

가스 배관 내부의 음파 전달 특성에 관한 연구

Identification on Principle of Acoustic Wave Propagation Characteristics in a Gas Pipe

김민수* · 이상권† · 장상엽** · 고재필***

Min-Soo Kim, Sang-Kwon Lee, Sang-Yup Jang and Jae-Pil Koh

(2007년 11월 6일 접수 ; 2008년 6월 9일 심사완료)

Key Words : Gas Pipe(가스배관), Wave Propagation(음파전달), Cut-off Frequency(차단주파수), Correlation Method(상관성기법), Time-frequency Analysis(시간-주파수 분석법)

ABSTRACT

In the gas supply pipe, the gas leakage caused by the impact of the construct equipment is serious problem. The identification of the impact position is an important issue and an engineering work. For the basic research of this problem, the principle studies for the acoustic wave propagation in a gas pipe are proceeded in this paper. This principal work is based on the identification of the cut-off frequency associated with major modes of the gas pipe theoretically and experimentally. The cut-off frequency is confirmed by STFT and cross-correlation function is used to identify the leakage position.

1. 서 론

매설되어 있는 배관에서 가스 누출은 폭발 위험을 갖고 있을 뿐만 아니라 국가 경제적으로 에너지 손실이라는 측면에서 볼 때, 꼭 생각해 보아야 할 문제이다. 그러므로 매설되어 있는 가스 배관의 손상으로 인한 누출 위치를 찾는 것은 매우 중요한 일이다. 일반적으로 가스 배관 손상으로 인한 가스 누출의 가장 큰 원인은 건설 현장에서 건설 장비의 충격이다. 이러한 건설 장비의 충격은 가스 배관 내에 충격파를 발생 시키게 되는데, 이 충격파는 가스 배관의 가이드라인을 따라 전파하게 된다. 이때 전파되는 충격음은 배관의 기하학적 형상에 따라 전파 특성을 갖게 된다. 이러한 전파 특성을 이용하여 충

격음의 위치를 시간과 주파수 특성 분석을 통해 추적할 수 있게 된다.

이미 많은 연구⁽¹⁻⁶⁾에서 배관 내의 음향 전파 특성에 대해 밝힌 바 있다. 특히 배관의 반지름 방향의 기하학적 특성에 의해 발생하는 차단 주파수 (cut-off frequency)는 음파의 전파에 있어서 상당히 큰 영향을 미친다. 차단 주파수에 의한 주요 특성은 차단 주파수 이상의 주파수들은 에너지를 전파할 수 있고 그 이하의 주파수들은 감쇠를 하게 되는 것이다. 이 연구에서는 이러한 차단 주파수를 이론적으로 구하고 이를 시간-주파수 분석법(time-frequency analysis)⁽⁹⁾을 이용하여 확인을 하였다. 그리고 TMM(two microphone method)을 이용하여 얻어진 시간에 따른 음압을 상관성 기법(correlation method)⁽¹⁰⁾을 이용하여 충격 위치를 추적하였다.

† 교신저자: 정희원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : sangkwon@inha.ac.kr
Tel : (032)860-7305, Fax : (032)868-1716

* 정희원, 인하대학교 기계공학과

** 한국가스공사 연구개발원

*** 정희원, 한국가스공사 연구개발원

2. 음향 전파 특성 이론

2.1 배관 내 음향 파동 방정식

배관 내에서 음향 파동 방정식은 원통 좌표계를 이용하여 표현할 수 있다^(7,8).

$$\nabla^2 \varphi(t, \mathbf{r}) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \varphi(t, \mathbf{r}) = 0 \quad (1)$$

여기서 $\varphi(t, \mathbf{r})$ 은 속도 퍼텐셜, $\mathbf{r} = (r, \theta, z)$ 은 원통 좌표계에서 공간 벡터, c 는 음속을 나타낸다. 각각의 공간 벡터와 파수는 Fig. 1과 같다. 식 (1)로부터 축 방향으로 길이가 무한한 강체벽 조건을 가진 속도 퍼텐셜 근을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\varphi(t, \mathbf{r}) = \sum_{m,n=0} A_{mn} J_m(k_{r_{mn}} r) \cos(m\theta) e^{jk_{z_{mn}} z} e^{-j\omega t} \quad (2)$$

식 (2)에서 반지름 방향 파수($k_{r_{mn}}$)는 배관 벽에서 수직 방향으로 입사속도가 '0'이 되는 경계조건을 통해 구할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial r} (J_m(k_{r_{mn}} r))_{r=a} = 0 \quad (3)$$

