

음향방출 및 가속도 신호를 이용한 지하매설 상수도배관의 누수지점 탐지연구

Leak Location Detection of Underground Water Pipes using Acoustic Emission and Acceleration Signals

이영섭*[†], 윤동진*, 정중채*

Young-Sup Lee*[†], Dong-Jin Yoon* and Jung-Chae Jeong*

초 록 지하매설 상수도 배관의 누수는 사회적, 환경적 그리고 경제적 문제를 야기시킨다. 이러한 누수에 대한 적절한 대응책의 하나로서 배관의 누수지점에 대한 탐지 및 수리가 해당될 것이다. 누수음은 배관의 누수지점의 식별에 좋은 탐지원이다. 비록 청음봉, 청음기 또는 지상마이크로폰과 같은 누수음으로 누수지점을 탐지하는 몇가지의 방법이 있어 왔지만, 그들은 그렇게 효율적인 도구들은 아니었다. 본 논문에서는, 좀 더 쉽고 효율적인 방법을 제공할수도 있는 음향방출센서와 가속도계를 사용한 누수위치탐지를 다룬다. 누수지점 탐지를 위해 센서로부터의 입력신호에 대한 필터링, 신호처리 및 알고리즘을 기술하였다. 120 미터 길이의 배관이 실험을 위해 설치되었고, 실험결과들은 음향방출센서와 가속도계가 누수지점의 정밀탐지에 이용될 수 있음을 보여 주었다. 누수지점의 탐지에 극히 중요한 지하매설배관 속의 유체의 음파 전파속도에 관한 이론적 해석 또한 기술되었다.

주요용어: 누수탐지, 음향방출, 가속도계, 상관법, 음파전달, 상수도 배관

Abstract Leaks in underground pipelines can cause social, environmental and economical problems. One of relevant countermeasures against leaks is to find and repair of leak points of the pipes. Leak noise is a good source to identify the location of leak points of the pipelines. Although there have been several methods to detect the leak location with leak noise, such as listening rods, hydrophones or ground microphones, they have not been so efficient tools. In this paper, acoustic emission (AE) sensors and accelerometers are used to detect leak locations which could provide an easier and more efficient method. Filtering, signal processing and algorithm of raw input data from sensors for the detection of leak location are described. A 120 m-long pipeline system for experiment is installed and the results with the system show that the algorithm with the AE sensors and accelerometers offers accurate pinpointing of leaks. Theoretical analysis of sound wave propagation speed of water in underground pipes, which is critically important in leak locating, is also described.

Keywords: leak detection, acoustic emission, accelerometer, correlation method, acoustic wave propagation, water pipelines

1. 서론

국내 상수도 관망은 수도 시설의 중요한 구성요소지만 대부분이 지하에 매설되어 있으므로 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 누수 탐지는 육안으로 식별이 곤란하므로 누수로 인한 신호음으로 부터 누수위치를 식별하는 기술이 주로 응용되고 있으며 선진국의 경우 상용화된 제품이 개발된 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 제수변 (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 판단해야 하므로 설치하는데 많은 어려움이 따랐다. 지상 마이크로폰 (ground microphone)은 그 이후에 사용된 것으로, 이것은 상수도관이 매설된 지상의 포장도로나 흙등의 지표면 바로 위에서 누수음을 청음하는 것으로 의심가는 누수위치를 집어 내는 (pinpointing)에 사용되었다[6]. 이 방법은 휴대용 청음 장비를 소지하고 지하 관로를 따라 일일이 탐지해야 하며, 청음방법을 사용하기 때문에 고도의 주의를 기울여 누수를 판별해야 하는 숙련된 기술이 필요하다.

1970년대 들어서 좀 더 정밀한 탐지법의 필요성이 제기되었고[7], 음향상관 해석법 (acoustical correlation analysis)이 제안되었으나 그 당시엔 일미터이내의 극히 짧은 거리에서만 탐지가 가능하여 현실성이 없었다[8,9]. 1990년대들어 독일의 Fuchs와 Riehle은 계측된 신호를FFT한후 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 찾는데, 배관내 유체의 음속을 정확히 알아야만 한다. 그래서 Pinnington과 Briscoe[11] 그리고 Muggleton et al[12]은 누수로 인한 배관의 진동모드에 대한 분류와 지하매설된 배관내 유체의 음파 전달속도를 이론적으로 해석하였다. Hunaidi와 Chu는 음파의 감쇠가 심한 플라스틱 배관에 대한 실험적 연구에서 유체와 배관이 연성된 경우 누수탐지에 결정적으로 이용되는 음파 전달과 관련된 진동은 저주파에서 지배적으로 나타남을 보였다[13].

