

중성자잡음신호를 이용한 영광 3,4호기 원자로내부구조물의 진동 분석

조상진, 성계용, 김봉현

한국원자력안전기술원

대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

본 연구에서는 영광 3,4호기 원자로의 Core Support Barrel 거동을 중성자 잡음해석을 이용하여 분석하였다. 분석 방법은 원자로 노외계측기에서 취득한 교류 성분의 중성자 잡음 신호를 주파수분석하므로써 얻어진 PSD, Phase, Coherence 등을 이용하였다. 영광 3,4호기의 1 주기 동안의 신호를 분석 결과, CSB의 Beam Mode 주파수는 영광 3호기의 경우 BOL, MOL, EOL에서 각각 7.75 ~ 8.5Hz, 7.75Hz, 7.25 ~ 7.75Hz로 나타났고, 영광 4호기 BOL에서 8.5 ~ 8.75Hz 임이 도출되었다. 본 연구 결과는 한국형 원전의 원자로 내부구조물의 진동 특성을 파악하고 운전중 CSB건전성 진단을 위한 기초 자료로 활용할 수 있다.

1. 서 론

가압경수형 원자로의 내부 구조물은 경년 열화(Aging) 및 원자로 냉각재의 Flow Induced Vibration에 의해서 내부 구조물간의 체결력 저하 혹은 파손으로 노심손상을 유발할수 있다. 특히 원자로 내부구조물의 결함은 주로 노심지지통(Core Support Barrel; CSB)과 원자로 상부 헤드간의 체결 부위 또는 열차폐통(Thermal Shield ; TS)과 CSB의 체결부위에서 발생된다.

이러한 결함을 조기에 발견하기 위해 노외 중성자 계측기에서 발생하는 중성자 잡음 신호를 이용한 해석방법이 이미 외국 원전에서는 널리 이용되고 있으며 미국에서는 ASME/ANSI OM Part 5 [1]을 발간하여 사업자들에게 감시 및 분석지침을 제공하고 있다. 국내에서도 울진1 및 영광 3,4

호기에 원자로 잡음을 이용한 IVMS(Internal Vibration Monitoring System)가 설치되어 원자로 내부구조물의 건전성을 감시할 수 있도록 되어 있으나 잡음해석 기술 및 관련 설비의 운전 경험 부족, 결합 진단기술의 미미함으로 인해 그 활용도가 매우 낮은 실정이다.

본 연구 대상인 영광 3, 4호기는 CE형 2 Loop 1300MWe급을 1000MWe급으로 축소 제작한 최초의 노심으로써 이에 대한 CSB 운동특성은 영광4호기 가동전 시험중 CVAP(Comprehensive Vibration Assessment Program) 시험에 의해 측정되어지기는 하였지만, 운전중 CSB 거동을 감시하기 위해서는 실제 핵연료가 장전된 상태에서의 측정값이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 영광3, 4호기 첫주기 100% 출력 운전중 노외 중성자 계측기에서 취득한 중성자 잡음 신호 분석을 통하여 원자로 내부구조물, 특히 CSB의 운동 Mode 특성을 확인하여 발전소 수명 동안 내부구조물의 진단을 위한 초기분석 자료로 활용하고 한국형원전의 원자로 내부구조물에 대한 진동 감시기술의 Baseline Data를 제공하고자 함이다.

2. CSB 진동 관련 중성자 잡음신호의 표현[2]

정상적인 발전소 출력운전시 노외중성자검출기로 부터 나오는 신호는 식 (1)과 같이 직류성분과 교류성분의 합으로 표현할 수 있다.

$$I(t) = \langle I \rangle + \delta I(t) \quad (1)$$

$$\delta I(t) = \delta I_c(t) + \delta I_r(t) + \delta I_s(t)$$

여기서 $\langle I \rangle$ 는 신호의 평균값을 나타내고, 변동치 $\delta I_c(t)$ 는 CSB/TB의 운동에 의한 변동치이며, $\delta I_r(t)$ 는 반응도 변동치, $\delta I_s(t)$ 는 계측기내에서의 반응율의 통계적 변동치를 의미한다.

