

<논 문>

## 상용 유한요소해석 프로그램을 이용한 축류송풍기의 내진해석 Seismic Analysis of an Axial Blower Using a Commercial FEM Code

임 형 빈\* · 김 강 성\* · 허 진 욱\* · 정 진 태†

Hyung-Bin Im, Kang-Sung Kim, Jin-Wook Heo and Jintai Chung

(2001년 8월 23일 접수 : 2002년 2월 8일 심사완료)

**Key Words** : Finite Element Method(FEM : 유한요소법), Natural Frequency(고유진동수), Frequency Response Function(주파수응답함수), Seismic Analysis(내진해석)

### ABSTRACT

A seismic analysis is one of crucial design procedures of an axial blower used in nuclear power plants. The blower should be operated even in an emergency such as an earthquake. The blower should be designed in order to stand against an earthquake. For the seismic analysis, we perform the modal analysis and then evaluate the required response spectrum (RRS) from the given floor response spectrum (FRS). A finite element model of the blower is established by using a commercial FEM code of ANSYS. After the finite element modeling, the natural frequencies, the mode shapes and the participation factors are obtained from the modal analysis. The RRS is acquired by a numerical approach on the basis of the principle of mode superposition. We verify the structural safety of the axial blower and confirm the validity of the present seismic analysis results.

### 1. 서 론

원자력 발전소에서 사용되는 송풍기는 지진 발생시 지진에 견딜 수 있는 강인한 설계를 요구한다. 만약 지진에 의해 송풍기가 파손되면 송풍을 할 수 없게 되어 원자력 발전소의 안전을 보장 할 수 없고 큰 재해로 직접 연결되기 때문이다. 따라서 원전에서 사용되는 송풍기는 내진성을 만족시켜야 한다. 국내에서의 내진검증과 내진설계는 거의가 미국의 원전검증 전문 업체인 Wyle 및 Ellis & Watts사에 의존하는 실태이다. 따라서 이런 국내의 취약한 환경을 보다 개선하고자 한다.

내진검증은 크게 내진해석과 내진실험으로 구분된

다. 가장 바람직한 것으로는 대상 구조물 전체를 내진실험하는 것이 바람직하지만 이 경우 완제품을 미리 만들어야 한다는 점과 하자 발생 시 제품의 설계 변경이 어렵다는 점 때문에 유한요소법을 사용하여 내진해석을 한다. 기존의 연구<sup>(1,2)</sup>들도 대부분 그러한 방식을 따르고 있다. 기존의 연구들은 공조기 혹은 공기정화기 등을 위 방식에 따라 내진검증을 하였다. 하지만, 송풍기에 대한 내진검증은 미비하다. 따라서 본 연구에서는 송풍기에 대한 내진해석을 수행하였다.

내진해석을 위해서는 모달해석을 수행한 후에 바닥 응답스펙트럼(FRS)으로부터 요구응답스펙트럼(RRS)을 계산해야 한다. 따라서 본 논문에서는 우선 유한요소법이 적용되는 상용패키지인 ANSYS를 이용하여 축류송풍기를 모델링하고 제작된 모델을 ANSYS를 이용하여 모달해석을 하여서 얻고자 하는 데이터들을 구한다. 그리고 나서 구해진 모달데이터들로부터 수치해석을 이용해서 RRS를 얻어냈다. 이 RRS가 내진설계의 기본적인 자료이며 설계 시 중요한 설계요소가

† 책임저자, 정회원, 한양대학교 기계공학과

E-mail : jchung@hanyang.ac.kr

Tel : (031) 400-5287, Fax : (031) 406-5550

\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

된다. 따라서 구해진 RRS를 통해서 축류송풍기의 구조물이 얼마나 안전한가를 측정할 수 있다.

