

가속도계를 이용한 상수도 배관의 누수위치 식별연구 Pinpointing of Leakage Location of Water Pipelines using Accelerometers

이영섭*·윤동진**·정중채**

Young-Sup Lee, Dong-Jin Yoon and Jung-Chae Jeong

Key Words : Leak detection (누수탐지), Leak noise (누수소음), Correlation method (상관법), Acoustic wave propagation (음파전달), Water pipelines (상수도 배관).

ABSTRACT

Leaks in underground pipelines can cause social, environmental and economical problems. One of a good countermeasures of leaks is to find and repair of leak points of pipes. Leak noise is a good source to identify the location of leak points of pipelines. Although there have been several methods to detect the leak location with leak noise, such as listening rods, hydrophones or ground microphones, they were not so efficient tools beca. In this paper, two accelerometers are used to detect leak locations which could provide an easier and efficient method. The filtering, signal processing and algorithm is described for the detection of leak location. A 120m-long pipeline system for experiment is installed and the results with the system show that the algorithm with the two accelerometers gives very accurate pinpointing of leaks. Theoretical analysis of sound wave propagation speed in underground pipes is also described.

1. 서론

국내 상수도 관망은 수도 시설의 중요한 구성요소이지만 대부분이 지하에 매설되어 있음으로 배관의 노후상태 파악이 어려워 적절한 시기에 효과적인 유지관리를 받지 못하고 있다.⁽¹⁾ 환경부의 통계에 의하면 2001년 12월말 기준으로 총 연장 120,405km 중 11년 이상 경과된 노후관이 거의 52%에 이르고 있으며, 전체 생산량의 약 14%가 누수되어 적지않은 사회 및 경제적 손실이 발생되고 있다.⁽²⁾ 이러한 지하매설 상수도 배관의 누수탐지는 육안으로 식별이 곤란하므로 누수로 인한 신호음으로 부터 누수위치를 식별하는 기술이 주로 응용되고 있으며 선진국의 경우 상용화된 제품이 개발되어 있는 상태이다.^(3,4) 그러나, 누수탐지에 쓰이는 기술의 개략적 방법은 알려져 있으나 실제 상세기술은 공개가 되지 않고 있어 국내의 기술개발이 필요한 실정이다.

누수로 인한 손실이 문제화 되면서 부터 누수위치탐지를 위한 노력이 시작되었는데, 초창기엔 청음봉(listening rod) 이나 하이드로폰이 많이 이용되었다.⁽⁵⁾ 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 숙련자가 판단해야 하므로 설치하는데 많은 어려움이 따랐다. 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.⁽⁶⁾

1970년대 들어서 좀 더 정밀한 탐지법의 필요성이 제기되었고⁽⁷⁾, 음향상관해석법 (acoustical correlation analysis)이 제안되었으나 그 당시엔 일미터이내의 극히 짧은 거리에서만 탐지가 가능하여 현실성이 없었다.^(8,9) 1990년대 들어 독일의 Fuchs 와 Riehle 은 계속된 신호를 FFT 한후 효과적인 주파수범위를 선택하여 누수위치를 탐지하는 상호상관함수를 실제에 적용, 누수지점을 정밀하게 집어 내는데 좋은 결과를 얻어 내었다.⁽¹⁰⁾ 이후 누수음 상관기 (leak noise correlator)는 상용화되어 보편적으로 쓰이기 시작하였다.

그런데, 이와같은 상관법은 시간지연 (time delay)을 이용하여 누수위치를 찾는 데, 배관내 유체의 음속을 정확히 알아야 만 한다. 그래서 Pinnington 과 Briscoe⁽¹¹⁾ 그리고 Muggleton 등⁽¹²⁾ 은 누수로 인한 배관의 진동모드에 대한 분류와 지하매설된 배관내 유체의 음파 전달속도를 이론적으로 해석하였다. Hunaidi 와 Chu 는 음파의 감쇠가 심한 플라스틱 배관에 대한 실험적 연구에서 유체와 배관이 연성된 경우 누수탐지에 결정적으로 이용되는 음파전달과 관련된 진동은 저주파에서 지배적으로 나타남을 보였다.⁽¹³⁾

