

# 기계잡음 환경에서의 배관 누설탐지기법에 관한 연구

## A Study on Leak Detection Technique of a Pipe In a Noisy Environment

윤두병, 박진호, 신성환

(Doo-Byung Yoon, Jin-Ho Park, and Sung-Hwan Shin)

한국원자력연구원 원자력융합기술개발부

(접수일자: 2011년 12월 3일; 수정일자: 2012년 7월 16일; 채택일자: 2012년 8월 31일)

**초 록:** 발전소 건설 시에 설치된 지하매설 배관이 대부분 20년 이상 경과됨에 따라서 지하매설 배관의 누설탐지의 중요성이 점차 부각되고 있다. 본 논문의 목적은 발전소와 같이 매설배관 주변에 회전체 기계잡음이 존재하는 경우에 배관의 누설위치 추정성능을 개선하기 위한 방법을 연구하는 것이며, 이러한 목적을 달성하기 위하여 주파수영역에서 배관 주변의 회전체 기계잡음을 효과적으로 제거할 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 상호스펙트럼의 위상정보를 이용하여 배관의 누설위치를 추정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 타당성 평가를 위하여 실험을 수행하였으며, 실험결과 회전체에서 발생하는 주기적인 잡음성분을 제거함으로써, 배관 누설을 탐지하는 상호상관함수기법의 성능을 개선할 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어:** 매설배관, 누설, 상호상관함수, 상호스펙트럼, 위상정보, 신호처리

**투고분야:** 구조음향 및 진동 분야(11.3)

**ABSTRACT:** The importance of the leak detection of a buried pipe in a power plant of Korea is being emphasized as the buried pipes of a power plant are more than 20 years old. The objective of this work is to enhance the capability of the leak detection technique in a noisy environment. For this purpose, a modified cross-correlation method that can effectively remove the rotating machinery noise component is suggested. In addition, a method for leak point detection using phase information of cross-spectrum is suggested. The validity of the proposed method is verified by performing an experiment. The experimental result demonstrates that the performance of the cross-correlation method can be enhanced by reducing the periodic noise components due to mechanical equipment.

**Key words:** Buried pipe, Leakage, Cross-correlation function, Cross-spectrum, Phase information, Signal processing

**ASK subject classification:** Structural Acoustics and Vibration (11.3)

### 1. 서 론

최근 발전소의 장기간 운전에 따라, 발전소 건설 시 지하에 매설된 소화수관, 용수관, 그리고 외부로부터 유입된 송유관 등에서 장기간의 부식으로 인하여 누설이 발생하는 경우가 자주 발생하고 있어, 경제적인 손실 및 환경오염 문제가 유발되고 있다.

미국 등 해외원전에서는 매설배관 누설에 의한 지하수내 삼중수소 검출문제가 원전 사업의 주요 현안이 된 사례가 있으며, 원전 가동기간 증가와 함께 경년열화에 의한 매설배관 손상이 국내외에서 점진적으로 증가하고 있다.<sup>[1]</sup> 또한 환경부에서 발표한 “2008년 상수도통계”<sup>[2]</sup>에 따르면 상수도 누수율이 12.2%에 이르며, 상수도의 누수에 의해 적지 않은 경제적, 환경적 손실이 발생하고 있으므로, 상수도의 경우에도 지하에 매설된 배관에 대한 효율적인 누설 탐지 및 관리의 필요성이 증대되고 있다.

\*Corresponding author: Doo-Byung Yoon (yoondb@kaeri.re.kr)  
1045 Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon, 305-353, Republic of Korea  
(Tel: 82-42-868-8909; Fax: 82-42-868-8313)

지하 매설배관의 누설을 탐지하기 위한 방법은 크게 직접검사와 간접검사로 구분할 수 있으며, 직접검사는 매설배관을 직접 노출시켜 육안 및 장비를 사용하여 검사하는 방법을 말한다. 간접검사는 배관을 직접 노출시키지 않고 간접적인 방법으로 누설 여부를 분석하는 방법이며, 대표적인 것으로는 상호상관함수기법(cross-correlation method)을 들 수 있고, 이 방법은 상수도 배관의 누설탐지에 주로 활용되고 있다.<sup>[3-7]</sup>

상호상관함수기법은 매설배관의 누설부에서 발생하는 누설진동음(누설진동파)이 배관 양단으로 전파하며, 매설배관 양단에 설치된 센서에 도달하는 누설진동파의 시간지연이 양단 센서로부터 누설부까지의 거리에 따라 달라지는 현상을 이용하여 누설을 감시하는 방법이다. 이러한 상호상관함수를 이용한 누설탐지방법의 장점은 사용되는 신호처리기법이 매우 단순하다는 점이며, 상용화된 신호분석기(signal analyzer)나 사용자가 직접 프로그램을 작성하여서도 구현할 수도 있다는 점이다. 그러나 이러한 상호상관함수를 이용한 누설탐지방법은 신호대잡음비(SNR: Signal to Noise Ratio)가 작아질수록, 누설탐지 성능이 저하되는 단점이 있는 것으로 알려져 있다.<sup>[5,7]</sup> 이러한 단점을 극복하기 위하여 기존의 연구<sup>[5]</sup>에서는 배관 양단에서 측정된 진동신호 중 상관기여도(coherence)가 양호한 부분의 신호만을 선택적으로 필터링하여, 누설 위치 추정성능을 개선할 수 있는 방법을 제안하였다. 그러나 배관 양단에서 계측된 누설신호에 동일한 기계에 의해 발생한 진동잡음이 모두 존재하는 경우에는 양단에서 계측된 잡음신호간에도 상관성이 있으므로, 이러한 방법을 적용하여도, 기계잡음성분의 제거가 용이하지 않을 수 있다.

배관 주변에 진동잡음이 있는 경우에 적용 가능한 다른 방법으로 참고문헌<sup>[8]</sup>에서는 배관 주변에 주변잡음을 측정하기 위한 센서를 추가적으로 설치하고, 적응필터링(adaptive filtering) 방법을 이용하여 배관에 설치된 센서 신호로부터 주변잡음(추가센서에서 계측된 신호)을 제거하는 방법을 제안하였으나, 이 경우 추가적인 센서 설치가 필요하며, 다소 복잡한 적응필터링기법을 사용하여야 하는 단점이 있다.

본 논문의 목적은 발전소와 같이 매설배관 주변에 회전체 기계잡음이 존재하는 경우에 누설위치 추정성능을 개선하기 위한 방법을 연구하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 매설배관 주변의 회전체 기계잡음을 주파수영역에서 효과적으로 제거할 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 상호스펙트럼의 위상정보를 이용하여 누설위치를 추정하는 방법을 제안하였다. 또한 회전체 기계잡음이 존재하는 환경에서 배관 누설탐지 실험을 수행함으로써, 제안된 방법의 타당성을 확인하였다.

## II. 기본이론

지하에 매설된 배관의 누설을 탐지하기 위해 초창기에는 청음봉(listening rod) 등이 주로 사용되었으며, 이는 누설 발생 여부를 확인하는 용도로는 사용이 가능하지만, 누설이 발생하는 위치를 찾는 데는 한계가 있었다.

