

원전 원자로냉각재계통 내의 충격신호 유형 분석

A Pattern Analysis of Impact Signal in Reactor Coolant System

정창규† · 이광현* · 이재기*

Chang-Gyu Jung, Kwang-Hyun Lee, and Jae-Ki Lee

Key Words : LPMS(금속파편감시계통), Structure Friction(구조물 마찰), Thermal Expansion(열팽창), RCS(원자로냉각재계통), RCP(원자로냉각재펌프)

ABSTRACT

Loose Parts Monitoring System(LPMS) monitors loosened or detached parts and foreign parts inside the pressure boundary of a reactor coolant system (RCS). It is difficult to discriminate valid signal from LPMS alarms at full power since the signal pattern by thermal shocks and structure friction are similar to those by loose metal impacts. In addition, It is more difficult to discriminate the impact signals induced by the rod driving, sensor hard-line movement and loosened component since they have similar frequency characteristics with valid signals. This paper classifies the signal patterns by analyzing actual LPMS signal captured during nuclear power plant operation.

1. 서 론

금속파편감시계통은 원자로냉각재계통 내부 구조물 간의 체결력 약화로 발생하는 충격신호나, 계통 내부에서 원자로냉각재 흐름에 따라 자유롭게 이동하는 금속이물질에 의한 충격신호를 검출하여 관련 구조물 손상을 방지하기 위한 감시설비이다.

원자력발전소 정상운전 중에 발생하는 구조물 열팽창, 구조물 간 마찰 등에 의한 충격신호는 구조물의 건전성에 미치는 영향이 미비하다. 반면에 원자로냉각재계통 내부 구조물의 체결력 약화나, 금속이물질에 의한 충격은 구조물에 심각한 손상을 줄 수 있다.

따라서 금속이물질에 의한 충격신호와 구조물 마찰 등과 같은 유사 신호를 신속하고 정확하게 구별하는 것은 원자로냉각재계통 구조물의 건전성을 확보하기 위한 중요 수단이다. 그러나 구조물 열팽창이나 마찰 등에 의한 충격신호 및 구조물 외부에서

발생되는 충격신호는 계통 내부에서 금속이물질에 의해 발생하는 충격신호와 신호의 형태 및 주파수 분포가 유사하여 구별하기가 어렵다.

본 논문에서는 원자력발전소 금속파편감시계통에서 검출되는 충격신호의 특성을 분석하여 신호를 유형별로 분류하고자 한다.

2. 본 론

2.1 금속파편감시계통의 구성

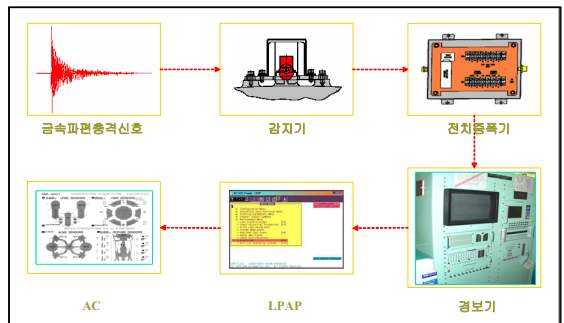


그림 1. 금속파편감시계통의 구성

금속파편감시계통은 그림1과 같이 압전효과를 이용

† 교신저자; 정회원, 한국수력원자력

E-mail : INC92@khnp.cokr

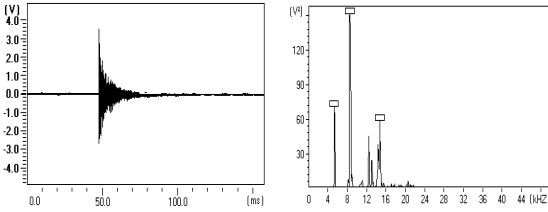
Tel : 042-870-5615

* 한국수력원자력

한 가속도계 센서, 전하량을 전압으로 변환하는 전치증폭기, 신호를 검출하는 경보기, 검출신호를 검증하는 LPAP 및 신호분석용 컴퓨터로 구성되어 있다.

