

## 파이프-유체의 연성진동을 이용한 누수위치 식별연구

### Pinpointing of Leakage Location Using Pipe-fluid Coupled Vibration

이 영 섭<sup>†</sup> · 윤 동 진<sup>\*</sup>

Young-Sup Lee and Dong-Jin Yoon

(2003년 7월 29일 접수 : 2004년 1월 10일 심사완료)

**Key Words** : Leak Detection (누수탐지), Leak Noise (누수소음), Correlation Method (상관법), Water Pipelines (상수도 배관), Accelerometer (가속도계)

#### ABSTRACT

Leaks in underground pipelines can cause social, environmental and economical problems. One of relevant countermeasures against leaks is to find and repair of leak points of the pipes. Leak noise is a good source to identify the location of leak points of the pipelines. Although there have been several methods to detect the leak location with leak noise, such as listening rods, hydrophones or ground microphones, they have not been so efficient tools. In this paper, accelerometers are used to detect leak locations which could provide an easier and more efficient method. Filtering, signal processing and algorithm of raw input data from sensors for the detection of leak location are described. A 120m-long and a 70m-long experimental pipeline systems are installed and the results with the systems show that the algorithm with the accelerometers offers accurate pinpointing for leaks location detection. Theoretical analysis of sound wave propagation speed of water in underground pipes, which is critically important in leak locating, is also described.

#### 1. 서 론

국내 상수도 관망은 수도 시설의 중요한 구성요소지만 대부분이 지하에 매설되어 있으므로 배관의 노후상태 파악이 어려워 적절한 시기에 효과적인 유지관리를 받지 못하고 있다.<sup>(1)</sup> 환경부의 통계에 의하면 2001년 '12월말 기준으로 총 연장 120,405 km 중 11년 이상 경과된 노후관이 거의 52 %에 이르고 있으며, 전체 생산량의 약 14 %가 누수되어 적지않은 사회적, 환경적 및 경제적 손실이 발생되고 있다.<sup>(2)</sup> 이러한 지하매설 상수도 배관의 누수 탐지는 육안으로

식별이 곤란하므로 누수로 인한 신호음으로부터 누수위치를 식별하는 기술이 주로 응용되고 있으며 선진국의 경우 상용화된 제품이 개발되어 있는 상태이다.<sup>(3,4)</sup> 그러나, 누수탐지에 쓰이는 기술의 개략적 방법은 알려져 있으나 실제 상세기술은 공개가 되지 않고 있어 국내의 기술개발이 필요한 실정이다.

누수로 인한 손실이 문제화되면서 부터 누수위치탐지를 위한 노력이 시작되었는데, 초창기엔 청음봉(listening rod) 이나 하이드로폰이 많이 이용되었다.<sup>(5)</sup> 이것은 소화전(fire hydrant)나 제어밸브(control valve) 또는 배관에 직접 이들을 접촉시켜 누수로 인해 발생하는 소리를 감지하는 것이었다. 이들 장치로는 누수를 확인할 수는 있으나 누수위치를 찾는 데는 한계가 있었다. 또한 경우에 따라서 배관 내부에 직접 이런 장치를 넣어 관내의 유체를 따라 전해오는 누수음을 판단해야 하므로 설치하는데 많은 어려움이 따

<sup>†</sup> 책임저자 : 정회원, 한국표준과학연구원 스마트계측그룹  
E-mail : yslee@kriss.re.kr

Tel : (042) 868-5705, Fax : (042) 868-5639

<sup>\*</sup> 한국표준과학연구원 스마트계측그룹

랐다. 지상 마이크로폰 (ground microphone)은 그 이후에 사용된 것으로, 이것은 상수도관이 매설된 지상의 포장도로나 흙 등의 지표면 바로 위에서 누수음을 청음하는 것으로 의심가는 누수위치를 집어 내는 (pinpointing)데 사용되었다.<sup>(6)</sup> 이 방법은 휴대용 청음 장비를 소지하고 지하 관로를 따라 일일이 탐지해야 하며, 청음방법을 사용하기 때문에 고도의 주의를 기울여 누수를 판별해야 하는 숙련된 기술이 필요하다.

1970년대 들어서 좀 더 정밀한 탐지법의 필요성이 제기되었고,<sup>(7)</sup> 음향상관 해석법 (acoustical correlation analysis)이 제안되었으나 그 당시엔 일미터이내의 극히 짧은 거리에서만 탐지가 가능하여 현실성이 없었다.<sup>(8,9)</sup> 1990년대 들어 독일의 Fuchs와 Riehle은 계측된 신호를 FFT한후 효과적인 주파수범위를 선택하여 누수위치를 탐지하는 상호상관함수를 실제에 적용, 누수지점을 정밀하게 집어 내는데 좋은 결과를 얻어 내었다.<sup>(10)</sup> 이후 누수음 상관기 (leak noise correlator)는 상용화되어 보편적으로 쓰이기 시작하였다.

그런데, 이와같은 상관법은 시간지연 (time delay)을 이용하여 누수위치를 찾는데, 배관내 유체의 음속을 정확히 알아야 만 한다. 그래서 Pinnington과 Briscoe<sup>(11)</sup> 그리고 Muggleton et al<sup>(12)</sup>은 누수로 인한 배관의 진동모드에 대한 분류와 지하매설된 배관내 유체의 음파 전달속도를 이론적으로 해석하였다. Hunaidi 와 Chu는 음파의 감쇠가 심한 플라스틱배관에 대한 실험적 연구에서 유체와 배관이 연성된 경우 누수탐지에 결정적으로 이용되는 음파전달과 관련된 진동은 저주파에서 지배적으로 나타남을 보였다.<sup>(13)</sup>

