

## 중성자신호를 이용한 울진 1호기 내부구조물 진동감시

김태룡, 정승호, 박진호, 박진석  
한국원자력연구소

### 요 약

원자로 내부구조물의 진동감시를 위한 신호로 노의 중성자 잡음을 선정하고 중성자 잡음에 실려 있는 진동모우드 성분을 신호간의 위상차에 근거하여 분리하는 새로운 방법을 제안하였다. 이 방법은 기존의 방법에 비해 계산속도가 빠르고 3개 이상의 신호에도 적용할 수 있다. 제안한 방법을 토대로 울진 1호기의 노의 중성자 잡음 신호를 채취, 분석하여 내부구조물의 진동특성을 밝히고 진동감시의 대상이 되는 진동모우드를 분리함으로써 방법의 효율성을 검증하였다. 또 한 핵연료주기동안 주기적으로 신호를 채취, 분석하여 중성자 잡음신호의 특성이 한 핵주기동안 점차 증가하는 경향을 갖는다는 것을 밝혔다.

### 1. 서론

원자로 내부구조물은 원자로를 순환하는 고온·고압의 냉각수에 의한 유동유발진동(flow induced vibration)과 경년열화에 의해 내부구조물 구성 부품간의 체결력이 저하되기도 하고, 체결부품이 이탈되어 냉각수 유로를 따라 이동함으로써 노심 유로를 차단할 뿐만 아니라 타기기에 손상을 주기도 한다. 따라서 원자로의 구조적 건전성을 확보하고 사고를 미연에 방지하기 위해서는 원자로 내부구조물의 결함을 조기에 탐지할 수 있는 감시활동이 필수적이다.

원자로 내부구조물의 진동모우드 변화를 감시하는 데 가장 좋은 방법은 고온·고압 및 고방사선 환경에 견딜 수 있는 특수센서를 내부구조물에 직접 설치하는 것이나 이는 현실적으로 거의 불가능하므로 간접적인 방법으로 계측 및 분석을 해야 한다. 이러한 간접적인 방법을 원자로 잡음해석(reactor noise analysis)이라 하는데 이는 원자로 보호 및 제어계통 신호 즉, 압력, 온도, 유량, 중성자속 신호 등의 변동(AC 성분) 신호와 진동 및 음향 신호들에 구조동역학적/열수력학적 특성정보가 내포되어 있음을 착안하여 이들 신호들을 처리/분석하여 결함을 조기에 탐지하고자 하는 기술이다.

내부구조물의 진동분석을 위해 이용되고 있는 신호로는 노의 중성자 잡음신호, 노내 중성자 잡음신호, 원자로 압력용기 상에 설치된 가속도계 신호, 원자로 입/출구 노즐 입력 신호 등이 있다. 이러한 신호들을 모두 측정할 수 있다면 이상진단의 신뢰도 측면에서 매우 좋다고 할 수 있으나, 경우에 따라서는 측정이 용이하지 않을 때도 있다. 이러한 경우 가장 많이 이용되는 신호가 노의 중성자 신호이다. 그러나 노의 중성자 신호는 내부구조물의 진동에 의한 성분 뿐만 아니라 여러가지 열수력학적 요인들의 성분도 내포하고 있기 때문에 이들 신호로부터 내부구조물의 진동모우드 변화를 정량적으로 감지해 내는 일은 그리 쉬운 일이 아니다. 그러나 열수력학적 요인에 의한 성분이 주로 0.5 - 2Hz 대역에 나타

나며, 내부구조물의 진동에 의한 성분은 2.0 - 25Hz 대역에서 나타난다는 점에 착안하여 주파수분석을 통한 정성적 접근방법으로 진동모우드를 분리할 수 있다.

본 연구에서는 울진 1호기의 원자로 내부구조물의 진동 감시를 위하여 진동모우드를 분리하는 방법을 제안하였으며, 제안한 방법을 토대로 울진 1호기의 노외 중성자 잡음 신호를 분석하고 검증하였다. 또 원자로 내부구조물의 진동특성이 한 핵주기 동안 어떤 경향을 갖는 지도 분석하였다.

