

# 원자력발전소용 주 제어반의 내진 검증

## Seismic Qualification of the Main Control Board for Nuclear Power Plant

변 훈 석\* · 이 준 근\*

Hoon-Seok Byeon and Joonkeun Lee

(2001년 12월 22일 접수 : 2002년 8월 31일 심사완료)

**Key Words** : Seismic Qualification(내진 검증), Seismic Analysis(내진 해석), Finite Element Method(유한요소법), Main Control Boards(주 제어반), Required Response Spectra(요구 응답 스펙트럼)

### ABSTRACT

Seismic qualification of the main control board(MCB) for the nuclear power plant Ulchin 5 and 6 has been performed with the guideline of ASME Section III and IEEE 344 code. As the size and weight of the MCB are too large and heavy to excite using the excitation table, finite element analysis is used in order to investigate the dynamic behaviors and structural integrity of the MCB. As the fundamental frequencies of the equipment are found to be less than 33 Hz, which is the upper frequency limit for the dynamic analysis, response spectrum analysis using ANSYS is performed in order to combine the modal stresses within the frequency limit. In order to confirm the electrical stability of the major components of the MCB, modal analysis theory has been adopted to derive the required response spectra at the component locations. As the all combined stresses obtained from the above procedures are less than the allowable stresses and no mechanical or electrical failures are found from the seismic testing, the authors can confirm the safety of the nuclear equipment MCB under the given seismic loading conditions.

### 1. 서 론

원자력발전소에서 작동되는 기기 중 안전등급에 해당되는 기기는 정상, 비정상 환경과 지진발생과 같은 사고 조건 하에서도 그 기능이 유지될 수 있도록 설계되어야 하며 이에 대한 일련의 과정을 기기검증(equipment qualification)<sup>(1)</sup>이라고 한다. 기기검증은 Fig. 1과 같이 일반적으로 온도, 습도, 압력, 방사선 등의 환경조건에 대한 노화시험 및 해석(aging test/analysis)<sup>(2)</sup>으로 구성되는 내환경검증과 내진해석 및 시험(seismic analysis/test)으로 구성되는 내진검증<sup>(3)</sup>

으로 구분할 수 있다. 내진 검증의 경우 가장 바람직한 것으로는 대상 구조물 전체를 지진력에 해당하는 힘으로 가진하여 실험하는 것이 바람직하지만 이 경우 완제품을 미리 만들어야 한다는 점과 하자발생시 제품의 설계변경이 어렵다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석 기법과 모드해석 이론 그리고 가진실험을 조합하는 내진 검증방법을 활용하여 이를 실제기기에 적용하였다. 즉 유한요소법을 통해 전체적인 구조물의 지진 안정성을 평가하고 주요 부위에서의 스펙트럼 응답증폭률을 계산하기 위한 해석응답 스펙트럼(analysis response spectra : ARS)을 모드해석이론에 근거하여 산출하였다. 이를 통해 주요 전장품에 대해서는 별도의 요구응답 스펙트럼을 이용하여 가진실험을 함으로써 전기적, 구조적 안전성을 평가하였다. 이러한 과정을 거쳐 검증 대상기기는 주

† 책임저자, 정희원, (주) 새한검증

E-mail : imstax@sneq.co.kr

Tel : (031) 427-2520, Fax : (031) 427-2526

\* 정희원, LG전선(주)

