

# 특집

원자력 발전소  
원자력 내부구조물

## 한국표준형원전

## 원자로 내부구조물의 종합진동평가

정승하\*  
(한국전력기술(주))

### 1. 머리말

한국표준형원전의 원자로 내부구조물은 그림 1과 같이 원자로용기 내에 위치하며 노심지지배럴(CSB), 하부지지구조물(LSS), 노심슈라우드(CS), 상부안내구조물(UGS), 제어봉안내관(CEA guide tube) 및 제어봉집합체 슈라우드(CEA shroud) 등 여러 개의 복잡한 구조물로 구성되어 있다. 이러한 원자로 내부구조물은 정상운전 및 과도운전 조건에서 원자로 냉각재의 흐름을 유지하고 원자로 노심을 지지하며 보호하는 매우 중요한 역할을 수행한다. 따라서, 원자로 예상 수명 동안 원자로 내부구조물에는 원자로 냉각재로 인해 매우 잦은 빈도의 정적 그리고 동적 수력하중이 가해지므로 이러한 유체유발 수력하중으로부터 과도한 진동을 피할 수 있도록 원자로 내부구조물은 설계된다.

그리고 유체유발진동에 대한 원자로 내부구조물의 구조적 건전성을 입증하기 위하여 관련 법규인 참고문헌 (1)에 따라 원자로내부구조물에 대한 종합진동평가 프로그램(comprehensive vibration assessment program, 이하 CVAP)을 수행한다. CVAP은 시운전 및 초기 가동시험 기간 중에 수행하는 원자로 내부구조물의 해석, 측정 및 검사 들을 포함하며 원자로 내부구조물의 분류 형태에 따라 수행 범위가 달라진다.

한국표준형원전 원자로 내부구조물은 미국 Palo Verde 발전소 원자로 내부구조물을 참조 설계로 하였으며, 그 구성과 배열이 동일하므로 참고문헌 (1)에 따라 Palo Verde 1호기를 유효원형으로 하는 비원형 범주 I

로 분류되었다. 비원형 범주 I에 대한 CVAP은 해석과 검사를 수행하도록 규정되어 있으나, 영광 3,4호기 발전소의 국내 인허가 심사과정 중 제어봉집합체 슈라우드의 설계 변경에 따른 제한적인 진동 측정을 요구 받아 영광 4호기 원자로내부구조물에 대하여 국내에서는 처음으로 상업운전 전 고온기능시험(hot function test, 이하 HFT) 기간 동안 구조해석, 측정, 검사 및 평가 등 4 단계로 구성된 종합진동평가가 수행되었다<sup>2)</sup>. 진동평가의

