



## 매설배관 내의 압축성 유체 누설 위치 검출에 관한 연구

†이정환\* · 김형진\* · 윤두병\*\* · 박진호\*\*

\*(주) 액트, \*\*한국원자력연구원

(2016년 8월 1일 접수, 2016년 9월 13일 수정, 2016년 10월 4일 채택)

## A Study on the Compressible Fluid Leak Position Detection of Buried Pipelines

†Jeong-Han Lee\* · Hyung-Jin Kim\* · Doo-Byung Yoon\*\* · Jin-Ho Park\*\*

\*ACT Co., Ltd., Daejeon 34027, Korea

\*\*Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Korea

(Received August 1, 2016; Revised September 13, 2016; Accepted October 4, 2016)

### 요약

지하 매설배관을 이용한 유체 수송 중 임의의 배관 위치에서 누설이 발생할 경우 육안 식별의 어려움으로 진동 센서 등을 이용하여 누설 위치를 탐지한다. 이러한 누설 위치 검출 시스템은 물과 같은 비 압축성 유체를 대상으로 센서 간의 신호 도달 시간차와 음파의 전파속도를 이용하여 검출하고 있다. 본 논문에서는 가스와 같은 압축성 유체의 누설 검출을 위한 시스템을 개발하고자 기존 검출 방법을 검토하고, 온도와 압력을 고려한 압축성 유체의 전파속도 식을 개선하고 압축 공기를 이용한 실험 장치를 구축하여 실험 수행을 통해 검증하였다. 검증 결과 매설배관 내 압축성 유체의 누설 위치 검출이 가능함을 확인하였으며, 가스 수송용 매설배관 내 누설 위치 검출 시스템 개발에 적용 가능함을 확인하였다.

**Abstract** - When a leak occurs in the buried pipelines, The leak locations are able to detected by using the vibration sensors. These leak detection system, intended for incompressible fluid, such as water, are of using the wave propagation velocity and a signal arrival time delay between the sensors. In this paper, to develop a leak location detection system for a compressible fluid such as gas, the conventional detection methods have been studied, improved, and verified through the experiment using the compressed air. It confirmed that it is possible to detect the leak location for compressible fluid in the buried pipelines and to be applicable to the development of a leak location detection system in buried pipelines for gas.

**Key words** : leak location detection system, wave speed, compressible fluid leak, cross correlation, fluid-pipe coupled wave propagation, phase unwrapping, time delay

### 1. 서론

국내 원자력발전소와 같은 대규모 에너지 생산 시설이나 석유 및 가스와 같은 에너지 플랜트 시설 등에서 물이나 기름 등의 비압축성 유체와 가스 등의 압축성 유체의 수송을 위해 지하에 매설된 배관

망을 이용한 수송 시설을 유지하고 있다. 이러한 지하에 매설된 배관의 일부 구간에서 노후나 부식 또는 인위적인 파손 등으로 인해 누설이 발생할 경우 지하 매설로 인한 배관 상의 누설은 육안 식별이 쉽지 않기 때문에 신속하고 경제적인 유지 보수를 위해서 정확한 누설 위치의 검출이 필요하게 된다. 이러한 지하 매설배관의 누설 검출을 위해서 기존에 많은 연구가 진행되었으며[1-13], 관련 상용 장비 개발도 이루어져왔다.

†Corresponding author:jhlee@actbest.com

Copyright © 2016 by The Korean Institute of Gas

지하 매설 배관의 누설 위치 검출은 배관 양단에 가속도 센서와 같은 음향신호 측정 센서를 이용하여 동시에 신호를 취득한 후 상호상관을 분석하여 두 개 신호의 시간 차이를 계산하고 음파의 속도를 적용하여 두 지점 간의 상대 위치를 추정하는 방법이 주로 사용되고 있고[3,8-13], 이러한 방법을 이용한 상용 제품들 개발되고 있으며, 누설 위치의 정확도 향상과 효율적인 현장 적용, 상시 온라인 감시를 위한 시스템 개발을 위해 지속적으로 개발을 진행하고 있다.

누설 검출 방법의 핵심이 센서 간 도달 시간차(Time delay)와 음파의 전파속도에 기인하므로[3] 이 두 개의 정보가 누설 위치 검출의 신뢰도를 좌우한다.

따라서 본 논문에서는 지하 매설 배관 내에 가스와 같은 압축성 유체 누설 위치를 탐지할 수 있는 누설 검출 시스템을 개발하고자 압축 공기를 이용한 매설배관 실험 장치를 구축하고 이론적 방법을 적용한 배관 내 압축성 유체의 전파속도와 상호상관분석 등의 신호처리 알고리즘을 이용한 도달 시간차 측정을 통해 누설 위치를 추정하고 결과에 대한 고찰을 통해 가스와 같은 압축성 유체 누설 검출의 적용 가능성을 알아보고자 한다.

## II. 누설 위치 검출 이론

누설 위치 검출(leak location detection)의 이론적 개념은 매설된 배관의 임의의 위치에서 누설이 발생할 경우 배관 내 유체 진동 모드(mode)와 배관 진동 모드가 연성(coupled) 되면서 누설 위치 양단을 향해 배관을 매개로 이동 전파하는 신호를 두 개 이상의 진동 측정 센서를 이용하여 진동을 측정 한 후 각 센서에 도달한 신호의 시간 차이를 분석하고 음파의 전파속도를 적용하여 위치를 추정하는 것이다.

따라서 매설 배관에서 누설 위치 검출을 위해 다음과 같이 진동 발생의 개념과 유체를 통한 전파속도에 대해 이론적으로 검토하고, 배관의 양단에서 측정된 진동 신호를 이용하여 도달 시간차를 구하는 신호분석 방법에 대해 검토해 보고자 한다.

