

## 상수도 배관에서 두 지점의 동시 누수에 따른 신호특징 분석

# Analysis on Signal Properties due to Concurrent Leaks at Two Points in Water Supply Pipelines

이영섭

Young-Sup Lee

**초 록** 스마트 워터 그리드와 같은 지하매설 상수도 배관망을 구성할 때 누수 지점에 대한 지능적 탐지는 중요한 요소이다. 이런 지능형 배관망의 구성에는 많은 수의 누수탐지센서를 일정한 간격으로 설치하는 것이 필요하며 이들 센서에서 계측되는 신호를 분석해서 누수 유무 및 누수발생시 그 지점의 추정을 신속히 할 수 있어야 한다. 그래서 본 연구에서는 특히 두 지점에서 동시에 누수가 발생하는 경우에 대해 그 센서가 측정하는 신호가 가지는 특성 및 두 누수지점 동시 추정 가능성을 심도있게 분석하였다. 즉, 센서간 거리가 315.6 m 인 100A 사이즈의 주철관 상수도 배관에 대해 두 지점 동시 누수시 각각의 개별 센서신호를 계측하였으며, 그 신호를 기반으로 주파수 특성 및 상호상관함수 등의 분석을 통해 두 지점의 누수탐지에 대해 기술하였다.

**주요용어:** 두 지점 동시 누수, 교차상관관계, 신호 해석, 도달 시간 차이, 누수탐지

**Abstract** Intelligent leak detection is an essential component of a underground water supply pipeline network such as a smart water grid system. In this network, numerous leak detection sensors are needed to cover all of the pipelines in a specific area installed at specific regular distances. It is also necessary to determine the existence of any leaks and estimate its location within a short time after it occurs. In this study, the leak signal properties and feasibility of leak location detection were investigated when concurrent leaks occurred at two points in a pipeline. The straight distance between the two leak sensors in the 100A sized cast-iron pipeline was 315.6 m, and their signals were measured with one leak and two concurrent leaks. Each leak location was described after analyzing the frequency properties and cross-correlation of the measured signals.

**Keywords:** Concurrent Leaks at Two Points, Cross-Correlation, Signal Analysis, Time Arrival Difference, Water Leak Detection

### 1. 서 론

지하에는 다양한 수도 및 가스과 같은 사회의 중요한 기반시설이 매설되어 있어 이의 파손이 상당한 사회적 경제적 손실이 발생한다. 이에 따라 오랜 기간에 걸쳐 이들 배관들의 파손을 방지하는 기술 및 파손 발생시에 이를 조기에 탐지하기 위한 다양한 기술들이 연구되어 왔다[1-4]. 특히 지하에 매설된 상수도 배관에서 발생하는 누수의 경우 육안으로 확인이 곤란해서 누수 존재

유무 및 누수 위치를 탐지하기 위한 다양한 센서의 개발 및 누수 신호 처리방법이 개발되어 왔다 [3-8].

최근의 지하매설 상수도 배관에 대한 지능적 배관망을 구성하려는 스마트 워터 그리드(smart water grid)에 대한 연구도 심화되고 있는데, 그에 대응하는 누수탐지 센서 네트워크도 중요한 주제가 되고 있다. 이 네트워크에서는 어떤 지역에 대해 설치된 배관망에 대해 고정형의 누수탐지 센서를 일정한 간격으로 배치하여 매우 신속하고

[Received: January 18, 2015, Revised: January 27, 2015, Accepted: February 3, 2015] 인천대학교 임베디드시스템공학과, Department of Embedded Systems Engineering, Incheon National University, Incheon 406-772, Korea (E-mail: YSL@incheon.ac.kr)

© 2015, Korean Society for Nondestructive Testing

정확하게 누수 유무 및 누수 지점을 탐지하는 기능이 요구되고 있다.

이러한 기능을 경제성을 가지며 지속적으로 수행하기 위해서는 무인화가 요구되고 또한 신속하고 정확한 누수 탐지 알고리즘의 개발이 요구되고 있다.

이미 산업계에서는 청음봉, 그라운드 마이크폰, 하이드로폰 및 가속도계 등의 센서를 기반으로 다양한 형태의 누수탐지 시스템들이 상업적으로 국내외에 판매되고 있으며[3-5], 이들의 탐지 기술은 센서에서 측정된 신호 분석에 의해 수행된다. 하지만, 이 신호분석 기술은 공개되지 않고 간략히 논문에서 소개되는 실정이다[6-8].

또한 타 연구에서 취급된 것은 주로 단일 지점의 누수에 대한 것으로 실제 낡은 배관의 경우 일정한 거리에서 두 지점 이상에서도 누수가 생길 수도 있다. 그래서 본 연구에서는 단일 지점뿐 아니라 두 지점에서의 누수에 대해서 측정된 신호를 바탕으로 그 신호의 특성에 대해 심도있게 분석하고자 하였다.

