

울진 원자력발전소 5,6 호기용 공기정화기에 대한 내진검증

이준근* · 김진영** · 정필중**

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

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

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 is 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 : absolute structural displacement
 w : relative structural displacement
 \ddot{z} : seismic acceleration
 σ : combined stress
 ϕ_r : modal vector
 η_r : modal displacement
 ξ_r : modal damping
 μ_r : modal participation factor

1. 서론

원자력발전소에서 작동되는 기기중 안전등급에 해당되는 기기는 정상, 비정상 환경과 지진발생과 같은 사고조건하에서도 그 기능이 유지될 수 있도록 설계되어야 하며 이에 대한 일련의 과정을 기기검증(Equipment Qualification)⁽¹⁾ 이라고 한다. 기기검증은 일반적으로 열노화(Thermal Aging)⁽²⁾와 방사선노화(Radiation Aging)⁽³⁾로 구성되는 내환경검증과 내진해석과 가진실험으로 구성되는 내진검증으로 구분할 수 있다. 내진검증의 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 점 때문에 유한요소법과 같은 기법을 이용하여 전체적인 구조물의 안전성을 평가하고 해석이 어려운 일부 전

* 정회원, LG 전선(주) 기계연구소, ljk@lgmach.co.kr

** LG 전선(주) 기계연구소

장비에 대해서는 그 장착위치에서의 진동응답가속도를 모드해석법을 이용하여 추출하여 별도의 가진실험을 함으로써 전기적, 구조적 안전성을 평가하게 된다. Fig. 1은 원전기기검증의 일반적인 분류이다.

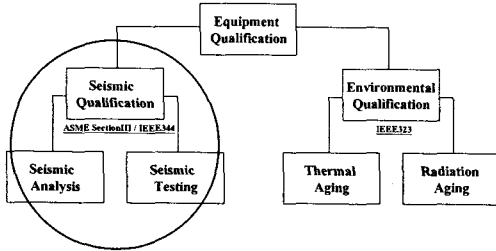


Fig. 1 Classification of equipment qualification

2. 내진해석

2.1 동적유사성 해석

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

Table 1. Overall sizes and Weights of Air Cleaning Units

	Sizes(m ³)	Weight(kg)
Model 1	11.94 x2.33x2.32	5238
Model 2	11.94x1.65x1.89	3027
Model 3	11.94x1.85x1.89	3568

각 장비들은 유사한 각 부품, 즉 Base Frame, 진동모터, 송풍기 카본흡착기(Carbon Adsorber) 등으로 구성되어 있고 각 장비의 하우징 두께는 일정하다. Table 1에서 보듯이 Model 1의 크기와 무게가 가장 크므로 Model 1에 대한 내진검증결과가 요구조건을 만족하면 다른 2 모델에 대한 검증을 수행하지 않더라도 전체모델에 대한 내진안전성을 입증할 수 있으며 이와 같은 해석기법을 동적유사성 해석법(Dynamic Similarity Analysis)이라고 한다.

2.2 유한요소해석

ACU Model 1에 대한 내진해석을 수행하기 위해서

는 장비 각 부위 및 주요부품에 대한 이론적 모델링을 수행하여 이를 유한요소모델로 변환하는 과정이 선행되어야 한다. 장비의 하우징이나 기초 프레임등은 ANSYS Version 5.5의 Shell 63번⁽⁴⁾ 요소를 주로 사용하였고 모터 및 Fan, 제어판등은 Lumped Mass 21번 및 Rigid Body 요소를 조합하여 사용하였다. Shell 63 번의 물성치는 다음과 같다.

Table 2. Material Properties of the Finite Elements

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

Fig. 1은 해석대상인 ACU 유한요소모델이며 총 노드수는 1997 개이다. 대부분의 지진파는 33Hz 미만의 성분을 갖는데 만일 장비의 고유진동해석결과 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 n에 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(Dead weight), 운전하중(Operating load)⁽⁷⁾, 노즐하중(Nozzle Load), 운전 정지지진(Operating Basis

$$\sigma = \sqrt{\sum_{n=1}^N \sigma^2_n} = \sqrt{\sigma^2_1 + \sigma^2_2 + \dots + \sigma^2_n} \quad (1)$$

