

원전 금속파편감시설비 개발

이 용 호
한국전력공사

전남 영광군 홍농읍 계마리 517 영광원자력발전소

요 약

원자력발전소 금속파편감시계통(LPMS : Loose Parts Monitoring System)은 냉각계통 내부에 존재하는 금속파편물을 조기에 탐지하여 관련 구조물 파손을 방지하므로써 불필요한 검사 및 보수로 인한 작업자 방사선 피폭을 최소화 하며 원전 안전성 및 경제성을 제고시킨다.

현재 국내 원전에서 가동중인 금속파편감시설비중 영광 1,2호기와 고리 3,4호기에서 운영중인 Westinghouse사의 금속파편감시설비(상품명 : Digital Metal Impact Monitoring System)는 70년대에 개발되어 설치된 설비로 기능의 낙후와 장기간 운영에 따른 노후화로 인해 발생될 수 있는 문제점을 방지하고자 하드웨어 및 금속충격파 검출 및 판별 알고리즘을 개발하여 영광 1,2호기에서 기존 설비와 병렬운전중이다.

A. 서 론

금속파편감시설비는 원자로와 증기발생기 압력경계 외부표면에 충격파에 민감한 Sensor를 부착하여 내부 구조물에 금속파편이 부딪칠 때 발생하는 충격파를 감시하는 On-Line 계측 시스템이다. 각 Sensor는 금속이물질 정체가 용이한 지역(Natural collection region)의 압력경계 외벽에 쌍(Pair)을 이루어 설치되어 있으며 1g(가속도 크기)의 충격량에 대하여 평균 30 pico-culomb의 감도를 갖고 있다. Sensor로 부터의 신호는 Preamplifier와 Signal Conditioner를 거치면서 증폭, 정규화 및 잡음제거등이 수행된 후 검출 알고리즘에 의해 이벤트 신호가 검출된다. 검출 알고리즘에 의해 검출된 신호는 금속충격파 판별 알고리즘에 의해 6단계의 판별 과정을 거쳐 참 경보(True Alarm)로 판명되면 주제어실에 경보를 발생시키고 데이터는 분석 컴퓨터로 전송하여 금속충격물의 위치, 질량 및 에너지를 계산한다.

B. 본 론

1. 금속파편감시설비 개발(하드웨어)

신호의 독립성을 유지시키기 위해 각 채널을 물리적으로 격리시켰으며 내진동 및 연속 운전에 적합한 시스템 규격과 안정적이며 고속의 신호처리가 가능하도록 설비를 개발하였다.

