

LPMS 신호분석 연구

A Study on the Signal Analysis of Loose Parts Monitoring System

이상국†(한수원중앙연구원)

Sang-Guk Lee

Key Words : Signal Analysis(신호분석), Loose Parts Monitoring System(금속파편 감시시스템), NSSS Integrity Monitoring System(원자로종합건전성 감시계통), Nuclear Power Plant(원자력발전소)

ABSTRACT

The Nuclear Steam Supply System(NSSS) is designed to provide an integrated approach that includes areas of monitoring relevant to the integrity of the NSSS. LPMS is designed to function as an alarm system by providing sensor channel alarms for the associated subsystems. LPMS is equipped to provide analysis tools for new alarm events, historical events and for historical periodically stored channel data (e.g. waveforms) for most channels. This paper is intended to introduce the diagnosis principle and abnormal symptom of loose parts monitoring system as a monitoring tool in Nuclear Steam Supply System. And also, we are going to introduce signal analysis program in order to perform the actual diagnosis in power plants.

기 호 설 명

- D_{max} : 최대변위
- T_d : 접촉시간
- m : 강구의 질량
- V_0 : 강구의 충돌속도
- V_1, V_2 : 평판과 강구의 Poisson비
- E_1, E_2 : 평판과 강구의 Young율
- R : 강구의 반경

1. 서 론

금속파편 감시시스템(LPMS, Loose Parts Monitoring System)은 Hertz의 금속충격이론을 바탕으로, 충격물체가 원자로 및 증기발생기 압력경계 내부면에 부딪칠 때 발생하는 충격파를 가속도계(Accelerometer)를 이용하여 탐지하는 설비로서, 취득된 가속도 신호로부터 충격응답 가속도 진폭, 가속도 계간의 신호도달 지연시간 및 충격파 시간이력 및 주

파수 특성 등을 평가하여 충격 위치, 충격물질의 질량 및 충격에너지를 추정함으로써 금속파편의 조기 제거작업 수행 여부를 결정하는 기술이 적용된다⁽¹⁾. 본 논문은 원자로종합건전성 감시계통(NIMS, NSSS Integrity Monitoring System)중 실제 원전에서 가장 많은 이용되고 있는 금속파편 감시시스템(LPMS)의 감시원리, 진단기법 및 이상징후를 분석할 수 있는 신호분석 프로그램 등을 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 감시원리 및 진단기법

(1) 기능 및 감시원리

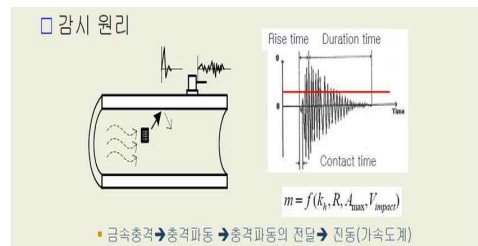


Fig. 1 Principle of LPMS monitoring

† 이상국; 정회원, 한수원중앙연구원
E-mail : sgklee@khnp.co.kr
Tel : 042-870-5514, Fax : 042-870-5939

금속파편감시시스템은 원자로계통의 압력경계내부에 금속성 이물질(Losse parts)이 존재할 때 이를 조기에 감지하는 설비로서 금속성 이물질의 위치 및 중량을 결정하기 위한 정보를 제공해준다. Fig.1은 금속파편감시기술의 감시원리를 그림으로 나타내었다.

(2) Hertz의 충격이론

Hertz의 충격이론은 금속파편 감시계통 신호평가의 이론적 근거를 제공한다. 금속평판(Steel plate)에 강구(Solid sphere)가 충돌할 때, 평판의 주된 응답함수가 충격 접촉시간을 반주기(Half period)로 하는 굽힘파(Bending wave)라고 가정하면 접촉시간 동안의 최대변위 D_{max} 및 접촉시간 T_d 는 다음과 같이 (1)식과 (2)식으로 표현된다.

$$D_{max} = K_h(mV_0^2)^{0.4}R^{-0.2} \quad (1)$$

$$T_d = 2.94D_{max}/V_0 \quad (2)$$

여기서, $K_h = \left[\frac{15}{16} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{0.4}$

m = 강구의 질량 (lbf/32.2ft/sec²)

