

Ansys 를 이용한 축류송풍기의 내진설계

임형빈* · 김강성* · 허진욱* · 정진태**

The Seismic Design of Axial Blower Using Ansys

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

Key Words : Finite Element Method (유한요소법), Natural Frequency (고유진동수), Frequency Response Function(주파수응답함수), Seismic Design(내진설계)

Abstract

The seismic design for an axial blower is the procedure in which the required response spectrum (RRS) is computed by using the floor response spectrum (FRS). The seismic design is very important to reduce severe damages from an earthquake; therefore, the seismic design has been a great concern in engineering society. In this study, after finite element modeling is established by using Ansys, the modal data are obtained such as the natural frequencies, the participation factor, and so on. With these data, the RRS is acquired by a numerical approach. The seismic safety of the axial blower is evaluated.

1. 서론

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 보장할 수 없고 큰 재해로 직접 연결되기 때문이다. 따라서 원전에서 사용되는 송풍기는 내진성을 만족시켜야 한다. 국내에서의 내진검증과 내진설계는 거의가 미국의 원전검증업 전문업체인 Wyle 및 Ellis & Watts 사에 의존하는 실태이다. 따라서 이런 국내의 취약한 환경을 보다 개선하고자 한다. 여기서 내진설계란 Floor Response Spectrum (FRS)을 이용해서 Required Response Spectrum (RRS)을 얻는 과정이다. 따라서 본 논문에서는 우선 유한요소법이 적용되는 상용패키지인 Ansys 를 이용하여 축류송풍기를 모델링하고 제작된 모델을 Ansys 를 이용하여 모달해석을 하여서 얻고자 하는 데이터들을 구한다. 그리고 나서 구해진 모달 데이터들로부터 수치해석을 이용해서 RRS 를 얻어

냈다. 이 RRS 가 내진설계의 기본적인 자료이며 설계 시 중요한 설계요소가 된다. 따라서 구해진 RRS 을 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 3 차원 공간에서는 회전방향 3 가지, 수직방향, 동서방향 그리고 남북방향 이렇게 총 6 가지 성분이 발생하게 된다. 이들 중 회전방향은 아주 미비하고, 가장 크고 일반적으로 작용하는 것이 남북방향과 동서방향이며 거의 대부분의 에너지를 차지한다. (1) 대부분의 지진설계에서는 중력가속도로 인하여 수직방향의 지진에 대해서는 안전하다고 보는 경우가 많다. 하지만 본 논문에서는 수평방향과 수직방향 즉 3 가지 방향에 대해서 해석을 수행하였다.

다음은 1 자유도 시스템 (2-4) 에서의 식을 나타낸 것이다.

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

** 한양대학교 공학대학 기계공학과

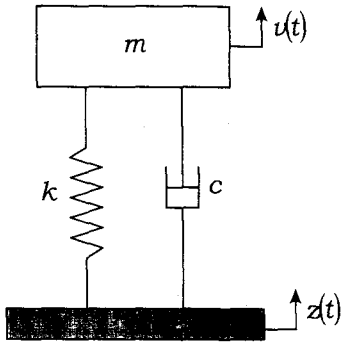


Fig. 1 System of SDOF

$$\sum \mathbf{F} = m\ddot{u} \quad (1)$$

$$m\ddot{u} + c(\dot{u} - \dot{z}) + k(u - z) = 0 \quad (2)$$

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

일반적으로 지진하중이 오는 경우 우리는 지반변위(ground displacement)보다는 지반가속도(ground acceleration)로 해석을 한다. 그 이유는 지진계에서 측정되는 것은 지반의 가속도⁽⁴⁾이기 때문이다. 지진의 측정기계에서 가속도를 계측하는 것은 계측된 가속도를 가지고 한번 적분하면 속도가 되고 또 한번 적분을 하면 우리가 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.

$$\ddot{u} = \ddot{w} + \ddot{z}, \dot{u} - \dot{z} = \dot{w}, u - z = w \quad (3)$$

식(3)을 식(2)에 대입하면 다음과 같다.