ANSYS

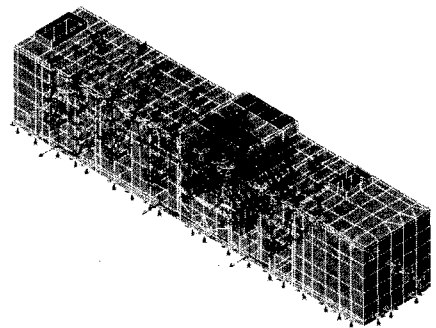


Fig. 1 Finite Element Model of Air Cleaning Unit

Earthquake : OBE)⁽⁷⁾, 안전정지지진(Safety Shutdown Earthquake : SSE)⁽⁷⁾ 등으로 구분할 수 있다. 이러한 지진력의 구분에 따라 내진해석에 사용되는 하중 조합조건은 Table 3 와 같이 A, B, D 의 3 종류로 구분되며 이중 D 조건을 가장 가혹한 조건으로 볼 수 있다.

Table 3. Classification of Load Combinations

Level A	Dead Weight + Operating Load + Nozzle Load
Level B	Dead Weight + Operating Load + Nozzle Load+OBE
Level D	Dead Weight + Operating Load + Nozzle Load + SSE

이러한 각각의 하중조건에 대한 응력해석을 통해 전체 구조물의 안정성을 평가하게 된다. Fig. 2 는 전반적인 내진해석 절차도이다.

2.2.1 고유진동해석

해석에 사용된 ACU 의 경계조건은 44 군데에서 앵커볼트로 바닥과 연결되어 있으므로 이부위에서의 경계조건은 단순지지조건으로 한다. Table 4 는 33Hz 이내의 고유진동 해석결과이다.

Table 4 Participation Factors with respect to 3-Axis
(a) (E-W : 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) (V-S : 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) (N-S : 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-50
3	12.38	0.81E-1	7.4658	55.7385	0.1011
4	13.16	0.76E-1	-13.288	176.570	0.2861
5	27.57	0.36E-1	-3.1282	9.7857	0.8120

1 차 고유진동수가 33Hz 미만이므로 내진해석이 필요함을 알 수 있으며 장비의 구조적 특성각 방향별로 기여도(Participation factor) 차이가 나타남을 알 수 있다. Fig. 3 은 1 차 모드형상이며 모터 및 송풍기가 위치한 상대적으로 무게가 많이 나가는 곳에서 변형이 많이 발생하는 것을 볼 수 있다.

2.2.2 응답스펙트럼 해석

지진파는 Random 형태의 시간영역 함수로 주어지는 것이 일반적이며, 시간영역에서 지진파에 대한 구조응답을 계산하기 위해서는 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 이 경우 응답스펙트럼 해석법(Response Spectrum Analysis)⁽⁸⁾을 이용하면 지진파의 주파수 스펙트럼상에서 값을 읽어 어떤 모드에 어떻게 응답을 조합하느냐만 결정하면 되므로 매우 편리하고 또한 많이 쓰이는 해석기법이다.

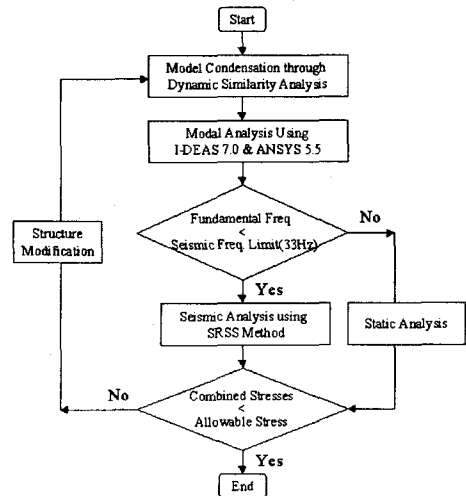


Fig. 2 Flow Chart for Seismic Analysis

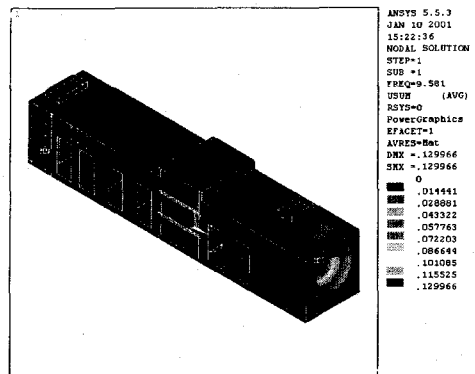


Fig. 3 Fundamental Mode Shapes of ACU(Mode 1)