이러한 배관의 누수를 계측하는데는, 초음파의 음향방출 (acoustic emission)에 바탕한 초음파센서를 이용한 누수위치 탐지방법이 있으나 비교적 단거리 구간에서 사용 가능하며,<sup>(14)</sup> 장거리의 구간의 탐지는 가속도계를 이용하여 누수로 인해 발생하는 유체의 음향파를 연성운동을 일으키는 배관의 진동을 계측해서 추정하는것이 보편적이다.<sup>(13)</sup> 이러한 가속도계를 이용한 계측은 배관이나 제수변등의 외부에 수월하게 부착할수 있는 장점이 있다. 한편, Pinnington 과 Briscoe는 압전와이어로 배관내부의 압력변화를 계측할 수 있는 센서를 제안하였다.<sup>(10)</sup>

따라서 궁극적으로는 차세대에 적합하도록 지속적인 감시가 가능한 효율적인 누수탐지 네트워크 구축을

목표로 하여, 어느 정도 확립된 기술인 압력 및 유량 센서를 이용하여 상수도 관로상의 대략적인 누수 예상 구간을 선정한 뒤 각 지역에 설치된 센서를이용하여 정확한 누수 지점을 검출하는 기술을 개발하고자 하는 것으로 본 논문에서는 가속도계를 이용한 누수 탐지 기법및 실험결과에 대해 언급한다.

본 연구에서는 한국표준과학연구원내에 설치된 두 종류의 모의 상수도 시스템에 대해 가속도 센서를 이용한 누수위치 탐지 실험에 대해 기술한다. 2절에서는 누수탐지의 이론적 배경에 대하여, 3절에서는 탐지 알고리즘 그리고 4절에서는 모의 시스템에 대한 실험을 통해 탐지 가능성을 검토하였다.

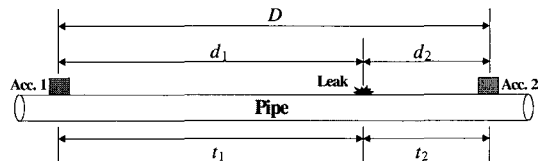
## 2. 누수탐지 이론

### 2.1 도달 시간차를 이용한 누수탐지

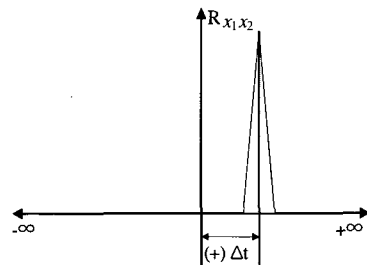
Fig. 1(a)와 같이 배관의 표면으로부터 누수가 발생할 경우, 누수 지점의 양 방향에 진동파를 감지할 수 있는 센서(가속도계)를 설치하여 각 센서에 도달하는 진동파의 도착시간 구별이 가능하다면, 아래의 식에 의해 누수 위치를 탐지할 수 있다.

$$\begin{aligned} d_1 &= (D + c\tau_d) / 2 \\ d_2 &= (D - c\tau_d) / 2 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $D$ 는 센서간 거리,  $c$ 는 누수로 인한 배관



(a) Leak locating with time arrival difference



(b) Cross-correlation function

Fig. 1 Principle of leak detection

진동파의 속도,  $\tau_d$ 는 두 센서에 도달하는 진동파의 전달 시간차 ( $t_1 - t_2$ ) 이다.

즉, 누수지점 위치  $d_1$ 과  $d_2$ 는 진동파의 속도  $c$ 와 시간차  $\tau_d$ 를 알 수 있으면 추정 가능해진다. 그런데 실제의 지하매설 배관은 주변소음, 복잡한 배관망으로 인한 다양한 소음원 등 여러가지의 잡음에 노출되어 있어 어떤 진동파가 누수에 의한 것인지 단순하게 판단내릴 수 없는 경우가 많다. 왜냐하면 가속도계는 배관에 존재하는 잡음 포함한 여러가지의 파동을 동시에 계측하므로 누수와 관련된 것만을 추출, 계측하는 것이 탐지성능을 좌우한다.

누수신호 및 노이즈를 포함한 두 센서에서 계측된 신호  $x(t)$ 와  $y(t)$ 가 다음과 같이 주어 질때,

$$\begin{aligned} x(t) &= s(t) + n_x(t) \\ y(t) &= \alpha s(t - \tau_d) + n_y(t) \end{aligned} \quad (2)$$

이때  $s(t)$ 는 순수한 누수신호로서 평균이 영 (zero-mean) 이고, 시간에 따라 통계학적 특성이 변하지 않는 stationary 랜덤 신호로 가정한다. 그리고  $\alpha$ 는 상대적인 진폭인자 (amplitude factor)이며,  $n_x(t)$  및  $n_y(t)$ 는 각각의 가속도계에서 계측된 노이즈이다. 가장 이상적인 경우는 노이즈없는 단순 파형의  $s(t)$ , 그리고  $y(t)$ 가  $x(t)$ 와 비교하여 시간  $\tau_d$ 만큼 지연된 신호일 때이다.

그런데, 연속적이고 랜덤한 이러한 신호는 단순히 그 파형을 시간 영역에 두고 비교해서는 시간 지연  $\tau_d$ 를 알기가 매우 어렵다. 이런 경우엔 두 신호의 상호상관함수 (cross-correlation function)  $R_{xy}$ 를 사용하여 추정 가능한 데,<sup>(15)</sup> 즉,

$$R_{xy} = E[x(t)y(t+\tau)] = \alpha R_{xx}(\tau - \tau_d) + R_{n_x, n_y}(\tau) \quad (3)$$

여기서  $E[\ ]$ 는 두 신호  $x(t)$ 와  $y(t+\tau)$ 의 곱의 앙상블 평균 (ensemble average) 이다. 그래서 노이즈  $n_x(t)$ 와  $n_y(t)$ 가 서로 연관되어 있지 않다면, 식 (3)의  $R_{xy}$ 는 간단히 다음과 같이 된다.

$$R_{xy} = \alpha R_{xx}(\tau - \tau_d) \quad (4)$$

즉, Fig. 1(b)와 같이 상호상관함수는 시간차  $\tau_d$ 를 가진  $x(t)$  신호의 자기상관함수 (auto-correlation

function)로 나타나게 된다.

