

울진 1,2호기의 중성자 잡음신호 분석

⁰김태룡*, 박진호**, 고병무***, 배용채*

Neutron Noise Analysis in Ulchin Nuclear Unit 1 & 2

⁰Tae-Ryong Kim*, Jin-Ho Park**, Byung-Moo Koh***, Yong-Chae Bae*

Abstract

This paper presents the analysis results of ex-core and in-core neutron noise, acceleration signals and pressure fluctuation measured at Ulchin Nuclear Unit 1 & 2 to identify and monitor the reactor internals vibration including fuel motion. A phase separation algorithm developed by authors was applied to the neutron noises to clearly identify the reactor internals vibratory motion. The beam mode frequency of the core support barrel was identified to be 8Hz and the shell mode to be 20Hz. The first frequency of the fuel assembly was also found to be 3Hz, while first two acoustic frequencies of the primary coolant system were 6 and 17.5Hz. By monitoring and analyzing these frequencies periodically, it is possible to diagnose the operating condition of reactor internals and to provide an early detection of faults for the predictive maintenance.

1. 서론

원자로계통의 주요 구조물(예를 들어 원자로 압력용기 및 CSB, 등) 또는 핵연료의 진동은 원자로압력용기의 외부에 설치되어 있는 가속도계 뿐 아니라 노심에서 나오는 중성자속 신호나 냉각재의 압력신호 등에도 영향을 끼쳐 이러한 신호의 미소한 변동성분(이를 원자로잡음이라 한다)으로 나타난다[1]. 원자로잡음은 원자로의 정상운전에 기 원전에 설치되어 있는 각종 신호계측기를 통하여 원전의 운전에는 전혀 지장을 주지 않으면서 취득할 수 있으며, 이를 취득·분석하면 원자로구조물 및 주요 기기의 진동 특성과 운전상태를 알 수 있고 결함 발생시 초기에 탐지할 수 있다. 따라서 발전설비의 주요 구조물 및 기기의 손상을 미연에 방지할 수 있는 예방보수가 가능하므로 상당한 경제적 이득을 얻을 수

* 한전 전력연구원, ** 한국원자력연구소,

*** 울진원자력 제1발전소

있다.

원자로계통의 주요 구조물 및 기기의 상태와 건전성을 감시하기 위하여 원전에서는 각종 감시계통이 설치·운영되고 있다. 그 대표적인 것으로 원자로내부구조물 감시계통(IVMS: internals vibration monitoring system), 금속파편 감시계통(LPMS: loose parts monitoring system) 및 음향누설 감시계통(ALMS: acoustic leak monitoring system) 등이 있으며, 감시에 사용되는 신호로는 중성자속(neutron flux), 구조물의 진동변위, 속도, 가속도, 음향, 냉각재의 압력, 온도, 유량 등으로 다양하다.

울진원전 1,2호기는 1988년, 1989년에 상업운전을 시작한 950MW 급의 가압경수로로써 IVMS와 ALMS가 설치·운영되고 있다. LPMS는 설치되어 있지 않으나 원자로외부 표면에 진동감시를 위한 가속도계가 설치되어 있어 일부 LPMS

역할을 수행할 수 있다. 특히 IVMS의 경우 한전 전력연구원과 한국원자력연구소가 공동으로 설계, 제작하여 1995년부터 1호기에 설치·운영되고 있다[2].

본 보고에서는 1997년 7월 11~12일에 올진 1,2호기의 IVMS 용 노외중성자검출기, 노내중성자검출기, 원자로 외부표면의 가속도계 및 일차계통의 압력센서에서 취득한 잡음신호의 분석결과를 설명하고자 한다.