### 2.1. 배관 내 유체 진동

유체 수송을 위한 배관의 일부 구간에서 손상에 의해 누설이 발생하면 배관 내 유체에 압력 파동이 발생하는데, 이러한 파동은 배관과 유체 사이의 연성된 진동을 유발하게 된다[4-5]. 이때 배관은 단면 방향으로 셸 모드(shell mode)와 길이 방향의 빔 모드(beam mode)가 발생하는데, 매설된 배관의 경우

토사 등의 영향으로 굽힘 변형 발생이 어렵기 때문에 셸 형태의 모드만이 나타난다[6-7]. 이때 셸 모드는 Fig. 1과 같이 여러 진동 모드 중에서 배관 내 종 방향 전파와 상관관계가 높은 모드는 유체-배관의 연성 모드의 가장 기본 모드인  $n = 0$ (breathing mode) 모드로 알려져 있다[6].  $n=0$  모드는 배관 내의 유체의 압력 변화가 배관의 단면 방향의 수축 팽창 변형을 유발하고, 두 매질이 서로 연성되어 진동하게 된다. 이때 유체를 매질로 하는 음파의 전파는 주파수에 따라 분산(dispersive)하는 파동으로 나타난다[6]. 또한 배관의  $n=0$  모드의 주파수를 링 주파수(ring frequency)라 하는데 다음의 식 (1)과 같이 정의된다[7].

$$f_r = \frac{C_l'}{\pi d} \quad (1)$$

$$C_l' = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (2)$$

여기에서,  $f_r$  링 주파수,  $C_l'$ 의 의사 종파(quasi-longitudinal wave)이고,  $d$ 은 배관의 평균 직경,  $E$ 는 배관 재료의 탄성계수(Young's modulus),  $\rho$ 는 배관 재료의 밀도,  $\nu$ 는 푸아송 비(Poisson's ratio)이다.

배관의 링 주파수 이하 대역에서는 여러 구조 주파수 모드가 발생하는데, 이 중에서 누설에 따른 유체 연성 모드인  $n=0$ 와 관계하는 모드는 축대칭 모드(axisymmetric mode)로  $s=0, 1, 2$  모드가 있으며,  $s$  모드 중에서  $s=1$  모드가 비교적 감쇠가 작아 배관을 따라 멀리까지 파동이 전파되어 배관 누설 위치 탐지에 가속도계로 측정 분석할 수 있는 모드로 알려져 있다[6].

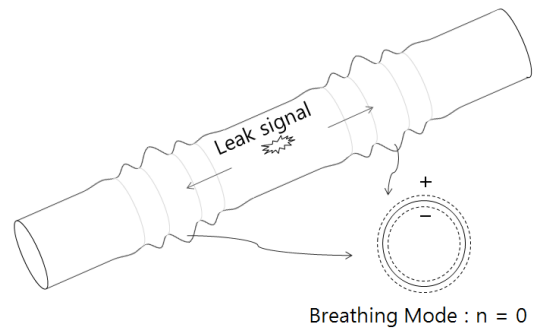


Fig. 1. Leak induced wave propagation and fluid-pipe coupled mode shape, breathing mode  $n=0$ .

따라서 본 논문에서는 배관 누설 위치 탐지를 위해  $n=0$  모드와  $s=1$ 의 축대칭 모드를 대상으로 분석 진행하고자 한다.

**2.2. 압축성 유체의 전파속도**

매설 배관의 누설 위치 검출 분석을 위해서 누설에 따른 유체의 압력 변동에 의한 파동의 도달 시간차와 음파의 전파속도를 이용하게 된다. 음파의 도달 시간차는 측정에 의해서 구할 수 있으며, 음파의 전파속도는 실험과 이론식에 의해 구할 수 있는데, 실험을 통해 얻을 경우 음파의 전파속도는 배관의 재료와 물성 값, 배관 내 유체의 조건에 따라 달라지므로 모든 조건에서 실험을 통해 얻을 경우 많은 비용과 시간이 필요하게 된다. 반면, 이론적인 접근 방법으로 전파속도를 구할 경우 배관 및 유체의 조건에 따라 쉽게 얻을 수 있는데, Muggleton[6] 등은 Fig. 1과 같은 배관에 대해 배관 표면에서 측정할 수 있는  $s=1$  파의 파수(wavenumber)  $k$ 로 식 (3)과 같이 제시하였다.

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

여기에서,  $k_f = \omega/C_f$ 는 유체의 파수이며,  $\omega$ 는 주파수,  $h$ 는 배관의 두께이고,  $B_f$ 는 배관 내의 유체의 체적탄성계수(Fluid bulk modulus)이며,  $\rho$ 는 배관의 밀도,  $r$ 는 배관의 반경,  $C_f$ 는 자유공간에서 유체의 전파속도이며, 다음 식과 같이 주어진다[7-8].

$$C_f = \sqrt{\frac{B_f}{\rho_f}} \quad (4)$$

여기에서,  $\rho_f$ 는 유체의 밀도이다.

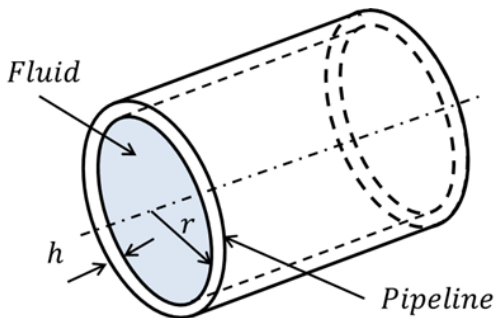


Fig. 2. Geometry of the pipeline.