### 2.2 누수 신호의 특성

지하에 매설된 배관에서 천공 등으로 인해 누수가 발생하면, 광대역의 주파수에 걸친 누수 신호 (leak signal)를 발생시키게 된다.<sup>(12)</sup> 이 신호는 일시적으로 생기는 잡음과는 달리 일단 누수가 생기기 시작하면 지속적으로 계속 발생된다는 점에서 다른 일시적 잡음과는 확연히 분간할 수 있는 신호로서 누수지점에서의 압력강하의 크기, 천공 (hole)의 형태 및 크기에 따라 누수신호크기가 달라질 수 있다.<sup>(13)</sup>

누수음은 배관의 누수지점을 기준으로 배관 종방향의 양끝으로 전파해 간다. 소리의 전파라는 것은 압력의 변화가 전파되어 가는 것이므로, 누수로 인한 배관 내의 갑작스런 압력강하는 소리를 발생시키게 되고, 배관내 유체는 배관 및 배관을 둘러싼 흙등의 주변 매질과 연성되어 음파의 전파현상을 지배하게 된다.

### 2.3 유체-배관 연성진동

유체가 배관속에 있을때의 음향 및 진동 특성은 서로 연성 (coupled) 되어 나타나며, 유체없이 배관만 있을 때와는 다른 형태를 보인다.<sup>(16)</sup> 유체-배관의 연성진동은 Fig. 2와 같이 여러 가지의 모드 (mode)로 나타날 수 있다.  $n=0$  모드는 '숨쉬기모드 (breathing mode)' 라고 불리는 것으로 유체-배관 연성진동의 가장 기초적인 진동형태이다.<sup>(17)</sup>  $n=1$  모드는 배관의 굽힘모드 (bending mode)로서 배관을 하나의 보 (beam)로 가정하면 보의 굽힘진동 (bending vibration)에 해당되는 것으로 지하에 매설된 배관에서는 대진폭의 굽힘진동은 나타나기가 어렵게 구속되어 있는 것이다. 그리고  $n=2$  모드는 배관의 '타원형 모드 (ovalling mode)' 로서 고주파에서 나타난다.

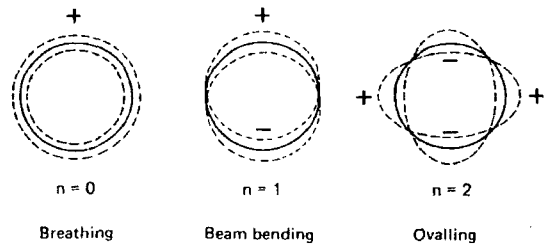


Fig. 2 Mode shapes of a circular cylindrical shell<sup>(17)</sup>

이들 중에서 누수음의 배관내 종방향 전파와 관계가 되는 것은  $n=0$  모드이다.<sup>(11,12)</sup> 누수로 인해 전달되는 유체음은 종파인 반면 계속하고자 하는 것은  $n=0$ 라는 배관의 횡진동인데 이들은 다음과 같은 물리적 이유로 서로 연성 (coupled)이 되어 있기 때문이다. 즉, 배관내의 유체의 압력변화가 전파되어 갈 때, 유체를 감싸고 있는 배관도 유체압력의 고저에 따라 팽창 또는 수축되는 변형을 하게 된다. 이러한 변형이 숨쉬기 모드에 해당되는 것이다. 그래서 유체내의 압력변화의 전파는 유체를 둘러싸고 있는 배관과 연성된 채로 이루어진다. 이로 인해 원래 자유공간에선 비분산적 (non-dispersive) 이어야할 유체속의 음파 전달이 배관에 둘러 쌓이게 되면 주파수에 따라 음속이 바뀌는 분산적인 (dispersive) 파동으로 나타나게 된다.<sup>(12)</sup> 한편,  $n=0$  모드는 “링주파수 (ring frequency)” 에서 공진을 일으키는데 아래와 같이 정의된다.<sup>(17)</sup>

$$f_r = \frac{c'_l}{\pi d} \tag{5}$$

여기서  $d$  는 배관의 평균직경 [(내경+외경)/2]이고, quasi-longitudinal wave의 위상속도  $c'_l = [E/\rho(1-\nu^2)]^{1/2}$  은 주파수에 독립적이다. 여기서  $E$  는 배관재료의 영계수,  $\rho$  는 밀도,  $\nu$  는 푸아송비 이다.

유체가 찬 배관에서는 상기의 식 (5)에 의해 정의되는 링 주파수 아래의 주파수 영역에는 4개의 파형이 존재하는데,<sup>(11,12)</sup> 그것은  $n=1$ 인 보의 굽힘파 (bending wave)와  $n=0$ 일때 3가지의 축대칭파 ( $s=0, 1, 2$ ) 이다.

이들 중  $n=0$  &  $s=0$ 파는 유체와는 연성되지 않은 배관의 축대칭 비틀림 파동으로 누수음의 전파와는 무관하다.  $n=0$  &  $s=1$ 은 유체에 기인한 파가 지배적인 파동으로서 누수음의 전파와 연관되어 있어 매우 의미있는 파동이다. 그리고  $n=0$  &  $s=2$  파는 배관 셸(shell) 자체의 길이방향 압축파가 지배적인 축대칭 파동인데 감쇠가  $s=1$ 파에 비해 심하다. [이들 파동에 대한 좀 더 자세한 설명은 문헌 (11, 12, 16)을 참고할 것.]

그래서  $n=0$  &  $s=1$ 의 축대칭 파동의 계측은 가속도계를 이용한 누수탐지에 매우 중요하다. 아울러,  $n=1$  이나  $n=2$  이상의 모드가 누수탐지에서 계측

되면 잡음(noise)이 되어 탐지를 저해하므로 이들은 필터등으로 걸러져야만 한다.

