

지하매설 플라스틱 배관의 누수지점 추정을 위한 창함수 비교 연구

Comparison of Window Functions for the Estimation of Leak Location for Underground Plastic Pipes

이 영 섭*

Young-Sup Lee

(2010년 4월 12일 접수 ; 2010년 5월 4일 심사완료)

Key Words : Leak Location Detection(누수지점 탐지), Time Delay Estimation(시간지연 추정), Cross-correlation Function(상호상관함수), Window Function(창함수), Plastic Pipe(플라스틱 배관)

ABSTRACT

It is widely known that the leak locating of underground plastic pipelines is much more difficult than that of cast iron pipelines. The precision of the leak locating depends upon the speed of leak signal and the time delay estimation between the two sensors on the pipeline. In this paper, six different windowing filters are considered to improve the time delay estimation especially for the plastic pipelines. The time delay is usually estimated from the peak time of cross-correlation functions. The filtering windows including rectangle, Roth, Wiener, SCOT, PHAT and maximum likelihood are applied to derive the generalized cross-correlation function and compared each other. Experimental results for the actual plastic underground water supply pipeline show that the introduction of the filtering windows improved the precision of time delay estimation. Some window functions provide excellent leak locating capability for the plastic pipe of 98 m long, which is less than 1 % of the pipe lengths. Also a new probabilistic approach that the combinations of all results from each filtering window is suggested for the better leak locating.

1. 서 론

지하매설 상수도 배관은 누수발생시에 지상에서 그 위치를 육안이나 단순한 듣기로 정확히 탐지하는 것은 대단히 까다로운 일이다. 이런 경우 통상적으로 배관과 탐지자 사이엔 흙이나 아스팔트와 같은 불투명의 불균질 매질이 존재하기 때문에 전통적인 청음봉(listening rod) 등과 같은 숙달자에 의존적인 탐지법이 있어 왔다. 그런데 1990년대 이후 상용화된 누수음의 측정에 기초한 누수음 상관기(leak noise correlator)를 사용하더라도 누수위치 추정의 정

확도를 향상시키는 데는 한계가 있어 왔다^(1,2). 특히 누수음 상관기는 직선관의 경우 통상 2개의 센서를 누수예상지점을 포함하는 구간의 양단 2곳에 설치하며 이에 탐지된 누수 신호의 상호상관함수(cross-correlation function)에서 얻어진 시간지연(time delay) 또는 도달시간차(time arrival difference)로서 추정하는 것이다.

그런데, 상수도용으로 많이 쓰이는 플라스틱관의 경우는 주철관에 비해 누수지점 탐지가 상대적으로 매우 까다로운 것으로 알려져 있다⁽³⁾. 이것은 누수로 인한 진동이 감쇠가 큰 재료인 플라스틱 배관의 특성으로 인해 누수지점으로 부터 센서의 거리가 멀면 누수음을 측정하기 어렵기 때문이다. 반면 주철관은 상대적으로 더 먼 거리에서 도 누수지점을

* 교신저자 ; 정회원, 인천대학교 임베디드시스템공학과
E-mail : YSL@incheon.ac.kr
Tel : (032)835-8656, Fax : (032)835-8760

탐지할 수 있다.

그리고 상관법은 누수신호의 전파속도와 상호상관함수의 피크치에 대한 시간지연(time delay)을 추정해 내는 것이 누수탐지의 정밀도를 결정한다^(2,3). 그런데 누수신호의 전파속도는 다양한 지하매설 플라스틱 배관에 대한 실험을 통한 데이터베이스의 구축으로 정확도가 높은 자료를 얻을 수 있다⁽⁴⁾. 이와는 달리, 시간지연의 경우는 누수와 배관과의 물리적 연성에 의한 누수연관 신호를 포착해야 하므로 통상 노이즈에 노출된 지하매설 배관에서 얻어진 신호속에 포함되어 있는 순수한 누수신호만을 필터링시키는 기법이 필수적이다.

이러한 시간지연의 추정 문제는 Kanpp과 Carter에 의한 일반화된 상호상관법(generalized correlation method)의 제안 이후⁽⁵⁾, 많은 연구자들이 개선된 창필터(windowing filter)를 제시하였다⁽⁶⁻¹⁰⁾.

이 연구에서는 이러한 잡음이 포함된 배관신호에서 두 개의 가속도계를 사용할 경우 얻어지는 상호상관함수의 시간지연을 더욱 정밀하게 계산하기 위한 창함수를 실험 결과를 바탕으로 상호 비교하며, 새로운 추정법을 제시한다.

2. 누수탐지와 도착시간차 추정법

지하매설 배관에 대한 누수탐지를 위한 도달시간차 방법의 원리는 이미 참고문헌 (2)에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 간략하게만 기술한다. Fig. 1(a)와 같이 유체가 가득 찬 지하매설 플라스틱 배관의 한 지점에 누수가 발생할 때 두 개의 센서(예. 가속도계)를 거리 D 의 간격으로 배관에 설치하고, 각 센서에 도달하는 누수신호 도착시간 차이의 계산이 가능하면, 아래의 식에 의해 누수 위치를 탐지할 수 있다⁽²⁾.

$$d_1 = (D - c \cdot \Delta t) / 2 \quad d_2 = D - d_1 \quad (1)$$

여기서, c 는 플라스틱 배관과 관내 유체의 연성거동(coupled behavior)에 의한 누수신호의 전파속도(propagation speed)이고, $\Delta t = t_2 - t_1$ 는 도달시간차이다.

