

배관계의 가스누설탐지를 위한 음향모델 연구

A Study on an Acoustical Model for Gas Leak Detection in a Pipeline

양윤상(Yoon-Sang Yang)¹, 이동훈(Dong-Hoon Lee)^{2*}, 고재필(Jae-Pil Koh)³

¹서울과학기술대학교 에너지시스템공학과, ²서울과학기술대학교 기계·자동차공학과, ³한국가스공사연구개발원

¹Dept. Energy System Eng., Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Republic of Korea

²Dept. Mechanical and Automotive Eng., Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Republic of Korea

³Korea Gas Corporation R&D Division, Ansan 426-860, Republic of Korea

(Received November 21, 2013; revision received December 27, 2013; Accepted: December 30, 2013)

Abstract An acoustical model for detecting the leak location in a buried gas pipeline has been developed. This model is divided into an experimental model for sound diagnosis, and a theoretical model for sound prediction, which is based on the transfer matrix method, representing the sound pressure and the volume velocity as state variables. The power spectrum is measured by attaching only one microphone to the closed end pipe. It has been shown that the response magnitude of acoustic pressure signals calculated by the acoustical model depends upon the thickness and diameter of a pinhole. The validity for the acoustical model has been verified through a comparison between the measured and calculated results.

Key words Transfer matrix method(전달행렬법), Leak detection(누설탐지), Pinhole(핀홀), Pipe line(배관계)

† Corresponding author, E-mail: ldh@seoultech.ac.kr

기호설명

p	: Acoustic pressure [Pa]
q	: Acoustic volume velocity [m^3/s]
k	: Wave number [rad/m]
Y	: Characteristic impedance [kg/m^4s]
Z	: Acoustic impedance [kg/m^4s]
w	: Angular frequency [rad/sec]
c	: Sound speed [m/s]
u	: Acoustic particle velocity [m/s]
ρ	: Density [kg/m^3]
d_h	: Diameter of pinhole [m]
t	: Thickness of pinhole [m]
t_{eq}	: Effective acoustic length [m]

1. 서 론

유체수송 배관계에 대해서 누설 징후를 탐지하거나 이미 진행되고 있는 누설을 탐지하는 문제는 공학적으로 시급히 해결해야 할 과제이다. 특히 가스관이나 송유관에서의 누설은 안전과 환경에 커다란 영향을 미치기 때문에 누설탐지 기술에 대하여 그 동안 많은 연구가 진행되어 왔다.^(1,2)

배관계에서의 누설탐지를 위한 방법으로는 유도초

음파(ultrasonic guided wave)법과 음향진단법(acoustic diagnosis method)이 있다. 유도초음파법은 구조물의 기하학적 구조를 따라 전파하는 초음파를 이용하는 방법으로서, 탐측자의 이동없이 고정된 지점으로부터 대형 설비 전체를 한번에 탐상할 수는 있으나, 매설된 배관계에는 적용할 수 없는 한계가 있다.⁽³⁾

매설된 배관계에 적용할 수 있는 음향진단법은 음파를 배관 내부로 직접 전파시킨 상태에서 음향센서를 이용하여 누설신호를 탐지하는 음향학적 방법이다.⁽⁴⁻⁷⁾ 즉 배관계의 상류측이나 하류측에 부착된 한 개 혹은 두 개의 음향센서로부터 자기스펙트럼 또는 상호스펙트럼을 구하여 누설위치를 탐지하는 방법이다. 지금까지 발표된 배관계에서의 누설탐지에 대한 대부분의 연구는 실험에 기반을 둔 것으로서, 이론적 방법을 통하여 누설을 추정하는 연구결과의 발표는 그리 많지 않다.

따라서 본 연구에서는 음향이론을 이용하여 배관계에 생긴 핀홀과 같은 결함을 추정할 수 있는 음향모델을 수립하였다. 음향모델의 기본이론으로는 전달행렬법(transfer matrix method)을 이용하였다. 배관계의 결함요소인 핀홀의 두께, 지름 그리고 위치를 변화시키면서 누설신호의 크기와 위치를 계산하였다. 음향모델의 타당성 검증은 핀홀에 스피커를 부착하고 측정 결과와 계산결과의 비교를 통하여 확인하였다.

2. 음향모델

Fig. 1과 같이 음향센서가 하류측 끝단에 부착되어 있는 경우, 핀홀을 갖는 파이프의 음향모델은 다음과 같이 전기음향등가회로로 표현할 수 있다.