1990년대에 독일의 Fuchs에 의해 누설위치를 탐지하는 용도로 상호상관함수를 이용한 누설탐지기법이 개발되었으며, 이 방법은 현재까지도 상수도 매설배관의 누설탐지에 널리 사용되고 있다.<sup>[3-7]</sup>

상호상관함수기법을 이용하여 지하매설배관의 누설을 탐지하기 위해서는 일반적으로 Fig. 1과 같이 누설이 추정되는 배관의 양단(지하점검구나 소화전 등)에 가속도계를 설치하고 신호를 계측하는 방법이 이용된다.<sup>[3-7]</sup>

배관 양단에 설치된 센서에 계측된 신호를 각각  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ 라 하면, 상호상관함수<sup>[9]</sup>는 식(1)과 같이 표현되며, 이때  $E[\cdot]$ 는 기대치(expected value)를 나타내며,  $\tau$ 는 시간지연(time delay)을 나타낸다.

$$C_{12}(\tau) = E[x_1(t)x_2(t+\tau)] \quad (1)$$

이때 누설지점으로부터 발생한 누설진동파 신호는 배관 구조물을 따라 양단으로 전파하며, 전파 속도(c)는 참고문헌<sup>[10-12]</sup>에서와 같이 배관 및 유체의 물성치와 배관의 지름과 두께를 알면 이론적으로 구할 수 있다.

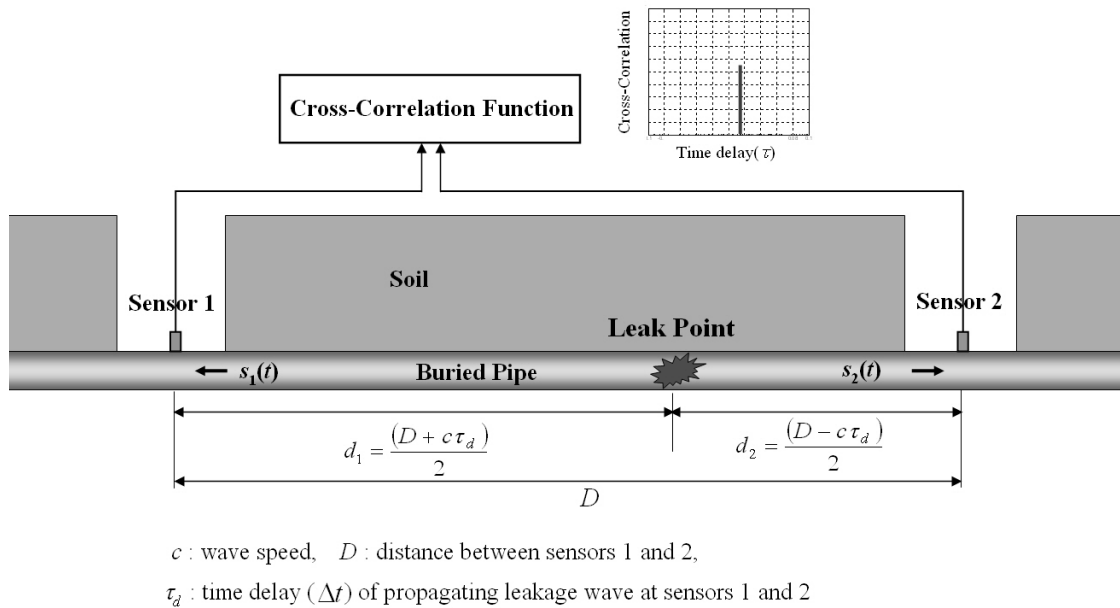


그림 1. 상호상관함수를 이용한 매설배관 누설위치 추정  
 Fig. 1. Typical measurement arrangement of the cross-correlation technique for leak detection of a buried pipe.

누설이 발생하는 경우 누설신호의 도달시간차를  $\tau_d$ 라고 하면, 상호상관함수 그래프의  $\tau_d$ 에 해당하는 위치에서 누설에 의한 피크가 발생하므로 이 정보를 이용하여 누설위치를 추정할 수 있다. 즉, 시간지연과, 음파의 전파속도, 센서간의 거리는 식(2), (3)과 같은 관계가 있으므로, 누설신호의 시간지연  $\tau_d$ 를 알면 식(2), (3)을 이용하여 누설위치를 추정할 수 있다.

$$d_1 - d_2 = \tau_d \cdot c \tag{2}$$

$$d_1 = (D + c\tau_d)/2, d_2 = (D - c\tau_d)/2 \tag{3}$$

### III. 주변 기계잡음 제거 및 상호스펙트럼 위상정보를 이용한 누설위치 추정

발전소의 경우, 지하에 매설된 배관의 주변에는 펌프, 전동기, 냉각팬 등의 기계가 발전소의 운전기간동안 정지시간이 없이 연속적으로 운전되는 경우가 대부분이며, 발전소 운전기간 중 누설 탐지를 위하여 주변에서 운전되는 기계류를 정지시키는 것은 용이하지 않다.

발전소에 설치된 기계는 대부분 회전체이며, 발전

소에서 발생 가능한 대표적인 기계잡음 신호는 회전체(rotating machinery)에 의해 발생하는 깃통과주파수(BPF: Blade Passing Frequency) 성분을 들 수 있다. 깃통과주파수 성분은 펌프 등의 회전체의 블레이드 수와 펌프의 회전수를 곱한 주파수에서 발생하는 성분으로 지하매설 배관의 경우, Fig. 2에서 볼 수 있듯이 인접한 배관으로 전파되어, 누설탐지를 위한 센서에 추가적으로 계측될 수 있다.

즉, 누설탐지를 위해 매설배관 양단에 설치된 센서에서 계측된 신호를 각각  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ 라 하면,  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ 는 다음 식과 같이 누설진동파( $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$ )와 기계진동성분( $n_1(t)$ ,  $n_2(t)$ )으로 표현할 수 있다.

$$x_1(t) = s_1(t) + n_1(t) \tag{4}$$

$$x_2(t) = s_2(t) + n_2(t) \tag{5}$$

이때 상호상관함수  $C_{12}(\tau)$ 는 다음 식과 같이 표현되며, 첫 번째 항은 누설진동파에 의한 성분을 나타내고, 두 번째 성분은 주변 기계진동에 의한 성분을 나타낸다.

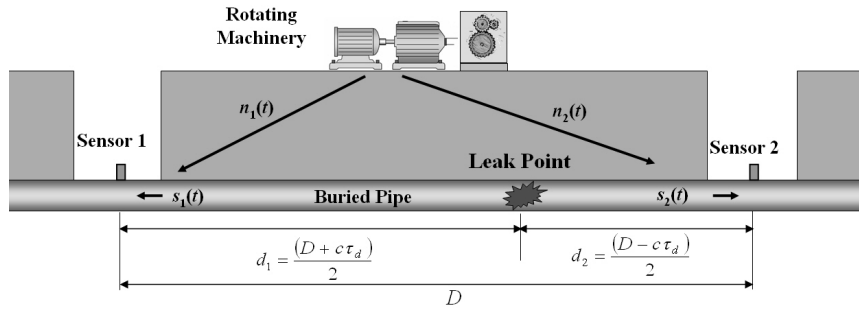


그림 2. 기계잡음 환경에서의 매설배관 누설위치 추정을 위한 센서 설치 예  
 Fig. 2. Schematic diagram of typical measurement arrangement for leak detection of a buried pipe in a power plant.

