

울진 원자력발전소 5,6 호기용 공기정화기에 대한 내진검증

이준근[†] · 김진영^{*} · 이희남^{**}

(2001년 11월 5일 접수, 2002년 4월 2일 심사완료)

Seismic Qualification of the Air Cleaning Units for Nuclear Power Plant Ulchin 5&6

Joonkeun Lee, Jin-Young Kim and Hui Nam Rhee

Key Words : Seismic Qualification(내진검증), Seismic Analysis(내진해석), Finite Element Method(유한요소법), Floor Response Spectrum(바닥응답스펙트럼), Required Response Spectrum(요구응답스펙트럼)

Abstract

Seismic qualification of the Air Cleaning Units for nuclear power plant Ulchin 5&6 has been performed with the guideline of ASME Section III and IEEE 344 code. By using the structural and geometrical similarity analysis, the three models to be analyzed are condensed into a single model and, at the same time, the excitation forces and other operating loads for each model are encompassed with respect to different loading conditions. As the fundamental frequencies of the structure are found to be less than 33Hz, which is the upper frequency limit of the seismic load, response spectrum analysis using ANSYS is performed in order to combine the modal stresses within the frequency limit. In order to confirm the structural and electric stability of the major components, modal analysis theory is adopted to derive the required response spectrum at the component locations. As the all combined stresses obtained from the above procedures are less than allowable stresses and no mechanical or electrical failures are found from the seismic testing, the authors confirm the safety of the nuclear equipments Air Cleaning Units studied in this paper.

기호설명

- v : 시스템의 절대변위
- w : 시스템의 상대변위
- \ddot{z} : 지진파 가속도
- σ : 모드 조합응력
- ϕ_r : 모드 벡터
- η_r : 모드 변위
- ξ_r : 모드 감쇠
- μ_r : 모드 기여도

1. 서론

원자력발전소에서 작동되는 기기 중 안전등급에 해당되는 기기는 정상, 비정상 환경과 지진발생과 같은 사고 조건하에서도 그 기능이 유지될 수 있도록 설계되어야 하며 이에 대한 일련의 과정을 기기검증(equipment qualification)⁽¹⁾이라고 한다. 기기검증은 Fig. 1과 같이 일반적으로 열노화(thermal aging)⁽²⁾와 방사선노화(radiation aging)⁽³⁾로 구성되는 내환경검증과 내진해석과 가진실험으로 구성되는 내진검증⁽⁴⁾으로 구분할 수 있다. 지금까지 안전등급에 해당되는 기기의 내진검증은 대상 구조물 전체를 지진력에 해당하는 힘으로 가진하여 수행하여 왔다. 그러나 이 경우 완제품을 미리 만들어야 한다는 점과 하자발생시 제품의 설계변경이 어렵고 특히 대형구조물의 경우 거대한 가진기를 필요로 한다는 점에서 국내에서는 Wyle와 같은 외국

[†] 책임저자, 회원, LG 전선(주) 생산기술센터
E-mail : ljk@lgmach.co.kr
TEL : (031)450-8358 FAX : (031)450-8331

^{*} LG 전선(주)

^{**} 순천대학교 기계자동차공학부

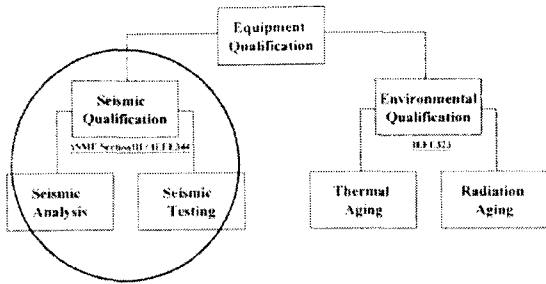


Fig. 1 Classification of equipment qualification

Table 1 Overall sizes and weights of air cleaning units

	Sizes(m ³)	Weight(N)
Model 1	11.94 x2.33x2.32	51384.8
Model 2	11.94x1.65x1.89	29694.9
Model 3	11.94x1.85x1.89	35002.1

기관의 설비를 이용하여 내진검증을 수행하여 왔다. 이러한 애로사항을 극복하기 위해 본 연구에서는 유한요소해석 기법과 모드해석 이론 그리고 가진실험을 조합하는 새로운 내진검증기법을 제안하여 이를 실제 기기에 적용하였다. 즉 유한요소해석을 통해 전체적인 구조물의 지진안전성을 평가하고 해석이 어려운 주요 전장품에 대해서는 그 장착 위치에서의 진동응답 가속도를 모드해석이론을 적용하여 추출하였으며 이들을 대상으로 별도의 가진실험을 함으로써 전기적, 구조적 안전성을 평가하였다. 이러한 과정을 거쳐 대상기기 전체의 가진실험을 수행하지 않고서도 효율적인 내진검증을 수행할 수 있었다.

