

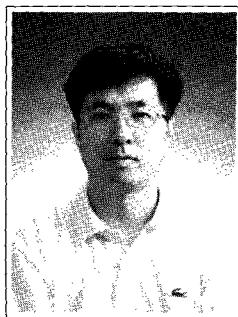


휴대용 원자로 잡음 신호 분석 시스템

개발 배경과 전망

박 진 호

한국원자력연구소 KALIMER기술개발팀 진동실험실
선임연구원



한국원자력연구소에서는 과학기술부에서 주관한 원자력국제공동연구비의 지원으로 96년 9월부터 99년 3월까지 「원자로 잡음을 이용한 결합 진단 기술 개발 과제」를 수행하였다.

국제 협력 상대 기관인 독일 하노버 공대 비파괴시험연구소와 공동으로 노내외 중성자 신호, 원자로 계통의 압력 및 가속도 신호 등 원자로 잡음 신호의 분석 기법을 연구하였다.

이를 토대로 울진 1·2호기 및 영광 3·4호기 원자로 내부 구조물에 대한 동적 상태를 진단하고 데이터베이스화하였으며, CANDU 원자로의 SPND(Selp Powered Neutron Detector) 잡음 신호를 이용한 센서지지물 및 핵연료 채널의 구조적 건전성 감시 기법을 확립하였다.

그리고 현장에서 잡음 신호 분석을 실시간으로 수행하여 그 결과를 바로 알아볼 수 있는 「휴대용 원자로 잡음 신호 분석 시스템」을 개발하였다.

개발된 시스템은 원자로 내부 구조물의 감시/진단 및 데이터 베이스 기능을 포함하고 있으며, 원자로 계통의 각종 구조물의 진동 상태 진단을 위한 간이용 주파수 분석기로도 활용할 수가 있다.

따라서 현재 원자로 내부 구조물 감시 시스템이 설치되어 있지 않은 국내 가압 경수로형 원자로에 직접적으로 활용할 수가 있으며, 기설치되어 있는 한국 표준형 원자로의 원자

로 내부 구조물 감시 시스템에 대해서는 진단 및 데이터 베이스 기능을 보완해 줄 수 있다.

특히 원자로 내부 구조물에 대한 상시 감시 시스템의 설치가 어려운 CANDU 원자로의 핵연료 채널에 대한 결합 진단 분석용으로 매우 유용하게 사용할 수 있을 것으로 전망되며, 앞으로 원전의 종합적인 휴대용 구조 건전성 진단 시스템으로 발전시켜 나가고자 한다.

개발 배경

가압 경수로형 원자로 내부 구조물은 원자로 압력 용기(Reactor Pressure Vessel) 내의 노심 지지 원통(Core Support Barrel; CSB), 상부 안내 구조물(Upper Guide Structure), 노심 울타리판구조물(Core Shroud Assembly), 하부 지지 구조물(Lower Support Structure) 등으로 구성되어 있다(그림 1).

그 중에서도 노심 지지 원통 구조물은 원자로 내부를 흐르는 고온·고압의 유체 유동에 의하여 손상이 가장 많은 곳이다.

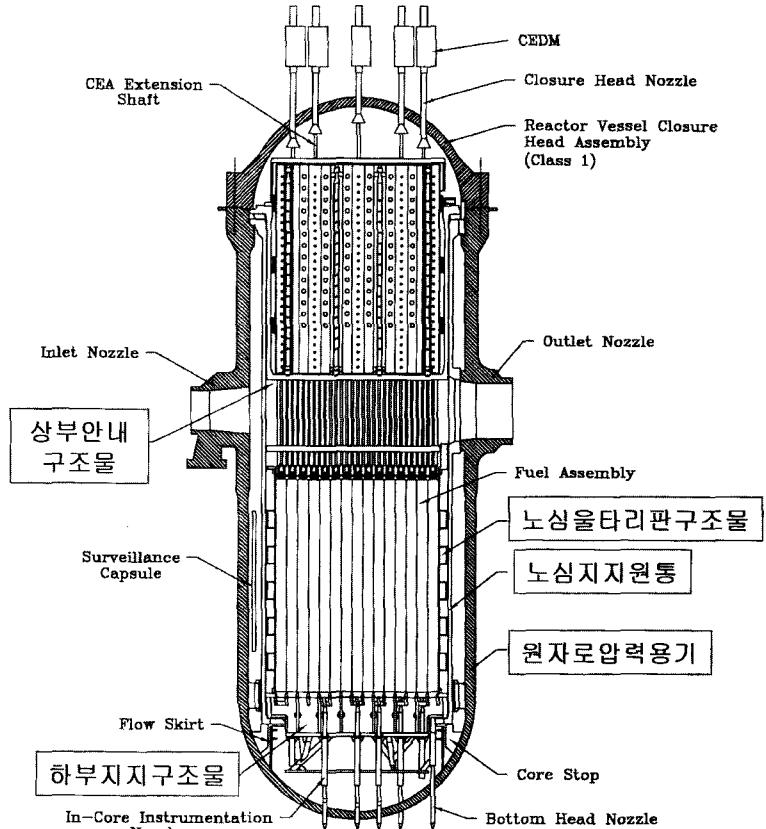
외국의 경우 70년대 이래 발생한 원자로 내부 구조물의 고장 사례를 살펴보면, 고장의 발생 빈도가 가장 높은 곳이 노심 지지 원통 구조물 계통으로 밝혀졌으며, 이는 유체 유발 진동에 의한 노심 지지 원통의 지지력 저하, 또는 열차폐체 연결 부품의 균열·이탈 등이 그 주요 원인으로 나타났다.

