



통합형 원자로계통 구조건전성 감시 시스템

박진호*, 윤두병, 신성환
(한국원자력연구원)

1. 머리말

우리나라의 대부분을 차지하고 있는 가압 경수형 원전에서 원자로 압력계통(그림1 참조)을 구성하는 기기의 구조적인 건강상태를 온라인으로 검진하는 설비로서, 원자로계통 구조건전성 감시 시스템(NIMS; NSSS integrity monitoring system)이 있다. 원자로계통 구조건전성 감시 시스템의 부속 시스템으로는, 1) 원자로내부구조물 진동감시 시스템 (IVMS; internal vibration monitoring system), 2) 금속이물질 감시 시스템 (LPMS; loose part monitoring system), 3) 음향 누설 감시 시스템 (ALMS; acoustic leak monitoring

system) 및 4) 원자로 냉각재 펌프 진동감시 시스템(RCP-VMS; reactor coolant pump vibration monitoring system) 등이 있다.

기존의 원자로계통 구조건전성 감시 시스템의 경우 대부분 선진국 제품을 수입하여 사용하고 있으며, 각 부속 시스템의 센서가 계측한 신호는 해당 시스템에서만 독립적으로 분석되는 구조로 되어 있어 서로 다른 신호간의 상관관계를 고려한 종합적인 계측 및 분석이 어려운 단점이 있었다. 따라서 한국원자력연구원에서는 2006년부터 2009년까지 지식경제부의 지원으로 한국수력원자력 및 삼창기업과 더불어, 기존의 부속 시스템에 설치된 각종 센서들로부터 계측된 신호를 종합적으로 취득 및 분석하여, 기존의 시스템보다 신뢰성이 대폭 향상된 통합형 원자로계통 구조건전성 감시 시스템을 완전 국산화 개발하였다.

이 글에서는 새로이 개발된 통합형 원자로계통 구조건전성 감시 시스템 및 그 핵심기술에 대하여 간략하게 소개하고자 한다.

2. 원자로내부구조물 진동감시 시스템

원자로내부구조물 진동감시 시스템(IVMS)은 원자로 출력을 측정하기 위한 노외중성자 검출기의 미세한 잡음신호 성분분석을 통하여 원자

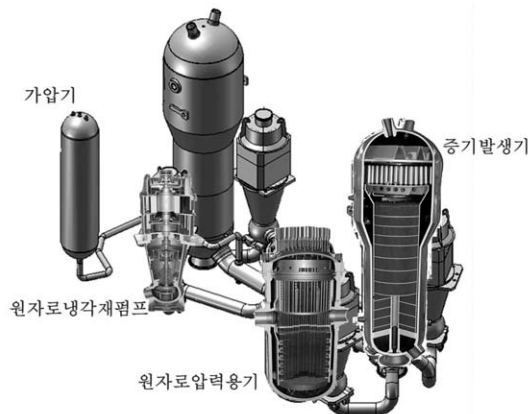


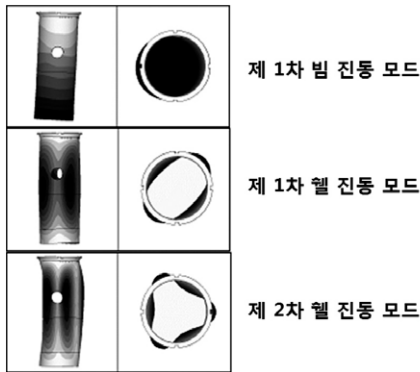
그림 1 한국형 표준 원전의 원자로 압력계통 구성기기

* E-mail : pjh213@kaeri.re.kr / Tel : (042) 868-2915

로내부구조물의 고유진동 특성변화를 감시하는 장치로서, 원자로내부구조물의 체결력 저하 또



(a) 원자로내부구조물



(b) 노심지지 배럴의 진동 모드

그림 2 원자로내부구조물 및 고유진동 모드 형상

는 지지상태의 악화를 조기에 검진하는 것이 목적이다. 즉, 원자로내부구조물은 고유한 진동모드 형상을 갖고 있으며, 지지상태의 변화 또는 체결부품의 구조적인 결함이 발생하면 그 주파수 성분 및 주파수 성분별 진동에너지의 크기가 변하게 되어 이상 상태를 감지할 수 있게 된다. 사람의 신체 내부 장기에서 건강이 나빠지면 그 장기와 관련된 맥박의 주기 및 세기가 달라지므로 환자의사가 진맥을 통하여 병을 진단하는 것과 유사하다.

