

특집

음향 진동 신호처리 기술과 응용
(non-stationary 신호 처리)

시간-주파수 분석을 이용한

원전 압력경계 구조물의 금속파편 감시 기법

박진호*

(한국원자력연구소 기계공학연구부)

1. 머리말

원자력발전소에서는 원자로 압력경계 구조물 내부의 금속파편(loose parts) 발생을 감시하기 위하여 금속파편 감시시스템(LPMS; loose parts monitoring system)을 설치·운용해오고 있다^(1,2).

금속파편 감시시스템의 목적은 원자로계통 내부의 금속 이물질의 발생을 조기에 탐지하여, 원자로 계통 기기 및 구조물의 구조건전성을 원전의 수명기간 동안에 확보하고자 하는 것이다. 금속파편 감시시스템은 그림 1에서 보여주는 바와 같이 원자로 압력경계 구조물 표면에 설치된 여러 개의 가속도계로부터 측정되는 진동 신호에 대한 모니터링을 수행한다.

원전 내부의 금속파편은 내부 구조물로부터 이완이나 부식 등으로 인하여 떨어져 나와 생성되기도 하고, 핵연료의 재장전이나 보수 활동 시에 유입될 수도 있다. 원자력 발전소의 원자로 계통 내부에 금속파편과 같은 이물질이 존재하게 되면, 이물질이 고압, 고속의 냉각수 유동을 따라 이동하여 원자로 내벽 손상, 일차 계통의 온도 감지 센서의 파손, 노심의 냉각재 유로 방해, 제어봉의 구동 장애, 증기발생기의 세관 손상 또는 원자로 냉각재 펌프의 임펠러 손상 등을 초래할 가능성이 있다. 따라서 원자로 일차계통 압력경계 구조물 내부에서 금속파편에 의한 충격신호가 발생한 경우 금속파편의 크기나 질량 및 에너지를 파악하는 것은 원자로 안전성 측면에 있어서 매우 중요한 일이다.

그러나 원자로 일차 계통 압력경계 외부에 설치된 가

속도 센서에서 취득한 충격 파형을 이용하여 충격 신호를 유발한 금속파편의 정보를 파악한다는 것은 매우 어렵고 불확실성을 많이 내포하고 있다. 금속파편 감시시스템의 경보 발생 시, 엔지니어의 판단 착오로 금속파편의 크기를 과소 평가하는 경우 원전의 무리한 가동으로 안전사고를 야기할 수 있고, 반대로 파편의 영향을 과도하게 오판할 경우 불필요한 원전 가동 정지로 경제적 손실과 국민 불안을 초래할 수 있다.

따라서 금속파편의 충격위치 추정 및 질량 추정의 신뢰성 및 정확성을 향상시키기 위한 연구가 활발하게 수행되고 있으며, 이러한 연구 중 하나로서 시간-주파수 분석을 이용한 금속파편 감시기법에 대해 소개하고자 한다.

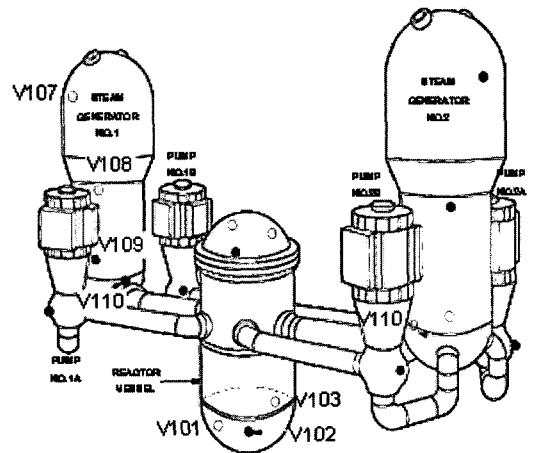


그림 1 한국 표준형 원전 압력경계 구조물 및 금속파편 탐지를 위한 가속도계 설치 위치

* E-mail : pjh213@kaeri.re.kr / Tel : (042) 868-2915

2. 금속파편 감시 기법

2.1 기존의 충격위치 추정방법

금속파편 감시시스템은 금속 이물질이 원자로의 압력경계 내부에 부딪힐 때 발생하는 충격파를 압력경계 외벽에 부착되어 있는 가속도계를 이용하여 탐지한다. 측정된 신호로부터 우선 충격 발생위치를 추정한 후 충격의 크기 및 에너지를 예측하며, 이로부터 금속파편의 충격 원인규명, 조기제거 여부 및 기계적 손상을 평가한다. 따라서 금속파편 감시 및 진단의 시작은 충격의 위치 추정으로부터 시작되며, 충격의 발생 위치를 얼마나 정확하게 추정하느냐가 곧 금속파편 감시의 성과와 직접적으로 관계된다. 또한 금속파편의 발생위치를 정확하게 알아야만 금속파편의 제거작업 절차를 수립할 수 있다²⁾.