식 (2)에서 z축 방향 파수($k_{z_{mn}}$)는 일반적으로 다음과 같이 표현할 수 있다. 그리고 파수는 주파수와 음속의 관계식으로 $k = 2\pi f / c$ 이다.

$$k_{z_{mn}} = \pm (k^2 - k_{r_{mn}}^2)^{1/2} \quad (4)$$

그리고 A_{mn} 은 음향 모드 각각의 진폭 크기를 나타낸다. m 과 n 에 의해 나타나는 모드 형상은 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\varphi(r, \theta) = J_m(k_{r_{mn}} r) \cos(m\theta) \quad (0 < r < a) \quad (5)$$

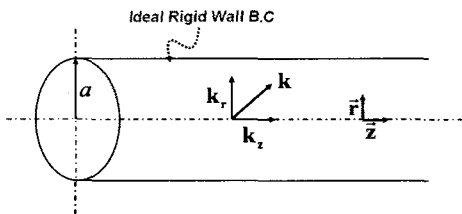


Fig. 1 Boundary condition & wave number of the pipe

Fig. 2는 배관에서 음향 모드 형상⁽²⁾을 나타내는 데, m 은 지름 방향의 노드 개수를 나타내고 n 은 원주 방향의 노드 개수를 나타낸다.

여기서 각각의 (m,n) 모드는 차단 주파수와 같이 생각할 수 있다. 만일 식 (4)에서 파수 k 의 주파수가 충분히 크다면, $k = \omega/c > k_{r_{mn}}$ 이 되고 $k_{z_{mn}} > 0$ 이 되어 (m,n) 모드는 배관을 따라 전파하게 된다. 그리고 $k = k_{r_{mn}}$ 이고 $k_{z_{mn}} = 0$ 인 차단 주파수에서는 (m,n) 모드에서 축방향으로 전파가 일어나지 않는다. 또, $k < k_{r_{mn}}$ 인 경우 $k_{z_{mn}}^2 < 0$ 이 된다. 이때 음향 모드 (m,n) 은 전파되지 않고 음압은 음원으로부터 멀어질 지수적으로 감쇠하게 된다.

식 (4)에서부터 지금까지 살펴본 차단 주파수와 파수와의 관계는 배관 내부의 유체가 정적인 경우에 해당되는 식이다. 일반적으로 배관 내부에 유체가 일정한 유속 V 로 유동하는 경우의 파수는 다음과 같다⁽¹⁾.

$$k_{z_{mn}} = \frac{-Mk \pm \sqrt{k^2 - k_{r_{mn}}^2 (1 - M^2)}}{1 - M^2} \quad (6)$$

여기서 M 은 마하수(mach number)를 나타내고 $M = V/c$ 로 표현된다. 식 (6)에 의한 차단 주파수는

$$k = k_{r_{mn}} \sqrt{1 - M^2} \quad (7)$$

과 같이 표현된다. 식 (7)에서 차단 주파수에 대한 표현은 앞서 표현된 정적인 경우 차단 주파수가 $k = k_{r_{mn}}$ 이 되는 경우와 비교해 볼 때, 마하수에 의해 그 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 가스

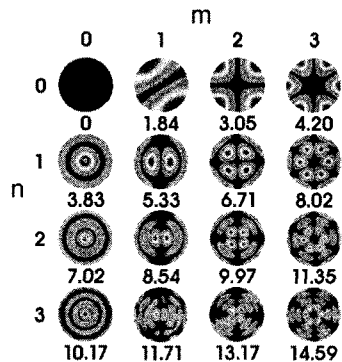


Fig. 2 Acoustic mode shape of a pipe

배관에서는 유속이 약 20 m/s 이하로 유지되고 있고 실제로는 약 4 m/s이다^(11,12). 그리고 가스에서 음속은 438 ± 2 m/s이다⁽¹³⁾. 마하수는 $M \approx 0.009132$ 가 된다. 결국 식(7)에서 나타나는 차단 주파수는 $M^2 \approx 0$ 이 되어 정적인 경우에서 차단 주파수와 같게 된다. 그러므로 가스 배관 내 차단 주파수를 결정하는 경우 배관 내 정적 유체가 있는 경우의 식을 써도 무방하게 된다.

식(4)와 파수와 음속의 관계를 이용하면 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$C_{g_{mn}} = c \sqrt{1 - (f_{r_{mn}} / f)^2} \quad f \geq f_{r_{mn}} \quad (8)$$

$$C_{p_{mn}} = c / \sqrt{1 - (f_{r_{mn}} / f)^2} \quad f \geq f_{r_{mn}} \quad (9)$$

여기서 식(8)은 (m,n) 모드의 군속도(group speed)를 나타내고 식(9)는 (m,n) 모드의 위상속도(phase speed)를 나타낸다.

