

# 원자로 안전관련 정지반의 내진검증

\* \* \*  
유    봉    안    규    석

(Seismic Qualification of Safety Related Reactor Control Panel)

## 1. 서론

원자력발전소 및 연구용원자로 등의 원자력 관련시설물들은 지진 및 방사선 등의 가혹한 환경조건이나 가상적사고 조건에 대해서도 공중 및 운전자에 대한 허용 피폭 선량을 초과하지 않고 안전하게 운전되도록 설계되어야 한다. 특히, 원자로의 설계시 지진 발생시 원자로 정지에 필요한 능동적인 기능을 보유하거나 지진에 의한 손상으로 허용치를 초과하는 방사선급 및 누출이 우려되는 계통과 부품 등은 안전등급 및 내진 범주로 분류하여 기기 검증 (내진, 내방사성, 내환경 등)을 통해 안전성을 확보하도록 하고 있다 [1][2][3].

원자로의 안전 정지와 보호를 위한 원자로 보호 계통 (RPS, Reactor Protection System)도 내진범주 I급 (Seismic Category I)으로 분류되며 이에 따른 기기 검증을 필하도록 되어 있다. 원자로 보호 계통에서 Class 1B 기기인 계장부품과 계기들을 내장하고 있는 원자로 정지반 (Reactor Control Panel)은 원자로 제어실에 설치되므로 내방사선 및 내환경 조건은 거의 무시되나 지진 발생시에는 고유기능을 발휘할 수 있도록 내진 검증이 필수적으로 요구된다 [4][5].

원자로 정지반의 내진검증을 위해서는 설계 및 내진해석, 내진검증절차 및 방법 확립, 실제작후 내진실험에 의한 구조적건전성 및 기능유지를 만족하는지에 대한 검증이 필요하다.

현재 국내의 기기 검증 기술은 거의 외국의 기기 검증에 의존하고 있는 실정이며 외국의 설계도면에 의한 일부 기기 및 부품의 단순 제작에 그치는 정도이다 [6].

본 논문에서는 원자로 정지반의 실제 제작을 위한 예비단계로서 예비설계된 정지반의 전산모델을 이용하여 내진해석을 수행하였으며 이는 내진설계자료 및 내진시험에 대한 검증자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 정지반의 내진검증

원자로 정지반은 내진 범주 I급, Class 1B Component로 분류되므로 지진 발생시 안전 기능을 수행하여야 하며 이의 보장을 위한 내진 검증이 요구된다. 정지반의 내진 검증 절차를 흐름도로 표시하면 그림 1과 같다.

해석에 사용된 정지반은 스테인레스 304L 강판재료를 사용하며, 가로 세로 71x82 cm,

높이 210 cm의 캐비넷 모양의 구조로 상부 전면에는 운전을 위한 표시기와 버튼등이 설치되며 하부에는 사람형의 랙이 다층으로 설치되며 릴레이 등이 장치된다. 후면은 보수 및 그림 2에 의해 여닫이형의 문이 설치된다 [7]. 정지반의 Lay-Out 이 있다. 정지반의 내진 검증은 실험이나 해석을 통해 각 부재의 응력을 허용응력과 비교하여 구조적 건전성을 보이며 또한 정지반 각 부에 부착된 계기와 부품들의 위치에서 시간이력해석에 의한 계산 응답 스펙트럼을 구하고 기기의 요구응답 스펙트럼과 비교하여 요구응답 스펙트럼이 내진검증으로 부터 계산 응답 스펙트럼을 포괄하는 것을 보

