

연속웨이브렛 변환을 이용한 충격음 위치 규명

김의열* · 김민수* · 이상권*† · 고재필**

* 인하대학교 기계공학과, ** 한국가스공사 연구개발원

CWT-Based Method for Identifying the Location of the Impact Source in Buried Pipes

Eui Youl Kim*, Min Su Kim*, Sang Kwon Lee*† and Jae Pil Koh

* Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.,

** School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

(Received August 17, 2009 ; Revised August 11, 2010 ; Accepted August 19, 2010)

Key Words : Continuous Wavelet Transform(연속웨이브렛), Impact Location(충격위치), Acoustic Wave(음향파), Duct(덕트), Dispersive Wave(분산파)

초록: 본 연구에서는 지하에 매설된 가스 파이프에 가해진 충격의 위치를 탐지하기 위한 개선된 방법을 제시하고 있다. 가스 파이프에서 가스 누출은 건설 기계 장비에 의한 기계적 충격에 의해 발생하며, 가스 이송 산업계에 치명적인 재해를 발생시킬 수 있다. 이와 같은 문제를 초기에 발견하고 조치를 취하기 위해 기존에는 충격 위치 탐지를 위해 상관 관계 기법이 사용되어 왔다. 하지만, 외부 충격에 의해 파이프 따라 전파되는 음향파의 분산 특성은 양쪽 센서에 측정되는 도착 시간을 사용하여 센서 사이에 도착 시간 지연을 예측하는데 상당한 에러를 발생시킬 수 있다. 그래서 이 논문에서는 분산파 대신 직접파의 도착 시간 지연을 측정하기 위해 웨이블렛 기법을 사용하였다. 제안된 방법은 지하에 매설된 실제 가스 파이프에서 측정된 음향 신호에 적용하여 기존의 상관 관계 기법에 비해 외부 충격 위치를 추정하는데 보다 효과적임을 확인하였다.

Abstract: This paper presents a new method for indentifying the location of impact source in a buried duct. In a gas pipeline, the problem of leakage occurs due to the mechanical load exerted by construction equipment. Such leakage can cause catastrophic disasters in gas supply industries. Generally, the cross-correlation method has been used for indentifying the location of impact source in a pipeline. Since this method involves the use of the dispersive acoustic wave, it derives an amount of error in process of estimating the time delay between acoustic sensors. The object of this paper is to estimate the time delay in the arrival of the direct wave by using the wavelet transform instead of the dispersive wave. The wavelet transform based method gives more accurate estimates of the impact location than the cross-correlation method does. This method is successfully used to identify the location of impact force in an actual buried gas duct.

1. 서 론

배관의 건전성을 유지하기 위한 노력은 산업시설 곳곳에서 진행되고 있다. 특히 산업시설 내에 존재하는 배관 내부를 유동하는 유체가 휘발성이 있거나 폭발의 우려가 있는 경우에는 이러한 위험을 사전에 방지하고자 많은 인적, 물적 자원을 투입하게 된다. 이와 같은 노력을 위해 여러 가지 연구가 방법이 사용되고 있다.^(1,2)

일반적으로 잘 알려진 방법으로는 배관에서 누

출되는 열수가 지하에서 열 층을 형성하고 확산되어 지표에 도달할 때 열 추적 카메라로 촬영하여 지표의 열 분포 상태를 판독, 누수 지점을 확인하는 열 분포 사진 분석법(Thermograph), 배관의 임의의 두 측정 지점간에서 누수가 발생시키는 음파를 측정하여 측정지점까지의 음파가 도달하는 시간차를 분석하여 누수지점을 확인하는 상관관계방법(Correlation Method), 임펄스 레이더(Radar Impulse)의 반사작용을 응용하여 누수 지점을 확인하는 임펄스 측정방법(Impulse Measurement), 배관 내부에 감지회로를 내장하여 수분의 침투 또는 회로의 단락을 저항 비교 측정기를 이용하여 결함부의 위치를 확인하는 저항 측정 방법(Resistivity Measurement) 등이 존재한다.

† Corresponding Author, sangkwon@inha.ac.kr
© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

첫 번째로 열 분포 상태를 관독하여 누출의 위치를 탐지하는 방법은 배관 내부에 고온의 유체가 존재하는 경우로 한정되고 만일 그 유체가 위험물질인 경우에는 사후 처리에 많은 어려움이 따르게 된다. 그리고 열 분포의 특성을 살펴야 하는 측면에서 누출 탐지 범위가 매우 국부적이게 된다. 두 번째 방법으로 임펄스 측정 방법과 저항 측정 방법의 경우 배관을 제작하는 과정에서 임펄스 신호를 측정하는 알람 와이어(Alarm Wire)를 함께 해야 하며 이는 시설 비용 측면에서 부담으로 작용할 수 있다. 그리고 알람 와이어의 길이 제약 문제가 존재하여 일반적으로는 1,000m 정도마다 새로운 와이어를 사용해야 한다. 그리고 매설된 후에 와이어가 손상이 된 경우 이를 연결하여 복구하는 과정에서 있어 여러 가지 어려움이 따르게 된다. 세 번째는 상관관계방법으로 배관 내부에 발생한 누출 신호의 음압 특성을 이용하여 두 센서에 측정되는 음압의 시간차를 이용하여 누출 위치를 찾는 방법이다. 이 방법은 배관 내부의 유체에 대한 충분한 이해와 배관 내부에 전파되는 음파의 전달 특성에 대해 조사를 하지 않으면 많은 오차가 발생할 수 있다.