Table 1 Theoretical cut-off frequencies of a steel pipe(diameter = 106 mm, sonic speed = 343.4 m/s)

Cut-off frequencies : $f_{r_{mn}}$ (Hz)					
$m \backslash n$	0	1	2	3	4
0	0	3952	7243	10493	13743
1	1898	5499	8811	12082	15331
2	3147	6923	10286	13588	16869
3	4333	8274	11710	15053	18354
4	5489	9574	13082	16466	19809

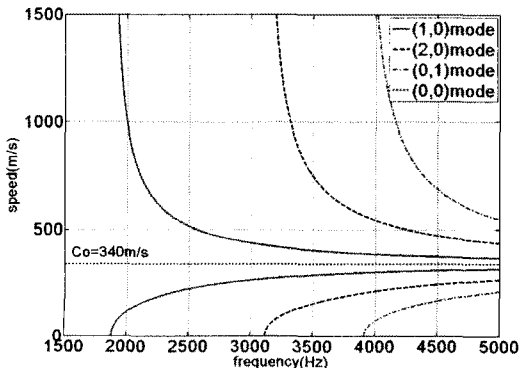


Fig. 3 Group speed and phase speed of (1,0), (2,0), (0,1) modes

위와 같은 차단 주파수 특성을 이용하여 길이 1000 mm, 내경 106 mm, 두께 4 mm를 갖는 강철 배관의 (m,n) 모드의 차단 주파수를 식(4)를 이용하여 구하면 Table 1과 같고 식(8), 식(9)를 이용한 군속도와 위상속도를 구하면 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 c_0 아래 그래프는 군속도를 나타내고 위의 그래프는 위상속도를 나타낸다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 에너지의 전파를 나타내는 군속도는 차단 주파수에서 '0'이 되는 것을 볼 수 있다. 그리고 주파수에 따라 그 속도가 달라지는 분산(dispersive)현상도 볼 수 있다.

2.2 실험 결과 데이터

실제 배관은 매우 길기 때문에 배관 내부 음파의 전파에 대한 연구를 하기에 어려움이 따른다. 그러

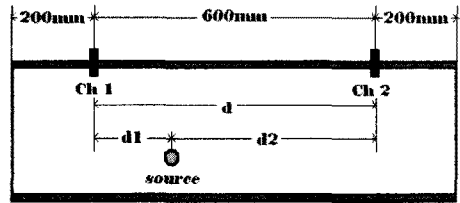


Fig. 4 Experiment pipe size and acoustic source

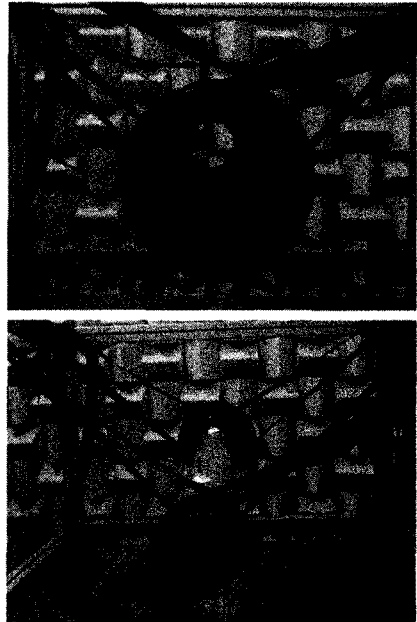
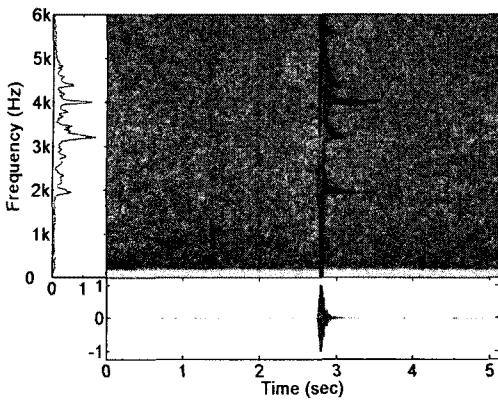
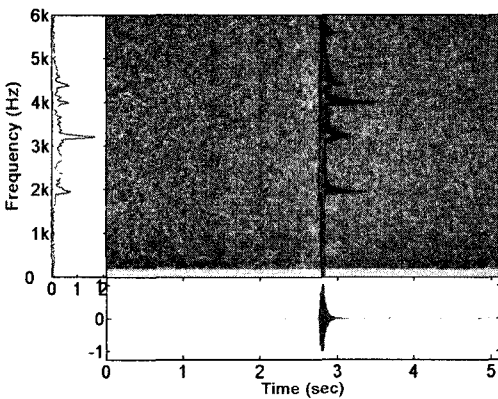


Fig. 5 Picture of the installed pipe in an anechoic room



(a)



(b)

Fig. 6 Response of sensors using STFT (a) sensor1 (b) sensor2

므로 Fig. 4와 같은 배관을 무향실에 설치하여 차단 주파수에 의한 배관 내 음파 전달 특성을 살펴보고자 하였다.