이러한 두 지점 누수신호에 대한 분석은 단일 지점 누수에 대한 분석과의 비교를 통해 지하매설 배관의 누수 현상에 대한 심화된 이해를 제공해 줄 수 있을 것이다.

참고로 본 논문에서는 주철관에 대해서 언급을 하고 있는데 이 주철관은 플라스틱관에 비해서 누수신호의 거리 전파에 따른 감쇠가 적어 비교적 누수지점 탐지가 용이한 측면이 있다.

2장에서는 지하매설 배관의 누수탐지의 대한 이론을 전개하고, 3장에서는 실험 대상 및 실험 방법 구리고 컴퓨터 시뮬레이션에 대한 언급을 하고, 4장에서는 실제 지하매설 배관의 누수 탐지 실험 결과에 대해 단일 지점 누수 및 두 지점 누수에 대해 측정된 신호를 기반으로 다양한 측면에서 신호를 분석한다.

## 2. 이론

### 2.1. 두 지점 누수에 대한 탐지 원리

Fig. 1과 같이 유체가 가득 찬 지하매설 배관의 두 지점에 누수가 발생할 때 두 개의 센서(예. 가속도계)를 거리  $D$ 의 간격으로 두 누수지점을 사이에 두고 배관 외면에 설치하고, 각 센

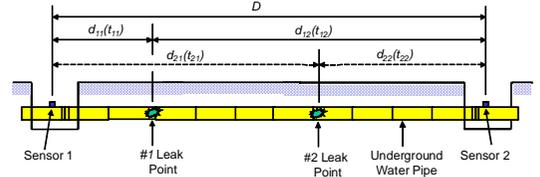


Fig. 1 Multiple leak location detection based on the cross-correlation function

서에 도달하는 누수신호 도달시간 차이의 계산이 가능하면, 아래의 식에 의해 두 누수위치를 탐지할 수 있다[7].

$$d_{i2} = (D - c \cdot \Delta t_i) / 2, \quad d_{i1} = D - d_{i2} \quad (1)$$

여기서,  $i$ 는  $i$ 번째 누수 지점,  $c$ 는 서로 연성된 거동 특성을 가지는 배관과 관내 유체간의 상호작용에 의한 누수 신호의 전파속도(propagation speed)이고,  $\Delta t_i = t_{i2} - t_{i1}$ 는 도달시간차이다.  $d_{i1}$ 은 1번 센서로부터  $i$ 번째 누수 위치까지의 거리이고,  $d_{i2}$ 는 2번 센서로부터  $i$ 번째 누수 위치까지의 거리이다.

그리고, 두 센서 신호  $x$  및  $y$ 에 대한 상호상관 함수(cross-correlation function)를 계산하면 누수신호의 도달시간차를 추정할 수 있다. 즉, 두 곳의 누수지점 위치  $d_{i1}$ 과  $d_{i2}$ 는  $c$ 와  $\Delta t_i$ 를 알 수 있으면 추정 가능하다는 의미이다.

### 2.2. 두 지점 누수 신호

다중의 누수신호 및 노이즈를 포함한 두 센서에서 측정된 신호  $x(t)$ 와  $y(t)$ 가 다음과 같이 주어질 때,

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum_{i=1}^I \alpha_i s_i(t) + n_x(t) \\ y(t) &= \sum_{i=1}^I \beta_i s_i(t - \Delta t_i) + n_y(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $\alpha_i$  및  $\beta_i$ 는  $i$ 번째 누수지점으로부터 각각 1번 및 2번 센서로 전파되면서 누수지점으로부터 센서위치까지의 거리에 의해 감쇠된 후의 진폭인자(amplitude factor)들이다. 이때  $s_i(t)$ 는 순수한  $i$ 번째의 누수신호로서 평균이 영(zero)이고, 시간에 따라 통계학적 특성값이 변하지 않는

stationary 랜덤 신호로 가정한다.  $n_x(t)$  및  $n_y(t)$  는 각각의 센서에서 계측된 노이즈이다.

### 2.3. 두 지점 누수에 대한 도달시간차 추정

식 (2)에 의해 정의되는 센서가 계측하는 두 누수신호는 연속적이고 랜덤해서 신호간의 도달 시간차는 상호상관함수(cross-correlation function)를 통해 추정할 수 있는데, 이는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$R_{xy}(\tau) = E[x(t)y(t+\tau)] = \sum_{i=1}^I \frac{\beta_i}{\alpha_i} R_{x,x,i}(\tau - \Delta t_i) + R_{n_x n_y}(\tau) \quad (3)$$

이때  $\gamma_i = \beta_i/\alpha_i$ 로서 상대적인 진폭비(relative amplitude ratio) 이고,  $E [ \ ]$ 는 두 누수신호 곱의 앙상블 평균(ensemble average) 이다. 그래서 노이즈  $n_x(t)$  및  $n_y(t)$ 가 상호 연관되어 있지 않다면, 식(3)의 성분인  $R_{n_x n_y}(\tau) = 0$ 이 된다. 그래서 창함수(window function)  $w(\tau)$ 를 적용한 식 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$R_{xy}^w(\tau) = w(\tau) \sum_{i=1}^I \gamma_i R_{x,x,i}(\tau - \Delta t_i) \quad (4)$$

창함수는 센서 신호의 특징에 따라 다양한 형태가 존재할 수 있다. 즉, Fig. 2(b)와 같이 상호상관함수는 누수신호의 도달시간차  $\Delta t_i$ 를 가진  $x(t)$  신호의 자기상관함수(auto-correlation function)로 표현된다.