금속파편의 충격 위치를 추정하기 위해서 원자력 발전소에서는 3~4개의 제한된 수의 센서만으로 충격의 발생위치를 추정할 수 있는 삼각법³⁾ 또는 원교차법⁴⁾을 사용하고 있다.

그림 2(a)에서 볼 수 있듯이 삼각법은 2차원 평판과 같이 분산특성(dispersive characteristic)을 갖는 구조물에서 균열이나, 누설 또는 충격의 발생위치를 추정하기 위하여 가장 보편적으로 사용되어온 방법으로서, 3개 또는 4개의 센서에 도달하는 충격파의 도달시간차를 이용하

여 위치를 추정한다.

그림 2(b)에 설명된 원교차법은 평판에서 국부적인 충격력에 의하여 발생한 표면파의 분산특성을 이용한 방법으로 1개의 가속도계에서 측정된 신호상에서 서로 다른 2개의 특정 전파 모드(의사종파 및 굽힘파 또는 굽힘파의 서로 다른 2개의 주파수 성분)의 도달시간차를 이용한다. 따라서 1개의 센서로부터 충격위치까지의 거리를 직접 구할 수가 있다.

기존의 충격위치 추정방법들은 충격파가 전파하는 매질의 군속도(group velocity)에 대한 정보를 사전에 정확하게 알고 있어야 하며 곡률이 있는 셀 형태에서는 정확하게 충격의 발생지점을 표시하기 어려운 단점이 있다. 또한 사용된 모든 센서에서 신호의 최대 진폭이 동일한 위상을 가져야만 위치 추정을 정확하게 할 수 있으며, 잡음에 취약하다. 특히 원교차법을 이용할 경우 가속도계에 측정되는 의사종파의 크기는 굽힘파에 비해 그 크기가 작으므로, 비교적 작은 배경잡음(background noise)이 존재하는 경우에도 의사종파의 도달시점을 명확하게 확인할 수 없는 경우가 많다.

삼각법과 원교차법의 이러한 단점을 보완할 수 있는 기법으로서 상호상관함수를 이용한 동일 위상 추정 방법⁵⁾이 소개되었으나, 이 방법 역시 잡음이 존재하는 경우에는 전체 센서에서 지배적인 동일 위상 성분을 찾아내는 데에 어려움이 있다.

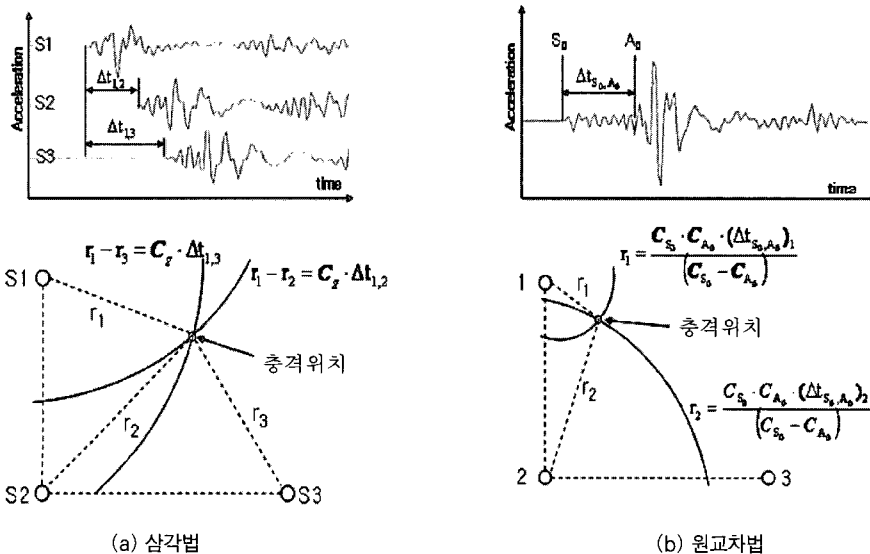
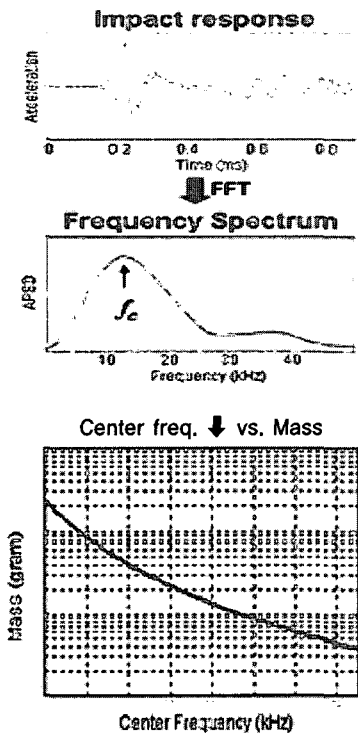
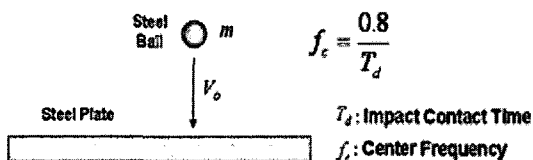
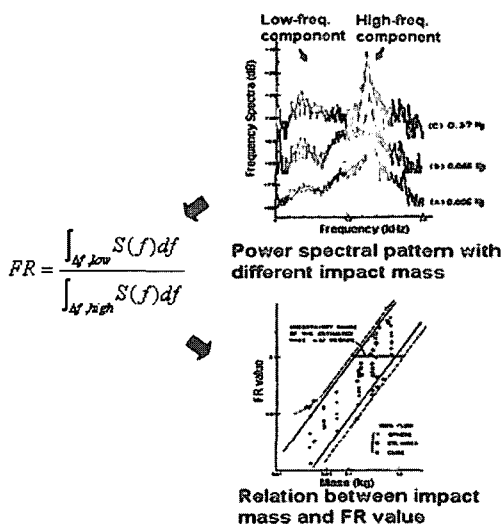