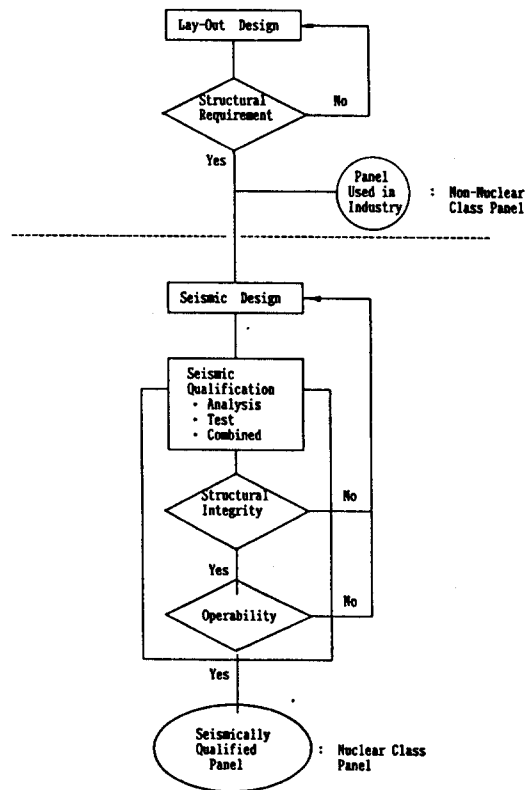


그림 1 Seismic Design and Qualification Procedure

\* 한국원자력연구소  
\*\* 한국원자력연구소

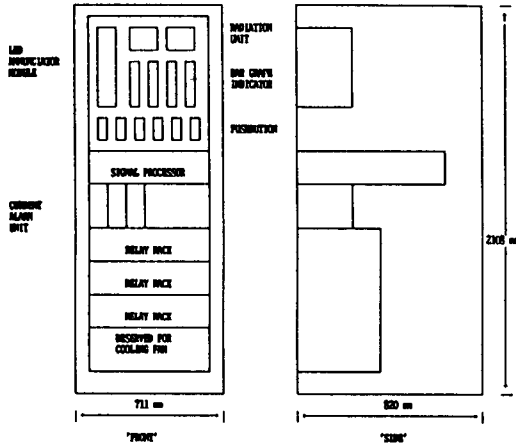


그림 2 실험기 Lay-Out

정지반은 기계적인 구동부를 포함하지 않는 단순한 구조물이나 부착되는 기기 및 부품들이 지진시 안전 기능을 제대로 작동되는 것을 보이기 위해 내진 시험을 필요로 한다. 또, 국내에서 Class 1B 패널의 제작 경험은 있으나 설계 경험이 없으므로 초기 설계 단계에서 해석에 의한 내진 설계가 필요하며 최종 시험에 앞서 해석에 의한 내진 검증은 거름으로써 내진 시험만족 할 때까지 반복하여 제작하는 불편을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 전산 STARDYNE [7]을 이용하여 고유진동수 해석, 응답 스펙트럼 해석, 시간이력해석에 의한 응답 스펙트럼 작성을 수행하였다.

### 3. 정지반의 내진 해석

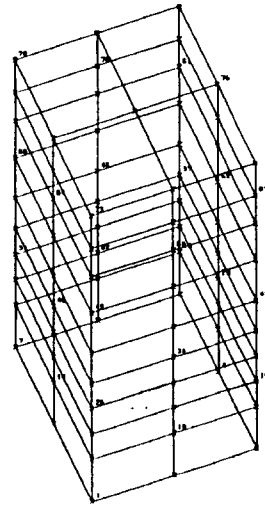
정지반의 내진 설계를 위한 해석으로 예비 설계된 정지반의 고유진동수 해석을 이용하여 정지반의 고유 진동수 범위를 구한다. 이때 정지반내의 기기가 놓이는 위치에서 지진 응답이 크게 증폭되는 것을 막기 위하여 진동수가 철판의 두께와 정지반의 기둥이 되는 앵글의 지수를 정하여 정지반의 구조를 결정한다. 다음은 예비 내진해석 단계를 거쳐 정지반에 설치되는 부품의 부착방법을 반영한 해석모델을 작성한 뒤, 내진해석 절차에 따라 응답 스펙트럼 해석을 수행하여 정지반 각 부위에 걸리는 지진 하중에 의한 응력을 구하고, 또한 시간이력해석에 의한 기기 및 부품 등의 설치 위치에서 응답 스펙트럼을 구한다. 이렇게 구한 지진응력과 응답 스펙트럼을 각각 허용응력과 요구응답 스펙트럼과 비교하여 만족될 때까지 해석 모델을 수정하여 반복 수행한다. 이렇게 하여 정지반의 내진 시험을 위한 최종 설계를 완료한다.