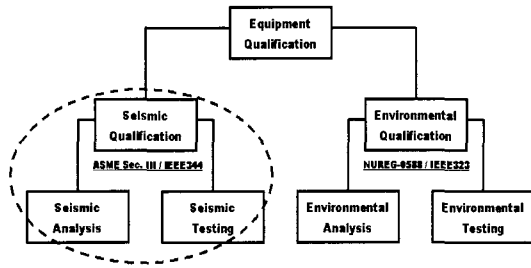


Fig. 1 Classification of equipment qualification

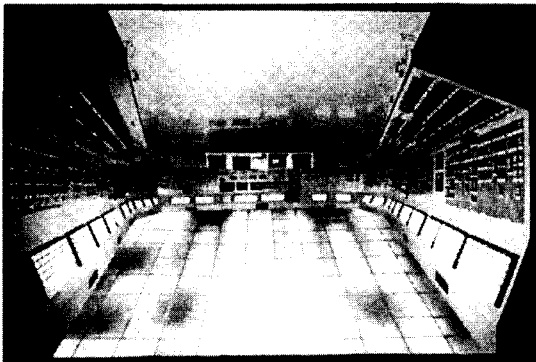


Fig. 2 Main Control Boards for seismic qualification

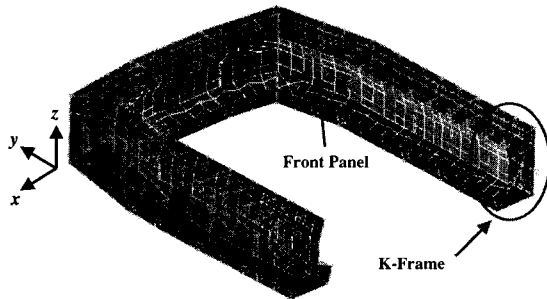


Fig. 3 Finite element model of the MCB

제어반(main control board : MCB) 전체에 대한 가진실험을 수행하지 않고서도 효율적인 내진 검증을 수행할 수 있었다.

## 2. 해석에 의한 내진 검증

### 2.1 유한요소해석

본 연구에서 다루는 실제 주제어반 모델은 Fig. 2와 같이 12개의 하부요소로 구성되며 전체 크기 및 무게는  $18.3 \times 14.6 \times 2.9 \text{ m}^3$  과 39898 kg이다. 각 하부요소는 기본골격인 Fig. 3과 같이 K형상의 프레임으

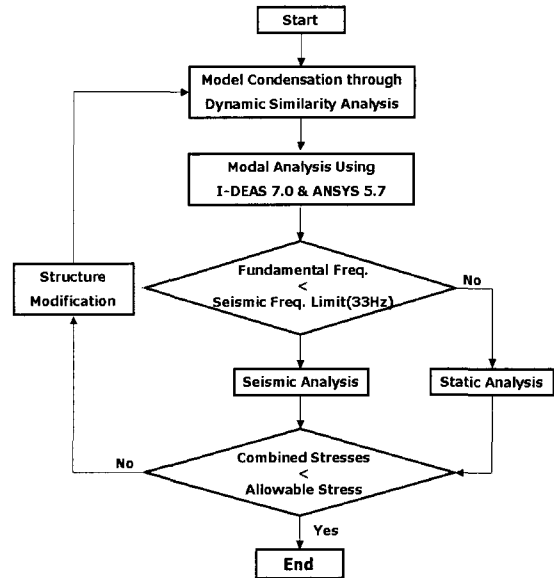


Fig. 4 Flow chart for the seismic analysis

로 지지되며 각 하부 요소간은 볼트로 체결되며 바닥은 용접으로 고정되는 형상을 하고 있다. 또한 각 하부요소는 전방패널(front panel)상에 계전기(relay) 및 스위치로 구성된 여러가지 전장품이 설치되어 있는데 이러한 전장품들은 해석의 편의를 위해 집중질량으로 모델링 하였다. 주제어반의 모델링은 ANSYS version 5.7로 수행되었으며 K형상의 기초 프레임은 beam 4<sup>(4)</sup> 요소로, 전방패널(front panel)은 shell 63<sup>(4)</sup> 번으로 기타 전장품은 lumped mass 21<sup>(4)</sup> 번으로 요소분할 하였다. 평판요소나 보 요소의 물성치는 일반강(SCM440)을 기준으로 하였다. Fig. 3의 총 유한요소 수는 9267개로써 보 요소가 8918개 평판요소가 349개로써 총 9267개의 요소로 구성되어 있다.

Fig. 4는 일반적인 내진해석의 절차도이다. 대부분의 지진파는 높은 에너지를 갖는 주파수 성분이 주로 33 Hz미만에 있는데 만일 장비의 고유진동 해석결과 저차 모드의 주파수 값이 33 Hz 이내 존재한다면 공진에 의한 과대응력이 발생할 수 있다. 이 경우에는 ASME section III, appendix N<sup>(5)</sup>에서 규정하는 식 (1)과 같은 SRSS(square roots of sums of square) 법이나 식 (2)와 같이 각 모드에 대한 응력의 절대값을 합하는 방법(absolute sum method) 등을 사용하여 총 응력을 계산하게 된다. 본 연구에서는 계산된 각 모드들이 10 % 이내로 근접하였기 때문에 식 (2)와 같이 각 모드에 해당되는 응력의 절대합을 취

**Table 1** Classification of load combinations

|         |                                    |
|---------|------------------------------------|
| Level A | Dead weight + Operating load       |
| Level B | Dead weight + Operating load + OBE |
| Level D | Dead weight + Operating load + SSE |