이러한 배관의 진동파를 계속하는 데는, 초음파의 음향방출(acoustic emission)에 바탕한 초음

* 한국표준과학연구원
E-mail : ysllee@kriss.re.kr
Tel : (042) 868-5705, Fax : (042) 868-5639

** 한국표준과학연구원

파센서를 이용한 누수위치 탐지방식이 있으나 비교적 단거리 구간에서 가능하며⁽¹⁴⁾, 장거리의 구간의 탐지는 가속도계를 이용하여 누수로 인해 발생하는 유체의 음향파를 연성운동을 일으키는 배관의 진동을 계속해서 추정하는것이 보편적이다.⁽¹³⁾ 이러한 가속도계를 이용한 계속은 배관이나 계수변동의 외부에 수월하게 부착할수 있는 장점이 있다. 한편, Pinnington 과 Briscoe⁽¹⁰⁾는 압전와이어로 배관내부의 압력변화를 계속할 수 있는 센서를 제안하였다.

본 연구에서는 한국표준과학연구원에 설치된 모의 상수도 시스템에 대해 가속도계를 이용한 누수위치 탐지 실험에 대해 기술한다. 2 절에서는 가속도계를 이용한 누수탐지의 이론적 배경에 대하여, 3 절에서는 탐지 알고리즘 그리고 4 절에서는 실험결과에 대해 기술한다.

2. 이론적 배경

2.1 배관의 누수 신호

지하에 매설된 배관에서 천공 등으로 인해 누수가 발생하면, 광대역의 주파수에 걸친 누수 신호(leak signal)를 발생시키게 된다.⁽¹²⁾ 이는 압력이 높은 배관내부에서 압력이 낮은 배관 외부로 압력강하와 더불어 물이 뿜어져 나가면서 발생하는 신호로서 배관의 누수위치를 탐지하는데 중요하게 이용된다. 이 신호는 일시적으로 생기는 갑음과는 달리 일단 누수가 생기기 시작하면 지속적으로 계속 발생시킨다는 점에서 확연히 분간할 수 있는 신호이다. 누수지점에서의 갑작스런 압력강하의 크기, 천공(hole)의 형태 및 크기에 따라 누수신호크기가 달라질 수 있다.⁽¹³⁾

누수위치를 탐지하는데는 누수로 인한 배관내의 유체를 타고 전파해 가는 압력파를 효과적으로 센싱하는 것이 중요하다. 유체음은 배관의 누수지점을 기준으로 배관 종방향의 양끝으로 전파해 간다. 소리의 전파라는 것은 압력의 변화가 전파되어 가는 것이므로, 누수로 인한 배관내의 갑작스런 압력강하는 소리를 발생시키게 되고, 관내 유체는 배관 및 배관을 둘러싼 흙등의 주변 매질과 연성되어 음파의 전파현상을 지배하게 되는 것이다.

2.2 유체-배관 연성진동

유체가 배관속에 있을때의 음향 및 진동 특성은 유체없이 배관만 있을 때와는 매우 다른 형태를 보인다. 또한 자유공간속에 유체만 있을 때와도 분간이 된다. 그래서 유체-배관의 연성 진동 문제(fluid-pipe coupled vibration problem)는 하나의 독립된 주제로 다루지기도 해왔다.^(15,16)

유체-배관의 연성진동은 Fig. 1 과 같이 여러 가지의 모드(mode)로 나타날 수 있다. $n=0$ 모드는 '숨쉬기모드(breathing mode)' 라고 불리는 것으로 유체-배관 연성진동의 가장 기초적인 진동형태이다.⁽¹⁷⁾ $n=1$ 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.