그림 2(a)는 한국 표준형 원전의 원자로내부구조물을 보여주며, 노심지지배럴, 노심 슈라우드 구조물, 상부 안내 지지물 및 하부지지 구조물 등으로 구성되어 있다. 그림 2(b)는 노심지지 배럴

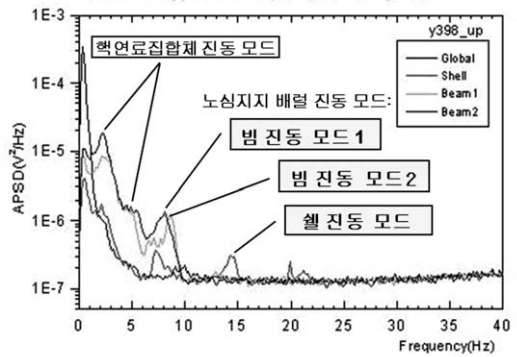


그림 3 원자로내부구조물의 고유진동 모드별 주요 주파수 성분

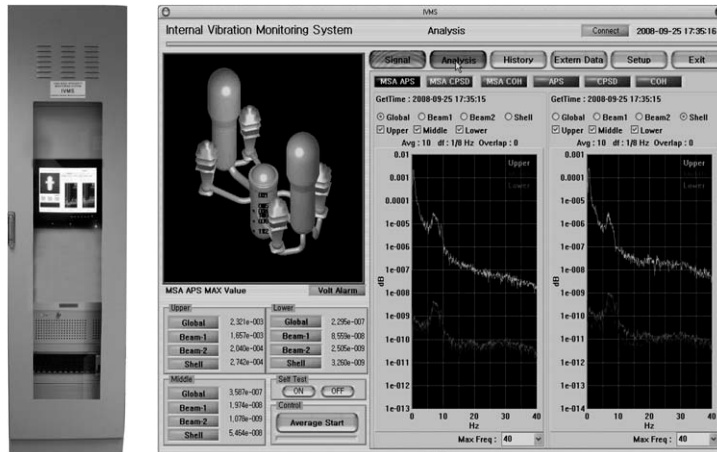


그림 4 원자로내부구조물 진동감시 시스템 및 모니터링 소프트웨어 화면

의 고유진동 모드를 보여주며, 빔(beam) 진동 모드 및 셸(shell) 진동 모드가 복합적으로 연계되어 나타난다. 대체로 제 1차 고유진동모드의 경우 순수 빔 진동으로 고유진동 주파수는 약 8 Hz 정도이며, 제 2차 고유진동 모드는 순수 셸 진동 모드로서 약 15 Hz 이다. 그림 3은 노외중성자 검출기의 잡음신호 성분을 측정하여 한국원자력연구원에서 자체 개발한 위상분리 기법을 적용하여 구한 한국형 표준 원전 원자로내부구조물의 정상상태 진동 모드별 스펙트럼 분포를 보여주고 있으며, 그림 4는 국산화 개발된 원자로내부구조물 진동감시 시스템의 하드웨어 및 온라인 감시화면이다.

3. 금속이물질 감시 시스템

사람의 몸에는 혈관을 통하여 혈액이 순환하고 있다. 이 혈액 속에 이물질이 발생하여 주요 혈관을 막거나 심혈관 속에 들어가면 건강에 심각한 문제를 야기 시킬 수 있으므로, 이러한 이물질을 신속히 찾아 제거하는 것이 매우 중요하다. 원자로 압력계통에서 금속 이물질의 존재여부, 위치 및 그 크기를 진단하기 위한 감시설비로서 금속 이물질 감시 시스템(LPMS)이 있다. 이 시스템은 원자로 압력계통의 외부표면에 설치된 가속도 센서를 이용하여 계통 내부의 이물질에 의해 발생한 충격파를 탐지함으로써 이물질의 진위여

부, 발생위치 및 충격에너지의 정도를 진단하기 위한 정보를 제공한다.

