

다중 센서간 위상 차이를 이용한 충격 위치추정 기법

Source localization technique for metallic impact source by using phase delay between different type sensors

최경식†·최영철*·박진호*·김환우**

Kyoung-Sik Choi, Young-Chul Choi, Jin-Ho Park and Whan-Woo Kim

Key Words : Loose Part Monitoring System(금속파편 감시시스템), Impact Source Localization(충격위치추정), Phase delay(위상지연), Cross Spectrum(상호스펙트럼), Hilbert Transform(힐버트 변환), Envelope(포락선), Flexural wave(굽힘파), Accelerometer(가속도계), AE sensor(AE 센서)

ABSTRACT

In a nuclear power plant, loose part monitoring and its diagnostic technique is one of the major issues for ensuring the structural integrity of the reactor system. Typically, accelerometers are mounted on the surface of a reactor vessel to localize impact location caused by the impact of metallic substances on the reactor system. However, in some cases, the number of the accelerometers is not enough to estimate the impact location precisely. In such a case, one of alternative plan is to utilize another type sensors that can measure the vibration of the reactor structure even though the measuring frequency ranges are different from each others. The AE sensors installed on the reactor structure can be utilized as additional sensors for loose part monitoring. In this paper, we proposed a new method to estimate impact location by using both accelerometer signal and AE signal, simultaneously. The feasibility of the proposed method is verified by an experiment. The experimental results demonstrate that we can enhance the reliability and precision of the loose part monitoring.

기 호 설 명

C_g : 군속도 (group velocity)
 k : 파수 (wave number)
 ρ : 밀도 (density)
 h : 두께 (thickness)
 E : 영계수 (Young's modulus)
 ν : 푸아송 비 (Poisson's ratio)
 α : 신호 감쇄율 (decay ratio)
 λ : 파장 (wave length)
 θ : 위상지연 (phase delay)

\mathcal{F} : 푸리에 변환 (Fourier Transform)
 \mathcal{H} : 힐버트 변환 (Hilbert Transform)
 $sgn(t)$: 사인함수 (sign function)
 $R_{x,y}(\tau)$: 상호상관함수 (Cross Correlation)
 T : 주기 (Period)
 $\frac{N_0}{2}$: 백색 가우시안 잡음 (White Gaussian Noise)

1. 서론

원자력 발전소 내부에 금속 이물질에 의한 원자로 내부 손상은 안정성 문제를 야기시킬 수 있기 때문에 현재 가장 이슈화 되고 있으며, 실제 원전에서 금속 이물질이 발생하여 원자력 발전소를 정지한 사례가 보고되었다.⁽¹⁾

† 최경식; 충남대 전자전파정보통신공학과
E-mail : punky301@naver.com
Tel : (042) 868-4868, Fax : (042) 868-8313

* 한국원자력연구원(KAERI)

** 충남대 전자전파정보통신공학과

금속 이물질 충격신호를 검출하고 진단하기 위해 발전소에서는 금속파편감시시스템(LPMS)⁽²⁾을 운영하고 있다. 금속파편 감시시스템은 금속파편의 충격신호를 검출한 다음 신호분석을 통해 금속파편의 충격위치 및 질량을 추정함으로써 진단한다. 이 중에서 충격이물질 위치추정과 관련하여 현재 많은 기법들이 개발되었으며 적용되고 있다.^(3,4) 충격파 신호의 정확한 위치 추정을 위해 충격소음원이 발생한 구역에 위치가 다른 최소 3개 이상의 센서가 부착되어 있어야 충격위치를 추정할 수 있다. 원자력 발전소에는 가속도계 센서가 충분히 설치되지 않은 경우가 있으며, 3개 이상의 센서가 설치되어 있더라도 센서 혹은 장비결함 등으로 신호를 받지 못하는 경우도 종종 발생하기 때문에 금속이물질이 존재하더라도 위치추정이 어려운 경우가 발생한다. 원자력 발전소 1차 계통에서는 이물질 감시를 위한 가속도계 센서만 활용한다. 하지만 냉각수 누설을 감시하기 위한 음향방출센서(Acoustic Emission Sensor; AE Sensor)가 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 가속도계 주위에 부착되어 있다. 충격신호가 발생할 경우 가속도계 센서뿐만 아니라 음향방출센서 신호까지 동시에 측정한다면, 가속도계를 추가 설치하지 않고 3개 이상의 신호를 받을 수 있다. 하지만 가속도계의 주파수영역은 수 Hz에서 수십 KHz 이고 음향방출 센서의 경우는 수십 KHz에서 수백 KHz 이기 때문에 두 센서를 사용하여 동시에 신호를 받더라도 충격위치를 추정하기 위한 신호처리가 어렵게 된다. 따라서 본 논문에서는 주파수 특성이 다른 두 센서 신호를 이용하여 충격위치를 추정하는 기법에 대해 소개한다.

