

〈論 文〉

# 중성자속잡음신호를 이용한 원자로의 진동감시

Vibration Monitoring of Reactor Internals using Excore Neutron Flux Noise Signals

김성호\* · 강현국\*\* · 성풍현\*\* · 한상준\* · 전종선\*

S.H. Kim, H.G. Kang, P.H. Seong, S.J. Han and C.S. Chun

〈1995년 4월 29일 접수 ; 1995년 8월 29일 심사완료〉

## ABSTRACT

The vibration of reactor internals should be monitored and diagnosed for the early detection of the failure of reactor pressure vessel. This can be performed by analyzing the time-history signals from the excore neutron flux detectors. The conventional method is an on-demand system which generates power spectra through Fast Fourier Transform(FFT) algorithm. The operator can make his own decision to detect abnormal vibration using these spectra. This post-processing method, however, requires special expertise in the reactor noise analysis and signal processing for random data. It may mislead the operator into erroneous decision-making, if he is a novice in reactor noise analysis. Hence this study is focused on the automated monitoring and diagnosis procedure for the reactor noise analysis, especially on the Fuzzy algorithm to recognize the pattern of the vibration of Core Support Barrel. The excore neutron signals of Yonggwang Nuclear Power Plant unit 3 is acquired and analyzed using conventional FFT spectra and tested to adopt the Fuzzy method. An Automated Monitoring and Diagnosis System for CSB Vibration using this Fuzzy method is proposed. Furthermore, vibration data for CSB of Yonggwang Nuclear Power Plant unit 3 is presented.

## 1. 서 론

여러 종류의 기계구조물들이 나사로 조여지거나 서로 맞물려 이루어진 원자압력용기(Reactor Pressure Vessel: RPV)의 내부구조물들은 높은 압력으로 빠르게 흐르는 유체로 인해 진동을 하게 된다. 이러한 진동은 대개 시간이 지남에 따라 점차 커지

며, 심한 경우 서로의 체결력을 떨어 뜨리거나 부품을 파손시켜 원자로의 안전에 영향을 주게 된다. 따라서 원자로 내부의 진동을 감시하여 이상진동의 발생 시 이를 조기에 감지하고, 그 이상의 원인과 진동의 정도를 발전소운전원에게 정확하게 알려 주는 것은 원자력발전소의 안전운전과 경제성향상에 매우 중요한 일이다. 그러나 원자로는 구조적 특성상 내부구조물 진동의 직접측정이 힘들며, 진단에 있어서도 고도로 훈련된 전문가의 주관적 판단에 의존하는 실정이다. 일반적으로 알려진 원자로내부구조물의 진동방식과 진동의 감지방법은 다음과 같다.

\*정회원, 한국원자력연구소

\*\*한국과학기술원 원자력공학과

1.1 원자로내부구조물의 진동

원자로의 주요구조물인 노심지지통(Core Support Barrel: CSB)은 hold down spring에 의해 원자로 윗부분과 체결되어 있으며, 아랫부분은 노심지지통의 뒤틀림을 막기 위해 snubber의 제한을 받는다(Fig. 1). 이러한 구조로 인해 고속, 고압의 냉각재에 의해 가진될 때 윗부분이 고정되고 아랫부분이 자유로운 외팔보방식의 beam mode 진동이나, 원통형구조물에서 전형적으로 나타나는 shell mode 진동을 한다(Fig. 2). 그리고 이 진동은 여러가지 공정변수나 진동감지를 위해 설치된 감지기에서 감지된다.

1.2 가속도계를 이용한 진동의 감지

냉각재에 의해 가진된 노심지지통의 진동은 원자로압력용기에 전달되어 원자로외벽에 직접 부착된 가속도계에 의해 감지될 수 있다. 이 경우 내부구조물의 진동이 직접 나타나는 장점이 있으나, 진동의 실제규모를 알기 힘들며 원전설계 및 건설단계에서 별도의 전용가속도계를 미리 설치하지 않으면 진동 신호의 취득이 어렵다는 단점이 있다.

1.3 중성자속 감지기를 이용한 진동의 감지

노심지지통이 진동함에 따라 노심지지통을 둘러싼 냉각재의 두께가 달라지고 이에 따라 중성자의 흡수경로가 달라진다. 이처럼 달라진 중성자 흡수경로에 의해 변화된 중성자의 수는 노외중성자속 감지기에서 잡음형태로 감지된다. 이 경우에는 원자로의

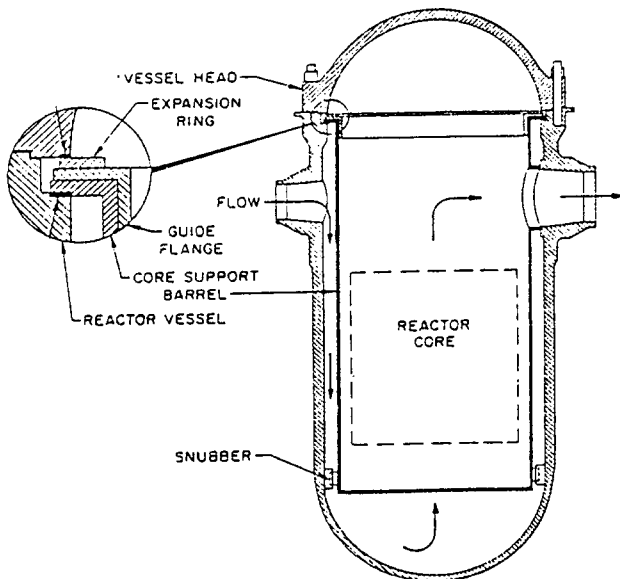


Fig. 1 Reactor internals

출력계산에 사용되는 기존의 노외중성자속감시계통 신호를 사용하는 것이므로, 신호취득이나 진동의 모양과 규모 파악이 비교적 쉬운 장점이 있다. 그러나 이 신호에는 기계구조물의 진동에 의한 영향 외에도, 원자로 내부의 핵반응도변화나 열수력학적인 변화, 그리고 중성자속 감지기의 통계적 계수율변화 등에 의한 영향이 포함되는 단점이 있다.

