

〈論 文〉

# 단위 충격 응답함수를 이용한 원형관 시스템의 누출감지 연구

## Leak Detection of Circular Piping Systems by Using Unit Impulse Response Function Analysis

전 오 성\* · 윤 병 옥\* · 김 창 호\*\*

Jun Oh Sung, Yoon Byung Ok and Kim Chang Ho

〈1994년 4월 11일 접수 ; 1994년 8월 23일 심사완료〉

### ABSTRACT

A method of the leak detection from the pipe system by using accelerometer is proposed. The signal detected from accelerometer is proved experimentally to be a dispersive wave. Based on the experiments, a method using the narrow band pass filter and the unit impulse response function is analyzed. The method uses the characteristics of the unit impulse response function, that the function is available even in the narrow band signal because, unlike the cross correlation, it is normalized by the auto spectrum. The accelerometer is quite easier to use than the hydrophone in adapting to the pipe system.

### 1. 서 론

유체의 수송과 이동에 대부분 활용되고 있는 원형관(circular pipe) 시스템에서의 유체누출은 유체수송 공정의 안정성과 최저조업의 측면에서 불때 정확한 진단이 필요한 매우 중요한 변수이다. 누출의 정도는 배관내부를 흐르는 유동유체의 물성과 유속등 유동상태에 의존하며, 가장 일반적인 진단은 유동배관 내부 압력의 이상유무를 관측이나 또는 배관 시스템의 진단위치에 유량계를 설치하는 방법이 있다. 그러나 일반적인 화학공장이나 정유공장 등의 대단위 공정에서 수백 km에 달하는 전체 공정 배관에 상대적으로 고가적인 유량감지 시스템을 장착하여 감시하기에는 비용과 효율면에서 매우 비관적이며, 더우기 이동성이 없어 여러부분의 이동진단이 거의 불가능하고, 누출위치를 찾는 데도 공간적 분해능이 매우 떨어지는 단점을 갖고 있다.

연속신호의 경로해석을 위해 cross correlation function을 이용한 방법이 쓰이고 있다<sup>(1)</sup>. 이 기법은 비교적 단순한 경로를 갖는 비분산전달파(nondispersive propagation wave)에 쉽게 적용될 수 있는데, 유체배관의 경우 단순전파경로(simple propagation path)를 갖는 시스템이기 때문에, 대부분 수중마이크로폰(hydrophone)을 이용하여 연구가 진행되고 있다<sup>(2~4)</sup>. 그러나 이 경우 센서를 배관 내부에 삽입시켜야 하는 등 이동성 면에서는 제한이 있다.

그러나, 유체 비접촉식 센서의 사용은 배관 외부에 장착과 탈착이 자유로와 이동성이 클 뿐아니라, 감도가 우수한 가속도계(accelerometer)의 사용이 가능하다면 원형관내부에 센서를 삽입하는 수중마이크로폰의 활용보다는 유리하다. 물론 가속도계의 사용은 검출신호가 외부잡음에 노출되기 쉬운 점 등 몇가지 문제가 있어 아직까지 실용적 기술이 되지 않고 있다. 그러나, 대부분의 산업 공정유체가 부식성이 큰 화학유체인 점을 비추어 보면 가속도계를 이용하면 유체와 센서가 접촉하지 않는 비접촉식 측정원리와 우수한 이동성이 큰 장점을 가지는 진단방법이 될 수 있다.

\*정회원, 한국표준과학연구원 음향진동연구팀

\*\*한국표준과학연구원 유체유동연구팀

본 연구에서는 이상에서 제기되는 종래의 분석방법에 대한 문제점을 보완하여 새로운 누출감지 기법을 시도하였다. 적용된 신호처리 기법은 단위 충격 응답함수 계산기법이며, 이를 이용하여 원형관 시스템에서 가속도계를 이용하여 누출감지를 측정하는 비접촉 진단방법의 가능성을 제시하였다.

