

영광 3&4 호기의 원자로잡음신호 해석

°박진호ⁱ, 류정수ⁱⁱ, 심우건ⁱⁱⁱ, 김태룡^{iv}, 박종범^v

Reactor Noise Analyses in Yonggwang 3&4 Nuclear Power Plants

°Jinho Parkⁱ, Jeong-Soo Ryuⁱⁱ, Woo-Gun Simⁱⁱⁱ, Tae-Ryong Kim^{iv}, and Jong-Beom Park^v

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 signals have been performed to monitor the vibration modes of reactor internals such as fuel assembly and Core Support Barrel in Yonggwang 3&4 Nuclear Power Plant. A real time mode separation technique have been developed and applied for the analyses. It has been found that the first vibration mode frequency of the fuel assembly was around 2.5 Hz, the beam and shell mode frequencies of CSB(Core Support Barrel) 8 Hz and 14.5 Hz, respectively. Also the analyses data base have been constructed for the continuous monitoring and diagnose of the reactor internals.

1. 서 론

원자로 잡음이란 원자로의 정상상태 출력운전 중 원자로 계통의 제어, 보호 및 감시 시스템으로부터 출력되는 신호의 시간평균치(DC 성분)에 수반되는 변동성분(AC 성분)을 말한다. 이러한 변동 성분에는 일반적으로 원자로 계통의 핵적, 열수력적, 그리고 구조동역학적인 정보가 포함되어 있다. 따라서 원자로 잡음신호를 통계적으로 처리하여, 시간 및 주파수 영역에서 적절한 분석을 수행함으로써 원자로 계통의 이상상태를 감시 및 진단할 수가 있다. 이러한 제반 분석 활동을 원자로잡음해석이라고 부른다^[1]. 원자로잡음해석의 장점은 원전의 정상운전에 전혀 지장을 주지 않으면서, 기존에

설치되어 있는 각종 센서 및 계측기를 이용하여 발전소의 운전상태 및 결함을 조기에 감시·진단할 수 있다는 것이다. 원자로잡음해석의 응용분야는 매우 다양하며, 그 대표적인 예를 살펴보면 다음과 같다:

- 원자로 내부 핵적 변동요인의 측정
- 원자로 계통의 열수력적 인자의 변동 탐지
- 원자로 계통의 구조건전성 및 계측계통의 감시 및 진단 등.

원자로잡음해석을 이용함으로써 발전소의 예방정비 및 보수가 가능하여 경제적인 이득뿐만 아니라 원자력발전소의 안전성 향상에도 크게 기여할 수가 있다.

원자로의 진동현상과 관련된 잡음신호로서는 노외중성자 잡음신호, 노내중성자 잡음신호, 원자로 압력용기 외부 표면의 가속도계 신호, 원자로 계통의 압력 변동신호 등이 있다. 특히 노외중성자 잡음신호는 원자로 내부구조물 중에서 핵심 부분

- i) 정희원, 한국원자력연구소 신형원자로개발단
- ii) 한국원자력연구소 하나로이용연구단
- iii) 한남대학교 기계공학과
- iv) 정희원, 전력연구원 원전설비지원그룹
- v) 전력연구원, 중소기업지원그룹

인 노심지지원통(CSB:Core Support Barrel))의 진동상태를 감시·진단하는데 이용되고 있으며, 노심지지원통에 대한 모우드 해석결과의 검증수단으로 응용되기도 한다^[2].

본 고에서는 영광 3&4 호기 원자로 내부구조물의 진동현상과 관련된 원자로잡음해석에 대하여 기술하고자 한다.