배관내의 기체의 온도와 압력은 일정하다고 하면 이상기체로 간주할 수 있으므로 음속 c 는 일정한 값을 갖는다. 또 배관내의 음향현상은 1차원 파동방정식을 만족하는 평면파로 간주 한다.

따라서 Fig. 1에서와 같이 상류단과 하류단에서의 음압과 체적속도를 각각 $p_1(f)$, $q_1(f)$ 그리고 $p_2(f)$, $q_2(f)$ 라하고, 핀홀에서 관의 내부로 입사하는 음압 $p_i(f)$, 상류측으로 전파하는 음의 체적속도 $q_{i1}(f)$ 그리고 하류측으로 전파하는 음의 체적속도를 $q_{i2}(f)$ 라 할 때, 핀홀 경계면으로부터 상류단과 하류단으로 전파하는 음의 전파특성은 다음과 같은 전달행렬로 표현할 수 있다.⁽⁸⁾

$$\begin{bmatrix} p_i(f) \\ q_{i1}(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kx & -jY \sin kx \\ (-j/Y) \sin kx & \cos kx \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1(f) \\ q_1(f) \end{bmatrix} \quad (1a)$$

$$\begin{bmatrix} p_i(f) \\ q_{i2}(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kx & jY \sin kx \\ (j/Y) \sin kx & \cos kx \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2(f) \\ q_2(f) \end{bmatrix} \quad (1b)$$

식(1a)에서 핀홀위치를 기준으로 상류측 $x = -l_1$ 에서 $q_1(f) = 0$ 이 되므로, $q_{i1}(f)$ 와 $p_i(f)$ 는 각각 다음과 같다.

$$p_i(f) = p_1(f) \cos(-kl_1) = p_1(f) \cos(kl_1) \quad (2a)$$

$$q_{i1}(f) = \left(\frac{-j}{Y} \right) p_1(f) \sin(-kl_1) = \left(\frac{j}{Y} \right) p_1(f) \sin(kl_1) \quad (2b)$$

식(2b)의 $p_1(f)$ 대신에 식(2a)를 대입하면 다음과 같다.

$$q_{i1} = \left(\frac{j}{Y} \right) \frac{p_i(f) \sin kl_1}{\cos kl_1} \quad (3)$$

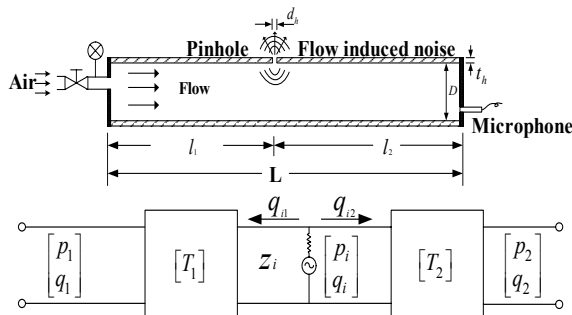


Fig. 1 The equivalent electroacoustic circuit for a pipeline with a pinhole.

또한 식(1b)에서는 핀홀위치를 기준으로 하류측 $x = +l_2$ 에서 $q_2(f) = 0$ 이므로, $q_{i2}(f)$ 와 $p_i(f)$ 는 각각 다음과 같다.

$$p_i(f) = p_2(f) \cos kl_2 \quad (4a)$$

$$q_{i2}(f) = \left(\frac{j}{Y} \right) p_2(f) \sin kl_2 \quad (4b)$$

Fig. 2는 핀홀에서 발생한 음원의 음압을 $p_s(f)$ 그리고 이중에서 관내부로 입사한 음압을 $p_i(f)$, 관의 상류측과 하류측으로 전파하는 음의 체적속도를 각각 $q_{i1}(f)$ 과 $q_{i2}(f)$ 로 나타내고 있다.

