

# 지하매설 배관의 누수지점 탐지를 위한 음향학적 해석 및 신호처리

이영섭<sup>1</sup>, 윤동진<sup>2</sup>, 백광현<sup>3</sup>, 김상무<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>한국표준과학연구원 스마트계측그룹, <sup>3,4</sup>단국대학교 기계공학과

## Acoustical analysis and signal processing for leak location of buried pipes.

Young-Sup Lee<sup>1</sup>, Dong-Jin Yoon<sup>2</sup>, Kwang-Hyun Baek<sup>3</sup> and Sang-Moo Kim<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>Korea Research Institute of Standards and Science, <sup>3,4</sup>Dankook University

<sup>1</sup>yslee@kriss.re.kr, <sup>2</sup>djyoon@kriss.re.kr, <sup>3</sup>khbaek@dankook.ac.kr, <sup>4</sup>moradin@dankook.ac.kr

### 요약

Leak noise is a good source to identify the exact location of a leak point of underground water pipelines. Water leak generates broadband noise from a leak location and can be propagated to both directions of water pipes. However, the necessity of long-range detection of this leak location makes to identify low-frequency acoustic waves rather than high frequency ones. Acoustic wave propagation coupled with surrounding boundaries including cast iron pipes is theoretically analyzed and the wave velocity was confirmed with experiment. The leak locations were identified both by the acoustic emission (AE) method and the cross-correlation method. In a short-range distance, both the AE method and cross-correlation method are effective to detect leak position. However, the detection for a long-range distance required a lower frequency range accelerometers only because higher frequency waves were attenuated very quickly with the increase of propagation paths. Two algorithms for the cross-correlation function were suggested, and a long-range detection has been achieved at real underground water pipelines longer than 300m.

### 1. 서론

대부분 지하에 매설된 상수도 관망은 노후상태 파악

이 어려워 적절한 시기에 효과적인 유지관리를 받지 못하고 있으며, 한국의 경우 생산량의 약 14%가 누수되어 적지 않은 사회적, 환경적 및 경제적 손실이 발생되고 있다.[1] 이러한 지하매설 상수도 배관의 누수 탐지는 육안으로 식별이 곤란하므로 누수로 인한 신호음으로부터 누수위치를 식별하는 기술이 주로 응용되고 있다.[2]

초창기엔 청음봉(listening rod)이나 하이드로폰이 많이 이용되었다.[3] 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. 지상 마이크로폰 (ground microphone)은 상수도관이 매설된 지상의 포장도로나 흙 등의 지표면 바로 위에서 누수음을 청음하는 것으로 고도의 주의를 기울여 누수를 판별해야 하는 숙련된 기술이 필요하다.[4] 1970년대 들어서 좀 더 정밀한 탐지법의 필요성이 제기되었고, 음향상관 해석법 (acoustical correlation analysis)이 제안되었으나 그 당시엔 일 미터 이내의 극히 짧은 거리에서만 탐지가 가능하며 현실성이 없었다. 1990년대 들어 독일의 Fuchs와 Riehle은 계속된 신호를 FFT한 후 효과적인 주파수 범위를 선택하여 누수위치를 탐지하는 상호상관함수를 실제에 적용, 누수지점을 정밀하게 잡아내는 데 좋은 결과를 얻어 내었다.[5] 이후 누수음 상관기(leak noise correlator)는 상용화되어 보편적으로 쓰이기 시작하였다. 그런데, 이와 같은 상관법은 시간지연 (time delay)을 이용하여 누수위치를 찾는 데, 배관내 유체의

음속을 정확히 알아야 만 한다. 그래서 Pinnington과 Briscoe [6] 그리고 Muggleton et al [7]은 누수로 인한 배관의 진동모드에 대한 분류와 지하매설된 배관내 유체의 음파 전달속도를 이론적으로 해석하였다. Hunaidi 와 Chu는 음파의 감쇠가 심한 플라스틱배관에 대한 실험적 연구에서 유체와 배관이 연성된 경우 누수 탐지에 결정적으로 이용되는 음파전달과 관련된 진동은 저주파에서 지배적으로 나타남을 보였다.[8]

이러한 배관의 누수를 계측하는 데는, 초음파의 음향 방출 (acoustic emission)에 바탕한 초음파센서를 이용한 누수위치 탐지방법이 있으나 비교적 단거리 구간에서 사용 가능하며, 장거리의 구간의 탐지는 가속도계를 이용하여 누수로 인해 발생하는 유체의 음향파를 연성 운동을 일으키는 배관의 진동을 계속해서 추정하는 것이 보편적이다.[7]

본 연구에서는 음향방출 및 가속도 센서를 이용한 누수위치 탐지 이론 및 실험에 대해 기술한다. 2절에서는 이론적 배경에 대하여, 3절에서는 탐지 알고리즘 그리고 4절에서는 탐지 실험에 대해 기술한다.