따라서 원자력 발전소의 설계시에 유체 유발 진동에 의한 영향을 평가하여 원자로 내부 구조물의 구조적 건전성을 입증하는 것은 원전의 상업 운전을 위하여 필수적인 사항이 되었다.

그러나 구조적 건전성이 입증되어 발전소가 가동되었지만 운전 연수가 증가함에 따라서 구조물 상호간의 체결력 저하 또는 상실, 부품의 이탈·파손에 의한 이물질 발생과 그에 따른 노심의 유로 차단 및 비정상적인 진동 등과 같은 여러 가지 결합 증상이 발생할 가능성이 있게 된다.

이러한 증상을 조기에 발견하여 정비·보수함으로써 유지 보수비의 절감은 물론이고 원전의 대형 사고를 미연에 방지할 수가 있다.

따라서 가동중인 원자로 내부 구조물 계통에 대한 주기적인 감시 및 진단은 원전의 안전성 확보 및 전력 생산성 측면에서 매우 중요하다고 하겠다.



〈그림 1〉 원자로 내부 구조물 단면도

가동중인 원자로 내부의 중성자속 신호, 원자로 내부를 흐르는 냉각수의 열수력 관련 신호(온도·압력·유량), 그리고 원전 구조물의 외부로부터 감지되는 구조 진동 및 음향 관련(변위·가속도 등) 신호들의 변동 성분(AC 성분)을 통틀어서 원자로 잡음이라 하며, 이를 적절히 신호 처리·분석함으로써 원전 주요 기기의 동적 상태를 감시하고 결함을 조기에 탐지하고자 하는 기술을 원자로 잡음

해석 기술이라고 한다.

원자로 잡음 해석을 이용한 원전의 감시 및 진단 기술은 원자로 계통의 제어·보호 및 감시 계통에 설치되어 있는 기존의 센서를 이용하기 때문에 추가적인 센서를 따로 설치할 필요가 없으며, 원자로를 정상적으로 가동하면서 연속적으로 감시 및 진단 활동을 수행할 수 있는 장점이 있다.

가압 경수로의 경우 원자로 외부에 설치되어 있는 노의 중성자 검출기의



잡음 신호를 분석하면 원자로 내부의 핵연료 집합체와 노심 지지 원통의 고유 진동 주파수를 추출해 낼 수가 있으며 노심 지지 원통의 여러 가지 진동 모드를 분리해 낼 수가 있다.

이 때 원자로 내부 구조물에 결합 증상(노심 지지 원통의 지지력 저하, 열차폐체와의 체결력 저하, 구성 부품의 이탈·파손 등)이 발생하면 특정 고유 진동 주파수 및 해당 진동 모드에 변화가 발생하게 된다.

이를 이용하면 원자로 내부 구조물의 구조적인 결합을 조기에 감시·진단할 수가 있게 된다.

CANDU 원자로의 경우에는 칼란드리아 내부에 핵연료 채널의 길이별 위치에 따라 수직 방향으로 설치되어 있는 SPND 중성자속 검출기의 잡음 신호를 분석함으로써 핵연료 채널의 고유 진동 주파수 및 관련 진동 모드를 추출할 수가 있으며 마찬가지 방법으로 구조적인 결합을 조기에 발견할 수가 있다.