따라서 핀홀 경계면상에서의 음압차 $p_s(f) - p_i(f)$ 와 음의 체적속도 $q_i(f) = q_{i1}(f) + q_{i2}(f)$ 그리고 음향 임피던스 Z_i 는 다음의 관계를 갖는다.

$$p_s(f) - p_i(f) = Z_i \{q_{i1}(f) + q_{i2}(f)\} \quad (5)$$

식(5)를 관내부로 입사하는 음압 $p_i(f)$ 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$p_i(f) = p_s(f) - Z_i \{q_{i1}(f) + q_{i2}(f)\} \quad (6)$$

식(6)에 식(3)과 식(4)을 대입하여 정리하면 음향센서 위치에서의 음압 $p_2(f)$ 와 핀홀에서 발생한 음원의 음압 $p_s(f)$ 간에 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$p_2(f) = \frac{p_s(f)}{\cos kl_2 + \left\{ \frac{j Z_i}{Y} \right\} \frac{\sin(kl_1 + kl_2)}{\cos kl_1}} \quad (7)$$

식(7)에 관의 길이 $L = l_1 + l_2$ 을 대입하고, 음향센서 위치에서의 음압 $p_2(f)$ 와 핀홀에서의 음압 $p_s(f)$ 간에 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$p_2(f) = \frac{p_s(f)}{\cos kl_2 + \left\{ \frac{j Z_i}{Y} \right\} \frac{\sin kL}{\cos kl_1}} \quad (8)$$

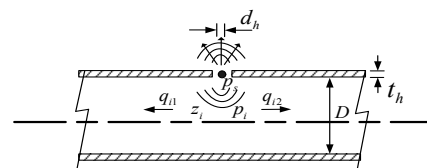


Fig. 2 Propagation behavior of sound emitted from a pinhole.

식(8)에서 분모의 제1항은 분모의 제2항과 비교하여 무시할 수 있으므로 $p_2(f)$ 는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$p_2(f) \cong \frac{Y}{jZ_i} \cdot \frac{\cos kl_1}{\sin kL} p_s(f) \quad (9)$$

위 식으로부터 $p_2(f)$ 는 $\sin kL$ 의 $kL=2\pi$ 일 때 마다 펄스형태의 음압패턴을 갖게 된다. 이 때 펄스형태의 음압을 갖는 공간 각주파수 ω 는 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$\omega = \frac{2\pi c}{L} \quad (10)$$

Fig. 2의 핀홀에서 관내부로 전파하는 음압을 $p_{in}(f)$ 그리고 관외부로 전파하는 음압을 $p_{out}(f)$ 라 할 때, 음압차 $\Delta p(f) = p_{in}(f) - p_{out}(f)$ 그리고 핀홀의 단면적과 두께를 각각 s 와 t_h 라 하면, 뉴턴법칙을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s \Delta p(f) = \rho s t_h \frac{du}{dt} \quad (11)$$

식(11)에서 ρ 는 매질의 밀도, 그리고 u 는 음의 입자 속도를 의미한다. 또한 음의 입자속도 $u = Ue^{j\omega t}$ 를 시간에 대하여 미분하면 $du/dt = j\omega Ue^{j\omega t} = j\omega u$ 이므로, 이것을 식(11)에 대입하면 다음과 같다.

$$(\Delta p) = j\omega u \rho t_h \quad (12)$$

지름이 큰 관의 원주면에 뚫려 있는 지름 d_h 그리고 두께 t_h 인 핀홀에서 음이 발생하여 관내외부로 전파하게 되면, 핀홀의 두께는 실제의 물리적인 두께 t_h 보다 유효 음향두께(effective acoustic length) $8d_h/3\pi$ 만큼 더 크므로 식(12)의 t_h 대신에 다음과 같은 음향학적 길이 t_{eq} 가 계산에 포함되어야 한다.

$$t_{eq} = t_h + \frac{8d_h}{3\pi} \quad (13)$$

핀홀에서의 음향 임피던스는 핀홀 양단의 음압차 Δp 와 체적속도 $q(=su)$ 의 비로 정의할 수 있으므로, 음향 임피던스 Z_i 는 식(12)와 식(13)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Z_i = \frac{\Delta p}{q} = \frac{j\omega \rho (12\pi t_h + 32d_h)}{3\pi^2 d_h^2} \quad (14)$$

또한 핀홀에서의 음향 임피던스는 식(9)에서 보듯이 $\sin kL$ 의 $kL=2\pi$ 일 때마다 강한 펄스형태의 음압을 갖기 때문에 식(14)의 각주파수 ω 는 공간 각주파수 $\omega = 2\pi c/L$ 로 대체되어야 한다. 따라서 식(14)에 공간 각주파수를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$Z_i = \frac{\Delta p}{q} = \frac{j\rho c (24\pi t_h + 64d_h)}{3\pi d_h^2 L} \quad (15)$$