2. 노외 중성자속 잡음신호

올진 1,2호기에는 노외 중성자속을 검출하기 위하여 그림 1(b)와 같이 원자로 압력용기 외측에 원주방향으로 약 90도 간격으로 4개씩, 상·하단으로 총 8개의 중성자검출기가 설치되어 원자로의 출력레벨을 표시하는데 활용되고 있다. 여기에서 검출되는 중성자속 신호는 원자로의 출력에 따른 성분뿐만 아니라 내부구조물(특히 CSB)의 진동에 따라 변동성분(잡음)이 발생하게 된다. 즉 원자로압력용기와 내부 CSB의 상대적 변위에 따라 두 원통사이의 gap에 차있는 물(중성자 감속재)의 두께가 변하면 중성자속 잡음신호가 발생하게 된다.

그림 2는 노외 중성자속 잡음신호의 자기파워스펙트럴밀도(APSD: auto power spectral density) 함수를 보인 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 전 APSD 는 거의 같은 형상을 보이고 있으며 N2와 N6를 제외한 6개의 중성자 검출기의 신호를 보면 2호기에 비해 1호기의 신호파위가 높게 나타나고 있다. 이는 냉각재에 함유되어 있는 boron 농도의 영향으로, 측정당시 1호기는 핵연료주기의 말기로 핵연료주기의 초기였던 2호기에 비해 boron 농도가 열었기 때문으로 생각된다. 그러나 N2와 N6 검출기 신호에서는 거의 같은 크기로 나타났으며 현재로서는 그 이유를 확실히 분석할 수 없었다. APSD 그림에서 주목할 만한 peak로는 1.5Hz 이하, 3Hz, 6Hz, 8Hz, 17.5Hz, 20Hz 등이 있다. 1.5Hz 이하의 주파수 peak 는 열수력학적인 것이며, 3Hz는 핵연료진

동, 6Hz 및 17.5Hz는 압력의 음향파 모드로서 각각 노내중성자신호 및 압력신호와 같이 분석되어야 할 수 있는 것으로 추후 다시 설명하겠다. 남은 8Hz 와 20Hz 근처의 peak는 구조물(CSB)의 진동성분으로 각각 CSB의 beam 모드, CSB의 shell모드이나 그림 2만으로는 이를 확인하기 어렵다.

이러한 구조물의 진동모드를 쉽게 확인하기 위해서 저자들이 개발한 위상분리법[3,4]을 이용하여 신호분석을 수행하였다. 신호간의 위상차 특성을 이용하는 이 신호분석기법은 동시에 측정된 4개의 중성자속 잡음신호(예를 들면 N1~N4 검출기의 신호)를 이용하여 신호를 global 성분, CSB의 beam 모드성분, CSB의 shell 모드성분으로 분리한다. 여기서 global 성분은 신호 전체가 모두 같은 위상(in-phase) 인 경우이며, beam 모드 성분은 서로 인접한 검출기 신호사이엔 in-phase, 서로 마주보는 검출기 신호사이엔 180도의 위상차(out-of-phase)인 경우이고, shell 모드 성분은 서로 인접한 검출기 신호사이엔 out-of-phase, 서로 마주보는 검출기 신호사이엔 in-phase 인 경우이다.

그림 3은 올진 1,2호기 노외중성자속 신호에 위상분리를 적용한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 1.5Hz 에서는 global 성분의 파워가 가장 크게 나타나며 이는 반응도의 변화 또는 열수력학적인 현상으로 풀이된다. 8Hz 근처에서 가장 큰 파워를 보이는 것은 CSB의 beam 모드, 20Hz 근처에서는 CSB의 shell 모드가 가장 파워가 크게 나타나므로 쉽게 구조물의 진동모드를 확인할 수 있게 된다. 특히 20Hz에 shell 모드와 중첩되어 나타난 매우 날카로운 peak는 원자로냉각재펌프의 회전수(1192rpm=19.8Hz)를 나타낸다.

3. 노내 중성자속 잡음신호

노심의 중성자 속의 검출은 노심내의 중성자속의 분포와 thermal margin, 핵연료의 연소도 등, 주로 노심의 열수력학적인 특성을 확인하기 위하여 주기적으로 검출된다. 본 연구에서는 노심의 구조동력학적인 특성을 조사하기 위하여 노

내중성자속 잡음신호를 취득한 것은 국내 최초로 수행한 것이다.