금속이물질의 발생은 원자로내부구조물 또는 제어봉 체결부품 등의 이완이나 부식 등으로 인하여 생성되기도 하고, 핵연료의 재장전이나 보수 활동 시에 예기치 않게 유입될 수도 있다. 원자로 압력계통 내부에 금속파편과 같은 이물질이 발생하게 되면, 고속의 냉각수 유동을 따라 이동하여 원자로 내벽 손상, 일차계통의 온도 감지 센서의 파손, 노심의 냉각재 유로 방해, 제어봉의 구동 장애, 증기발생기의 하부 및 세관 손상 또는 원자로 냉각재 펌프의 임펠러 손상 등을 초래할 가능성이 있다(그림 5 참조). 따라서 원자로 압력계 내부에서 금속파편에 의한 충격신호가 발생할 경우 금속파편의 발생위치, 크기 및 충격에너지를 신속하고 정확하게 진단하여 원자로의 정지여부 결정 및 적절한 제거방안을 수립함으로써 원자로 계통의 구조적 건전성이 저하되지 않도록 해야 한다.

금속이물질의 감시는 크게 세 가지로 구성되어 진행된다. 첫째, 감시센서로부터 충격파가 발생할 경우 실제로 금속이물질에 의한 것인지 그 진위여부를 판단하는 기술이다. 실제로 압력계 외부에서 포착된 충격신호는 금속이물질이 아닌 전기적인 잡음, 열 충격 및 유체 과도진동 등 다른 현상에 의해 발생할 수도 있으므로 진위판별은 금속이물질 감시 시스템에서 가장 첫 번째로 중요한 사항이다. 둘째, 금속이물질의 발생위치 추정 기술이다. 금속이물질 발생이 사실로 판정되면 가장 우선적으로 그 발생 위치를 정확하게 진단하여야 한다. 궁극적으로 금속이물질이 발생하면 충격에 의한 기계적인 손상 가능성을 평가하여 그 제거 시기 및 절차를 수립해야 하므로 이물질의 발생위치를 정확하게 판단하여야만 성공적인 평가가 가능하다. 마지막으로 금속이물질의 크기 및 충격에너지를 추정하는 기술이다. 즉, 이물질의 발생 및 그 위치가 파악되면, 발전소의 정지 여부 및 그 시기를 결정하기 위하여 구조안전성 영향평가를 수행하며 이를 위하

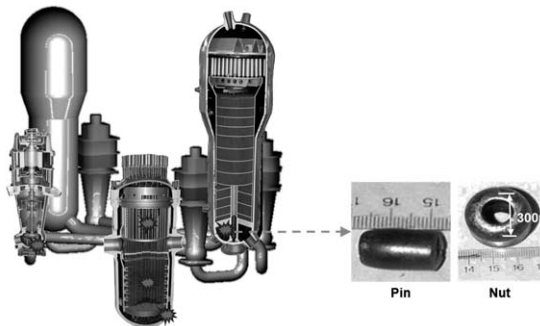


그림 5 원자력발전소 내부의 금속이물질 발생 가능 위치 및 사례

여 이물질의 크기 및 충격에너지를 가능한 정확하게 예측하여야 한다.

실제로, 원자로 운전 중에 압력경계 외부에 설치된 가속도 센서에서 취득한 충격파를 이용하여 충격을 유발한 금속이물질의 정보를 추정하는 것은 매우 어렵고 불확실성을 많이 내포하고 있다. 금속이물질 감시기술은 1980년대에 선진국을 중심으로 개발되었으며, 지속적으로 개선되어 오고 있다. 이물질 진위 판별 기술의 경우 약 7가지의 기술이 종합적으로 적용되어 현장에서 활용되고 있으나, 이물질의 발생위치 및 충격

에너지 추정 기술은 불확실성을 감소시키기 위한 연구가 계속적으로 진행되고 있다. 2000년대 초반까지 이물질의 발생위치 및 충격에너지 추정기술은 주로 선진국에서 개발한 시간과형 분석, 주파수 분석 및 실험데이터를 이용한 추론기술 등을 적용해 왔으나, 최근 한국원자력연구원 에서 시간-주파수 동시 분석 및 신개념 잡음영향 감소기법 등을 적용하여 정확성과 신뢰성이 향상된 기술을 개발하였다.

