

## 발전소 주 제어실 제어패널의 내진해석

### Seismic Analysis on a Control Panel of (Nuclear) Power Plant

이 흥 식\* · 김 명 구\* · 조 중 두†

Heung-Shik Lee, Myung-Gu Kim and Chongdu Cho

(2004년 10월 15일 접수 : 2005년 5월 3일 심사완료)

**Key Words** : Seismic(내진), Finite Element Model(유한요소모델), Mode Analysis(모드해석), Natural Frequency(고유진동수), Required Response Spectra(요구 응답 스펙트럼), Spectrum(스펙트럼), Mode Combination(모드 조합법), Acceleration(가속도), Vibration Level(진동레벨)

#### ABSTRACT

In this paper, seismic qualification analysis for the plant control panel is carried out to confirm the structural integrity under the seismic conditions represented by required response spectra(RRS). The finite element method(FEM) is used for the analysis and a mode combination method is adopted to obtain a more reliable spectrum analysis results. In addition, the experimental analysis is performed to compare the reliability of the analytical results. The analysis results shows that the plant control panel system is designed to have the dynamic rigidity with no resonance frequency below 33 Hz. The analytically calculated maximum stress of the plant control panel system is 36 % of the yield strength of material, thus it can be shown that the system has a stable structure for the seismic load.

#### 1. 서 론

원자력 산업에 지진이 미치는 영향은 매우 크다. 원자력 시설의 안전성 확보를 위해서는 자연재해에 의한 피해를 방지하고 최소화하기 위한 노력이 필요하며 이를 위해서는 발생 가능한 자연재해 중 광범위한 지역에 대해 심각한 피해를 야기 시킬 수 있는 지진에 대해 철저한 대비를 하지 않을 수 없다.

기계류 및 전기류를 포함한 산업용 구조물은 해당 구조물이 설치될 지역에서 발생 가능한 지진에 대하여 지진 발생 중 또는 발생 후에 장비가 제 기능을 유지하는지 검증할 필요가 있다<sup>(1)</sup>. 이를 내진검증이라 하는데 크게 시험적인 방법과 해석적인 방법으로

구분되며 두 가지 방법을 병행하기도 한다. 시험적인 방법은 대상 기기를 진동대에 설치하고 실제 지진을 모사하여 기기의 안전성을 검증하는 방법으로 가장 정확한 방법이다. 이에 비해 해석적인 방법은 해석 모델의 구성과 지진 하중의 산정 등 그 과정에 상당한 가정과 생략이 포함되나 초기 설계단계에서 평가 결과를 얻을 수 있으므로 설계에 그 결과를 재 반영할 수 있는 장점이 있다. 해석적 방법에서는 앞에서 언급한 가정과 생략을 보상하기 위해 보수적인 해석(conservative analysis) 또는 평가를 하는 것이 일반적이다.

해석적 내진검증에는 대상 기기의 동적 특성, 지진 하중 등에 따라 정적 해석법 혹은 동적 해석법을 적용할 수 있으며 정적 해석법에는 등가 정적해석(static coefficient analysis)이 포함되고, 동적 해석법에는 응답스펙트럼해석(response spectrum analysis), 시간이력해석(time history analysis) 등이 포함된다. 이 연구에서는 plant control panel에 대하여 원자력 발전소 설치용 장비에 적용되는 요구 응답 스펙트럼

† 책임저자 : 정회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : cdcho@inha.ac.kr

Tel : (032) 860-7321, Fax : (032) 868-1716

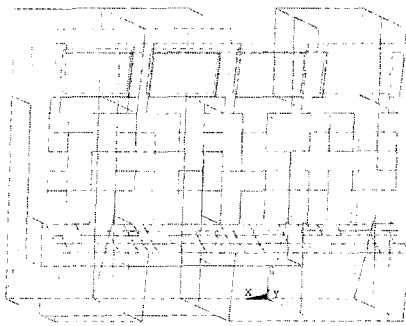
\* 정회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

(required response spectrum : RRS)을 적용하여 다양한 조건과 해석방법으로 내진해석을 수행하였고, 또한 패널(panel)의 고유진동수와 발생하는 진동 레벨(level)을 실험적으로 측정하여 내진에 의한 시스템의 구조적 건전성(structural integrity)을 평가 하였다.