그림 2 기존의 충격위치 추정방법



(a) 중심주파수 방법



(b) 스펙트럼 비를 이용한 방법

그림 3 충격질량 추정방법

결론적으로 충격위치 추정의 정확도는 충격파가 센서에 도달하는 시점을 정확하게 찾을 수 있는가에 의해 결정되며, 비교적 큰 잡음이 존재하여 시간영역에서 충격파의 도달시간을 정확히 구하지 못하는 경우, 위치 추정의 정확도가 떨어질 수 있다.

2.2 기존의 충격질량 추정방법

금속파편의 질량을 추정하는 방법으로는 그림 3에 도시된 바와 같이 중심주파수 방법(center frequency method)⁶⁾과 스펙트럼 비를 이용한 방법(frequency ratio method)⁷⁾ 등이 있다.

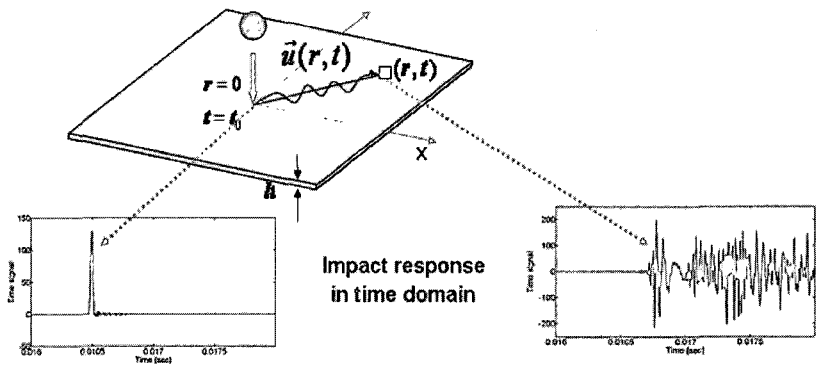
중심주파수 방법은 Hertz의 충격 이론에 근거한 방법으로 충격발생시 금속파편의 질량이 크면 구조물과의 접촉시간이 길어지고 스펙트럼의 중심주파수가 낮아지며, 반대로 질량이 작으면 접촉시간이 짧아지고 스펙트럼의 중심주파수가 상대적으로 높아진다는 원리에 기초한 방법이다.

스펙트럼 비를 이용한 방법은 충격실험을 통해 제시된 방법으로, 금속파편의 질량이 증가할수록 스펙트럼 상에서 저주파 영역의 에너지가 증가하는 원리에 기초하여 개발된 방법이다.