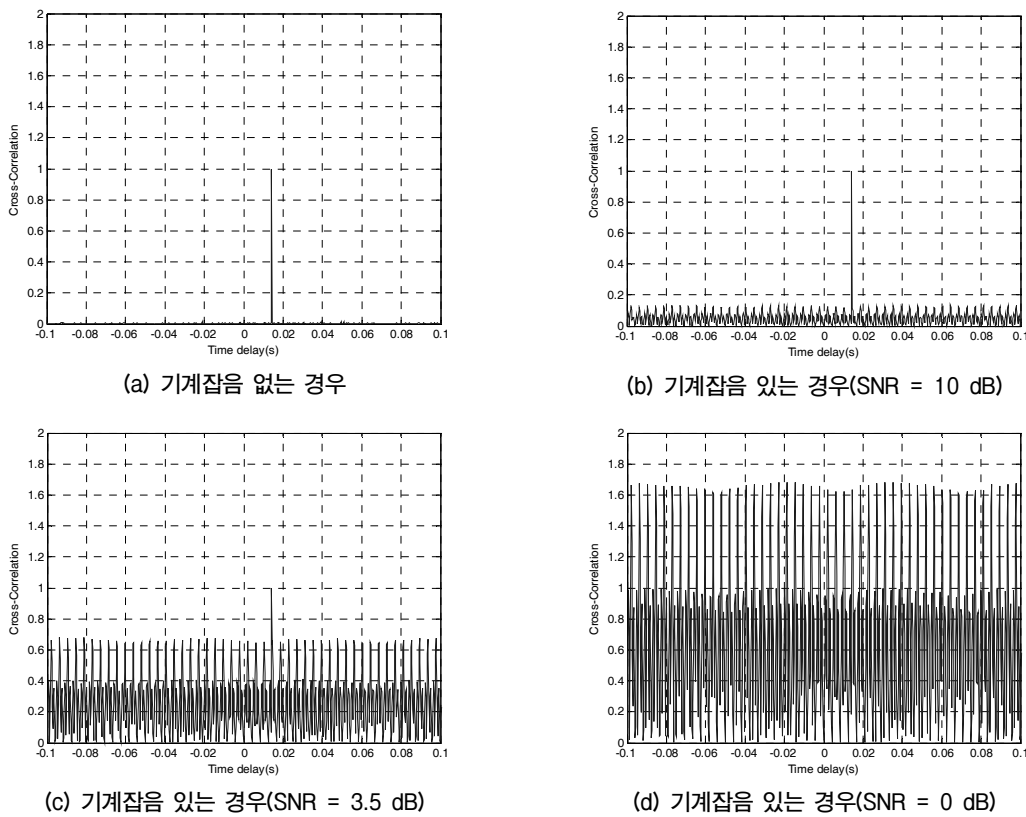


그림 3. 주기적인 기계잡음이 상호상관함수에 미치는 영향(시뮬레이션)  
 Fig. 3. Effects of machinery noise on the cross-correlation technique(numerical simulation).

$$C_{12}(\tau) = E[x_1(t)x_2(t+\tau)] = E[s_1(t)s_2(t+\tau)] + E[n_1(t)n_2(t+\tau)] \quad (6)$$

기계잡음이 존재하지 않는 상황( $n_1(t)=0, n_2(t)=0$ )에서는, 누설위치로부터 양단 센서까지의 거리에 따라 결정되는 시간지연( $\tau_d$ )에 해당하는 지점에서 상호상관함수의 피크가 발생하며, 센서설치위치

간의 거리( $D$ ), 누설진동파의 배관에서의 전파속도 ( $c$ ), 그리고 시간지연( $\tau_d$ )의 관계를 나타내는 식(2), (3)에 의해 누설 위치를 추정할 수 있다.

그러나 주변 기계에 의한 기계진동성분( $n_1(t), n_2(t)$ )이 존재하는 경우에는 Fig. 3에서와 같이 상호상관함수 그래프에 누설에 의한 피크 외에 기계진동 성분에 의한 피크들이 다수 존재하며, 신호대잡음비

(SNR)의 저하에 따라, 기계진동성분이 상호상관함수에 미치는 영향은 증가하므로, 이로부터 누설진동파의 정확한 시간지연( $\tau_d$ )에 대한 정보를 얻기가 어려워지며, 누설위치를 정확히 추정할 수 없다. Fig. 3은 기계잡음이 상호상관함수기법에 미치는 영향을 파악하기 위하여 임의로 생성된 누설신호와 기계잡음 신호를 이용하여, 펌프의 회전에 의한 주기적인 진동성분이 누설탐지용 센서에 유입되는 경우를 가정하여 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타내고 있다. 배관의 누설신호는 랜덤신호(random signal)로 가정하여 생성하였고, 기계잡음 생성 시 펌프의 회전수는 1800 rpm이고 블레이드 수는 8개인 경우를 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 신호대잡음비(SNR)는 기계잡음(주기적인 성분)의 파워에 대한 누설신호의 파워의 비로 정의하였다.

Fig. 3을 관찰해보면 기계잡음이 없는 경우(Fig. 3(a))에 비해, 기계잡음이 커지면 그래프에서 누설에 의한 피크를 구분하기 쉽지 않음을 알 수 있다. 즉, 이 경우 누설신호의 신호대잡음비가 약 3.5 dB 이하가 되면 그래프에서 피크의 확인이 용이하지 않으며, 누설신호의 신호대잡음비가 약 0 dB 이하가 되면 그래프에서 누설에 의한 피크를 찾기가 어려움을 알 수 있다. 따라서 상호상관기법을 이용한 누설탐지방법은 주변 기계소음(주기적으로 반복되는 소음)에 취약함을 알 수 있으며, 이러한 경우 누설위치 추정이 용이하지 않음을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 방법을 제안하고자 하며, 이 방법은 다음의 두 가지 단계로 구성된다.

### 3.1 주파수영역에서 기계진동에 의해 발생한 피크성분을 제거

기계진동성분이 존재하는 경우, 시간영역에서는 누설진동파( $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$ )와 기계진동성분( $n_1(t)$ ,  $n_2(t)$ )을 구분하는 것이 용이하지 않다.