울진 1,2호기의 노내중성자속 검출기(로듐검출기)는 항시 노심내에 설치되어 있지 않고 필요시 장입할 수 있는 형태로 전 노심에 걸쳐 여러개가 준비되어 있다. 그림 4는 노외중성자속 잡음신호를 취득한 노심내의 검출기 path를 나타낸 것으로 (a)는 1호기의 경우, (b)는 2호기의 경우이다. Path의 선정은 1호기의 경우 노내·외 중성자신호끼리의 상관관계를 보기 위하여 노외중성자 검출기와 가장 가까이에 있는 path(#7, #13, #22, #43)를 선정하였으며, 2호기의 경우에는 핵연료 진동 성분을 추출하기 위하여 상호 인접한 노내중성자 검출기의 path(#6, #15, #29, #35, #48)를 선정하였다. 신호취득은 검출기의 각 path에서 수직 방향(핵연료 길이방향)으로 2곳의 위치(노심하부 grid 에서 1600mm, 2800mm 상부)에서 수행하였다.

그림 5는 노내 중성자속 잡음신호의 APSD 함수를 보인 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 전 APSD 형상은 거의 비슷한 모양의 추세를 보이고 있으나 3~6Hz 사이에 있는 peak의 위치가 조금씩 다른 것을 확인할 수 있다. 신호간의 상호 상관관계(coherence 및 phase)를 검토한 결과, 이는 핵연료의 1차 진동모드으로써 핵연료의 연소도에 따라 진동특성이 조금씩 다르게 나타난 것임을 확인할 수 있었다. 그림 6은 노내 중성자신호와 노외 중성자신호 사이의 상관 관계를 보인 것으로 서로 가까이 있는 것끼리 coherence가 높게 나타나며 특히 CSB의 진동모드에서 높게 나타남을 알 수 있었다.

이상의 결과에서 노내 중성자신호에서도 구조물(CSB)의 진동을 확인할 수 있으며, 특히 핵연료 진동에 대해서도 어느 정도 파악할 수 있음을 알았다.

4. 가속도 신호 및 압력신호

울진 1,2호기의 원자로 압력용기 외부에는 원자로의 진동 감시용으로 그림 1(a)와 같이 상부 헤드에 4개(수직방향), 하부 원자로 바닥에 2

개(수평방향)의 가속도계가 설치되어 있다. 그림 6은 원자로 하부의 V1 및 V2 가속도 신호의 APSD이다. 그림에서 알 수 있듯이 여러개의 peak가 관측되며, 구조물의 진동 측면에서는 8Hz, 17.5Hz, 20Hz 정도의 peak가 의미있는 것들이라 하겠다. 이 중 8Hz와 20Hz 성분은 이미 앞의 노외중성자신호 분석결과에서도 나타났듯이 각각 CSB의 beam 모드와 펌프의 회전수(1192rpm)를 나타내는 것으로 판단된다.

17.5Hz 성분은 다음 압력신호 분석 결과와 함께 보면 일차계통의 배관계내에 존재하는 음향파 특성을 나타낸 것으로 추정된다.

그림 7은 일차계통에서 취득한 압력신호의 분석결과를 보인 것이다. (a)는 압력신호의 APSD, (b)는 압력신호와 노내중성자신호 사이의 coherence, (c)는 압력신호와 노외중성자신호 사이의 coherence, (d)는 압력신호와 가속도신호 사이의 coherence 결과이다. 일차계통내에 존재하는 음향파는 6.2Hz, 17.5Hz인 것으로 보이며, 이 음향파 성분은 다른 잡음신호에도 나타나고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