**Table 2** Modal parameters of the MCB with respect to 3-axis

(a) (East-West : X direction)

| Mode No. | Freq. | Period | Partci. factor | Ratio | Mass fraction |
|----------|-------|--------|----------------|-------|---------------|
| 1        | 16.26 | 0.061  | -38.41         | 1.00  | 0.18          |
| 2        | 26.94 | 0.037  | -1.29          | 0.03  | 0.18          |
| 3        | 28.70 | 0.035  | -17.12         | 0.44  | 0.22          |
| 4        | 29.84 | 0.033  | -12.99         | 0.34  | 0.24          |

(b) (North-South : Y direction)

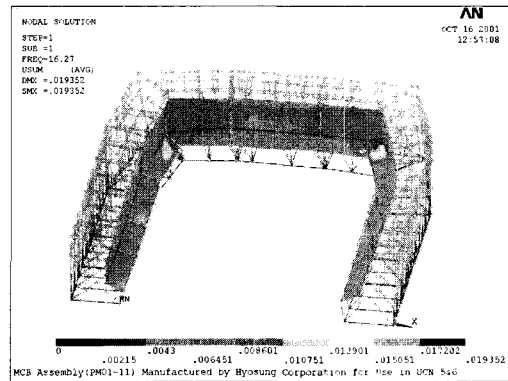
| Mode No. | Freq. | Period | Partci. factor | Ratio | Mass fraction |
|----------|-------|--------|----------------|-------|---------------|
| 1        | 16.26 | 0.061  | 1.32           | 0.01  | 0.001         |
| 2        | 26.94 | 0.037  | -99.49         | 1.00  | 0.92          |
| 3        | 28.70 | 0.035  | 5.51           | 0.06  | 0.92          |
| 4        | 29.84 | 0.033  | -8.11          | 0.08  | 0.93          |

(c) (Vertical-Slab : Z direction)

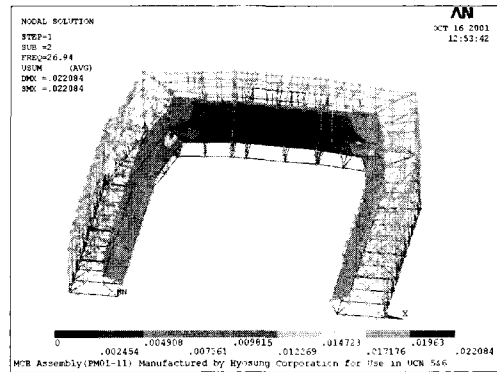
| Mode No. | Freq. | Period | Partci. factor | Ratio | Mass fraction |
|----------|-------|--------|----------------|-------|---------------|
| 1        | 16.26 | 0.061  | -0.18          | 0.02  | 0.001         |
| 2        | 26.94 | 0.037  | -4.33          | 0.40  | 0.05          |
| 3        | 28.70 | 0.035  | -0.65          | 0.06  | 0.05          |
| 4        | 29.84 | 0.033  | -1.71          | 0.16  | 0.06          |

하여 해석결과의 보수성을 높였다. 계산된 총 응력은 ASME section III, appendix I<sup>(6)</sup>에서 규정하는 허용 응력값과 비교하여 구조물의 건전성을 파악하게 되는데 이때 하중조건으로는 장비의 무게, 운전 하중(operating load), 운전 기준 지진(operating basis earthquake : OBE),<sup>(7)</sup> 안전 정지 지진(safety shut-down earthquake : SSE)<sup>(7)</sup>에 의한 하중 등으로 구분할 수 있다. 이러한 지진력의 구분에 따라 내진해석에 사용되는 하중 조합 조건은 Table 1과 같이 A, B, D의 3종류로 구분된다. 이러한 각각의 하중 조건에 대한 응력해석을 통해 전체 구조물의 건전성을 평가하게 된다.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{n=1}^N \sigma_n^2} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_N^2} \quad (1)$$



**Fig. 5** 1<sup>st</sup> Mode mode shape of MCB



**Fig. 6** 2<sup>nd</sup> Mode mode shape of MCB

$$\sigma = \sum_{n=1}^N |\sigma_n| = |\sigma_1| + |\sigma_2| + \dots + |\sigma_N| \quad (2)$$