이러한 배관의 누수를 계측하는데는, 장거리의 구간의 탐지는 가속도계를 이용하여 누수로 인해 발생하는 유체의 음향파를 연성운동을 일으키는 배관의 진동을 계측해서 추정하는 것이 보편적이다[13]. 이러한 가속도계를 이용한 계측은 배관이나 제수변등의 외부에 수월하게 부착할수 있는 장점이 있다. 한편, Pinnington과 Briscoe는 압전와이어로 배관내부의 압력변화를 계측할 수 있는 센서를 제안하였다[10].

따라서 궁극적으로는 차세대에 적합하도록 지속적인 감시가 가능한 효율적인 누수탐지 네트워크 구축을 목표로 하여, 어느 정도 확립된 기술인 압력 및 유량 센서를 이용하여 상수도 관로상의 대략적인 누수 예상 구간을 선정 한 뒤 각 지역에 설치된 탄성파 검출센서를 이용하여 정확한 누수 지점을 검출하는 기술을 개발하고자 하는 것으로 본 논문에서는 음향방출(acoustic emission)센서와 가속도계를 이용한 누수탐지 기법 및 실험결과에 대해 언급한다.

본 연구에서는 한국표준과학연구원내에 설치된 모의 상수도 시스템에 대해 음향방출 및 가속도 센서를 이용한 누수위치 탐지 실험에 대해 기술한다. 2절에서는 누수탐지의 이론적 배경에 대하여, 3절에서는 탐지 알고리즘 그리고 4절에서는 모의 시스템에 대한 실험을 통해 탐지 가능성을 검토하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 배관의 누수신호

지하에 매설된 배관에서 천공 등으로 인해 누수

가 발생하면, 광대역의 주파수에 걸친 누수 신호(leak signal)를 발생시키게 된다[12]. 이는 압력이 높은 배관내부에서 압력이 낮은 배관 외부로 압력강화와 더불어 물이 뿜어져 나가면서 발생하는 신호로서 배관의 누수위치를 탐지하는데 중요하게 이용된다. 이 신호는 일시적으로 생기는 잠음과는 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 된다.

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 진동문제(fluid-pipe coupled vibration problem)는 하나의 독립된 주제로 다루지기도 해왔다[14,15].

유체-배관의 연성진동은 Fig. 1과 같이 여러 가지의 모드(mode)로 나타날 수 있다. n=0 모드는 '숨쉬기모드 (breathing mode)' 라고 불리는 것으로 유체-배관 연성진동의 가장 기초적인 진동형태이다 [16]. 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.

이들 중에서 누수음의 배관내 종방향 전파와 관계가 되는 것은 n=0 모드이다[11,12]. 누수로 인해 전달되는 유체음은 종파인 반면 계속하고자 하는 것은 n=0라는 배관의 횡진동인데 이들은 다음과 같

은 물리적 이유로 서로 연성(coupled)이 되어 있기 때문이다. 즉, 배관내의 유체의 압력변화가 전파되어 갈 때, 유체를 감싸고 있는 배관도 유체압력의 고저에 따라 팽창 또는 수축되는 변형을 하게 된다. 이러한 변형이 숨쉬기 모드에 해당되는 것이다. 그래서 유체내의 압력변화의 전파는 유체를 둘러싸고 있는 배관과 연성된 채로 quasi-longitudinal wave [16]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.

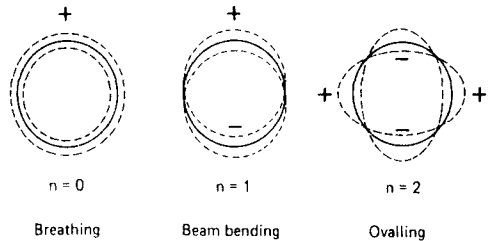


Fig. 1 Mode shapes of a circular cylindrical shell[16]

한편, n=0모드는 링주파수 (ring frequency) 라고 불리는 주파수에서 공진을 일으키는데 이는 아래와 같이 정의 된다[16].