2. 기본이론

2.1 기존 위치추정기법

가장 고전적인 방법으로 시간영역에서 충격파 신호의 시작점을 찾아 위치추정을 하는 삼각법과 원고차법이 있다.⁽³⁾ 이 기법들은 충격파신호에 잡음이 많은 경우 신호의 시작점을 정확히 찾을 수 없어 위치추정 결과에 오차가 커지게 된다. Fig. 4은 잡음이 거의 존재하지 않는 실험실 환경에서 취득한 강구 충격파신호에 백색잡음 $\frac{N_0}{2} = 200$ 을 합산해서 만든 신호이다. 그림에서 볼 수 있듯이 충격파신호에 잡음이 많이 포함된 경우 정확한 시작점을 찾기 어려워 분석을 수행하는 사람에 따라 다른 위치추정 결과를 내게 된다. 또한 신호에 잡음성분이 없더라도 신호취득 지점이 충격소음원에서 거리가 멀리 떨어져 있으면 모드별 전파속도 차이로 인하여 신호가 변형되어 특정 모드의 시작점을 찾기 어렵게 된다.

최근에 개발된 시간주파수영역에서 위치추정 기법^(4,5)은 Wigner Ville 분석 후 신호 대 잡음비가 좋은 주파수대를 선택하여 분산곡선에서 충격파 신호의 시작점을 찾아 위치

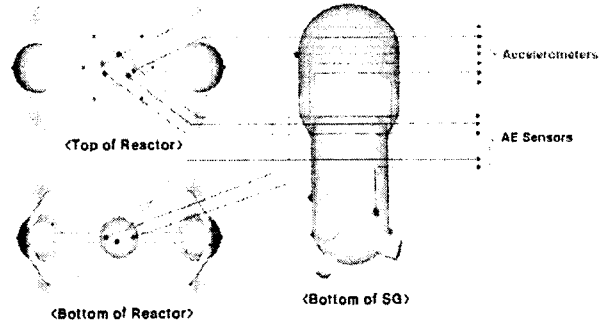


Fig. 1 The location of sensors, red circle denote accelerometers, and black circle denote acoustic emission sensors

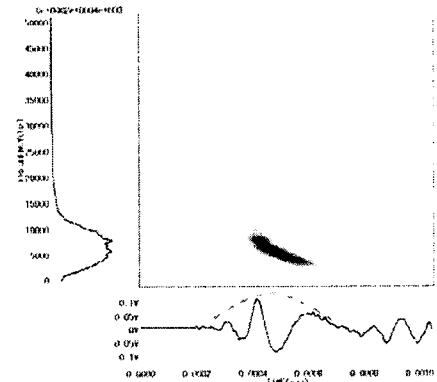


Fig. 2 Result of time frequency analysis from Accelerometer : the impact signal is measured at the steel plate, dot line is the envelope of impact signal.