#### 3.1 고유진동수 해석

고유진동수 해석은 정지반의 고유진동수와 진동 모드를 위한 요소 프로그램을 이용하여 구하는 것으로 전산 프로그램 STARDYNE를 사용하였다. 고유진동수 해석은 단면이 다른 두 가지 형태의 정지반을 3차원 보 요소만으로 모델링한 경우와 3차원 평판 요소와 보 요소를 조합하여 서로 다른 5 가지 형태의 정지반을

모델링한 경우에 대하여 각각 수행하였으며 그림 3은 대표적인 해석모델을 나타내 보이고 있다. 표 1에 고유진동수 해석에 사용한 해석 모델명과 각각의 특징이 요약되어 있다. 표 2는 고유진동수 해석결과를 나타내 보인다.

\*\*\* ORIGINAL SHAPE OF RPS PANEL (FPLPLST) 189.06.08 \*\*\*



SHIMDINE FINITE ELEMENT MODEL PRODUCTION ON 22-K3 FLOW (ASK NO. 1)

그림 3 해석 모델 (평판요소/보요소) - PL4

표 1 고유진동수 해석에 사용한 해석모델

모델명	요소종류	요소수	절점수	특징
ST 1	보 요소	9	10	4.0t
ST 2	보 요소	9	10	3.2t
PL 1	평판 요소	76	81	3.2t
	보 요소	44		
PL 2	평판 요소	76	84	기동영달
	보 요소	44		
PL 3	평판 요소	76	85	총 암 지지영달
	보 요소	52		
PL 4	평판 요소	76	85	기동영달
	보 요소	52		
PL 5	평판 요소	58	78	후면평판
	보 요소	52		

#### 3.2 응답 스펙트럼 해석

응답 스펙트럼 해석은 고유진동수 해석에서 사용한 모델중 평판요소와 보요소를 조합한 PL3의 경우에 대하여 수행하였다. 해석에 사용한 응답 스펙트럼은 원자로 제어실이 위치한 높이에서의 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake, SSE)에 대한 수평 응답 스펙트럼 (감쇠계수 2%)으로서 그림 4와 같다. 수평 성분 응답 스펙트럼의 Zero Period Acceleration (ZPA)은 약 0.45g이며 Peak Acceleration은 5.5 Hz 에서 7.5 Hz 사이의 4.8g이다. 한편, 수직 성분 응답 스펙트럼의 ZPA는 약 0.37g이며 Peak

