

〈논 문〉

## 원자력 발전소용 공조기에 대한 내진검증

### Seismic Qualification of the Air Conditioning Equipment for Nuclear Power Plant

이 준 근\* · 김 진 영\*\* · 정 필 중\*\* · 정 정 훈\*\*\*

Joonkeun Lee, Jin-Young Kim, Phil-Joong Chung and Jung-Hoon Chung

(1999년 1월 26일 접수 : 1999년 4월 9일 심사완료)

**Key Words** : Seismic Qualification(내진검증), Seismic Analysis(내진해석), Finite Element Method (유한요소법), AHU(공조기), FRS(지진력 스펙트럼), RRS(요구응답 스펙트럼)

#### ABSTRACT

The seismic qualification of the structures has been great concern in our engineering society with an effort to reduce the severe damages from an earthquake. However, on the contrary to the importance of the seismic qualification, the whole procedures are used to rely on the advanced countries who require various expenses for the qualification, which leads to the heavy loss of the foreign currency. In this study, the nuclear air conditioning system produced by LG Cable are adopted for the seismic qualification based on the guideline of NUREG, IEEE and ASME code. In order to confirm the validity of the present study, the results from the Ellis & Watts are compared with the present results and, also, the seismic qualification procedures and results mentioned herein are approved by KOPEC, which is a national surveillance institute for the construction of nuclear power plant. From these results, the author confirmed the validity of the present seismic qualification procedures and results, which might be usefully applied to the other kind of seismic qualification of equipments.

#### 1. 서 론

지진에 의한 피해는 말할 것도 없이 대단히 막대한 것이다. 특히 원자력발전소와 같이 중요한 산업 기반시설들은 지진에 의해 자칫 잘못하면 엄청난 인명피해를 유발할 수 있다는 점에서 정부에서는 따로 관계법령<sup>(1)</sup>을 제정하여 이를 준수하도록 규정하고

있다. 즉 원자력발전소의 시설과 기기는 지진과 같은 자연재해로부터 보호되고, 가상적 사고조건에서도 구조적 안전성을 유지하고 동시에 안전관련기능을 충분히 수행할 수 있도록 법률적으로 요구되며, 설계, 제작, 시공 및 운전의 전반에 대하여 엄격한 품질보증요건과 각종 기준을 적용하도록 요구하고 있다. 특히 원자력 발전소에서 작동되는 기기중 안전등급에 해당되는 기기는 정상, 비정상 환경과 지진발생과 같은 사고조건에서도 그 기능이 유지될 수 있도록 설계되어야 하며 이에 대한 일련의 입증과정을 기기검증(equipment qualification)<sup>(2)</sup>이라고 한다. 따라서 기기검증은 일반적으로 열노화(thermal

\* 정회원, LG전선(주) 기계부문 메카트로닉스 연구소

\*\* LG전선(주) 기계부문 메카트로닉스 연구소

\*\*\* 정회원, 한국기계연구원 구조시스템 연구부

aging) 및 방사능 노화(radiation aging)에 해당되는 내환경 검증(enviromental qualification)<sup>(2)</sup>과 지진력에 대한 안정성을 평가하는 내진검증(seismic qualification)<sup>(2)</sup> 및 이에 해당되는 일련의 과정을 모두 포함하나 본 논문에서는 지면상 내진검증에 국한해서 언급하도록 한다.

국내에서는 지금까지 대부분의 내진검증작업을 미국의 원전검증업 전문업체인 Wyle사 및 Ellis & Watts 사 등에 용역을 의뢰하였으며 여기에는 일부 국내에서 검증이 어려운 부품들의 선정도 함께 포함되어 있었다. 그러나 97년 말 도래한 IMF로의 환경변화로 환율이 급상승하고 이에 따라 원전사업의 수익성이 악화됨으로 인하여 내진검증 작업을 국내에서 수행하기로 결정하고 본 연구에 착수하게 되었다. 대상장비로는 원자력 발전소에 납품하기로 예정된 총 25개의 공조기가 있으나 본 연구에서는 그중 대표적인 공조기(Air Handling Unit, AHU)에 국한하여 내진검증을 언급하도록 하며 아울러 이 결과를 미국의 내진검증 전문업체인 Ellis & Watts사의 결과<sup>(3)</sup>와 비교검증하여 신뢰성을 확인하도록 한다.

## 2. 본 론

내진검증은 크게 내진해석(seismic analysis)과 내진실험(seismic testing)<sup>(4)</sup>으로 구분된다. 가장 바람직한 것으로는 대상 구조물 전체를 내진실험하는 것이 바람직하지만 이 경우 완제품을 미리 만들어야 한다는 점과 하자발생시 제품의 설계변경이 어렵다는 점 때문에 유한요소법과 같은 기법을 이용하여 근사적인 전체 구조물의 지진력에 대한 안정성을 파악하고 내진해석이 어려운 일부 부품 및 시스템을 내진실험을 통해 안정성을 파악하는 것이 일반적이다. 공조기를 구성하는 부품들중에는 전장품으로 구성된 제어판(control panel)과 히터 어셈블리(heater assembly)등이 있는데 이와같이 부품들은 내진해석만으로 그 성능을 입증하기 어렵게 된다. 이 경우에는 부품들이 위치한 곳에서의 가속도를 입력값으로 하여 가진테이블(shake table)을 기동하고 그에 따른 구조적, 전기적 내진 안정성을 파악해야 하는데 이와같은 일련의 과정을 내진실험이라고 한다.