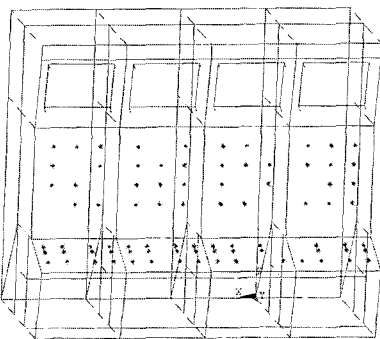
## 2. 해석적 내진 검증

### 2.1 유한요소 모델링

구조적 안정성 평가를 위한 발전소 주 제어실 제어패널의 유한요소모델을 상용 유한요소해석프로그램인 ANSYS를 사용하여 구성하였다. 이 시스템은 계측에 사용되는 모니터링 기기와 제어에 사용되는 스위치와 버튼(button) 등의 작은 계측기기 들로 구성되어있다. 상단 모니터 부분을 제외한 기타 부분은 질량이 매우 작아 내진에 의한 영향이 미소한 것으로 판단되어 모델링에서 간략화 되었다. 주요 외판 부재는 셸(shell) 요소로, 내부의 보강재는 등가 빔 요소로 모델링 하였다. Fig.1의 (a)는 modeling 형상이며, (b)는 계측기기의 분포를 보여 준다.



(a)



(b)

Fig. 1 Modeling of a plant control panel

패널(panel)에 부착되어 있는 제어기기의 고정용 볼트는 따로 모델링하지 않고 단순 지지 경계조건으로 구현하였으며 이 시스템의 아래, 좌, 우측 부분이 구속됨을 이용하여 모델링 하였다. 발전소 주 제어실 제어패널의 구조 강성에 영향을 미치지 않는 일부 부품 및 응력 평가 대상이 아닌 부품들은 고정되는 위치의 절점에 집중질량으로 모델링 하였다.

### 2.2 모드해석<sup>(2,3)</sup>

해석 대상 구조물의 경계조건에 따른 동적특성(가요성인지 강성구조인지의 여부)을 판단하기 위해 스펙트럼해석에 앞서 모드해석을 수행하였다.

모드 해석에서는 고유진동수와 모드형상, 참여계수를 나타내며, 해석결과 최저고유진동수는 68.487 Hz로 요구 응답 스펙트럼(RRS)의 차단진동수(cutoff frequency : 33 Hz) 보다 큰 진동수에서 고유진동수 값이 있으므로 강성기기의 해석 절차를 따라야 함을 알 수 있다. Fig. 2~Fig. 4에 1차, 2차 모드 형상과 1, 2차 모드에서 발생하는 응력 분포, 그리고 5차와 6차 모드에서 발생하는 응력 분포를 나타내었다. 그림에

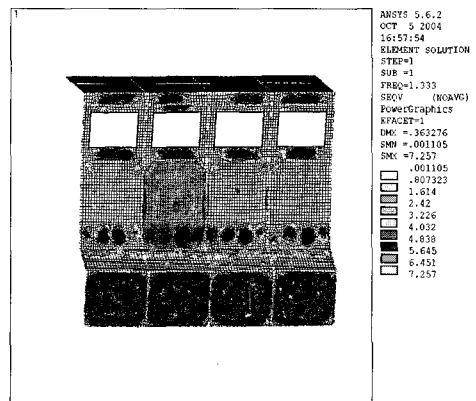
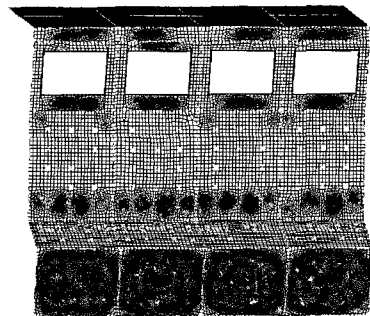


Fig. 2 1st Mode(up) and stress(under) analyses

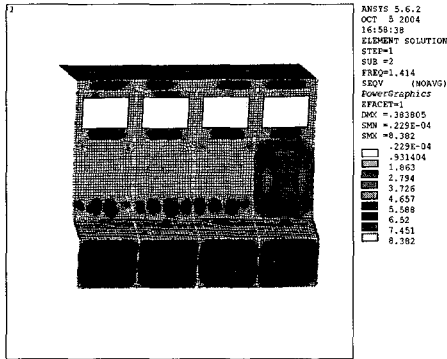
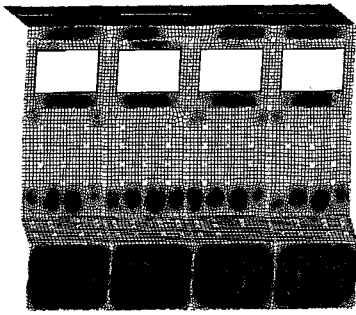