1.4 원자로 저온관/고온관 압력신호를 이용한 진동의 감지

원자로내부구조물 진동의 직접원인이 냉각재의 고속유입이므로, 원자로의 냉각재유입구인 저온관의 압력신호는 원자로진동모델의 입력신호로 사용될 수

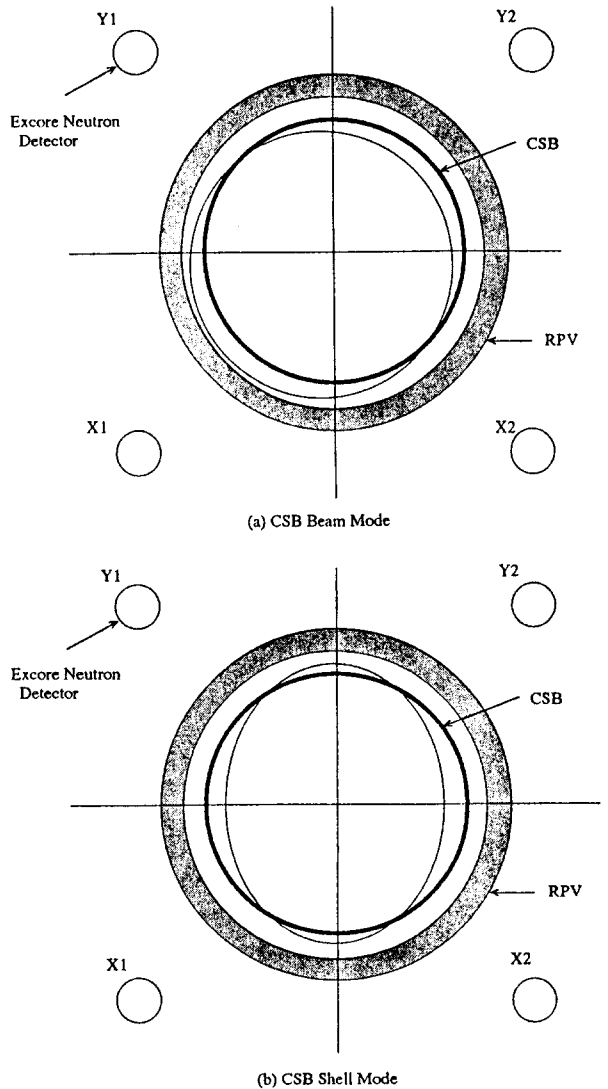


Fig. 2 Vibration modes of CSB

있다. 또한, 냉각재의 출구인 원자로고온관의 압력 신호에는 원자로내부구조물의 진동결과가 포함되어 있다<sup>(1)</sup>. 따라서, 원자로저온관과 고온관의 압력신호는 원자로의 진동에 대한 직접적인 정보를 포함하고 있다. 그러나 압력신호는 발전소의 안전에 영향을 주는 안전등급의 신호이므로 취득이 어렵다는 단점이 있다.

본 연구에서는 원자로의 외부에 설치된 중성자속 감지기에서 감지되는 중성자속신호의 잡음성분을 취득하여 분석하며, 이 자료를 토대로 원자로의 주요 구조물인 노심지지통(Core Support Barrel: CSB)의 진동주파수를 인식하고 그 변화를 추적하는 방법을 제시하고자 한다. 이 과정에서 Fuzzy 알고리즘을 적용한 진동의 감지법을 제안하여, 영광 3, 4호기에서 최근 국내최초로 운전을 시작한 원자로내부구조물 진동감시계통(Internal Vibration Monitoring System: IVMS)의 진단구조를 개선하기 위한 방법을 모색하였다. 아울러, 진동의 시간이력신호로부터 진동의 방식과 진동의 정도를 알아내는 방법도 설명하고자 한다.

## 2. 진동신호의 해석방법

### 2.1 진동의 시간이력신호

노심지지통과 원자로압력용기 사이에는 냉각재가 흐르고 있으며, 노심지지통의 외부로 빠져 나온 중성자들은 냉각재와 그 속의 중성자흡수재에 의해 감속되거나 흡수된다. 따라서, 노심지지통이 진동할 경우 중성자의 진행경로가 달라져 원자로압력용기 외부에 설치된 중성자속감지기에 감지되는 중성자의 수는 다음과 같이 변화한다.

$$\phi(t) = \phi_0 - \phi_0 \mu x(t) \quad (1)$$

여기서

- $\phi(t)$  : 감지기에서 감지되는 중성자속의 크기
- $\phi_0$  : 노심지지통이 진동의 평균위치에 있을 때 감지기에서 감지되는 중성자속의 크기
- $\mu$  : 단위 중성자운동거리당 중성자수의 변화량 (변환계수)
- $x(t)$  : 노심지지통으로부터 감지기까지의 중성자 운동거리

따라서 감지기에서 감지되는 중성자속은 노심지지통의 진동에 따라 다음과 같이 변화한다.

$$\Delta\phi(t) = -\phi_0 \mu \Delta x(t) \quad (2)$$

그런데 감지기에서는 중성자속의 세기에 비례하는 크기의 전류가 발생하므로 전류의 시간에 따른 변화  $\Delta i(t)$ 는 다음과 같다.

$$\Delta i(t) = -i_0 \mu \Delta x(t) \quad (3)$$

( $i_0$  : 전류의 평균 또는 직류성분)

여기서 전류신호는 전압신호로 비례변환되어, 다음과 같이 전압신호의 시간이력신호  $\Delta v(t)$ 를 취득할 수 있다.

$$\Delta v(t) = -v_0 \mu \Delta x(t) \quad (4)$$

### 2.2 시간이력신호의 Fourier 변환

식 (4)에서와 같이 노심지지통의 진동정보를 가진 두 채널의 전압변동성분  $\Delta v_i(t)$ 와  $\Delta v_j(t)$ 의 시간이력신호를 취득하여 Fourier 변환하면 다음과 같은 스펙트럼들을 구할 수 있다.

- Power Spectral Density(PSD):

$$S_{ij}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{ij}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (5)$$

- Coherence function:

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \quad (6)$$

Table 1 The spectral characteristics of reactor internals vibration

| Type of vibration                         | Phase           |                    | Coherence       |                    | Frequency <sup>(2)</sup><br>(Hz) |
|---|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------------------------|
|   | Cross detectors | Adiacent detectors | Cross detectors | Adiacent detectors |                                  |
| CSB beam mode<br>(Fig. 2 (a))             | 180°            | 0°                 | High            | High               | 7.5~14                           |
| CSB shell mode<br>(Fig. 2 (b))            | 0°              | 180°               | High            | High               | 18~24                            |
| Fuel assembly 1st bending mode (2nd mode) | 180°            | 0°                 | High            | Low                | 2~5<br>(5~7.5)                   |

• Phase angle :

$$\theta_{xy}(f) = \tan^{-1} \frac{Im S_{xy}(f)}{Re S_{xy}(f)} \quad (7)$$

• Correlation function :

$$R_{i,j}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \Delta v_i(t) \Delta v_j(t + \tau) dt \quad (8)$$

이와 같이 주파수영역에서 변환된 스펙트럼에서 원자로의 진동시 나타나는 주파수특성을 고려하여 원자로내부구조물의 진동을 감시할 수 있다(Table 1). 이 때 파악된 특정구조물의 진동스펙트럼이 시간에 따라 변화하는 것을 관찰하여 분석함으로써 내부구조물의 이상여부를 알 수 있게 된다.