2. 내진해석

2.1 동적유사성 해석

실제 내진검증이 필요한 장비는 총 3 가지 이나 이들 각각을 모델링하여 해석하기에는 많은 시간이 소요되므로 3 가지 모델 중 가장 구조적으로 취약한 모델을 선정하여 해석하고 이를 통해 나머지 장비의 구조적 안정성을 간접적으로 입증하도록 한다. Table 1 은 각 장비들의 제원이다.

각 장비들은 유사한 각 부품, 즉 기초프레임, 전동모터, 송풍기 카본흡착기(carbon adsorber) 등으로 구성되어 있고 각 장비의 하우징 두께는 일정하다. Table 1 에서 보듯이 Model 1 의 크기와 무게가 가

Table 2 Material properties of the shell

	Young's Modulus	Density	Poisson's Ratio
Shell 63	211x10 ⁹ Pa	7974 kg/m ³	0.29

장 크므로 Model 1 에 대한 내진검증결과가 요구조건을 만족하면 다른 모델에 대한 검증을 수행하지 않더라도 전체모델에 대한 내진안전성을 입증할 수 있으며 이와 같은 해석기법을 동적 유사성 해석법(dynamic similarity analysis) 이라고 한다.

2.2 유한요소해석

공기정화기(ACU : Air Cleaning Unit) Model 1 에 대한 내진해석을 수행하기 위해서는 장비 각 부위 및 주요부품에 대한 이론적 모델링을 수행하여 이를 유한요소모델로 변환하는 과정이 선행되어야 한다. 장비의 하우징이나 기초 프레임등은 ANSYS Version 5.5 의 Shell 63 번⁽⁴⁾ 요소를 주로 사용하였고 모터 및 송풍기, 제어판 등은 집중질량 21 번 및 강체요소를 조합하여 사용하였다. Shell 63 번의 물성치는 다음과 같다.

Fig. 2 는 해석대상인 공기정화기 유한요소모델이며 총 노드수는 1997 개이다. 대부분의 지진파는 33Hz 미만의 성분을 갖는데 만일 장비의 고유진동 해석결과 저주파모드의 주파수 값이 33Hz 이내에 존재한다면 공진에 의한 과대응력이 발생할 수 있다. 이 경우에는 ASME Section III, Appendix N⁽⁵⁾ 에서 규정하는 식 (1)과 같은 SRSS(Square Roots of Sums of Square)법에 따라 33Hz 미만에 해당되는 각 모드 *n* 에 해당되는 응력의 제곱의 합에 대한 제곱근의 값을 구하여 ASME Section III, Appendix I⁽⁶⁾ 에서 규정하는 허용응력값과 비교하여 구조물의 안정성을 파악해야 한다. 이때 하중조건으로는 장비의 무게, 운전하중,⁽⁷⁾ 노출하중, 운전 기준지진(Operating Basis Earthquake : OBE),⁽⁷⁾ 안전 정지지진(Safety Shutdown Earthquake : SSE)⁽⁷⁾ 등으로 구분할 수 있다. 운전 기준지진은 발전소 수명동안 약 5 회 정도 발생한다는 가정하에 발전소가 운전될 수 있을 정도의 지진을 의미하여 안전 정지지진은 발전소 수명동안 한번 발생할 가능성이 있는 상대적으로 강력한 지진을 의미한다. 이러한 지진력의 구분에 따라 내진해석에 사용되는 하중 조합조건은 Table 3 과 같이 A, B, D 의 3 종류로 구분되며 이중 D 조건을 가장 가혹한 조건으로 볼 수 있다. 이러한 각각의 하중조건에 대한 응력해석을 통해 전체 구조물의 안정성을 평가하게 된다.