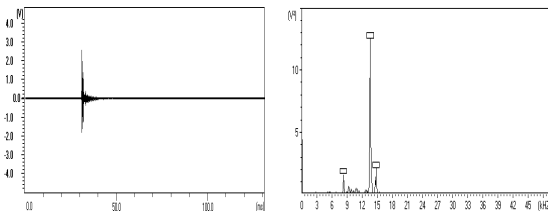
2.2 충격신호 유형별 분류

2.2.1 금속체에 의한 충격신호



(a) Time Chart (b) FFT Chart

그림 2. 금속이물질에 의한 충격신호(76gram)



(a) Time Chart (b) FFT Chart

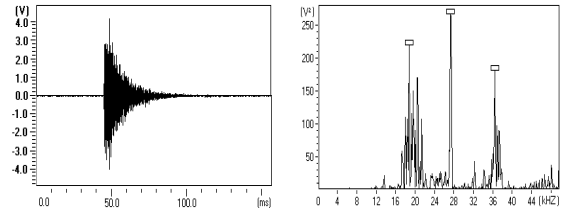
그림 3. 강구에 의한 모의충격신호(170gram)

그림2는 원자력발전소에서 100% 출력 운전 중에 증기발생기 1차측에 존재한 76gram의 금속이물질에 의해 발생된 충격신호이다. 신호는 1초에 3~4회씩 지속적으로 발생되었으며, 신호의 형태는 삼각형으로 지속시간은 30ms 이내이다. 특이주파수는 5.4kHz, 8.6kHz 및 14.6kHz에서 발생되었으며 대부분의 에너지가 16kHz 이하에 집중되어 있다.¹⁾

그림3은 발전소를 정지하고 계획예방정비를 하는 기간에 금속과편감시계통의 건전성을 검증하기 위해서 170gram의 강구(베어링)를 이용하여 가속도 센서 근처에서 모의로 충격신호를 발생시키고 취득한 신호이다. 신호의 형태는 삼각형이며 지속시간은 20ms 이내이다. 특이주파수는 8.7kHz, 13.6kHz 및 14.9kHz에서 발생되어 실제 금속이물질에 의한 충격신호의 주파수와 유사하다.

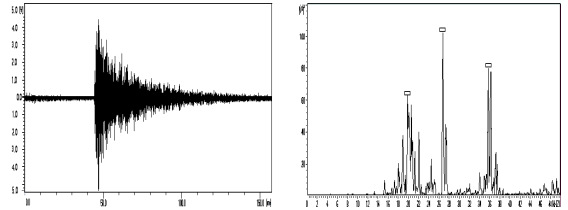
증기발생기 내부의 금속이물질에 의한 충격신호와 강구를 이용한 모의 충격신호 모두 신호의 지속시간이 짧으며 크기가 급격히 감소한다. 또한 15kHz 이상에서는 상대적으로 충격에너지가 적다.

2.2.2 구조물 열팽창에 의한 충격신호



(a) Time Chart (b) FFT Chart

그림 4. 열팽창에 의한 충격신호(증기발생기)



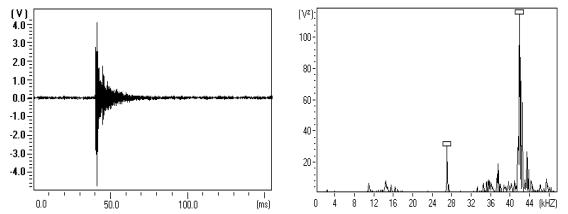
(a) Time Chart (b) FFT Chart

그림 5. 열팽창에 의한 충격신호(원자로)

원자로냉각재 구조물은 계획예방정비 기간 동안 상온으로 냉각되었다가 계획예방정비 말기에 원자로 냉각재펌프 운전으로 인하여 열과 원자로 출력 상승에 따라 가열되면서 관련 구조물로 열전달이 이루어진다. 열전달에 의해 가열된 구조물은 팽창하면서 금속이물질에 의해 발생하는 충격신호와 유사한 형태의 충격신호를 발생시킨다. 열팽창에 의한 충격신호는 구조물로 열전달이 완전히 이루어져 열적 평형에 도달되어야 종료된다.

그림4와 그림5는 증기발생기와 원자로에서 발생한 열팽창에 의한 충격신호로 신호의 형태는 금속이물질에 의한 충격신호와 동일하게 삼각형을 이루나, 신호의 지속시간이 50msec 이상이 걸리기도 한다. 특이주파수는 18.2kHz, 27.6kHz, 36.7kHz에서 관측되었다.

2.2.3 구조물 마찰에 의한 충격신호



(a) Time Chart (b) FFT Chart

그림 6. 구조물마찰에 의한 충격신호(증기발생기)

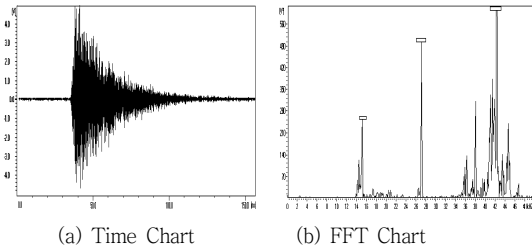


그림 7. 구조물마찰에 의한 충격신호(원자료)

원자로냉각재계통 구조물과 구조물을 지지하는 지지대 사이의 마찰로 발생하는 구조물마찰에 의한 충격신호는 원자로 출력 상승이나 하강 기간에만 발생하는 열팽창에 의한 충격신호와 달리 100% 출력 운전 중에도 발생된다.