## 2. 운동방정식 유도

본 논문에서의 내진해석을 논하기 전에 지진에 대한 기본적인 내용을 논하고자 한다. 그리고 이런 내용을 바탕으로 구조물, 즉 축류송풍기의 운동방정식을 유도한다. 우선 지진하중의 성분은 3차원 공간에서는 회전방향 3가지, 수직방향, 동서방향 그리고 남북방향 이렇게 총 6가지 성분이 발생하게 된다. 이들 중 회전방향은 아주 미미하고, 가장 크고 일반적으로 작용하는 것이 남북방향과 동서방향이며 거의 대부분의 에너지를 차지한다.<sup>(3)</sup> 대부분의 지진설계에서는 중력 가속도로 인하여 수직방향의 지진에 대해서는 안전하다고 보는 경우가 많다. 하지만 본 논문에서는 수평방향과 수직방향 즉 3가지 병진운동 방향에 대해서 해석을 수행하였다. Fig. 1은 지진을 받는 1자유도에 대한 개략도이다. 다음은 1자유도 시스템<sup>(4, 5)</sup>에서의 식을 나타낸 것이다.

$$\sum F = m \ddot{v} \tag{1}$$

$$m \ddot{v} + c(\dot{v} + \dot{z}) + k(v - z) \tag{2}$$

여기서  $v(t)$ 는 질량  $m$ 의 절대 변위,  $z(t)$ 는 지반에 대한 절대 변위 그리고  $w(t)$ 는 즉  $w(t) = v(t) - z(t)$ 은 지반에 대한 질량  $m$ 의 상대 변위이다.

일반적으로 지진하중이 오는 경우 지반변위보다는 지반가속도로 해석을 한다. 그 이유는 지진계에서 측정되는 것은 지반의 가속도<sup>(4)</sup>이기 때문이다. 지진의 측정기계에서 가속도를 계측하는 것은 계측된 가속도

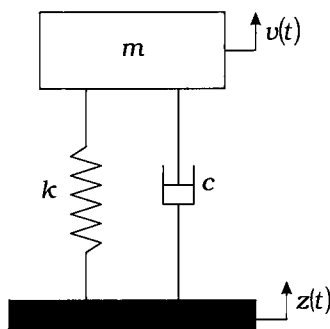


Fig. 1 A Single-degree-of-freedom problem

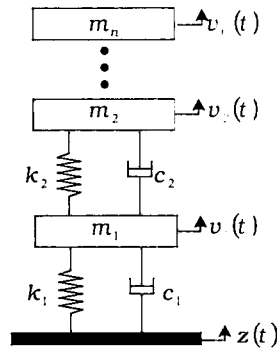


Fig. 2 A multi-degree-of-freedom problem

를 가지고 한번 적분하면 속도가 되고 또 한번 적분을 하면 원하는 변위를 구할 수 있다.

변위를 구한 다음 이것을 미분해서 속도를 구하고 이것을 미분해서 가속도를 구하는 방법도 있지만 이는 상당한 오차가 있다. 따라서 지진하중을 지반가속도로 해석한 값을 주로 사용한다. 식 (3)은 지반가속도이다.

$$\ddot{v} = \ddot{w} + \ddot{z}, \dot{v} - \dot{z} = \dot{w}, v - z = w \tag{3}$$

식 (3)을 식 (2)에 대입하면 다음과 같다.

$$m \ddot{w} + c \dot{w} + kw = -m \ddot{z} \tag{4}$$

식 (4)는 만약에 계측한  $\ddot{z}(t)$ 의 네이터만 있다면, 변위  $z(t)$ 가 없다고 가정하고  $-m \ddot{z}$ 를 일반적인 동적하중으로 하여 가진함으로써 내진 설계를 수행할 수 있음을 보여준다.

이제 1자유도 시스템을 확장해서 다자유도 시스템을 구성해 보면 Fig. 2와 같다. Fig. 2는  $n$ 개의 자유도로 구성된 기초부분의 움직임이 있는 시스템<sup>(4, 6)</sup>으로 가정한 것이다. 이에 대한 운동 방정식은 단자유도 시스템에서의 식 (4)와 비슷한 다음과 같은 행렬형태의 운동 방정식<sup>(4)</sup>을 얻을 수 있다.

