

국내 원전의 금속파편 감시기술 및 설비 현황

⁰김태룡*, 이준신*, 손석만*

Status of Loose Part Monitoring Technology and Facility in Domestic Nuclear Power Plant

⁰Tae-Ryong Kim*, Jun-Shin Lee*, Seok-Man Sohn*

ABSTRACT

Loose parts monitoring system(LPMS) is one of the important monitoring systems for the safe and efficient operation of the nuclear reactor, since it is LPMS that can early detect loose parts which may cause a significant damage in facilities or components of the plant. Nuclear power plants in Korea have recently experienced several loose part alarms due to the metallic impact and it is expected that the frequency of the loose part will be increased along the aging of the plants. In this paper, the status of loose parts monitoring technologies and facilities in Korean nuclear power plants is presented for the establishment of LPMS installation plan in some nuclear reactors which are not yet equipped with LPMS. Sensor specification, location and mounting method for loose parts monitoring were reviewed. As a result, the location and the mounting method of the properly chosen sensor was recommended. Data acquisition algorithms and discriminating rules of loose part impact signals were also reviewed. Actual alarm cases occurred by true impact signal and false impact signal were stated here.

1. 서론

금속파편 감시계통(Loose Part Monitoring System: 이하 LPMS)은 원자로냉각재계통 내의 주요 기기 외부에 충격탐지센서를 부착하여 이물질에 의한 충격시 전파되는 충격파를 감지하여 원자로 냉각재계통 내의 이물질 존재를 조기에 탐지하고, 또 충격신호를 원자로 격납건물 밖의 제어실에 전송, 분석함으로써 금속 이물질의 충격 위치 및 질량 등을 추정하여 원자로 냉각재계통 주요

기기의 손상을 방지하기 위하여 설치하는 계통이다.

이물질의 발생 원인은 주로 기계적 손상 또는 부식 등에 의해 원자로 내부구조물의 부품이 이탈하거나 또는 원전건설이나 핵연료 재장전시 또는 정비시에 외부로부터 유입되는 것이라 할 수 있다. 주로 일차계통에서 많이 발생하며 이차계통의 발생 빈도는 일차계통에 비해 훨씬 적은 편이다. 표 1은 그 동안 발생한 주요 금속파편 종류와 발생

* 한전 전력연구원

원전 및 년도 등을 정리해 본 것으로, 이물질은 주로 금속파편으로 그 종류는 매우 다양하며 이물질에 의한 손상도 종종 발생한 경우가 있음을 알 수 있다.

본 글에서는 LPMS 기술과 관련한 국내외 현황을 먼저 알아 본 다음, 국내 원전의 LPMS 설비 현황 및 진단사례 등에 대해 서술한다.

Table 1. Loose parts kinds and results

Plant	Loose parts	Year	Results
Turkey Point-3	Tube plug	1970s	-
Indian Point-2	RCP labyrinth seal	1976	-
Mihama-3	Split pin	1978	-
Ginna	Unknown	1982	S/G tube rupture
St Lucie-1	Thermal shield position pin	1982-83	Thermal shield damage
Milestone-2	Thermal shield	1983	-
Catawba-1	Wrench	1983-84	In core guide tube damage
Palo Verde-1	RCP bolt	1985	S/G damage
McGuire-1	Fuel assembly grid strap	1990	-
Bugey-5	Screw	1991	Found in secondary
Maine Yankee	Check valve	1992	-
YGN-2	CRDM guide tube pin	1997-1999	-

2. LPMS 기술 현황

가. 이론적 배경

(1) 기본적인 수식표현[1]

금속파편에 의한 충격신호 분석의 이론적 배경은 평판에 강구가 충돌할 때 발생하는 충격파의 분석에 관련한 것으로 일반적으로 Hertz 충격이론으로 알려져 있다. 탄성이 있는 무한평판에 강구가 충돌할 경우 강구의 질량 및 에너지에 따른 평판

의 최대변형 변위 D_{max} 와 접촉 시간 t_d 은 다음과 같이 표현된다.