2. 노외중성자 잡음신호 분석 기법

2-1 기존의 주파수 해석 기법

일반적인 가압경수형 원자로 내부구조 및 노외중성자 검출기의 위치가 Figure 1 및 Figure 2에 나와 있다. 노외중성자 신호는 본래 노심보호계통의 입력신호로 사용되고 있으며, 또한 원자로 내부구조물 진동감시 시스템의 입력신호로 이용되고 있다. 센서의 위치는 Figure 2에서 보는 바와 같이 원자로 압력용기 외부 둘레에 동일 평면상에서 약 90° 간격으로 설치되어 있으며, 노심의 상부와 하부 또는 상부, 중심부, 하부에 각각 4 개씩 설치되어 있다. 노외중성자 잡음은 그 특성에 따라서 핵적, 열수력적, 기계적 운동, 구조동역학적 요인 및 기타 잡음 등으로 나누어지며, 그 중에서 구조동역학적 요인으로는 원자로 압력용기의 흔들림 운동, 핵연료 집합체의 진동, 노심지지원통(CSB)의 진동 등이 있다.

노외중성자의 잡음신호를 적절히 신호처리 하면 핵연료 집합체 및 노심지지원통의 진동과 관련된 부분을 추출해 낼 수가 있으며, 이를 통하여 원자로 내부구조물의 동적 결합을 감시·진단할 수가 있다. 여기서는 노외중성자 신호를 이용하여 원자로 내부구조물의 진동성분을 추출하는 기존의 주파수 방법에 대하여 논의하고 최근에 개발한 실시간 진동모우드 분리 방법에 대하여 서술한다.

원자로의 정상상태 출력운전 시 노외중성자 신호는 stationary 랜덤 신호로 가정된다^[3]. 따라서 FFT(Fast Fourier Transform) 기법을 이용한 주파수 분석을 수행함으로써 노외중성자 잡음에 포함되어 있는 원자로 내부구조물의 진동 성분을 분리하여 추출할 수가 있다. 이때 사용되는 주파수 분석 파라미터들로서는,

- APSD(자기 파워스펙트랄 밀도함수)
- CPSD(상호 파워스펙트랄 밀도함수)
- Phase
- Coherence

등이 있다. 여기서 APSD는 측정된 채널신호의 단위 주파수별 파워(mean square)를 중심 주파수별로 나타낸 것으로서 peak 주파수의 유무를 통하여 주요 성분을 판단한다. CPSD는 동시에 측정된 두 채널신호간의 상관관계를 크기 및 phase로 구분하여 주파수 성분별로 표현한 것으로서 복소수 형태로 나타난다. Phase는 동시에 측정된 두 채널사이의 시간영역에서의 지연관계를 표현한 것으로서 그 값이 0° 인 경우 in-phase, 180° 인 경우 out-of-phase로 정의한다. 마지막으로 Coherence는 동시에 측정된 두 채널신호사이의 선형적인 상관관계를 무차원화 한 것으로서 두 신호사이에 선형적인 인과관계가 전혀 없을 경우에는 0, 인과관계가 완전하거나 두 신호가 동일한 경우에는 1의 값을 갖는다. 즉 두 신호간의 CPSD를 각 신호의 APSD로 무차원화 한 개념이다^{[4][5]}.

노외중성자 신호분석을 이용하여 알 수 있는 원자로 계통의 진동모우드로는 원자로 압력용기의 흔들림 모우드, 노심지지원통의 beam 및 shell 진동 모우드, 핵연료집합체의 bending 모우드 주파수 등이 있으며, 제어봉의 진동 모우드 및 원자로냉각재 펌프에 의한 압력가진 주파수등도 간접적으로 확인할 수가 있다. 특히 원자로 내부구조물과 관련한 노심지지원통의 beam 및 shell 진동 모우드 그리고 핵연료집합체의 bending 모우드는 다음과 같은 방법을 이용하여 확인된다.

(1) 노심지지원통의 beam 진동 모우드

동일한 APSD peak 주파수를 갖는 인접한 노외중성자 신호사이의 phase가 0° 또는 180° 이면서 coherence가 높다. 반대편 노외중성자 신호사이의 phase는 항상 180° 이고 또한 coherence가 높다. 아울러 상하의 노외중성자 신호사이의 phase가 0° 이면서 coherence가 높다(Figure 3).