Fig. 1(a)처럼, 센서 1이 누수지점으로부터 센서 2에 비해 가까운 곳에 위치하고 있다면, 센서 1은 누수신호를 센서 2보다 먼저 받게 될 것이다. 그리고

두 센서 신호 x 및 y 에 대한 상호상관함수(cross-correlation function) $R_{xy}(\tau)$ 를 계산하면 누수신호의 도달시간차 Δt 를 추정할 수 있다. 즉, 누수지점 위치 d_1 과 d_2 는 c 와 Δt 를 알 수 있으면 추정 가능하다는 의미이다.

그런데, 일반적으로 누수탐지 센서는 순수한 누수신호뿐 아니라 센서 주변의 잡음을 같이 측정하게 되므로 센서가 측정한 누수신호는 주변 잡음에 오염될 가능성이 매우 높다. 잡음에 오염된 채로 상호상관함수를 계산하면 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 뚜렷한 상관함수 피크치를 분간하기 어려워지게 되며, 곧 이것은 두 신호의 도달시간차 Δt 를 추정하기가 힘들게 된다는 것을 나타낸다.

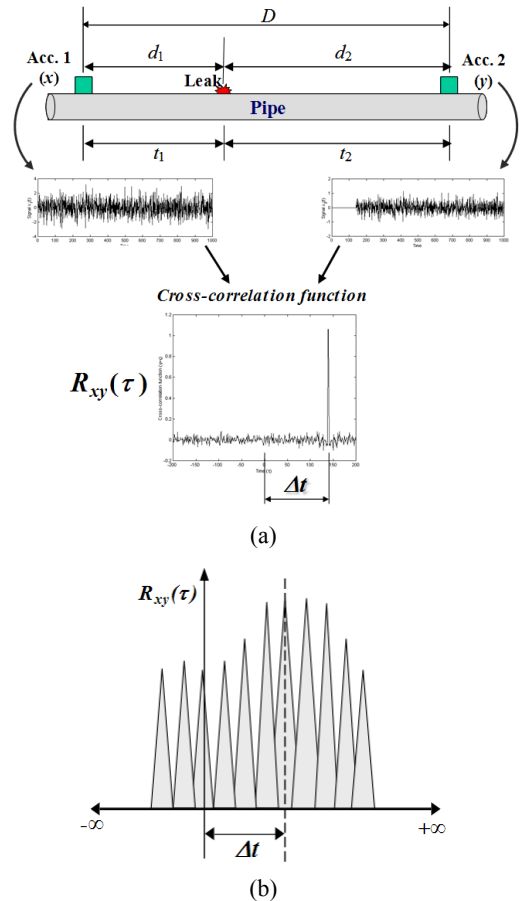


Fig. 1 (a) Leak location detection based on the cross-correlation function, (b) A typical cross-correlation function corrupted with ambient noise

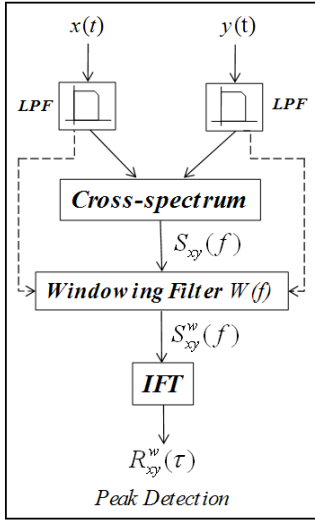


Fig. 2 Application of a windowing filter to obtain improved leak location detection

그래서 이와 같은 주변 잡음을 제거하기 위해서는 Fig. 2에 보는 것 같은 특정 주파수 이하의 신호만을 계측하기 위한 저역통과필터(low pass filter) 뿐 아니라 두 센서 측정신호로부터 의미 있는 주파수 대역을 강조하는 가중함수(weighting function)를 적용한 창함수(window function)를 통한 필터링이 필수적으로 요구된다. 이에 대해서는 3절에서 상세히 기술한다.

3. 일반화 상호상관함수 및 창필터

3.1 일반화 상호상관함수

Knapp and Carter는 시간지연의 추정을 더욱 체계화시킨 일반화 상호상관함수(generalized cross-correlation function: GCC) $R_{xy}^w(\tau)$ 를 도입하였는데⁽⁵⁾, 이것은 가중함수 또는 창함수 $w(\tau)$ 를 가지는 것으로 시간영역에서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{xy}^w(\tau) = w(\tau) * R_{xy}(\tau). \tag{5}$$

그래서 창함수를 가진 상호 스펙트럼(windowed cross spectral density function) $S_{xy}^w(f)$ 은 아래와 같이 정의될 수 있다.

$$S_{xy}^w(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}^w(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = W(f) S_{xy}(f) \tag{6}$$

여기서 $W(f)$ 및 $S_{xy}(f)$ 는 각각 $w(\tau)$ 및 $R_{xy}(\tau)$ 의 주파수 영역에서의 표현이다. 이 때 $W(f)$ 는 누수신호와 관련된 주파수를 강조하는 창필터(windowing filter) 역할을 수행하게 된다. 그러므로 GCC 함수 $R_{xy}^w(\tau)$ 는 $S_{xy}^w(f)$ 의 역푸리에 변환으로 구할 수 있다⁽¹¹⁾.

$$R_{xy}^w(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xy}^w(f) e^{j2\pi f\tau} df \tag{7}$$

3.2 창필터(windowing filters)

그래서 시간지연 추정을 위한 창필터에 대한 연구는 오랫동안 지속되어 왔다⁽⁵⁻¹⁰⁾. 이 논문에서 취급하는 주요한 6가지의 창필터에 대해 간략히 언급한다.

