

특집

음향 진동 신호처리 기술과 응용
(non-stationary 신호처리)

지하매설 상수도 배관의 누수지점 탐지

이영섭*

(전북대학교 기계공학과)

1. 머리말

지하매설 배관의 누수는 육안에 의한 누수위치 판독이 어려운 경우가 많아 음향학적인 접근으로 그 위치를 찾아 왔다. 전통적인 방법은 숙련된 기술자에 의한 자의적 판단에 의해 주로 이루어져 왔으나 그 정밀도가 매우 떨어졌다⁽¹⁾.

1970년대 들어서 비숙련자도 탐지 가능하며 아울러 더 정밀한 탐지 가능한 기법의 필요성의 의해 음향상관 해석법(acoustical correlation analysis)이 제안된 이후 1990년대 Fuchs와 Riehle은 계측된 신호에서 상호상관함수를 계산하여 누수지점을 정밀하게 얻어 내었다⁽²⁾. 이후 누수음 상관기(leak noise correlator)는 상용화되어 보편적으로 쓰이기 시작하였다⁽³⁾.

그런데, 이와 같은 상관법은 도달시간차법에 의해 누수위치를 찾게 되는데, 누수음의 전파속도와 상호상관

함수의 피크치에 대한 시간지연(time delay)을 추정해 내는 것이 누수탐지의 정밀도를 결정한다. 상관법에서 누수음으로 인한 배관의 진동을 계측하는데 이를 위해 통상 가속도계를 사용한다⁽⁴⁾.

그런데, 누수음의 전파속도는 다양한 지하매설 배관에 대한 실험을 통한 데이터베이스의 구축으로 정도가 높은 자료를 얻을 수 있다. 이와는 달리 시간지연의 경우는 이를 계산하는 추정 알고리즘에 따라 적지 않은 차이를 보일 뿐 아니라 누수음과 배관과의 물리적 연성에 의한 진동신호를 포착해야 하므로 항상 잡음에 노출된 지하매설 배관에서 얻어진 신호 속에 포함되어 있는 순수한 누수신호만을 필터링시키는 기법이 필수적이다.

이 글에서는 이러한 잡음이 포함된 배관신호에서 두 개의 가속도계를 사용할 경우 얻어지는 상호상관함수의 시간지연을 더욱 정밀하게 계산하는 추정법에 대해 기술한다.

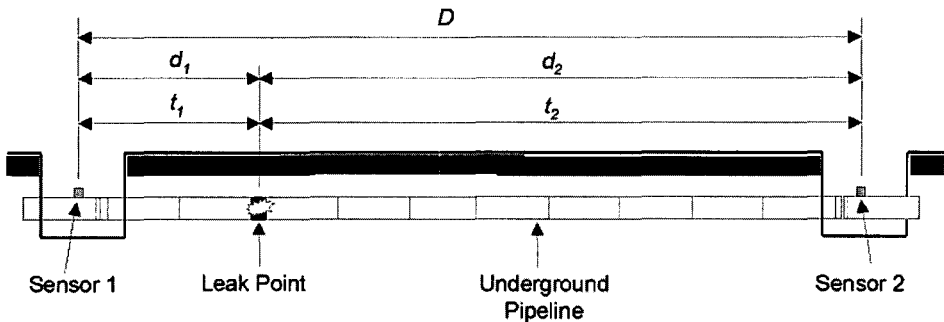


그림 1 지하매설 배관의 누수지점 탐지개념

* E-mail : blueocean@chonbuk.ac.kr / Tel : (062) 270-2319

특집 음향 진동 신호처리 기술과 응용(non-stationary 신호처리)

2. 누수탐지와 시간지연

그림 1에 그려진 것처럼 센서 1이 누수 지점으로부터 센서 2에 비해 가까운 곳에 위치하고 있다면, 센서 1은 누수신호를 센서 2 보다 먼저 받게 될 것이다. 문제는 어느 정도의 시간차로서 계측되는지를 추정하는 방법이다.