무향실에 설치된 배관은 음원으로부터 발생하는 음압이 배관 자체를 진동시켜 발생시키는 구조음(structure borne sound)의 영향을 최소화시키기 위해 양단 끝을 고무로 고정시켰다. 발생하는 음원은 100 Hz에서 5 kHz까지의 선형 주파수 변조 신호(linearly swept frequency signal)를 주었고, 배관 내에서 위치를 조작할 수 있도록 만들었다. 보다 자세한 실험 사진은 Fig. 5와 같다. Fig. 6은 센서 1과 센서 2에서 측정된 데이터를 이용하여 STFT(short time Fourier transform)방법^(9,14)을 이용하여 나타낸 그림이다.

Fig. 7은 식 (8), 식 (9)를 이용하여 나타낸 군속도와 위상속도의 이론값과 무향실 실험값의 비교 그래

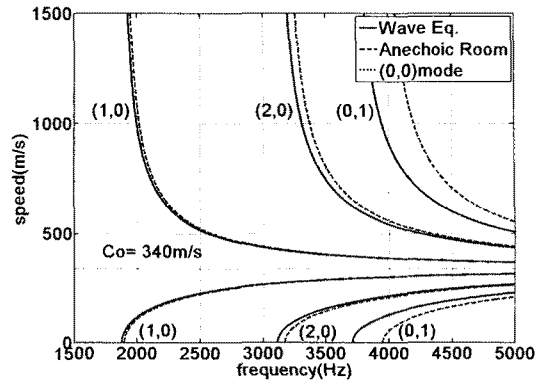


Fig. 7 Comparison between group speed and phase speed of theoretical data and those of anechoic room data

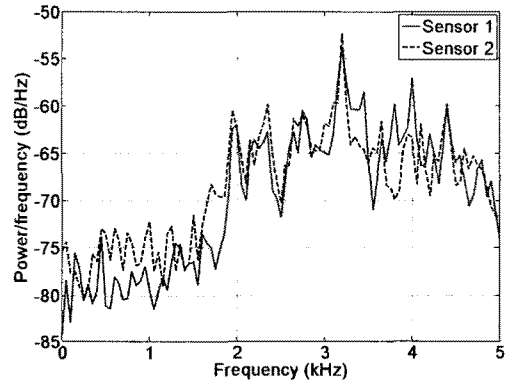


Fig. 8 PSD of sensor1 and sensor2

프를 나타낸다. 모드 (1,0)에서는 그 값의 차이가 유사하나 모드가 증가할수록 그 격차가 커짐을 볼 수 있다. Fig. 8은 기존의 차단 주파수를 파악할 때 사용하던 PSD(power spectrum density) 그래프이다. Fig. 6은 Fig. 8보다 각 모드에서 나타나는 차단 주파수에 대한 인식을 보다 잘 할 수 있으며 시간에 따른 분산 특성도 실시간으로 판단하기 용이하다.

지금까지 실험을 바탕으로 실제 매설되어 있는 가스 배관에서의 음압 특성을 살펴본 그래프는 Fig. 9와 같다. Fig. 9의 결과는 힘을 가한 지점에서 약 8 km 떨어진 위치에서 측정된 결과이다. 그리고 실제 배관의 직경이 30in.이고 이에 대한 차단 주파수 특성은 Table 2에 나타나 있다.

Table 2에서 살펴본 이론적 차단 주파수의 특성과 Fig. 9에서 실제 배관의 충격 실험을 통해 나타난 차단 주파수 특성은 (1,0)모드와 (0,1)모드 특성이 잘

