

급속파편 감시 시스템에 대한 시간-주파수 해석 적용 연구 Application of Time-Frequency Analysis Methods to Loose Part Impact Signal

박진호^{*} · 이정환^{*} · 김봉수^{**} · 박기용^{*}

Jin-Ho Park, Jeong-Han Lee, Bong-Soo Kim, Gee-Yong Park

Key Words : "Wavelet transform(웨이브렛 변환)", "Wigner-Ville distribution(위그너빌 분포)", "loose part(급속파편)", "nuclear plant(원자력발전소)"

ABSTRACT

The safe operation and reliable maintenance of nuclear power plants is one of the most fundamental and important tasks. It is known that a loose part such as a disengaged and drifting metal inside of reactor coolant systems might lead to a serious damage because of their impact on the components of the coolant system. In order to estimate the impact position of a loose part, three accelerometers attached to the wall of the coolant system have been used. These accelerometers measure the vibration of the coolant system induced by loose part impact. In the conventional analysis system, the low pass filtered version of the vibration data was used for the estimation of the position of a loose part. It is often difficult to identify the initial point of the impact signal by using just a low passed time signal because the impact wave is dispersed during propagation into the sensor. In this paper, the impact signal is analysed by use of various time frequency methods including the short time Fourier transform(STFT), the wavelet transform, and the Wigner-Vill distribution for finding a convenient way to identify the starting point of a impact signal and their advantages and limits are discussed.

1. 서 론

신호처리 분야에서 푸리에 변환(Fourier transform)은 구 조물로부터 취득된 진동 신호의 스펙트럼 분석에 대해 가장 유용한 기법 중에 하나이다. 그러나 푸리에 변환은 정상(stationary) 신호 해석에 적합하다. 원자력 발전소의 원자로 냉각 시스템(Reactor coolant system)은 원자로에서 발생하는 열을 냉각함과 동시에 전기 생산을 위해 증기 발생기로 열을 전달하는 역할을 한다. 이 때루프인 원자로 냉각 시스템에 급속파편과 같은 이물질이 있는 경우, 급속파편은 냉각수에 의해 이동하면서 배관이나 다른 기기들과 충돌하면서 충격신호를 유발한다. 이러한 충격신호를 burst-type의 비정상(non-stationary) 신호로 주파수에 따라 신호의 진폭속도가 다르며, 가속도 센서로 측정된 경우 주파수 별로 퍼지형(dispersive) 형태의 신호가 된다. 비정상 신호에

대해, 단구간 푸리에 변환(short-time Fourier transform : STFT) 기법이 적용 가능하다.[1] STFT는 불확실성 원리로 인해 동시에 좋은 시간과 주파수 해상도(resolution)를 얻지 못한다. Wigner-Vill distribution[2]는 보다 나은 시간과 주파수 해상도를 얻을 수 있으나 계산 수행 과정에서 이것은 원신호의 물리적 특성이 아닌 계산상의 결과로써 원치 않은 cross-term들이 발생하는 문제점을 가지고 있다.

Wigner-Vill 분포의 cross-term 발생 문제를 해결하기 위해 웨이브렛 변환 기술이 소개된다. 웨이브렛 변환은 시간과 주파수의 해상도 관계에 하나의 규칙을 가지고 있는데 저주파수에서, 주파수 해상도는 좋고 고주파수에서, 시간 해상도가 더욱 좋아진다. 즉, 고주파 대역에서는 폭이 좁은 윈도우를, 저주파 대역에서는 폭이 넓은 윈도우를 사용한다는 것이다. 이러한 시간-주파수 기법들은 각각 장,단점을 가지고 있다. 본 논문에서, STFT, Wigner-Vill distribution, 그리고 웨이브렛 변화들에 대해서 알아보고 이러한 기법들을 이용하여 그림 1에시와 같이 원자로 냉각 시스템(reactor coolant system)의 증기발생기에서 강구 시험을 통하여 측정된 가속도 신호를 적용하여 파동의 전파 특성을 알아보았다. 그림 2는 냉각 시스템에서 측정된 강구 충격신호를 보여준다.

* 한국원자력연구원
E-mail : jgh213@kaeri.re.kr
Tel : 02988 2915 Fax : 02988 8163

** 한국원자력연구원

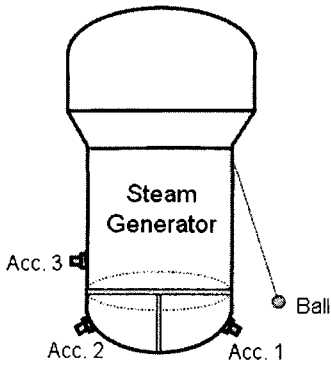


Fig.1 Nuclear coolant system

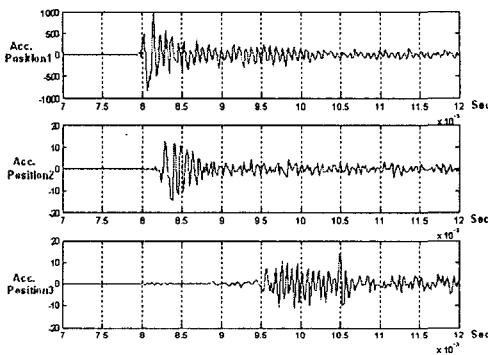


Fig.2 Vibration data measured on the system

2. 단구간 푸리에 변환

$s(t)$ 신호에 대한 STFT는 다음과 같이 정의된다.