기존의 여러 연구에서는 배관 자체에 균열이 발생하여 이 균열에 의해 누출 신호가 발생한 것을 바탕으로 배관 내 외부에서 신호를 측정하여 그 위치를 파악하였다. 특히 J. F. Doyle⁽³⁾의 연구에서는 빔 구조물의 주파수 분석(spectral analysis)을 통해 구조물에 가해진 충격의 위치를 찾았고 S. K. Lee 와 A. Mal⁽⁴⁾은 평판에 가해진 충격의 위치를 시간 데이터를 CWT(continuous wavelet transform)을 통해 시간-주파수 기법을 바탕으로 충격의 위치를 찾았다. 여기서 고체파를 이용한 누출 및 충격 위치 추적은 고체파의 빠른 감쇠 특성과 배관 자체에 용접이나 다른 개스킷, 볼트 등에 의해 신호의 오염이 발생할 수 있다는 단점이 존재한다. 그 결과 Y. Gao 등⁽⁵⁾은 플라스틱 배관에서의 누출 신호를 이용하여 음파와 고체파의 특성을 바탕으로 상관관계기법(correlation method)을 이용하여 위치의 특성을 찾았다. 특히 음파 전달 특성이 고체파 전달 특성보다 더 유용함을 검증함으로써 음파를 통한 전달 특성의 효율성을 나타내었다. 하지만 상관관계기법을 통한 위치 추적은 배관 내부를 따라 전파되는 음파의 전파 특성을 파악할 수 없다. 그리고 배관 내부의 음파 전달 특성을 파악할 때 측정하는 모든 신호를 바탕으로 위치를 추적하는 것은 오차를 발생 시킬 수 있게 된다.

위와 같은 여러 가지 연구를 바탕으로 본 연구에서는 가스가 유동하고 있는 배관에 외부에 충격이 가해졌을 때 이 충격의 위치를 찾는 것을 이론적, 실험적으로 검증할 것이다. 일반적으로 배관 자체의 균열에 의해 발생하는 신호를 이용하여 누출 위치를 추적하게 되는데 본 연구에서는 고압, 인화성 유체를 이송하는 배관이 균열에 의해 고압으로 누출되는 경우 자연 발화가 되는 것을 사전에 방지하고자 배관 손상에 지대한 영향을 미칠 것으로 예상되는 타 공사 시의 배관 외부 충격에 관한 위치를 추적하고자 한다. 또한 사전 연구⁽⁶⁾인 상관관계기법을 통해 단순히 두 센서간의 시간차이에 의해 위치를 추적한 것에서 보다 개선된 방법으로 배관 내 음파 전달 특성을 이용하여 CWT를 적용하고 이를 통해 각각 주파수들의 위치 특성을 살펴볼 것이다.

2. 음파전달특성 이론

2.1 배관에서 음향 파동 방정식

배관 내부의 음파를 이용하여 배관의 건전성을 모니터링 하기 위해서는 우선 배관 내부의 음파 전달특성을 이해할 필요가 있다. 배관 내 음파 전달특성은 실린더 좌표계를 사용하는 삼차원 선형 파동 방정식은 식 (1)과 같이 구현할 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. 1 과 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 입자속도가 '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 z 축 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. m과 n에 의해 나타나는 모드 형상은 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

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

Fig. 2는 배관에서 음향 모드 형상⁽⁹⁾를 나타내는데, m은 지름 방향의 노드 개수를 나타내고 n은 원주 방향의 노드 개수를 나타낸다. 여기서 각각의 (m,n)모드는 차단 주파수와 같이 생각할 수 있다. 만일 식 (4)에서 파수 k의 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 $k_{z_{mn}} < 0$ 이 된다. 이때 음향 모드(m,n)은 전파되지 않고 음압은 음원으로부터 멀어질수록 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 V로 유동하는 경우의 파수는 다음과 같다.⁽¹⁰⁾

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

여기서 M은 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. 일반

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

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

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

여기서 식 (8)은 (m,n)모드의 군속도(group speed)를 나타내고 식 (9)는 (m,n)모드의 위상 속도(phase speed)를 나타낸다. 위와 같은 차단 주파수 특성을 이용하여 길이 1000mm, 내경 106mm, 두께 4mm를 갖는 강철 배관의 (m,n)모드의 차단 주파수를 식 (4)를 이용하여 구하면 Table 1과 같다.

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

Cut-off frequencies: $f_{r_{mn}}$ (Hz)					
m \ n	0	1	2	3	4
0	0	3878	7109	10298	13488
1	1863	5397	8648	11858	15048
2	3088	6795	10096	13336	16556
3	4253	8121	11493	14774	18015
4	5387	9397	12840	16161	19442

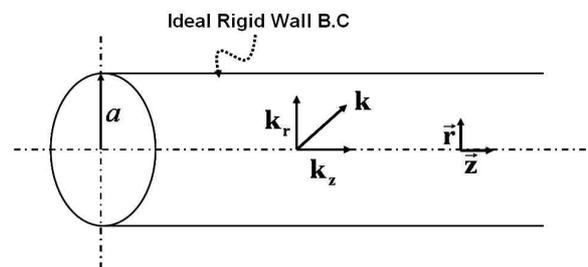


Fig. 1 Boundary condition & wave number of the pipe

그리고 식 (8), 식 (9)를 이용하여 각각의 모드에 대한 군속도와 위상속도를 구하면 Fig. 3 과 같다. Fig. 3 에서 c_0 아래 그래프는 군속도를 나타내고 위의 그래프는 위상속도를 나타낸다. 위 그래프에서 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.