세계적으로 CANDU 원전이 가압 경수로형 원전에 비하여 가동률이 저하되고 있으며, 이는 원자로 계통에 대한 감시·진단 활동이 상대적으로 적은 데에 그 원인이 있다.

특히 캐나다의 경우 신규 핵연료 채널의 교체시 원자로 잡음 신호 분석 기법을 이용함으로써 수백만달러의 정비·보수료를 절감한 사례는 주목할만한 일이다.

원자로 잡음 신호 분석 기술은 외

국의 경우 60년대부터 많은 연구가 진행되어 왔으며 신호 처리 기법 및 컴퓨터 기술의 발달과 더불어 원자로 내부 구조물의 결합 진단 기법으로 효과적으로 활용·연구되어지고 있다.

미국의 경우에는 대부분 원자로의 최초 가동시에 노외 중성자 잡음 신호를 이용하여 원자로 내부 구조물의 동적 상태에 대한 기준 데이터를 마련해 놓고 매 주기마다 그 추이를 비교·분석 데이터 베이스화하고 있다. 그 외 캐나다·프랑스·독일 등 선진국들도 유사한 분석을 수행하고 있으며 감시 시스템의 상용화를 통하여 꾸준히 감시 활동을 진행해 오고 있다.

국내의 경우를 자세히 살펴보면, 원자로 잡음 해석 관련 연구가 80년대 말부터 이루어져 왔으나 대부분 부분적인 연구로만 수행되었다.

94년에 이르러 한국원자력연구소에서 RIVMOS라는 원자로 내부 구조물 감시 계통을 개발하여 울진 1호기에 설치하는 성과가 있었으며, 가압 경수로형 원자로 내부 구조물의 진동 상태를 진단할 수 있는 위상 분리 알고리즘을 개발하여 국내 발전소에 적용·검증한 바 있다.

그러나 원자로 내부 구조물의 결합 진단을 위한 체계적인 연구는 이루어 지지 못하였다.

최근 96년 9월부터 99년 3월까지 한국원자력연구소에서는 과학기술부가 주관한 원자력국제공동연구비의

지원을 받아, 독일의 하노버 공대 비파괴시험연구소와 공동으로 가압 경수로형 및 CANDU형 원자로 계통의 결합 진단을 위한 잡음 신호 분석기술을 연구하였으며, 국내의 울진 1·2호기 및 영광 3·4호기를 포함하여 국외의 가압 경수로 및 CANDU 형 원전에 직접 적용하여 데이터 베이스화하였다.

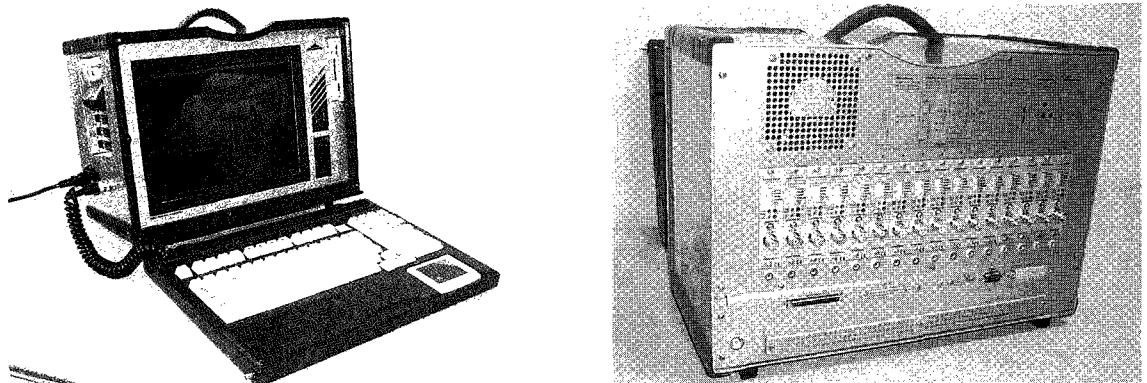
이때 최종적인 분석 결과를 보기 위해서는 현장의 신호를 모두 녹음하여 연구소로 가져온 뒤 다시 재생해야 하며, 현장에서 즉각적으로 분석 결과를 알려주지 못하는 불편함이 있었다.

이것은 그동안 분석 관련 장비 및 소프트웨어를 모두 외국 제품에 의존함으로써 새로운 원자로 잡음 신호 분석 기법을 적용하기 위해서는 PC를 이용하여 별도의 프로그램 작업을 수행해야 하기 때문이다.

