

<논 문>

울진 1호 원자력발전소 원자로 내부구조물의 진동 특성

Vibration Characteristics of Reactor Internals of Ulchin-1 Nuclear Power Plant

정 승 호* · 김 승 호*

Seungho Jung and Seungho Kim

(1999년 10월 7일 접수 ; 2000년 1월 17일 심사완료)

Key Words : 원자로 내부구조물(Reactor Internals), 중성자신호(Neutron Signal), 울진 1호 원자력발전소(Ulchin-1 Nuclear Power Plant)

ABSTRACT

This paper presents the vibration characteristics of reactor internals of Ulchin-1 nuclear power plant, which are identified by using the conventional and the phase separated spectral analysis of the pressure vessel acceleration and ex-core neutron signals. These identified vibration characteristics show excellent agreement with those of Tricastin-1 nuclear power plant that is the prototype of Ulchin-1. And the trend of ex-core neutron signals has been observed during one reactor cycle. These results can be used as basic data for fault diagnosis of reactor internals.

1. 서 론

일반적인 가압경수로형 원자로의 내부구조물은 매우 복잡한 구조물로서 운전 년수의 증가에 따른 경년열화(aging) 현상과, 원자로 내부를 흐르는 고온 고압의 냉각수에 의한 유체유발진동(flow induced vibration)에 의하여 내부구조물 간에 체결력이 저하되기도 하고, 체결부품이 이탈되어 냉각재 유로를 따라 이동함으로써 노심 유로를 차단할 뿐만 아니라 타기기에 손상을 주기도 한다. 따라서, 원자로의 구조적 건전성을 확보하고 사고를 미연에 방지하기 위해서는 원자로 내부구조물의 결합을 조기에 탐지할 수 있는 감시활동이 필수적이다.

현재까지의 자료들에 의하면 원자로 내부구조물 계통의 결합 중 노심지지통(core support barrel)과 원자로 상부헤드와의 체결부위 또는 열차폐체(thermal shield)와 노심지지통의 체결부위에서 결합의 빈도가 높은 것으로 보고되고 있다^(1, 2). 이와 같이 원자로 내부구조물에 기계

적 결함이 발생되면 가장 민감하게 변화하는 것이 내부구조물의 진동특성(진동 주파수 및 진동 모드)이다. 따라서 원자로 내부구조물 진동특성을 파악하고, 그 변화를 감시함으로써 결함의 유무를 파악할 수 있다. 현재까지 알려진 바로는 노심지지통의 빔(mode) 모드 진동 특성의 변화는 주로 노심지지통 노즐부분이나 원자로 압력용기(reactor pressure vessel)의 플랜지부, 또는 결합부품인 홀 다운 스프링(hold down spring)에 결함이 있을 시 나타나며, 노심지지통 셸(shell) 모드 진동 특성의 변화는 주로 노심지지통과 노심 지지판(core baffle plate) 또는 노심지지통과 열차폐체(thermal shield)의 결합성이 약화되었을 때 나타난다⁽³⁾. 이 밖에도 핵연료 집합체의 굽힘(bending) 모드 진동특성에 변화가 있을 시에는 핵연료 집합체의 상하 지지부 건전성이나 또는 핵연료 집합체의 간격 격자(spacer grid) 결합성에 결함이 있다는 것을 의미한다.

원자로 내부구조물 진동 특성을 파악하기 위하여 가장 좋은 신호 측정방법은 내부구조물의 진동을 직접 측정하는 것이다. 그러나 이를 위해 원자로 내부구조물 상에 진동센서를 설치할 경우 원자로 내부를 흐르는 고온고압

* 정회원, 한국원자력연구소

의 냉각수로 인한 특수한 환경에 견딜 수 있는 특수한 종류의 센서가 필요하며, 시간이 경과함에 따라 방사선의 노출에 의한 센서의 기능저하가 우려된다. 그리고 원자로 내부구조물 사이의 센서 설치 공간의 제약성이 따른다. 또한 가장 큰 문제로서 설치된 센서가 파손되거나 이탈되어 일차계통을 따라 돌아다니게 되는 경우 원자로의 안정성에 큰 문제를 야기시키게 된다. 따라서 원자로 내부구조물의 진동을 직접 측정하기보다는 간접적인 방법으로 측정을 해야 한다. 내부구조물의 진동분석을 위해 이용되고 있는 신호로는 노외 중성자 신호, 노내 중성자 신호, 원자로 압력용기 상에 설치된 가속도계 신호, 원자로 입/출구 노즐 입력신호 등이 있다. 이러한 신호들을 모두 측정할 수 있다면 신뢰도 측면에서 매우 좋다고 할 수 있으나, 경우에 따라서는 측정이 용이하지 않을 때도 있다. 이러한 경우 가장 많이 이용되는 신호가 노외 중성자 신호이다. 노외 중성자 신호는 원자로의 압력용기 외부에 설치된 노외 중성자 탐지기로부터 취득되기 때문에 측정이 용이할 뿐만 아니라 모든 원자력 발전소에 설치되어 있기에 별도의 설치가 필요치 않다는 장점이 있다.