Fig. 3 2nd mode(up) and stress(under) analyses

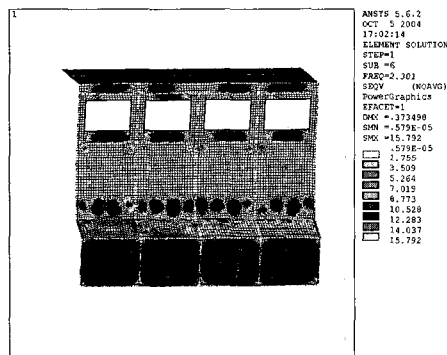
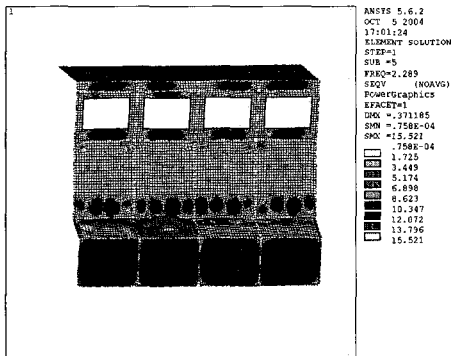


Fig. 4 5th(up) and 6th(under) mode stress analyses

서 보이는 바와 같이 1차 진동모드의 최대 응력은 주변 패널(panel) 왼쪽 중앙 부분에 있는 플레이트(plate)에서 발생하였으며, 2차 진동모드에서는 패널의 우측부분에서, 그리고 5차 진동모드와 6차 진동모드에서는 하단 좌측 중앙부분과 좌측부분에서 발생하였고 각각의 경우 좌우 방향(x-방향) 휨과 패널내부의 프레임(frame) 및 측면 플레이트(plate)에서 미소 응력 분포가 다양하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 또한 고유진동수가 비교적 높게 나타나 견고한 구조물로 예측할 수 있다.

### 2.3 스펙트럼 해석

#### (1) 스펙트럼 해석 개요

스펙트럼 해석은 발전소 주 제어실 제어패널이 설치되는 위치의 층 응답 스펙트럼(FRS) 및 요구 응답 스펙트럼(RRS)값을 모두 포함할 수 있도록 가진 방향별로 작성한 스펙트럼 값으로 하여 하중조건으로 입력하였으며 2%의 OBE(operating basis earthquake) 감쇠곡선, 3%의 SSE(safe shutdown earthquake) 감쇠곡선을 적용하여 해석하였다.<sup>(4)</sup>(Fig.5 참조) 요구 응답 스펙트럼(RRS)이란 고객이 제시하는 지진파의 주파수 별 응답 스펙트럼을 의미하며 내진 설계 시, 시간 기반의 지진 자료로부터 해석적으로 설계자가 구할 수도 있다.

이 연구에서는 대상 기기의 1차 고유진동수가 33 Hz 이상이므로 정적 내진해석을 수행하였으며 패널에 부착된 장치들에 한정하여 수행하였으므로 주파수를 기반으로 한 요구 응답 스펙트럼(RRS)의 2.5배를 최종 입력 스펙트럼 값으로 사용하였다.

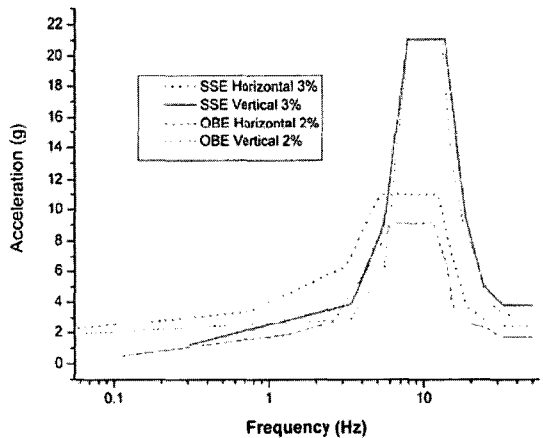


Fig. 5 Required response spectrum

(2) 응답 스펙트럼 해석

응답 스펙트럼 해석법은 주어진 RRS에서 해석하고자 하는 진동수에 해당하는 가속도를 입력으로 하여 구조물의 응답을 구하고 그 결과를 합산하여 대상 장비의 안전성을 평가하는 방법이다. 응답 스펙트럼 법은 다음과 같이 지반 또는 기저부의 가진에 대한 기기의 운동 방정식으로부터 각 절점의 변위를 구하게 된다<sup>(5)</sup>.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = [M]\{1\} \{\ddot{u}_b\} \quad (1)$$

절대변위  $u_i$ 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\{u_i\} = \{u\} + \{1\}\{u_b\} \quad (2)$$

식 (1)에 대해 고유치 해석을 수행하여 모드행렬  $[\phi]$ 를 구하게 되면 각 절점에서의 변위  $u$ 와 모드 응답  $\xi$ 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\{u\} = [\phi]\{\xi\} \quad (3)$$

