

## 중성자 신호이용 원자로 내부 구조물 감시시스템 설계

• 박 종범\*, 박 진호\*\*, 황 총완\*\*\*, 김 인국\*\*\*  
 \*한국전력공사 전력연구원 \*\*한국원자력연구소 \*\*\*(주)동암실업

### Design of Diagnostic System for Reactor Internal Structures Using Neutron Noise

• Jong Beom Park\*, Jin Ho Park\*\*, Choong Hwan Hwang\*\*\*, In Kook Kim\*\*\*  
 \*KEPRI \*\*KEARI \*\*\*Dong Am Corporation

**Abstract** - Reactor Noise is defined as the fluctuations of measured instrumentation signals during full-power operation of reactor which have informations on reactor system dynamics such as neutron kinetics, thermal-hydraulics, and structural dynamics. Reactor noise analyses of ex-core neutron detector internals such as fuel assembly and Core Support Barrel in Nuclear Power Plant. A real time mode separation technique have been developed and applied for the analyses. The analyses data base have been constructed for the continuous monitoring and diagnose of the reactor internals. Detailed design of diagnostic system reactor internal structures using neutron noise(RIDS).

## 1. 서 론

원자로 잡음이란 원자로의 정상상태 출력 운전중 원자로 계통의 제어, 보호 감시 시스템으로부터 출력되는 신호의 시간평균치에 수반되는 변동성분을 말한다. 이러한 변동 성분에는 일반적으로 원자로 계통의 해적, 열수력적, 그리고 구조동력학적인 정보가 포함되어 있다. 따라서 원자로 잡음신호를 통계적으로 처리하여, 시간 및 주파수 영역에서 적절한 분석을 수행함으로써 원자로 계통의 이상상태를 감지 및 진단할 수가 있다. 이러한 제반 분석활동을 원자로 잡음해석이라고 부른다. 이미 이런 기술은 미국의 경우에는 웨스팅하우스사 및 CE사 등에 의하여 원자로 잡음신호를 이용한 자동화 감시 시스템이 개발되어 대부분의 발전소에서 사용되고 있으며, 중성자 잡음신호 해석과 관련된 기술표준을 개발해 놓고 있고 독일, 프랑스, 캐나다 등에서도 원자로 내부구조물 진동 감시, Loose Part 감시 음향누설감시시스템을 개발하여 발전소에서 꾸준히 운용 및 개선되어지고 있다. 국내 원전에는 격리기 및 Signal Conditioner가 설치되어 있는 발전소(울진1호기)에는 연구과제로 원자력연구소에서 설치하여 모니터링하고 있으나 진단과 관련된 알고리즘이 탑재되지 않았으며 신호처리 분석 기법의 개선, 사용의 용이성 등 하드웨어 및 소프트웨어의 개선이 필요하다. 원자력발전소는 예방정비를 강화하는 추세에 있으며, 계측장비의 국산화와 더불어 개발된 알고리즘 및 신호분석 기술의 적용, 개선을 통하여 중성자 신호이용 원자로 내부 구조물 감시시스템이 개발되어야 할 것이며, 국내의 관련기술 수준은 신호취득 및 신호처리 기술은 확보되어 있고 결합진단 기초기술도 확보되어 있다. 중성자 잡음신호를 이용한 원자로 내부구조물 진단기술은 아직 국내에서는 생소한 분야이다. 그러나 원자력연구소의 꾸준한 관심과 국제공동 연구 등으로 인하여 신호처리 및 분석기술이 양호한 수준으로 올라섰다. 그러나 선진국 수준까지 다가서기 위해서는 결합증상에 대한 연구, 진단기술의 고도화 및 현장데이터의 지속적인 수집이 필요하다. 본 논문에서는 현재 개발되어지고 있는 중성자

신호이용 원자로 내부 구조물 감시시스템의 설계 및 기능구현에 대해서만 논의하려고 한다.

## 2. RIDS 시스템 개요

중성자 신호이용 원자로 내부구조물 감시 시스템(이하 RIDS: Reactor Internals Diagnosis System 이라고 칭함)은 노외 중성자와의 잡음신호를 이용하여 원자로의 내부 진동 및 건전성을 판단하기 위한 장치이다. 이를 위하여 여러 구성품과 기능을 필요로 하는데 주요 기능 및 구성품에 대하여 기술되어 하였다.

### 2.1 RIDS 시스템 구성

그림1은 RIDS 시스템 구성도를 나타내고 있다.