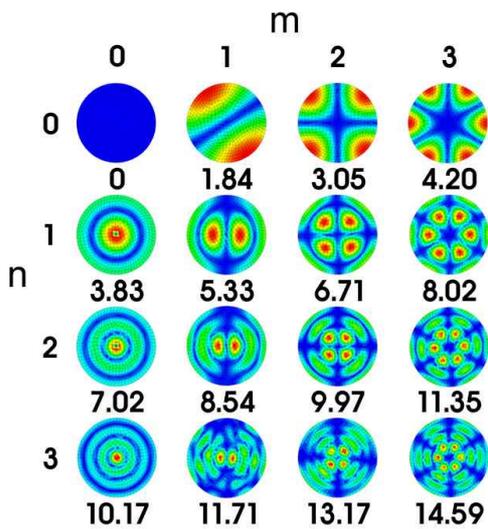


Fig. 2 Acoustic mode shape of a pipe

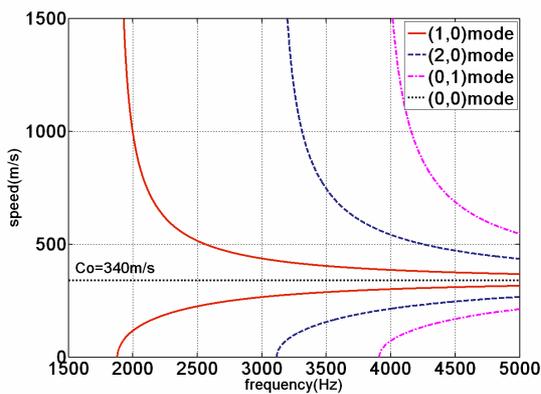


Fig. 3 Group speed and phase speed of (1,0), (2,0), (0,1) modes

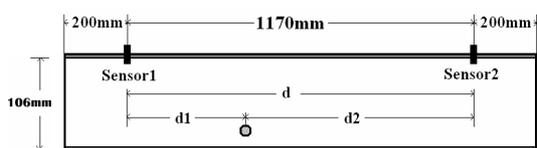


Fig. 4 Experiment pipe size and acoustic source

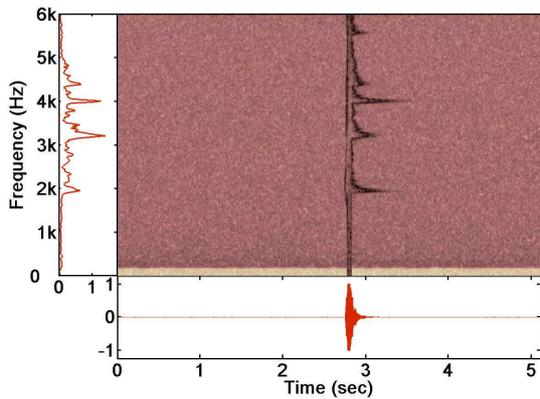
2.2 음파전달특성 검증

앞서 살펴본 배관 내 음파전달특성 중 Table 1 에서 살펴본 차단 주파수의 특성을 실험적 검증을 위해 무향실에서 Fig. 4 와 같은 배관을 이용하여 실험을 수행하였다. Fig. 4 에서 음원은 100Hz 에서 5kHz 까지 선형 주파수 변조 신호(linearly swept frequency signal)를 사용하였고 직경 40mm 스피커를 이용하여 배관 내부에서 발생시켰다. 마이크로폰은 Fig. 4 에서 보는 바와 같이 배관에 구멍을 뚫어 삽입하였다. 센서 1 과 센서 2 에서는 LMS.CADA-X 의 Signature Monitor 를 이용하여 시간 데이터를 측정하였고 주파수 분석에는 MATLAB 을 사용하였다. 보다 자세한 실험 사진은 Fig. 5 와 같다. Fig. 6 은 센서 1 과 센서 2 에서 측정된 데이터를 이용하여 STFT(short time fourier transform)방법⁽¹⁴⁾을 이용하여 나타낸 그림이다.

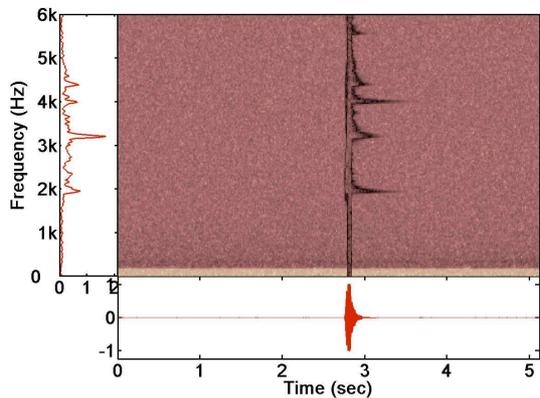
Fig. 6 의 결과를 살펴보면 센서 1 과 센서 2 에서 모두 (1,0)모드는 1900Hz, (2,0)모드는 3175Hz 그리고 (0,1)모드는 3950Hz 에 나타나는 것을 볼 수 있다. 각 모드에서 차단 주파수들은 Table 1 에서 이론적으로 구한 차단 주파수와 어느 정도의 차이를 보이고 있는데 이것은 Table 1 에서 차단 주파수는 단순히 파이프의 기하학적 형상에 의존하여 그 값이 결정되었고 실험에 의한 차단 주파수는 파이프의 재질이나 온도 같은 물리적 물성치가 연관되어 있기 때문이라 본다. 그러나 오차가 최대 3.4%인 것을 볼 때, 그 경향성은 거의 일치한다고 볼 수 있다. Fig. 7 은 식 (8), 식 (9)를 이용하여 나타낸 군속도와 위상속도의 이론값과 무향실 실험값의 비교 그래프를 나타낸다. 모드 (1,0)에서는 그 값의 차이가 유사하나 모드가 증가할수록 그 격차가 커짐을 볼 수 있다. Fig. 8 은 기존의 차단 주파수를 파악할 때 사용하던 PSD(power spectrum density) 그래프이다.