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

$$t_d = \frac{2.94 D_{max}}{V_0} \quad (2)$$

여기서 m 은 강구의 질량

V_0 는 강구의 초기 속도

R 은 강구의 반경

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

ν_i 및 E_i 는 강구 및 평판의 Poisson 비와 탄성계수이다.

또한 충격신호의 dominant 주파수와 접촉시간의 관계는 경험적으로 다음과 같이 나타난다.

$$f_c = \frac{1.6}{2t_d} \quad (3)$$

그림 1은 전형적인 충격파의 형상을 보인다.

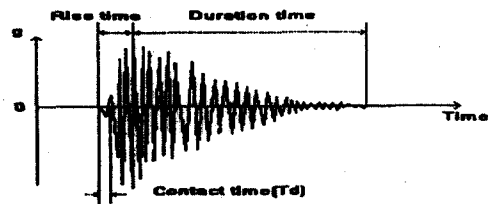


Fig. 1. Typical impact signal

(2) 충격위치 평가법

충격위치를 평가하는 데 가장 많이 활용하는 방법은 삼각법에 의한 위치평가로써 적어도 3개 이상의 센서 신호가 있을 경우 충격신호의 각 센서 도달 지연시간과 전파속도를 이용하여 충격 위치를 추정하는 방법이다(그림 2 참조). 이외에도 센서 신호가 2개인 경우 서로 다른 두 개의 모드파

(대칭파 S_0 및 비대칭파 A_0)의 전파속도가 다른 점을 이용하는 원 교차법에 의한 위치평가방법[1], envelope curve에 의한 위치평가방법[2], bandpass filtering에 의한 위치평가방법[3]도 있다.

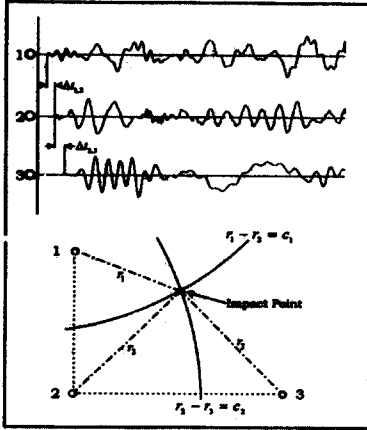


Fig. 2 Location by triangulation

(3) 충격질량 평가법

충격질량을 추정하는 방법으로는 Hertz 이론에 근거한 충격물질의 접촉시간과 충격위치에서의 유속분포로부터 충격속도를 가정하여 질량을 평가하거나[4], 또는 impact test 시 얻은 데이터로 작성한 frequency ratio(FR)을 미리 작성해 둔 FR 표와 비교하여 충격 질량을 추정하는 방법이 있다[5]. 또 질량평가 map을 활용하는 방법도 있으며, 질량평가 map은 미국 EPRI에서 개발한 방법[6]으로 신호감쇠효과를 고려하여 충격위치에서의 최대 가속도를 계산하고 충격신호의 dominant 주파수를 확인한 후 이를 토대로 질량 map에서 충격질량 및 충격속도를 평가한다. 그림 3은 충격량에 따른 dominant 주파수와 충격신호 크기를 보인 질량 map 이다.

나. 신호 검출 및 분석 알고리즘

앞에서 기술한 이론적인 배경을 바탕으로 LPMS에 들어오는 신호를 검출하고 실제 충격신호인지 진위여부를 판단해야 한다. 이를 위한 이물질 충격

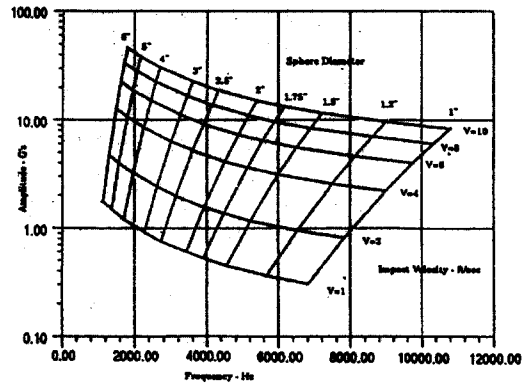


Fig. 3. Mass estimation by EPRI map

신호의 분석과 관련한 알고리즘으로 현재 많이 사용하고 있는 event 검출 알고리즘과 event screen 알고리즘은 다음과 같다.