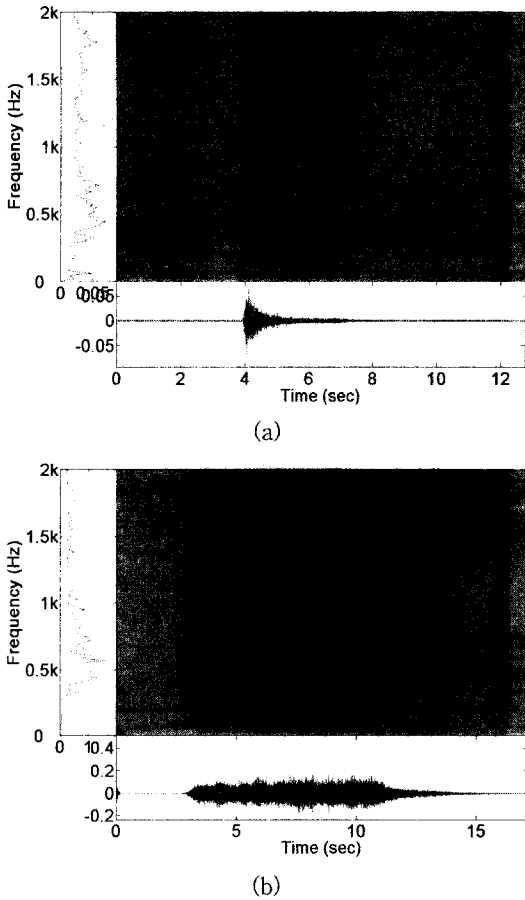


Fig. 9 Impact test of real gas pipe (a) weight (b) hammer drill

Table 2 Theoretical cut-off frequencies of a buried real gas pipe. (diameter = 30in ≈ 762 mm, sonic speed = 436 m/s)

Cut-off frequencies: f_{rnm} (Hz)					
$m \backslash n$	0	1	2	3	4
0	0	698	1279	1853	2427
1	335	971	1556	2134	2708
2	556	1223	1817	2400	2979
3	765	1461	2068	2659	3242
4	969	1691	2311	2908	3499

일치하는 것을 볼 수 있다. 그리고 앞서 살펴본 분산 특성 역시 실제 배관에서 차단 주파수 특성을 갖는 부분에서 뚜렷이 나타나는 것을 볼 수 있다. 그 결과는 Table 3에 나타내었다. 여기서 (2,0)모드의 특성이 실제 배관에서 잘 나타나지 않은 것을 확인

Table 3 Comparison between experimental and theoretical cut-off frequencies

Mode	Theory	Experiment	Error
(1,0)	335 Hz	380 Hz	11.8 %
(2,0)	556 Hz	- Hz	- %
(0,1)	698 Hz	664 Hz	5.12 %

할 수 있는데 이는 길이방향으로 에너지 전파가 (1,0)모드와 (0,1)모드에 비해 (2,0)모드가 잘 되지 않는 것으로 판단된다. 그리고 어느 정도 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있는데 이 또한 여러 가지 물리적 물성치가 관여하기 때문이다.

3. 신호처리

3.1 충격 신호의 특성

실제 지하에 매설되어 있는 배관에서 신호를 측정할 때, 상당히 많은 배경 소음이 함께 측정된다. 특히 도로 아래를 지나는 배관은 자동차 소음 또는 다른 지상의 충격음이 함께 측정되기도 한다. 이와 같은 소음과 실제 누출에 의해 발생하는 신호는 반드시 구분되어야만 한다. 그러기 위해서는 앞 절에서 설명한 배관 내 음향 특성을 고려할 필요가 있다. Fig. 10은 Fig. 8의 PSD 그래프를 보다 광대역에서 이 경우를 나타내고 약 1900 Hz에서 5000 Hz 사이에 에너지의 밀집이 이루어져 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 11은 두 센서간의 코히어런스(Coherence)를 나타내는데 거의 1에 가까운 것을 볼 수 있다. Fig. 10과 Fig. 11을 종합하여 에너지가 밀집되어 있어 잘 확인할 수 있고 코히어런스가 우수한 1900 Hz에서 5000 Hz 대역을 대역 통과 필터(band pass filter)를 사용하였다.

3.2 누출 신호의 위치 추적

Fig. 10의 데이터를 이용하여 상관 기법을 사용한 음원의 위치 추적을 위한 개략적인 그림은 앞에서 본 Fig. 4와 같다. 여기서 센서1에서 d_1 만큼, 센서2에서 d_2 만큼 떨어진 위치에 있는 음원의 위치는 다음과 같은 식을 이용하여 구할 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$R_{s_1}(\tau) = E[s_1(t)s_2(t + \tau)] \quad (10)$$