원자로계통의 주요 구조물 및 기기의 상태와 건전성을 감시하기 위해서는 여러 감시계통에서 취득한 각종 잡음신호의 분석을 통하여 동특성을 추출하고 이상유무를 판단할 수 있는 신호분석기술이 필수적이다. 이를 위하여 울진원전 1,2호기를 대상으로 노외중성자신호, 노내중성자검신호, 가속도신호 및 압력신호를 취득하여 신호분석을 통하여 원자로 내부구조물의 동특성을 추출하였다. 그 결과 울진 1,2호기의 CSB의 beam 모드와 shell 모드는 각각 8Hz와 20Hz 임을 알았고, 또 노내중성자 잡음신호를 국내 최초로 분석함으로써 핵연료의 진동도 연소도에 따라 조금 다르게 나타나나 3Hz 근처에 1차모드가 존재함을 확인하였다. 이는 문헌상[5]에 나타난 프랑스의 Tricastin-1(울진 1,2호기의 prototype)의 결과와 일치하고 있음을 확인하였다. 그러나 6Hz 근처의 성분은 중성자신호, 압력신호 및 가속도신

호 등에 모두 나타나고 있어 음향파의 가능성과 핵연료의 제2차모드의 가능성이 모두 존재하는 것으로 추정된다. 이를 확인하기 위해서는 좀 더 많은 신호의 채취 및 분석과 일차계통에 대한 열수력학적인 해석이 있어야 할 것이다.

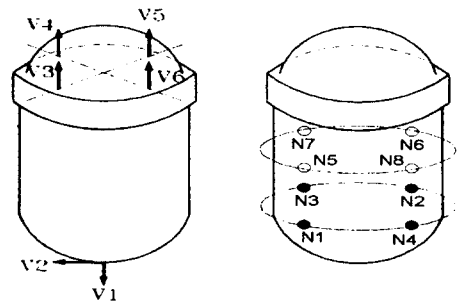
이러한 원자로잡음신호를 주기적으로 채취·분석하여 이들 특성주파수를 감시하면 원자로의 운전상태를 진단할 수 있고, 특성주파수의 변화로부터 결함을 조기에 예측할 수 있어 발전설비의 예방보수가 가능해지게 된다.

원자로 잡음해석 분야는 국외에서는 오래전부터 수행해 오고 있으며 많은 데이터베이스를 구축하고 실제 발전소에 적용하여 예방보수를 수행하고 있으나, 국내에는 아직 하드웨어인 감시계통이 제대로 갖춰지지 않은 발전소가 많으며 더욱이 소프트웨어인 신호분석 기술도 제대로 정립되지 못한 실정이다. 이 보고를 통하여 원자로 잡음신호 분석기술에 많은 관심이 있기를 기대해 본다.

참고문헌

- [1] Thie, J. A., 1981, Power Reactor Noise, American Nuclear Society, chap. 1.
- [2] Joo, Y. S. *et al*, 1995, "Development of Reactor Internals Vibration Monitoring System(RIVMOS) Using Neutron Noise," Proc. of 7th Specialist Meeting on Reactor Noise, Avignon, France, pp. 541~548.
- [3] Kim, T. R. *et al*, 1995, "Korean Experience in Neutron Noise Monitoring of Nuclear Power Plant," Proc. of 7th Specialist Meeting on Reactor Noise, Avignon, France, pp.32~39.
- [4] Jung, S. H. and Kim, T. R., 1997, "Phase Separation Algorithm for Ex-Core Neutron Signal Analysis," J. of Korean Nuclear Society, Vol. 29, No. 5, pp.399~405.

- [5] Fry, D. N. *et al*, 1984, "Use of Neutron Noise for Diagnosis of In-Vessel Anomalies in Light Water Reactors," NUREG/CR-3303(ORNL/TM-8774).



