

# 다중 센서와 연립 방정식 기반 산업용 배관 누출 위치 탐지에 관한 연구

이재웅<sup>1</sup>, 강민성<sup>2</sup>, 손동구<sup>3</sup>, 김종면<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>예측진단기술, <sup>2</sup>울산대학교 전기전자컴퓨터공학과, <sup>3</sup>한국전자통신연구원

dlwodnd12345@gmail.com, kangms9104@gmail.com, sdk@etri.re.kr, \*jongmyon.kim@gmail.com

## A Study on the Location Detection of Industrial Pipe Leakage Based on Multiple Sensors and Simultaneous Equations

Lee Jae Ung<sup>1</sup>, Kang Min Seong<sup>2</sup>, Shon Dongkoo<sup>3</sup>, Kim Jong Myon<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Prognosis and Diagnostics Technologies, <sup>2</sup>Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, University of Ulsan, <sup>3</sup>ETRI

### 요 약

지하배관은 가스และ 수도와 같은 중요한 유틸리티 서비스를 제공하는 핵심 기반 시설로, 누출이 발생하면 경제적인 손해는 물론, 인명 피해로도 이어질 수 있다. 이에 따라 누출 감지 시스템을 구축하는 것이 필수적이며, 여러 비파괴 검사 기법들이 제안되었다. 본 논문에서는 실시간 상태 모니터링, 미세한 충격 감지, 하드웨어 설치 용이성 등의 장점을 갖춘 음향 방출을 이용한 비파괴 검사 기법을 채택하여 배관의 누출 탐지 및 위치 추정에 대한 연구를 수행하였다. 누출 위치 추정 연구는 신호의 도착 시간 차이(TDOA)와 신호의 전파속도를 이용하여 위치를 추정하는 다양한 알고리즘들이 제안되었는데 대부분의 알고리즘들은 신호의 전파속도를 고정값으로 TDOA만 구하여 누출 위치를 추정하였다. 하지만 실제 데이터 취득 시 여러 환경 요인들에 의해 신호의 전파 속도가 변해 정확한 위치 추정이 어려운 문제점이 있었다. 본 논문에서는 이러한 문제를 개선하기 위해 신호의 전파속도값 없이 센서 위치 정보와 취득한 데이터만을 이용하여 누출 위치를 통계적으로 추정하는 알고리즘을 제안하였다.

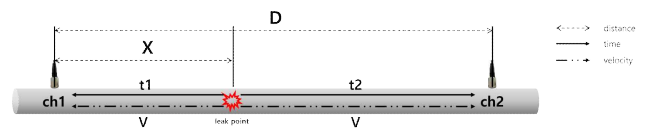
### I. 서 론

지하배관은 가스และ 수도를 운송하기 위한 배관은 중요한 유틸리티 서비스를 제공하는 핵심 기반 시설이다. 기본 인프라가 구축되어있는 대부분의 나라에서 지하배관은 일상생활과 밀접한 관계가 있는데 미국의 경우 380만 km(240만 마일) 이상의 송배전(T&D) 파이프라인 네트워크가 구축되어있다[1]. 이렇게 광범위하게 구축되어있는 지하배관 네트워크에서 배관의 누출 사고가 발생하면 경제적인 손해도 그치지 않고 인명 피해로도 이어질 수 있다. 이에 따라 누출 감지 시스템을 구축하는 것은 필수적이고 이와 관련된 다양한 연구들이 제안되었다. 본 논문에서는 온라인 감시가 가능하다는 장점을 가지고있는 음향 방출[2]을 이용한 비파괴 검사 기법을 채택하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 기존에 속도값의 사전 입력이 필요했던 연구[3]와 달리 매질의 전파속도 값이 없어도 누출 위치를 추정할 수 있기 때문에 다양한 환경의 배관으로 알고리즘의 확장이 용이할 것으로 기대된다.

### II. 방 법

본 논문에서는 실제 산업용 배관과 유사하게 설계된 테스트베드에 4개의 음향방출 센서를 설치하여 데이터를 취득하였다. 실험은 센서 위치를 조금씩 달리하여 총 4회 진행되었다. 먼저 누출 시점의 데이터를 추출하여 채널 4개 중 2개를 선택하는 조합  $C_2^4$  를 통해 총 6가지의 경우의 수를 모두 도출한다. 아래 수식 (1)에서  $D$ ,  $TDOA(t_2-t_1)$ [4],  $A$  의 값은 모두 계산 가능한 상수 이기 때문에 앞서 생성된 6가지 조합별로 각각  $V$ 와  $X$ 를 미지수로하는 일차방정식이 생성된다. 이때 미지수가 2개인 일차방정식의 해를 구하기 위해 6개의 일차방정식 중 2개를 선택하여 연립하는 경우의 수는  $C_2^6$  로 총 15개의 해를 구할 수 있다. 이 과정을 진행하면 누출

시점의 데이터 하나로 15개의 추정 위치값을 얻을 수 있지만 통계적 추정을 하기에는 데이터의 수가 적어 신뢰성을 확보하기 어렵다. 따라서 누출 신호의 에너지가 강하게 나타났던 [10kHz ~ 100kHz] 사이의 주파수 대역을 10kHz 단위씩 10개 구간으로 나눈 뒤 똑같이 연립 방정식의 해를 구하면 총 150개의 위치 추정 값이 도출되는데 이 때 히스토그램을 통하여 가장 많은 빈도로 추정된 값이 위치한 영역을 추출한 뒤 해당 영역의 값들의 중간값을 이용해 최종 위치 추정 값으로 결정한다.



