

시간-주파수 기법을 이용한 금속파편 질량 추정 Mass estimation using time-frequency analysis

최영철† · 박진호* · 윤두병* · 박근배*

Young-Chul Choi, Jin-Ho Park, Doo-Byung Yoon and Keun-Bae Park

Key Words : Mass estimation(질량추정), time-frequency analysis(시간-주파수 기법), Wigner-Ville distribution(위그너 빌 분포).

ABSTRACT

Mass estimation was derived as functions of acceleration magnitude and primary frequency. The conventional method of mass estimation used frequency data directly in the frequency domain. The signals that can be obtained sensor contained noise as well as impact signal. Therefore, how well we can detect the frequency data in noise directly determines the quality of mass estimation. To find exact frequency data, we used time-frequency analysis. The time-frequency method are expected to be more useful than the conventional frequency domain analyses for the mass estimation problem on a plate type structure. Also it has been concluded that the smoothed WVD can give more reliable means than the other methodologies for the mass estimation in a noisy environment.

1. 서론

원전 내부에 금속파편은 장비나 기기로부터 이완이나 부식 등으로 인하여 떨어져 나와 생성되기도 하고, 핵연료의 재장전이나 보수 활동 시에 유입될 수 있다. 이러한 금속파편은 냉각재의 유동과 함께 이동하면서 핵연료나, 노심 내부 구조물, 냉각재 펌프, 또는 증기 발생기의 U 튜브에 손상을 입히게 된다[1].

따라서 원자로 1 차 계통 압력경계 (NSSS) 내부에서 금속파편에 의한 충격신호가 발생한 경우 금속파편의 크기나 질량 및 에너지를 파악하는 것은 원자로 안전성 측면에 있어서도 매우 중요한 일이다.

원전에 설치되어 있는 금속파편 탐지 건전성 시스템은 그림 1 에서 보여주는 바와 같이 원자로 표면에 여러 개의 가속도계를 부착하여 측정되는 진동 신호를 측정하여 금속파편의 발생유무, 발생 위치 및 발생질량의 크기를 예측한다.

그러나 원자로 1 차 계통 압력경계 외부에 설치된 가속도 센서나 음향 방출 센서에서 취득한 충격 파형을 이용하여 충격 신호를 유발한 금속파편의 정보를 파악한다는 것은 매우 어렵고 불확실성

을 많이 내포하고 있다. 따라서 지금까지 개발된 금속파편 감시계통 관련 분석 기법은 분석 결과에 있어서 많은 오차를 내포하고 있다.

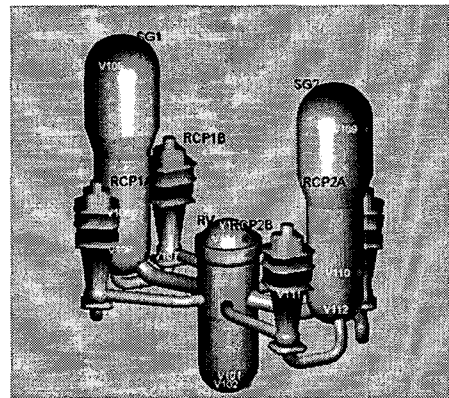


그림 1. 원자로 1 차 계통 압력경계에서 가속도계 부착 위치

현재까지 개발된 원자로 1 차 계통 내부의 금속파편 특성(금속파편 질량, 에너지, 속도, 크기 등)을 파악하는 기법은 크게 Hertz 충격이론을 기반으로 하는 해석적 분석 기법과 금속파편 충격 신호의 스펙트럼 분석 기법 두 가지로 분류될 수 있다. 이러한 방법들은 충격신호의 정확한 중심 주파수(primary frequency) 또는 스펙트럼을 알아야만 질량을 오차없이 정확하게 추정할 수 있다 하지만, 가속도계로 측정된 신호에는 충격신호 뿐만 아니라 마운팅에 의한 공진(resonance), 배경 잡음(background noise)까지 포함되기 때문에

† 한국원자력연구소
E-mail : cyc@kaeri.re.kr
Tel : (042) 868-4870, Fax : (042) 868-8313

* 한국원자력연구소

정확한 주파수 데이터를 얻기가 어렵다. 본 연구에서는 기존의 방법을 개선하여 정확한 주파수 데이터를 얻기 위해 시간-주파수 기법을 사용한다.