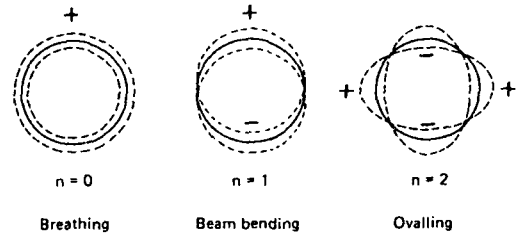


Fig. 1 Mode shapes of a circular cylindrical shell.⁽¹⁷⁾

이들 중에서 누수음의 배관내 종방향 전파와 관계가 되는 것은 $n=0$ 모드이다.^(11,12) 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 팽창또는 수축되는 변형을 하게 된다. 이러한 변형이 숨쉬기 모드에 해당되는 것이다. 그래서 유체내의 압력변화의 전파는 유체를 둘러싸고 있는 배관과 연성된 채로 quasi-longitudinal wave⁽¹⁷⁾의 형태로 퍼져 나간다. 이로 인해 원래 자유공간에선 비분산적(non-dispersive) 이어야할 유체속의 음파전달이 배관에 둘러 쌓이게 되면 주파수에 따라 음속이 바뀌는 분산적인(dispersive) 파동으로 나타나게 된다.⁽¹²⁾ 이는 순전히 배관의 탄성적 성질(elasticity) 과 유체의 거동이 연성된 것에 기인하는 것이다.

한편, $n=0$ 모드는 링주파수 (ring frequency)라고 불리는 주파수에서 공진을 일으키는데 이는 아래와 같이 정의 된다.⁽¹⁷⁾

$$f_r = \frac{c'_\lambda}{\pi d}, \quad (1)$$

여기서 d 는 배관의 평균직경 [(내경+외경)/2]이고, quasi-longitudinal wave 의 위상속도인 $c'_\lambda = [E/\rho(1-\nu^2)]^{1/2}$ 은 주파수에 독립적이다.

여기서 E 는 배관재료의 영계수, ρ 는 밀도, ν 는 포와송비이다.

상기의 식(1)에 의해 정의되는 링 주파수 아래의 주파수 영역에는 4개의 파형이 존재하며, 대부분의 에너지 전달과 관련된 것으로 알려져 있다.^(11,12) 그것은 $n=1$ 인 보의 굽힘파(bending wave)와 $n=0$ 일때 3가지의 축대칭파($s=1, 2, 3$)인데, 이들 중 $s=2$ 파는 유체와는 무관한 배관의 비틀림 파, $s=1$ 파는 유체에 기인한 파가 지배적인 파동으로서 누수탐지에 이용된다. 그리고, $s=3$ 파는 배관 셸(shell) 자체의 길이방향 압축파가 지배적인 파동인데 감쇠가 $s=1$ 파에 비해 심하다. 그래서 $n=0$ 이하의 $s=1$ 파동을 계측하는 것이 가속도계를 이용한 누수탐지에 매우 중요하다. 아울러, $n=1$ 모드나 $n=2$ 이상의 모드가 누수탐지에서 계측되면 잡음(noise)이 되어 정확한 계측을 저해하므로 이들은 필터등으로 걸러져야만 한다.

2.3 누수음 전파속도

지하에 매설된 배관내에서 누수로 인한 전파되는 $s=1$ 파의 위상속도는 유체와 배관이 탄성적 성질로서 서로 연성되어 있을 뿐만 아니라 배관외부를 감싸고 있는 흙과 같은 매질의 영향도 받는다. 그러나 상대적으로 흙과 같은 배관을 둘러싼 매질의 영향은 미미하다고 알려져 있으므로, 이의 영향을 무시하면 누수음인 $s=1$ 파의 파수(wavenumber) k 는 아래와 같이 주어질 수 있다.⁽¹²⁾

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

여기서 ω 는 주파수, h 는 배관의 두께, B_f 는 배관내 유체의 체적탄성계수, $k_f = \omega/c_f$ 는 유체의 파수(wavenumber)이며, c_f 는 자유공간에서 유체 압력파의 전파속도로서 다음과 같이 주어진다.⁽¹⁷⁾

$$c_f = (B_f/\rho_f)^{1/2}, \quad (3)$$

이때 ρ_f 는 유체의 밀도이다. 식(2)를 바탕으로 누수음($s=1$)의 전파속도는 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$c = c_f \left[1 + \frac{2B_f/d}{Eh/d^2 - \rho h \omega^2} \right]^{-1/2}, \quad (4)$$