Basic rectangular window : 가장 기본적인 창필터다.

$$W_B(f) = 1 \tag{8}$$

ROTH window : 센서에서 수신된 신호의 자기 스펙트럼의 역수로 정의되어 $S_{xy}(f)$ 를 정규화시킨다⁽⁶⁾.

$$W_R(f) = \frac{1}{S_{xx}(f)} \tag{9}$$

Wiener window : 코히어런스 함수를 도입하여 상관관계가 좋은 주파수를 강조하는 역할을 한다⁽⁷⁾.

$$W_W(f) = \gamma_{xy}^2(f) \tag{10}$$

SCOT window : 누수음과 같은 광대역 신호에 비해서 지나치게 큰 tonal noise를 억제하는 역할을 한다⁽⁸⁾.

$$W_S(f) = \frac{1}{\sqrt{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}} \tag{11}$$

PHAT window : 센서, 누수원, 누수경로를 포함한 물리적 시스템의 주파수 특성에 의한 영향을 제거하는 역할을 한다⁽⁹⁾.

$$W_P(f) = \frac{1}{|S_{xy}(f)|} \tag{12}$$

Maximum likelihood(ML) window : 측정된 신호가 주로 랜덤 가우시안(random Gaussian) 일 때 시간지연 추정의 향상을 위해 적용된다⁽¹⁰⁾.

$$W_{ML}(f) = \frac{\gamma_{xy}^2(f)}{[1 - \gamma_{xy}^2(f)] |S_{xy}(f)|} \quad (13)$$

4. 실험결과 및 분석

4.1 실험

대전 용계동의 실제 지하매설 상수도 배관에 대한 누수탐지 실험을 수행하였다. 실험대상은 호칭경 100A의 플라스틱 배관(PE관, 최소외경 = 114 mm, 최소두께 = 7.4 mm)으로 지하 약 2 m 위치에 매설되어 있었다.

센서간 길이 $D = 98$ m, 누수지점으로부터 센서 1 및 센서 2까지의 거리는 각각 $d_1 = 59$ m, $d_2 = 39$ m로 정하였다. 측정 주파수 구간은 0 ~ 500 Hz이었으며, 배관에 볼밸브를 연결하여 누수장치를 설치하였다. 가속도계는 저주파에서의 감도가 뛰어난 B&K 8313C를 배관 외부에 부착하여 실험을 수행하였다. B&K Nexus 및 PULSE를 신호조정기 및 분석기로 각각 사용하였다. 총 35회에 걸친 누수탐지 실험이 반복 수행되었다.

4.2 누수신호 특성 및 전파속도 추정

이 실험의 측정결과를 보여 주는 Fig. 4(a)는 누수지점으로부터 거리가 먼 $d_1 = 59$ m 인 센서 1의 시간영역 신호 $x(t)$ [Fig. 4(a)의 윗그림]와 거리가 가까운 $d_2 = 39$ m인 센서 2의 신호 $y(t)$ [Fig. 4(a)의 아래그림]인데, 누수지점으로부터 거리가 멀어 질수록 플라스틱 관의 재료적 특성인 고감쇠로 인해 신호 크기가 급격히 감소함을 알 수 있다.

Fig. 4(b)는 상호스펙트럼(crossspectrum) $S_{xy}(f)$ 으로서 175 Hz 이하의 저주파에서의 응답특성이 좋으며 50 ~ 60 Hz 근방에 공진이 나타나고 있는데, 플라스틱관에서는 장거리 탐지를 할수록 금속 파이프에 비해서 상대적으로 저주파에서 누수 현상이 탐지된다. 이것은 코히어런스 함수 $\gamma_{xy}^2(f)$ 를 나타낸 Fig. 4(c)에서 보는 것과 같이 30 ~ 175 Hz 범위에서 좋은 값을 보여 주어 플라스틱관에서 저주파에 대한



Fig. 3 Experimental set-up for leak locating tests of the plastic pipe (a) Leak valve, (b) Installed accelerometer

탐지의 중요성을 뒷받침 하고 있다.

Fig. 4(d)는 주파수에 따른 위상응답 $\phi_{xy}(f)$ 을 나타낸 것인데, 특히 100 ~ 175 Hz의 구간에서 선형위상(linear phase) 이라는 아래와 같이 정의되는 매우 중요한 특성을 확인할 수 있다.

$$\phi_{xy}(f) = -\alpha 2\pi f \quad (14)$$

이때 α 는 상수이다. 그래서 이 구간에서는 두 신호간의 위상지연 (phase delay) τ_p 는 그룹지연 (group delay) τ_g 와 동일하므로, 상수 $\alpha = \tau_p = \tau_g$ 이며, 이것은 위상응답의 기울기로서 $\alpha = -0.04085$ 이다. 위상 그림으로부터 이것은 $\tau_g = -\Delta\phi/\Delta\omega = -19.25(\text{deg}) / 2\pi * 75 (\text{Hz}) = -40.85(\text{msec})$ 는 누수로 인한 각각의 가속도계에서 계측된 두 신호간의 시간지연(엄밀하게는 time advance)으로 해석될 수 있다. 즉, 누수지점으로부터 가속도계 2가 가속도계 1보다 더 가까이 위치하기 때문에 이러한 결과로 나온 것으로 해석할 수 있다. 실제로 $d_1 = 59$ m이고 $d_2 = 39$ m이다. 이것으로 인해 Fig. 4(d)에서는 위상이 주파수의 증가에 따라 같이 증가하는 현상이 나타났다.