식 (4)에 정의된 이론적 수식은 두 지점의 누수가 발생하는 경우에 적용하면, Fig. 2와 같은 두 개의 피크를 가지는 상호상관함수 그래프를 얻을 수 있음을 보여 준다.

### 3. 실험 및 컴퓨터 시뮬레이션 개요

Fig. 3은 지상 포장도로면 기준으로 약 1.5 m 아래에 매설된 상수도 주철관(100 A 치수, 내부 수압 5 bar)에 대해 2곳의 지점에 대해 한 지점씩 강제로 누수를 시켜 누수신호를 측정하였다. 두 개의 센서를  $D = 315.6$  m 의 간격을 두었고, 실험에서 측정된 센서신호는 단일지점 누수에 대한 것이다.

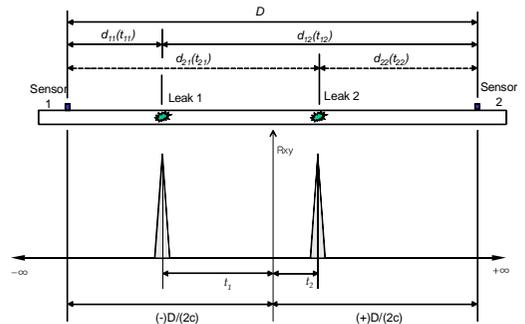


Fig. 2 Suggested algorithm for estimating leak location from measured sensor signals

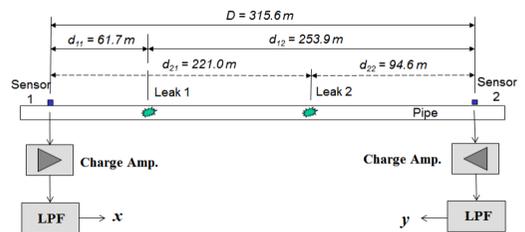


Fig. 3 Measurement set-up for two leaks in the pipeline

실험을 위해 배관의 정해진 두 지점에 각각 천공을 하였으며 각 천공지점에는 25 mm 직경의 볼밸브를 설치하여 강제로 개방각도(최대 90도) 조절이 가능한 누수가 되도록 하였다. 누수 조절 밸브의 개방각도가 클수록 누수량이 증가하여 누수신호의 세기가 증가하도록 되어있다. 실험을 위해 누수 조절밸브를 90도, 45도, 30도의 3가지 개방각도를 사용하여 측정하였다. 측정을 위해 사용된 센서1 및 2는 각각 B&K 8313C 가속도계였고, 샘플링 주파수는 2048 Hz를 적용하였다. 그리고 Fig. 3과 같이 센서 신호들은 B&K Nexus charge amplifier와 LPF (차단주파수 = 800 Hz)를 통과한 뒤 신호분석기에 저장되었고, 이후 PC로 분석을 하였다. 1번 및 2번 센서에서 계측된 신호를 식(2)와 같이 각각  $x$ 와  $y$ 로 정의하였다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이, 제1 누수지점은  $d_{11} = 61.7$  m,  $d_{12} = 253.9$  m인 위치, 제2 누수지점은  $d_{21} = 221.0$  m,  $d_{22} = 94.6$  m 인 위치로 각각 설정하고 컴퓨터 시뮬레이션 및 실제 실험을 수행하였다. 시뮬레이션에서 사용된 누수신호로서는 LPF를 통과한 백색잡음을 사용하였다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과 분석

4.1. 단일 및 두 지점 누수 시뮬레이션 결과 분석

3절에서 정의된 두 지점 누수실험 조건과 동일한 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 식(4)에 적용한 결과 얻어진 상호상관함수 그래프를 Fig. 4에 나타내었다. 여기에 적용된 창함수는 maximum likelihood(ML) 기법을 적용하였는데, 이것은 누수 탐지에 있어 타 기법에 비해서 상대적으로 우수한 결과를 제시하는 것으로 알려져 있다[7,8].

Fig. 4(a)와 (b)는 단일지점 누수 2군데 (제1 및 제2 누수지점, Fig. 3 참조)의 각각의 경우에 대한 정규화된 상호상관함수 그래프로서 제1 누수 추정 지점은  $d_{11} = 61.41$  m,  $d_{12} = 254.19$  m인 위치, 제2 누수 추정지점은  $d_{21} = 220.91$  m,  $d_{22} = 94.69$  m인 위치였다. 오차는 각각의 경우 0.29 m 및 0.09 m로서 매우 미소하였다(이때 누수신호 전파속도 1350 m/sec로 추정하였다.).