ANSYS

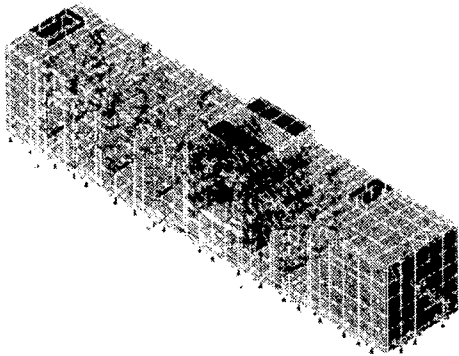


Fig. 2 Finite element model of air cleaning unit

Table 3 Classification of the Load Combinations

Level A	Dead Weight + Operating Load + Nozzle Load ^(K)
Level B	Dead Weight + Operating Load + Nozzle Load+OBE
Level D	Dead Weight + Operating Load + Nozzle Load + SSE

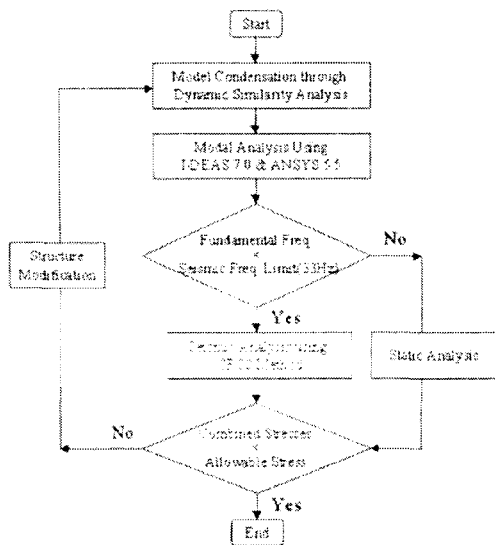


Fig. 3 Flow chart for the seismic analysis

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

2.2.1 고유진동해석

해석에 사용된 ACU의 경계조건은 44 군데에서 앵커볼트로 바닥과 연결되어 있으므로 이부위에서의 경계조건은 단순지지조건에 가깝다고 볼 수 있다. Table 4는 33Hz 이내의 고유진동 해석결과이며 Fig. 3은 전반적인 내진해석 절차도이다. Table 4의 비율(ratio)은 각 모드에 해당되는 기여도

Table 4 Modal properties of ACU with respect to 3-Axis

(a) (East-West : X direction)

Mode No.	Freq.	Period	Partici. Factor	Ratio	Mass Fraction
1	9.580	0.10438	-10.624	0.9819	0.4327
2	10.53	0.95E-1	10.819	1.0000	0.8814
3	12.38	0.81E-1	2.3397	0.2162	0.9191
4	13.16	0.76E-1	1.5506	0.1433	0.9284
5	27.57	0.36E-1	1.0779	0.0996	0.9455

(b) (Vertical -Slab : Y direction)

Mode No.	Freq.	Period	Partici. Factor	Ratio	Mass Fraction
1	9.580	0.10438	2.4429	0.1987	0.605E-2
2	10.53	0.95E-1	0.2872	0.0233	0.613E-2
3	12.38	0.81E-1	3.4189	0.2781	0.2685
4	13.16	0.76E-1	3.9222	0.3190	0.2841
5	27.57	0.36E-1	1.7940	0.1459	0.7552

(c) (North-South : Z direction)

Mode No.	Freq.	Period	Partici. Factor	Ratio	Mass Fraction
1	9.580	0.10438	0.69E-1	0.0052	0.51E-5
2	10.53	0.95E-1	0.16E-1	0.0012	0.53E-5
3	12.38	0.81E-1	7.4658	0.0563	0.1011
4	13.16	0.76E-1	-13.288	1.0000	0.2861
5	27.57	0.36E-1	-3.1282	0.2350	0.8120

(participation factor)중 가장 큰 값에 대한 비율이고 질량비율(mass fraction)은 각 방향 총 모드에 의한 질량의 합을 1로 보았을 때 각 모드까지의 질량의 합이다. 1차 고유진동수가 33Hz 미만이므로 내진해석이 필요함을 알 수 있으며 장비의 구조적 특성상 각 방향별로 기여도 차이가 나타남을 알 수 있다. Fig. 4는 1차 모드형상이며 모터 및 송풍기가 위치한 상대적으로 무게가 많이 나가는 곳에서 변형이 많이 발생하는 것을 볼 수 있다.

2.2.2 응답스펙트럼 해석

지진파는 랜덤형태의 시간영역 함수로 주어지는 것이 일반적이며, 시간영역에서 지진파에 대한 구조응답을 계산하기 위해서는 많은 시간과 노력이 필요로 한다. 이 경우 응답스펙트럼 해석법(response spectrum analysis)⁽⁹⁾을 이용하면 지진파의 주파수 스펙트럼상에서 값을 읽어 어떤 모드에 어떻게 응답을 조합하느냐만 결정하면 되므로 매우 편리하고 또한 많이 쓰이는 해석기법이다.