그러나 노외 중성자 신호는 핵반응에 의해 발생하는 중성자의 밀도 변화에 해당하는 신호로 내부구조물의 진동에 의한 성분 뿐만 아니라 핵 반응도의 변동성분 및 여러 가지 열수력학적 요인들의 성분도 내포하고 있기 때문에 이들 신호로부터 내부구조물의 진동 모드 변화를 정량적으로 감지해 내는 일은 그리 쉬운 일이 아니다. 하지만 열수력학적 요인에 의한 성분이 주로 0.5~2 Hz 대역에 나타나며, 내부구조물의 진동에 의한 성분은 2.0~25 Hz 대역에서 나타난다는 점에 착안하여 주파수분석을 통한 정성적 접근방법으로 진동모드를 파악할 수 있다⁽⁴⁾. 노외 중성자 신호들로부터 주파수분석에 의한 진동 모드들을 파악하는 방법은 자기 파워 스펙트럼, 상호 파워 스펙트럼, 기여도(coherence)들을 이용한 통상적인 주파수분석법⁽⁵⁾과 신호를 위상 특성에 따라 모델링하고 이로부터 위상분리 스펙트럼을 이용하는 방법⁽⁶⁾ 등이 있다.

본 연구에서는 원자로 내부구조물 결함 진단을 위한 기본적 데이터를 확보하기 위해 울진 1호 원자력 발전소의 노외 중성자 신호 및 원자력 압력용기 상에 부착된 가속도계 신호를 취득하고, 통상적인 주파수분석법 및 위상분리 스펙트럼 분석을 하였으며, 그 결과로부터 원자로 내부구조물, 특히 노심지지통의 진동 특성을 파악하였다. 그리고 파악된 진동 특성을 울진 1호기의 원형(prototype)인 Tricastin 1호기⁽⁷⁾의 진동 특성과 비교 검토하였다. 또한 한 핵주기 동안(대략 1년)의 노외 중성

자 신호를 측정 분석하여 노외 중성자 신호들의 한 핵주기 동안의 경향을 파악하였다.

2. 원자로 내부구조물의 진동 특성

원자로 내부구조물의 진동을 야기 시키는 주된 요인은 원자로 냉각재의 압력변동으로 이 압력변동이 내부구조물에 가진력으로 작용한다. 압력변동에 의한 가진력은 난류유동에 기인한 저주파대역의 랜덤(random) 가진력과, 냉각펌프의 불평형 질량이나 냉각펌프의 회전과 관련된 음향 정지파(acoustic standing wave)에 기인한 확정(deterministic) 가진력 등이 있다. 이러한 가진력에 의해 야기되는 원자로 내부구조물의 진동 모드가 원자로 내부구조물의 개략도와 함께 Fig. 1에 나와있다.

원자로 내부구조물 중 냉각재 유동에 가장 직접적인 영향을 받는 것은 노심지지통이다. 노심지지통은 상부가 원자로 압력용기와 홀 다운 스프링에 의해 고정되어 있고 하부가 자유스윙기 때문에 내부유동에 의한 가진력을 받을 경우 마치 진자처럼 진동을 한다. 이러한 진동은 내부구조물의 대표적인 진동 모드로서 노심지지통의

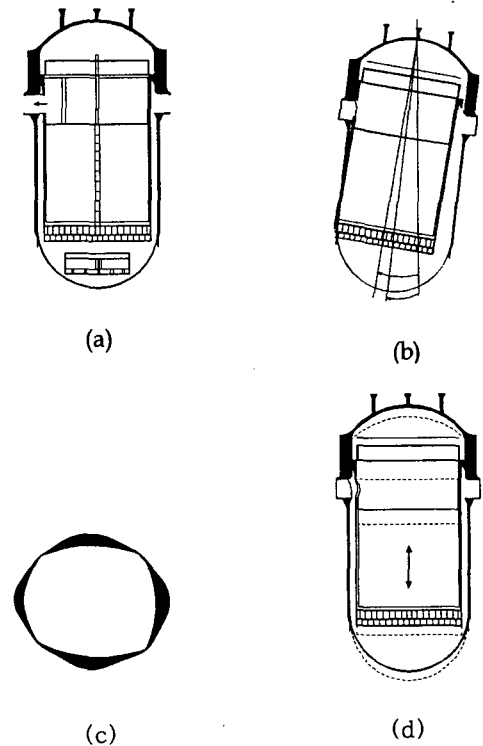


Fig. 1 Typical vibration modes of reactor internals
 (a) Schematic diagram of reactor internals
 (b) Beam mode of core support barrel
 (c) Shell mode of core support barrel
 (d) Vertical movement mode of pressure vessel

빔 모드라 부른다. 또한 노심지지통은 원통형 구조물이기 때문에 원통형 구조물에서 전형적으로 나타나는 셀 모드 진동을 한다. 셀 모드 진동 중 가장 잘 나타나는 것이 1차 셀 모드이며 때로는 2차 셀 모드가 나타나기도 한다.

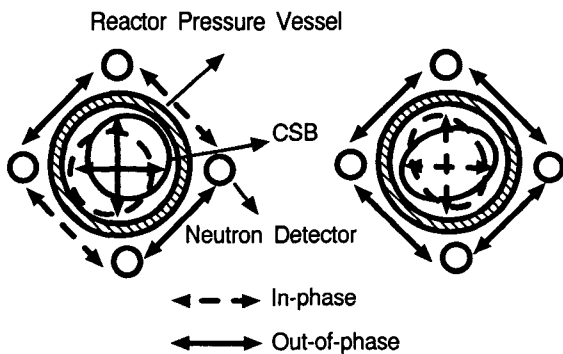
원자로 압력용기와 노심지지통 사이의 유로를 따라 내려온 냉각재는 하부 판(lower plate)를 통과하여 수직으로 올라가게 되며 이 때 하부 판은 상하방향으로의 힘을 받게되어 하부 판과 연결된 원자로 압력용기와 노심지지통 등이 상하운동을 겪는다. 이것을 상하 운동 모드라 부른다. 이외에도 내부구조물은 아니지만 내부구조물 내에서 진동을 하는 것으로 핵연료집합체가 있다. 핵연료 집합체는 단순지지(simply supported) 조건과 유사하게 노심지지통 내에 장치되기 때문에 단순 지지보와 유사한 진동을 하게 된다. 이것을 핵연료 집합체의 굽힘(bending) 모드라 부른다.