(2) 노심지지원통의 shell 진동 모우드

동일한 APSD peak 주파수를 갖는 인접 중성자 탐지기 신호사이의 phase가 180° 이면서 coherence가 비교적 높다. 반대쪽 중성자 탐지기 신호사이의 phase가 항상 0° 이면서 coherence가 높다. 그리고 상하의 중성자 탐지기 신호사이의 phase가 0° 이며 coherence가 매우 높다(Figure 3).

(3) 핵연료 집합체 bending 모우드

핵연료 집합체 bending 모우드는 노심내의 reactivity 의 변동 요인으로 작용하며, 노심의 가장자리에 있으면서 노외중성자 검출기에 인접한 집합체들의 bending 모우드가 탐지된다. 따라서 중성자 탐지기 신호사이의 phase 관계 및 coherence 가 매우 약하게 나타나며, 모우드 성분의 정확한 분석을 위해서는 노내중성자 신호를 함께 이용할 필요가 있다.

이와 같이 phase의 차이 및 coherence 값의 상대적인 크기에 근거하여 중성자 신호의 APSD에 나타나는 peak들을 분석하면 원자로 내부구조물의 주요 진동 모우드를 구별해 낼 수가 있다. 그러나 원전에 따라서 노심지지원통(CSB)의 beam 진동 모우드 성분 및 핵연료 집합체의 고차 bending 모우드 주파수가 근접하는 경우에는 앞에서 서술한 phase 및 coherence관계가 성립되지 않을 수가 있다^[6]. 그리고 노외중성자 잡음에는 원자로 내부구조물의 진동성분뿐만 아니라 다른 여러 요인들도 포함되어 있다. 따라서 최근에는 노내중성자 잡음과 압력변동신호 그리고 원자로 계통의 가속도신호등을 동시에 분석함으로써 노외중성자 잡음신호 분석 결과를 보완하고 있다.

2-2 실시간 진동모우드 분리 기법

신호분석 이론에 의하면, 어떤 시스템으로부터 n 개의 비상관 신호를 동시에 측정함으로써 n 개의 시스템 모우드를 알 수 있다^[7]. 이 점을 근거로 하여 원자로 압력용기의 둘레에 약 90° 간격으로 설치된 4 개의 노외중성자 신호를 동시에 측정, 분석함으로써 노외중성자 신호를 4 개의 독립된 모우드 성분으로 모델링 할 수가 있다. 따라서 앞에서 정의한 노심지지원통의 beam 및 shell 진동모우드 성분의 phase 특성에 근거하여, 동일평면에 위치하는 4 개의 노외중성자 신호를 다음과 같이 모델링 한다^[8].

$$x_1(t) = g(t) + b_1(t) + b_2(t) + s(t) \quad (1)$$

$$x_2(t) = g(t) - b_1(t) + b_2(t) - s(t) \quad (2)$$

$$x_3(t) = g(t) - b_1(t) - b_2(t) + s(t) \quad (3)$$

$$x_4(t) = g(t) + b_1(t) - b_2(t) - s(t) \quad (4)$$

여기서 $g(t)$, $b_1(t)$, $b_2(t)$, $s(t)$ 는 각각 global 모우드 성분(모든 방향으로 in-phase를 보이는 성분), 노심지지원통의 beam-1 진동모우드 성분, beam-2 진동모우드 성분, 그리고 노심지지원통의

shell 진동모우드 성분을 의미한다(Figure 4). 여기서 측정값 $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$, $x_4(t)$ 를 이용하여 각각의 분리된 모우드 성분을 추출할 수가 있다. 즉, 식 (1)~식 (4)에서 각 모우드 성분에 대하여 연립방정식을 풀면,

$$g(t) = \frac{1}{4} \{ x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) + x_4(t) \} \quad (5)$$