## 2. Cross Correlation 함수를 이용한 경로해석

### 2.1 Cross Correlation 함수의 특성

Fig. 1은 관의 중간에 누출이 발생한 경우를 보여 준다. 누출로 인하여 이 위치에서 누출신호가 발생하면 이 신호는 관의 양쪽으로 전파하게 된다. 누출 신호가 A와 B 위치까지 도달하는데 소요되는 시간의 차이(지연시간)  $\tau_d$ 는, 전파속도를  $c$ 라 하면

$$\tau_d = \frac{L_A - L_B}{c} \quad (1)$$

로 표시된다. 이 지연시간의 측정은 발생신호가 충격음의 형태를 취하는 경우에는 시간영역의 신호 비교에 의하여도 가능하다. 그러나 누출에 의한 신호와 같은 연속적이고 구분이 어려운 신호에 대하여는 두 측정신호간의 관련성 여부를 표현하는 것으로서 상관함수가 이용되는데, 시간을 매개로 한 상관성을 검토하는 함수로 cross correlation이 이용되고 있다. 앞의 A와 B 위치에서의 시간신호  $x(t)$ ,  $y(t)$ 에 대하여 두 신호의 cross correlation을 취하면 다음과 같다.

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad (2)$$

$x(t)$ 와  $y(t)$ 가 coherent source에서 발생된 신호라 하면 두 신호 사이의 관계를

$$x(t) = A \cdot y(t + \tau_d) \quad (3)$$

로 표시할 수 있다. 실제로 Fig. 1에서  $L_A$ 와  $L_B$ 가 같은 크기일 때 측정된 Fig. 2의 신호는 상사성을 잘 보여준다. 식 (3)을 식 (2)에 대입하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_{xy}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A \cdot y(t + \tau_d) \cdot y(t + \tau) dt \\ &= R_{yy}(\tau - \tau_d) \end{aligned} \quad (4)$$

이 식은 auto correlation을  $\tau_d$ 만큼 이동시킨 형태임을 보이는데, 각종 신호에 대한 auto correlation의 형태를 참고하고  $\tau$ 축으로의 평행이동량을 고려하여 coherent source에 대한 신호특성 및 도달지연시간

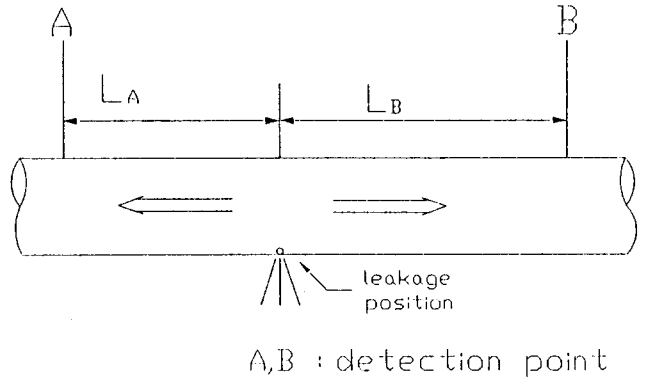


Fig. 1 Example of the leaking system

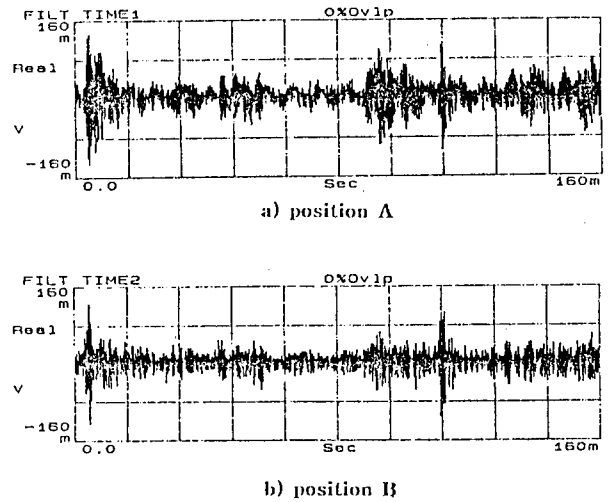
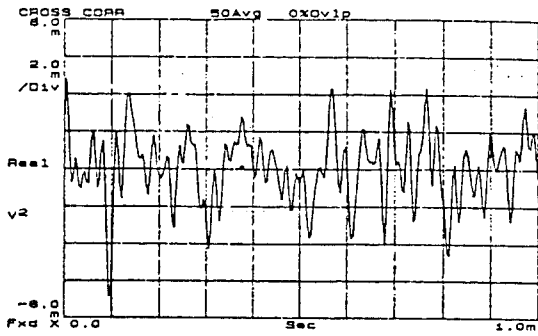


Fig. 2 Time signals by leakage

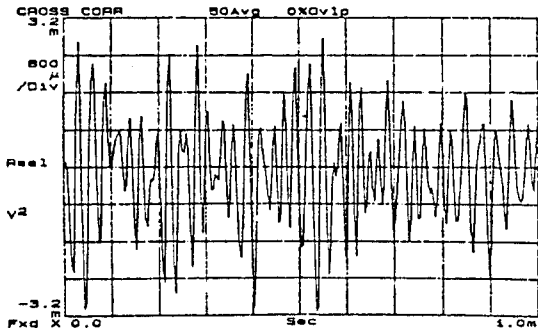
을 구하는데 이용된다.

