



상수도관로 누수신호의 특성 분석을 위한 누수 실험시설 개발

Development of leakage test facility for leak signal characteristic analysis in water pipeline

박상혁*·곽필재·이현동·최창호

Sanghyuk Park*·Philljae Kwak·Hyundong Lee·Changho Choi

한국건설기술연구원

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

ABSTRACT

A real scale leakage test facility was developed to study the leak signal characteristics of water supply pipelines, and then leak tests were carried out. The facility was designed to overcome the limited experimental circumstances of domestic water supply pipeline experimental facilities. The length of the pipeline, which was installed as a straight line, is 280m. Six pipes were installed on a 70m interval with different pipe material and diameters that are DCIP(D200, D150, D100, D80), PE(D75) and PVC(D75). The intensity of the leakage is adjusted by changing the size of the leak hole and the opening rate of ball valve. Various pressure conditions were simulated using a pressure reducing valve. To minimize external noise sources which, deteriorate the quality of measured leak signal, the facility was built at a quiet area, where traffic and water consumption by customers is relatively rare. In addition, the usage of electric equipment was minimized to block out noise and the facility was operated using manual mode. From the experimental results of measured leakage signal at the facility, it was found that the signal intensity weakened and the signal of high frequency band attenuated as the distance from the water leakage point increased.

Key words: accelerometer, leakage test facility, leak detection, leak signal, water supply pipeline

주제어: 가속도계, 누수 실험 시설, 누수 탐지, 누수 신호, 상수도관로

1. 서 론

세계 인구의 급격한 증가로 노후화된 기반시설과 수자원의 감소는 주요 관심사이다(Hamilton, S. and Charalambous, B., 2013). 국내의 경우 상수도시설에서 매년 최소 6억 m³ 이상의 정수된 물이 손실되고 있다(Ministry of Environment, 2011~2014). 수자원 감소를 대비하고 수도시설을 효율적으로 관리하기 위해서 누

수량을 줄이는 노력이 무엇보다 중요한 시점이다. 수도시설에서 누수로 인하여 손실되는 물이 많다면 우선적으로 누수 지점을 신속하게 탐지하고 복구하는 것이 가장 효과적인 방법일 것이다. 지금까지 누수탐지 기술은 물리적으로 간단히 판단할 수 있는 검사 방법부터 음향 방법에 이르기까지 다양하게 개발되어 왔으며, 이 중에서 음향기법을 이용한 장치가 상수도관로 배수관망 시스템에서 가장 널리 사용되어 왔다(Hunaidi, 1998). 음향기법은 상수도관로와 같은 압력 관에서 누수되는 물의 소리 또는 진동을 감지하는 방법으로써 초창기에는 청음봉(listening rod), 하이드로

Received 16 August 2017, revised 18 October 2017, accepted 19 October 2017

* Corresponding author: Sanghyuk Park (E-mail: karasin811@kict.re.kr)

pp. 373-381

pp. 383-388

pp. 389-395

pp. 397-407

pp. 409-414

pp. 415-419

pp. 421-430

pp. 431-440

pp. 441-445

pp. 447-457

pp. 459-469

폰(hydrophone), 지오폰(ground microphone) 등이 사용되어 왔다. 최근에는 누수가 발생되었을 때 소음이나 진동을 수집하여 누수위치를 탐지하거나 누수지역을 감지하는 방법 등이 사용되고 있다(Hunaidi, 2004).

한편, 국내에 도입되고 있는 누수탐사 장치는 전량 수입되고 있기 때문에 장치 내 센서의 성능과 누수탐지 알고리즘 등과 같은 핵심 기술에 대해서는 정확히 파악되지 않고 있다. 그러므로 국내 누수탐지 분야의 기술력 확보는 점점 어려워지고 있으며, 외국산 제품에 종속되어 가고 있어 이에 대한 기술개발이 시급한 실정이다. 이러한 문제점의 근본적인 이유는 국내 상수도관로에서 나타나는 누수신호의 특성을 파악하기 위한 기초 연구가 부족하였기 때문인 것으로 판단된다. 특히, 국내에는 상수도관로에서 안정된 누수신호를 측정하기 위해 적합한 실험 시설도 부족한 실정이다.

기존 연구에 의하면, 상수도관로의 누수에 의한 소리 또는 진동 신호는 수용가의 물 사용 및 주변 소음원 등과 관의 종류 및 관경, 누수 부위의 크기나 형태, 주변 지반 특성 등 다양한 요인에 의해서 신호의 크기 및 주파수가 다르게 나타날 수 있는 것으로 알려져 있다(Hunaidi and Chu, 1999). 즉, 실제 시설과 동일한 조건에서 외부 영향요인을 배제하고 누수에 의한 진동 또는 소리를 측정해야 정확한 누수의 특성이 파악될 것으로 판단된다. 하지만, 실제 상수도관망에서 누수신호를 측정하기 위하여 누수를 임의로 시키고 운영조건을 다변화하는 것은 현실적으로 한계가 있으며, 주변의 소음원 등으로부터 안정된 조건을 유지할 수 없을 것으로 판단된다. 반면, 실험실 규모의 시설에서는 실제 상수도관망과 같이 관을 길게 매설하거나 관의 연결부, 밸브, 분기관 등의 부속물 등의 조건을 반영하기 어렵기 때문에 안정된 조건에서 누수신호를 측정할 수 있는 실증 실험 시설이 필요할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 실제 국내 상수도관로에서 발생하는 누수신호의 특성을 파악하기 위하여 기존 문헌과 국내 실험시설을 고찰하여 실증규모의 누수실험 시설을 개발하였으며, 대상 시스템에서 누수 신호 분석을 위한 기초 실험을 수행하였다.

본 논문에서는 2장에서 이론적 고찰로서 음향기법을 이용한 누수탐지 기술의 현황과 누수신호 측정 측면에서 국내 실증실험 시설의 특징을 분석하였으며, 문헌고찰을 통하여 개발된 누수실험 시설의 고려사항

과 구성내용을 제시하고자 한다. 또한 개발된 실증 시스템에서 임의로 누수를 발생시킨 후 측정된 누수신호를 시간 영역과 주파수 영역에서 분석한 결과를 기술한다.