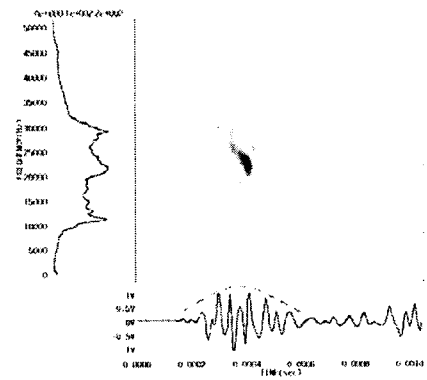


Fig. 3 Result of time frequency analysis from AE sensor : the impact signal is measured at the steel plate, dot line is the envelope of impact signal

추정을 한다. 기존에 시간영역에서의 위치추정기법에 비해 잡음에 강하며, 시간주파수 분석을 통해 주파수에 따라 굽힘파의 군속도^(8,9)를 적용하므로 신호 분석자에 따라 위치 추정결과가 많이 다르지 않고 비슷한 결과를 얻는 장점이 있다. 하지만 Fig 3과 같이 음향방출센서를 통해 취득한 신호는 고주파 성분을 받기 때문에 많은 모드들이 중첩되어 분산곡선이 복잡하여 시간-주파수 영역에서 센서간 시간지연 차이를 구하기 어렵다는 단점이 있다.

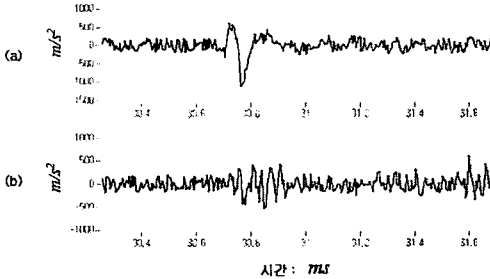


Fig. 4 Measured Impact signals due to impact of metallic ball on the plate, (a) is accelerometer signal and (b) is AE signal.

(white noise of $\frac{N_0}{2} = 200$ is added)

2.2 포락선 위상지연차를 이용한 위치추정 기법

가속도계센서와 음향방출센서는 주파수특성이 상이하다. 두 센서의 주파수 특성이 다르더라도 Fig 2와 Fig 3의 시간영역신호에서 볼 수 있듯이 중심주파수는 다르지만 충격파의 전체적인 형상인 포락(Envelope)은 비슷함을 알 수 있다. 따라서 가속도계와 음향방출센서에서 받은 신호의 포락을 구한 다음 두 센서간의 시간차이를 구할 수 있다면, 충격위치 추정에 적용할 수 있을 것이다.

2.2.1 충격파신호 포락선 구하기

기존에 위치추정 기법은 중심주파수가 다르면 적용하기 어렵다.^(3,4) 본 논문에서 제안된 방법은 중심주파수가 달라도 두 신호간 공통으로 존재하는 주파수를 이용한다. 하지만 이 기법에도 선택할 수 있는 주파수에 제한조건이 존재한다. 충격소음원에서 두 센서에 전달된 최대 시간지연 차이는 충격소음원과 센서들이 나란히 일직선상에 놓인 경우이며, 이때 선택된 주파수의 반 파장이 두 센서간 거리 차이보다 커야 한다. 즉, 충격소음원에서 전달된 두 센서 신호의 최대 시간지연차이가 선택된 주파수의 반주기 보다 짧아야 한다. 선택된 주파수의 파장을 λ , 두 센서간 거리를 d

라면, $d < \frac{\lambda}{2}$ 이고 아래 관계식을 만족해야 한다.