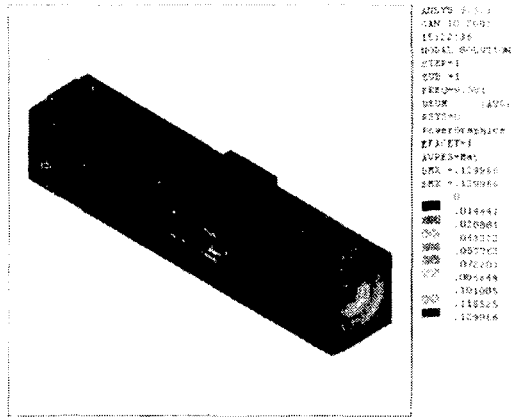


Fig. 4 Fundamental mode shape of ACU(Mode 1)

Table 5 Stress summary due to service level D condition

Locations	Combined Stress(Pa)	Allowable Stress(Pa)
Pressure differential transmitter	1.11×10^6	1.99×10^8
Electric Heater Control Panel	4.65×10^6	1.99×10^8
Fire Protection Control Panel	2.99×10^6	1.99×10^8
Motor Frame	4.03×10^6	1.99×10^8
Fan	3.75×10^6	1.99×10^8

*Maximum stress : 9.86×10^7 Pa at the drain pipe location

Fig. 5, 6 은 각각 해석에 사용된 운전 기준지진과 안전 정지지진의 스펙트럼 예이다. 구조물의 1차 고유진동수가 33Hz 이내에 존재하면 주어진 지진파에 의한 공진현상이 발생하게 되므로 고유진동해석을 통해서 구한 고유진동수에 해당 가속도 값을 응답스펙트럼에서 구한 다음 이 값을 입력값으로 하여 ANSYS 상의 응답스펙트럼 해석법에서 식(1)의 SRSS 기법을 이용하면 3방향 지진파에 의한 조합응력을 계산할 수 있다. 이때 각 모드에 대한 응력은 각 방향의 절대값의 합으로 구해진다. Fig. 7, 8 은 이러한 과정을 통해서 구한 운전 기준지진과 안전 정지지진에 의한 장비의 응력 분포도이다. Fig. 9 는 ACU 주요부품의 위치를 보여주는 그림이다. 이들 부품 중 특히 제어판 및 덕트히터, 모터, 송풍기 등은 전장품으로서 가진실험을 통하여 구조적 안정성뿐만 아니라 전기적 안정성도 함께 입증하여야 한다. 이와 관련된 내용은 다음 장에서 다루도록 한다. Table 3 에서처럼 지진파이외의 하중을 조합하여 A, B, D 의 3 개 하중조건에 대한 각 주요부위에서 총 응력을 계산하게 된다. Table 5 에서는 가장 가혹조건에 해당되는 조건인 D 하중조건에 대한 주요 부위에서의 응력값이다. 계산된 총 응력이 재료의 허용응력보다 적은 값을 가지므로 검증대상 장비의 구조적 안전성을 입증할 수 있다.

