

# 지하매설 유체함입 강파이프의 감쇠특성 규명 Attenuation Characteristics of the Buried Steel Water Pipes

박경조 · 강우석 · 김이곤  
K. J. Park, W. S. Kang and Y. G. Kim

(접수일 : 2008년 11월 6일, 수정일 : 2008년 12월 9일, 채택확정 : 2008년 12월 12일)

**Key Words** : Guided Waves(유도파), Buried Water Pipes(매립 유체함입 파이프), Leak Detection(누설탐지), Attenuation Characteristics(감쇠특성)

**Abstract** : The attenuation of the fundamental non-torsional modes that propagate down buried steel water pipes has been studied. The mode shapes, mode attenuation due to leakage into the surrounding medium and the scattering of the modes as they interact with pipe joints and fittings have been investigated. In the low frequency region the mode predicted to dominate over significant propagation distances approximates a plane wave in the water within pipe. The established acoustic technique used to locate leaks in buried steel water pipes assumes that leak noise propagates as a single non-dispersive mode at a velocity related to the low frequency asymptote of this water borne mode.

## 1. 서 론

지하에 매설된 수도관이나 송유관에서의 누설문제는 관련 업체에서 가장 시급하게 해결해야 할 문제로 대두되어 왔다. 누설문제는 누설되는 파이프를 재배치하거나 수리함으로써 해결할 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해 현재 널리 사용되는 방법은 Fuchs와 Riehle1)의 논문에 자세히 설명되어 있는데, 즉 파이프 상의 두 곳에 가속도계를 설치하여 누설잡음(leakage noise)을 모니터링하고 두 신호 사이의 시간차 상관관계로부터 누설되는 위치를 파악하는 방법이다(Fig. 1 참조).

위에서 설명한 누설탐지방법은 잡음이 단일, 비분산(non-dispersive) 유도파(guided wave) 형태로 전파되며 이때의 속도는 분산성을 갖는 수인성 모드(water borne mode)에 점근하는(asymptotic) 주파수와 관련이 있다고 가정한다. 그러나 두 개 이상의 모드가 전파되고 관심 주파수범위에서 분산성이 존재하면 누설위치 계산결과가 부정확해지는 단점이 있다. 즉 신호의 분산성을 고려하지 않으면

명확한 피크 값을 구별할 수 없고 이에 따라 상관함수(correlation function)가 오손되는 결과가 발생한다.

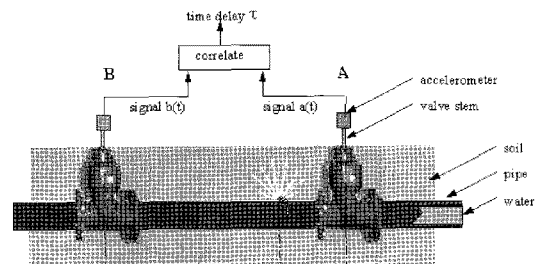


Fig. 1 Water leak detection system

따라서 지하에 매설된 유체함입 파이프를 따라 누설잡음이 전파되는 특성을 규명하고 파동전파 시 어떤 모드가 존재하는가를 살펴보는 것은 누설위치를 탐지하는데 매우 중요하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 기본모드 전파 시 파이프를 둘러싼 토양으로 에너지가 누설될 때 나타나는 감쇠(attenuation) 특성을 살펴보고 파이프의 조인트와 피팅(fitting)에서의 모드산란(mode scattering)에 대해서도 조사하고자 한다. 조사결과는 파이프가 묻혀 있는 외부 매체의 음향특성에 따라 존재여부가 결정되는 모드의 예측 및 해당모드의 전파가능 거리를 계산하는데 유용한 정보를 제공할 것이다.