그리고 경우에 따라서는 원자로 압력용기의 흔들림(swing) 모드가 나타나기도 하는데 이 진동 모드는 압력용기가 입/출력 노즐 부근을 중심으로 흔들리는 것을 일컫는다. 이 외에도 내부구조물의 상부구조물이나 하부구조물에 의한 모드들과 상기 언급한 진동 모드들의 조화(harmonic)성분 내지는 고차 모드들이 나타날 수도 있다.

원자로 내부구조물 진동 파악에 가장 많이 사용되는 노의 중성자 신호는 원자로 압력용기 둘레에 90° 간격으로 설치된 노의 중성자 탐지기로부터 수집된다. 수집된 노의 중성자 신호로부터 원자로 내부구조물의 전형적인 진동 모드, 즉 노심지지통 빔 모드, 노심지지통 셀 모드, 핵연료 집합체 굽힘 모드를 파악하기 위하여 노의 중성자 신호들 간의 각 진동 모드에 따른 위상과 기여도 특성을 이용한다^(8,9).

노심지지통 빔 모드

노심지지통 빔 모드는 Fig. 2에서 보듯 그 진동방향에 따라



(a) CBS beam mode (b) CBS Shell mode
 Fig. 2 Phase characteristics of CBS beam and shell mode

- 인접 중성자 탐지기 신호사이의 위상이 진동방향에 따라 0° 또는 180° 이다. 그리고 기여도가 높다.
- 반대쪽 중성자 탐지기 신호사이의 위상이 180° 이다. 기여도는 높다.
- 상하의 중성자 탐지기 신호사이의 위상이 0° 이며 기여도가 매우 높다.

노심지지통 셀 모드

노심지지통 셀 모드는 Fig. 2에 나타난 진동 모양에서와 같이

- 인접 중성자 탐지기 신호사이의 위상이 180° 이며 기여도가 비교적 높다.
- 반대쪽 중성자 탐지기 신호사이의 위상이 0° 이며 기여도가 높다.
- 상하의 중성자 탐지기 신호사이의 위상이 0° 이며 기여도가 매우 높다.

핵연료 집합체 굽힘 모드

핵연료 집합체 굽힘 모드는 노심내의 핵반응도(reactivity)의 변동을 야기 시키는 요인으로

- 인접 중성자 탐지기 신호사이의 기여도가 매우 약하며
- 반대쪽 중성자 탐지기 신호사이의 위상이 180° 부근이다.

이러한 위상의 차이에 근거하여 중성자 신호의 파워 스펙트럼에 나타나는 여러 개의 봉우리들이 어느 진동 모드에 기인한 것인지를 구별할 수가 있다.

중성자 신호들 간의 위상은 직각 방향으로 설치된 4개의 중성자 탐지기로부터 수집된 중성자 신호들에 대한 각각의 APSD(auto power spectral density) (총 4개) 및 인접/대각선 방향으로의 CPSD(cross power spectral density) (총 6개)를 조사함으로써 파악된다. 그러나 이러한 방법을 통한 위상의 파악은 번거로울 뿐만 아니라 중성자 신호에서 각 위상별 성분의 기여도(이를 알기 위해서는 각 성분의 분리가 필요함)를 알 수 없다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 위상분리 스펙트럼을 이용하기도 한다.

3. 울진 1호기 원자로 내부구조물 진동분석

3.1 신호 취득 및 분석

1988년 최초 상업운전을 시작한 울진 1호기는 불란서의 Framatome에서 제작한 900MWe급 3 loop 가압경수로형 원자로로서 부분적인 열차폐체를 갖고 있으며, 원자로 압력용기, 내부구조물, 가압기 등의 진동을 측정하기 위해 Fig. 3(a)에서와 같이 원자로 압력용기 하부 노내 관통 슬리브(incore penetration sleeve)에 2개, 압력용

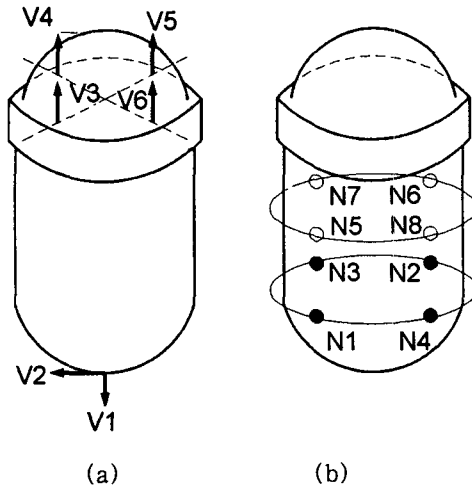


Fig. 3 Locations of accelerometers and excore neutron detectors in Ulchin-1 NPP

기 헤드의 스티드 볼트(stud bolt)상에 90° 간격으로 4개, 그리고 가압기 서지 배관(surge line)상에 2개의 가속도계가 설치되어 있다. 측정 운동방향은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 V1, V2는 횡방향, V3 ~ V6은 수직방향이다. 그리고 V7, V8은 원자로 배관과 가압기(pressurizer)를 연결하는 서지 배관의 수평부에 부착된 가속도계 신호로 V7은 수평 서지 배관 단면의 횡방향, V8은 종방향의 진동 신호이다. 발전소 사정으로 이들 신호 중 V1, V2, V3, V4, V7만을 취득하였다. 노의 중성자 탐지기는 Fig. 3(b)에서와 같이 압력용기 원주둘레에 90° 간격으로 상하 총 8개가 설치되어 있다.