발전소에 설치된 기계는 대부분 회전체이며, 발전소에서 발생하는 기계진동 신호는 회전체(rotating machinery)에 의해 발생하는 깃통과주파수(BPF: Blade Passing Frequency) 성분 및 이의 배수성분으로 주기적인 신호(periodic signal)이므로, 주파수영역에서는

피크성분들로 표현될 수 있다. 반면에 누설에 의해 발생하는 누설진동파는 랜덤(random)신호의 특성을 나타내며,<sup>[7,13]</sup> 주파수영역에서는 평탄한 주파수성분을 갖는 성분으로 표현될 수 있다(Fig. 4 참조).

따라서 매설배관의 양단에 설치된 진동센서에서 계측되는 신호성분을 주파수영역으로 변환하여, 매설배관의 누설에 의한 누설진동파성분(주로 랜덤신호성분)과 회전체에 의한 기계진동성분(주기적인 신호로 주파수영역에서 피크들로 나타남)을 Fig. 5와 같이 분리, 제거한 후, 다시 시간영역으로 변환하여 상호상관함수를 구하면, 주변 기계(회전체)잡음의 영향을 제거하고, 시간지연( $\tau_d$ )을 구할 수 있다.

이때 배관 양단 센서에서 계측된 시간영역신호를 주파수영역으로 변환하기 위하여 푸리에 변환(fast fourier transform)을 사용할 수 있다. 주파수영역에서 회전체 기계진동성분을 제거하기 위해서는 하드웨어적인 노치필터(notch filter)를 사용할 수도 있으나, 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 소프트웨어적으로 기계진동성분을 제거하는 방법을 적용하였으며, 주파수영역에서 회전체에 의한 주기적인 진동성분은 피크 형태로 나타나므로, 설정치( $L_{th}$ )를 초과하는 피크성분들을 주파수스펙트럼에서 제거(0으로 대체)하는 방법을 사용하였다. 이때 Fig. 6(a)와 같이 누설신호(random)의 주파수성분이 주파수대역에 걸쳐 평탄하다고 가정하면, 주파수영역에서 피크성분을 제거하기 위한 기준인 설정치( $L_{th}$ )의 범위는 식(7)과 같이 정할 수가 있다(Fig. 6(c) 참조).

$$L_{th,lower} = ([R_{xx}(0) - R_{xx}(\tau)_{\tau \neq 0, \max}] / B_f)^{1/2} \quad (7a)$$

$$L_{th,lower} < L_{th} < L_{th,upper}, L_{th,upper} = \text{최대 피크의 크기} \quad (7b)$$

본 연구에서는 피크성분을 제거하기 위한 기준인 설정치( $L_{th}$ )를 설정함에 있어서, 실험을 통해 취득한 신호의 주파수스펙트럼을 관찰하고, 식(7)을 고려하여  $L_{th}$ 를 설정하였다. 또한, 주파수영역에서 피크성분을 제거한 후, 이를 다시 역푸리에 변환(Inverse FFT)을 수행하여 회전체 기계잡음이 제거된 누설신호를 얻을 수 있도록 하였다.

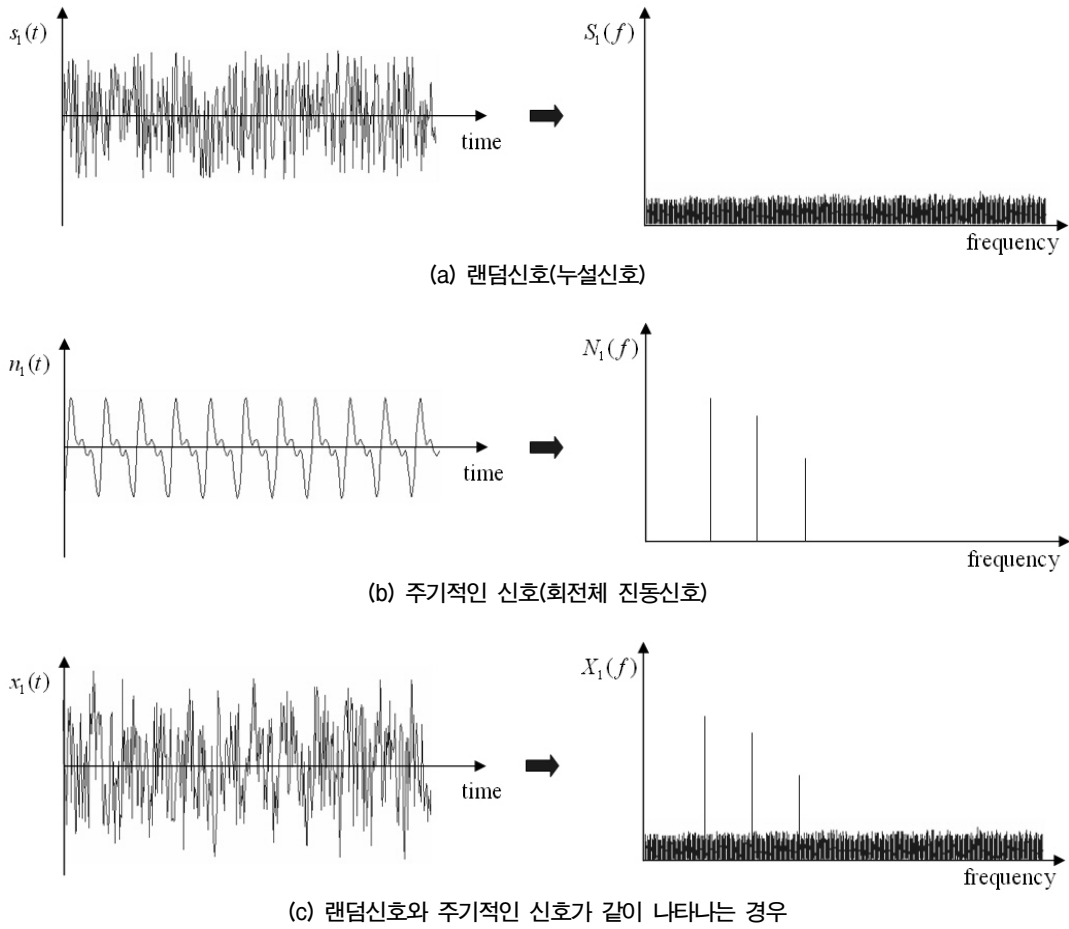


그림 4. 랜덤(누설)신호와 주기적인 신호(회전기계 잡음)의 주파수 특성

Fig. 4. Frequency characteristics of the random(leakage) signal and periodic(rotating machinery) signal.

