

주파수 대역 변화를 이용한 배관의 누수지점 추정 개선 연구

Improved Estimation of Leak Location of Pipelines Using Frequency Band Variation

이영섭*[†], 윤동진**

Young-Sup Lee*[†] and Dong-Jin Yoon**

초 록 스마트워터그리드 시스템의 지하 상수도 배관 관리에 있어서 누수는 중요한 요소인데, 특히 그 배관이 낡았고 인구가 많은 도시의 포장도로나 다양한 건축물의 아래에 매설된 경우이다. 이러한 누수지점의 정확한 탐지는 이들 배관의 효율적인 운용을 위해 필수적이기 때문에, 주파수 대역 변화, 창 필터 그리고 확률에 바탕한 새로운 누수지점 탐지 방법론을 본 논문을 통해 제안한다. 정확한 누수지점의 추정은 누수음에 의한 센서 신호간의 시간 지연 추정의 정확성에 따라 결정된다는 것이 알려져 있기 때문에 중요한 주파수에 가중치를 부여하는 몇 가지의 창 함수들이 개선된 상호상관함수를 계산하기 위해 적용되었다. 실제 주철로 제작된 길이 253.9 m의 지하매설 상수도 배관에 대해 새로운 방법론을 적용한 실험결과는 향상된 누수지점 탐지 성능을 보여 주었다.

주요용어: 누수탐지, 상관법, 주파수 대역 변화, 스마트워터그리드

Abstract Leakage is an important factor to be considered for the management of underground water supply pipelines in a smart water grid system, especially if the pipelines are aged and buried under the pavement or various structures of a highly populated city. Because the exact detection of the location of such leaks in pipelines is essential for their efficient operation, a new methodology for leak location detection based on frequency band variation, windowing filters, and probability is proposed in this paper. Because the exact detection of the leak location depends on the precision of estimation of time delay between sensor signals due to leak noise, some window functions that offer weightings at significant frequencies are applied for calculating the improved cross-correlation function. Experimental results obtained by applying this methodology to an actual buried water supply pipeline, ~ 253.9 m long and made of cast iron, revealed that the approach of frequency band variation with those windows and probability offers better performance for leak location detection.

Keywords: Leak Detection, Correlation Method, Frequency Band Variation, Smart Water Grid

1. 서 론

배관의 누수 또는 가스의 누설지점에 대한 탐지는 다양한 산업분야에서 중요한 문제로 취급되어 왔다[1-3]. 특히 지하에 매설되어 있는 상수도 배관의 경우에는 누수가 육안으로 확인된 이후에는 이미 문제가 심각해진 상태가 되므로 조기에

탐지할 필요가 있다[2-4]. 특히 스마트워터그리드 (smart water grid)와 같은 지능화된 상수도 관망 시스템에서는 GIS(geographic information system)와 센서 네트워크에 기반한 무인화, 자동화와 더불어 신속성과 정확도가 향상된 누수지점 탐지 알고리즘이 더욱 중요하게 취급되고 있다. 지하매설 배관의 누수는 육안에 의한 위치판독

[접수일: 2014. 2. 5, 수정일: 2014. 2. 21, 게재확정일: 2014. 2. 21] *인천대학교 임베디드시스템공학과, **한국표준과학연구원 안전측정센터, [†]Corresponding Author: Embedded System Engineering Department, Incheon National University, Incheon 406-772, Korea (E-mail: ysl@incheon.ac.kr)

이 어려워 청음에 기초하여 숙련된 기술자의 경험적 판단에 의해 그 위치를 찾아 왔으나 그 정밀도가 매우 떨어졌었다. 이후 정밀한 탐지기법의 필요성의 의해 음향상관해석법(acoustical correlation analysis)이 제안된 이후 상호상관함수를 계산하여 누수지점을 정밀하게 추정할 수 있게 되었고 누수음 상관기(leak noise correlator)가 상용화되어 널리 사용하게 되었다[3-7]. 이 기법은 도달시간차법에 의해 누수 위치를 찾게 되는데, 누수신호의 전파 속도와 측정된 누수신호 간의 시간지연(time delay)을 추정해 내는 것이 누수탐지의 정밀도를 결정한다[5-7].

지하매설 상수도 배관에서 누수가 발생하는 경우 센서에 의해 측정된 누수신호는 일반적으로 상당한 수준의 잡음을 가지게 된다. 누수로 인해 센서에 들어오는 연속적이고 랜덤한 신호는 단순히 그 파형을 시간영역(time domain)에 두고 비교해서는 알기가 매우 어렵다. 이것은 누수로 인한 파동의 전달이 복잡한 물리적 과정과 여러 가지의 잡음에 노출된 채로 배관과 그 내부의 물을 전달 매개체로 전파되는 관계로 그리고, 배관의 곳곳에 위치한 불연속점(밸브, 분기관 등등)을 거쳐 오기 때문이다. 아울러 누수로 인한 관내부의 압력 변화의 전파는 배관의 구조와 연성된(coupled) 거동을 가지게 되므로 분산적인(dispersive) 한 특성으로 인해 더욱 복잡해지게 된다. 또한 계측시의 각종 주변 소음 및 진동에 의해 추가의 불확실한 인자들이 개입될 수도 있다. 이런 이유로 항상 잡음에 노출된 지하매설 배관에서 얻어진 신호 속에 포함되어 있는 순수한 누수신호만을 필터링시키는 신호처리기법이 필수적이다[7].