2. 접근 방법

2.1 누수신호의 특성

관에서 누수가 발생되면 누출부위에서는 물이 외부로 빠져나가면서 관 벽 또는 표면을 통과하면서 소리가 발생되며, 음향 탐지 장비는 이러한 소리 또는 진동을 측정한다. 일반적으로 누수가 발생되면 난류성 제트기류를 생성하고, 이 흐름은 관 벽과 상호작용함으로써 압력 변동을 일으켜 소리를 발생시킨다. 또한 물이 누출부위를 통과함에 따라서 그 속도가 증가하며 속도가 일정 이상 높아지면 누출 지점의 압력이 관 내부의 압력보다 낮아지면서 증기 기포를 형성한다. 기포가 파열되면 미세한 충격파가 생성되며, 이러한 충격파는 단단한 관 벽에 충돌하여 소리를 발생시킨다(Thompson et al., 2001). 누수신호의 소리 또는 진동은 관 내·외부의 압력강하에 의해서 관과 유체 흐름변화인 비정상상태의 유동분리 또는 공동현상(cavitations)에 의해서 발생되기 때문에 고주파에서부터 저주파까지 다양한 범위의 주파수를 발생시킨다(Muggleton, 2002).

유체의 흐름이 없는 상태에서 누수가 발생되었을 때 누수지점에서의 음향파의 크기는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(Chis, 2007). 누수 음향파의 크기는 유체의 특성, 누수지점의 관내 압력, 누수크기 및 관의 직경에 의한 함수관계가 성립하며, 동일한 관경에서 누수의 크기와 누수지점의 압력이 높을수록 높은 에너지의 음향파가 발생된다.

$$\Delta p = 0.3 \times P_s \times \left(\frac{D_L}{D_p} \right)^2 \quad (1)$$

- 여기서, ΔP : the acoustic signal(acoustic pressure)
- P_s : the static pressure in the pipe at the leak site
- D_L : the diameter of the leak hole
- D_p : the local diameter of the pipe



누수의 음향파는 누수지점을 기준으로 관의 양쪽 종방향으로 전파되며, 관내 유체는 관 및 관 외부의 지반 등의 지반 매질과 연성되어 음파의 전파현상을 지배하게 된다(Lee et al., 2003). 누수 음향파의 고주파 성분은 상수도관로의 불연속성과 밸브, 분기관 등 다양한 부속물로 인하여 음향파의 전파를 방해하는 댐핑효과(wall-damping effects), 점성효과(Viscous effects) 및 분자완화효과(molecular relaxation effects)를 발생시키며, 주파수의 제곱에 비례하여 신호의 전달을 방해한다. 기존 연구에 따르면, 누수에 의한 음향 신호는 광범위한 주파수가 나타날 수 있으나 고주파 성분의 현저한 감쇠로 인해 상대적으로 낮은 주파수만이 실질적인 누수 탐지에 유용하다고 보고하고 있다(Loth et al., 2004).

2.2 국내 누수탐지 기술 현황

누수 위치를 찾기 위해 음향측정을 이용한 개념은 1930년대에 가스관의 누출탐지를 위해서 처음 도입되었다(Khulief et al., 2012). 초기에는 청음봉 또는 지오폰 등의 장치가 작동이 간단하여 사용되었으나 사용자의 경험에 따라 탐지 성능에 차이가 있었다. 이에 따라 지난 20년간 가속도계/진동계 또는 마이크로폰 중 하나를 센서로 사용하여 관의 외부 표면에 직접 설치하는 방식이 도입되고 있다. 가속도계는 누수 소음이 관 벽으로 유도된 진동을 측정하는 표면 장착형 센서로 사용되며, 상관식을 이용하는 경우 두 개 이상의 위치에서 진동을 측정함으로써 누수 위치를 탐지할 수 있다. 이러한 진동 센서 또는 가속도계는 일반적으로 관로와 함께 소화전, 밸브 또는 다른 접촉점에 부착하여 사용된다(Hunaidi et al., 2004).

음향식 누수탐지와 관련하여 국내에서는 2003년에 처음으로 AE(Acoustic Emission) 센서와 가속도계를 이용한 상관식 누수탐지기술 개발 연구가 진행되었으며(Lee et al., 2003), 최근에는 진동센서를 이용한 누수 지역 감지 방법과 누수 지역 감지 후 누수위치까지 동시에 탐지할 수 있는 기술에 대한 일부 연구가 진행되었다(KICT, 2014; ANAM, 2015). 하지만 개발된 기술에 대한 상용화 사례가 부족하기 때문에 어느 정도의 성능을 갖고 있는지 확인하기 어려운 실정이다. 아직까지 국내 연구사례는 많이 부족한 편이며, 국내 상수도관로의 특성을 반영한 누수신호의 특성 파악에

대한 연구도 현저히 부족한 편이다.

지금까지 국내 연구 중에서 실제 운영되고 있는 관망에서 누수 신호 파악을 위한 연구는 Kong et al. (2013)에 의한 연구가 유일하다. Kong et al. (2013)은 실제 현장에서 누수가 발생된 전/후에 상수도관로의 진동 신호를 측정된 결과 누수와 관련된 진동신호는 2kHz 이하에서 나타났으나, 관망상태 및 누수발생 지점 등에 따라 신호 크기 및 주파수 특성이 상이하다고 보고하였다. 이와 같은 이유는 현장 특성상 누수 조건을 일정하게 유지하기 어려우며, 주변의 소음원 및 수용가의 물 사용 등으로 인한 간섭 등에 대한 영향도 측정 조건에 영향을 주었기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 무엇보다 실제 현장과 동일하고 주변의 소음원을 최소화한 상태에서 누수신호를 측정할 수 있는 시설이 필요하다는 것으로 판단할 수 있다. 현재 국내에는 상수도관로 실증실험시설이 일부 설치되어 있다. 하지만 누수 시험만을 목적으로 설치하지 않았기 때문에 누수 신호를 측정하는데 한계 요인이 존재할 것으로 판단된다. 따라서 다음 절에서는 누수 발생 시 관에 전달되는 진동 신호의 측정 측면에서 국내 상수도관로 실증 실험시설의 특징을 검토하고자 한다.

2.3 국내 상수도관로 실험시설

국내에서 상수도관망 실증 실험시설은 크게 4개(KRISS, WARECO, GBEST, PPI)가 있는 것으로 파악된다. Table 1에 대상 시설의 특징을 비교하였다. KRISS는 국내 최초로 누수탐지 기술 개발을 목적으로 설치된 시설이며, 현재는 철거된 상태이다. 당시 이 시설은 강관으로 내경 D65와 D50로 구성된 총 길이 약 150m의 배수관망으로 구성하였으며, 압력 및 유량 등을 조절하기 위하여 펌프로 가압시설을 구성하였다. 하지만 누수신호 측정 시 펌프에 의한 소음은 누수신호 분석에 방해가 되기 때문에 최소화하기 위하여 가압시설에서 관로까지 연성이 강한 고무튜브를 사용하였다고 보고하였다. 또한 누수 신호의 측정에서 지상에 노출형으로 제작하였기 때문에 고주파 주파수대역의 감쇄가 적게 나타났다고 보고하였다(KRISS, 2004).