### 2.3 진동의 규모계산

Fig. 3과 같이 노심지지통이 한 감지기와  $\theta$ 의 각을 이루며  $\Delta r(t)$ 만큼 진동할 때, 두 감지기 A와 B에서의 전압변화와 노심지지통의 진동은 아래의 관계를 가진다.

$$\begin{cases} \frac{\Delta v_A(t)}{v_0} = -\mu \Delta r(t) \sin \theta \\ \frac{\Delta v_B(t)}{v_0} = -\mu \Delta r(t) \cos \theta \end{cases} \quad (9)$$

또는

$$\Delta r(t) = \frac{1}{\mu} \sqrt{\left(\frac{\Delta v_A(t)}{v_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v_B(t)}{v_0}\right)^2} \quad (10)$$

따라서 식 (9)를 Fourier 변환하면

$$\begin{cases} \frac{\Delta V_A(\omega)}{v_0} = -\mu \Delta R(\omega) \sin \theta \\ \frac{\Delta V_B(\omega)}{v_0} = -\mu \Delta R(\omega) \cos \theta \end{cases} \quad (11)$$

가 되며, 이에 따라 식 (10)도

$$\Delta R(\omega) = \frac{1}{\mu} \sqrt{\left(\frac{\Delta V_A(\omega)}{v_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_B(\omega)}{v_0}\right)^2} \quad (12)$$

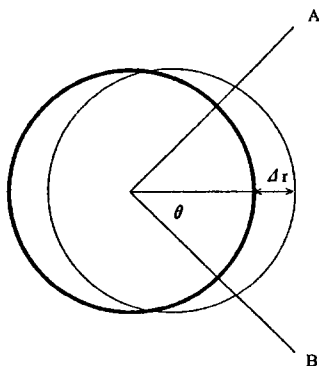


Fig. 3 Two-dimensional vibration of CSB

와 같이 표현될 수 있다. 여기서  $\Delta V(\omega)$ 와  $\Delta R(\omega)$ 는 각각  $\Delta v(t)$ 와  $\Delta r(t)$ 의 Fourier변환이다. 따라서 주파수영역  $[f_1, f_2]$ 에서

$$\Delta R_{rms} = \frac{1}{\mu} \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} NPSD_A(\omega) d\omega + \int_{f_1}^{f_2} NPSD_B(\omega) d\omega} \quad (13)$$

의 관계가 성립한다. 여기서  $NPSD$  (Normalized Power Spectral Density)는

$$NPSD_A(\omega) = \frac{\int_{f_1}^{f_2} [\Delta V_A(\omega)]^2 d\omega}{v_0^2} \quad (14)$$

와 같이 표현된다. 그러므로 노외중성자속감지기에 감지되는 전압의 세기의 변화  $\Delta v(t)$ 를 측정하고 변환계수  $\mu$ 를 알면  $NPSD$ 를 이용하여 노심지지통의 진동의 크기를 알 수 있다.

변환계수  $\mu$ 를 알기 위해서는 원자로내부의 노심지지통에, 이탈된 속중성자와 열중성자의 수가 노심지지통이 진동함에 따라 다음과 같은 요인에 의해 노외의 중성자속 감지기에 도달하는 수가 달라지는 사실을 고려한다.

단위 중성자속당 중성자수의 변화 =

(단위 중성자속당 냉각재에 의해 열중성자로 감속되는 속중성자의 수) - (단위 중성자속당 냉각재에 의해 흡수되는 속중성자와 열중성자의 수) (15)

이에 따라 변환계수  $\mu$ 는 다음과 같이 결정된다.

$\mu = (\text{속중성자에 대한 물의 산란단면적} + \text{속중성자에 대한 붕소의 산란단면적} \times \text{붕소의 밀도}) - (\text{속중성자에 대한 물의 흡수단면적} + \text{속중성자에 대한 붕소의 흡수단면적} \times \text{붕소의 밀도} + \text{열중성자에 대한 물의 흡수단면적} + \text{열중성자에 대한 붕소의 흡수단면적} \times \text{붕소의 밀도})$  (16)

### 2.4 진동신호의 해석결과

본 연구에서는 영광 3호기의 100% 출력시 노외중성자속 감시시스템의 네 채널로부터 신호를 취득하여 직류성분을 제거한 후 시간이력신호를 Fourier변환하여 분석하였다. Fig. 4는 기존의 발전소에서 운전원이 요구할 때에 원자로의 진동해석전문가에 의해 수행되는 방법의 개념도이다. 신호취득은 TEAC DAT Recorder RD-135T를 사용하였으며, B & K

Signal Analyzer 2035와 LabWindows/CVI를 이용하여 신호를 해석하였다. 영광 3호기 노외중성자속 감지기의 위치는 Fig.5와 같다. 원자로의 주요내부 구조물인 노심지지통은 Fig.2에서와 같이 beam mode 진동과 shell mode 진동을 한다. 이 때, 그림에서와 같이 네 위치에서 검출한 중성자속 신호는 Table 1의 스펙트럼특성을 가진다. 여기서, 감지기 A, B, C, D는 B & K Signal Analyzer에서 각각 채널 X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>에 해당하므로 Table 1의 cross detector쌍과 adjacent detector 쌍은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Cross Detectors} &= \{(X_1, Y_2), (X_2, Y_1)\}, \\ \text{Adjacent Detectors} &= \\ &\{(X_1, X_2), (X_1, Y_1), (X_2, Y_2), (Y_1, Y_2)\} \end{aligned}$$