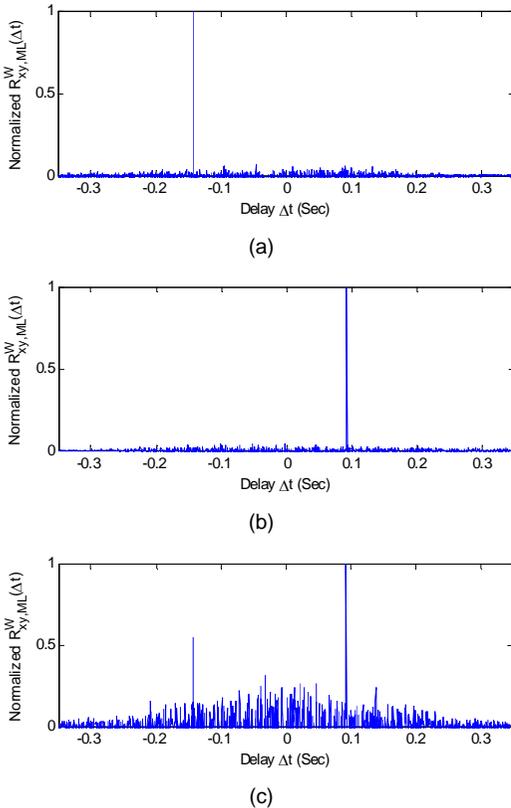


Fig. 4 Measured sensor signals x and y in time domain. (a) Leak 1 only, (b) Leak 2 only

4.2. 단일 지점 누수의 신호특징 분석

Fig. 3에 표시된 각각의 단일 지점 누수에 대해 서 두 센서들이 측정한 뒤 정규화시킨 시간영역 신호들은 Fig. 5와 같이 나타나는데, 누수신호의 백색잡음으로 표현할 수 있는 신호의 특성을 가지고 있다[8]. Fig. 5(a)는 1번누수에 대한 센서 신호( $x_1$  및  $y_1$ )이고, Fig. 5(b)는 2번누수에 대한 센서 신호( $x_2$  및  $y_2$ )이다. 각각의 경우 누수 조절밸브의 개방각도는 최대인 90도를 유지하였다.

누수지점으로부터 거리가 증가함에 따라 지수함수적으로 그 신호의 크기가 감소하게 됨을 잘 보여 주고 있는데, 신호의 크기가 큰 순서대로 나열하면  $x_1, y_2, x_2, y_1$  순서가 된다. 정규화한 신호의 상대적 표준편차를 계산한 결과 Table 1 과 같이 순서대로 1, 0.0382, 0.1313, 0.7006이 구해졌다.

이것은 누수지점으로부터 가까운 센서의 순서와 같다. 즉, 센서와 누수지점 간의 거리 크기는  $d_{11} < d_{22} < d_{21} < d_{12}$  이기 때문이다.

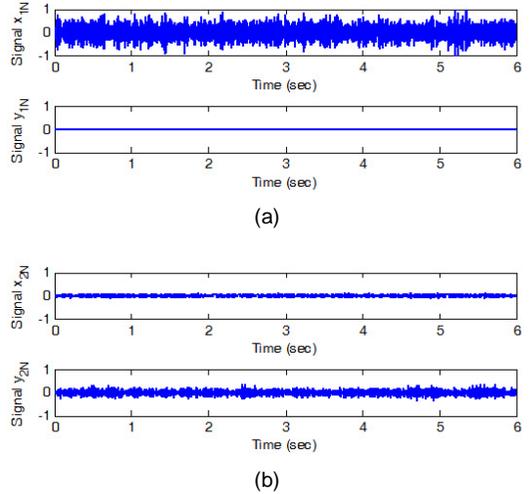


Fig. 5 Measured sensor signals x and y in time domain. (a) Leak 1 only, (b) Leak 2 only

Table 1 Magnitudes of measured leak signals

Leak	Sensor Signal	Relative Standard Deviation	Max( x / y  ,  y / x )
Leak 1	x1	1.0000	26.1528
	y1	0.0382	
Leak 2	x2	0.1313	5.3380
	y2	0.7006	

Fig. 6은 센서 신호들에 대한 코히어런스 함수(coherence function)를 나타낸 것인데, 이것은 특정 누수지점에 대해서 측정된 센서 신호간의 크기비가 클수록 (1번누수의 경우: 26.2, 2번누수의 경우: 5.3) 더 낮은 값을 보여 주고 있다 (Table 1 참조). 이러한 두 신호 간의 신호 크기의 격차는 특히 누수지점으로부터 먼 거리의 센서 신호의 신호대 잡음비(signal to noise ratio, SNR)에 영향을 주어 코히어런스 함수의 값이 낮아지게 되는 원인을 제공한다.