위 식을 식 (1)에 대입하고 모드행렬을 전치(transpose)하여 전승하면 모드벡터의 직교성에 따라 다음과 같이 모드응답에 대한 비 연성된 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{\xi}_n + 2\zeta\omega_n\dot{\xi}_n + \omega_n^2\xi_n = \gamma_n \ddot{u}_b \quad (4)$$

위 식에서  $\gamma_n$ 는 참여계수(participation factor)로서 아래와 같이 정의되며 지반 가속도가  $\ddot{u}_b$ 가 모드응답  $\xi$ 에 미치는 영향계수로 이해할 수 있다.

$$\gamma_n = \frac{\{\phi\}_n^T [M]\{1\}}{\{\phi\}_n^T [M]\phi} \quad (5)$$

식 (4)에서 모드응답을 구해 식 (3)에 대입하면 최종적으로 다음과 같이 각 절점에서의 변위를 구하게 되고 이로부터 내부 응력과 힘을 구할 수 있다.

$$\{u\} = \{\phi_n\} \gamma_n \frac{R_a}{\omega_n^2} \quad (6)$$

위 식에서  $R_a$ 는 응답 스펙트럼에서의 가속도를

의미한다.

(3) 모드조합법

식 (6)에서 구해진 각 모드별 응답을 합산하는 방법에는 여러 가지가 있지만 기계 구조물에 있어서는 다음 식이 사용된다.

$$\sigma_T = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} \sigma_i \sigma_j} \quad (7)$$

- $\sigma_i, \sigma_j$  :  $i, j$  번째 모드에 해당하는 최대 모드응답
- $\sigma_T$  : 최종 모드응답
- $n$  : 전체 모드 수
- $\beta_{ij}$  :  $i$  모드와  $j$  모드 사이의 연성계수

위 식 (7)에서 연성계수  $\beta_{ij}$ 에 따라 SRSS(square root of sum of squares) 방법과

$$\beta_{ij} = \begin{cases} 1.0 & \text{if } i=j \\ 0.0 & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (8)$$

$$\sigma_{T_{SRSS}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} \quad (9)$$

CQC(complete quadratic mode combination) 방법,

$$\beta_{ij} = \left[ \frac{8\sqrt{\epsilon_i \epsilon_j} (\epsilon_i + r\epsilon_j) r^{3/2}}{(1-r^2)^2 + 4\epsilon_i \epsilon_j r(1-r^2) + 4(\epsilon_i^2 + \epsilon_j^2)^2} \right] \quad (10)$$

- $\epsilon_i, \epsilon_j$  :  $i, j$  번째 모드에 해당하는 감쇠율(damping ratio)
- $r = \frac{\omega_j}{\omega_i}$  ( $\omega_i, \omega_j$  :  $i, j$  번째 모드의 고유진동수)

DSUM(double sum mode combination) 방법

$$\beta_{ij} = \left[ 1 + \left\{ \frac{(\omega_i + \omega_j)}{(\epsilon_i \omega_i + \epsilon_j \omega_j)} \right\}^2 \right]^{-1} \quad (11)$$

- $\omega_i = \omega_i (1 - \epsilon_i^2)^{1/2}$
- $\omega_j = \omega_j (1 - \epsilon_j^2)^{1/2}$
- $\epsilon_i = \epsilon_i + \frac{2}{t_d \omega_i}$
- $\epsilon_j = \epsilon_j + \frac{2}{t_d \omega_j}$  ( $t_d = 10$  Seconds)

등으로 나뉜다<sup>(1, 6)</sup>.

이 연구에서는 스펙트럼해석에서의 모드 조합방법으로 SRSS법과 그 외에 모드해석상의 모드별 주파수가 근접하게 존재할 경우에 대하여 몇 가지의 다른 모드 조합법을 사용하였다. 앞 절의 모드해석 결과, 몇몇 모드가 근접하게 존재하고 있으므로 이 해석 프로그램인 ANSYS에서 제공하는 모드 조합법인 SRSS (square root of sum of squares mode combination) 외에 DSUM(double sum mode combination) 조합법, CQC(complete quadratic mode combination) 조합법, GROUP(grouping mode combination) 조합법으로 해석하여 응력 해석 결과를 비교하였다. 이와 같은 스펙트럼해석에서 두 수평방향과 수직 방향의 가진에 대해 독립적으로 해석한 후, 각 방향별로 계산된 결과는 각 방향에서의 지진하중에 기인한 기기 상의 임의의 위치에서 결과를 얻기 위해 SRSS방법으로 합산하였다.