그림 6은 원자로 하부에서 인위적으로 강구형태의 금속충격을 가하여 그 발생위치를 기존의 방법(삼각법1 및 삼각법2)과 비교 추정한 결과를 보여주며, 기존의 방법에 비하여 정확성과 신뢰성이 동시에 향상되었음을 알 수 있다. 국산화 개발된 금속이물질 감시 시스템의 하드웨어 및 온라인 감시화면이 그림 7에 나와 있다.

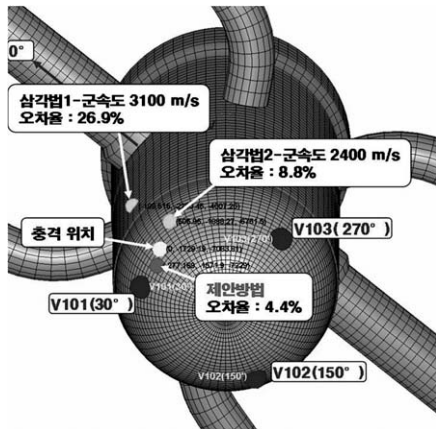


그림 6 기존 방법과 시간-주파수 동시분석 방법을 이용한 충격위치 추정 결과 비교(원자로 하부)

4. 음향 누설감시 시스템

성인이 건강관리에 소홀하게 되면 혈관벽에 지방이 축적되어 혈압이 상승하게 되고, 이로 인해 신체혈관의 약한 부분이 파열되면서 내출혈 등을 일으킬 수 있다. 이와 유사하게 원자로 계통은 압력경계 기기들의 용접으로 이루어져 있으므로 응력에 상대적으로 취약한 이중용접 부위에

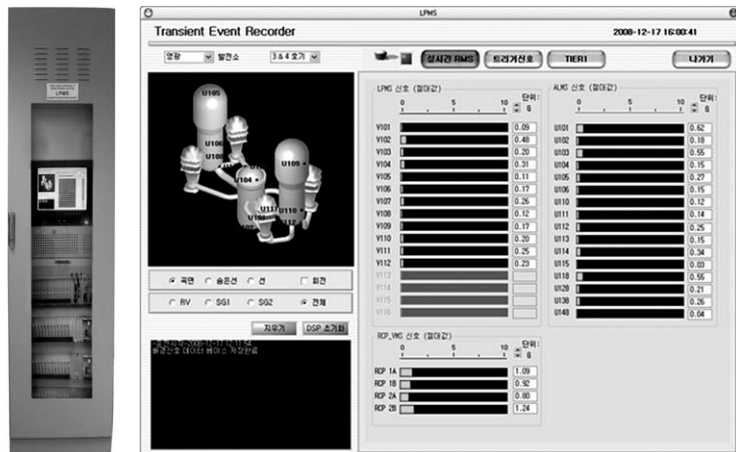


그림 7 금속이물질 감시 시스템 및 모니터링 소프트웨어 화면

서 균열 또는 미세한 누설이 발생할 수 있다. 균열 또는 누설이 발생하면 압력경계 기기의 표면으로 고주파 성분의 응력파가 발생하여 전파하게 된다.

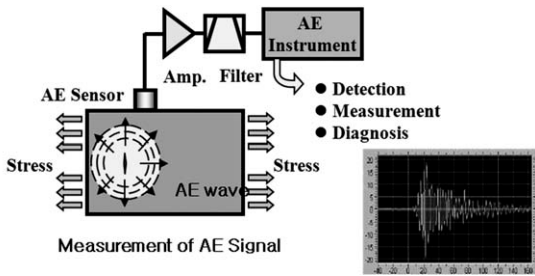


그림 8 음향방출 신호의 측정 구성도

음향 누설감시 시스템(ALMS)은 미세한 표면 응력파를 측정할 수 있는 음향방출(acoustic emission) 센서를 이용하여 원자로 계통의 압력경계 면에서 균열 또는 냉각수의 누설이 발생할 경우에 이를 신속하게 탐지하고자 하는 장비이다. 또한 1979년 미국의 드리마일 아일랜드 원전사고 이후에 규제사항으로 가압기 안전밸브의 개폐상태를 감시할 수 있는 기능이 추가되어 있다.