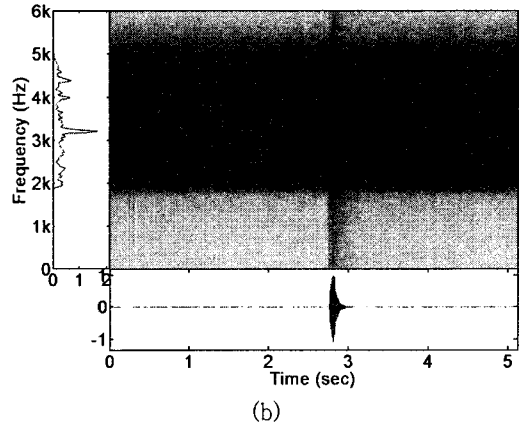
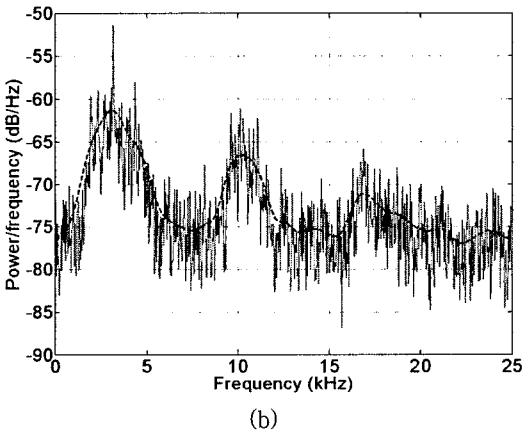
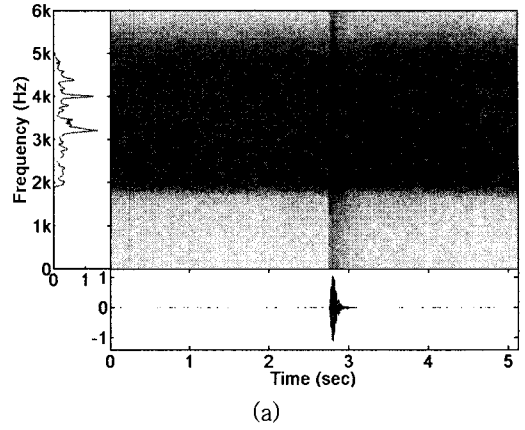
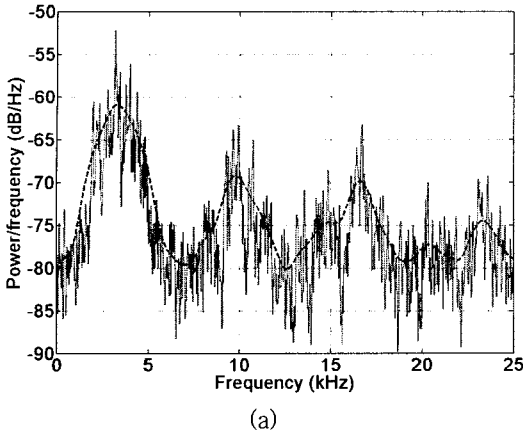


Fig. 10 PSD (a) sensor1 (b) sensor2(--- : trend line)

Fig. 12 Filtered signal (a) sensor1 (b) sensor2

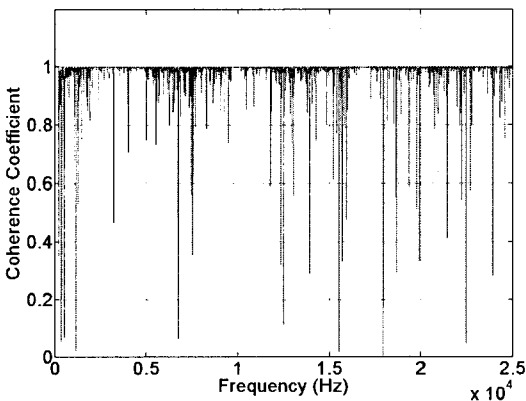


Fig. 11 Coherence between sensor1 and sensor2

식 (10)은 센서1과 센서2의 상호상관관계 함수 (cross correlation function)이고 여기서 $s_1(t)$ 와 $s_2(t)$ 는 센서1과 센서2에서 측정된 랜덤 신호를 나타낸다. 그리고 τ 는 식 (10)에서 얻어진 최대값으로

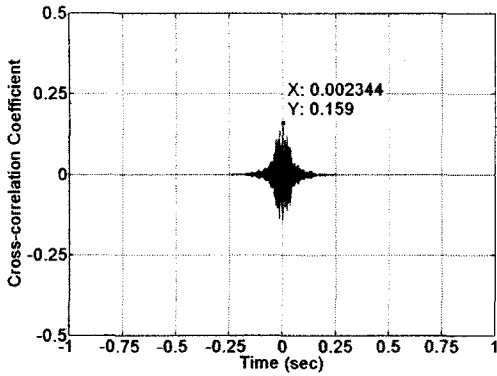
구해지는 시간 지연 값을 나타낸다. 식 (10)에서 얻어진 데이터를 정규화된 형태로 표현하기 위해 각각 센서에서 얻어진 자기상관관계 함수(auto correlation function)의 최대값을 이용한다.