수도관의 누출탐지를 위해 일본등지에서 이미 cross correlation을 이용하였으나 그 경우 사용된 센서는 수중마이크로폰이었으며<sup>(2~4)</sup>, 가속도계를 센서로 사용할 경우의 장점을 인정하면서도 이의 사용에 의한 누출탐지에는 효과를 거두지 못한 바 있다.

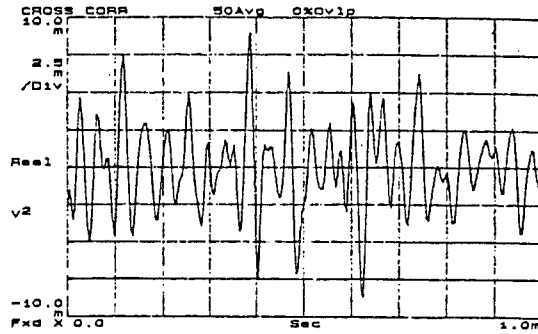
실제로 본 연구의 실험에서도 가속도계를 이용하여 누출이 있는 배관계에서, 누출위치를 사이에 두고 양쪽에 비등거리의 위치에 가속도계를 두개 설치하여 얻은 신호  $x(t)$ 와  $y(t)$ 로부터 cross correlation을 취하여 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a) (b) (c)는 누출점에서부터 A 및 B 가속도계까지의 거리차이가 9.2 cm, 16.8 cm, 27.2 cm인 경우에서의 cross correlation인데, 경로차에 비례하는 시간축상의 피크가 감지되지 않고 있다. 이는 가속도계에서 측정된 신호가 분산파(dispersive wave)이



(a) path length difference = 9.2 cm



(b) path length difference = 16.3 cm



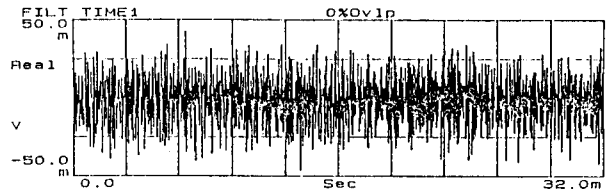
(c) path length difference = 27.2 cm

Fig. 3 Cross correlations with different path length

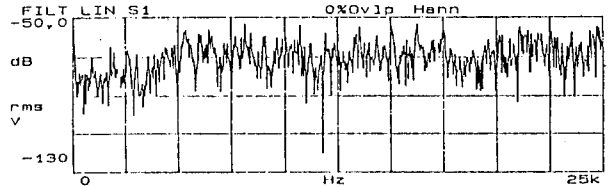
기 때문에 각 주파수마다 다른 지연시간을 초래한 것으로 추후 분석되었다.

### 2.2 분산파(Dispersive Wave) 경로분석

음파의 분산도(dispersiveness)는 서로 다른 주파수를 갖는 음파가 서로 상이한 전달속도를 갖는 경향을 포함한다. 공기중 음파라든지 균일 고체내의 횡파(transverse wave)와 종파(longitudinal wave)의 경우는 비분산적(non-dispersive) 특성을 갖는 경우이다. 이러한 파동의 에너지는 단일파 패킷(single



(a) time history



(b)spectrum

Fig. 4 Leakage signal

wave packet) 내에 결합되어 전파한다. 수중마이크로폰을 이용하는 경우에는 누출점에서 발생한 신호가 관내의 액체(물)를 통해 전파할 때 주파수에 무관하게 일정한 속도를 가진 비분산파(non-dispersive wave)를 측정하게 된다. 반면에 배관 표면에 부착된 가속도계는 주파수에 따라 속도가 다른 파동을 감지하게 되는데, 전단파(shear wave)가 그의 일종이다. 따라서 Fig. 4와 같이 넓은 주파수 범위에 걸쳐 에너지를 갖고 있는 본 실험의 경우에는 신호의 경로차에 의한 지연시간이 주파수마다 각기 다르므로 cross correlation 상에 확실한 정보가 발견되지 않고 있는 것이다.