두 센서에서 들어오는 연속적이고 랜덤한 신호는 단순히 그 파형을 시간 영역(time domain)에 두고 비교해서는 알기가 매우 어렵다. 이것은 누수로 인한 파동의 전달이 복잡한 물리적 과정과 여러 가지의 잡음(noise)에 노출된 채로 배관과 그 내부의 물을 전달 매개체로 전파되어 오는 관계로 그리고, 배관의 곳곳에 위치한 불연속점(밸브, 분기관 등등)을 거쳐 오기 때문이다. 또한 계측시의 각종 주변 소음 및 진동에 의해 불확실한 인자들이 개입될 수도 있다.

이와 같이 지하에 매설되어 있는 배관의 실체를 제대로 알지 못하는 상황에서 단지 센서 2개에서 얻어지는 신호로 누수지점을 정확히 알아낸다는 것은 단순한 일이다.

또한 실제의 지하매설 배관은 주변소음, 복잡한 배관망으로 인한 다양한 소음원 등 여러 가지의 잡음에 노출되어 있어 어떤 진동파가 누수에 의한 것인지 단순하게 판단을 내릴 수 없는 경우가 많다. 왜냐면 가속도계는 배관에 존재하는 잡음을 포함한 파동을 동시에 계측하므로 누수와 관련된 것만을 추출, 계측하는 것이 탐지성능을 좌우한다.

그림 1과 같이 배관의 표면으로부터 누수가 발생할

경우, 누수 지점의 양 방향에 진동파를 감지할 수 있는 센서(가속도계)를 설치하여서 각 센서에 도달하는 진동파의 도착시간 구별이 가능하면, 아래의 식에 의해 누수 위치를 탐지할 수 있다⁶⁾.

$$\begin{aligned} d_1 &= (D - c \cdot \Delta t) / 2 \\ d_2 &= (D + c \cdot \Delta t) / 2' \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, D 는 센서간 거리, c 는 배관내 누수음의 속도 ($s=1$ 과의 위상속도), $\Delta t = t_2 - t_1$ 는 도달 시간차이다. 즉, 누수지점 위치 d_1 과 d_2 는 c 와 Δt 를 알 수 있으면 추정 가능해진다.

누수로 인해 두 센서에서 계측된 신호 $x(t)$ 와 $y(t)$ 는 각각 순수한 누수신호로서 평균이 0 (zero-mean)인 stationary 랜덤 신호로 백색잡음 (white noise)이라 가정한다. (누수로 인한 소음이 광대역의 특성을 가지기 때문에 이렇게 가정을 한다.) 그리고 α 는 상대적인 진폭인자(amplitude factor)이다.

이와 같은 시간지연의 정도를 나타내 주는 상관함수의 특성을 이용하면, 누수 지점으로부터 떨어진 두 지점에서 각각 계측된 신호로부터 도착시간 지연을 추정해 낼 수 있다. 왜냐하면 그 두 신호는 누수로 인해 발생하는 신호를 감지하므로 서로 연관성을 가지고 있기 (correlated) 때문이다.

그래서 상호상관함수 $R_{xy}(\tau)$ 는 간단히 다음과 같이 된다.

$$R_{xy}(\tau) = \alpha R_{xx}(\tau - \Delta t), \quad (2)$$

즉, 상호상관함수는 시간차 Δt 를 가진 $x(t)$ 신호의

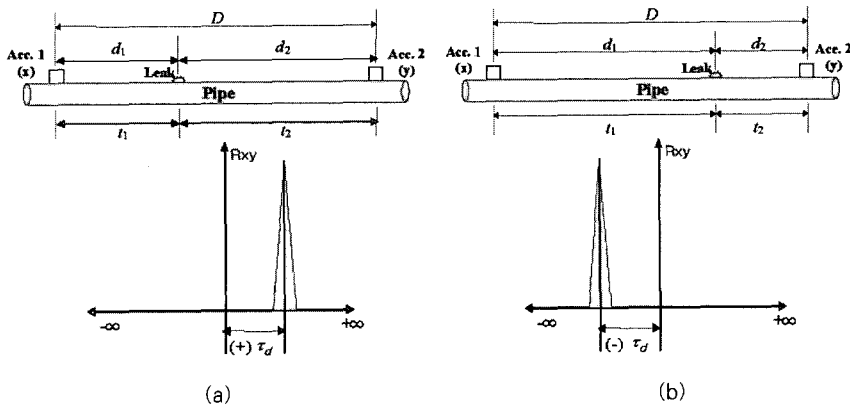


그림 2 도착시간 차이

자기상관함수(auto-correlation function)로 나타나게 된다

결국 실제에 있어서는 제한된 시간동안 센서의 신호를 계측한 후 상관함수를 그려서 누수 지점을 찾아내는 것이 도착 시간차 추정법(arrival time difference method)의 기본이 된다.