(1) Event 검출 알고리즘

신호의 순간치 또는 정해진 시간(0.5 ~ 5ms에서 설정 가능) 동안 신호의 short term RMS value가 채널 특성을 고려한 alarm set-point를 초과할 경우 일단 이물질 발생 경보를 발생한다. 다음과 같은 두가지 경보가 사용된다.

- Fixed alarm
- Floating alarm

(2) Event screen 알고리즘

Fixed alarm 또는 floating alarm 발생시 충격신호의 진위여부를 판정하는 알고리즘으로 대부분의 LPMS는 다음과 같은 항목을 점검한다.

- RMS ratio
- Ringing frequency
- Impact duration
- In-channel delay
- Event period

다. 국내·외 LPMS 기술 현황

국내의 LPMS 관련 기술은 원자력 관련 여러 기관에서 기초적인 연구를 수행하거나 관심을 보이

고 있으며 아직은 초보 수준에 머물러 있다고 할 수 있다.

국내에서 LPMS 관련으로 최초로 관심을 보인 곳은 한국원자력안전기술원이라 할 수 있겠다. 여기서는 국내 최초로 규제 관점에서 LPMS 관련 기초적인 연구를 수행한 후[7,8], “원자력 냉각재계통 금속파편 감시지침(안)”으로 발표한 바 있다. 또 국제 LPMS benchmarking[9]에도 국내에서 유일하게 참여한 바 있다.

한국원자력연구소에서도 LPMS 관련 기초적인 연구 수행 및 소프트웨어 개발 추진한 바 있으며 [10,11], '97년 영광 2호기 문제 발생시 비공식적으로 참여하여 이물질 탐지를 수행한 바 있다. 또 이러한 경험을 바탕으로 기술이전 실용화 과제를 추진 중에 있다.

한국전력공사의 전력연구원에서도 LPMS를 포함한 각종 감시신호의 신호분석기술의 중요성을 인식하고 발전소 주요 감시설비 신호분석 기술조사를 수행한 바 있으며, 현재 LPMS가 미설치되어 있는 고리 1,2호기 및 울진 1,2호기를 대상으로 신규설치 방안을 수립한 바 있다[12].

LPMS의 실제 운용자인 국내 원자력발전소도 자체적으로 많은 노력을 경주하고 있으며 특히 영광 1발전소는 LPMS 기술을 자체 습득하고 1,2호기의 노후 LPMS를 국내 중소기업과 함께 upgrade (하드웨어 장치 교체) 완료하고 분석도 성공한 바 있다. 그러나 대부분의 발전소는 충격신호 발생시 운전자 혹은 관련 기술자에게 경보를 알려주는 수준으로 분석은 거의 할 수 없는 실정이며 따라서 분석전문기관에 의뢰함으로써 진단에 많은 시간이 소요되어 효율적으로 대처하지 못하고 있는 실정이다.

이에 반해 선진 외국에서는 70년대 이후로 원전 계통 내부에서 금속파편이 발견되는 사례가 증가함에 따라, 금속 파편 감시계통의 설치를 통한 조기진단의 중요성을 인식하고 이에 대한 연구를 현재까지 활발히 진행해 왔다. LPMS의 충격신호로부터 실제 금속파편의 충격위치 및 질량 평가에 관련해서는 주로 Hertz 이론 및 EPRI map 등을 이용하고 있고 최근에는 neural network, pattern

인식 등의 기술이 접목되고 있는 추세이다. 신호분석은 아직 자동화에는 이르지 못하여 전문가의 의한 off-line 분석이 주로 이루어지고 있으며 지금까지 개발된 분석기법과 발전소 현장에서의 경험 사례 및 시험자료들을 연계하여 상용화한 제품이 등장하고 있다.