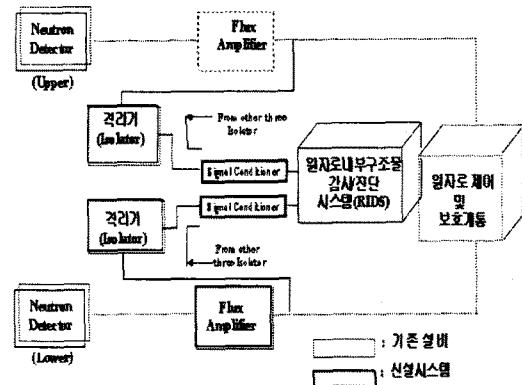


그림 1. RIDS 시스템 구성도

### 2.2 RIDS 구성 요소

#### 가. 신호 격리기

노외 중성자 신호는 중앙 제어실 및 컴퓨터실로 전송된다. 이러한 신호를 본 개발 장치의 입력신호로 연결하기 위해서는 본 장치 연결로 인하여 기존 발전소 시스템에 전혀 영향을 미치지 않도록 하여야 한다.

#### 나. 신호 조정 보드

노외 중성자 측정기에서 측정한 전기적인 미약한 신호를 신호 분석이 가능하도록 증폭하고 측정시 유입되는 잡음 및 분석 영역 외의 신호를 제거하기 위하여 필터링을 수행한다.

#### 다. 디지털 신호 처리 보드

신호 조정 보드로부터 출력되는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하고 변환된 디지털 신호를 이용하여 신호 처리를 수행한다. 이 보드에서는 변환된 디지털 신호를 기반으로 실시간 주파수 분석을 수행하고 이러한 신호 데이터 및 주파수 데이터를 운전자에게 나타내기 위하여 아래에 기술된 주프로세서로 전송된다. 또한 주프로세서에서 명령한 제어 신호를 처리하여 본 보드 및 신호 조정 보드로 전송한다.

## 라. 주프로세서

주프로세서는 크게 세 가지의 기능을 가지고 있다. 첫째, 본 장치의 신호 증폭 및 필터 보드와 신호 변환 및 처리 보드가 설정된 기능을 수행하기 위하여 각 보드를 초기화하고 또한 각 기능들을 보드에 부여한다. 둘째, 신호 변환 및 처리 보드에서 계산된 출력물을 전송 받아서 운전자에게 보여주며 또한 이 출력물을 이용하여 진단에 필요한 Knowledge Base가 있으면 이를 이용하여 진단 결과를 보여준다. 세째, 이렇게 계산한 결과 및 신호 데이터를 추후 분석이나 자료 전송을 위하여 저장하여 보관하고 측정 및 분석시 운전 상황 및 기타 정보를 저장한다. 아울러 주프로세서는 작업자가 설정치들을 변경하고자 할 경우 변경된 설정 값을 각 보드에 전송하여 설정 값이 변경되도록 한다. 주프로세서에서 작동하는 프로그램은 상기와 같은 결과들을 작업자들이 빠르게 인식하기 위하여 그래픽 화면으로 표시되도록 하며 또한 작업자들이 본 장치에 쉽게 명령을 전달하기 위하여 마우스 구동 방식의 기능을 갖도록 한다.

## 3. RIDS 기능 구현

### 3.1 신호 격리기

신호 격리기는 발전소 기존 시스템에 공급하는 신호와 개별 장치와의 입력 신호가 서로 간섭 없이 신호 취득을 할 수 있도록 하는 기능을 수행하는 하드웨어이다. 신호의 격리를 외부 환경의 변화에서도 간섭받지 않고 기능을 수행하기 위해서는 외부 간섭을 받지 않는 내부 부품 및 외장으로 구성되어있다. 그림2는 신호격리기의 기본적인 기능 흐름도를 나타내고 있다.