그리고, 그림 2에 나타난 것처럼 시간지연 Δt 부호의 (+)/(-)에 따라 상관함수의 피크치 위치가 달라진다. 즉, $d_1 > d_2$ 이면 상관함수의 피크치는 시간 축의 (+)쪽에 나타나고, $d_1 < d_2$ 이면 (-)쪽에 나타난다. 그래서 이상의 방법으로 누수로 인한 신호를 두 개의 센서로부터 받아서 상호상관함수를 계산해서 보면 시간지연을 알 수 있게 되는데, 누수로 인한 진동파의 속도를 정확히 알고 있으면 누수지점의 계산은 식 (1)에 의해 구해 질 수 있다.

한편 분기가 많은 배관일수록 주변 잡음에 의한 신호대 잡음비(SNR)의 저하로 인해 분석자체가 불가능해질 수도 있다. 그래서 이러한 불필요한 잡음을 제거하고 누수와 직접 연관된 신호만을 탐지하도록 적당한 필터(filter)의 채택이 필수적이다. 아울러 누수에 가장 민감하게 반응하는 주파수 대역을 잘 선정하는 것 또한 중요한데, 이것은 배관의 재질과 치수에 종속적이다.

3. 시간지연의 추정

실제 지하매설 배관의 누수로 인한 신호에서 시간지연을 의미하는 상호상관함수의 피크치를 찾는 것은 매우 까다로운 일이다. 이것은 앞에서 언급된 SNR에 따라 결정되며, 낮은 SNR에서 순수한 누수음을 추출하는 것이 관건이다. 특히 앞 절에서는 보여준 도달시간차를 이용한 누수탐지의 원리에서는 미소한 시간지연 추정의 오차도 누수지점의 추정에서는 큰 오차를 유발 시키게 된다.

그래서 이 절에서는 계측된 신호로부터 단순히 상호상관함수를 계산하는 것과는 별도로 새로운 상호상관함수의 피크치를 추정하는 방안을 제시하며 이를 실제 누수탐지에 적용한다.

이 글에서는 시간지연의 추정에 좀 더 체계적인 방법을 도입하는데, Knapp and Carter의 일반화된 상관법(generalized correlation method)으로서 가중치를 가진 상호상관함수는 아래처럼 정의 될 수 있다⁽⁵⁾.

$$\hat{R}_{xy}(\tau) = w(\tau)R_{xy}(\tau), \quad (3)$$

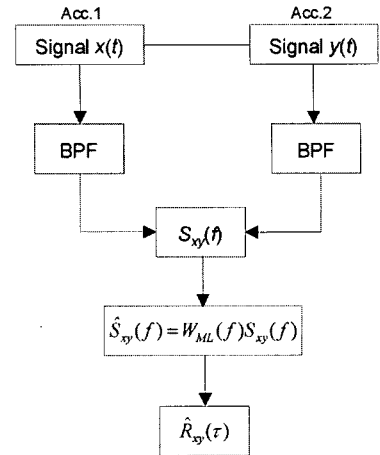


그림 3 Optimal maximum likelihood window에 의한 시간지연 추정

여기서 $w(\tau)$ 는 연속적인 시간 가중함수이다. 특히 "optimal maximum likelihood"로 알려진 가중 창함수 $w_{ML}(\tau)$ 를 적용할 수도 있을 것이다. 이것은 주파수 영역에서 창함수인 최적 maximum likelihood 창 $W_{ML}(f)$ 로 표현될 수 있다⁽⁸⁾. 한편 $x(t)$ 와 $y(t)$ 라는 두 개의 측정된 누수신호 사이의 코히어런스함수(coherence function)는 아래와 같이 주어진다⁽⁴⁾.