아울러 선형위상의 이 주파수 구간에서는 그룹지연이 일정하므로 그룹속도 및 위상속도도 일정함을 알 수 있다. 참고로 코히어런스 함수는 약 100 Hz ~ 175 Hz의 범위에서 두 가속도 신호간의 누수로 인한 높은 연관성을 가진 신호들이 계측되고 있음을 보여 주므로, 코히어런스가 가장 큰 그 주파수 구간에서 위상응답에 대하여 최소자승법으로 그 기울기 계산을 통해 누수신호 전파속도를 추정하였다. 즉, $c = (d_2 - d_1) / \Delta t = (d_2 - d_1) / \tau_g = -20 / -0.04085 \approx 490$ m/sec이 된다.

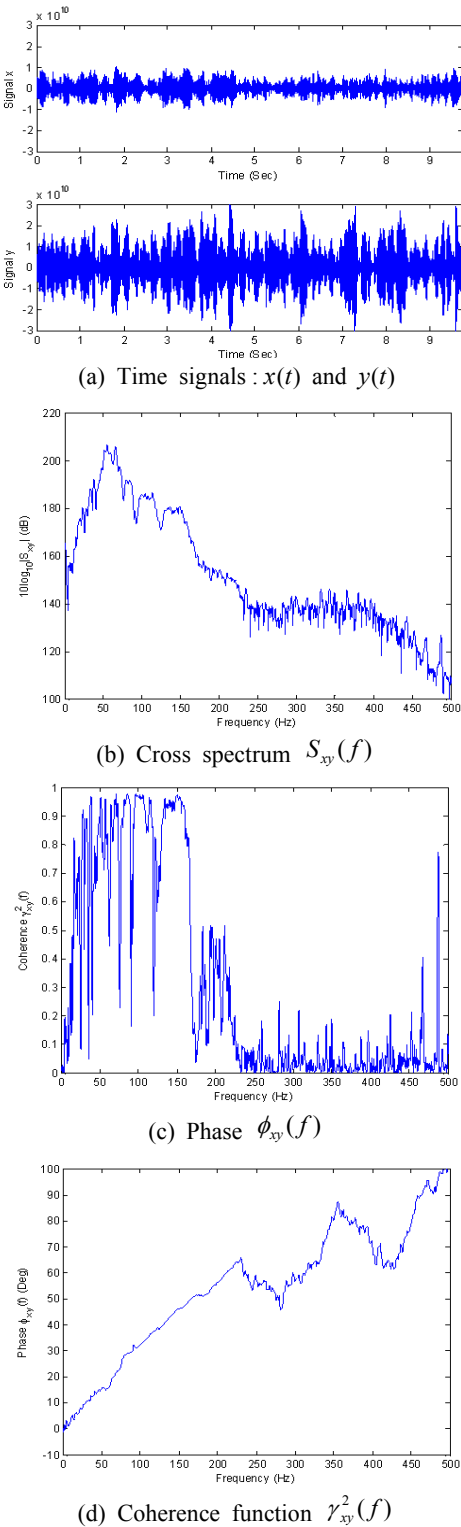


Fig. 4 Measured signal properties from accelerometers for the PE pipe when $D=98.0$ m

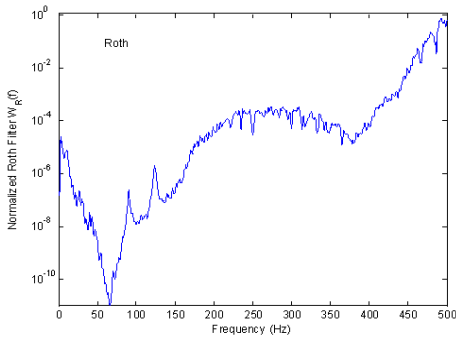
4.3 창필터를 적용한 상호스펙트럼

Fig. 5는 더욱 정밀한 시간지연을 추정하기 위해 사용된 식 (8)~(13)에서 정의된 6가지의 창필터 (windowing filter) $W(f)$ 들 중에서 4개(Roth, SCOT, PHAT 및 ML)를 주파수 영역에서 나타낸 것이다. 이 중에서 Fig. 5(a)는 Roth window로서 신호 $x(t)$ 의 자기스펙트럼 $S_{xx}(f)$ 의 역수로 정의되기 때문에 $S_{xx}(f)$ 의 anti-resonance인 주파수에서 큰 진폭을 보여 준다. 이들 창필터들의 개략적인 형상들은 서로 상당히 유사하나 세부적으로 차이가 있음을 확인할 수 있다.