$$d < \frac{C_g(f)}{2 \times f} = \frac{C_g(f) \times T}{2} \quad (1)$$

(1) 식에서 위상지연차이를 이용한 위치추정기법은 저주파수 영역에 한정된다. 다행히 균일한 탄성영역에서 굽힘파의 군속도 $C_g(f)$ 는 주파수함수^(7,8,9)로서 주파수가 높을수록 군속도는 빠르다. 보다 확실한 방법으로 저주파수의 위상지연차이를 구하기 위해 포락선을 이용하는 방법이 있다. 힐버트 변환⁽⁶⁾은 주파수 영역에서 양의 주파수 영역에는 $-j$ 를 곱하고 음의 주파수에는 $+j$ 를 곱해서 얻을 수 있다. 시간 $t=0$ 이후에만 값을 갖는 유인함수(causal function)를 $a(t)$ (즉, $a(t)=0, t < 0$) 라고 하고 푸리에 변환된 결과를 $A(f)$ 힐버트변환된 결과를 $\tilde{a}(t)$ 라고 하면,

$$\begin{aligned} \tilde{a}(t) &= \mathcal{H}\{a(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} a(\tau) \left(\frac{1}{t-\tau} \right) d\tau \quad (2) \\ &= \frac{1}{\pi} a(t) * \left(\frac{1}{t} \right) \end{aligned}$$

이고 길쌈이론(convolution theorem)을 적용하면 시간영역에서 길쌈연산은 주파수 영역에서 곱으로 표현되므로 힐버트 변환결과를 주파수 영역으로 옮기면 아래와 같다.

$$\mathcal{F}\{\tilde{a}(t)\} = A(f) \times \{-j \operatorname{sgn}(f)\} \quad (3)$$

즉, 원래 주파수 성분에서 양의 주파수 영역에는 $-j$ 만큼 위상이동이 있고 음의 주파수 영역에는 $+j$ 만큼 위상이동이 있다.

2.2.2 센서간 시간지연차이 구하기

충격 위치를 추정하기 위해서는 센서간 시간지연 차이를 구해야 한다. 앞서 설명하였듯이 주파수 특성이 다른 두 센서의 포락을 구한 다음 시간지연 차이를 구해야 하는데, Fig 2와 Fig 3에서 볼 수 있듯이 포락만으로 시간지연 차이를 구하기 어렵다. 따라서 각 센서 신호의 포락 위상차이를 이용한 센서간 시간지연 차이를 찾는 방법에 대해 살펴본다. 신호들은 무한한 사인(sine)과 코사인(cosine) 함수의 조합⁽⁶⁾으로 이루어져 있으며, 하나의 충격소음원에 대해서 신호들은 동일한 주파수 성분을 가진다. 신호를 구성하는 주파수 성분 중에서 충격에 의해 발생한 관심 주파수를 f_0 라하고, 먼저 도달한 신호를 x_1 , 시간지연 τ_0 를 가지고 도달한 신호를 x_2 이라고 하면 두 신호는 아래와 같이 표현할

수 있다. (A : 임의의 값, $\alpha < 1$)

$$x_1(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \theta) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} x_2(t) &= \alpha x_1(t - \tau_0) \\ &= \alpha A \sin(2\pi f_0(t - \tau_0) + \theta) \end{aligned} \quad (5)$$

(4)번과 (5)번 신호의 상관함수를 구하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} R_{x_1 x_2}(\tau) &= E[x_1(t)x_2(t + \tau)] \\ &= \alpha E[x_1(t)x_1(t + \tau - \tau_0)] = \alpha R_{x_1 x_1}(\tau - \tau_0) \end{aligned} \quad (6)$$

(6) 식에서 위상지연 τ_0 을 가지는 두 신호의 상호상관함수는 위상지연 τ_0 을 갖는 자기상관함수의 형태로 나타난다.