### 2.1 원전공조기의 내진해석

내진해석을 위해서는 먼저 구조물의 유한요소모델을 필요로 한다. 해석방법에 있어서 효율적인 모델

Table 1 Material properties of the finite elements

	Shell 63	Solid 45	Mass 21
Young's modulus	$211 \times 10^9$ Pa	$211 \times 10^9$ Pa	-
Shear modulus	$81.7 \times 10^9$ Pa	$81.7 \times 10^9$ Pa	-
Density	7974 kg/m <sup>3</sup>	7974 kg/m <sup>3</sup>	45 kg
Poisson's ratio	0.29	0.29	-

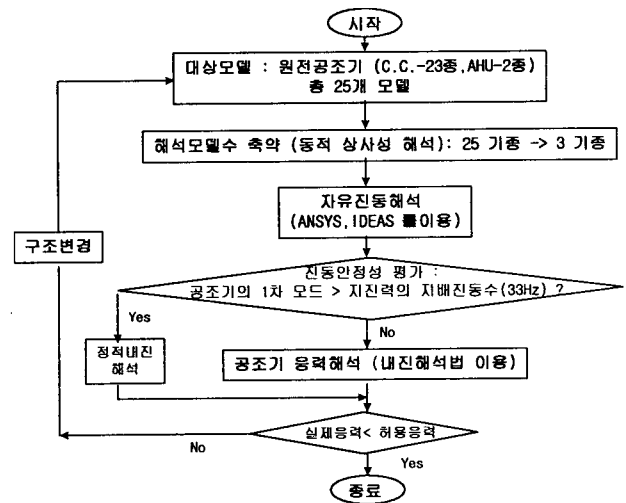


Fig. 1 Flow chart for the seismic analysis of the air handling unit

링과 해석을 위하여 I-DEAS 5.0 으로 3-D CAD 모델링과 유한요소분할을 행한 후 이를 다시 ANSYS 데이터 파일로 변환하여 ANSYS 5.4로 유한요소모델을 구성하였다. ANSYS 데이터베이스에서 Shell 63은 하우징과 프레임의 모델에 사용하고, Lumped Mass 21 및 Solid 45는 모터와 팬의 모델링에 사용하였으며 이들에 대한 물성치는 Table 1과 같다.

Fig. 1은 내진해석 흐름도이다. 지진력의 주파수 성분은 대부분 33 Hz 미만을 가지는데 대상 구조물의 진동해석 결과의 고유진동수가 33 Hz 보다 낮은 범위에 존재한다면 구조물의 공진현상이 발생한다고 볼 수 있다. 공진현상이 발생하는 경우에는 ASME Appendix N<sup>(5)</sup>에서 규정하는 식 (1)과 같은 SRSS (Square Roots of Sum of Square)법에 따라 33 Hz 미만에 해당되는 각 모드  $n$ 에 해당되는 응력의 제곱의 합에 대한 제곱근의 값을 구하여 ASME Appendix I<sup>(6)</sup>에서 규정하는 허용응력값과 비교하여 구조물의 안정성을 파악해야 한다.

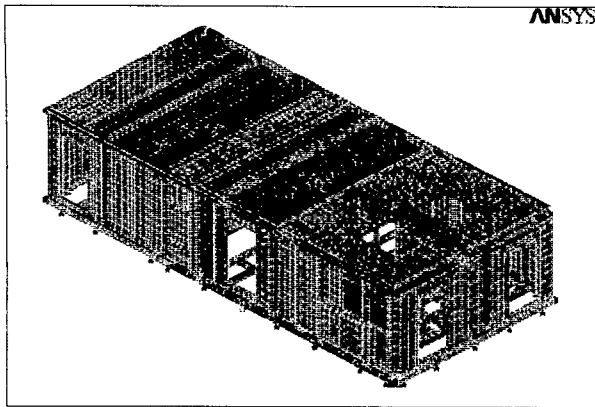


Fig. 2 Finite element model of the air handling unit

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

이때 하중조건으로는 단순한 장비의 무게 (dead weight), 운전하중 (operating load)과 운전정지 지진 (Operating Basis Earthquake : OBE)<sup>(4)</sup>, 안전정지 지진 (Safety Shutdown Earthquake : SSE)<sup>(4)</sup> 등으로 구분할 수 있다. 이중 내진해석에 있어서 가장 큰 하중의 조합은 장비의 무게와 운전하중 그리고 안전정지 지진을 동시에 고려한 경우이며 이를 위험조건 (faulted condition)<sup>(7)</sup>이라고 부른다. 진동해석결과에서 고유진동수가 33 Hz 보다 높다면 입력된 지진력에 의하여 구조물은 전달력의 감소

Table 2 Participation factor and effective mass with respect to the natural frequencies

