

## 가속도계를 이용한 탄성과 기반 누수탐지 기술 분석

최광목<sup>1</sup> · 이호현<sup>1</sup> · 신강욱<sup>2</sup> · 홍성택<sup>3\*</sup>

### Analysis of Elastic Wave Based Leakage Detection Technology Using Accelerometers

Kwangmook Choi<sup>1</sup> · Hohyun Lee<sup>1</sup> · Gangwook Shin<sup>2</sup> · Sungtaek Hong<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Senior Researcher, K-water Research Institute, K-water, Daejeon, 34045, Korea

<sup>2</sup>Head Researcher, K-water Research Institute, K-water, Daejeon, 34045, Korea

<sup>3\*</sup>Principal Researcher, K-water Research Institute, K-water, Daejeon, 34045, Korea

#### 요약

상수도 배관은 땅속에 매설되어 있어서 배관의 노후화에 따른 누수를 맨눈으로 탐지하기가 불가능하며, 누수음을 감지함으로써 배관의 누수를 탐지하는 기술이 주로 사용된다. 본 논문에서는 상수도 배관의 양단에 두 개의 가속도계를 부착·취득한 데이터 간의 도달 시간 차이를 계산하여 누수 지점을 탐지하는 알고리즘을 개발하였다. 배관의 누수 시험은 17.2m의 배관에 4.3m, 8.6m, 12.9m 지점에 밸브를 설치하고, 밸브의 개도율을 30%, 70%로 변경해 가면서 누수 지점을 분석하였으며, 밸브가 30%, 70%씩 개방된 정도의 배관 내 압력 강하에 대해서는 누수를 탐지할 수 있는 것으로 확인되었다. 초기 단계의 누수를 탐지하는 것이 매우 중요하며, 본 연구에서 적용한 알고리즘으로부터 초기의 누수 지점의 탐지가 가능할 것으로 판단된다.

#### ABSTRACT

Water pipes are laid on the ground, making it impossible to visually detect leaks due to aging of pipes, and technology to detect leaks in pipes is mainly used to detect leaks in pipes by detecting leaks. In this paper, two accelerometers were attached to both ends of the constant water piping to calculate the time difference between the acquired data to detect leakage points. The leak test of piping was performed by installing valves at 4.3m, 8.6m, and 12.9m points on piping 17.2m, and changing the development rate of valves to 30% and 70%. Leakage can be detected for pressure drop in piping, which is 30% and 70% open valve. It is very important to detect leakage in the early stage, and it is judged that detection of the initial leak point from the algorithm applied in this paper will be possible.

**키워드** : 가속도계, 누수음, 누수탐지, 상수도 배관, 탄성과

**Key word** : accelerometer, leakage sound, leakage detection, water pipe, elastic wave

Received 1 June 2020, Revised 12 June 2020, Accepted 8 July 2020

\* Corresponding Author Sungtaek Hong (E-mail:sthong@kwater.or.kr, Tel:+82-42-870-7681)

Principal Researcher, K-water Research Institute, K-water, Daejeon 34045, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.9.1231>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서론

국내 상수도 관망은 국가 수도 시설의 주요한 구성 요소이지만 대부분이 땅속에 매립되어 있어 배관의 노후화 정도를 파악하기 어려우므로 적절한 시기에 효과적으로 유지 관리하기가 매우 어렵다. 그림 1에서 보듯이 환경부의 통계에 따르면 2017년 기준 국내 연간 수도물 생산량 65억 m<sup>3</sup> 중 수도관 사고나 배수지 균열 등의 누수로 인한 누수량은 6.8억 m<sup>3</sup>으로 전체 공급량의 10.5%를 차지하고 있어, 적지 않은 환경적 및 사회적, 경제적 손실이 발생하고 있다[1-2].

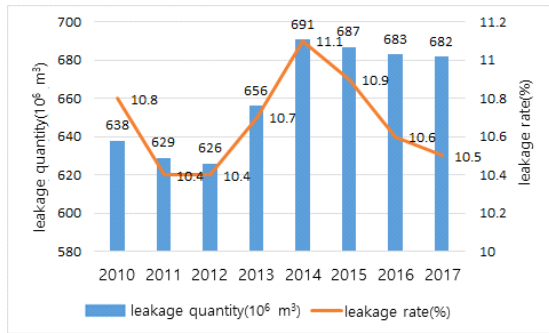


Fig. 1 Leakage by year(Ministry of Environment)

상수도 배관은 땅속에 매설되어 있으므로 배관의 노후화에 따른 누수를 맨눈으로 탐지하기란 불가능하며, 따라서 누수음을 감지함으로써 배관의 누수를 탐지하는 기술이 주로 사용된다. 기술 선도국의 경우 누수음 감지 기법 기반의 누수탐지 시스템이 상용화되어 있는 상태이나 누수탐지 상세 기술이 공개되지 않아 누수탐지 기술의 국산화가 필요한 실정이다.