V_0 = 강구의 충돌속도 (ft/sec)

ν_1, ν_2 = 평판과 강구의 Poisson비

E_1, E_2 = 평판과 강구의 Young율(lbf/in²)

R = 강구의 반경 (ft)

(3) 금속파편의 신호분석

① 금속파편의 충격위치 분석

충격위치 평가에 이용되는 신호정보는 충격 응답파의 상승시간(Rise time), 지속시간(Duration time), 도달시간(Arrival time)등 대부분 충격신호의 시간이력 정보를 이용한다. 위치 평가에는 삼각법(Triangular method), 원 교차법(Circle intersection method) 및 포락 곡선법(Envelope curve method)들이 이용된다.

삼각법(Triangular method)에 의한 위치평가는

Fig. 2와 같이 금속파편에 의한 충격파가 쌍을 이루는 센서들간에 각기 도달되는 지연시간과 충격파의 전파속도를 이용하는 가장 보편적인 방법

이다. 그러나 이 방법을 사용하기 위해서는 적어도 3개 이상의 센서로부터의 신호정보가 필요하다. 따라서 2 센서 배열(Array)를 채용하고 있는 발전소의 위치평가에는 적용되지 않는다. 포락곡선법(Envelope curve method)에 의한 위치평가 방법은 충격에 의한 응답가속도신호는 충격위치와 가속도계 설치위치간의 거리에 따라 신호의 상승시간(Rise time)이 달라진다는 특징을 이용한 방법으로, 1개 가속도 신호로부터 개략적인 충격위치 추정이 가능하나 정확한 충격위치 평가는 곤란한 점이 있다.

원교차법(Circle intersection method)에 의한 위치평가 방법은 Fig.3에서 나타낸 것과 같이 구조물내에서의 충격파(Lamb wave) 전파특성을 이용하는 것으로서, 1개 가속도 신호상에서 서로 다른 2개의 특정 Mode파(S_0, A_0)를 이용하는 방법과 센서의 2개 공진주파수(공진주파수 f_1 과 센서 마운팅(Mounting) 공진주파수 f_2)를 이용하는 방법이 있다.

모드(Mode)파에 의한 방법은 기본 모드파, 즉 S_0 와 A_0 모드파의 전파속도차에 의한 신호도달 지연시간 $\Delta t_{A_0, S_0}$ 를 이용하는 것이다. 2개 공진주파수에 의한 방법은 A_0 파와 S_0 파중 비교적 큰 진폭을 야기시키는 A_0 파의 2개 공진주파수간 전파속도 차이에 의한 신호도달 지연시간을 이용한다.