그림6은 증기발생기 1차측에서 검출된 전형적인 구조물 마찰에 의한 충격신호를 보여주고 있다. 구조물 마찰에 의한 충격신호는 모의충격신호나 금속이물질에 의한 충격신호보다 충격에너지가 몇 십배 크며 상승시간이 길고(최소 3m 이상에서 충격신호 발생) 동일 지역에 쌍으로 설치된 다른 감지기에서 검출된 신호의 감쇠가 적다. 그러나 충격신호는 쌍으로 설치된 두 감지기에서만 검출되었다.²⁾ 이는 증기발생기 Cold Leg 쪽의 배관과 배관 지지용 새들간의 마찰로 형성된 충격파가 원자로냉각재계통의 구조적 제약으로 원자로나 다른 증기발생기로 전파되기 어렵기 때문인 것으로 보인다. 그림7은 원자로 노즐 부위에서 검출된 신호로 신호의 전달경로가 간단하기 때문에 원자로냉각재계통에 설치된 전 채널에서 충격신호가 검출되었다.

특이주파수는 27.8kHz, 42.3kHz에서 관측되었다. 구조물마찰에 의한 충격신호는 금속이물질에 의한 충격신호, 열팽창에 의한 충격신호 등 모든 충격신호 중 가장 고주파 성분을 많이 포함하고 있다.

2.2.4 제어봉 구동에 의한 충격신호

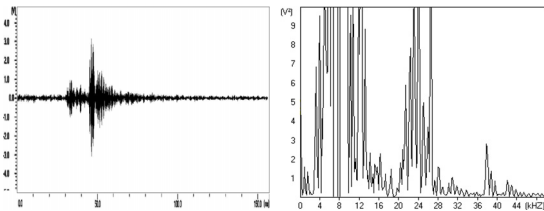


그림 8. 제어봉 구동에 의한 충격신호

그림 8은 제어봉 구동에 의한 충격신호이다. 제어봉 구동에 의한 충격신호는 원자로 상부에서만 신호가 검출되며 원자로하부에서는 신호가 검출되지 않는다. 원자로하부에서 신호가 검출되지 않는 것은 원자로 상부 구조물이 복잡하여 신호전달 과정에서 대부분의 에너지가 감쇄되기 때문인 것으로 판단된다.³⁾ 신호의 형태는 금속이물질에 의한 충격신호에 비해 불규칙적이다. 또한 금속이물질에 의한 충격신호 주파수 대역과 구조물 마찰에 의한 주파수 대역의 신호가 동시에 검출된다. 이는 제어봉 구동 래치가 제어봉을 잡으면서 충격신호를 발생시키고 이후 제어봉이 약간 미끄러지면서 생긴 마찰 때문인 것으로 추정된다.

2.2.5 보온재 흔들림에 의한 충격신호

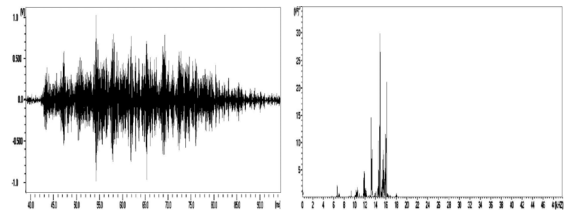


그림 9. 보온재 흔들림에 의한 충격신호(센서 하드라인 충격)

계획예방정비 후 출력 증발 중 증기발생기 1차측에서 충격신호가 검출되었다. 충격신호음은 4~5초에 1회 정도로 연속하여 발생하였다. 검출된 신호는 증기발생기 하부에서만 충격신호가 검출되었으며 쌍으로 설치된 다른 감지기에서는 검출되지 않았다. 충격신호의 파고는 약 4ms로 연속적으로 나타났으며, 충격파형이 타원형 모양이었다. 충격신호의 특이주파수는 금속 이물질에 의한 충격 주파수와 동일하였다.

신호의 형태가 금속이물질에 의한 충격신호와 달랐으며 쌍으로 설치된 센서에서 검출되지 않아, 동 충격신호는 센서의 Hard Line에 충격을 직접 가하여져야 발생할 수 있는 것으로 분석되었다.

CCTV를 이용하여 증기발생기를 조사한 결과 증기발생기의 보온재를 싸고 있는 철판의 일부에서 체결이 풀려 있는 것이 확인되었다. 철판은 진동에 따라 흔들리면서 센서의 하드라인에 충격을 가하고 있었다. 보온재 철판을 고정한 이후에는 충격신호음이 소멸되었다.