## 2. In-phase, Out-of-phase 성분의 분리방법

울진 1호기에는 노외 중성자 탐지기가 그림 1에서와 같이 압력용기 원주둘레에 90° 간격으로 상하 총 8개가 설치되어 있으며 중성자속(neutron flux)를 계측하여 그 DC 성분으로 원자로의 출력을 표시하는데 사용하고 있다. 그러나 DC 성분 이외에도 원자로내부의 진동이나 핵반응등의 현상으로 AC성분인 잡음이 실려 있고 이것이 본 연구의 대상이다. 중성자 잡음의 성분은 그 특성에 따라 reactivity의 변동성분, attenuation의 변동성분, 진동모우드 변동성분, 측정 noise 등으로 나뉘어 진다. 이 중 원자로 내부구조물의 진동감시 대상인 CSB( Core Support Barrel)의 진동모우드 성분, 즉 CSB beam 모우드, CSB shell 모우드를 구별하는 방법으로 측정된 노외 중성자 잡음신호들 간의 phase와 coherence가 사용된다. 각 모우드별 phase 및 coherence의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

### (1) CSB beam 모우드

- 인접 신호사이의 phase 가 진동방향에 따라 0° 또는 180° (그림 2참조)
- 반대쪽 신호사이의 phase 가 180°
- 상하 신호사이의 phase 가 0°
- 높은 coherence

### (2) CSB shell 모우드

- 인접 신호사이의 phase 가 180°
- 반대쪽 신호사이의 phase 가 0°
- 상하 신호사이의 phase 가 0°
- 높은 coherence

이러한 phase의 차이에 근거하여 중성자 신호의 파워 스펙트랄 밀도에 나타나는 여러개의 peak들이 어느 진동모우드에 기인한 것인지를 구별할 수가 있으며, 따라서 분리된 각 진동모우드의 변화로 부터 용이한 진동감시가 이루어질 수 있다.

신호내에 존재하는 in-phase 성분과 out-of-phase 성분을 분리하는 방법은 지금까지 Mayo의 방법 [1]이 가장 많이 이용되고 있다. 그의 방법에 따르면, in-phase 성분  $x(t)$ 와 out-of-phase 성분  $y(t)$ 을 갖는 두개의 신호  $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$ 에 대하여 각각 자기 파워 스펙트랄 밀도함수(APSD: Auto Power Spectral Density)  $P_{s_1s_1}(f)$ ,  $P_{s_2s_2}(f)$ , 그리고 상호 파워 스펙트랄 밀도함수(CPSD: Cross Power Spectral Density)  $C_{s_1s_2}(f)$  및 coherence를 이용하여 in-phase 성분 및 out-of-phase 성분의 APSD

$P_{XX}(f)$ ,  $P_{YY}(f)$  를 분리하게 된다. 그러나 이 방법은 CPSD 와 coherence 를 계산해야 하는 번거로움이 있으며 또한 상당한 계산시간이 필요하게 된다.

본 연구에서는 in-phase, out-of-phase의 APSD 를 계산함에 있어 지금까지와는 다른 계산 알고리즘을 제안한다. 먼저 Mayo의 방법과 마찬가지로 in-phase 성분  $x(t)$ 와 out-of-phase 성분  $y(t)$  을 갖는 두개의 신호  $s_1(t)$ ,  $s_2(t)$ 에 대하여

$$s_1(t) = x(t) + y(t), \quad s_2(t) = x(t) - y(t)$$

복소수(complex) 신호,  $z(t)$ 를 만들고

$$z(t) = s_1(t) + js_2(t)$$

이 신호에 대하여 Fourier 변환을 행하면,

$$Z(f).Re = X(f).Re - X(f).Im + Y(f).Re + Y(f).Im$$

$$Z(f).Im = X(f).Re + X(f).Im - Y(f).Re + Y(f).Im$$

가 된다. 여기서,  $X(f)$ ,  $Y(f)$ ,  $Z(f)$ 는  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$ 의 Fourier 변환 결과이고  $Re$ ,  $Im$ 은 실수부와 허수부를 의미한다. 실수부만 같은 신호에 대해 Fourier 변환을 행할 경우, Fourier 변환 결과의 실수부는 even 함수, 즉  $Re(f) = Re(-f)$ 가 되고, 허수부는 odd 함수, 즉  $Im(f) = -Im(-f)$ 가 되므로, 이 성질을 이용하여 다음과 같이 in-phase, out-of-phase 성분을 분리할 수 있다.

$$X(f).Re = 1/4 ( Z(f).Re + Z(f).Im + Z(-f).Re + Z(-f).Im )$$

$$X(f).Im = 1/4 ( -Z(f).Re + Z(f).Im + Z(-f).Re - Z(-f).Im )$$

$$Y(f).Re = 1/4 ( Z(f).Re - Z(f).Im + Z(-f).Re - Z(-f).Im )$$

$$Y(f).Im = 1/4 ( Z(f).Re + Z(f).Im + Z(-f).Re - Z(-f).Im )$$

이로부터, in-phase와 out-of-phase APSD 는

$$P_{XX}(f) = X(f).Re^2 + X(f).Im^2$$

$$P_{YY}(f) = Y(f).Re^2 + Y(f).Im^2$$

가 된다.