## 2.4 누수음 전파속도

지하에 매설된 배관내에서 누수로 인한  $s=1$  파의 위상속도는 유체와 배관이 탄성적으로 서로 연성되어 있을 뿐만 아니라 배관의부를 감싸고 있는 흙과 같은 매질의 영향도 받는다. 그러나 흙과 같은 배관을 둘러싼 매질의 영향은 상대적으로 적다고 알려져 있으므로, 이의 영향을 무시하면 누수음과 연관이 깊은  $s=1$  파의 파수 (wavenumber)  $k$ 는 아래와 같이 주어진다.<sup>(12)</sup>

$$k^2 = k_f^2 \left[ 1 + \frac{2B_f/d}{Eh/d^2 - \rho h \omega^2} \right] \tag{6}$$

이때  $\omega$  는 주파수,  $h$  는 배관의 두께,  $B_f$  는 배관내 유체의 체적탄성계수,  $k_f = \omega/c_f$  는 유체의 파수 (wavenumber)이며,  $c_f = (B_f/\rho_f)^{1/2}$  는 자유공간에서 유체 압력파의 전파속도이다.<sup>(17)</sup> 이때  $\rho_f$  는 유체의 밀도이다. 식 (6)을 바탕으로 누수음 ( $s=1$ )의 전파속도는 다음과 같게 된다.

$$c = c_f \left[ 1 + \frac{2B_f/d}{Eh/d^2 - \rho h \omega^2} \right]^{-1/2} \tag{7}$$

식 (7)은 배관내의 유체 누수음 ( $s=1$ )의 위상전파속도에 관한 식으로 배관재질 및 치수에 따라 그리고 주파수에 따라 그 속도가 바뀌어 질 수 있는 분산적인 (dispersive) 특성을 보여 주고 있다. 이것은 자유공간에서의 유체음의 위상전파속도가 주파수와는 무관한 비분산적인 (non-dispersive) 특성을 갖는 것과는 대조적이라 할 수 있다.

Table 1은 누수로 인한 음향전파와 관련한 65A ( $d=72.7$  mm,  $h=3.65$  mm)의 동일한 치수이지만 재료가 다른 배관들 (PVC 배관, steel 배관 및 주철관)의 특성을 나타낸 수치계산 결과이다. 이는 이론적 계산을 바탕으로 세 종류의 배관의 누수음 전파특성을 서로 비교한 것이다.

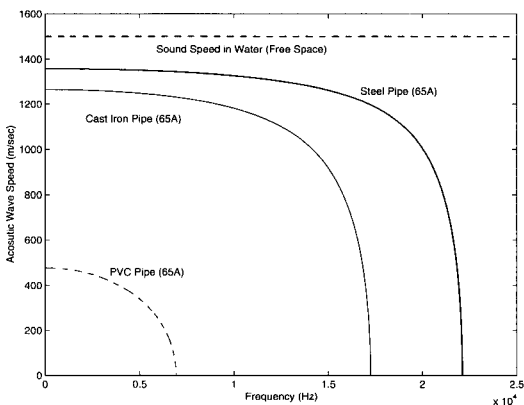
누수음 ( $s=1$  파)의 전파속도는 식 (7)에 의해 Fig. 3과 같이 얻어졌는데, 동일한 치수를 가진다 하더라도 배관의 재질에 따라 그리고 주파수에 따라 음

속 ( $s=1$  파)은 크게 달라 질 수 있음을 보여 준다. 아울러 주파수가 증가함에 따라 음속이 감소되어 링 주파수 ( $n=0$  모드)에 이르게 되면 음파 ( $s=1$ 파)는 전달이 되지 않게 된다. Steel 배관은 0 Hz 근처에서 약 1356 m/sec의 음속을 가지는 데 비해 PVC 배관에서는 그 보다 약 2.9 배정도 느린 475 m/sec를 보인다. 이것은 자유공간의 물 속의 음속이 약 1500 m/sec으로 일정한 것과는 대조적이다.

이상과 같이, 정확한 음속을 추정하기 위해서는 배관의 재질에 따르는 기계적 특성이 정확히 주어져야 하나 실제 배관은 불연속점 (플랜지, 커넥터, 밸브, 분기관, 배관 직경의 변화 등등)을 가지므로, 배관 시

**Table 1** Wave propagation properties in 65A pipes ( $d=72.7$  mm,  $h=3.65$  mm) with various materials

Material	PVC	Steel	Cast iron
Young's modulus $E$ (N/m <sup>2</sup> )	$5.0 \times 10^9$	$2.0 \times 10^{11}$	$1.1 \times 10^{11}$
Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2000	7800	7100
Poisson's ratio $\nu$	0.4	0.28	0.26
Quasi-longitudinal wave speed $c'_l$ (m/sec)	1725	5270	5434
Ring frequency $f_r$ (Hz)	7559	23111	23801
$s=1$ wave speed $c$ (m/sec)	475	1356	1175



**Fig. 3** Calculated leak noise propagation speed against frequency in water filled pipes (65A)

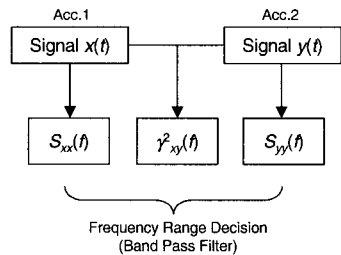
스템에 대한 음속의 추정은 오차를 가질 수 있다. 이런 이유로 다양한 배관에 대한 충분히 축적된 실험적 음속데이터가 필요하다.

### 3. 누수탐지 신호처리

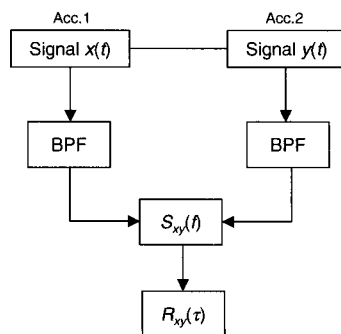
2.1절에서는 도달시간차를 이용한 누수탐지의 원리를 보여 주었는데, 실험에 있어서의 실제 상호상관함수는 다음의 두 과정으로 구하였다. 첫번째 과정은 주파수 대역의 설정이 목적이고, 두번째 과정은 설정된 주파수 대역에 맞춰 실제 상호 상관함수로 부터 시간지연을 계산하는 것이다.