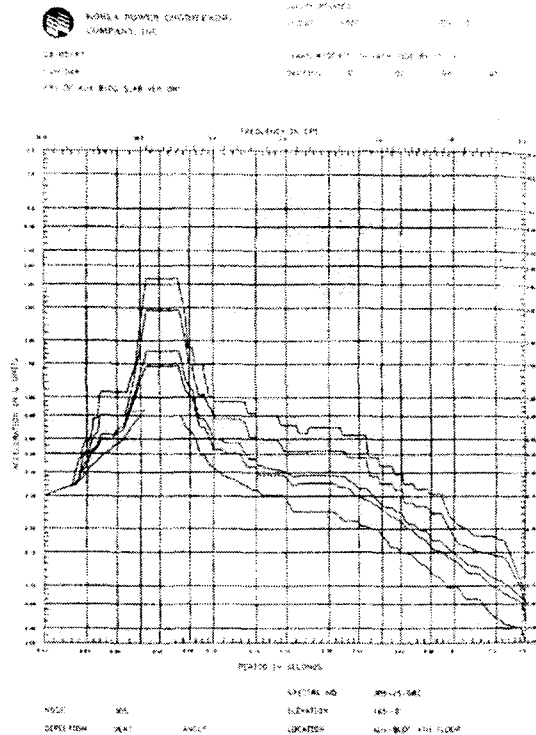


Fig. 5 OBE floor response spectrum at Y-direction

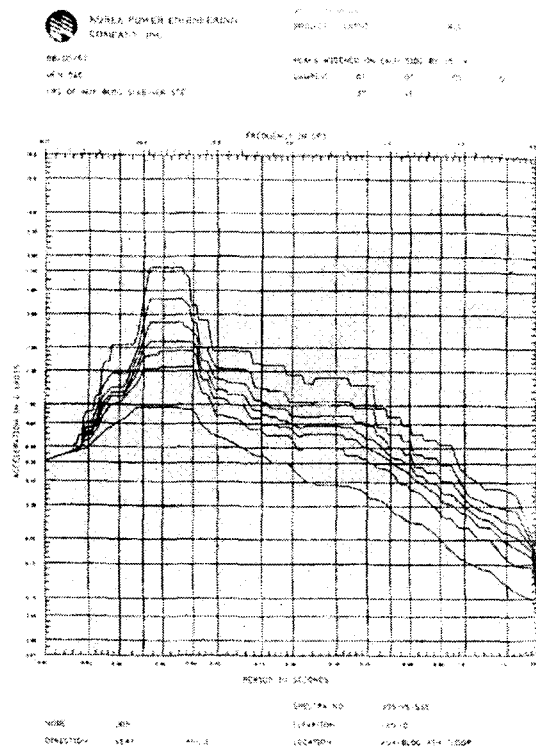


Fig. 6 SSE floor response spectrum at Y-direction

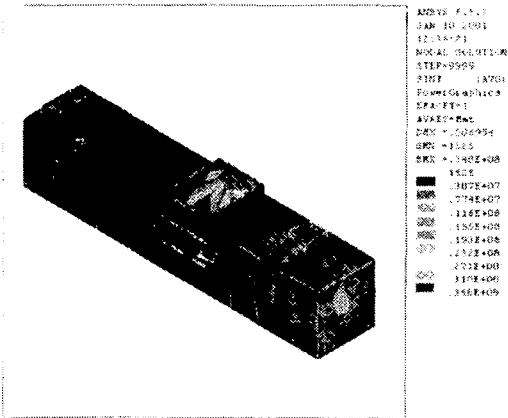


Fig. 7 Stress distribution of ACU subject to OBE load (Pa)

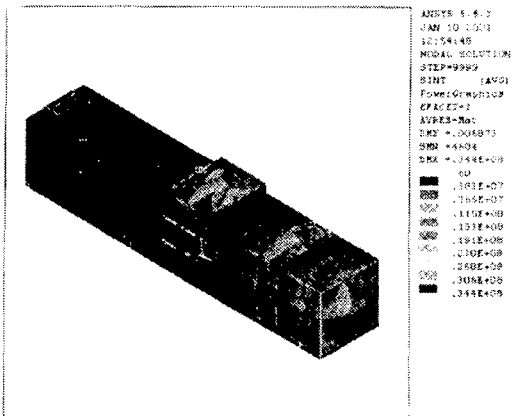


Fig. 8 Stress distribution of ACU subject to SSE load (Pa)

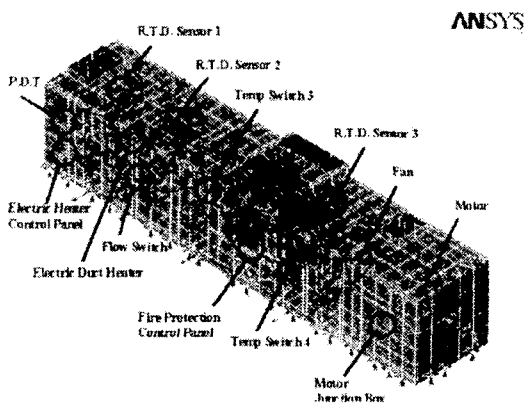


Fig. 9 Major components locations in ACU

3. 가진실험

3.1 가진신호 추출

제어판이나 모터, 송풍기등과 같은 전장품들은 내진해석만으로는 구조적, 전기적 안정성을

동시에 입증하기 어려움을 앞장에서 언급한 바 있다. 따라서 이러한 전장품은 별도의 가진실험⁽¹⁰⁾을 수행하여 주어진 지진파에 대한 안정성을 입증해야 한다. 그런데 이러한 전장품들은 Fig. 5, 6의 응답스펙트럼을 직접 적용할 수 있는 건물바닥에 위치한 것이 아니라 기기상에 위치하기 때문에 다음의 모드해석이론을 적용하여 그 위치에서의 응답신호를 추출해야 한다. Fig. 10과 같이 n 개의 자유도를 갖는 기초부분의 움직임이 있는 시스템에 대한 운동방정식은 다음과 같다

$$[m]\{\ddot{w}\} + [c]\{\dot{w}\} + [k]\{w\} = \{0\} \quad (2)$$

여기서 $\{v\} = \{w\} + \{z\}$ 이다. 식 (2)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 (2)의 좌변항을 상대변위 $\{w\}$ 에 대해 다시 표현하면