본 연구에서 제시하는 방법은 coherence 나 CPSD 를 계산할 필요 없이 단지  $P_{s_1s_1}(f)$ ,  $P_{s_2s_2}(f)$  를 구하는 과정에서 FFT의 특성을 이용하여 대수적 가감산에 의해 in-phase, out-of-phase APSD 를 구하는 것이다. 이것은 계산 횟수의 단축을 가져오며, 또한 차후 4개의 신호를 이용하여 phase 특성에 따른 global 성분, shell 모우드 성분, beam 모우드 성분을 분리함에 있어 매우 유리한 방법이다.

그림 3은 울진 1호기에서 채취한 중성자 신호에 대해 Mayo방법과 본 연구에서 제안한 방법으로 계산한 in-phase/out-of phase 성분의 APSD 결과를 비교한 것이다. 두 알고리즘에 의한 결과가 약간의 차이를 보이는 이유는 Mayo의 알고리즘은 in-phase성분  $x(t)$  와 out-of-phase 성분  $y(t)$  가 서로 독

립적이라는 가정하에서 유도된 것이고, 본 연구에서 제시한 방법은 이러한 가정이 수반되지 않기 때문이다.

### 3. 울진 1호기 노외중성자 신호의 분석 결과 및 고찰

울진 1호기의 노외중성자 신호는 '93.4 부터 '94.7 까지 핵연료 5주기 및 6주기에 걸쳐 약 3개월 간격으로 6회 채취하였다. 신호는 tape recorder에 녹음하여 실험실에서 분석하였으며, 디지털 신호처리를 위한 샘플링 및 신호처리는 본 연구에서 개발한 소프트웨어[2]에 의해 수행되었다.

앞에서 설명한 바와 같이 중성자 잡음신호내에 포함되어 있는 진동성분의 phase 특성에 근거하여 90° 간격으로 설치된 4개의 노외중성자 신호를 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$x_1(t) = g(t) + s(t) + b_1(t) + b_2(t), \quad x_2(t) = g(t) + s(t) - b_1(t) - b_2(t)$$

$$y_1(t) = g(t) - s(t) + b_1(t) - b_2(t), \quad y_2(t) = g(t) - s(t) - b_1(t) + b_2(t)$$

여기서,  $g(t)$ ,  $s(t)$ ,  $b_1(t)$ ,  $b_2(t)$ 는 각각 global 성분(모든 방향으로 in-phase를 보이는 성분), shell 모드 성분, beam 1 모드 성분, beam 2 성분을 의미한다. 각 성분들을 분리하기 위해서 먼저 위의 신호를 다음과 같이 복소수 신호로 만든다.

$$z_1(t) = x_1(t) + jy_1(t), \quad z_2(t) = x_2(t) + jy_2(t)$$

이들 신호에 대하여 앞서의 방법을 적용하면 노외 중성자 신호의 각 성분의 APSD 를 구할 수 있다.

그림 4는 하부 4채널 중성자 신호의 각 APSD 를 보인 것이며 그림 5는 위의 방법으로 계산된 global성분, shell모우드 성분, beam 1 모드 성분, beam 2 성분의 APSD 를 보인 것이다.

하부의 4채널 신호 N1 - N4 의 APSD를 살펴보면 N1, N4와 N2, N3의 APSD가 전 대역에 걸쳐 power의 값에 차이를 보이고 있는데 이는 울진 1호기가 국내 다른 원자로와 달리 CSB 외측에 설치해 두고 있는 부분적인 열차폐체의 영향으로 생각된다. 즉 N1, N4 채널 쪽에는 열차폐체가 없고, N2, N3 채널 쪽에는 열차폐체가 설치되어 있음으로 인하여 중성자의 차폐두께에 차이가 있기 때문이라 생각된다. 이러한 차이는 상부의 4채널 N6 - N8에서도 확인되었다.