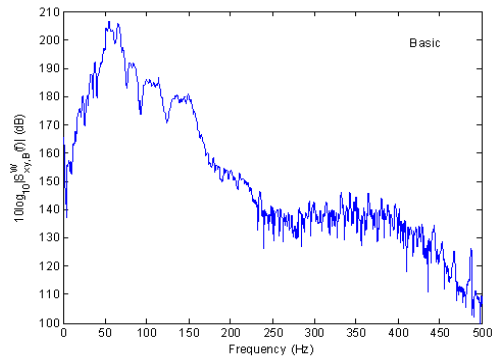
그리고 Fig. 6은 이들 창필터를 적용한 상호스펙트럼 $S_{xy}^w(f)$ 를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 기본 창을 적용시킨 것이므로 Fig. 4(b)의 상호스펙트럼 $S_{xy}(f)$ 와 동일하다. 그리고 Fig. 6(b)는 Roth window $W_R(f)$ 를 적용시킨 것인데, 특히 50, 90, 120 및 150 Hz 근방에서 큰 진폭을 보여 준다. Fig. 6(c)는 Wiener window $W_w(f)$ 를 적용시킨 것으로 식 (10)에서 정의된 대로 코히어런스 함수가 $S_{xy}(f)$ 에 곱해져서 170 Hz 이하의 주파수 성분이 더욱 강조됨을 보여 준다. Fig. 6(d)는 SCOT window $W_s(f)$ 를 적용시킨 것으로 측정된 상호스펙트럼 $S_{xy}(f)$ 의 170 Hz 이하에 존재하는 높은 진폭의 주파수 성분을 억제시킴을 보여 준다. 그리고 Fig. 6(e)는 PHAT window $W_p(f)$ 를 적용한 것으로 측정된 상호스펙트럼 $S_{xy}(f)$ 와 서로 상쇄되어 그 절대적인 진폭이 대단히 감소한다. 이것은 결국 누수시스템 전반의 주파수 특성에 의한 영향을 최소화하게 되는 것으로 알려져 있다⁹⁾. Fig. 6(f)는 ML window $W_{ML}(f)$ 를 적용시킨 것인데, 측정된 상호스펙트럼 $S_{xy}(f)$ 와 비교하여 170 Hz 이하의 진폭이 과도한 부분이 제거되었으나 Fig. 6(d)의 SCOT window가 적용된 경우보다는 덜 제거되었음을 확인할 수 있다.

4.4 일반화 상호상관함수 및 탐지지점 추정 결과 비교

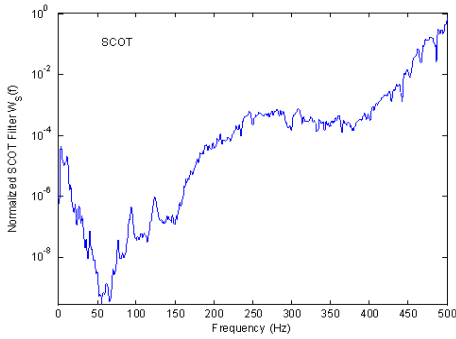
이 플라스틱배관 누수지점 탐지실험에서는 $D=98$ m, $d_1=59$ m, $d_2=39$ m인 위치에서 수행하였으며, d_1 위치 추정을 위해 35회의 측정된 실험결과를 6개의 서로 다른 창함수를 적용시킨 상호스펙트럼 $S_{xy}^w(f)$ 을 역푸리에변환(inverse Fourier transform)을 통해 상호상관함수 $R_{xy}^w(\tau)$ 을 구한 뒤 이것을 절대정규화