기존의 방법인 해석적 분석 기법과 스펙트럼 분석 기법을 먼저 기술하고 본 연구에서 제안된 질량 추정 기법은 후에 기술한다.

2. 기존의 질량 추정 방법

2.1 해석적 질량 추정기법

해석적 질량 추정 기법은 Hertz 의 충격이론을 기반으로 하되 다음과 같은 정보들을 조합하여 금속과편의 질량과 에너지를 추정한다.

- 1) 가속도 센서를 이용하여 측정된 신호 데이터
- 2) 금속과편 특성에 대한 경험
- 3) 주파수 특성과 신호전송 감쇠에 대한 진폭보상을 기반으로 한 특성 값
- 4) 충격력과 운동량을 추정하기 위한 음파 해석 모델

Hertz 충격이론에 의한 강구와 평판의 충돌에서의 최대 변위 D_{max} 는 다음과 같다[1].

$$D_{max} = \left[\frac{15}{16} V_0^2 (K_1 + K_2) M \right]^{0.4} R^{-0.2} \quad (1)$$

여기서, V_0 는 초기 충돌 접촉시간에서 강구의 속도, M 은 강구의 질량, R 은 강구의 평판 충돌 지점에서의 곡률 반경이다. 식(1)에서 K_1 과 K_2 는 평판과 강구의 물성치로 조합되는 값으로 다음과 같이 나타낸다.

$$K_i = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \quad (2)$$

여기서 ν_i 는 i 번째 물질의 Poisson 비, E_i 는 Young 계수를 나타낸다.

강구가 평판에 충돌하는 경우, 평판에서의 변위가 삼각함수의 형태로 변한다고 가정하면 충격 접촉 시간(t_c)과 평판 변형의 최대 가속도(A_{max})는 다음과 같이 된다.

$$t_c = \pi k_h M^{0.4} V_0^{-0.2} R^{-0.2} \quad (3)$$

$$A_{max} = k_h^{-1} M^{-0.4} V_0^{1.2} R^{0.2} \quad (4)$$

위의 식에서 $k_h = \left[\frac{15}{16} (K_1 + K_2) \right]^{0.4}$ 이다. 충돌

시간 (t_c) 동안에 발생하는 충격력(F)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(t) = M \cdot A(t), 0 < t < t_c \quad (5)$$

여기서 $A(t)$ 는 충돌 접촉시간 동안에서 금속과편의 가속도 값을 나타낸다. 식(5)를 이용하여 다음과 같은 충격 운동량을 구할 수가 있다.

$$MV_0 = \frac{F_{max} t_c}{\pi} \quad (6)$$

식 (6)에서 최대 충격력 F_{max} 는 평판에 대한 음파 이론에 의하여 다음과 같이 계산된다.

$$F_{max} = \frac{8B' |A_{PL}|_{max}}{C_b} \quad (7)$$

위의 식에서 A_{PL} 는 충돌 지점에서 최대 충격 가속도 값이고, C_b 는 충돌 지점에서 평판 굽힘과 속도이며 B' 은 평판 굽힘 강도로 다음과 같이 표현된다.

$$B' = \frac{E_1}{1 - \nu_1^2} \cdot \frac{h^2}{12} \quad (8)$$

식 (6)에서의 충격 시간 t_c 는 취득한 신호 데이터를 이용하여 측정하며, 시간 축 상에서 초기 굽힘과 신호의 주기를 이용하거나, 초기 충격신호를 추출하여 스펙트럼을 구한 후 최대 스펙트럼 주파수를 구하여 충격 시간을 구할 수 있다.