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h^*(\tau - t) s(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

(1)

여기서 $h(t)$ 는 윈도우 함수이며 윈도우 함수의 도시적 표현은 그림 3과 같다. STFT에서 $S(t, f)$ 는 이동하는 윈도우의 크기에 따라 시간과 주파수 해상도의 차이가 발생하는데 윈도우 크기가 크면 주파수 해상도는 좋아지나 시간 해상도는 떨어지고, 윈도우 크기가 작으면 시간 해상도는 좋아지지만 주파수 해상도는 떨어진다.

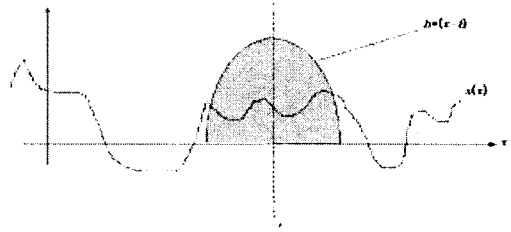


Fig. 3 Pictorial explanation of STFT

만일 이동하는 윈도우의 크기가 고정되면, 신호에 따라 시간과 주파수 해상도를 조절할 수 없게 된다. 그러므로 비정상 신호의 해석에 대해 시간-주파수 해상도는 상호 균형을 이루어야 한다. 그림 4는 원자로 냉각 시스템에서 측정된 충격 신호에 대한 단구간 푸리에 변환을 보여준다. 충격 신호의 시작점은 낮은 시간 해상도로 인해 정확한 위치를 찾기는 힘들다. 전체적인 분포는 알 수 있다.

3. 웨이브렛 변환

최근 웨이브렛 변환은 다양한 표현법에 따라 많은 공학 분야에서 사용되어지고 있다. 웨이브렛 변환은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$CWT(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt$$

(2)

여기에서 $\Psi(t)$ 는 mother wavelet으로, 다음식과 같다.

$$\psi(t) = A e^{-\left(\frac{t-b}{\sigma}\right)^2} e^{j2\pi \frac{t}{\alpha}(t-b)}$$

(3)

mother wavelet은 주파수 영역에서 a 에 의해 크기가 조정되며 시간 영역에서는 b 에 의해 옮겨진다. 웨이브렛 변환의 윈도우 크기는 a 에 의해 조정된다. 저주파수에서는 주파수 분해능을 증가시키고, 고주파수에서 시간 분해능을 증가시킨다. 시간-주파수에서 높은 해상도를 보기 위해서, 연속적인 웨이브렛 변환이 원자로 냉각 시스템에서 측정된 충격 신호 분석에 적용된다. 그림 5는 저주파수 영역에서의 높은 분해능을 보여주고 있으며 원자로 냉각 시스템의 전체적인 공진 모우드를 보여준다. 반면 고주파수에서는 주파수 해상도가 좋지 않고 냉각 시스템의 국부 공진을 보기에 충분히 명확하지 않음을 알 수 있다.

4. 위그너-빌 분포

일반적으로 Cohen의 등값으로서 언급되는 쌍일차 분포는 단일 분포, 위그너 빌 분포(WVD)로부터 모는 것이 유도될 수 있다. WVD는 다음과 같은 두개의 등식에 의해 정의된다.

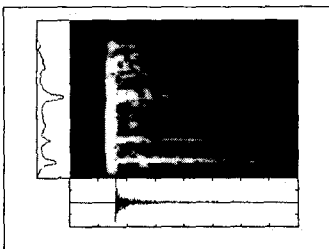
$$W(t, f) = \int s(t-\tau/2)s^*(t+\tau/2)e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (4a)$$

$$= \int S(f-v/2)S(f+v/2)e^{2\pi i v t} dv \quad (4b)$$

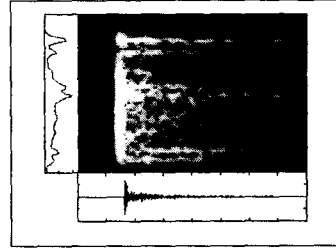
여기서 $s(t)$ 는 분석한 신호이며, $S(f)$ 는 푸리에 변환이고 *는 공액 복소수를 의미한다. WVD는 높은 시간-주파수 분해능을 얻을 수 있는 요소를 포함한 많은 비합리적인 특성을 가지고 있다. 그러나 WVD의 직접적인 적용은 cross-term을 생성시키는 요소에 의해 제한된다. 특히 신호 $a(t)+b(t)$ 의 WVD는 $a(t)$ 와 $b(t)$ 의 상호작용으로부터 발생한 auto-term이라고 언급된 추가 interference(cross-) 항에 따른 $a(t)$ 와 $b(t)$ 에 의한 요소들을 포함한다. 그것들은 cross-term들은 진동하고 auto-term들은 그렇지 않다는 사실에 의해서 입력 요소들에 직접적으로 연관된 분포 요소들인 auto-term들과는 구별되어 진다. 따라서 WVD에 2차원 low pass 필터를 적용시키면 auto-term에 연관되는 cross-term들을 감소시킨다. 쌍일차(bilinear) 시간-주파수 표현의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$C(t, f) = \iint W(t', f')\Phi(f-f', t'-t)dt'df' \quad (5)$$