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

식(4)는 만약에 계측한 지반가속도의 데이터만 있다면, 땅이 안 움직인다고 가정하고 일반적인 동적하중으로 지반가속도를 가진 함으로써 내진 설계를 수행할 수 있음을 보여준다.

이제 1 자유도 시스템을 확장해서 다자유도 시스템을 구성해 보면 Fig. 2와 같다. Fig. 2은 n 개의 자유도로 구성된 기초부분의 움직임이 있는

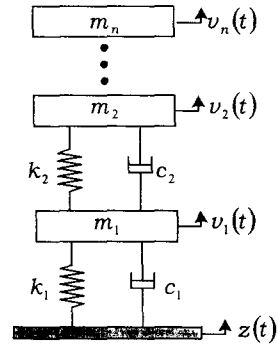


Fig. 2 System of MDOF

시스템^{(2),(4)}으로 가정한 것이다. 이에 대한 운동 방정식은 단자유도 시스템에서의 식(4)와 비슷한 다음과 같은 Matrix 형태의 운동 방정식⁽²⁾을 얻을 수 있다.

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

$$\{w\} = \{v\} - \{z\} \quad (6)$$

3. Ansys의 모드해석

앞 절에서 지진에 대해서 설명하였고 또한 운동 방정식을 구하였다. 이제 모드해석을 수행할 차례인데 이런 모드해석을 수행하기 위해서는 우선 구조물의 유한요소모델⁽⁵⁾을 필요로 한다. 해석방법의 효율적인 모델링과 해석을 위해서 유한요소해석 툴인 Ansys를 이용해서 유한요소모델을 구성하였다.

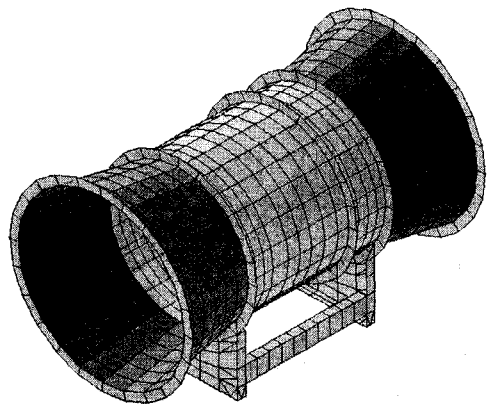


Fig. 3 Ansys model

Fig. 3은 Ansys를 통해서 만들어낸 축류송풍기의 모델이다.

이렇게 만들어진 모델을 가지고 Ansys의 Modal Analysis⁽⁵⁾를 통해서 내진해석에 필요한 데이터 즉 모달행렬(modal matrix), 고유진동수(natural frequency), 모달기여도, 유효질량⁽⁵⁾의 값들을 얻어낸다. Table 1, Table 2, Table 3는 각각 X, Y, Z 방향의 모달기여도(Participation Factor), 유효질량(Effective Mass)⁽⁵⁾의 데이터들을 나타내고 있다. 본 논문에서는 25개의 모드를 구하였으나 지면상 6개의 모드 데이터까지만 표시했다.

4. 요구응답 스펙트럼(RRS)

식(5)와 같이 연계된 상미분방정식을 풀기 위해서는 고유진동해석 결과로부터 얻어진 질량에 대해 정규화 된 모드형상의 직교성⁽²⁻⁴⁾을 이용하면 쉽게 풀 수 있다. 중첩의 원리를 이용하여 $\{w\}$ 를 식(7)과 같이 mode superposition으로 표현한다.

$$\{w\} = \{\phi\}\{\eta\} = \sum_{r=1}^n \{\phi_r\}\eta_r(t) \quad (7)$$

여기서 $\{\phi\}$ 는 모달행렬, $\{\phi_r\}$ 는 r 번째 모달벡터, 그리고 $\eta_r(t)$ 는 r 번째 모달좌표이다.