본 논문에서는 누수에 의해 발생하는 신호의 특성에 대한 간단한 고찰과 함께 이를 탐지하기 위한 주파수 대역별 특성에 의한 누수지점 탐지 알고리즘의 개선 기법에 대해 실험결과와 함께

분석하여 그 유용성을 제시하고자 한다. 2장에서는 지하매설 배관의 누수탐지의 대한 개략적 이론 및 주파수 대역 변화 기법과 다양한 창 함수 적용 기법을 전개하고, 3장에서는 실험 대상 및 실험 방법에 대한 언급을 하고, 4장에서는 실제 지하매설 배관의 누수 탐지 실험 결과에 대해 분석한다.

2. 이론적 배경

2.1. 누수탐지 원리 및 누수신호의 특징

스마트워터그리드에 적용되는 누수 탐지 센서는 누수로 인해 발생하는 유체가 팽창 배관 내부의 압력 변화 또는 유체-관 연성진동(coupled vibration)을 측정할 수 있어야 한다. 대표적으로 하이드로폰 또는 가속도계가 주로 사용되는데, 누수와 관련된 주파수 대역에서 우수한 감도를 가져야 한다.

일단 누수가 발생하면 Fig. 1과 같이 누수지점을 중심으로 관의 길이 전후 방향으로 누수신호인 압력 변화 또는 연성진동이 퍼져 나가게 된다. 이때 누수 탐지 센서 2개를 누수지점의 전후에 각각 설치해 두고, 각 센서에 전달되는 누수신호의 도달시간차(arrival time difference)를 추정하면 누수지점 위치를 식(1)과 같이 계산할 수 있다[1,3].

$$d_1 = (D + c\tau) / 2 \quad d_2 = (D - c\tau) / 2 \quad (1)$$

여기서, D 는 센서간 거리, c 는 배관내 누수신호의 전파 속도, τ 는 도달시간차이다. 누수신호의 전파 속도는 배관의 재질 및 치수, 관 내부 압력, 매설 깊이 등에 따라 달라지는데 특히 주파수에 대한 분산적인 특성이 있다. 그리고 다양한 배관에 대한 측정으로 전파 속도에 대한 데이터베이스를 구축할 필요가 있다[7].

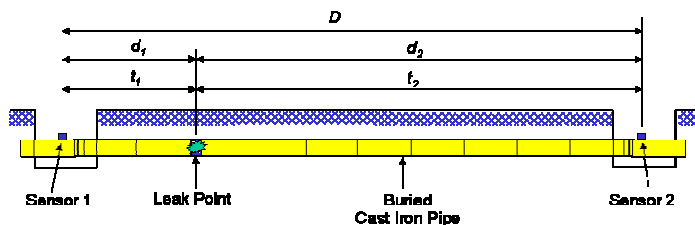


Fig. 1 Leak locating in an underground pipeline with two sensors

지하에 매설되어 있는 배관에서 단지 센서 2개에서 얻어지는 신호로 누수지점을 정확히 알아내기 위해서는 누수신호의 특징에 대한 이해가 필수적이다. 실제의 지하매설 배관은 주변 소음, 복잡한 배관망으로 인한 다양한 소음원 등 여러 가지의 잡음에 노출되어 있어 어떤 진동파가 누수에 의한 것인지 판단이 중요하다.

그래서 상호상관함수는 식(1)에서 제시된 누수 신호간의 도달시간차를 계산하는데 중요하게 사용될 수 있다. 특히 이 함수는 매우 정밀하게 계산되어야만 정확한 누수위치의 추정이 가능하다.

2.2. 주파수 밴드별 분석

측정된 센서 신호 $x(t)$ 및 $y(t)$ 로부터 높은 SNR 확보를 위한 잡음을 제거하고 정확한 도달시간차의 추정을 위해 Fig. 2에서 제시된 알고리즘을 적용을 고려한다. 본 알고리즘은 측정된 신호들이 우선 미리 설정되어 다양한 밴드 폭을 가지는 대역통과필터(band pass filter, BPF)를 통과시킨 후 상호스펙트럼(cross-spectrum) $S_{xy}(f)$ 와 상호상관함수(cross-correlation function) $R_{xy}(\tau)$ 를 계산한다.