박경조(책임저자) : 전남대학교 기계자동차공학부  
E-mail : kjpark40@chonnam.ac.kr, Tel : 061-659-3221  
강우석 : 전남대학교 기계자동차공학부  
김이곤 : 전남대학교 전기·전자통신·컴퓨터공학부

## 2. 유체함입 파이프의 기본모드

파이프의 축방향으로 전파될 수 있는 유도파에는 세 가지 종류가 있다. 즉, 종파(longitudinal wave), 비틀림파(torsional wave), 휨파(flexural wave)가 있다. 각 모드의 특성을 결정하는 인자는 주파수, 위상속도(phase velocity) 그리고 감쇠이다. Long 등<sup>2)</sup>은 지하에 매설된 강파이프를 따라 전파되는 모드 중 축대칭 종파 모드의 특성을 규명하였는데, 그 중에서도 특히 위상속도의 특성에 대해 자세히 조사하였다. 본 논문에서는 이를 확장하여 축대칭, 비축대칭(휨) 모드의 특성을 조사하고 특히 감쇠특성 규명에 초점을 맞추고자 한다.

본 논문에서 제시하는 분산선도(dispersion curve) 결과는 영국 Imperial College에서 개발한 파동해석 소프트웨어인 Disperse<sup>®</sup>를 이용하여 구하였다<sup>3-5)</sup>. 이 프로그램은 유체가 함입되어 있거나 지하에 매설되어 있는 파이프의 유도파 특성을 자세하게 살펴볼 수 있는 매우 강력한 프로그램으로 알려져 있다. 위상속도와 감쇠 분산선도는 주파수-반경의 함수로 표시하는데 여기서 반경은 파이프의 보어반경(bore)을 의미한다. 파이프 두께에 대한 보어반경의 비가 일정하면 임의의 보어반경을 주파수-반경 축 상에 표시할 수 있다. 그러나 실제로 파이프 두께의 증가율은 보어반경의 증가율보다 낮기 때문에 두께에 대한 파이프 보어반경의 비는 증가하는 경향을 보인다. 보어반경이 결정되어 있을 경우 파이프 두께의 변화가 위상속도에 미치는 작지만 감쇠에 미치는 영향은 큰데 그 이유는 파동에너지의 누설 때문이다. 이를 정확하게 표현하기 위해 감쇠 분산선도 작성 시 세로축은 단위 전파거리 당 손실과 두께의 곱(dB-mm/m)으로, 가로축은 주파수-반경의 곱(MHz-mm)으로 표시하였다. 대상 파이프는 보어직경 152 mm, 두께 8 mm인 덕타일 주철(ductile cast iron) 파이프인데 자세한 재료특성은 Table 1에 보인 바와 같다.

Table 1 Material properties used for dispersion curve predictions

Material	Density $\rho(\text{kg/m}^3)$	$C_L(\text{m/s})$	$C_S(\text{m/s})$
Water	100	1,480	0
Ductile iron pipe	7,100	5,500	3,050
Saturated soil	1,000	1,500	25~100
Unsaturated soil	1,900	250~1,250	100

공기 중에 놓여있고 내부에 유체가 차있지 않은 파이프(v-p-v)의 위상속도 분산선도는 Fig. 2에 보인 바와 같다. Silk와 Bainton<sup>6)</sup>의 표기방법에 따라 기본 축대칭 모드는 L(0,1)로, 기본 비축대칭 모드는 F(1,1)로 표시하였다. 저주파수에서 L(0,1), F(1,1) 모드는 파이프 벽에서 각각 축방향, 반경방향 변위가 우세하게 나타나는 모드이다. 이 모드들의 오른쪽 즉 주파수-반경이 증가하는 쪽에는 무한개의 유도파 모드들이 존재하는데 그림에는 L(0,2), F(1,2), F(1,3) 모드만 나타내었다. 이 모드들과 저주파수에서 나타나지 않는 모드들은 논문의 고려대상에서 제외하고자 한다.

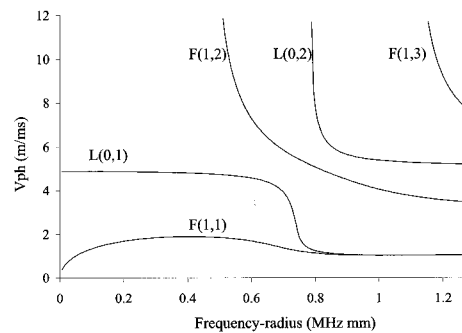


Fig. 2 Phase velocity dispersion curve for v-p-v

공기 중에 놓여있는 파이프에 유체가 차있을 경우(w-p-v), Fig. 3에 나타난 유도파 모드들은 (v-p-v)의 경우와 유사하다. 그렇지만 (v-p-v)시스템에서 나타나지 않았던 새로운 모드가 나타나는 것을 알 수 있는데 Aristegui 등<sup>7)</sup>은 이 모드를  $\alpha$ 모드라 명명하였다. Fig. 3에서 점선은  $\alpha$ 모드의 저주파수 점근선( $V_{NDLN}$ )을 나타내는데 속도  $V_{NDLN}$ 은 Pinnington과 Briscoe<sup>8)</sup>가 유도한 비분산 누설잡음 속도에 해당된다.