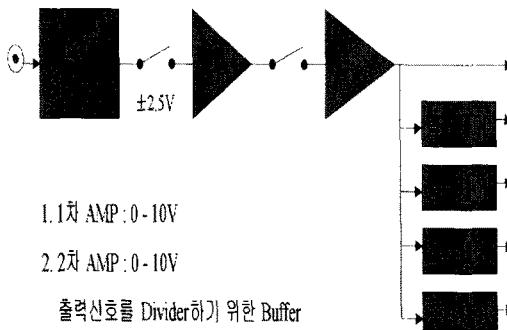


그림 2. 신호 격리기 흐름도

### 3.2 신호 조정 보드

신호 조정 보드의 기본적인 기능 흐름도가 그림3에 나타나 있다. 신호 조정 보드의 기능은 크게 신호 증폭 모듈, 그리고 신호 필터 모듈로 2개의 부분으로 나뉜다. 신호 증폭 모듈은 신호 분석에 적합한 범위까지 증폭하고 기본적인 신호 격리 기능을 내장하고 있다. 신호 필터 모듈은 AC 신호에 대하여 저주파 대역 통과 필터(LPFilter)를 내장한다. 현재 설계된 신호 증폭 모듈은 0dB에서부터 최대 100dB까지 증폭할 수 있고, 원하는 주파수 범위의 신호만 취득하기 위하여 원하는 주파수 외의 신호 및 잡음 신호를 차단하기 위한 장치이다. 신호 조정 보드에는 LPF가 있어서 필터 범위를 선택함으로써 원하는 범위의 신호를 취득할 수 있다.

그림3에서 보는 바와 같이 센서에서 측정한 신호는 Surge Protection을 거쳐서 증폭기에 들어가는데 Surge Protection은 본 증성자 신호이용 원자로 내부 구조물 감시 장치를 보호하기 위한 회로로 돌발 상황에 의해 신호 조정 보드 및 시스템이 파괴되는 것을 방지하기 위함이다.

Matching은 신호 취득 모듈을 의미한다. Matching에서는 DC의 전원 성분과 미소의 AC 성분을 분리한다. 취득된 미소 신호는 증폭기를 거쳐서 증폭되고, 증폭된 신호는 필터 기능이 ON된 경우 필터링을 거쳐서 원하는 주파수 범위의 신호만 살아남게 한다. 신호 증폭과 신호 필터 모듈은 그림3의 하단부 제어 논리 회로에 의해 증폭 값이나 필터 기능이 결정되며 제어 논리 회로는 작업자가 시스템 설정시 적절하게 조절한다.

증폭 모듈을 거쳐서 증폭된 신호는 A/D Chip Interface를 거쳐서 디지털 신호 처리 보드로 전송된다.

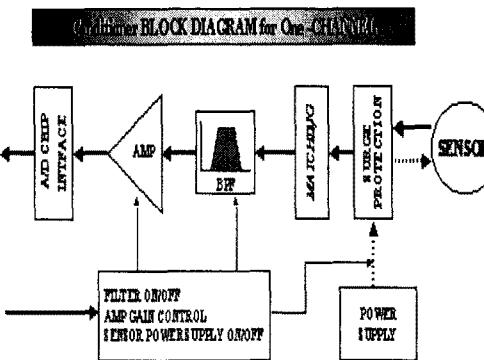


그림 3. 신호 조정 보드 흐름도

### 3.3 디지털 신호 처리 보드

디지털 신호 처리 보드에서의 기능 흐름도가 그림4에 나타나 있다. 신호 조정 보드로부터 증폭되고 필터링 된 아날로그 신호는 그림2 우측 하단에 있는 AD 변환기로 들어간다. AD 변환기는 신호를 디지털 값으로 변환하여 EPLD(Enhanced Programmable Logic Device)로부터의 신호가 있기 전까지는 이 신호가 버퍼로 들어가지는 않는다. EPLD에서 설정한 간격이 되면 EPLD는 AD 변환기로 신호를 주고 AD 변환기는 이 신호를 받으면 버퍼로 데이터를 저장한다. 또한 EPLD는 이 신호를 보냄과 동시에 DSP로 인터럽트를 발생하여 신호가 AD 변환기를 통하여 들어왔음을 알린다. DSP는 이러한 인터럽트를 받으면 버퍼로부터의 신호를 메모리로 전송하여 저장한다. 이렇게 들어오는 신호가 주파수 연산에 필요한 데이터 양만큼 들어오면 DSP는 주파수 연산을 수행한다. 주파수 연산 수행도중 인터럽트가 들어오면 버퍼의 신호를 메모리의 임의의 번지에 저장하고 주파수 연산을 계속 수행한다. 주파수 연산이 끝나면 주파수 연산에 사용한 신호 데이터와 주파수 연산 결과를 PCI Interface를 통하여 주프로세서로 전송한다.