Fig. 4(a)로 나타낸 첫번째 과정은 아래와 같다.

- (1) 주파수 대역이 상대적으로 넓은 가속도계를 사용하여 누수가 있는 배관의 두 지점에서 신호  $x(t)$  와  $y(t)$  를 계측한다.
- (2) 이들을 오토스펙트럼  $S_{xx}(f)$  및  $S_{yy}(f)$ , 그리고 코히어런스함수 (coherence function)  $\gamma_{xy}^2(f)$  를 계산한다.
- (3) 코히어런스함수의 값이 높으면서도, 누수음과 연관된 가속도계 신호의 오토스펙트럼의 크기가 큰



(a) Frequency band decision



(b) Time delay estimation

**Fig. 4** Algorithm for leak location detection

주파수 구간이 누수탐지에 좋으므로, 이에 해당하는 주파수 대역을 찾는다. 배관의 재료 및 치수에 따라 주파수 대역은 크게 달라 질 수 있음에 유의한다.

주파수대역의 결정후, Fig. 4(b)의 과정으로 아래와 같이 시간지연을 구한다.

- (1) 대역통과필터 (band pass filter)를 설정한다.
- (2) 신호  $x(t)$ 와  $y(t)$ 를 대역통과필터 (band pass filter)를 지나게 한 뒤 상호스펙트럼  $S_{xy}(f)$ 를 계산한다.
- (3) 상호스펙트럼의 역푸리에 변환 (inverse Fourier transform)을 통해 시간영역의 상호 상관함수 (cross-correlation function)  $R_{xy}(\tau)$ 를 구하여 식 (1)의 도달 시간지연  $\tau_d$ 를 추정한다.

## 4. 실험 및 결과

### 4.1 실험 (I)

#### (1) 실험 (I) 개요

한국표준과학연구원에 설치된 호칭경 65A등의 강관이 용접으로 연결되 만들어져 지지대에 의해 지상에서 약 30 cm 정도 들린 채 설치된 전체길이 약 120 m의 모의 누수 배관 시스템(I)에 대하여 실험을 실시 하였다.

Fig. 5와 같이 여러 지점이 직각으로 꺾인 구조이며, 최대 직선길이는 약 60 m 정도 되는데, 이 직선구간의 한 지점에 누수홀을 제작하여 볼밸브 조절하였으며, 모의시스템의 한 끝단에서 물을 공급 가압시켰다. 관내 수압을 초기 3.6 kgf/cm<sup>2</sup>으로 유지한 상태에서 누수 실험을 수행하였는데, 누수시 3.2

kgf/cm<sup>2</sup>를 보였다. 모의배관 시스템(I)은 실험의 편의성 및 유효성 검증을 위해 지상에서 실험을 수행하였다.

본 실험에서는 두 종류의 가속도계가 사용되었는데, 이는 탐지주파수 대역이 넓은 PCB 352C66 가속도계 (상위주파수 12.8 kHz)과 좁은 것으로 B&K 4370 (상위주파수 4.8 kHz)으로 분간해 사용되었다. 우선 주파수 대역이 넓은 것을 사용하여 주파수 대역을 결정한 후 좁은 주파수 대역을 가지는 가속도계가 뒤에 사용되었다. 즉, Fig. 6에서 보는 것처럼 PCB 352C66 가속도계를 이용 코히어런스함수의 값이 높으면서도 스펙트럼의 크기가 큰 주파수 대역인 3~4 kHz가 누수탐지 구간으로 결정되었다.

이는 다른 주파수에서 국부적으로 더 큰 스펙트럼 크기를 보여 주기도 하나 두 가속도계에서 같이 크게 나타나지 않거나 코히어런스 함수값이 상대적 낮기 때문이다. 즉, 2 kHz 부근도 국부적으로 높은 스펙트럼 크기를 보이는 것 같으나, 주파수가 서로 정확히 일치하지 않을 뿐 아니라 코히어런스 함수값이 상대적으로 낮다. 또한 5~6 kHz에서도 가속도계 No. 2는 스펙트럼값이 크나, No. 1은 낮아서 누수탐지 구간으로 적용하기엔 적절치 않았다.

두 개의 B&K 4370 가속도계는 배관상의 두 지점에 부착되었고, 계측된 신호는 신호증폭기인 B&K의 Nexus, 그리고 Krohn-Hite 3103 필터 (통과대역 3~4 kHz)를 통해 신호분석 전용장비인 B&K의 Pulse System으로 전달 되도록 구성이 되었다. 가속도계간의 거리는 직선구간 54 m, ㄷ자 구간 67 m으로 나누어 모의 시스템(I)에서 누수 위치탐지 실험이 수행되었다.

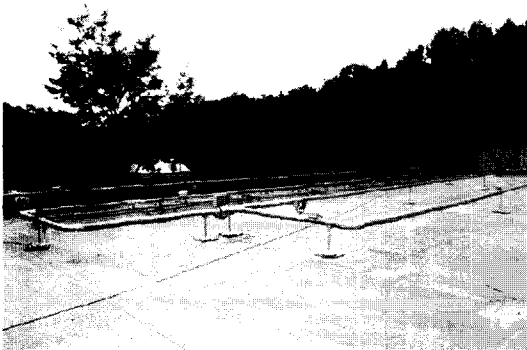


Fig. 5 Leak test facility (I) in KRISS

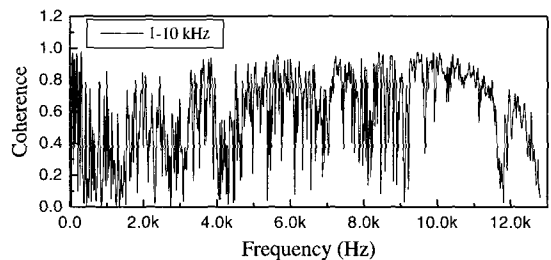
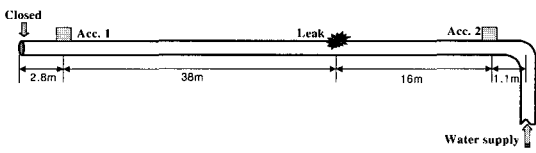