$$V_{NDLN} = \frac{C_L}{\left[1 + \frac{B\nu a}{Eh} \text{RIGHT}\right]} \quad (1)$$

여기서  $C_L$ 은 유체의 종방향 입체파 속도(bulk velocity)이고  $B$ 는 유체의 벌크 탄성계수(bulk modulus),  $E$ 와  $\nu$ 는 파이프 구성 재료의 영계수와 포와송비이다.  $a$ 는 파이프의 내경이고  $h$ 는 파이프의 두께이다.

(w-p-v)시스템의 저주파수 근방에서의 F(1,1), L(0,1),  $\alpha$ 모드의 모드형상(mode shape)을 Fig. 4(a), (b), (c)에 나타내었다. F(1,1) 모드는 축방향 변위는

매우 작고 유체와 파이프 벽면에서의 반경방향 변위는 일정하게 나타나는 것을 알 수 있다. L(0,1) 모드와  $\alpha$ 모드는 축방향 변위가 우세하게 나타나는데, L(0,1) 모드는 파이프 벽면에서,  $\alpha$ 모드는 유체 내에서 축방향 변위가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 두 모드 모두 저주파수에서 반경방향 변위는 작다.

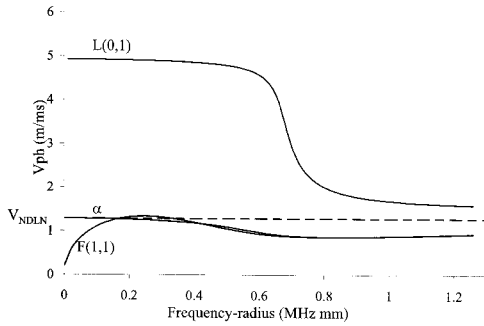


Fig. 3 Phase velocity dispersion curve for w-p-v

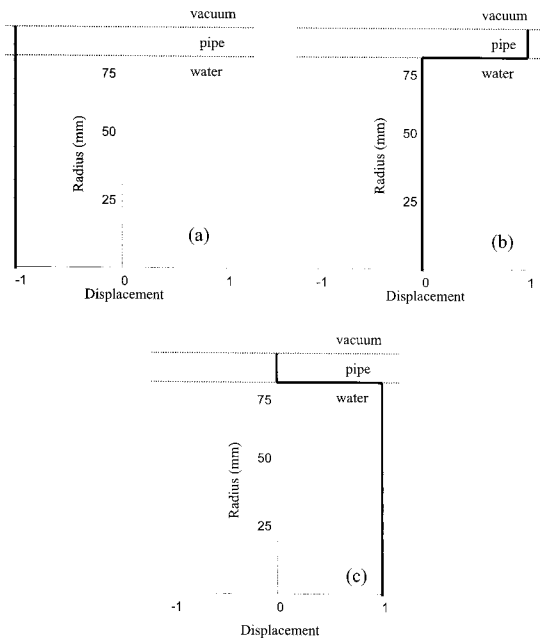


Fig. 4 Mode shapes for dispersion curves in Fig.2 at near-zero frequency (a) F(1,1), (b) L(0,1), (c)  $\alpha$

### 3. 모드 감쇠

전파되는 누설잡음의 수신 대역폭은 입력신호, 누설에 의한 감쇠, 재료손실에 따른 감쇠, 파이프 조인트와 피팅에서의 파동산란에 의한 손실에 따라 달라진다. 본 장에서는 주변매질로 모드에너지가 누설됨에 따라 나타나는 기본 모드들의 감쇠를 먼저 살펴보고, 다음으로 파이프 조인트와 피팅에서의 모

드감쇠를 조사하고자 한다.

