

# 상호스펙트럼 위상정보를 이용한 배관 누설탐지방법에 관한 연구

## A Study on Method for Detecting Pipe Leak Using Phase Information of Cross-Spectrum

윤두병† · 박진호\* · 신성환\* · 전형섭\*\*

D.-B. Yoon, J.-H. Park, S.-H. Shin and H.-S. Jeon

### 1. 서 론

최근 발전소의 장기간 운전에 따라, 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, 국내외에서 매설배관 누설 탐지에 대한 관심이 점차 높아지고 있다.

매설배관의 누설탐지를 위한 대표적인 방법으로는 상호상관함수기법(Cross-correlation method)을 들 수 있으며, 이 방법은 상수도 배관의 누설탐지에 주로 활용되고 있다. 그러나 이러한 방법은 신호대 잡음비(SNR: Signal to Noise Ratio)가 작아질수록, 누설탐지 성능이 저하되는 단점이 있는 것으로 알려져 있다.

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

### 2. 이론 및 실험

† 교신저자; 한국원자력연구원  
E-mail : yoondb@kaeri.re.kr  
Tel : 042-868-8909, Fax : 042-868-8313

\* 한국원자력연구원  
\*\* 세안기술(주)

### 2.1 상호상관함수를 이용한 누설위치 추정

매설배관의 누설을 탐지하기 위해서는 일반적으로 Fig.1과 같이 누설이 추정되는 배관의 양단(지하 점검구나 소화전)에 가속도계를 설치한 후, 누설지점으로부터 배관 양단으로 전파되는 신호를 계측하고, 이에 대한 상호상관함수를 구하여 누설위치를 추정하는 방법이 활용된다. 이때 상호상관함수는 식 (1)과 같이 표현되며, 누설이 발생하는 경우 상호상관함수를 구하면  $\tau_d$ 에 해당하는 시간지연(위치)에서 피크가 발생하므로 이 정보를 이용하여 누설위치를 추정할 수 있다. 이러한 상호상관함수를 이용한 누설탐지방법은 주변 기계소음(주기적으로 반복되는 소음)이 있는 경우 누설위치 추정 성능이 저하되는 것으로 알려져 있다.

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

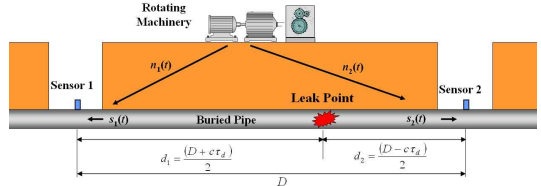


Fig. 1 Schematic of measurement setup for leak detection of a buried pipe in a power plant

### 2.2 위상정보를 이용한 시간지연 추정방법

매설배관 양단에 설치된 센서로부터 계측된 신호에 대해 FFT(Fast Fourier Transform)를 수행하여,  $X_1(f)$ 와  $X_2(f)$ 를 구한 후 이들의 상호스펙트럼을 구하면 상호스펙트럼은 다음과 같이 표현된다.

$$S_{12}(f) = X_1(f)^* \cdot X_2(f) \quad (2)$$

상호스펙트럼은 크기와 위상(phase)의 곱으로 표현( $S_{12}(f) = |S_{12}(f)| \cdot e^{j\phi_{12}(f)}$ )되며, 이 때 배관 양단에 설치된 센서로부터 계측된 누설신호에 대한 상호스펙트럼의 위상은 식 (3)과 같이 표현될 수 있다. 식 (3)의 첫 번째 항은 누설진동파가 양단의 센서로 전파하는 시간지연( $\tau_d$ )에 대한 정보를 가지고 있으며, 두 번째 항은 기계잡음 및 주변 환경에 의해 발생하는 위상( $\phi_{12}(f)$ )의 잡음성분을 나타낸다.