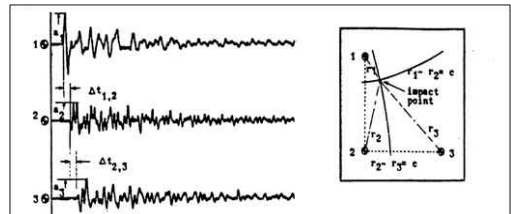


Fig. 2 Triangular method for searching impact point

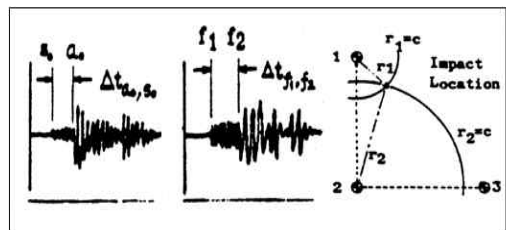


Fig. 3 Circle intersection method for searching impact point

② 금속파편의 질량 분석

질량과 충격속도를 가지는 강구(Steel ball)가 강판(Steel plate)에 충돌하는 경우의, 충격속도에 따른 충격접촉시간과 충격물질 질량과의 관계로부터 질량을 추정할 수 있다. 충격물질의 질량이 작을수록 접촉시간이 짧는데, 이는 구조물을 넓은 주파수 대역으로 여기(Excitation)시키며, 접촉시간이 10 μ sec 이상이면 10 kHz 이하의 주파수대역을 여기 시킨다. 이 방법은 충격응답 시간이력에서 접촉시간 정보를 얻을 수 있고 충격속도가 정해질 때 평가가 가능한 방법으로, 정확한 충격속도의 결정에 의해 평가의 불확실성(Uncertainty)을 줄일 수 있다. 또한 충격물질의 질량이 커질수록 구조물 주파수특성의 저주파성분이 잘 여기 된다는 이론에 근거하여 취득된 충격 신호 주파수 분석으로 충격질량을 알아내는 방법이다. 배경잡음(Background noise)과 충격가속도 신호의 주파수 대역별 파워 스펙트라 비(Normalized power spectra ratio)를 이용해 충격질량에 따라 구성주파수의 상대적 증가를 확인할 수가 있는데, 산출된 파워 스펙트라(Power spectra) 함수의 면적중심 fc가 질량지표로 활용된다.

2.2 신호분석 프로그램 개발

LPMS 신호분석 프로그램은 충격 신호의 진위 판정, 트리거링 및 알람 판별, 충격신호의 시간-주파수 분석, 충격 위치 및 충격물의 질량 추정과 분석 결과에 대한 열람 기능을 수행할 수 있도록 개발하였다⁽²⁾. Fig.4는 신호분석중 측정신호에 대한 이물질 신호의 진위여부를 판별하는 프로그램 알고리즘을 수행하는 화면을 나타낸다. Fig.5는 위치추정 결과를 보여주는 화면을 나타낸 것이다.

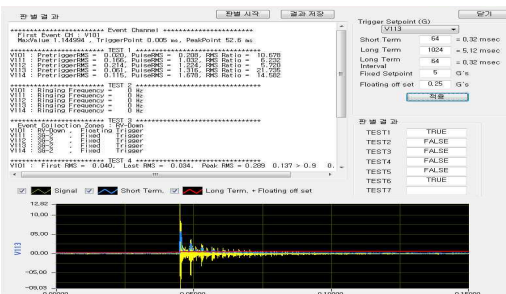


Fig. 4 Picture showing discrimination algorithm on whether loose parts or not

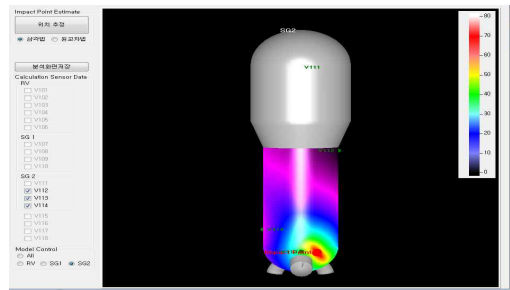


Fig. 5 Picture showing local estimation result on steam generator

3. 결 론

원자로계통의 건전성 감시를 위해 운용되고 있는 금속파편 감시시스템(LPMS)의 감시원리 및 진단기법 소개와 이상징후를 분석할 수 있는 신호분석 프로그램 개발 연구를 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. LPMS는 취득된 가속도 신호로부터 충격응답 가속도 진폭, 가속도계간의 신호도달 지연시간 및 충격과 시간이력 및 주파수 특성 등을 평가하여 충격 위치, 충격물질의 질량 및 충격에너지를 추정함으로써 금속파편의 조기에 제거작업 수행 여부를 결정하는 설비로써 원자력발전소의 안전 확보를 위한 중요한 설비임을 확인할 수 있다.

2. 또한 국내 운전중인 경수로 원전의 LPMS 신호분석 프로그램 개발을 통하여 발전소 이상 징후에 대한 진단 신뢰도를 크게 향상시킬 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) C. W. Mayo, D. P. Bozarth, G. N. Lagerberg, C. L. Mason, 1998, Loose-Part Monitoring System Improvements, Research Project 2642-1, EPRI NP-5743.
- (2) Sang-Guk Lee, et al., 2014, Development of Integral Database and Analysis Program for Structural Integrity Monitoring and Diagnosis of Nuclear Reactor system, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 293~294.