## 2.2 고유진동해석

해석에 사용된 주 제어반은 바닥면과 장비의 프레임이 용접으로 고정되어 있으므로 경계조건은 고정단 조건으로 처리하여 계산하였다. Table 2는 33 Hz 이내의 주 제어반의 고유진동 해석 결과이다. Table 2의 모드 비(ratio)는 각 모드에 해당되는 기여도(participation factor)중 가장 큰 값에 대한 비율이고 부분질량함(mass fraction)은 각 방향 총 모드에 의한 질량의 합을 1로 보았을 때 각 모드까지의 질량의 합이다. 1차 고유진동수가 33 Hz 미만이므로 동적해석이 필요함을 알 수 있으며 장비의 구조적 특성상 각 방향별로 기여도 차이가 나타남을 알 수 있다. Figs. 5, 6은 주 제어반의 1, 2차 모드 형상이며 주 제어반의 끝단에서 구조의 특성상 슬림에 의한 최대변위가 발생함

을 알 수 있다. Table 2에서 볼 수 있듯이 특히 1, 2 차 모드에서 기여도가 큰 것을 볼 수 있는데 이는 33 Hz 이내의 지진파 성분 중에서 특히 x, y 방향의 지진파에 의한 영향이 지배적이라는 것을 의미한다.

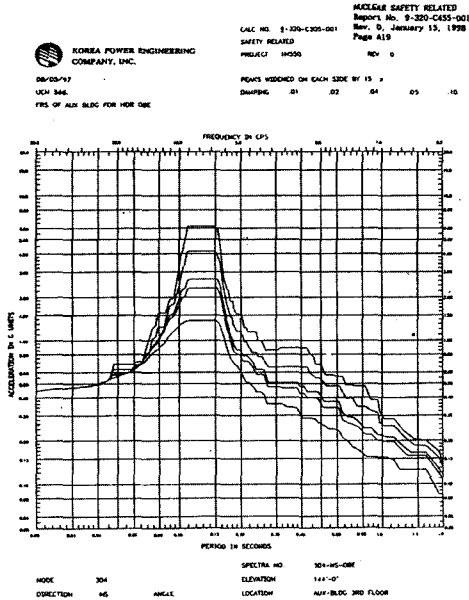


Fig. 7 OBE FRS for N-S(X) direction at 43.92 m elevation

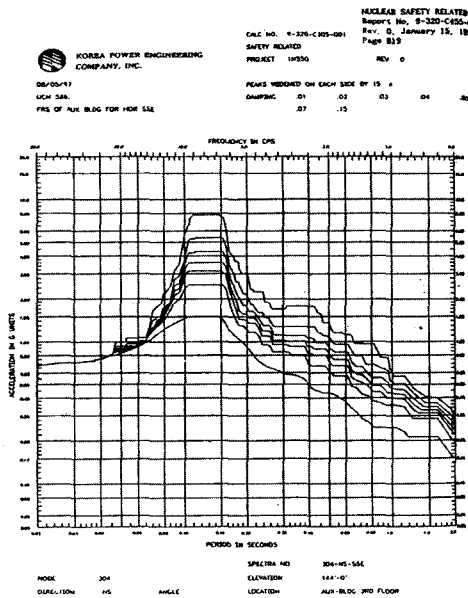


Fig. 8 SSE FRS for N-S(X) direction at 43.92 m elevation

### 2.3 응답 스펙트럼 해석

지진파는 랜덤 형태의 시간영역 함수로 주어지는 것이 일반적이며, 시간영역에서 지진파에 대한 구조응답을 계산하기 위해서는 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 지진시 주로 선형거동이 예측되는 구조물의 경우 응답 스펙트럼 해석법(response spectrum analysis)<sup>(8)</sup>을 이용하면 지진파의 주파수 응답 스펙트럼상에서 값을 읽어 어떤 모드에 어떻게 응답을 조합하느냐만 결정하면 되므로 매우 편리하고 또한 많이 쓰이는 해석 기법이다. Figs. 7, 8은 해석에 사용된 운전 기준 지진파와 안전 정지 지진의 요구 응답 스펙트럼 예이다. 구조물의 1차 고유 진동수가 33 Hz 이내에 존재하면 주어진 지진파에 의한 공진현상이 발생하게 되므로 고유진동해석을 통해서 구한 고유진동수의 해당 가속도 값을 요구 응답 스펙트럼에서 구한 다음 이 값을 입력값으로 하여 식 (2)와 같은 조합방법을 통해 각 방향의 지진파에 의한 조합응력을 계산할 수 있다. Figs. 9, 10은 이러한 과정을 통해서 구한 운전 기준 지진과