[그림 1] 실험 배관 개념도

$$\frac{D - (t_2 - t_1)V}{2} + A = X \quad (1)$$

$t_1$  : 센서1에 신호가 도착한 시간

$t_2$  : 센서2에 신호가 도착한 시간

$V$  : 신호의 전파 속도

$D$  : 센서1과 센서2 사이의 거리

$X$  : 누출 위치

$A$  : 원점에서 센서1 까지의 거리

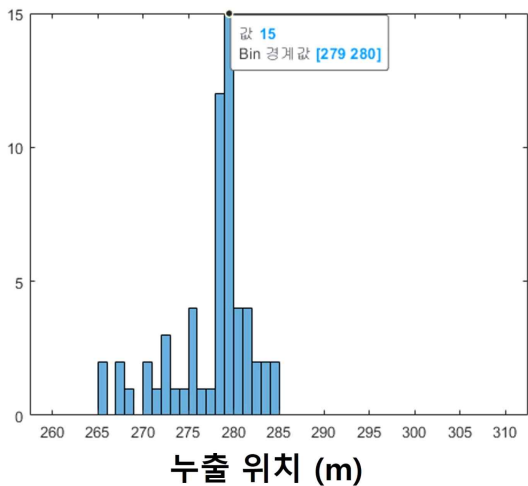
### III. 실험 결과

각 실험별 결과 값은 아래 표와 같으며 4번의 실험에서 평균적으로 약

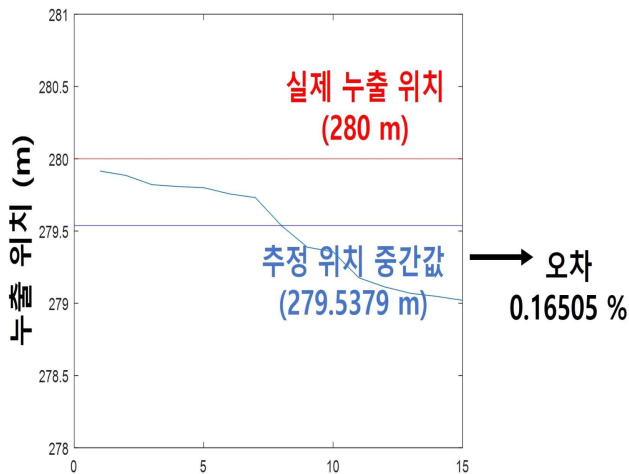
0.6%의 오차율이 나타났고 비교적 높은 정확도를 보여주었다.

	누출위치 (m)	추정위치 (m)	오차 (m)	오차율 (%)
실험1	280m	279.5379	0.4621	0.16505
실험2	280m	279.7232	0.2768	0.09887
실험3	30m	29.6089	0.3911	1.3037
실험4	20m	19.7813	0.2187	1.0934
평균	-	-	0.3372	0.6653

〈표 2〉 실험 결과



〔그림 2〕 실험1 누출 위치 히스토그램



〔그림 3〕 실험1 누출 위치 오차

### III. 결 론

본 연구에서 제안한 알고리즘은 사전에 매질의 속도값 입력 없이 누출 위치를 추정함에도 4개의 실험 모두에서 비교적 높은 정확도를 보여주었다. 또한 센서 개수가 늘어날수록 통계적 추정의 신뢰도가 높아지기 때문에 기존의 제한된 영역이 아닌 더 넓은 범위의 배관으로 시스템을 확장한다면 보다 높은 정확도를 보여줄 것으로 기대된다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 울산시-ETRI 2차 공동협력사업의 일환으로 수행되었음 [25AB1600, 제조 혁신을 위한 주력산업 지능화 기술 개발 및 산업현장에서의 사람-이동체-공간 자율협업지능 기술 개발]. 또한 이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 ('RS-2023-00232515', '수소혼입 도시가스 배관 수소취성 평가 및 수명예측 안전기술 개발/실증')

### 참 고 문 헌

- [1] K. Siler-Evans, A. Hanson, C. Sunday, N. Leonard, and M. Tumminello, "Analysis of pipeline accidents in the United States from 1968 to 2009," International Journal of Critical Infrastructure Protection, vol. 7, no. 4, pp. 257?269, 2014.
- [2] 이종오, 지현섭, and 주노희, "음향방출(AE)시험의 원리 및 응용," 기계와 재료 (State of the Art Report), vol. 21, no. 2, pp. 156 - 164, 2009.
- [3] T. Q. Bui and J.-M. Kim, "Leak localization in industrial-fluid pipelines based on acoustic emission burst monitoring," Measurement, vol. 151, article no. 107150, 2020.
- [4] B. O'Keefe, Finding Location with Time of Arrival and Time Difference of Arrival Techniques, ECE Senior Capstone Project, 2017.