

산업용 구조물의 방진장치
성능 평가 방법에 관한 연구
A study on the evaluation method
of isolation system for industry structure

°정 정교*, 박 해동*, 김 두훈*, 최 현*, 박 상규**

Jeoung-Kyo Jeoung*, Hae-Dong Park*, Doo-Hoon Kim*
Hyun Choi* Sang-Kyu Park**

ABSTRACT

Vibration and vibration-induced noise, major sources of occupant complaint, are increasing in modern buildings, Lighter weight construction and equipment located in penthouses or intermediate level mechanical rooms increase structure-bone vibration and noise transmission.

In this paper discusses about testing vibration isolation systems and about the effectness of floor flexibility for vibration transmission.

1. 서 론

각종 회전체 장비, 즉 공기조화기 및 송풍기, 펌프, 냉각탑, 냉동기, 패키지 에어컨, 팬필터유니트 등은 회전부분의 불균형과 장비 가동시 발생하는 기체 및 액체의 운동으로 장비의 불균형이나 기체 및 액체의 소용돌이 혹은 전동기와 연결 불량 등에 따라 진동이 발생한다. 또한 이러한 회전장비에 접속되는 덕트나 파이프 배관은 회전장비의 진동으로 진동하는 동시에 그 안을 지나는 유체의 유속, 와류현상, 워터해머현상 등에 의해서도 진동이 발생한다. 이러한 회전기계의 진동은 이들 원인중 회전체의 불평형에 기인한 진동이 대부분을 차지하며, 장비기초에서 바닥으로, 바닥에서 건물 구조체로 전달되어 건물 구조체음, 즉 고체음을 발생시키는 원인이 된다. 또한 인체에 감각적, 생리적, 신체적 영향을 주어 인체에 불쾌감을 주며

근무의욕을 감퇴시키는 원인이 된다. 일반적으로 다양한 진동원에 의해 발생하는 진동이 구조물로 전달되는 것을 차단하기 위해 단성지지를 수행한다.

탄성지지를 이용한 방진시설은 가진원(회전체)와 가진원이 부착되는 기초부 그리고 관성 블록과 관성블록과 구조물을 연결하는 방진제품으로 이루어지며 방진제품에 의해 발생하는 고유진동수가 가진원 및 관성블록의 유연모드 주파수에 비해 아주 낮다는 가정하에 6자유도계의 모형으로 단순화 가능하며 더 나아가 실제 제품의 대칭성이 존재한다면 2~3개의 자유도계로 표현할 수 있으며 각 모드를 비연성화 하면 독립된 1자유도계의 진동계로 해석할 수 있게 된다. 주로 초기 단계의 방진설계는 1자유도화된 모형을 이용하여 목표 방진 효율을 결정하게 되며 그 목표치를 이용하여 방진시설을 설치한 후 진동 저감 효율을 측정하여 설계치와 비교 검증하게 된다.

본 논문에서는 진동 측정을 통해 방진효율을 구하는 방법에 대해 기술하고 1 자유도 시스템으로

* 유니슨 산업(주) 기술연구소

** 연세대학교 환경공학과

방진 설계된 계의 특성과 실제 가진원과 환경을 묘사한 실험값을 비교 분석하고 다자유도 시스템으로 확장하였을 때의 평가 방법에 대해 고찰하려고 한다. 방진시설 설치후, 진동 연성에 의한 영향이 설계치 및 방진 효율에 미치는 영향에 대해 고찰한 후, 산업용 구조물의 방진장치 성능평가 방법을 논하고자 한다.

2. 본 론

2.1 방진설계

가) 방진 설계 순서

방진장치의 설계를 위해서는 다음과 같은 변수들에 대한 정보 및 제한 조건들을 결정해야 한다.

- i) 관성 블록 및 받침판을 포함한 기계 장치계의 전체 중량 및 무게 중심
- ii) 기계장치의 작동회전수와 가진력의 작용점 및 크기
- iii) 적절한 전달율의 선정
- iv) 스프링 상수, 감쇠기의 감쇠계수 계산
- v) 스프링 배치 및 스프링 선택의 주의 점
- vi) 연성계에 대한 고찰

등을 고려해야 하며 각 항목간의 순서는 그림 2.1과 같다. [1]