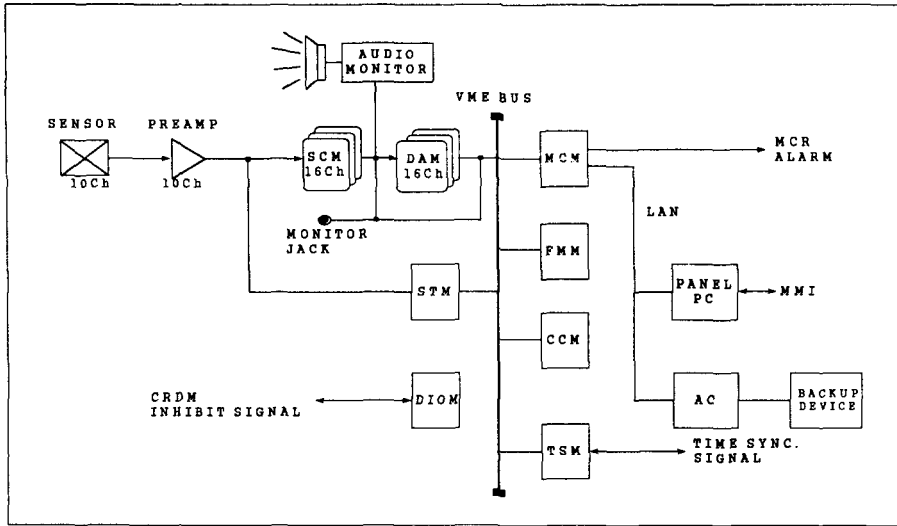


그림 1. 금속파편감시설비 하드웨어 블록도

그림 1은 개발된 금속파편감시설비 하드웨어 블록도이다. SCM(SIGNAL CONDITIONING Module)는 저주파 직류성분, 상용전원 성분 및 기저잡음의 대부분을 차지하는 기기진동 잡음신호를 제거하기 위한 1kHz High Pass Filter와 금속충격파의 주파수 특성, 가속계 고유 주파수 및 마운팅 주파수를 고려한 3단계(15, 20, 25kHz)의 Low Pass Filter를 원하는 신호특성에 맞게 임의 설정할 수 있도록 설계하였다. DAM(Data Acquisition Module)은 SCM로 부터 신호를 입력받아 A/D(Sampling Time : 100Khz, Resolution : 16bit) 변환한 후 충격신호 검출 알고리즘을 수행하여 결과 데이터를 MCM에 전송 한다. MCM(Main Control Module)은 충격신호 판단 알고리즘 수행하여 True 충격신호가 발생하면 주제어실에 경보를 발생시키고 분석컴퓨터로 데이터를 전송한다. 또한 각 구성 모듈의 운용 파라미터를 관리 제어한다. FMM(Flash Memory Module)은 메모리를 블록 단위로 관리한다. 이벤트 신호가 발생하면 전 채널의 데이터를 같은 블록영역에 저장하며, 500개의 데이터 블록을 저장할 수 있는 용량을 가지고 있다. CCM(Communication Control Module)은 MCM과 분석컴퓨터와의 데이터 송수신을 담당하는 모듈로서 TCP/IP를 위한 소프트웨어가 내장되어 있다. DIOM(Digital Input Output Module) 제어봉 제어계통에서 금지신호(Inhibit Signal)를 입력 받아 MCM에 전달하여 제어봉 이동중 발생하는 금속충격신호의 취득을 금지시킨다. STM(System Test Module)은 계획예방정비 기간중에 취득한 모의 충격신호를 이용하여 시스템의 건전성 및 충격신호 검출 기능을 확인한다. AMU(Audio Monitoring Unit)는 SCM의 출력신호와 DAM의 실시간 현장신호를 입력받아 해당 채널의 현장 신호음을 청취하도록 한다. Panel PC는 MMI(Man Machine Interface)용으로 사용자가 본 설비를 편리하게 운용할 수 있도록 한다. ACU(Analysis Computer Unit)는 MCM에서 전송되는 다양한 종류의 신호데이터(충격신호 데이터, 모의충격시험 데이터, 배경잡음신호 데이터)를 저장, 가공, 분석하여 사용자가 원하는 형태의 최종 정보를 제공한다.

2. 검출 및 진단 알고리즘

가. 검출 알고리즘

DAM은 SCM의 출력신호를 A/D 변환하여 데이터 전용 메모리에 저장한 후 금속 충격신호검출 알고리즘을 수행한다.

한 채널에서 충격신호가 검출되면 전 채널이 동기되어 Pre-Trigger 영역을 포함한 데이터를 160ms 동안 저장하여 MCM으로 전송한다.