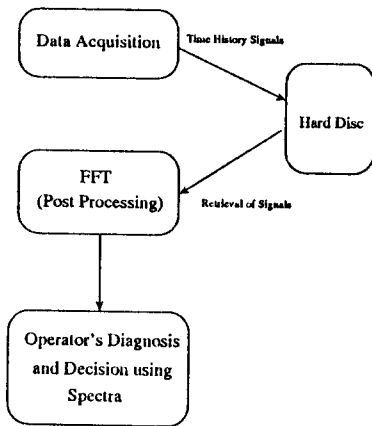


Fig. 4 Typical method for excore neutron noise analysis to detect CSB vibration

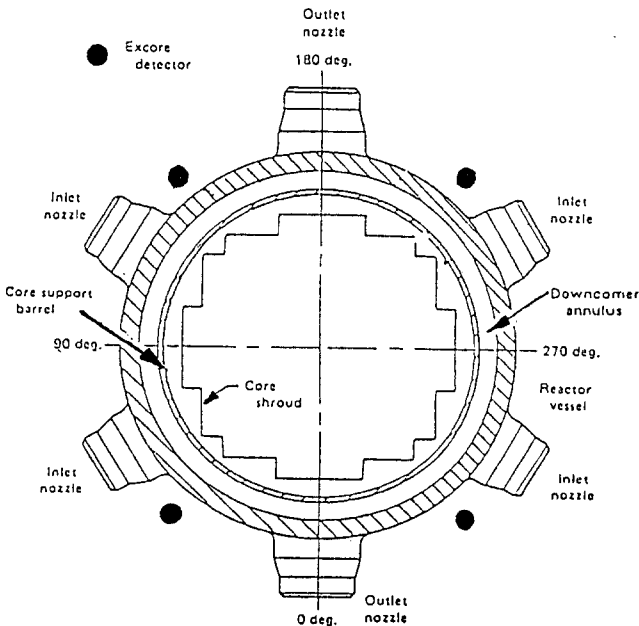


Fig. 5 Location of excore neutron flux detectors

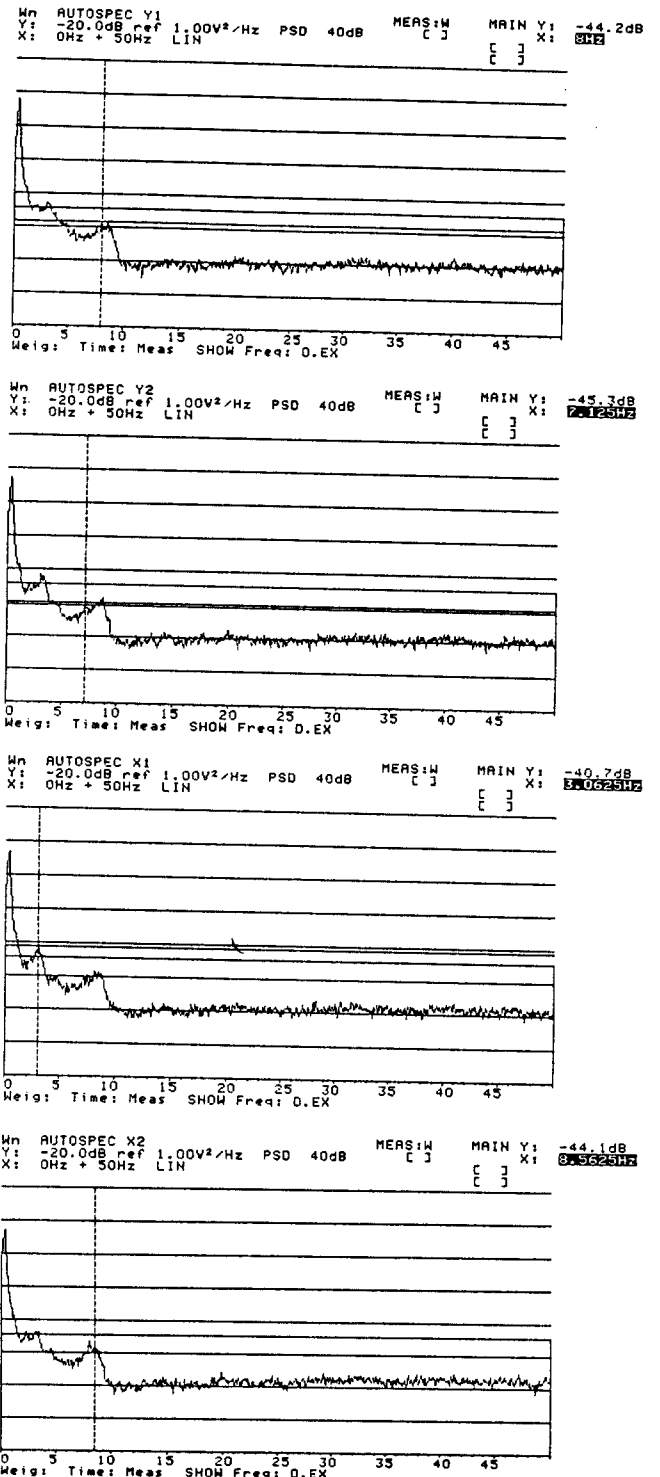


Fig. 6 APD of excore neutron flux noise signals for YGN unit 3

각 감지기에서 검출된 신호의 Auto-Power Spectral Density (APSD) function은 Fig. 6과 같다. 그러나 APSD에는 기계구조물의 진동에 의한 영향 이외의