식 (3)에서 진동의 파수(wavenumber)는 유체와 배관이 탄성학적으로 연성되어 있고, 배관을 둘러싼 토양 등의 영향은 고려하지 않음을 알 수 있다.

식 (3)에  $k = \omega/C$ 을 대입하여 전파속도에 대해 정리하면 다음 식과 같다.

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

식 (5)는 일반적인 누설에 따른 유체에 의한 전파속도 식이다. 식 (4)의 경우 자유공간에서 유체에 의한 전파속도는 주파수 독립적인 특성을 나타내나, 식 (5)와 같이 배관 내의 유체에 의한 전파속도는 주파수 종속적인 분산 특성을 나타낸다.

본 논문에서는 가스와 같은 기체 상태의 압축성 유체의 누설 위치 탐지에 적용할 수 있는 시스템을 개발할 수 있도록 유체의 밀도를 이상기체 상태방정식으로부터 다음 식과 같이 압력과 온도의 함수로 나타내었다.

$$\rho_f = \frac{P_f}{R_s(T+273)} \quad (6)$$

여기에서,  $P_f$ 는 배관 내 유체의 압력이고,  $R_s$ 는 비기체상수(Specific gas constant),  $T$ 는 배관 내 유체의 온도(°C)이다.

식 (4)와 식 (6)를 식 (5)에 적용하면, 다음과 같이 배관 내 압축성 유체의 음파 속도 식으로 나타낼 수 있다.

$$C_{air} = \left( \frac{B_f R_s (T+273)}{P_f} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ 1 + \frac{2B_f/r}{Eh/r^2 - \rho h \omega^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

본 논문에서는 식 (7)을 압축성 유체의 누설 위치 탐지를 위한 전파속도 식의 적용 가능성을 검토해보기 위해서 다음과 같이 비압축성 유체인 물과 압축성 유체인 공기를 비교 대상으로 정하고, 그 특성을 비교하였다.

Table 1은 본 논문에서 사용하고자 하는 배관의 재료와 물성 값이며, Table 2는 비압축성 유체인 물과 압축성 유체인 공기에 대한 상수 값이다.

Fig. 3은 배관 내에 비압축성 유체인 물에 대한 전파속도와 압축성 유체인 공기에 대한 전파속도를 식 (5)와 식 (7)을 적용하여 계산한 그래프이다.

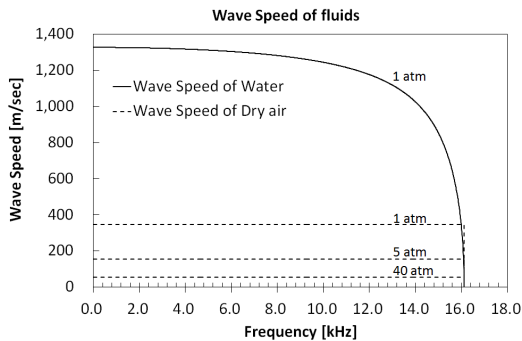
비압축성 유체인 물의 경우 배관의 링 주파수 이하 대역에서 전파속도가 주파수에 따라 분산 특성이

**Table 1.** The property of pipeline in 100A

	Steel Pipe
Young's Modulus	200 GPa
Poisson's ratio	0.28
Density	7800 kg/m <sup>3</sup>
Thickness	4 mm
Diameter	100 mm
Ring frequency	16 kHz

**Table 2.** The material property of fluids

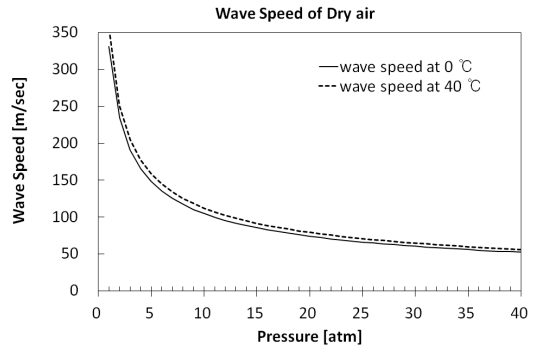
	Water	Dry air
Bulk Modulus	2.25×10 <sup>9</sup> Pa	1.42×10 <sup>5</sup> Pa
Expansion coefficient	8.8×10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> °C	-
Specific gas constant	-	2.84×10 <sup>2</sup> J/(kg·K)



**Fig. 3.** Comparing the wave speed of water and dry air at the temperature of 25°C and the pressure of 1atm, 5atm and 40atm.

잘 나타나고 있으나, 압축성 유체인 공기의 경우 주파수에 따른 분산 특성이 잘 나타나지 않음을 알 수 있다. 따라서 압축성 유체가 기체 상태일 경우 전파 속도 값은 주파수와 관계없이 일정한 값으로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 압축성 유체인 공기에 대해 온도와 압력에 따른 음파의 전파속도를 나타낸 결과 그래프이다. 온도 변화는 지하에 매설된 배관의 특성상 최저 0°C와 40°C 두 개의 값을 기준으로 정하여 계산하였고,



**Fig. 4.** Wave speed of dry air between the temperature of 0°C and 40°C.

압력의 경우 1기압에서 40기압까지를 기준으로 하여 계산하였다. 압력의 경우 도시가스를 기준으로 저압, 중압, 고압 및 상업용, 비상업용 전체를 기준하여 최짓값과 최뒹값을 정하여 계산하였다. 그래프에서 나타내듯이 압축성 유체인 공기는 유체 전파속도가 실제 사용 조건에서 온도보다는 압력에 대해 큰 민감성을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 압축성 유체의 누설에 따른 위치 탐지를 위해서는 유체의 전파속도 적용 시 온도 정보뿐만 아니라 압력 정보를 보다 정확히 파악하고 실험을 통해 얻거나 이론식에 적용하여 구해야 함을 알 수 있다.