$$[m] \{\ddot{w}\} + [c] \{\dot{w}\} + [k] \{w\} = -[m] \{\ddot{z}\} \tag{5}$$

여기서,

$$\{w\} = \{v\} - \{z\} \tag{6}$$

## 3. ANSYS를 이용한 유한요소해석

송풍기 모델에 대한 내진해석을 수행하기 위해서는

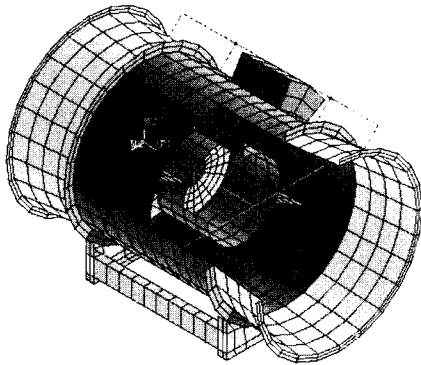


Fig. 3 Finite element model using ANSYS

장비 각 부위 및 주요부품에 대한 이론적 모델링을 수행하여 이를 유한요소모델로 변환하는 과정이 선행되어야 한다. Structural base와 fan casing 등은 ANSYS version 5.5의 Shell 63번 요소를 주로 사용하였다. 물성치는 영의 계수는  $2.07 \times 10^{11}$  Pa, 질량밀도는  $7.8 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>으로 하였다. Impeller와 valve는 lumped mass 21을 사용하였다. 그리고 motor는 Beam 4를 사용하고 단면적은 0.1649 m<sup>2</sup>이고 면적 관성모멘트는  $I_z = 1.2164 \times 10^{-3}$  m<sup>4</sup>,  $I_x = 2.4328 \times 10^{-3}$  m<sup>4</sup>로 하였다.

Fig. 3은 ANSYS를 통해서 만들어낸 축류송풍기의 모델이며 총 element수는 7620개이다. 대부분의 지진파는 33 Hz미만의 성분을 갖는데 만일 장비의 고유진동해석결과 저주파모드의 주파수 값이 33 Hz 이내에 존재한다면 공진에 의한 과대응력이 발생할 수 있다. 이 경우에는 식 (7)과 같은 SRSS(square roots of sums of square)법에 따라 구한 응력값이 허용응력값과 비교하여 구조물의 안정성을 파악해야 한다.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{n=1}^N \sigma_n^2} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2} \quad (7)$$

이 때 하중조건으로는 장비의 무게(dead weight), fan housing에 작용하는 내부압력(pressure), 운전 정지지진(operating basis earthquake : OBE), 안전정지 지진(safety shutdown earthquake : SSE) 등으로 구분할 수 있다. 본 논문에서의 하중조건은 장비의 무게, 내부압력, SSE만을 고려하였다. 해석에 사용된 송풍기의 경계조건은 앵커볼트로 바닥과 연결되어 있으므로 이 부위에서 단순지지조건으로 한다. Table 1~3은 고유진동해석의 결과이다.

Table 1 Participation factor and effective mass in the X-direction

| Mode | Freq.   | Partic. factor | Ratio   | Effect. mass | Mass frac |
|------|---------|----------------|---------|--------------|-----------|
| 1    | 16.7815 | 1.70E-08       | 0       | 2.91E-16     | 2.68E-19  |
| 2    | 21.5053 | -31.734        | 1       | 1007.03      | 0.927785  |
| 3    | 49.6115 | -1.40E-08      | 0       | 1.96E-16     | 0.927785  |
| 4    | 58.5583 | -3.29E-08      | 0       | 1.08E-15     | 0.927785  |
| 5    | 79.4635 | -4.1552        | 0.13094 | 17.2658      | 0.943692  |

Table 2 Participation factor and effective mass in the Y-direction

| Mode | Freq.   | Partic. factor | Ratio    | Effect. mass | Mass frac |
|------|---------|----------------|----------|--------------|-----------|
| 1    | 16.7815 | -0.13598       | 0        | 1.85E-02     | 1.43E-05  |
| 2    | 21.5053 | 3.77E-09       | 1        | 1.42E-17     | 1.43E-05  |
| 3    | 49.6115 | -33.803        | 0        | 1142.64      | 0.883556  |
| 4    | 58.5583 | 4.4354         | 0.131213 | 19.6727      | 0.898767  |
| 5    | 79.4635 | 1.65E-08       | 0        | 2.73E-16     | 0.898767  |

Table 3 Participation factor and effective mass in the Z-direction

| Mode | Freq.   | Partic. factor | Ratio    | Effect. mass | Mass frac |
|------|---------|----------------|----------|--------------|-----------|
| 1    | 16.7815 | 34.597         | 1        | 1196.96      | 0.95028   |
| 2    | 21.5053 | 2.23E-08       | 0        | 4.97E-16     | 0.95028   |
| 3    | 49.6115 | -1.0362        | 0.02995  | 1.07367      | 0.951133  |
| 4    | 58.5583 | -6.8552        | 0.198144 | 46.994       | 0.988442  |
| 5    | 79.4635 | -1.84E-08      | 0        | 3.39E-16     | 0.988442  |