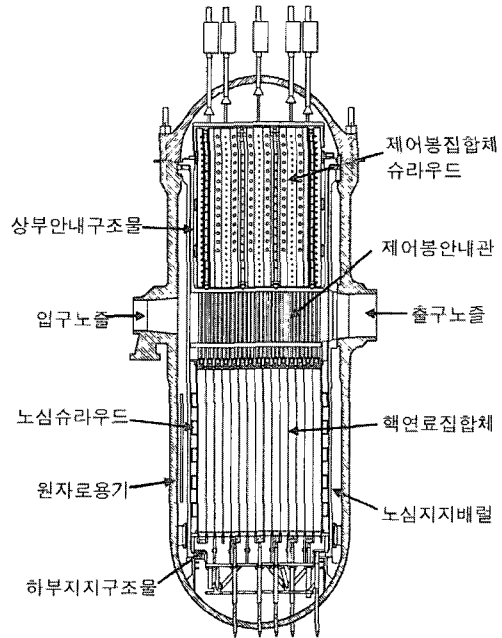


그림 1 한국표준형원전 원자로 내부구조물

특집: 원자력 발전소 원자력 내부구조물

\* E-mail : shjeong@kopec.co.kr / Tel : (042) 868-4147

특정 : 원자력 발전소 원자력 내부구조물

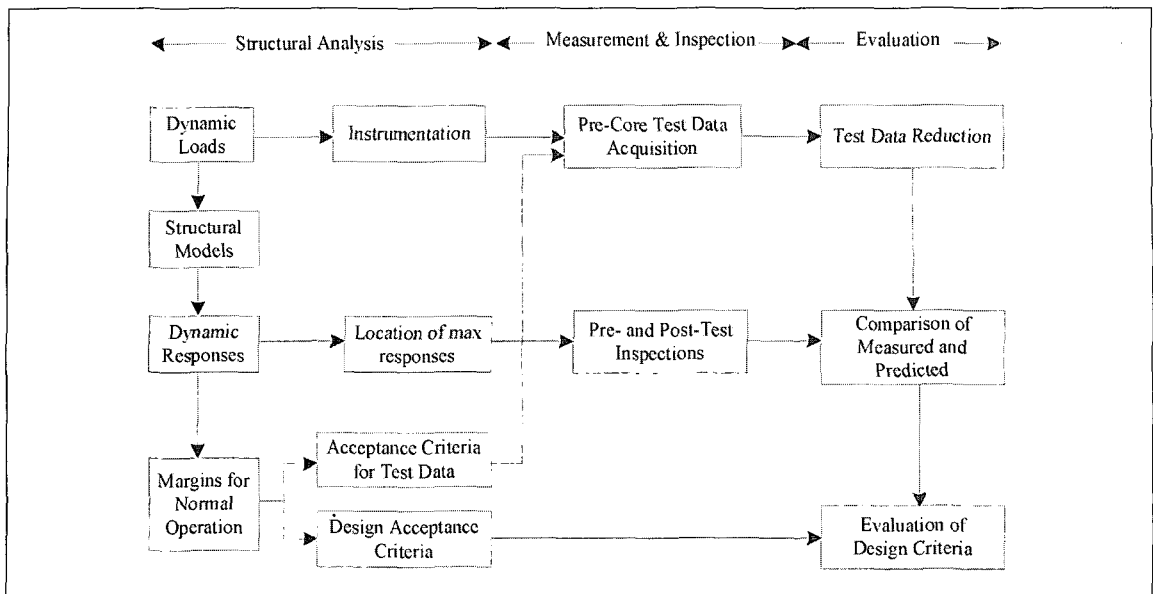


그림 2 원자로 내부구조물 진동평가 프로그램 흐름도

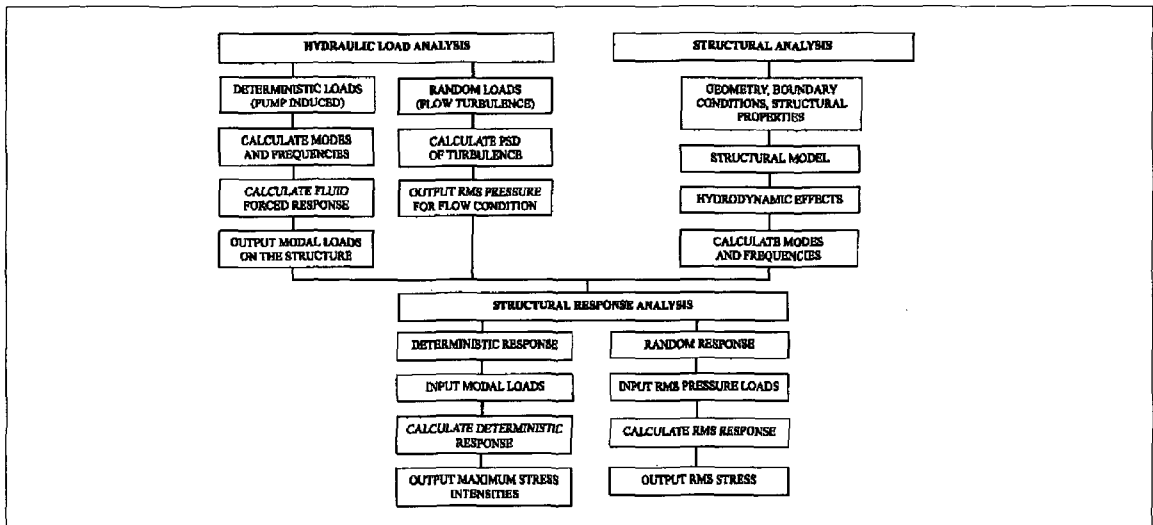


그림 3 원자로 내부구조물 동적 응답 해석 절차

전반적 절차에 대한 흐름도는 그림 2에 나타내었으며, 다음 절들에 각 단계 별로 기술하였다.

## 2. 구조해석(Structural Analysis)

구조해석은 유체유발 수력하중으로 인한 원자로 내

부구조물의 동적 응답을 예측하고, 실제 진동실험 전에 측정과 검사에 대한 기본 정보를 제공하기 위한 목적으로 수행되었다. 원자로 내부구조물의 동적 응답을 해석하는 절차는 다음 세 부분으로 나눌 수 있다.

- 수력하중 또는 함수의 계산

- 고유진동 특성치 (고유진동수 및 모드형상)를 결정하기 위한 구조물의 해석
- 변위, 변형을 그리고 응력 등 응답의 계산

고유진동수, 응력, 변형을 그리고 변위 등 해석 결과는 추후 실제 측정된 데이터와 비교하였다. 그림 3에 원자로 내부구조물의 동적 응답을 해석하는 절차를 나타내었으며 다음 절에는 수력하중 및 동적 응답에 관한 사항들을 기술하였다.