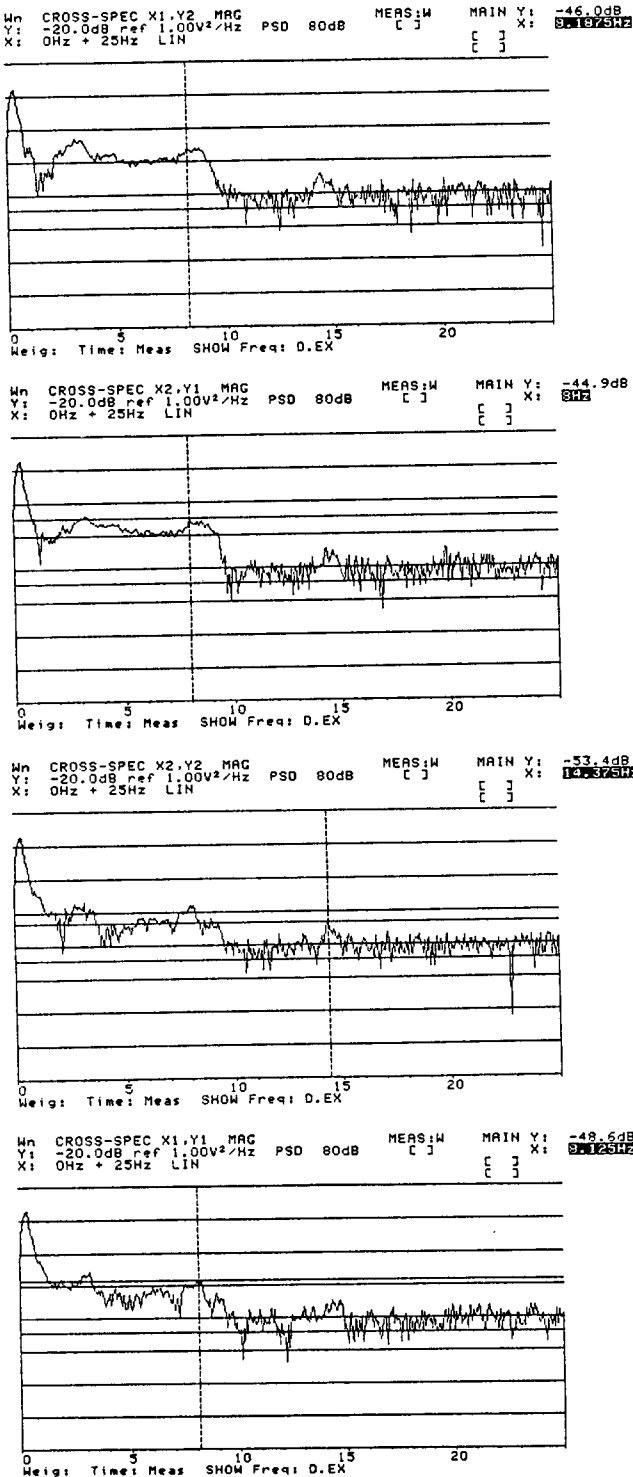


Fig. 7 CPSD of excore neutron flux noise signals for YGN unit 3

성분들이 많이 포함되어 있으므로 각 신호들사이의 CPSD를 구해보면 Fig. 7과 같다. 이 두 종류의 스펙트럼을 통해 2.4Hz, 3.0~3.4Hz, 4.3Hz, 6.8~7.3Hz, 8.0~8.9Hz, 14.3Hz, 그리고 19.9Hz 등에서 진동과 관련된 피크가 나타남을 알 수 있다. 한편, 각 시간이력신호의 Coherence(Fig. 8)와 위상각(Fig. 9)을 고려할 때, 8.4Hz와 8.9Hz 사이에서 노심지지통의 beam mode 진동이 있으며, 3.1Hz와 3.4Hz 사이에서는 핵연료집합체의 전형적인 beam mode 진동이 나타난다. 이상의 분석결과는 Table 2와 같다.

한편, 식 (16)에 의해 변환계수  $\mu$ 를 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mu &= 44.6b - 0b - (0.66b + 5b - 4.5b - 100.2b) \\ &\quad \times 790\text{ppm} \\ &\approx 0.0099\text{mm}^{-1} (1b = 1\text{barns} = 10^{-24}\text{cm}^{-1}), \end{aligned}$$

또 노심지지통의 진동주파수( $f_c$ )에 대한 감시범위가  $\pm 25\%$  이내임을 고려하여 감시범위를 7~10Hz로 하고 NPSD의 진폭을 가장 보수적으로 선택할 때,

$$\begin{aligned} \text{NPSD}_A(7\text{Hz}) &= 1.41 \times 10^{-9}, \\ \text{NPSD}_B(10\text{Hz}) &= 1.77 \times 10^{-9} \end{aligned}$$

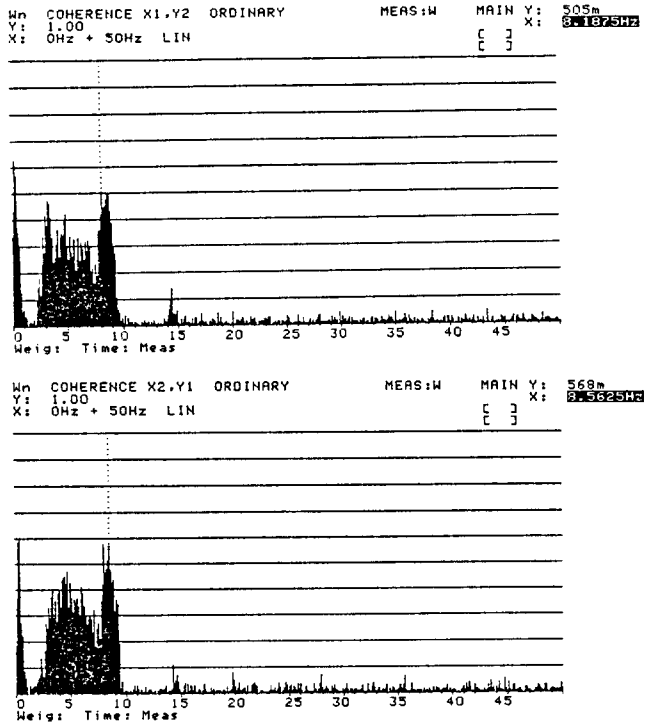
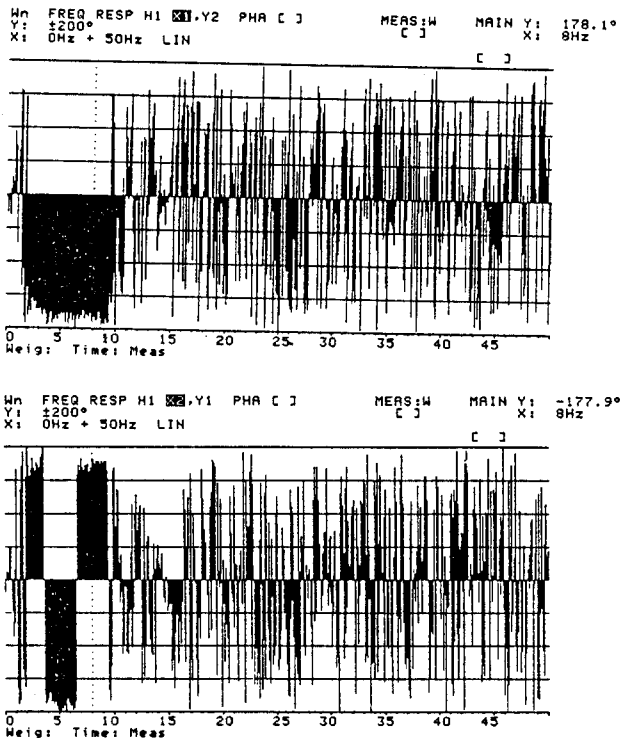