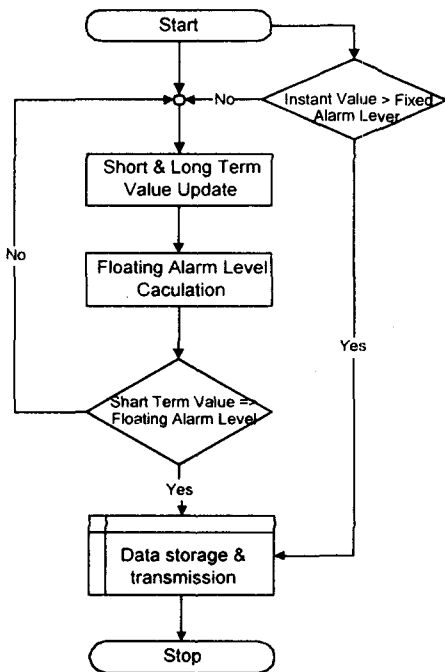


그림 2. 검출 알고리즘

그림 2.의 검출 알고리즘 흐름도에서 Instant Value는 현장 신호의 순시값이며 Fixed Alarm Level과 비교하여 크거나 같으면 'Fixed' 이벤트를 발생시킨다. Short Term Value는 10 μ s 간격으로 입력되는 데이터의 최종 64개 Absolute Instantaneous Signal Value의 평균값이며 Long Term Value는 10 μ s에 Long Term Constant를 곱한 시간동안 입력되는 Absolute Instantaneous Signal Value의 평균값이다. Floating Alarm Level은 Long Term Value에 Floating Offset를 더한 값으로 Floating Offset는 사용자가 결정하는 설정값이다. 만약 Short Term Value가 Floating Alarm Level 보다 크거나 같으면 'Floating' 이벤트로 처리된다. 'Fixed' 이벤트와 'Floating' 이벤트 모두 MCM에 전송되어 판별 알고리즘에 의해 검증된 후 FMM에 관련 정보와 함께 저장된다.

그림 3.은 Instant Value가 Fixed Alarm Level를 초과하여 발생한 'Fixed' 이벤트이며 그림 4.는 Short Term Value가 Floating Alarm Level 초과시 발생하는 'Floating' 이벤트로 제어봉 구동 신호이다.

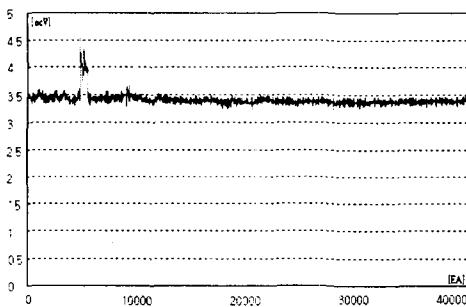


그림 3. 'Fixed' 이벤트

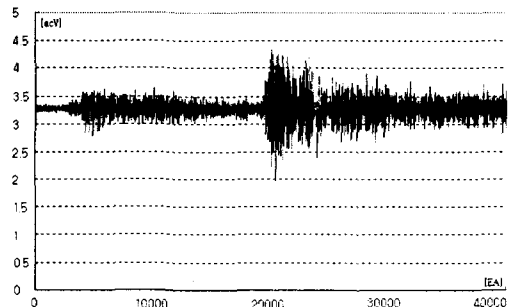


그림 4. 'Floating' 이벤트

나. 판별 알고리즘

DAM에서 전송된 이벤트 데이터는 MCM의 판별 알고리즘에 의해 거짓 경보(False alarm)와 참 경보(True Alarm)로 구분된다. 판별 알고리즘은 총 6단계의 판별 과정을 수행한다.

단계 1 : RMS 비율 비교 테스트(RMS Ratio Comparison Test)

판별 : $(RMS\ Ratio) \geq (Alarm\ RMS, \text{ 또는 } Significant\ RMS)$

① $(RMS\ Ratio) = \frac{(Pulse\ RMS)}{(PreTrigger\ RMS)}$

② Pulse RMS : 신호의 최고치에 중심을 둔, RMS short term 시간 범위의 RMS 값

③ Pretrigger RMS : 신호 검출전 신호의 RMS 값

④ 평가 : RMS Ratio가 설정된 경보 RMS Ratio 또는 Significant RMS Ratio보다 클 경우 True Alarm으로 평가.

단계 2 : Ringing Frequency Test

판별 : $Max.\ Freq. > Ringing\ Freq. > Min.\ Freq.$

① Ringing freq. : 금속 파편 충돌 특성에 따라 실제 파편이 충돌했을 경우 그 주파수 성분은 1kHz에서 20kHz 대역 내에 들어야 한다.