$$f_r = \frac{c'_l}{\pi d} \tag{1}$$

여기서 d 는 배관의 평균직경 [(내경+외경)/2]이고, quasi-longitudinal wave의 위상속도인 $c'_l = [E/\rho(1-\nu^2)]^{1/2}$ 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=1인 보의 굽힘파 (bending wave)와 n=0일때 3가지의 축대칭파 (s=1, 2, 3) 인데, 이들 중 s=2파는 유체와는 무관한 배관의 비틀림 파, s=1파는 유체에 기인한 파가 지배적인 파동으로서 누수 탐지에 이용된다. 그리고, s=3 파는 배관 셸(shell)

자체의 길이방향 압축파가 지배적인 파동인데 감쇠가 s=1파에 비해 심하다. 그래서 n=0 모드의 s=1축 대칭 파동의 계측은 가속도계를 이용한 누수탐지에 매우 중요하다. 아울러, n=1 이나 n=2 이상의 모드가 누수탐지에서 계측되면 잡음(noise)이 되어 정확한 계측을 저해하므로 이들은 필터 등으로 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 주어진다[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 파수이며, c_f 는 자유공간에서 누수음의 전파속도로서 다음과 같이 주어진다[16].

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

이때 ρ_f 는 유체의 밀도이다. 식 (2)를 바탕으로 누수음(s=1)의 전파속도는 다음과 같게 진다.

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

식 (4)는 배관내의 유체 누수음 (s=1)의 위상전파속도에 관한 식으로 배관재질 및 치수에 따라 그리고 주파수에 따라 그 속도가 바뀌어 질 수 있는 분산적인 (dispersive) 특성을 보여 주고 있다. 이것은 식 (3)에 나타난 자유공간에서의 유체음의 위상전파속도가 주파수와는 무관한 비분산적인 (non-dispersive) 특성을 갖는 것과는 대조적이라 할 수 있다. Table 1은 누수로 인한 음향전파와 관련한 몇몇 배관재료의 특성을 나타낸 것이다.

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

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

Properties	PVC	Steel	Cast-iron
Young's Modulus E (N/m ²)	5.0×10^9	2.0×10^{11}	1.1×10^{11}
Density ρ (kg/m ³)	2000	7800	7100
Poisson's Ratio ν	0.4	0.28	0.26
Quasi-longi. wave speed c_λ (m/sec)	1725	5270	5434
Ring frequency f_r (Hz)	7559	23111	23801
s=1 wave speed c (m/sec)	475	1356	1175

Fig. 2에서 보는 바와 같이, 동일한 치수를 가진 다 하더라도 배관의 재질에 따라 그리고 주파수에 따라 음속 (s=1 파)은 크게 달라 질 수 있다. 이것은 자유공간 하에 있는 물 속에서의 음속은 약 1500 m로 일정한 것과는 대조적이다. 아울러 주파수가 증가함에 따라 음속이 감소되어 특정 주파수에 이르게 되면 음파 (s=1파)는 전달이 되지 않게 된다. 이 주파수가 배관의 링 주파수 (ring frequency)로서 n=0 모드에 해당되는 것이다. Steel 배관은 0 Hz 근처에서 약 1356 m/sec의 음속을 가지는 데 비해 PVC 배관에서는 그 보다 약 2.9 배 정도 느린 475 m/sec를 보인다.

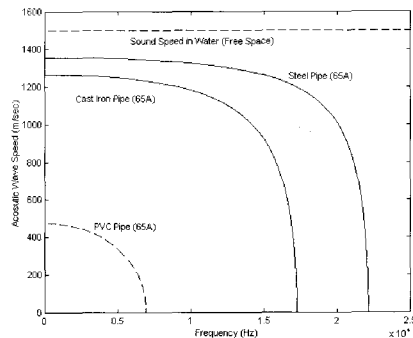


Fig. 2 Leak noise propagation speed against frequency in water filled pipes (65A)

이상과 같이, 정확한 음속을 추정하기 위해서는 배관의 재질에 따르는 기계적 특성과 컷수가 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 에러를 가질 수 있다. 이런 이유로 다양한 배관에 대한 충분히 축적된 음속데이터가 필요하다.

3. 누수탐지 신호처리

Fig. 3과 같이 배관의 표면으로부터 누수가 발생할 경우, 누수 지점의 양 방향에 탄성파를 감지할 수 있는 센서(AE센서 또는 가속도계)를 설치하여 각 센서에 전달되는 탄성파의 도달시간차에 의해 누수 위치를 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$d_1 = (D + c\tau)/2 \quad d_2 = (D - c\tau)/2 \quad (5)$$

여기서, D 는 센서간 거리, c 는 배관내 누수음 ($s=1$ 과)의 속도, τ 는 도달 시간차이다.