외부 메모리에는 프로그램 영역이 있는데 본 진단장치를 시작하고자 하여 전원을 넣고 전단 프로그램을 수행하면 DSP가 수행하여야 할 프로그램이 PCI Interface를 통하여 이 외부 메모리의 0번지부터 다운로드 된다. 그리고 나서 DSP를 리셋하면 DSP는 0번지부터 명령을 읽어서 작업을 수행한다.

신호 과정 및 주파수 연산 데이터의 경우 디지털 신호 처리 한 보드 당 많게는 4채널의 데이터를 전달하여야 하기 때문에 전송하여야 할 데이터가 많다. 따라서 실시간 처리를 위해서는 이 데이터 전송속도가 매우 빨라야 한다. 이러한 고속 데이터 전송을 위하여 디지털 신호 처리 보드에서 주프로세서로 데이터를 전송할 때는 DMA(Direct Memory Access)기법을 이용하여 전송체계를 구축하였다.

그림4의 EPLD내부에서 우측 하단부를 보면 EPLD는 AD 변환기의 동기화를 위한 clock, start, 및 stop 신호를 생성하고 있다. 본 증성자 신호이용 원자로 내부

구조물 감시/진단 장치에는 2개의 디지털 신호 처리 보드가 설치된다. 각각의 디지털 신호 처리 보드가 신호 파형을 저장하고 FFT를 수행하는 데에는 모든 채널의 신호들이 시간상에서 동기화가 되어야 하는 것은 정밀 분석을 위해서 반드시 필요한 일이다. 이러한 기능을 수행하기 위하여 중요한 역할을 하는 것이 EPLD인데 EPLD는 동기화를 구현하기 위한 제어 신호를 생성하도록 설계되어 있다.

본 장치의 하드웨어 구동 프로그램은 시스템이 구동시 2개의 디지털 신호 처리 보드 중 임의의 하나를 마스터 보드로 지정하는 기능을 내장하고 있다. 주프로세서에서 원자로 내부 진단을 시작하라고 명령을 내리면 그 명령 신호는 마스터 보드로 직접 전달된다. 마스터 디지털 신호 처리 보드는 그 신호를 받자마자 A/D 변환기에 구동 신호를 보내고 이 신호에 따라 A/D는 샘플링 및 A/D 변환을 수행하여 Memory로 신호 파형을 전달한다. 디지털 신호 처리보드의 구동 및 정지 신호는 항상 마스터 디지털 신호 처리 보드내의 마스터 EPLD에서 나간다. 디지털 신호 처리 보드는 PCI 방식의 데이터 전송 처리를 위한 PCI Interface 부품이 있고, TMS320C31 DSP 부품, 및 외부 Memory가 있다. 외부 Memory는 DSP가 주파수 변환을 수행하는 데에 사용되는 메모리로 용량은 2MByte이다.

그림4의 우측 상단에 점선의 블록으로 쌓인 부분은 EPLD를 나타내고 있는 것으로 점선 블럭안의 여러 블록들은 EPLD 내부에 있는 회로가 여러 기능에 따라서 나누어져 있는 것을 나타내고 있다. EPLD는 AD 변환기의 Start/Stop 신호를 발생하고 신호가 취득되면 DSP로 인터럽트를 발생시킨다. EPLD내에는 제어 및 상태 레지스터가 있어서 DSP는 제어 레지스터에 명령을 써넣고 상태 레지스터를 통하여 논리 진행 상황을 파악한다. 또한 다른 하나의 디지털 신호처리 보드와의 동기화를 위하여 대표로 선정된 EPLD는 자신의 클럭을 다른 보드로 내보낸다.