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



(a)



(b)

Fig. 6 Response of sensors using STFT (a) sensor 1 (b) sensor 2

Fig. 6 은 Fig. 8 보다 각 모드에서 나타나는 차단 주파수에 대한 인식을 보다 잘 할 수 있으며 시간에 따른 분산 특성도 실시간으로 판단하기 용이하다. 지금까지 살펴본 무향실 내 배관에 대한 차단 주파수 특성을 실제 매설되어있는 가스 배관에서 그 특성을 살펴보았다. 실제 매설되어있는 배관은 직경이 30in 이고 유속은 4m/s 이다. 그리고 가스에서 음속은 436m/s 이다. 실제 실험 사진은 Fig. 9 와 같고 결과 그래프는 Fig. 10 과 같다. Fig. 10 의 결과는 힘을 가한 지점에서 약 8km 떨어진 위치에서 측정된 결과이고 이에 대한 차단 주파수 특성은 Table 2 에 나타나 있다. Table 2 에서 살펴본 이론적 차단 주파수의 특성과 Fig. 10 에서 실제 배관의 충격 실험을 통해 나타난 차단 주파수 특성은 (1,0)모드와 (0,1)모드 특성이 잘 일치하고 있다. 그리고 앞서 살펴본 분산 특성 역시 실제 배관에서 차단 주파수 특성을 갖는 부분에서 뚜렷이 나타나는 것을 볼 수 있다. 여기서 (2,0)모드의 특성이 실제 배관에서 잘 나타나지 않은 것을 확인할 수 있는데 이는 길이 방향으로 에너지 전파가

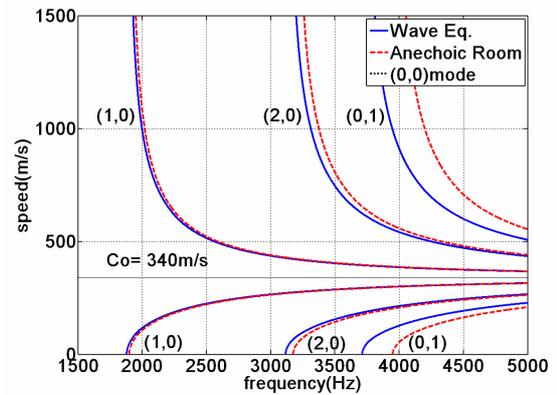


Fig. 7 Comparison between group speed and phase speed of theoretical data and anechoic room data

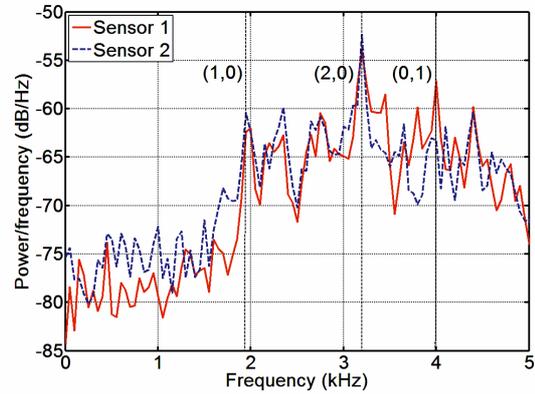


Fig. 8 PSD of sensor1 and sensor2

(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

지금까지 배관 내 음파전달특성에 대한 이론적 내용을 살펴보고 분산 특성과 밀접한 차단주파수를 실험적으로 검증하였다. 여기에서는 앞서 살펴본 음파 전달 특성에 관한 이론적 내용을 기반으로 STFT, CWT⁽¹⁵⁾를 이용하여 충격음의 위치를 탐지하는 방법을 논할 것이다. 그리고 상호상관관계 함수를 이용하여 위치를 추적⁽⁶⁾하는 것은 사전연구를 통해 밝힌 바 있고 그 결과만을 본 연구에서 인용할 것이다.

일반적으로 웨이블릿 변환은 충격과 신호가 가지고 있는 특성을 잘 표현하기 위해 사용되는 신호처리 기법으로 window의 사이즈를 조절하여 고주파에서는 시간 분해능을 증가시키고 저주파에서

는 주파수 분해능을 증가시킨다. 그러나 불확실성의 원리는 여전히 존재한다. 따라서 저주파에서는 주파수 분해능이 나빠지고 고주파에서는 시간 분해능이 감소한다. 웨이블릿 변환에 대한 수학적 표현은 다음의 식과 같다.

$$WT_{\psi}\{x\}(a,b) = \int_R x(t)\psi_{a,b}^*(t)dt \quad (10)$$

여기서 모웨이블릿 함수 $\psi(t)$ 는 식 (11), (12)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 a 는 스케일 변수로 양수이고 크기를 결정한다. 다시 말해 모웨이블릿 함수의 확장과 주파수 영역에서의 대역폭 이동을 결정해준다. b 는 어떠한 실수를 나타내고 시간축의 이동되는 정도를 나타낸다. 일반적으로 모웨이블릿은 Fig. 11 과 같이 여러 가지 종류가 존재한다. 본 연구에서 사용되는 모웨이블릿 함수는 모아렛 웨이블릿으로써 Fig. 11 에서 (b)에 해당된다.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (11)$$

$$\psi(t) = \exp\left(-\frac{c_0^2}{2}t^2\right)\exp(j2\pi f_0 t) \quad (12)$$

위와 같은 기본 CWT 에 대한 이론을 바탕으로 시간과 주파수 상의 분해능(resolution)의 한계를 개선해 볼 것이다. 이를 위해 우선 도입하는 것은 2.1 절에서 살펴본 식 (8)과 식 (9)에 의한 음파전달속도에 관한 이론이다. 일반적으로 배관에 음파전달을 측정함에 있어 많은 노이즈가 발생하게 된다.

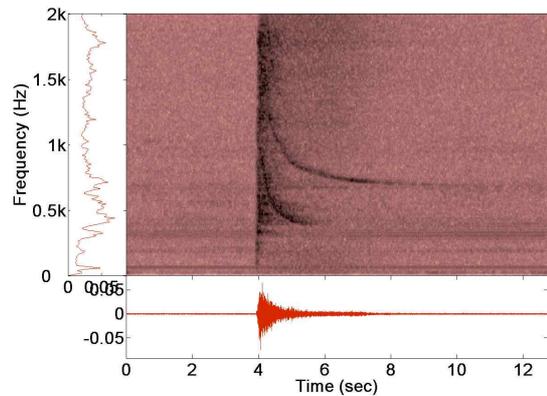
Table 2 Theoretical cut-off frequencies of a buried real gas pipe. (diameter = 30in \approx 762mm, sonic speed = 436m/s)

Cut-off frequencies: f_{mn} (Hz)					
m \ 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