(11) 이 관계를 주파수 도메인에서 보면 상호스펙트럼 함수는 상호상관함수에 대한 푸리에 변환이다. 두 신호에서 특정 주파수의 시간지연은 주파수 도메인에서 위상지연차로 구할 수 있다. x_1 에 대한 푸리에 변환 결과를 $X_1(f)$, x_2 에 대한 푸리에 변환 결과를 $X_2(f)$, 그리고 상호스펙트럼 함수를 $S_{X_1 X_2}(f)$ 라고 하면

$$\begin{aligned} S_{X_1 X_2}(f) &= X_1^*(f) \times X_2(f) \\ &= |X_1(f)| |X_2(f)| e^{j\{\theta_{x_2}(f) - \theta_{x_1}(f)\}} \end{aligned} \quad (7)$$

(7) 식에서 주파수 f 에서 상호 스펙트럼 함수의 크기는 두 신호 진폭의 곱으로 나타나고 위상은 두 신호의 위상차로 나타난다. 흥미로운 것은 곱으로 인하여 두 신호에 공통으로 존재하는 주파수 성분은 남고 한 신호에 없는 주파수 성분은 감쇄되어 잡음성분은 제거되고 두 센서에 공통으로 존재하는 충격파의 의한 주파수 성분만 남게 된다.

주기 T 와 주파수 f 사이에는 $T = \frac{1}{f}$ 인 관계가 있으므로, 두 신호사이 위상 차이를 통해서 두 신호사이 시간지연 차이를 구하기 위해서는 주기에 위상 지연 비를 곱하여 구할 수 있다.⁽⁹⁾ 즉, 시간 지연을 $T_d(f)$ 라고 하면

$$T_d(f) = \frac{1}{f} \times \frac{\theta_{x_2}(f) - \theta_{x_1}(f)}{2\pi} \quad (8)$$

이다. (8) 식에 곱힘파의 군속도를 곱하여 충격파 소음원에서 두 센서에 전달된 거리차이를 구할 수 있다. 주파수 f 에서 곱힘파의 군속도를 $C_g(f)$ 라고 하면 충격 소음원에서 두 센서사이 거리차이는 다음과 같다.

$$\Delta r_{1,2} = r_1 - r_2 = C_g(f) \times T_d(f) \quad (9)$$

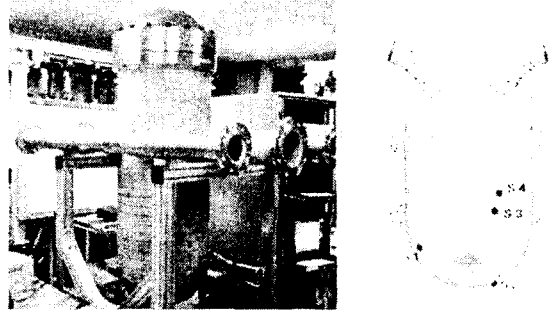


Fig. 5 Experimental setup for 1/8 Reactor Vessel, S1&S2 denote accelerometers, S3&S4 denote AE sensors.

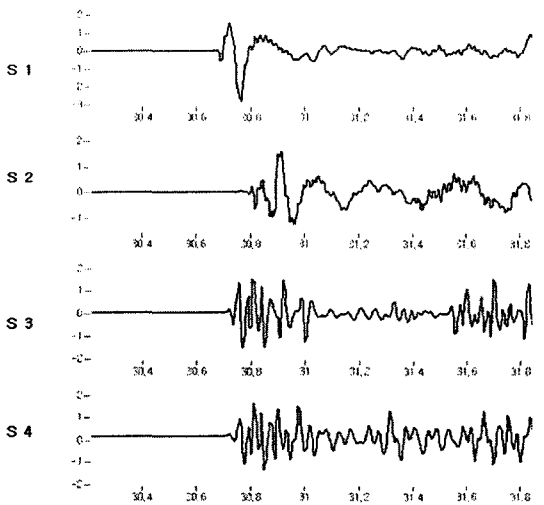


Fig 6. Impact response signals for 1/8 reactor model ($t_1=30.69$, $t_2=30.80$, $t_3=30.72$, $t_4=30.73$ (ms)).