$$\rho_{s_1s_2}(\tau) = \frac{R_{s_1s_2}(\tau)}{\sqrt{R_{s_1s_1}(0)R_{s_2s_2}(0)}} \quad (11)$$

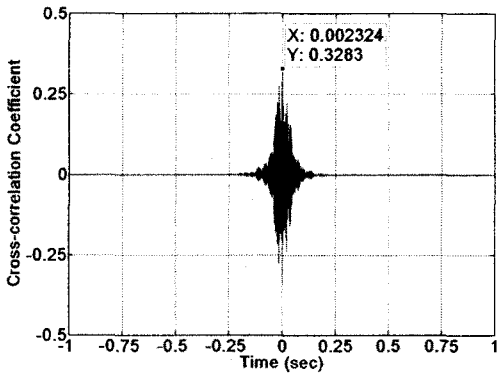
식 (11)은 정규화된 상호상관관계 함수이고 $R_{s_1s_1}(0)$ 과 $R_{s_2s_2}(0)$ 는 자기상관관계 함수의 최대값이다. 식 (10)과 식 (11)로부터 얻어진 τ 값을 이용하여 두 센서 사이에 존재하는 음원의 위치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d_1 = \frac{d - c\tau}{2} \quad (12)$$

식 (12)에서 c 는 음파의 전파 속도이다. 여기서



(a)

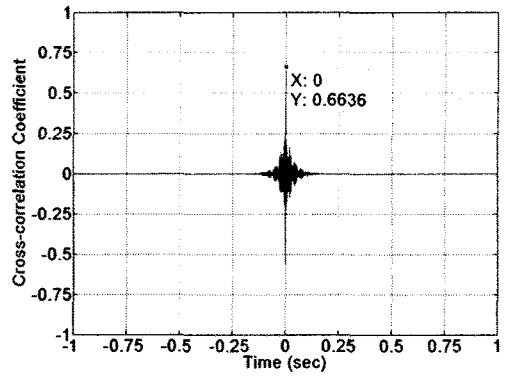


(b)

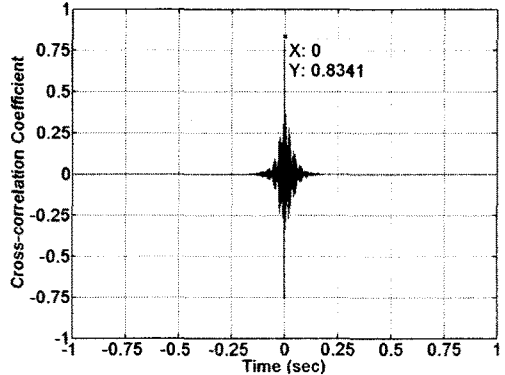
Fig. 13 Cross-correlation when $d_1 = 10$ cm (a) filtered data (b) raw data

c 값은 상온 20°C 기준으로 343.4 m/s이다. 이 연구에서는 식 (12)의 검증에 위해 d_1 값이 10 cm인 경우와 30 cm인 경우를 이용하여 검증하였다. 그리고 1900 Hz에서 5000 Hz 대역을 대역 통과 필터를 이용하여 식 (10)의 시간 지연 값을 구하였고 식 (12)를 이용하여 d_1 값을 구하였다. Fig. 12는 무향실에서 수행한 실험 결과를 바탕으로 센서1로부터 10 cm 떨어진 지점에서 음원을 주었을 때 얻어진 STFT 그래프를 대역 통과 필터를 적용했을 때 그림이다.

여기서 대역 통과 필터 사용 전 후의 데이터에 대한 상호상관관계 함수를 통한 시간 지연 값은 Fig. 13에 나타내었다. 그리고 Fig. 14는 센서1로부터 30 cm 떨어진 위치에서 음원을 주었을 때 센서1과 센서2의 상호상관관계 그래프를 나타낸다. Fig. 13의 시간 축을 비교해 보면 (a)에서는 0.002344초이고 (b)에서는 0.002324초가 되는 것을 볼 수 있다. 두 값을 식 (12)에 대입하면 (a)의 경우는 10.24 cm, (b)



(a)



(b)

Fig. 14 Cross-correlation when $d_1 = 30$ cm (a) filtered data (b) raw data

의 경우는 9.91 cm를 얻게 된다. 각각에 대한 오차는 (a)는 2.4%, (b)는 0.9%가 된다.