식 (6)에서 충격력과 충격 시간을 구하면 금속과편의 운동량을 파악할 수 있다. 이러한 운동량이 얻어진 경우, 식(6)에서 경험적으로 얻어진 원자력발전소 내부에서 발생할 수 있는 금속과편의 질량 범위 내에서 임의의 값을 선택하면 선택된 질량에 대한 금속과편 이동 속도가 계산된다. 이

렇게 구한 값들을 식(3.2)에 대입하면 금속파편의 충돌 곡률 반경이 구해진다. 이러한 방식으로 예측 가능한 질량 구간에서의 여러 질량에 대하여 식(3)를 이용하여 구해진 곡률반경의 값이 실제 발생할 수 있는 반경의 범위를 초과하는 경우에는 그 때의 질량은 삭제하고 반경의 범위에 들어가는 질량은 질량추정 예상 후보군에 기록한다. 이렇게 구해진 질량의 값들은 어느 범위를 나타낼 것이다. 이렇게 구해진 질량 범위에서 평균값에 해당하는 것을 추정된 금속파편의 질량으로 간주한다.

2.2 스펙트럼 분석법

스펙트럼 분석기법에 의한 질량 추정방법은 금속파편에 의하여 충격신호 발생시 가속도계에서 측정된 신호를 주파수 변환을 수행하면 스펙트럼 파형은 금속파편의 충격위치나 충격 에너지에 상관없이 금속파편의 질량에 의존하여 파형이 결정된다는 사실을 기반으로 하여 개발된 방법이다.

주파수 스펙트럼 파형 정보를 이용하여 질량을 추정하기 위한 지침을 설정하기 위한 방법으로는 크게 주파수 비(Frequency Ratio) 기법과 중심주파수 기법이 있다.

주파수 비 기법은 센서 공진 주파수 영역을 선택하고 저 주파수에서의 충격 신호 영역을 적절히 선택하여 두 구간에서의 스펙트럼 값을 적분한 값의 비를 질량 추정 지표로 사용하는 것이다. 주파수 비(FR: Frequency Ratio) 지표계산을 위한 식은 다음과 같다[1].

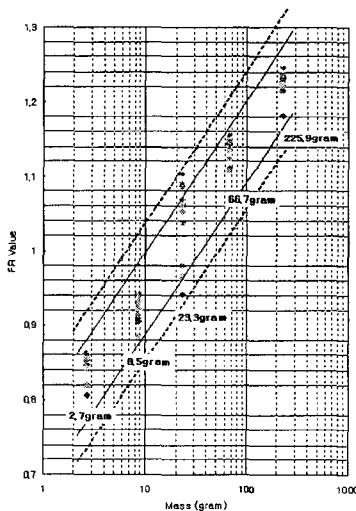


그림 2. 주파수 비 지표 그래프

$$FR = \frac{\int_{f_{s,min}}^{f_{s,max}} APSD(f)df}{\int_{f_{r,min}}^{f_{r,max}} APSD(f)df} \quad (9)$$

위의 식에서 $f_{s,max}$, $f_{s,min}$ 는 저 주파수 범위를 나타내는 최소 및 최대 주파수 값을 나타내고 있으며, $f_{r,max}$, $f_{r,min}$ 는 센서 공진 주파수 범위를 표시하는 최소 및 최대 주파수 값을 나타내고 있다.

이렇게 하여 구한 FR 값들이 그림 2 에 나타나 있다. 그림 2 에서 보듯이 강구의 질량과 FR 값은 강구의 낙하 속도나 충격 위치에 상관없이 선형관계를 보이고 있으며 질량의 편차는 좋은 경우에는 0.65 decade 에서 나쁜 경우에는 0.85 decade 를 보이고 있다. 질량지표로서 FR 은 좋은 기존의 질량 추정 기법 보다는 비교적 우수한 결과를 보이고 있으며 실제 원자력발전소에서 질량 추정에 많이 활용되고 있다.

3. 제안된 방법

앞 장에서 설명하였듯이 기존의 방법으로 금속파편의 질량을 추정하기 위해서는 정확한 주파수 데이터가 필요함을 알 수 있다. 즉 정확한 중심주파수 또는 스펙트럼이 있어야만 금속파편의 질량을 정확하게 추정할 수 있다.