WARECO에서 현재 운영 중인 시설은 2011년도에 상수도관로 내 진단을 위한 로봇 개발과 누수탐지 장비 개발을 위해 지상과 지하(1.2m 이상)에 설치되어

pp. 373-381

pp. 383-388

pp. 389-395

pp. 397-407

pp. 409-414

pp. 415-419

pp. 421-430

pp. 431-440

pp. 441-445

pp. 447-457

pp. 459-469

Table 1. Water supply pilot plants in Korea

	Pipe	Diameter (mm)	Distance (m)	Type	area (m ²)	Max. pressure (kgf/cm ²)	Control pressure	Characteristic of local	Pump	Ground
KRISS	CIP	D65	120	straight, loop	3,200 (80×40)	-	possible	in research institute	Yes	on
		D50	30							
WARECO	CIP	D200	500	straight, loop	4,430	7	possible	commercial	Yes	on/under
		D300	500							
	DCIP	D100	338	straight						
Acrylic	D100	2								
G-BEST	CIP	D100	-	straight	3,200 (80×40)	7	possible	on the water reservoir	Yes	on
	PVC	-	-	straight						
	PE	-	-	straight						
PPI	PVC	D100	100	straight	200	10	not possible	near expressway	Yes	under
	CIP	D100	100	straight						

있다. 총 연장 1.4km로 강관과 덕타일주철관으로 구성되어 있다. 강관의 경우 D200와 D300가 각각 500m씩 루프(Loop) 형태로 매설되어 있으며, 덕타일주철관의 경우 D100 관로가 직선과 루프형태로 약 340m가 매설되어 있다. 또한 다양한 실험을 위해서 밸브, 소화전, 펌프, 그 밖의 장치 성능의 운전 상황을 외부에서 관찰하고, 실험의 특수성을 고려하여 지상과 지하로관이 혼합되어 설치되어 있다(GBEST, 2016). 누수신호의 측정은 주로 D100 덕타일주철관에서 수행할 수 있도록 구성되어 있으며, 지역 상수도로 압력을 유지하거나 펌프로 압력을 유지할 수 있도록 구성되어 있다. 지하에 매설되어 있는 시설로는 국내 실험시설 중 가장 규모가 크고 다양한 환경이 매설되어 있어 실제 상수도관로와 유사한 상황에서 다양한 조건의 실험이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 대상 시설의 직선 관로 중 최대 연장은 약 70m로 이외의 구간은 관로가 루프(loop) 형태이다. 실제 상수도관로는 대부분 격자 형태이며, 직선 연장이 블록 특성에 따라서 상이할 수 있으나 대상 시설보다 긴 구간이 다수 존재하고 있다. 이러한 경우 관의 굴곡에 의한 누수신호의 반사파 및 왜곡 현상이 발생 될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 누수 신호의 감쇄효과에 대한 측정 결과가 실제 상수도관로와 유사한지에 대한 추가적인 검증이 필요할 것으로 판단된다.

GBEST의 실험시설은 상수도관망 최적운영 관리, 관로 내 미생물 측정, 소수력 에너지 개발 등 다양한 목적의 실험과 기술 개발을 목적으로 설치 운영되고

있다. 현재 S시 정수장 내 정수지 상부에 설치 운영되고 있으며, 관로 총 연장이 960m로 격자형태의 관망으로 구성되어 있다. 시설 운영의 주요 목적이 누수탐지 장치 개발에 한정되어 있지 않기 때문에 지상에서 육안으로 확인할 수 있도록 대부분의 관로가 지상에 설치되어 있다(GBEST, 2016). 일부 매설되어 있는 구간이 있으나 5m 이내로 실제 상수도관로에서 발생하는 누수신호의 전달 특성과는 상이한 결과를 나타낼 것으로 판단된다. 또한 관로 내 압력 유지를 위해서 자연유하식이 아닌 추가적인 가압시설로 운영 중에 있기 때문에 누수신호 측정 시에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 대상 시설의 경우 직관, 분기관(T자관, 十자관), 하향식, 상향식, 수평 굴곡에 위치한 관 등 실제 상수도관로에서 설치 운영하고 있는 다양한 부속설비 등이 시설에 포함되어 있기 때문에 누수에 의한 진동신호 측정을 제외한 다양한 현상에 대해서 실험 및 검증이 가능할 것으로 판단된다.

PPI의 시설은 누수탐지 장치를 개발하기 위해 PPI사의 스마트 시험동에 설치되어 있으며, 총 연장 200m로 주철관(D100) 100m, PVC관(D100)로 지하 1m에 매설되어 있다. 하지만 관로 내 압력 유지를 위하여 가압설비를 이용하고 있어 누수에 의한 진동 신호 측정시 펌프의 영향을 배제할 수 없을 것으로 판단된다. 또한 대상 시설의 경우 대형 차량의 통행량이 많은 고속도로 옆에 설치되어 있다. 따라서 누수신호 측정시 각별한 주의가 필요할 것으로 판단된다. 하지만 대상 시설은 금속관과 신호감쇄가 상대적으로 높은



Table 2. Leakage test facility in this study

	Pipes	Diameter (mm)	Distance (m)	Type	area (m ²)	Max. pressure (kgf/cm ²)	Control pressure	Characteristic of local	Pump	Ground / soil
KICT WNSP	DCIP	D200	70.0	straight, loop	9,000 (300×30)	5	possible	rural area (KICT REC)	No	under (1.2m) / sandy soil
		D150	70.1							
		D100	70.1							
		D80	70.0							
		D100	338							
	PVC	D70	70.0							
	PE	D70	70.1							
	Total		281.4							

비금속관이 각각 동일한 조건으로 매설되어 있기 때문에 이에 대한 비교·분석을 위하여 상대적으로 다른 시설보다 유용할 것으로 판단된다(PPI, 2015).

국내 상수도 실험시설은 지중에 매설되어 있는 상수도 시설에서 발생될 수 있는 다양한 현상을 육안으로 관찰하기 위해서 대부분 지상에 설치되었던 것으로 판단된다. 하지만 누수신호의 측정을 위해서는 지상보다는 지중에 매설되어 있는 경우가 바람직할 것으로 판단되며, 주변에서 발생하는 소음을 최소화하기 위하여 펌프의 사용을 배제한 시설의 설치가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 누수실험 시설 개발 시 이와 같은 특징을 반영하였으며, 다음절에 개발된 시스템의 구성 내용을 기술하였다.

3. 상수도관로 누수실험 시설

기존 상수도관로 실험 시설은 다양한 수리 및 수질 현상을 모의하기 위해서 펌프를 이용하고, 지상 노출형으로 구성되어 있었다. 본 연구의 상수도 누수실험 시설은 기존의 상수도관로 실험시설의 문제점을 개선 및 보완하기 위하여 누수 발생 시 외부 잡음을 최소화하고 누수의 형태와 압력/유량 등을 조절할 수 있도록 개발하였으며, 다양한 누수발생 시나리오를 재현 및 검증할 수 있도록 하였다. 개발된 누수실험 시설의 구성은 Table 2에 나타내었으며, 설치환경과 세부 구성 내용은 다음과 같다.