식(4)는 배관내의 유체 누수음($s=1$)의 위상전파속도에 관한 식으로 배관재질 및 치수에 따라 그리고 주파수에 따라 그 속도가 바뀌어질 수

있는 분산적인(dispersive) 특성을 보여주고 있다. 이것은 식(3)에 나타난 자유공간에서의 유체음의 위상전파속도가 주파수와는 무관한 비분산적인(non-dispersive) 특성을 갖는 것과는 대조적이라 할 수 있다. 표 1은 누수로 인한 음향전파와 관련한 몇몇 배관재료의 특성을 나타낸 것이다.

Table 1. Leak noise propagation properties in 65A ($d=72.7\text{mm}$, $h=3.65\text{mm}$) sized pipes with various materials.

	PVC 관	강관	주철관
영계수 E (N/m ²)	5.0×10^9	2.0×10^{11}	1.1×10^{11}
밀도 ρ (kg/m ³)	2000	7800	7100
포와송비 ν	0.4	0.28	0.26
quasi-longi. wave 속도 c'_λ (m/sec)	1725	5270	5434
링주파수 f_r (Hz)	7559	23111	23801
$s=1$ 파 속도 c (m/sec)	475	1356	1175

그리고, 배관의 치수가 표 1과 같이 주어질 때 PVC 배관, steel 배관 및 주철관의 누수음($s=1$ 파) 전파속도는 이론적인 식(4)에 의해 Fig. 2와 같이 얻어졌다.

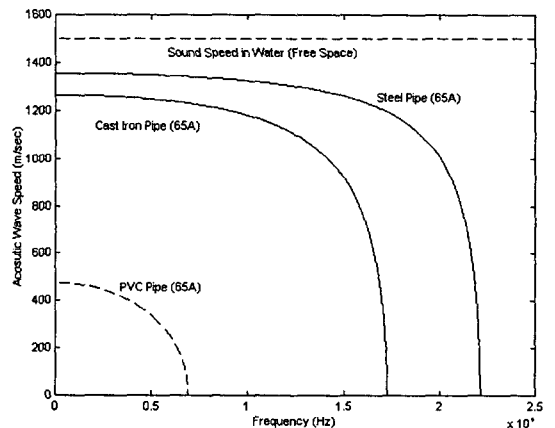


Fig. 2. Leak noise propagation speed against frequency in water filled pipes (65A).

~ Fig. 2에서 보는 바와 같이, 동일한 치수를 가진다 하더라도 배관의 재질에 따라 그리고 주파수에 따라 음속($s=1$ 파)은 크게 달라질 수 있다. 이것은 자유공간 하에 있는 물 속에서의 음속은

약 1500m 로 일정한 것과는 대조적이다. 아울러 주파수가 증가함에 따라 음속이 감소되어 특정 주파수에 이르게 되면 음파 ($s=1$ 파)는 전달이 되지 않게 된다. 이 주파수가 배관의 링 주파수 (ring frequency)로서 $n=0$ 모드에 해당되는 것이다. Steel 배관은 0Hz 근처에서 약 1356m/sec의 음속을 가지는 데 비해 PVC 배관에서는 그보다 약 2.9 배정도 느린 475m/sec를 보인다.

이상과 같이, 정확한 음속을 추정하기 위해서는 배관의 재질에 따르는 기계적 특성 과 칫수가 정확히 주어져야 하나 실제 배관은 여러 가지의 불연속점 (플랜지, 커넥터, 밸브, 분기관, 배관 직경의 변화 등등)을 가질수 있기 때문에, 이런 불연속점을 가진 배관 시스템에 대한 음속의 추정은 애러를 가질 수 있다. 이런 이유로 다양한 배관에 대한 충분히 축적된 음속데이터가 필요하다.

