

## 스케일이 있는 급수관내의 유도초음파의 전파 특성에 관한 연구

### A Study of the Guided Wave Propagation in the Water Supplying Pipes with Scale

송성진\*, 김영환\*<sup>†</sup>, 이동훈\*, 이현동\*\*, 배철호\*\*, 박정훈\*\*

Sung-Jin Song\*, Young H. Kim\*<sup>†</sup>, Dong-Hoon Lee\*, Hyun-Dong Lee\*\*,  
 Cheol-Ho Bae\*\* and Jung-Hoon Park\*\*

**초 록** 배관 내의 스케일은 통수비를 감소시키므로 배관을 적절히 관리하기 위해서는 스케일량에 대한 정량적인 평가가 필수적이다. 상수도 급수관내의 스케일량을 평가하기 위해서 유도초음파를 사용하였다. 가변각 웨지를 사용하여 유도 초음파의 여러 모드를 발생시키고, 노후 배관을 따라서 전파하는 특성을 분석하였다. 실험적으로 관내의 스케일이 증가함에 따라서  $f \times d = 1.5 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 인 경우에 F(M,2) 모드들의 진폭이 크게 감소하는 것을 알 수 있었다. 본 연구의 결과로 상수도 급수관의 스케일량 평가에 적합한 유도 초음파는 F(M,2) 모드들임을 알 수 있었다.

**주요용어:** 유도초음파, 스케일탐지, 분산선도, 위상속도, 군속도, 급수관

**Abstract** Since the scale in pipes reduces the flow rate, a quantitative evaluation of the scale is essential for the proper maintenance of pipes. Guided waves were employed to estimate the amount of scale in water supplying pipes. Using variable angle wedge, several modes of guided waves were generated and their propagation characteristics along the pipes with scale were analyzed. It was experimentally observed that the amplitude of F(M,2) modes at  $f \times d = 1.5 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$  decreased significantly with increasing amount of scale. The present study showed that F(M,2) modes were optimal to evaluate the scale in water supplying pipes.

**Keywords:** ultrasonic guided wave, scale detection, dispersion curve, phase velocity, group velocity, water supplying pipe

#### 1. 서 론

상수도관에 대한 부식 및 노후도 상태를 진단 및 평가하는 가장 큰 목적은 현재의 기능 및 시설에 대한 상태를 진단하고 평가하는 것이다. 즉, 정확한 현재 상태를 진단하고 그 상태를 정밀하게 평가하면 개량에 대해서 구체적인 접근 방안이 모색될 수

있다. 즉, 교체를 해야하는지, 아니면 갱생을 해야 하는지 등 문제발생에 대응하거나 시설의 개량 및 교체 등의 시기를 결정하는데 이용할 수가 있다.

미국의 AWWA의 연구보고[1]에 의하면 상수도관에 적용되고 있는 비파괴 진단기술에는 배수분관에 대하여 초음파, 음향방출, 누출자속(Magnetic Flux Leakage), 원격장 와전류탐상(RF-ECT) 등으로

주로 덕타일 주철관(Ductile Cast Iron Pipe) 및 회주철관(Gray Cast Iron Pipe) 등에 적용하고 있으며, 건물내 노후 급수관에 대한 비파괴 진단기술은 연구개발 중에 있다. 일본에서는 건물내 급수관의 안전진단기술로 관내면 스케일 두께 관찰을 위해 비파괴기술중 육안검사(visual methods)의 일종인 내시경에 의한 방법을 사용하고 있으며, 또한 통수 단면적의 감소를 평가하기 위한 유량 및 수압측정 방법을 실시하고, 관의 잔존두께 진단을 위해 초음파 탐지기를 이용한 비파괴 진단기술을 개발하여 실용화단계에 이르고 있다.

또한 상수도관의 내부 스케일 검사에 대한 연구는 진행 중에 있으나 대부분의 검사법이 특정 부위에 대한 정보만 알 수 있다는 단점이 있다. 그러나 유도초음파를 이용한 광범위 비파괴 탐상기술은 급수관의 외부에 유도초음파를 발생시켜 수 mm까지 급수관을 탐상할 수 있으며, 급수관에 존재하는 결함을 탐상할 수 있다. 유도초음파는 광범위 파이프라인에 사용될 수 있는 효율적인 방법이나 다중모드들이 분산되어 전파함으로서 유도초음파의 특정모드만을 가진 시킨다는 것은 실질적으로 매우 어렵다[2].