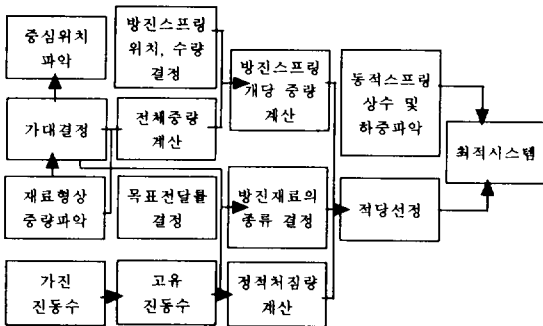


그림 2.1 탄성방진설계의 순서

위의 조건을 포함하는 탄성지지를 이용한 방진 설계시 방진시스템은 기계와 받침 탄성계 그리고 기초로 이루어진다. (그림 2.2)

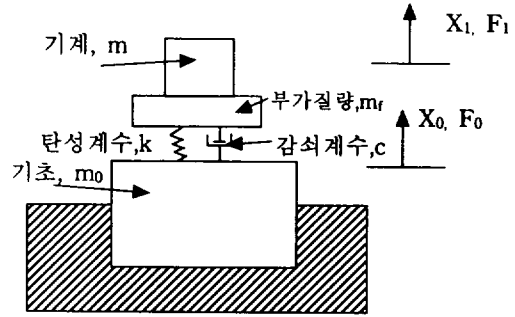


그림 2.2 탄성지지를 이용한 방진

나) 방진 제품 성능 측정

그림 2.2의 방진시스템의 성능은 전달율의 개념으로 표현되는데, 그 목적에 따라 세가지 개념으로 나누어 생각할 수 있다.

- i) 가진력 F_1 에 대해 지반으로 전달되는 힘 F_1 의 저감
- ii) 가진력 F_1 에 의해 응답하는 변위 X_1 의 크기 저감
- iii) 지반의 진동 변위 X_0 에 의하여 유발되는 기계의 진동변위, X_1 의 저감

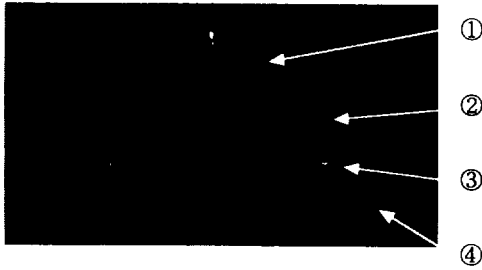
i)의 경우 가진원에서 발생하는 것이 구조물로 전달되는 것을 차단하는 목적이며 ii)의 경우 작업대와 같이 가진원이 있는 위치의 진동이 어느 기준을 만족해야 하는 경우가 되며 iii)의 경우는 외부 설비에 의한 진동이 지반운동을 통해 구조물로 전달되는 경우를 나타낸다.

논문에서 다루고자 하는 문제는 가진원(기계)에서 발생하는 가진력(F_1)에 의해 구조물로 전달되는 힘을 줄이는 경우로 응답하는 구조물의 진동 변위 혹은 가속도(X_0)를 감소하는 것을 목적으로 한다. 따라서 방진 제품의 성능은 가진원이 구조물에 고정되었을 때의 구조물 가속도와 힘을 방진 설비를 행한 후, 측정된 구조물의 가속도와 힘과 비교하였다. [2]

다) 실험 대상

방진제품 성능 평가를 위해 실물 크기의 시스템을 제작하였다. 시스템의 형상은 그림 2.3과 같다. 좌표축은 상하운동을 하는 방향을 수직방향 (vertical axis, z), 모터축을 축방향(longitudinal

axis, y)라고 하고 두축에 수직한 축을 횡방향축 (lateral axis,x)이라고 정의한다.



- ① 가진원 : 불평형 가진기 (모터)
- ② 관성질량
- ③ 방진제품
- ④ 유연 기초부

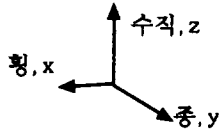


그림 2.3 방진 시스템

④유연 기초부는 일반 구조물(사무용 건물)의 바닥을 묘사하는 것으로 수직 방향 고유진동수는 약 14 Hz에 위치하고 있다.

표 2.1 가진기의 사양

사 양	값	사 양	값
불평형질량	90 g	편심거리	25 cm
최소 주파수	3 Hz	최소 가진력	8.0 N
최대 주파수	30 Hz	최대 가진력	800.4 N

2.2 방진 이론

가) 1 자유도 시스템

2.1 절의 나항 i)의 경우 전달율(Transmissibility)은 다음과 같다.^[3]

$$TR = \frac{F_0}{F_1} = \frac{\sqrt{1+(2\zeta r)^2}}{\sqrt{(1-r^2)^2+(2\zeta r)^2}} \quad \text{식 1}$$

ii)의 경우 증폭율(Magnification factor) 이라고 하며 식 2와 같다.

$$MF = \frac{X_1}{X_{static}} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2+(2\zeta r)^2}} \quad \text{식 2}$$

iii)의 경우 변위 전달율과 하중전달율은 각각 식 3과 식4 처럼 정의된다.

$$TR = \frac{X_1}{X_0} = \frac{\sqrt{1+(2\zeta r)^2}}{\sqrt{(1-r^2)^2+(2\zeta r)^2}} \quad \text{식 3}$$

$$FTR = \frac{F_1}{kX_0} = r^2 \frac{\sqrt{1+(2\zeta r)^2}}{\sqrt{(1-r^2)^2+(2\zeta r)^2}} \quad \text{식 4}$$

$\zeta = 0.1$ 일 때를 기준으로 식 1, 식2, 식 4의 그래프를 함께 표현하였다.