$$|\gamma_{xy}(f)|^2 = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \quad (4)$$

여기서 $|\gamma_{xy}(f)|^2 < 1$ 를 만족해야만 한다. 이 최적 maximum likelihood 창 $W_{ML}(f)$ 에서는 코히어런스함수를 적용, 아래와 같이 정의 한다⁽⁶⁾. 즉,

$$W_{ML}(f) = \frac{|\gamma_{xy}(f)|^2}{|S_{xy}(f)|[1 - |\gamma_{xy}(f)|^2]}, \quad (5)$$

그래서 상호파워스펙트럼 $S_{xy}(f)$ 은 창함수 $W_{ML}(f)$ 가 곱해져 개선된 상호파워스펙트럼 $\hat{S}_{xy}(f)$ 를 얻게 되는데⁽⁶⁾,

$$\hat{S}_{xy}(f) = W_{ML}(f)S_{xy}(f) \quad (6)$$

이 되어서, 이것으로부터 역푸리에 변환을 통해 개선된 상호상관함수를 구할 수 있다.

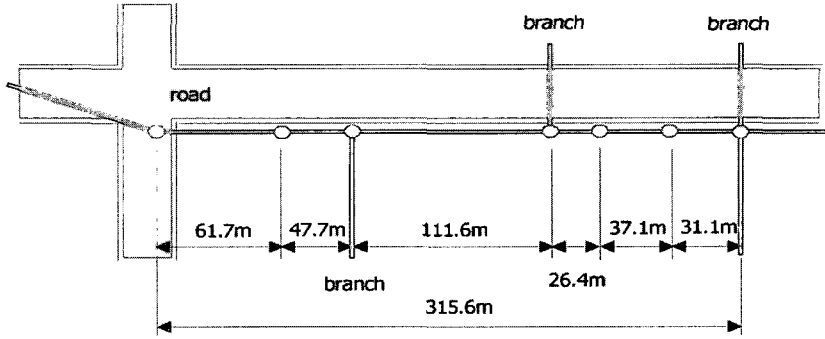


그림 4 실제 지하매설배관에 대한 누수탐지실험 (주철관의 길이: 315 m)

$$\hat{R}_{xy}(\tau) = IFFT[\hat{S}_{xy}(f)] \quad (7)$$

이상의 이론에 의해 실험에 있어서의 실제 상호상관 함수는 그림 3의 세 과정으로 구한다. 첫 번째 과정은 주파수대역의 설정이 목적이고, 두 번째 과정은 설정된 주파수 대역에 맞춰 상호파워스펙트럼을 구하는 것이며, 세 번째는 상호파워스펙트럼 $S_{xy}(f)$ 에 시간지연을 계산하도록 설정된 주파수영역의 특정한 창함수(window function)인 maximum likelihood window를 씌운 상호파워스펙트럼 $\hat{S}_{xy}(f)$ 를 역푸리에 변환을 통해 상호상관함수를 계산하여 시간지연 Δt 를 추정하는 것이다.

4. 실험 및 결과

그림 4에서 보는 바와 같이 대전광역시 용계동 일대의 실제 지하매설 상수도 배관중에서 가장 많이 적용되는 호칭경 100A의 주철관에 대한 누수탐지를 수행하였다. 실험에 적용된 상수도 배관길이는 약 315 m이었으며, 지하 1.5 m ~ 2 m 정도의 위치에 매설된 배관이었으며, 누수음의 속도는 1350 m/sec로 추정되었고, 사용한 측정 주파수 구간은 0 ~ 800 Hz 이었다. 그림 4에 나타난 것 처럼, 이 지하매설 배관은 전체 실험구간 상에 모두 7개의 맨홀이 설치되어 있으며, 이 중에서 3군데의 맨홀지점에 $\phi 25$ 볼밸브를 연결하여 임의의 누수장치를 설치하였다. 아울러 가속도계는 저주파에서의 감도가 매우 뛰어난 B&K 8313C가 사용되었다.