단계 3 : Impact Duration Test

판별 1 : Peak 후 min. Impact Duration 이후를 중심으로 1msec 내의 RMS 값이 Impact pulse RMS 값의 90%보다 커야 함.
판별 2 : Peak 후 Max. Impact Duration만큼 지난 부분에 중심을 둔 1msec 시간 범위의 RMS 값이 Impact pulse RMS 값의 50%보다 작아야 함.

① Impact Duration Test : 금속충격신호는 급격히 감쇠하거나 장시간 신호가 위치되지 않는 점을 이용한다.

단계 4 : Inter-Channel Delay Test

판별 : $Max.\ Delay\ Time > Chnl.\ Delay\ Time > Min.\ Delay\ Time$

① Inter-Channel Delay Test : 채널간 신호 지연은 채널들의 기구적 위치 차이 때문에 발생한다. 따라서 휴효한 신호는 수 ms 이내의 지연시간을 갖는다.

단계 5 : Amplitude Ratio Test

판별 : $(Ampli.\ Ratio) > (Alarm\ Ratio \text{ 또는 } Significant\ Ratio)$

$$\textcircled{1} (\text{Amplitude Ratio}) = \frac{(\text{Impact Portion peak})}{(\text{PreTrigger Peak})}$$

② Impact Portion Peak : 충격 파형의 Peak 값.

③ PreTrigger Peak : Event 발생 전 신호의 Peak 값

단계 6 : Event Period Test

① Event Period Test : 단계 1에서 5의 Test 결과가 True Alarm으로 판단되는 이벤트가 일정기간 동안 정해진 회수 이상으로 발생되어야 한다.

단계 1에서 6중 단계 1과 6은 필수적으로 수행되어야 하며 나머지 단계는 사용자에게 의해 선택이 가능하다.

다. 검증

발전소 계획예방정비 기간에 개발 설비와 기존설비(DMIMS)를 병렬로 연결한 후 원자로와 증기발생기에 강구를 이용한 충격시험을 통하여 본 연구의 타당성을 검증하였다.

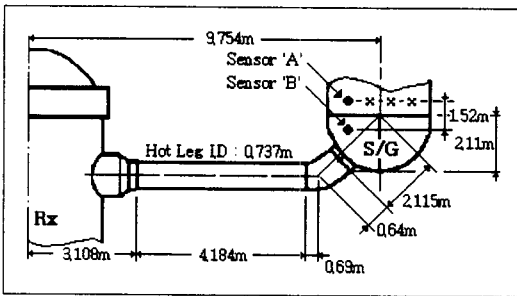


그림 5. 원자로와 증기발생기 개략도

그림 5.은 원자로와 증기발생기의 개략도이다. ※는 강구를 이용하여 충격시험을 수행한 강구 충격위치이며 강구 충격위치와 센서의 이격거리는 왼쪽부터 30cm, 60cm, 90cm 이다. 이때 사용한 강구의 질량은 70g, 176g, 361g 및 537g 이다. 그림 6., 7., 8.은 70g의 동일 질량의 강구를 이용하여 다른 위치에서 충격실험을 한 그래프이며, 그림 9., 10., 11.은

60cm의 동일 위치에서 각기 다른 질량의 강구를 이용하여 충격 실험을 한 그래프로 모두 검출 및 판별 알고리즘에 의해 금속충격신호로 인식된 신호이다.