청음봉, 하이드로폰 및 지상 마이크로폰 기법은 누수음을 직접 청음하는 기법으로 여러 단점이 있다. 따라서 1970년대에 들어 좀 더 정밀한 누수탐지 기법의 필요성이 제기되었으며, 음향 상관 해석법이 제안되었다. 하지만 초기의 음향 상관 해석법은 1m 이내의 거리 내에서만 적용할 수 있어 실용성이 낮았다. 이후 계측된 신호를 FFT(Fast Fourier Transform) 하여 주파수 범위를 선택하여 해석함으로써 정확도 높은 누수 지점 탐지가 가능해져 누수음 상관 기법이 상용화되어 보편적으로 사용되었다. 이와 같은 상관 기법은 배관에 부착된 센서에서 계측된 신호간의 시간 지연을 이용하여 누수 지점을

찾는데, 배관 내 유체의 음속을 정확히 알고 있어야 한다. 따라서 누수에 의한 배관의 진동모드와 배관 내 유체의 음파 전달 특성을 해석하는 연구도 진행됨으로써 누수 지점 탐지의 정확도가 향상되었다. 이 기법을 이용하여 배관의 누수를 탐지하는 기법은 다시 크게 초음파 기법과 가속도 기법으로 나눌 수 있다. 초음파 기법은 비교적 단거리 구간에서 적용할 수 있으며, 장거리 누수 탐지를 위해서는 유체와 배관의 연성 진동을 계측하는 가속도 기법이 보편적이다. 가속도 기법에서는 배관이나 제수변 등의 외부에 가속도계를 비교적 수월하게 부착할 수 있다는 장점이 있다[3].

## II. 누수탐지

### 2.1. 누수 신호 형태

땅속에 매설된 배관에서 균열, 천공 등으로 인해 유체의 누수가 발생하면, 광대역 주파수에 걸친 누수 신호를 발생시키게 된다. 이는 누수로 인한 배관 내외부의 압력 차이가 원인이며, 누수 신호를 효과적으로 처리함으로써 누수 지점의 탐지가 가능하다.

배관 내 유체의 누수는 배관 진동과 누수음으로 분류할 수 있는 두 가지 신호를 발생시킨다. 배관 진동은 배관 길이 방향으로 전파되는 종파와 면의 방향으로 전파되는 횡파의 두 가지 모드를 가지고 발생한다. 이 중 횡파는 진동 발생 지점에서 가까운 지점에서 급격히 그 크기 줄어드는 파와 지속해서 전파되는 파의 두 가지 특성으로 가지고 전파된다. 누수음은 누수로 인한 배관 내 압력변화로 인해 발생하며 배관 내 유체에서 전파되는 유체음향 신호와 배관 진동에 의한 구조전달 음향신호로 나누어질 수 있다. 이처럼 배관에서의 누수는 다양한 특성을 갖는 신호를 발생시키게 되며 이를 효과적으로 계측함으로써 배관에서의 누수를 탐지할 수 있다.

청음기는 유체에서 전파되는 누수음을 측정하여 누수를 탐지하는 기법이며, 가속도계는 배관 진동을 계측하여 누수를 탐지하는 기법이다. 가속도계를 이용하는 기법은 감도가 높은 가속도계를 이용한 하드웨어를 구축하고, 잡음 신호를 효과적으로 필터링할 수 있는 신호처리 알고리즘을 구축함으로써 누수탐지 정확도를 높일 수 있다.

가속도계로 계측할 수 있는 누수 신호는 배관 진동 중

횡파이며, 배관의 횡파는 누수로 인해 배관에 직접 발생하는 배관 진동과 유체와 배관의 연성 진동의 특성을 갖는다. 누수로 인해 배관에 직접 발생하는 배관 진동은 배관의 재질, 치수 등의 물성값과 균열 및 천공 등의 손상 크기 등에 따라 달라질 수 있으나 비교적 고주파수 영역의 신호 특성을 가지며, 그 크기가 작아 배관 자체의 감쇠 효과에 의해 장거리 전파가 어렵다. 반면, 유체-배관 연성 진동은 비교적 저주파 영역에서 계측되며, 신호 크기가 크다. 또한, 누수음에 의한 탄성파가 배관을 따라 장거리까지 전파가 가능하므로 유체-배관 연성 진동의 계측을 통해 누수탐지 알고리즘을 구현할 수 있다.

2.2. 누수 신호의 전파 특성

유체-배관 연성 진동은 그림 2와 같이 다양한 모드를 나타낸다. 그림 2의 최저차 모드인  $n=0$  모드는 유체-배관 연성 진동의 가장 기본적인 모드로써 ‘숨쉬기 모드 (breathing mode)’라고도 한다.  $n=1$  모드는 단순보의 거동인 휨 모드(bending mode)와 유사한 거동을 나타내는 모드로써 땅속에 매설된 배관은 땅속에 구속되어 실제에서는 나타나기 어렵다.  $n=2$  모드 이상의 모드는 고주파 대역에서 나타나는 ‘타원형 모드(ovalling mode)’이다. 이들 중 배관 누수에 의한 탄성파의 종방향 전파와 관계되는 것은  $n=0$  모드이다. 배관 누수에 의한 배관 내 유체의 압력변화는 유체음을 유발하며, 배관 내 유체가 흐르는 방향을 따라 유체음이 전파된다. 이때 유체음이 흐르는 위치에서 배관의 압력변화 때문에 횡방

향 변위가 발생하여 유체-배관 연성 진동 특성을 나타내며, 그림 3과 같은 준종파(quasi-longitudinal wave)의 형태로 전파된다. 유체 내의 탄성파는 비분산적 특성이 있으나, 유체가 배관 내에 있을 경우 유체-배관 연성 진동은 주파수에 따라 탄성파의 속도가 달라지는 분산적 파동의 특성을 띠게 된다[4].