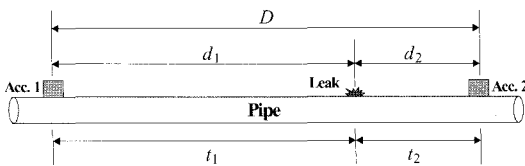


Fig. 3 Detection of leak location with time arrival difference

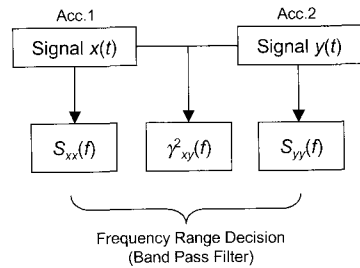
AE센서 또는 가속도계는 배관에 존재하는 노이즈를 포함한 여러가지의 파동을 동시에 계측하므로 누수음과 관련된 것을 계측하는 것이 탐지성능을 좌우한다.

AE센서를 사용한 경우엔 주위 환경에 따른 특정 범위내의 문턱값을 설정한뒤 이를 통과한 음향방출 누수신호를 AE hit로 계산하여 누수위치를 표정하는데 많은 횟수에 걸쳐 이를 수행하여 가장 많이 누적된 위치를 누수지점으로 추정하는 방법이다.

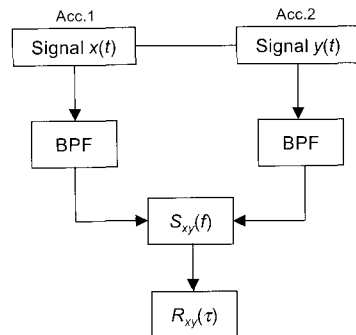
가속도계를 누수감지센서로 사용한 경우는 아래의 알고리즘을 적용시켰다. 두 가속도계에서 들어오는 신호 $x(t)$ 와 $y(t)$ 는 순수한 랜덤신호 (purely random signal)로서 백색잡음(white noise)이라 가정한다. (누수로 인한 소음이 광대역의 특

성을 가진다.) 또한 이들 신호는 평균이 0 (zero-mean) 이고, 시간에 따라 통계학적 특성값이 변하지 않는 stationary 신호이며, ergodic한 성질을 가진다고 가정한다. 그런데, 연속적이고 랜덤한 신호는 단순히 그 파형을 시간 영역에 두고 비교해서는 시간지연차를 알기가 매우 어렵다. 그래서 Fig. 4(a)에 나타난 것처럼 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.

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.



(a)



(b)

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

4. 실험 및 결과

4.1. 실험 개요

한국표준과학연구원에 설치된 모의 누수 배관 시스템에 대하여 실험을 실시 하였다. Fig. 5에서 보는 것과 같이 호칭경 65A 등의 강관으로 만들어져 지상에 설치된 모의 시스템은 전체길이 약 120 m로서 여러 지점이 직각으로 꺾인 구조이며, 최대 직선길이는 약 60 m 정도 이다. 이 직선 구간의 한 지점에 직경 3 mm의 누수홀을 제작하여 볼밸브 조절하였으며, 모의시스템의 한 끝단에서 물을 공급 가압시켰다. 관내 수압을 초기 3.6 kgf/cm²으로 유지하면서 실험을 수행하였는데, 누수시 3.2 kgf/cm² 를 나타내었다.

4.2. 음향방출센서 이용 누수탐지 실험

음향방출(AE) 신호의 측정을 위해 2개의 60 kHz (PAC R6) 공진형 AE 센서, 다채널 상용 AE 시스템인 MISTRAS 2001 (PAC)과 디지털 오실로스코프 LeCroy 9354A를 사용하였다.

실험에서 문턱값은 43~77 dB로 주변 환경에 따라 설정되었으며, 임의 결합 구역에서 방출되는 누수 신호는 전치증폭기를 통해 60 dB로 동일하게

증폭하였다. AE 신호분석 시스템에서는 누수위치를 찾는 기본 변수들을 먼저 설정하게 되는데 본 실험에서 탄성파의 전파속도 c 는 다수의 검증 실험을 통해 얻은 1250 m/sec로 설정하였다.

AE를 이용한 누수지점 위치표정은 누수가 발생하는 경우 많은 AE 신호들이 전체 센서구간에 걸쳐 나타났으나, 시간이 경과함에 따라 누출 지점에 최다의 AE hit를 발생시켰음을 관찰할 수 있었는데 상세한 결과는 아래와 같다.