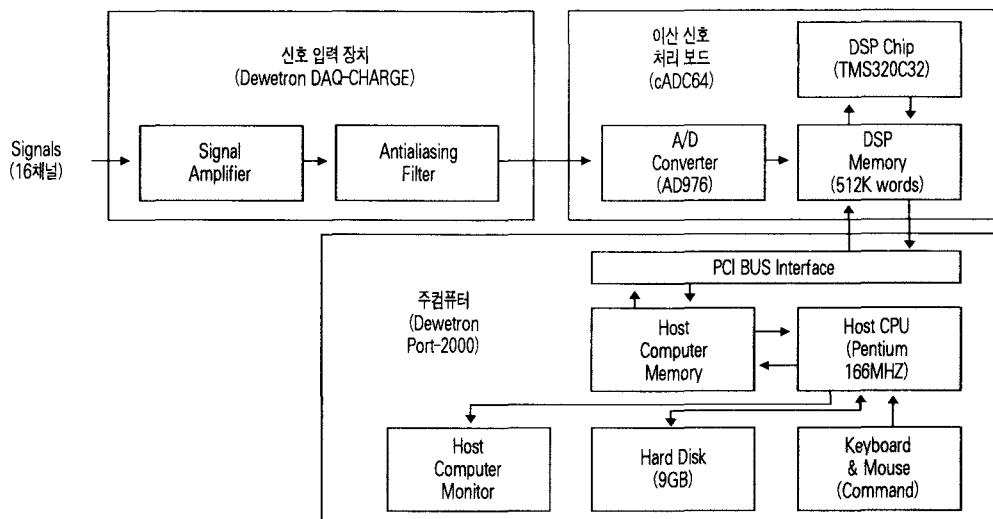
위와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 신호 분석 장비 및 소프트웨어의 국산화가 불가피하였다. 따라서 현장에서 실시간으로 원자로 계통의 각종 잡음 신호를 분석하여 결합 진단을 수행할 수 있는 휴대용 원자로 잡음 신호 분석 시스템(RENAS)을 개발하게 되었으며, 현장에 적용·검증한 결과 만족할만한 성과를 얻었다.

휴대용 원자로잡음신호 분석시스템

개발된 휴대용 원자로 잡음 신호



〈그림 2〉 휴대용 원자로 잡음 신호 분석 시스템. 앞부분(좌) 뒷부분(우)



〈그림 3〉 하드웨어 구성도

분석 시스템에 대하여 간략하게 소개하고자 한다. 〈그림 2〉는 휴대용 원자로 잡음 신호 분석 시스템의 전체 모습이며, 이 시스템의 하드웨어부는 〈그림 3〉에서 보는 바와 같이 입력되는 원자로 잡음 신호에 대한 신호 조절(필터링 및 증폭)을 위한 신호 입력

장치, 입력되는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하고 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)을 수행하는 디지털 신호 처리기(Digital Signal Processor: DSP)가 내장된 이산 신호 처리 보드, 이산 신호 처리 보드의 기능을 제어하

고 데이터의 디스플레이 및 출력, 그리고 데이터 베이스 기능을 담당하는 주컴퓨터로 구성되어 있다.

휴대가 가능한 크기로 하드웨어부를 구성함으로써 발전소 현장에서 실시간 계측 및 분석이 가능하도록 하였으며, 16채널의 입력 신호를 동시



에 수집 및 주파수 분석이 가능하도록 되어 있다.

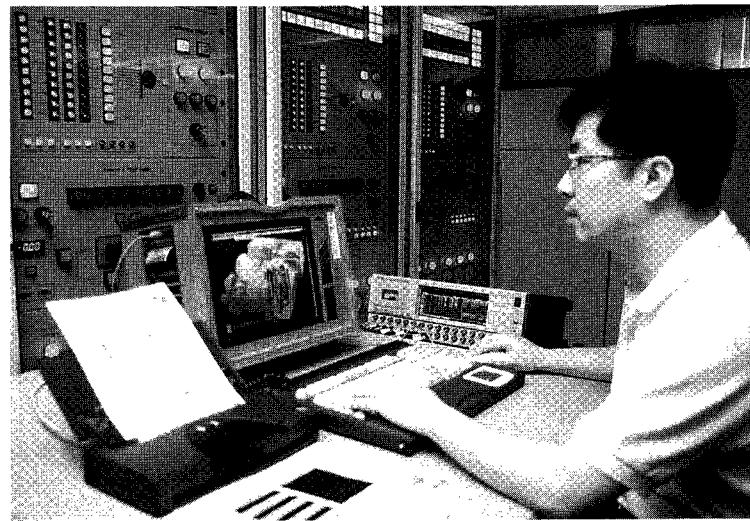
특히 주컴퓨터는 산업용 컴퓨터를 사용하여 일반적인 노트북 컴퓨터보다 충격 및 열에 강하며, 그 후면은 각종 계측 장비 및 앰프를 장착할 수 있도록 설계되었다.