두 가속도계간의 거리를 약 150 m부터 약 300 m에 걸쳐 다양하게 변화시키면서 수행한 실험의 결과는 요약하여 그림 5에 나타내었다. 이들 그림 속에서 작은 원

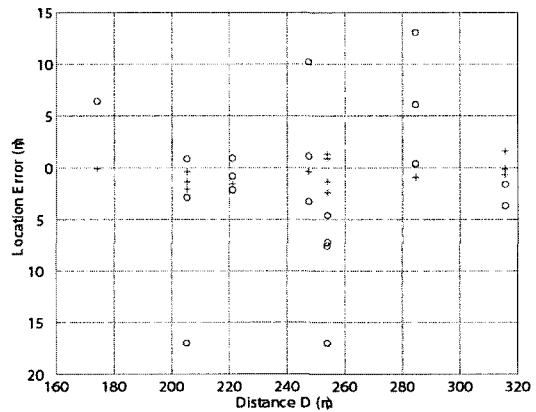


그림 5 D에 따른 탐지위치오차error (m). ○: 단순 상호상관함수 결과. +: Optimal maximum likelihood window 결과

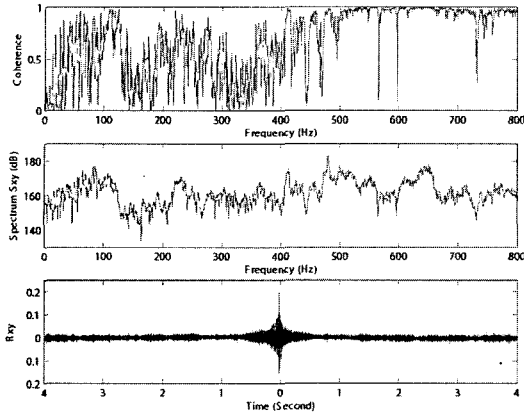
(○)으로 그려진 것은 단순 상호상관함수에 의한 결과이고, 십자 (+)로 그려진 것은 최적 maximum likelihood에 의한 누수탐지결과를 뜻하고 있다.

단순 상호상관함수법의 경우 최대 약 11 m 정도의 오차, 즉 D의 약 6%의 최대탐지오차를 나타내었다.

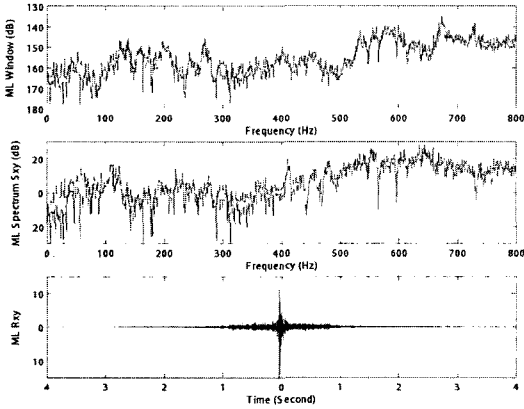
그러나, 최적 maximum likelihood법의 경우는 절대적 오차로 약 2 m이내, 그리고 D의 약 1% 이내의 최대오차를 보여 주어 상대적으로 매우 뛰어난 탐지 성능을 보여 주었다. 이는 300 m의 최대거리에서 1% 이내의 탐지오차를 보여 이 글의 제시사양을 충족시키고 있음을 확인하였다.

아울러, 그림 6 및 7은 각각 가속도계간 거리가 174 m 및 254 m 인 경우 실험에서 얻어진 결과로 구체적인 시간지연 추정을 보여준다.