Fig. 14의 시간 축은 (a)와 (b) 둘 다 '0'초에 있는 것을 볼 수 있다. 그리고 식 (10)에 의해 계산된 값도 둘 다 같음을 알 수 있다. 여기서 다른 점은 (b)에서 상호상관관계의 최대값이 더 큰 것을 알 수 있다.

4. 결 론

이 논문에서는 배관 내 음파 전달 특성을 이론적, 실험적인 방법으로 알아보았다. 배관 내부를 강제 경계조건으로 결정하여 얻은 차단 주파수는 배관 내부에서 음파가 전달될 때 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 특히 균속도와 위상속도가 차단 주파수에 의해 영향을 받으면서 주파수에 따른 분산 특성을 살펴볼 수 있었다. 이러한 특성은 실제 무향실 실험에서 실험한 결과, STFT를 이용한 그림에서

그 결과의 일치성을 알 수 있었다. 또한 실제 매설되어 있는 가스 배관에서 그 특성이 잘 나타나는 것을 확인하였다. 이와 같은 이론적 실험적 결과를 바탕으로 배관 내부에 음원을 주었을 때 그 음원의 위치를 찾는 실험을 수행하였다. 배관 내 음원의 위치를 찾을 때 상호상관관계 함수를 이용하여 최대값의 시간 차이를 이용하여 그 위치를 추적하였는데, 음압 센서를 통해 얻은 실험값을 음압 전파 특성을 잘 나타내는 대역인 1900Hz에서 5000Hz를 대역 통과 필터를 이용하여 상호상관관계 함수를 적용했을 때 결과가 필터를 사용하지 않았을 때보다 더 음원의 위치에 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

이 논문에서 알아본 배관 내 음압 전파 특성 중 차단 주파수에 의한 음압 전파 특성은 배관에 가해진 충격 위치를 탐지 하는데 있어 주요 목표 대역이 되는 것을 알 수 있다.

후 기

이 연구는 한국가스공사(KOGAS) 연구개발원의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Mason, V., 1969, "Some Experiments on the Propagation of Sound along a Cylindrical Duct Containing Flowing Air", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 10, pp. 208~226.

(2) Eriksson, L. J., 1980, "Higher Order Mode Effects in Circular Order Mode Effects in Circular Ducts and Expansion Chamber", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 68, No. 2, pp. 545~550.

(3) Junger, M. C., 1952, "The Physical Interpretation of the Expression for an Outgoing Wave in Cylindrical Coordinates", *Journal of the Acoustic Society of America*, Vol. 25, pp. 40~47.

(4) Fuller, C. R. and Fahy, F. J., 1982, "Characteristics of Wave Propagation and Energy Distributions in Cylindrical Elastic Shells Filled with Fluid", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 81, No.

4, pp. 501~518.

(5) Muggleton, 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*, Vol. 249, No.5, pp. 939~954.

(6) Muggleton, J. M., Brennan, M. J. and Linford, P. W., 2004, "Axis Symmetric Wave Propagation in Fluid Filled Pipes: Wavenumber Measurements in Vacuo and Buried Pipes", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 270, pp. 171~190.

(7) Kinsler, L. E., 1999, "Fundamental of Acoustics 4th Edition", John Wiley & Sons, Inc., New York.

(8) Munjal, M. L., 1987, "Acoustics of Ducts and Mufflers with Application to Exhaust and Ventilation System Design, Vibration Testing", John Wiley & Sons, Inc., New York.

(9) Lee, S. K., 2002, "An Acoustic Decay Measurement Based on Time-frequency Analysis Using Wavelet Transform", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 252, No. 1, pp. 141~152.

(10) Gao, Y., Muggleton, J. M., Brennan, M. J., Joseph, P. F. and Hunaidi O., 2005, "On the Selection of Acoustic/vibration Sensors for Leak Detection in Plastic Water Pipes", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 283, No. 927~941.

(11) Beggs, H. D., 1991, "Production Optimization", Oil&Gas Consultants International Inc., 129.

(12) Kumar, S., 1987, "Gas Production Engineering", Gulf Publishing Company, pp. 284~285.

(13) Burstein, L., Ingman, D. and Michlin, Y., 1999, "Correlation between Gas Molecular Weight, Heating Value and Sonic Speed under Variable Compositions of Natural Gas", *ISA Transactions*, Vol. 38, pp. 347~359.

(14) Lee, S. K. 2007, "Acoustics and Vibration Signal Processing and its Theory and Application", *Journal of KSNVE*, Vol. 17 No. 1, pp. 9~15.