## 2.1 유체유발 수력하중

유체유발 수력하중은 시간에 따른 변화 여부에 따라 주기적(periodic) 또는 불규칙적(random) 성분으로 분류되며, 주기적 성분과 불규칙적 성분은 서로 상관관계가 없다고 가정하였다. 그리고, 주기적 하중과 불규칙적 하중은 크기, 주파수 그리고 공간 분포로서 정의하였다.

주기적 하중은 원자로 냉각수 순환펌프로 인한 유압의 조화적 변화(펌프 맥동)에 의한 것이다. 이 펌프 맥동은 음향파로서 계통 내부로 전달되며, 펌프 회전 주파수인 20 Hz의 배수와 펌프회전수와 임펠러 날개수의 곱인 120 Hz의 배수에서 피크값이 발생한다. 수학적 해석과 실험 자료를 사용하여 주기적 하중의 크기, 주파수 및 분포를 구하였다. 운동방정식, 연속방정식 그리고 상태방정식을 조합하여 작성된 파동방정식을 풀어야 하며, 실험 자료는 파동방정식의 해를 구하는 데 필요한 적절한 경계 조건을 결정하는 데 사용되었다<sup>4)</sup>.

불규칙적 하중은 유동 난류로부터 발생된다. 모든 불

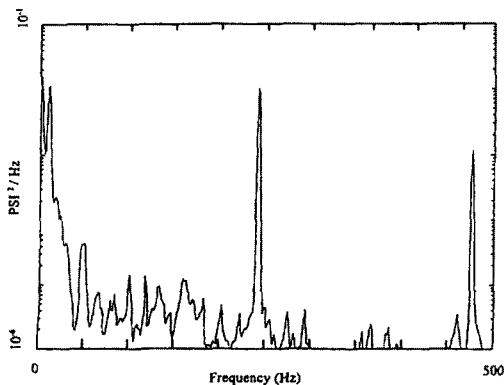


그림 4 제어봉안내관의 펌프 맥동 파워스펙트럼밀도 분포

규칙적 하중은 정상적(stationary)이고 에르고딕(ergodic)하다고 가정하였으며, 공간적 분포는 이들 하중에 기여(coherent)된 면적이나 길이를 규정하여 정의된다<sup>4)</sup>.

주기적 하중과 불규칙적 하중의 주파수에 따른 크기 변화는 주파수 당 압력 제곱의 형태인 파워스펙트럼밀도(power spectrum density)로 정의하였다. 한 예로써 그림 4는 제어봉안내관에서 측정된 펌프 맥동 파워스펙트럼밀도 분포를 보여주며, 펌프 회전 주파수와 임펠러 날개수의 곱의 배수인 20, 40, 120, 240, 360 Hz 및 480 Hz에서 펌프 맥동압의 피크값이 발생함을 확인할 수 있었다.

## 2.2 동적 응답 해석

각 구조물을 유한요소로 모델링한 수학적 모델로 모드 해석을 수행하여 동적 특성을 파악하였으며, 여러 하중 조건으로 인한 구조적 응답을 해석하였다. 이 해석에 사용되는 모델은 각 구조물에 작용하는 주요한 하중조건이 고려된 가장 효율적인 해석이 될 수 있도록 고안되었다. 그리고, 주기적 하중과 불규칙적 하중에 대한 응답들은 모드 중첩법을 사용하여 구하였다.

노심지지베럴은 축대칭 셀 유한요소로 모델링하여 공기중에서의 고유진동수와 모드 형상을 계산하였으며, 아울러 동수력 효과를 고려한 수중에서의 고유진동수를 계산하였다. 그림 5는 노심지지베럴의 보(beam)와

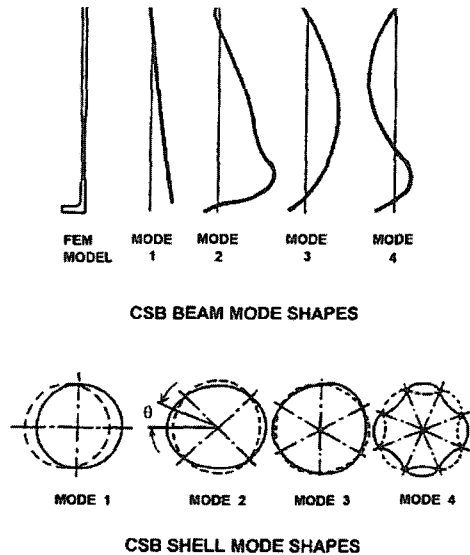


그림 5 노심지지베럴의 보와 셀 모드 형상

셸(shell) 모드 형상을 보여주며, 표 1에 공기중과 수중에서의 고유진동수 해석 결과를 정리하였다. 조화해석법(harmonic analysis method)을 사용하여 주기적 하중합수에 대한 구조응답을 구하였다. 유동의 난류 성분에 대한 응답은 불규칙적 응답 파워스펙트럼밀도 곡선을 사용하여 계산하였다. ANSYS 유한요소 코드<sup>®</sup>를 사용하여 노심지지배럴의 집중질량 및 보 유한요소 모델을 작성한 후 이 모델에 입구노즐 과 출구노즐 위치와 그 외 노심지지배럴 표면에서의 난류의 압력 변동을 나타내는 두 개의 파워스펙트럼밀도 함수를 하중으로 적용하였다.

