

표준형원전 금속파편감시계통 질량평가 방법에 대한 비교연구

A Comparison Study on the Mass Estimation of Loose Part Monitoring System of Korea Standard Nuclear Plant

김선재† · 박찬일 · 김진성 · 김용범*

Seonjae KIM, Chan-il Park, Jin-sung KIM and Yong-Beum KIM

1. 서 론

원전에서 방사능물질의 누출을 방지하기 위한 압력경계를 이루고 있는 원자로냉각재계통의 건전성 확보·유지는 원전의 안전에 있어 매우 중요한 요소이다. 외부로부터 유입 또는 내부적으로 이탈된 금속파편은 냉각재 유동과 함께 원자로냉각재계통을 이동하며 핵연료, 노심내부구조물, 냉각재펌프 또는 증기발생기 등에 심각한 영향을 미쳐 최종적으로 압력경계의 건전성을 위협하게 된다.

한국표준형원전의 금속파편감시계통(그림 1)은 원자로냉각재계통의 건전성을 위협하는 금속파편의 존재를 조기에 탐지하여 예방조치를 가능하게 하고자 규제요건(Reg. Guide 1.133)에 따라 설치 운영되고 있다. 원자로계통 기기 외면에 설치된 가속도계로부터 충격신호를 측정하여 금속파편의 발생유무, 발생위치 및 질량을 추정하는 기능을 수행한다.

취득된 충격신호로부터 금속파편의 특성, 특히 질량을 추정하는 방법은 크게 Hertz 충격이론에 근거한

근거한 해석적 분석방법과 주파수 영역의 신호특성을 이용하는 스펙트럼 분석방법으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 한국표준형원전에 설치된 금속파편감시계통에서 취득한 신호를 이용하여 기존의 질량추정 방법의 특성 및 적용성을 비교분석하였다.

2. 금속파편 질량추정 알고리즘

2.1 해석적 분석방법

1) Hertz 충격이론을 이용한 질량추정법

해석적 분석방법은 Hertz의 충격이론은 무한평판에 강구가 충돌할 때 강구의 질량 및 충격에너지에 따른 접촉시간, 접촉변위에 관한 이론으로서 질량추정의 이론적 근거가 된다.

탄성이 있는 무한 평판에 강구가 충돌할 때 접촉시간동안 초기변위를 정현파로 가정하면, 평판의 접촉시간과 최대가속도는 다음 식과 같이 표현된다.

$$T_d = \pi K_h m^{0.4} V_o^{-0.2} R^{-0.2} \tag{1}$$

$$A_{max} = K_h^{-1} m^{-0.4} V_o^{1.2} R^{0.2} \tag{2}$$

여기서 K_h 는 평판과 강구의 탄성계수 및 Poisson 비의 함수로 결정되며 m 과 V_o , R 는 각각 강구의 질량, 충돌속도, 충격점에서의 곡률반경을 나타낸다. 또한, 충격파의 초기 반파(half wave)는 충격접촉시간보다 1.6배정도 짧은 주기를 가지므로, 중심주파수(f_c)와 접촉시간은 다음과 같이 표현된다.

$$f_c = 1.6 / (2T_d) \tag{3}$$

따라서, 금속파편의 질량은 원자로냉각재계통에서 발생 가능한 금속파편의 질량(m_0)을 가정하고 a)초기 충격신호의 최대스펙트럼 주파수로부터 중심주파수(f_c)를 구하고 b)식(3)으로부터 접촉시간과 식(1)로부터 충격속도, 식(2)로부터 최대가속도를 각각 구하

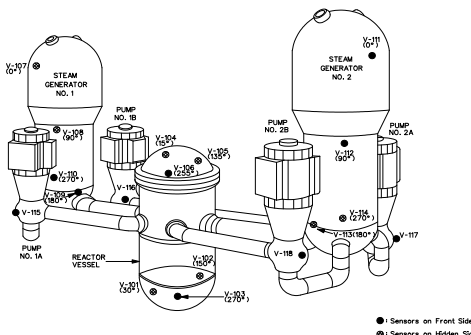


그림 1. KSNP LPMS 가속도계 위치

† 교신저자; 정회원, 교신저자 소속
 E-mail : sjkim@kins.re.kr
 Tel : 042-868-0579, Fax : 042-868-0168
 * 한국원자력안전기술원

고 c)최대가속도(A_{max})가 측정최대가속도(A_{peak})에 근접하도록 질량을 변화시켜 b)~c)를 반복하는 반복 계산법으로 구할 수 있다.