관에 대한 유도초음파 기술은 최근 많은 분야에서 응용되고 있으며 국내에서도 가스배관의 결함 탐지에 대한 연구가 수행한 바 있으나[2] 많은 유도초음파연구들 중에서도 스케일의 상태에 따른 변화를 예측한 연구는 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 관 내부에 발생하는 스케일량에 따른 유도초음파의 변화 양상을 확인함으로써 유도초음파 전파 양상에 따른 스케일량 예측을 시도하고자 하였다.

본 연구에 사용된 시험편들은 전혀 사용하지 않은 신관과 실제로 일반 주택 등에서 10~20년간 사용된 상수도관을 대상으로 스케일량에 따라 유도초음파의 전파 특성을 연구하였다.

## 2. 급수관 내의 유도초음파

### 2.1. 탄성관내의 유도초음파

유도초음파의 분산특성은 적합경계조건과 함께 운동방정식에 의해 결정되어진다[3]. 유도초음파의 진행방향이 관의 길이방향인 경우 유도초음파 모드를 나타내기 위해서 두 개의 첨자  $M$  (circumferential order)과  $n$  (mode number)을 사용하고 있다.

$M=0$ 인 경우에는 관의 축에 대해 대칭이고  $M=1, 2, 3..$ 인 경우에는 축 대칭이 아니다. 그래서  $M=0$ 인 경우에는 축 대칭인 모드(axisymmetric modes)를 나타내는데, 축 대칭인 모드는 다시 종방향(longitudinal) 모드와 비틀림(torsional) 모드로 파관의 벽 속에서 진동하는 양상에 따라 구별되어 진다. 종방향 모드는 파의 진동하는 성분이 관의 길이방향과 반경방향으로만 있는 경우로서  $L(0,n)$ 으로 나타내며, 비틀림 모드는 파의 진동성분이 원주방향으로만 있을 경우로서  $T(0,n)$ 으로 나타낸다[5]. 그리고  $M=1, 2, 3..$ 인 경우에는 비축대칭 모드(non-axisymmetric modes)를 나타내며 휨(flexural) 모드로 부르며  $F(M,n)$ 으로 표시한다. 휨 모드의 경우에는 관의 벽 속에서 파의 진동성분이 세 방향(반경, 원주 그리고 길이방향)으로 모두 존재한다[3]. 종방향 모드와 비틀림 모드는  $M=0$ 에서 무한한 모드가 존재할 수 있고,  $M=1, 2, 3, \dots$ 에서 원둘레 차수(circumferential order)  $M$ 에 대해 무한한 휨 모드가 존재할 수 있다.

관형 구조물에 유도초음파가 전파할 때는 종방향 모드, 휨 모드, 비틀림 모드의 세 종류의 모드가 존재한다. 일반적으로 실험에 주로 사용되는 모드는 축 대칭인 종방향 모드이다. 그러나 비축대칭 결함의 반사등으로 인하여 비축대칭인 모드, 즉 휨 모드가 생성될 수 있기 때문에 비축대칭 모드에 대한 연구가 필수적이다. 그리고 비틀림 모드는 실험적으로 발생시키고 수신하는데 있어서 일반적인 초음파 센서로는 효율이 떨어져서 잘 사용되지 않고 있다.