X (E-W) Direction						
Mode	Frequency	Period	Partic factor	Ratio	Effective mass	Cumulative mass fraction
1	19.1165	.52311E-01	-.23787E-02	.004245	.565821E-05	.146335E-04
2	22.5559	.44334E-01	.12545E-03	.000224	.157379E-07	.146742E-04
3	24.3970	.40989E-01	-.79898E-01	.142599	.638362E-02	.165243E-01
4	24.7097	.40470E-01	-.61899E-03	.001105	.383146E-06	.165253E-01
5	27.8642	.35888E-01	.78423E-02	.013997	.615010E-04	.166844E-01
6	28.3974	.35215E-01	.43357E-02	.007738	.187982E-04	.167330E-01
7	32.6127	.30663E-01	-.56029	1.000000	.313929	.828632
8	33.5519	.29805E-01	-.76166E-02	.013594	.580131E-04	.828782
Y (N-S) Direction						
Mode	Frequency	Period	Partic factor	Ratio	Effective mass	Cumulative mass fraction
1	19.1165	.52311E-01	.17195	.304259	.295672E-01	.763627E-01
2	22.5559	.44334E-01	.14625	.258774	.213877E-01	.131600
3	24.3970	.40989E-01	-.56515	1.000000	.319391	.956488
4	24.7097	.40470E-01	.63287E-01	.111984	.400529E-02	.966832
5	27.8642	.35888E-01	-.61558E-02	.010892	.378936E-04	.966930
6	28.3974	.35215E-01	.53198E-01	.094131	.282999E-02	.974239
7	32.6127	.30663E-01	.33415E-01	.059127	.111658E-02	.977123
8	33.5519	.29805E-01	-.11221E-02	.001986	.125920E-05	.977126
Z (V-S) Direction						
Mode	Frequency	Period	Partic factor	Ratio	Effective mass	Cumulative mass fraction
1	19.1165	.52311E-01	-.17555E-03	.002081	.308176E-07	.418996E-05
2	22.5559	.44334E-01	.30595E-02	.036266	.936067E-05	.127686E-02
3	24.3970	.40989E-01	.69118E-02	.081929	.477727E-04	.777202E-02
4	24.7097	.40470E-01	.81016E-03	.009603	.656352E-06	.786126E-02
5	27.8642	.35888E-01	.84363E-01	1.000000	.711713E-02	.975503
6	28.3974	.35215E-01	-.57730E-02	.068431	.333280E-04	.980035
7	32.6127	.30663E-01	.82085E-03	.009730	.673790E-06	.980126
8	33.5519	.29805E-01	-.18524E-02	.021957	.343134E-05	.980593

시스템으로 거동하게 된다. 이 경우는 주어진 지진력 스펙트럼(FRS<sup>(7)</sup> : Floor Response Spectrum)에서 강체주파수에 해당되는 가속도 값(Zero Period Acceleration : ZPA)을 읽어 단순히 정적해석을 수행하여 구조안정성을 파악하면 된다. Fig. 2는 원