3.1 지반 및 주변 환경

누수실험 시설은 Fig. 1 (a)의 한국건설기술연구원의 하천실험센터 실험부지 내 저수지 인근에 설치하

였다. 대상 지역의 경우 농촌지역으로 인근에 차량 통행 및 수용가가 극히 제한적이며 외부의 소음을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

대상시스템은 총 9,000m²(300m×30m)의 부지에 관의 직선구간이 최대 약 280m가 되도록 설치하였다. 누수시스템의 상수도관망은 실제 상수도관망과 동일한 조건으로 구성하기 위하여 지중 1.2m 이하에 설치하였다. 관로가 매설된 지반은 사질토로써 대상 지역의 여건상 일반적으로 상수도관로가 매설되는 지반 특성과는 상이하다. 하지만 사질토와 같은 모래의 경우 관 부설시 하부 뒤채움재로 활용되고 있기 때문에 시설을 설치하였다.

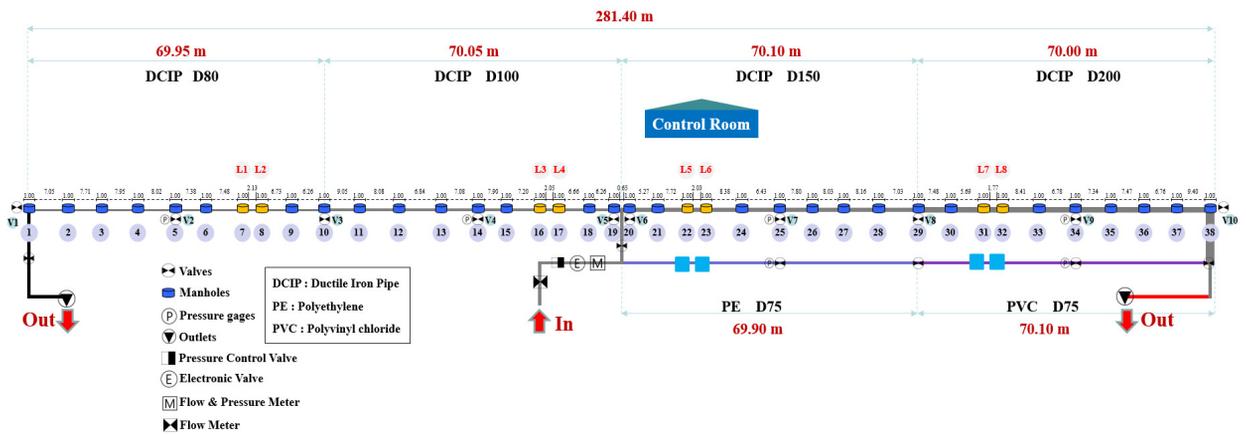
3.2 상수도관로

상수도관로는 물 공급 방향을 고려하여 중구경 관에서 소구경 관으로 관경이 축소되도록 시스템을 개발하였다. 또한 다양한 누수발생 시나리오를 재현 및 검증할 수 있도록 직관부, 분기관, 제수밸브 등을 고려하였으며, Fig. 2에 시스템을 구성하고 있는 관 종류와 밸브, 유량계 등의 부속품들을 나타내었다.

상수도관의 재질은 최근 사용량이 증가하고 있는 덕타일주철관(DCIP)과 플라스틱 계열의 PE와 PVC관을 사용하였다(Ministry of Environment, 2011~2014). 관경은 덕타일주철관의 경우 내경 D80, D100, D150, D200로 직선구간에서 각각 70m로 연결하여 관경의 변화에 따른 누수신호 발생 특성의 변화를 비교/분석할 수 있도록 구성하였다. 플라스틱 계열의 경우 현재 주로 소구경 관로에서 주로 사용되고 있어 본 연구에서는 PE관과 HI-3P관 모두 내경 D75로 구성하여 관 재질별 누수신호 특성을 비교/분석할 수 있도록 구성하였다.



(a)



(b)

Fig. 1. Schematic diagram of leak pipeline plant. (a) Picture of the plant at KICT REC(river experiment center) (b) Design of leak pipeline plant.

3.3 가압설비

누수에 의한 진동 신호의 크기는 압력에 비례하기 때문에 상수도관망의 압력의 변화에 따른 영향을 파악할 필요가 있다. 하지만 펌프와 같은 가압시설을 이용할 경우 측정에 방해가 되므로 개발 시스템은 지역 A시 상수도 용수 공급을 협조 받아 관 말단에 시스템을 연결하였다.

상수도관 내 수압은 대상 상수도관망이 설치된 주변 급수지역의 물 사용량에 따라서 상이하나 최대 약 5kgf/cm^2 까지 유지가 가능한 것으로 나타났다. 따라서 실험 시 수용가의 사용에 따라 변화되는 압력을 최소화하기 위하여 유입부에 감압밸브를 이용하여 공급되는 압력보다 낮게 유지하여 측정 시 수압을 일정하게 조절할 수 있도록 구성하였다.

관내 수압은 유입구의 전자압력계(Pressure Gauge)와 약 35m마다 간이 수압계를 설치하여 수압변화를 확인할 수 있도록 하였다. 전자장비의 경우 측정 장비

에 전기적인 잡음 신호를 발생시킬 수 있어 물이 유입되는 지점에만 전동밸브를 설치하였으며, 그 밖의 밸브의 운영은 수동으로 조작할 수 있도록 구성하였다. 이러한 이유는 관로 주변에서 높은 전력을 사용하는 경우 누수신호를 측정하는 센서에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 시설 설치 당시 분석실에 난방용 전기 장비를 설치하였으나 심각하게 전기 신호가 발생되어 누수신호 측정 시 분석에 어려움이 있었다. 따라서 누수 실험시에는 조건을 변화시킨 후 전기 장비의 사용 없이도 수행가능하도록 시스템을 구성하였다.

누수실험 시설의 양 끝단에는 관내에 물의 흐름을 발생시키고 동파방지를 위하여 퇴수구를 설치하고, 관내 공기를 배출을 위해 공기배출밸브를 설치하였다.