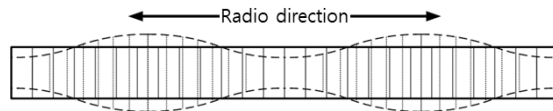


Fig. 3 Quasi-longitudinal wave propagation radio wave pattern

$n=0$  모드는 링 주파수라고 하는  $f_r$ 에서 공진하는데, 이는 아래 식과 같이 정의된다.

$$f_r = \frac{c_t}{\pi d} \tag{1}$$

여기서,  $d$ 는 배관의 직경이며,  $c_t$ 는 준종파의 위상 속도로서 주파수에 독립적이며, 다음과 같이 매개 구조물의 물성값으로 결정된다.

$$c_t = \left[ \frac{E}{\rho(1-\nu^2)} \right]^{1/2} \tag{2}$$

여기서,  $E$ 는 배관 재료의 영계수(Young's modulus),  $\rho$ 는 배관 재료의 밀도,  $\nu$ 는 배관 재료의 포아송 비(Poisson's ratio)이다.

링 주파수 영역에서는 에너지 전환에 따라 4종류의 탄성파로 나뉘는데,  $n=0$  모드에서  $s=0, 1, 2$ 의 세 종류와  $n=1$  모드로 나타난다.  $n=0$  모드 중  $s=1$  모드가 유체에 기인한 파가 지배적인 파동이며, 이 모드가 누수탐지에 이용된다.

땅속에 매립된 배관 내에서 누수로 인해 발생하는 탄성파의  $s=1$  모드의 위상 속도는 유체와 배관의 연성 특성과 더불어 배관 외부를 감싸고 있는 흙과 같은 매질에도 영향을 받지만, 흙과 같이 배관을 둘러싸고 있는 매질의 영향은 미미하다고 알려져 있으므로 이를 무시하면  $s=1$  파의 파수  $k$ 는 아래와 같이 주어질 수 있다.

$$k^2 = k_f^2 \left[ 1 + \frac{2B_f/a}{Eh/a^2 - \rho h \omega^2} \right] \tag{3}$$

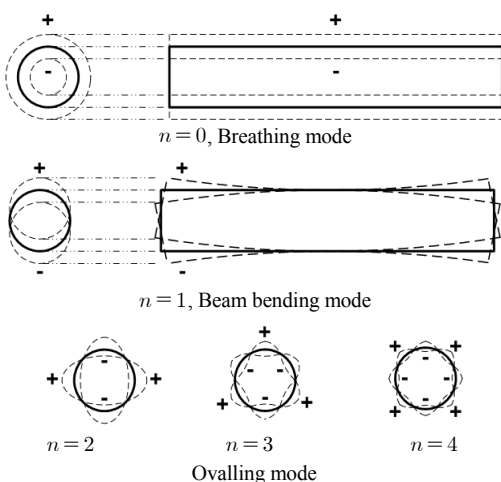


Fig. 2 Fluid-Piping Ductility Mode in Pipe

여기서,  $\omega$ 는 주파수,  $h$ 는 배관의 두께,  $B_f$ 는 배관 내 유체의 체적 탄성 계수,  $a$ 는 배관의 평균 반경[(내경+외경)/2],  $k_f = \omega/c_f$ 는 자유공간에서 유체의 파수이며,  $c_f$ 는 자유 공간에서 유체의 종파 속도로서 다음과 같이 주어진다.

$$c_f = \sqrt{B_f/\rho_f} \quad (4)$$

여기서,  $\rho_f$ 는 유체의 밀도를 나타낸다.

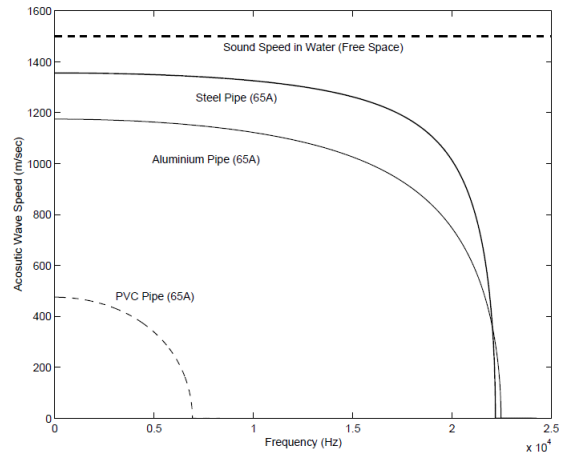
식 (3)을 이용하여  $s=1$  모드의 전파속도는 관계식인  $c = \omega/k$ 로 추정이 가능하며 다음과 같다.

$$c = c_f \left[ 1 + \frac{2B_f/a}{Eh/a^2 - \rho h \omega^2} \right]^{-1/2} \quad (5)$$

식 (5)는 배관 누수음  $s=1$  모드의 위상 속도로서 배관 재질 및 치수, 주파수에 따라 그 속도가 바뀌는 분산적 특성을 나타내고 있다. 배관의 치수가 표 1과 같이 주어질 때 이를 식 (5)에 대입하여 주파수 별로 계산하면 PVC관, 강관, 알루미늄관의 누수음 중  $s=1$  모드의 전파속도는 그림 4와 같다. 그림 4에서 배관의 재질에 따른 물성값 특히, 영계수 및 포와송비에 따라 배관 내의 유체의 음속( $s=1$  모드)은 크게 달라질 수 있음을 알 수 있고, 주파수가 증가함에 따라 음속은 감소하며, 특정 주파수에 이르러서는 음파( $s=1$  모드)는 전달되지 않는데 이 주파수가 배관의 링 주파수이다.