(a) Accelerometers (b) Ex-core neutron detectors

Fig. 1 Location of Accelerometers and Ex-core Neutron Detectors in Ulchin 1,2

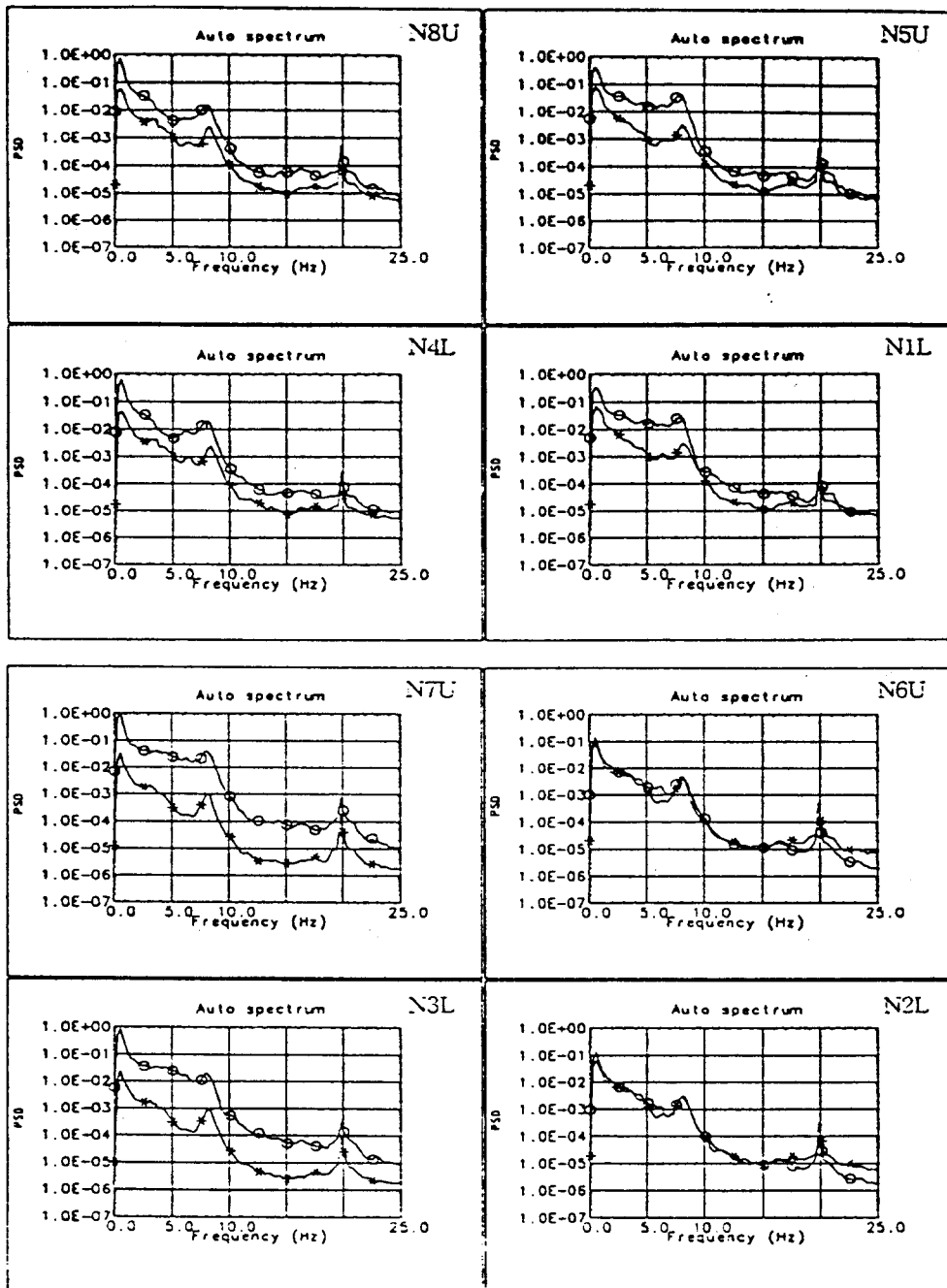
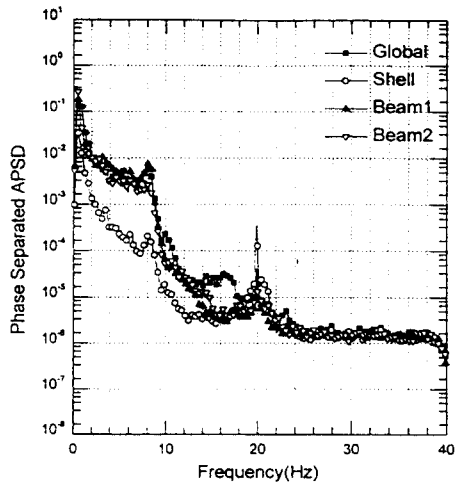
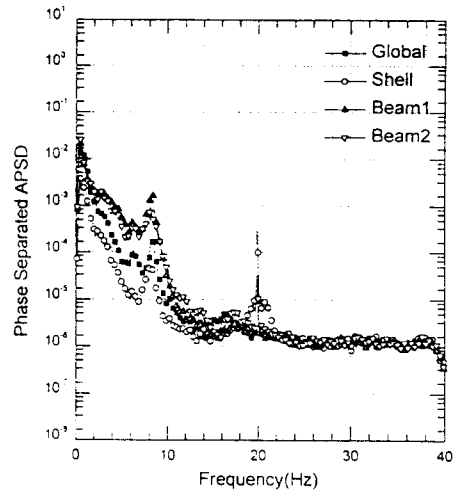