### 3.1 누설

(w-p-v)시스템의 경우 모드 전파특성은 파이프의 구조와 재료특성에 따라 달라지고 파이프가 탄성이면 감쇠가 존재하지 않는다. 그러나 이 시스템이 토양 속에 묻히게 되면(w-p-s) 감쇠가 존재하게 되고 이때 파이프의 외부 표면에서 발생하는 전파모드의 변위특성이 중요한 인자로 작용하게 된다. 즉 유도파의 위상속도가 주변매질의 입체파 속도보다 크면 이러한 변위들이 주변매질의 입체파를 가진하게 된다. 가진된 입체파는 Snell의 법칙으로부터 구한 특성 누설각(characteristic leakage angle)에서 파이프의 에너지를 토양으로 전달하게 되고 이로 인해 감쇠가 발생하게 된다.

반경방향 변위는 입체 전단파(bulk shear wave)가 아닌 종방향 입체파와 주로 관련이 있다. 마찬가지로 파이프 표면의 축방향 변위는 토양의 입체 전단파를 주로 가진하게 된다. 특정 모드의 에너지 누설량은 파이프와 주변매질의 재료특성에 따라 달라지고 주파수-반경의 함수가 된다. 모드의 위상속도가 주변매질의 어떤 입체파 속도보다 낮다면 누설각은 허수가 되어 파이프로부터의 에너지누설은 나타나지 않는다. Disperse를 이용하여 (w-p-s)시스템의 분산선도를 구하기 위해 파이프를 세 개의 층으로 모델링 하였는데 안쪽의 층은 유체, 중간층은 파이프, 바깥층은 주변매질로 구성하였고 바깥쪽 층의 두께는 무한대로 가정하였다.

먼저 유체 중에 놓여있는 유체함입 파이프(w-p-w)를 고려해 보자. 이 시스템은 유체의 특성에 의해 주변매질로 전단파가 전파되지 않는 특성을 갖는다. (w-p-w)시스템의 위상속도 분산선도를 Fig. 5에 나타내었다. F(1,1) 모드와  $\alpha$ 모드의 위상속도 특성은 (w-p-v)시스템과 유사한 것을 알 수 있다. L(0,1) 모드는 저주파수에서는 (w-p-v)와 유사하지만 고주파수-반경에서는 Fig.2에 보인 (v-p-v)시스템의 L(0,2) 모드의 곡선을 따라가는 것을 알 수 있다.

Fig. 6(a), (b), (c)에는 0.4 Mhz-mm 주파수-반경(152 mm 보어직경의 경우 5.3 kHz)에서 F(1,1), L(0,1),  $\alpha$ 모드의 모드형상을 나타내었다. 이 주파수에서 L(0,1)모드의 모드형상은 요동하는(oscillatory) 특성을 나타내고, 따라서 누설모드라는 것을 알 수 있기 때문에 조사대상 주파수로 선정하였다. 모드의 위상속도

가 주변매질의 입체파 속도  $C_L$ 보다 낮으면 Snell의 법칙으로부터 구한 특성 누설각이 허수가 된다. 고려대상 시스템의 경우 F(1,1) 모드와  $\alpha$ 모드가 이에 해당되는데 이 모드들은 파이프를 따라 진행하는 파동을 생성하지 못하고 에너지가 시스템 내에 갇히게 되어 변위가 지수적으로 감소하는 특성을 갖게 된다.