**Table. 1** Major Characteristics of Pipeline for Sound Wave Speed

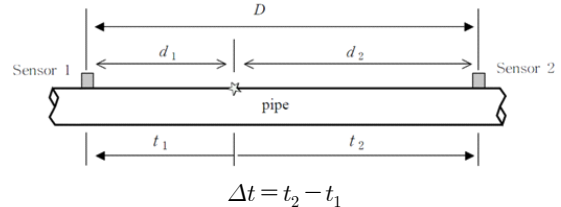
	PVC	Steel	Aluminum
diameter	65A		
outside diameter (m)	0.0763		
inside diameter (m)	0.0690		
average diameter (m) $a$	0.0727		
thickness (m) $h$	0.00365		
compression wave speed (m/sec) $c_t$	1,725	5,270	5,434
ring frequency (Hz) $f_r$	7,559	23,111	23,801
0Hz, sound speed ( $s=1$ mode) (m/sec) $c$	475	1,356	1,175



**Fig. 4** Variation of sound velocity by frequency in pipes containing water

### 2.3. 시간 지연차 기법

배관 표면에서 누수가 발생하면 배관 내부의 유체가 누수되며 탄성파가 발생하는데, 이 탄성파는 누수 지점을 기준으로 양방향으로 전파된다. 이때, 그림 5와 같이 누수 지점의 양방향에 탄성파를 계측한 후 다음 식과 같은 방법으로 누수 지점을 탐지할 수 있다.



**Fig. 5** Time difference technique

$$d_1 = \frac{1}{2}(D - c\Delta t) \quad (6)$$

$$d_2 = \frac{1}{2}(D + c\Delta t)$$

여기서,  $D$ 는 센서 간 거리,  $d_1$  및  $d_2$ 는 각각 센서 1 및 센서 2에서 누수 지점까지의 거리이며,  $c$ 는 탄성파의 전파속도,  $\Delta t$ 는 도달 시간차이다. 식 (6)에서 알 수 있듯이 탄성파 도달 시간차를 이용한 누수 지점 탐지 알고리즘은 탄성파의 전파속도와 도달 시간차를 구하여야 한다.

그림 5와 같이 센서 1이 누수 지점에서 더 가깝다면 센서 1이 더 먼저 누수음 신호를 취득하게 되는데, 위 식 (6)의 도달 시간차 알고리즘을 적용하기 위해서는 센서 1과 센서 2의 누수음 신호의 도달 시간차이를 추정하여

야 한다.

식 (6)에서 탄성파의 속도  $c$ 와 시간차  $\Delta t$ 를 안다면 누수지점 위치  $d1$ 과  $d2$ 의 추정이 가능하다. 먼저, 누수 신호 및 잡음을 포함한 두 센서에서 측정된 신호  $x(t)$  및  $y(t)$ 가 다음과 같다고 다음과 같이 가정한다.

$$x(t) = s(t) + n_x(t) \tag{7}$$

$$y(t) = \alpha s(t - \Delta t) + n_y(t)$$

여기서,  $s(t)$ 는 누수에 의한 신호로 평균이 '0'이고 시간에 따라 통계학적 특성값이 변하지 않는 랜덤 신호로써 백색 잡음이라 가정한다.  $\alpha$ 는 두 센서 신호의 상대적 진폭 계수이며,  $n_x(t)$  및  $n_y(t)$ 는 각각 두 센서에서 측정된 잡음 신호이다.

### III. 누수탐지 알고리즘

#### 3.1. 시스템 개요

누수탐지 알고리즘에 있어서 도달 시간차의 추정은 매우 중요하다. 도달 시간차는 배관에 부착된 두 개의 센서로부터 측정된 가속도 데이터를 활용하여 두 신호 간의 상호 상관함수를 계산하여 도출할 수 있다[5-7]. 도달 시간차를 추정하는 알고리즘은 다음 과정과 같다.

- (1) 누수음은 광대역 주파수 범위를 가지고 있으며, 땅속에 매립된 배관의 탄성파를 측정하여야 하므로 주파수 대역이 넓으며, 미세 진동의 측정이 가능한 가속도계를 배관의 양단에 부착하여 신호  $x(t)$ 와  $y(t)$ 를 측정한다.
- (2) 신호  $x(t)$  및  $y(t)$ 의 오토스펙트럼  $S_{xx}(f)$  및  $S_{yy}(f)$  및 상호스펙트럼  $S_{xy}(jf)$ 를 계산하여 코히어런스 함수(coherence function)  $\gamma_{xy}^2(f)$ 를 계산한다.
- (3) 코히어런스 함수는  $0 < \gamma_{xy}^2(f) < 1$ 의 구간을 갖는데 '0'에 가까울수록 잡음을 의미한다. 따라서 코히어런스 함수값이 크면서도 스펙트럼의 신호 크기가 큰 구간의 주파수 영역을 찾는다. 배관의 재료 및 치수에 따라 사용 주파수 대역이 달라질 수 있으므로 주파수 구간의 설정이 매우 중요하다.
- (4) 설정된 주파수 구간에 해당하는 대역통과 필터를 설정한다.

- (5) 선정된 대역통과 필터를 거친 신호  $x(t)$ 와  $y(t)$ 의 상호스펙트럼  $S_{xy}(f)$ 를 계산한다.
- (6) 상호스펙트럼의 역 푸리에 변환을 통해 상호 상관함수  $R_{xy}(\tau)$ 를 구하여 도달시간차  $\Delta t$ 를 추정한다.
- (7) 대상 배관의 재질에 따른 탄성파 속도  $c$ 와  $\Delta t$  및 배관의 치수를 식 (6)에 대입하여 누수지점을 추정한다.