그리고 PCI 버스 인터페이스를 통하여 이산 신호 처리보드 메모리로 입력되는 데이터를 주컴퓨터의 메모리로 고속으로 저장하며, 모니터 화면을 통하여 분석 데이터를 실시간으로 디스플레이 할 수 있다.

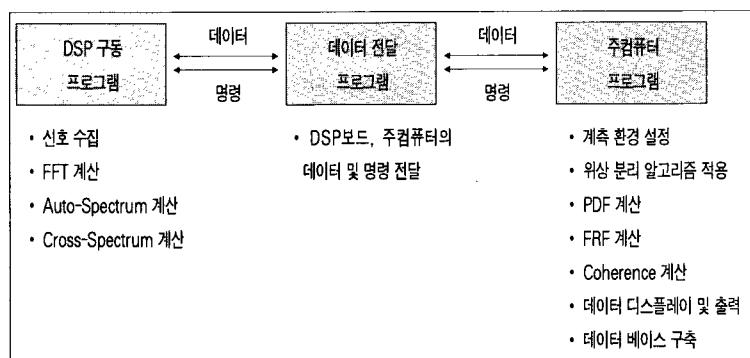
또한 데이터 입출력 및 분석 결과에 대한 데이터 베이스 기능을 위하여 고용량(약 9기가바이트)의 보조 기억 장치를 내장하였다.

소프트웨어는 크게 디지털 신호 처리기(DSP) 구동 프로그램, 데이터 전달 프로그램, 그리고 주컴퓨터 운용 프로그램 등 세 부분으로 구성되어 있으며, 각 프로그램의 주된 역할은 다음과 같다(그림 4).

디지털 신호 처리기 구동 프로그램은 이산 신호 처리 보드에 내장된 아날로그·디지털 변환기를 이용, 각 채널의 시간 영역 신호를 수집하여 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform: FFT)을 수행하고, 자기 파워 스펙트럼(Auto Spectrum) 및 상호 파워 스펙트럼(Cross Spectrum)을 구하여 데이터 전달 프로그램을 거쳐서 주컴퓨터의 메모리로 전송하는 역할을 수행한다.



휴대용 원자로 잡음 신호 분석 시스템 운용 모습. 이번에 개발된 시스템은 원자로 내부 구조물의 감시/진단 및 데이터 베이스 기능을 포함하고 있으며, 원자로 계통의 각종 구조물의 진동 상태 진단을 위한 간이용 주파수 분석기로도 활용할 수가 있다. 따라서 현재 원자로 내부 구조물 감시 시스템이 설치되어 있지 않은 국내 기압 경수로형 원자로에 직접적으로 활용할 수가 있으며, 기설치되어 있는 한국 표준형 원자로의 원자로 내부 구조물 감시 시스템에 대해서는 진단 및 데이터 베이스 기능을 보완해 줄 수 있다.



〈그림 4〉 소프트웨어 구성도

이 때 데이터 전달 프로그램은 디지털 신호 처리기 구동 프로그램과 주컴퓨터 프로그램 사이에서 시간 및 주파수 영역 데이터를 전달하고, 주컴퓨터 프로그램에서 디지털 신호 처리기 구동 프로그램으로 지시하는 작동 명령을 전달하는 역할을 수행한다.