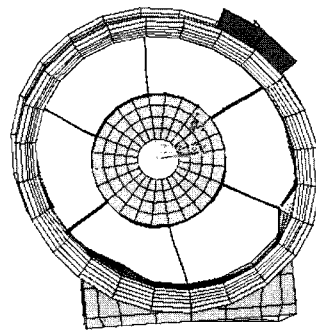


Fig. 4 Fundamental mode shapes of the axial blower

1차 고유진동수가 33 Hz미만이므로 내진해석이 필요함을 알 수 있으며 장비의 구조적 특성상 각 방향 별로 기여도(participation factor)의 차이가 나타남을 알 수 있다. Fig. 4는 1차 모드형상을 나타내고 있다.

지진파는 random 형태의 시간영역 함수로 주어지는 것이 일반적이며, 시간영역에서 지진파에 대한 구조응답을 계산하기 위해서는 많은 시간과 노력이 필요로 한다. 이 경우 응답 스펙트럼 해석법(response spectrum analysis)을 이용하면 지진파의 주파수 스펙트럼상에서 값을 읽어 어떤 모드에 어떻게 응답을 조합하느냐만 결정하면 되므로 매우 편리하고 또한 많이 쓰이는 해석기법이다. 구조물의 1차 고유진동수가 33 Hz 이내 존재하면 주어진 지진파에 의한 공진 현상이 발생하게 되므로 고유진동해석을 통해서 구한 고유진동수에 해당 가속도값을 응답스펙트럼에서 구한 다음 이 값을 입력값으로하여 ANSYS상의 응답 스펙트럼 해석법에서 식 (7)의 SRSS 기법을 이용하면 3방향 지진파에 의한 조합응력을 계산할 수 있다. Fig. 5에서 Fig. 7은 각각 장비의 무게, 내부압력, 지진파(SSE)에 의한 응력 분포를 나타낸다. Table 4에서처럼 지진파 이외의 하중을 조합하여 각 주요부위에서 총 응력이 재료의 허용응력보다 적은 값을 가지므로 검증대상 장비의 구조적 안정성을 입증할 수 있다.

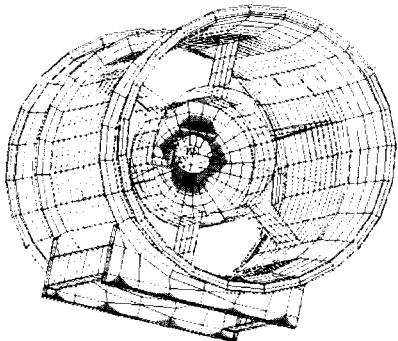


Fig. 5 Stress distribution subject to dead weight

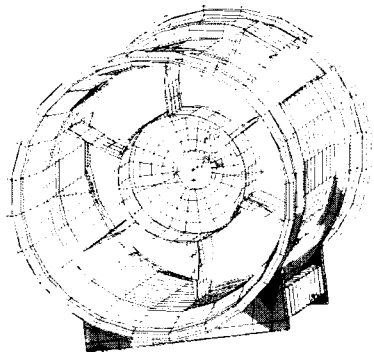


Fig. 6 Stress distribution subject to pressure

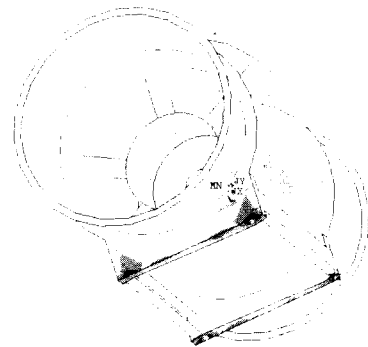


Fig. 7 Stress distribution subject to SSE load

Table 4 Summary of stress value results

| Components            | Combined stress(psi) | Allowable stress(psi) |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Pipe stress           | 195.8                | 21,600                |
| Maximum stress of fan | 20,305.3             | 21,600                |
| Dwyer gauge stress    | 38.0                 | 21,600                |
| Valve stress          | 100.8                | 21,600                |

#### 4. 요구응답 스펙트럼(RRS)

식 (5)와 같이 연계된 상미분방정식을 풀기 위해서는 고유진동해석 결과로부터 얻어진 질량에 대해 정규화 된 모드형상의 직교성<sup>(4,5)</sup>을 이용하면 쉽게 풀 수 있다. 중첩의 원리를 이용하여 (1)를 식 (8)과 같이 모드 중첩으로 표현한다.