Fig. 6 Determination of frequency range for experiment I. From top to bottom: autospectrum of  $x(t)$ , autospectrum of  $y(t)$ , and coherence function

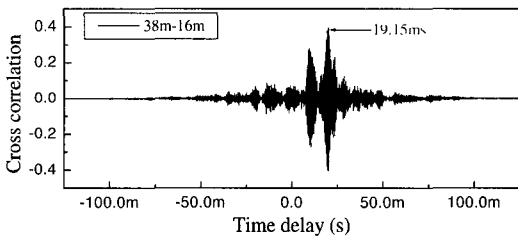
(2) 직선구간 54 m 누수탐지 실험

Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이, 1번 가속도계는 모의 배관시스템(I)의 누수지점에서 좌측으로 38 m, 2번 가속도계는 우측으로 16 m 떨어진 곳의 배관 표면위에 부착하였다.

Fig. 7(b)는 상호 상관함수를 보여 주는데 피크치는 대체로 약 19.15 msec의 시간 지연을 가졌으며, 선명한 제2의 피크가 또한 보이는 데 이는 반사파로 인한 것으로 추정된다. 왜냐하면, 2번 가속도계의 경우 직각으로 굽은 배관이 1.1 m 옆에 위치하고 있음

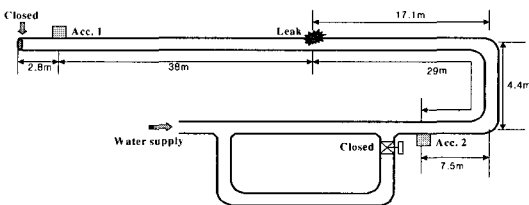


(a) Accelerometers position and leak point

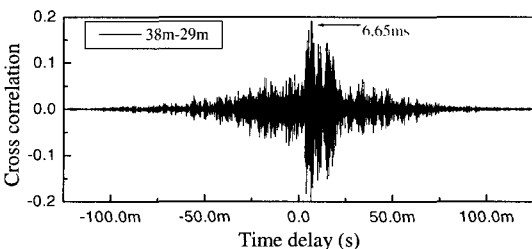


(b) Cross-correlation function

Fig. 7 Result at a straight distance of 54 m



(a) Accelerometers position and leak point



(b) Cross-correlation function

Fig. 8 Result at a U-shaped distance of 67 m

으로 전달되는 음파가 반사되는 현상에 노출되어 있기 때문이다.

많은 횟수에 의한 실험 결과 모의 배관 시스템에서의 음파 전달속도가  $c=1250$  m/sec 으로 나타났으므로, 식 (5)에 의거, 누수 추정거리는  $d_1=38.97$  m 와  $d_2=15.03$  m가 각각 된다. 오차는 0.97 m가 발생하였는데, 이는 구간거리  $D$ 의 1% (0.54 m)를 약간 초과한다.

(3) U자 구간 67 m 누수탐지 실험

Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이, 1번 가속도계는 모의 배관시스템(I)의 누수지점에서 좌측으로 38 m, 2번 가속도계는 우측으로 두 곳의 직각지점을 지난 29 m 떨어진 곳에 부착하였다.

Fig. 8(b)는 상호 상관함수를 보여 주는데 앞의 54 m 실험에 비해서선 덜 선명한 피크치를 보여주나 약 6.65 msec의 시간 지연을 가졌으며, 두 군데의 제2의 피크가 또한 보이는 데 이들은 두 직각지점에서의 반사파로 인한 것으로 추정된다. 음파의 전달속도가  $c=1250$  m/sec 일때, 식 (5)에 의거, 누수 추정거리는  $d_1=37.66$  m 와  $d_2=29.34$  m가 각각 된다. 오차는 0.34 m가 발생하였는데, 이는 구간거리  $D$ 의 1% (0.69 m) 미만이다.

4.2 실험 (II)

(1) 실험 (II) 개요

모의 누수 배관 시스템 (II)는 모의 시스템 (I)의 타당성 실험 및 기초 계측을 바탕으로 실제 상수도 배관에 통상 사용되는 호칭경 150A의 주철관 및 제수변등을 실제와 동일하게 볼트로 체결하여 만들어졌으며 일직선으로 된 전체길이가 약 75 m인 실험 장치이다. 한국표준과학연구원에 설치된 이 장치는 Fig. 9에서 보는 바와 같이, 지면에 모래주머니를 깔 뒤, 그 위에 배관을 놓아 더욱 실제 지하매설 배관에 가깝도록 구성하였으며, 아울러 임의의 누수조절 및 가속도계의 설치 및 측정의 편의를 고려하였다. 이는 실제 지하 매설배관의 경우엔 누수음의 전파 및 감쇠는 주로 관내 유체를 둘러싼 배관 과 배관을 감싸는 흙의 두 매질중 배관의 영향이 훨씬 지배적인것으로 알려져 있기 때문에<sup>(12)</sup> 모의 시스템 (II)도 육상에 설치하였다. 이 모의 시스템 (II)의 두 지점에 누수홀을 가진 구간을 제작하여 볼밸브를 이용 누수를 조절하였는데, 앞의 실험과 마찬가지로 관내 수압은 초기엔

3.6 kgf/cm<sup>2</sup>이나 누수시에는 3.2 kgf/cm<sup>2</sup> 를 보였다. 누수는 공기중으로 분출되도록 고안되었다

본 실험 (II)에서는 탐지주파수 대역이 넓은 것으로 B&K 4370 (상위주파수 4.8 kHz)과 좁은 것으로 B&K 8318C (상위주파수 1.8 kHz) 으로 분간해 사용 되었다. 즉, B&K 8318C 가속도계를 이용 주파수 분석 결과 Fig. 10과 같이 50~60 Hz를 누수탐지 주파수구간으로 결정한후 실험을 수행하였다.