3.4 누수공 제작 및 누수신호 측정 지점

관로의 누수를 발생시키기 위하여 누수공의 크기를

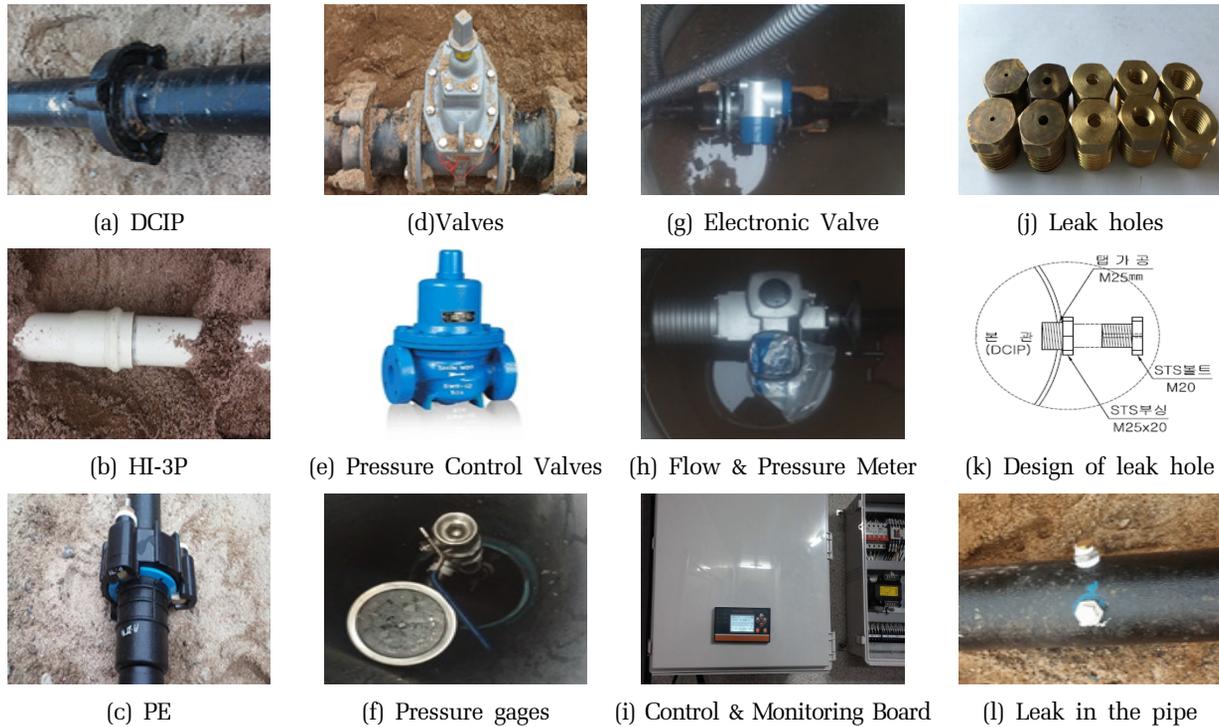


Fig. 2. Components of leak pipeline plant.

조절할 수 있도록 Fig. 2의 (k)와 같이 볼트 중앙에 다양한 크기(0.0mm ~ 10.0mm)로 제작하였다. 누수공 크기 변화는 Fig. 2의 (j)와 (l)과 같이 관의 상단에 임의로 구멍을 내고, 나사탭(screw tap)을 만든 후 볼트를 체결할 수 있도록 제작하였으며, 수동밸브도 연결하여 누수의 크기를 조절할 수 있도록 구성하였다.

누수 발생 시 누수 지점으로부터 거리에 따른 누수 신호의 특성과 부속물들에 의한 영향을 파악하기 위하여 약 7m 간격으로 맨홀을 제작하여 관을 노출시켜 측정에 활용하였다. Fig. 1의 중앙에 검은색 번호 1에서 38까지는 센서를 이용하여 측정이 가능하도록 맨홀로 구성된 지점을 나타내고 있다. 여기서 밸브가 위치한 지점은 V1~V9이며, 누수지점은 L1~L8까지 각 구간별로 거리가 일정하도록 구성하였다.

4. 누수 테스트 프로그램

개발된 누수실험 시설을 이용하여 누수 신호 분석을 위한 기초 실험으로 거리에 따른 누수신호를 측정 및 분석하였으며, 분석 방법 및 결과는 다음과 같다.

4.1 누수신호 측정 및 분석 방법

거리에 따른 누수신호의 측정을 위해 Fig. 1의 우측에 위치한 덕타일주철관 D150과 D200 관에서 가속도계를 이용하여 누수에 의한 진동을 측정하였다. 누수 신호의 발생은 Fig. 3의 22번 지점(덕타일주철관, D150)에서 Fig. 4의 (a)와 같이 15mm 볼밸브를 이용하였으며, 누수 시 100% 개방하여 누수를 발생시켰다. 물의 흐름 방향은 Fig. 3에서 아래쪽 PE관과 HI-3P관을 거쳐 22번 지점으로 흐르도록 밸브를 조작하였으며, 누수 시 관내 수압은 유입구의 감압밸브를 통하여 약 2.6kg/cm²로 유지되도록 실험을 수행하였다.

누수신호의 측정은 Fig. 3의 23번 지점에서 33번 지점까지 총 11개의 위치에서 각각 10초씩 측정을 수행하였으며, 측정 지점별로 가속도계는 순차적으로 옮겨가면서 측정을 수행하였다. 각 지점별 거리는 23번이 누수지점으로부터 약 3.0m 거리에 위치하며, 마지막 33 지점에서는 누수지점으로부터 약 82.2m 거리에 위치하였다. 측정을 위해 사용된 가속도계는 누수탐지 센서의 개발을 위해 테스트용으로 제작하였으며, 제작된 가속도계의 측정 범위는 ±1g이며, 주파수 측정범위는 0 ~ 1.5kHz 였다.