### 2.3. 신호처리 알고리즘

유체를 수송하는 매설 배관의 일부 구간에서 파손에 의해 누설이 발생하면, 누설 지점의 양 방향으로 탄성파가 연속적으로 발생하여 전파되는데, 이러한 탄성파를 Fig. 5와 같이 AE 센서나 가속도 센서를 부착하고 계측 시스템을 사용하여 진동을 측정하면 정상적 랜덤 신호(Stationary signal)를 얻을 수 있고, 취득된 시간 이력 데이터를 신호처리하면 탄성파의 도달 시간차를 구할 수 있어, 다음 식 (5)와 같이 누설 위치를 추정할 수 있다.

$$d_1 = \frac{D + C\tau_d}{2}, d_2 = \frac{D - C\tau_d}{2} \quad (8)$$

여기에서,  $d_1, d_2$ 는 누설 위치에서 양단의 센서까지 거리이며,  $D$ 는 센서 간 거리이고,  $C$ 는 배관 내의 누설음의 전파속도,  $\tau_d$ 는 누설음의 도달 시간차이다.

음파의 전파 속도  $C$ 는 식 (7)을 사용하거나 실험을 통해 구할 수 있으며, 도달 시간차는 측정 시스템

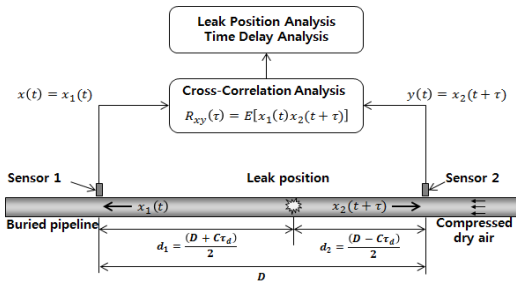


Fig. 5. Schematic diagram of signal processing for leak location analysis.

을 사용하여 시간 이력 데이터를 측정된 후 신호처리를 통해 구할 수 있다.

매설 배관에서 누설에 의해 발생하는 진동 신호는 식 (9)와 같이 연속적으로 발생하는 정상적 랜덤 신호(Stationary random signal)로 볼 수 있는데, 이러한 신호를 분석하는 방법으로 식 (10)과 같은 상호상관함수를 이용한 상호상관분석법이 많이 활용되고 있다[8-11]. 상호상관함수는 두 개의 정상적 랜덤 신호의 곱의 앙상블 평균값(Ensemble average)을 구하는 함수인데 두 개의 신호가 일정 시간이 지연된 유사한 신호일 경우 시간 지연 값  $\tau_0$ 를 구할 수 있는 신호처리 방법이다 [12].

$$\begin{aligned} x(t) &= x_1(t) + n_1(t) \\ y(t) &= \alpha x_1(t + \tau_0) + n_2(t) \end{aligned} \quad (9)$$

여기에서,  $n_1(t), n_2(t)$ 는 각각 두 개 신호의 잡음 성분이다.

$$\begin{aligned} R_{xy}(t) &= E[x(t)y(t)] \\ &= \alpha E[x_1(t)x_1(t + \tau_0)] \\ &\quad + E[n_1(t)n_2(t)] \\ &= \alpha R_{x_1x_1}(\tau + \tau_0) + R_{n_1n_2}(\tau) \end{aligned} \quad (10)$$

여기에서,  $E[ ]$ 는 기대치 연산자(expectation operator)이며,  $\alpha$ 는 신호의 감소 진폭 인자(Attenuation factor)이고,  $R_{n_1n_2}(\tau)$ 는 두 개의 신호가 상호 연관되지 않은 잡음 성분으로 0가 된다.

또한 센서 측정 위치를 중심으로 임피던스 차에 의한 반사파가 발생하거나 주기적으로 반복되는 기계 소음 등의 주변 환경에 의한 잡음 성분을 최소화하기 위해서 상호 스펙트럼(Cross spectrum)의 위상 정보를 이용한 방법을 적용하였다[12].

두 개 신호의 위상 정보를 얻기 위해서 상호 스펙트럼을 계산하게 되는데, 상호상관함수를 FFT 하면 구할 수 있다. 두 함수의 관계는 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} S_{xy}(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \\ &= |S_{xy}(f)| \cdot e^{-j\hat{\phi}_{xy}(f)} \end{aligned} \quad (11)$$

여기에서,  $S_{xy}(f)$ 는 상호 스펙트럼 함수이고,  $\hat{\phi}_{xy}(f)$ 는 위상 정보이다.

일반적으로 위상 정보는  $\pm\pi$  사이의 Wrapped phase를 측정하게 된다. 식 (11)의 측정된 위상 정보를 식 (12)와 같이 Unwrapped phase 값으로 변환하게 되면 두 신호의 상호 상관도가 높은 누설 신호의 경우, 위상 정보가 주파수 증가에 따라 선형적으로 증가하거나 감소하게 된다. 하지만 상관성이 낮거나 잡음 성분의 경우 섭동성분으로 나타난다[13].

$$\phi^n(f) = \phi^w(f) + 2n\pi \quad (12)$$

여기에서,  $n$ 는 정수 값이다.

따라서 이러한 섭동성분을 최소화하기 위해서 식 (12)의 변환된 위상 신호 결과를 선형 피팅(linear fitting) 처리하였으며, 이 결과를 적용하여 상호상관 함수에서 도달 시간차를 구하기 위해서 선형 피팅(fitting) 처리한 위상 신호를 사용하여 식 (13)과 같이 복소수 형태의 상호 스펙트럼 함수로 변환하였다.

$$\hat{S}_{xy}(f) = |S_{xy}(f)| \cdot e^{-j\hat{\phi}_{xy}(f)} \quad (13)$$

여기서,  $\hat{\phi}_{xy}(f)$ 는 선형 피팅(Linear fitting) 처리된 위상신호이다.