그래서 센서간 거리  $D$ 가 멀어질수록 누수탐지는 난이도가 지수함수적으로 증가한다. 그래서 2번누수의 경우가 탐지에 1번누수에 비해서 더 탐지가 용이하다. 즉,  $\text{abs}(d_{11} - d_{21})$ 과  $\text{abs}(d_{12} - d_{22})$  중에서 그 값이 작을수록 더 탐지에 유리하다.

또한, 각 단일 지점 누수에 대해 측정된 신호  $x_1$ 과  $y_1$  그리고  $x_2$ 와  $y_2$ 간의 주파수응답함수(frequency response function)를 Fig. 7(a)와 (b)에 각각 나타내었는데, 주파수에 따른 크기  $|T_{xy}(f)|$ 와 위상  $\angle T_{xy}(f)$ 을 보여준다.

특히, Fig. 7(a)와 (b)의 위상 그림은 중요한 정보를 제공하는데, 위상응답에서 공통적으로 100 - 800 Hz의 구간에서 선형위상(linear phase)이라는 중요한 특성을 확인할 수 있다. 센서1에 가까운 경우 주파수 증가에 따른 위상 기울기가 (-), 센서2에 가까운 경우는 (+)로 나타남이 확인된다. 1번누수의 경우 누수지점과 각 센서 거리의 차이인  $\text{abs}(d_{11} - d_{21})$  값이 2번누수의 경우인  $\text{abs}(d_{12} - d_{22})$ 보다 더 크므로 기울기의 크기가 더 크게 그려진다. 이 주파수 구간에서 위상응답에 대하여 아래의 식을 통해 신호간의 시간지연 및 누수신호의 전파속도를 추정하였다.

$$\frac{d}{df} \{ \angle T_{xy}(f) \} = -2\pi \Delta t \quad (5)$$

즉,  $c = (d_{i2} - d_{i1}) / \Delta t_i \approx 1350 \text{ m/s}$  이 된다.

Fig. 8(a)와 (b)는 maximum likelihood(ML) window를 적용한 뒤 계산된 각각 1번누수 및 2번누수의 상호상관함수 그래프이다. 1번 단일 누수의 경우 -0.1477 sec 이고, 2번 단일누수의 경우는 +0.0955 sec 로서 제1 누수추정 지점은  $d_{11} = 58.10 \text{ m}$ ,  $d_{12} = 257.50 \text{ m}$  인 위치, 제2 누수 추정

지점은  $d_{21} = 222.26 \text{ m}$ ,  $d_{22} = 93.34 \text{ m}$ 인 위치였다. 그리고 식(1)에 이 결과를 대입하여 각각의 누수지점을 추정하였는데 오차는 각각의 경우 3.60 m 및 1.26 m로서 미미하였다.