pp. 373-381

pp. 383-388

pp. 389-395

pp. 397-407

pp. 409-414

pp. 415-419

pp. 421-430

pp. 431-440

pp. 441-445

pp. 447-457

pp. 459-469

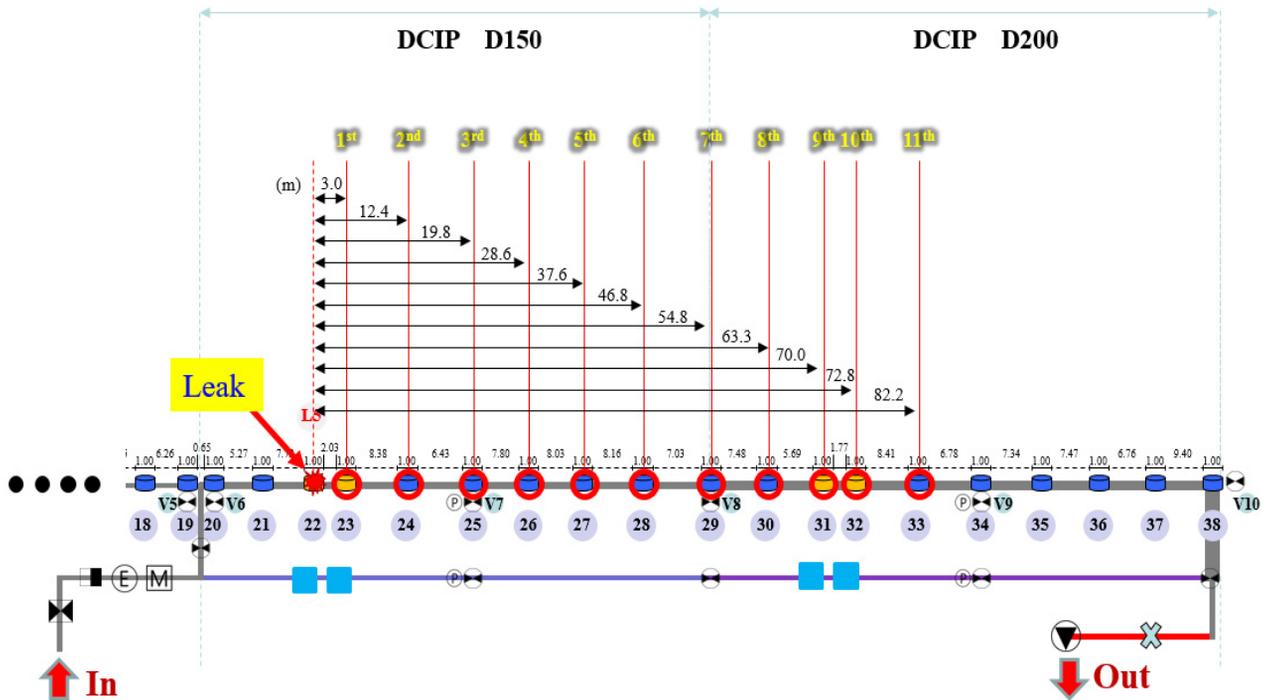


Fig. 3. Leak points and accelerometer locations.

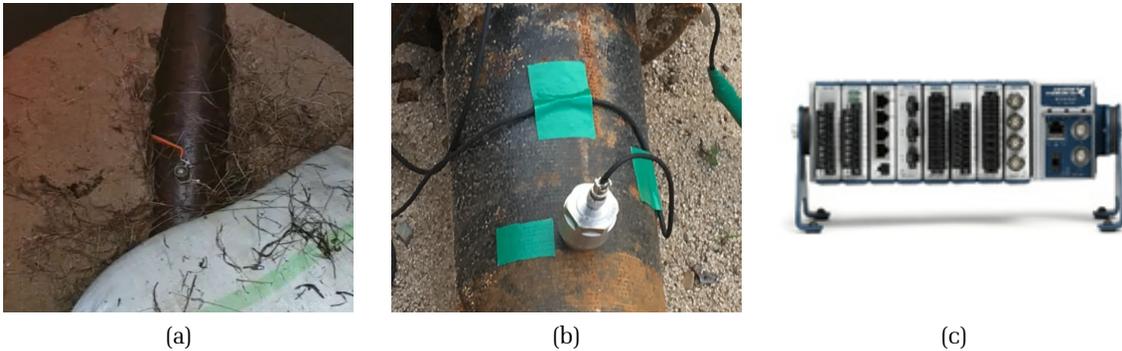


Fig. 4. Experimental set-up for leak tests of the DCIP (a) Leak valve, (b) Accelerometer, (c) Data acquisition system (NI cDAQ-9188, NI cDAQ-9234).

가속도계에 의해서 측정된 데이터의 취득은 Fig. 4 (c)의 National Instrument 사의 NI cDAQ-9188와 NI cDAQ-9234를 이용하였으며, 누수신호 측정 시에 샘플링 간격은 다양한 주파수 대역을 확인하기 위하여 51.2kHz로 측정하였으며, 별도의 주파수 필터링 과정을 거치지 않고 누수신호를 분석하였다. 누수신호의 분석을 위해 측정된 가속도 값은 Mathworks사의 Matlab 2015a의 FFT function를 이용하여 고속 푸리에 변환 (Fast Fourier Transform) 한 후 각 실험 조건별 주파수의 특성을 비교·분석하였다.

4.2 거리별 누수신호 세기 및 주파수영역 비교

계측된 신호를 시간영역과, 주파수영역 그리고 시간영역의 측정결과를 RMS(Root Mean Square)값을 구하여 누수 여부, 누수 크기에 따른 신호의 변화를 분석하였다. Fig. 5는 23지점부터 33지점까지 측정된 가속도 측정값을 시간영역에서 나타내었으며, Fig. 6은 동일한 측정값에 대해서 주파수 영역에서 나타내었다. 분석된 주파수 범위는 측정에 이용한 가속도계의 측정 주파수 범위가 1.5kHz 이하이므로 그 이상에 대