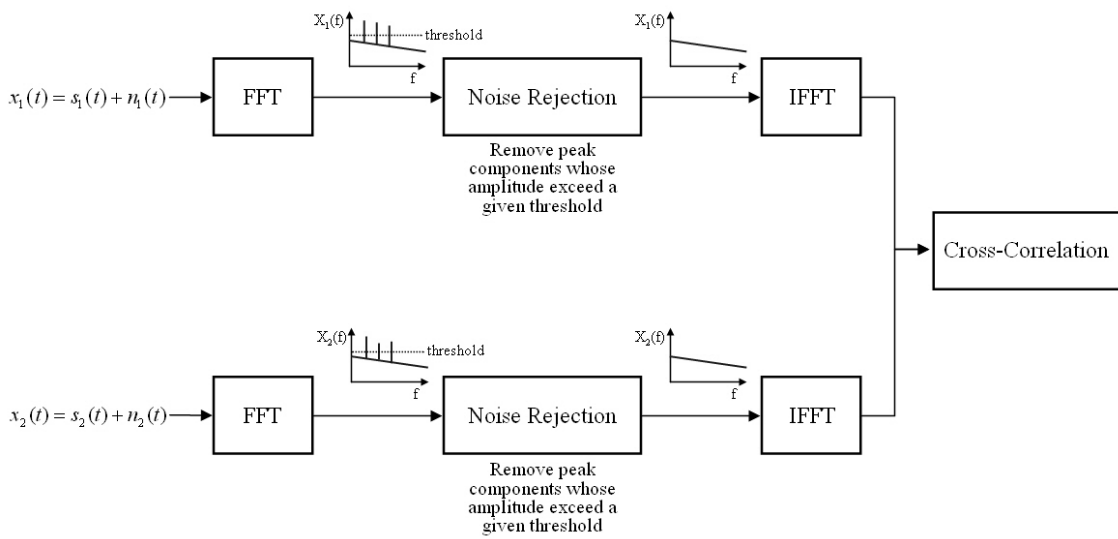


그림 5. 주파수영역에서 기계잡음성분을 제거하는 방법

Fig. 5. Method for reducing the machinery noise component in frequency domain.

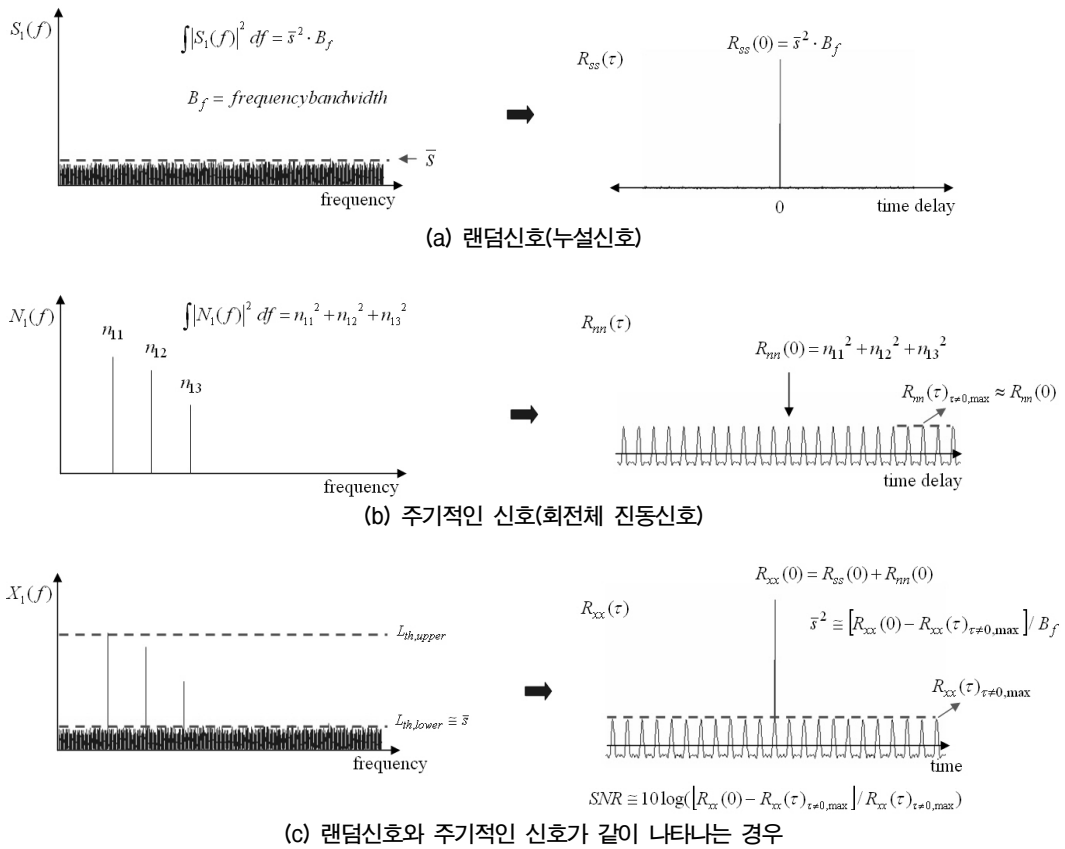


그림 6. 랜덤(누설)신호와 주기적인 신호(회전기계 잡음)의 스펙트럼과 자기상관함수와의 관계  
 Fig. 6. Relation between auto-correlation function and frequency spectrum of the random/ periodic signal.

### 3.2 상호스펙트럼의 위상정보를 이용하여 시간지연을 추정

매설배관 양단에 설치된 센서로부터 계측된 신호에 대해 FFT(Fast Fourier Transform)를 수행하여,  $X_1(f)$ 와  $X_2(f)$ 를 구한 후 이들의 상호스펙트럼( $S_{12}(f)$ )을 구하면 상호스펙트럼은 다음과 같이 표현되며, 이때 \*는 공액복소수(complex conjugate)를 의미한다.

$$S_{12}(f) = X_1(f)^* \cdot X_2(f) \quad (8)$$

상호스펙트럼은 크기와 위상의 곱으로 표현( $S_{12}(f) = |S_{12}(f)| \cdot e^{j\phi_{12}(f)}$ )되며, 이 때 배관 양단에 설치된 센서로부터 계측된 누설신호에 대한 스펙트럼의 위상(phase)은 다음의 식(9)와 같이 표현될 수 있다. 식(9)의 첫 번째 항은 누설진동파가 양단의 센서로 전파

하는 시간지연( $\tau_d$ )에 대한 정보를 가지고 있으며, 두 번째 항은 기계잡음 및 주변 환경에 의해 발생하는 위상( $\phi_{12}(f)$ )의 잡음성분을 나타낸다.

$$\phi_{12}(f) = 2\pi f\tau_d + n_\phi(f) \quad (9)$$

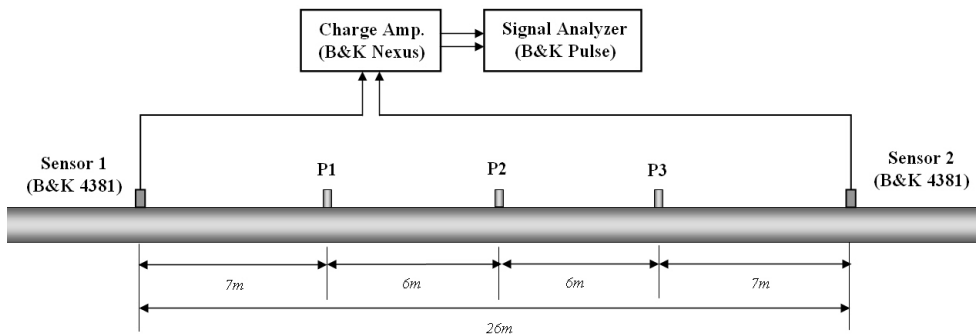
따라서 이론적으로 상호스펙트럼의 위상( $\phi_{12}(f)$ )의 기울기( $d\phi_{12}/df$ )가 누설진동파가 양단의 센서로 전파하는 시간지연( $\tau_d$ )을 나타내므로, 배관 양단 센서에서 계측된 신호에 대한 상호스펙트럼의 위상데이터를 구한 후, 커브피팅(curve fitting)을 수행하여 위상  $\phi_{12}(f)$ 의 기울기를 구함으로써, 누설진동파가 양단의 센서로 전파하는 시간지연을 추정할 수 있다. 또한 커브피팅(curve fitting)을 수행하여 구한 시간지연 값을  $\hat{\tau}_d$ 라 하면, 이러한 시간지연 정보를 이용하여 위상데이터를 대체( $e^{j2\pi f\hat{\tau}_d}$ )하고, 이에 대한