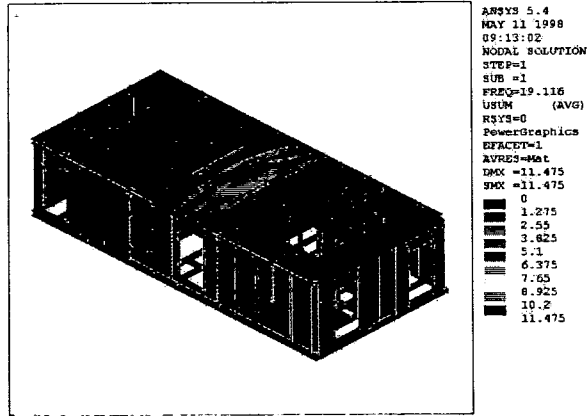


Fig. 3 1st vibration mode shape of the air handling unit

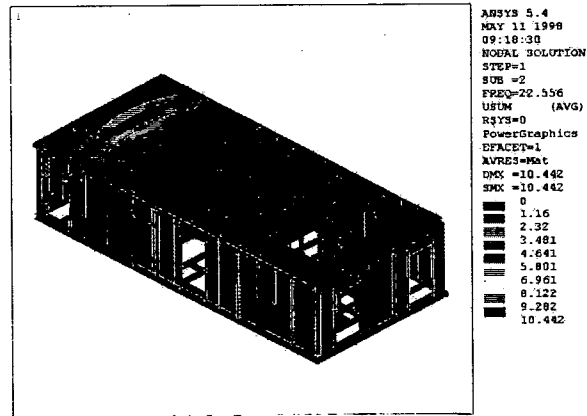


Fig. 4 2nd vibration mode shape of the air handling unit

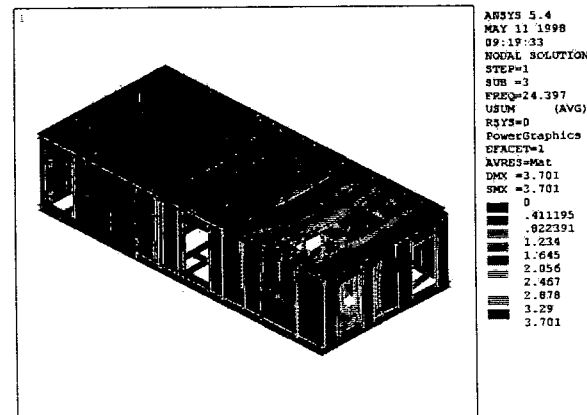


Fig. 5 3rd vibration mode shape of the air handling unit

전공조기의 유한요소 모델이다. 유한요소모델의 타당성을 입증하기 위해서는 유한요소의 수를 증가시키면서 결과의 수렴성을 확인하는 것이 원칙이나 본 연구에서는 대상장비의 복잡성으로 인하여 이와같은 반복적인 요소분할을 수행하는 것은 상당한 시간이 소요될 것으로 판단되었다. 따라서, 처음 유한요소 분할단계부터 몇몇 국부모드가 나올 것을 감수하고 상당히 자세하게 모델링을 수행함으로써 한번 해석으로 유한요소해석의 정확도와 시간절약이라는 효과를 얻고자 하였다. 실제 공조기는 총 32개점에서 앵커볼트로 고정되어 있으므로 경계조건은 이점에서 모두 단순지지조건으로 처리하였다.

Figs. 3, 4, 5는 공조기의 고유진동수와 이에 해당하는 모드형상들이다. Fig. 3과 같은 공조기의 1차 모드에서 가장 큰 변위가 발생하는 곳은 히터 어셈블리가 장착된 하우징의 중간부분인데 이것은 히터 어셈블리의 무게가 하우징에 부착됨으로 인하여 가장 먼저 나타나는 일종의 국부 모드로 볼 수 있다. Fig. 4와 같은 2차모드는 주로 공조기의 출구쪽에서 발생하며 Fig. 5의 3차 모드는 모터와 팬을 지지하는 프레임에 포함하는 운동이므로 전체 공조기 구조물에 끼치는 영향이 큰 모드로 볼 수 있다. Table 2는 각 모드에 대한 기여도(participation factor)<sup>(8)</sup> 및 효과질량(effective mass)을 보여준다. 1차 모드는 19.1 Hz 이나 모드의 기여도를 볼 때 전체 구조물의 거동에 비교적 큰 영향을 끼치는 모드는 3차 모드인 24.4 Hz 로 볼 수 있다. 본 연구에서는 33 Hz 내에 존재하는 8개의 모드에 대한 응력을 계산하여 SRSS법을 통해 주어진 지진력에 대한 응력을 구했으며 추가적으로 강체모드 즉 ZPA값을 이용하여 구한 정적응력을 합산하여 총응력을 계산하였다.

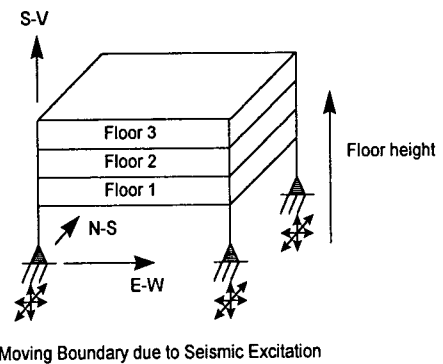


Fig. 6 Seismic excitation with respect to the floor height and directions

Table 3 Seismic SSE loads in ANSYS input data file

SED,1,0,0,
FREQ,0.5,2,0,3,5,6,8,15,19,26,33
FREQ,50,
SV,0.03,0.22,1,1,1,3,5,1,5,1,1,8,1,8,0,9,0,85,
SV,0.03,0,81,
SED,0,1,0,
FREQ,0,5,3,5,10,14,19,20,3,20,6
FREQ,33,50,
SV,0.03,0,17,0,9,0,9,1,5,3,4,3,4,1,8,1,8,0,85,
SV,0.03,.,65,
SED,0,0,1,
FREQ,0,5,2,5,3,5,5,5,6,9,15,19
FREQ,33,50,
SV,0.03,0,24,1,4,1,4,2,5,5,2,1,6,0,8,0,75,

2.2 응답 스펙트럼

Fig. 6과 같이 지진력은 3방향(E-W(X), N-S(Y), V-S(Z))으로 구분되며 특히 건물내에서의 지진력은 층 높이에 따라 증폭된다. 따라서 공조기가 받는 지진력은 Fig. 6과 같이 공조기가 위치한 층높이와 방향에 따라 구분되어 진다. 해석대상 장비인 공조기의 높이는 지면에서 165 ft(50.3 m) 만큼 떨어져 있으므로 이 높이에서의 각 3방향에 대한 지진응답 스펙트럼을 FRS를 읽어 가진조건으로 사용해야 한다. Fig. 7은 높이 165 ft(50.3 m), E-W 방향에 대한 FRS(SSE)의 한 예이며 Table 3은 ANSYS 상에 입력값으로 사용된 3방향 FRS에 대한 입력 데이터이다. Fig. 7에서 SSE 스펙트럼은 감쇠량에 따라 그 값이 변하는데 일반적으로 SSE 가진에 의



KOREA POWER ENGINEERING COMPANY, INC.