$$\phi_{12}(f) = 2\pi f\tau_d + n_\phi(f) \quad (3)$$

따라서 상호스펙트럼의 위상( $\phi_{12}(f)$ )의 기울기( $d\phi_{12}/df$ )가 양단의 센서로 전파하는 누설진동파의 시간지연( $\tau_d$ )을 나타내므로, 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 커브피팅을 수행하여 구한 시간지연 값을  $\hat{\tau}_d$ 라 하면, 이러한 시간지연 정보를 이용하여 상호스펙트럼의 위상데이터를 대체( $e^{j2\pi f\hat{\tau}_d}$ )하고, 이에 대한 역푸리에변환(Inverse FFT)을 수행함으로써, 상호상관함수를 구할 수 있으며, 이 정보를 배관의 누설위치를 추정하는데 활용할 수 있다.

### 2.3 배관 누설 실험 결과

제안한 배관 누설신호의 시간지연 추정방법의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 2 (a)와 같이 실험장치를 구성하여 실험을 수행하였다. Fig. 2 (a)에서 볼 수 있듯이, 인위적으로 누설을 발생시키기 위하여, 배관상의 3개 위치(P1-P3)에 설치된 볼밸브를 조작하여 인위적인 누설을 발생시킬 수 있도록 하였다. 또한 기계잡음이 상호상관함수기법에 미치는 영향을 실험적으로 알아보기 위하여 배관을 건물 공기조화장치의 팬 인근에 설치하였다.

Fig. 2 (b)는 기계잡음(공기조화장치의 팬)이 존재하는 상황에서 P1 위치에 누설이 발생하는 경우에 센서 1,2에서 계측한 진동신호의 상호상관함수를 나타내고 있다. Fig. 2 (b)를 관찰해 보면 실제 누설에 의한 피크 이외에 기계잡음 성분에 의해 주기적으로 발생하는 다수의 피크들로 인하여 누설 위치의 정확한 추정이 어려움을 알 수 있다. Fig. 2 (c)를 관찰

해 보면 기계잡음이 존재하는 상황에서도 상호스펙트럼의 위상데이터는 선형적인 형태를 나타내며, 이러한 위상정보를 직선으로 커브피팅(점선)하여, 시간지연 정보( $\hat{\tau}_d$ )를 추출할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 2 (d)는 이러한 기울기 정보를 위상데이터로 대체( $e^{j2\pi f\hat{\tau}_d}$ )하고, 이에 대한 역푸리에변환을 수행하여 상호상관함수를 구한 결과를 나타내며, 상호상관함수 그래프에서 양단 센서에서의 누설진동파의 시간지연정보를 용이하게 파악할 수 있음을 알 수 있다.

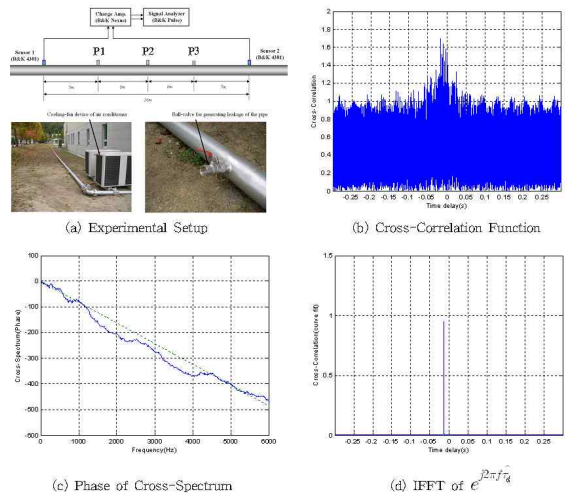


Fig. 2 Leak detection experiment for estimating the time delay at the two sensors (leakage P1)

### 3. 결 론

발전소와 같이 매설배관 주변에 다수의 회전기계 운전에 의한 잡음이 발생하는 환경에서 적용이 가능한 배관 누설탐지방법으로, 상호스펙트럼의 위상정보를 이용하여 배관에서 발생하는 누설신호의 시간지연을 추정하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 기계잡음이 존재하는 상황에서 배관의 누설탐지 실험을 수행하였으며, 실험 결과 회전체 기계잡음 성분이 존재하는 경우에도 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 판단된다.