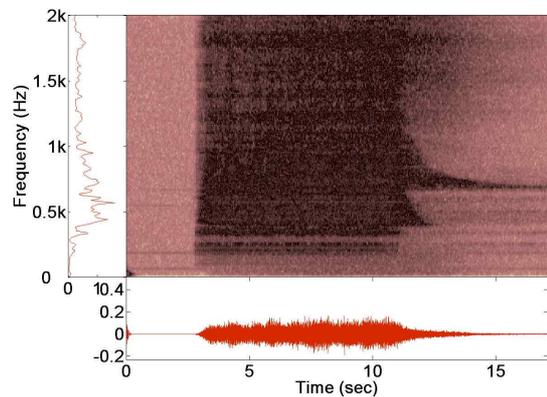
이러한 노이즈들은 대부분 저주파 부분에 발생하게 되어 배관의 형상에 의해 결정되는 차단주파수의 (1,0)모드 이하에 발생하게 된다. 본 연구에서는 이러한 특성에 착안하여 (1,0)모드와 (2,0)모드 사이의 평면파 특성을 갖는 대역을 충격음 위치 추적에 사용할 것이다. 이에 대한 분석 진행 절차는 Fig. 12 에 나타내었다. 그리고 CWT 를 위해 사용된 배관의 특성은 Fig. 4 에 나타내었다.



Fig. 9 A buried real gas pipe test



(a)



(b)

Fig. 10 Impact test of real gas pipe (a) Weight (b) Hammer drill

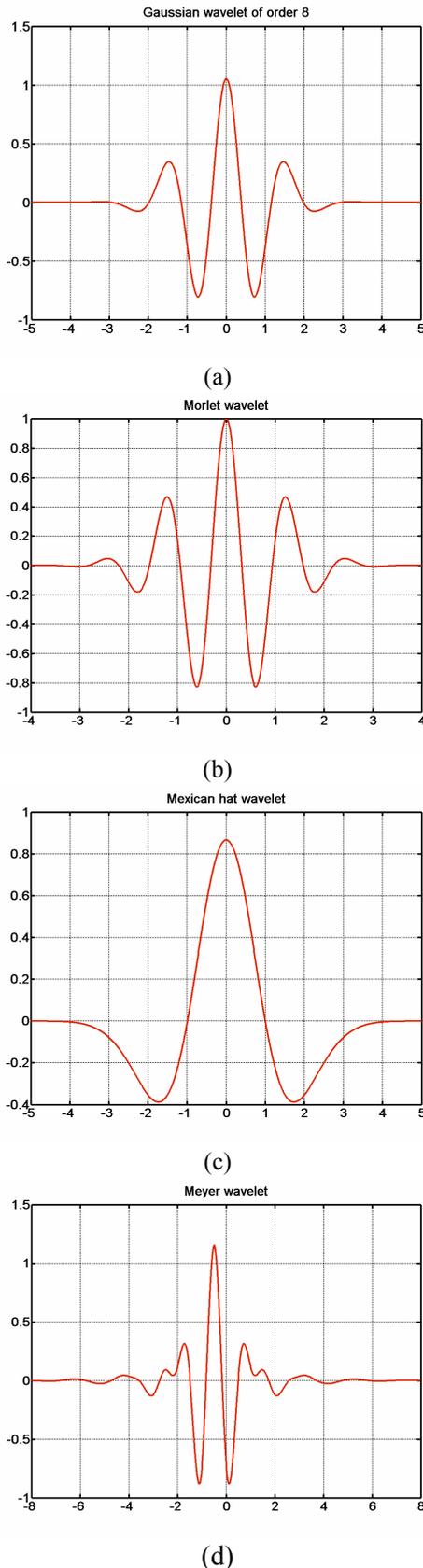


Fig. 11 Examples of mother wavelet (a) Gaussian (b) Morlet (c) Mexican hat (d) Meyer

여기서 음원의 위치를 일정하게 설정하여 d_1 을 630mm 로 두었고 d_2 는 540mm 로 정하였다. 그리고 음원은 2.2 절에서 수행한 방법과 동일하다. 본 연구에서 모웨이브렛의 대역폭 이동을 나타내는 b 값은 1 로 설정하였고 스케일변수는 데이터를 1024 개를 커버할 수 있도록 설정하였다. 그 결과 시간 분해능(time resolution)은 약 $0.1 \cdot e^{-4} \text{sec}$ 를 나타내었고 주파수 분해능(frequency resolution)은 약 1.66Hz 를 나타내었다. 이는 STFT 에 비교해 매우 우수한 것을 확인할 수 있다. 또한 분해능의 불확실성을 줄이는 방안으로 관심 대역 상하로 약 1000Hz 씩을 여유 있게 필터링 하였다.

Fig. 13 에서 Fig. 15 은 각각 모드를 갖는 대역 사이에 평면파를 갖는 부분의 음속을 실험적으로 구한 결과를 보여준다. 위 결과들의 주요 사항은 (1,0)모드와 (2,0)모드 이상의 모드 사이 평면파 대역에서 음파전달속도는 예측하기 어렵다는 것을 파악할 수 있다. 이것은 Fig. 3 과 Fig. 7 에서 밝힌 바와 같이 모드의 중첩으로 인해 음속이 다 변화 되는 것을 의미한다. 결국 배경 소음의 영향을 덜 받을 수 있고 또한 모드의 중첩을 최소화 시킬 수 있는 (1,0)모드와 (2,0)모드의 사용이 최적의 선택이라는 것을 보여주는 것이다.

우선 (1,0)모드와 (2,0)모드 특성을 예측하기 전에 CWT 의 특성상 많은 컴퓨터를 이용하여 많은 시간이 소모되는 것을 피하기 위해서 실제 측정된 신호를 (1,0)모드와 (2,0)모드 대역을 band pass filter 를 이용하여 필터링을 수행하였다.