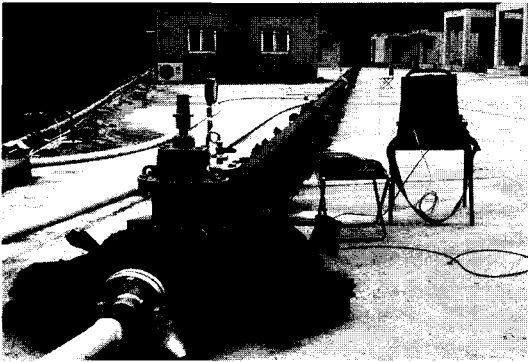


Fig. 9 Leak test facility (II) in KRISS

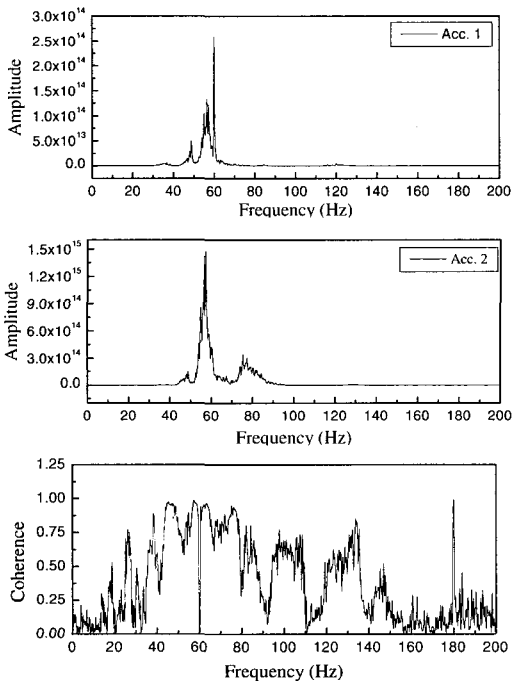


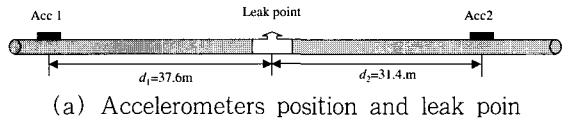
Fig. 10 Frequency range determination for experiment (II). From top to bottom: autospectrum of  $x(t)$ , autospectrum of  $y(t)$ , and coherence function

이는 앞의 실험의 경우인 3~4 kHz에 비해 매우 낮은 주파수 범위로서 누수음의 전파가 식 (2)와 같이 배관의 치수 및 재질에 매우 의존적이며, Hunaidi와 Chu가 밝혔듯이 유체와 배관이 연성된 경우 누수 탐지와 직결된 음파전달과 관련된 진동은 저주파 (예를 들어, 플라스틱배관의 경우 200 Hz이내)에서 나타남을 확인하였다.<sup>(13)</sup> 모의 시스템(I)의 경우 배관이 서로 용접으로 연결된 65A 치수의 강관이었으므로 상대적으로 높은 주파수 대역인 3~4 kHz에서도 누수음의 전파와 연성된 진동이 격심한 감쇠없이 멀리 떨어진 가속도계까지 전달된 것으로 사려된다. 그런데 이와는 달리, 모의 시스템 (II)의 경우엔 50~60 Hz의 저주파에서 연성 진동이 계측된 것은 150 A 치수의 주철관으로 6 m 마다 고무패킹과 함께 체결 부위가 들어 있음으로 인해 감쇠가 심한 고주파보다는 덜 감쇠가 되는 저주파에서 상대적으로 선명한 계측이 이루어 졌다.

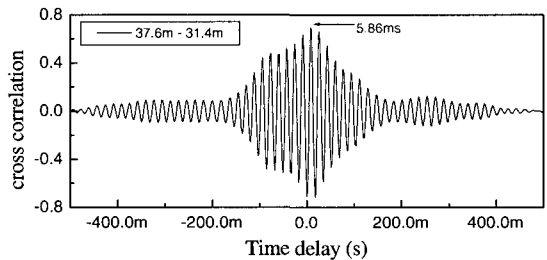
(2) 직선구간 69 m 누수탐지 실험

모의 배관 시스템(II)는 두 개의 누수홀을 가지고 있는데, 1번 누수홀은 중앙에 가깝고 2번 홀은 좌측 끝단에 가깝도록 제작되었다.

1번 누수홀에 대한 실험의 경우, Fig. 11(a)에서 보는 바와 같이, 1번 가속도계는 모의 배관시스템(II)의 누수지점으로 부터 좌측으로 37.6 m, 2번 가속도계는 우측으로 31.4 m 떨어진 곳에 부착하였다. Fig. 11(b)는 통과대역필터를 50~60 Hz로 둔 뒤 얻어진 상호 상관함수를 보여 주는데 피크치는 약 5.86 msec



(a) Accelerometers position and leak point



(b) Cross-correlation function

Fig. 11 Result at a straight distance of 69 m for leak hole No.1



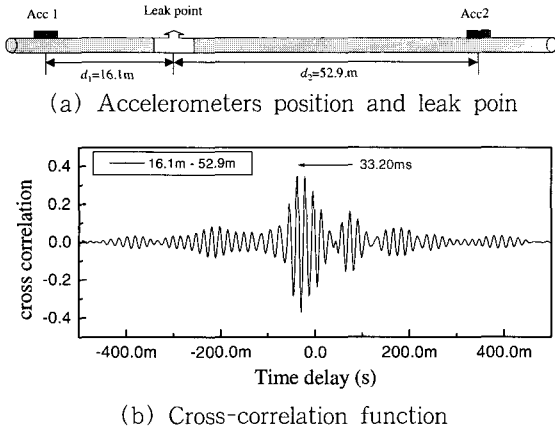


Fig. 12 Result at a straight distance of 69 m for leak hole No.2

의 시간 지연을 가졌다. 많은 횟수에 의한 실험 결과 모의 배관 시스템(II)에서의 음파 전달속도가  $c = 1150 \text{ m/sec}$  으로 나타났으므로, 식 (5)에 의거, 누수 추정거리는  $d_1 = 37.86 \text{ m}$  와  $d_2 = 31.13 \text{ m}$  가 각각 된다. 오차는 0.22 m가 발생하였는데, 이는 구간거리  $D$ 의 0.3 %에 해당하는 탐지성능을 보여 주었다.