## 2. 누수신호의 발생 및 전파

지하에 매설된 배관에서 천공 등으로 인해 누수가 발생하면, 광대역의 주파수에 걸친 누수 신호 (leak signal)를 발생시키게 된다.[7] 이 신호는 일시적으로 생기는 잡음과는 달리 일단 누수가 생기기 시작하면 지속적으로 계속 발생된다는 점에서 다른 일시적 잡음과는 확연히 분간할 수 있는 신호로서 누수지점에서의 압력강하의 크기, 천공(hole)의 형태 및 크기에 따라 누수신호크기가 달라질 수 있다.[8]

누수음은 배관의 누수지점을 기준으로 배관 중방향의 양끝으로 전파해 간다. 소리의 전파라는 것은 압력의 변화가 전파되어 가는 것이므로, 누수로 인한 배관내의 갑작스런 압력강하는 소리를 발생시키게 되고, 배관내 유체는 배관 및 배관을 둘러싼 흙등의 주변 매질과 연성되어 음파의 전파현상을 지배하게 된다.

유체가 배관속에 있을때의 음향 및 진동 특성은 서로 연성 (coupled) 되어 나타나며, 유체없이 배관만 있을 때와는 다른 형태를 보인다.[7] 유체-배관의 연성진동은 여러 가지의 모드(mode)로 나타날 수 있다.  $n = 0$  모드는 '숨쉬기모드 (breathing mode)' 라고 불리는 것으로 유체-배관 연성진동의 가장 기초적인 진동형태이

다.[9] 이것은 누수음의 배관내 중방향 전파와 관계가 되는 것으로 유체와 배관이 서로 연성 (coupled)이 되어 있기 때문이다. 즉, 배관내의 유체의 압력변화가 전파되어 갈 때, 유체를 감싸고 있는 배관도 유체의 압력에 따라 팽창 또는 수축되는 변형을 하게 된다. 이로 인해 원래 자유공간에선 비분산적(non-dispersive) 이어야 할 유체속의 음파전달이 배관에 둘러 쌓이게 되면 주파수에 따라 음속이 바뀌는 분산적인(dispersive) 파동으로 나타나게 된다.

특히  $n = 0$  일때  $s = 1$ 파는 유체에 기인한 파가 지배적인 파동으로서 누수탐지에 이용된다.[7] 지하에 매설된 배관내에서 누수로 인한  $s = 1$  파의 위상속도는 유체와 배관이 탄성적으로 서로 연성되어 있을 뿐만 아니라 배관의부를 감싸고 있는 흙과 같은 매질의 영향도 받는다. 그러나 흙과 같은 배관을 둘러싼 매질의 영향은 상대적으로 적다고 알려져 있으므로, 이의 영향을 무시하면 누수음과 연관이 깊은  $s = 1$  파의 전파속도는 아래와 같이 주어 진다.[7]

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

이때  $\omega$ 는 주파수,  $h$ 는 배관의 두께,  $B_f$ 는 배관내 유체의 체적탄성계수,  $c_f = (B_f / \rho_f)^{1/2}$ 는 자유공간에서 유체 압력파의 전파속도이다.[9] 이때  $\rho_f$ 는 유체의 밀도이다.

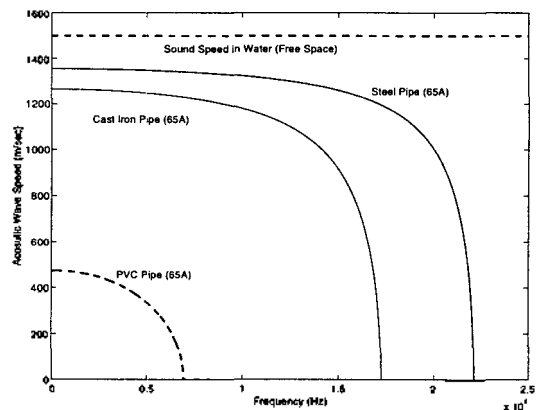


그림 1. 유체가 가득찬 배관 (65A)의 주파수에 대한 누수음 전파속도

누수음 ( $s = 1$  파)의 전파속도는 식(1)에 의해 그림

1과 같이 얻어졌는데, 동일한 치수를 가진다 하더라도 배관의 재질에 따라 그리고 주파수에 따라 음속 ( $s = 1$  파)은 크게 달라질 수 있음을 보여 준다. Steel 배관은 0 Hz 근처에서 약 1356 m/sec의 음속을 가지는 데 비해 PVC 배관에서는 그 보다 약 2.9 배정도 느린 475 m/sec 를 보인다. 이것은 자유공간의 물 속의 음속이 약 1500 m/sec로 일정한 것과는 대조적이다.