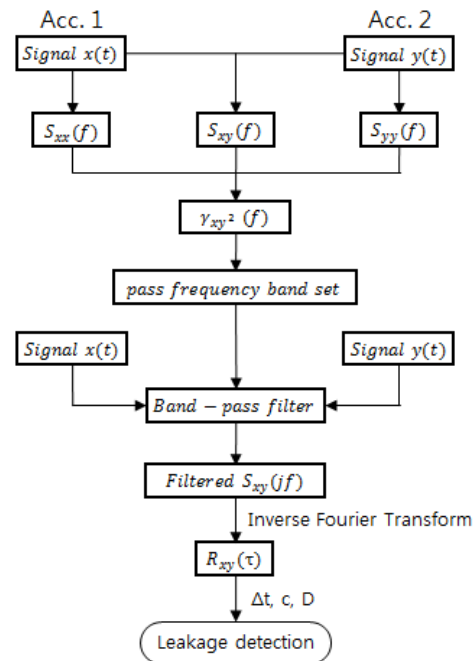


Fig. 6 Leakage detection algorithm Flowchart

그림 6의 알고리즘에서는 대역통과 필터로써 웨이블릿 변환을 이용한다. 웨이블릿 변환이란 시간 영역 데이터의 각 시간 요소에 대해 주파수 영역 별 분해를 통해 시간대 주파수 영역으로 신호를 나타내는 기법으로써, 데이터 de-noising 등에 적용된다[8-9].

### IV. 누수탐지 시험 및 분석

#### 4.1. 시험 개요

본 연구에서 누수음 탐지 알고리즘을 개발하기 위해 그림 7의 PE관망 파이프 플랜트 중 직선 구간 17.2m의 PE 배관에서 3개의 지점에 누수 현상을 시험하기 위한 밸브를 설치하였다. 배관 내의 물은 만관 상태로 흐르고

있으며, 밸브의 열림 정도에 따라 그림 8과 같이 누수 정도를 시험하였다. 누수음 측정을 위한 가속도 센서는 그림 9와 같이 Meggit사의 Endevco 7703A-1000 모델을 사용하였으며, 배관의 양단에 부착하여 두 센서 간의 거리는 17.2m이다. 이 가속도계는 1000 pC/g의 민감도를 가지고 있어 진동의 크기가 상대적으로 매우 작은 누수음에 의한 탄성파를 측정하기에 적합하다.



Fig. 7 PE piping Pilot Plant



Fig. 8 Valve installed in PE piping

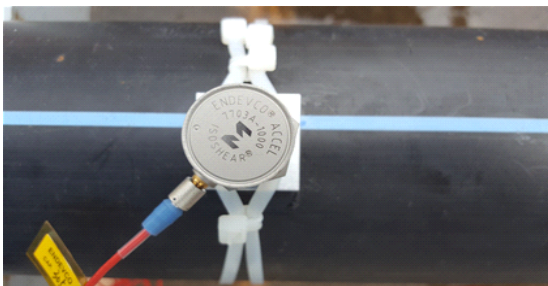


Fig. 9 Accelerometers sensor

배관의 누수를 시험하기 위한 밸브의 위치는 총 3지점으로 그림 10과 같다. 전체 배관 길이(17.2m)를 4등분한 지점인 4.3m, 8.6m, 12.9m에 밸브를 설치하였으며, 누수 지점의 탐지 성능을 평가하기 위해 3개의 지점에

서 각각 누수가 발생하는 조건(밸브를 30, 70, 100% open)으로 시험을 수행하였다. 누수 지점 계산을 위한 탄성파의 속도는 직경 100mm의 고밀도 PE관에 해당하 는 370m/s로 지정하여 누수 지점을 계산하였다[10-12].

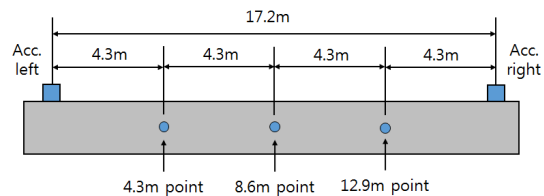


Fig. 10 Valve and acceleration sensor location for water leak test

#### 4.2. 데이터 취득

그림 11~14는 각 시험 시나리오 중 각 지점에 대해 계 측된 데이터를 나타낸 그림이므로써 주변 잡음을 제거하 기 위한 필터링 과정이 적용되기 전의 데이터이다. 이 데이터의 주파수 영역 분석을 통해 주변 잡음 제거를 위 한 필터링 주파수를 산정하며, 필터링 데이터로부터 누 수 지점 탐지 알고리즘을 수행하였다. 각 그림에서 (a) 가속도 데이터 비교 그림에서는 두 개의 가속도 센서에 서 취득한 데이터를 비교한 그림이므로써 누수가 발생하 지 않은 정상 상태에서는 주변 잡음에 의한 가속도 데이 터만 취득되었다. 각각의 가속도 데이터로부터 도출된 상호 스펙트럼은 각 그림의 (b), (c), (d)에 나타내었으며, 이로부터 취득한 코히어런스 함수를 각 그림의 (e)에 나 타내었다. 각 스펙트럼의 침투값 크기가 크게 나타나는 구간은 약 0~500Hz 구간이었으나, 코히어런스 함수에 서 0~500Hz 구간은 편차가 매우 크며, 1보다 매우 작은 값을 나타내고 있어, 이 주파수 영역에서는 누수음에 의 한 탄성파가 아닌 주변 잡음에 의한 영향이 계측된 것으 로 볼 수 있다. 따라서 누수 지점 탐지를 위한 주파수 영 역은 4.3m 지점의 밸브 70% 개방 경우의 결과를 바탕으 로 500~1,000Hz 구간으로 설정하였으며, 이 구간에서 는 코히어런스 함수가 비교적 1에 가까운 값을 나타내 고 있다. 따라서 잡음 제거를 위한 필터링 주파수는 500~1,000Hz로 설정하였으며, 이 주파수 대역에 해당 하는 대역 통과 필터를 사용하여 잡음을 제거하였다. 정 상 상태의 경우 누수음에 의한 탄성파가 측정되지 않고 주변 잡음에 의한 상시 진동 신호만 계측되어 상호 상관 함수가 도출되지 않아 누수탐지 알고리즘에 따라 정상 상태로 판별할 수 있다.