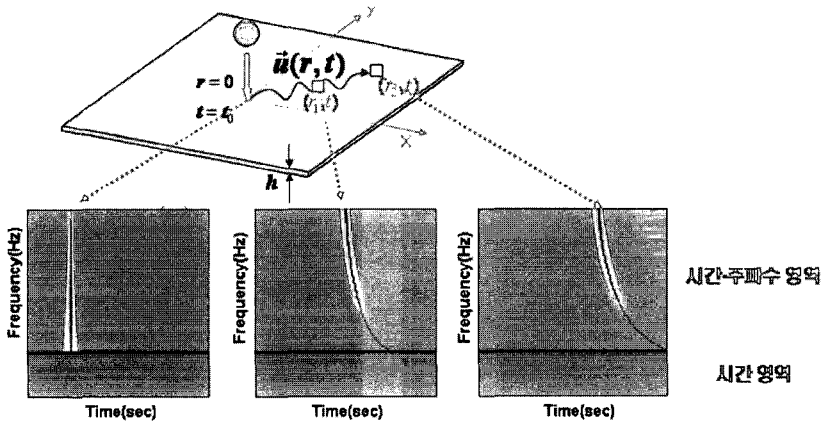
이러한 질량 추정방법들은 모두 충격파의 스펙트럼 정보를 이용하여 질량을 추정하는 방법으로서 충격파의 스펙트럼을 정확하게 얻는 것이 매우 중요하다. 그러나 실제 환경에서는 원자로 운전에 의한 잡음(냉각수 유동에 의한 진동 등)과 이미 센서를 지나간 충격파가 매질 후단의 임피던스 부정합(impedance mismatch)에 의하여 반사된 후 다시 센서에 계측되는 반사파 성분 등이 존재할 수 있으므로 질량 추정에 오차가 발생할 소지가 있다. 따라서 정확한 질량 추정을 위해서는 센서에 계측된 신호 중 잡음과 반사파 성분을 효과적으로 제거하거나 구분할 수 있어야 한다.

2.3 시간-주파수 분석을 이용한 금속파편 감시기법 개선

그림 4(a)는 평판에 강구가 충돌하는 경우 충돌지점과 일정한 거리 r 만큼 떨어진 위치에서 계측한 충격파를 나타내고 있으며, 그림 4(b)의 시간-주파수 분석결과에서 충격에 의해 발생한 굽힘파(flexural wave)의 분산 특성(dispersive characteristic)을 관찰할 수 있다.



(a) 시간영역 분석



(b) 시간-주파수 분석

그림 4 분산특성을 갖는 충격파의 특성

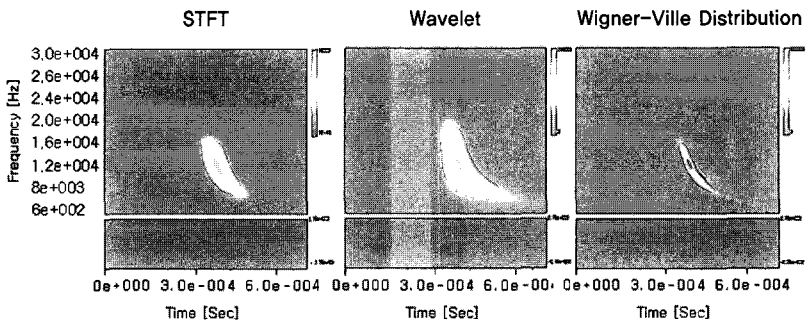


그림 5 시간-주파수분석 기법의 비교

최근에는 연속 웨이블릿 변환을 이용하여 시간-주파수 영역에서 센서간 도달시간차를 주파수 성분별로 구하여, 삼각법 또는 원교차법에 응용한 사례들이 보고되었다^(8,9). 이 방법은 굽힘파의 분산특성을 시간-주파수 분포로 변환하여 각 주파수별 도달시간차를 쉽게 구할

수 있다. 그러나 그림 5에서 볼 수 있듯이 웨이블릿 변환의 경우 저 주파수 영역에서는 시간 분해능이 저하되어 도달시간차 추정 시 오차가 클 가능성이 있다. 반면에 위그너-빌 분포는 STSF(short-time fourier transform)와 웨이블릿 변환에 비하여 계산시간이 상대적으로 오래

특성 : 분산 특성을 갖는 충격파의 특성 (Non-stationary signal)