Fig. 8 Coherence of excore neutron flux noise signals for YGN unit 3

**Table 2** The characteristics of excore neutron flux spectra for YGN unit 3

| Detector pairs     |                                    | CPSD frequency(Hz)                | Phase(°)           | Coherence |
|--------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------|
| Cross detectors    | (X <sub>1</sub> , Y <sub>2</sub> ) | 3.1, 3.4, 4.5, 7.3, 8.4, 8.7, 8.9 | 162~180            | high      |
|                    |                                    | 14.4, 14.8, 19.9                  | 6~20               | low       |
|                    | (X <sub>2</sub> , Y <sub>1</sub> ) | 3.1, 4.6, 8.6                     | 168~178            | high      |
|                    |                                    | 14.3, 14.6, 19.9                  | 2~16               | low       |
| Adjacent detectors | (X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> ) | 2.3, 3.1, 3.4, 4.3                | 32, -135, -73, -90 | low       |
|                    |                                    | 6.1, 7.9                          | -3, -20            | high      |
|                    |                                    | 8.9, 14.3                         | 166, 170           | low       |
|                    | (X <sub>1</sub> , Y <sub>1</sub> ) | 7.9, 9.1, 6.3, 6.9, 14.3, 19.9    | 162~179            | high      |
|                    |                                    | 3, 3.5, 8.2, 2.3                  | 13~65              | low       |
|                    | (X <sub>2</sub> , Y <sub>2</sub> ) | 5.8, 7.9, 6.8, 14.4, 19.9         | 168~179            | high      |
|                    |                                    | 3.3, 8.8, 2.5, 2.7                | 34~52              | low       |
|                    |                                    | 2.4, 3.4, 3.9, 8.1, 6.3           | 1~26               | high      |
|                    | (Y <sub>1</sub> , Y <sub>2</sub> ) | 7.3, 8.8, 14.3, 14.6, 19.9        | 166~178            | low       |



**Fig. 9** Phase of excore neutron flux noise signals for YGN unit 3

이므로

$$\Delta R_{rms} = 0.0099\text{mm} (0.38\text{mil})$$

의 폭으로 진동하고 있음을 알 수 있다. 이것은 노

심 지지통과 snubber의 간격이 최대 5mils (0.1225mm)인 것을 고려하면 허용범위의 약 7.6%의 진동규모를 가지는 것이다.

### 3. Fuzzy방법에 의한 노심지지통의 고유진동주파수 인식

앞에서 살펴 본 것과 같이, 수집된 시간이력신호를 Fourier변환하여 APSD와 CPSD를 구한 후, 피크값을 조사하면 구조물의 진동주파수를 알 수 있다. 또한 Coherence와 Phase spectrum으로 각 감지기신호들 사이의 상호연관성과 진동의 방식을 추정할 수 있다. 일반적으로 구조물의 진동감시는 이러한 FFT 스펙트럼의 지속적인 변화추적을 통해 이루어지고 있다. 그러나 수집된 중성자 잡음신호를 FFT 변환한 후 그 스펙트럼을 현장의 운전원에게 직접 전달하여 판단하도록 하는 것은, 원전의 운전원이 원자로잡음해석 전문가가 아닐 경우 진단효율이 극히 낮거나 판단에 오류를 범할 가능성이 있다. 또한, 중성자속 잡음신호는 뚜렷하고 선명한 피크를 찾아 내기 어렵고 CSB 이외의 신호잡음 변동요인이 많이 포함하고 있으므로, 약간의 주파수 변화만으로 CSB 체결구조의 변화라 판단할 수는 없다. 그러므로 이러한 점들을 고려하여 진단 시스템을 자동화함으로써 전문가가 아닌 운전원이라 할지라도 노심체결부의 건전성을 수시로 감시하고 진단할 수 있도록

하는 것이 바람직한 일이다. 본 연구에서는 이를 구현하기 위해 Fig. 10과 같은 Real-time Automated Monitoring and Diagnosis System을 구성하여 연구 중이며, 자동파형인식을 위해 Fuzzy 알고리즘을 다음과 같이 적용하였다.

### 3.1 파형인식

Fig. 11은 본 연구에 적용된 퍼지 알고리즘의 개념도이다. 중성자속 분신신호를 입력으로 하여 퍼지화하는 과정은 Fig. 12에 도시하였다. 그림에 나타난 것은 퍼지 알고리즘 내부에 있는 이등변삼각형 소속

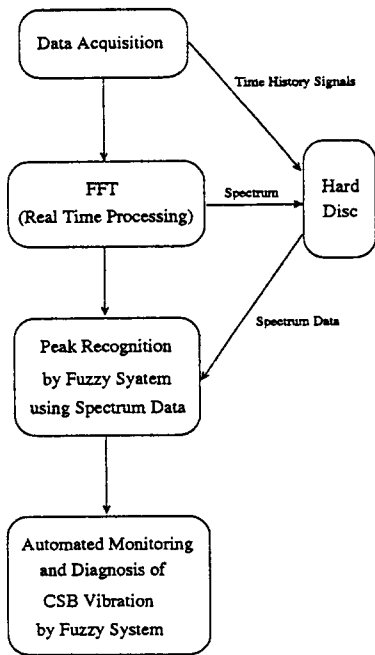


Fig. 10 Automated monitoring and diagnosis system for CSB vibration

함수의 초기화된 모습이다. 5.2Hz와 6.2, 7.5, 8.3, 9.9Hz의 스펙트럼 크기를 이용하여 퍼지값을 생성하고 추론하는 방법을 적용하였다.

### 3.2 주파수 및 진폭변화예상치의 감시영역

원자로 내부 구조물의 이상은 주로 CSB 체결구조의 결합과 열차폐체 부착상태의 결합에 의해 발생한다<sup>(3)</sup>. 본 연구의 목적호기인 영광 3호기의 경우, 열차폐체가 없는 구조의 CSB이므로 그 체결구조의 이상이 주된 노심내부 구조물의 고장상태일 것이라 예상할 수 있다. 한국원자력연구소의 김태룡 박사팀<sup>(4)</sup>이 최근에 행한 연구에서 울진 원전 1호기의 CSB를 유한 요소법으로 3차원해석한 결과에 의하면 CSB 경계조건 완화(체결구조 결합)에 따른 고유진동수의 변화는 Table 3과 같다. CSB의 체결 구조가 약 20%의 결합을 가지는 경우 고유진동수는 18.5%정도 변화하는 것으로 밝혀져 있으므로, 본 연구에서는 0~20%의 고유진동 변화검출을 진단의 목표로 한다. 한편, 소형 CSB 모델을 대상으로 행해진 실험<sup>(3)</sup>(Fig. 13)에서 경계조건 완화에 따른 고유 진동수 및 진폭의 변화는 Fig. 14와 같은 것으로 밝혀졌다. Fig. 14에 나타난 바와 같이 300Hz미만의 beam mode 고유주파수는 경계조건에 민감하게 반응하여 CSB를 지지하는 joint의 수가 줄어들어 따라 변화하나, 320Hz 근방의 shell mode주파수는 거의 변화하지 않는다. 또한 진폭은 고유 주파수가 감소함과 동시에 줄어드는 것으로 나타났다. 그런데 중성자속 신호는 실제 원자로에 핵연료를 넣고 운전을 하여야만 수집할 수 있으므로 이러한 CSB 체결구조의 결합에 따른 고유 진동수 변화자료를 얻는 것이 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 소형 CSB 모델 실험을 근거로 인식시스템의 training data를 생성하