원자로 출력 운전중 미세한 변동성분($\delta I(t)$)만을 분리하여 신호값에 대한 일반적인 종속성을 나타내는 함수인 Auto-correlation function 및 Cross-correlation function를 Fourier 변환하면 아래와 같이 Power Spectral Density Function (PSD) 및 Cross Power Spectral Density Function (CPSD)으로 표현된다.

$$PSD_i(f) = \langle \delta I_{ic}^*(f) \delta I_{ic}(f) \rangle + \langle \delta I_{ir}^*(f) \delta I_{ir}(f) \rangle + \langle \delta I_{is}^*(f) \delta I_{is}(f) \rangle \quad (2)$$

$$CPSD_{1,2}(f) = \langle \delta I_{1c}^*(f) \delta I_{2c}(f) \rangle + \langle \delta I_{1r}^*(f) \delta I_{2r}(f) \rangle + \langle \delta I_{1s}^*(f) \delta I_{2s}(f) \rangle$$

여기서 $\langle \rangle$ 는 Ensemble 평균을 나타내며 PSD는 계측기 i 채널의 신호이며 CPSD는 계측기 1 및 2의 신호를 의미한다. 또한 *의 표현은 해당 신호의 Conjugate를 나타낸다.

또한 두 검출기 신호간의 상관관계를 확인하기 위하여 위상각(Phase), Coherence함수 ($r_{12}^2(f)$) 및 RMS가 이용되는데 먼저, 위상각은 CPSD를 이용하여 식(4)와 같이 도출되며 Coherence함수 $r_{12}^2(f)$ 는 CSPD 및 PSD의 관계로 부터 식 (5)과 같이 표현된다.

$$\phi_{1,2}(f) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[CPSD_{1,2}(f)]}{\text{Re}[CPSD_{1,2}(f)]} \quad (4)$$

$$CF_{1,2} = r_{1,2}^2(f) = \frac{|CPSD_{1,2}(f)|^2}{PSD_1(f)PSD_2(f)} \quad (5)$$

또한 PSD에 대한 RMS값은 식(6)에 의해서 구할 수 있으며 RMS는 CSB의 운동 진폭을 평가하는 척도로 이용되고 발전소 정상 출력 운전 동안 경보값으로 제공될 수 있다.

$$(\text{RMS})^2 = \int_{f_1}^{f_2} PSD(f) \text{ (or CPSD)} df \quad (6)$$

3. 신호 취득 및 분석

영광 3, 4호기의 원자로 내부구조물은 그림 1 과 같이 CSB, 하부안내구조물 및 상부안내구조물등으로 분류된다. 본 연구의 주요 관심 부분인 CSB는 원자로 압력용기 상부 노즐 부분에 Hold-down Ring으로 연결되어 있으며 핵연료체 및 제어봉 등을 지지하고 있다. 원자로 내부구조물 진동을 감시하기 위해서 이용되는 노외 중성자 검출기의 안전 채널은 그림 2 와 같이 고온관 중심선에서 35°, 30° 정도 떨어져 4 방향에 설치되었으며, 한 채널당 상부, 중간 및 하부의 세부분으로 구성되어 총 12개가 설치되어있다.