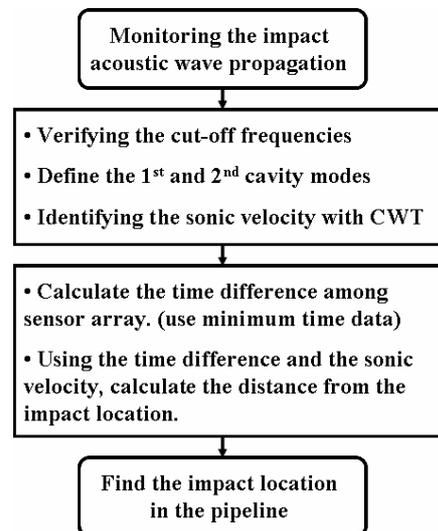


Fig. 12 The logic of verifying the impact location with CWT(continuous wavelet transform)

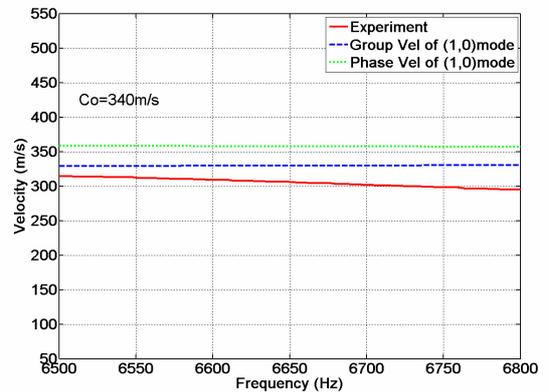
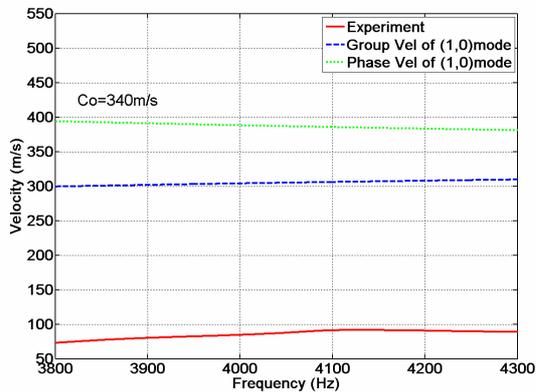
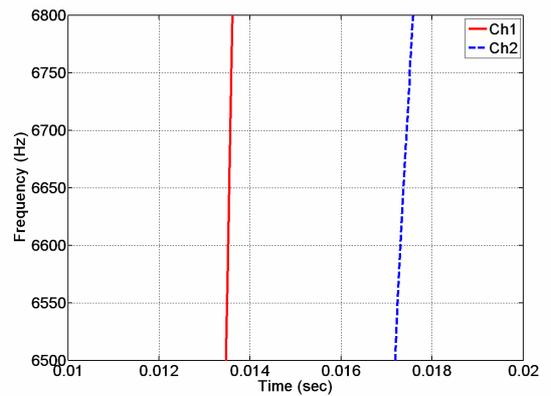
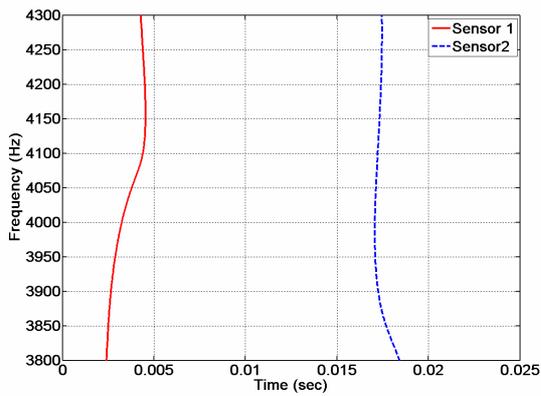
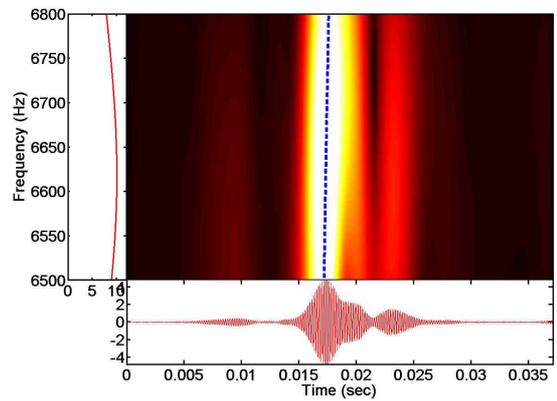
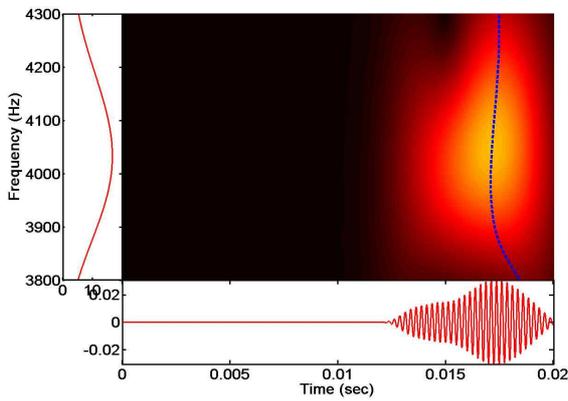
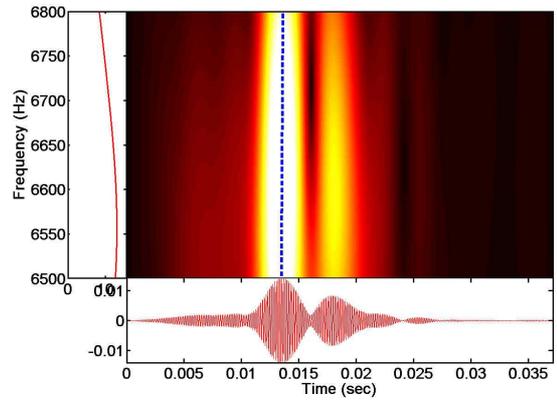
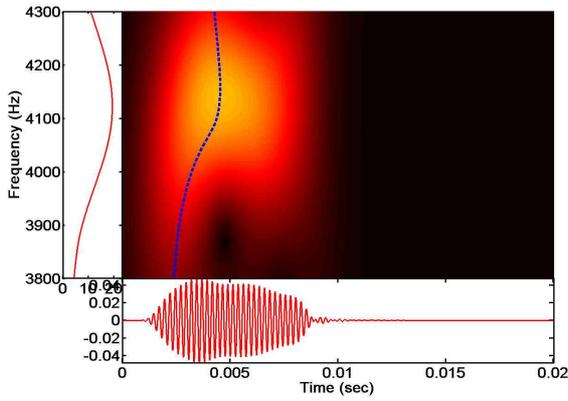