상부안내구조물배럴, 튜브 뱅크(tube bank), 그리고 제어봉집합체 슈라우드를 포함한 상부안내구조물집합

표 1 노심지지배럴의 공기중과 수중에서의 고유진동수 해석 결과

f(Hz) air	f(Hz) water	N = 1	N = 2	N = 3	N = 4
M = 1	19.2	89.0	117.8	181.2	
	6.5-8.1	26.9	35.6	54.8	
M = 2	41.6	99.7	159.8	215.2	
	16.6	41.5	70.6	103.4	
M = 3	44.4	73.4	117.3	164.3	
	22.3	38.6	63.4	92.9	
M = 4	74.5	87.6	110.9	143.9	
	48.9	53.9	69.0	91.6	

주) N=보 모드, M=셸 모드

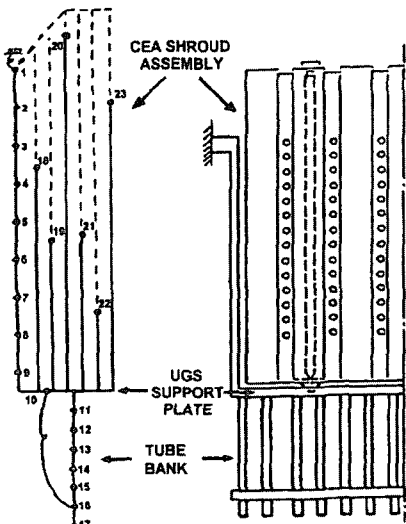


그림 6 상부지지구조물집합체 모델

체를 그림 6과 같은 집중질량-보요소로 모델링하였다. 이 모델과 STARDYNE 코드<sup>®</sup>를 사용하여 모드 해석, 주기적 및 불규칙적 응답 해석을 수행하였다. 상부안내구조물 지지판, 제어봉안내관 그리고 핵연료정렬관을 포함한 제어봉안내관집합체는 좀 더 상세히 모델링하여 해석하였다. 해석 결과 중 제어봉안내관의 변형율과 상부안내구조물 지지판의 변위 예측치를 실제 측정된 값과 비교하였다.

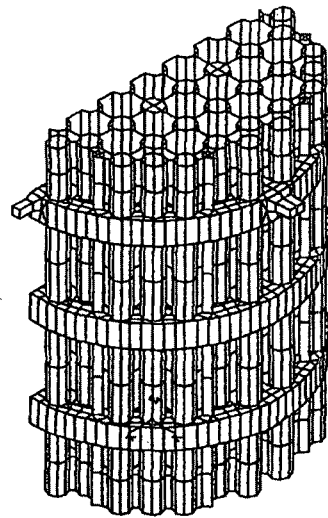


그림 7 제어봉집합체 슈라우드 유한요소 모델

표 2 해석 모델의 종류 및 목적

구조물	사용 모델	목적
노심지지배럴	축대칭 셸 유한요소 모델	고유진동수 해석, 펌프 맥동 응답해석
	집중질량-보요소 모델	불규칙적 난류 응답해석
상부안내구조물	집중질량-보요소 모델 (그림 6)	상부안내구조물집합체의 고유진동수 해석, 펌프 맥동 응답해석, 불규칙적 난류 응답해석
	절반 대칭 제어봉안내관 집합체 유한요소 모델	제어봉안내관집합체의 고유진동수 해석, 펌프 맥동 응답해석, 불규칙적 난류 응답해석
제어봉 집합체 슈라우드	제어봉집합체 슈라우드 1/2 대칭 유한요소 모델 (그림 7)	제어봉집합체 슈라우드의 고유진동수 해석, 펌프 맥동 응답해석, 불규칙적 난류 응답해석
	단일 튜브/웹 전원주 유한요소 모델	단일 튜브/웹의 고유진동수 해석, 펌프 맥동 응답해석, 불규칙적 난류 응답해석

특정 : 원자력 발전소 원자력 내부구조물

제어봉집합체 슈라우드는 ANSYS 코드로 모델링하여 주기적 해석과 불규칙적 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 절반 대칭의 제어봉집합체 슈라우드 유한요소 모델을 그림 7로 나타내었다. 아울러, 단일 제어봉집합체 슈라우드 튜브 모델을 작성하여 각 성분별 응답해석을 좀 더 상세히 수행하였다. 제어봉집합체 슈라우드는 지지판에서의 횡 운동으로 유체유발 하중이 작용된다고 가정하여 응답을 계산하였으며, 제어봉집합체 슈라우드의 응답과 단일 제어봉집합체 슈라우드 튜브 모의 응답을 조합하여 가속도계와 스트레인게이지 등 센서 위치에서의 응답을 계산하였다.