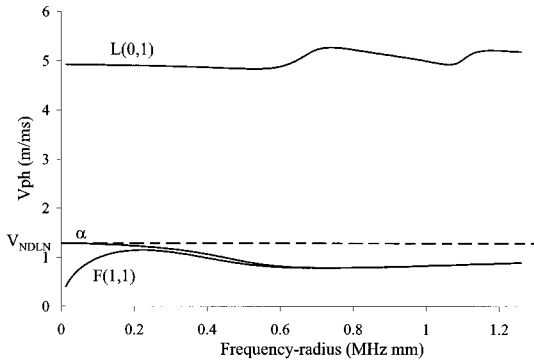


Fig. 5 Phase velocity dispersion curve for w-p-w

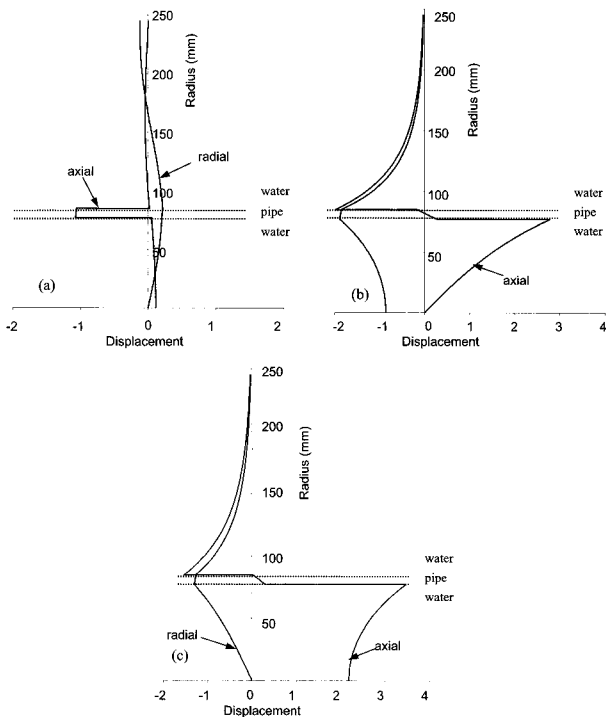


Fig. 6 Mode shapes for dispersion curves in Fig. 5 at 0.4MHz-mm (a) F(1,1), (b) L(0,1), (c)  $\alpha$

다음으로 전단속도가 분산선도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 유체함입 파이프가 토양으로 둘러싸여있는 경우(w-p-s<sub>s</sub>)를 고려해보자. 토양의  $C_s$ 는 작다고 가정한다. 이 경우 속도의 분산성에 미치는 영향은 무시할 수 있을 만큼 작지만 전단파가 주변

매질로 누설되기 때문에 감쇠에 미치는 영향은 크다. 먼저 토양의 종방향 속도가  $\alpha$ 모드의 저주파수 점근속도보다 클 경우( $C_{Lsoil} > V_{NDLN}$ )를 고려해보자. 주변매질의 밀도와 종방향 속도는 물과 마찬가지로  $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_L=1500 \text{ m/s}$ 로 모델링 하였고 전단파 속도  $C_s$ 만 25 %에서 100 %로 변화시켰다. 이와 같은 특성을 갖는 매질로는 고�령토(kaolin)나 점토슬러리(clay slurry)와 같은 포화토양(saturated soil)이 대표적이다.

(w-p-s<sub>s</sub>)시스템에 대한 감쇠 분산선도를 Fig. 7에 제시하였는데 그림에서 세로축은 감쇠(dB/m)와 파이프 두께(mm)의 곱으로 나타내었다. 세 모드 전체에서 나타나는 피크 값들은 공진현상과 관련이 있는데 이 주파수에서 파이프로부터 주변매질로 전달되는 에너지가 최대가 된다. (w-p-v)시스템의 경우 이러한 공진주파수는 높은 차단주파수(cut-off frequency)에서 발생한다. 주파수-반경이 작을 때의 L(0,1) 모드의 감쇠는 토양의 전단속도의 크기에 의해 좌우된다. 이는 파이프 외부표면의 축방향 변위가 주변매질의 입체 전단파를 가진하기 때문이다.