그림 8은 음향방출 신호의 기본적인 측정 구성도를 보여주며, 그림 9는 음향 누설감시 시스템을 통하여 측정할 수 있는 음향방출 신호의 종류를 나타낸다. 유체의 누설은 일반적으로 비정상적인 연속성 신호 형태로 나타나며, 균열 현상은

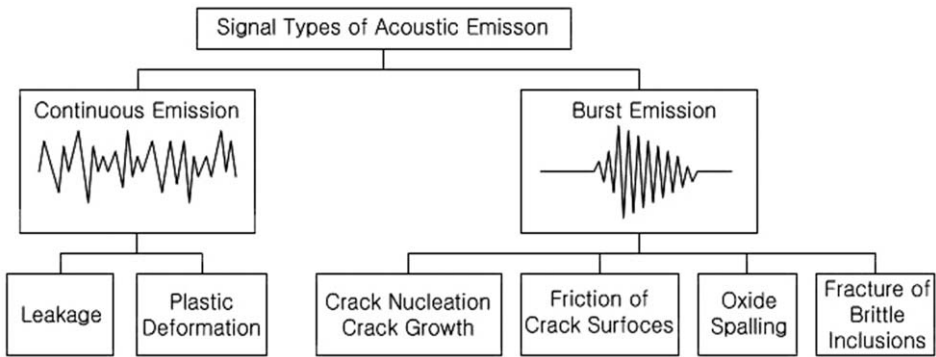


그림 9 균열 및 누설에 의한 음향방출 신호의 형태

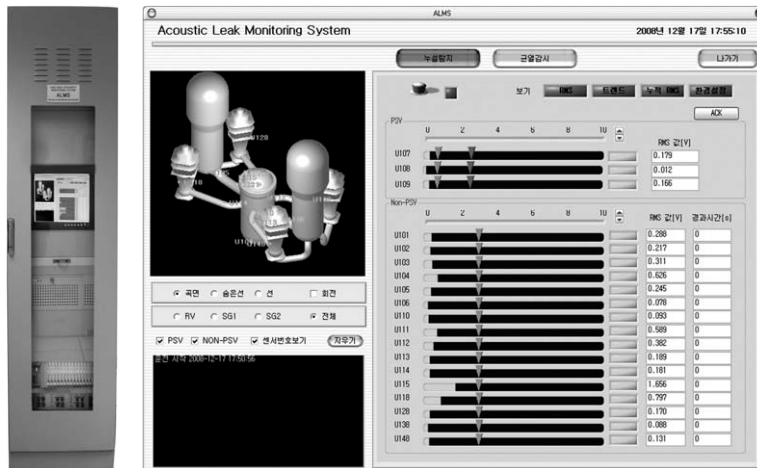


그림 10 음향 누설감시 시스템 및 모니터링 소프트웨어 화면

과열형 과도신호 형태로 나타난다. 기존의 시스템에서는 누설이 발생할 경우, 배경잡음에 비하여 센서 계측신호의 실효치가 증가함에 착안하여, 신호의 실효치가 설정치를 초과하는 경우 경보를 발생시키며, 균열에 의한 응력파의 발생 횟수만을 기록하여 경보 발생 시 전문적인 엔지니어의 경험과 판단에 의하여 현장 확인 및 원자로의 정지 여부를 결정한다. 새로 개발된 통합형 시스템에서는 전문가의 정밀진단에 필요한 시간 및 주파수 파형을 동시에 저장할 수 있으며, 잡음제거 기능, 시간-주파수 동시 분석 및 신경회로망을 이용한 누설률 및 균열의 판별 기능을 추가하였다. 또한 누설 발생시 저주파 진동과의 상관성도 고려할 수 있도록 금속이물질 감시 시스템의 가속도 신호를 함께 분석할 수 있도록 하드웨어를 개선하였다. 그림 10은 국산화 개발된 음향 누설감시 시스템의 하드웨어 및 온라인 감시화면을 보여준다.