물론 분산파의 경우에도 두 지점에서 주파수의 차이로 변하는 두 신호의 시간지연을 식 (2)로써 표현할 수 있는데, 이때 경로확인을 목적으로한 분산파의 처리, 즉 신호의 필터링이나 종합화(grouping) 등의 처리를 통해서 분석이 가능하다.

## 3. 실험 및 분석

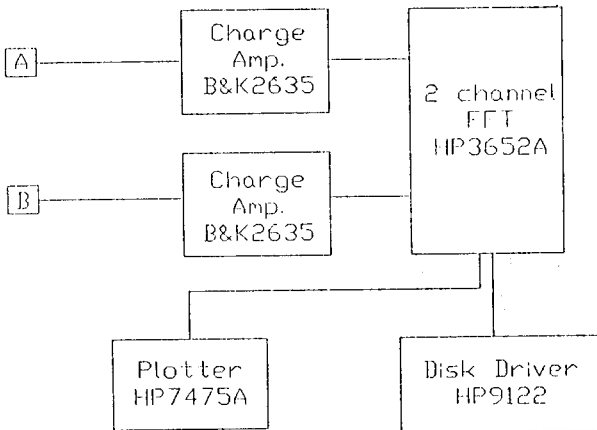
### 3.1 모의 누출실험

이상에서 분석한 종래의 방법상의 문제점을 보완하여 가속도계를 이용한 실험을 시도하였다. 유동 배관은 외경 48 mm이고, 내경이 44 mm인 강철제 원형관(두께 : 2 mm)을 사용하였다. 실험 배관의 전체 길이는 약 15 m이며, 원형관 한쪽은 수돗물을 4기압으로 가압하고 있는 수조와 연결하였으며, 다른 한쪽의 배관에는 0.3 mm×2 mm 크기의 사각 유출구를 천공하여 유체누출과 유사한 상태를 가지도록

하였다. 이 시스템으로 약 2분간의 누출을 연속적으로 발생시킬 수 있다. A지점과 B지점에는 한 쌍의 가속도계(B&K 4366)를 원형관 외부에 부착하였다. 실험의 진행은 A센서는 고정하고, B센서를 이동하여 거리차를 변화시키며 신호를 수집하고 처리하는 방식으로 진행하였다.

가속도계를 관의 표면에 부착하여 분산파를 대상으로 band-pass filter를 이용하여 전파속도가 비슷한 주파수들을 묶어서 지연시간 측정에 이용하도록 하였다. Band width는 1/3 옥타브로 하였으며 1/3 옥타브 밴드패스 필터는 B&K 1618과 B&K 1621을 Fig. 5와 같이 charge amplifier B&K 2635와 2채널 FFT인 HP3562A 사이에 연결하여 사용하였다. 1/3 옥타브 밴드의 중심주파수는 누출신호의 스펙트럼을 보며 정할 수 있는데 16 kHz, 10 kHz, 5 kHz를 중심 주파수로 하였다.

Fig. 6은 Fig. 1과 같이 경로차를 주고 A와 B 가속도계에서 받은 신호를 필터링한 후 cross correlation을 구한 결과를 보여준다. 이 Fig. 6(a), (b), (c)는 중심주파수 10 kHz의 1/3 옥타브 밴드패스 필터를 거쳐 경로차가 각각 9.2 cm, 16.8 cm, 27.2 cm인 경우에 대하여 취해진 cross correlation이다. 이들 결과는 마치 sine파에 대한 cross correlation을 보는 듯한 착각을 일으키게 한다. 따라서 이러한 정보는 경로차에 관련된 정보를 제공할 수 없다. 실제 cross correlation의 사용을 위해서는 지연시간이 어느 정도 이상 커야하는 제한이 따르는데, 지연시간  $\tau$ 는 다음과 같은 조건을 만족시킬 때 이 cross correlation 함수의 응용이 가능해진다<sup>(1)</sup>.