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

이 된다. 식 (3)과 같이 연성된 상미분방정식을 풀기 위해서는 고유진동해석 결과로부터 얻어진 질량에 대해 정규화된 모드형상(mass normalized mode shapes)의 직교성을 이용해야 한다. 이를 위해 상대변위 w 를 식 (4)로 나타낸 후 식 (3)에 대입하면

$$w = \phi \eta = \sum_{n=1} \phi_n \eta_n(t) \quad (4)$$

식 (5)와 같이 모드좌표로 표현되는 비 연성된 미분방정식으로 바뀌게 된다.

$$\ddot{\eta}_r + 2\xi_r \omega_r \dot{\eta}_r + \omega_r^2 \eta_r = \phi_r^T [m] \ddot{z} = \mu_r \ddot{z} \quad (5)$$

여기서 μ_r 은 모드 기여도이다. 모드해 및 기초변위 η_r, z 을 각각 $\eta_r = H_r e^{i\omega t}$, $z = Z e^{i\omega t}$ 와 같이 조화해로 가정하여 식 (5)에 대입하면 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$-\omega^2 H_r + i\omega 2\xi_r \omega_r H_r + \omega_r^2 H_r = -\omega^2 \phi_r^T [m] Z = \mu_r Z_A \quad (6)$$

식 (6)으로부터 계산된 결과를 조화해 가정을 통해 식 (4)에 대입하면 질량에 대해 정규화된 모드 형상과 더불어 상대변위 및 가속도를 구할 수 있으며 구하고자 하는 절대가속도는 식 (7)로부터 얻을 수 있다.

$$\{\ddot{v}_n\} = \{\ddot{w}_n\} + \{\ddot{z}\} \quad (7)$$

식 (7)에서 $\{r_n\}$ 은 FRS가 되며 $\{\ddot{z}_n\}$ 은 구하고자 하는 요구응답스펙트럼(RRS)⁽¹¹⁾이 된다. 그런데 실제의 가진력은 3방향 가진을 수반하므로 모드기여도도 Table 4와 같이 X, Y, Z의 3방향으로 구분되며 각 방향에 대해서 위의 과정을 반복적으로 수행해 3방향 스펙트럼을 구해야 한다. Fig. 11은 각각 제어판 위치에서의 안전 정지지진 조건에서의 각 방향별 스펙트럼이며 이러한 값들은 가진실험시 입력값으로 사용된다.

3.2 실험결과

가진실험은 크게 3단계로 구분되는데 먼저 정현파가진(sine sweep test)을 통해 구조물의 공진주파수를 확인하는 정현파 실험과 3.1장과 같은 과정을 통해서 구한 특정위치에서의 지진파를 입력파형으로 하는 가진실험 그리고 마지막으로 정현파실험을 한번 더 수행함으로써 구조물의 변형에 대한 공진주파수의 변화양상을 조사하는 단계로 구분할 수 있다.