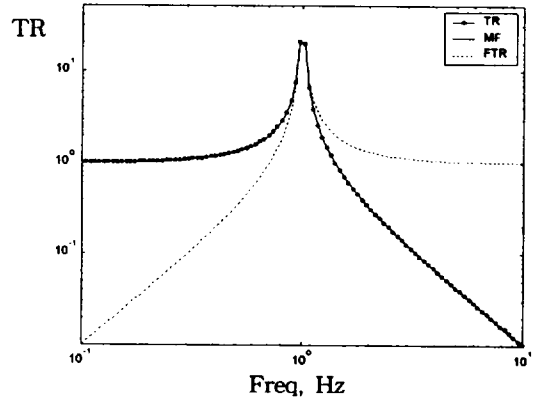


그림 2.4 전달율 그래프

나) 6자유도계 시스템

앞서 말한 바와 같이 구조물의 무게 중심과 가진 위치가 일치하고 대칭형상을 띠는 방진시스템의 경우 1 자유도 모델로 충분히 표현 가능하나 실제의 경우 가진 위치가 무게 중심과 틀리거나 비대칭 형상을 하여 모드가 연성되어 나타난다.

이를 묘사하는 6자유도 시스템의 모형과 운동방정식은 아래와 같다.^[4]

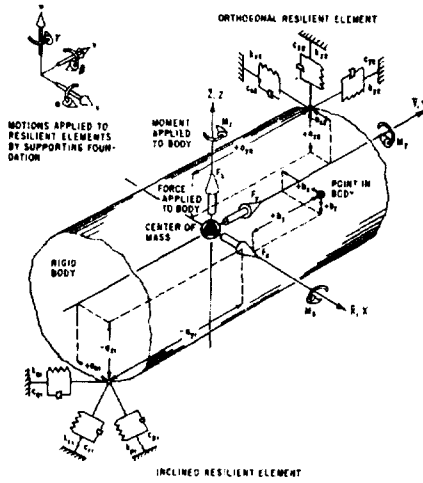


그림 2.5 자유도 모형

$$m \ddot{x}_c + \sum k_{xx}(x_c - u) + \sum k_{yy}(y_c - v) + \sum k_{zz}(z_c - w) + \sum (k_{xx}a_y - k_{yy}a_x)(a - a) + \sum (k_{xx}a_z - k_{zz}a_x)(\beta - \beta) + \sum (k_{yy}a_x - k_{xx}a_y)(\gamma - \gamma) = F_x$$

$$I_{xx} \ddot{\alpha} - I_{yy} \ddot{\beta} - I_{zz} \ddot{\gamma} + \sum (k_{xx}a_y - k_{yy}a_x)(x_c - u) + \sum (k_{yy}a_z - k_{zz}a_y)(y_c - v) + \sum (k_{xx}a_y - k_{yy}a_x)(z_c - w) + \sum (k_{yy}a_x^2 + k_{zz}a_y^2 - 2k_{xx}a_ya_z)(a - a) + \sum (k_{xx}a_ya_z + k_{yy}a_xa_z - k_{zz}a_xa_y - k_{yy}a_x^2)(\beta - \beta) + \sum (k_{xy}a_ya_x + k_{yy}a_xa_y - k_{xx}a_ya_x - k_{zz}a_y^2)(\gamma - \gamma) = M_x$$

$$m \ddot{y}_c + \sum k_{xx}(x_c - u) + \sum k_{yy}(y_c - v) + \sum k_{zz}(z_c - w) + \sum (k_{yy}a_y - k_{xx}a_x)(a - a) + \sum (k_{xx}a_z - k_{zz}a_x)(\beta - \beta) + \sum (k_{yy}a_x - k_{xx}a_y)(\gamma - \gamma) = F_y$$