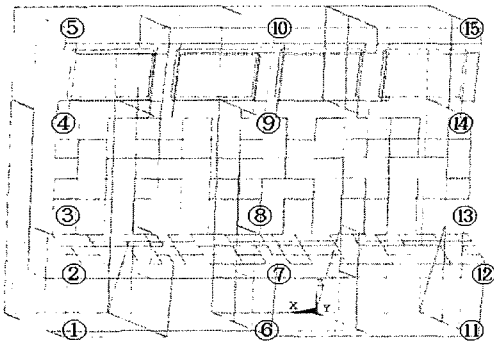


Fig. 6 Locations of experimental measurements

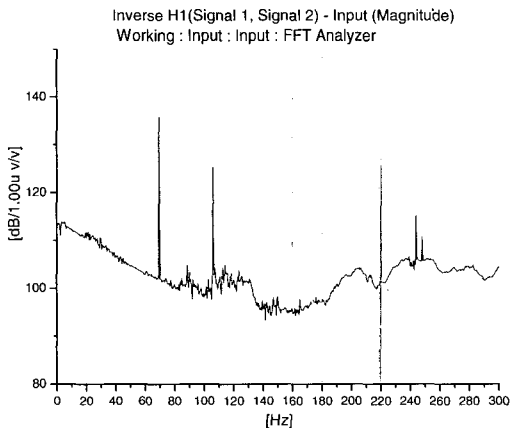


Fig. 7 Natural frequency of the control panel (position 8, y-direction)

이와 함께 운전하중의 일종으로 볼 수 있는 패널(panel)의 자중에 의한 응력 분포를 고려하기 위해 중력가속도에 의한 정적해석을 수행하였으며, 이 값을 스펙트럼해석 결과에 더하였다.

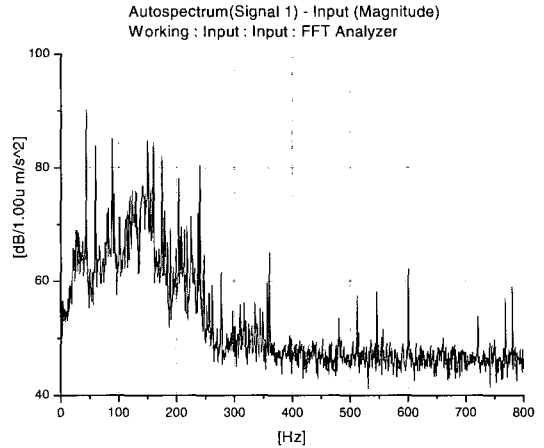


Fig. 8 Floor vibration level at the position 6

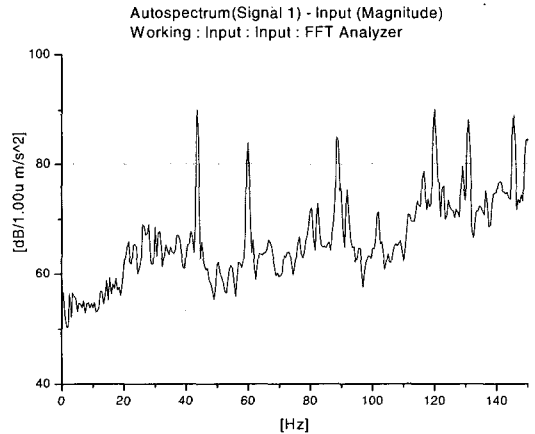


Fig. 9 Floor vibration level at the position 6 below 150 Hz

Table 1 Natural frequencies and participation factors

Mode	Freq.(Hz)	Rot x	Rot y	Rot z
1	68.487	-165.94	0.421e-1	118.53
2	106.174	40.367	-53.500	-16.806
3	244.099	0.611e-3	-29.620	-12.457
4	248.202	64.861	-21.639	4.565
5	353.080	-4.706	16.944	5.222
6	356.834	0.256e-2	-3.254	-33.114
7	402.344	0.242e-3	0.944	0.471
8	421.435	-52.430	0.035	30.295