신호 측정 및 분석을 위한 장비 구성은 그림 3과 같다. 노외 중성자 계측기 안전채널로 부터 나온 신호들은 발전소 보호계통인 Core Protection Calculator로 신호가 전달되며 한편 이와 동시에 내부구조물의 건전성을 감시 할 수 있도록 IVMS로 신호가 전달된다. 본 연구에서는 중성자 잡음 신호를 Analysis computer 전 단계에서 Tape Recorder 를 통하여 현장에서 취득한 후 실험실에서 불필요한 신호를 제거하기 위해 Filter를 거쳐 Signal Analyzer을 사용하여 분석하였다. 측정된 노외 중성자 잡음 신호들은 원자로 내부구조물의 특성을 파악하기 위해서 APSD, CPSD, Phase , Coherence 및 RMS을 산출하여 그 결과의 경향을 분석하였다. 이를 수행함에 있어서 0.2 Hz~50 Hz Band-Pass Filtering , 50% Overlapping, Averaging 200번, 주파수의 해상도 0.25Hz, 그리고 Window는 Hanning 을 적용하였다.

4. 분석 결과 및 고찰

CSB 운동Mode는 Beam Mode와 Shell Mode로 구분되는데 (그림 4) 이러한 진동Mode의 구분은 PSD, Coherence 및 Phase 등을 이용하여 분석이 가능하다. 즉 CSB Beam Mode는 Cross detector간 에 Coherence는 0.5 ~1의 값을 가지며 Phase는 180°의 특성을 가지고 있으며, CSB Shell Mode는 Coherence는 0.5 ~1의 값을 가지며 Phase는 0°의 특성을 갖는다. 경험적으로 CSB Beam Mode는 7.5 ~14 Hz 사이의 진동특성을 가지며, Shell Mode 는 18~24 Hz에서의 진동특성을 가진다. 본 연구에서는 영광 3,4 호기의 CSB 진동 특성을 파악하고자 1주기 운전 동안 영광 3호기는 BOL('95.2.20), MOL('95.9.29), EOL('96.1.24) 원자로출력 100%에서 측정하였으며, 영광 4호기는 BOL('96.1.24)에 측정 한 자료를 분석하였다. 그림 5는 영광 3호기 노의 계측기의 Lower 채널에서의 CPSD, Phase 및 Coherence를 나타내고 있다. 여기서 알 수 있는 것은 7.75 Hz 에서 반대편에 위치한 중성자 계측기간 에는 위상각은 대략 $\pm 170^\circ$ 을 나타내고 있으며 이때의 Coherence가 0.5 이상으로 나타내고 있다는 것이다. 같은 방법으로 분석한 결과 영광 3호기 1주기 운전동안 CSB의 Beam Mode는 BOL에서 7.75 ~8.5 Hz, MOL에서는 7.75Hz 그리고 EOL에서는 7.25~7.75Hz 임을 확인하였다.

또한 영광 4호기의 노의 계측기의 Lower 채널에서 측정한 결과는 그림 6 에서와 같이 8.5~8.75Hz 에서 CSB Beam 주파수임을 확인할 수 있다. 이것은 영광 4호기 CVAP의 결과(예측치 : 6.7~8.06, 실측치: 7.5 Hz)보다 크게 나타나고 있는데 이는 핵연료의 장전으로 인해 하중의 증가로 인해 Holddown-ring의 체결력이 핵연료 장전전보다 증가했기 때문으로 판단된다.

일반적으로 PWR에서는 약 18~24Hz근방에서 CSB의 Shell Mode Peak가 나타나는데 영광 3,4호기에서는 10Hz이상에서 특정한 Peak값이 나타나지 않았으며 Coherence 역시 0.2이하의 매우 낮은 값을 보여 Shell Mode Peak값을 확인할 수 없다. 그 이유는 노의 중성자 계측기 신호를 IVMS 의 신호 처리 과정에서 고유 CSB 중성자 신호 특성을 잃을 수도 있고, IVMS 자체에서 발생하는 잡음 신호가 유입되므로서 유발될 수도 있다. 또한 신호 취득하는 Tape Recorder의 Dynamic Range가 잘못 설정 될 수도 있는데 이는 발전소 IVMS 분석 결과가 Tape Recorder분석 결과와 같이 10Hz이상에서 특정한 Peak가 나타나지 않는 것으로 보아 신호취득에서의 문제는 아닌것으로 판단된다. 따라서 CSB 진동을 분석하는데 필수적인 Shell Mode Peak도출을 위한 연구가 수행되어야 할 것이고 IVMS의 설계 개선등이 검토되어야 할 것이다.