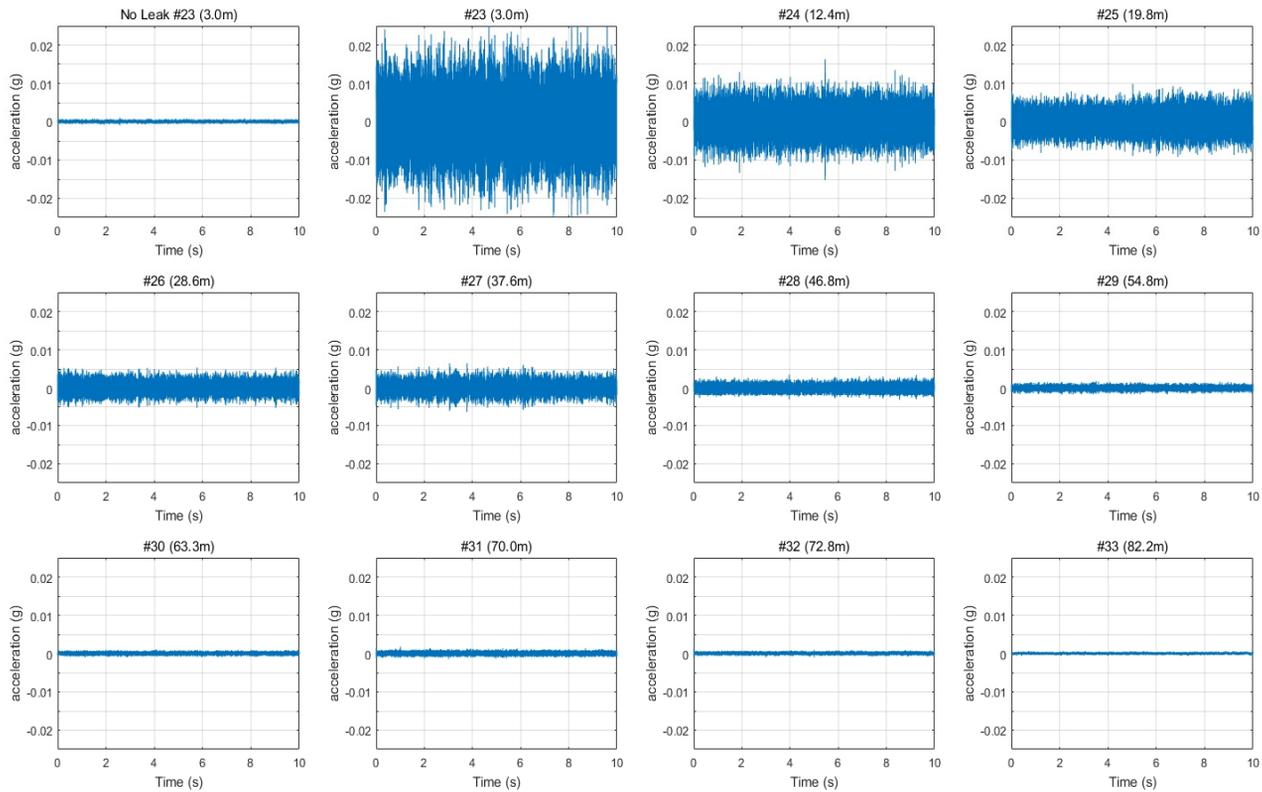


Fig. 5. The amplitude of measured acceleration for leak signal with various distances from the leak position.

해서는 신뢰할 수 없으므로 분석 결과에 나타내지 않았다.

Fig. 5의 No Leak #23은 누수가 없을 때 23번 지점에서 측정된 결과이다. 누수가 없는 상태에서는 가속도 값이 약 $\pm 0.0005g$ 이내로 나타났으며, Fig. 6 #23의 주파수 영역에서도 아무런 주파수 특성이 나타나지 않았다. 대상 시스템의 경우 외부의 소음원이 거의 없는 지역에 설치되어 있으며, 측정 시 주변에 차량통행 등과 같은 진동을 유발할 수 있는 외부 영향요인은 없었다. 따라서 계측된 결과는 가속도계와 데이터 취득 시스템에 의한 노이즈 신호이며, 사용한 가속도계의 측정 한계치가 될 것으로 판단된다.

Fig. 5와 Fig. 6의 #23은 누수지점으로부터 약 3m 거리에서 측정된 가속도 값의 시간영역과 주파수영역에서의 결과이다. 측정된 가속도 값은 약 $\pm 0.02g$ 로 나타났으며, 0~1.5kHz에서 광대역으로 주파수 대역이 나타났다. 다음으로 #24는 약 10m 이격거리 위치에서 측정된 결과이다. 가속도 값은 약 $\pm 0.01g$ 로 400Hz~800Hz과 1kHz ~ 1.5kHz에서 걸쳐 다양한 주파수 대역이 나타

났다. 이후 #25 ~ #31에서는 누수지점으로부터 거리가 멀어질 수 록 가속도 값이 점차 작아지는 것으로 나타났다. #32와 #33은 누수신호의 크기가 누수가 없을 때의 신호크기와 유사하고 주요 주파수가 나타나지 않았기 때문에 사용된 가속도계로는 측정이 어려울 것으로 판단된다. 누수발생 시 주요 주파수대역은 누수지점에서 가까운 경우 광대역에 걸쳐 나타나지만 신호 감쇄가 일어날수록 1.2kHz ~ 1.5kHz에서 주요 주파수대역이 나타났다. 본 연구에서는 측정한계가 1.5kHz인 가속도계를 이용하였기 때문에 1.5kHz 이상에서는 확인이 어려우므로 주파수 측정 범위가 넓고 민감도가 높은 가속도계를 통하여 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 7은 시간영역의 값을 전체 측정된 결과에 대해서 RMS(Root mean square) 계산 결과를 나타내었다. 시간영역에서의 결과보다 누수 발생위치에서 거리가 멀어질수록 신호의 크기가 작아지는 것을 더 명확하게 확인할 수 있을 것으로 판단된다. 누수신호는 23지점부터 급격하게 신호감쇄가 나타났다. 개발 시스템의

pp. 378-381
pp. 383-388
pp. 389-395
pp. 397-407
pp. 409-414
pp. 415-419
pp. 421-430
pp. 431-440
pp. 441-445
pp. 447-457
pp. 459-469

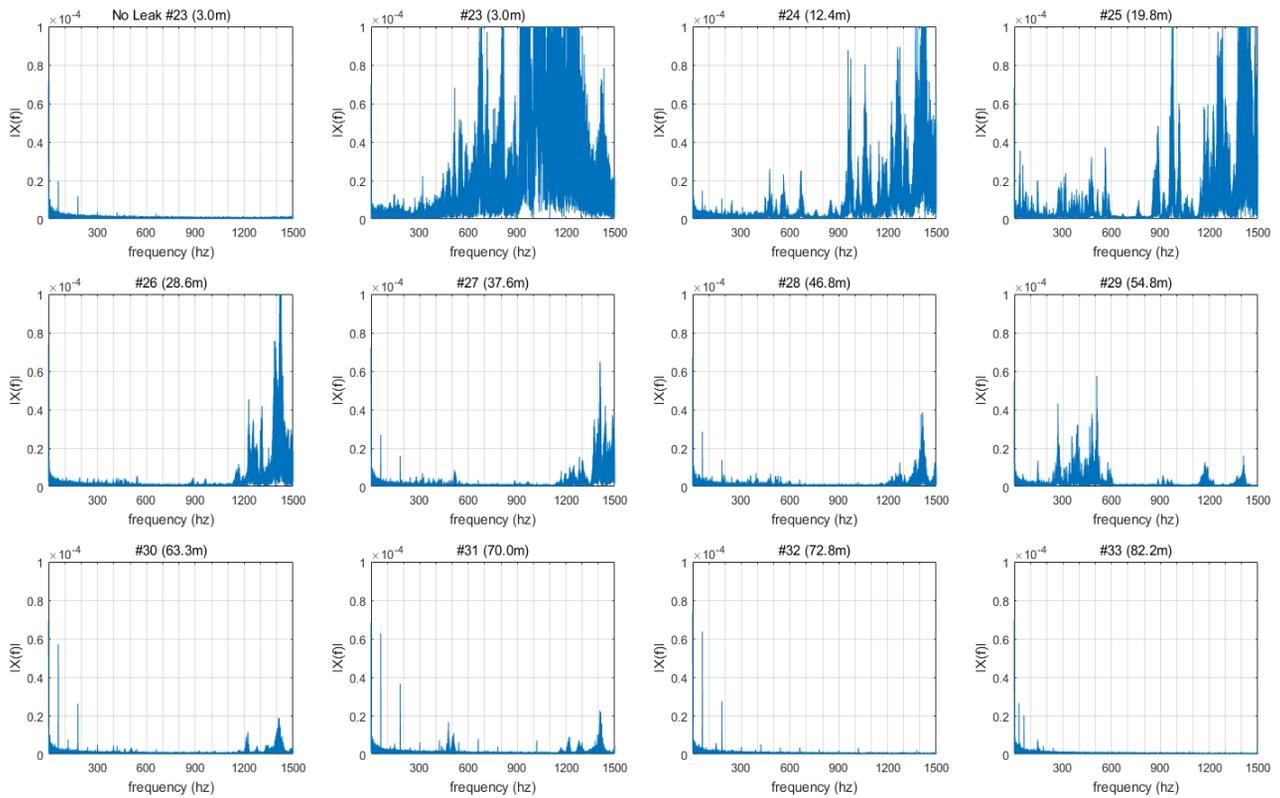


Fig. 6. The frequency variations for leak signal with various distances from the leak position.