표 2 고유진동수해석 결과 요약

모델명	ST 1		ST 2		PL 1		PL 2		PL 3		PL 4		PL 5	
	진동수 (HZ)	모드	진동수 (HZ)	모드	진동수 (HZ)	모드	진동수 (HZ)	모드	진동수 (HZ)	모드	진동수 (HZ)	모드	진동수 (HZ)	모드
1 차	134.5	10-1	121.0	10-1	14.8	48-1	21.0	44-1	26.9	20-1	26.9	20-1	24.8	28-1
2 차	143.9	10-2	130.1	10-2	18.7	44-1	21.6	40-1	27.0	24-1	27.1	24-1	26.8	24-1
3 차	426.5	10-1	432.4	5-1	20.7	64-1	26.5	52-1	28.8	60-1	28.8	60-1	27.6	20-1
4 차	439.3	10-2	446.4	5-2	23.3	60-1	26.6	56-1	28.9	64-1	28.9	64-1	28.7	60-1
5 차	516.8	10-3	490.1	10-3	23.4	46-2	27.9	34-2	33.28	18-2	33.28	18-2	33.2	64-1
6 차	848.4	10-1	873.2	3-1	27.1	42-2	28.5	38-2	33.3	22-2	33.3	22-2	33.3	22-2
7 차	863.1	10-2	887.4	3-2	28.2	62-2	33.1	58-2	35.1	58-2	35.1	58-2	35.1	62-2
8 차	1278.7	10-1	1250.7	8-1	28.9	81-3	33.2	54-2	35.2	62-2	35.2	62-2	35.9	81-3
9 차	1290.1	10-2	1264.5	8-2	30.2	58-2	33.4	44-1	36.1	81-3	36.1	81-3	44.7	16-1
10 차	1358.0	10-3	1396.5	10-3	30.8	44-1	33.4	48-1	44.7	16-1	44.7	16-1	45.3	12-1
11 차	1530.3	10-1	1594.6	2-1	32.3	81-3	36.1	81-3	44.8	12-1	44.8	12-1	47.3	56-1
12 차	1541.1	10-2	1601.8	2-2	35.8	42-2	39.6	42-2	47.7	56-1	47.7	56-1	47.7	52-1

Acceleration 은 15 Hz 부근의 2.1g 이다. 수평 성분의 응답 스펙트럼은 해석모델의 X1 과 X2 방향으로 수직 성분은 X3 방향으로 각각 입력되었다. 응답 스펙트럼 해석은 각 방향 성분에 대해 별도로 수행되며 각각의 해석 결과는 SRSS (Square Root Sum of Square) 로 구해진다. 또한, 서로 다른 3 방향에 대한 해석 결과의 조합은 해석 수행후 중요한 값인 SRSS로 평균하여 구한다. 응답 스펙트럼 해석의 출력으로는 요소절점 각 방향의 변위, 가속도와 각요소에 작용하는 하중, 모멘트, 응력 등이 있으며 본 해석에서도 변위, 가속도, 하중, 응력 등을 선정 출력하였다. 최대굴림 응력은 24.34 MPa로서 보요소 48 에서 발생하며 이는 허용응력 108 MPa 의 약 1/4에 해당하므로 SSR 발생시에도 정지반은 구조적 건전성을 충분히 유지하고 있음을 알 수 있다.

3.3 정지반의 시간이력해석

정지반에 부착 설치될 각 부품 계기류의 내진 검증을 위해 그림 4의 요구응답 스펙트럼 (수평, Peak Accel. 8.6g, ZPA 0.81g) 이 실제 정지반 각 위치에서의 총응답 스펙트럼을 포괄하는 것을 보이기 위해서는 정지반 계기류의 각 위치의 총응답 스펙트럼을 구해야 한다. 정지반의 총응답 스펙트럼은 정지반이 설치된 원자로 제어실의 총응답 스펙트럼을 입력으로 여러단계의 해석 절차를 거쳐 작성된다. 작성 단계를 요약 하면 먼저 인공 지진 시간기록을 정지반 설치 위치의 총응답 스펙트럼으로부터 구하고 이것을 입력으로 정지반의 시간 이력 해석을 수행한다. 정지반의 계기류가 높은 각 위치에서 변위 가속도 등의 시간 이력의 출력을 얻을 수 있으며 이렇게 얻은 시간 이력의 출력을 응답 스펙트럼으로 바꿔주면 정지반의 총응답 스펙트럼이 된다. 이 절차를 반복하면 정지반의 총응답 스펙트럼이 된다. 이 절차를 반복하면 다음과 같다.