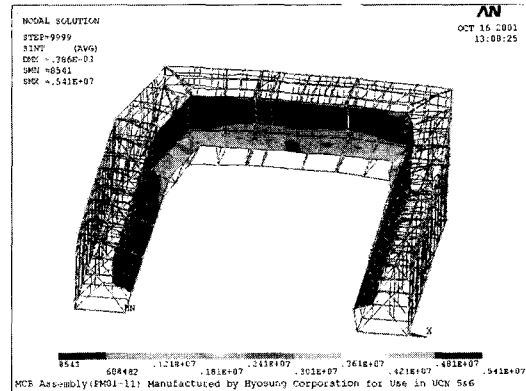


Fig. 9 Stress distribution of MCB due to OBE load

Table 3 Maximum stresses for the each service load condition

| Plant operating condition | Loading condition | Stress value (Pa)    |                      | Allowable stress (Pa)            |
|---------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|
|                           |                   | Beam                 | Shell                |                                  |
| Service A (normal)        | Dead weight       | 5.54×10 <sup>6</sup> | 3.03×10 <sup>6</sup> | 150×10 <sup>6</sup><br>(0.6×Sy)  |
| Service B (upset)         | Dead weight + OBE | 14.7×10 <sup>6</sup> | 6.44×10 <sup>6</sup> | 199×10 <sup>6</sup><br>(0.8×Sy)  |
| Service D (faulted)       | Dead weight + SSE | 19.2×10 <sup>6</sup> | 8.17×10 <sup>6</sup> | 237×10 <sup>6</sup><br>(0.95×Sy) |

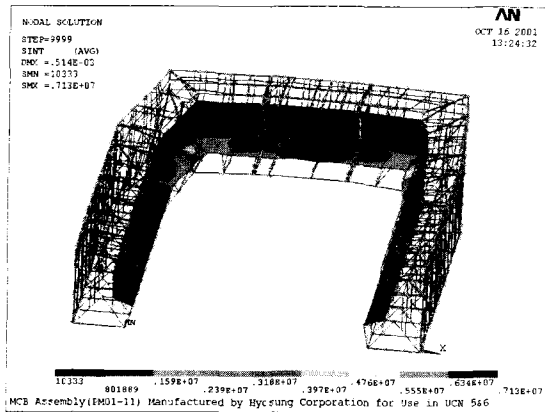


Fig. 10 Stress distribution of MCB due to SSE load

안전 정지 지진에 의한 기기의 응력 분포도이며 Table 3은 중력과 운전 기준 지진 및 안전 정지 지진에 의한 주 제어반의 허용응력 값에 대한 최대 응력값의 비교이다. Table 3에서 보듯이 각 하중 조건에서의 응력값이 모두 허용응력보다 적으므로 주 제어반의 구조적 건전성을 입증할 수 있다. 각 하중 조건에서의 허용응력은 항복하중에 0.6부터 0.95까지의 변수를 곱함으로써 결정하게 된다.<sup>(7)</sup> 이상의 과정을 통해 주 제어반의 구조적 건전성을 입증하게 하였다.

#### 2.4 해석 응답 스펙트럼 유도

주 제어반의 검증요건에는 주 제어반 구조의 어떠한 부분에서도 스펙트럼 응답이 요구 응답 스펙트럼의 1.8배를 초과하지 않아야 한다는 제약조건이 있다. 이러한 응답 증폭률을 알아내기 위해서는 기본적으로 가진시험을 수행하여야 하나 본 연구에서 다루는 구조물인 주 제어반은 무게만도 40톤에 육박하는 대형 구조물이기 때문에 시험이 불가능하다. 따라서 해석을 통한 구조의 해석 응답 스펙트럼(analysis response spectra : ARS)을 구하여야 할 필요가 있다. 다음의 모드 해석 이론을 적용하여 다수의 노드에서의 가속도 스펙트럼을 별도로 유도하여야 한다. Fig. 11과 같이  $n$ 개의 자유도를 갖는 기초부분의 움직임이 있는 시스템에 대한 운동 방정식은 다음과 같다

$$[m]\{\ddot{w}\} + [c]\{\dot{w}\} + [k]\{w\} = \{0\} \quad (3)$$

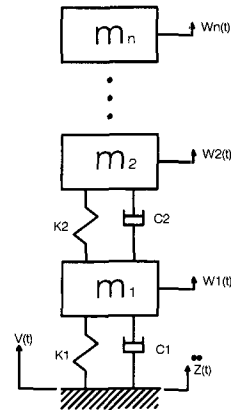


Fig. 11 Schematic diagram of  $n$ -DOF system subject to base excitation

여기서  $\{v\} = \{w\} + \{z\}$ 이다. 식 (3)에서  $[m]$ ,  $[c]$ ,  $[k]$ 는 각각  $n$ 개의 자유도를 갖는 질량, 감쇠, 강성행렬이며  $\{v\}$ ,  $\{w\}$ 는 각각 시스템의 절대변위와 상대변위를 의미하고  $\{z\}$ 는 기초변위를 의미한다. 식 (3)의 좌변항을 상대변위  $\{w\}$ 에 대해 다시 표현하면