Fig. 2 Auto Power Spectral Density of Ex-Core Neutron Chamber Signals in Ulchin Unit 1 & 2
(o : Unit 1, * : Unit 2)

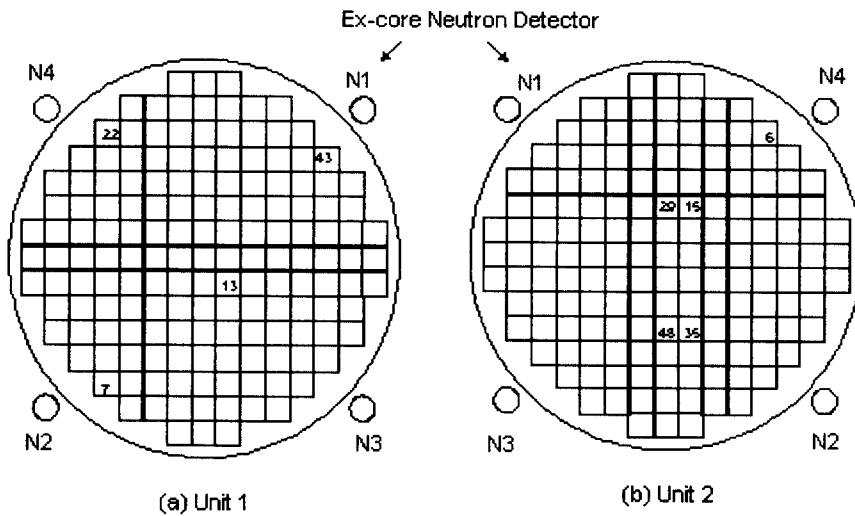


(a) Unit 1



(b) Unit 2

Fig. 3 Phase Separated Auto Power Spectral Densities
(using lower excore neutron detector signals)



(a) Unit 1

(b) Unit 2

(Unit 2 is the mirror-image of Unit 1)