Phase 분리에 의한 성분들의 APSD를 살펴보면 0~2 Hz 및 10~18.5 Hz 대역에서는 global 성분이, 2~9.5 Hz 대역에서는 beam 1, beam 2 성분이 (3, 6.2, 8.2 Hz 에서 봉우리), 그리고 20Hz 부근에서는 shell 모드 성분이 (20.6 Hz 에서 봉우리) 다른 성분보다 강하게 나타남을 알 수 있다. 이는 울진 1호기의 prototype 인 Tricastin 1호기(Framatome) 의 진동특성과 잘 일치하는 결과이다[3].

이와 같이 phase 에 의한 성분분리는 원자로 내부구조물의 이상진단에 자기 파워 스펙트럼과 함께 매우 유용하게 사용될 수 있다. 특히 결합의 부위까지도 구체적으로 진단하는 경우 많은 정보를 제공한다. 예를 들어 CSB의 hold down spring 에 결합이 발생할 경우, shell 모드 성분의 파워 스펙트럼 밀도보다는 beam 모드 성분의 파워 스펙트럼 밀도가 더 민감하게 변화할 것이고, CSB와 core baffle plate 또는 CSB와 TS의 결합성이 약화되었을 경우는 shell 모드 성분의 파워 스펙트럼 밀도가 더 민

감하게 변화할 것이다.

또 내부구조물 진동감시 및 진단을 위한 feature들의 경향을 파악하기 위해 '93. 4 부터 '94. 7 까지 대략 3개월 간격으로 6번 취득된 노외 중성자 신호들의 분석을 수행하였다. 그림 6은 그 중 핵연료 5주기 동안의 중성자 신호 분석결과를 보인 것이다. 운전시간 경과에 따라 중성자의 APSD가 증가하는 것은 핵주기의 운전시간의 경과에 따라 붕소농도의 변화(감소)에 따라 그 중성자속 밀도가 변화(증가)하기 때문으로 판단된다. 따라서 노외 중성자 신호를 이용하여 내부구조물의 진동을 감시, 결함을 진단하고자 할 경우 이 점을 유의하여야 한다.

#### 4. 결 론

원자로 내부구조물의 진동감시를 위한 신호로 노외 중성자 잡음을 선정하고 중성자 잡음신호를 global 성분, shell 모드 성분, beam 1 모드 성분, beam 2 성분으로 분리하는 새로운 위상차 분리법을 제안하였다. 이 방법은 FFT의 특성을 이용하므로 기존의 방법에 비해 계산속도가 빠르고 3개 이상의 다채널신호에도 적용할 수 있다. 제안한 방법을 토대로 울진 1호기의 노외 중성자 잡음 신호를 채취, 분석하여 내부구조물의 진동특성을 밝히고 진동감시의 대상이 되는 진동모드를 분리하여 방법의 효율성을 검증하였다. 울진 1호기의 CSB·beam 모드가 8.2 Hz, shell 모드가 20.6 Hz 임을 밝혔으며 이는 울진 1호기의 prototype 인 Tricastin 1호기의 진동특성과 잘 일치하였다. 또한 핵연료주기동안 주기적으로 신호를 분석하여, 운전시간의 경과에 따라 붕소농도의 감소에 따라 그 중성자속 밀도가 점차 증가하는 경향을 갖는다는 것을 밝혔다. 따라서 지속적인 노외중성자 잡음신호를 측정, 분석하여 데이터뱅크를 구축하면 추후 내부구조물의 결함 진단시 보다 신뢰성 있는 진단이 이루어 질 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

1. C. W. Mayo, "Detailed Neutron Noise Analysis of Pressurized Water Reactor Internal Vibration," Atomkernenergies(ATKE) Bd. 29, p9, 1977.
2. S. H. Jung et al., "Development of Fault Diagnostic PC-based Software for Reactor Internals," Specialist Meeting on Reactor Noise VII, June 19-23, 1995, Avignon, France.
3. D. N. Fry et al., "Use of Neutron Noise for Diagnosis of In-Vessel Anomalies in Light-Water Reactors," NUREG/CR-3302, 1984.