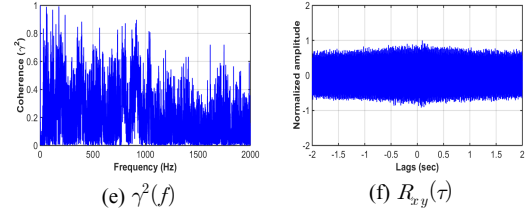
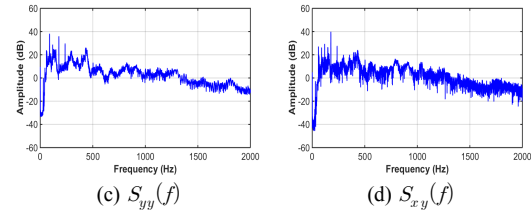
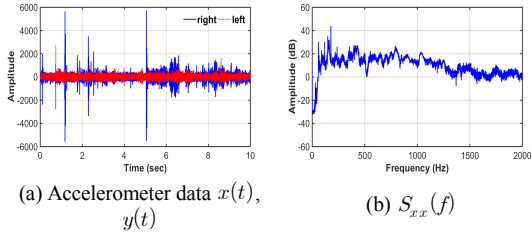


Fig. 11 normal state

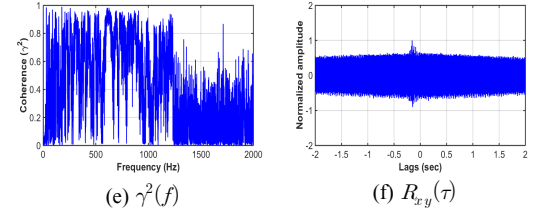
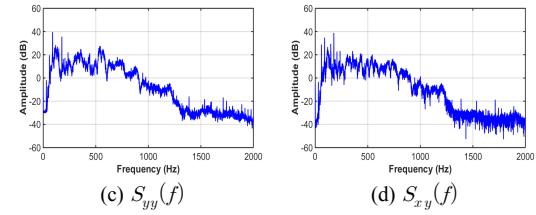
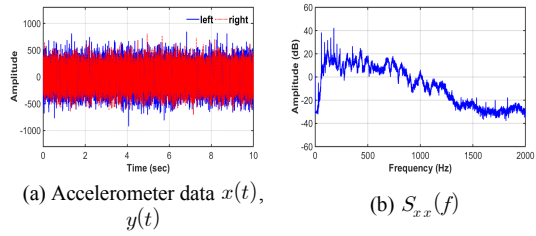


Fig. 13 8.6m point, valve 70% open

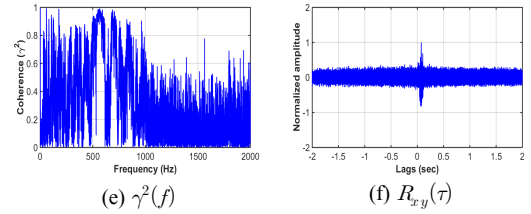
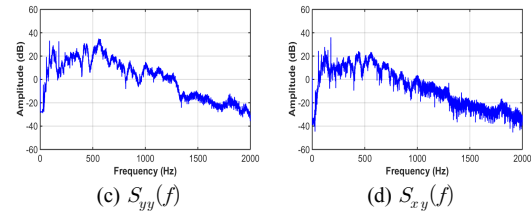
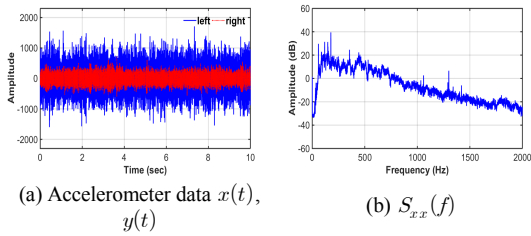


Fig. 12 4.3m point, valve 70% open

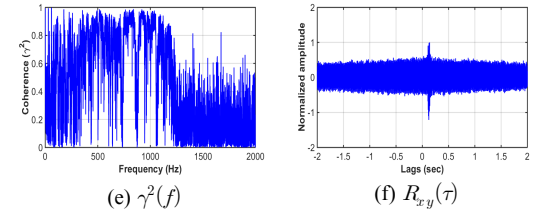
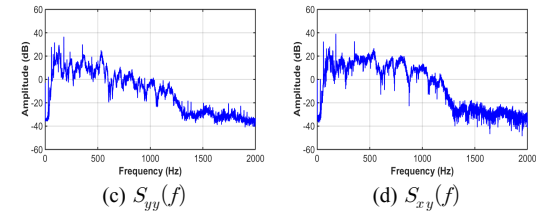
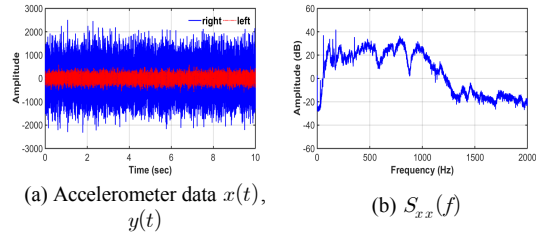


Fig. 14 12.9m point, valve 70% open

4.3. 데이터 분석

500~1,000Hz의 주파수 대역폭을 갖는 대역 통과 필터를 적용한 후 누수 지점을 추정한 결과를 아래 표 2~4에 나타내었다. 우선, 누수탐지 알고리즘 적용성 여부를 살펴보기 위해 각각 4.3m, 8.6m, 12.9m에 대해 밸브를 70% 개방하였을 때의 데이터를 분석하여 누수 지점을 추정하였으며, 각 경우에 대해 10초간 10회 측정된 데이터를 분석하였다.