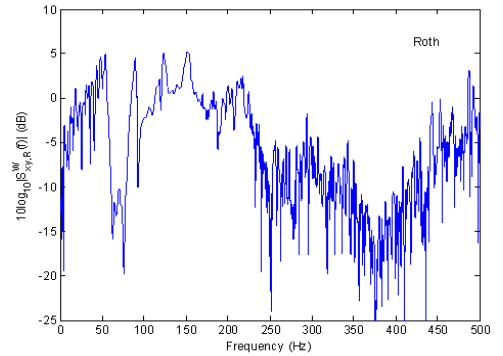
(a) Roth



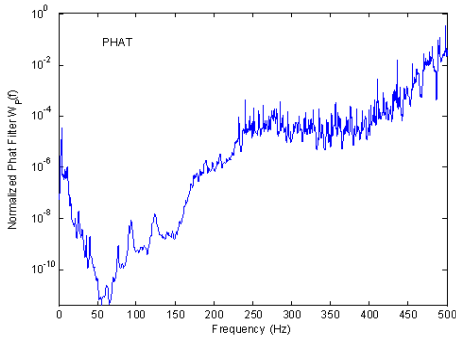
(a) Basic



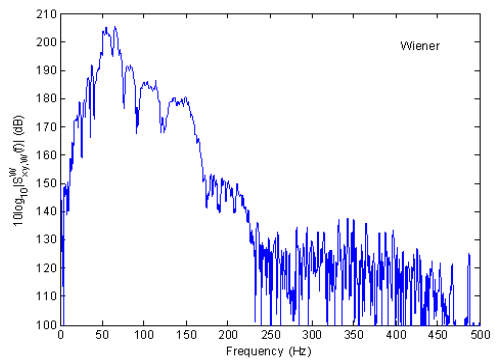
(b) SCOT



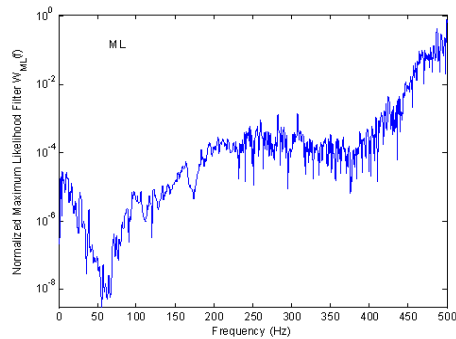
(b) Roth



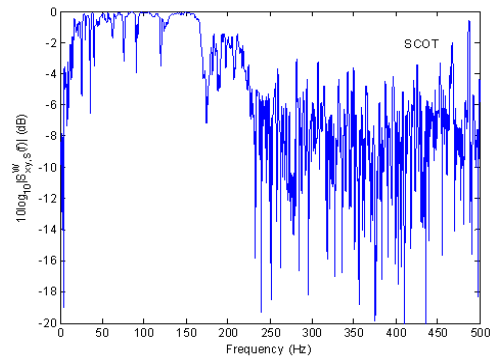
(c) PHAT



(c) Wiener

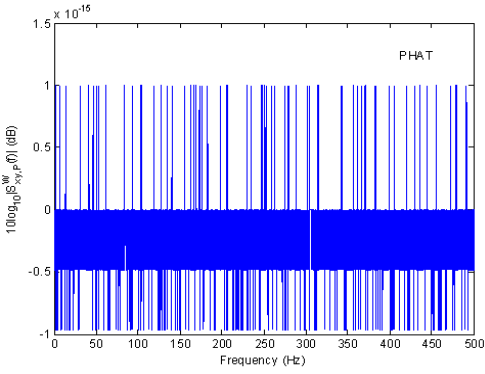


(d) ML

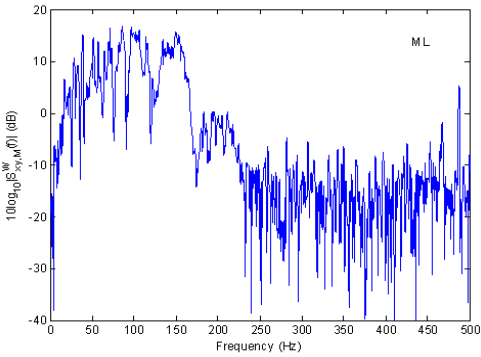


(d) SCOT

Fig. 5 Filtering windows $W(f)$ for the improved time delay estimation



(e) PHAT

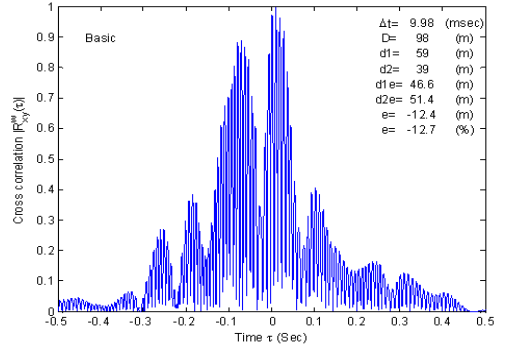


(f) ML

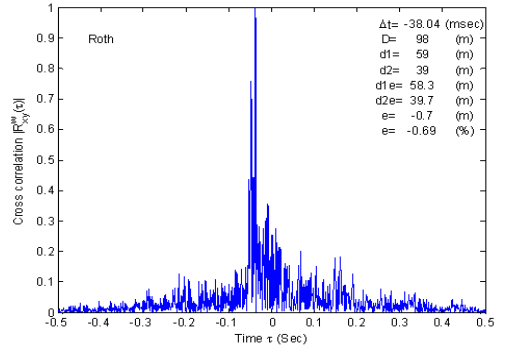
Fig. 6 Windowed cross powerspectra $S_{xy}^w(f)$

된 $|R_{xy}^w(\tau) / \max[R_{xy}^w(\tau)]|$ 로서 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7로 부터 도달시간차는 기본창, Roth, Wiener, SCOT, PHAT, ML 창함수를 적용시켰을 때 각각 $\Delta t = 9.98, -38.04, 9.92, -37.94, -38.01, -38.00$ msec 인 것으로 나타났다. 즉 추정된 누수지점의 위치는 각각 $d_{1e} = 46.6, 58.3, 46.6, 58.3, 58.3, 58.3$ m(실제 $d_1 = 59.0$ m) 이었다. 이것은 탐지위치 오차율 $e/D = (d_{1e} - d_1)/D$ 이 각각 $-12.70, -0.69, -12.68, -0.72, -0.70, -0.70$ %를 보였는데, 기본창 및 Wiener window는 10%가 넘으며 거의 동일한 오차율을 보였는데 이것은 Fig. 6(a)와 6(c)의 상호스펙트럼도 거의 동일한 것이 이를 뒷받침해 주고 있다. 반면에 Roth, SCOT, PHAT, ML window는 1% 미만의 정밀한 탐지위치 오차율을 보였다.