그림 7은 영광 3호기에서 계측기간의 Phase및 Coherence를 나타내고 있는데 Beam Mode 주파수 부근에서 채널 1과3 간의 Phase는 180°, Coherence 0.5이하, 서로 반대편에 있는 채널 1과4 간의 Phase 는 약 180°, Coherence 는 0.5이상, 그리고 채널 3과4 간의 Phase 는 0°, Coherence 는 0.5이하

를 나타내고 있는 것으로 보아 CSB의 Beam Mode가 그림 6과 같이 운동함을 추론할수 있으며 영광 4호기의 결과도 영광 3호기와 유사하게 나타났다.

그림 8, 9는 ASME OM-5에서 요구하는 협대역(Narrow Band), 즉 중심주파수의 $\pm 25\%$ 및 광대역(Wide Band)은 0.2Hz ~ 20 Hz 범위에서 RMS를 산출한 것으로 영광 3호기 BOL, MOL, EOL 그리고 영광 4호기 BOL에서의 협대역, 광대역의 변화 추이를 나타내고 있다. 여기서 영광 3,4호기 CSB Beam mode의 협대역 및 광대역 RMS 값은 BOL에서 10^{-6} 그리고 EOL에서 10^{-5} 정도의 값을 나타내고 있는데 이는 국내·외국원전의 분석 결과 및 ASME OM Part 5에서 확인된 사실, 즉 RMS 값은 붕소 농도 감소 (혹은 노심 연소도의 증가)함에 따라 증가하는 경향과 일치하고 있다.

5. 결 론

- ▶ 한국형 원자로의 참조 발전소인 영광 3,4호기의 CSB의 Beam Mode주파수는 영광 3호기의 BOL, MOL 그리고 EOL 에서 각각 7.75 ~ 8.5Hz, 7.75Hz, 7.25 ~ 7.75Hz로 나타났고, 영광 4호기에서는 BOL에서 8.5 ~ 8.75Hz 임이 도출되었다.
- ▶ 영광 3호기의 광·협대역 RMS값의 추이는 일반적인 PWR에서와 같이 전형적으로 붕소농도감소(연소도의 증가)에따라 RMS 값이 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 측정된 RMS값은 CSB의 Lateral Motion Displacement 값을 산출하는데 적용하여 CSB체결력 상실시 조기에 노심안전성 평가에 활용될 수 있다.
- ▶ 영광 3,4호기 CSB Beam mode 주파수 및 RMS를 분석하므로서 차후 CSB 체결력 상실시 조기 진단을 위한 Base Line Dta를 확보하였고 후속으로 건설되는 울진 3,4, 및 영광 5,6호기의 원자로 내부 구조물의 진동 특성 파악 및 감시계통의 성능 검증을 위한 기초 자료로 활용이 가능할 것이다.

참 고 문 헌

1. ASME OM Part 5, "Inservice Monitoring of CSB Axial Preload In PWRs", 1989
2. J.S Bendat and A.G Persol, "Random Data Analysis and Measurement Procedures",1971.
3. 김용식, 신원기, "원자로 잡음해석을 이용한 원전 진단기술에 관한 연구", KINS/AR-024, 1990
4. 김태룡, "중성자 신호를 이용한 원자로 내부구조물 진단 기술에 관한 연구",KAERI/RR-1245/93,1993
5. 윤원영 외, "Neutron Noise Analysis for PWR Core Motion Monitoring", J. of KNS, VOL 20,1988
6. 영광 3, 4호기 노의 중성자 계측기 Manual
7. 이 철언 외, "NSSS 진동/누설 감시 장치 개발 I", KRC-92N-J05, 한국전력공사,1994.