식 (13)의 상호 스펙트럼 함수를 iFFT 처리하면 상호상관함수를 구할 수 있는데 다음 식과 같다.

$$R_{xy}(\hat{\tau}) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{S}_{xy}(f) e^{j2\pi f\hat{\tau}} df \quad (14)$$

여기에서,  $\hat{\tau}$ 는 잡음이 저감된 시간 지연 값이다. 식 (14)의 결과에서  $R_{xy}(\hat{\tau})$ 의 절댓값의 최댓값을 구하게 되면 누설에 의한 두 개 센서로부터 측정된 도달 시간차  $\tau_d$ 를 구할 수 있다.

Fig. 6은 도달 시간차를 구하기 위한 신호처리 과정을 도식화한 흐름도이며, 이러한 순서에 따라 신호처리를 수행하였다.

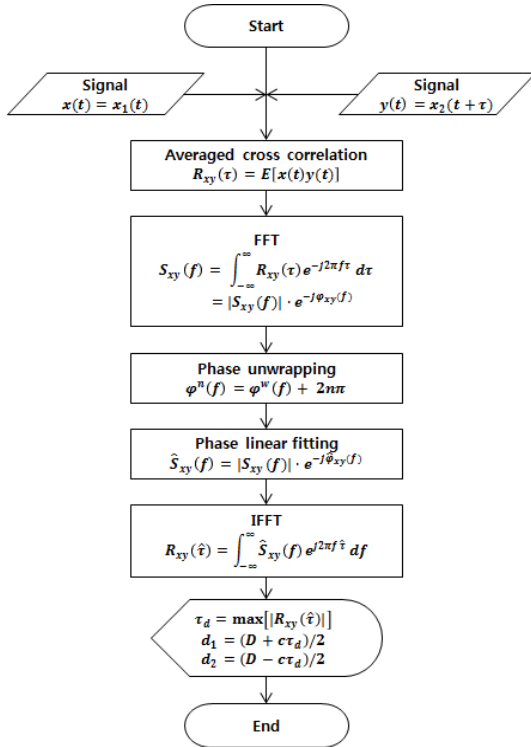


Fig. 6. Flow chart for signal processing and leak location detection algorithm.

### III. 누설 실험

본 논문에서는 가스와 같은 압축성 유체를 수송하는 매설 배관 내에서 누설 위치 검출 시스템 개발을 위한 검증을 위해 다음과 같이 실험 장치와 측정 시스템 구성하고, 실험 결과를 비교 분석 하였다.

#### 3.1. 실험 장치

가스와 같은 압축성 유체 수송을 위한 매설배관의 누설 위치 탐지 기술 검증을 위해서 실험 장치를 구축하였다. Fig. 7은 구축한 실험 장치의 전체 배관 개략도와 실제 도양에 매설하여 설치한 사진을 나타낸다. 유체-구조 연성 진동의 경우 비교적 감쇠가 작아 토사의 영향보다는 배관의 영향이 지배적인 것으로 알려졌다[6] 때문에 일반적인 자갈을 포함한 사질 양토의 석토층으로 매설하였다.

매설된 배관 구간의 총 길이는 40m이며, 누설 시 배관 내 유체의 압력을 유지하기 위해서 압력 탱크를 두었다. 또한, 전체 배관 중에서 매설된 구간에 누설을 발생시키기 위해 배관 표면에 볼밸브를 설치

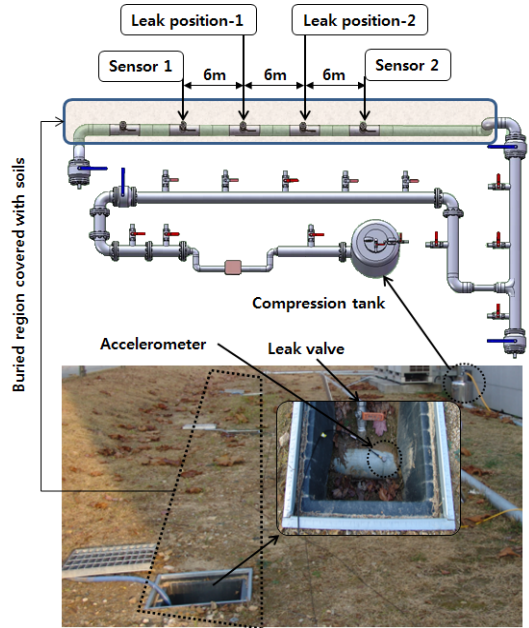


Fig. 7. Experimental system for leak location detection in buried pipeline.

하였으며, 볼밸브는 25A 규격으로 누설을 재현하기 위해 볼밸브를 50% 개방하여 대기에 노출되도록 하였다. 설치된 센서와 누설 발생을 위한 밸브 간격은 각각 6m로 센서 사이의 거리는 18m이다.

누설은 센서 1의 위치에서 6m 지점과 12m 지점 2개 위치로 정하였다.

#### 3.2. 측정 시스템 구성

매설 배관은 대부분 실외에 설치되며, 밸브 연결 부위와 같이 노출되는 양단의 거리가 수백 미터에 이를 수 있기 때문에 무선 전송 시스템의 개발이 유용하다. 따라서 본 논문에서는 무선 시스템을 적용해 보고자 상용 무선 시스템과 유선 시스템 두 개 시스템으로 데이터를 측정할 수 있도록 구성하였다.