$$b_1(t) = \frac{1}{4} \{ x_1(t) - x_2(t) - x_3(t) + x_4(t) \} \quad (6)$$

$$b_2(t) = \frac{1}{4} \{ x_1(t) + x_2(t) - x_3(t) - x_4(t) \} \quad (7)$$

$$s(t) = \frac{1}{4} \{ x_1(t) - x_2(t) + x_3(t) - x_4(t) \} \quad (8)$$

로 표현된다. 여기서 각 신호에 대한 FFT 결과를

$$G(f) \equiv F[g(t)] \quad (9)$$

$$B_1(f) \equiv F[b_1(t)] \quad (10)$$

$$B_2(f) \equiv F[b_2(t)] \quad (11)$$

$$S(f) \equiv F[s(t)] \quad (12)$$

과 같이 정의하면, 분리된 모우드 성분들의 APSD 는 아래와 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$P_{gg}(f) = G(f) \times G^*(f) \quad (13)$$

$$P_{b_1b_1}(f) = B_1(f) \times B_1^*(f) \quad (14)$$

$$P_{b_2b_2}(f) = B_2(f) \times B_2^*(f) \quad (15)$$

$$P_{ss}(f) = S(f) \times S^*(f) \quad (16)$$

이 기법은 디지털 신호처리를 탑재한 실시간 휴대용 원자로잡음신호분석시스템에 내장하여 현장에서 측정과 동시에 분석을 완료하였다.

3. 영광 3&4 호기의 원자로잡음 해석

영광 원자력 3&4 호기는 한국원자력연구소가 미국 CE사와 공동으로 설계하고 한국전력(주)이 건설한 1000 MWe 급 4 loop 가압경수로형 원자로(PWR, Pressurized Water Reactor) 이다. 영광 3&4 호기는 국내 기술진에 의하여 최초로 설계된 한국형 표준원자로로서, 울진 3,4,5,6 및 영광 5,6,7,8 호기의 원형로(proto type)가 된다.

영광 3&4 호기의 노외중성자 및 금속파편 탐지용 가속도계 신호(100% 정상상태 출력 조건)에 대한 주파수 분석을 수행(1997년 4월, 1998년 9월 및 1999년 3월)하여 데이터베이스화 하였다^[9]. Figure 5는 센서의 설치위치를 보여준다.

신호의 측정은 발전소 주 제어실의 신호출력 단자를 통하여 수행하였으며, 신호분석은 한국원자력연구소에서 자체 개발한 실시간 휴대용원자로잡음 신호분석시스템을 이용하였다^[10]. 이때 영광 3&4 호기에서는 현장사정으로 인하여 노내중성자 및 원자로 계통의 압력변동 신호는 측정하지 못하였다.

주파수 분석을 수행하여 얻어진 원자로 노심상부(UP1, UP2, UP3, UP4)의 노외중성자 신호들의 APSD, coherence 및 phase 결과가 Figure 6에서 Figure 9까지에 나와 있다. 전체적으로 APSD의 peak를 살펴보면 3,4 호기 모두에서 2.5 Hz, 8 Hz 에서 두드러진 peak를 보이며, 5 Hz 및 14.5 Hz 근방에서 완만한 peak의 존재를 확인할 수 있다. APSD 만으로는 각 peak 주파수와 원자로 내부구조물의 진동 모드와의 상관관계를 파악할 수가 없다. 따라서 coherence 및 phase를 통하여 각 신호사이의 선형관계를 조사함으로써, 각 peak 주파수 성분들과 원자로 내부구조물 진동모드와의 상관관계를 알아 낼 수가 있다.

먼저, 8 Hz peak 주파수의 경우에는 서로 맞은편에 있는 신호(UP1과 UP4, UP2와 UP3)간의 coherence가 매우 높으면서 phase가 180°이며, 인접하고 있는 신호들 사이의 경우(UP1과 UP2, UP3과 UP4)에는 상대적으로 coherence가 낮고 phase가 0° 또는 180° 임을 확인할 수가 있다. 따라서 8 Hz peak 성분은 원자로 내부구조물 중 노심지지원통(Core Support Barrel)의 beam 모드 성분임을 추정할 수가 있다.

Figure 7 및 Figure 8로부터 약 14.5 Hz에서 미약한 peak가 존재함을 볼 수 있으며, 여기서 서로 맞은 편에 있는 신호(UP1과 UP4, UP2와 UP3)간의 coherence가 약간 높게 나타나면서 phase가 거의 0° 임이 확인된다. 따라서 이 성분은 노심지지원통의 shell 모드 주파수임을 추정할 수 있다.

