

연구소 建物の 슬래브 振動 性能改善 研究

A Study on the Control of the Floor Vibration in a Research Building

백 인 회*
Baik, In-Whee

강 호 섭**
Kang, Ho-Sub

손 영 규***
Sohn, Young-Kyoo

Abstract

A vibration in the building occurs by influences of the facility equipment and the structural system. As the building recently becomes higher and bigger, the vibration in the floor slab is issued. Specially, the vibration with 4-8Hz frequency is harder to control than any other range of frequency. This vibration easily affects human sensibility and often makes the resonance phenomenon by corresponding with the floor slab's natural frequency when people and heavy equipments move. Moreover, the permission regulations for the vibration of the building are established by building's purposes. However, it is not subdivided in detail and sometimes ambiguous to each client. Even though the vibration could cause negative influences in a research building, there is not the vibration criterion for a research building. Therefore, it is necessary to set up its own vibration criterion with the client before building and to keep checking this vibration criterion under the construction.

This study proposes the reasonable control methods and the vibration criterion for floor slab's vibration which are adapted to the R4-project, The R4-project is a research building and a high-rise building also. Accordingly, this study could help to the next similar project in the design and the construction phase.

키워드 : 바닥진동, 고유진동수, 동특성, 동조질량감쇠기

Keywords : Floor Vibration, Natural frequency, Dynamic Characteristics, TMD : Tuned Mass Damper

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

건물진동은 일반적으로 설비장비 및 구조시스템의 영향으로 많이 발생한다. 특히 최근에 건물의 대형화, 초고층화 및 대공간화로 인해 건물의 슬래브 진동의 중요성이 강조되고 있다. 특히 사람이 많이 느끼는 4-8Hz 진동의 경우에는 사람과 중량물 이동시의 진동이 건물의 고유진동수와 일치하여 공진현상에 의한 진동이 발생하고 있으며 이를 제어하기는 매우 어렵다. 또한 진동에 대한 허용 규정치는 건물의 용도별로 구분은 되어있으나 이를 세분화되어 있지 않고 사람에 따라 느끼는 정도가 다를 수 있다. 특히 연구소 건물에서는 진동이 연구 환경에 부정적인 영향을 미칠 수 있음에도 불구하고 이에 대한 진동기준이 없는 실정이다. 따라서 설계 시부터 각각의 건물 성격에 부합되는 진동기준을 착공 전에 설정하고 공사 중에도 세심한 관리가 필요하다.

이에 따라 본 연구의 목적은 연구소 건물이자 대형 고층 건물인 R4에 적용된 슬래브 진동에 대한 성능개선 공사의 합리적인 방안과 진동기준 그리고 향후 프로젝트 대책 안을 제시하여 추후 유사 프로젝트의 설계 및 공사 수행 시 도움이 되고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 실제 대형 고층건물의 슬래브 진동에 대한 성능개선공사를 적용한 사례를 분석, 연구하여 다른 대형 고층건물에서도 유사 사례 발생 시 도움을 주고자 한다. 본 연구의 사례 분석은 연구실 공간이 있는 고층부와 특수실험실이 있는 저층부로 나누어지고, 쾌적한 공간 확보를 위해 경간 14.5m, 천정고는 2.8m이며, 기준층 평면은 84m x 42m의 규모인 연구소 건물의 지상층 공조실 및 기준층 슬래브를 대상으로 하였으며, 다음과 같은 방법으로 진행하였다.

- 1) 사례분석 대상건물의 기준층 슬래브 진동원인을 분석하고 건물용도에 적합한 진동기준을 파악한다.
- 2) 연구소 건물의 진동기준 설정을 통하여 다각도로 적용하고 도출한 기준층 슬래브 성능개선공사의 합리적인 방안을 제시한다.
- 3) 개선 전/후의 성능평가를 통한 기준층 슬래브 성능개선공사의 합리적인 방안을 검증하여 연구소 건물의 용도에 적합한 진동기준과 향후 프로젝트대책을 제시한다.

2. 진동 원인분석 및 진동기준

2.1 진동 원인분석

사례분석 대상인 본 연구소 건물의 경우 7층 공조실 및 기준

* 정회원, 삼성물산(주)건설부문 현장소장/복합시설Expert

** 정회원, 삼성물산(주)건설부문 공사차장

*** 정회원, 삼성물산(주)건설부문 공무주임

층 슬래브에 진동이 발생하였으며, 8층 슬래브에 발생된 진동은 7층 공조실 공조기의 비정상적인 운전모드에서 발생하는 진동성분이 8층 슬래브 바닥구조의 공진영역과 일치하여 문제가 발생하였고, 기준층의 경우는 DVM 실내기의 영향으로 인한 슬래브 진동이 발생하여 성능개선을 하였으나, 정숙한 환경을 요하는 연구소 건물의 특성상 다른 건물보다 낮은 진동수준이 요구되어 추가 성능개선을 하였다.

2.1.1 8층 슬래브 진동 분석

공조기의 VAV-System상에서 송풍기 회전수 제어대역은 반드시 송풍기 성능곡선 상의 운전범위 내에서 운전이 되도록 설정되어야 하나, 본 건물은 송풍기의 운전대역이 성능 곡선도상에 나타나지 않은 범위에서 공조기가 운전되어 진동이 발생하였다.