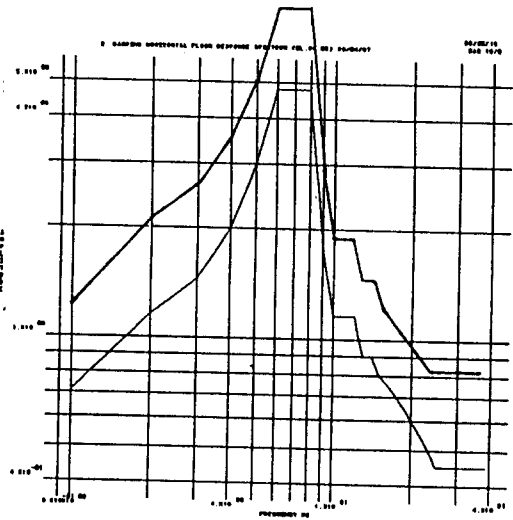


그림 4 총응답 스펙트럼 (수평 성분)

--- 정지반 계기류의 총응답 스펙트럼  
 — 정지반 계기류의 요구응답 스펙트럼

3.3-1) 인공지진 시간기록의 작성

원자로 건물의 지진해석에서 구한 총응답 스펙트럼은 시간 이력 해석에 사용할 수 없으므로 정지반의 설치 위치에서의 총응답 스펙트럼은 인공지진 시간기록으로 바꾸어야 한다. 인공지진 시간기록의 작성에는 전산프로그램 STARDYNE 의 부프로그램 DYNRB7 을 이용하였다. DYNRB7 은 응답 스펙트럼을 시간이력으로 바꾸거나 시간이력 응답

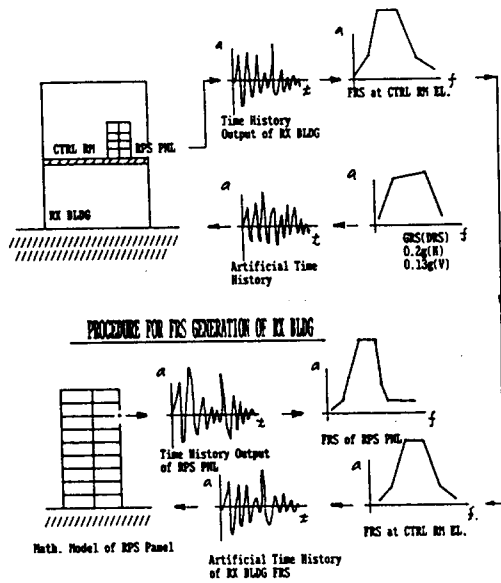


그림 5 PROCEDURE FOR FRS GENERATION OF RPS PANEL

스펙트럼으로 바꿀 수 있다. DYNRE7 은 입력된 응답 스펙트럼을 인공지진 시간기록으로 바꾼 후 다시 계산된 시간기록에 적합한 응답 스펙트럼을 출력하므로 출력된 시간기록이 입력된 응답 스펙트럼의 특성을 잘 나타내는지의 여부를 비교하여 확인할 수 있다. 그림 6은 정지반위치의 인공지진 기록(Peak Accel, -0.8g)을 나타내며 이 인공지진 기록의 응답스펙트럼과 정지반의 응답스펙트럼의 비교시 Peak Acceleration 과 Peak 시의 진동수는 잘 일치하나 ZPA가 다소 과장되는 경향이 있어 출력된 인공지진 시간기록은 실제보다 보수적이라 할 수 있다. 인공지진 시간 기록은 지속시간을 15초로 하였다.

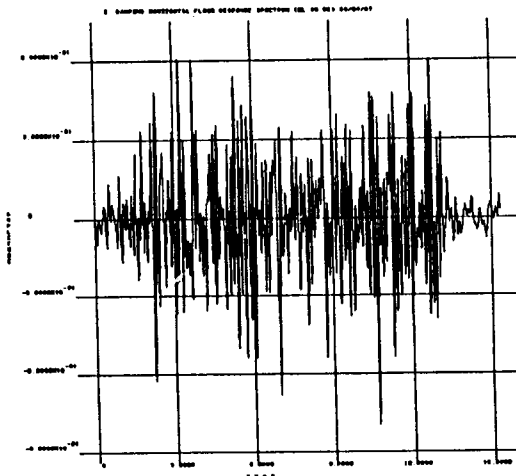


그림 6 인공 지진 시간 기록 (수평 성분)