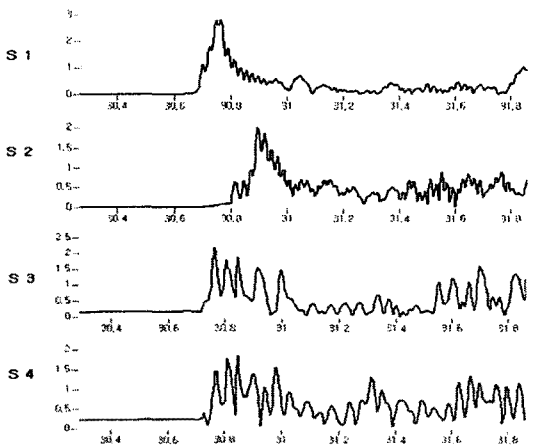


Fig. 7 Hilbert Transform of the measured impact signals.

두 센서로부터 거리차이가 일정한 지점은 쌍곡선을 그리게 된다. 각각의 센서들로부터 얻은 쌍곡선이 만나는 지점이 금속이물질 충격위치가 된다.^(1,2)

3. 실험

실험에 사용된 원자로모형은 실제 원자력발전소 KSNP 원자로를 1:8로 축소한 모델로 두께 10mm, 재질 SUS 304이 사용되었으며, 충격파신호를 가진 시키기 위해 질량 47g의 강구가 사용되었다. 가속도계센서는 B&K 4374 타입이 사용되었고, AE 센서는 PAC 사의 광대역형 센서가 사용되었다. Fig. 5는 실제 실험에 사용된 1:8 축소형 원자로 모형에 대한 센서위치와 실험장치구성도이다. 본 실험에서는 동일한 충격소음원에 대해서 가속도 센서와 음향방출 센서로 동시에 신호를 취득하여 충격이물질 위치추정을 하기 위해 S 1과 S 2에는 가속도 센서를 부착하고, S 3와 S 4에는 AE센서를 부착하여 200KS/s 으로 신호를 취득하였다. Fig. 6는 실제 강구로 충격을 가해 취득한 충격신호를 보여준다. 잡음이 거의 존재하지 않는 실험실에서 취득한 신호지만 충격파신호의 시작점이 분석자마다 다를 수 있다. 대략적인 충격파신호의 시작점을 찾으면 $t_1=30.69ms$, $t_2=30.80ms$, $t_3=30.72ms$, $t_4=30.73ms$ 이다. 이 신호들로 시간지연 차이를 구하면 경우의 수는 센서 수를 n 이라고 하면 모두 $\frac{n \times (n-1)}{2}$ 가지에서 6가지 경우의 수가 있다.

$$\begin{aligned} \Delta t_{1,2} &= t_1 - t_2 = 30.69 - 30.80 = -0.11 \text{ ms} \\ \Delta t_{1,3} &= t_1 - t_3 = 30.69 - 30.72 = -0.03 \text{ ms} \\ \Delta t_{1,4} &= t_1 - t_4 = 30.69 - 30.73 = -0.04 \text{ ms} \\ \Delta t_{2,3} &= t_2 - t_3 = 30.80 - 30.72 = 0.08 \text{ ms} \\ \Delta t_{2,4} &= t_2 - t_4 = 30.80 - 30.73 = 0.07 \text{ ms} \\ \Delta t_{3,4} &= t_3 - t_4 = 30.72 - 30.73 = -0.01 \text{ ms} \end{aligned}$$

이와 같이 육안으로 충격파 신호의 시작점을 찾는 경우 분석자마다 다른 결과를 얻어 오차가 상당히 크며, 위치추정 결과를 신뢰하기 어렵다. 따라서 본 논문에서 소개한 위상 지연차기법을 적용하기 위해 Fig. 7는 취득한 신호에 포락선을 구한 것이고, Fig. 8과 Fig 9는 센서간 위상 차이를 구하기 위해 포락선에 대해 상호스펙트럼 분석결과 중 두 가지 경우이다. Fig. 8에서 직류 오프셋을 제외하고 1261.59Hz 에서 최대 값을 보이며, 이때의 위상차는 -0.83 rad 이다. Fig. 9에서 1238.39Hz에서 최대 값을 보이고 이때의 위상차는 -0.38 rad 이다. 모든 경우에 대해