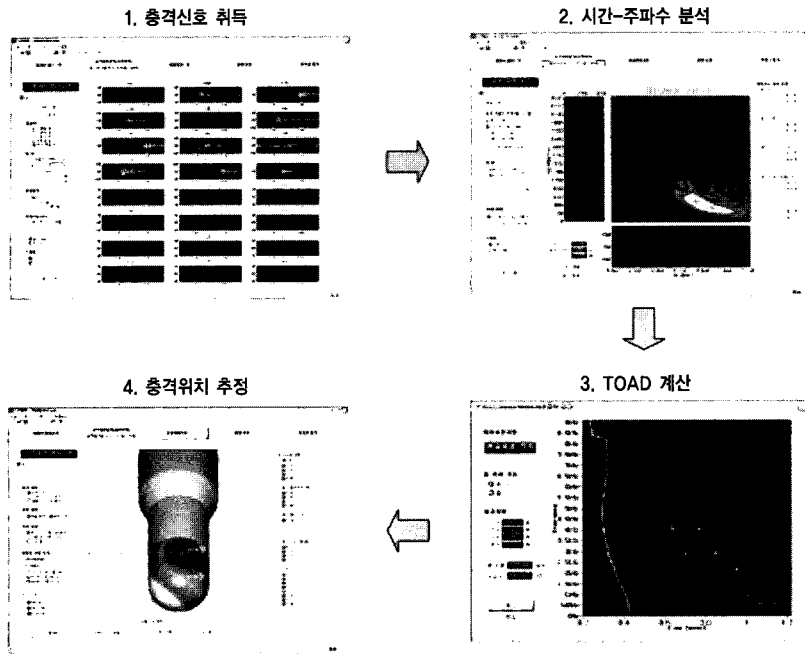


그림 6 시간-주파수 분석 기법을 적용한 충격위치 추정 방법

걸리는 단점은 있으나, 시간 분해능과 주파수 분해능이 상대적으로 높은 장점이 있으므로, 충격과가 센서에 도달하는 시간과 중심주파수 성분을 타 방법에 비하여 상대적으로 정확하게 파악할 수 있는 장점이 있다.

따라서 위그너-빌 분포를 시간-주파수 분석 기법으로 이용하여 금속파편의 위치 및 질량을 추정하기 위한 센서간 도달시간차 계산 및 중심주파수 결정에 활용하면 위치추정 및 질량추정의 정확도를 높일 수 있다⁽⁹⁾.

그림 6에는 금속파편의 위치를 추정하는 절차를 나타내었다. 먼저 각 센서에서 취득한 충격신호에 대한 시간-주파수 분석을 수행하여 굽힘파 성분임을 확인한 후, 센서에 도달한 굽힘파간의 TOAD(time of arrival difference)를 계산한 후, 금속파편의 충격위치를 추정할 수 있다. 기존의 삼각법이나 원교차법의 경우, 매질의 균속도를 정확히 모르면 위치추정의 오차가 발생할 수 있으나, 새로이 개발한 최소분산 스캐닝 방법⁽¹⁰⁾을 적용하면 균속도 정보를 사전에 모르는 경우에도 충격위치를 기존 방법에 비하여 정확히 추정할 수 있다.

3. 개선된 금속파편 감시기법의 적용

3.1 충격위치 추정

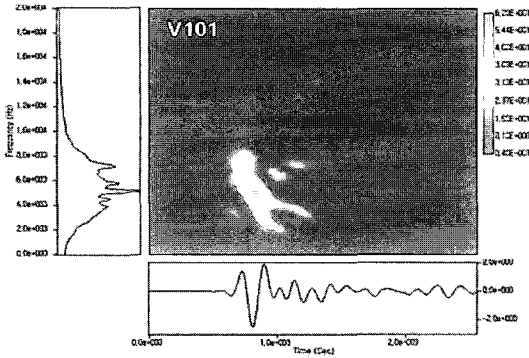
원자력발전소는 금속파편 감시시스템의 건전성을 확인하기 위하여, 정비기간 중 원자로 압력경계 구조물에 인위적으로 충격(작은 질량의 강구에 의한 충격)을 가하여 가속도계와 경보 시스템의 건전성을 점검한다.

그림 7은 강구를 이용한 충격시험시 가속도계에서 취득한 진동신호에 대한 위그너-빌 분포를 나타내고 있으며, 그림 8은 기존의 시간영역에서의 삼각법을 이용하여 충격위치를 추정한 결과와 위그너-빌 분포를 이용하여 충격위치를 추정한 결과를 비교하고 있다. 그림 8에서 관찰할 수 있듯이 위그너-빌 분포를 이용한 방법이 기존의 방법에 비하여 실제 충격위치에 더 근접한 지점을 충격위치로 추정함을 알 수 있다.

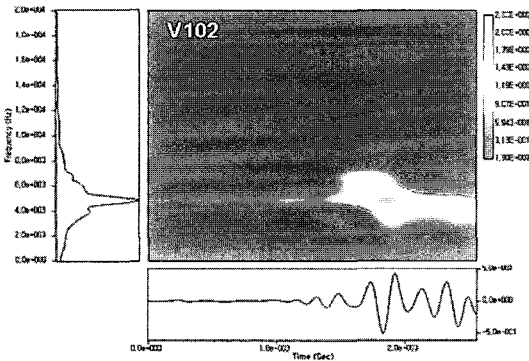
그림 9와 그림 10은 각각 원자로 하부와 증기발생기 하부에 대한 강구 충격시험시의 진동신호를 취득한 후 위그너-빌 분포를 이용하여 강구의 충격위치를 추정한 결과이며, 실제 충격지점에 근접한 위치추정 결과를 보여주고 있으므로, 위그너-빌 분포를 이용함으로써 정확하게 충격위치를 추정할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 충격질량 추정