11 OCT 94  
SC1E01

CALC NO. 9-310-C305-001  
PROJECT YON 5 & 6 REV 0  
PROJECT NO. 1M336  
PEAKS WIDENED BY 15% ON EACH SIDE  
DAMPING 0.010 0.020 0.040 0.050 0.100  
PAGE

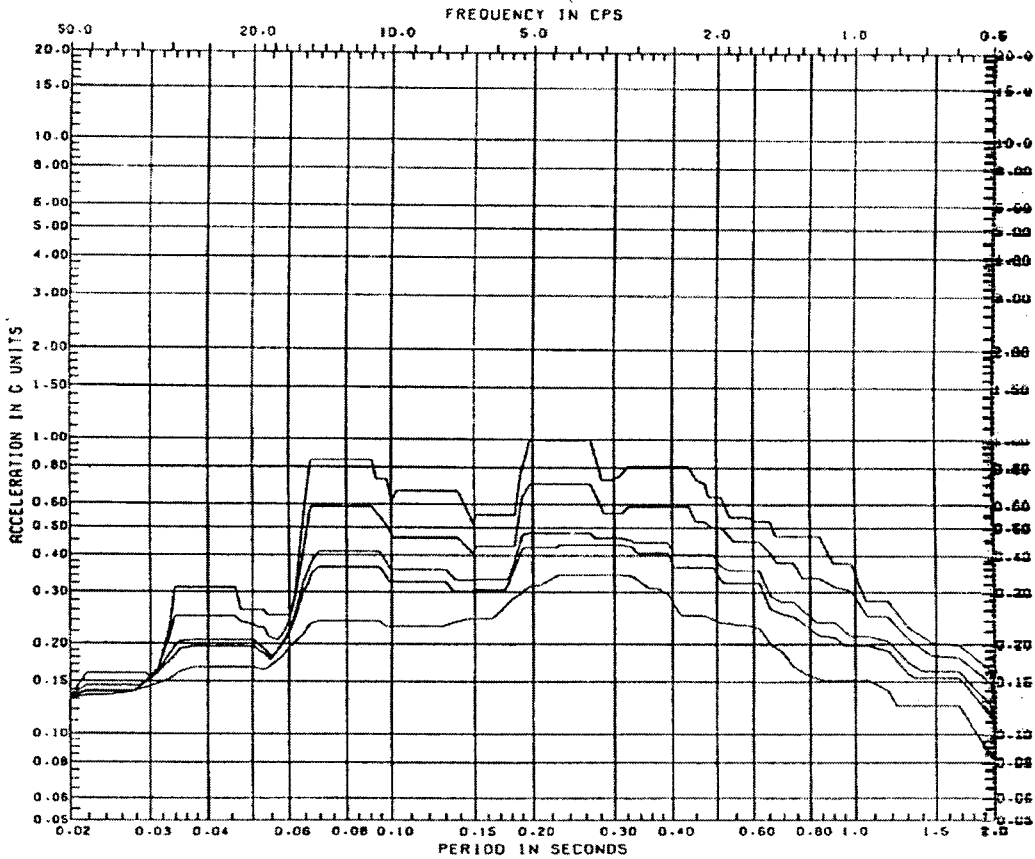


Fig. 7 SSE floor response with respect to east-west direction at the 165 ft (50.3 m)

한 해석에서는 3% 감쇠를 OBE 가진에 의한 해석에는 2% 감쇠에 해당되는 값을 사용한다.

### 2.3 내진해석 결과

ANSYS 5.4에 있는 응답스펙트럼해석(response spectrum analysis module)<sup>(9)</sup>을 이용하여 내진해석

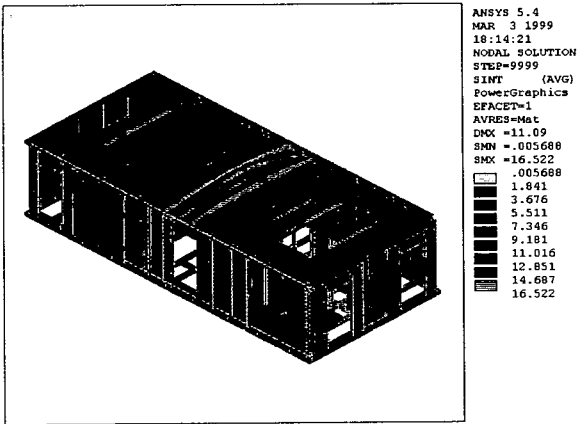


Fig. 8 Stress distribution of AHU subject to upset condition (kgf/mm<sup>2</sup>)

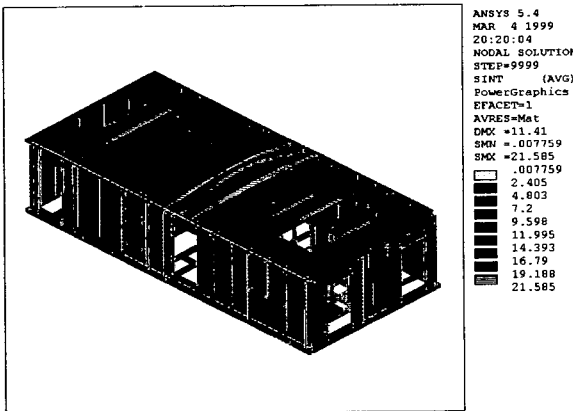


Fig. 9 Stress distribution of AHU subject to faulted condition (kgf/mm<sup>2</sup>)