하지만 가속도계를 통하여 받은 신호에는 충격에 의한 신호 뿐만 아니라 가속도계 자체 및 마운팅에 의한 공진까지 포함되어 측정된다. 또한 원자로의 구동과 유체의 유동에 의해서 발생하는 배경잡음까지 포함되기 때문에 측정된 신호로부터 정확한 주파수 데이터를 얻는 것은 현실적으로 어렵다.

따라서 본 연구에서는 정확한 주파수 데이터를 얻기 위해 시간-주파수 기법을 사용한다. 시간-주파수 기법은 비정상상태 신호를 분석하는 대표적인 방법으로 셀 및 평판 구조물과 같은 분산 특성을 갖는 매질에서의 충격 신호를 분석하기에 적합한 신호처리이다[2]. 이장에서는 시간-주파수 기법에서 셀에서의 충격신호를 분석하기에 적합한 위그너-빌 분포[3]에 대해 설명한다. 그리고 시간-주파수 기법을 사용하여 충격 신호와 배경잡음을 분리하여 정확한 주파수 데이터를 얻는 방법에 대해 살펴 본다.

3.1 위그너빌 분포

위그너-빌 분포는 bilinear TFR(Time Frequency Representation) 의 한 종류로서 그 정의는 다음과 같다:

$$\begin{aligned} W(t, f) &= \int_{-\infty}^{\infty} R(t, \tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} z\left(t - \frac{\tau}{2}\right) z^*\left(t + \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (10) \\ &= \int Z^*\left(\omega + \frac{\phi}{2}\right) Z\left(\omega - \frac{\phi}{2}\right) e^{-j\omega\phi} d\phi \end{aligned}$$

여기서, $R(t, \tau) = z\left(t - \frac{\tau}{2}\right) z^*\left(t + \frac{\tau}{2}\right)$ 는 시간중속-자기상관함수 (time dependent autocorrelation function), $z(t)$ 는 신호의 해석함수, $Z(\omega)$ 는 $z(t)$ 의 푸리에 변환이다. 즉, 시간중속 자기상관함수의 시간지연에 대한 푸리에 변환으로 정의되며, 물리적으로는 각 시간별 신호의 에너지에 대한 주파수 분포를 나타낸다. 가장 큰 장점은 시간 및 주파수의 분해능을 신호의 길이를 이용하여 원하는 만큼 조절이 가능하다. 따라서 분산 매질에서 전파하는 굽힘파의 주파수 별 도달시간차를 측정하고자 할 경우에, 전체 주파수 대역에서 동일한 시간-주파수 분해능으로 측정이 가능하다. 그러나 신호의 형태가 시간-주파수 분포상에서 곡선의 형태로 나타나거나 2 개 이상의 성분들로 구성되어 있는 경우에는 자체신호 또는 신호성분들 사이의 간섭성분(cross term)이 수반되므로, 이에 대한 영향이 반드시 고려되어야 한다^[40]. 그리고 위그너-빌 분포의 정의에서 이용되는 신호의 시간구간은 무한대 시간이다. 그러나 실제로는 대부분 무한대의 창문을 사용할 수 없으며, 관심 있는 시간영역의 크기에 해당하는 창문을 적용한다. 이때 신호에 창문을 적용한 위그너-빌 분포를 가상 위그너-빌 분포 (pseudo Wigner-Ville distribution) 이라 부른다.

3.2 배경잡음 감소기법

원자로 표면에서 측정된 신호는 금속파편으로 인하여 발생하는 충격음파와 원자로의 구동과 유체의 운동에 의해서 발생하는 정상신호로 구성된다. 이 경우 정상신호는 충격음파에 대해 배경잡음이 된다. 배경잡음이 충격음파에 비해서 크기가 크고, 주파수 성분이 같다면 충격음파만을 탐지하

는 것이 때로는 어렵기 때문에 배경잡음을 제거하는 기술이 매우 중요하다.