미국에서는 신규원전의 설계시 LPMS를 반영하도록 요구하고, 기 운전중인 LPMS 미설치 발전소에는 LPMS의 신규 설치를 권고하는 Reg. Guide 1.133[13]를 제정한 바 있다. 이에 따라 주로 ORNL, EPRI, North Carolina 주립대 등에서 기술개발을 주도해 왔으며[14,15,16], EPRI에서는 LPMS 개선을 위하여 그 당시까지의 모든 연구결과를 정리하여 원전 사업자들이 참고할 수 있도록 하였다.[6] 또 ASME에서는 구체적인 설비의 규격이나 데이터 분석방법 등의 표준화를 위한 지침서 [17]를 마련해 두고 있다. Westinghouse사에서는 금속파편 뿐 아니라 총합감시시스템으로 ADPMS (advanced diagnosis and predictive maintenance system)를 개발하여 Westinghouse type 발전소에 적용하고 있으며, ABB-CE도 LPMS가 포함된 NIMS(NSSS integrity monitoring system)을 국내 영광3,4호기, 울진3,4호기에 적용한 바 있다.

독일은 국외에서 LPMS와 관련하여 가장 기술개발이 활발한 편으로 주로 GRS, SIEMENS 등에서 기술개발을 주도하고 있으며[18], 자동화 설비로 RAMSES(remote acoustic monitoring and signal evaluation system), KUS 95 등을 개발하여 많은 발전소에 적용하고 있다. 또 DIN 25475[19]라는 원전 설계요건들을 제시한 규제지침서를 만들어 활용하고 있으며 최근에는 금속파편 추정 필요성 및 중요성에 대한 인식이 확산됨에 따라 비안전성 계통으로 분류되어 오던 LPMS를 안전성 등급으로 조정하려는 움직임을 보이고 있다.

프랑스는 주로 EdF 에서 기술개발을 주도[20]하고 있으며 자국내의 발전소에 개발된 시스템을 설치 운용하고 있다.

3. 국내 LPMS 설비 현황

LPMS는 1977년 USNRC에 의해 처음 규제요건으로 설정된 이래 국내에서는 고리 1,2호기, 영광 1,2호기, 영광 3,4호기, 울진 3,4호기 등에 발전소 주기기 공급처에서 공급한 감시 계통이 설치, 운영되고 있다(표 2참조). 본 절에서는 LPMS 설비 관련 각종 요건과 국내 LPMS 설비 현황을 정리해 본다.

Table 2. Status of LPMS installation

NPP	Year	Supplier	Remark
Kori 1,2	Not inst.	-	To be inst.
Kori 3,4	1985	W-H	Under upgrade
YGN 1,2	1986	W-H	Upgraded
YGN 3,4	1995	ABB-CE	NIMS
YGN 5,6	To be inst	ABB-CE	NIMS
UCN 1,2	Not inst.	-	To be inst.
UCN 3,4	1998	ABB-CE	NIMS
UCN 5.6	To be inst	ABB-CE	NIMS
Wolsung	Not inst.	-	-

NIMS : NSSS Integrity Monitoring System

가. 센서 및 케이블

LPMS 센서로는 가속도계가 사용되고 있으며 센서의 주요 사양은 원자로계통 내에서 발생 가능한 이물질의 크기와 충격에너지를 감안하여 선정한다. 현재 Reg. Guide 1.133에서 요구하는 탐지대상 이물질의 질량과 에너지는 다음과 같다.

- 질량: 0.25 lb (113 gram) ~ 30 lb (13.6 kg)
- 에너지: 0.5 ft-lb 의 충격에너지

구체적인 가속도계의 사양에 대한 요건은 ASME OM-12에 정리되어 있으며 현재 국내에 설치되어 있는 LPMS 용 센서의 사양은 표 3과 같다.

센서와 전하변환기(또는 전치증폭기) 사이를 연결하는 센서 케이블은 기기의 절연재 내부에서는 반드시 고온용 저잡음 hardline 케이블이 사용되어야 한다. 절연재 밖으로 나오면 온도가 400°F 이내 일 경우 연결점을 설치하여 저잡음 softline 케이블

을 연결 사용할 수 있다.