이를 위해 Fig. 2와 같은 다수의 대역통과필터로 구성된 연속적인 필터 बैं크를 구축하고, 측정 신호를 필터링시켜 누수신호 이외의 잡음을 제거하는데 적용한다. 필터의 갯수와 대역폭의 크기 그리고 주파수 범위는 누수신호에 따라서 가변적으로 구성될 필요가 있다. 이것은 배관의 치수 및 재료에 따라 누수와 연관을 가지는 주파수의 범위 및 그 대역폭이 달라지기 때문이다.

그리고 Fig. 3에서 보는 것과 같이 이들 누수 신호로부터 대역폭 별로 누수 위치를 히스토그램(histogram)을 그려서 어떤 주파수 대역에서 가장 집중적으로 누적되는지를 분석하여 최적의 주파수 밴드를 결정한다.

이 방법은 좀 더 많은 연산을 요구하나, 해당 주파수 대역별로 확률적으로 접근하는 길을 제시해 준다. 두 측정 누수신호간의 코히어런스 함수(coherence function)가 높은 주파수 대역을 포함할 수 있도록 필터의 대역폭을 조정할 수 있어야 한다.

이를 통해 주파수 대역별로 확률적으로 누수 추정 위치를 구해보고 최적의 주파수 대역을 선정한다. 이때 코히어런스 함수와 확률적 최적 대



Fig. 2 Band pass filter bank

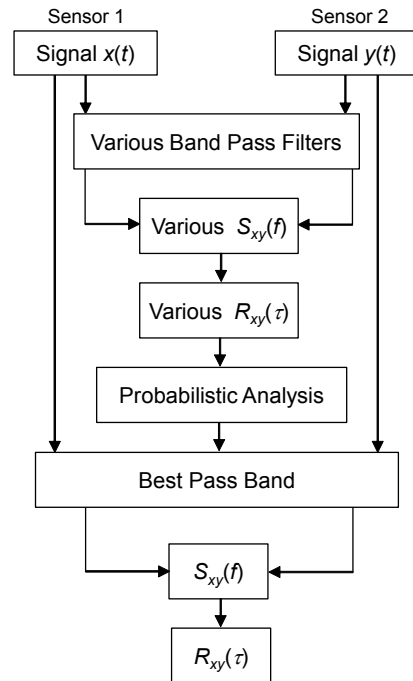


Fig. 3 Frequency band variation and probabilistic approach for better time arrival difference estimation

역폭은 상호 매우 의존적인 관계를 일반적으로 보이게 된다.

그리고 나서, 이 최적 대역폭을 통과한 신호를 처리하여 상호상관함수로부터 도달시간차를 추정하도록 한다.

2.3. 도달시간차 추정

두 신호간의 도달시간차를 추정하기 위한 신호 처리 기법은 일반화된 상호상관(generalized cross-correlation)법에 기초하는 것이 많은데[6], 이것은 다음과 같이 정의된다.

$$R_{xy}^w(\tau) = w(\tau) * R_{xy}(\tau), \quad (2)$$

이때, $w(\tau)$ 와 $R_{xy}(\tau)$ 는 각각 가중 창 함수 및 상호상관함수이다. 그래서 식(2)를 푸리에 변환(Fourier transform)을 통해 일반화된 상호스펙트럼을 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$S_{xy}^w(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}^w(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = W(f) S_{xy}(f), \quad (3)$$

여기서 $W(f)$ 는 $w(t)$ 의 주파수 영역 창 함수 표현이고, $S_{xy}(f)$ 는 상호스펙트럼이다. 이러한 창 함수의 적용은 누수지점 탐지를 향상시키기 위한 매우 중요한 수단이 된다. 그래서 시간영역의 일반화된 상호상관함수(GCC)는 역푸리에 변환(inverse Fourier transform)으로 아래와 같이 표현될 수 있음을 의미한다.

$$R_{xy}^w(\tau) = IFFT[S_{xy}^w(f)]. \quad (4)$$

이러한 과정을 통해 구해진 일반화된 상호상관함수로부터 도달시간차 τ 를 추정하면 식(1)에 의해서 누수지점에 대한 계산이 가능해진다.

일반적으로 대역통과필터를 제외하고 6가지의 창 함수가 널리 이용되는데, 기본적인 사각창(basic rectangular window), Roth창(Roth window), Wiener창(Wiener window), SCOT창(smoothed coherence transform window), PHAT창(phase transform window) 그리고 ML창(maximum likelihood window)이 그들이다. 이들 각각의 창 함수는

Table 1과 같이 정의된다.

3. 누수탐지 실험

본 논문에서 제안된 Fig. 3의 누수지점 탐지 알고리즘의 실험 및 분석을 위해서 지하 1.5 m에 매설된 상수도 배관에 대해 볼밸브를 설치하고 이를 개방하여 강제로 누수를 시킨 후 가속도계(accelerometer)를 이용하여 누수신호를 측정하였다. 본 실험에서는 이러한 볼밸브의 개방을 통하여 실제 누수와 근사 상황을 모사할 수 있는 하나의 방법이라 판단하였다. 왜냐하면 누수가 발생하기 위한 천공의 형태는 매우 다양할 수 있는데, 볼밸브의 동작도 천공의 한 가지 형태와 유사하기 때문이다. 특히 볼밸브의 각도 조절을 통해 좀 더 다양한 누수량과 누수 천공 패턴을 모사할 수 있는 장점도 있는 것으로 사려된다.