### 2.4 실험적 해석

데이터의 신뢰성(reliability)을 얻기 위하여 발전소 주 제어실 제어패널의 고유진동수와 진동 level을 가속도계(accelerometer : B&K)를 이용하여 가속도계의 출력으로 auto power spectral density function을 구하였다. 측정 위치는 제어패널의 양쪽 부분과 중앙 부분이었으며, 각각 다섯 군데의 위치에서 측정하였다. 주 제어실의 바닥 진동레벨(vibration level) 측정을 위해서는 패널의 최 하단 부분 바닥의 진동을 측정하였다. 패널의 진동레벨 측정 위치를 Fig. 6에 나타내었으며, 고유진동수 측정은 패널 좌, 우측 중앙부분을 추가로 측정하였다. 고유진동수 측정 시 주파수 대역은 800 Hz이었으며, Fig. 7에 300 Hz에 해당하는 부분의 스펙트럼 값을 나타내었다. Fig. 7을 통해 최저 고유진동수가 68 Hz에서 발생하는 것을 볼 수 있으며, 그 후 106 Hz 부근에서 다시 고유진동수가 나타나고 있다. 진동레벨 측정 또한 고유진동수 측정에서와 동일하게 800 Hz의 주파수 대역에서 측정하였고(Fig. 8), Fig. 9은 150 Hz에 해당하는 부분의 진동레벨 스펙트럼 값을 나타내었다. 그래프를 통해 33 Hz 이상의 부분에서 최대진동을 보이는 것을 알 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

2장에서 정리한 모드 해석, 스펙트럼 해석법을 발전소 주 제어실 제어패널에 대하여 각각 수행하고 von Mises 응력응답을 평가하였다. 적절한 해석방법에 의해 수행된 응답결과는 그 기기가 구조적 건전성(structural integrity)을 유지하기 위한 허용기준을 만족시켜야 하는데, 이 해석 대상인 주 제어실의 제어패널은 철 구조물로서 인장강도가 41 kg/mm<sup>2</sup>, 항복강도가 24 kg/mm<sup>2</sup>인 SS400강으로 구성되어있으며, 미국 철강협회(AISC Sect. A5.2)의 지진 시강구조물에 대한허용응력 증가의 기준을 고려하여 허용응력은 항복강도의 90%인 21.6 kg/mm<sup>2</sup>로 한다.<sup>(7)</sup> 이를 위해 각 부재들의 응력 평가 방법들을 제시하고 각 해석 방법에 따른 결과를 비교하였다. 모든 내진 해석은 X, Y, Z 각 방향 지진하중에 대한 응답을 SRSS(square root of sum of squares mode combination)합산하여 최종 응력 결과를 도출하였다. 그 후 CQC(complete quadratic mode combination), GROUP(grouping mode combination), DSUM(double sum mode combination) 방법에 의해 합산

하였다. 엄밀한 결과 평가를 위해서는 각 절점에서의 응력 값을 각각 합산해 평가해야 하나 모든 절점에서 응력 값을 추출하여 계산하는 것은 시간이 많이 소요된다. 따라서 각 응력 평가 범위에서 최대 값들을 대표 값으로 취하여 합산함으로써 평가시간을 단축하되 보수성은 유지하였다.

실험을 통해, 패널의 고유진동수 값이 60 Hz 이상

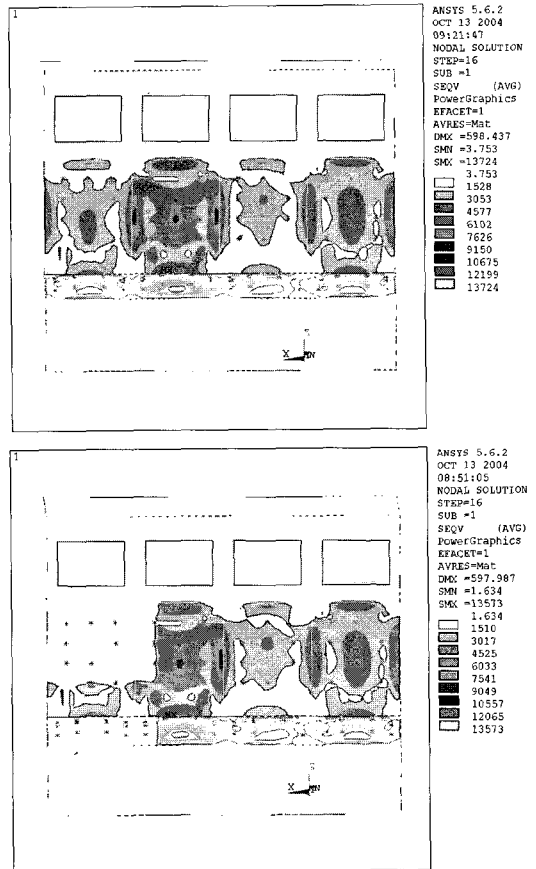


Fig. 10 OBE nodal solutions of SRSS and CQC

Table 2 Results of maximum stresses

Seismic spectrum	Mode combination	Max (kg/mm <sup>2</sup> )
OBE	SRSS	6.171
	GROUP	6.173
	CQC	6.173
	DSUM	6.176
SSE	SRSS	7.675
	GROUP	7.677
	CQC	7.678
	DSUM	7.680