### 2.2. 상수도 급수관에서의 유도초음파 모드

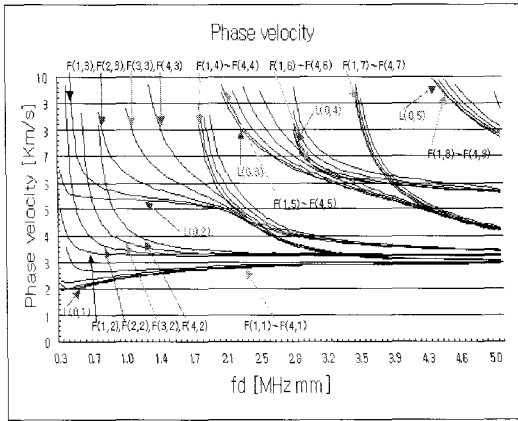
탄성관에 대한 유도초음파 특성방정식으로부터 상수도 급수관의 분산선도를 얻을 수 있다[9]. 실제로 에너지 전파 속도와 같은 군속도(group velocity)를 구하기 위해 위상속도(phase velocity)를 구하면 Figure 1과 같은 결과를 얻을 수 있다. Figure 1은 일반적으로 사용되었던 상수도 급수관인 KSM 3408 내에서 발생 가능한 종방향 및 휨 모드의 위상속도 및 군속도의 분산선도를 보여주고 있다. 여기서 같은 모드 수( $n$ )를 가지는 각각의 모드들은 서로 비슷한 분산 양상을 가짐을 알 수 있다.

Figure 1에서 주파수가 0.5 MHz인 탐촉자를 사용하여 두께 3 mm, 외경 22 mm, 내경 16 mm, 중

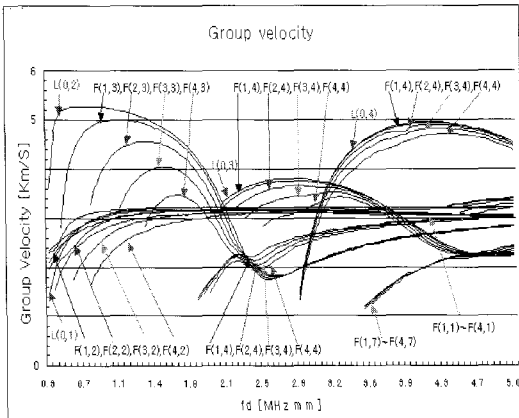
파속도 5920 m/s, 횡파속도 3230 m/s인 관을 지날 때 발생 가능한 모드들은  $fd$  값이 1.5 [MHz mm] 일 때이다. 각각의 모드들이 가지는 위상속도로부터 Snell의 법칙을 이용하여 해당 모드의 입사각을 다음과 같이 계산할 수 있다[2].

$$\frac{v_w}{\sin \theta_i} = \frac{v_p}{\sin 90^\circ}$$

여기서  $v_w$ 는 윗지에서의 종파속도,  $\theta_i$ 는 입사각,  $v_p$ 는 발생하는 유도초음파의 위상속도이다. 아크릴 윗지를 사용할 경우  $v_w=2720\text{m/s}$ 이므로 위상속도가 2720 m/s 보다 작은 모드들은 발생되지 않는다.



(a) phase velocity



(b) group velocity

Fig. 1 Dispersion curves for steel pipe with thickness of 3 mm, outer diameter of 22 mm and inner diameter of 16 mm

따라서  $fd=1.5$  MHz mm인 경우에 발생가능한 모드들은 Table 1에서 보이는 10개의 모드들만이다.

Table 1은 최종적으로 상수도 급수관내를 전파할 수 있는 모드들과 발생각, 위상속도, 군속도를 나타내고 있다.

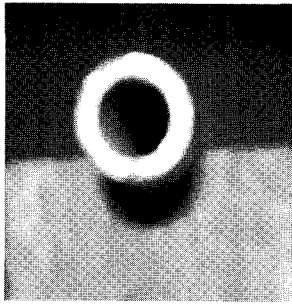
Table 1 Angle of incidence, phase velocity, and group velocity in the pipes

Incident Angle (Degree)	Mode	Phase velocity (km/s)	Group velocity (km/s)
22.17	F(4,3)	7.23	3.43
26.39	F(3,3)	6.14	4.04
29.13	F(2,3)	5.61	4.46
30.69	F(1,3)	5.35	4.72
31.2	L(0,2)	5.27	4.80
49.21	F(4,2)	3.61	2.89
52.79	F(3,2)	3.43	3.04
55.46	F(2,2)	3.31	3.14
57.11	F(1,2)	3.25	3.21
80.25	F(4,1)	2.77	3.06