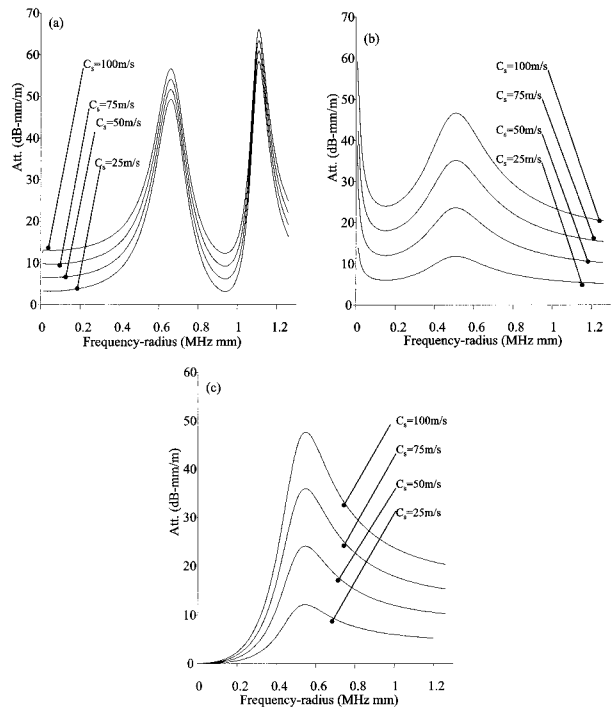


Fig. 7 Variation of attenuation for (w-p-ss) (a) L(0,1), (b) F(1,1), (c)  $\alpha$

감쇠 분산선도로부터 F(1,1) 모드와  $\alpha$ 모드는 누설 전단파와 연성되는 특성을 가지지만 누설 종파와는 연성되지 않는다는 사실을 확인할 수 있다. 이는

두 모드의 위상속도가 외부매질의 입체 종파의 속도보다 낮기 때문이다. 세 모드 중 저주파수에서  $\alpha$  모드의 감쇠가 가장 적는데 그 이유는  $\alpha$ 모드가 수인성 모드이고 따라서 주변매질과 에너지가 연성되지 않는 특성을 갖기 때문이다. 이로부터 파동의 장거리전파 시 가장 주요하게 나타나는 모드는  $\alpha$ 모드이고 F(1,1) 모드와 L(0,1) 모드는 높은 감쇠로 인해 파동 전파거리가 짧을 것이라는 것을 예측할 수 있다.

다음으로 토양의 종방향 속도가  $V_{NDLN}$ 보다 작은 경우( $C_{Lsoil} < V_{NDLN}$ )를 고려해보자. 주변매질의 전단속도는  $C_s=100$  m/s로, 밀도는  $\rho=1900$  kg/m<sup>3</sup>로 설정하였고, 종방향 속도  $C_L$ 을 250 m/s에서 1250 m/s로 변화시켰다. 이러한 특성을 갖는 매질로는 지표면 아래 1 m 깊이에 주로 존재하는 점토나 모래와 같은 비포화토양(unsaturated soil)이 대표적이다 (w-p-s<sub>u</sub>). 이 시스템에 대한 감쇠 분산선도를 Fig. 8에 제시하였다. Fig. 8의 감쇠 크기가 Fig. 7의 크기와 매우 다른 점을 주목할 필요가 있다. Fig. 8의 (a), (b), (c)의 감쇠 크기도 각각 다르다. 그림에서 주파수-반경 곱이 작을 때 L(0,1) 모드의 감쇠는  $C_L$ 의 변화에 크게 영향을 받지 않는데 이로부터 L(0,1) 모드의 누설되는 양은 토양의  $C_s$ 에 주로 지배된다는 것을 알 수 있다.

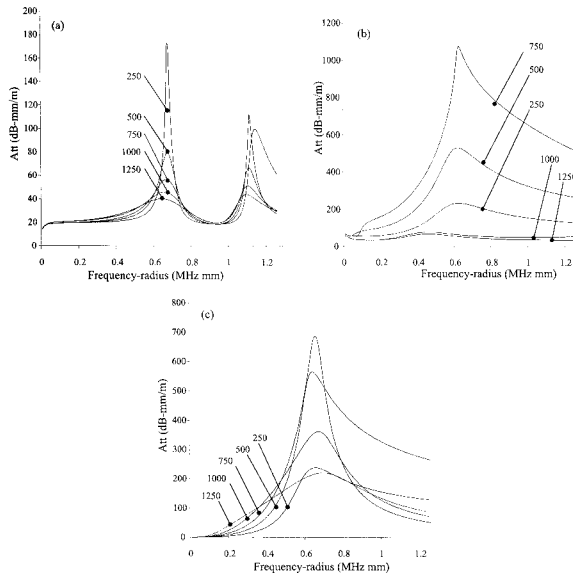


Fig. 8 Variation of attenuation for (w-p-su) (a) L(0,1), (b) F(1,1), (c)  $\alpha$