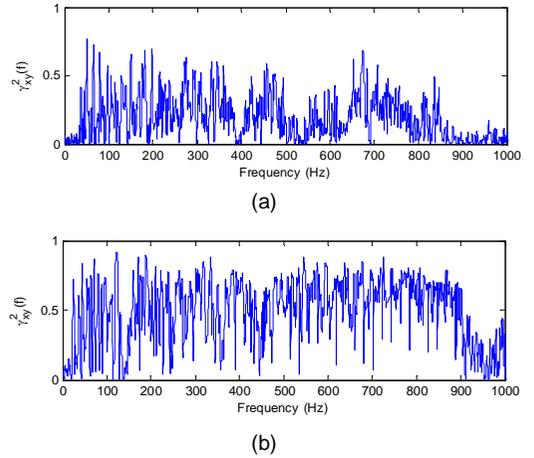


Fig. 6 Measured coherence functions between x and y. (a) Leak 1, (b) Leak 2

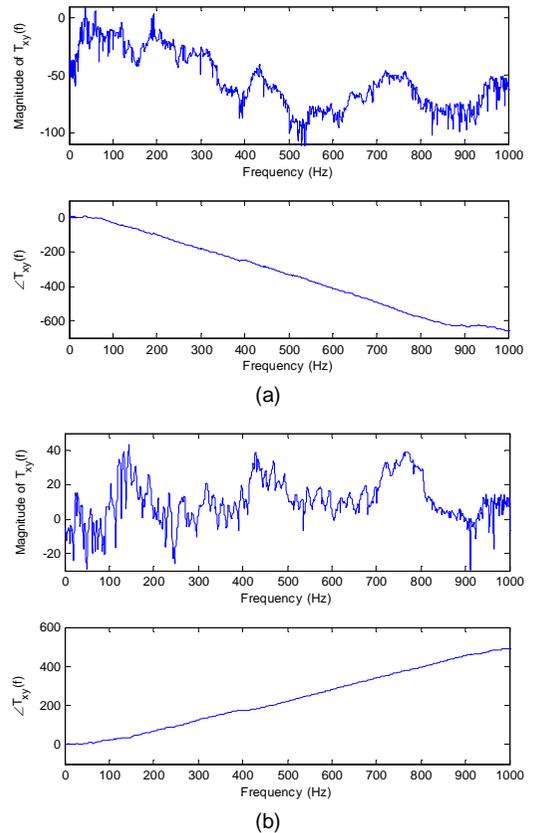


Fig. 7 Measured transfer functions between x and y. (a) Leak 1, (b) Leak 2

4.3. 두 지점 누수의 신호 분석

Fig. 3과 같은 조건으로 동시에 두 지점에서 누수가 발생하도록 누수 조절밸브를 최대개방각도 (90도)를 적용한 경우에 측정된 센서신호를 이용해서 Fig. 9(a)의 코히어런스 함수 및 (b)의 주파수 응답함수 그리고 (c)의 상호상관함수를 구하였다.

코히어런스 함수의 경우 Fig. 6의 단일 지점의 그래프에 비해 현저하게 낮아진 것을 보여 주었고, 특히 약 300 Hz 이상에서의 값은 미미함을 알 수 있다. 그리고 주파수응답함수 그래프의 위상은 Fig. 7과 같은 일정한 형태의 위상기울기를 갖지 못하고 위상기울기가 등락을 거듭하는 형태로 나타났다. 즉, 약 300 Hz까지는 기울기가 증가하다가 이후 약 500 Hz까지 감소하였고, 다시 약 700 Hz까지 증가한 다음 완만한 기울기로 감소함을 보여 주었다.

그리고 Fig. 9(c)의 상호상관함수 그래프는 Fig. 4(c)와 같은 선명한 두개의 피크가 나타나지 않고 크기 차이가 많지 않은 더 많은 개수의 피크가 나타났다. 이 그래프로부터 가장 큰 두 군데의 피크는 -0.0408 sec 와 +0.0989 sec의 값을 가졌다. 이를 식(1)에 의해 계산하면, 한 지점은  $d_{11} = 130.26$  m,  $d_{12} = 185.34$  m인 위치, 다른 지점은  $d_{21} = 224.56$  m,  $d_{22} = 91.04$  m인 위치였다. 이들 지점들은 실제 누수위치와 비교하면 제1 누수위치와는 68.56 m의 오차, 제2 누수지점과는 2.01 m의 오차를 각각 보였다.

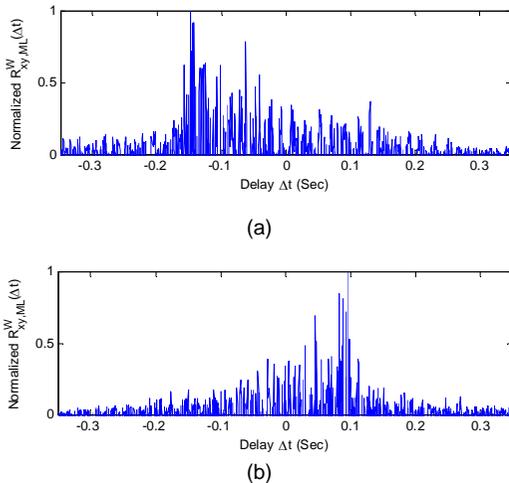


Fig. 8 Estimated time delays. (a) Leak 1, (b) Leak 2

Fig. 9(a)의 코히어런스 함수 그래프로부터 약 300 Hz 이하에서 상대적으로 큰 값을 보여 주고 있으며, 아울러 Fig. 9(b)의 위상 그래프에서 위상의 기울기가 약 300 Hz까지는 증가하는 것으로 확인된다. 이것은 Fig. 7(b)의 경우와 같이 누수지점이 센서2에 가까이 위치한다는 것을 의미한다. 즉, Fig. 9(c)의 상호상관함수에서 (+) 시간지연에서 가장 큰 피크(+0.0989 sec)가 가장 유력한 누수 지점이 되는 것으로 판단할 수 있다. 특히 이것은 Table 1에서 보는 것과 같이 2번누수신호 ( $x_2, y_2$ ) 간의 크기비가 5.3으로서 1번누수신호 ( $x_1, y_1$ )의 26.2에 비해 현저하게 적어서 신호의 상관성이 상대적으로 높아서 누수 지점 탐지에 좀 더 유리하다. 또한 이것은 지하매설 상수도 배관에서 누수