4.2.1. 직선구간 20 m 누수탐지 실험

Fig. 6은 누수 지점으로부터 AE 센서1까지 거리는 15 m이며 AE 센서2까지 거리는 5 m인, 전체 검출 구간 길이가 20 m 일 때의 AE 위치표정 결과를 나타낸 것이다. 탄성파 진행 속도는 1250 m/s로 입력하였고 AE 검출 신호의 문턱값은 57 dB로 설정하였다.

시험구간은 Fig. 5에 나타난 바와 같이 전체 모의 상수도 관로 중 60 m의 직선 구간을 이루고 있는 S/V2를 누출 지점으로 하여 진행한 위치표정 결과 값을 나타내었다. 동일한 조건에서 위치표정의 재현성 실험을 한 결과 AE센서1로부터 정확히 15 m 되는 지점에 다량의 AE hit가 발생되어 있음을 관찰할 수 있었다.

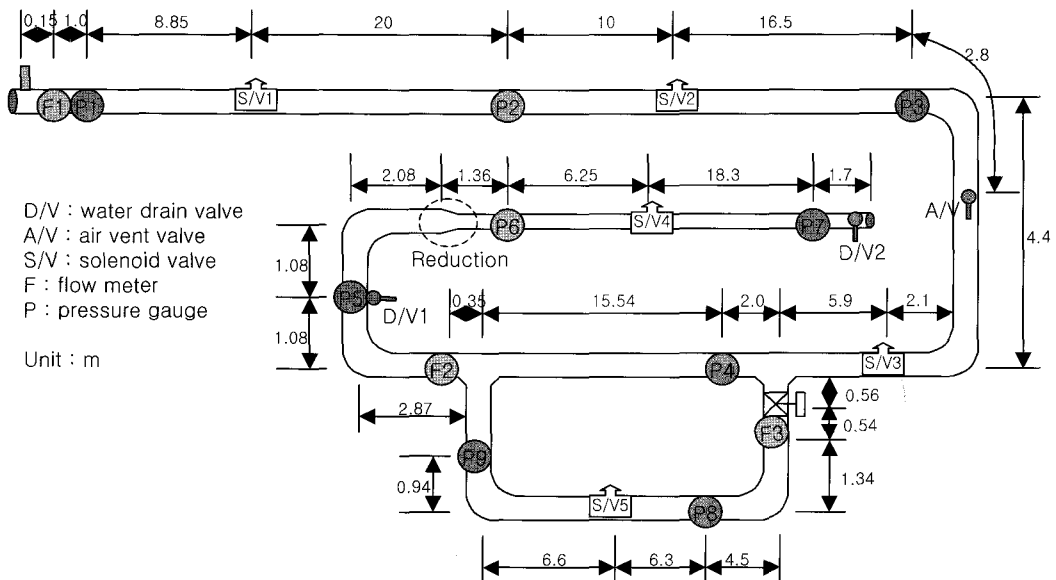


Fig. 5 Schematic diagram of a simulated pipeline system for leak test

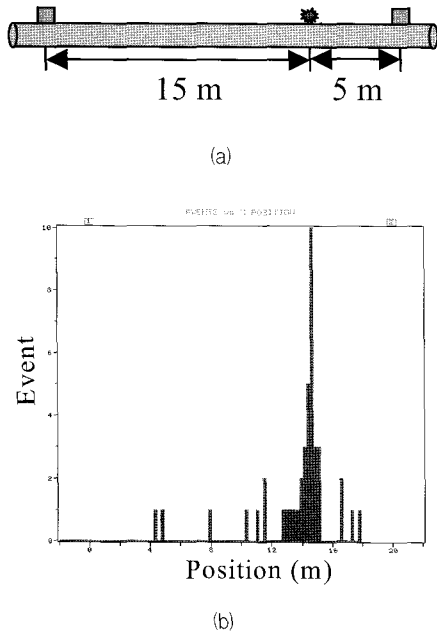


Fig. 6 Leak location by acoustic emission (a) AE sensor position and leak point (b) AE hit numbers against distance

4.2. T자구간 70 m 누수탐지 실험

Fig. 7은 누수 지점으로부터 센서1까지 거리가 30 m이고 센서2까지는 40 m의 T자 구간으로 센서간 거리가 70 m에 대한 누수탐지 시험 결과이다.