Fig. 4 Location of In-core Neutron Detectors(TIPs) Measured in Ulchin NPP

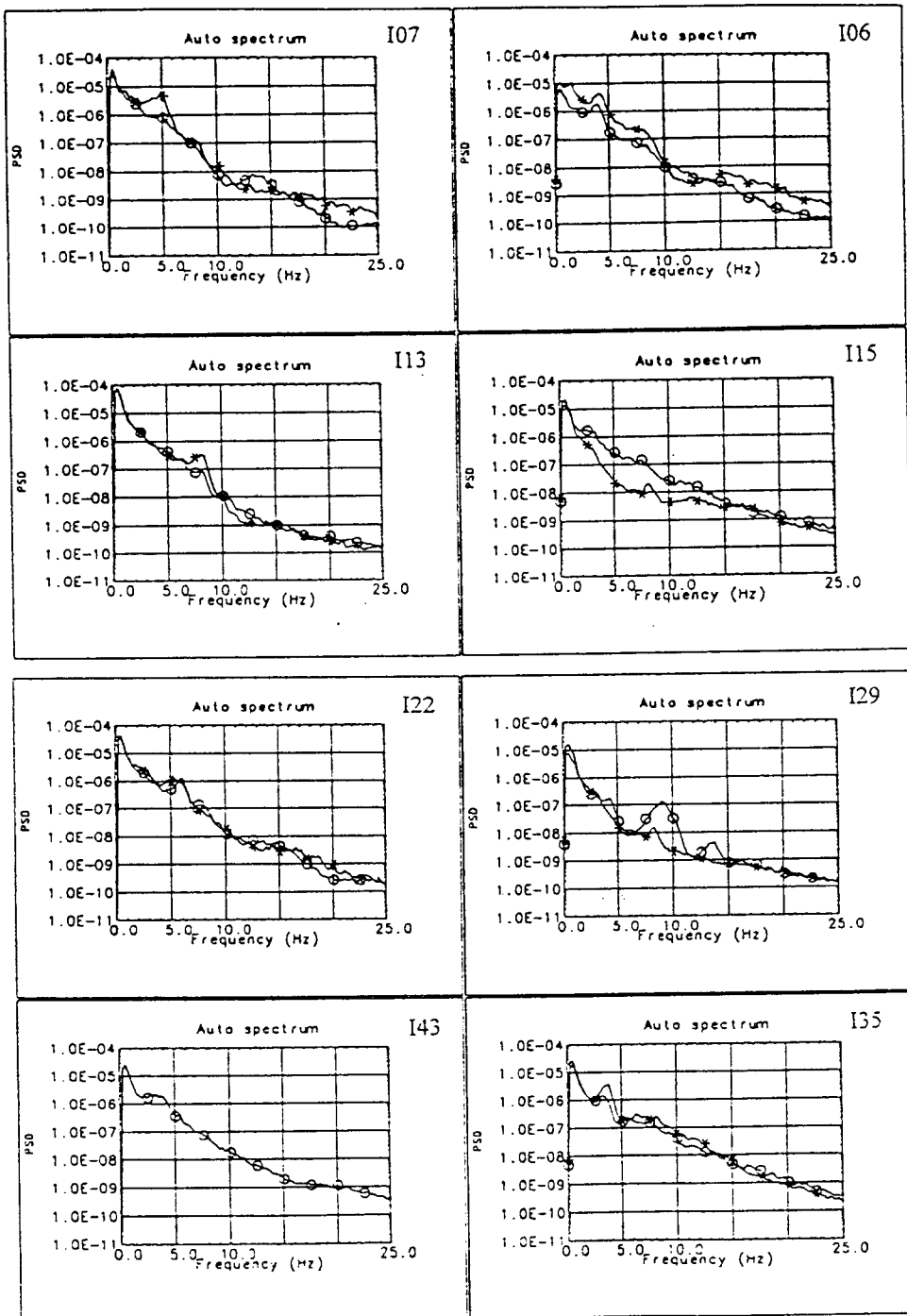


Fig. 5 Auto Power Spectral Density of Incore Neutron Detector Signals.
 Ulchin units 1 & 2 (left column: unit 1, right column: unit 2,
 o : 1600mm above lower grid, * : 2800mm above lower grid)