Fig. 8은 측정 시스템에 대한 기본 개략도이며, 지하에 매설된 배관의 노출 부위에 진동을 측정할 수 있도록 ICP 유형의 공진과파수가 18kHz 대역인 B&K 4507 가속도계를 사용하였고, 무선 시스템의 경우 ICP 앰프와 A/D Board가 내장된 NI-9234 DAQ모듈을 사용하였으며, 최대 샘플링 속도는 51.2kS/s이고, Anti-aliasing 필터가 내장된 제품이다. 또한 디지털로 변환된 측정 신호를 분석 PC에 전송할 수 있도록 무선 전송 모듈인 NI-9191을 사용하여 데이터를 취득하였다. 데이터 취득 소프트웨어는 C# 언어를

이용하여 구현하였다. 유선 시스템의 경우는 B&K Pulse 제품을 사용하여 데이터를 취득하였다.

모든 데이터 측정 시스템 구성은 상용 제품을 기본 모듈로 하여 구성하였으며, 향후 전용 제품을 개발하기 위해서 기능 수행 목표로 시스템을 구성하여 데이터를 측정할 수 있도록 하였다.

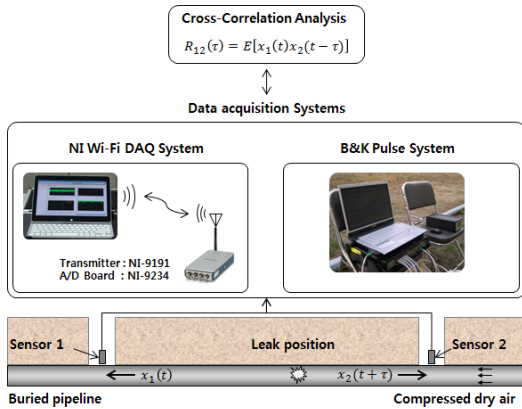
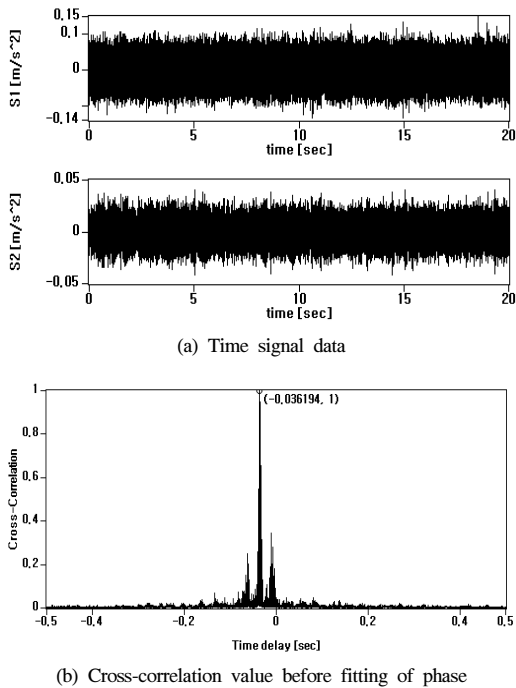


Fig. 8. Schematic diagram of data acquisition system for leak location detection.



(b) Cross-correlation value before fitting of phase

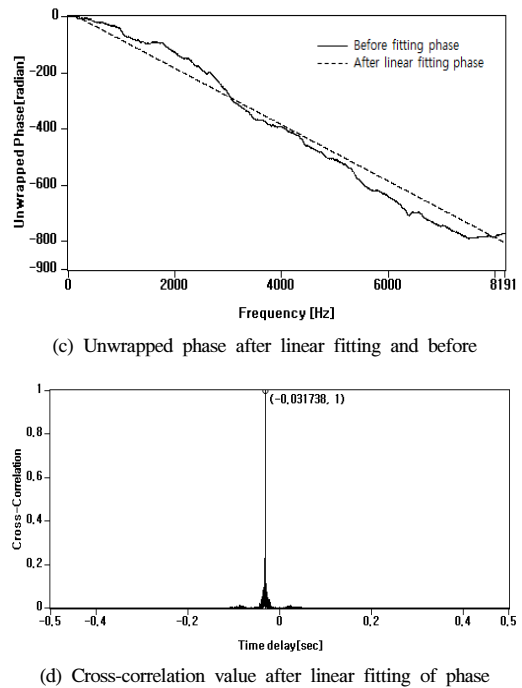
### 3.3. 실험 결과 및 고찰

가스와 같은 압축성 유체의 수송을 위한 매설 배관에서 누설 위치 탐지 가능성을 확인하고, 누설 탐지 시스템을 개발하기 위해 실험이 용이한, 압축성 유체인 압축 공기를 사용하여 실험을 수행하였다.

실험을 위해 Fig. 7과 같이 매설된 배관 중 2군데의 누설 위치에서 강제 누설을 발생시키고, 배관 양단에서 진동을 측정하여 상호상관분석을 통해 누설 위치를 추정하는 방식으로 실험을 수행하였다.

Fig. 9과 Fig. 10은 실험을 수행한 후 상호상관분석을 실시한 결과이다. Fig. 9 및 Fig. 10에서 (a)는 각 센서에서 측정된 가속도 신호이고, (b)는 가속도 신호의 상호상관분석 결과를 나타내며, (c)는 가속도 신호의 상호스펙트럼 분석하고 언래핑(Unwrapping) 처리한 위상 신호와 선형 커브 피팅(Linear curve fitting)을 수행한 위상 신호를 나타낸다. 또한 (d)는 선형 커브 피팅 처리한 위상 신호를 iFFT를 통해 상호상관 값으로 변환한 결과를 나타낸다.

Fig. 9와 Fig. 10의 (b)는 위상 신호의 선형 커브 피팅 전의 상호상관 값이며, 그 값에 따라 가속도 신호의 도달 시간차를 나타낸다. 또한 상호상관의 분포 값 중 최댓값이 상호상관성이 가장 높으므로 누설에 의해 발생한 진동 신호의 도달 시간차로 분석



(d) Cross-correlation value after linear fitting of phase

Fig. 9. Experiment results for detection of the leak position at leakage position-1.