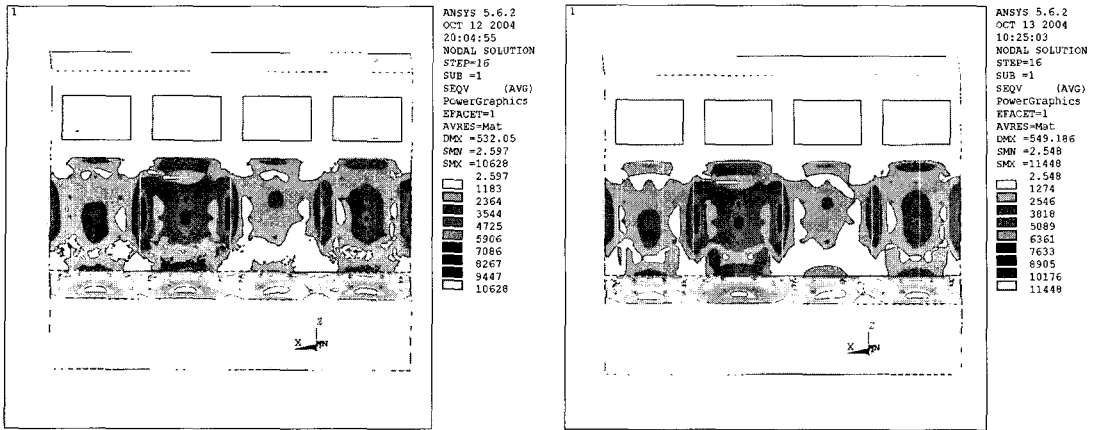


Fig. 11 OBE nodal solutions of GROUP and DSUM

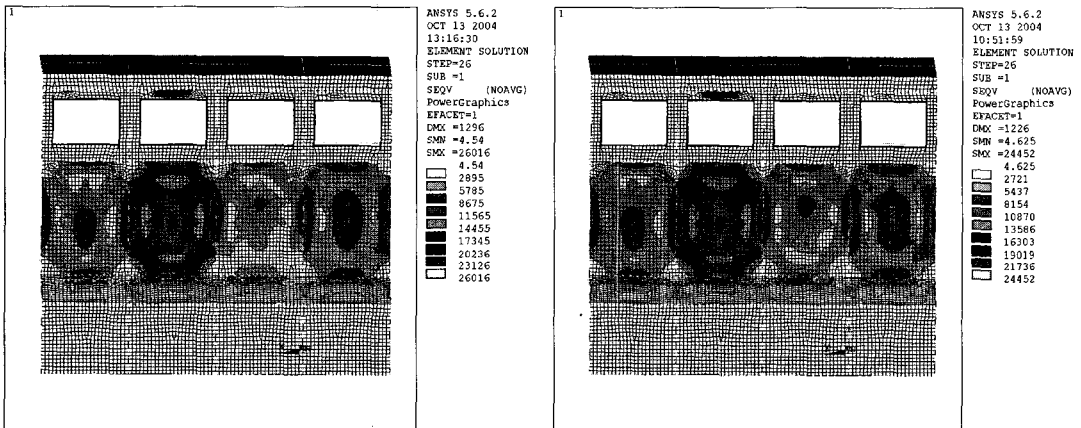


Fig. 12 SSE element solutions of SRSS and CQC

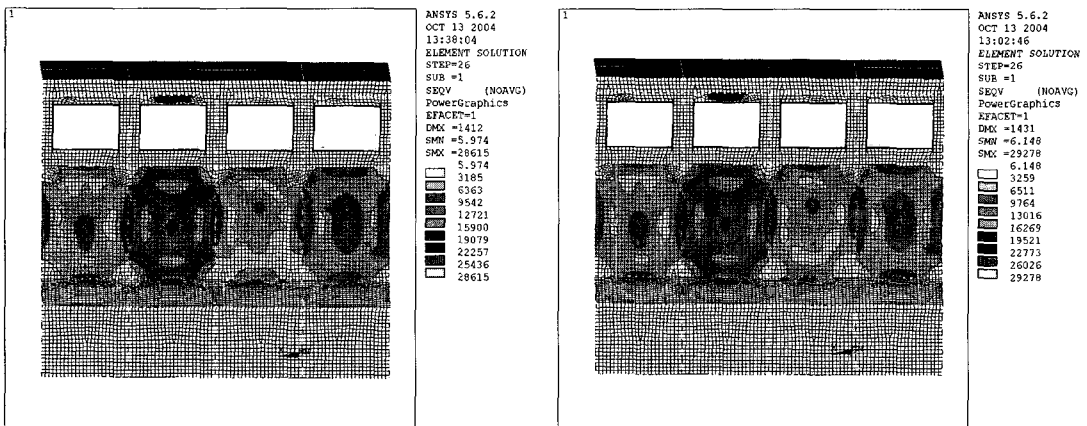


Fig. 13 SSE element solutions of GROUP and DSUM

의 높은 값을 나타내었고 유한요소 해석에서 얻은 고유진동수의 값에 근사하는 것을 확인하였으며, 실험에서 얻은 바닥진동의 주파수 값들이 패널의 고유진동수 이후인 33 Hz 이상 부분에서 나타내고 있어, 실험적으로도 제어패널이 안전함을 확인하였다.

각 해석방법에 따른 결과를 Table 2에 나타내었고, CQC, DSUM, GROUP 모드 조합법에 의한 결과를 Fig. 10~ Fig. 13에 나타내었다. 결과치가 가장 큰 DSUM 조합법에 의한 von Mises의 등가응력 결과, SSE 조건의 최대 응력으로, 중앙 오른쪽 부분, 제어기기 주변의 플레이트(plate)에서  $7,680 \text{ kg/mm}^2$ 의 값으로 나타났으며, 이와 함께 내부 프레임(frame)에서도 전반적으로 낮은 응력 분포를 보였다.

이러한 결과는 역시 패널이 안정적인 구조를 갖고 있기 때문에 기인한 것으로, 결과적으로 해석 결과치가 허용 응력인  $21.6 \text{ kg/mm}^2$ 의 36% 이하의 값으로, 낮게 나타나 주 제어실의 제어패널은 매우 안정적인 구조임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

이 논문에서는 모드해석과 스펙트럼 해석, 그리고 모드 조합의 대표적인 방법에 대해 간략한 소개를 하였으며 주 제어실 제어패널에 대해 유한요소 해석 방법과 실험적 해석 방법을 적용해 보았다. 그 결과 구조적 건전성을 만족하게 하는 응력 허용치를 모두 만족하였다. 그리고 그 결과들의 비교, 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

먼저 모델링 측면에서 경계조건의 종류 및 위치, 집중 질량의 분포에 따라 해석 결과에 상당한 차이가 발생하므로 실제에 가까운 모델링이 필요하다.

동적 해석을 간단하게 수행하기 위한 등가 정적해석법은 응답스펙트럼해석 결과와 유사한 결과를 주는 것으로 판단되며, 다만 33 Hz 안에 많은 수의 모드가 있을 경우 이에 대한 영향을 고려하여야 한다.