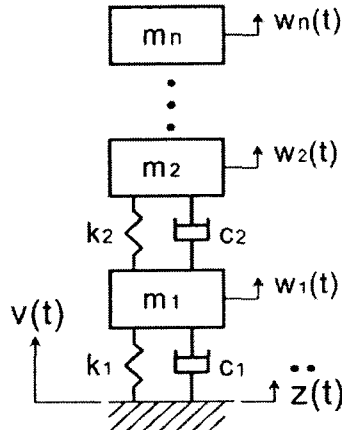


Fig. 10 Schematic of the n D.O.F. system

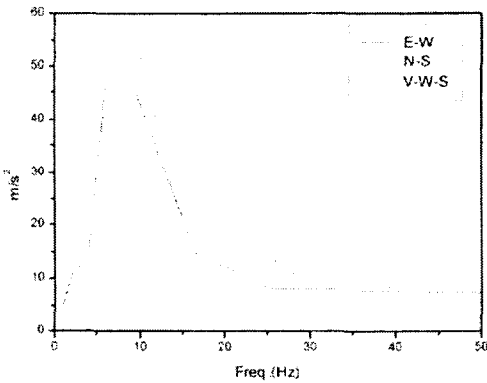


Fig. 11 Required response spectra at the control panel location

먼저 Fig. 12는 안전정지 지진에 대한 제어판의 수직방향 전달함수의 비교이다. 40Hz이내에서 특이한 주파수 응답함수의 차이가 없으므로 가진실험 전후에 대한 구조적 변형이 없음을 알 수 있다. 가진실험시 유의할 사항은 가진실험에 필요한 입력신호보다 실제 실험에 사용된 신호가 크다는 것을 입증해야 한다. Fig. 13, 14는 각각 3.1장에서 구한 운전 기준지진 조건과 안전 정지지진 조건하에서의 입력가진신호와 실제 가진실험시 입력에 사용된 스펙트럼의 비교이다. 그림에서 보는 것처럼 실제 실험에 사용된 가속도 레벨이 2Hz이상의 매우 저주파수에서부터 이론으로 추출한 입력가속도보다 크므로 가진실험의 신뢰성을 확인할 수 있다. 특히 변압기나 계전기와 같은 전장품의 경우 가진실험시 전압신호의 변화량이나 채터링 발생유무가 가진실험 성공의 중요한 판단기준이 된다. Fig. 15는 제어판에 사용되는 특정 계전기의 안전 정지지진 실험에 대한 전압의 변동양상을 보여준다. 약간의 전압변동이 발생하고 있지만

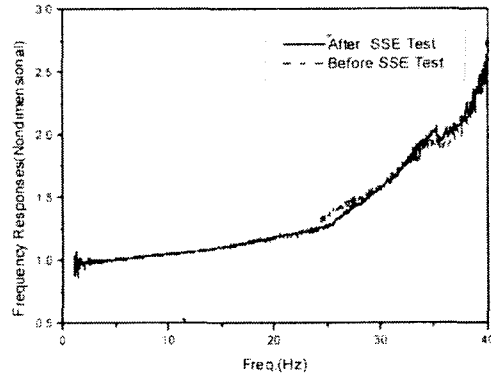


Fig. 12 Comparison of the frequency response of the control panel before and after sse test at Y-direction

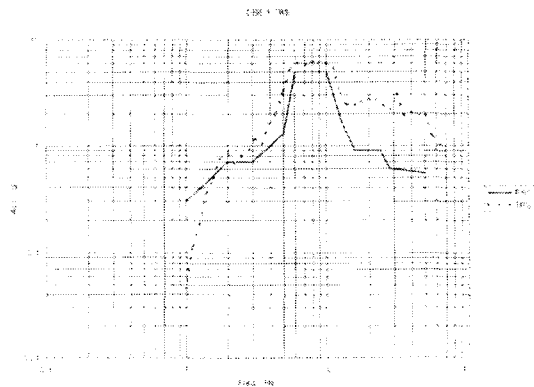


Fig. 13 Comparison of the RRS and TRS at the control panel location with OBE test at Y-direction

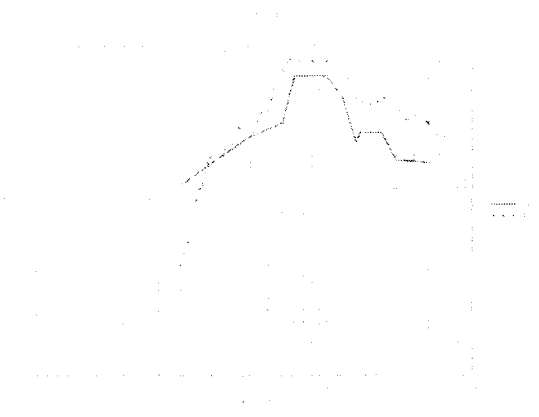
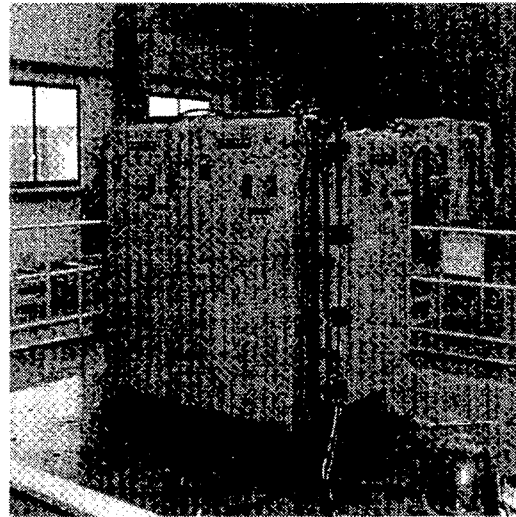


Fig. 14 Comparison of the RRS and TRS at the control panel location with SSE test at Y-direction