실험에 사용된 배관은 직선관으로서 호칭경 100 A의 주철관(cast iron pipe)이었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 센서로 사용된 2개의 가속도계는 모두 B&K 8313C로서 측정 최대 주파수는 1,800 Hz였으며 배관의 외부에 부착되었다. 그리고 측정된 누수신호는 B&K Nexus 신호증폭기와 1,800 Hz이내의 범위에서 저역통과를 시켜 B&K Pulse 시스템에서 측정되었다.

센서 2개는 $D = 253.9$ m의 간격으로 실험 상수도관 상면에 부착이 되었고, 1번 센서로부터 $d_1 = 159.3$ m의 위치 (즉, 2번 센서로부터 $d_2 = 94.6$ m)에 관에 누수를 유발시켰다.

Table 1 Window functions for generalized cross-correlation functions

Window function name	Window function	Remarks
Basic rectangular window	$W_b(f) = 1$	-
Roth window	$W_r(f) = \frac{1}{S_{xx}(f)}$	inverse of auto-spectrum of x
Wiener window	$W_w(f) = \gamma_{xy}^2(f)$	coherence function of x and y
SCOT window	$W_s(f) = \frac{1}{\sqrt{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}}$	suppresses unwanted peaky tonal noises
PHAT window	$W_p(f) = \frac{1}{ S_{xy}(f) }$	inverse of absolute cross-spectrum of x and y
ML window	$W_{ML}(f) = \frac{\gamma_{xy}^2(f)}{[1 - \gamma_{xy}^2(f)] S_{xy}(f) }$	enhancing accuracy of time delay

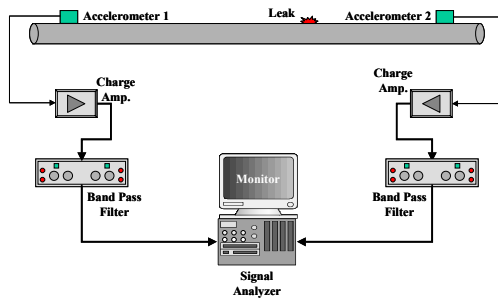


Fig. 4 Experiment set-up for leak locating of a pipeline

모두 4번에 걸쳐 측정 실험을 실시하였으며, 이들 측정 신호들은 Fig. 2에서 제안된 알고리즘에 의해 분석되었다.

우선 대역통과필터 설계를 위한 주파수 범위를 850 Hz 이내로 설정하였다. 이것은 실험 대상 상수도 배관이 주철인 관계로 이 경우 대체로 이 정도의 주파수 범위에서 누수신호가 지배적으로 나타나기 때문이다.

Fig. 4와 같이 200 Hz의 통과대역폭을 가지도록 5개의 필터뱅크 Type 1(0-200 Hz, 200-400 Hz, 400-600 Hz, 600-800 Hz, 800-1,000 Hz)를 Matlab을 통해 설계하였다.

이와 함께 좀 더 세밀한 분석을 위해 50 Hz의 통과대역폭을 가지도록 20개의 필터뱅크 Type 2 (0-50 Hz, 50-100 Hz, 100-150 Hz,... 950-1,000 Hz)를 가지도록 추가로 설계하였다.

4. 실험결과 분석

4.1. 주파수 대역 변화 적용

$D=253.9$ m, $d_1=159.3$ m인 4회의 시험(Test 1 - 4)을 통해 측정된 센서의 누수신호들로부터 누수 지점에 대한 추정을 시도하였다. 대역통과필터를 적용시키지 않는 경우(No BPF)와 필터뱅크 Type 1의 5가지 BPF를 포함해서 6종류의 대역통과필터에 측정된 누수 신호들을 통과시킨 후 어떤 창함수도 적용시키지 않은 사각창 함수(basic rectangular window)와 필터링 시켰다. 그 이후 누수지점의 오차를 추정된 결과를 Fig. 5와 같이 정리하였다. 모두 6종류의 필터에 4번의 실험이 있으므로 24번의 누수지점 추정 결과를 계급값의

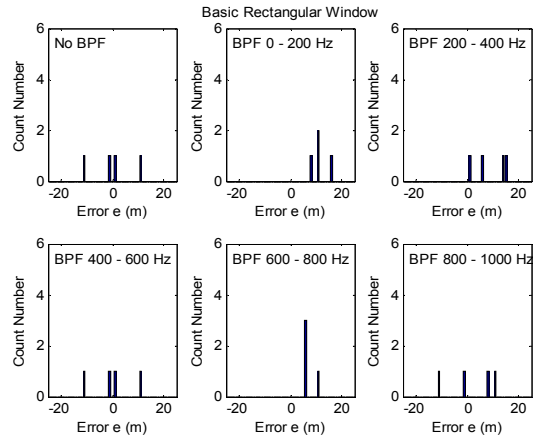


Fig. 5 Histograms of leak locating errors for 6 different frequency bands

크기를 1 m로 설정한 히스토그램으로 나타내었다. 이 결과는 600-800 Hz BPF 때 가장 작은 누수지점 추정 오차를 가짐을 보여 준다.