잡음의 영향을 줄이기 위해서는, 우선 잡음과 굽힘파의 특성을 살펴 봄으로써 두 신호의 차이점을 아는 것이 중요할 것이다. 굽힘파는 주파수에 따라 에너지의 전파 속도가 다르기 때문에 시간 주파수 해석인 위그너-빌 분포를 통해 잡음과 굽힘파가 어떤 특성이 있는지 살펴보는 것이 효과적일 것이다.

앞 절에서 살펴 본 바와 같이 위그너-빌 분포는 시간중속 자기상관함수 $R(t, \tau)$ 를 시간 지연 (τ) 에 대하여 푸리에 변환한 것이다. 여기서 $R(t, \tau)$ 를 절대시간(t) 에 대한 푸리에 변환을 생각해 볼수가 있는데 이를 엠비규어티 함수라 정의하며 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} A(\xi, \tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} R(t, \tau) e^{-j2\pi\xi t} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} s\left(t - \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t + \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi\xi t} dt \quad (12) \end{aligned}$$

따라서 위그너빌 식과 위 식으로부터 위그너-빌 분포와 엠비규어티 함수는 다음과같이 상호 이중 푸리에 변환으로 연계되어 있음을 알 수가 있다.

$$W(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(\xi, \tau) e^{j(2\pi\xi t - 2\pi f\tau)} d\xi d\tau \quad (13)$$

$$A(\xi, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(t, f) e^{-j(2\pi\xi t - 2\pi f\tau)} dt df \quad (14)$$

여기서 식 (4-63)에서 엠비규어티 함수에 1 이 아닌 2 차원 창문함수를 곱한 경우를 일반적으로 스무딩이라고 부르며, 이를 이중 푸리에 변환하여 구한 위그너-빌분포를 스무딩 된 위그너-빌 분포라고 부른다. 즉,

$$W_{SM}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\xi, \tau) A(\xi, \tau) e^{j(2\pi\xi t - 2\pi f\tau)} d\xi d\tau \quad (15)$$

따라서 잡음을 제거할 수 있는 제안된 스무딩 된 위그너-빌 분포는 다음 식과 같이 된다[6].

$$W_{SM}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s\left(u + \frac{\tau}{2}\right) \cdot s\left(u - \frac{\tau}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\pi\sigma}{\tau^2}} \cdot \exp\left[-\frac{\pi^2\sigma(t-u)^2}{\tau^2}\right] \cdot \exp[-j2\pi f\tau] du d\tau \quad (16)$$

로 표현된다.

식 (16)은 엠비큐티의 영역에서 Choi-William 윈도우처럼 모든 사사분면에 똑 같은 가중치를 주는 것이 아니라, 각 사사분면 다른 가중치를 주어 충격신호와 잡음을 분리하는 기술이다. 따라서 이러한 방법을 이용한다면 정확한 주파수 정보를 얻을 수 있기 때문에 오차 없이 질량을 추정할 수 있을 것이다.

4. 평판 실험

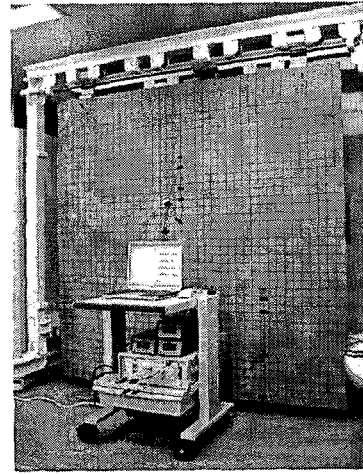
충격신호를 위그너-빌 분포를 통하여 시간-주파수분석을 한 다음 잡음을 제거하여 얻은 주파수 데이터를 기존의 방법인 해석적 질량 추정기법과 스펙트럼 분석법에 적용한다면 정확한 질량 추정 가능성이 쉽게 알 수 있다.

이 장에서는 평판 충격 실험을 통하여 제안된 방법에 대한 적용가능성에 대해 살펴보기로 한다.