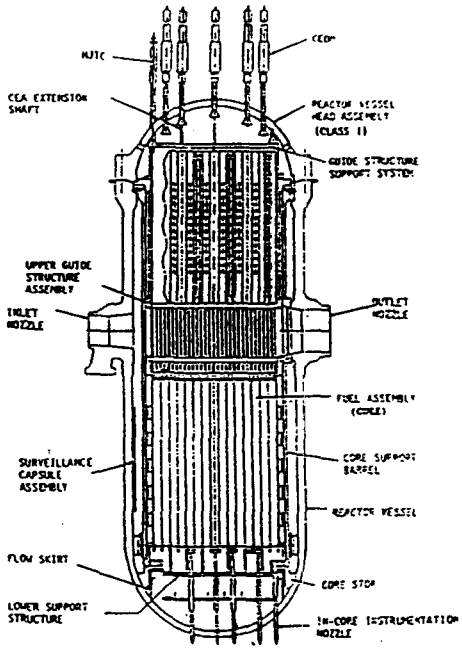


그림 1. 영광3,4호기 원자로 내부구조물

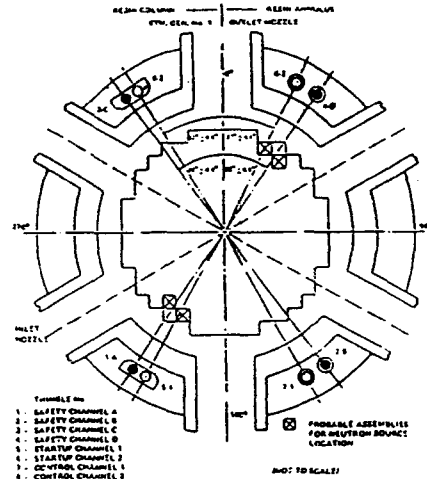


그림 2. 영광 3,4호기 노외계속기 위치

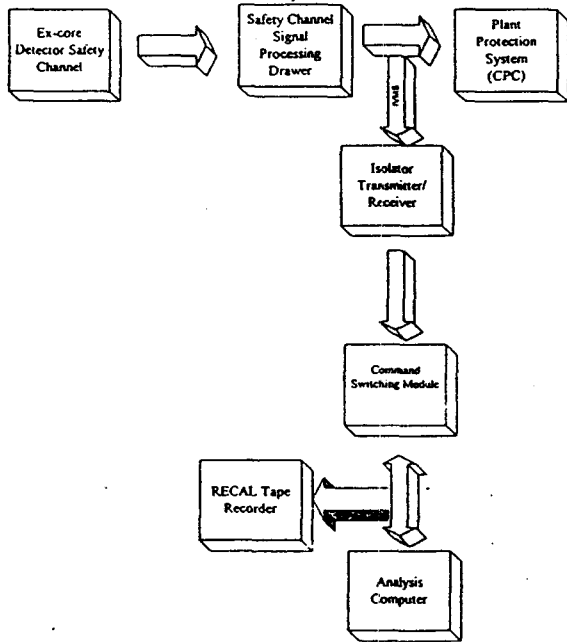


그림 3. 신호취득을 위한 장비 구성도

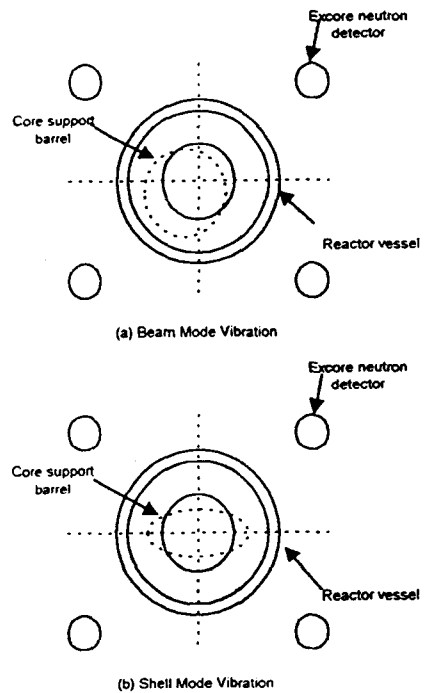
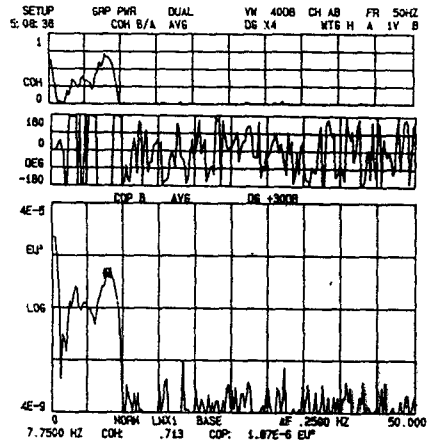
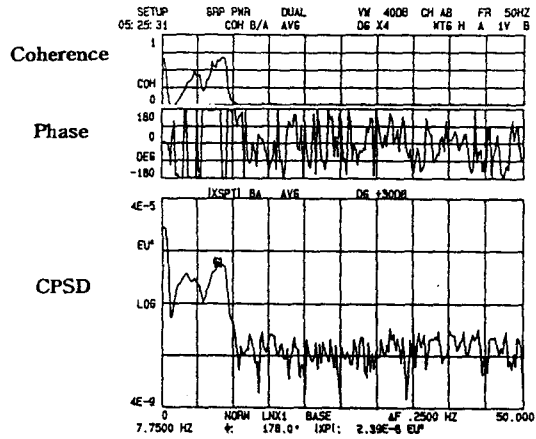


그림 4. 전형적인 노심지지통(CSB)의 Beam모드 및 Shell모드