3. 누수탐지 신호처리

3.1 도달 시간차를 이용한 누수탐지

Fig. 3 과 같이 배관의 표면으로부터 누수가 발생할 경우, 누수 지점의 양 방향에 진동파를 감지할 수 있는 센서(가속도계)를 설치하여서 각 센서에 도달하는 진동파의 도착간 구별이 가능하다면, 아래의 식에 의해 누수 위치를 탐지할 수 있다.

$$\begin{aligned} d_1 &= (D + c\tau)/2 \\ d_2 &= (D - c\tau)/2 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, D 는 센서간 거리, c 는 배관내 압력파의 속도 ($s=1$ 파의 위상속도), τ 는 도달 시간차이다.

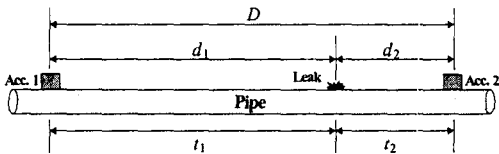


Fig 3. Detection of leak location with time arrival difference.

가속도계는 배관에 존재하는 노이즈를 포함한 여러가지의 파동을 동시에 계측하므로 누수음과 관련된 것을 계측하는 것이 탐지성능을 좌우한다. 두 가속도계에서 들어오는 신호 $x(t)$ 와 $y(t)$ 는 순수한 랜덤신호 (purely random signal)로서 백

색잡음 (white noise)이라 가정한다. (누수로 인한 소음이 광대역의 특성을 가진다.) 또한 이들 신호는 평균이 0 (zero-mean) 이고, 시간에 따라 통계학적 특성값이 변하지 않는 stationary 신호이며, ergodic 한 성질을 가진다고 가정한다. 그런데, 연속적이고 랜덤한 신호는 단순히 그 파형을 시간 영역에 두고 비교해서는 시간지연차를 알기가 매우 어렵다. 그래서 Fig. 4(a)에 나타난 것 처럼 주파수 영역에서 코히어런스함수 (coherence function) $\gamma_{xy}^2(f)$ 와 누수음과 연관된 두 신호의 스펙트럼은 의미있는 주파수 구간을 정하는데 중요한 의미를 가진다.⁽¹⁰⁾ 즉, 코히어런스함수의 값이 높으면서도 스펙트럼의 크기가 큰 주파수 구간이 누수탐지에 가장 좋다.

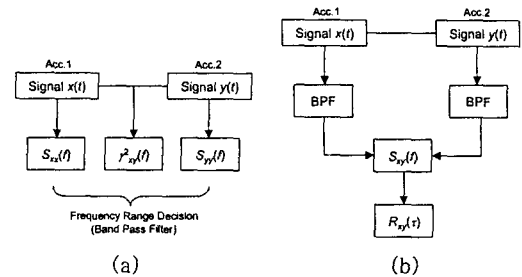


Fig 4. Algorithm for leak location detection. (a) Frequency band decision. (b) Time delay estimation.

이렇게 주파수구간이 결정되면, Fig. 4(b)와 같이 대역통과필터 (band pass filter)를 지난 신호로부터 상호스펙트럼 $S_{xy}(f)$ 를 계산한 뒤, 역푸리에 변환을 통해 시간영역의 상호 상관함수 (cross-correlation function) $R_{xy}(\tau)$ 를 구하여 식(5)의 도달 시간지연차 τ 를 추정할 수 있다.

4. 실험 및 결과

4.1 실험 개요

한국표준과학연구원에 설치된 모의 누수 배관 시스템에 대하여 실험을 실시 하였다. 호칭경 65A 등의 강관으로 만들어져 지상에 설치된 모의 시스템은 전체길이 약 120m로서 여러 지점이 직각으로 꺾인 구조이며, 최대 직선길이는 약 60m 정도 이다. 이 직선 구간의 한 지점에 누수홀을 제작하여 볼밸브 조절하였으며, 모의시스템의 한 끝단에서 물을 공급 가압시켰다. 관내 수압을 초기 3.6 kg/cm²으로 유지한 상태에서 누수 실험

을 수행하였는데, 누수시 3.2 kg/cm^2 를 유지 하였다.