X(E-W) Direction

MODE	FREQ.	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECT. MASS	MASS FRAC.
1	16.7815	5.96E-02	1.70E-08	0	2.91E-16	2.68E-19
2	21.5053	4.65E-02	-31.734	1	1007.03	0.927785
3	49.6115	2.02E-02	-1.40E-08	0	1.96E-16	0.927785
4	58.5583	1.71E-02	-3.29E-08	0	1.08E-15	0.927785
5	79.4635	1.26E-02	-4.1552	0.13094	17.2658	0.943692
6	80.9335	1.24E-02	1.45E-08	0	2.11E-16	0.943692

Table 1. Participation Factor and Effective Mass of X-Direction

Y(N-S) Direction

MODE	FREQ.	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECT. MASS	MASS FRAC.
1	16.7815	5.96E-02	-0.13598	0.004023	1.85E-02	1.43E-05
2	21.5053	4.65E-02	3.77E-09	0	1.42E-17	1.43E-05
3	49.6115	2.02E-02	-33.803	1	1142.64	0.883556
4	58.5583	1.71E-02	4.4354	0.131213	19.6727	0.898767
5	79.4635	1.26E-02	1.65E-08	0	2.73E-16	0.898767
6	80.9335	1.24E-02	0.32108	0.009498	0.10309	0.898847

Table 2. Y-방향의 Participation Factor and Effective Mass of Y-Direction

Z(V-S) Direction

MODE	FREQ.	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECT. MASS	MASS FRAC.
1	16.7815	5.96E-02	34.597	1	1196.96	0.95028
2	21.5053	4.65E-02	2.23E-08	0	4.97E-16	0.95028
3	49.6115	2.02E-02	-1.0362	0.02995	1.07367	0.951133
4	58.5583	1.71E-02	-6.8552	0.198144	46.994	0.988442
5	79.4635	1.26E-02	-1.84E-08	0	3.39E-16	0.988442
6	80.9335	1.24E-02	-3.1045	0.089733	9.63784	0.996093

Table 3. Participation Factor and Effective Mass of Z-Direction

따라서 식(7)을 식(5)에 대입하면 식(8)과 같이
모달좌표로 표현되는 미분방정식으로 바뀌게 된다.

$$[m][\phi]\{\ddot{\eta}\} + [c][\phi]\{\dot{\eta}\} + [k][\phi]\{\eta\} = -[m]\{\ddot{z}\} \quad (8)$$

이렇게 구해진 식(8)에 $[\phi]^T$ 를 곱하면 다음과 같
이 표현된다.

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

여기서 $[\phi]$ 가 정규화된 모달행렬⁽²⁾ 이고 $[c]$ 가
slightly damping matrix⁽²⁾ 이며 여기에 직교성
을 적용하면 식(9)는 식(10)과 같이 표현된다. 그
리고 식(10)의 r 번째 방정식은 식(11)과 같다.

$$\{\ddot{\eta}\} + [2\zeta_r \omega_r] \{\dot{\eta}\} + [\omega_r^2] \{\eta\} = -[\phi]^T [m]\{\ddot{z}\} \quad (10)$$

$$\ddot{\eta}_r + 2\zeta_r \omega_r \dot{\eta}_r + \omega_r^2 \eta_r = -\mu_r \ddot{z} \quad (11)$$

여기서 ζ_r 는 모달감쇠율^{(2),(4)} (Modal Damping
Ratio)이고 μ_r 은 내진해석시 필요한 모달기여도
(Participation Factor)가 된다. μ_r 은 Ansys의
모드해석을 통하여서 얻었고 이제 ζ_r 를 구하기
위해서 식(12)와 같은 단자유도시스템을 이용한다.

$$\ddot{v} + \frac{c}{m} \dot{v} + \frac{k}{m} v = \frac{F(t)}{m} \quad (12)$$

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

여기서 m 은 질량, c 는 감쇠상수, k 는 스프링
상수, $c/m = 2\zeta \omega_n$, $k/m = \omega_n^2$ 그리고 ω_n 는 고유
진동수이다. 이를 다자유도 시스템에 적용하면
 ζ_r 은 $\zeta_r = c/2m_r \omega_r$ 이 된다. 그리고 $c = 0.03$ 으로
하였고 m_r 은 Ansys 의 모드해석을 통하여서 얻어
진 유효질량이 된다.