Fig.4 는 해석에 사용된 지진파(OBE)의 응답스펙트럼 예이다. 구조물의 1차 고유진동수가 33Hz 이내에 존재하면 주어진 지진파에 의한 공진현상이 발생하게 되므로 고유진동해석을 통해서 구한 고유진동수에 해당 가속도값을 응답스펙트럼에서 구한 다음 이 값을 입력값으로하여 ANSYS 상의 Response Spectrum Analysis 에서 식(1)의 SRSS 기법을 이용하면 3방향 지진파에 의한 조합응력을 계산할 수 있다. Fig. 5, 6은 이러한 과정을 통해서 구한 OBE 하중과 SSE 하중에 의한 장비의 응력 분포도이다. Fig. 7은 ACU 주요부품의 위치를 보여주는 그림이다. 이들 부품중 특히 제어판(Control panel) 및 덕트히터(Electric Duct Heater), 모터, 송풍기등은 전장품(Electric Components)으로서 가진실험을 통하여 구조적 안정성뿐만 아니라 전기적 안정성도 함께 입증하여야 한다. 이와 관련된 내용은 다음장에서 다루도록 한다. Table 3에서처럼 지진파이외의 하중을 조합하여 A, B, D의 3개 하중 조건에 대한 각 주요부위에서 총 응력을 계산하면 Table 5와 같다. 계산된 총 응력이 재료의 허용응력보다 적은 값을 가지므로 검증대상 장비의 구조적 안전성을 입증할 수 있다.

Table 5. Stress summary due to service level D Condition

Locations	Combined Stress(Pa)	Allowable Stress(Pa)
Pressure differential Transmitter	1.11E6	1.99E8
Electric Heater Control Panel	4.65E6	1.99E8
Fire Protection Control Panel	2.99E6	1.99E8
Motor Frame	4.03E6	1.99E8
Fan	3.75E6	1.99E8

*Maximum Stress : 9.86E7 Pa at the Drain Pipe Location

3. 가진실험

3.1 가진신호 추출

제어판이나 모터, 송풍기등과 같은 전장품은 내진해석만으로는 구조적, 전기적 안정성을 동시에 입증하기 어려움을 앞에서 언급한 바 있다. 따라서 이러한 전장품은 별도의 가진실험⁹⁾을 수행하여 주어진 지진파에 대한 안정성을 입증해야 한다. 그런데 이러한 전장품들은 Fig. 4의 응답스펙트럼을 직접 적용할 수 있는 건물바닥에 위치한 것이 아니라 장비상에 위치하기 때문에 다음의 모드해석이론을 적용하여 그 위치에서의 응답신호를 추출해야 한다. Fig. 8과 같이 n개의 자유도로 구성된 기초부분의 움직임이 있는 시스템을 가정하자. 이에 대한 운동방정식은 다음과 같다

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

여기서 $\{v\} = \{w\} + \{z\}$ 이다. 식(2)에서 $[m]$, $[c]$, $[k]$ 는 각각 n개의 자유도를 구성하는 질량, 감쇠, 강성항이며 $\{v\}$, $\{w\}$ 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 연계된 상미분방정식을 풀기 위해서는 고유진동해석 결과로부터 얻어진 질량에 대해 정규화된 모드형상(Mass Normalized Mode Shapes)의 직교성을 이용해야 한다. 이를 위해 식(4)를 식(3)에 대입하면

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

식(5)와 같이 모달좌표로 표현되는 비 연계된 미분방정식으로 바뀌게 된다.