2번 누수홀에 대한 실험의 경우, Fig. 12(a)에서 보는 바와 같이, 1번 가속도계는 모의 배관시스템(II)의 누수지점으로 부터 좌측으로 16.1 m, 2번 가속도계는 우측으로 52.9 m 떨어진 곳에 부착하였다. Fig. 12(b)는 통과대역필터를 50~60 Hz로 둔 뒤 계측된 상호 상관함수를 보여 주는데 피크치는 약 33.20 msec의 시간 지연을 가졌다. 이 경우에도 음파 전달속도  $c = 1150 \text{ m/sec}$  를 식 (5)에 적용시키면, 누수 추정거리는  $d_1 = 15.41 \text{ m}$  와  $d_2 = 53.59 \text{ m}$  가 각각 된다. 오차는 0.69 m가 발생하였는데, 이는 구간거리  $D$ 의 정확히 1 %에 해당하는 탐지성능을 보여 주었다.

### 5. 결론

가속도계를 이용한 상수도 배관의 누수지점 탐지를 위한 이론적 연구 및 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 배관의 누수로 인한 음향 탄성파의 분류와 전파속도 그리고 탄성파 계측 센서에 의한 탐지메카니즘을 이론적으로 분석하였다.
- (2) 누수음의 전파속도는 배관의 재질 및 치수에

따라 달라지며, 분산적인 특성을 가지며 누수지점의 탐지에 결정적으로 중요하다.

(3) 누수탐지를 위한 계측에 사용되는 주파수 대역은 배관의 치수 및 재질 그리고 관내 유체의 물리적 성질에 따라 달라 질수 있음을 실험적으로 확인할 수 있었다.

(4) 저주파범위에서 계측하는 가속도계의 경우 계측된 신호의 주파수 대역은 누수음의 계측과 연관성이 있으며, 필터링 및 신호처리 과정을 통해 도착시간차를 계산하여 충분히 정확한 누수지점을 탐지해 내었다. 가속도계를 이용하여 감쇠가 상대적으로 적은 저주파에서 누수음과 연성된 배관의 진동을 계측하여 센서간 거리가 69 m인 경우에도 매우 정밀한 누수위치를 탐지하였다.

### 후 기

본 연구는 환경부의 차세대 핵심환경기술사업인 "탄성파 기술을 이용한 상수도 누수탐지 감시시스템 개발" 과제에 대한 연구결과의 일부임을 밝히며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) 안윤주, 이현동, 1995, "국내 중소도시 수도관의 파괴특성에 관한 고찰," 한국수자원학회, 춘계학술대회논문집, pp. 48~51.
- (2) 환경부 수도정책과, 2002, "2001 상수도 통계," 환경부.
- (3) Palmer Environmental, MicroCorr, Palmer Environmental Services.
- (4) Fuji Telecom Inc, 1997, Super Correlator Model: LC-7000, Fuji Telecom Inc.
- (5) Liston, D. A. and Liston J. D., 1992, "Leak Detection Techniques," Journal of New England Water Works Association, Vol. 1206, No. 2, pp. 103~108.
- (6) Hunaidi, O. and Giamou, P., 1998, "Ground-penetrating Radar for Detection of Leaks in Buried Plastic Water Distribution Pipes", 7th Int'l Conf. on Ground-penetrating Radar, Kansas, USA, pp. 783~786.

- (7) Brainard, F. S., 1979, "Leakage Problems and the Benefit of Leak Detection Programs," *Journal of American Water Works Association*, pp. 64~65.
- (8) Shaw Cole E., 1979, "Methods of Leak Detection: Overview," *Journal of American Water Works Association*, pp. 73~75.
- (9) Akizuki, K., et al, 1979, "Detection of Water Leakage Point Using Cross Correlation Methods," *Proceedings of IMEKO Symp. Flow Measurements and Control in Industry*, Tokyo, pp. 199~204.
- (10) Fuchs, H. V. and Riehle R., 1991, "Ten Years of Experience with Leak Detection by Acoustic Signal Analysis," *Applied Acoustics*, Vol. 33, pp. 1~19.
- (11) Pinnington, R. J. and Briscoe A. R., 1994, "Externally Applied Sensor for Axisymmetric Waves in a Fluid Filled Pipe," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 173, No. 4, pp. 503~516.
- (12) Muggleton, J. M., Brennan, M. J. and Pinnington, R. J., 2002, "Wavenumber Prediction of Waves in Buried Pipes for Water Leak Detection," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 249, No. 5, pp. 939~954.
- (13) Hunaidi, O. and Chu W. T., 1999, "Acoustical Characteristics of Leak Signals in Plastic Water Distribution Pipes," *Applied Acoustics*, Vol. 58, pp. 235~254.
- (14) Fantozzi, M., Di Chirico, G., Fontana, E., Fontana, E. and Liston, D. A., 1993, "Leak Inspection on Waterlines by Acoustic Emmission With Cross-correlation Method," *Annual Conference Proceedings, American Water Works Association, Engineering and Operations*, pp. 609~621.
- (15) Bendat J. S. and Piersol A. G., 1991, *Random Data*, John Wiley & Sons.
- (16) Fuller, C. R. and Fahy, F. J., 1982, "Characteristics of Wave Propagation and Energy Distributions in Cylindrical Elastic Shells Filled with Fluid", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 81, No. 4, pp. 501~518.
- (17) Fahy, F. J., 1985, *Sound and Structural Vibration-Radiation, Transmission and Response*, Academic Press, London.