Table 3. LPMS sensor specification

	Kori 3,4 YGN 1,2	YGN 3,4 UCN 3,4	ASME OM-12
Sensitivity	30 pC/g	1pC/ms ⁻²	10~50 pC/g
Working Range	0~100 g	0~2,000 g	0.01~100g
Frequency Response	1Hz~9kHz	1Hz~9kHz	5 Hz ~ 8 kHz
Resonance Frequency	> 30kHz	30 kHz	> 20kHz
Temp. Range	~625 °F	~400 °C	60~625 °F
Radiation Resistance	N/A	γ : 3~4 × 10 ⁸ (rad) N: ~ 10 ¹⁹ (N/cm ²)	γ : 10 ⁶ ~10 ¹⁰ (rad)

나. 센서 부착 위치 및 수량

LPMS 센서의 부착 위치는 원자로 냉각계통 내에서 금속파편과 같은 이물질이 쉽게 모일 수 있는 natural collection zone 이어야 하며 일반적으로 원자로 상부 및 하부 plenum, 증기발생기의 hot leg 수실에 주로 부착된다. LPMS 센서는 대상 기기의 shell에 직접 센서가 접촉할 수 있도록 설치하는 것이 가장 바람직하나 원자로 상부의 경우, 원자로 용기 뚜껑(reactor closure)의 인양고리(120° 간격으로 3개)에 많이 설치되고 있는데 상부 인양고리는 원자로의 압력경계가 아니지만 원자로 용기 뚜껑과 일체물이므로 충격을 탐지가 충분히 가능하기 때문이다. 또 원자로 하부는 in-core instrument(ICI) guide tube 세 곳에 각 한 개씩 설치하고 있으며 하부 in-core instrument(ICI) guide tube도 압력경계가 아니지만 원자로 하부와 일체물이므로 충격을 탐지가 가능하다. 이 때 원자로의 정기점검 및 정비 시에 타 계통의 정비 작업으로 인해 손상을 입지 않도록 해야 하고, 또 타

계통에 방해가 되지 않도록 그 위치를 선정해야 한다.

센서의 수량은 많을수록 신뢰성 있는 분석이 가능하지만 최소한 위치판별을 위한 수량은 있어야 한다. 표 4과 그림 4는 현재 국내 원전에 설치되어 있는 LPMS용 센서의 위치 및 개수를 정리한 것이다.

Table 4. Location and number of LPMS sensor

	Kori 3,4 YGN 1,2	YGN 3,4 UCN 3,4	YGN 5,6 UCN 5,6	R. G. 1.133
Rx	4	4	6	min. 4
S/G (# of S/G)	2 (3)	4 (2)	4 (2)	min. 2
RCP (# of RCP)	-	-	1 (4)	-
Total	10	12	18	

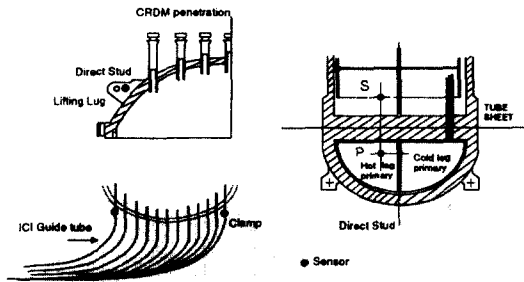


Fig. 4 LPMS sensor location(Kori 3,4/YGN 1,2)

다. 센서 부착 방안

센서를 감시대상 기기에 부착하는 방법은 다음과 같이 여러 가지 있다.

- Direct stud mounting
- Clamped mounting
- Mounting block 용접
- Magnet 사용 부착

Direct stud mounting은 센서 설치 대상 기기의

외벽을 연삭하고 직접 나사 구멍을 가공한 후 stud bolt로 센서를 설치하는 방법이다. 센서의 설치주파수 응답이 가장 좋으며 충격음 탐지에 가장 유리한 장점이 있다. 주로 원자로 및 S/G의 shell에 센서부착 시에 활용되며 압력경계인 기기의 경우 구멍가공에 따른 기기건전성 평가가 필요하다.

영광 3,4,5,6호기, 울진 3,4,5,6호기에서는 센서 부착위치의 shell을 weld buildup한 후 센서를 이 방법으로 설치하였으며, 고리 3,4호기, 영광 1,2호기, Catawba(미), McGuire(미)의 S/G 및 원자로 상부 인양고리에 사용된 방법이다.