4.3m 지점에서의 누수 지점 추정 결과는 32cm 이내로 추정되어 평균 오차율 약 7.4% 정도로 정확도가 매우 높게 누수 지점이 검출되었고, 8.6m 지점에서는 25cm 이내로 평균 오차율 약 3% 정도, 12.9m 지점에서는 약 -31cm 이내로 평균 오차율 약 -2.4% 정도를 나타내었다.

Table. 2 4.3m point, valve 70% open

No.	delay time (ms)	revision delay time (ms)	d <sub>1</sub> (m)	d <sub>2</sub> (m)	error (m)	error ratio (%)
1	73.24	-21.76	4.57	12.63	0.27	6.39
2	73.24	-21.76	4.57	12.63	0.27	6.39
3	73.36	-21.64	4.60	12.60	0.30	6.92
4	73.36	-21.64	4.60	12.60	0.30	6.92
5	73.49	-21.51	4.62	12.58	0.32	7.44
6	73.49	-21.51	4.62	12.58	0.32	7.44
7	73.61	-21.39	4.64	12.56	0.34	7.97
8	73.61	-21.39	4.64	12.56	0.34	7.97
9	73.73	-21.27	4.67	12.53	0.37	8.49
10	73.73	-21.27	4.67	12.53	0.37	8.49

Table. 3 8.6m point, valve 70% open

No.	delay time (ms)	revision delay time (ms)	d <sub>1</sub> (m)	d <sub>2</sub> (m)	error (m)	error ratio (%)
1	86.91	1.91	8.95	8.25	0.35	4.12
2	86.79	1.79	8.93	8.27	0.33	3.85
3	86.67	1.67	8.91	8.29	0.31	3.59
4	86.55	1.55	8.89	8.31	0.29	3.33
5	86.43	1.43	8.86	8.34	0.26	3.07
6	86.30	1.30	8.84	8.36	0.24	2.80
7	86.18	1.18	8.82	8.38	0.22	2.54
8	86.06	1.06	8.80	8.40	0.20	2.28
9	85.94	0.94	8.77	8.43	0.17	2.02
10	85.82	0.82	8.75	8.45	0.15	1.75

Table. 4 12.9m point, valve 70% open

No.	delay time (ms)	revision delay time (ms)	d <sub>1</sub> (m)	d <sub>2</sub> (m)	error (m)	error ratio (%)
1	121.58	21.58	12.59	4.61	-0.31	-2.38
2	121.58	21.58	12.59	4.61	-0.31	-2.38
3	121.58	21.58	12.59	4.61	-0.31	-2.38
4	121.46	21.46	12.57	4.63	-0.33	-2.56
5	121.46	21.46	12.57	4.63	-0.33	-2.56
6	121.58	21.58	12.59	4.61	-0.31	-2.38
7	121.58	21.58	12.59	4.61	-0.31	-2.38
8	121.58	21.58	12.59	4.61	-0.31	-2.38
9	121.58	21.58	12.59	4.61	-0.31	-2.38
10	121.58	21.58	12.59	4.61	-0.31	-2.38

4.4. 알고리즘 성능 검증

누수 지점 탐지 알고리즘의 성능을 알아보기 위해 누수 정도를 달리하여 누수탐지 알고리즘을 적용한 결과를 표 5~7에 나타내었다. 4.3m, 8.6m, 12.9m의 각각의 경우에 밸브를 70% 개방 시의 분석 결과를 나타내었다. 밸브를 70% 개방한 경우 대부분의 계측 데이터에서 낮은 오차율을 보이며 누수에 의한 배관 내 압력 강하가 발생한 것으로 판단된다.

Table. 5 4.3m point, valve 70% open

No.	delay time (ms)	revision delay time (ms)	d <sub>1</sub> (m)	d <sub>2</sub> (m)	error (m)	error ratio (%)
1	68.60	-21.40	4.64	12.56	0.34	7.95
2	68.60	-21.40	4.64	12.56	0.34	7.95
3	68.48	-21.52	4.62	12.58	0.32	7.42
4	68.48	-21.52	4.62	12.58	0.32	7.42
5	68.36	-21.64	4.60	12.60	0.30	6.89
6	68.36	-21.64	4.60	12.60	0.30	6.89
7	68.24	-21.76	4.57	12.63	0.27	6.37
8	68.24	-21.76	4.57	12.63	0.27	6.37
9	68.12	-21.88	4.55	12.65	0.25	5.84
10	67.99	-22.01	4.53	12.67	0.23	5.32



**Table. 6** 8.6m point, valve 70% open

No.	delay time (ms)	revision delay time (ms)	$d_1$ (m)	$d_2$ (m)	error (m)	error ratio (%)
1	107.30	-2.70	9.10	8.10	-0.50	-5.81
2	107.42	-2.58	9.08	8.12	-0.48	-5.55
3	107.67	-2.33	9.03	8.17	-0.43	-5.02
4	107.79	-2.21	9.01	8.19	-0.41	-4.76
5	107.91	-2.09	8.99	8.21	-0.39	-4.50
6	108.03	-1.97	8.96	8.24	-0.36	-4.23
7	108.15	-1.85	8.94	8.26	-0.34	-3.97
8	108.15	-1.85	8.94	8.26	-0.34	-3.97
9	108.15	-1.85	8.94	8.26	-0.34	-3.97
10	108.28	-1.72	8.92	8.28	-0.32	-3.71