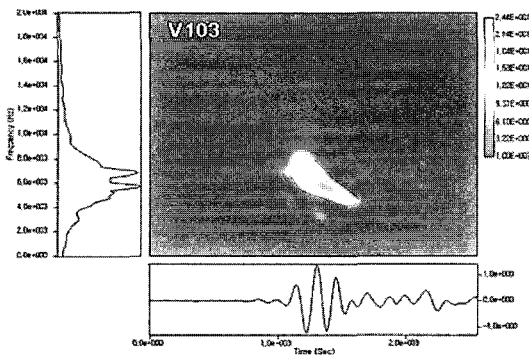
그림 11은 65 gram의 강구를 사용하여 평판(2m×2m, 두께 10 mm)에 충격을 주었을 때의 실험결과를 보여주



(a) V101 센서 신호분석



(b) V102 센서 신호분석



(c) V103 센서 신호분석

그림 7 원자로 하부 충격시험 시 계측된 충격 신호에 대한 시간-주파수 분석 결과

고 있다. 아래 그림은 가속도계를 이용하여 계측한 충격 신호를 보여주고, 좌측 그림은 자기 스펙트럼을 나타내며 중앙에 있는 그림은 위그너-빌 분포를 보여주고 있다. 중심 주파수를 구하기 위해 스펙트럼만을 본다면, 중심 주파수를 11.2 kHz로 오인할 수 있다. 그러나 위그너-빌 분석 결과를 보면 충격에 의한 중심 주파수는

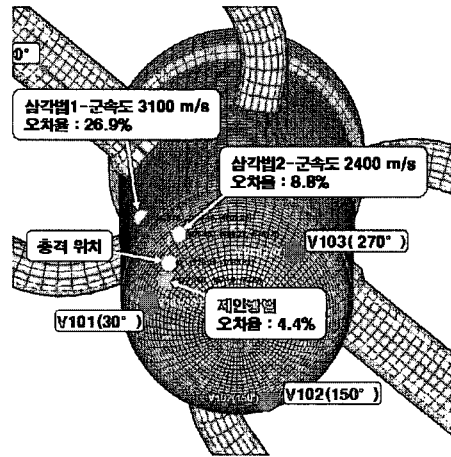


그림 8 기존방법과 위그너-빌 분포를 이용한 방법의 충격위치 추정 결과 비교

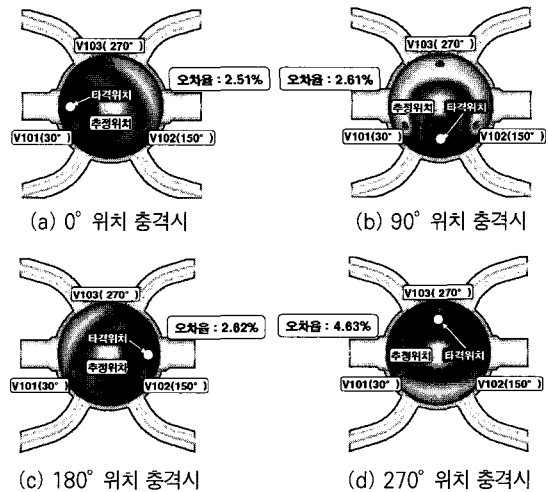
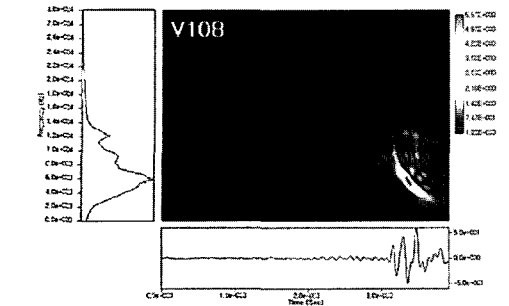


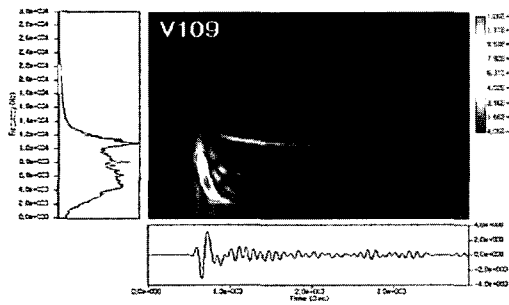
그림 9 위그너-빌 분포를 이용한 원자로 하부 충격위치 추정 결과

8.5 kHz임을 쉽게 알 수 있으며, 11.2 kHz는 가속도계의 마운팅에 의한 공진임을 알 수 있다. 그림 3(a)의 중심 주파수와 질량관계 그래프로부터 중심 주파수가 8.5 kHz인 경우 질량은 51 gram이며, 중심 주파수를 11.2 kHz로 추정할 경우 질량은 22 gram으로 추정됨을 알 수 있다.