위상차를 구하여 (8)식에 대입하면 충격소음원에서 각 센서에 도달한 시간지연 차이를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta t_{1,2} &= \frac{1}{1261.59 \text{ Hz}} \times \frac{-0.83}{3.14 \times 2} = -0.105 \text{ ms} \\ \Delta t_{1,3} &= \frac{1}{1238.39 \text{ Hz}} \times \frac{-0.35}{3.14 \times 2} = -0.045 \text{ ms} \\ \Delta t_{1,4} &= \frac{1}{1230.77 \text{ Hz}} \times \frac{-0.41}{3.14 \times 2} = -0.053 \text{ ms} \\ \Delta t_{2,3} &= \frac{1}{1246.11 \text{ Hz}} \times \frac{0.38}{3.14 \times 2} = 0.049 \text{ ms} \\ \Delta t_{2,4} &= \frac{1}{1269.84 \text{ Hz}} \times \frac{0.34}{3.14 \times 2} = 0.043 \text{ ms} \\ \Delta t_{3,4} &= \frac{1}{1273.89 \text{ Hz}} \times \frac{-0.07}{3.14 \times 2} = -0.009 \text{ ms} \end{aligned}$$

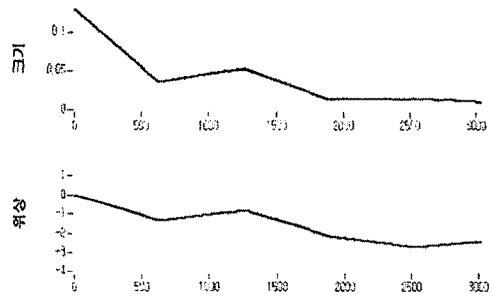


Fig. 8 Cross Spectrum for S1 and S2, signals (peak freq 1261.59Hz, phase delay -0.83 rad).

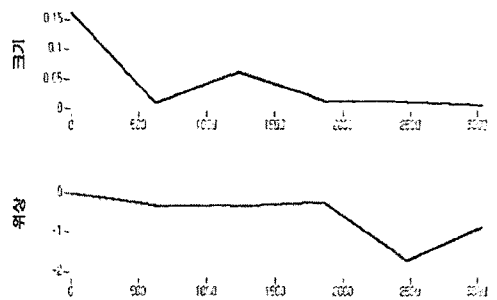


Fig. 9 Cross Spectrum for S1 and S3 signals (peak freq 1238.39Hz, phase delay -0.35 rad).

두께가 10mm 인 SUS 304 재질에서 주파수가 1250Hz에서의 군속도는 650.82 m/s 이다.^(8,9) 시간영역에서 구한 센서간 시간지연차와 포락선 위상차를 이용해 구한 시간지연차에 각각 군속도를 곱하여 충격소음원에서 센서간 거리

차이를 구한 후 삼각법^(1,2)을 적용하여 위치추정을 할 수 있다. Fig. 10 (a)는 시간지연차를 이용한 위치추정 결과이고 Fig. 10 (b)는 포락선 위상차를 이용한 위치추정 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 시간 지연차를 이용한 위치추정 결과는 실제 충격위치와 많이 다르지만 포락선 위상지연차를 이용한 위치추정 결과는 실제 충격위치에 가깝다. 또한 포락선 위상지연차를 이용한 위치추정 기법은 힐버트변환과 상호스펙트럼을 이용한 수식에 의존하므로 위치추정 결과가 분석자에 관계없이 일정하게 나온다. 하지만 시간지연차를 이용한 위치추정은 분석자의 판단에 의존하므로 항상 다른 위치추정 결과를 얻게 된다.