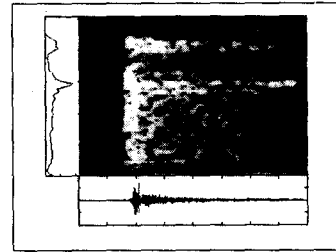
여기서 $C(t, f)$ 는 일반적인 쌍일차 분포이고 $\Phi(t, f)$ 는 2차원 low pass 필터이다. 함수 $\Phi(t, f)$ 의 다른 선택들은 유용한 방어진 분포들의 과잉을 초래한다. 그림 6은 기중 위그너 분포를 사용한 원자로 냉각 시스템에서 측정된 충격신호의 결과이다. 이 해석에서는 exponential 2차원 low pass 필터가 사용되었다. 초기 피크의 사각 주기는 매우 명확하게 확인되었지만 다른 진동 모우프는 쌍일차 선형 시간 주파수 변환으로 인해 초기 피크에 관해서 매우 작은 값으로 나타났다. 만약 냉각 구성물의 공진이 중요하다면, 3차원 디스플레이가 요구된다.



(a) Acc. Position 1

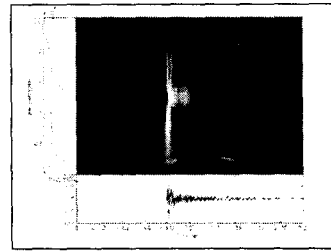


(b) Acc. Position 2

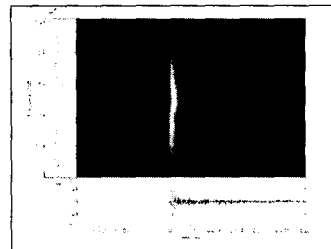


(c) Acc. Position 3

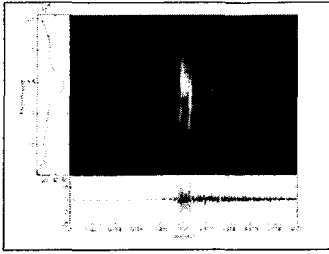
Fig. 1 Time-frequency analysis of the vibration signal measured on the coolant system using Short time Fourier transform



(a) Acc. Position 1

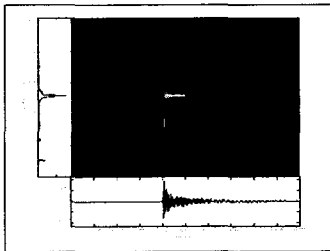


(b) Acc. Position 2

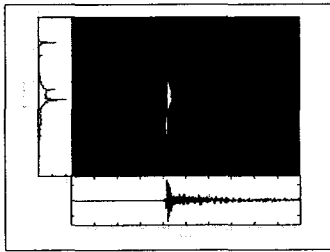


(c) Acc. Position 3

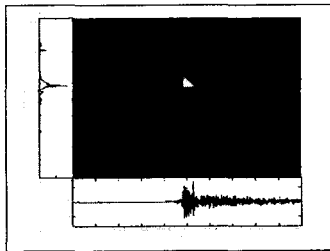
Fig. 5 Time-frequency analysis of the vibration signal measured on the coolant system using Wavelet transform



(a) Acc. Position 1



(b) Acc. Position 2



(c) Acc. Position 3

Fig. 6 Time-frequency analysis of the vibration signal measured on the coolant system using weighted Wigner distribution

4. 결론

STFT, 웨이브렛 변환과 WVD와 같은 시간 주파수 기법들은 원자로 냉각 시스템에서 측정된 충격신호의 특성 분석의 적용 확인을 위해서 알아보았다. 이러한 기법들은 각각 장단점들을 가지고 있다. 신호의 quick view에 관해서는 STFT가 해법이며 충격 탐지에 관해서는 웨이브렛 변환이 가장 좋은 해법 중에 하나이다. 단일 신호 분석을 위해 시간과 주파수 해상도가 중요한 정보라면 가장 위크니 분포가 좋은 해법으로 본다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자로 중장기 연구개발 기금으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Koenig, R. 1946, "The sound spectrogram" , J. Acoust. Soc. Am., Vol.18, p19-46
- (2) Ville, J. 1948, "Theori et application dela notion de signal and analytique" , Cables et Transmissions, Vol. 2A
- (3) T. Onsay and A. G. Haddow, 1994, "Wavelet transform analysis of transient wave propagation in a dispersive medium", JASA.