Fig. 13 the experimental sonic speed expectation between (0,1) and (3,0) mode

Fig. 14 the experimental sonic speed expectation between (5,0) and (2,1) mode

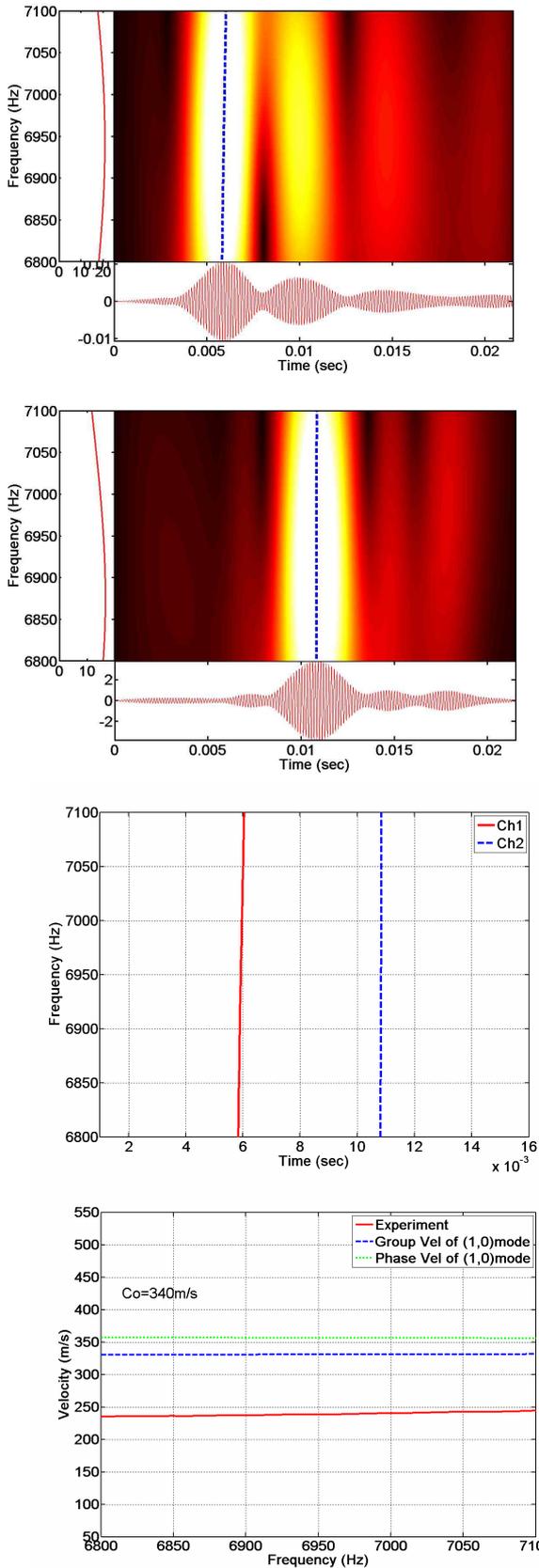


Fig. 15 the experimental sonic speed expectation between (2,1) and (0,2) mode

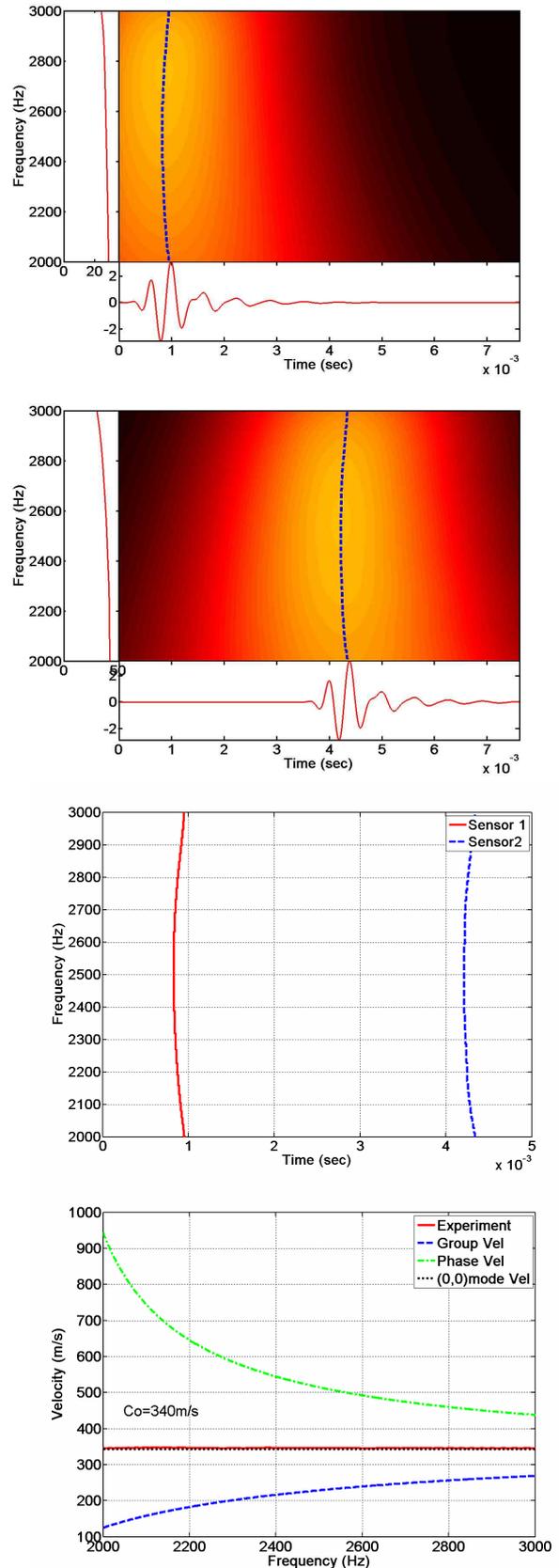


Fig. 16 The experimental sonic speed expectation between (1,0) and (2,0) mode

(1,0)모드와 (2,0)모드의 wave front 데이터를 이용하여 CWT 를 수행한 결과는 Fig. 16 와 같다. Fig. 16 에 나타난 결과를 살펴보면 실험에 의해 결정된 음속의 값이 약 343±2m/s 로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 3 에서의 결과 값과 유사함을 확인할 수 있다. Fig. 16 에서 결정된 음속 값을 이용하고 식 (13)을 이용하여 Fig. 16 에서 보여진 배관에서 수행한 충격음의 음원을 찾는 과정을 수행하면 Fig. 1 과 같은 결과를 얻게 된다.

$$d_1 = \frac{d - c\tau}{2} \tag{13}$$

Fig. 17 는 주파수 영역에 따라 약간의 오차가 존재함을 보여준다. 센서 1 과 센서 2 사이에 최대 오차는 약 4.2mm 이며 평균 오차는 1mm 이다. 이는 전체 파이프 길이에 대해 약 0.064%의 오차이며 Table 3 에서 볼 수 있듯이 기존 상관관계기법에 비해 작은 오차 값을 가진다. 그리고 시간 값 이외에 내부 주파수 특성까지 볼 수 있기 때문에 이 결과는 앞으로 배관의 건전성 평가 시스템 구축에 있어 큰 장점이 될 수 있다.

Table 3 Comparison between correlation method and CWT method (the number in the blank is original length from the acoustic source)

Method	Result from sensor1	Error
Correlation	9.91cm (10cm)	0.9% ¹⁾
CWT	63±0.01cm (63cm)	0.02%

⁺ Correlation method: Reference (6)

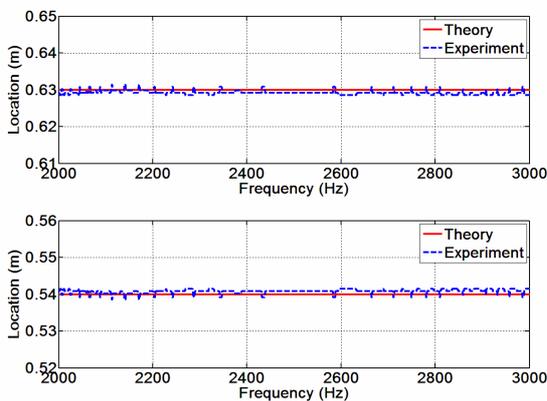


Fig. 17 The results of identifying the acoustic source location using CWT method. (a) is from sensor 1 and (b) is from sensor 2

4. 결 론

배관 내 음파전달특성을 이용하여 여러가지 신호처리 기법을 적용해 충격음의 위치를 찾는 과정을 수행하였다. 이론적으로 배관 내 음파전달특성 중 배관의 기하학적 형상에 의해 결정되는 차단주파수를 알 수 있었고 이를 실험을 통해 검증하였다. 기존의 연구에서 상호상관관계 기법을 이용하여 충격음의 위치를 추적하였으나 상호상관관계함수를 이용한 경우 배관 내부의 음파전달특성을 파악할 수 없었고 주파수 별로 전파 특성을 알 수 없었다. 하지만 본 연구인 CWT 를 통해서는 (1,0) 모드와 (2,0)모드 사이에 평면파 특성을 갖는 경우를 바탕으로 모드 대역사이의 주파수 별 음속을 분석할 수 있었고 또한 음원의 위치를 상호상관관계함수의 경우보다 정확하게 예측할 수 있었다. 앞으로 본 연구의 결과는 충격음의 예측뿐만 아니라 비파괴 분야에 파동 전파특성의 예측과 정확한 파손 및 충격점 위치 예측에 도움이 될 것이다.