원자로 내부구조물의 동특성 파악을 위해 원자로 압력용기의 가속도 신호와 노의 중성자 신호에 대해 FFT를 행하여 APSD, CPSD, 기여도 및 위상 스펙트럼을 계산하였다. 이 때의 샘플링 시간은 3.90625 msec, 주파수 해상도는 0.0625 Hz이며, 75% 중첩하여 300번 평균화하였다.

3.2 분석 결과 및 고찰

가속도 신호의 분석 결과 중 가속도 신호 V1, V3의 APSD가 Fig. 4에 나와있으며, Fig. 5~8에는 가속도 신호들간의 CPSD 및 기여도가 나와있다. 가속도 신호의 APSD, CPSD 및 기여도들을 조사한 결과, 의미가 있다고 생각되는 주파수는 3.1 Hz, 4.8 Hz, 6.2 Hz, 8.2 Hz, 13.3 Hz, 17.4 Hz, 19.9 Hz, 26.3 Hz이다. 이들 중 19.9 Hz의 날카로운 봉우리는 내부구조물의 고유 진동 모드에 의한 성분이 아니라 냉각펌프의 불평형 질량에 의한 진동성분으로 냉각펌프의 회전수인 1192 rpm (=19.87 Hz)와 일치한다.

가속도 신호들의 주파수 해석 결과들로부터 상기 주파

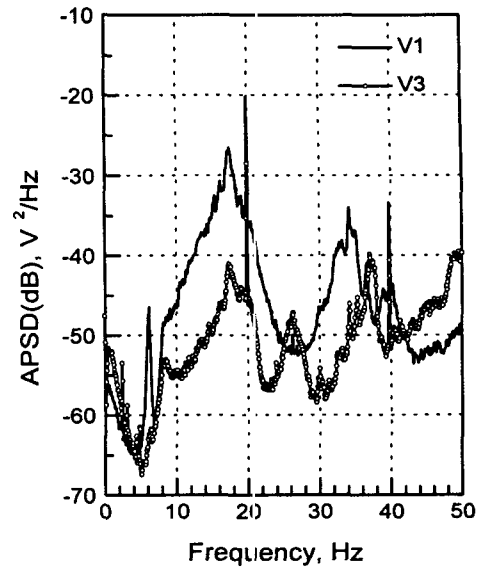


Fig. 4 APSD of V1 and V3 acceleration

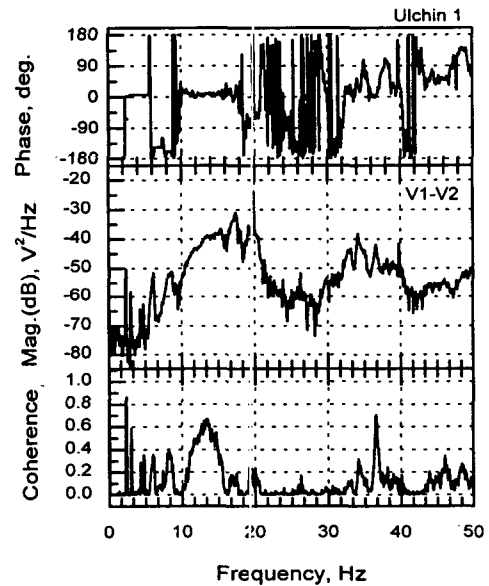


Fig. 5 CPSD and coherence of V1-V2

수들에 대한 위상과 기여도를 고찰해 보면 13.3 Hz는 APSD 상에서 단일 봉우리를 보이고 있지는 않지만 기여도에서 높게(0.6 이상) 나타나며, 동위상(in-phase, 0°), 이위상(out-of-phase, 180°)의 구분이 비교적 잘 나타난다. 즉, V1-V3가 동위상, V1-V4가 이위상 그리고 V3-V4가 이위상을 보이고 있다. 가속도계의 위치와 상호 위상의 관계를 미루어 생각할 때, 13.3 Hz는 원자로 압력용기의 흔들림 모드로 생각된다. 26.3 Hz의 경우, V3-V4가 0.95의 높은 기여도 값을 보이며 위상은 0° 정도로 동위상 경향을 보이고 있다. 그리고 수평방향 가속

도 신호 V1, V2 보다 수직방향 가속도 신호 V3, V4의 APSD에서 봉우리가 잘 나타난다. 이러한 위상 특성을 볼 때, 원자로 압력용기의 상하 운동 모드 중의 하나로 추정되지만, 이 성분이 13.3 Hz의 2차 조화(harmonic) 성분일 가능성을 배제할 수는 없다. 13.3 Hz와 26.3 Hz에 대한 위상과 기여도의 값이 Table 1과 Table 2에 나와있다. 3.1 Hz, 6.2 Hz 그리고 8.2 Hz의 경우, 가속도 신호의 정보만으로는 그 모드를 파악하기 어려우며 노의 중성자 신호 분석에서 파악되었다.