역푸리에변환(Inverse FFT)을 수행함으로써 상호상관함수를 구할 수 있으며, 이 정보를 3.1절에서 구한 상호상관함수와 서로 비교를 하면서 배관의 누설위치를 추정하는데 활용할 수도 있다. 이러한 방법의 타당성은 다음의 실험 및 결과 고찰에서 확인하고자 한다.

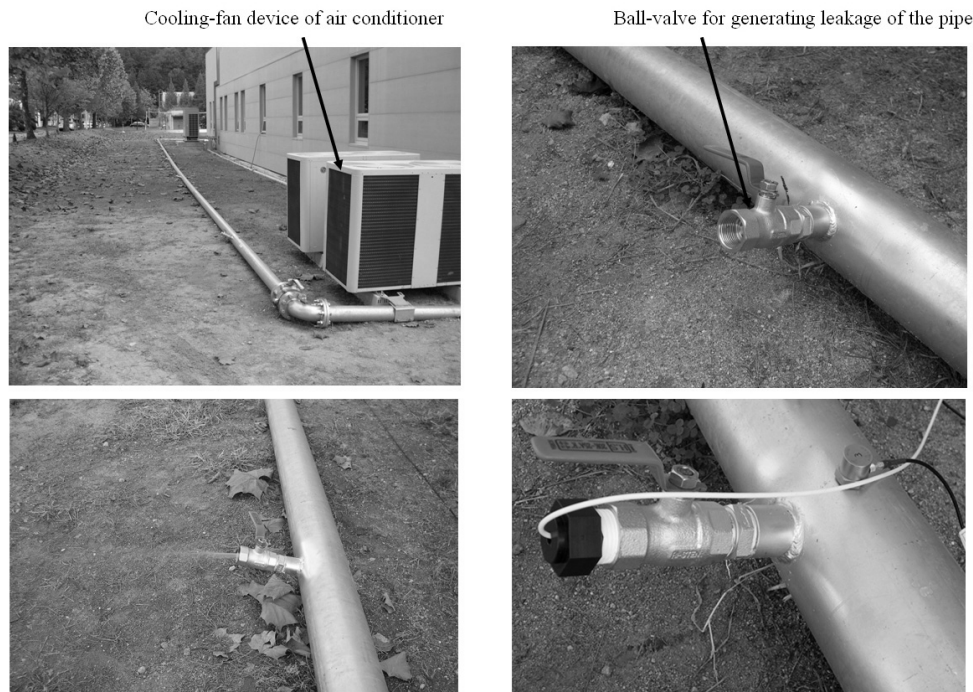
#### IV. 실험 및 결과 고찰

본 논문에서 제안한 배관 누설신호의 시간지연 추정방법의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 7과 같이

실제로 실험장치를 구성하여 실험을 수행하였다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 실험용 배관(지름: 100 mm, 총길이: 45 m)을 설치하였으며, 인위적으로 누설을 발생시키기 위하여, 배관상의 3개 위치(P1-P3)에 볼 밸브를 설치하고 볼밸브를 조작하여 인위적으로 누설을 발생시킬 수 있도록 하였다. 또한 기계잡음이 상호상관함수기법에 미치는 영향을 실험적으로 알아보기 위하여 배관을 건물 공기조화장치의 냉각팬 인근에 설치하여, 냉각팬을 가동함으로써 인위적으로 주변 기계(회전체) 잡음을 발생시킬 수 있도록 실



(a) 실험장치 구성



(b) 기계잡음 생성을 위한 냉각팬 및 실험사진

그림 7. 배관 누설탐지를 위한 실험장치 구성

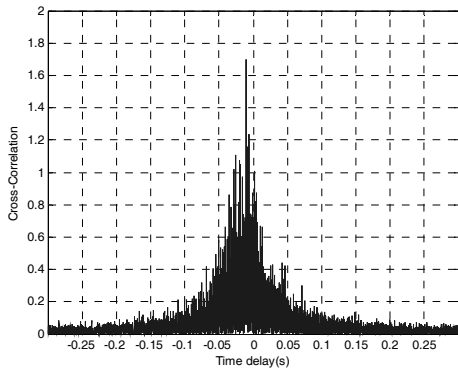
Fig. 7. Experimental setup and schematic of the data acquisition of the leakage signal.



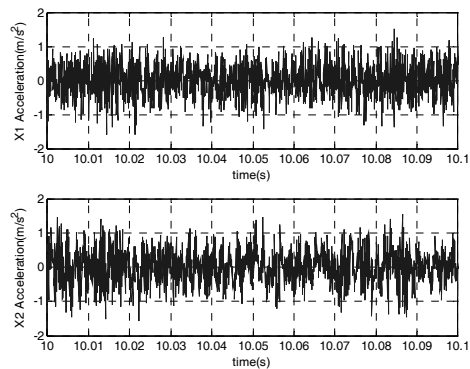
협장치를 구성하였다. 누설발생 시 배관 양단으로 전파하는 누설신호를 계측하기 위한 진동센서(가속도계)로는 B&K 4381을 배관 양단에 한 개씩 설치하였으며, 계측된 진동신호를 증폭하기 위한 전하증폭기로는 B&K Nexus를 사용하였다. 또한 계측된 신호에 대해 디지털신호처리가 가능하도록 신호분석기(B&K pulse)를 사용하여 아날로그신호를 디지털신

호로 변환하여 2분간 저장하였다. 이때 진동센서(B&K 4381)의 공진주파수가 16 kHz임을 고려하여, 주파수분석은 가속도계 공진주파수의 1/3인 정도인 6 kHz범위 내에서 수행하였다.