그러나, 실제 배관은 불연속점 (플랜지, 커넥터, 밸브, 분기관, 배관 직경의 변화 등등)을 가지므로, 배관 시스템에 대한 음속의 추정은 오차를 가질 수 있으므로 충분한 실험적 자료가 필요하다.

### 3. 누수지점 탐지 알고리즘

그림 2와 같이 배관에서 누수가 발생할 경우, 누수 지점의 양 방향에 진동파를 감지할 수 있는 센서(예, 가속도계)를 설치하여 각 센서에 도달하는 파동의 도착 시간 구별이 가능하다면, 아래의 식에 의해 누수 위치를 탐지할 수 있다.

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

여기서,  $D$ 는 센서간 거리,  $c$ 는 파동의 속도,  $\tau_d$ 는 두 센서에 도착하는 파동의 전달 시간차 ( $t_1 - t_2$ )이다. 즉, 누수지점 위치  $d_1$ 과  $d_2$ 는 파동의 속도  $c$ 와 시간차  $\tau_d$ 를 알 수 있으면 추정 가능해진다.

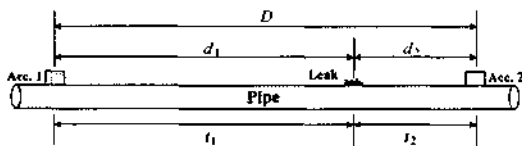


그림 2. 도달시간차를 이용한 누수지점 추정

이때 속도  $c$ 는 다양한 종류의 배관에 대한 실험을 통한 체계적 데이터베이스가 필요하다. 그리고 도달시간차  $\tau_d$ 의 추정은 본 연구에서 신호처리의 핵심으로 누수지점 탐지의 정밀도를 결정한다. 실제 다양한 시간지연 추정법이 존재하나 여기서는 상호상관함수 (cross-correlation function method)에 바탕한 방법을 채택하였다. 즉, 그림 2의 두 센서에서 측정된 신호  $x(t)$ 와  $y(t)$ 의 상호상관함수  $R_{xy}$ 를 사용하여 추정 가능

한 데, 즉,

$$R_{xy} = E[x(t)y(t+\tau)] = \alpha R_{xx}(\tau - \tau_d) + R_{n_x n_y}(\tau) \quad (2)$$

이때  $E[\ ]$ 는 두 신호의 곱의 앙상블 평균 (ensemble average),  $\alpha$ 는 상대적인 진폭인자 (amplitude factor), 그리고  $n_x(t)$  및  $n_y(t)$ 는 각각 노이즈이다. 만약 노이즈  $n_x(t)$ 와  $n_y(t)$ 가 연관되어 있지 않다면 (uncorrelated), 상호상관함수는 시간지연  $\tau_d$ 를 가진 자기상관함수 (auto-correlation function)에 비례할 것이다. 본 연구에서는 아래에 상술하는 바와 같이 두 가지의 알고리즘으로 시간지연을 추정하였다.

우선 그림 3(a)에서 보는 바와 같이, 두 신호의 자기 파워 스펙트럼  $S_{xx}(f)$  및  $S_{yy}(f)$ , 그리고 코히어런스 함수 (coherence function)  $\gamma_{xy}^2(f)$ 를 바탕으로 탐지주파수 대역을 정한다. 이것은 배관의 재료 및 치수에 따라 크게 달라질 수 있음에 유의한다. 그리고 나서 설정된 주파수 대역에 맞춰 실제 상호 상관함수로 부터 시간지연을 계산하는 것이다.

그림 3(b)는 알고리즘 1인데 FFT에 기초한 것으로, BPF (통과대역필터)를 통과한 두 신호의 상호파워 스펙트럼  $S_{xy}(f)$ 로 부터 IFFT (역푸리에변환)를 통해  $R_{xy}(\tau)$ 를 계산한다.