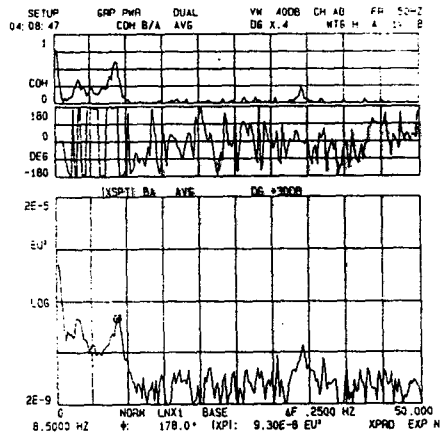


a) CH 1/4

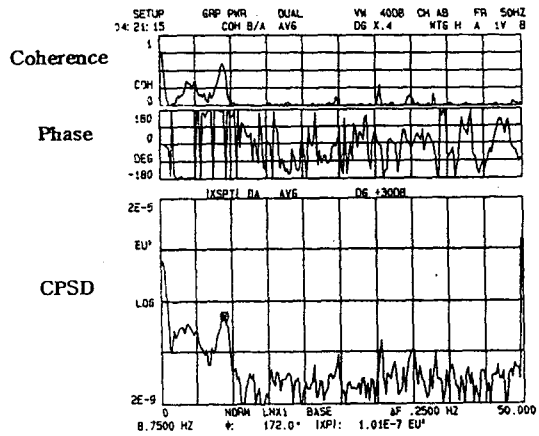


b) CH 2/3

그림 5. 노의 계측기 Lower 채널 1/4, 2/3의 CPSD, Phase, Coherence
(영광 3호기 BOL : FEB 20. 1995, 100% Full Power)



a) CH 1/4



b) CH 2/3

그림 6. 노의 계측기 Lower 채널 1/4, 2/3의 CPSD, Phase, Coherence
(영광 4호기 BOL : JAN 24. 1996, 100% Full Power)