식(11)에서 \ddot{z} 는 주파수 영역에서의 기초부분 가
속도, 즉 FRS 를 의미한다. 또한 모달변위 η_r ,
지진변위 z 를 각각 $\eta_r = H_r e^{i\omega t}$, $z = Z e^{i\omega t}$ 라 가
정하고 식(11)에 대입하면 식(13)과 같다.

$$(\omega_r^2 - \omega^2 + i\omega 2\zeta_r \omega_r) H_r e^{i\omega t} = \mu_r \omega^2 Z e^{i\omega t} \quad (13)$$

식(13)으로부터 식(14)와 같이 H_r , 즉 주파수응

답함수(Frequency Response Function) 를 얻는다.

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

식(14)에서 구한 H_r 을 $\eta_r(t) = H_r e^{i\omega t}$ 에 대입하면
 $\eta_r(t)$ 를 구할 수 있으며 이 $\eta_r(t)$ 를 식 (7)에 대
입하면 $\{w\}$ 를 구할 수 있다. 이 과정을 식(15)에
정리하였다.

$$\{w\} = \sum_{r=1}^n \{\phi_r\} \eta_r(t) = \sum_{r=1}^n \{\phi_r\} H_r e^{i\omega t} = \{W\} e^{i\omega t} \quad (15)$$

식(15)로부터 주파수 영역에서의 상대변위인 $\{w\}$
를 구할 수 있다. 따라서 구하고자 하는 최종 절
대변위, $\{v\}$ 는 식(16)같이 나타낼 수 있다.

$$\{v\} = \{w\} + \{z\} \quad (16)$$

여기서 $\{w\} = \{W\} e^{i\omega t}$, $\{w\} = \{W\} e^{i\omega t}$, $\{z\} = \{Z\} e^{i\omega t}$ 라
가정하였다. 따라서 식(16)를 이용해서 절대 변위
를 구할 수 있고 또한 식(16)으로부터 식(17)과
같은 절대변위의 가속도를 구할 수 있다.

$$\{\ddot{v}\} = \{\ddot{w}\} + \{\ddot{z}\}$$

$$= -\omega^2 \{V\} e^{i\omega t} = -\omega^2 \{W\} e^{i\omega t} - \omega^2 \{Z\} e^{i\omega t}$$

$$-\omega^2 \{V\} = -\omega^2 \{W\} - \omega^2 \{Z\} \quad (17)$$

여기서 $\{V\}$, $\{W\}$, $\{Z\}$ 는 각각 절대변위, 상대변위, 지
반의 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(18)과 같다.

$$\{\ddot{V}\} = \{\ddot{W}\} + \{\ddot{Z}\} \quad (18)$$

여기서 $\{\ddot{V}\}$ 는 절대 변위 가속도의 크기, $\{\ddot{W}\}$ 는
상대 변위 가속도의 크기 그리고 $\{\ddot{Z}\}$ 는 지반 변
위 가속도의 크기가 된다. 따라서 n 번째 node 의
절대변위에 대한 가속도는 식(18)에 절대값을 취
하면 식(19)가 된다.

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

여기서 $|\dot{V}_n|$ 는 n 번째 node 의 절대변위에 대한 가속도의 크기, $|\ddot{W}_n + \ddot{Z}_n|$ 는 n 번째 node 의 상대변위에 대한 가속도의 크기와 지반변위에 대한 가속도의 크기와의 합이다. 식(19)이 바로 우리가 구하고자 하는 요구응답 스펙트럼(RRS)이 된다.