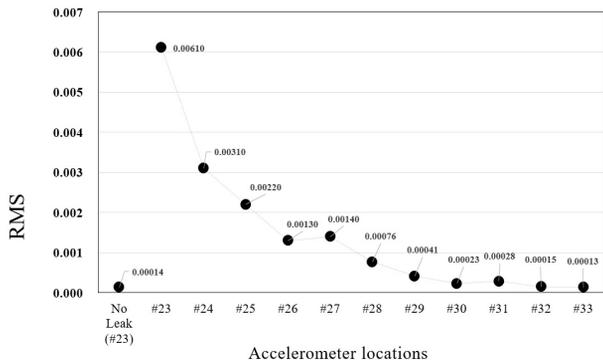


Fig. 7. The RMS values for leak signal with various distances from the leak position.

경우 관 연결부와 같은 불연속점과 밸브 및 관경 변화 등 다양한 영향요인이 존재하며 이러한 특성이 신호감쇄에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 누수 신호 특성을 파악하기 위하여

국내 상수도 실험시설의 특징을 검토하고 누수 신호 측정 시에 영향을 미칠 수 있는 요인들을 배제하여 누수실험 시설을 개발하였다. 또한 대상 시스템을 통하여 누수신호의 특성을 파악하기 위한 기초 실험을 수행하였으며, 그 결과 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 누수 신호의 특성을 정확히 파악하기 위해서는 상수도관로가 매설되어 있는 지반 조건을 고려하기 위하여 지하에 매설하고, 관의 불연속점과 같은 실제 운영 조건과 동일한 상태에서 펌프 등과 같은 소음원을 배제한 상태에서 측정이 이루어져 한다.

2) 본 연구의 분석 조건에서 누수지점으로부터 3m 거리에 전달된 누수 신호의 크기는 약 0.02g 이하였으며, 약 70m 거리 이후부터는 측정되지 않았다. 이러한 특성은 누수탐지 센서를 개발하는데 있어서 센서의 정량적인 성능을 결정하는데 도움이 될 것으로 판단되며, 본 연구에서 사용된 가속도계보다 민감도가 더 높은 센서를 선택하는 것이 누수탐지에 더 경제적인 것으로 판단된다.

3) 개발된 시스템에서 누수지점으로부터 거리에 따른 누수 신호를 분석한 결과 누수지점에서 가까울수록



록 누수신호는 크고 저주파에서 고주파까지 광대역으로 나타났으나 거리가 멀어질수록 점차 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 누수위치에 가까울수록 누수신호의 감소폭은 크게 나타났다. 이러한 특징은 누수지점에 가까운 경우 유체에 의한 진동과 관체에 의한 구조적인 진동 특성이 강하게 나타나지만 멀어질수록 구조적인 진동 특성이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 관 연결부와 밸브 등의 부속물과 같은 불연속점 등에 의한 영향도 있을 것으로 추정되며 향후 개발된 시스템을 이용하여 추가적인 분석이 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 미래창조과학부 및 국가과학기술연구회의 융합연구사업의 일환으로 수행하였음. [융합연구단-14-2-ETRI, 사물인터넷(IoT) 기반 도시 지하매설물 모니터링 및 관리시스템 기술 개발]

References

- ANAM. KAIA. (2015). Central leak monitoring system of water supply pipes for building an intelligent system of U-City city facilities, 14CHUD-C061952-03, 64-67.
- Chis, T. (2007). Computer system to oil pipeline transporting, *Annals, Computer Science Series*, 5(1), 35-44.
- GBEST. KEITI. (2016). Advanced Intelligent Water Distribution System, GT-11-G-02-001-1, 635-700.
- Hamilton, S. and Charalambous, B. (2013). Leak Detection - Technology and Implementation, *IWA Publishing*, UK, pp.1.
- Hunaidi, O. (1998). "Ground-penetrating radar for detection of leaks in buried plastic water distribution pipes." *Seventh International Conference on Ground-Penetrating Radar*, May 27-30, 1998, Lawrence, KS, USA, pp. 783 - 786.
- Hunaidi, O. and Chu, W. T. (1999). Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes" *Applied Acoustics*, 58, 235-254.
- Hunaidi, O., Wang, A., Bracken, M., Gambino, T., and Fricke, C. (2004). "Acoustic methods for locating leaks in municipal water pipe networks", *International Conference on Water Demand Management*, May 30 - June 3, 2004, Dead Sea, Jordan
- Khulief, Y. A., Khalifa, A., Mansour, R. Ben and Habib, M. A. (2012). Acoustic Detection of Leaks in Water Pipelines Using Measurements inside Pipe, *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 3(2), 47-54.
- KICT. (2015). Development of water distribution Technology in Microgrid(V), 2015-079, 74-212
- Kong, M. S., Lee, H. D., Kang, S. W., and Park, E. Z. (2013). Characteristics of Leak Noise Frequency in Water supply system, *Journal of Water treatment*, 21(4)4, 61-70.
- Korea Ministry of Environment. (2011~2014). *Waterworks Statistics 2010~2013*.
- KRISS. Ministry of Environment. (2004). Development of leak detection system for waterworks using elastic wave. 22-162
- Lee, Y. S., Yoon, D. J. and Jeong, J. C. (2003). Leak location detection of Underground water pipes using acoustic emission and acceleration signals, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 23(3), 227-236.
- Loth, J. L., Morris, G. J. and Palmer, G. M. SCNG. (2004). Acoustic Detecting and Locating Gas Pipe Line Infringement Final Contract Report, 9-13.
- Muggieton, 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), 939-954.
- PPI. (2015). <http://www.ppinet.co.kr> (accessed october 30, 2015).
- Thompson, M., Chapman, C. J., Howison, S. D., and Ockendon, J. R. (2001). "Noise generation by water pipe leaks", *40th European Study Group with Industry*, April 9-12, Keele, Staffordshire, England.

pp. 373-381

pp. 383-388

pp. 389-395

pp. 397-407

pp. 409-414

pp. 415-419

pp. 421-430

pp. 431-440

pp. 441-445

pp. 447-457

pp. 459-469