관의 단면적을 S 그리고 관의 지름을 D 라 할 때, 관의 특성 음향 임피던스 $Y = \rho c/S$ 이므로, 식(15)를 (Y/jZ_i) 에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{Y}{jZ_i} \right) = - \frac{3d_h^2 L}{(6\pi t_h + 16d_h) D^2} \quad (16)$$

따라서 식(16)을 식(9)에 대입하면 다음과 같이 핀홀의 음향 임피던스를 고려한 음향센서 위치에서의 음압 $p_2(f)$ 와 핀홀에서 발생한 음원의 음압 $p_s(f)$ 간의 관계식을 구할 수 있다.

$$p_2(f) \cong - \frac{3d_h^2 L}{(6\pi t_h + 16d_h) D^2} \cdot \frac{\cos kl_1}{\sin kL} p_s(f) \quad (17)$$

그리고 식(17)의 양변을 제곱하여 파워 스펙트럼으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} (1 - \cos 2kL) |p_2(f)|^2 \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{3d_h^2 L}{(6\pi t_h + 16d_h) D^2} \right\}^2 |p_s(f)|^2 (1 + \cos 2kl_1) \end{aligned} \quad (18)$$

식(18)은 직류성분과 교류성분을 갖는 주기적 주파수 특성을 갖는 것을 알 수 있으며, 핀홀에서 발생한 음압 $p_s(f)$ 는 모든 주파수에서 진폭이 일정한 백색잡음(white noise) 형태로 전파하므로 파워 스펙트럼(power spectrum)의 진폭도 일정하게 된다. 따라서 식(18)의 우변과 좌변을 각각 푸리에 역변환(Inverse Fourier transform)하면, 다음과 같이 시간에 따른 음압 $p_2(t)$ 의 실험값과 이론값을 구할 수 있다.

$$p_2(t)_{\text{experiment}} = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1}{2} (1 - \cos 2kL) |p_2(f)|^2 \right] \quad (19)$$

$$p_2(t)_{\text{theory}} = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1}{2} \left\{ \frac{3d_h^2 L}{(6\pi t_h + 16d_h) D^2} \right\}^2 (1 + \cos 2kl_1) |p_s(f)|^2 \right] \quad (20)$$

식(20)에서 알 수 있듯이 음압에 대한 양의 펄스 응답은 $2kl_2 = 2\pi$ 될 때의 시간 $t_1 = 2l_2/c$ 마다 발생하며, 그 크기는 핀홀에서 발생한 음원의 음압과 함께 핀홀의 지름과 두께 그리고 관의 길이와 지름에 의존함을 알 수 있다. 음압 $p_2(t)$ 에 대한 실험 식(19)에서는 $2kL = 2\pi$ 될 때마다 응답이 발생하며, 그 크기는 관내를 전파하는 음파의 음압에 의존함을 알 수 있다. 이상의 관계로부터 양단이 막힌 파이프의 한쪽 단면에서 측정된 음향신호의 주파수 분석결과를 식(19)에 대입하여 구한 양의 펄스 응답시간 t_1 값으로부터 핀홀까지의 거리 l_2 는 다음 식으로 구한다.

$$l_2 = L - l_1 = L - \frac{ct_2}{2} \quad (21)$$

3. 실험

Fig. 3은 핀홀 위치별로 음향신호를 확보할 수 있도록 구성한 모사실험 장치로서, 공기가 핀홀을 통과하면서 발생하는 유체소음 대신에 스피커를 핀홀별로 설치하여 관내부로 음이 방사되도록 하였다. 관 길이 $L = 2.24 \text{ m}$, 지름 $D = 0.067 \text{ m}$, 두께 $t_h = 0.005 \text{ m}$ 인 제원을 가지며, 스피커 위치를 $l_1 = 390 \text{ mm}$, $l_1 = 790 \text{ mm}$, $l_1 = 1,190 \text{ mm}$ 및 $l_1 = 1,590 \text{ mm}$ 로 변화시키면서 하류측에 설치한 1/4인치 마이크로폰으로 음향신호를 측정하였다. 음향 신호는 주파수 분석기의 신호발생기에서 발생되어 증폭기를 거쳐 증폭된 다음, 스피커를 통해 관내로 공급된다. 소음측정 및 주파수 분석범위는 10 kHz, 주파수 간격은 1.5625 Hz 그리고 샘플링 레코드의 길이는 0.64 sec로 설정하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 핀홀 두께 $t_h = 3 \text{ mm}$ 그리고 핀홀 위치 $l_1 = 790 \text{ mm}$ 로 고정시킨 상태에서 핀홀 지름을 $d_h = 1 \text{ mm}$, $d_h = 3 \text{ mm}$, $d_h = 5 \text{ mm}$ 그리고 $d_h = 7 \text{ mm}$ 로 변화시키