그림 6(a) 및 7(a)는 위에서부터 코히어런스함수

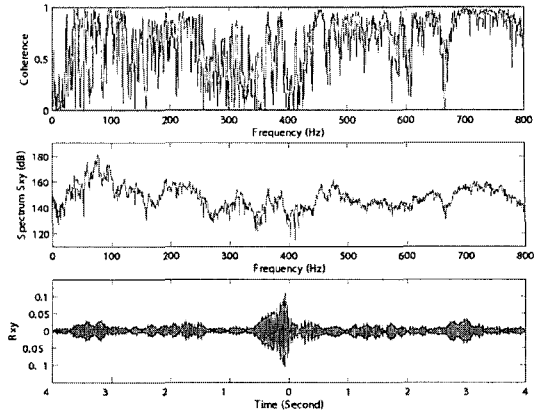


(a) 단순상호상관법

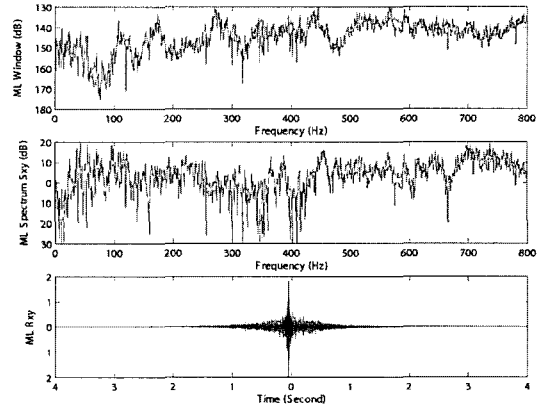


(b) Optimal maximum likelihood 법

그림 6 D=174 m 일 때 시간지연 추정



(a) 단순상호상관법



(b) Optimal maximum likelihood 법

그림 7 D=254 m 일 때 시간지연 추정

$|\gamma_{xy}(f)|^2$, 상호상관함수 $S_{xy}(f)$ 그리고 상호상관함수 $R_{xy}(\tau)$ 를 나타낸다. 그리고 그림 6(b) 및 7(b)는 위에서 부터 식 (6)에 정의된 최적 maximum likelihood 창함수 $W_{ML}(f)$, 식 (7)에 정의된 개선된 상호파워스펙트럼 $\hat{S}_{xy}(f)$, 그리고 개선된 상호상관함수 $\hat{R}_{xy}(\tau)$ 이다.

특히 $W_{ML}(f)$ 은 예측된 두 가속도계의 신호의 연관 성으로부터 얻어진 것으로 주파수 영역에서의 필터링을 수행한다. 그래서 그림 6 및 7로부터 $\hat{S}_{xy}(f)$ 는 $S_{xy}(f)$ 와는 상당히 다른 함수임을 알 수 있다. 그리고 이러한 차이가 누수지점 탐지에 결정적 기여를 하는 시간지연을 추정하는 상호상관함수를 훨씬 더 개선 시킬 수 확인할 수 있다.

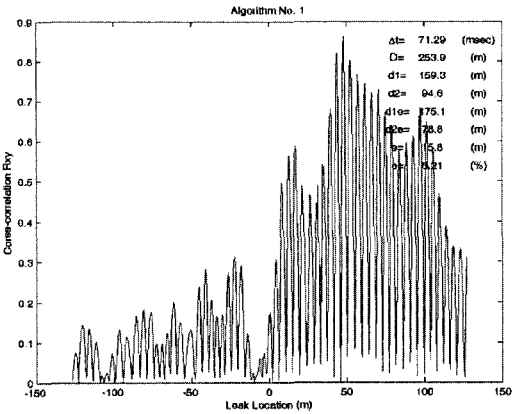
즉, $\hat{R}_{xy}(\tau)$ 는 $R_{xy}(\tau)$ 에 비해 그림 6의 경우 배경 잡음이 많이 축소 되어 SNR이 매우 개선되었으며, 그림 7

의 경우엔 작은 피크들이 모두 사라지고 훨씬 선명한 시간지연을 보여 준다.

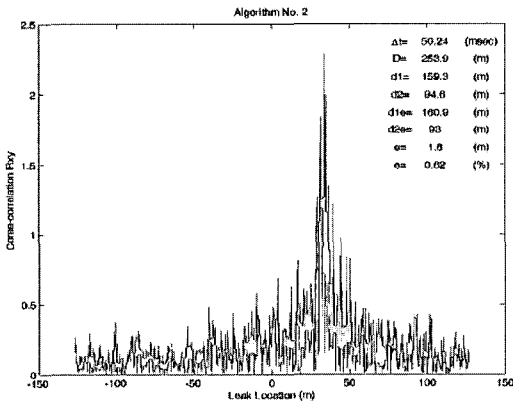
이와 같은 최적 maximum likelihood 창의 적용이 그림 5에 나타난 전체적인 누수탐지의 성능을 월등히 개선 시키고 있음을 알 수 있다.