$$[m]\{\ddot{w}\} + [c]\{\dot{w}\} + [k]\{w\} = -[m]\ddot{z} \quad (4)$$

이 된다. 식 (4)와 같이 연성된 상미분방정식을 풀기 위해서는 고유진동해석 결과로부터 얻어진 질량에 대해 정규화된 모드 형상의 직교성을 이용해야 한다. 이를 위해 상대변위  $w$ 를 식 (5)로 나타낸 후 식 (4)에 대입하면

$$w = \phi \eta = \sum_{n=1} \phi_n \eta_n(t) \quad (5)$$

식 (6)과 같이 모드좌표로 표현되는 비 연성된 미분방정식으로 바뀌게 된다.

$$\ddot{\eta}_r + 2\xi_r \omega_r \dot{\eta}_r + \omega_r^2 \eta_r = \phi_r^T [m] \ddot{z} = \mu_r \ddot{z} \quad (6)$$

여기서  $\mu_r$ 은 모드 기여도이다. 모드해 및 기초변위  $\eta_r$ ,  $z$ 를 각각  $\eta_r = H_r e^{i\omega t}$ ,  $z = Z e^{i\omega t}$ 와 같이 조화해로 가정하여 식 (6)에 대입하면 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$-\omega^2 H_r + i\omega 2\xi_r \omega_r H_r + \omega_r^2 H_r = -\omega^2 \phi_r^T [m] Z = \mu_r Z_A \quad (7)$$

식 (7)로부터 계산된 결과를 조화해 가정을 통해 식 (5)에 대입하면 질량에 대해 정규화 된 모드 형상과 더불어 상대변위 및 가속도를 구할 수 있으며 구하고자 하는 절대 가속도는 식 (8)로부터 얻을 수 있다.

$$\{\ddot{v}_n\} = \{\ddot{w}_n\} + \{\ddot{z}\} \quad (8)$$

상기의 모드해석 이론을 통해 유도된 주요 위치에서의 해석 응답 스펙트럼(ARS)의 생성 및 요구 응답 스펙트럼(RRS)과의 비교결과 스펙트럼 상에서의 최대 가속도 증폭률은 약 1.74배이며 이것으로 검증요건을 만족하였다.

Figs. 12, 13은 최대 가속도 증폭률을 나타낸 운전 기준 지진과 안전 정지 지진의 E-W 방향에서의 응답 스펙트럼 비교이다.

