

원자력발전소 금속파편감시계통 센서 건전성 평가

조성한, 정창규, 김형관
한국수력원자력 원자력발전기술원

Evaluation Methode for LPMS Sensor of Nuclear Power Plant

Sung-Han Jo, Chang-Gyu Jung, Hyoung-Gwan Kim
Korea Hydro & Nuclear Power Co. Nuclear Engineering & Technology Institute

Abstract - 원자력발전소의 금속파편감시계통(LPMS : Loose Parts Monitoring System)은 원자로냉각계통 내부에 존재할 수 있는 금속 이물질과 구조물 이완부에 의한 충격신호를 조기에 검출하여 원자로 구조물 및 핵연료 손상, 제어봉 구동장애 등을 미연에 방지하여 발전소 안전운전을 담당하는 중요 감시설비이다. LPMS는 금속 이물질이나 구조물 이완부에 의한 충격신호를 검출하기 위해 충격파에 민감한 가속도계를 원자로냉각계통 중 금속파편이 자연적으로 모일 수 있는 각 구역의 표면에 최소 2개 이상 설치되어 있다.

원전은 규제요건에 따라 설비의 건전성 확인을 위해 24시간, 7일, 31일, 91일 마다 각 1회의 설비 건전성 시험을 수행하며, 계획예방정비기간 중에는 가속도계 주변에서 강구나 스프링 타격기를 이용한 충격시험을 통해 설비 전체의 건전성을 확인하고 있다.

설비 건전성 확인을 위해 정상운전 중에 수행하는 설비 건전성 시험에는 설비 특성상 가속도계 및 전치증폭기의 건전성을 확인할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 정상운전 중 가속도계와 전치증폭기의 건전성을 확인할 수 있는 기법을 제시하고자 한다.

1. 서 론

원자력발전소는 원자로에서 발생하는 열을 이용하여 전기를 생산하므로 안전하게 운영하는 것이 가장 중요하다. 원자력발전소는 원자로를 포함하고 있는 원자로냉각계통의 건전성을 확인하고 안전하게 유지하기 위해 많은 설비를 운영하고 있으며, LPMS가 그 중 하나이다. LPMS는 원자로냉각계통 내부의 이물질을 탐지하고 조기에 경보를 제공하여 중요 구조물 파손과 같은 사고를 방지하는 감시설비로 정상운전 중 정상적으로 설비가 동작하고 있음을 보증하기 위해 요건[1],[2]에 따라 시험을 수행하고 있다. LPMS 건전성 확인 시험은 전치증폭기에서 모의신호를 발생시켜 경보기부터 분석컴퓨터까지의 건전성을 확인하는 기능시험과 계획예방정비 기간 중 정비원이 직접 가속도계가 설치된 원자로냉각계통에 접근하여 강구 또는 스프링타격기로 가속도계에 0.68J의 에너지로 충격을 가하여 가속도계부터 분석컴퓨터까지의 전체 설비의 건전성을 확인하는 교정시험이 있다.

그러나 계획예방정비 기간에 수행하는 교정시험과는 달리 정상운전 중에 수행하는 기능시험에서는 전치증폭기에서 만들어 지는 전기적 모의신호를 이용하여 설비의 건전성을 확인하기 때문에 가속도계와 전치증폭기의 건전성을 확인할 수 없다.

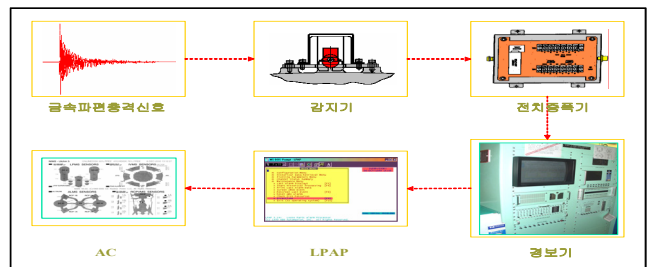
따라서 본 논문에서는 배경잡음 신호의 특성을 확인하여 가속도계와 전치증폭기의 건전성을 확인하는 기법을 제안한다.