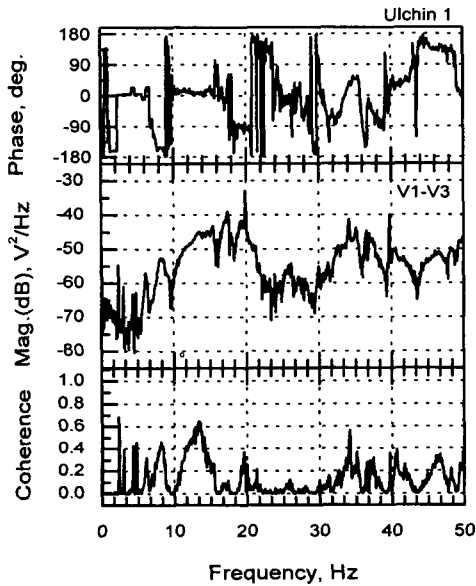


Fig. 6 CPSD and coherence of V1-V3

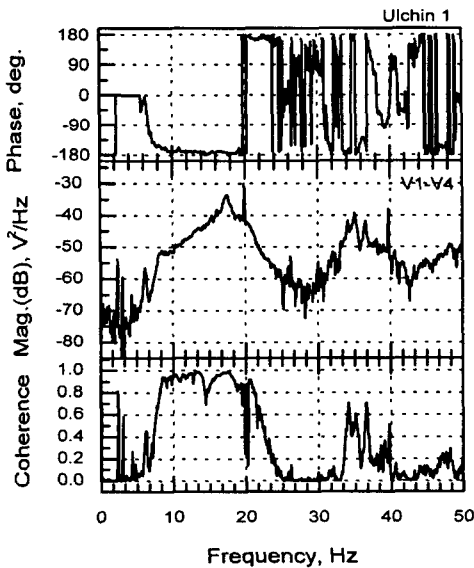


Fig. 7 CPSD and coherence of V1-V4

그리고 4.8 Hz, 17.4 Hz는 파악하지 못하였지만 위상 특성을 고려해 볼 때 17.4 Hz는 압력용기, 4.8 Hz는 내부구조물의 진동 모드로 간주된다. 또한 주목할 만한 것은 서지 배관의 가속도 신호인 V7과 수평 가속 신호인 V1, V2와의 기여도를 살펴보면 Fig. 9에서 보듯이 3~9 Hz와 19~21 Hz의 대역에서 그 값이 비교적 높게 나타

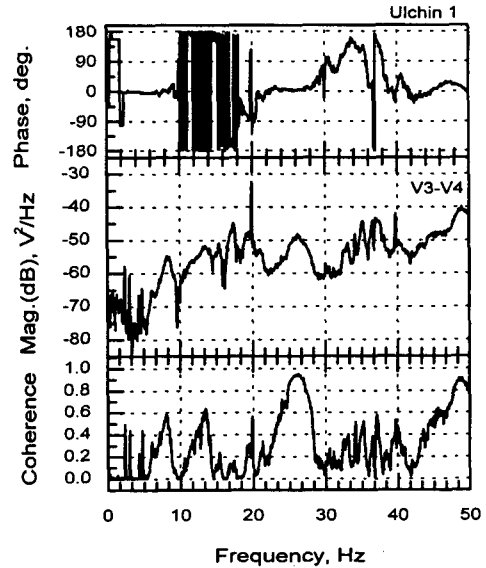


Fig. 8 CPSD and coherence of V3-V4

Table 1 Phase and coherence of vibration signals at 13.3 Hz

Signal pair	Phase	Coherence
V1 - V2	4°	0.66
V1 - V3	8°	0.65
V1 - V4	-170°	0.98
V2 - V3	0°	0.99
V2 - V4	-172°	0.64
V3 - V4	186°	0.61

Table 2 Phase and coherence of vibration signals at 26.3 Hz

Signal pair	Phase	Coherence
V1 - V2	-11°	0.17
V1 - V3	-20°	0.09
V1 - V4	-10°	0.14
V2 - V3	8°	0.30
V2 - V4	30°	0.35
V3 - V4	0°	0.95

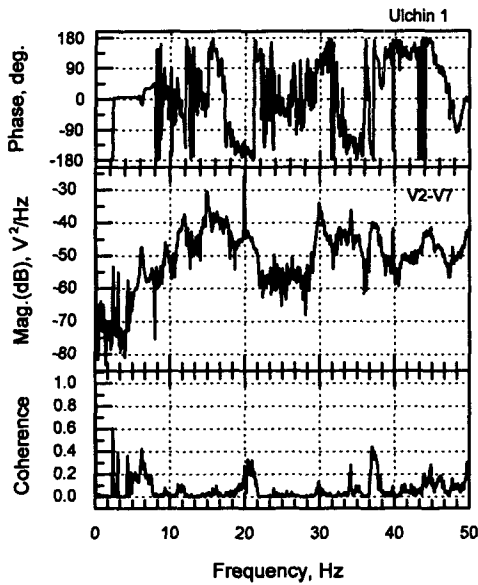


Fig. 9 CPSD and coherence of V2-V7

난다. 이 대역은 노심지지통의 진동 모드 대역으로(노의 중성자 신호 분석에서 파악됨) 결국 노심지지통의 진동이 냉각재 출력 측의 압력변동을 야기하며 이것이 서지 배관의 진동에 영향을 주는 것으로 생각된다.