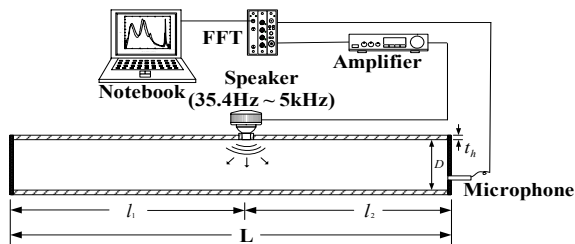


Fig. 3 Experimental simulator for detecting the sound emitted from a pinhole.

면서 음압진폭 $p_2(t)$ 를 계산한 결과이다. 계산결과에서 피크 진폭의 크기가 양(+)의 피크에 해당하는 시간은 모두 $t_2 = 4.64844(\text{msec})$ 로서, 상류측에서 핀홀까지의 거리 $l_1 = 7 \text{ mm}$ 의 위치에서 음향신호가 탐지되는 것을 확인할 수 있다. 특히 핀홀 지름이 커질수록 피크 진폭의 크기가 크게 되는데, 이것은 핀홀 지름이 커질수록 음원의 음향 임피던스는 감소하기 때문이다.

Fig. 5는 핀홀 지름 $d_h = 3 \text{ mm}$ 그리고 핀홀 위치 $l_1 = 790 \text{ mm}$ 로 고정시킨 상태에서 핀홀 두께를 $t_h = 1 \text{ mm}$, $t_h = 3 \text{ mm}$, $t_h = 5 \text{ mm}$ 그리고 $t_h = 7 \text{ mm}$ 로 변화시키면서 음압진폭 $p_2(t)$ 를 계산한 결과이다. 이 결과에서도 피크 진폭의 크기가 양(+)의 피크에 해당하는 시간은 모두 $t_2 = 4.64844(\text{msec})$ 인 것을 확인할 수 있다. 또 핀홀 두께가 작아질수록 피크 진폭의 크기가 커지게 되는데, 이것 역시 핀홀 두께 t_h 가 작아질수록 음원의 음향 임피던스가 감소하기 때문이다.

Fig. 6은 핀홀 지름 $d_h = 3 \text{ mm}$ 그리고 핀홀 두께 $t_h = 3 \text{ mm}$ 로 고정시킨 상태에서 핀홀 위치를 $l_1 = 390 \text{ mm}$, $l_1 = 790 \text{ mm}$, $l_1 = 1,190 \text{ mm}$ 및 $l_1 = 1,590 \text{ mm}$ 로 변화시키면서 피크 음압을 계산한 결과이다. 계산결과에서 피크 음압이 양(+)의 피크 진폭에 해당하는 시간은 $l_1 = 390 \text{ mm}$ 인 경우가 $t_2 = 2.30469 \text{ msec}$, $l_1 = 790 \text{ mm}$ 의 경우는 $t_2 = 4.64844 \text{ msec}$, $l_1 = 1,190 \text{ mm}$ 인 경우 $t_2 = 7.03125 \text{ msec}$ 그리고 $l_1 = 1,590 \text{ mm}$ 인 경우, $t_2 = 9.3750 \text{ msec}$ 이

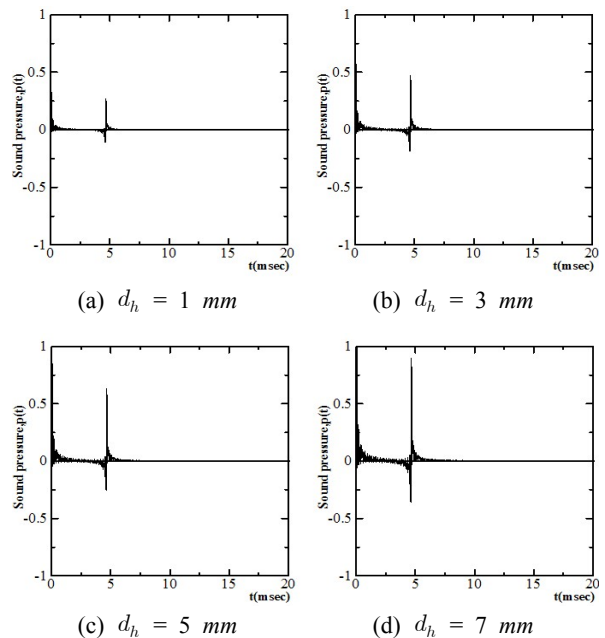


Fig. 4 Variation of the sound pressure amplitude calculated by changing the diameter of a pinhole.