위의 두 결과는 영광 3&4 호기 원자로 내부구조물에 대한 유한요소 해석 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다^[2].

Figure 10은 노심지지원통에 대한 실시간 진동모드 분리기법을 적용한 결과를 보여준다. 노심지지원통의 beam 및 shell 진동모드를 한 개의 그림만으로 상세하게 관찰할 수가 있다. 특히 기존의 주파수 분석 방법에 비하여 shell 모드의

분리 능력이 뛰어난을 볼 수가 있다.

2.5 Hz peak 성분의 경우에는 노외중성자 신호만으로는 정확히 판단하기는 어려우나, 일반적으로 핵연료 집합체의 beam 모드의 경우 노심지지원통의 beam 모드 주파수보다 훨씬 낮으며 노외중성자 신호들 간의 coherence가 낮게 나타나므로, 핵연료 집합체의 beam 모드 성분일 것으로 추정된다. 이는 기하학적 형상 및 지지조건 상으로 큰 차이가 없는 울진 1&2 호기의 핵연료 집합체 1 차 bending 모드 성분이 3 Hz 임을 감안하면 적절한 판단이라 하겠다^[11].

Figure 11 및 Figure 12는 최근 3 년간의 영광 3 및 영광 4 호기의 노외중성자 APSD의 추이를 보여준다. 전체적으로 주요 peak 성분들의 변화가 거의 없는 것으로 보아 현재(1999년 3월)까지 원자로 내부구조물의 동특성 이상 징후는 없는 것으로 판단된다.

4. 결론

영광 3&4 호기의 노외중성자 신호를 이용한 원자로잡음해석을 수행하였으며, 이에 대한 데이터베이스를 구축하였다. 핵연료 집합체의 기본 bending 모드 주파수가 약 2.5 Hz, 노심지지원통(CSB)의 beam 모드 및 shell 모드 주파수는 각각 8 Hz, 14.5 Hz인 것으로 나타났다.

5. 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업으로 수행되었기에 감사의 뜻을 포함합니다.

6. 참고 문헌

- [1] J. A. Thie, Power Reactor Noise, ANS, La Grange park, Illinois, 1981
- [2] 박진호 외 4인, "영광 3&4 호기 원자로내부구조물의 동특성 해석 및 검증," 한국원자력학회 '99추계학술발표회 논문집 10A-212, 1999
- [3] ANSI/ASME OM Part 5-1981, Inservice Monitoring of Core Support Barrel Axial Preload in PWR, 1981
- [4] D. E. Newland, An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis, Longman Scientific & Tech., 3rd ed., 1993
- [5] E. O. Brigham, The Fast Fourier Transform and its Applications, Prentice-Hall Editions, 1988
- [6] F. J. Sweeney, "Utility Guidelines for Reactor Noise Analysis," EPRI NP-4970, 1987

- [7] S. U. Pillai, Array Signal Processing, Springer-Verlag New York Inc., 1989
- [8] 김태룡 외 3 인, 중성자 신호를 이용한 원자로 내부구조물 진단기술에 관한 연구, 한국원자력 연구소 연구보고서(KAERI/RR-1386/93), 1994
- [9] 박진호 외 7 인, "원자로 잡음을 이용한 결함진단 기술개발," KAERI/RR-1908/98, 한국원자력연구소
- [10] Jin-Ho Park et al, "Development of a Portable Reactor Noise Analysis System (RENAS) for the Vibration Monitoring of Reactor Internals," *International Conference On Nuclear Engineering (ICONE-8)* by ASME, Baltimore, USA, ICONE-8453, 2000
- [11] 김태룡 외 3 인, "울진 1&2 호기의 중성자 잡음신호 분석," 한국소음진동공학회 1998년도 춘계 학술대회논문집, pp. 582-589, 1998