이것은 누수 센서 신호는 대단히 많은 잡음을 가지고 있고 특히 측정시 주변의 음향 환경에 직접적으로 큰 영향을 받게 되므로 그 센서 신호들의 코히어런스 함수값들이 일정하지 않는 경우가 많음을 보여 준다. 이에 대한 원인은 매우 다양한데 누수 이외에도 측정 순간에 발생하는 수돗물 사용이나 교통소음 등과 같은 일시적인 잡음에 의해서도 영향을 받는다. 하지만 일시적인 이러한 현상 때문에 시차를 두고 여러 번 측정할 필요가 있다. 그러면 일시적인 소음은 측정값에서 사라지게 되고, 반면에 누수와 같이 지속적으로 발생하는 소음은 여러 번 측정해도 계속 신호가 나타나게 된다.

그래서 주목해야 하는 것이 코히어런스 함수이다. 이는 일시적 잡음과는 관계없는 누수신호간의 연관성을 잘 나타내는 인자이기 때문이다. 이에 따라 Fig. 6 및 7은 4회의 누수 측정 실험중에서 Test 1 및 2에서 얻어진 두 센서의 신호들의 코히어런스 함수를 보여 준다.

Fig. 6은 Test 1에서 얻어진 결과로서 각각 세부적 주파수 성분 별로 나타낸 코히어런스 함수 및 상호상관함수, 200 Hz 간격으로 BPF를 5개 적용해서 대역별 코히어런스 함수 평균값 및 0-200 BPF 적용시의 상호상관함수, 그리고 50 Hz 간격으로 BPF를 20개 적용해서 대역별 코히어런

스 함수 평균값 및 700-750 BPF 적용시의 상호 상관함수 이다.

이 결과에서 시간지연 τ 값의 변화에 주목할 필요가 있다. 식(1)에 따르면 t에 의해 누수 위치가 결정되기 때문에 안정적인고 정확한 τ 의 추정 은 중요하다. 그런데 BPF의 적용유무 및 그 대역 폭에 따라 τ 의 값이 바뀔을 확인할 수 있다. 즉,

Test 1에서는 No BPF의 경우 $\tau = -71.6644$ ms, 0-200 Hz BPF의 경우 $\tau = -71.6644$ ms 그리고 700- 50 Hz BPF의 경우 $\tau = -71.6644$ ms로 변화 함을 알 수 있다. 이것은 누수지점 추정으로 계산 해 보면 각각 $d_1 = 175.323$ m($e = -16.023$ m), 175.275 m(-15.975 m) 그리고 158.600 m (0.700 m) 가 된다. 즉, 코히어런스 평균값이 높은 적당한