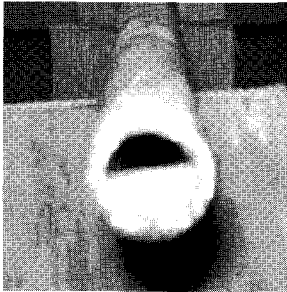
### 3. 실험

본 연구에 사용된 시험편은 일반적인 가정에서 사용된 KSM 3408 상수도관이며 이 관의 외경은 22 mm ( $\pm 0.5$  mm) 내경은 16 mm ( $\pm 0.5$  mm) 이고 두께는 3 mm ( $\pm 0.5$  mm) 으로 Figure 2에 나타내었다. 배관 내부의 폐쇄량에 따른 4종류의 시험편을 이용하여 관내부의 스케일량에 따라 유도초음파의 전파 특성이 어떻게 달라지는지 비교 분석하였다. 노후관의 스케일량은 신관내의 관내에 들어가는 물의 체적과 노후관내에 들어가는 물의 체적의 비로부터 결정하였다.

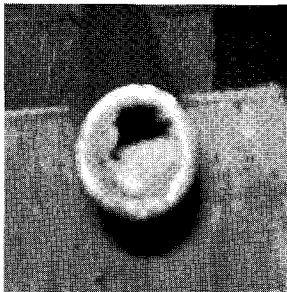
유도초음파 발생장치는 Ritec사의 RAM-10000을 사용하였으며 신호의 저장을 위해 디스크 저장 장치가 있는 400 MHz 디지털 오실로스코프(Lecroy 9310A)를 사용하였다. 초음파 탐촉자는 크기가 13 mm  $\times$  25 mm의 직사각형이고 중심주파수가 0.5 MHz인 Panametrics사의 제품을 사용하였다.



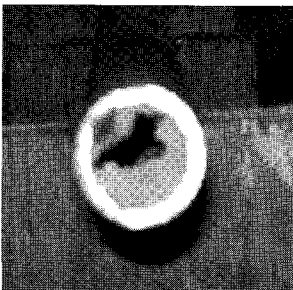
(a) new pipe (no scale)



(b) decrepit pipe (3% scale)



(c) decrepit pipe (23% scale)



(d) decrepit pipe (42% scale)

Fig. 2 Water pipes with scale

급수관에 유도초음파를 모드별로 발생시키기 위해서 상수도관에 적합한 아크릴 가변각 웨지를 설계 제작하였다. 이때 웨지는 급수관 외부면의 반을 감싸도록 제작하여 실험하였다. 본 연구에서는 Figure 3에서 보이는 바와 같이 pitch-catch 법을 이용하여 실험하였으며, 송수신 탐촉자의 거리를 50 cm로 하였다. 그리고 초음파 신호는 탐촉자가 시편에 닿는 힘의 정도에 따라 어느 정도는 변화하므로 일정한 압력을 유지하기 위해 동일한 밴드를 이용하여 결속함으로써 최대한 실험오차를 줄이고자 하였다.

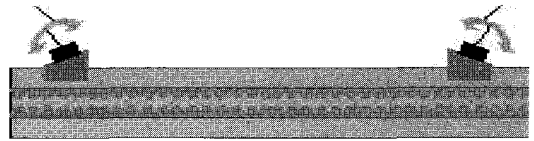


Fig. 3 Transducer set-up for guided wave excitation and reception

### 3. 결과 및 고찰

스케일 량이 다른 4종류의 배관에 대하여 이론적으로 발생이 가능한 10가지 모드의 유도초음파를 발생시키고 각각의 모드의 전파 특성을 조사하였다. Figure 4는 대표적으로 상수도 급수관 내에 F(2,2) 모드를 발생 시켰을 때 수신되는 유도초음파 신호를 나타내었다. Figure 4(b) 에서와 같이 관 내부에 약간의 스케일이 끼어있는 경우에는 수신에서 발생하는 F(2,2) 모드가 진폭만 변화되고 전파하지만 Figure 4(c), (d)에서와 같이 스케일량이 많아지면 F(2,2) 모드는 거의 전파하지 않음을 알 수 있다. 특히, 스케일이 42%인 시험편에 대해서는 그 신호의 크기가 잡음 신호의 크기와 거의 유사하여 구분하기 힘들다. 이와 같은 양상은 F(1,2), F(3,2), F(4,2) 모드들에서도 같은 거동을 보였다. 이들은 모드 수가 2인 공통점을 지니고 있으며 F(M,2)로 나타낼 수 있다. 즉, F(M,2) 모드는 관 내부의 스케일 량에 따라서 잘 전파되지 않는다.