(a) Electric control panel

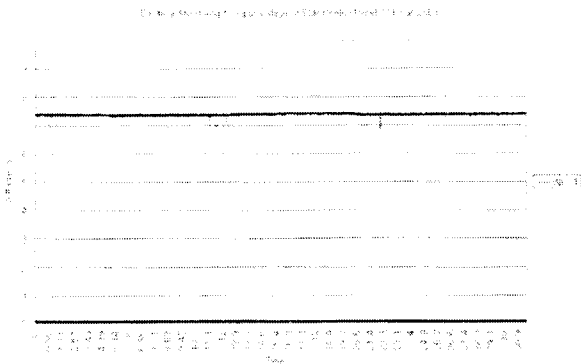
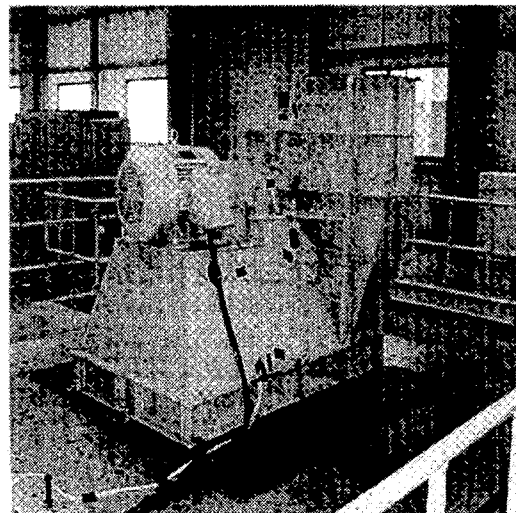


Fig. 15 Voltage variation of the relay at the control panel with SSE test



(b) Motor and fan

Fig. 16 Experimental set-up for the seismic test

그 폭이 10% 이내이고 스위치의 단락을 일으키는 채터링이 발생하지 않음을 알 수 있다. 이러한 가진실험을 거치는 동안 각 장비의 고유진동수 변화 및 구조적 결함이 발견되지 않았으므로 주어진 지진파에 대한 주요 전장품의 전기적/구조적 안정성을 입증할 수 있었다. Fig. 16은 제어판과 모터-팬의 가진 실험장치이다. 실험에 사용된 장비는 울산소재 현대중공업 2축 가진기(수평-수직 : X-Z 방향가진)를 사용하였으며 2축 가진실험 후 90도 만큼 돌려서 나머지 1축에 대한 가진실험을 병행하였다.

4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석 기법과 모드해석 이론 그리고 가진실험을 조합하는 새로운 내진검증기법을 제안하여 이를 안전등급 원전 울진 5, 6호기용 공기정화기에 적용하여 내진 검증을

수행하였다. 먼저 (1)유한요소법을 이용한 내진해석을 수행하여 전체 구조물의 지진파에 대한 구조적 안정성을 입증하였으며 (2) 주요전장품 위치에서의 입력가속도 값을 모드 해석이론을 이용하여 유도하였다. (3)이를 바탕으로 별도의 가진실험을 수행하여 전장품의 전기적/기계적 안정성을 조사하였다. 이상의 결과로서 내진검증 대상물인 원전 울진 5, 6호기용 공기정화기는 지진파를 포함한 여러 입력조건에 대해 충분히 기계적/전기적인 안정성을 유지할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 새로운 내진검증 기법을 이용하면 임의의 원전관련 산업기기들의 내진검증도 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

(1) Nuclear Regulation Laws, 1995, *Article 42(2) (Permission of the Equipment Qualification), Article 42(2) (Standards of the Permission), Article 42(4) (Inspection)*.

(2) Korea Electric Power Corporation, 1997, *Nuclear Equipment Qualification*.

(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, 1998, *Specification No. PUC-P-9M252, Safety-Related ACU's and Duct Heaters*, pp. 4-1~4-55.

(8) Suh, M. W., Jang, D. M., Kim Y. J., Jang, K. S., Choi, S. N., 2000, "Development of Mesh Generation Program for the Primary System of Nuclear Power Plant," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 24, No. 2, pp. 386~393.

(9) *Users Guide for Response Spectrum*, 1998, ANSYS, pp. 7-1~7-68.

(10) ANSI/IEEE 344-1987, 1987, *Recommended Practice For Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Station*.

(11) Lee, J. K., Kim J. Y., Chung, P. J., Chung, J. H., 1999, "Seismic Qualification of the Air Conditioning Equipment for Nuclear Power Plant," *Journal of the KSNVE*, Vol. 9, No. 3, pp. 535~543.

(12) Roy, R., Craig, 1992, *Structural Dynamics*, Wiley Publication, pp. 497~512.

(13) 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.