표 2에 각 원자로 내부구조물에 대하여 고유진동수 해석, 펄프 맥동 및 불규칙 난류 하중 응답 해석에 사용한 모델을 요약하였다.

표 3 센서의 위치 및 목적

센서	위치 (갯수)	목적
가속도계	제어봉집합체 슈라우드 상부 (2)	제어봉집합체 슈라우드 튜브의 가속도
	상부안내구조물 지지판 바닥 (2)	상부안내구조물 지지판의 가속도
	노심지지배럴 바닥 (2)	노심지지배럴 바닥의 가속도
압력변환기	제어봉집합체 슈라우드 상부 (6)	제어봉집합체 슈라우드 압력
	상부안내구조물 지지판 바닥 (2)	상부안내구조물 지지판 하부의 압력
스트레인 게이지	제어봉집합체 슈라우드 상부 (8)	제어봉집합체 슈라우드 튜브의 변형률
	상부안내구조물 제어봉 안내관 상부 (4)	제어봉안내관의 굽힘 응력
	노심지지배럴 상부 (2)	노심지지배럴의 굽힘 변형률
	노심지지배럴 중간 (2)	노심지지배럴의 셸 모드로 인한 원주 변형률

### 3. 측정(Measurement)

측정 프로그램은 정상운전 및 과도운전 조건에 대하여 2절에서 수행한 해석 결과를 검증하는데 필요한 충분한 데이터를 수집하고 장기간 운전에 대한 안전도를 검증하기 위함이다. 이를 위하여 유체유발 수력하중 및 각 구조물의 동적 응답에 대한 데이터를 필요로 하여 유동과 응답을 측정하기 위한 계측을 수행하였다.

#### 3.1 센서(Sensor)

진동 측정을 위한 센서들은 6개의 이축 가속도계 (biaxial accelerometer), 8개의 압력변환기 (pressure transducer), 그리고 16개의 스트레인 게이지 (strain gage) 로 구성된다.

모든 센서들은 원자로 내부 냉각수 운전 조건인 고압(155 bar) 및 고온(300 °C)에서 기능을 정확히 유지하는지를 미리 시험하였다. 각 센서의 위치와 목적은 표 3에 나타내었으며, 각 센서의 위치는 원자로 내부구조물이 센서와 인입선이 설치될 때 받을 손상, 그리고 유체유발진동으로 센서를 보호할 설비 등을 고려하여 선택하였다.

#### 3.2 데이터 수집(Data Acquisition)

데이터 수집 계통의 개략도는 그림 8에 나타내었으며, 신호 제어기(signal conditioner), 데이터 수집 장비, 그

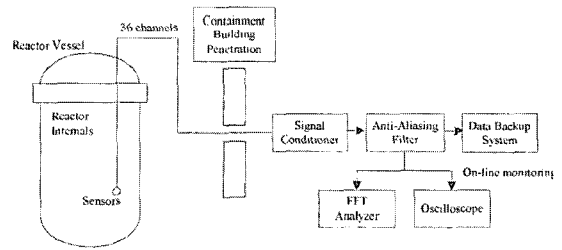


그림 8 데이터 수집 계통의 개략도

리고 온라인 모니터 장비(on-line monitoring equipment)로 구성된다. 데이터는 표 4에 수록된 전체 21개 시험 조건에 대하여 취득하였으며, 이들 시험 조건들은 정상 운전, 과도운전 및 배경 소음 조건(background noise condition)을 포함한 다양한 운전 조건을 고려하여 선정하였다. 데이터는 각 시험 조건에 대하여 2개의 서로 다른 주파수 영역(고주파 영역의 0 ~ 500 Hz 및 저주파 영역의 0 ~ 50 Hz)에서 수집하였다. 각 주파수 영역에서 초당 1600 개와 160 개의 비율로 샘플링하였고, 에일리어징 방지 필터(anti-aliasing filter)는 각각 500 Hz 와 50 Hz로 설정하였다.