탄성과 전파의 흐름이 왜곡되는 지역에서는 측정 거리가 짧다 할지라도 누수 위치표정을 명확히 하기 힘들거나 심하게 왜곡되는 현상을 나타내기 때문에 곡관부 및 끝단부 영향을 배제한 실험 조건에서 탄성과 영향을 관찰하였다. 좌측의 센서1로부터 약 30 m 지점에 가장 많은 횟수의 AE hit 이 발생하여 이곳이 누수지점임을 추정할 수 있다. 누수지역 위치표정결과 여러개의 유사 peak 가 나타났으나, 가장 높은 peak 지점이 누수가 집중적으로 일어나는 곳임을 판단할 수 있다. 그러나 AE센서의 경우 센서간 거리가 증가함에 따라 누수지점의 추정의 정확도가 감소됨을 확인하였는데, 이는 감쇠가 상대적으로 심한 고주파를 계속하는 센서의 특성에 기인한다고 여겨진다. 그래서 감쇠가 비교적 많지 않은 저주파에서 누수음을 계속하는 가속도계를 이용한 실험을 수행하게 되었다.

4.3. 가속도계 이용 누수탐지 실험

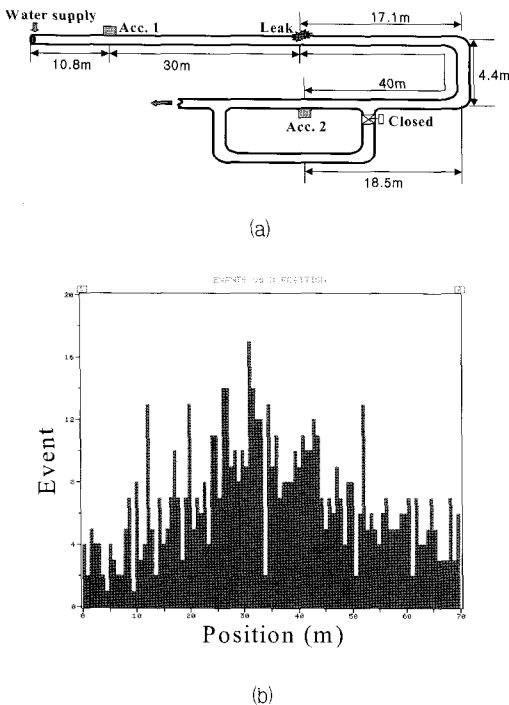


Fig. 7 Leak location by acoustic emission (a) AE sensor position and leak point (b) AE hit numbers against distance

본 실험에서는 두 종류의 가속도계가 사용되었는데, 이는 탐지주파수 대역이 넓은 것으로PCB 352C66 가속도계 (상위주파수 12.8 kHz)과 좁은 것으로 B&K 4370 (상위주파수 4.8 kHz) 으로 분간해 실험에 사용 되었다. Fig. 8에서 보는 것처럼 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 3-4 kHz가 누수탐지 구간으로 결정되었다.

가속도계간의 거리는 직선구간 54 m, T자 구간 67 m으로 나누어 모의 시스템에서 누수 위치탐지 실험이 수행되었다.

두 개의 B&K 4370 가속도계는 배관상의 두 지점에 부착되었고, 계측된 신호는 신호증폭기인 B&K의 Nexus, 그리고 Krohn-Hite 3103 필터 (3-4 kHz)를 통해 신호분석 전용장비인 B&K의 Pulse System으로 전달 되도록 구성이 되었다. 신호분석기의 설정은 66.67% overlap과 Hanning

window를 사용하여 50번의 평균으로 Fig. 4(b)의 신호처리 과정을 수행하였다.

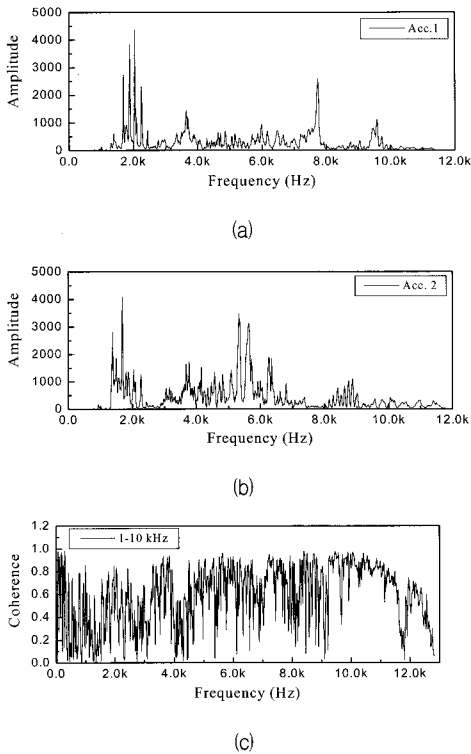


Fig. 8 Determination of frequency range. From top to bottom: autospectrum of $x(t)$, autospectrum of $y(t)$, coherence function

4.3.1. 직선구간 54 m 누수탐지 실험

Fig. 9(a)에서 보는 바와 같이, 1번 가속도계는 모의 배관시스템의 누수지점으로부터 좌측으로 38 m, 2번 가속도계는 우측으로 16 m 떨어진 곳에 부착하였다.