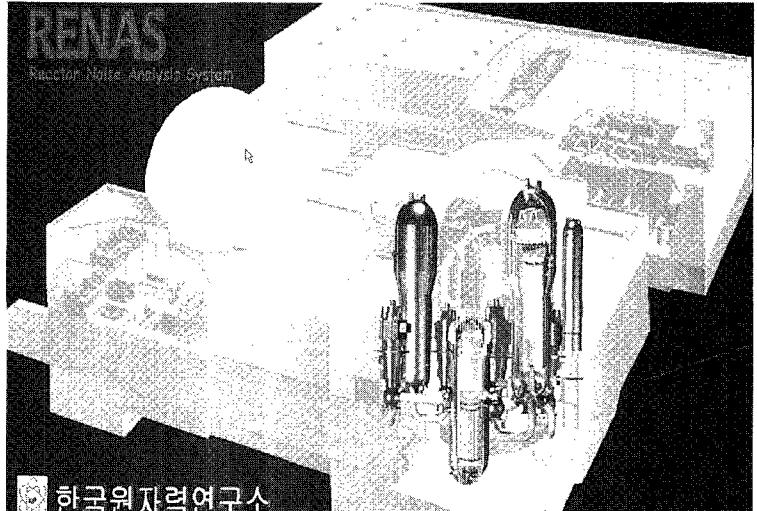
주컴퓨터 프로그램에서는 디지털

신호 처리기 구동 프로그램으로부터 전송된 시간 및 주파수 영역 데이터를 이용, 확률 밀도 함수(Probability Density Function), 주파수 응답 함수(Frequency Response Function), 상관 기여도 함수(Coherence Function)를 계산하여 원자로 내부 구조물의 고유 진동 주파수를 추출하

고, 한국원자력연구소에서 자체 개발한 위상 분리 알고리즘(Phase Separation Algorithm)을 적용하여 노심 지지 원통에서 발생하는 진동 모드 및 그 크기를 분석하는 역할을 수행한다.

또한 주컴퓨터 프로그램은 이러한 분석 결과들을 컴퓨터 모니터상에 실시간으로 출력하게 해주며, 상기 결과들을 데이터 베이스화하여 저장·관리하고 필요시 레포트 형태로 출력하는 역할도 수행한다.

〈그림 5〉는 주프로그램 실행시 디스플레이되는 초기 화면을 보여준다.



〈그림 5〉 분석 소프트웨어 초기 화면

향후 전망

현재까지 국내에서는 운전 연수가 상대적으로 증가하였음에도 불구하고 원자로 내부 구조물의 상시 감시 장비가 설치되어 있지 않은 가압 경수로형 발전소가 다수 있으며, 이를 발전소의 경우 원자로 내부 구조물의 동적 상태에 대한 기준 데이터가 전혀 없다.

미국을 비롯한 선진국의 경우에는 신규 발전소의 시운전시에 기준 데이터를 마련하여 매회 핵연료 주기마다 일정 횟수로 감시 활동을 하고 있으며, 최근에는 원자로 내부 구조물 감시시스템의 상시 설치를 권유하고 있는 추세이다(관련 지침서: ASME/ANSI O&M-SG-90 part 5 & 23, EPRI NP-4970, Reg. Guide 1.20).

국내 원전의 경우에도 원전의 안전

성 제고를 위하여 앞으로 규제 기관의 설치 권고가 있으리라 예상된다. 따라서 상시 감시 장비의 신규 설치 시에 휴대용 원자로 잡음 신호 분석 시스템의 분석 기능을 그대로 적용할 수가 있다.

그리고 현재 상시 감시 장비가 설치되어 있는 원전의 경우에는, 설치 당시에 비하여 개선된 신호 분석 기법 및 전단 알고리즘을 직접 적용할 수가 없다. 이럴 경우에도 개발된 휴대용 시스템을 보완적으로 적용할 수 있다.

특히 CANDU형 원자로의 경우에는 핵연료 채널의 수가 많으므로 원자로 내부 구조물에 대한 상시 감시 장비의 설치가 곤란하다. 따라서 결함이 있는 핵연료 채널을 조기에 발

견하기가 쉽지가 않다.

그러나 휴대용 원자로 잡음 신호 분석 시스템을 이용한다면 발전소의 정상 가동중에 핵연료 채널의 결함 부위를 정확하게 진단함으로써 핵연료 채널의 교체 기간을 크게 단축시켜 정비·보수료를 획기적으로 절감 할 수가 있을 것이다.

현재 개발된 휴대용 원자로 잡음 신호 분석 시스템은 일반적인 실시간 주파수 분석 기능을 갖추고 있으며, 주로 원자로 내부 구조물의 감시·진단에 초점이 맞추어져 있다.

그러나 앞으로는 원자로 계통 전반의 구조적 건전성에 대한 종합적인 진단 기능을 수행할 수 있도록 하드웨어의 성능 및 소프트웨어의 기능을 더욱 보완·발전시켜 나갈 예정이다.

