반의 밀도가 증가하게 된다. 본 연구에서는 밀도가 증가된 지반에서 수분포화도가 감쇠에 미치는 영향을 알아보았다. Fig. 5는 수분포화도가 0%인 경우에 밀도의 변화에 따른 $L(0, 1)$ 과 $L(0, 2)$ 모드에 대한 감쇠 해석 결과를 나타내었으며, Fig. 6에서는 수분포화도가 90%인 경우에 밀도의 변화에 따른 $L(0, 1)$ 과 $L(0, 2)$ 모드에 대한 감쇠 해석 결과를 나타내었다. 그림 5에서 알 수 있듯이 $L(0, 1)$ 모드의 경우 지반의 밀도가 증가할 경우에도 감쇠가 증가하는 것을 확인할 수 있으나, 최대 감쇠가 발생하는 주파수의 위치는 변화가 크지 않은 것을 알 수 있다. 또한, 수분포화도가 높을 경우에 밀도의 증가에 의한 감쇠의 증가는 포화도가 낮을 때에 비하여 더 크게 변화하



(a) $L(0, 1)$



(b) $L(0, 2)$

Fig. 5. Effect of Density Increment on Mode Attenuation (0% of water saturation).

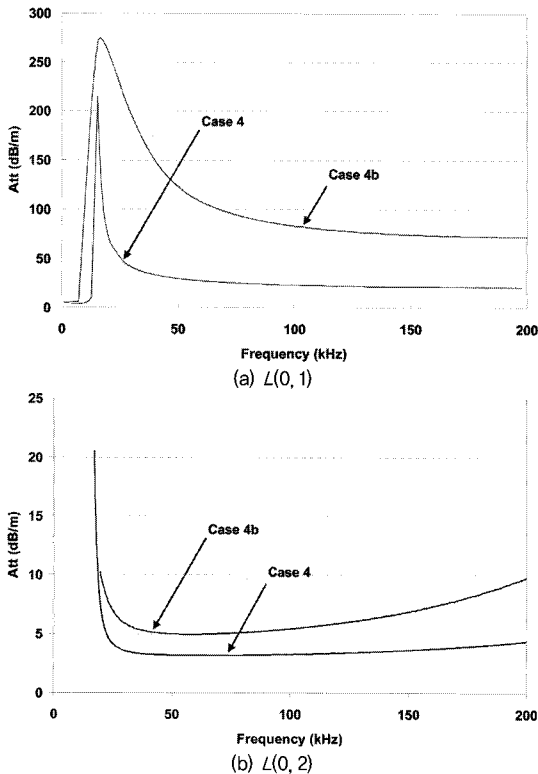


Fig. 6. Effect of Density Increment on Mode Attenuation(90% of water saturation).

는 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 6에서 확인할 수 있듯이, $L(0, 2)$ 모드의 경우는 앞서 수분 포화도의 증가 시에 감쇠의 증가가 거의 없었던 것에 반하여, 밀도가 증가할 때 감쇠가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라, 포화도가 낮을 때 밀도의 증가가 모드 감쇠에 더 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 이로부터, $L(0, 1)$ 모드의 감쇠 거동에서는 수분 포화도와 밀도가 큰 영향을 주지만, $L(0, 2)$ 모드는 수분 포화도 보다는 밀도에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있으며, 밀도 증가에 의한 $L(0, 2)$ 모드의 감쇠 변화가 포화도가 낮을 때 더 민감하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 감쇠의 크기와 변화의 폭이 주변 지반의 상태에 매우 큰 영향을 받는 $L(0, 1)$ 모드보다는, $L(0, 2)$ 모드가 지반에 매립된 배관에 대한 유도초음파 진단에 있어서 더욱 적합한 모드라는 것을 알 수 있다. 마지막으로, 본 연구의 해석 대상인 API 5L-41/2 규격 배관의 경우, 50~100(kHz) 부근의 $L(0, 2)$ 모드가 가장 작은 감쇠를 보이지만, 배관의 직경과 배관 두께가 변화할 경우에는 가장 작은 감쇠를 보이는 주파수 대역이 변화할 수 있기 때문에, 실제 적용 과정에