후 기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (No.2009-0084728), (No.2010-0014260).

참고문헌

- (1) Farahnak, S. D., et al, 2000, "Understanding Line Leak Detection Systems," *State Water Resources Control Board, California Environmental Protection Agency*.
- (2) Lee, T. S., 1993, "A Review on the Leak Detection System," *Daewoo Engineering & Construction Technology Magazine*, Vol. 10, No. 1.
- (3) Martin, M. T. and Doyle, J. F., 1996, "Impact Force Location in Frame Structures," *Int. J. Impact Engng*, Vol. 18, No. 1, pp. 79~97.
- (4) Lee, S. K., Banerjee, S. and Mal, A., 2007, "Identification of Impact Force on a Thick Plate Based on the Elastodynamic and Higher-Order Time-Frequency Analysis," *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 221, No. 11, pp. 1249~1263.
- (5) 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. 3~5, pp. 927~941.
- (6) Kim, M. S., Lee, S. K. and Kim, S. J., 2008,

- “Identification of Impact Force on the Gas Pipe Based on Analysis of the Acoustic Wave,” *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 22, No. 9, pp. 1039~1044.
- (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) 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.
- (10) Mason, V., 1969, “Some Experiments on the Propagation of Sound along a Cylindrical Duct Containing Flowing Air,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 10, No. 2, pp. 208~226.
- (11) Beggs, H. D., 1991, *Production Optimization*, *Oil & Gas Consultants International Inc.*, Vol.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., 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.
- (15) Lee, S. K., 2007, “Acoustic and Noise Signal Processing and Its Application,” *Journal of Sound and Vibration Magazine*, Vol. 17, No. 1, pp. 9~15.