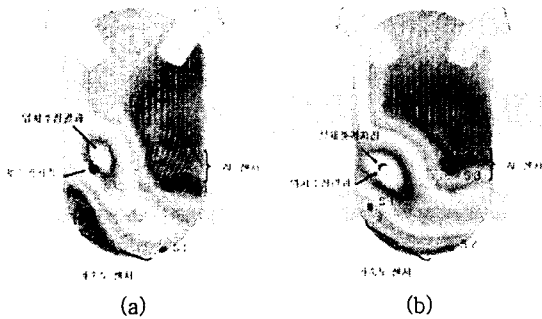


Fig. 10 Result of impact source localization, (a) is the result of time delay method, (b) is the result of phase delay method.

4. 결 론

본 연구의 목적은 금속이물질 충격위치를 보다 정확하게 추정 하기위해 가속도계 센서와 음향방출센서의 동시 활용 가능성을 보는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 주파수 특성이 다른 두 센서신호에 적용할 수 있는 포락선 위상차를 이용한 위치추정기법을 적용하였다. 개발된 포락선 위상지연차를 이용한 위치추정기법의 타당성을 검증하기 위하여 KSNP 1:8 원자로 모델에 대하여 가속도계와 음향방출센서를 동시에 부착하여 실험 하였다. 실험결과 가속도계 센서와 음향방출센서는 주파수 특성이 서로 다르지만 포락선의 주파수는 동일했으며, 포락선 위상차를 이용하여 위치를 추정한 결과 정확하게 충격소음원의 위치를 추정할 수 있었다. 본 연구에서는 원자로 1:8 모형에 대해서 충격파 신호를 받고 위치 추정을 하였지만 향후 실제 발전소 금속 이물질 충격신호에 대해 포락선 위상지연차를 이용한 위치추정 기법을 적용하여 검증할 계획이다.

참 고 문 헌

- (1) B.T. Lubin, "Analysis of Internals Vibration Monitoring and Loose Part Monitoring Systems Data Related to the St. Lucie 1 Thermal Shield Failure," Reactor Noise-SWORN VI, Progress in Nuclear Energy, Vol. 21, 1988
- (2) C.W. Mayo et al, "Loose-Part Monitoring System Improvements" EPRI NP-5743 Project 2642-1 Final Report March 1988
- (3) I. K. Rhee, et al.: "Development of Loose Parts Signal Location Estimating Technique in High Pressurized Structure(Research Report KAERI/CM-102/94, 1994)"
- (4) Jin-Ho Park and Yang-Hann Kim "Impact source localization on an elastic plate in a noisy environment", Measurement and Science Technology. 17(2006) 2757-2766
- (5) L. Cohen: "Time-Frequency Distribution", Prentice Hall PTR, Engle-wood Cliffs, New Jersey, 1995)
- (6) R.B. Randall, B. Tech., B.A, 1987, B&K "Frequency Analysis" 3rd edition p19-31, p58-62
- (7) Yong-Moo Cheong, Joo-Hag Kim and Hyun-Kyu Jung, "Dynamic elastic constants of weld HAZ of SA 508 CL. 3 steel using resonant ultrasound spectroscopy," 15th world conference on non-destructive testing 15-16 October 2000 in Rome, 2000
- (8) Cremer, L. and Heckl, M., 1998, Structural-borne Sound, Spring-verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Toyko, p.101
- (9) Viktorov, I.A., 1967, "Rayleigh and Lamb Waves", Plenum Press, pp. 67~102
- (10) Donald, R., 1987, "Mechanics of Underwater Noise" Peninsula Publishing Los Altos, California, p.159
- (11) Julius S. Bendat and Allan G. Piersol "RANDOM DATA, Analysis and Measurement Procedures" 2nd Edition, p109-p159