한편, 급수관 내에 발생가능한 모드들 중에서 모드수가 2가 아닌 모드들 즉, F(1,3), F(2,3), F(3,3), F(4,3), L(0,2), F(4,1) 모드들은 스케일량에 상대적으로 적게 민감하여 스케일이 존재하는 관에서도 전파는 가능하다. Figure 5는 F(2,3) 모드가 스케일량

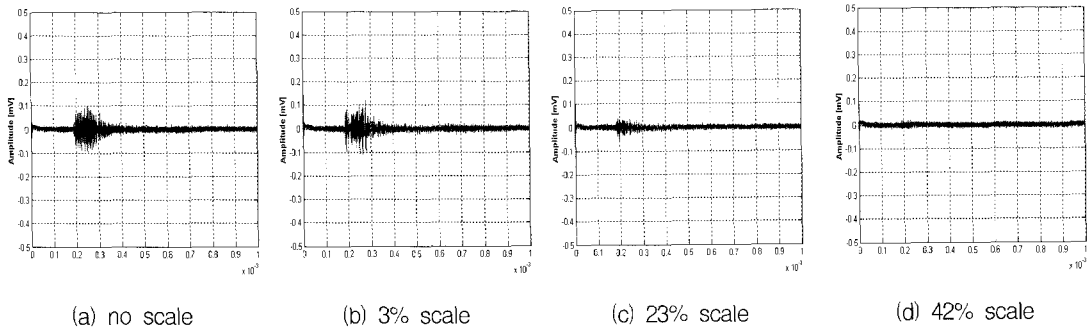


Fig. 4 The received signals of F(2,2) mode

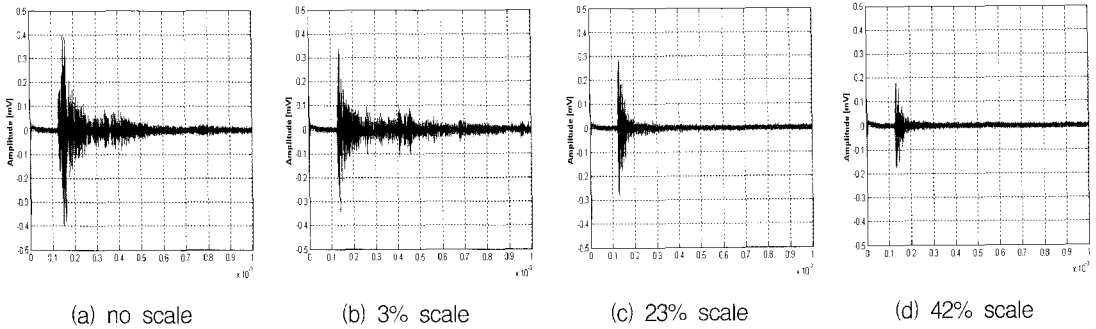


Fig. 5 The received signals of F(2,3) mode

에 따라 변화하는 전파 양상을 나타낸다. 여기서 스케일의 량이 많아질수록 탐촉자의 특성에 의해 분산되는 주위의 모드[기]들이 사라지고 발생시키고 자하는 특정한 모드만이 전파됨을 보여주고 있다. 그리고 스케일의 량에 따라 전파하는 진폭이 감소 하는 것을 알 수 있다. 그 외의 발생 가능한 다른 모드들 또한 Figure 5와 같은 거동을 보인다.

위의 실험 결과로 발생 가능한 모드들 중 모드 수가 2인 모드들은 관 내부가 심하게 폐쇄 될수록 잘 전파하지 못하는 특성을 보이고 있다. 그리고 다른 모드들은 F(M,2) 모드에 비하여 적기는 하지만 스케일의 영향으로 인하여 진폭이 감소됨을 알 수 있다. F(2,2) 모드와 F(2,3) 모드의 진폭이 스케일 양에 따라 작아지는 경향을 Figure 6에 나타내었다.