2. 본 론

2.1 LPMS 설비 일반

<그림1>은 LPMS 기기 구성도이다. 가속도계는 압전형 가속도계로 원자로냉각계통 압력계 외부에 Stud Mounting 방식으로 설치되어 있다. 감지기 감도는 10 pC/g 이며 동작 범위는 2000 g (설비 최대 압력 : 100 g)이다. 전치증폭기는 가속도계에서 출력된 전하량 신호를 전압신호로 변환 및 증폭하여 경보기로 전달한다. 경보기의 패널 전면에 설치된 디스플레이는 각종 정보를 시각적으로 제공하고, 제어용 키보드(Keypad)는 이벤트에 대한 정보, 채널별 설정치 입력, 경보리셋, 기능시험 등을 수행할 수 있도록 되어 있다. 또한 선택된 채널의 음향신호를 들을 수 있는 스피커가 있으며, 패치패널을 이용하면 현장신호(Filtered 신호)를 오실로스코프나 기록계를 이용하여 쉽게 관측할 수 있다. LPAP는 경보기에 의해 검출된 입력신호에 대해 경보관별 기능을 수행하고, 경보분석 및 자료저장을 위하여 이벤트 신호를 분석컴퓨터(AC)로 전달한다. 분석컴퓨터는 분석컴퓨터로 전송된 이벤트 신호를 교정시험에 의해 저장되어 있는 신호와 비교하여 유사한 신호가 있는지 확인하는 2

차 평가를 수행하며, 신호를 분석할 수 있는 Time Chart, FFT Chart 등의 분석 프로그램을 제공한다.[3]



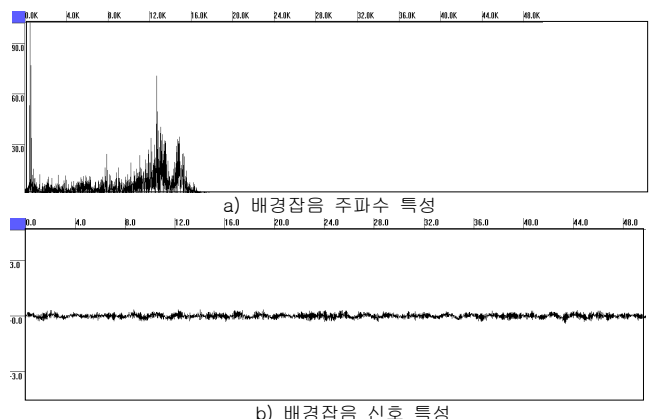
<그림 1> LPMS 기기 구성도

운전 중인 발전소에서 LPMS 센서 건전성 평가를 위해서 음향신호 청취 및 배경잡음 신호를 취득한다. 그러나 가속도계나 전치증폭기의 기능 저하 시에는 음향신호 청취로 가속도계나 전치증폭기 건전성 확인이 어려우며, 취득한 배경잡음 신호는 정상 배경잡음 신호와 단순 비교하기 때문에 가속도계나 프리앰프의 기능이 완전히 퇴화되기 전에는 설비의 건전성을 확인하기 어렵다. 따라서 데이터 취득 장비를 LPMS 외부에서 연결하고 주파수특성을 취득/분석하여 고장유무를 확인하는 방법을 통하여 LPMS 건전성을 평가하는 기법을 제시하고자 한다.

2.2 고장진단 기법

2.2.1 정상 배경잡음 신호

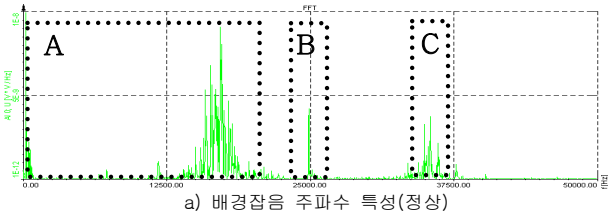
현재 발전소에서 운전 중인 LPMS는 샘플링 시간이 100kHz며, 1.0kHz ~ 12kHz와 0.5kHz ~ 15kHz 두 가지의 대역필터(Band-Pass Filter) 만을 선택할 수 있기 때문에 가속도계의 고유 응답 주파수(Crystal Response Frequency : 25kHz)와 설치 응답 주파수(Mounted Response Frequency : 약 34kHz)는 설비에서 필터링 되기 때문에 확인할 수 없다.<그림 2>