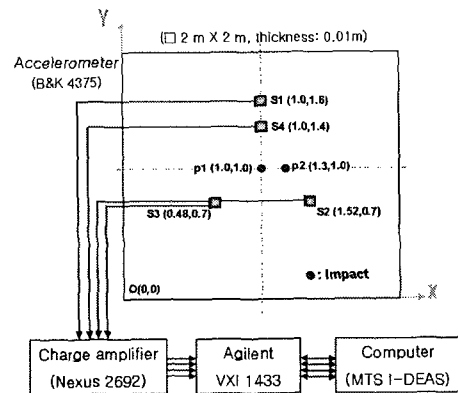
4.1 실험장치 구성

그림 3(a)는 강철 평판 실험 장치 구성사진을 보여주고, 그림 3(b)는 센서의 위치 및 충격지점 위치와 실험 장치 개략도를 보여주고 있다. 충격을 가하는 방법은 30cm 되는 줄 끝에 다양한 무게의 강구를 매달아 자유낙하 시키는 방법을 사용하였다. 평판은 굽힘파를 지배적으로 발생시키고 반사파의 영향을 줄이기 위하여 길이에 비하여 두께가 매우 작은 2000mm X 2000mm X 10mm의 정사각형 평판을 제작하였다. 재질은 스테리스틸(SUS 304) 재질로서, 영 계수 $E = 205$ GPa, 밀도 $\rho = 7930$ kg/m³, 그리고 프와송 수 $\nu = 0.3$ 이다.

가속도 응답 신호의 측정은 Agilent VXI 1433 front end 를 사용하여, 모든 센서의 신호를 동시에 측정하였으며, 이때 최대 샘플링 주파수는 200 kHz 이고, 50 kHz anti-aliasing 필터를 적용하였다.



(a)



(b)

그림 3. 평판 실험 장치 구성 (a) 실험사진, (b) 실험장치 개략도

4.2 실험 결과

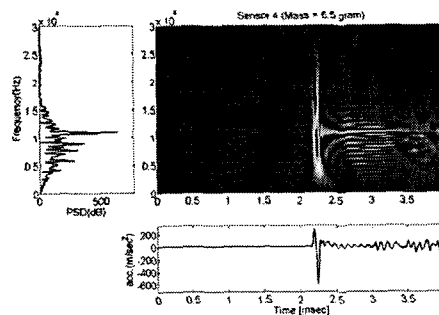


그림 4. 무게 65 gram 의 강구를 떨어 트렸을 때 S4 위치에 있는 가속도 신호. 좌측은 자기 스펙트럼, 아래는 시간영역에서의 가속도 신호, 그리고 중앙은 위그너-빌 분포를 보여줌.