을 수행하였다. 내진해석에 사용되는 입력조건은 일반적으로 일반조건(normal condition), 주의조건(upset condition), 위험조건(faulted condition)으로 구분된다. 일반조건은 장비의 무게만 고려한 응력해석이고, 주의조건은 OBE 지진력을 바탕으로, 위험조건은 SSE 지진력을 바탕으로 한 가진력의 조합이다. Figs. 8, 9는 각각 주의조건과, 위험조건하에서의 응력분포를 보여주며 Table 4는 위험조건하에서 수행한 특정노드점에서의 E&W 결과와의 응력비교이다. 위험조건하에서의 최대응력은 공조기 위쪽중간 하우징에서 발생하며 값은 23336 psi(16.52 kgf/mm<sup>2</sup>)로서 허용응력 34000 psi(24.06 kgf/mm<sup>2</sup>)보다 적음을 알 수 있었다. 아울러 계산된 각 노드점에서의 총 응력이 모두 허용응력보다 적으므로 공조기의 지진력에 대한 구조적 안정성이 입증되었다고 할 수 있다.

### 2.4 내진실험

내진해석으로 검증이 어려운 제어판과 히터 어셈블리 등과 같은 전장품은 실험으로 그 성능을 입증해야 함을 앞서 언급한 바 있다. 그런데 이러한 전장품이 위치한 곳은 FRS를 적용할 수 있는 각 층의 바닥부분이 아니라 공조기 내부에 장착되어 있기 때문에 내진실험시 이러한 장치가 위치한 곳에서의 응답 스펙트럼을 구해야 한다. 이를 요구응답 스펙트럼(Required Response Spectrum : RRS)라고 한다. 이러한 요구응답 스펙트럼은 FRS와 공조기의 모드형상을 이용하여 다음의 과정으로부터 얻어질 수 있다.

Fig. 10과 같이  $n$  개의 자유도로 구성된 기초부분의 움직임이 있는 시스템을 가정하자. 이에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

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

Table 4 Comparison of stresses from LGM, E&W with respect to allowable stress, psi(kgf/mm<sup>2</sup>)

Nodal point No.	Location	LGM	E&W	Allowable stress
3684	Base frame	15166(10.73)	10202(7.22)	34000(24.06)
12232	Housing	11912(8.43)	13672(9.68)	34000(24.06)
17700	Heater section	8760(6.20)	10256(7.26)	34000(24.06)
5543	Fan/motor frame	1101(0.78)	960(0.68)	34000(24.06)
5662	Control panel	187(0.13)	120(0.08)	34000(24.06)

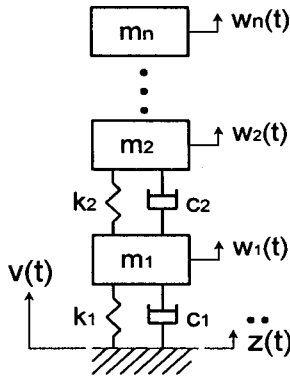


Fig. 10 Schematic of nth degree of freedom system subject to base excitation

여기서  $\{v\} = \{w\} + \{z\}$  이다. 식(2)에서  $[m], [c], [k]$  는 각각  $n$  개의 자유도를 구성하는 질량, 감쇠, 강성 항이며  $\{v\}, \{w\}$  는 각각 시스템의 절대변위와 상대 변위를 의미한다. 또한  $z$  는 기초변위를 의미하며  $\ddot{z}$  는 기초변위  $z$  의 가속도를 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 연계된 상미분방정식을 풀기 위해서는 고유진동해석 결과로부터 얻어진 질량에 대해 정규화된 모드형상(mass normalized mode shape)의 직교성을 이용해야 한다. 정규화된 모드형상의 직교성을 이용하기 위하여 식 (4)를 식 (3)에 대입하면

$$w = \phi \eta = \sum_{r=1}^n \phi_r \eta_r(t) \quad (4)$$

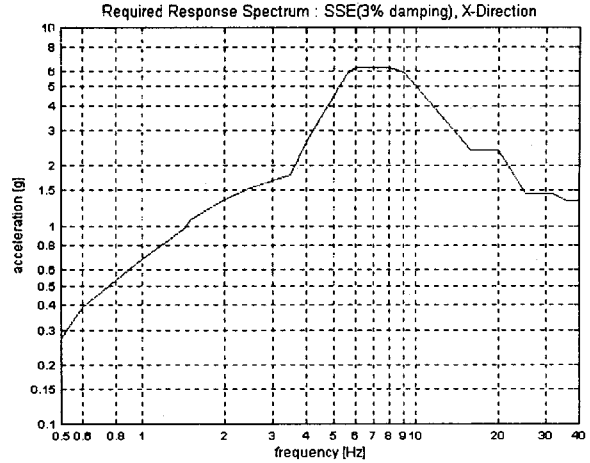
식 (5)와 같이 모달좌표로 표현되는 비연계된 미분 방정식으로 바뀌게 된다.