토양의  $C_L$ 이 F(1,1) 모드의 위상속도보다 크면 F(1,1) 모드는 누설 전단파와만 연성되고 따라서 (w-p-s<sub>u</sub>)시스템의 F(1,1) 모드 감쇠특성은

(w-p-s<sub>s</sub>)와 유사하다는 것을 알 수 있다. 반대로 F(1,1) 모드의 위상속도가 더 크면 F(1,1) 모드가 누설 종파와 연성되고 따라서 감쇠가 급격하게 증가하게 된다. (w-p-s<sub>u</sub>)시스템의  $\alpha$ 모드 감쇠는 (w-p-s<sub>s</sub>)시스템에 비해 급격하게 증가하는데 그 이유는 토양의  $C_L$ 이  $\alpha$ 모드의 위상속도보다 커지게 되어 모드가 누설 종파, 전단파 모두와 연성되기 때문이다.

### 3.2 산란

누설에 의한 감쇠해석으로부터 장거리전파 시 가장 우세하게 나타나는 모드는  $\alpha$ 모드임을 확인하였다. 즉 모든 토양에 대해 누설에 의한 감쇠가 가장 적기 때문에 가장 장거리를 전파할 수 있는 모드임을 알 수 있다. 그러나 산업현장에 설치되어 있는 파이프들은 매 3~10 m마다 조인트로 연결되어 있고 다른 파이프로 분리되는 곳에는 T자관이 설치되어 있고, 중간에 파이프가 굽어진 곳도 있으며 여러 가지 벨브들이 파이프에 장착되어 있다. 모드가 이와 같은 조인트나 피팅을 만나게 되면 산란에 의해 감쇠가 발생하게 된다. 본 절에서는 이에 의한 영향을 살펴보고자 한다.

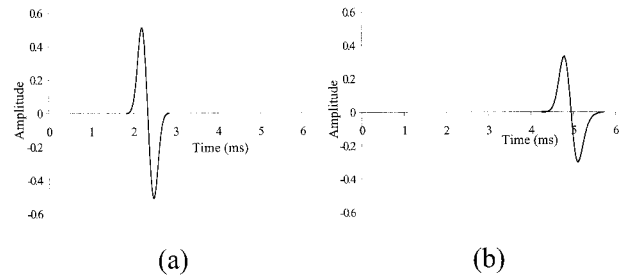


Fig. 9 L(0,1) mode propagation signal (a) 6m before joint, (b) 6m after joint

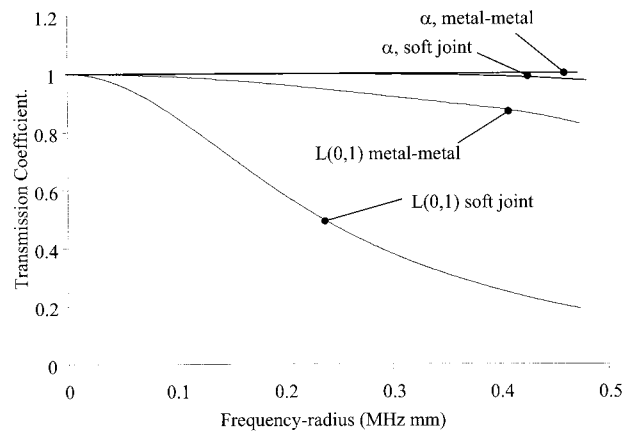


Fig. 10 Transmission coefficient for propagation across a pipe joint

유체가 함입되어 있는 파이프의 한쪽 끝단에서 1 사이클 톤버스트(tone-burst) 신호를 입사하였을 때 조인트 전후에서의 파동특성을 조사하였다. 입사신호는 L(0,1) 모드와  $\alpha$ 모드로 선정하였다. Fig. 9(a), (b)에 조인트 6 m 전과 6 m 후에서의 전파신호를 나타내었다. 조인트를 지난 후에 수신한 신호를 변환하여 조인트에서의 전달계수(transmission coefficient)를 계산하였다. 각 모드에 대한 전달계수는 Fig. 10에 보인 바와 같다. L(0,1) 모드의 경우 유연조인트(soft joint)를 지날 때와 금속-금속(metal-metal)조인트를 지날 때의 손실이 크게 차이가 나는 것을 알 수 있는데 이는 금속-금속 조인트에 비해 유연조인트의 구조적 불연속성이 크기 때문이다. 수인성 모드인  $\alpha$ 모드의 손실은 L(0,1) 모드에 비해 무시할 수 있을 만큼 작고 따라서 누설해석에서 확인하였던  $\alpha$ 모드의 장거리전파 가능성은 변하지 않았음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 지하에 매설된 유체함입 파이프를 따라 전파되는 기본모드의 감쇠특성에 대해 조사하였다. 모드형상과 누설 및 파이프 조인트, 피팅에서의 산란에 의한 모드 감쇠해석으로부터 가장 장거리를 전파할 수 있는 모드를 선정하는 방법에 대해서도 살펴보았다.