5. 원자로 냉각재 펌프 진동감시 시스템

인체의 정맥과 동맥 사이에서 평생 동안 혈액을 끊임없이 순환시키는 장기가 심장이며, 유사하게 원자로 계통의 심장 부위에 해당하는 것이 원자로 냉각재 펌프(RCP)이다. 원자로 냉각재 펌

프-진동감시 시스템(RCP-VMS)은 가속도센서 및 비접촉 변위센서를 이용하여 원자로 냉각재 펌프 회전축의 이상 상태 및 지지 베어링의 결함을 조기에 탐지하여 원자로 계통의 구조건전성을 유지하고자 하는 것이 목적이다. 그림 11은 원자로 냉각재 펌프의 위치, 내부구조 및 감시센서의 설치위치를 보여준다.

기존 시스템의 경우에는 시간영역 변위 신호의 실효치 크기 변화에 따른 경보 제공이 주된 기능이며, 경보 발생 시에는 궤도 및 스펙트럼 분석 기능만을 제공하였으나, 통합형 시스템에서는 사용자 편의 기능을 대폭 향상시키고 실시간 차수분석, 주 궤도 분석, 방향성 스펙트럼 및 시간-주파수 동시 분석 기능 등을 개선 및 추가하여 정확하고 신뢰성 있는 진단이 가능하도록 개발하였다. 그림 12는 기존의 시스템에서 사용중인 온라인 궤도분석과 국산화 시스템에 적용된 주 궤도분석 방법의 차이점을 보여주는 사례이다. 기존의 시스템에서는 펌프 축의 1차 및 2차 궤도 성분이 잡음신호와 함께 묻혀 나타나므로 정확한 구분이 어려우나, 개발된 시스템에서는 잡음성분이 제거되고 주요 궤도성분을 별도로 구분하여 정확하게 분석할 수가 있다. 즉, 국산화 개발된 원자로 냉각재 펌프 진동감시 시스템에서는 방향성 스펙트럼 분석을 수행하여 회전축 궤도

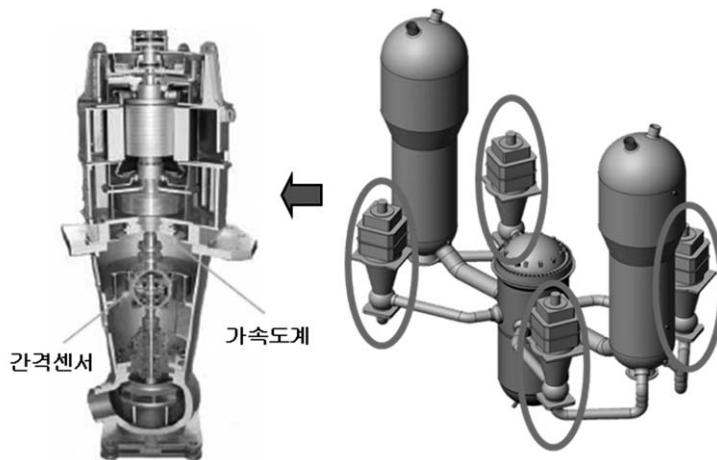
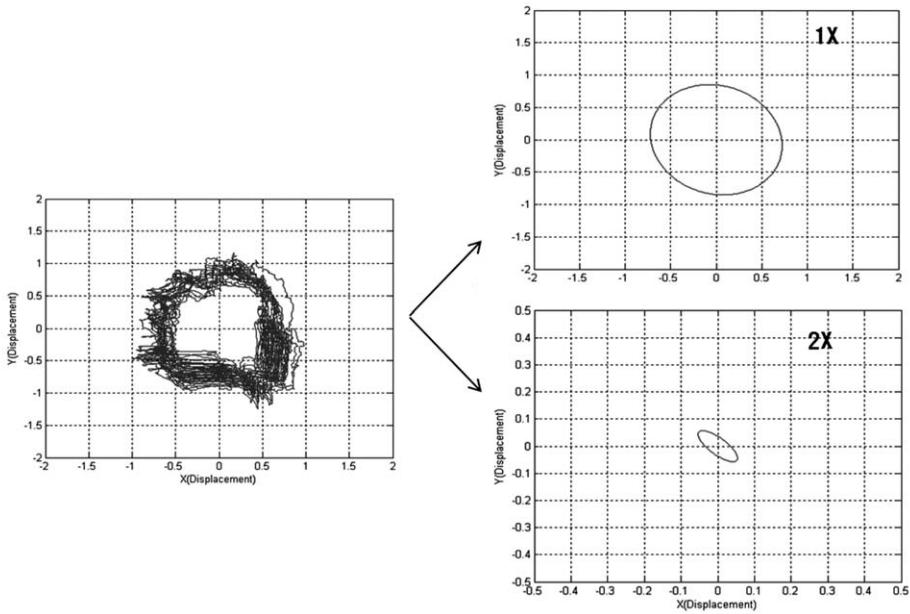