알고리즘 2는 그림 3(c)에 보인 것처럼, 알고리즘 1 바탕위에 optimal Maximum Likelihood 창 (window) [10]을 적용시켜 정밀한 시간지연을 얻고자 하였다.

두 신호  $x(t)$ 와  $y(t)$  사이의 코히어런스 함수의 크기제곱으로 주파수 영역에서 아래와 같이 표현된다.

$$|\gamma_{xy}(f)|^2 = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \quad (3)$$

이러한 코히어런스의 크기제곱에 대한 정의하에, Maximum Likelihood 가중함수는 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다. [10]

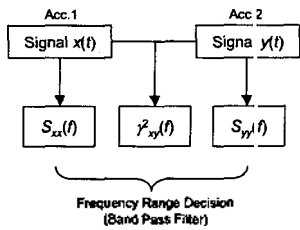
$$W_{ML}(f) = \frac{|\gamma_{xy}(f)|^2}{|S_{xy}(f)|[1 - |\gamma_{xy}(f)|^2]} \quad (4)$$

여기서  $|\gamma_{xy}(f)|^2 < 1$ 이다. 식(4)의 가중함수는 상호

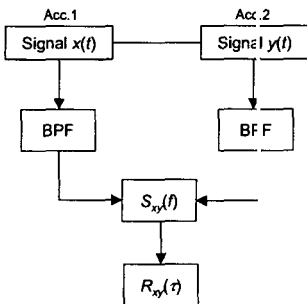
상관함수를 이용하여 시간지연의 피크 추정에 좋은 결과를 주는 것으로 알려져 있다. 그러므로 수정된 상호 파워 스펙트럼  $\hat{S}_{xy}(f)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{S}_{xy}(f) = W_{ML}(f) S_{xy}(f), \quad (5)$$

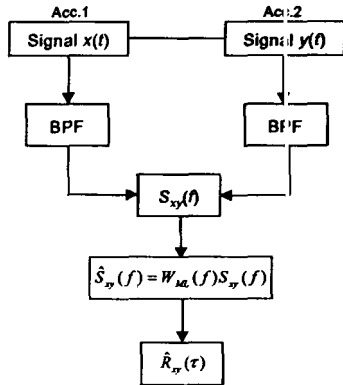
그리고 나서 수정된 상호상관함수  $\hat{R}_{xy}(\tau)$ 는  $\hat{S}_{xy}(f)$ 로부터 IFFT를 통해 계산 가능하다.



(a) 주파수 대역 선정



(b) 알고리즘 1을 이용한 시간지연 추정



(c) 알고리즘 2를 이용한 시간지연 추정

그림 3. 누수지점 탐지를 위한 알고리즘

#### 4. 실험 결과

Fig. 5에서 보는 것과 같이 호칭경 35A등의 강관으로 전체길이 약 120m정도의 누수탐지 배관 시스템에 대해 음향방출(acoustic emission) 및 기속도계를 이용한 실험을 실시 하였다. 누수는 직경 3mm의 홀을 제작하여

볼밸브로 조절하였으며, 누수탐지 시스템의 한 끝단에서 물을 공급하여 가압시켰다.

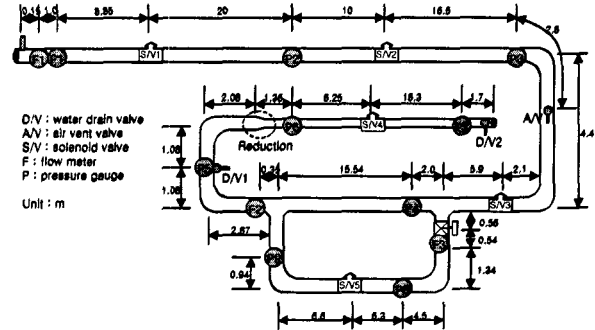
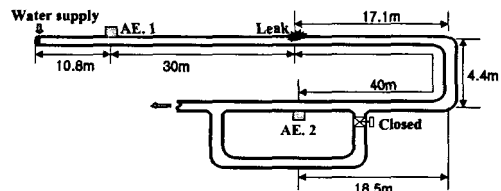
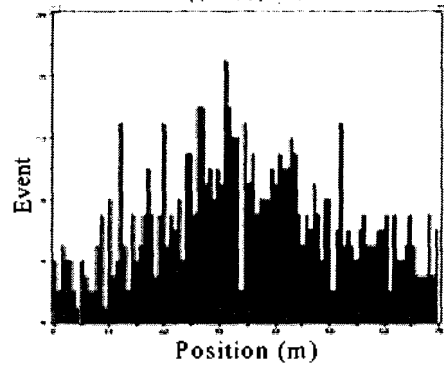


그림 4. 누수시험장치의 개략도

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 43~77dB로 주변 환경에 따라 설정되었으며, 임의의 결함 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.