노의 중성자 신호들에 대한 주파수분석 결과 중 하부 중성자 탐지기 신호 N1~N4의 APSD 및 CPSD가 Fig. 10~12에 나와있으며, 상부 중성자 신호 N1과 하부 중성자 신호 N5의 CPSD 및 기여도가 Fig. 13에 나와있다. APSD 결과들을 살펴보면 3.1 Hz, 6.2 Hz, 8.2 Hz, 13.3

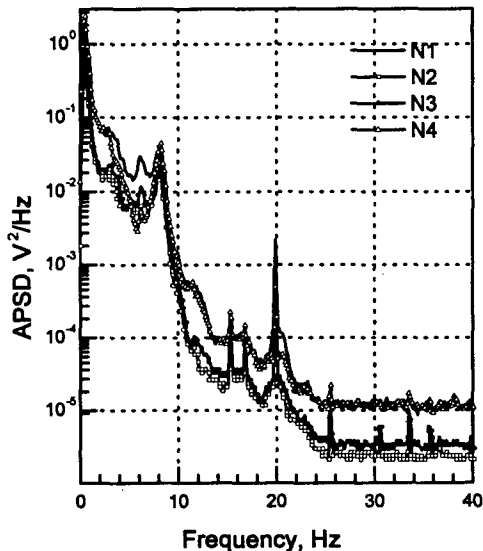


Fig. 10 APSD of neutron signals

Hz, 17.4 Hz, 20.6 Hz에 봉우리가 나타난다. 여기서 특이한 점으로 APSD가 N1, N4와 N2, N3의 APSD가 전 대역에 걸쳐 그 값에 일정한 차이를 보이고 있다. 이것은 노심지지통 주위에 부분적으로 설치된 열차폐체의 영향으로 생각된다. 즉 N1, N4 채널 쪽에는 열차폐체가 없고 N2, N3 열차폐체가 설치되어 있음으로 인하여 중성자 차폐 두께에 차이가 있기 때문이라 생각된다. 이러한 차이는 상부의 채널들에서도 확인된다.

위의 봉우리 중 3.1 Hz, 6.2 Hz, 8.25 Hz, 20.6 Hz에 대

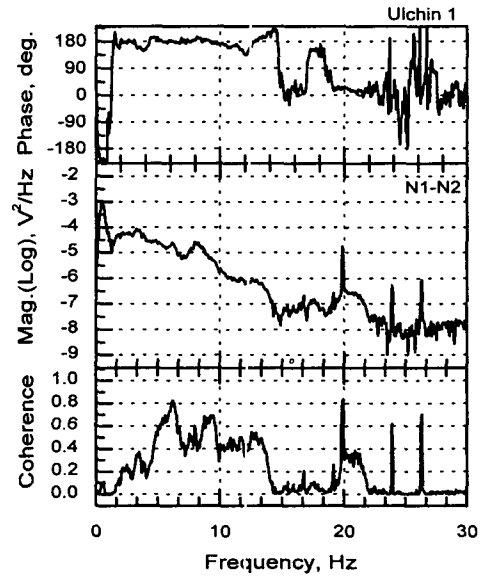


Fig. 11 CPSD and coherence of N1-N2

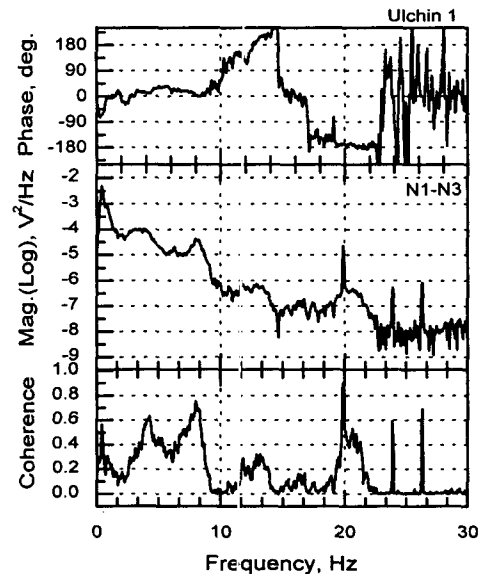


Fig. 12 CPSD and coherence of N1-N3

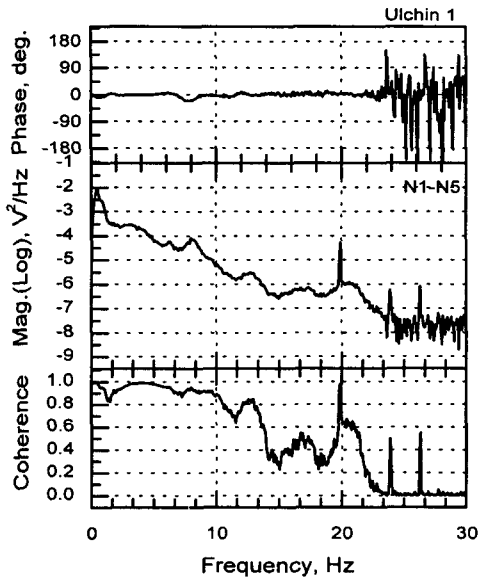


Fig. 13 CPSD and coherence of N1-N5

한 위상과 기여도를 조사하여 정리하면 Fig 14와 같다. 이 결과를 내부구조물의 전형적인 진동모드의 특징에 비추어 보면 3.1 Hz와 6.2 Hz는 핵연료 집합체의 진동모드이고, 8.2 Hz는 노심지지통 빔 모드, 20.6 Hz는 노심지지통 셸 모드이다. 여기서 노의 중성자 신호들의 APSD, CPSD에서 3 Hz 부근의 봉우리가 너무 완만하여 가속도 신호 분석 결과에서 나타난 값 3.1 Hz를 참조하였다. 또한 상기 진동 모드들의 특성상 구조물 상부와 하부가 동위상 특성을 보여야 하는데, 이러한 특징은 상부 중성자 신호 N1과 하부 중성자 신호 N5의 위상을 조사한 결과