이것은 또한 그림 8에 보여진 것처럼 실제 누수지점 탐지의 적용에서는 확연한 개선된 성능을 보여 주고 있다. 단순 상호상관함수법이 적용된 그림 8(a)의 경우, 피크치가 주위의 값들에 비해 상대적으로 높지 않아 누수 탐지 현장에서 엔지니어들이 판단을 내리기가 쉽지 않다. 이와는 달리 최적 maximum likelihood 법의 경우 누수 추정지점이 매우 선명히 나타나 엔지니어들의 판단에 큰 지원이 될 수 있다.

이상의 시간지연 추정방법에 바탕한 누수탐지 기술은 실제 지하매설 배관에 적용가능하도록 하드웨어도



(a) 단순상호상관법



(b) Optimal maximum likelihood 법

그림 8 $D=254$ m 일 때 누수지점 추정

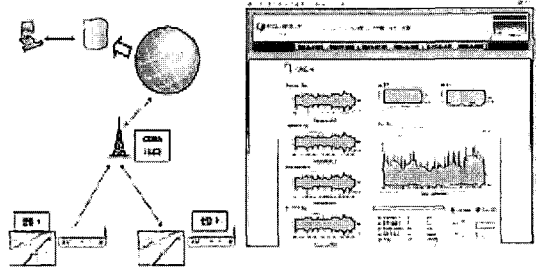


그림 10 인터넷을 이용한 원격 누수탐지시스템

5. 맺음말

이 글에서는 항상 잡음에 노출된 지하매설 배관에서 얻어진 신호속에 포함되 있는 순수한 누수신호만을 필터링하여 상호상관함수의 피크치에 대한 시간지연을 더욱 정밀하게 계산하는 최적 maximum likelihood 기법에 대해 기술하였다. 실험결과 이 추정법은 단순 상호상관함수법에 비해 훨씬 정밀한 시간지연값을 계산해 내어 누수탐지의 정확도를 센서간 거리 314 m에서도 1% 이내의 오차로서 찾아내었다. 이러한 추정법을 바탕으로 무선 이동식 누수탐지 센서가 제작되었고, 인터넷으로 작동가능한 지하매설 배관에 대한 무선원격 누수탐지시스템이 완성되었다. ☐

참고문헌

- (1) 이영섭, 윤동진, 2004, "파이프-유체의 연성진동을 이용한 누수위치 식별연구," 한국소음진동공학회 논문집, 제 14 권, 제 2 호, pp.95~104.
- (2) 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.
- (3) Palmer Environmental, "MicroCorr," Palmer Environmental Services.
- (4) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 1991, Random Data, John Wiley & Sons.
- (5) Knapp, C. H. and Carter, G. C., 1976, "The Generalized Correlation Method for the Estimation of Time-delay," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. ASSP-24, pp. 320~327.

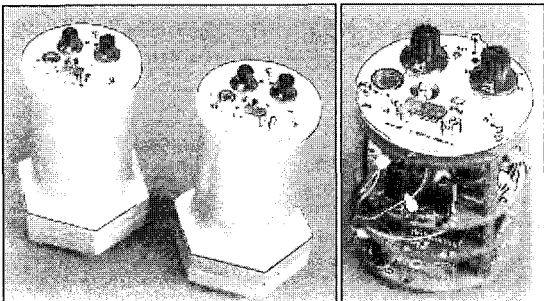


그림 9 누수탐지를 위해 개발된 무선 이동식 가속도계

제작되었다. 그림 9와 같이 가속도계를 내장한 무선 이동식 누수탐지센서와 CDMA 통신 모듈 그리고 그림 10 과 같이 이것을 인터넷을 통해 원격조정 가능한 소프트웨어를 포함한다.

특정: 음향 진동 신호처리 기술과 응용(non-stationary 신호처리)