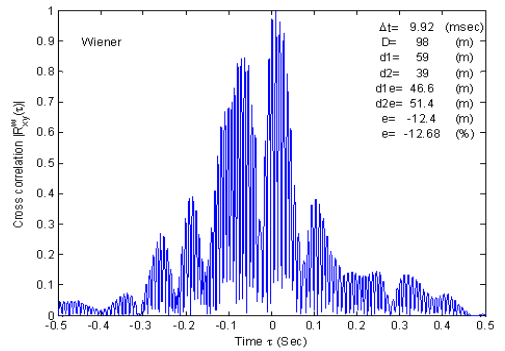
PE pipe에서 d_1 위치 추정을 위해 35회의 실험 결과를 6개의 창함수를 각각 적용시켜 탐지된 누수 위치를 Fig. 8의 히스토그램으로 나타내었다. 각 히스토그램은 수직축에는 누적도수를 수평축은 2m의



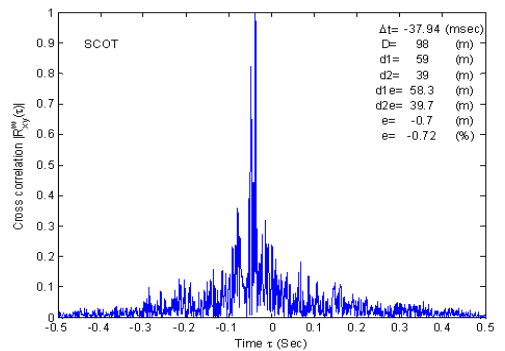
(a) Basic



(b) Roth



(c) Wiener



(d) SCOT

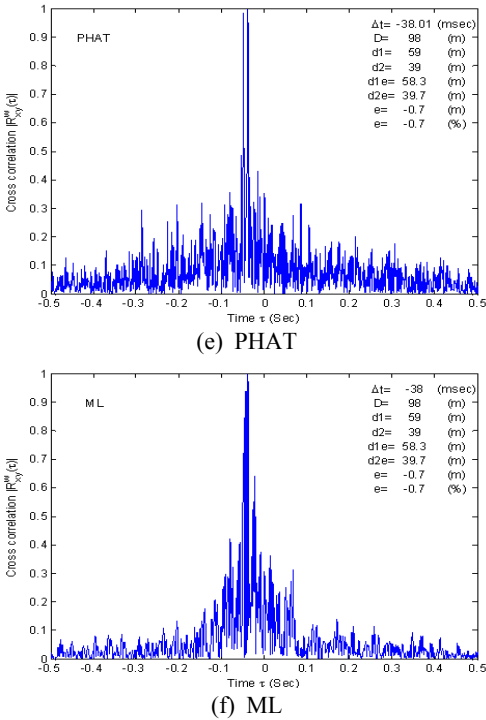


Fig. 7 Absolute and normalized cross correlation function $|R_{xy}^w(\tau) / \max[R_{xy}^w(\tau)]|$ at the PE pipe when $D=98$ m

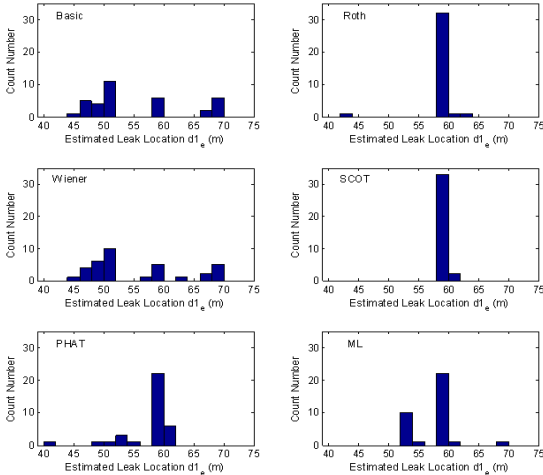


Fig. 8 Comparison of d_1 estimation histograms with 6 different filtering windows when true $d_1 = 59$ m

계급간격으로 나타난 추정누수위치를 각각 의미한다. 이 그림으로부터 SCOT 및 roth 창함수가 35회

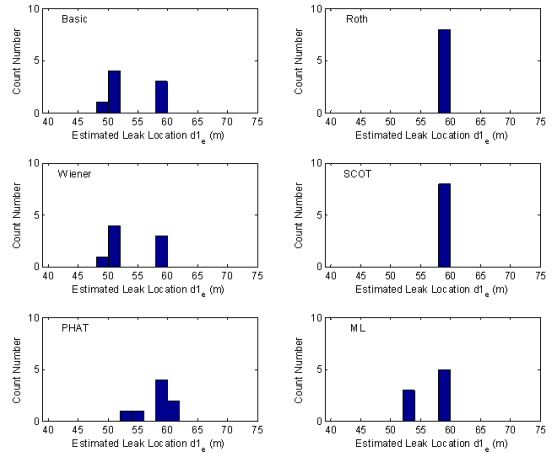


Fig. 9 Comparison of d_1 estimation histograms for the high leak rate(valve angle = 45 deg) when true $d_1 = 59$