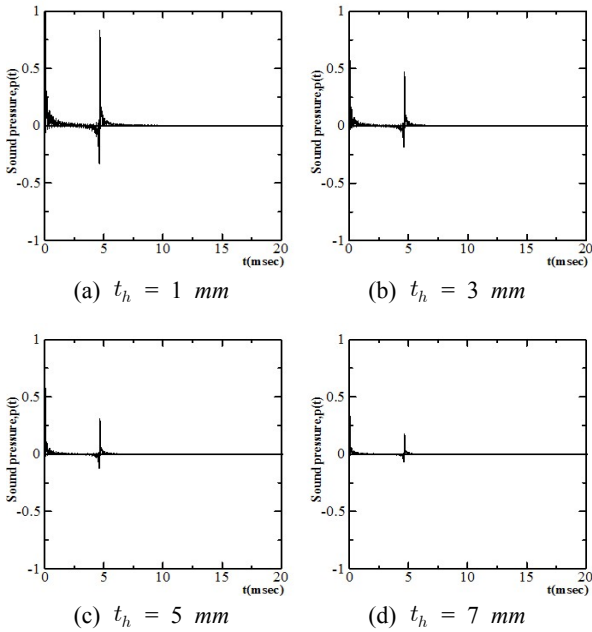


Fig. 5 Variation of the sound pressure amplitude calculated by changing the thickness of a pinhole.

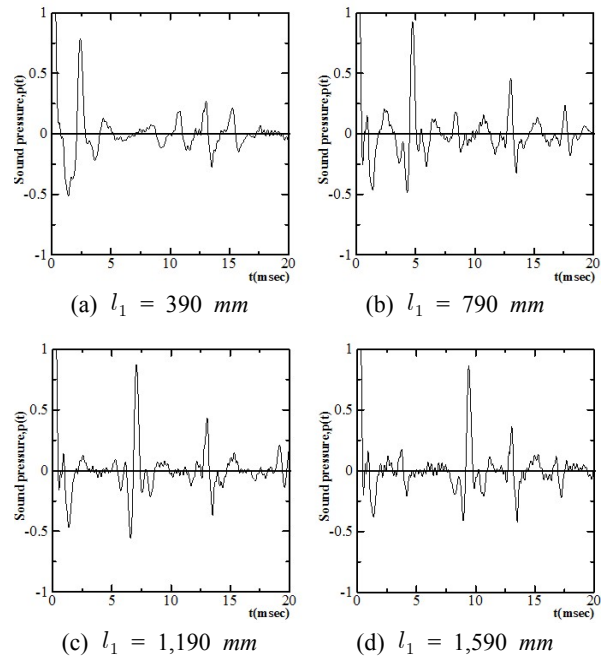


Fig. 7 Variation of the sound pressure amplitude measured by changing the location of a pinhole.

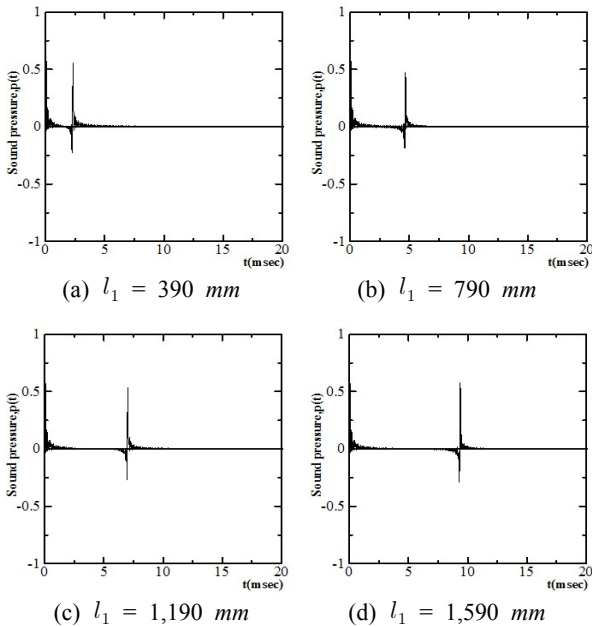


Fig. 6 Variation of the sound pressure amplitude calculated by changing the location of a pinhole.