2) 질량도표를 이용한 질량추정법

금속과편의 형태를 강구(metal sphere)로 가정하고 충격신호로부터 구한 중심주파수 및 최대가속도를 질량도표(Mass Map)에 나타내어 대략적인 질량을 추정할 수 있다. 질량도표는 실험적으로 발생가능한 충격상황을 고려하여 다양한 질량 및 충돌속도에 대하여 충격시험을 실시하고 이를 분석하여 미리 작성해두면 실용적으로 적용할 수 있다.

2.2 스펙트럼 분석방법

1) FR값을 이용한 질량추정법

충격질량이 클수록 전파되는 파동중 저주파수 성분이 잘 여기된다는 이론에 근거하여 다음과 같은 식으로 표현되는 FR(Frequency Ratio)값으로부터 질량을 추정할 수 있다.

$$FR = \frac{\int_{1kHz}^{6kHz} S(f)df}{\int_{10kHz}^{15kHz} S(f)df} \quad (4)$$

여기서 $S(f)$ 충격신호의 파워스펙트럼값을 나타낸다. 충격질량 증가에 따라 $10kHz$ 이하의 저주파 성분들의 상대적 증가가, $10\sim 15 kHz$ 사이 주파수 성분들의 상대적 증가보다 크므로 FR값은 충격질량과 함께 증가하며 최대가속도의 크기 및 충격물의 형상, 충격위치 등과는 무관한 특성을 나타낸다. 따라서 사전에 충격시험을 통해 FR chart를 작성하면 실제 경우 유용하게 사용할 수 있다.

2) FC값을 이용한 질량추정법

FR값을 이용하는 방법과 같이, 충격질량이 클수록 저주파수 성분이 잘 여기됨에 근거한다. 충격물의 질량 증가에 따라 중심주파수가 낮아지는 정도를 사전에 다양한 충격시험을 통해 지표화하여 FC chart를 작성하면 실제 경우 FR값을 이용하는 방법보다 더 정확하게 질량을 추정할 수 있다.

$$f_c = \sum_i R_{fi} f_{ci} / \sum_i R_{fi} \quad (5)$$

$$R_{fi} = \frac{S(f_i)}{B(f_i)}, \quad f_{ci} = \frac{(f_{i-1} + f_i)}{2} \quad (6)$$

여기서 R_{fi} 는 충격신호와 배경잡음의 파워스펙트럼비함수이며 f_{ci} 는 전체 R_{fi} 의 면적중심에 해당된다.

3. 질량추정방법 비교

3.1 FR, FC, Mass Map을 이용한 질량추정

한국표준형원전은 건설단계에서 LPMS에 대하여 사용전검사를 실시하는데 $57\sim 3629$ gram의 강구 7종을 이용하여 증기발생기 표면에 충격시험을 실시하여 기본데이터를 취득한다. 이를 이용하여 그림 2, 3과 같이 실제 현장에서 적용할 수 있는 FR chart 및 FC chart, Mass Map을 개발하였다.

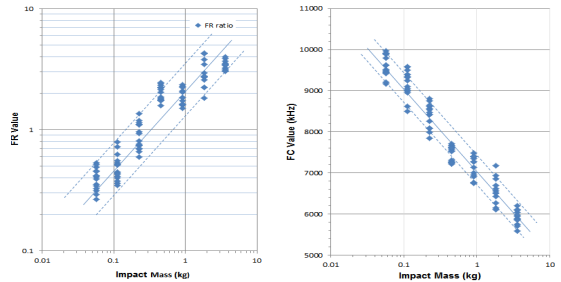


그림 2. 신월성 1호기의 LPMS Channel 9에 대한 FR chart and FC chart

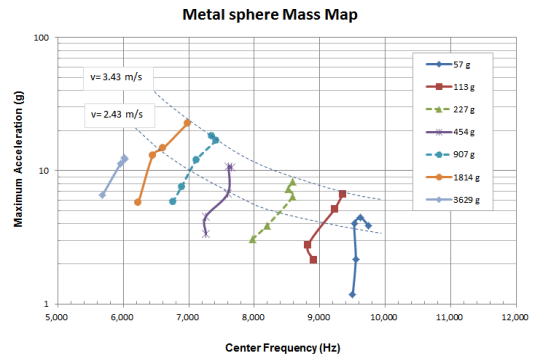


그림 3. Mass map for Ch.9 of SWN1 LPMS

4. 결 론

본 연구에서는 신월성 1호기 사용전검사단계에서 수행한 충격시험의 데이터를 이용하여 현장에서 적용 가능한 질량추정방법을 개발하였으며 충격신호에 대한 질량평가지 활용할 수 있을 것으로 판단한다.