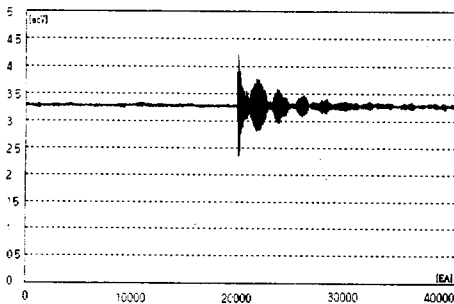


그림 6. 금속충격신호(이격거리 : 30cm)

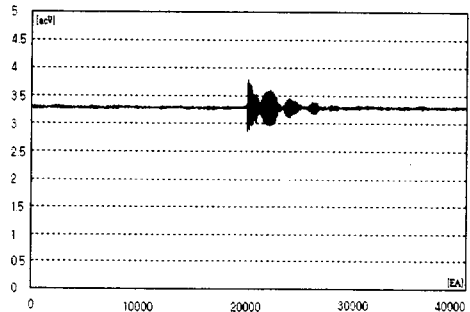


그림 7. 금속충격신호(이격거리 : 60cm)

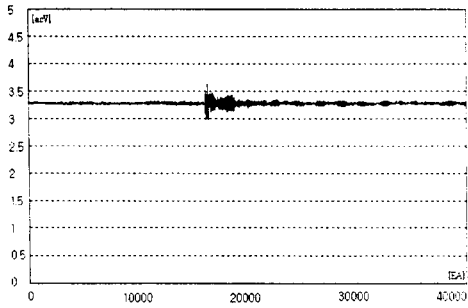


그림 8. 금속충격신호(이격거리 : 90cm)

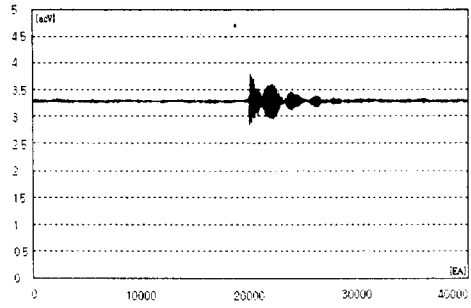


그림 9. 금속충격신호(강구질량 : 70g)

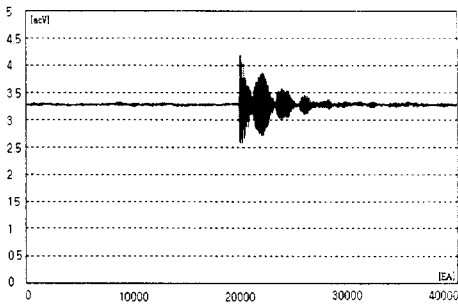


그림 10. 금속충격신호(강구질량 : 176g)

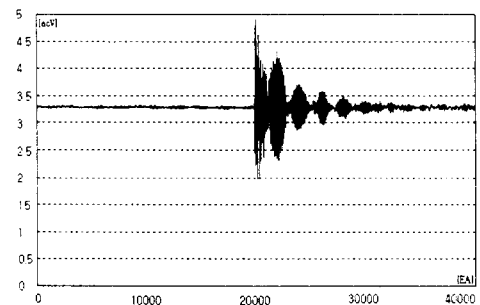


그림 11. 금속충격신호(강구질량 : 361g)

C. 결 론

본 연구에서 제시한 금속파편감시설비의 하드웨어 및 검출, 판단 알고리즘의 타당성을 원자력 발전소 계획예방정비 기간중에 각기 다른 질량의 강구로 충격위치를 이동하면서 시험을 수행하여 검증하였으며, 또한 기존 설비와 장기간의 병렬운전을 통하여 설비의 안전성을 확보할 수 있었다. 따라서, 동 설비를 타 원전에서도 설비 및 알고리즘의 변경 없이도 사용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. B.T.Lubin, etc., Analysis of internals vibration monitoring and loose part monitoring system data related to the St.Lucie 1thermal shield failure, SMORN V
2. Mayo, C.W. et al., Loose Part Monitoring System Improvements. Final Report NP-5743, The Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA 94303
3. B.J. Olma, Source location and mass estimation in loose parts monitoring of LWR's Progress in Nuclear Energy, Pergamon Press, Vol.15, 1985, p. 583 ff