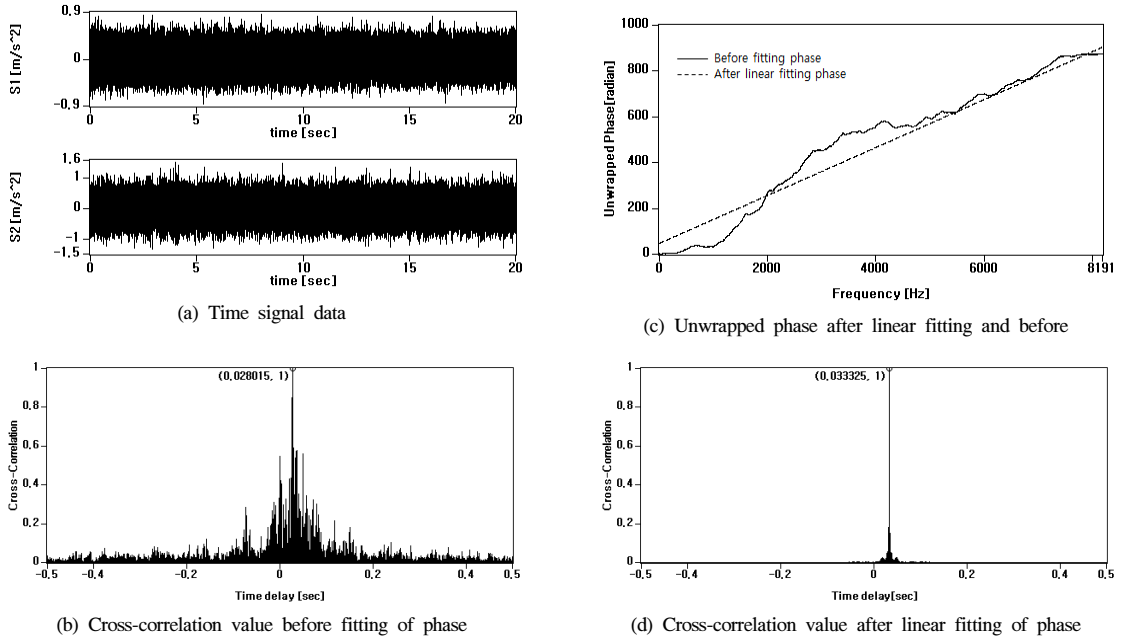


Fig. 10. Experiment results for detection of the leak position at leakage position-2.

Table 3. Experimental results of the leak position estimation at leakage position-1

	Cross-correlation	Unwrapped phase linear fitting
Time delay[sec]	-0.036194	-0.031738
Theory speed[m/s]	172.5	172.5
Estimated position[m]	5.9(S1) / 12.1(S2)	6.2(S1) / 11.8(S2)
Real position[m]	6.0(S1) / 12.0(S2)	6.0(S1) / 12.0(S2)
Error[%]	1.7(S1) / 0.8(S2)	3.3(S1) / 1.7(S2)

하였다.

Fig. 9와 Fig. 10의 (c)의 결과를 보면 언래핑(Unwrapping)된 위상 신호가 변동(Oscillation)하는 것을 알 수 있는데, 주파수에 따른 위상 신호의 기울기가 도달 시간차(Time delay)를 나타내므로 모든 주파수 대역에서 동일한 시간차를 가질 경우 위상 신호는 변동하지 않고 일정한 기울기를 갖는 직선 형태가 된다. 그러나 외부 잡음의 영향과 배관 길이 방향으로 분기된 지관 등의 연결부, 배관 단면의 강성 변화에 따라 식 (7)의 전파속도가 누설 발생 위치로

Table 4. Experimental results of the leak position estimation at leakage position-2

	Cross-correlation	Unwrapped phase linear fitting
Time delay[sec]	0.028015	0.033325
Theory speed[m/s]	172.5	172.5
Estimated position[m]	6.6(S1) / 11.4(S2)	6.1(S1) / 11.9(S2)
Real position[m]	6.0(S1) / 12.0(S2)	6.0(S1) / 12.0(S2)
Error[%]	10.0(S1) / 5.0(S2)	1.6(S1) / 0.8(S2)

부터 배관을 따라 이동하면서 변하는 경우 언래핑(Unwrapping)된 위상 신호가 변동(Oscillation)하게 된다. 따라서 이러한 변동 성분을 최소화할 경우 주 누설원의 위상 신호를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 이러한 특성을 이용하고자 언래핑(Unwrapping)된 위상 신호를 선형 커브 피팅(Linear curve fitting) 처리한 후 다시 상호상관 값을 구하였다. Fig. 9, 10의 (d)는 이러한 위상 신호를 이용하여 구한 상호상관 값이다.

Table 3과 Table 4는 누설 실험 수행 후 도달 시간



차를 분석한 결과이다. 실험 시 배관 내 유체 온도가 23℃, 배관 내 압력이 4.0기압 값을 고려하여 식 (7)을 이용하여 전파속도를 계산하였고, 이 값을 적용하여 누설 위치를 추정한 결과이다. 측정 데이터는 16384Sa/sec로 측정하였고, 총 20회 평균하여 구하였다. 결과를 보면 추정 오차가 발생하나 압축성 유체의 경우도 누설 위치 추정이 가능함을 알 수 있다. 또한 언래핑(Unwrapping)된 위상 신호의 변동 성분을 최소화한 경우 추정 오차가 감소되는 것을 알 수 있는데, 이것은 잡음 성분이 최소화되어 추정 신뢰도가 향상되는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결론

압축성 유체 수송을 위한 매설 배관에서 누설 발생 시 누설되는 위치를 탐지할 수 있는 분석 시스템을 개발하고자 그 타당성을 검증하기 위해서 실험 장치를 구성하고 측정 시스템과 누설 위치를 추정할 수 있는 신호 처리 알고리즘을 적용해 보았다.