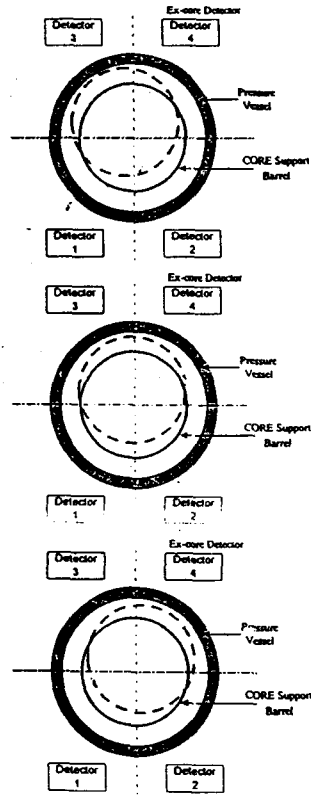
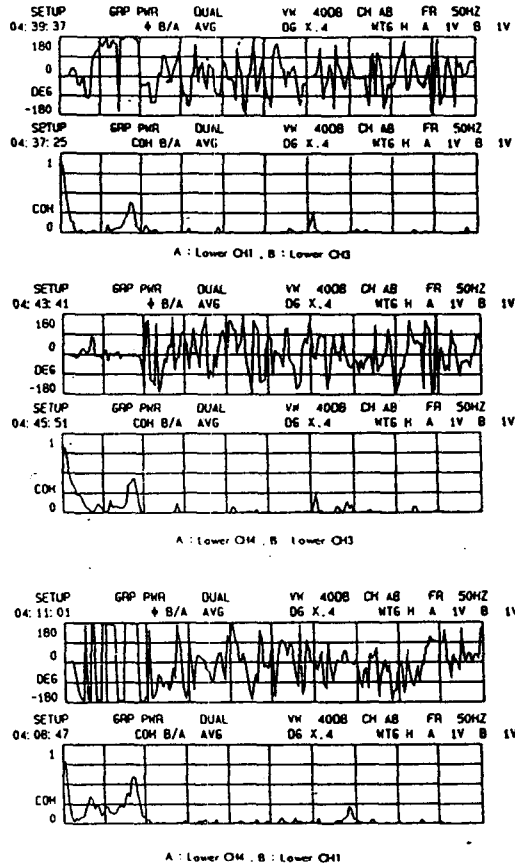


그림 7. 영광 3호기 CSB 운동

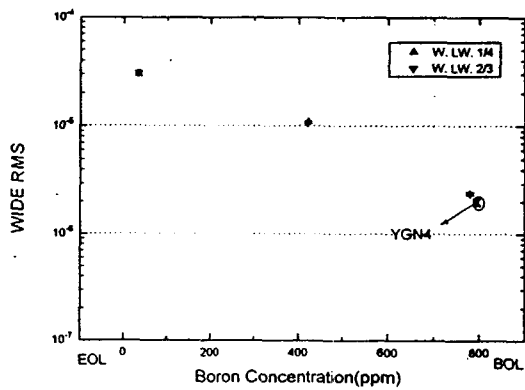


그림 8. 영광 3,4호기 협대역 RMS에 대한 Boron Concentration

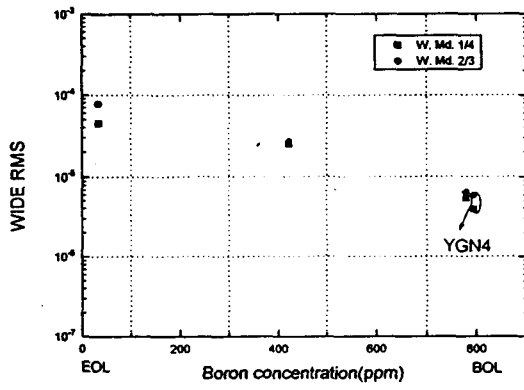


그림 9. 영광 3,4호기 광대역 RMS에 대한 Boron Concentration