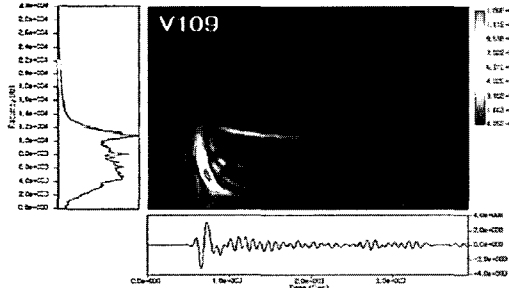
그림 12는 반사파가 존재하는 경우의 시간-주파수 분석 결과를 나타내고 있다. 그림 12 하단의 시간영역 그래프에서는 반사파의 존재를 확인하기가 용이하지 않으며, 스펙트럼 그래프에서도 중심 주파수를 찾기가 쉽지 않음을 알 수 있다. 그러나 시간-주파수 영역에서는 센서에 처음으로 도달한 곱힘파와 반사파를 명확히 구



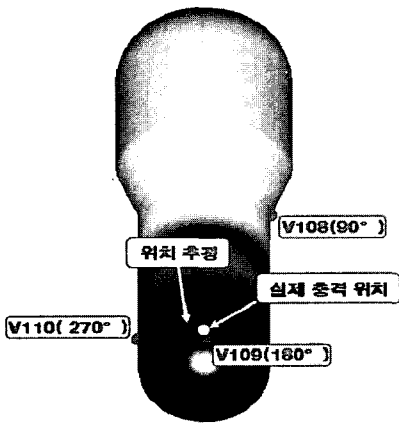
(a) V108센서



(b) V109센서



(c) V110센서



(d) 충격위치 추정 결과

그림 10 시간-주파수 분석 기법을 이용한 증기 발생기 하부 충격 위치 추정 결과

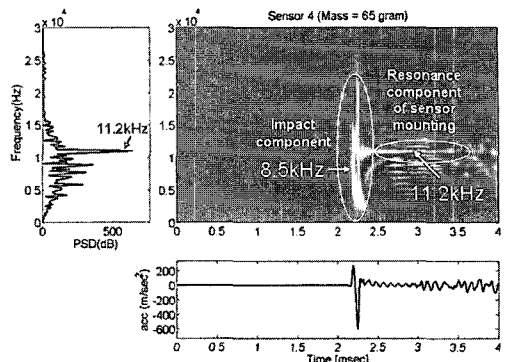


그림 11 시간-주파수 분석 기법을 이용한 질량 추정 결과

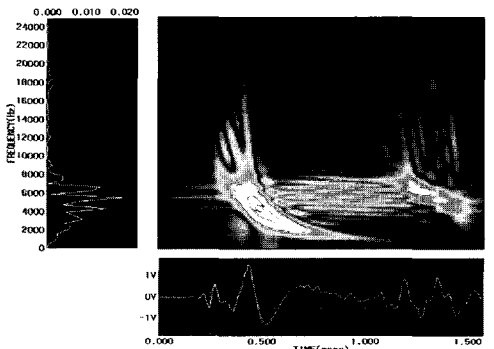


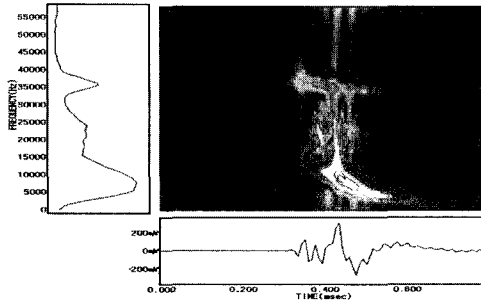
그림 12 반사파가 존재하는 경우의 시간-주파수 분석 결과

분할 수 있으며, 중심주파수도 쉽게 찾을 수 있으므로 충격질량을 보다 정확하게 추정할 수 있다.