압축성 유체의 음파 전파속도를 구하기 위해서 유체의 전파속도 식 (5)에 압력과 온도를 고려하여 식 (7)과 같이 적용하였으며, 누설 위치 추정에 이로운 전파속도 값을 실험을 통해 검증하였다.

또한 상호스펙트럼의 위상 신호를 이용하여 잡음 성분을 감소시킨 결과 오차를 최소화할 수 있었으며, 이러한 분석 알고리즘을 적용한 결과 유의미한 누설 위치 추정이 가능함을 확인하였다.

따라서 압축성 유체 수송용 매설 배관에서 누설 위치 검출 시스템 개발 시 본 연구 내용의 전파속도 식 (7)과 Fig. 6의 신호처리 알고리즘의 절차를 적용하여 제품 개발에 활용하고자 한다.

향후 매설배관 내 압력과 온도 조건에 따른 실험을 추가 분석하고, 다중 누설 조건과 지관 등의 분기 조건에 따른 누설 탐지 연구를 지속하여 제품 개발에 적용하고자 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(NO.20161520302230)

#### 사용기호

$f_r$  : ring frequency [Hz]  
 $C_l'$  : quasi-longitudinal wave speed [m/s]  
 $d$  : effective diameter of pipe [m]

$r$  : radius of pipe [m]  
 $h$  : thickness of pipe [m]  
 $E$  : young's modulus [Pa]  
 $k$  : wavenumber of the s=1 wave  
 $k_f$  : wavenumber of fluids in rigid walled  
 $B_f$  : fluid bulk modulus of elasticity [Pa]  
 $C_f$  : acoustic wave velocity of fluids [m/s]  
 $C$  : propagation velocity of the leak signal [m/s]  
 $P_f$  : pressure of fluids [Pa]  
 $R_s$  : specific gas constant [J/(kgK)]  
 $T$  : temperature of fluids [°C]  
 $D$  : length of pipe between the sensors [m]  
 $d_1$  : distance between leak position and sensor 1 [m]  
 $d_2$  : distance between leak position and sensor 2 [m]  
 $R_{xy}$  : cross-correlation  
 $R_{x_1x_1}$  : auto-correlation  
 $R_{n_1n_2}$  : cross-correlation of noise  
 $S_{xy}$  : cross-spectrum  
 $\hat{S}_{xy}$  : cross-spectrum after phase fitting

#### 그리스 문자

$\rho_f$  : density of fluids [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\nu$  : poisson's ratio  
 $\rho$  : density of pipe [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\tau$  : time delay [sec]  
 $\tau_d$  : arrival time delay [sec]  
 $\hat{\tau}$  : time delay after phase fitting [sec]  
 $\omega$  : angular frequency [rad/sec]  
 $\phi_{xy}$  : phase factor  
 $\hat{\phi}_{xy}$  : phase factor after linear curve fitting  
 $\alpha$  : attenuation factor  
 $\phi^n$  : unwrapped phase factor  
 $\phi^w$  : wrapped phase factor

#### REFERENCES

- [1] Knapp, C. H., and Carter, G. C., "The generalized correlation method for the estimation of time-delay", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, 24(4), 320-327, (1976)
- [2] Liston, D. A., et al., "Leak Detection Techni-

- ques", *Journal of New England Water Works Association*, 1206(2), 103-108, (1992)
- [3] Gao, Y., Brennan, M. J., Joseph, P. F., "A Comparison of Time Delay Estimators for the Detection of Leak Noise Signals in Plastic Water Distribution Pipes", *Journal of Sound and Vibration*, 292, 552-570, (2006)
- [4] Lin, T. C., and Morgan, G. W., "Wave Propagation through Fluid Contained in a Cylindrical, Elastic Shell", *Journal of Acoustical Society of America*, 28(6), 1165-1176, (1956)
- [5] Fuller, C. R., and Fahy, F. J., "Characteristics of Wave Propagation and Energy Distributions in Cylindrical Elastic Shells Filled with Fluid", *Journal of Sound and Vibration*, 81(4), 501-518, (1982)
- [6] 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), 939-954, (2002)
- [7] Fahy, F. J., *Sound and Structural Vibration-Radiation, Transmission and Response*, Academic Press, London, (1985)
- [8] Lee, Y. S., Yoon, D.J., and Jeong, J.-C., "Leak Location Detection of Underground Water Pipes Using Acoustic Emission and Acceleration Signals," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 23(3), 89-98, (2003)
- [9] Lee, Y. S., "Leak Point Detection of Underground Water Pipelines", *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 17(1), 16-21, (2007)
- [10] Yoon, D. B., Park, J. H., and Shin, S. H., "Improvement of Cross-correlation Technique for Leak Detection of a Buried Pipe in a Tonal Noisy Environment", *Nuclear Engineering and Technology*, 44(8), 977-984, (2012)
- [11] Lee, Y. S., "Analysis on Signal Properties due to Concurrent Leaks at Two Points in Water Supply Pipelines", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 35(1), 31-38, (2015)
- [12] Bendat, J. S., Piersol, A. G., *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, 3<sup>rd</sup> ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 118-130, (2000)
- [13] Yoon, D. B., Park, J. H., et al., "A Study on Method for Removing Reflected Wave to Enhance the Leak Detection Capability of a Buried Pipe", *Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference*, 209-210, (2012)