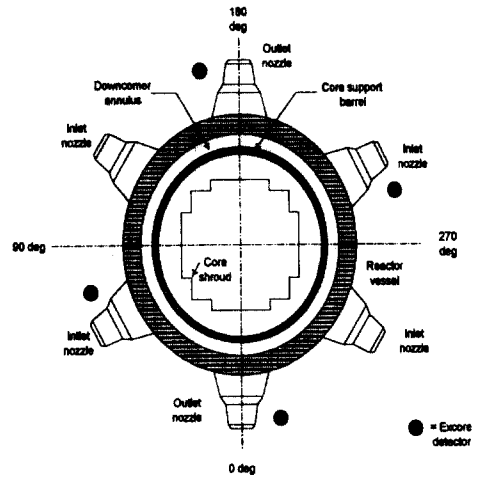


Figure 2 Ex-core Neutron Detectors of PWR Reactor

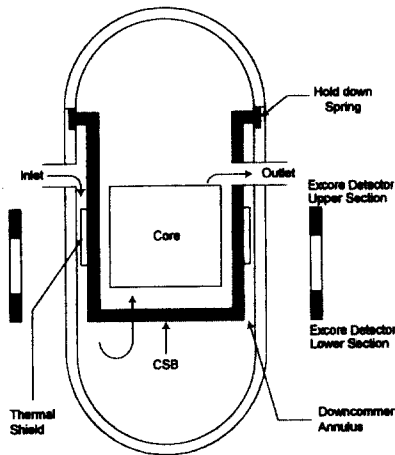


Figure 1 CSB(Core Support Barrel) of Reactor Internal

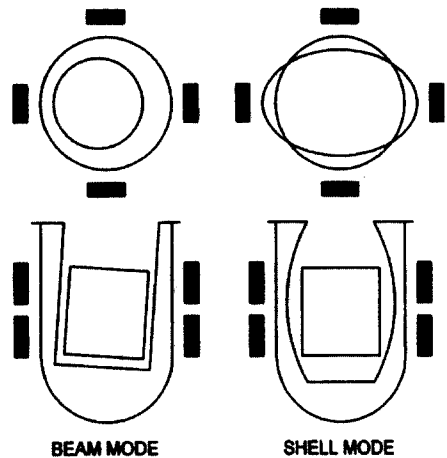
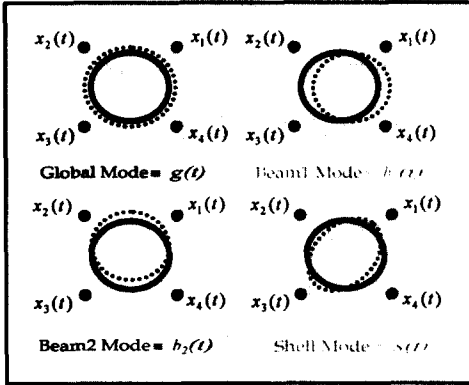


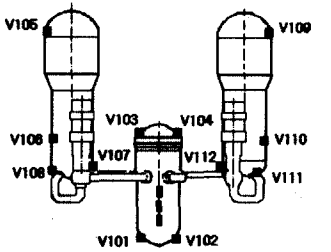
Figure 3 CSB Vibration Modes

원자로 Core Supported Barrel 의 진동 Mode



($x_i(t)$: i 번째 중성자 신호)