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

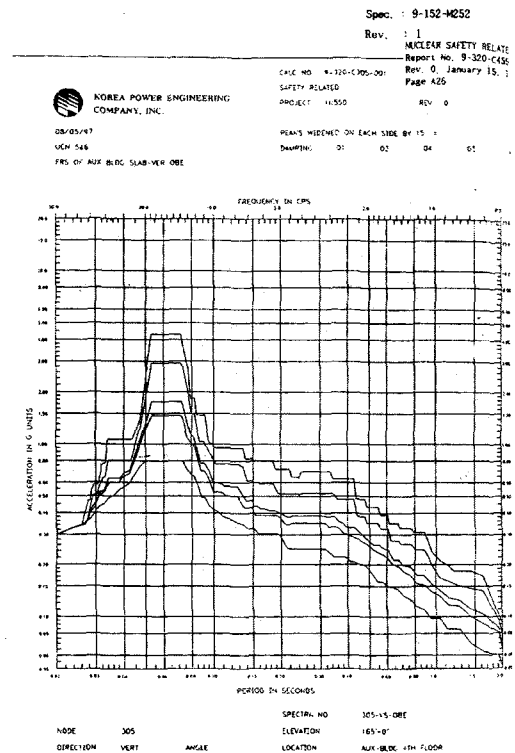


Fig. 4 OBE Floor Response Spectrums at Y-direction

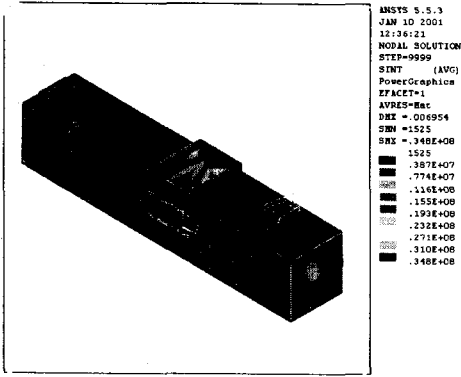


Fig. 5 Stress distribution of ACU subject to OBE load (Pa)

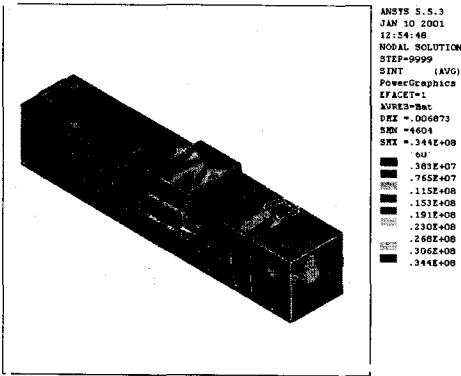


Fig. 6 Stress distribution of ACU subject to SSE load (Pa)

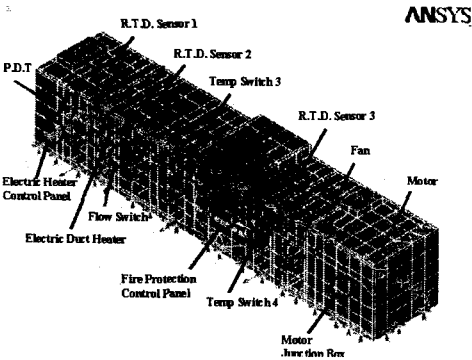


Fig. 7 Major components location in ACU

여기서 μ_r 은 모드기여도(Modal Participation Factor)이다. 모달해 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.

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

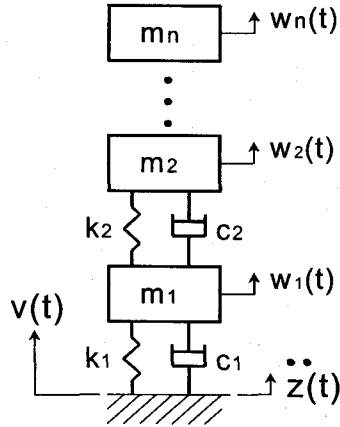


Fig. 8 Schematic of the n-th D.O.F. system

식(6)으로부터 계산된 결과를 조화해 가정을 통해서 식(4)에 대입하면 질량에 대해 정규화된 모드형상과 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 $\{\ddot{z}\}$ 은 FRS가 되며 $\{\ddot{v}_n\}$ 은 구하고자 하는 요구응답스펙트럼(RRS)⁽¹⁰⁾가 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. 9는 각각 제어판 위치에서의 SSE하중 조건에서의 각 방향별 RRS 이며 이러한 값들은 가진시험시 입력값으로 사용된다.