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

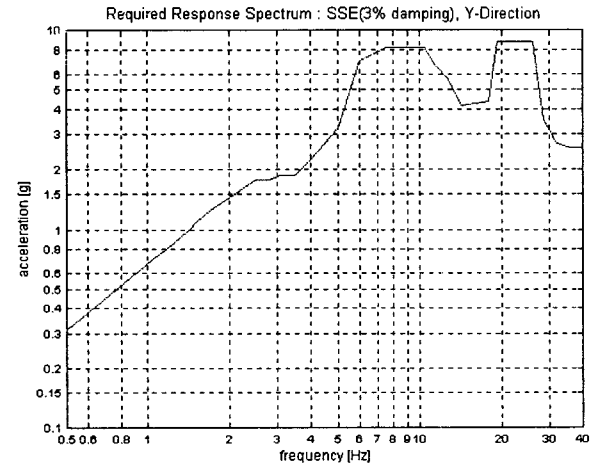
이때 모달변위  $\eta_r, z$  를 각각  $\eta_r = H_r e^{i\omega t}$ ,  $z = Z e^{i\omega t}$  와 같이 각주파수  $\omega$ 의 조화함수로 가정하여 식 (5)에 대입하면 다음과 같이 표현된다.

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

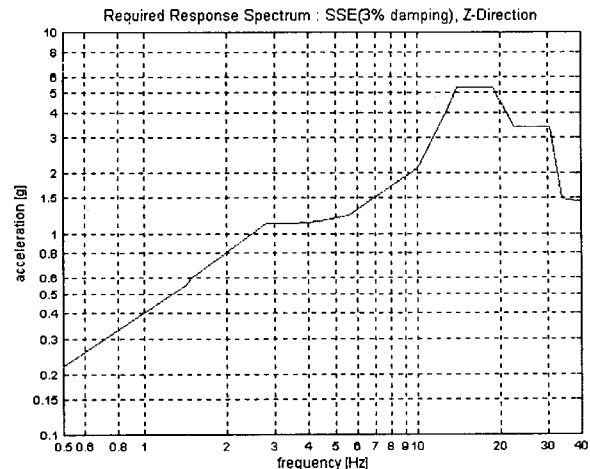
여기서  $\mu_r$  은 모달기여도이고 식 (4)의 질량에 대해 정규화된 모드형상과 더불어 ANSYS의 모달해