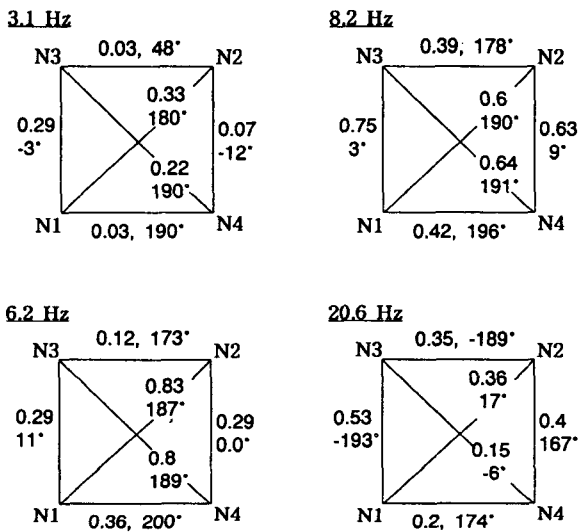


Fig. 14 Phase and coherence of neutron signals at vibration resonance frequencies

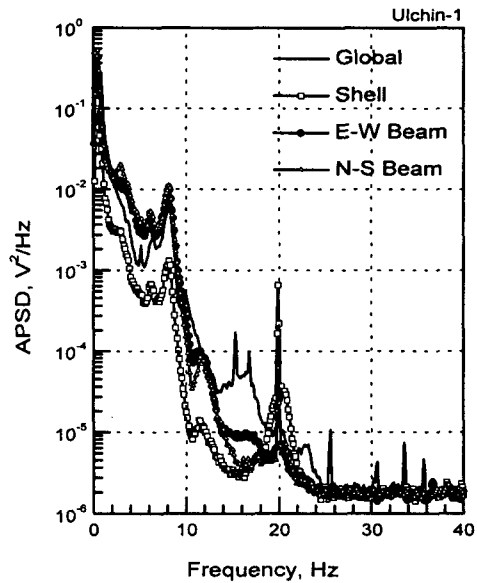


Fig. 15 Separated APSDs of neutron signals

에서 0 Hz에서 22 Hz까지의 전 대역에서 동위상을 보이고 있다는 것으로 입증된다.

이상의 분석 결과를 좀 더 명확하게 알아보기 위하여 하부의 노의 중성자 신호 N1, N2, N3, N4에 대한 위상 분리 스펙트럼 분석 결과인 Fig. 15을 살펴보면, 0~2 Hz 대역과 13~18 Hz 대역에서는 전역(global) 성분이, 2~9.5 Hz 대역에서는 노심지지통의 빔 모드 성분이, 20.5 Hz 부근에서는 노심지지통의 셸 모드 성분이 두드러지게 나타난다. 이것은 앞서의 통상적인 주파수 분석 결과와 같은 결과를 보여주고 있다.

원자로 압력용기 가속도 신호의 분석결과와 노의 중성자 신호의 분석결과를 비교하여 보면 원자로 내부 구조물의 진동이 노의 중성자 신호나 가속도 신호 모두에서 감지되나, 노의 중성자 신호에서는 노심지지통의 빔 모드 및 셸 모드 성분이, 가속도 신호에서는 원자로 압력용기의 흔들림 및 상하 운동 성분의 파악이 용이함을 알 수 있다. 특히 노심지지통의 셸 모드 성분은 원자로 압력용기의 가속도 신호에서 거의 감지되지 않으며 노의 중성자 신호에서 잘 감지되고 있다. 또한 핵연료 집합체의 진동 모드 성분들은 가속도 신호에서 봉우리들이 쉽게 구분되나 노의 중성자 신호에서는 완만한 봉우리를 보인다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 한 종류의 신호만으로 원자로 내부 구조물의 진동 특성을 파악하기엔 불완전하기 때문에 가능하면 여러 종류의 신호를 이용하는 것이 바람직하다.

이상의 분석결과와 외국문헌에 발표된 Tricastin 1호기

Table 3 Comparison of vibration resonance frequencies between Ulchin-1 and Tricastin NPP (N/A : not available)

Vibration mode	Ulchin-1	Tricastin ⁽¹⁾
FA 1st bending	3.1 Hz	3.2 Hz
FA 2nd bending	6.2 Hz	6.0 Hz
CSB beam	8.2 Hz	8.2 Hz
CSB shell	20.6 Hz	20 Hz
RPV swing	13.3 Hz	N/A
Unknown	26.3 Hz	N/A
Unknown	4.8 Hz	N/A
Unknown	17.4 Hz	N/A

(울진 1호기의 원형)의 진동특성을 비교해 보면 큰 차이가 없음을 알 수 있다(Table 3 참조).

4. 노외 중성자 신호의 경향 분석

중성자 신호는 측정의 용이성 때문에 원자로 내부구조물의 진동 분석 및 파악에 흔히 이용되는 신호이지만 내부구조물의 진동에 의한 성분뿐 만 아니라 핵 반응도의 변동성분 및 여러 가지 열수력학적 요인들의 성분도 내포하고 있기 때문에 이러한 요인들의 변동이 발생하면 그 영향이 중성자 신호에 반영되어 나타난다. 특히 원자로의 운전 시간의 경과에 따라 냉각수에 용해되어 있는 붕소의 농도가 감소하게 되고 이러한 붕소 농도의 변화는 중성자 신호에 큰 영향을 미친다. 이와 같은