3.2 실험결과

가진시험은 크게 3단계로 구분되는데 먼저 정현파가진을 통해 구조물의 공진주파수를 확인하

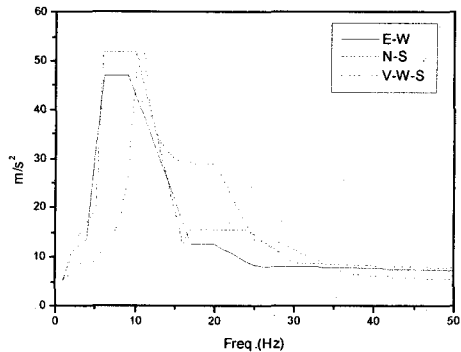


Fig. 9 Required Response Spectra at the Control Panel Location Due to SSE Load

는 정현파 시험(Sine Sweep Test)과 Fig. 9의 특정위치에서의 지진파를 입력파형으로 하는 가진시험(Seismic Load Test) 그리고 마지막으로 정현파시험을 한번 더 수행함으로써 구조물의 변형에 대한 공진주파수의 변화양상을 조사하는 단계로 구분할 수 있다. Fig. 10은 제어판, 송풍기의 가진실험 장치도이다. 실험의 신뢰성을 위해서 가진 Table 위에는 3축 가속도계를 설치하여 Fig. 9의 입력가속도 이상의 값으로 Table이 작동하는지 조사하여야 실험의 타당성을 확인할 수 있다. 이외에 주어진 지진파에 의한 제어판의 Transformer나 Relay의 전압신호의 변화량이 10% 이내이고 스위치의 단락을 일으키

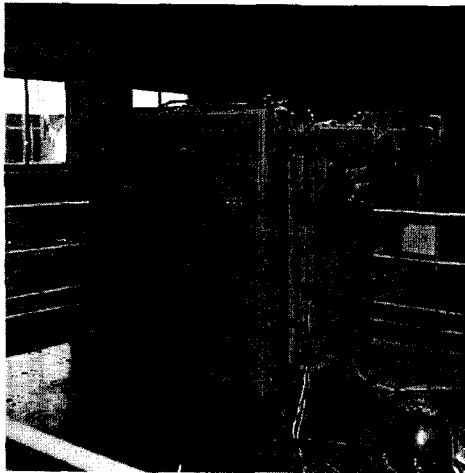
는 채터링이 발생하지 않음을 실험을 통해 입증할 수 있었으며 각 장비의 고유진동수 변화 및 구조적 결함이 발견되지 않았으므로 주어진 지진파에 대한 주요전장품의 전기적/구조적 안정성을 입증할 수 있었다.

4. 결론

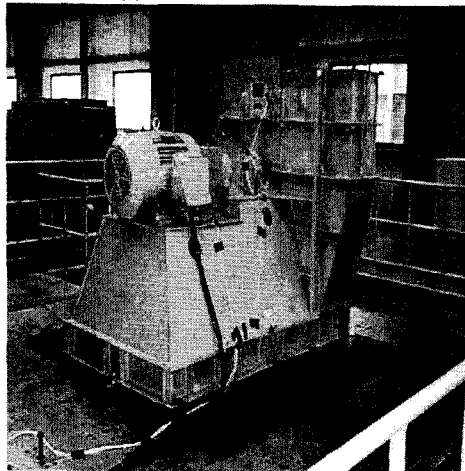
본 연구에서는 안전등급 원전 울진 5&6호기용 공기정화기의 내진검증을 이론과 실험을 조합하여 수행하였다. 먼저 (1)유한요소법을 이용한 내진해석을 수행하여 전체 구조물의 지진파에 대한 구조적 안정성을 입증하였으며 (2) 주요전장품 위치에서의 입력가속도 값을 모드 해석이론을 이용하여 유도하였다. (3)이를 바탕으로 별도의 가진실험을 수행하여 전장품의 전기적/기계적 안정성을 조사하였다. 이상의 결과로서 내진검증 대상물인 원전울진5&6호기용 공기정화기는 주어진 지진파에 대해 충분히 기계적/전기적인 안정성을 유지할 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 참고문헌

- (1)원자력법, 1995년, 제42조 2(성능검증업의 허가), 제42조의 3(허가기준), 제42조의 4(검사)
- (2)한국전력주식회사, 1997년, 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, 1998, Specification No. PUC-P-9M252, Safety-Related ACU's and Duct Heaters, pp. 4-1-4-55.
- (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 (영광5&6호기)용 공조기에 대한 내진검증, 한국소음진동공학회지, 제9권, 제3호, pp. 535-543.
- (11)Roy, R., Craig, 1992, Structural Dynamics, Wiley Publication, pp. 497-512.



(a) Electric Control Panel



(b) Motor and Fan

Fig. 10 Experimental Set-Up for Seismic Test