### 3.3-2) 정지반의 시간 이력 해석

STARDYNE 의 시간 이력 해석은 직접적분과 모드 중첩의 2 가지 방법이 모두 가능하나 직접적분의 경우 변위, 가속도등의 출력이 상대값이므로 응답 스펙트럼 작성에 부적합하다. 따라서, 정지반의 시간 이력 해석에는 모드 중첩으로 시간 이력 해석을 수행하는 STARDYNE 의 부프로그램 DYNRE1 을 사용하였다. DYNRE1 으로 구한 인공 지진에 대한 각 절점의 응답 시간 이력 ( 변위, 속도, 가속도, 응력 등) 의 출력은 0.01초 간격의 1500 스텝에 대한 400 여 자유도 ( 절점수 X 6 자유도) 중에서 관심있는 주요 절점의 가속도 시간 이력만을 출력하였다.

### 3.3-3) 계기의 계산 응답 스펙트럼과 요구응답 스펙트럼의 비교

위에 기술한 절차에 의해 정지반내의 계기가 놓이는 위치에서 작성된 계산 응답 스펙트럼은 그림 7과 같고 이를 요구응답 스펙트럼과 비교한 결과 계기의 계산 응답 스펙트럼의 Peak Acceleration (4.8g, 6~8Hz) 이 요구응답 스펙트럼의 Peak Acceleration 보다 작게 나타났으며, ZPA는 거의 비슷하게 나타났다. 따라서 응답 스펙트럼 작성에 사용한 3.2 mm 두께의 철판과 앵글로 예비 설계된 정지반은 충분히 보수적으로 설계되어 그 기본 구조가 적절한 것으로 생각 된다.

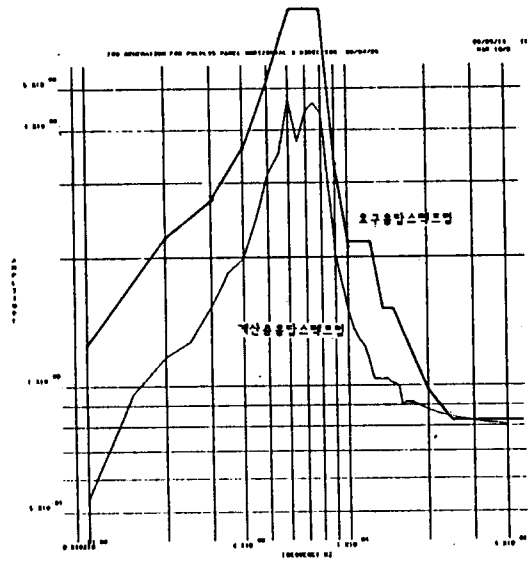


그림 7. 계산 응답스펙트럼과 요구응답스펙트럼의 비교

### 3.4 해석 결과

KMRR 정지반의 내진 설계와 내진 검증을 위해 전산 프로그램 STARDYNE에 의한 내진해석 결과를 확립하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 고유진동수해석에서 사각상사 형태를 보요소만으로 가정한 경우 (ST1 및 ST2), 이들의 고유진동수 134.5 Hz 및 121.1 Hz는 내진해석에서 관심있는 주파수 33 Hz 보다 훨씬 컸다. 평판요소만으로 가정한 경우 (PL1) 1차 고유