Fig. 9(b)는 상호 상관함수를 보여 주는데 피크치는 대체로 약 19.15 msec의 시간 지연을 가졌으며, 선명한 제2의 피크가 또한 보이는데 이는 반사파로 인한 것으로 추정된다. 왜냐면, 2번 가속도계의 경우 직각으로 굽은 배관이 1.1 m 옆에 위치하고 있음으로 전달되는 음파가 반사되는 현상에 노출되었기 때문이다.

많은 횟수에 의한 실험 결과 모의 배관 시스템에서의 음파 전달속도가 $c = 1250$ m/sec 으로 나타났으므로, 식 (5)에 의거, 누수 추정거리는

$d_1 = 38.9688$ m 와 $d_2 = 15.0313$ m가 각각 된다. 오차는 0.9687 m 가 발생하였는데, 이는 구간거리 D 의 1% (0.54 m)를 약간 초과한다.

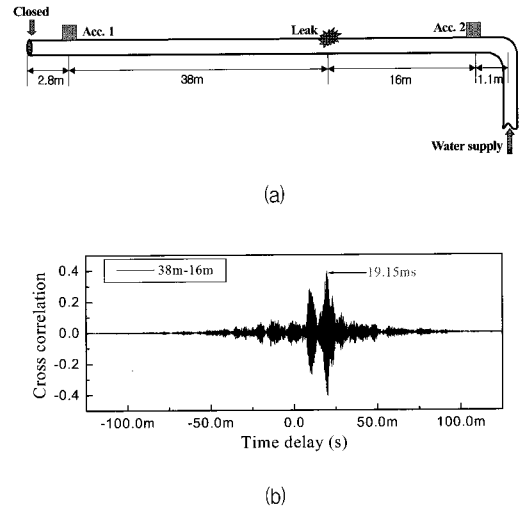


Fig. 9 Result at a straight distance of 54m
(a) Accelerometers position and leak point
(b) Cross-correlation function

4.3.2. T자구간 67 m 누수탐지 실험

Fig. 10(a)에서 보는 바와 같이, 1번 가속도계는 모의 배관시스템의 누수지점으로부터 좌측으로 38 m, 2번 가속도계는 우측으로 두 곳의 직각지점을 지난 29 m 떨어진 곳에 부착하였다.

Fig. 10(b)의 상호 상관함수는 54 m 실험에 비해 선 피크치가 덜 선명하나 약 6.65 msec의 시간 지연을 가졌으며, 두 군데의 제2의 피크가 또한 보이는데 이들은 두 직각지점에서의 반사파로 인한 것으로 추정된다. 음파의 전달속도가 $c = 1250$ m/sec 일 때, 식 (5)에 의거, 누수 추정거리의 $d_1 = 37.66$ m 와 $d_2 = 29.34$ m가 각각 된다. 오차는 0.34 m 가 발생하였는데, 이는 구간거리 D 의 1% (0.67 m)를 미만이다.

이와같이 가속도계를 이용한 누수탐지는 AE센서를 이용한 실험과 비교를 하면, 상대적으로 매우 정밀한 성능을 보여주는데, 이는 가속도계가 감쇠가 덜 한 비교적 저주파 대역 (3-4kHz) 에서 누수 음을 계측하기 때문이다.