(a) AE 센서 위치 및 누수지점



(b) 거리에 따른 AE hit 횟수

그림 5. 음향방출을 이용한 누수지점 탐지

그림 5는 전체길이 70 m 에서 AE를 이용한 누수지점 위치표정으로, 누수가 발생하는 경우 많은 AE 신호들이 전체 센서구간에 걸쳐 나타났으나, 시간이 경과함에 따라 누출 지점에 최다의 AE hit를 발생시켰음을 관찰할 수 있었다. AE 센서 1 으로부터 30 m 떨어진 곳에 누수를 시켰으나 실험결과는 약 33 m 지점에 표정되었다. 이러한 오차는 음향방출기법이 누수지점 탐지에는 탄성파의 거리 증가로 인한 감쇠로 우수하지 못함을 보여 주고 있다.

반면에, 가속도계를 이용한 경우엔 이 보다 우수한 성능을 보여 주었다. 두 개의 B&K 4370 가속도계는 배관상의 두 지점에 부착되었고, 계측된 신호는 신호증폭기인 B&K의 Nexus, 그리고 Krohn-Hite 3103 필터 (3-4kHz)를 통해 신호분석 전용장비인 B&K의 Pulse System으로 전달 되도록 구성이 되었다. 이때 1번 가속도계는 누수탐지 시스템의 누수지점으로 부터 좌측으로 38m, 2번 가속도계는 우측으로 두 곳의 직각지점을 지난 29m 떨어진 곳에 부착하였다. Fig. 6 은 이 실험으로 구해진 센서신호에서 알고리즘 1 으로 구해진 상호상관함수를 보여 주는데 약 6.65msec의 시간 지연을 가졌으며, 음파의 전달속도가  $c=1250\text{m/sec}$  일때, 식 (5)에 의거, 누수 추정거리는  $d_1=37.66\text{m}$  와  $d_2=29.34\text{m}$ 가 각각 된다. 오차는 0.34m가 발생하였는데, 이는 구간거리  $D$ 의 1% (0.67m) 미만이다.

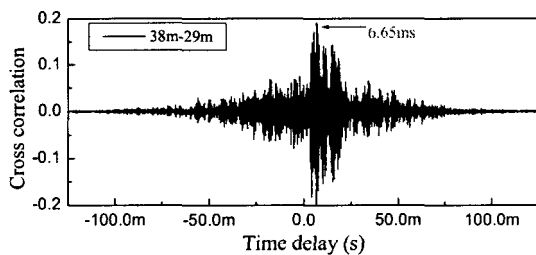


그림 6. 가속도계(알고리즘 1)을 이용한 누수지점 탐지

아울러 그림 7과 같이 대전시의 지하에 매설된 실제 상수도배관에 대해 가속도계를 이용한 두 가지의 알고리즘에 바탕한 탐지실험을 수행하였다. 배관은 지하 약 1.5 m 에 매설된 100 A 크기의 주철관으로 전체길이는 약 315 m 였다.

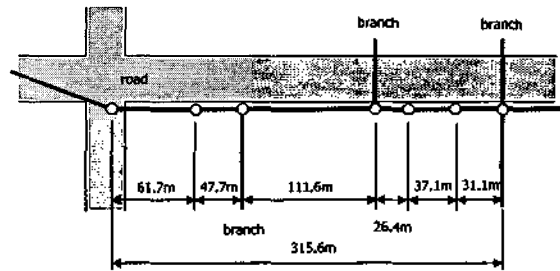
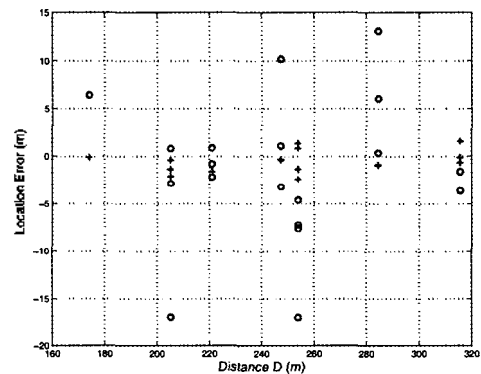
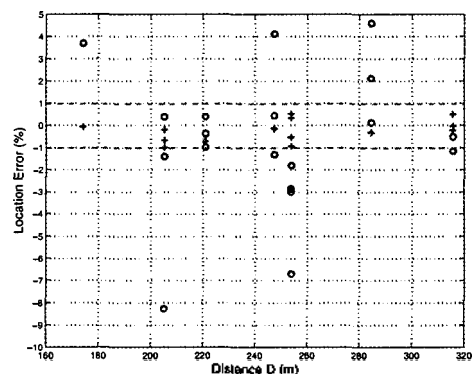