그림 11 원자로 냉각재 펌프의 위치 및 내부구조



(a) 기존의 궤도분석 결과

(b) 주 궤도분석 결과

그림 12 궤도분석 결과 비교

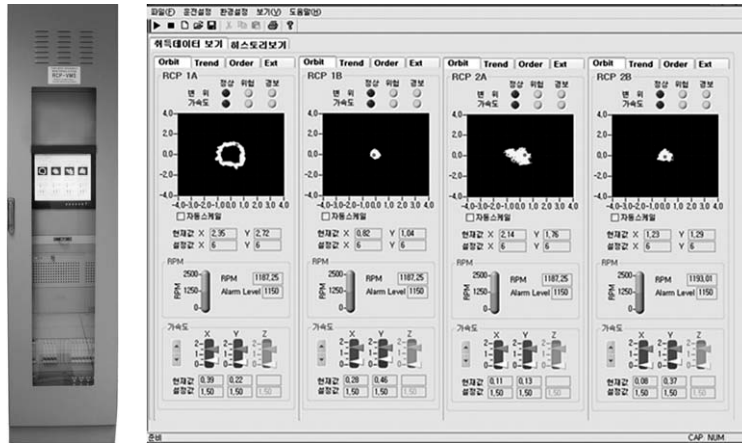


그림 13 원자로 냉각재 펌프 진동감시 시스템 및 모니터링 소프트웨어 화면

의 진동 방향을 실시간으로 확인할 수 있으며, 베어링 및 모터 등에 미세한 결함이 발생하거나 잠음 속에 결함 신호가 묻혀 있는 경우에도 결함의 존재 여부 및 위치를 파악할 수가 있다. 그림 13은 국산화 개발된 원자로 냉각재 펌프 진동감시 시스템의 하드웨어 및 온라인 감시화면을 보여준다.

6. 통합형 원자로계통 구조건전성 감시 시스템

원자로계통 압력계기 기기에 대한 온라인 감시 시스템은 미국, 독일, 프랑스 등 선진국들이 1980년대부터 개발·운영해오고 있으며, 국내 표준 원전에도 미국 웨스팅하우스 제품이 운용되고 있다. 그러나 종래에는 앞에서 소개한 4개의 부