A,B : accerelometers (B&K 4367)

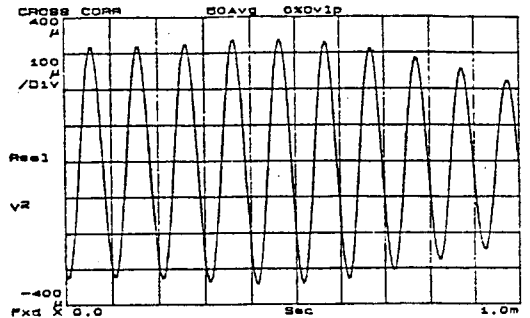
Fig. 5 Experimental setup of the equipments

$$|\tau| > \frac{1}{B} \tag{5}$$

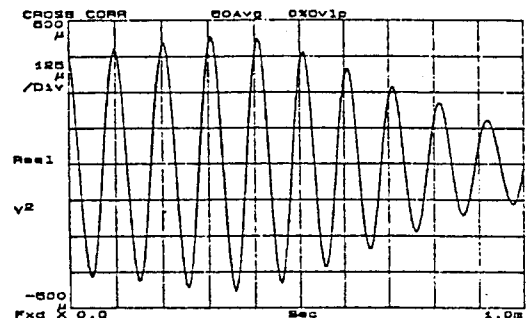
여기서, B는 correlation 분석에 사용된 신호의 주파수 폭인데, 이와같은 실험의 경우에는 필터를 사용하여 B값이 줄어들어서 지연시간  $\tau$ 가 클 것이 요구되고 있다.

### 3.2 협대역 Unit Impulse Response Function 이용

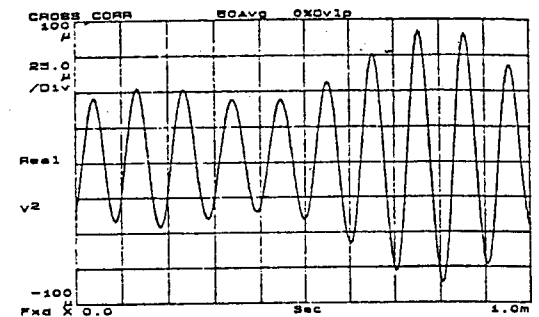
1/3 옥타브 밴드패스 필터를 거친 협대역 신호에



(a) path length difference = 9.2 cm



(b) path length difference = 16.8 cm



(c) path length difference = 27.2 cm

Fig. 6 Cross correlation results of the 10 kHz band filtered signals

대하여 전달계 특성을 나타내는 데 잘 사용되는 전달함수(transfer function)가 있다. 이 함수는 전달계 특성을 normalize하여 나타내는 역할을 하는데 주파수 영역에서 정보를 제공한다. 또한 이 함수의 Fourier 역변환을 취하면 전달계의 시간영역 정보를 얻을 수 있다. 이를 unit impulse response function 이라 하는데 다음과 같이 표시한다.

$$h(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f) e^{j2\pi f\tau} df \quad (6)$$

여기서  $H(f)$ 는 transfer function으로 다음과 같으므로

$$H(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)} \quad (7)$$

식 (6)의 unit impulse response function은 다음과 같이 표현된다.

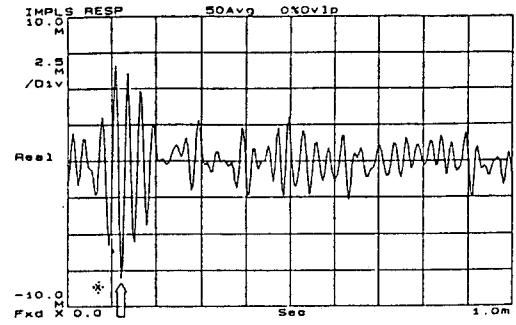
$$h(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)} e^{j2\pi f\tau} df \quad (8)$$

이 식을 다른 방법으로 표현된 cross correlation에 대한 다음의 식

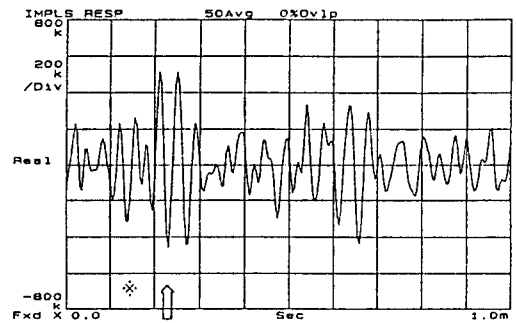
$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xy}(f) e^{j2\pi f\tau} df \quad (9)$$