Clamped mounting은 센서가 설치된 block을 strap으로 배관 또는 튜브 외측에 고정하는 방법으로 설치가 간편한 반면 센서의 설치주파수 응답이 낮아지므로 충격음 탐지에는 약간 불리한 특성이 있다. 압력경계에 설치시에도 기기건전성 평가가 필요 없으며 주로 작은 구경의 배관 또는 tube 등에 센서 부착 시에 활용할 수 있다. 고리 3,4호기, 영광 1,2호기, Catawba(미), McGuire(미)의 원자로 하부에 센서 부착시 사용된 방법이다.

Mounting block 용접은 센서가 설치된 block을 기기 표면 또는 배관에 용접으로 고정하는 방법이다. 센서의 설치응답이 direct stud mounting 보다는 떨어지겠지만 clamped mounting 보다는 유리할 것으로 판단된다. 용접에 따른 요건을 만족해야 하며 용접 열영향 등이 없을 때에는 기기 건전성 평가가 필요 없다. 주로 원자로 및 S/G의 shell, 직경이 큰 배관 등에 센서 부착 시에 활용한다. 현재 사용된 예는 없으나 direct stud mounting을 활용할 수 없는 경우에 좋은 대안이 될 수 있다.

Magnet를 사용하여 부착하는 방법은 설치가 매우 간편한 반면 센서의 설치주파수 응답이 가장 낮아 질량이 큰 경우 탐지가 가능하나 작은 이물질의 탐지는 매우 어렵다. 압력경계에 설치시에도 기기건전성 평가는 필요 없고 자성을 가진 모든 표면에 활용 가능하다. ASME 코드에서는 사용하지 않도록 권고하고 있으나 실제로 독일 PWR에는 많이 활용되고 있다.

라. 센서 설치시 기기의 건전성 평가

센서를 기기에 부착할 경우(특히 가동중 원전) 기기의 건전성 평가가 필요하다. 증기발생기에 direct stud mounting으로 센서를 부착할 경우, 증기발생기 쉘에 센서 설치용 구멍가공을 해야하며 이를 균열로 처리하여 파괴역학적 해석으로 건전성을 평가한다. 국내 가동중 원전의 증기발생기를 대상으로 파괴역학적 해석을 수행한 결과, 발전소 수명기간동안의 예측된 결합에 의한 응력확대계수는 원주방향 결합에 대하여 15.909 ksi $\sqrt{\text{in}}$, 축방향 결합에 대하여 22.263 ksi $\sqrt{\text{in}}$ 로써 ASME Sec. XI의 허용한계치인 63.24 ksi $\sqrt{\text{in}}$ 보다 작게 나타나 구조건전성이 유지됨을 알았다.

마. 분석시스템

LPMS 분석시스템은 신호 계측부인 센서에서 발생한 충격파를 적절한 신호조절기를 통하여 입력하여 충격신호의 진위여부를 판정하고, 필요시 정보를 결정하고 충격위치 및 충격질량을 추정할 수 있는 데이터를 생산하는 일련의 시스템이다. 그림 5는 일반적인 LPMS 분석설비 하드웨어 시스템의 블록선도로서 여러 가지 모듈로 구성된다.

현재 국내 원전의 LPMS 분석시스템은 도입 시기가 오래된 고리 3,4호기/영광 1,2호기에서 낙후된 LPMS 분석장비를 최근 한전 및 국내 업체에서 개발한 분석시스템으로 교체, 운용 중에 있다.

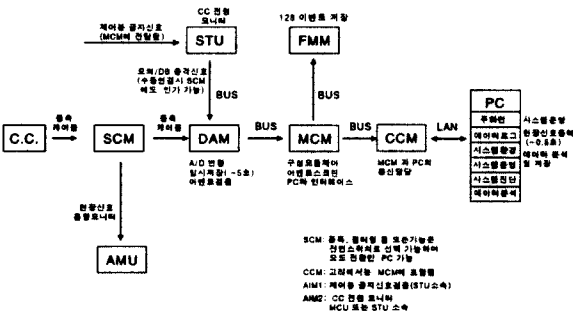


Fig. 5. Analysis system block diagram

4. 진단사례

LPMS 계통의 경보발생 사례 중 실제 금속이물질의 충격에 의한 것과 충격이 아닌 신호에 의한 경보 사례를 살펴본다.