그림 7. 실제 지하매설 배관에 대한 누수탐지 실험

배관 라인상에는 모두 7 개의 맨홀이 있어 중간중간에 누수지점 및 가속도계 설치지점을 다양하게 변경시키면서 실험을 수행하였다. 실제 사용하는 상수도배관에 대해 실험을 수행한 관계로 누수를 위해 관로상에 새들 (saddle)을 설치한 후 물을 만든 뒤 볼밸브로 누수를 조절하였다. 사용된 가속도계는 B&K 8313C 였으며, 주파수 대역은 0 - 800 Hz로 정하였고 누수신호의 전달속도는 1375 m/sec 로 추정하였다.



(a) 센서간 거리 vs 탐지예러 (m)



(b) 센서간 거리 vs 탐지예러 (%)

그림 8. 두가지 알고리즘을 이용한 누수탐지 실험. o 알고리즘 1, + 알고리즘 2.

그림 8 에는 두 가지의 알고리즘 (o 알고리즘 1, + 알고리즘 2) 에 의한 결과를 비교하였는데, 알고리즘 2 는 알고리즘 1에 비해 탁월한 탐지성능을 보여 주었다. 알고리즘 1 은 전체실험에 걸쳐 최대 약 20 m 의 거리 오차 즉,  $D$  의 8 % 에 해당하는 탐지오차를 나타내었다. 반면, 알고리즘 2 는 전체실험에 대해 300 m 의 센서간 거리에서 최대 3 m의 오차, 즉  $L$  의 1 % 에 해당하는 탐지오차를 나타내었다.

### 5. 결론

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

1) 배관의 누수로 인한 음향 탄성파의 분류와 전파속도 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 범위에서 탄성파를 계측하는 AE 센서는 AE hit수의 누적을 계산하여 단거리에서 누수탐지가 가능하나 감쇠로 인해 장거리에서는 한계가 있다.

4) 저주파범위에서 탄성파를 계측하는 가속도계의 경우 계측된 신호의 주파수 대역은 누수음의 계측과 연관성이 있으며, 필터링 및 신호처리 과정을 통해 도착시간차를 계산하여 충분히 정확한 누수지점을 탐지해 내었다. 특히 optimal Maximum Likelihood 창은 장거리에서도 매우 정밀한 탐지성능을 보였다.

### 후기

본 연구는 환경부의 차세대 핵심환경기술사업인 "탄성파를 이용한 상수도 누수탐지 감시시스템 개발" 과제에 대한 연구결과의 일부임을 밝히며, 실제 상수도배관에 대한 실험을 허가하고 협조해 준 대전광역시 상수도 사업본부 관계자 여러분께 감사드립니다

### 참고문헌

1. 환경부 수도정책과, "2001 상수도 통계", 환경부, 2002.
2. Palmer Environmental, MicroCorr, Palmer Environmental Services.

3. Liston D. A. and Liston J. D., "Leak detection techniques", Journal of New England Water Works Association, 1206(2), pp.103-108, 1992.

4. Hunaidi O. and Giamou P., "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.

5. Fuchs H. V. and Riehle R., "Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis", Applied Acoustics, 33, pp. 1-19, 1991.

6. Pinnington R. J. and Briscoe A. R., "Externally applied sensor for axisymmetric waves in a fluid filled pipe", Journal of Sound and Vibration, 173(4), pp. 503-516, 1994.

7. Muggleton J. M., Brennan M. J. and Pinnington R. J., "Wavenumber prediction of waves in buried pipes for water leak detection", Journal of Sound and Vibration, 249(5), pp. 939-954, 2002.

8. Hunaidi O. and Chu W. T., "Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes", Applied Acoustics, 58, pp.235-254, 1999.

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

10. Clarkson P. M., Optimal and adaptive signal processing, CRC Press, Florida, 1993.