### 3. 가진실험

주 제어반 부품중 안전등급에 해당되는 전장품은 반

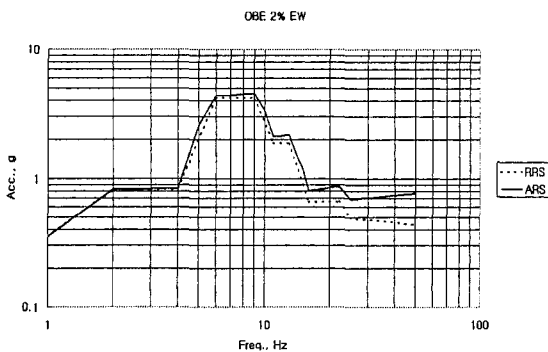


Fig. 12 OBE spectrum plot for E-W direction

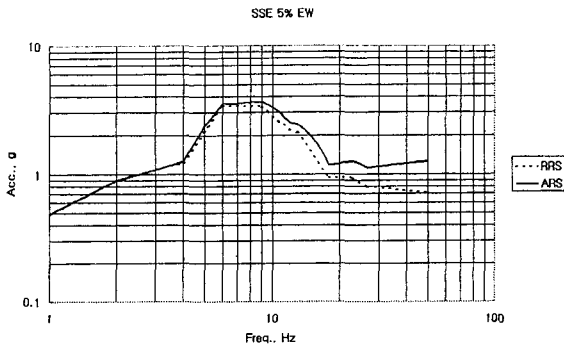


Fig. 13 SSE spectrum plot for E-W direction

드시 별도의 가진실험<sup>(9)</sup>을 통해서 각 부품의 내진 건전성을 입증해야 한다. 본 연구에서 가진실험을 수행한 주요 전장품으로는 리셉터클, 퓨즈와 퓨즈홀더 그리고 터미널 블록 등이 있는데 본 장에서는 리셉터클에 대해서만 언급하기로 한다. 주제어반의 검증요건에 의하면, 주제어반의 구조에 대해서 적용되는 감쇠(damping)는 OBE의 경우는 2%이며, SSE의 경우는 주제어반 구조에 대해서는 5%, 그 외 전장품류에 대해서는 3%를 적용하도록 요구하고 있다. 가진실험은 크게 3단계로 구분되는데 먼저 정현파 가진(sine sweep test)을 통해 구조물의 공진주파수를 확인하는 정현파 실험과 요구 응답 스펙트럼을 이용한 가진실험 그리고 마지막으로 정현파 실험을 한번 더 수행함으로써 구조물의 변형에 대한 공진주파수의 변화 양상을 조사하는 단계로 구분할 수 있다. 본 실험에 사용된 스펙트럼은 부품 검증에 대한 권장 증폭치인 2.5배를 적용한 요구 응답 스펙트럼의 세 직교좌표축 방향에 대한 포락 스펙트럼(enveloped spectrum)이다. Fig. 14는 리셉터클에 대한 가진실험 장치도이다. 가진실험은 3축을 동시에 가진할 수 있는 시험기를 사용하였으며 정현파 가진실험을 통해 공진주파수 파악 및 변화 여부를 관찰하였다. Fig. 15는 가진실험 전후에 대한 리셉터클의 주파수 응답함수를 보여준다. 실험 결과 리셉터클의 1차 고유진동수는 약 73 Hz임을 확인할 수 있었다. 그림에서 보는 것처럼 실험 전후에 고유진동수의 주목할 만한 변화가 없음을 확인되었으며 이를 통해 검증대상 기기인 리셉터클의 구조적 건전성을 입증할 수 있었다.

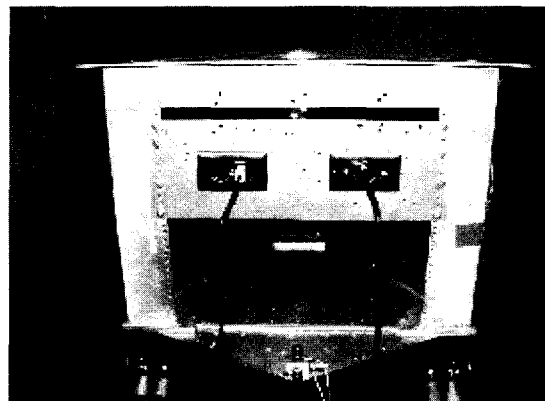
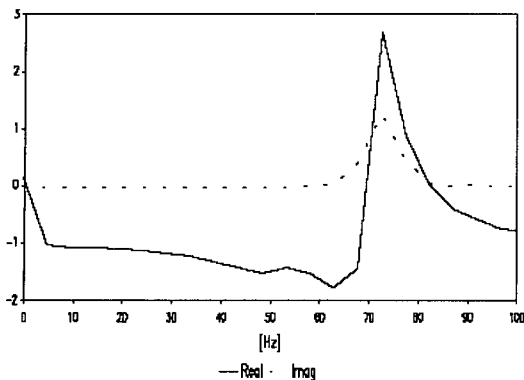
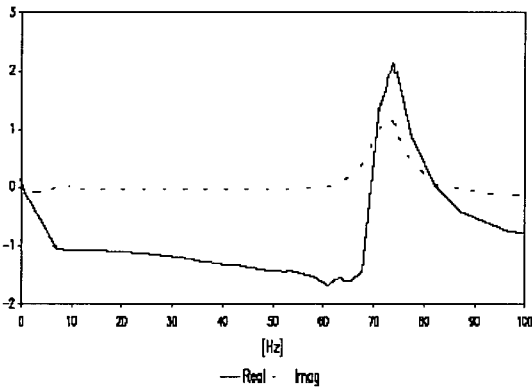