L(0,1) 모드의 위상속도는 항상 토양의 입체 종방향 속도( $C_L$ )보다 크기 때문에 누설에 의한 감쇠가 크게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 이 모드는 파이프 조인트나 피팅에서의 파동산란에 의한 에너지 손실도 크다는 것을 알 수 있었다. F(1,1) 모드의 감쇠도 크게 나타났는데 특히 위상속도가 토양의  $C_L$ 보다 높을 경우 감쇠의 증가폭이 커지는 것을 알 수 있었다. 이 두 모드에 비해  $\alpha$ 모드는 저주파수에서의 감쇠도 적고 파이프 조인트나 피팅에 의한 산란에도 크게 영향을 받지 않는다는 사실을 확인할 수 있었다. 따라서 유도파를 이용하여 지하에 매설된 유체함입 파이프검사를 수행할 경우  $\alpha$ 모드로 가진하면 가장 장거리를 전파할 수 있고 따라서 검사시간 및 비용 등을 절감할 수 있음을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

이 연구는 2008년도 한국산업기술재단 지역혁신

인력양성사업의 일부 지원에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

#### 참 고 문 헌

1. H. V. Fuchs and R. Riehle, 1991, "Ten Years of Experience with Leak Detection by Acoustic Signal Analysis", Applied Acoustics, Vol. 33, pp. 1~19.
2. R. Long, M. J. S. Lowe and P. Cawley, 2003, "Acoustic Wave Propagation in Buried Iron Water Pipes", Proceedings of Royal Society, London, pp. 351~356.
3. M. J. S. Lowe, 1995, "Matrix Techniques for Modelling Ultrasonic Waves in Multi-layered Media", IEEE Trans. Ultras., Ferroel. and Freq. Ctrl., Vol. 42, pp. 525~542.
4. B. N. Pavlakovic, M. J. S. Lowe and P. Cawley, 1997, "DISPERSE: A General Purpose Program for Creating Dispersion Curves", Review of the Progress in Quantitative NDE, Vol. 16A, pp. 185~192.
5. B. N. Pavlakovic and M. J. S. Lowe and P. Cawley, 1999, "A General Purpose Approach to Calculating the Longitudinal and Flexural Modes of Multi-layered, Embedded, Transversely Isotropic Cylinders", Review of the Progress in Quantitative NDE, Vol. 18A, pp. 239~246.
6. M. G. Silk and K. F. Bainton, 1979, "The Propagation in Metal Tubing of Ultrasonic Modes Equivalent to Lamb Waves", Ultrasonics, Vol. 17, No. 1, pp. 11~19.
7. C. Aristegui, P. Cawley and M. Lowe, 1999, "Guided Waves in Fluid-Filled Pipes Surrounded by Different Fluids", Review of the Progress in Quantitative NDE, Vol. 18A, pp. 159~166.
8. R. J. Pinnington and A. R. Briscoe, 1994, "Externally Applied Sensor for Axisymmetric Waves in a Fluid-Filled Pipe", Journal of Sound and Vibration, Vol. 73, No. 4, pp. 503~516.
9. 박경조, 2006, "매립된 유체함입 강파이프의 파

동전파 특성규명”, 한국동력기계공학회지, 제10권, 제1호, pp. 65~70.

10. J. L. Rose, 1999, "Ultrasonic Waves in Solid Media", Cambridge University Press, U.K.
11. 이정환, 구동식, 최병근, 2008, "배관에 의한 구조진동 진단 및 대책", 한국동력기계공학회지, 제12권, 제2호, pp. 23~28.