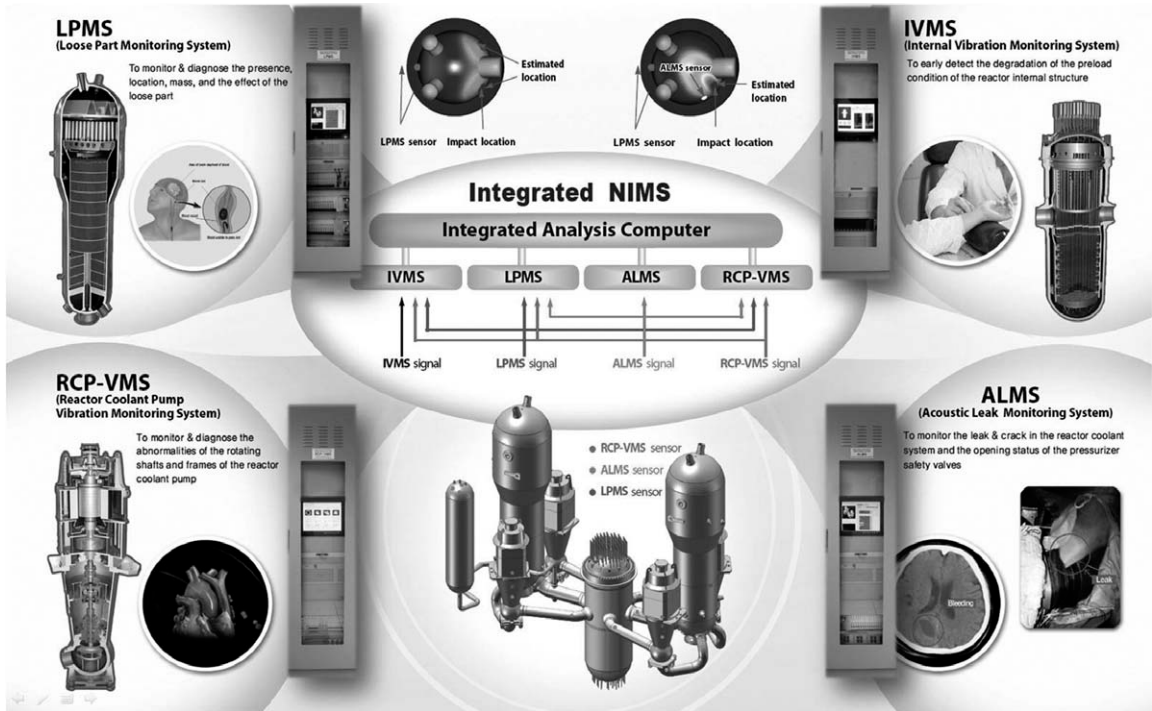


그림 14 통합형 원자로계통 구조건전성 감시 시스템

속 시스템이 각각 독립적으로 계측, 운용되는 구조로 설계되었으며, 하드웨어 신호처리 속도 향상, 소프트웨어 분석기능의 개선 및 경고 발생 시 운영 엔지니어의 신속하고 정확한 판단을 위한 진단기능 추가 등 개선요구가 꾸준히 제기되어 왔다.

한국원자력연구원은 1998년도에 이미 원자로 내부구조물 진동감시 시스템을 국산화하였으며, 2004년에는 기존의 선진국 제품에 비해 성능이 우수한 금속이물질 감시 시스템을 국산화하는데 성공하였다. 2009년에는 원자로내부구조물 진동감시 시스템 및 금속이물질 감시 시스템의 기능을 더욱 개선시키고 음향 누설감시 시스템 및 원자로 냉각재 펌프 진동감시 시스템을 추가 개발하여 전체 시스템을 종합적으로 운용할 수 있는 통합형 원자로계통 구조건전성 감시 시스템을 개발하였다(그림 14 참조). 통합형 원자로계통 구조건전성 감시 시스템은 첨단 IT 기술을 기반으로 하여, 하드웨어의 동시 신호처리 능력

을 대폭 개선하였으며 경고신호의 실시간 감지율 개선, 선진국 제품에는 포함돼 있지 않은 3차원 그래픽 디스플레이 기능 탑재, 첨단 감시기법 및 다차원 통합분석 기능의 적용 등 부속 시스템별 다양한 종류의 측정신호를 융합적으로 분석하여, 정밀한 진단을 내릴 수 있는 최초의 통합형 시스템으로 개발되었다.

7. 맺음말

정확성과 신뢰성이 개선된 국산 통합형 구조건전성 감시 시스템을 간략하게 소개하였다. 위 시스템은 우선적으로 가동중인 국내원전에 순차적으로 대체될 전망이며, 지속적인 개선과 더불어 가동 원전의 기기 안전성 향상에 기여할 것으로 판단된다. 아울러 신규원전 및 수출원전에도 적용된다면 수입대체로 인한 경제성 향상뿐만 아니라 원자력 기술의 국제적인 선도에 기여할 것으로 기대된다. **KSNVE**