$$\{w\} = [\phi]\{\eta\} = \sum_r [\phi_r]\eta_r(t) \quad (8)$$

여기서  $[\phi]$ 는 모달행렬,  $\{\phi_r\}$ 는  $r$ 번째 모달벡터, 그리고  $\eta_r(t)$ 는  $r$ 번째 모달좌표이다. 따라서 식 (8)을 식 (5)에 대입하면 식 (9)와 같이 모달좌표로 표현되는 미분방정식으로 바뀌게 된다.

$$[m][\phi]\{\ddot{\eta}\} + [c][\phi]\{\dot{\eta}\} + [k][\phi]\{\eta\} = -[u]\{\ddot{z}\} \quad (9)$$

이렇게 구해진 식 (9)에  $[\phi]^T$ 를 곱하면 다음과 같이 표현된다.

$$[\phi]^T[m][\phi]\{\ddot{\eta}\} + [\phi]^T[c][\phi]\{\dot{\eta}\} + [\phi]^T[k][\phi]\{\eta\} = -[\phi]^T[m]\{\ddot{z}\} \quad (10)$$

여기서  $[\phi]$ 가 정규화된 모달행렬<sup>(11)</sup>이고  $[c]$ 가 orthogonal damping matrix<sup>(11)</sup>이며 여기에 직교성을 적용하면 식 (10)은 식 (11)과 같이 표현된다.

$$\{\ddot{\eta}\} + [2\zeta, \omega_n] \{\dot{\eta}\} + [\omega_n^2] \{\eta\} = -[\phi]^T [m] \{\ddot{z}\} \quad (11)$$

그리고 식 (11)의 변제 방정식은 식 (12)와 같다.

$$\ddot{\eta}_r + 2\zeta_r \omega_n \dot{\eta}_r + \omega_n^2 \eta_r = -\mu_r \ddot{z} \quad (12)$$

여기서  $\zeta_r$ 는 모달 감쇠율<sup>(12, 14)</sup>(modal damping ratio)이고  $\mu_r$ 는 내진해석시 필요한 모달 기여도(participation factor)가 된다.  $\mu_r$ 는 ANSYS의 모드해석을 통하여서 얻었고 이제  $\zeta_r$ 를 구하기 위해서 식 (13)과 같은 단자유도시스템을 이용한다.

$$\ddot{v} + 2\zeta \omega_n \dot{v} + \omega_n^2 v = f(t) \quad (13)$$

여기서  $m$ 은 질량,  $c$ 는 감쇠상수,  $k$ 는 스프링 상수,  $c/m = 2\zeta \omega_n$ ,  $k/m = \omega_n^2$  그리고  $\omega_n$ 는 고유진동수이다. 단,  $f(t) = F(t)/m$ 이다. 이를 단자유도 시스템에 적용하면  $\zeta_r$ 은  $\zeta_r = c/2m_r$ ,  $\omega_r$ 이 된다. 그리고  $c = 0.03$ 으로 하였고  $m_r$ 은 ANSYS의 모드해석을 통하여서 얻어진 유효질량이 된다.

식 (12)에서  $\ddot{z}$ 는 주파수 영역에서의 기초부분 가속도, 즉 FRF를 의미한다. 또한 모달변위, 지진변위  $z$ 를 각각  $\eta_r = H_r e^{i\omega t}$ ,  $z = Z e^{i\omega t}$ 라 가정하고 식 (12)에 대입하면 식 (14)와 같다.

$$(\omega_r^2 - \omega^2 + i\omega 2\zeta_r \omega_r) H_r e^{i\omega t} = \mu_r \omega^2 Z e^{i\omega t} \quad (14)$$

식 (14)로부터 식 (15)와 같이  $H_r$ , 즉 주파수응답함수(frequency response function)를 얻는다.

$$H_r = \frac{\mu_r \omega^2 Z}{\omega_r^2 - \omega^2 + i\omega 2\zeta_r \omega_r} \quad (15)$$

식 (15)에서 구한  $H_r$ 을  $\eta_r(t) = H_r e^{i\omega t}$ 라 하면  $\eta_r(t)$ 를 구할 수 있으며 이  $\eta_r(t)$ 를 식 (8)에 대입하면  $\{w\}$ 를 구할 수 있다. 이 과정을 식 (16)에 정리하였다.