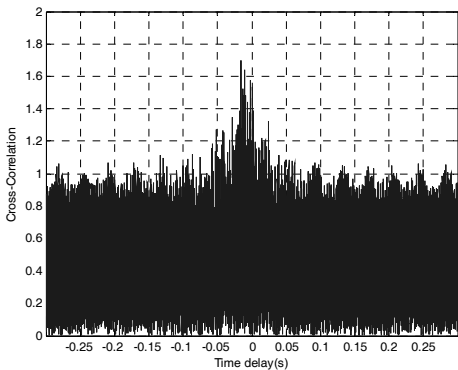
Fig 8(a)는 기계잡음이 없는 상황에서 P1 위치에서 누설이 발생하는 경우에 센서 1,2에서 계측한 진동신호의 상호상관함수를 나타내고 있으며, 누설에 의



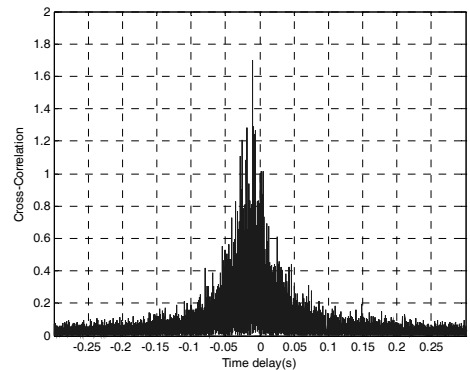
(a) 기계잡음이 없을 때의 상호상관함수



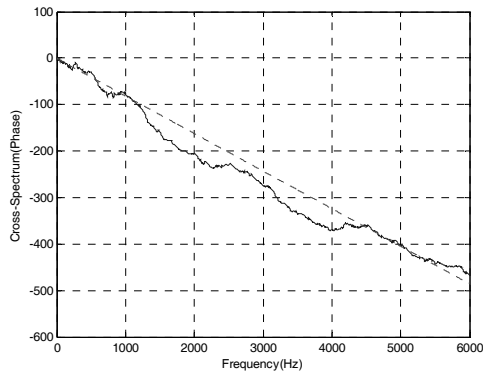
(b) 센서 1,2의 측정신호(기계잡음 존재 시)



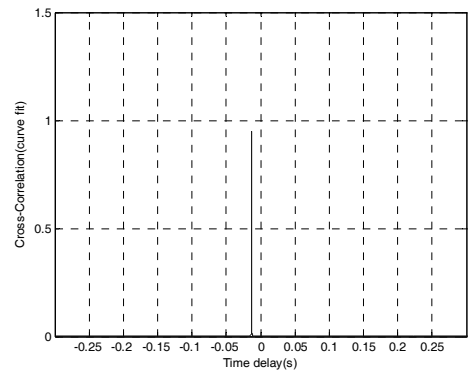
(c) 상호상관함수(제인방법 미적용)



(d) 상호상관함수(기계잡음 제거 후)



(e) 상호스펙트럼 위상



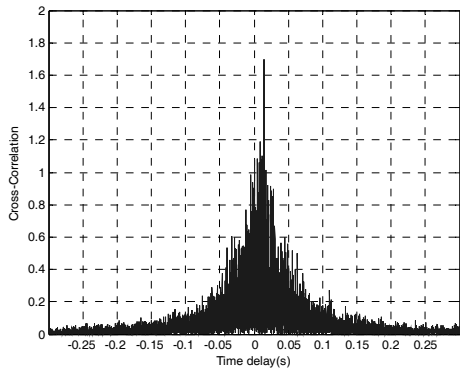
(f) 상호상관함수(상호스펙트럼 위상정보 이용)

그림 8. 배관 누설에 의한 양단 센서에서의 시간지연 추정실험결과(P1지점 누설)

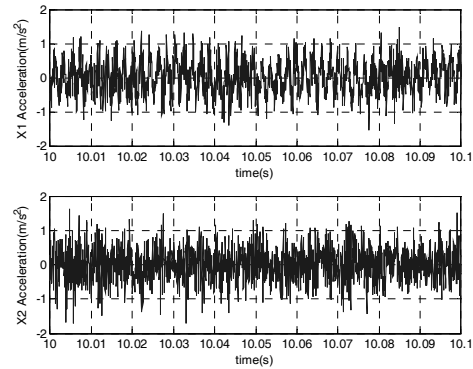
Fig. 8. Result of leak detection experiment for estimating the time delay at the two sensors (Leakage at point P1).

한 피크가 발생함을 명확하게 관찰할 수 있다. Fig 8(b)와 (c)는 기계잡음(공기조화장치의 팬 가동)이 존재하는 상황에서 P1 위치에 누설이 발생하는 경우에 센서 1,2에서 계측한 진동신호와 이들 신호의 상호상관함수를 나타내고 있다. 이때 센서 1,2번 신호의 신호대잡음비는 자기상관함수(Fig. 6(c)의 식 참조)를 이용하여 구하였으며, 각각 5.3 dB와 4.0 dB정

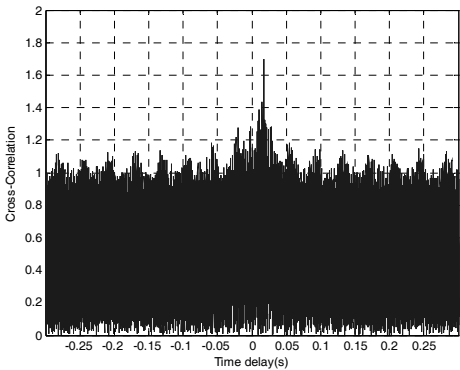
도인 것으로 나타났다. Fig 8(c)를 관찰해 보면 실제 누설에 의한 피크 이외에 기계잡음 성분에 의해 주기적으로 발생하는 다수의 피크들로 인하여 누설 위치의 정확한 추정이 어려움을 알 수 있다. 반면에 Fig 8(d)를 관찰해 보면, 두 개의 센서에서 계측한 신호를 주파수영역에서 변환한 후 주기적인 기계잡음 성분을 제거하고 다시 시간영역 신호로 변환한 후 이에



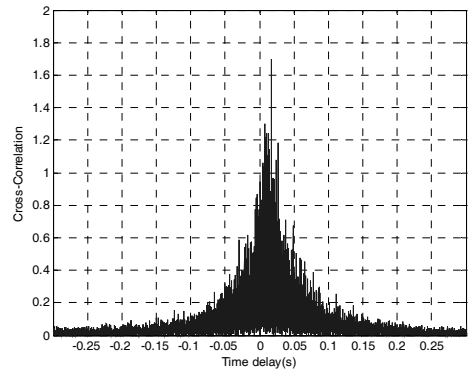
(a) 기계잡음이 없을 때의 상호상관함수



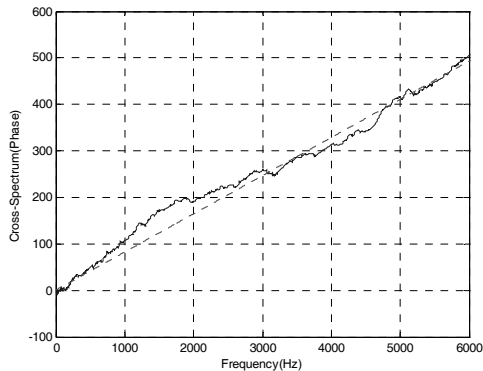
(b) 센서 1,2의 측정신호(기계잡음 존재 시)