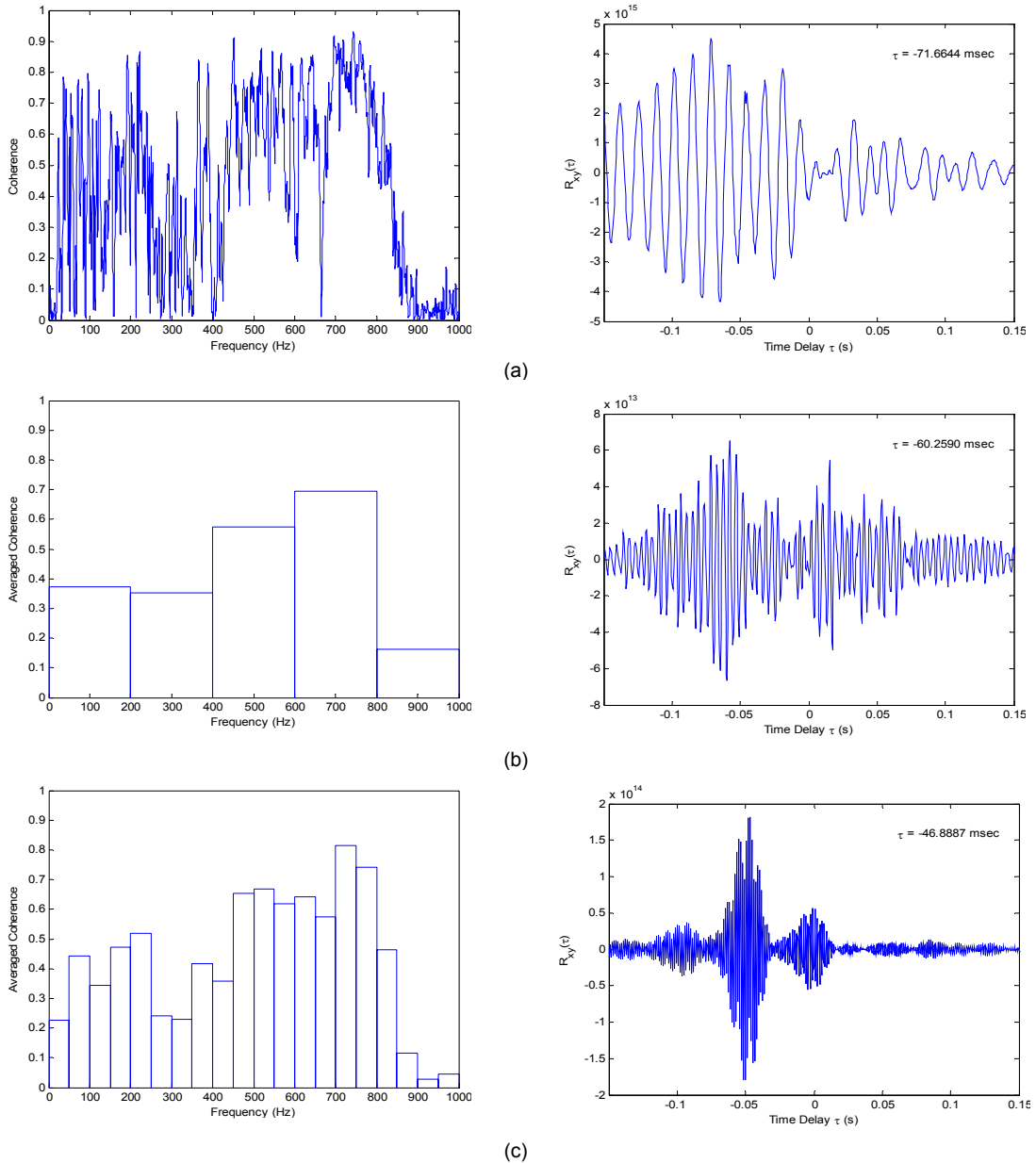


Fig. 6 Coherence functions and cross-correlation functions $R_{xy}(\tau)$ of measured leak signals from Test 1. (a) No BPF. (b) averaged coherence function after 200 Hz interval BPFs and $R_{xy}(\tau)$ for 0 - 200 Hz BPF case (c) averaged coherence function for 50 Hz interval BPFs and $R_{xy}(\tau)$ for 700 - 750 Hz BPF case

주파수 대역을 적용하면 누수 위치 추정 오차가 줄어드는 것이 확인된다.

Fig. 7는 Test 2의 결과이다. 즉, Test 1에서는 No BPF의 경우 $\tau = -71.6644$ ms, 0-200 Hz BPF의 경우 $\tau = -71.6644$ ms 그리고 700-750 Hz BPF의 경우 $\tau = -71.6644$ ms 로 변화함을 알 수 있다. 이것은 누수지점 추정으로 계산해 보면 각각 $d_1 =$

175.323 m($e = -16.023$ m), 175.275 m(-15.975 m) 그리고 158.600 m(0.700 m)가 된다.

또한 동일한 측정에 대해서도 측정할 때마다 가장 큰 코히어런스 평균값을 가지는 주파수 대역이 바뀔 수 있다는 점이다. 그러므로 측정 때마다 높은 코히어런스 평균값을 가지는 지배적인 주파수 대역을 찾아 낸 뒤에 누수 위치를 계산하는 과정