36개 센서 채널 각각에 204,800 샘플을 수집하였으며, 각 주파수 영역에서 8백만개의 샘플을 수집하였다. 과도운전 조건으로 분류된 시험 조건을 모두 분석한 결과 저주파 기록은 과도운전 조건이 발생된 후 수록되어 고

표 4 원자로 내부구조물 진동 시험 조건

Test No.	시험 조건	온도 ℃	RCP No.				Test type
			1	2	3	4	
0	Noise	65	x	x	x	x	Steady state
1	Pump start	65	x	x	s	x	Transient
2	Pump start	90	s	x	o	x	Transient
3	Pump start	90	o	x	o	s	Transient
4	Pump stop	130	o	x	o	t	Transient
5	Steady state	130	o	x	o	x	Steady state
6	Steady state	130	o	x	o	o	Steady state
7	Steady state	130	x	x	x	o	Steady state
8	Steady state	180	o	x	o	o	Steady state
0	Noise	180	x	x	x	x	Steady state
9	Steady state	260	o	x	o	x	Steady state
10	Pump stop	260	o	t	o	o	Transient
11	Pump start	260	o	x	o	s	Transient
12	Steady state	260	o	o	o	o	Steady state
13	Steady state	300	o	x	o	o	Steady state
14	Pump stop	300	o	x	o	t	Transient
15	Steady state	300	x	x	o	x	Steady state
0	Noise	300	x	x	x	x	Steady state
16	Pump start	300	o	x	o	t	Transient
17	Steady state	300	x	x	o	o	Steady state
18	Steady state	300	o	o	o	o	Steady state

o: operating x: not operating s: start t: stop

주파 기록이 실제로 과도 조건을 포함함을 알 수 있었다. 실제 시험동안 2채널 스펙트럼 분석기(two-channel spectrum analyzer)와 오실로스코프(oscilloscope)를 온라인 모니터링 장비로 사용하였다.

### 3.3 데이터 정리(Data Reduction)

시험 동안 실시간으로 데이터를 정리하여 구조물의 응답과 수력하중에 대한 RMS(root mean square) 값을 구하였다. 시험이 종료된 후 자기 테이프에 저장된 자료를 정리하여 모든 시험 조건에 대한 각 센서 혹은 서로 관련된 두 개의 센서 사이의 파워스펙트럼밀도, 상호 파워스펙트럼밀도(cross power spectral density), 기여도(coherence) 및 위상도(phase plot)를 얻었다. 또한, 별도의 계산을 수행하여 응답 파워스펙트럼 밀도 함수의 주기

적 성분과 불규칙적 성분을 분리시켰다. 이렇게 정리한 자료는 2절에서 예측한 압력, 가속도(혹은 변위), 그리고 변형률과 비교하는데 사용되었다.

## 4. 검사(Inspection)

영광 4호기 검사 프로그램은 HFT 전의 기초 육안검사(baseline visual inspection)과 HFT 후의 2차 육안검사로 수행되었으며, 검사 결과는 평가 프로그램에서 비교 평가되었다.

검사 부위는 참고문헌 (1)의 요건에 따라 다음과 같이 선정되었다.

- 노심지지구조물을 제 위치에 고정하는 주요 하중 지지 요소
- 원자로용기 내에서 수평, 수직 및 비틀림 방향의 구속부
- 손상될 경우 원자로 내부구조물의 구조적 건전성에 악영향을 주는 고정 및 체결 요소
- 운전 중 접촉하거나 접촉할 가능성이 있는 표면
- 진동해석에서 구한 임계부위
- 원자로 내부에서 이탈물 또는 이물질이 존재할 가능성이 있는 부위

검사 과정은 모두 문서화 되고 사진 또는 비디오 촬영으로 기록되었다. 검사 결과 이탈된 부품, 파편, 비정상적인 부식 생성물, 구조적 변형이나 건전성을 저해할 변위 등이 발견되지 않았으며, 따라서 원자로 내부구조물의 과도한 운동이 없음이 입증되었다.

## 5. 평가(Evaluation)

평가 프로그램으로 측정과 검사에서 취득한 자료들과 해석에서 예측한 값들을 비교하고, ASME 코드<sup>7)</sup>에 제시된 허용치와 원자로 내부구조물의 특정 설계 한도 이내인지 여부를 검증하였다.