가. 충격신호 사례 1

국내 원전의 한 증기발생기에의 1차측 수실의 센서과 2차측 센서에서 충격신호가 검출된 바 있다.

증기발생기에는 1차측 냉각재와 2차측 냉각재의 경계인 tube sheet 상하에 각각 한 개씩의 센서가 설치되어 있다(그림 4 참조). 센서는 2개지만 충격신호(그림 6참조)가 1차측 수실(tube sheet 하부, 채널: 759)에서 먼저 발생하였으므로 충격위치는 증기발생기의 1차측 수실 내부인 것으로 판단되었고, 정량적 모의충격신호(98년 2호기 계획예방정비 기간에 취득한 기준신호)와 비교결과, 충격위치는 증기발생기 1차측 센서로부터 약 1.5m~3m 떨어진 지점으로 파악되었다.

다양한 질량의 강구에 의해 미리 구해져 있던 질량지표와 검출 신호를 비교하여 충격질량을 추정한 결과 최소 50g ~ 최대 75g 사이의 금속체 2개 이상이 존재하는 것으로 추정되었으며, 실제 원자로 정지시 이를 확인한 바 있다.

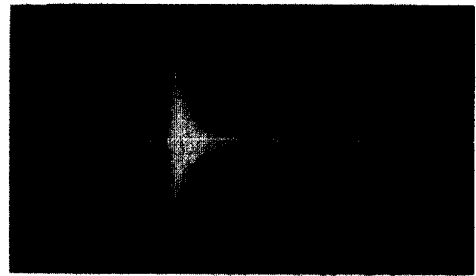


Fig. 6. Impact signal (ch. 759) in case 1

나. 충격신호 사례 2

국내 또 다른 원전의 원자로 및 증기발생기에 설치되어 있는 LPMS 채널에서 간헐적인 이상신호 및 경보가 발생하여 신호 채취 및 분석 결과, 쏘

채널의 신호가 그림 7에서 보는 바와 같이 약 1초 간 지속되는 이상신호로 충격신호와 다른 형태임을 확인하였다. 신호 전달 경로를 통해 이상신호의 근원지는 RCP 1A 로 추정되었고 주파수분석 결과 dominant 주파수는 3.7kHz로 이는 금속간의 마찰에 의한 음향으로 판단되었으며 추후 확인바 있다.

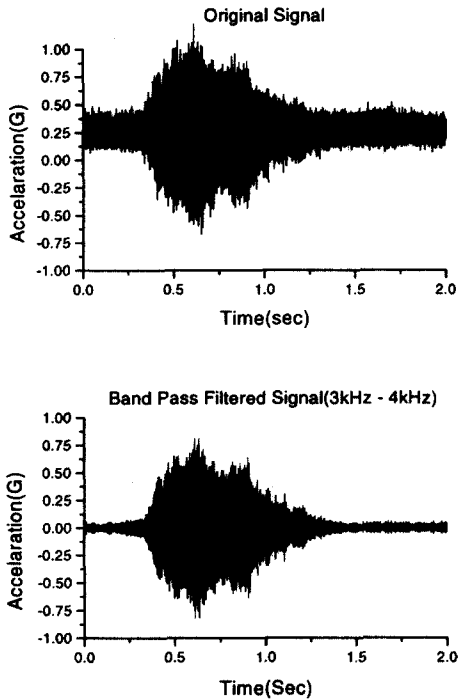


Fig. 7. Impact signal(ch. 107) in case 2

5. 결론

원전설비가 점차 노후화됨에 따라 원자로 1차 냉각재 계통 내에 금속이물질에 의한 충격가능성이 증가할 것으로 예상되고 실제로 최근 운전중인 발전소에서 금속파편이 발견된 바 있어 가동중 원전의 안전성 확보 차원에서 LPMS의 설치 운용은 반드시 필요한 사항이라 하겠다.