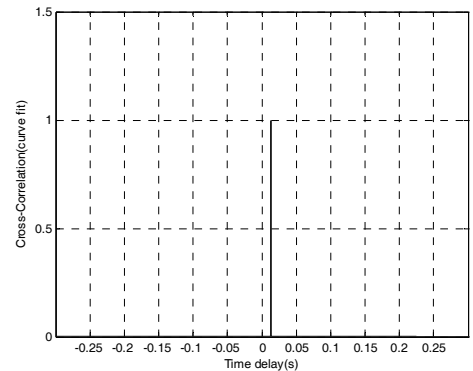
(c) 상호상관함수(제인방법 미적용)



(d) 상호상관함수(기계잡음 제거 후)



(e) 상호스펙트럼 위상



(f) 상호상관함수(상호스펙트럼 위상정보 이용)

그림 9. 배관 누설에 의한 양단 센서에서의 시간지연 추정실험결과(P3지점 누설)

Fig. 9. Result of leak detection experiment for estimating the time delay at the two sensors (Leakage at point P3)

대한 상호상관함수를 구함으로써, 누설진동파의 시간지연 정보( $\tau_d$ )를 구할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 Fig 8(e)를 관찰해 보면 상호스펙트럼의 위상데이터는 선형적인 형태를 나타내며, 이러한 위상정보를 직선으로 커브피팅(접선)하여, 시간지연 정보( $\hat{\tau}_d$ )를 추출할 수 있음을 알 수 있다. Fig 8(f)는 이러한 기울기 정보를 위상데이터로 대체( $e^{j2\pi f\hat{\tau}_d}$ )하고, 이에 대한 역푸리에변환(Inverse FFT)을 수행하여 상호상관함수를 구한 결과를 나타내며, Fig 8(d)와 Fig 8(f)를 함께 비교해 봄으로써 상호상관함수 그래프 상에서 양단센서에서의 누설진동파의 시간지연정보를 더욱 용이하게 파악할 수 있음을 알 수 있다.

Fig 9(a)는 기계잡음이 없는 상황에서 P3 위치에 누설이 발생하는 경우에 센서 1,2에서 측정한 진동 신호의 상호상관함수를 나타내고 있으며, Fig 9(b)와 (c)는 기계잡음이 존재하는 상황에서 P3 위치에 누설이 발생하는 경우, 센서 1,2에서 측정한 진동신호와 이들 신호의 상호상관함수를 나타내고 있다. Fig 9(c)의 상호상관함수를 관찰해보면 Fig 8(c)의 경우와 마찬가지로, 기계잡음에 의해 발생한 다수의 피크들로 인하여 상호상관함수 그래프에서 누설에 의해 발생한 피크의 판별이 용이하지 않음을 확인할 수 있다. 또한 Fig 9(d), (e), (f)를 관찰해 보면 제안한 두 가지 방법(3.1절과 3.2절)을 이용하여 누설진동파의 양단센서에서의 시간지연정보를 더욱 용이하게 파악할 수 있음을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문의 목적은 발전소와 같이 매설배관 주변에 다수의 회전기계 운전에 의한 잡음이 발생하는 환경에서 적용이 가능한 배관 누설탐지방법을 연구하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 주파수영역에서 배관 주변의 회전체 기계잡음을 효과적으로 제거할 수 있는 방법과 함께, 상호스펙트럼의 위상정보를 이용하여 배관에서 발생하는 누설신호의 시간지연을 추정하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 기계잡음이 존재하는 상황에서 배관의 누설탐지 실험을 수행하였으며, 실험결과 제안된 방법을 적용함으로써, 회전체 기계잡음

성분을 효과적으로 제거할 수 있으며, 상호스펙트럼의 위상정보로부터 누설신호의 시간지연을 추정할 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 발전소와 같이 매설배관 주변에 다수의 회전체가 존재하는 환경에서 배관의 누설위치를 찾는 방법으로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 박상규, 허남용, 김왕배, “원전 매설배관 경년열화관리 기술개발 현황,” *한국압력기공학회 2011 년도 연차학술대회*, 2011.
2. 환경부 수도정책과, “2008 상수도 통계,” 환경부, 2008.
3. H. V. Fuchs, “Ten Years of Experience with Leak Detection by Acoustic Signal Analysis,” *Applied Acoustics*, vol. 33, pp. 1-19, 1991.
4. D. A. Liston et al., “Leak Detection Techniques,” *Journal of New England Water Works Association*, vol. 1206, no. 2, pp. 103-108, 1992.
5. Y. Gao, M. J. Brennan, P. F. Joseph, “A Comparison of Time Delay Estimators for the Detection of Leak Noise Signals in Plastic Water Distribution Pipes,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 292, pp. 552-570, 2006.
6. 이영섭, 윤동진, “지하매설 상수도 배관의 누수지점 탐지 알고리즘 연구,” *2004 년 한국비파괴검사학회 춘계학술대회논문집*, pp. 212-218, 2004.
7. 이영섭, “지하매설 상수도 배관의 누수지점 탐지,” *소음·진동*, 17권, 1호, pp. 16-21, 2007.
8. K. Kazuhisa, “Method and Apparatus for Detecting Leakage Position in Piping,” Japan Patent No. JP-2004-125628A, 2004.
9. J. S. Bendat and A. G. Piersol, *Random Data*, Wiley, 1986.
10. R. J. Pinnington and A. R. Briscoe, “Experimentally Applied Sensor for Axisymmetric Waves in a Fluid Filled Pipe,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 173, no. 4, pp. 503-516, 1994.
11. J. M. Muggleton et al., “Wavenumber Prediction of Waves in Buried Pipes for Water Leak Detection,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 249, no. 5, pp. 939-954, 2002.
12. J. M. Muggleton et al., “Axisymmetric Wave Propagation in Fluid-Filled Pipes: Wavenumber Measurements in in Vacuo and Buried Pipes,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 270, pp. 171-190, 2004.
13. Osama Hunaidi, Wing T. Chu, “Acoustical Characteristics of Leak Signals in Plastic Water Distribution Pipes,” *Applied Acoustics*, vol. 58, pp. 235-254, 1999.

## 저자 약력

### ▶ 윤 두 병(Doo-Byung Yoon)



1991년: 연세대학교 기계공학과(학사)  
 1993년: 한국과학기술원 기계공학과(석사)  
 1998년: 한국과학기술원 기계공학과(박사)  
 2000년~현재: 한국원자력연구원 책임  
 연구원  
 <주관심 분야> 구조음향 및 진동 분야

### ▶ 박 진 호(Jin-Ho Park)



1983년: 부산대학교 기계공학과(학사)  
 1985년: 부산대학교 기계공학과(석사)  
 2006년: 한국과학기술원 기계공학과(박사)  
 1987년~현재: 한국원자력연구원 책임  
 연구원

### ▶ 신 성 환(Sung-Hwan Shin)



1997년: 한국과학기술원 기계공학과(학사)  
 1999년: 한국과학기술원 기계공학과(석사)  
 2004년: 한국과학기술원 기계공학과(박사)  
 2008년~현재: 한국원자력연구원 선임  
 연구원