Figure 4 Model of CSB Vibration Modes



■ Accelerometer
● Neutron Detector

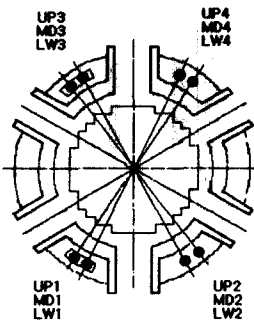


Figure 5 Sensor Locations outside of Reactor System

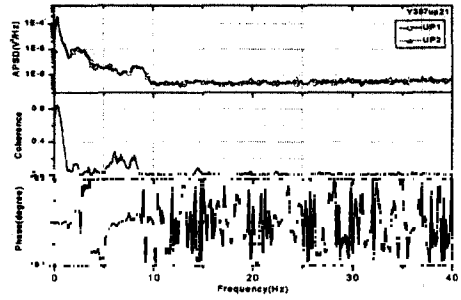


Figure 6 Frequency Analysis of Ex-core Neutron Signals of UP1 & UP2

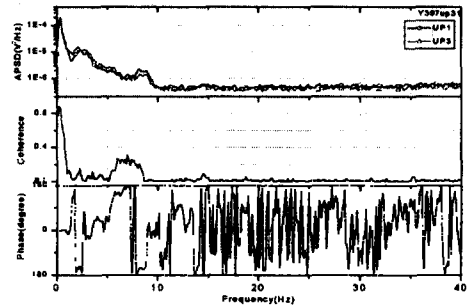


Figure 7 Frequency Analysis of Ex-core Neutron Signals of UP1 & UP3

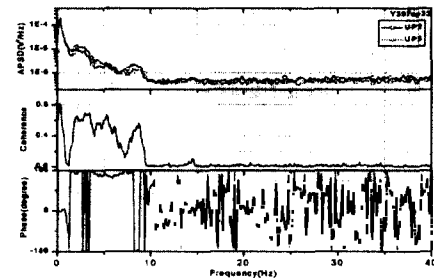


Figure 8 Frequency Analysis of Ex-core Neutron Signals of UP2 & UP3

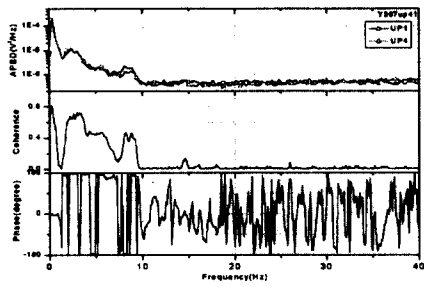


Figure 9 Frequency Analysis of Ex-core Neutron Signals of UP1 & UP4

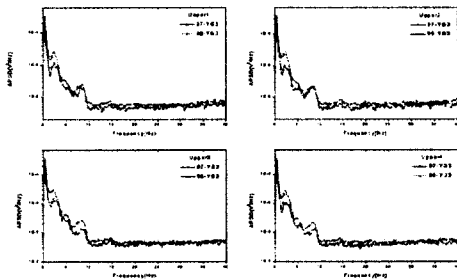


Figure 10 History of APSD for the upper Ex-core Neutron Signals of YGN 3

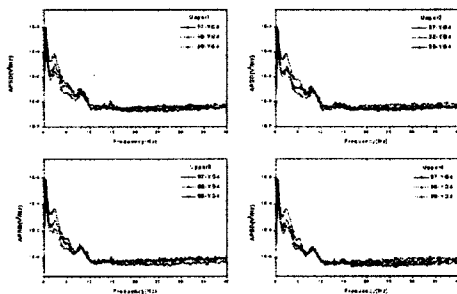


Figure 11 History of APSD for the upper Ex-core Neutron Signals of YGN 4

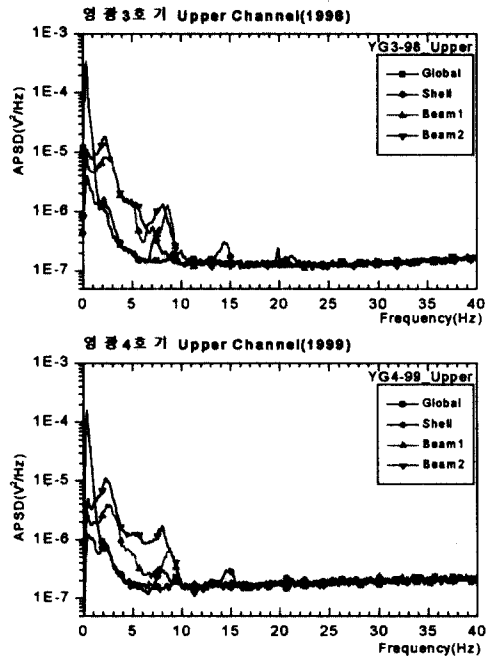


Figure 12 APSDs for Each CSB Mode