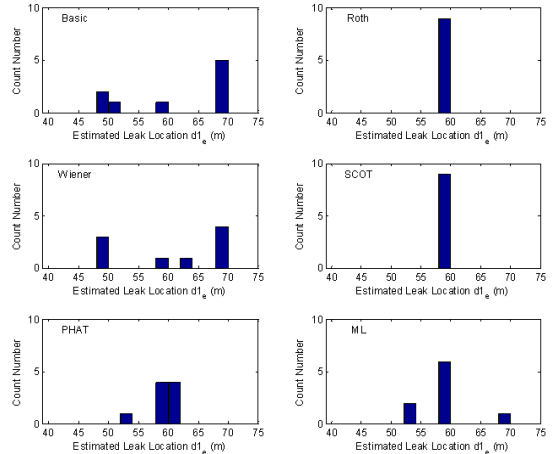


Fig. 10 Comparison of d_1 estimation histograms for the low leak rate(valve angle = 10 deg) when true $d_1 = 59$ m

의 실험에서 각각 33회 및 32회가 누수지점을 58.0 ~ 60.0 m로 추정하여 매우 높은 적중률을 보였다. PHAT 방법은 22회, ML방법은 21회의 적중률을 보였다. 서로 유사한 특성의 기본창 및 Wiener 방법은 가장 많은 회수가 50~52 m를 d_1 위치로 추정하였는데, 누수위치 추정이 44~70 m에 걸쳐 넓게 분포되어 정확성이 낮았다.

아울러 누수율(leak rate)에 따른 각 창함수 별 누수지점 추정위치를 Fig. 9 및 Fig. 10에 비교하여 나타내었다. 누수지점에 설치된 볼밸브의 각도를 조절

하여 높은 누수율(각도 45도 개방)와 낮은 누수율(각도 10도 개방)로 각각 8회 및 9회 실시하였다. 누수율과 관계없이 Roth 및 SCOT window는 100% 정확하게 누수위치를 찾았으며, ML 창함수는 각 5회씩, PHAT 창함수는 각 4회씩의 적중률을 보였다. 반면 기본창 및 Wiener 창함수는 누수율에 따라 적중률의 차이가 관측되었는데, 누수율이 높을수록 적중률이 올라감이 입증되었다.

이상과 같이 이 연구 결과에서는 플라스틱 배관에서는 일반적으로 누수율이 낮을수록 누수지점 탐지 적중률은 감소하고, 기본창이나 Wiener 창함수 보다는 SCOT이나 Roth 창함수를 사용하는 것이 더 높은 적중률을 보인다고 정리할 수 있다.

그래서 실제 누수지점 탐지에는 다수에 걸친 측정을 통해 다양한 창필터를 적용한 각 결과들을 통계적으로 처리해서 확률적으로 가장 높은 지점을 찾는 것이 타당하다고 판단된다. 특히, 플라스틱 배관에 대한 누수탐지는 상대적으로 우수한 4개의 창함수(SCOT, Roth, ML 및 PHAT)를 모두 구동시켜 가장 높은 확률의 위치를 누수지점으로 예측하는 것이 타당하다고 제안한다.

5. 결 론

이 연구에서는 누수가 발생한 지하매설 플라스틱 배관의 누수지점을 찾기 위한 연구로서 다양한 창필터를 적용한 일반화 상호상관함수의 피크치에 대한 시간지연을 계산하여 누수지점을 추정하는 기법에 대해 기술하였다. 실험결과 기본적 사각 창필터의 상호상관함수법에 비해 다른 창함수를 적용한 경우가 더 정밀한 시간지연값을 추정해 내어 누수탐지의 정확도를 플라스틱 배관의 경우 $D = 98$ m에서 D 의 1% 이내의 오차로서 찾아내었다. 또한 다수의 방법을 동시에 적용시킨 뒤 이를 모두 모아 통계학적으로 누수지점을 탐지하는 방안을 제안하였다. 이 방법은 플라스틱 배관에 대해 정밀하고 효과적인 누수지점 탐지 성능을 보였다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재

원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2009-0084728).

참 고 문 헌

- (1) 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.
- (2) Lee, Y.-S. and Yoon, D.-J., 2004, "Pinpointing of Leakage Location Using Pipe-fluid Coupled Vibration," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 95~104.
- (3) Hunaidi, O. and Chu, W. T., 1999, "Acoustical Characteristics of Leak Signals in Plastic Water Distribution Pipes," Applied Acoustics, Vol. 58, No. 234~254.
- (4) Palmer Environmental, MicroCorr, Palmer Environmental Services.
- (5) Knapp, C. H. and Carter, G. C., 1976, "The Generalized Correlation Method for the Estimation of Time-delay," IEEE ASSP, Vol. 24, No. 4, pp. 320~327.
- (6) Roth, P. R., 1971, "Effective Measurements Using Digital Signal Analysis," IEEE Spectrum, Vol. 8, pp. 62~72.
- (7) Hero, A. O. and Schwartz, S. C., "A New Generalized Cross Correlator," IEEE ASSP, Vol. 33, No. 1, pp. 38~45.
- (8) Carter, G. C., Nuttall, A. H. and Cable, P. G., "The Smoothed Coherence Transform," Proceedings of the IEEE, 61, pp. 1497~1498.
- (9) Brandstein, M. S., Silverman, H. F., 1997, "A Robust Method for Speech Signal Time-delay Estimation in Reverberant Rooms," IEEE Conference ICASSP-97, pp. 375~378.
- (10) Hannan, E. J., Thomson, P. J., 1973, "Eliminating Group Delay," Biometrika, 60, pp. 241~253.
- (11) Bendat J. S. and Piersol A. G., 1991, Random Data, John Wiley & Sons.