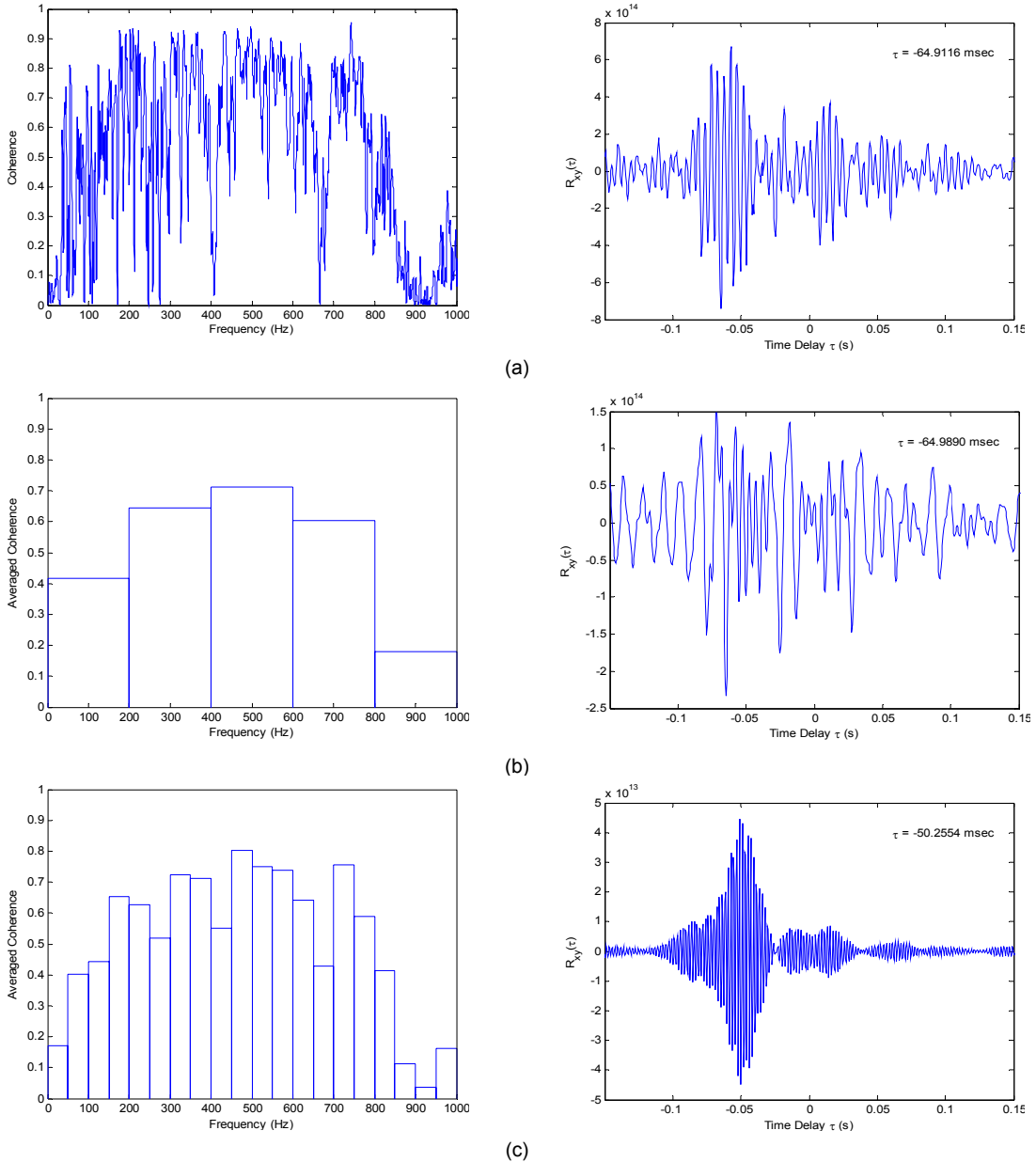


Fig. 7 Coherence functions and cross-correlation functions $R_{xy}(\tau)$ of measured leak signals from Test 2. (a) No BPF. (b) averaged coherence function after 200 Hz interval BPFs and $R_{xy}(\tau)$ for 0 - 200 Hz BPF case (c) averaged coherence function for 50 Hz interval BPFs and $R_{xy}(\tau)$ for 450 - 500 Hz BPF case

을 거쳐야 그 정확도가 향상된다는 것이다.

4.2. 주파수 대역 변화와 창 함수의 적용

Table 1에서 정의된 6가지의 창 함수를 2차례 실험을 통해 측정된 누수신호에 대해 적용시켰다. Table 2와 3는 Test 1과 Test 2에 대해 각각 6가지의 창 함수를 적용했을 때 발생하는 누수 위치 오차를 나타낸 것이다. Table 2는 Test 1의 경우에 대해 No BPF, 600-800 Hz, 700-750 Hz로 구분지어 그 오차를 나타내었고, Table 3는 Test 2의 경우에 대해 No BPF, 400-600 Hz, 450-500 Hz로 구분지어 나타낸 것이다.

Table 2와 3에서 보는 바와 같이, 사각창, Roth 창 및 Wiener창의 경우 대역통과필터를 적용시키지 않으면 매우 큰 오차를 보였다. 특히 Roth창 함수의 경우 가장 큰 누수지점 추정 오차를 보였을 뿐 아니라 대역통과필터와 동시에 혼합 적용을 시켜도 개선되는 결과를 보여 주지 못했다.

그렇지만 사각창 및 Wiener창의 경우는 대역통과필터의 적용이 획기적으로 누수지점 추정의 개선을 가져 왔다. 즉, Test 1의 경우 사각창에 대해 No BPF일 때는 오차율 $e/D = -16.0234 / 253.9 = -6.4$ (%)에서 BPF 700 - 750 Hz일 때는 $e/D = 0.3$ (%)로 감소되었으며, Test 2의 경우 사각창에 대해 No BPF일 때는 오차율 $e/D = -11.4653 / 253.9 = -4.5$ (%)에서 BPF 400 - 600 Hz일 때는 $e/D = 0.5$ (%)로 감소되었다.

그리고 SCOT창, PHAT창 및 M 창은 대역통과필터를 적용시키지 않아도 우수한 누수지점 추정 결과를 보여 주었다. 아울러 대역통과필터를 적용하여도 Test 1과 Test 2의 두 경우 모두 적용시키지 않은 경우와 거의 유사한 오차율 $e/D = 1.1 / 253.9 = 0.4$ (%)을 보였다.