$$I_{yy} \ddot{\beta} - I_{xx} \ddot{\alpha} - I_{zz} \ddot{\gamma} + \sum (k_{xx}a_x - k_{yy}a_y)(x_c - u) + \sum (k_{yy}a_z - k_{zz}a_y)(y_c - v) + \sum (k_{xx}a_y - k_{yy}a_x)(z_c - w) + \sum (k_{xx}a_ya_x + k_{yy}a_xa_z - k_{zz}a_xa_y - k_{yy}a_x^2)(a - a) + \sum (k_{xx}a_x^2 + k_{zz}a_x^2 - 2k_{xx}a_xa_z)(\beta - \beta) + \sum (k_{xy}a_xa_x + k_{yy}a_xa_y - k_{xx}a_ya_x - k_{zz}a_x^2)(\gamma - \gamma) = M_y$$

$$m \ddot{z}_c + \sum k_{xx}(x_c - u) + \sum k_{yy}(y_c - v) + \sum k_{zz}(z_c - w) + \sum (k_{xx}a_y - k_{yy}a_x)(a - a) + \sum (k_{xx}a_z - k_{zz}a_x)(\beta - \beta) + \sum (k_{yy}a_x - k_{xx}a_y)(\gamma - \gamma) = F_z$$

$$I_{zz} \ddot{\gamma} - I_{xx} \ddot{\alpha} - I_{yy} \ddot{\beta} + \sum (k_{xx}a_x - k_{yy}a_y)(x_c - u) + \sum (k_{yy}a_z - k_{zz}a_y)(y_c - v) + \sum (k_{yy}a_x - k_{xx}a_y)(z_c - w) + \sum (k_{xy}a_ya_x + k_{yy}a_xa_z - k_{xx}a_xa_y - k_{zz}a_y^2)(a - a) + \sum (k_{xy}a_xa_x + k_{zz}a_xa_y - k_{xx}a_ya_x - k_{yy}a_x^2)(\beta - \beta) + \sum (k_{xx}a_y^2 + k_{yy}a_x^2 - 2k_{xy}a_xa_y)(\gamma - \gamma) = M_z$$

식 5

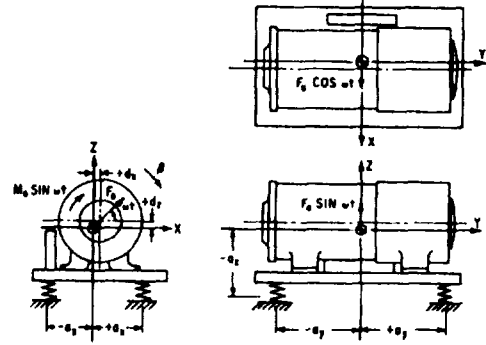


그림 2.6 방진 시스템의 모형

그림 2.3은 그림 2.6의 방진 시스템의 모형과 같이 표현된다. 먼저 불평형 가진력이 속도(ω)와 크기(F_0)로 회전한다. 힘은 Y축에 평행한 축을 기준으로 발생하나 d_x , d_z 만큼 떨어진 위치에 있다. 따라서 불평형 가진력 F_0 에 의해 발생하는 힘은 식 6로 정리된다.

$$\begin{aligned} F_x &= F_0 \cos \omega t & M_x &= 0 \\ f_y &= 0 & M_y &= F_0(d_z \cos \omega t - d_x \sin \omega t) \\ F_z &= F_0 \sin \omega t & M_z &= 0 \end{aligned}$$

식 6

그리고 대칭성에 의해서 식 7, 식 8이 성립하므로

$$I_{xy} = I_{xz} = I_{yz} = 0 \quad \text{식 7}$$

$$\begin{aligned} k_{xx} &= k_p = k_x, & k_{yy} &= k_q = k_y, & k_{zz} &= k_r = k_z, \\ k_{xy} &= k_{xz} = k_{yz} & &= 0 \end{aligned}$$

식 8

식 5를 단순화 할 수 있다.

2.3 실험 장비

실험은 그림 2.3 과 같은 시스템을 구성하였고 모터에 의한 불평형 가진력에 의해 발생하는 진동이 바닥에 전달되는 힘 및 바닥의 진동 가속도를 측정하였다. 또한 바닥이 완전 강체의 경우와 유연한 바닥인 경우에 대하여 실험을 수행 하였다. 전자의 경우 실험실 바닥에 방진 마운트 시스템을

그대로 장착 하였으며 후자의 경우 유연 바닥에 방진 마운트 시스템을 설치 하였다.

2.4 실험 결과

가) 강체 바닥의 경우

바닥은 그림 2.3 의 바닥부④가 지면으로 구동 주파수의 10배 이상이므로 고정부로 가정할 수 있다. 측정을 위해 3개의 가속도계를 바닥에 부착하여 평균값을 계산 하였다.