과 비교하면 unit impulse response function이 본 실험의 경우에 얼마나 적절한 방법인가를 알 수 있다. 즉 식 (6)은 cross correlation 중에서 input의 auto spectral density function  $S_{xx}(f)$ 이 모든 주파수에서 1인 이상적인 경우에 해당하게 된다. 따라서 본 실험에서는 필요에 의해 신호를 1/3 옥타브 밴드 패스 필터를 거쳐 협대역 신호로 만들었으나, 이 unit impulse response function을 이용하여 마치  $B$ 가 큰 광대역 신호에 대한 cross correlation을 구하는 것처럼 작용하기 때문에 경로차에 의한 지연시간 정보를 얻어낼 수 있게 된다<sup>(1)</sup>. 일반적으로 unit impulse response function은 진행파동의 경로가 많을 때 성능에 제약을 받을 때가 종종 있다.

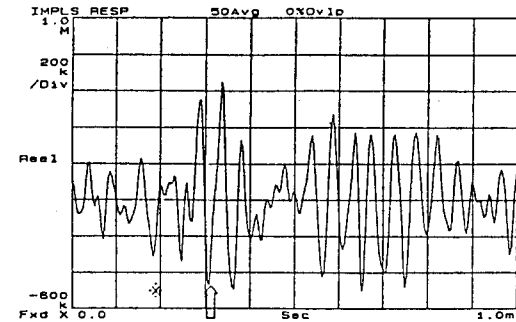
이 unit impulse response function을 이용한 실험 결과는 Fig. 7과 같다.  $L_A=5$  cm로 고정하였으며,  $L_B$ 를 14.2 cm, 21.8 cm 및 32.2 cm로 변화시켜 가며 실험하였다. 여기서 필터링은 cross correlation 실험에서와 마찬가지로 1/3 옥타브 밴드패스 필터를 거쳤으며 중심주파수는 10 kHz로 하였다. Fig. 7(a)는 센서간 거리가 9.2 cm일 때의 결과이며, 거리가 16.8 cm와 27.2 cm로 계속 증가함에 따라 화살표로 (♠) 표시된 피크가 시간축상에서 증가함을 볼 수



(a) path length difference = 9.2 cm



(b) path length difference = 16.8 cm



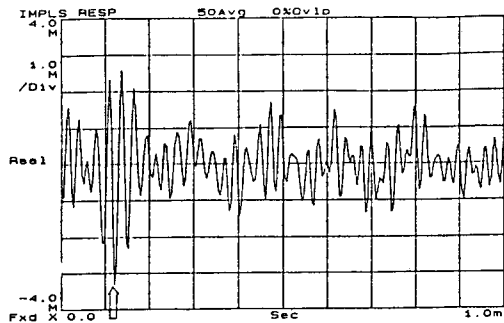
(c) path length difference = 27.2 cm

Fig. 7 Unit impulse response functions with 10 kHz octave band filtered signals

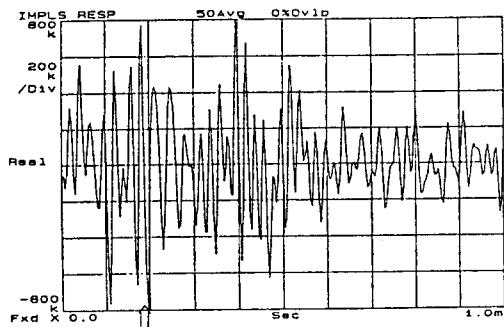
있다. 따라서 cross correlation기법의 경우와는 달리 센서간 거리가 증가함에 따라 측정되는 시간지연 ( $\tau$ )이 증가하는 것을 알 수 있다. 이 실험 결과로부터 계산한 전파속도(propagation velocity)는 약 750 m/s였다. 이 속도는 10 kHz를 중심으로한 1/3 옥타브 밴드 내의 분산파의 등가 속도로 판단된다. 실제 응용에 있어서의 속도측정은 주어진 거리간격을 갖는 두 개의 가속도계를 가지고 충격파를 주어 측정이 가능할 것이다. 또한 동일한 계를 수중마이크로폰으로 측정할 때 Akizuki<sup>(2)</sup>의 방법으로 계산한

확산속도는 1325 m/s인데, 이는 관내의 액체속에서 전파되는 비분산파(non-dispersive wave)의 속도이며 가속도계로 측정한 결과보다 1.7배 큰 값이다. Fig. 7의 결과를 자세히 관찰하면 비분산적인 음파는 모든 경우에(Fig. 8(a), (b) 및 (c)), 표면 분산파의 약 60% 위치에 위치함을 알 수 있다(Fig. 7에서 \* 표시).