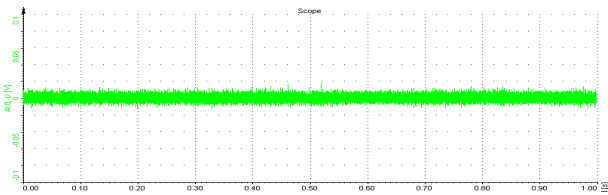
<그림 2> 현재 LPMS 배경잡음 신호

정상적인 LPMS 배경잡음 신호는 120Hz 이하의 원자로냉각계 펌프에 의한 구조물 진동신호, 원자로냉각계가 고압의 계통 배관을 흐르면서 발생시키는 12kHz 이하의 마찰신호 및 25kHz의 가속도계의 고유 응답 주파수(Crystal Response Frequency)와 34kHz 부위의 설치 응답 주파수(Mounted Response Frequency) 등 계통 고유의 주파수 특성이 있다.

따라서 이와 같은 특성주파수를 확인하면 가속도계 및 전치증폭기의 건전성을 알 수 있다. 특성주파수는 필터링 기능을 사용하지 않은 오실로스코프와 같은 데이터취득 장비를 활용하여 프리앰프 후단에서 측정한다. <그림 3>은 500kHz의 샘플링 시간을 갖는 외부장비를 이용하여 LPMS의 배경잡음 신호를 취득한 그래프이다. 배경잡음 신호의 주파수 특성에서 구조물 및 냉각재 마찰에 의한 신호(A)와 가속도계 고유 응답 주파수(B) 및 설치 응답 주파수(C)를 확인할 수 있었다.



a) 배경잡음 주파수 특성(정상)

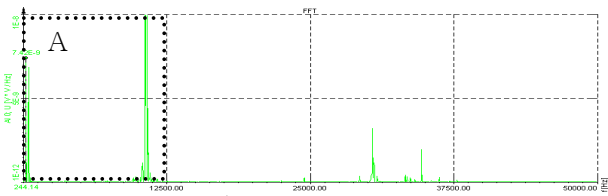


b) 배경잡음 신호 특성

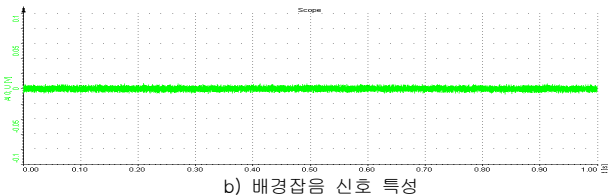
<그림 3> 배경잡음 신호(정상)

2.2.2 가속도계 기능저하

가속도계에 기능저하가 발생하는 경우 <그림4>와 같은 주파수 특성을 가진다. 가속도계의 기능이 저하되어도 120Hz 이하 영역과 11kHz 영역에서 발생하는 신호가 정상 가속도계에서 발생하는 신호와 유사하기 때문에 최대 0.5kHz에서 15kHz 사이의 신호만 확인이 가능한 LPMS로서는 기능이 저하된 가속도계와 정상 가속도계를 구분하기 어렵다. 그러나 외부장비를 이용하여 50kHz 이하의 주파수 특성을 확인한 결과 기능이 저하된 가속도계는 고유 응답 주파수와 설치 응답 주파수를 확인할 수 없었다.



a) 배경잡음 주파수 특성



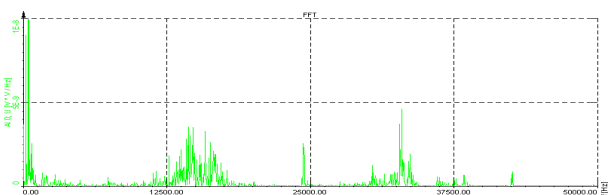
b) 배경잡음 신호 특성

<그림 4> 배경잡음 특성(가속도계 기능저하)

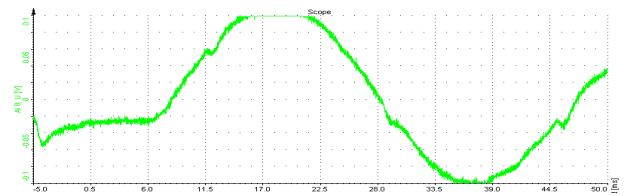
따라서 가속도계의 기능저하를 확인하기 위해서는 가속도계의 고유 주파수와 설치 주파수를 확인할 수 있어야 하며 이를 위해서는 필터링 사용하지 않는 외부 장비를 별도 설치하여야 한다.