Fig. 14 Seismic test setup for the receptacle



(a) Before seismic test



(b) After seismic test

Fig. 15 Fast fourier transforms of the sine sweep test for the receptacle

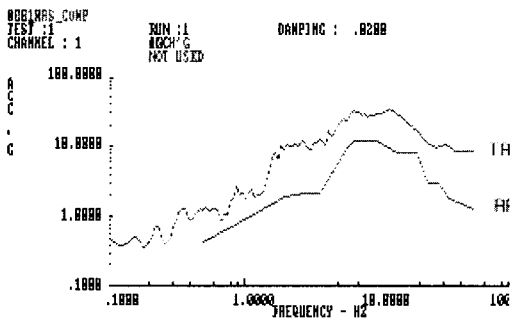


Fig. 16 Comparison of TRS and RRS for OBE N-S direction

다음으로 가진실험기 제어컴퓨터에서의 내부변환 과정을 통해 유도된 운전기준 지진 및 안전 정지 지진파에 대한 가속도 스펙트럼에 증가한 시간 이력 신호(time domain signal)를 이용한 가진실험을 각각 5회 및 1회 실시하였다.<sup>(9)</sup> 가진실험시 실험에 사용된

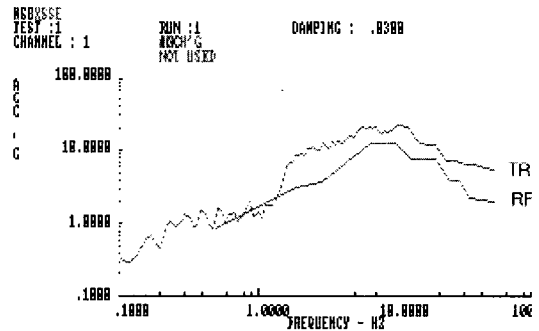


Fig. 17 Comparison of TRS and RRS for SSE N-S direction

입력 가속도 스펙트럼과 실험을 통해 모니터링한 실제 가진 스펙트럼(test response spectra : TRS)은 Figs. 16, 17과 같으며 이는 실제 가진에 사용된 스펙트럼이 입력 가진 신호보다 커야 하는 즉 가진실험의 타당성을 입증하기 위함이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 안전 등급 울진 5, 6호기용 주 제어반의 내진 검증을 수행하기 위해 유한요소해석 기법과 모드해석 이론 그리고 가진실험을 조합하는 효율적인 내진 검증기법을 제안하여 적용하였다. 즉 (1) 유한요소법을 이용한 내진해석을 수행하여 전체 구조물의 각 지진파 하중에 대한 구조적 건전성을 입증하였으며 (2) 주요 위치에서의 입력 가속도 값을 모드 해석이론을 이용하여 추출하였다. (3) 별도의 가진실험을 수행하여 전장품의 전기적/기계적 건전성을 조사하였다. 이상의 결과로서 내진 검증 대상체인 원전 울진 5, 6호기용 주 제어반은 주어진 지진파를 포함한 여러 입력조건에 대해 충분히 기계적/전기적인 건전성을 유지하며 작동할 수 있음을 확인할 수 있었다. 향후에도 이러한 새로운 내진 검증 기법을 이용하면 임의의 원전 관련 산업 기기들의 내진 검증도 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 논문의 작성에 많은 도움을 주신 효성중공업 방학수 과장님께 감사의 말씀을 드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) 원자력법, 1995, 제 42 조 2(성능검증업의 허가), 제 42 조의 3(허가기준), 제 42 조의 4(검사).
- (2) 한국전력주식회사, 1997, 원자력발전소 기자재 기기검증.
- (3) Ellis & Watts Company, 1994, Dynamic Qualification Reports for Younggwang 5 & 6 Air Handling Units.
- (4) ANSYS Element Reference 9th Edition, 1998, SAP INC, pp. 4-469~4-478.
- (5) ASME Section III Appendix N, 1992, Dynamic Analysis Method, ASME.
- (6) ASME Section III Appendix I, 1992, ASME
- (7) Korea Electric Power Corporation, 2000, Specification No. 9-751-J211, Purchase Specification for MCB & Associated Instruments for UCN 5 & 6.
- (8) Users Guide for Response Spectrum, 1998, ANSYS, pp. 7-1~7-68.
- (9) ANSI/IEEE 344-1987, 1987, Recommended Practice For Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Station.
- (10) 이준근, 김진영, 정필중, 정정훈, 1999, 원자력발전소(영광 5 & 6호기)용 공조기에 대한 내진 검증, 한국소음진동공학회지(현 논문집), 제 9 권, 제 3 호, pp. 535~543.
- (11) Roy, R., Craig, 1992, Structural Dynamics, Wiley Publication, pp. 497~512.
- (12) Lee, J., Kim, J. Y., Chung, P. J. and Heo, Y. S., 1999, "Seismic Qualification of the Air Handling Units for Nuclear Power Plant," Asia-pacific Vibration Conference '99, Singapore, Vol. 2, pp. 566~575.