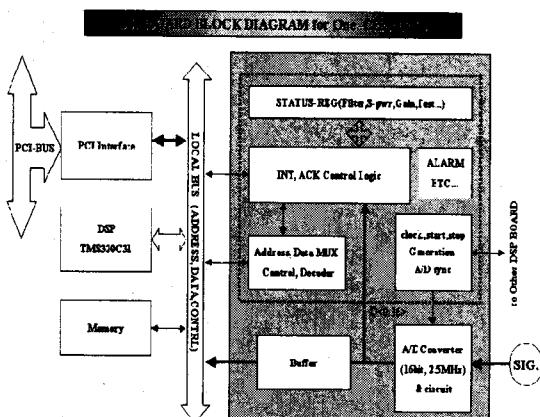


그림 4. 디지털 신호 처리 보드 흐름도

### 3.3 주프로세서

디지털 신호 처리보드에 있는 디지털 신호 처리기 (DSP)는 4KDWord의 내부 메모리를 가지고 있다. 그러나 DSP가 내부 메모리를 가지고 연산을 수행하면 매우 빠른 속도로 수행할 수 있으나, 이 정도의 메모리 용량으로는 본 과제 관련 개발될 장치가 연산을 수행하기에는 적합하지 못하다. 따라서 본 디지털 신호처리 보드에는 외부 메모리를 부착하여 신호 저장 및 연산 데이터 처리에 문제가 없도록 메모리 용량을 크게 하였고 고속의 메모리 소자를 사용하여 연산 속도도 늦어지지 않도록 하였다. 디지털 신호 처리 보드에 있는 외부 메모리는 크게 두 영역으로 나뉜다. 하나는 프로그램 영역인데

디지털 신호 처리기(DSP)가 수행 할 프로그램을 내장하고 있고 또한 여러 제어 신호 및 상태 신호를 저장하는 영역이다. 다른 영역은 데이터 영역으로써 AD 변환기를 거쳐 들어오는 디지털 신호 데이터를 저장하며 이러한 데이터를 기반으로 프로그램 영역에서는 주파수 연산을 수행하고 이 연산 결과를 또한 데이터 영역에 저장한다. 본 장치의 디지털 신호 처리 보드에 장착한 메모리의 용량은 총 2MByte이다. 이 메모리는 4채널에 관련된 데이터 및 연산 결과를 저장한다.

디지털 신호 처리 보드는 산업용 컴퓨터에서 PCI slot에 꽂히며 주프로세서와는 PCI 방식으로 데이터를 주고 받는다. 데이터 전송 방식의 일종인 PCI 방식은 고속의 데이터를 전송하기 위한 local bus로 기존의 local bus인 ISA 방식은 전송속도가 8MByte/s이고 EISA 방식은 전송속도가 33MByte/s인데 비하여 PCI 방식은 전송속도가 133MByte/s이다. 따라서 PCI 방식은 전송속도가 기존의 local bus의 전송 속도보다 빠르고 어느 특정한 시스템이 아닌 범용의 시스템에서 데이터 전송에도 적용 가능하기 때문에 점차 산업계에 표준으로 자리잡아가고 있고, 디지털 신호 처리 보드에서는 PCI 방식의 데이터 전송이 가능하도록 Programmable Logic Device Chip-set을 사용하여 구성하였다. 이 Chip-set은 주프로세서와의 데이터 전송을 담당하며 진단 장치가 작동을 시작할 때 디지털 처리 보드를 초기화 하며 이 보드의 기능 및 정보를 주프로세서에 알려주는 역할을 한다.

## 5. 결 론

원자로 중성자 신호를 이용하여 원자로 내부구조물을 감시시스템을 개발하여 원전의 가동년수 증가에 따른 원자로 내부구조물의 결함원인을 조기에 탐지하여 경년열화의 진행상태를 파악하고 이에 대응하는 대책을 수립함으로써 원전의 중대사고를 예방하고 원자력 발전소의 안전성향상에 기여키 위해 휴대용이 아닌 상시감시장치로 설계하고 있다. 원자로 중성자 신호에 포함되어 있는 잡음신호(0~30Hz)의 정확한 신호분석을 위해 수 Mhz 이상의 고속 Sampling을 할 수 있도록 구성하였고 또한 중성자 신호에 포함되어 있는 신호의 특성을 실시간으로 처리키 위해 주파수 분석을 위한 주파수변환(FFT)도 실시간으로 처리도록 설계하여 이에 소요되는 고속의 신호처리 장치인 DSP(Digital Signal Processor)를 자체설계개발 하였다. 또한 중성자 신호에서 측정한 전기적으로 미약한 신호를 분석이 가능하도록 증폭시키고 측정시 유입되는 잡음 및 분석영역 이외의 신호를 제거하기 위한 신호 조정기 보드(Signal Conditioner)도 자체설계개발 하였다. 향후 설계개발한 장비들의 실증시험과 내환경시험 등을 수행하여 기존의 국제품과 비교 분석을 수행하여야 할 것이다.

## (참 고 문 현)

- [1] 박진호 외, "원자로 잡음을 이용한 결합진단 기술개발", KAERI/PR-1908/98, 한국원자력연구소
- [2] F. J. Sweeney, "Utility Guidelines for Reactor Noise Analysis", EPRI NP-4970, 1987.
- [3] 박종범 외, "중성자 신호이용 원자로 내부구조물 감시/진단시스템 개발", 중간보고서, 2000.08.