**Table. 7** 12.9m point, valve 70% open

No.	delay time (ms)	revision delay time (ms)	$d_1$ (m)	$d_2$ (m)	error (m)	error ratio (%)
1	134.16	24.16	13.07	4.13	0.17	1.31
2	134.03	24.03	13.05	4.15	0.15	1.13
3	134.16	24.16	13.07	4.13	0.17	1.31
4	134.03	24.03	13.05	4.15	0.15	1.13
5	134.03	24.03	13.05	4.15	0.15	1.13
6	134.03	24.03	13.05	4.15	0.15	1.13
7	134.03	24.03	13.05	4.15	0.15	1.13
8	133.91	23.91	13.02	4.18	0.12	0.96
9	133.91	23.91	13.02	4.18	0.12	0.96
10	133.91	23.91	13.02	4.18	0.12	0.96

## V. 결 론

상수도 배관은 땅속에 매설되어 있으므로 배관의 노후화에 따른 누수를 맨눈으로 탐지하기란 불가능하다. 따라서 누수음을 감지함으로써 배관의 누수를 탐지하는 기술이 주로 사용된다. 기술 선도국의 경우 누수음 감지 기법 기반의 누수탐지 시스템이 상용화되어 있는 상태이나 누수탐지 상세 기술이 공개되지 않아 누수탐지 기술의 국산화가 필요한 실정이다[13].

누수에 의한 배관의 진동모드와 배관 내 유체의 음파 전달 특성을 해석하는 연구가 진행됨으로써 누수 지점

탐지의 정확도가 향상되었으며, 가속도 기법에서는 배관이나 제수변 등의 외부에 가속도계를 비교적 수월하게 부착할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 누수음 탐지 알고리즘을 개발 및 시험하기 위해 17.2m의 PE 배관에서 4.3m, 8.6m, 12.9m 지점에 밸브를 설치하고, 밸브의 개도율을 30%, 70%로 변경해 가면서 누수 지점을 분석하였으며, 밸브가 30%, 70%씩 개방된 정도의 배관 내 압력 강하에 대해서는 누수를 탐지할 수 있는 것으로 확인되었다. 초기 단계의 누수를 탐지하는 것이 매우 중요하며, 본 연구에서 적용한 알고리즘으로부터 초기의 누수 지점의 탐지가 가능할 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- [ 1 ] Ministry of Environment, *2017 Constant water statistics*, pp. 17-18, 2017.
- [ 2 ] Ministry of Environment, *Description of the 2018 Water Supply Standards revised research*, Jan. 2019.
- [ 3 ] R. S. McKenzie, H. Mostert and T. Jager, "Leakage reduction through pressure management in Khayelitsha : Two years down the line," *Water SA*, vol. 30, no. 5, pp. 13-17, 2001.
- [ 4 ] J. Thornton, and A. Lambert, "Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: burst frequency and pressure: consumption relationships," *Proceeding of IWA Special Conference 'Leakage 2005'*, Halifax, Canada, 2005.
- [ 5 ] K. H. Kim, *Hydrology*, Hantimedia, 2010.
- [ 6 ] Korea Water and Wastewater Works Association, *Water Supply Facility Criteria*, A book-printed construction book, 2010.
- [ 7 ] WIKA, *Selection, installation, handing and operation elastic element pressure gauge*, pp. 1-4, 2009.
- [ 8 ] Korea Occupational Safety & Health Agency, *Technical specification for the installation of pressure measuring devices*, pp. 1-6, Dec. 2017.
- [ 9 ] Korea Occupational Safety & Health Agency, *Technical specification for application of pressure system*, pp. 1-9, Jun. 2017.
- [ 10 ] K-water, *Criteria for installing and managing flow meters*, pp. 1-35, 2015.
- [ 11 ] K-water, *Standard for installation of valves and instrumentation facilities on a conduit*, pp. 1-8, 2018.

- [12] Korea Association of Standards & Testing Organizations, *Pressure precision Measurement Technology*, pp. 39-96, 2017
- [13] S. T. Hong, B. D. Park, J. L. Kim, and H. K. Jung, "Performance tests and uncertainty analysis of precipitation types," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 399-406, Mar. 2018.



**최광목(Kwangwook Choi)**

1996년 ~ 현재 한국수자원공사  
1996년 한밭대학교 전자공학과 학사  
2005년 충남대학교 산업공학과 석사  
2018년 성균관대학교 미래도시융합공학과 박사  
※관심분야: 멀티미디어정보처리, 위성통신, 제어계측, Ubiquitous Computing, USN, IoT



**이호현(Hohyun Lee)**

1998년 ~ 현재 한국수자원공사  
1998년 원광대학교 전자공학 학사  
2010년 KAIST 로봇학제 석사  
2017년 충북대학교 제어로봇공학 박사  
※관심분야: AI, 퍼지, 머신러닝, 최적화



**신강욱(Gangwook Shin)**

1993년 ~ 현재 한국수자원공사  
1987년 동국대학교 전자 공학과 학사  
1993년 홍익대학교 전자 공학과 석사  
2005년 홍익대학교 전기 공학과 박사  
※관심분야: 플랜트제어 및 응용, 모델링, 지능 제어, 원격감시제어, 센서응용



**홍성택(Sungtaek Hong)**

1996년 ~ 현재 한국수자원공사  
1993년 한밭대학교 전자공학과 학사  
1995년 한밭대학교 전자공학과 석사  
2020년 배재대학교 컴퓨터공학과 박사  
※관심분야: 컴퓨터공학, 위성통신, 계측제어, USN, IoT, 원격감시제어 및 센서응용 기술