었다. 양(+)의 피크 진폭에 해당하는 각각의 시간을 $l_1 = ct_2/2$ 에 대입하여 상류측에서 핀홀까지의 거리를

구하면 정확히 해당 위치까지의 거리와 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 핀홀 위치를 $l_1 = 390 \text{ mm}$, $l_1 = 790 \text{ mm}$, $l_1 = 1,190 \text{ mm}$ 및 $l_1 = 1,590 \text{ mm}$ 로 변화시키면서 상류측에 설치된 마이크로폰으로 스펙트럼을 측정하여 시간에 따른 피크진폭으로 나타낸 것이다. 결과로부터 양 (+)에 해당하는 1차 피크 진폭에 해당하는 시간은 $l_1 = 390 \text{ mm}$ 인 경우가 $t_2 = 2.30 \text{ ms}$, $l_1 = 790 \text{ mm}$ 의 경우는 $t_2 = 4.65 \text{ ms}$, $l_1 = 1,190 \text{ mm}$ 인 경우, $t_2 = 7.0 \text{ ms}$ 그리고 $l_1 = 1,590 \text{ mm}$ 인 경우, $t_2 = 9.38 \text{ ms}$ 이었다. 양(+)의 1차 피크 진폭에 해당하는 각각의 시간을 $l_1 = ct_2/2$ 에 대입하여 상류측에서 핀홀까지의 거리를 구하면 정확히 해당 위치까지의 거리와 일치하는 것을 알 수 있었다. 이외에도 측정결과에서는 1차 피크 진폭의 정수배에 해당하는 시간대에서 2차 피크 진폭에 해당하는 음향신호가 탐지되었다.

5. 결론

본 연구는 배관계의 가스누설탐지를 위한 음향모델을 수립하고, 실험결과와의 비교를 통하여 모델의 타당성을 확인하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 음향모델의 타당성 검증을 위해 핀홀의 두께와

지름을 변화시키면서 누설신호의 크기와 위치를 구한 계산결과로부터 핀홀의 지름이 커지고, 핀홀의 두께가 작을수록 핀홀에서의 음향임피던스 감소로 인하여 피크 음압 진폭이 증가하는 것을 확인하였다.

(2) 음향모델의 타당성 검증을 위해 배관계의 핀홀 위치를 변화시키면서 핀홀까지의 거리를 구한 계산결과와 실험결과는 잘 일치하였다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 일부 지원으로 수행되었습니다.

Reference

1. Lee, D. H, Seo, E. S., Lee, J. W., Kim, H. J., and Lee, H. S., 2010, A development of acoustical model for detecting gas leakage on a piping system, Proceedings of the KSNVE Conference, pp. 764-765.
2. Lee, D. H, Seo, E. S., Lee, J. W., and Koh, J. P., 2010, An experiment for detecting gas leakage on a piping system using acoustic method, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 242-243.
3. Dooly, R. B. and Chexal, V. K., 2000, Flow-accelerated corrosion of pressure vessels in fossil plants, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 77, pp. 85-90.
4. Wassef, W. A., Bassim, M. N., Houssny-Emam, M., and Tangri, K., 1985, Acoustic emission spectra due to leaks from circular holes and rectangular slits, J. Acoust. Soc. Am, pp. 916-923.
5. Kim, M. S., Lee, S. K., Jang, S. Y., and Koh, J. P., 2008, Identification on principle of acoustic wave propagation characteristics in a gas pipe, Journal of KSNVE, Vol. 18 No. 8, pp. 797-804.
6. Kim, M. S., Lee, S. K., Jang, S. Y., and Koh, J. P., 2008, Acoustic wave propagation characteristics corresponding to the cut-off frequency in gas pipeline, Journal of KSNVE, Vol. 18 No. 7, pp. 693-700.
7. Watanabe, K. and Himmelblau, D. M., 1986, Detection and location of leak in a gas-transport pipeline by a new acoustic method, AIChE Journal, Vol. 32, No. 10, pp. 1690-1701.
8. Munjal, M. L., 1987, Acoustics of Duct and Mufflers, John Wiley and Sons, pp. 75-85.