본 실험에서는 두 종류의 가속도계가 사용되었는데, 이는 탐지주파수 대역이 넓은 것으로 PCB 352C66 가속도계 (상위주파수 12.8 kHz)과 좁은 것으로 B&K 4370 (상위주파수 4.8 kHz) 으로 분간해 실험에 사용 되었다. Fig. 5 에서 보는 것 처럼 우선 주파수 대역이 높은 것을 사용하여 주파수 대역을 결정한 후 좁은 주파수 대역을 가지는 가속도계가 뒤에 사용되었다. 즉, PCB 352C66 가속도계를 이용 코히어런스함수의 값이 높으면서도 스펙트럼의 크기가 큰 주파수 대역인 3-4kHz 가 누수탐지 구간으로 결정되었다.

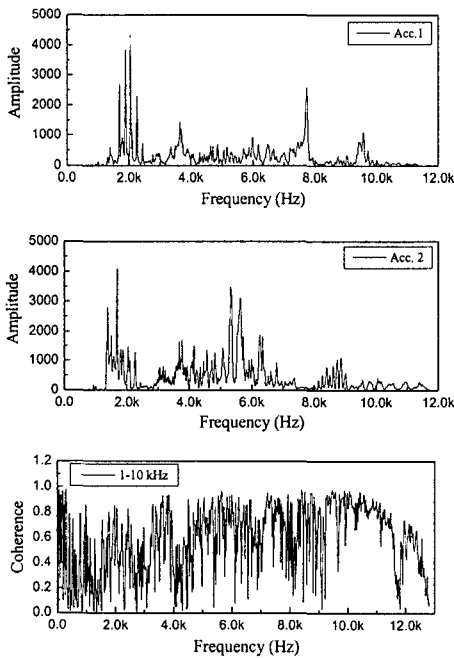


Fig 5. Determination of frequency range. From top to bottom: autospectrum of $x(t)$, autoapectrum of $y(t)$, coherence function.

가속도계간의 거리는 직선구간 54m, ㄷ자 구간 67m 으로 나누어 모의 시스템에서 누수 위치 탐지 실험이 수행되었다.

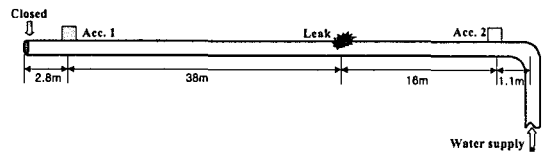
두 개의 B&K 4370 가속도계는 배관상의 두 지점에 부착되었고, 계측된 신호는 신호증폭기인 B&K 의 Nexus, 그리고 Krohn-Hite 3103 필터 (3-4kHz)를 통해 신호분석 전용장비인 B&K 의 Pulse System 으로 전달 되도록 구성이 되었다. 신호분석기의 설정은 66.67% overlap 과 Hanning window 를 사용하여 50 번의 평균으로 Fig. 4(b)의 신호처리 과정을 수행하였다.

4.2 직선구간 54m 누수탐지 실험

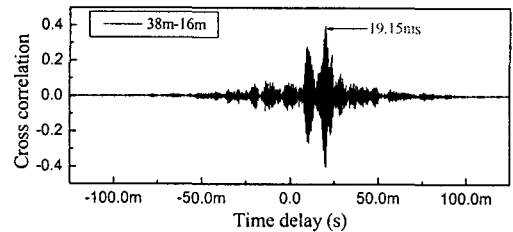
Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이, 1 번 가속도계는 모의 배관시스템의 누수지점으로부터 좌측으로 38m, 2 번 가속도계는 우측으로 16m 떨어진 곳에 부착하였다.

Fig. 6(b)는 상호 상관함수를 보여 주는데 피크치는 대체로 약 19.15msec 의 시간 지연을 가졌으며, 선명한 제 2 의 피크가 또한 보이는 데 이는 반사파로 인한 것으로 추정된다. 왜냐하면, 2 번 가속도계의 경우 직각으로 굽은 배관이 1.1m 옆에 위치하고 있음으로 전달되는 음파가 반사되는 현상에 노출되 있었기 때문이다.