4.3. 주파수 대역 필터링을 결합한 창 함수의 적용

이상에서 보는 바와 같이, 높은 코히어런스 함수값을 가지는 대역통과필터는 잡음에 노출이 심한 누수신호의 특성을 안정적으로 순수한 누수신호를 추출하는데 역할을 한다. 이렇게 BPF 600-800으로 필터링된 누수신호에 대해 가장 정확한 추정을 보이는 SCOT, PHAT, ML창 함수 3개를 채택하여 평균적인 누수지점을 추정해 보

Table 2 Leak locating errors by 6 window functions application for Test 1

	No BPF	600-800 Hz	700-750 Hz
Rectangular	-16.0234 m	-1.6064 m	0.7002 m
Roth	25.3444 m	25.3241 m	25.2599 m
Wiener	-11.5192 m	-1.6076 m	0.7003 m
SCOT	1.1358 m	1.1317 m	0.6602 m
PHAT	1.1089 m	1.1076 m	1.1178 m
ML	-1.5275 m	-1.5294 m	-1.5288 m

Table 3 Leak locating errors by 6 window functions application for Test 2

	No BPF	400-600 Hz	450-500 Hz
Rectangular	-11.4653 m	1.2366 m	-1.5724 m
Roth	23.4013 m	23.4105 m	23.3673 m
Wiener	-11.4721 m	1.2367 m	-1.5726 m
SCOT	1.1548 m	1.1489 m	1.1601 m
PHAT	1.1335 m	1.1295 m	1.1367 m
ML	1.1826 m	1.1773 m	1.1903 m

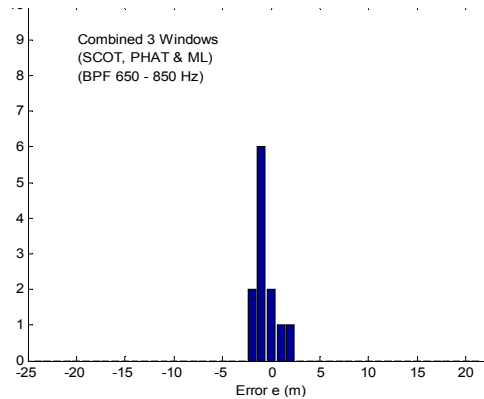


Fig. 8 Histogram of combined frequency band (600 - 800 Hz BPF) based on coherence function and three windowing functions

았다. Fig. 8은 4회의 실험 결과에 3개의 창 함수를 적용시켜 모두 12번의 누수지점 추정한 결과를 히스토그램으로 나타낸 것이다. 즉, 평균 추정 누수지점 $d_{le} = 159.27$ m로서 오차 $e = -0.03$ m를 보여 주었다.

이것은 실제 누수 탐지 알고리즘의 적용에 있어서 중요한 방법론을 제시해 준다. 즉, 실제 잡음이 많은 누수 측정신호로부터 코히어런스 함수가 높은 주파수 대역의 필터링 후에 중요한 창 함수를 동시에 적용하여 누수지점을 찾는 것은

확률적인 접근법으로서 매우 정밀한 누수지점 추정
정에 강력한 수단으로 이용될 수 있다.

5. 결론

지하매설 상수도 배관의 누수지점 탐지의 정확
도 개선을 위하여 실험을 통해 확보한 누수신호
에 대한 주파수 대역 변화와 창 함수의 적용에
따른 효과를 분석하였다. 그 결과 다음과 같은
결론을 얻었다.

- (1) 누수지점의 추정에는 누수신호의 전파속도와
누수신호 간의 도달시간차의 추정이 중요하다.
특히 결정적으로 중요한 도달시간차의 정
확한 추정은 신호처리기법을 통해 개선시킬
수 있다.
- (2) 누수신호는 주파수에 따라 그 전파 속도가
변하는 분산적 특징을 가지므로 주파수에 매
우 의존적이다.
- (3) 측정된 상수도 배관의 누수신호는 일반적으
로 매우 많은 잡음에 노출되어 있으므로 다
수의 측정이 필요하고, 그 때마다 코히어런스
함수의 값이 높은 주파수 대역을 통과시킨
신호로 누수지점을 추정하면 오차를 감소시
킬 수 있다.
- (4) 다양한 창 함수의 적용은 누수신호의 도달시
간차의 정확한 추정에 기여를 한다. 특히,
SCOT, PHAT 및 ML창은 중요하게 적용할
수 있다.
- (5) 이러한 대역통과필터 및 창 함수의 혼합 적
용은 누수지점 추정의 오차를 안정적으로 감
소시키는데 적용할 수 있다.
- (6) 실제 실험에서 측정된 신호에 통계적 기법으
로 적용한 결과 이러한 접근법이 매우 효과
적임이 확인되었다.

후 기

본 논문은 국토교통부 물관리연구사업의 연구
비 지원 (2013년)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 KSNT*, Vol. 23, No.
3, pp. 89-98 (2003)