2.2.3 가속도계 하드라인 절연파괴

가속도계는 고온에서도 사용이 가능하도록 일정 구간의 신호선을 고온에서도 사용가능한 하드라인으로 제작되어 있으며, 정상 가속도계의 하드라인의 (+)와 (-) 사이의 저항은 무한대이다.



a) 배경잡음 주파수 특성



b) 배경잡음 신호 특성

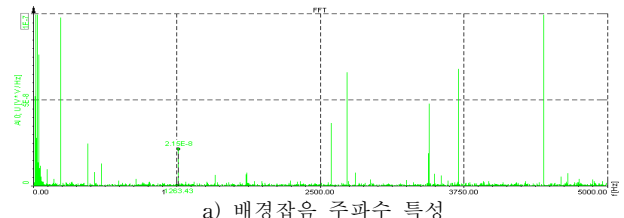
<그림 5> 배경잡음 신호(전치증폭기 고장)

가속도계의 하드라인의 절연이 파괴되어도 주파수 특성은 정상 가속도계와 유사한 특성을 보인다. <그림 5>와 같이 가속도계 하드라인의 절연이 파괴되는 경우에 발생하는 큰 크기의 사인파는 LPMS에서는 저주파 필터에 의해 필터링 되기 때문에 확인할 수 없다.

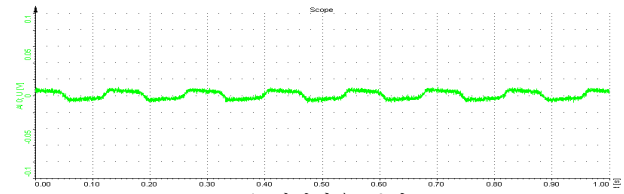
따라서 정상운전 중 가속도계 하드라인의 절연파괴 현상을 확인하기 위해서는 설비 기능시험 시 외부 장비의 설치를 통하여 배경잡음 신호 특성 분석이 필요하다.

2.2.4 전치증폭기 고장

가속도계가 건전하여도 전치증폭기의 기능이 저하된 경우에는 신호변환 및 증폭을 할 수 없기 때문에 LPMS 고유 특성 주파수를 확인할 수 없으며, 시간함수도 <그림 6>과 같이 사각파의 형태를 나타낸다. 전치증폭기의 고장은 대부분 전치증폭기 내부에 설치된 필터 및 미분기능을 수행하는 전자소자의 고장이다.



a) 배경잡음 주파수 특성



b) 배경잡음 특성

<그림 6> 배경잡음 특성(전치증폭기 고장)

3. 결 론

본 논문에서는 원전의 원자로냉각계통에 존재할 수 있는 금속이물 절이나 이완부를 조기에 검출하는 LPMS의 가속도계 및 전치증폭기의 기능저하 및 고장 특성을 정리하였으며, 건전성을 확인할 수 있는 방법을 제시하였다. 정상적인 LPMS 배경잡음 신호는 구조물 고유진동, 냉각재 마찰신호, 가속도계 고유 응답주파수, 설치 응답주파수 등이 나타나지만 센서나 전치증폭기 하드라인 등에 이상이 발생하면 이러한 신호가 변화하게 된다. 이러한 신호변화를 외부 장비를 활용하여 취득, 분석하므로 시스템의 건전성을 평가 할 수 있었다.

아울러, 이러한 평가방법은 원자력발전소 LPMS에 적용 될 뿐만 아니라 일반 산업계의 설비 상태를 감시하기 위해 설치된 가속도계 및 전치증폭기의 건전성 확인에 유용하게 사용될 것으로 기대한다.

[참 고 문 헌]

[1] NRC Reg.Guide 1.133 Rev1: Loose Part Detection Program for the Primary System of LWRs, 1.133-3, 1981
 [2] ASME OM Part 12 : Light Water Reactor Loose Part Monitoring and Diagnostic
 [3] Westinghouse Electric Company, Technical Manual for NSSS Integrity Monitoring Sys for Yonggwang Nuclear Power Plant, 2003
 [4] Mayo, C.W., "Loose Part Monitoring System Improvements". Final Report NP 5743, The Electric Power Research Institute, 1988
 [5] Mayo, C.W., "LOOSE-PART SIGNAL PROPERTIES", Progress in Nuclear Energy, Vol. No. 28, pp. 347-357, 1994