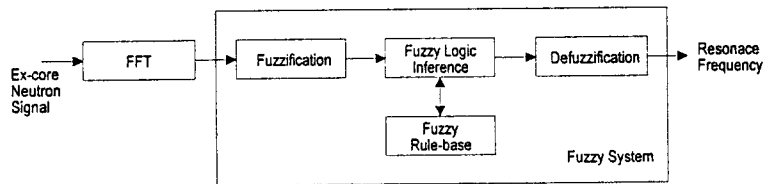


Fig. 11 The schematic diagram of Fuzzy peak recognition algorithm

Table 3 Natural frequencies of CSB vibration with various flange conditions

| Condition     | Normal   | 5% loosed | 10% loosed | 15% loosed | 20% loosed |
|---------------|----------|-----------|------------|------------|------------|
| Vibration     |          |           |            |            |            |
| CSB beam mode | 8.388 Hz | 8.303 Hz  | 8.003 Hz   | 7.473 Hz   | 6.840 Hz   |



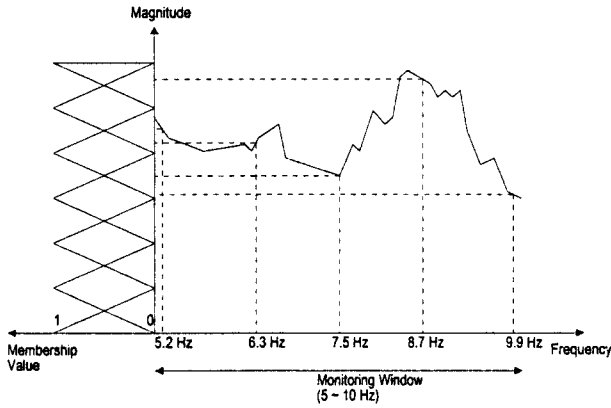


Fig. 12 Neutron noise spectrum and Fuzzy membership function

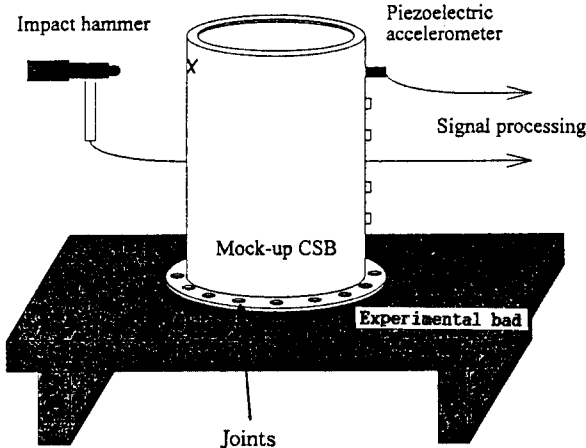


Fig. 13 Mock-up CSB and holding joints

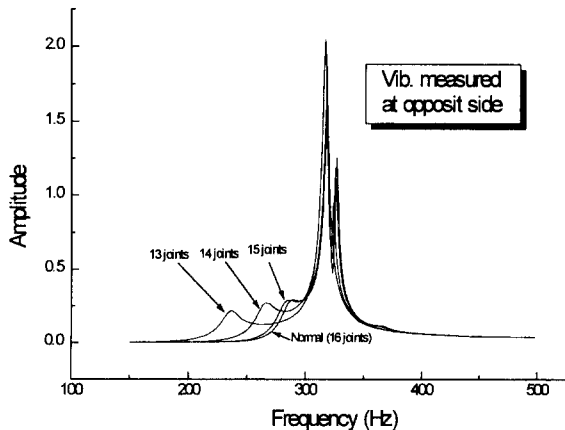


Fig. 14 Change of natural frequencies along boundary condition varies in small mock-up CSB model experiments

였다.

이러한 기존의 연구를 토대로 본 연구에서 추정된 CSB beam mode 주파수(8~9Hz) 영역을 고려하여 Fig. 12에 도시된 바와 같은 5~10Hz 감시 영역 (monitoring window)을 설정하였다. 고유 주파수뿐 아니라 그 진폭도 CSB 체결구조 상태의 중요한 정보를 제공하지만 중성자 신호의 경우 핵주기의 영향 등 잡음요인이 많아 본 연구의 인식시스템의 대상에서 제외하였다.

### 3.3 퍼지 인식 시스템

본 연구에서는 Nomura 등<sup>(5)</sup>이 제안한 gradient descent 방법의 학습을 적용하였다. 학습을 위한 식은 아래와 같이 구할 수 있다.

일정한 출력값을 갖는 Takagi-Sugeno rule type은 다음과 같다.

$$x_i \text{가 } A_{i1}, \dots, x_m \text{가 } A_{im} \implies y \text{는 } w_i, \quad (i=1, \dots, n) \quad (16)$$

여기서

$x^T = (x_1 \dots x_m)$  : 입력벡터

$A_{ij}$  :  $i$ -rule,  $j$ -번째 입력에 대한 멤버십 함수

$y$  : 출력변수

$w_i$  :  $i$ -번째 rule의 실제 출력값

$n$  : rule의 총 수

$m$  : 입력변수의 총 수

$A_{ij}$ 는 다음과 같이 표현되는 이등변 삼각형 소속 함수이다.

$$A_{ij}(x_j) = \begin{cases} 1 - \frac{2|x_j - a_{ij}|}{b_{ij}} & ; |x_j - a_{ij}| \leq \frac{b_{ij}}{2}, \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

이 때,  $a_{ij}$ 와  $b_{ij}$ 는 각각 삼각형의 중심점과 밑변의 길이이다. 소속함수값  $\mu_i(x)$ 는 다음과 같다.

$$\mu_i(x) = \prod_{j=1}^m A_{ij}(x_j) \quad (18)$$

이러한 조건에서 무게중심법에 의한 rule base의 출력치는 다음과 같다.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i w_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (19)$$

Gradient descent 방법을 사용하여 변수  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$ , 그리고  $w_i$ 를 다음과 같은 학습방법에 의해 수정한다.

$$z(t+1) = z(t) - K \left. \frac{\partial E}{\partial z} \right|_t \quad (20)$$

여기서

$z$  :  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$ , 또는  $w_i$

$K$  : 학습 속도계수 ( $K_a$ ,  $K_b$ ,  $K_w$ )

$t$  : 학습 반복수

각 변수  $z$  는 오차를 최소화하는 방향으로 학습을 진행하며, 그 목적 함수  $E$  는 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{D} \sum_{p=1}^D E_p \quad (21)$$

$$E_p = \frac{1}{2} (y_p - y_p^d)^2 \quad (22)$$

여기서

$D$  : Training에 사용된 자료의 수

$y_p$  : 식 (19)로 부터 계산된 값

$y_p^d$  : 기준출력값

최종적으로 각 변수의 학습 함수는 다음과 같이 구해진다.