동일한 fd 값에서도 모드에 따라서 위상속도, 군 속도, 원주방향 차수, 모드수가 다른데, 급수관 내에서 동일한 모드수를 가지는 모드들은 유사한 전 파 양상을 띄는 것을 알 수 있었다. 즉, F(M,2) 모드는 내부의 스케일 양에 따라서 감쇠가 쉽게 되는 것을 실험적으로 알 수 있었다. 이는 F(M,2) 모드들

은 전파할 때 관 내부의 영향을 받는다는 것을 말 하고 있는데, F(M,2)모드의 에너지가 관 내벽을 따라서 전파하고 스케일이 탬퍼로 작용하여 유도초음 파가 전파되지 못하는 것으로 추측된다. 이는 유도 초음파의 파형 구조를 구하면 그 전파특성이 보다 명확해 질 것으로 판단된다.

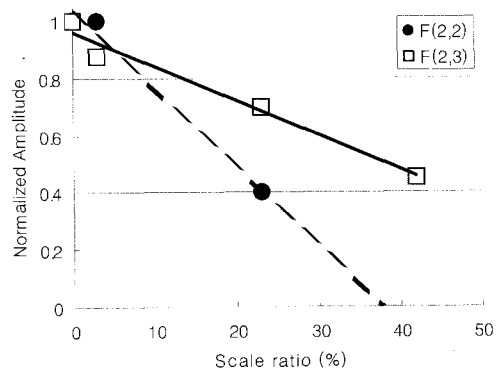


Fig. 6 Relation between the amplitude and the scale ratio

## 5. 결 론

지금까지의 실험의 결과로서 유도 초음파의 F(M,2) 모드를 사용하면 상수도관 내부의 스케일 량을 평가할 수 있는 가능성을 발견하였다. 이들 모드는 관 내부의 스케일에 의하여 크게 감쇠되므로 유도초음파의 진폭으로부터 스케일 량을 추정할 수 있다. 유도초음파의 RF 신호로부터 수도관의 스케일 량을 보다 정량적으로 산출하기 위해서는 더 많은 종류의 시편에 대한 실험이 보완되어야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 건설교통부가 주관하는 "2000년 건설 기술연구개발사업"의 "에너지 절약건물내 노후 급수관의 상태진단 및 평가를 위한 안전진단 기술개발" 과제의 연구성과입니다. 연구개발 및 지원을 해주신 건설교통부와 (주)동호엔지니어링, 중앙산업(주), (주)인디시스템에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] AWWA Research Foundation, "Nondestructive Testing of Water Mains for Physical Integrity," (1992)
- [2] 송성진, 신현재, 박준수, "피복강관의 광범위 비파괴 탐상을 위한 유도초음파 모드에 관한연구, 한국비파괴검사학회 춘계학술발표 논문집, pp. 527-534, (2000)
- [3] D. C. Gazis, "Three-Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders. I. Analytical Foundation," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 31, No. 5, pp. 568-573, May (1959)
- [4] K. F. Graff, wave motion in elastic solids, Dover Publication INC., New York (1975)
- [5] A. H. Fitch, "Observation of Elastic-Pulse Propagation in Axially Symmetric and Nonaxially Symmetric Longitudinal Modes of Hollow Cylinders," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 35, pp. 706-708 (1963)
- [6] M. Brook, T. D. K. Ngoc and J. Eder, "Ultrasonic Inspection of Steam Generator Tubing by Cylindrical Guided Waves," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 9, pp. 243-249 (1990)
- [7] J. J. Ditri, and J. L. Rose, "Excitation of Guided Wave Modes in Hollow Cylinders by Applied Surface Traction," J. Appl. Phys., Vol. 72(7), pp. 2589-2597 (1992)
- [8] J. J. Ditri, "Utilization of Guided Elastic Waves for the Characterization of Circumferential Cracks in Hollow Cylinders," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 96, pp. 3769-3775 (1994)
- [9] H. J. Shin, R. Yi and J. L. Rose, "Defect Detection and Characterization in Power Plant Tubing Using Ultrasonic Guided Waves," Proc. 14th WCNDT, New Delhi, India, December 8-13, pp. 2299-2302 (1996)