$$\{w\} = \sum_{r=1}^n \{\phi_r\} \eta_r(t) = \sum_{r=1}^n \{\phi_r\} H_r e^{i\omega t} = \{W\} e^{i\omega t} \quad (16)$$

식 (16)으로부터 주파수 영역에서의 상대변위인  $\{w\}$

를 구할 수 있다. 따라서 구하고자 하는 최종 절대변위,  $\{v\}$ 는 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{v\} = \{w\} + \{z\} \quad (17)$$

여기서  $\{v\} = \{V\} e^{i\omega t}$ ,  $\{w\} = \{W\} e^{i\omega t}$ ,  $\{z\} = \{Z\} e^{i\omega t}$ 라 가정하였다. 따라서 식 (17)을 이용해서 절대변위를 구할 수 있고 또한 식 (17)로부터 식 (18)과 같은 절대변위의 가속도를 구할 수 있다.

$$-\omega^2 \{V\} = -\omega^2 \{W\} - \omega^2 \{Z\} \quad (18)$$

여기서  $\{w\}$ ,  $\{W\}$ ,  $\{Z\}$ 는 각각 절대변위, 상대변위, 지반의 크기(magnitude)가 되며  $-\omega^2 \{V\} = \{\ddot{V}\}$ ,  $-\omega^2 \{W\} = \{\ddot{W}\}$ ,  $-\omega^2 \{Z\} = \{\ddot{Z}\}$ 과 같이 표현되므로 절대 변위의 가속도의 크기는 식 (19)와 같다.

$$\{\ddot{V}\} = \{\ddot{W}\} + \{\ddot{Z}\} \quad (19)$$

여기서  $\{\ddot{V}\}$ 는 절대 변위 가속도의 크기,  $\{\ddot{W}\}$ 는 상대 변위 가속도의 크기 그리고  $\{\ddot{Z}\}$ 는 지반 변위 가속도의 크기가 된다. 따라서  $n$ 번째 node의 절대변위에 대한 가속도는 식 (19)에 절대값을 취하면 식 (20)이 된다.

$$\{\ddot{V}_n\} = \{\ddot{W}_n\} + \{\ddot{Z}_n\} \quad (20)$$

여기서  $\{\ddot{V}_n\}$ 는  $n$ 번째 node의 절대변위에 대한 가속도의 크기,  $|\ddot{W}_n + \ddot{Z}_n|$ 는  $n$ 번째 node의 상대변위에 대한 가속도의 크기와 지반변위에 대한 가속도의 크기와의 합이다. 식 (20)이 구하고자 하는 요구 응답 스펙트럼(RRS)이 된다. Fig. 8은 송풍기의 상단부에서 계측장비와 접합되어 있는 부분의 RRS이고 Fig. 9는 송풍기의 하단부의 지지부분의 RRS의 예를 나타내고 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 100 Hz까지의 범위까지 본 그래프이다. 실제로 지진파는 보통의 경우 33 Hz까지 보는 것이 보통이다. 왜냐하면, 보통의 지진파들이 33 Hz를 넘어가는 경우는 거의 드물기 때문이다. 따라서, 33 Hz이상 되는 부분은 무시하여도 좋을 것이다. Fig. 8과 Fig. 9에서 보는 바와 같이 33 Hz내에서의 RRS는 10 g이 넘지 않는다. 따라서 본 논문에서는 각 장비의 고유진동수 변화 및 구조적 결함이 발견되지 않았으므로 주어진 지진파에 대한 주요장비의 구조적 안정성을 입증할 수 있었다.