$$a_{ij}(t+1) = a_{ij}(t) - \frac{K_a}{D} \sum_{p=1}^D \frac{w_i - y_p}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \frac{\mu_i}{A_{ij}} \frac{2 \operatorname{sign}(x_j - a_{ij})}{b_{ij}} (y_p - y_p^d) \quad (23)$$

$$b_{ij}(t+1) = b_{ij}(t) - \frac{K_b}{D} \sum_{p=1}^D \frac{w_i - y_p}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \frac{\mu_i}{A_{ij}} \frac{1 - A_{ij}}{b_{ij}} (y_p - y_p^d) \quad (24)$$

$$w_i(t+1) = w_i(t) - \frac{K_w}{D} \sum_{p=1}^D \frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} (y_p - y_p^d) \quad (25)$$

이때 상수  $K_a$ ,  $K_b$ ,  $K_w$  는 각각  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$ ,  $w_i$  를 위한 학습속도계수이고

$$\operatorname{sign}(x_j - a_{ij}) = \begin{cases} 1; & x_j \geq a_{ij}, \\ 0; & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

이다. 한편, 위에 언급한 바와 같이 원자로의 실제 고장 신호를 수집할 수 없으므로 정상 상태의 신호를 모형 실험을 근거로 하여 변형한 것을 고장 신호로 training하였다. Training에 사용된 신호 중 정상 신호와 0.5, 1, 1.5Hz 변화 신호는 Fig.15와 같다. 정상 신호의 고유 진동수는 8.4Hz에 있는 것으로 training 하였다. 이렇게 Training된 인식 시스템이 0~2Hz의 고유 진동수변화에 따른 변동 신호를 입력하였을 때, 그 인식 오차를 도시하면 Fig.16와 같다. 그 결과 training된 부분뿐 아니라 그 외의 영역에서도 좋은 인식능력을 보이는 것으로 판명되었다. 평균 인식오차는 약 0.6%이다.

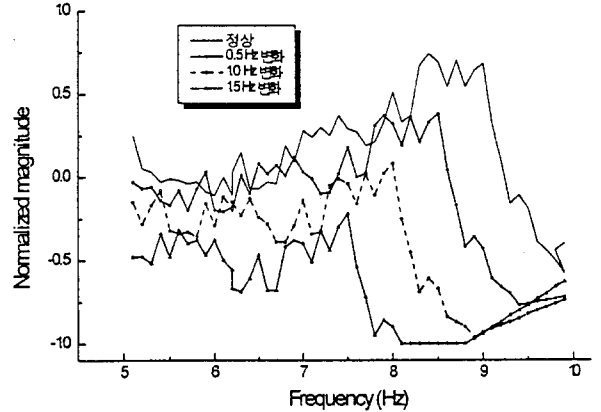


Fig. 15 Normal and changed signals that have 0.5Hz, 1Hz and 1.5Hz natural frequency shifts, respectively for Fuzzy recognition system training.

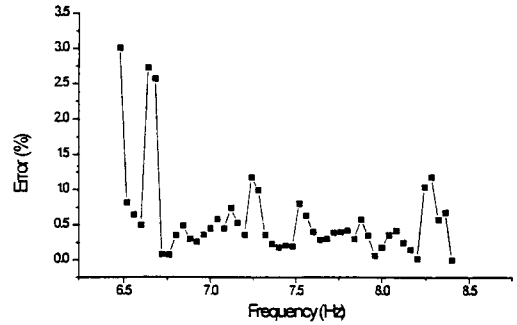


Fig. 16 The error of Fuzzy peak recognition system

## 5. 결 론

원자로내부의 주요구조물인 노심지지통은 원자로의 상부와 외팔보방식으로 체결되어 beam mode 진동특성과 shell mode 진동특성을 가진다. 이러한 노심지지통의 진동은 시간이력신호를 Fourier변화하여 주파수영역에서 나타낸 후, APSD, CPSD, Coference, 그리고 Phase angle을 분석함으로써 감지될 수 있다. 본 연구에서는 국내에서 최초로 운전이 시작된 미국 Combustion Engineering사의 노형인 영광 3호기에 관한 노심지지통의 진동특성을 다음과 같이 분석하였다.

- CSB Beam Mode 진동주파수 : 8.4-8.9Hz
- 변환계수 :  $2.51 \times 10^{-4} \text{mil}^{-1}$
- CSB Beam Mode 진폭 : 0.38mil

영광 3, 4호기에는 NSSS Integrity Monitoring System(NIMS)의 한 부계통으로 Internals Vibra-

tion Monitoring System(IVMS)이 설치되어 있으며, Fast Fourier Transform(FFT)를 이용한 여러가지 스펙트럼을 생산할 수 있다. 그러나 Fig. 4에 나타난 것과 같이 기존의 계통에서는 대부분의 진동신호 취득과 분석이 발전소운전원의 요구와 판단에 의해 이루어지므로, 운전원이 원자로진동해석 전문가가 아닐 경우 계통운영에 어려움이 있을 수 있다. 이를 극복하기 위한 방법으로 신호분석 및 파형인식에 관한 신뢰도 높은 알고리즘이 제공되어야 할 것으로 보며, 본 연구에서는 진동파형의 인식과 진동의 크기환산, 그리고 지속적인 이상진동의 감지를 수행하기 위하여 Fuzzy 알고리즘이 적용 가능성을 확인하였다.

### 참고 문헌

- (1) W. Bastl and V. Bauernfeind, 1975, "The Estimation of Vibration of Reactor Internals by Noise Analysis of Non-Nuclear Parameters", Ann. Nucl. Energy, Vol. 2, p. 277.
- (2) A. Trenty and et al., 1991, "SINBAD, A Data Base for PWR Internals Vibratory Monitoring", Proc. of SMORN VI.
- (3) 강현국, 1995, "압전가속도계와 퍼지 아트맵을 이용한 노심지시관 진동감시시스템 개발", 한국과학기술원, 석사학위 논문, p. 36.
- (4) 김태룡 외, 1994, 중성자 신호를 이용한 원자로 내부구조물 진단 기술에 관한 연구, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1386/93.
- (5) H. Nomura, I. Hayashi, and N. Wakami, 1992, "A Learning Method of Fuzzy Inference Rules by Descent Method", Tutorial Notes of Korea-Japan Joint Conference on Fuzzy System and Engineering, pp. 169~176.

(1) W. Bastl and V. Bauernfeind, 1975, "The Esti-