참고 문헌

진동수는 14.8 Hz 로써 예비설계 가정치 주파수인 20 Hz 보다 낮았다. 평균요소와 보요소를 조합한 경우, 1차 고유진동수의 한 21 Hz 이상이였으며 기동영구 두께에 보요소의 단면 변화에도 고유진동수 변화는 큰 지압을 알 수 있었다. 이들 평균요소를 포함하는 해석모델에서의 고유진동수를 보요소의 고유진동수와는 큰 차를 나타내 보였으며 이는 평균요소의 국부 변형모드에 대한 낮은 주파수임을 알 수 있었다. PL3 모델에서 보요소에 나타나는 굽힘모드를 구하기 위해 50차 까지 고차모드를 계산하였으며 27차에서 고유진동수 114.7 Hz는 1차 굽힘모드를 나타내며 이는 ST2의 굽힘모드 고유진동수 121 Hz와 잘 일치함을 알 수 있었다.

1. Seismic Qualification of Electric Equipment for Nuclear Power Plants, Regulatory Guide 1.100.
2. Dynamic Testing and Analysis of Systems, Components, and Equipment, SRP 3.9.2 NUREG-0800.
3. Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis, Regulatory Guide 1.92.
4. IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, ANSI/IEEE Std. 323-1983.
5. IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, IEEE Std. 344-1987.
6. 기기검정해설과 업무소개 (영광원자력 3,4호기 업무와 관련하여), 신광복, 이영욱, 전력기술 통권 제 2호, 1990.9.
7. 원전 안전성 기기검증 세미나 (다목적연구용 원자로 정지반의 내진검증), 유봉, 한국원자력연구소/과학기술자, 1990.6.
8. STARDYNE User Information Manual, General Microelectronics Corp., 1987.

- 2) PL3 모델에 대한 응답스펙트럼 해석에서 최대 굽힘 응력은 24.34 MPa로서 이는 허용응력 108 MPa 보다 훨씬 작으므로 구조적으로 안전함을 알 수 있으며 해석에서 사용된 평판 및 앵글의 두께를 상대적으로 더 줄일 수도 있음을 알 수 있다.
- 3) 정지반지점의 안전정지진 수평 층응답 스펙트럼에 상응하는 인공시간 이력곡선을 작성하였다. 이의 적합성을 알기 위하여 주파수 영역에서의 주파수 범위 및 가속도 비교에서 6 ~ 8 Hz 주파수 범위의 Peak Accel.은 서로 잘 일치하나 33 Hz 이상의 ZPA는 다소 과장되어 나타났다.
- 4) 인공시간이력 곡선을 이용하여 계기가 부착되는 위치에서의 계산 층응답 스펙트럼을 구하고 이를 계기의 요구응답 스펙트럼과 비교하기 위하여 정지반의 시간이력해석을 수행하였다. 계산 층응답 스펙트럼의 Peak Accel. 4.8g는 주파수범위 6 ~ 8 Hz 에서 나타났으며 이는 요구응답스펙트럼 작음을 알 수 있었다. 30 Hz 이상에서의 ZPA는 거의 비슷함을 알 수 있었다.

이는 해석에 사용된 모델은 충분한 강성을 지니고 있어 지진입력에 대하여 정지반의 각 위치에서의 지진응답이 크게 증폭되지 않음을 보여주고 있다.

4. 결 론

원자력 관련시설의 정지반의 내진 검증을 위한 예비단계로서 내진해석의 연구를 통해 다음과 같은 성과를 얻었다.

- 1) 다양한 형태의 정지반의 고유진동수 해석을 통해 정지반의 철판 두께와 앵글의 지지 형태를 결정하여 정지반의 기본 구조설계를 완성하였다.
- 2) 정지반의 고유진동수 범위와 진동 모드를 파악하여 정지반의 내진 시험시 정지반의 동특성 파악에 유용하게 사용할 수 있다.
- 3) 정지반의 시간이력 해석에 의한 층응답 스펙트럼을 구함으로써 계기의 요구응답 스펙트럼을 만족함을 입증하였다.
- 4) 정지반에 대한 내진 해석 절차를 확립하여 향후 안전관련 구조물 계통, 기기등의 내진 검증에 이용할 수 있게 되었다.