서는 지반 물성과 배관 직경 및 두께 등을 고려한 해석을 통하여 모드와 주파수 대역을 선택하여야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 수분의 함유 상태에 따른 지반의 역학적 특성이 매립된 배관에서의 유도초음파에 미치는 영향을 분석하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다. 200kHz 까지의 주파수 범위에서는 두 개의 축대칭 종파 모드인 $L(0, 1)$ 과 $L(0, 2)$ 모드가 있으며, 이들의 감쇠 특성은 지반의 특성에 따라 서로 다른 거동 양상이 나타난다. 지반의 수분 포화도가 증가할 경우에 $L(0, 2)$ 모드는 $L(0, 1)$ 모드에 비하여 매우 낮은 감쇠 값을 보이며, cut-off 주파수부터 130kHz 부근까지는 포화도의 변화에 의한 감쇠의 변화가 거의 없다는 것을 알 수 있었다. 반면에 $L(0, 1)$ 모드의 경우는 $L(0, 2)$ 모드에 비하여 감쇠의 크기가 평균적으로 10배 이상의 값을 가지며, 최대 감쇠의 크기와 주파수의 위치가 포화도의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. 뿐만 아니라, 최대 감쇠를 나타내는 주파수 보다 큰 주파수 범위에서도 포화도의 증가에 따라 감쇠가 전반적으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한, $L(0, 1)$ 모드의 경우 수분포화도가 높을 경우에 밀도의 증가에 의한 감쇠의 증가는 포화도가 낮을 때에 비하여 더 크게 변화하는 것을 알 수 있었으며, $L(0, 2)$ 모드의 경우는 수분 포화도의 증가 시에 감쇠의 증가가 거의 없었던 것에 반하여, 밀도가 증가할 때 감쇠가 증가하는 것을 알 수 있었다. 마지막으로, 감쇠의 크기와 변화의 폭이 주변 지반의 상태에 매우 큰 영향을 받는 $L(0, 1)$ 모드보다는 $L(0, 2)$ 모드가 지반에 매립된 배관에 대한 유도초음파 진단에 있어서 적합한 모드라는 것을 알 수 있었다.

감사의 글 : 본 연구는 지식경제부 지정 전남대학교 중화학설비안전진단센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- 1) Rose, J.L., Ultrasonic Waves in Solid Media, Cambridge University Press, 2004.
- 2) Rose, J.L., "A Baseline and Vision of Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 124, No. 3, pp. 273~283,

- 2002.
- 3) Kwon, H., Kim, S.Y., Choi, M.S., Walker, S.M., "Torsional guided-wave attenuation in coal-tar-enamel-coated, buried piping", *NDT & E International*, Vol. 37, No. 8, pp. 663~665, 2004.
 - 4) Demma, A., Alleyne, D., Pavlakovic, B., "Testing of Buried Pipelines Using Guided Waves", *Proceedings of 3rd Middle East Nondestructive Testing Conference and Exhibition*, 27-30 Nov. 2005, Bahrain, Manama, 2005.
 - 5) Na, W.B., Yoon, H.S., "Wave-attenuation Estimation in Fluid-Filled Steel Pipes : The First Longitudinal Guided Wave Mode", *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 43, No. 8, pp. 549~554, 2007.
 - 6) Lowe, M.J.S. "Matrix Technique for Modelling Ultrasonic Waves in Multilayered Media", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 42(4), pp. 525~542, 1995.
 - 7) Pavlakovic, B., Lowe, M.J.S., *DISPERSE USER MANUAL : A system for generating dispersion curves*, Department of Mechanical Engineering, Imperial College, University of London, 2003.
 - 8) *ANSI/API Spec 5L : Specification for Line Pipe*, American Petroleum Institute, 2007.
 - 9) Monahan, E.J., *Construction of Fills : 2nd Edition*, John Wiley and Sons, 1994.
 - 10) Adamo, F., Attivissimo, F., Fabbiano, L., Giaquinto, N., Spadavecchia, M., "Soil Moisture Assessment by Means of Compressional and Shear Wave Velocities: Theoretical Analysis and Experimental Setup", *Measurement*, Vol. 43(3), pp. 344~352, 2010.
 - 11) Lowe, M.J.S., Alleyne, D., Cawley, P., "Defect Detection in Pipes Using Guided Waves", *Ultrasonics*, Vol. 36(1), pp. 147~154, 1997.
 - 12) Long, R., Cawley, P., Lowe, M.J.S., "Acoustic Wave Propagation in Buried Iron Water Pipes", *Proceedings of the Royal Society A*, Vol. 459 (2039), pp. 2749~2770, 2003.