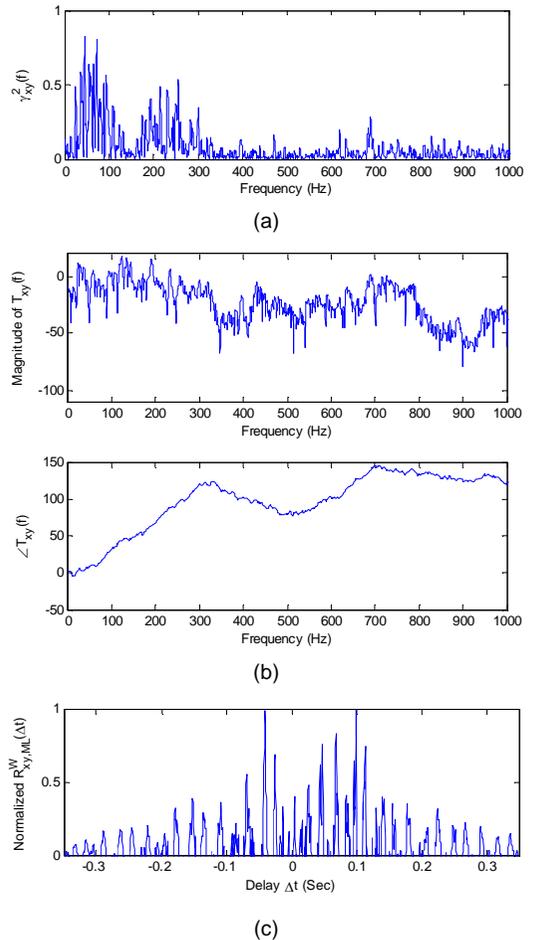


Fig. 9 Multiple leak detection results for both No.1 and No.2 leaks. (a) coherence, (b) frequency response function, (c) cross-correlation

신호의 거리에 따른 전파는 저주파일수록 누수 지점 탐지에 유리함도 확인하였다.

이상과 같이 한 지점의 누수위치는 상당히 높은 정확도로 추정할 수 있었다.

그리고 두 번째 누수지점을 찾기 위해서 Fig. 9(c)의 그 다음으로 큰 피크인 -0.0408 sec 지점을 고려할 수 있지만, 이 부분은 (-)의 시간지연으로서 위상그래프의 기울기가 (-)로 나와야 한다. 하지만 Fig. 8(b)에서 보는 것처럼, 위상기울기가 (-)인 부분은 약 300 - 500 Hz 구간에 위치하는데, 이 구간의 코히어런스 값은 Fig. 9(a)에 보는 것처럼 매우 낮아서 센서 신호간의 상관성이 거의 없다. 이로 인해 2번째 피크에 의한 또 다른 누수지점의 추정은 큰 오차를 초래하였다.

아울러 Fig. 9(c)에는 1번째 및 2번째 피크 이외에도 몇 개의 피크가 보이긴 하나, 이들은 모두 노이즈로 인한 것들이다.

#### 4.4. 누수 조절밸브 개방각도에 따른 두 지점 누수의 신호 분석

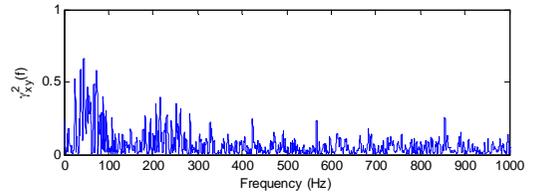
비록 단일 누수지점 추정에는 우수한 성능을 보이는 식(4)의 알고리즘을 사용하더라도, 앞에서 언급된 두 지점 동시 누수지점 추정시에는 그 정확도가 급격히 악화되었다. 앞의 두 지점 동시 누수에 대한 결과는 두 지점 모두 누수 조절밸브의 개방각도를 최대(90도)로 개방하였을 때의 결과이다. 두 누수 지점으로부터 각각 발생하는 누수신호는 동일한 내부 수압을 받고 있으므로 각각의 신호는 상호 혼합되면서 특히 300 Hz 이상의 주파수 대역에서 상호 노이즈로 작용하고 있음을 확인하였다.

그래서 1번 누수 조절밸브의 개방각도는 90도로 그대로 둔 채, 2번 누수 조절밸브의 개방각도를 45도 및 30도로 각각 변경시키면서 두 가지 경우 (즉, 1번 밸브: 2번 밸브 = 90도 : 45도, 90도 : 30도)의 누수신호를 측정하였다. 즉, 누수량을 조절하여 누수의 크기변화에 따른 영향을 분석하고자 하였다.

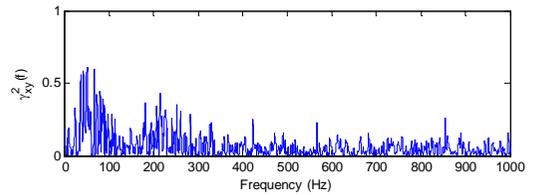
Fig. 10은 이 두 경우의 코히어런스 함수인데 Fig. 9(a)의 그래프 (90도 : 90도)와 차이는 거의 없지만, 약 300 Hz 이상에서 미미한 증가가 나타났다.