많은 횟수에 의한 실험 결과 모의 배관 시스템에서의 음파 전달속도가 $c=1250\text{m/sec}$ 으로 나타났으므로, 식 (5)에 의거, 누수 추정거리는 $d_1=38.9688\text{m}$ 와 $d_2=15.0313\text{m}$ 가 각각 된다. 오차는 0.9687m 가 발생하였는데, 이는 구간거리 D 의 1% (0.54m)를 약간 초과한다.



(a) Accelerometers position and leak point



(b) Cross-correlation function

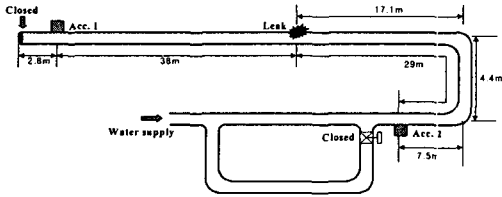
Fig 6. Result at a straight distance of 54m.

4.3 ㄷ자 구간 67m 누수탐지 실험

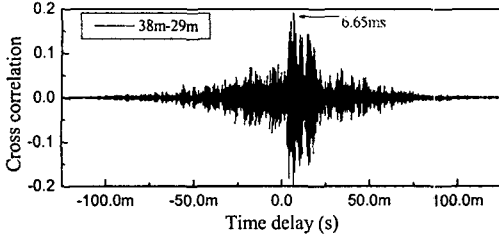
Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이, 1 번 가속도계는 모의 배관시스템의 누수지점으로부터 좌측으로 38m, 2 번 가속도계는 우측으로 두 곳의 직각지점을 지난 29m 떨어진 곳에 부착하였다.

Fig. 7(b)는 상호 상관함수를 보여 주는데 54m 실험에 비해서 덜 선명한 피크치를 보여주나 약 6.65msec 의 시간 지연을 가졌으며, 두 군데의 제 2 의 피크가 또한 보이는 데 이들은 두 직각지점에서의 반사파로 인한 것으로 추정된다. 음파의 전달속도가 $c=1250\text{m/sec}$ 일때, 식 (5)에 의거, 누수 추정거리리는 $d_1=37.66\text{m}$ 와 $d_2=29.34\text{m}$ 가 각각 된다. 오차는 0.34m 가 발생하였는데, 이는 구간거리 D 의 1% (0.67m)를

미만이다.



(a) Accelerometers position and leak point



(b) Cross-correlation function

Fig 7. Result at a C-shaped distance of 67m.

5. 결론

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

- 1) 배관의 누수로 인한 음향 압력파의 분류와 전파속도 그리고 가속도계에 의한 계측메카니즘을 이론적으로 분석하였다.
- 2) 누수음의 전파속도는 배관의 재질 및 치수에 따라 달라지며, 분산적인 특성을 가지며 누수지점의 탐지에 결정적으로 중요하다.
- 3) 두개의 가속도계에 의해 계측된 신호의 특징 주파수 대역은 누수음의 계측과 연관성이 있으며, 필터링 및 신호처리 과정을 통해 도착시간차를 계산하여 충분히 정확한 누수지점을 탐지해 내었다.

후 기

본 연구는 환경부의 차세대 핵심환경기술사업인 "탄성파를 기술을 이용한 상수도 누수탐지 감시시스템 개발" 과제에 대한 연구결과의 일부이다.

참고문헌

- (1) 안윤주, 이현동, 1995, "국내 중소도시 수도관의 파괴특성에 관한 고찰", 춘계학술대회 논문집, 한국수자원학회, 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, 1206(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.783786.

(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, 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, 173(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, 249(5), pp. 939-954.

(13) Hunaidi O. and Chu W. T., 1999, "Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes", Applied Acoustics, 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 emission with cross-correlation method", Annual Conference Proceedings, American Water Works Association, Engineering and Operations, pp. 609-621.

(15) Lin T. C. and Morgan G. W., 1956, "Wave propagation through fluid contained in a cylindrical, elastic shell", Journal of Acoustical Society of America, 28(6), pp. 1165-1176.

(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, 81(4), pp. 501-518.

(17) Fahy F. J., 1985, Sound and Structural Vibration- Radiation, Transmission and Response, Academic Press, London.