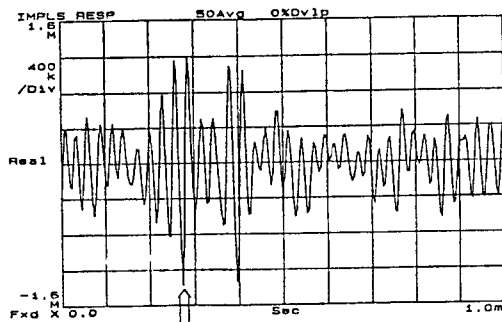
Fig. 8은 16 kHz를 중간주파수로 하여 1/3 옥타브 밴드패스 필터링한 신호로부터의 응답함수를 나타낸



(a) path length difference = 9.2 cm



(b) path length difference = 16.8 cm



(c) path length difference = 27.2 cm

Fig. 8 Unit impulse response functions with 16 kHz octave band filtered signals

다. 10 kHz를 중심주파수로 한 경우와 유사한 실험 결과를 나타내고 있다. 이상의 결과들과 cross correlation 방식의 누출 감지 결과와 비교해보면 unit impulse response function이 유효하게 적용됨을 알 수 있다. 이는 unit impulse response function의 이용시에는 지연시간과 분석신호의 주파수폭이 갖는 한계에 대하여 제약을 받지 않기 때문에 풀이된다. 5 kHz의 중심주파수 필터링의 경우에는 확실하게 피크를 분별하기가 어려웠다. 이는 본 실험에서 센서부착위치(A센서)가 누출점으로부터 너무 근접해 있고(거리가 1/4 파장 이내) 경로차가 상대적으로 작기 때문에 발생한 현상으로 생각된다. 따라서 10~16 kHz의 중간주파수를 유지하고, 좁은 밴드의 필터링 기법을 사용하는 것이 누출진단에 유효함을 확인할 수 있다. 또한 관의 재료에 따라서도 wave velocity와 파장이 다르므로 이와같은 주파수 밴드의 선택은 예비적으로는 Fig. 4와 같이 스펙트럼을 관찰하고, 활용가능한 주파수는 실험을 통하여 구할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

가속도계를 유체와 비접촉식으로 배관외부에 부착하여 파이프 배관의 누출상태를 진단하는 누출진단의 새로운 기법적용을 실험적으로 검토하여 보았다. Cross correlation 기법의 가속도계 사용시에는 직접 적용은 음파의 분산적 특성으로 인해 측정이 어려운 점을 확인하였으며, 이러한 음파의 분산적 특성이 파이프 표면에서 검출된다 하더라도, 좁은 주파수 밴드의 필터링과 unit impulse response function을 통해 이 문제를 해결할 수 있음을 보였다. 이 함수는 지연시간과 신호의 주파수폭에 대한 제약을 받지 않기 때문에 유용하게 활용할 수 있다.

앞으로 파이프 배관 시스템에서 발생되는 모든 종류의 음파의 특성을 보다 구체적으로 정량화하는 연구가 필요하며, 본 연구에서 제시하는 방법은 기존의 수중마이크로폰을 배관내부에 삽입하여 측정하는 불편한 장착과 실험진단 과정에 소요되는 시간을 줄일 수 있어, 비접촉식이면서 이동성이 큰 새로운 기법으로 활용이 될 것으로 전망된다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 1980, "Engineering Applications of Correlation and Spectral Anal-

- ysis", John Wiley & Sons, New York.
- (2) Akizuki, K. et al., 1979, "Detection of Water Leakage Point Using Cross Correlation Method," Proc. IMEKO Symp., Tokyo, Japan.
- (3) Shimazaki, H. et al., 1983, "Technique of Water Leakage Detection Using Cross Correlation Method," Bulletin of Water Works Society (Japanese), Vol. 52, No. 3, pp. 20~36.
- (4) Dakeda, S., 1986, "Fault Detection on Water Work System," Measurement and Control (Japanese), Vol. 25, No. 10, pp. 46~50.