Fig. 11(a)와 (b)는 두 경우 각각의 상호상관함

수를 보여 준다. 2번 조절밸브의 각도가 45도 인 경우에는 Fig. 11(a)에서 보는 것처럼 노이즈에 기인한 시간지연 피크들이 뚜렷이 추가로 나타나서 2번누수로 인한 피크 (시간지연 +0.09 sec 위치)가 오히려 묻히기 시작했으며, 1번누수로 인한 피크 (시간지연 약 -1.4 sec 위치)가 중간정도의 크기로 나타났다.

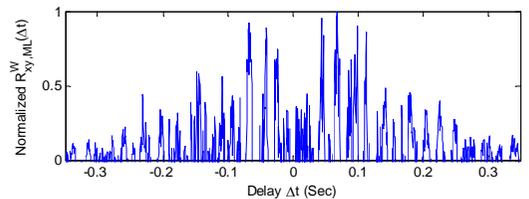


(a)

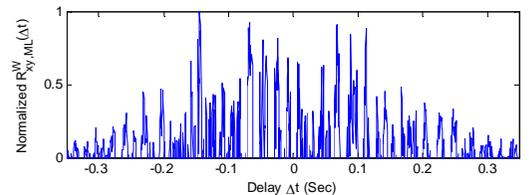


(b)

Fig. 10 Coherence functions at different leak control valve opening angles with two leaks. (a) Leak 1 (90 degree full), Leak 2 (45 degree), (b) Leak 1 (90 degree full), Leak 2, (30 degree)



(a)



(b)

Fig. 11 Cross-correlation functions at different leak control valve opening angles with two leaks. (a) Leak 1 (90 degree full), Leak 2 (45 degree), (b) Leak 1 (90 degree full), Leak 2 (30 degree)

2번 조절밸브의 각도를 30도로 줄이니 Fig. 11(b)에서 보는 것과 같이 1번누수에 기인한 시간지연의 피크가 가장 뚜렷해 졌다. 반면 2번 누수로 인한 피크는 주변의 2개의 노이즈 피크와 같이 나타났다.

즉, 2군데에서 동시에 누수가 발생하는 경우 다음과 같이 판단할 수 있다.

- 1) 각 누수지점별 누수량의 차이가 심한 경우: 누수량이 큰 쪽의 누수지점을 큰 오차없이 찾을 수 있다. 그러나 누수량이 작은 쪽의 누수지점 추정은 누수량이 큰 쪽의 누수지점을 수리한 이후에 현실적으로 가능하다.
- 2) 각 누수지점별 누수량의 차이가 작을 경우: 앞에서 분석한대로 위상변화 및 코히어런스 함수에 대한 정밀한 분석이 요구된다. 특히 저주파수 대역에서의 신호특성에 의미있게 나오면 누수량의 크기 차이가 비교적 작아도 한 군데의 누수지점은 찾을 수도 있다.

## 5. 결 론

본 연구는 동시에 2 군데의 누수지점을 가지는 지하배설 배관에서 그 누수로 인한 신호의 특성에 대한 분석과 그 두 누수지점을 탐지하기 위한 기법에 대해 실험을 통해 측정된 신호를 기반으로 기술한 것이다. 기존에 알려진 우수한 누수탐지 기법들도 동시에 2군데에서 발생하는 경우 상호 누수신호간의 간섭현상 등으로 인해 누수지점 탐지에 필수적인 신호정보가 노이즈에 의해 불명확해 지는 것이 확인되었다. 하지만 센서신호가 가진 특성에 주목하면 좀 더 지배적인 한 군데의 누수지점을 탐지할 가능성이 상당히 존재한다. 누수지점 간의 누수량의 차이도 동시 두 지점의 누수탐지에 큰 영향을 주는 것이 확인되었다.

## 후 기

본 논문은 국토교통부 물관리 연구사업의 연구

비 지원 (2014년)으로 수행되었음.

## 참고문헌

- [1] D. A. Liston and J. D. Liston, "Leak detection techniques," *Journal of New England Water Works Association*, 1206(2), pp. 103-108 (1992)
- [2] O. Hunaidi and P. Giamou, "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 (1998)
- [3] E. Shaw Cole, "Methods of leak detection: Overview," *Journal of American Water Works Association*, pp. 73-75 (1979)
- [4] H. V. Fuchs and R. Riehle, "Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis," *Applied Acoustics*, Vol. 33, pp. 1-19 (1991)
- [5] O. Hunaidi and W. T. Chu, "Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes," *Applied Acoustics*, Vol. 58, pp. 235-254 (1999)
- [6] C. H. Knapp and G. C. Carter, "The generalized correlation method for the estimation of time-delay," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, 24(4), pp. 320-327 (1976)
- [7] Y.-S. Lee, D.-J. Yoon and J.-C. Jeong, "Leak location detection of underground water pipes using acoustic emission and acceleration signals," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 23, No. 3, pp. 89-98 (2003)
- [8] Y.-S. Lee and D.-J. Yoon, "Improved estimation of leak location of pipelines using frequency band variation," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 34, No. 1, pp. 44-52 (2014)