### 5.1 노심지배열

구조물의 응답 파워스펙트럼밀도를 분석한 결과 불규칙적 하중을 받는 구조물의 응답 파워스펙트럼밀도

특정: 원자로 및 원자로 원자력 내부구조물

표 5 정상운전조건에서 RMS 동적 응력의 예측치와 측정치  
(단위:MPa)

구조물	위치	해석치	측정치
노심지지 배럴	상부 플랜지 (0°)	2.17	0.46
	상부 플랜지 (90°)	1.21	0.66
상부안내 구조물	중앙 단면 (0°)	0.38	0.08
	중앙 단면 (90°)	0.24	0.09
제어봉 집합체	슈라우드 외곽	3.14	1.26
	슈라우드 튜브	2.79	2.01
슈라우드	슈라우드 내부	2.00	0.77
	슈라우드 튜브웹	2.79	1.14

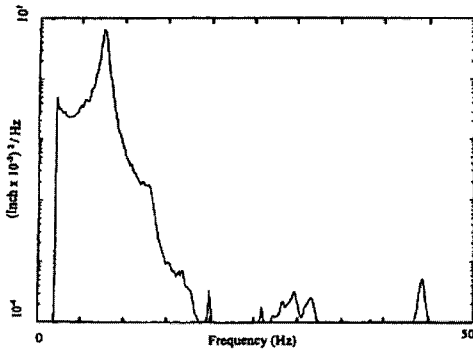


그림 9 노심지지배럴 바닥에서의 자기 파워스펙트럼밀도

는 그 구조물의 고유 진동수에서 피크 값을 보였으나, 주기적 하중에서는 구조물의 고유진동수가 아닌 하중 가진 주파수에서 피크 값을 보였다. 노심지지배럴의 일차 보 모드 주파수는 해석으로부터 6.5~8.1 Hz 사이에 있을 것으로 예측되었으며, 노심지지배럴 바닥의 이축 가속도계에서 약 7.7 Hz로 측정되었다. 이 결과는 노심지지배럴 상부에서 구한 스트레인게이지 데이터와의 강 상관관계(strong coherence)에 의해 더욱 확실하게 나타났다. 노심지지배럴의  $\cos 2\theta$  및  $\cos 3\theta$  셀 모드 주파수는 각각 17 Hz와 22 Hz로 예측되었으며, 변형률 데이터는 노심지지배럴 셀 모드의 응답 정도가 매우 낮지만 예측된 범위 내에 있음을 보여주었다. 또한, 펌프 과도 조건 즉 원자로냉각수 펌프의 기동 및 정지 동안 노심지지배럴의 응답 자료를 조사하였다. 해

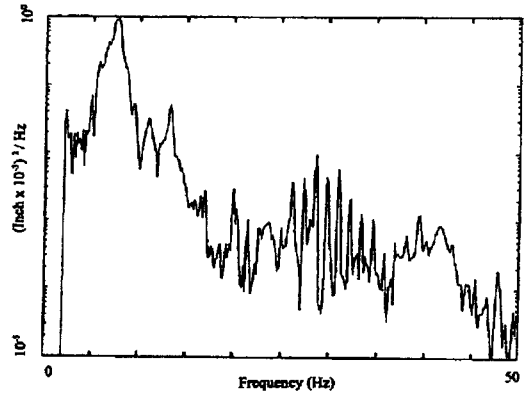


그림 10 상부안내구조물 지지판의 가속도계와 제어봉안내관 스트레인게이지 사이의 상호 파워스펙트럼밀도

석에서 예측된 대로 펌프 회전수가 빨리 변하기 때문에 응답에 공진은 발생되지 않았으며, 표 5에서 볼 수 있는 바와 같이 노심지지배럴의 응답 응력들은 예측치보다 작았다.

노심지지배럴의 전체 응답을 주기적 성분과 불규칙적 성분으로 분류하면 불규칙적 성분이 지배적이다. 그림 9는 노심지지배럴 바닥에 설치된 가속도계의 자기 파워스펙트럼밀도(auto power spectral density)를 보여주며, 이 그림에서 노심지지배럴의 일차 보 모드가 7.7 Hz임을 확인할 수 있었다.

## 5.2 상부안내구조물

일반적으로 수력하중 함수의 측정치는 예측치보다 작거나 비슷하였다. 상부안내구조물 지지판에 설치된 두 개의 가속도계에서의 응답이 해석에서 예측한 값과 같이 11 Hz에서 13 Hz 주파수 범위에서 최대값을 보였으며, 두 가속도계로부터 구한 상호 파워스펙트럼밀도와 기여도 선도로부터 이 주파수대에서 횡방향 응답이 있음을 확인할 수 있었다. 제어봉안내관집합체의 일차 횡방향 모드는 약 26 Hz로 예측되었으며, 이 값을 가속도계로부터 구한 데이터의 최대값과 제어봉안내관에 설치된 가속도계 및 스트레인게이지 사이의 상호 파워스펙트럼밀도와 기여도를 비교하여 일치 여부를 확인하였다. 제어봉안내관의 첫 번째 모드는 스트레인게이지 데이터의 최대값으로부터 150~170 Hz 주파수 범위 내에 있으며 예측치와 일치하였다. 제어봉안내관에서