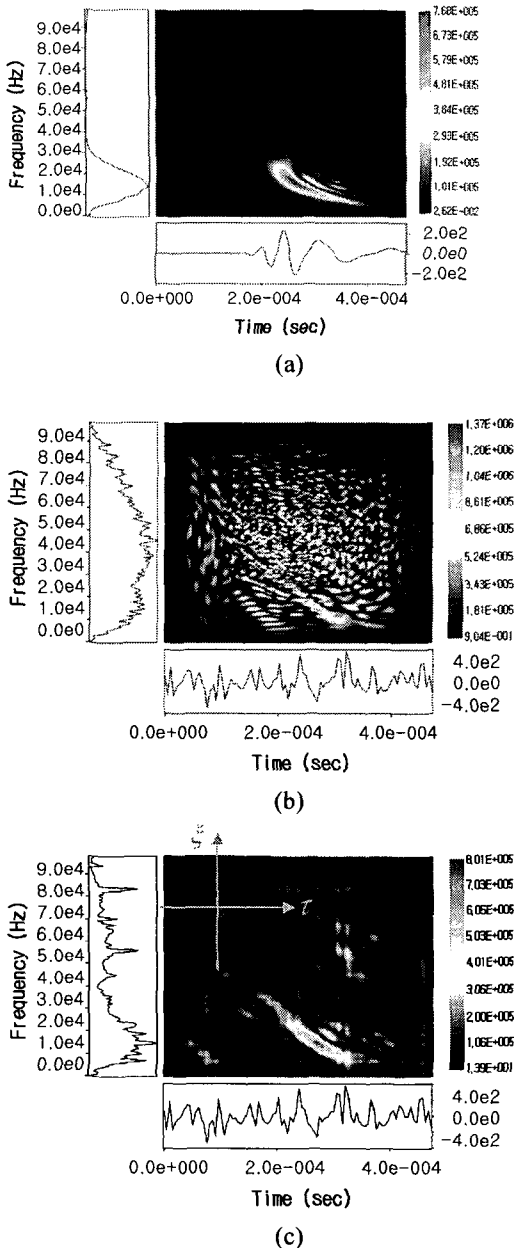


그림 5. 무게 36gram 의 강구를 사용하여 실험하였을때의 결과, (a) 잡음이 없는 경우, (b) 인위적으로 잡음 신호를 넣은 경우, (c) 잡음 감소 기법으로 잡음을 제거한 후.

그림 4는 65 gram 의 강구를 사용하여 충격을 주었을 때 실험결과를 보여주고 있다. 아래 그림은 충격 신호를 보여주고, 좌측 그림은 자기 스펙트럼을 나타내며 중앙에 있는 그림은 위그너-빌 분포를 보여주고 있다. 중심 주파수를 구하기 위해 자기 스펙트럼만을 본다면, 12.5kHz 임을 알 수 있다. 하지만, 위그너-빌 계산을 통해 시간-주파수 영역에서 살펴 보면 충격에 의한 중심 주

파수는 8.6kHz 임을 쉽게 알 수 있다. 12.5kHz는 가속도계의 마운팅에 의한 공진으로 주파수 영역에서만 본다면 마치 충격에 의한 중심 주파수로 오인 할 수 있다.

그림 5(a)은 36gram 의 강구를 사용하였을 때의 실험 결과를 보여주고 있다. 평판 실험이기 때문에 잡음이 거의 없는 깨끗한 충격 신호를 볼 수 있다. 하지만, 실제 원자력에서는 많은 배경잡음이 존재하기 때문에 그림 5(a) 신호에 인위적으로 가우시안 분포를 가지는 백색잡음을 넣어 본 결과 그림 5(b)는 중심 주파수는 물론 스펙트럼도 잡음에 묻혀 버리게 된다. 하지만 4 장 2 절에서 설명한 잡음 감소 기법을 적용해 본 결과 잡음이 많이 감소하여 정확한 주파수 데이터를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

원전 내부에서 금속파편이 발생하면 냉각재의 유동과 함께 이동하면서 방사능 유출 등 심각한 문제를 야기 시킬 수 있다. 따라서 금속파편의 충격 위치 추정과 더불어 무엇이 떨어졌는지 짐작하기 위해서는 질량 추정 또한 매우 중요한 일이다.

질량 추정을 위해서는 주파수 데이터가 매우 중요한 요소 인데, 기존의 방법들은 충격 신호가 비정상 상태 신호임에도 불구하고 스펙트럼만을 사용하여 질량을 추정하기 때문에 많은 오차가 포함하게 된다. 따라서 본 연구에서는 위그너-빌 분포를 사용하여 시간-주파수 영역에서 주파수 데이터를 얻음으로써 정확한 질량 추정 방법을 제시하였고, 평판 실험을 통하여 검증하였다.

참고문헌

- [1] Olma B.J., Source Location and Mass Estimation in Loose Parts Monitoring of PWRs, Progress in Nuclear Energy 15, 583, 1985
- [2] 박진호, 최영철,이정환 “시간-주파수 분석을 이용한 충격발생 위치 추정”, 한국소음진동공학회지, accepted, 2005.11
- [3] F. Hlawatsch and G.F. Boudreaux-Bartels, Linear and Quadratic Time-Frequency Signal Representations, IEEE SP Magazine 21, 1992
- [4] L. Cohen, Time-Frequency Analysis, Prentice Hall PTR, 1995
- [5] L. Gaul and S. Hurlbaeus, Identification of the Impact Location on a Plate using Wavelets, Mechanical Systems and Signal Processing 12, 783, 1997
- [6] Jin-Ho, Park and Yang-Hann Kim, “An impact source localization on an elastic plate in a noisy environment”, Submitted to Measurement science and technology, 2005.