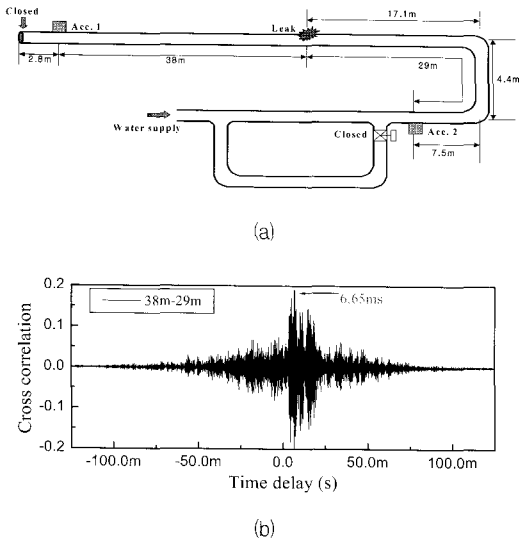


Fig. 10 Result at a U-shaped distance of 67m
(a) Accelerometers position and leak point
(b) Cross-correlation function

5. 결론

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

- 1) 배관의 누수로 인한 음향 탄성파의 분류와 전파 속도 그리고 탄성파 계측 센서에 의한 탐지메카니즘을 이론적으로 분석하였다.
- 2) 누수음의 전파속도는 배관의 재질 및 치수에 따라 달라지며, 분산적인 특성을 가지며 누수지점의 탐지에 결정적으로 중요하다.
- 3) 수십 kHz 주파수 범위에서 탄성파를 계측하는 AE 센서는 AE hit수의 누적을 계산하여 누수탐지를 정확히 할수 있었다. 그러나 센서간 거리가 약 70 m인 경우 약간의 탐지위치 오차를 보였는데, 이는 감쇠가 비교적 심한 고주파를 계측하는 센서의 특성에 기인한 것이다.
- 4) 저주파범위에서 계측하는 가속도계의 경우 계측된 신호의 주파수 대역은 누수음의 계측과 연관성이 있으며, 필터링 및 신호처리 과정을 통해 도착시간차를 계산하여 충분히 정확한 누수지점을 탐지해 내었다. 특히 가속도계의 경우 감쇠가 상대적으로 적은 저주파에서 누수음을 계측하므로 센서간 거리가 67 m인 경우에도 매우 정밀한 누수위치를 탐지하였다.

후 기

본 연구는 환경부의 차세대 핵심환경기술사업인 "탄성파를 기술을 이용한 상수도 누수탐지 감시시스템 개발" 과제에 대한 연구결과의 일부임을 밝히며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] 안윤주, 이현동, "국내 중소도시 수도관의 파괴 특성에 관한 고찰", 춘계학술대회 논문집, 한국수자원학회, pp. 48-51, (1995)
- [2] 환경부 수도정책과, "2001 상수도 통계", 환경부, (2002)
- [3] Palmer Environmental, MicroCorr, Palmer Environmental Services.
- [4] Fuji Telecom Inc, Super Correlator Model: LC-7000, Fuji Telecom Inc, (1997)
- [5] D. A. Liston and J. D. Liston, "Leak detection techniques", Journal of New England Water Works Association, 1206(2), pp. 103-108, (1992)
- [6] 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)
- [7] F. S. Brainard, "Leakage problems and the benefit of leak detection programs", Journal of American Water Works Association, pp. 64-65, (1979)
- [8] E. Shaw Cole, "Methods of leak detection: Overview", Journal of American Water Works Association, pp. 73-75, (1979)
- [9] K. Akizuki, et al, "Detection of water leakage point using cross correlation methods", Proceedings of IMEKO Symp. Flow Measurements and Control in Industry, Tokyo, pp. 199-204, (1979)
- [10] H. V. Fuchs and R. Riehle, "Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis", Applied Acoustics, 33, pp. 1-19, (1991)
- [11] R. J. Pinnington and A. R. Briscoe,

- "Externally applied sensor for axisymmetric waves in a fluid filled pipe", *Journal of Sound and Vibration*, 173(4), pp. 503-516, (1994)
- [12] J. M. Muggleton, M. J. Brennan and R. J. Pinnington, "Wavenumber prediction of waves in buried pipes for water leak detection", *Journal of Sound and Vibration*, 249(5), pp. 939-954, (2002)
- [13] O. Hunaidi and W. T. Chu, "Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes", *Applied Acoustics*, 58, pp. 235-254, (1999)
- [14] T. C. Lin and G. W. Morgan, "Wave propagation through fluid contained in a cylindrical, elastic shell", *Journal of Acoustical Society of America*, 28(6), pp. 1165-1176, (1956)
- [15] C. R. Fuller and F. J. Fahy, "Characteristics of wave propagation and energy distributions in cylindrical elastic shells filled with fluid", *Journal of Sound and Vibration*, 81(4), pp. 501-518, (1982)
- [16] F. J. Fahy, *Sound and Structural Vibration-Radiation, Transmission and Response*, Academic Press, London, (1985)