5. 결론

Fig. 4 는 위의 과정들을 통해서 얻어내려고 하는 node 들을 나타내고 있다.

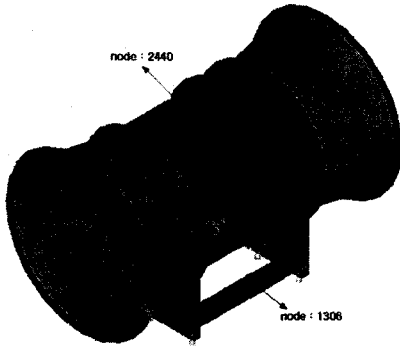


Fig. 4 Position of node

Fig. 5 와 Fig. 6 은 각각 상단점과 하단점의 결과를 나타내고 있다.

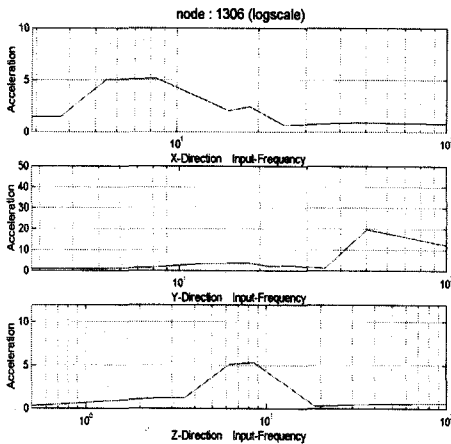


Fig. 5 Result of node 1306

Fig.5 와 Fig.6 은 100Hz 까지의 범위까지 본 그래프이다. 실제로 지진파는 보통의 경우 33Hz 까지 보는 것이 통례이다. 왜냐하면, 보통의 지진파들이 33Hz 를 넘어가는 경우는 거의 드물기 때문이다. 따라서, 33Hz 이상이 되는 부분은 무시하여도 좋을 것이다. 이렇게 구해진 RRS 는 내진설계의

기본적이며 중요한 자료가 된다.

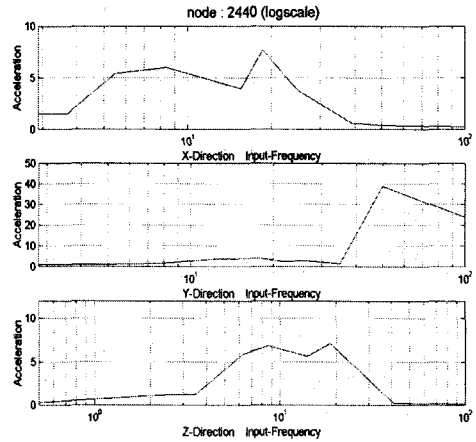


Fig. 6 Result of node 2440

6. 고찰

본 논문에서는 유한요소해석 툴인 Ansys 를 이용하여서 축류송풍기를 모델링하였다. 그리고 마친 가지로 제작된 모델에 Ansys 를 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 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. 지진에 대한 연구가 거의 미국의 몇몇 회사에만 의존을 하는 실정에서 미흡하나마 선진국의 연구에 가까이 감으로써 내진설계에 이바지하였음에 의의를 두었다.

참고문헌

- (1) D. J. Ewins , *Modal Testing: Theory and Practice*, Bruel & Kjaer Korea Ltd.
- (2) Leonard Meirovitch, 1967, *Analytical Methods in Vibrations*, Macmillan Publishing Co., Inc. New York, pp. 1~19.
- (3) Leonard Meirovitch , 1970, *Meirovitch Methods of Analytical Dynamics*, McGraw-Hill Book Company, pp. 45~100.
- (4) Willam T. Thomson, Marie Dillon Dahleh, 1993, *Theory of Vibration with Application*, Fifth Edition, PRENTICE HALL, pp. 49~81.
- (5) Ansys, Inc., *Ansys Dynamics*, Users Guide for Revision 5.1