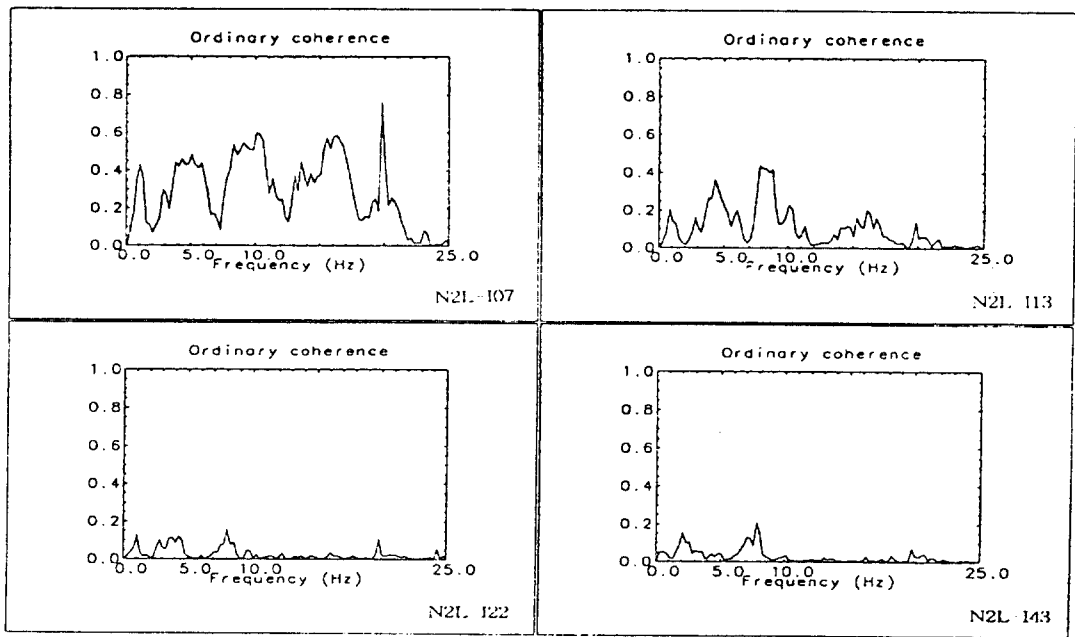


Fig. 6 Coherence Function between Excore and Incore Neutron Signals of Ulchin unit 1

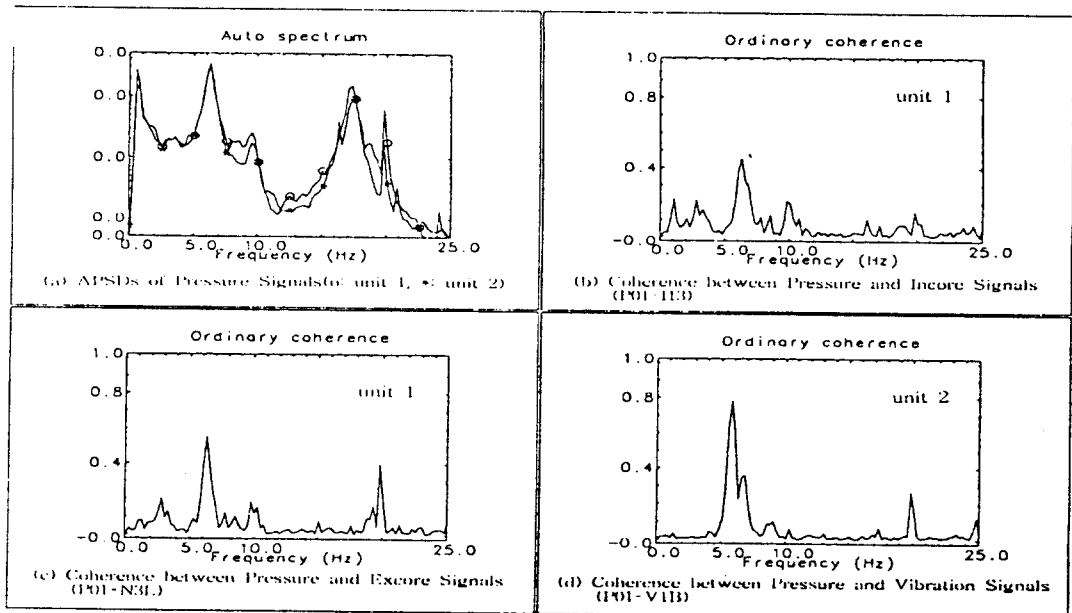


Fig. 7 Auto Power Spectral Density of Pressure Signals and related Coherence Functions, Ulchin unit 1&2