(a) E-W: X-direction

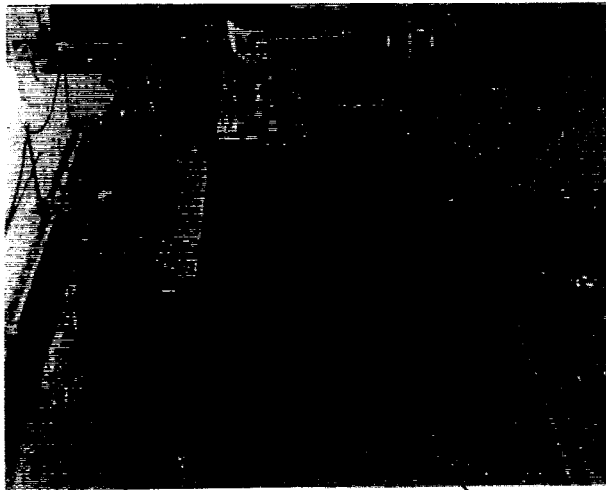


(b) N-S: Y-direction



(c) V-S: Z-direction

Fig. 11 Required response spectrum(RRS) at the heater location



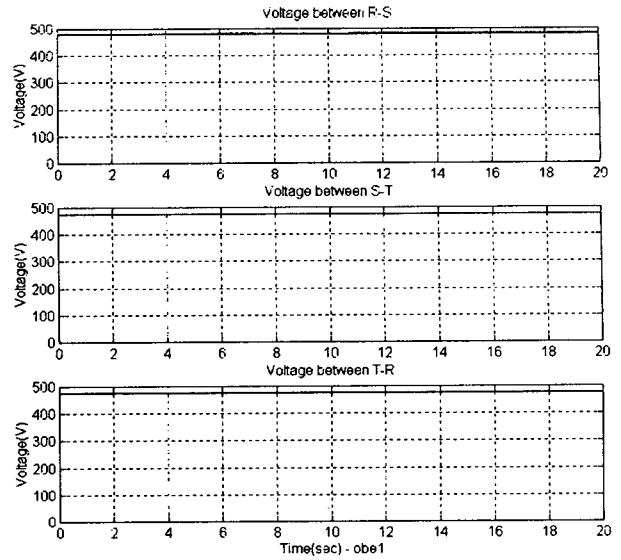
Heater ass'y Control panel

Fig. 12 Experimental set-up for seismic testing

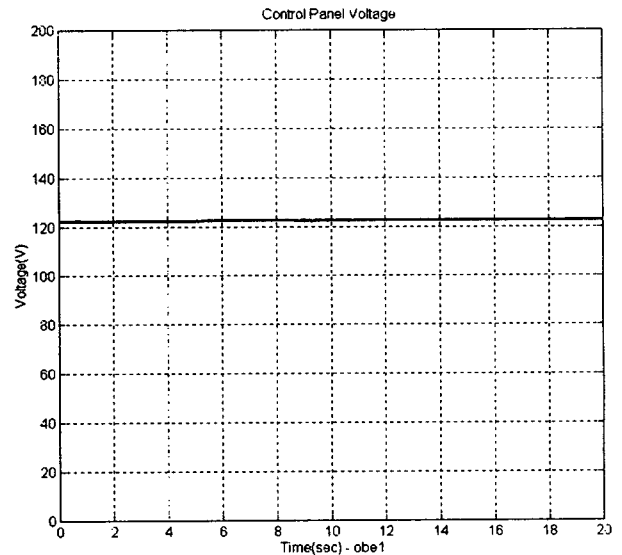
석 결과로부터 얻을 수 있다. 또한  $Z_A$ 는 주파수영역에서의 기초부분 가속도, 즉 FRS를 의미한다. 식 (6)으로부터 주파수영역의 모달변위  $H_r$ 을 구하고 이를 식 (4)의  $\eta_r$  대신 대입하면  $w = We^{i\omega t}$ 로 가정했을때의 주파수 영역에서의 변위  $W$ 를 구할 수 있으므로 결과적으로 식 (3)에서 구하고자 하는 각 자유도에서의 가속도  $\{\ddot{w}\}$ 는  $\ddot{w} = -\omega^2 We^{i\omega t}$ 의 관계로부터 얻을 수 있다. 따라서 임의의 자유도에 대한 절대가속도  $\{\ddot{v}_n\}$ 은 식 (7)의 관계, 즉 각 자유도의 상대가속도  $\{\ddot{w}\}$ 과 기초가진 가속도  $\{\ddot{z}\}$ 의 합으로부터 얻어지게 된다. 그런데 실제의 지진력은 3방향 가진을 수반하므로 모달기여도도 Table 2와 같이  $x, y, z$ 의 3방향으로 구분되며 따라서 식 (5)와 같은 비연계된 식을 각 방향에 따라 독립적으로 풀어야 한다.

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

식 (7)에서  $\ddot{z}$ 은 FRS가 되며  $\ddot{v}_n$ 은 구하고자 하는 요구응답스펙트럼 RRS가 된다. Fig. 11(a), (b), (c)는 이러한 과정을 통해서 구한 SSE(FRS)스펙트럼에 대한 제어판과 히터 어셈블리가 위치한 곳에서의 각 방향별 RRS의 예이며 가진실험은 적어도 Fig. 11과 같이 최대 9 g이상의 RRS보다 큰 값으로 가진하여 장비의 안정성을 파악해야 한다. 이러한 일련의 내진실험과정은 6자유도계 가진 테이블을 보유하고 있는 한국기계연구원에서 수행되었으며,



(a)



(b)

Fig. 13 (a) External input power voltages in OBE test and (b) Voltage variation of the control panel transformer in OBE test

Fig. 12는 이에 대한 내진실험 장치도이다. 제어판과 히터 어셈블리의 가진실험은 Fig. 11과 같은 요구응답스펙트럼으로 가진하였을 경우 구조적인 결함 혹은 파손이 발생하지 않고 이러한 부품들이 전장품이므로 전압변화 폭이 10% 내외이면 안정성이 입증된 것으로 보았다. Fig. 13은 이러한 RRS로 가진했을때의 제어판의 변환기(Transformer)에서의 전



압변동폭을 보여준다. 그림에서처럼 전압변동폭은 5% 범위를 벗어나지 않았으며 가진실험 후에도 제어판과 히터 어셈블리 모두 구조적인 결함이 발견되지 않았다. 이러한 과정을 통해 내진검증 대상 장비인 원전공조기는 주어진 내진조건하에서도 정상적으로 작동함이 입증되어 원자력발전소에 설치될 수 있었다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 지금까지 선진국에만 의존해오던 장비의 내진검증을 국내 자체기술로 수행하여 내진검증 대상장비인 원전공조기의 내진안정성을 파악하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) ANSYS를 활용한 내진해석기법을 정립하고 그에 따른 결과를 선진업체의 해석결과와 비교 검토함으로써 본 연구에서 수행한 내진해석결과의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

(2) 내진실험에 필요한 요구응답스펙트럼을 진동이론에 의거 추출하는 방법을 제안하고 이를 바탕으로 가진실험을 수행하여 장비의 구조적, 전기적 안정성을 파악하였다.

이러한 내진검증결과를 바탕으로 무난히 원자력발전소에 해당공조기를 설치할 수 있었으며 아울러 상당한 경비절감효과를 얻음으로서 원전사업에 대한 수익성을 확보할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- (1) 원자력법, 1995년, 제42조의 2(성능검증업의 허가), 제42조의 3(허가기준), 제42조의 4(검사).
- (2) 한국전력주식회사, 1997년, 원자력발전소 기자재 기기검증.
- (3) Ellis & Watts Company, 1994, Dynamic Qualification Reports for Korea Electric Power Corporation UCN 3&4.
- (4) ANSI/IEEE STD 344-1987, 1987, IEEE Recommended Practice For Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, IEEE, New York, NY 10017.
- (5) U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1992., ASME Appendix N, Dynamic Analysis Method N-1200.
- (6) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 1992, Section III, Appendices I.
- (7) Korea Electric Power Corporation, 1996, Specification No. 9-152-M251, Rev. 1, Safety-Related AHU's Cubicle Coolers and Non-Safety Related RCFC, Samsong-Dong, Kangnam-Gu, Seoul, Korea.
- (8) Roy R. Craig, 1992, Structural Dynamics, Wiley Publication, pp. 497~512.
- (9) ANSYS, 1998, Users Guide for Revision 5.1, Dynamics, pp. 7-1~7-68.