국내의 LPMS 관련 기술은 아직 초보 수준에 머물러 있다고 할 수 있고, LPMS의 실제 운용자인 국내 원자력발전소도 자체적으로 많은 노력을 경주하고 있으나 충격신호 발생시 운전자 혹은 관련 기술자에게 경보를 알려주는 수준이다.

충격신호 발생시 조속한 신호분석과 이물질에 의한 원전 주요 기기의 건전성 평가를 수행하여 원전의 계속 운전 여부를 판단하기 위해서는 LPMS 분석기술에 관련한 국내의 자체 기술력 확보와 전문가의 양성이 매우 시급하므로 관련 학계 및 전문가들의 많은 관심을 요청하는 바이다.

참고문헌

- [1] C. W. Mayo, "Loose Part Signal Theory," Process in Nuclear Energy, Vol 15, 1985 pp535-543
- [2] K. Fujita and M. Tanaka, "Shock and Vibration Analysis on the Impact of Metal Part for PWR Diagnosis," Process in Nuclear Energy, Vol 9, 1982, pp534-540
- [3] G. Casanie et al, "Recent Experience in Loose Part Monitoring of LWR," OECD/NEA 5th Int. Specialist Meeting on Reactor Noise (SMORN-V), Munich, Germany, 1987.10.
- [4] B. Olma, "Source Location and Mass Estimation," Process in Nuclear Energy, Vol 15, 1985 pp583-594
- [5] T. Tsunoda, et al, "Studies on Loose Parts Evaluation Technique," Process in Nuclear Energy, Vol 15, 1985 pp569-576
- [6] C. W. Mayo, Loose-Part Monitoring System Improvements, EPRI NP-5743, 1988.
- [7] W. K. Shin, et al., "A Study on the Signal Diagnosis Techniques for Loose Part

Monitoring System," KAERI/NSC-351/89

Process in Nuclear Energy, Vol 34, No, 3, 1999, pp231-261

- [8] D. I. Kim, et al., "Reconstruction Process Algorithm of the Corrupted Metal Impact Signal Based on the Adaptive Filtering in NPP," Proc. of 1996 ANS Int. Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technologies, May 1996.
- [9] G. Zigler and C. W. Mayo, "Loose Part Benchmark," SMORN-VII, Avignon, France, 19-23 June, 1995.
- [10] 김 택환 외, "삼각법을 이용한 증기발생기의 금속파편 위치판별 기법개발," 한국원자력학회 99년 추계학술대회 논문집
- [11] 김 태완 외, "발전소 시운전데이터를 이용한 금속파편 질량추적 알고리즘 개발," 한국원자력학회 99년 추계학술대회 논문집
- [12] 김 태룡 외, 원전 금속파편 감시설비의 신규 설치방안 수립, KEPRI 보고서, 2000.3
- [13] U.S. Regulatory Guide 1.133, Loose Part Detection Program for the Primary System of Light Water Reactors, May, 1981.
- [14] R. C. Kryter & F. Shahrokhi, Summary of Studies on Method for Detecting, Locating and Characterizing Metallic Loose Part in Nuclear Reactor Coolant Systems, NUREG/CR-2344, ORNL, 1981.
- [15] C. W. Mayo, "Loose Part Mass and Energy Estimation," Process in Nuclear Energy, Vol 34, No, 3, 1999 pp263-282
- [16] L. Shi, et al., "Loose Part Damage,"
- [17] ASME OM S/G-1997 Part 12, Loose Part Monitoring for Light Water Reactor Power Plants, 1997.
- [18] B. Olma and D. Wach, "Acoustic, Noise and Vibration Monitoring-Useful Methods in Condition Monitoring and Ontime Degradation Diagnosis," IAEA TCM, Wien Austria, July 8-10, 1991
- [19] DIN 25475, Acoustic Monitoring Systems for Loose Particle Detection; Characteristics, Design and Operation Procedures, Feb., 1983
- [20] J. C. Benas, et. al., "Experience Feedback on Loose Part Monitoring in France's 54 PWRs- Particular Case in the Secondary of a SG and in the Vessel," SMORN-VII, Avignon, France, 19-23 June, 1995.