가진기의 사양은 표 2.1과 같고 5, 6.5, 8.25, 9.75, 11.5, 16.5, 20.25, 24.75, 29.75 Hz의 9 개의 주파수에 대하여 실험을 수행 하였다.

강체를 이용하여 바닥과 부가질량을 연결하였을 때와 방진스프링으로 연결하였을 때 바닥 가속도 비를 측정하였고 이를 1 자유도 수치 모형으로 계산 한 값과 비교하여 그림 2.7에 나타내었다.

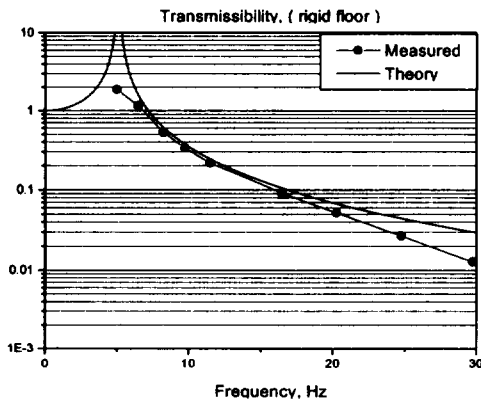


그림 2.7 강체 바닥의 경우 진동 전달율

위의 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 강체바닥의 경우 진동 전달율은 1 자유도 이론 값과 유사함을 알 수 있다.

나) 유연 바닥의 경우

시험 장치의 구성 및 측정 방법의 강체 바닥의 경우와 동일하다. 반면 유연 바닥의 경우 1 자유도계로 모형화 하는 것은 많은 무리가 따르며 강체 바닥의 경우와 비교할 때 바닥의 고유진동수가 진동 전달율에 크게 영향을 미칠 것이다.

먼저 방진스프링이 설치된 상태에서 모달 테스트를 수행하여 어느 주파수에서 어떤 모드로 방진 시스템이 거동하는지 살펴보았다. 측정 그림은 다음 표 2.2 와 같다.

표 2.2. 유연 바닥 위의 방진 시스템의 모드 형상

고유진동수, Hz	모드 형상
3.66	<p>부가질량의 수직모드</p>
6.2	<p>부가질량의 롤모드</p>
14.16	<p>유연 바닥의 수직모드</p>
20.28	<p>유연 바닥의 롤모드</p>

측정된 모드형상은 우선 부가 질량의 수직 운동

과 모터 회전축에 대한 회전 운동 발생하고 바닥 역시 구동 주파수 범위 내에서 수직 방향 및 회전 방향의 모드가 발생함을 알 수 있다.

위 결과를 고려하여 1 자유도 수치 모형으로 표현하였을 때 진동 전달율을 측정값과 비교하여 그림 2.8에 나타내었다.

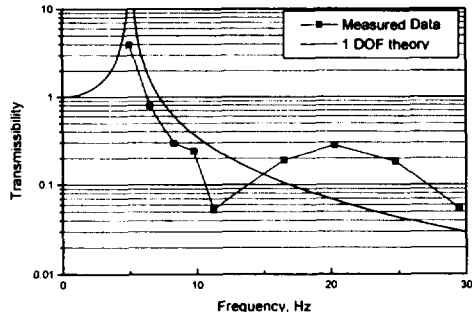


그림 2.8 유연 바닥의 진동 전달율

위의 그림과 표2.2에서 나타난 것과 같이 20 Hz 부근에 바닥 공진 영역이 있으므로 진동 전달율이 예측치 보다 크게 나타남을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 진동 측정을 통해 방진효율을 구하는 방법에 대해 기술하고 1 자유도 시스템으로 방진 설계된 계의 특성과 실제 가진원과 환경을 묘사한 실험값을 비교 분석하였다. 건물의 지하 층과 같이 바닥 조건이 강체에 가까울 경우 진동 전달율은 1 자유도계로 모형화 한 값으로도 충분하나 건물의 옥상이나 층간에 설치되는 방진 시스템의 경우 바닥과의 연관 관계를 고려하여 방진 시스템을 구성해야 하며 진동 전달율 역시 1 자유도계로 모형화 하였을 경우 보다 커지게 되므로 바닥의 진동특성을 고려한 방진 설계가 요구된다.

참고문헌

1. "소음 진동 편람", 소음진동공학회, pp316, 1995
2. "VIBRATION ISOLATION AND CONTROL", A.S.H.R.A.E , CHAPTER 52, 1987
3. Daniel J. inman "Engineering vibration", prentice hall , chapter 2, 1996
4. Crril M. Harris , "shock and vibration handbook", 4th Edition, McGrawHill , Chapter 3