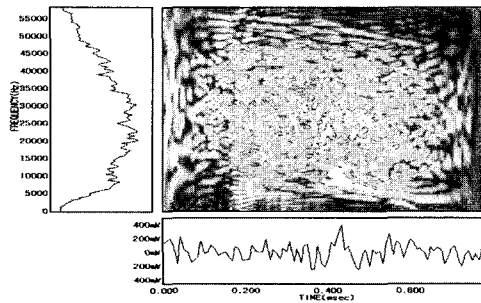
3.3 스무딩함수를 이용한 잡음 제거

그림 13(a)는 강구가 평판에 충돌할 경우의 실험 결과를 보여주고 있으며, 잡음이 거의 없는 깨끗한 충격 신호를 볼 수 있다. 그러나 실제 원자로는 비교적 큰 배경잡음이 존재할 수 있으므로, 이를 모사하기 위하여 그림 13(a)의 신호에 인위적으로 가우시안 분포를 가지는 백색잡음을 넣어 본 결과, 그림 13(b)에서 볼 수 있듯이 중심 주파수는 물론 충격파 성분이 잡음에 묻혀 버리게 됨을 알 수 있다. 그림 13(c)는 스무딩함수(smoothing function)를 이용한 잡음 감소 기법⁽¹⁰⁾을 적용한 결과이며, 잡음이 많이 감소하여 충격신호에 대한 정보를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

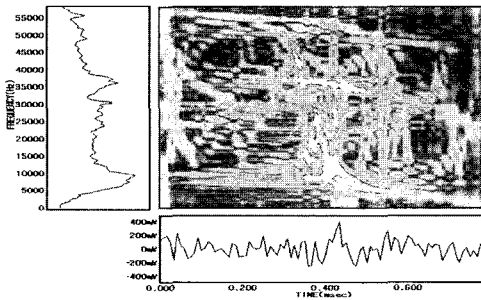
4. 맺음말



(a) 충격신호



(b) 잡음이 더해진 충격신호



(c) 잡음제거 후 분석결과

그림 13 스무딩함수(smoothing function)를 이용한 잡음 제거 방법

시간-주파수 분석을 이용한 원전 압력경계 구조물의 금속파편 감시 기법에 대하여 살펴보았다.

기존의 금속파편 감시기법이 시간영역 분석 또는 주파수 스펙트럼 분석을 이용하여 금속파편의 위치 및 질량을 추정하는 반면에, 시간-주파수 분석을 이용할 경우 과도신호(transient signal)인 충격파에 대한 분석이 용이하므로 기존 방법에 비하여 정확하고 신뢰성 있는 금속파편 감시가 가능함을 알 수 있다. 원자력분야의 매우 경미한 사고가 발생할 경우에도 사회적인 관심이 집중되므로, 금속파편 감시시스템이 제대로 동작하지 않는 경우에는 원전의 안전성과 더불어, 원전의 대국민

이미지를 손상시킬 가능성이 있다. 시간-주파수 분석을 이용한 금속파편 감시기법의 개발로 기존의 금속파편 감시 방법에 비해 신뢰성 있고 신속한 감시, 진단이 가능하므로, 이 기법은 원전의 안전성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. ☞

참고문헌

- (1) Allen, J., 1989, "Loose Part Monitor Sensor Validation, Impact Detection, and Characterization," Nuclear Plant Journal, pp. 80~91.
- (2) 한국전력공사 원자력교육원, 2001, 원자로감시계통, p. 23.
- (3) Olma, B. J., 1985, "Source Location and Mass Estimation in Loose Parts Monitoring of LWR's," Progress in Nuclear Energy, Vol. 15, pp. 583~593.
- (4) Tsunoda, T. and Kato, T., et al, 1985, "Studies on the Loose Part Evaluation Technique," Progress in Nuclear Energy, Vol. 15, pp. 569~576.
- (5) Olma, B. J., 1991, "Acoustic Monitoring of U-tube Steam Generator," Proceeding of SMORN VI, Vol. 2, pp. 74.1~74.13.
- (6) Mayo, C. W., 1999, "Loose-part Mass and Energy Estimation," Progress in Nuclear Energy, Vol. 34, No. 3, pp. 263~282.
- (7) Tsunoda, T., et al, 1986, "Acceleration Signal Characteristics for Loose Part Impact," J. Nuclear Science & Technology, Vol. 23, pp. 968~978.
- (8) Oensay, T. and Haddow, A. G., 1994, "Wavelet Transform Analysis of Transient Wave Propagation in a Dispersive Medium," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 95, No. 3, pp. 1441~1449.
- (9) Gaul, L. and Hurlebaus, S., 1997, "Identification of the Impact Location on a Plate using Wavelets," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 12, No. 6, pp. 783~795.
- (10) Park, J.-H. and Kim, Y.-H., 2006, "An Impact Source Localization on an Elastic Plate in a Noisy Environment," Measurement Science and Technology, Vol. 17, pp. 2757~2766.