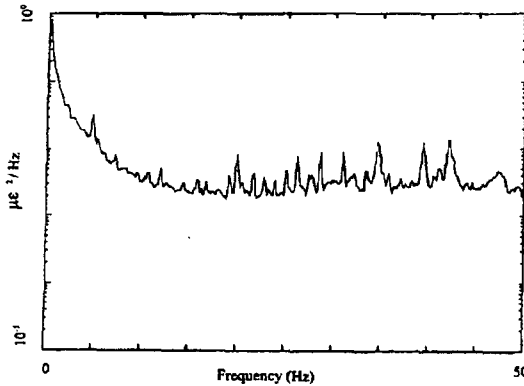


그림 11 제어봉집합체 슈라우드 튜브의 자기 파워스펙트럼밀도

측정한 응답 변형률은 예측치보다 훨씬 작았으며, 표 5에서 볼 수 있는 바와 같이 상부안내구조물의 응답 응력 역시 예측치보다 작았다. 그림 10은 상부안내구조물 지지판에 설치된 가속도계와 제어봉안내관에 설치된 스트레인게이지 사이의 상호파워스펙트럼밀도를 보여준다. 이 그림에서 11 Hz에서 13 Hz 주파수 범위에서 상부안내구조물 지지판의 횡방향 모드가 존재하고, 26 Hz에서 제어봉안내관집합체의 일차 횡방향 모드가 존재함을 확인할 수 있었다.

### 5.3 제어봉집합체 슈라우드

해석으로 예측한 펌프유발 압력 및 불규칙적 난류 압력은 측정치와 잘 일치하거나 측정치를 포괄하였다. 10 ~ 22 Hz와 25 ~ 50 Hz 주파수 범위에 있는 제어봉집합체와 제어봉집합체 슈라우드의 고유 진동수 예측치는 측정치와 일치 하였다. 제어봉집합체 슈라우드 튜브와 웹의 예측 고유진동수(130 ~ 200 Hz 주파수 범위)는 측정치와 일치하였다. 제어봉집합체 슈라우드 응답 변형률(14  $\mu\epsilon$  이하)은 예측한 대로 허용치(200  $\mu\epsilon$ )보다 상당히 작았으며, 응답 응력도 표 5에서 볼 수 있는 바와 같이 예측치보다 작았다. 그림 11은 제어봉집합체 슈라우드 튜브에 설치된 스트레인게이지 응답의 자기 파워스펙트럼밀도를 보여준다. 이 그림은 제어봉집합체 슈라우드 튜브의 변형률이 10<sup>-1</sup>  $\mu\epsilon$  이하임을 나타내며, 이 결과와 제어봉집합체 슈라우드의 변형률 측정 결과를 조합하여 허용치와 비교한 결과 허용치보다 상당히 작음을 확인하였다.

## 6. 결론

한국표준형원전인 영광 4호기의 원자로 내부구조물에 대하여 처음으로 수행한 진동 측정을 포함한 종합진동평가 프로그램으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 고유진동수의 측정치는 해석으로 예측한 고유진동수와 잘 일치하였다.
- 측정된 응답 변형률은 해석에서 예측한 값보다 모두 작았으며, 허용 기준보다 훨씬 작았다. 모든 측정된 변위들도 허용 기준 아래에 있었다.
- 원자로 내부구조물에 대하여 사용된 구조해석 절차는 이러한 크고 복잡한 구조물 해석에 적절하다고 판명되었다.
- 검사 결과 이탈된 부품, 파편, 비정상적인 부식 생성물, 구조적 변형이나 건전성을 저해할 변위 등이 발견되지 않았으며, 이러한 결과는 측정된 변형률과 변위 결과와도 일치한다.
- 허용 피로한도를 포함한 ASME 코드의 모든 설계한도를 만족하였다. 따라서 원자로 내부구조물은 설계수명 기간 동안 유체유발진동에 대하여 구조적 건전성이 유지될 것이다. ☐

## 참고문헌

- (1) U.S. Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 1.20, Rev. 2, May 1976.
- (2) A Comprehensive Vibration Assessment Program for Yonggwang Nuclear Generation Station 4, Final Evaluation of Pre-Core Hot Functional Measurement and Inspection Programs, 1995.
- (3) Lee, K.B. and Im, I.Y., 1994, "An Analytical Study on the Pump-induced Acoustic Pressure in a Pressurized Water Reactor," Nuclear Engineering and Design 147, pp.275~286.
- (4) Blevins, R.D. 1990, "Flow-induced Vibrations," 2nd Edition, Van Nostrand Reinhold, New-York.
- (5) ANSYS Version 5.1, Swanson Analysis System Inc., 1994.
- (6) STARDYNE, General Microelectronics, 1986.
- (7) ASME Boiler & Pressure Vessel Code," 1993.