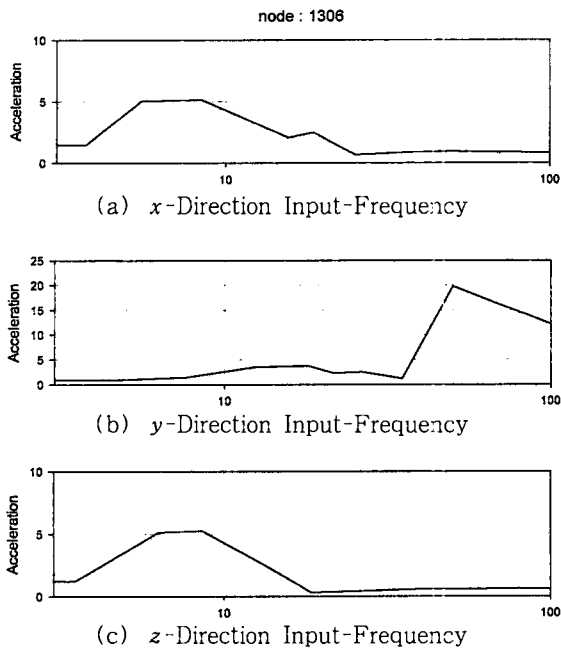


Fig. 8 Required response spectrum at node 1306 in (a) the x-direction (b) the y-direction (c) the z-direction

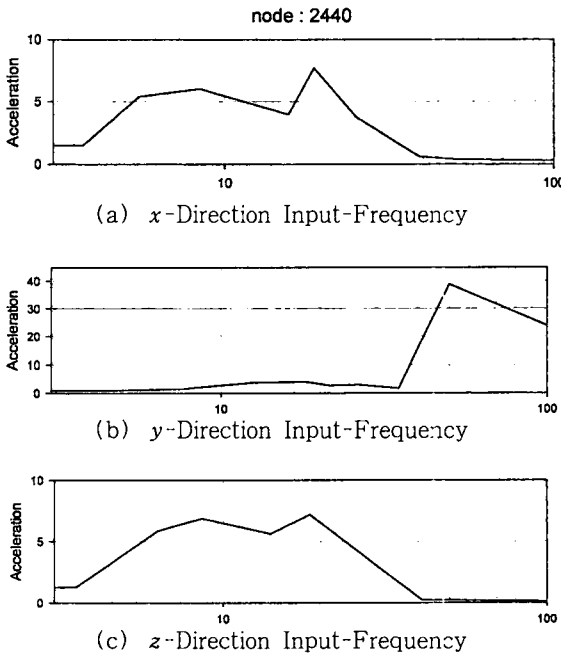


Fig. 9 Required response spectrum at node 2440 in (a) the x-direction (b) the y-direction (c) the z-direction

## 5. 결 론

본 논문에서는 유한요소해석 툴인 ANSYS를 이용하여 축류송풍기를 모델링하였다. 그리고 마찬가지로 제작된 모델에 ANSYS를 이용하여 모드해석을 수행하였다. 그리고 모드해석을 통해 얻어진 데이터들, 즉 모달기여도, 유효질량등의 데이터를 가지고 주파수응답함수인  $H_r$ 을 얻고 이  $H_r$ 로부터 모달좌표인  $\eta_r(t)$ 을 구하였다. 이  $\eta_r(t)$ 로부터 모드 중첩의 원리가 적용된 지반에 대한 질량  $m$ 의 상대변위를 얻게 되고 이로서 최종 절대변위를 구할 수 있다. 이 절대변위로부터 우리가 구하고자 하는 절대변위의 가속도의 크기, 즉 요구응답스펙트럼(RRS)를 구하게 된다. 이렇게 얻어진 요구응답스펙트럼을 분석함으로써 지진파에 대한 송풍기의 구조적 안정성을 검증할 수 있었으며, 이런 방식의 내진설계 기술이 본 연구 대상에의 적용에 적절함을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- (1) 이준근, 김진영, 정필중, 정정훈, 1999, "원자력 발전소(영광 5&6 호기)용 공조기에 대한 내진검증," 한국소음진동학회지, 제 9권, 제 3호, pp. 535~543.
- (2) 이준근, 김진영, 정필중, 2001, "울진 원자력발전소 5&6 호기용 공기정화기에 대한 내진검증," 대한기계학회 춘계학술대회논문집B, pp. 404~409.
- (3) D. J. Ewins, Modal Testing: Theory and Practice, Bruel & Kjaer Korea Ltd.
- (4) Leonard Meirovitch, 1967, Analytical Methods in Vibrations, Macmillan Publishing Co., Inc. New York, pp. 1~19.
- (5) Leonard Meirovitch, 1970, Meirovitch Methods of Analytical Dynamics, McGraw-Hill Book Company, pp. 45~100.
- (6) William T. Thomson, Marie Dillon Dahleh, 1993, Theory of Vibration with Application, Fifth Edition, PRENTICE HALL, pp. 49~81.
- (7) Ansys, Inc., Ansys Dynamics, Users Guide for Revision 5.1.