2.2.6 센서 보호관 체결 풀림에 의한 충격

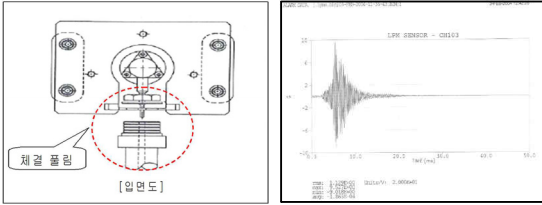


그림 10 센서 하드라인과 보호관 충격신호

발전소 정상 출력운전 중 그림 10과 같은 신호가 지속적으로 발생되었다. 신호의 형태와 주파수 대역을 확인한 결과 금속이물질에 의한 충격신호와 비슷하였다. 그러나 쌓으로 이루어진 근접 센서에서는 충격신호가 검출되지 않았다. 차기 계획예방정비기간 중에 확인한 결과 외부 충격으로부터 센서 하드라인을 보호하는 보호관의 체결이 풀어져 있었다. 정상운전 중 구조물 진동에 의해 풀어진 보호관이 센서 하드라인에 충격을 가한 것으로 판단된다.

2.2.7 증기발생기 급수전환과 충격신호

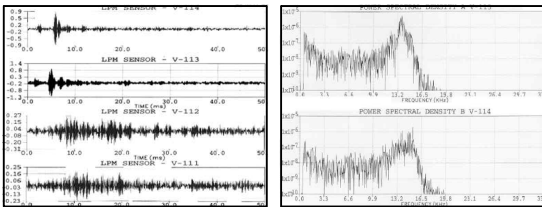


그림 11. 증기발생기 급수전환 시 충격신호

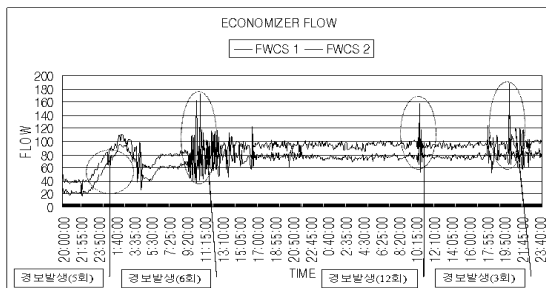


그림 12 증기발생기 급수전환과 경보발생 횟수

국내 OPR1000 발전소는 계획예방정비 후 원자로 출력이 15% 이상이 되면 증기발생기 급수를 다운콘머밸브에서 이코노마이저밸브로 전환하여 운전한다. 이때 그림 11과 같은 충격신호가 급격하게 검출된

다. 신호의 형태는 금속 충격신호와 매우 유사하다. 그러나 많은 에너지가 고주파수 대역에 집중되는 특성이 있다.

그림 12는 이코노마이저 급수유량과 충격신호 발생량과의 상관성을 도시한 그래프이다. 충격신호가 발생하는 원인을 조사한 결과, 충격신호는 그림 12와 같이 급수 유량의 급격한 변동이 생긴 구간에서 주로 발생되었다. 따라서 충격신호 발생원인은 급수 유량의 변동으로 인해 형성된 거품이 증기발생기 내부 세관과 충돌한 후 파괴되면서 발생된 것으로 추정된다.

3. 결 론

원자력발전소 원자로냉각재계통의 건전성을 감시하는 금속파편감시설비는 구조물에서 발생하는 충격신호를 검출한다. 충격신호 중 관심의 대상은 구조물 건전성에 영향을 미치는 금속이물질이나 헐거워진 부품에 의한 충격신호이다.

그러나 원자로냉각재계통에서는 유사 충격신호가 많이 발생되고 있기 때문에 모든 충격신호의 발생 원인을 증명하는 것은 매우 어려운 일이다. 본 논문에서는 다년간의 경험에 의해 취득된 신호들을 특성별로 분류하여 정리하였다.

향후에는 각 충격신호에 대한 이론적인 배경을 정립하고자 한다.

참 고 문 헌

(1) T.Tsunoda, T.Kato., 1985. Studies on the Loose Part Evaluation Technique, Process in Nuclear Energy, Vol.15, 569-576.

(2) US Nuclear Regulatory Commission, 1981. Loose-Part Detection Program for the Primary System of Light-Cooled Reactors, Regulatory Guide 1.133.

(3) Mayo, C.W. et al., 1988. Loose-Parts Monitoring System Improvements, EPRI Final Report NP-5743.

(4) Yanlong Cao et al., 2012. An alarm method for a Loose Parts Monitoring System, Shock and Vibration 19, 753-761.