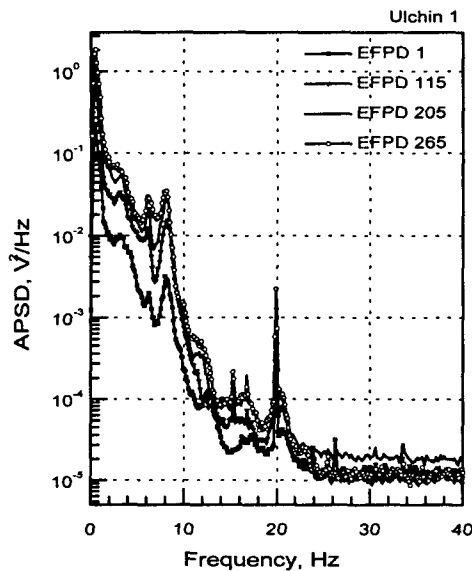


Fig. 16 Trend of neutron signal, N1

영향, 특히 붕소 농도의 영향을 파악하기 위하여 대략 3개월 간격으로 한 핵주기 동안 취득된 노외 중성자 신호들의 분석하여 원자로 운전시간의 변화에 따른 중성자 신호의 변화를 살펴보았다. 노외 중성자 신호 N1의 경향을 보여주는 Fig. 16을 살펴보면 운전시간(effective full power days, EFPD)이 증가함에 따라 0~20 Hz 대역의 APSD 크기가 전반적으로 증가하고 있으며 이것은 붕소 농도의 감소에 의한 영향이다. 이러한 이유로 노외 중성자 신호 자체만으로는 원자로 내부구조물 진동의 크기, 즉 진폭에 관한 정보를 파악 할 수는 없다. 그러나 앞서 파악된 노심지지통의 빔 및 셸 모드, 그리고 핵연료집합체의 굽힘 모드 주파수는 큰 변동이 없었다. 따라서 노외 중성자 신호가 비록 핵 반응도의 변동성분 및 여러 가지 열수력학적 요인들의 변동 성분도 내포하고 있다고 할지라도 원자로 내부구조물의 고유 진동수를 파악함에 있어 매우 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 울진 1호 원자력 발전소의 노외 중성자 신호 및 원자로 압력용기 상에 부착된 가속도계 신호를 취득하고, 통상적인 주파수분석법 및 위상분리 스펙트럼 분석을 수행하여 원자로 내부구조물, 특히 노심지지통의 진동 특성을 파악하였으며, 한 핵주기 동안의 노외 중성자 신호를 측정하여 그 경향을 파악하였다.

본 연구의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 울진 1호 원전의 원자로 내부구조물의 진동 주파수는
 핵연료 집합체 굽힘 모드 : 3.1 Hz, 6.2 Hz
 노심지지통 빔 모드 : 8.2 Hz
 노심지지통 셸 모드 : 20.6 Hz
 원자로 압력용기 흔들림 모드 : 13.3 Hz

로 파악되었으며, 이 외에도 명확히 확인되지 않은 진동 모드로 26.3 Hz, 4.8 Hz, 17.4 Hz가 있다.

(2) 원자로 내부구조물의 진동이 노외 중성자 및 가속도 신호에서 모두 감지되나, 노외 중성자 신호에서는 노심지지통 빔 및 셸 모드가, 가속도 신호에서는 원자로 압력용기 진동 모드의 파악이 용이하다. 특히 노심지지통 셸 모드는 가속도 신호에서 잘 감지되지 않으며 노외 중성자 신호에서 잘 감지된다.

(3) 한 핵주기 동안의 노외 중성자 신호의 경향을 살펴 본 결과, 원자로 운전시간의 경과에 따라 냉각수 내의 붕소 농도 감소로 인하여 노외 중성자 신호의 APSD에서 0~20 Hz 대역의 크기가 전반적으로 증가하지만 노심지지통의 빔 및 셸 모드, 그리고 핵연료집합체의 굽힘 모드 주파수는 큰 변동이 없었다

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 1978, Nuclear Power Experience, Vol. PWR-2 II, Reactor Internals.
- (2) Kryter, R. C. et al., 1978, "US Experience with In-Service Monitoring of Core Barrel Motion in PWRs using Ex-Core Neutron Detectors," Proc. Int. Conf. Vibration in Nuclear Plants, Keswick, U.K., p. 36.
- (3) W. Bastl et al., 1985, "The Influence of Noise Diagnostic Techniques on the Safty and Availability of Nuclear Power," Progress Nuclear Energy, Vol. 15, pp. 513~524.
- (4) Trenty, A. et al., 1991, "SINBAD, A Data Base

for PWR Internals Vibratory Monitoring," SMORN VI., Gatlinburg, Tennessee, USA., pp. 21.01~21.12.

- (5) E. Oran Brigham, 1988, The FAST Fourier Transform and Its Applications, Prentice-Hall.

- (6) Seungho Jung and Tae-Ryong Kim, 1997, "Phase Separation Algorithm for Ex-core Neutron Signal Analysis," J. of the Korean Nuclear Society, Vol. 29, No. 5, pp. 399~405.

- (7) D. N. Fry et al., 1983, "Use of Neutron Noise for Diagnosis of In-Vessel Anomalies in Light-WEater Reactors," NUREG/CR-3303.

- (8) Wach, D. and Sunder, R., 1977, "Improved PWR Neutron Noise Interpretation based on Detailed Vibration Analysis," Prog. Nucl. Energy, Vol. 1, pp. 309~322.

- (9) Bernald, P. et al., 1977, "Neutron Noise Measurements on Pressurized Water Reactors," Prog. Nucl. Energy, Vol. 1, pp. 333~351.