스펙트럼해석에서 두 수평방향과 수직방향의 가산에 대해 독립적으로 해석한 후, 각 방향별로 계산된 결과는 각 방향에서의 지진하중에 기인한 기기 상의 임의의 위치에서 결과를 얻기 위해 합산하였다.

실험적 해석을 통해 제어패널의 고유진동수와 진동

레벨, 제어실의 바닥 진동레벨의 측정을 통해 해석적 방법에 의한 결과가 타당함을 검증하였다.

해석과 측정에서 얻어진 데이터를 통해, 내진에 의한 주 제어실 제어패널의 안정성은 확인이 되었으나, 발전소 내의 기계진동에 의한 패널 및 기타 제어장치의 안정성은 후 연구과제로 생각된다.

#### 후 기

이 논문은 2004년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

#### 참 고 문 헌

- (1) IEEE Std., 1987, "Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations", pp. 344~348.
- (2) 김종욱, 홍성욱, 1999, "엄밀한 동적 요소를 이용한 프레임 구조물의 모델링 및 모드해석", 한국소음진동공학회논문집, 제 9 권, 제 5 호, pp. 966~974.
- (3) 우성현, 문상무, 김홍배, 이상설, 1999, "핵연료 봉지 구조물의 모드해석 및 유한요소 모형 개선", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 876~884.
- (4) US NRC Regulatory Guide 1.29, 1978, Seismic Design Classification.
- (5) R. W. Clough, J. Penzien, 1993, Dynamics of Structures, McGRAW-Hill.
- (6) 하동호, 고현무, 1999, "마찰 형 면진받침을 가진 지진격리교량의 지진응답해석", 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 96~101.
- (7) AISC(American Institute of Steel Construction), 1989, Manual of Steel Construction Allowable Stress Design-ninth Edition.
- (8) IEEE Std., 1983, Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, pp. 323~1983.
- (9) Kim, W. H., Oh, D. H. and Joo, W. H., 2003, "A Study on the Seismic Qualification of Gas Insulated Switchgear Using Analytical Method", 10th ICSV Proceeding.