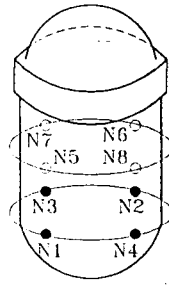


Fig. 1 Location of ex-core neutron detectors in Ulchin-1

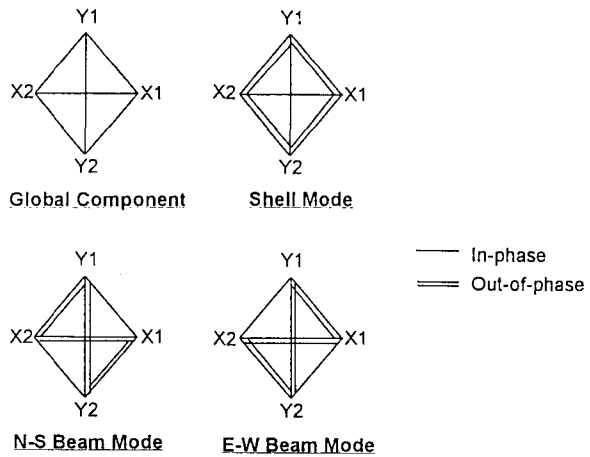


Fig. 2 Phase characteristics of CSB vibration modes

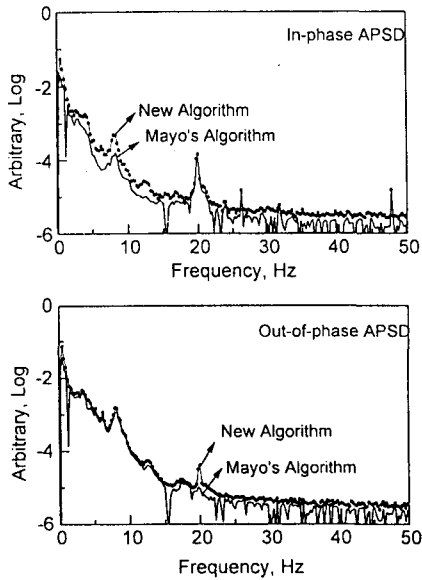


Fig. 3 In-phase and Out-of-phase APSD based on the new algorithm

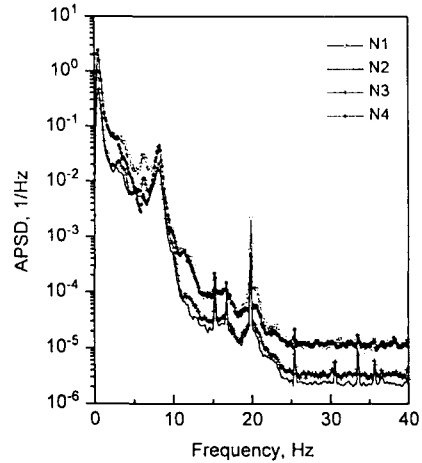


Fig. 4 APSD of neutron noise N1 - N4

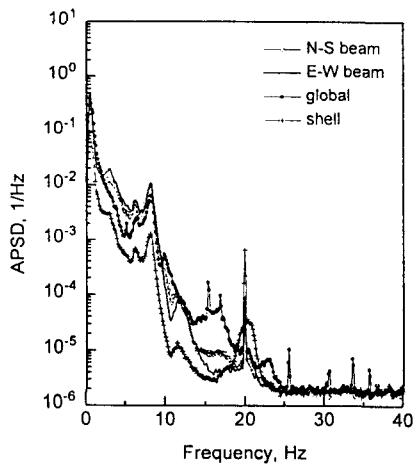


Fig. 5 APSD of the separated phase components from neutron noise N1-N4

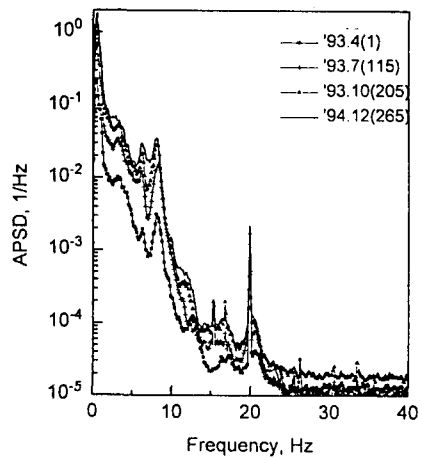


Fig. 6 Typical trend of the neutron noise N1 during fuel cycle 5 of Ulchin-1