아래 성능곡선도상에서 71,995CMH(33Hz)이하의 대역에서 Supply-Fan이 상시 운전될 시는 Duct관로에 격심한 공기의 맥동현상이 발생하여 불안정한 장비운전상태로 인한 진동이 발생하였다.

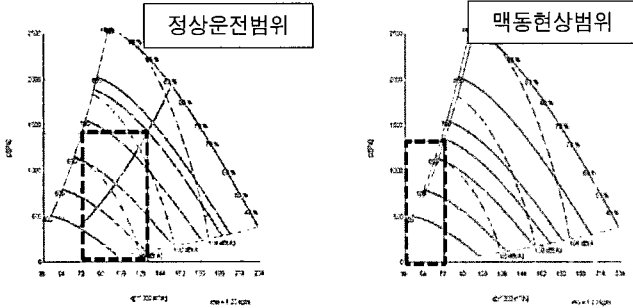


그림 2.1 공조기 성능곡선

8층 슬래브의 진동원인은 공조기의 비정상 운전 범위에서 맥동현상 발생으로 덕트 및 공조실 바닥을 통해 7층 공조실 상부인 8층 슬래브에 전달되어 건물구조의 고유 진동수와 일치하여 공진에 의한 진동이 발생되었다. 7층 공조실 진동으로 인해 8층 바닥에 나타나는 진동은 정상 운전범위를 벗어난 조건에서 공기 송출시 기류에 의해 나타나는 것으로 확인되었으며, 과도한 진동이 발생할 때 나타나는 지배 주파수는 6.0Hz 성분인 것으로 나타났다. 한편 Fan상부의 곡관에서 진동이 가장 심하게 나타나는 것으로 보아 진동은 곡관/직관 등 덕트에서 정상 운전조건에서 벗어나 운전할 때 발생하는 것으로 판단되며, 이러한 6.0Hz의 진동이 8층 바닥의 고유진동 주파수와 일치하는 영역에 존재하여 비교적 높은 진동을 유발하는 것으로 평가된다.

2.1.2 기준층 슬래브 진동 분석

기준층 슬래브 진동은 슬래브 진동 특성과 DVM 실내기의 진동 등으로 분석하였다.

1) 슬래브 진동특성 분석결과 기준건물(A)과 본 건물(B) 모두 국제기준을 만족하나 본 건물의 진동 지각정도 차이가 나는 큰 원인을 정밀 분석한 결과, 아래 그림 2.2 및 2.3과 같이 초기 가속도는 유사하나, 진동감쇠 차이 발생으

로 기준 건물(A)의 진동이 본 건물(B)의 진동 보다 감쇠가 빨라 느끼지 못하는 것으로 분석된다. 건물의 진동감쇠 차이발생은 High Partition설치, 구조부재 크기 평면배치형태, 설비 덕트 설치분포, 사무실 건축배치 등이다.

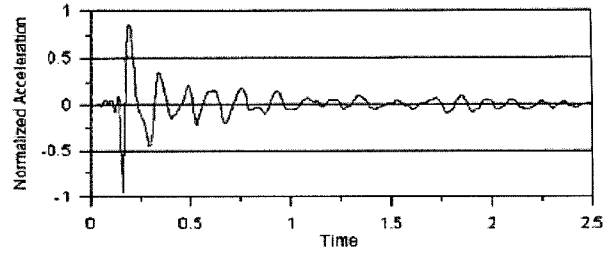


그림 2.2 기준 건물(A) 진동 감쇠비

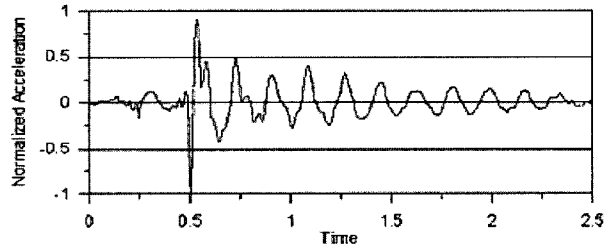


그림 2.3 본 건물(B) 진동 감쇠비

2) DVM 실내기의 진동을 측정된 결과, 실내기 26대중 실내기 중 5개소(송풍약 기준)에서 아래 그림과 같이 DVM 실내기 진동기준인 1.4cm/sec² (1.4gal)를 초과하였다.

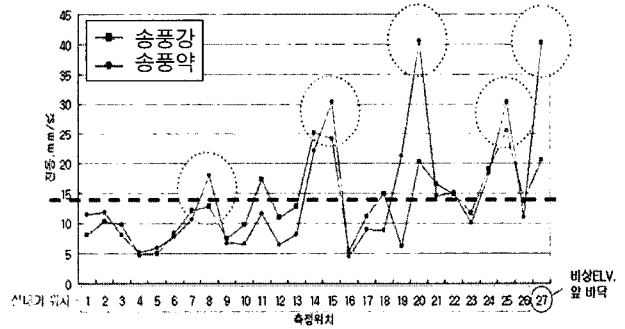


그림 2.4 위치별 진동 측정 그래프

진동이 심한 위치에서는 송풍약 운전 시 송풍강 대비 진동 레벨이 최대 2배 정도의 차이가 발생되었다.

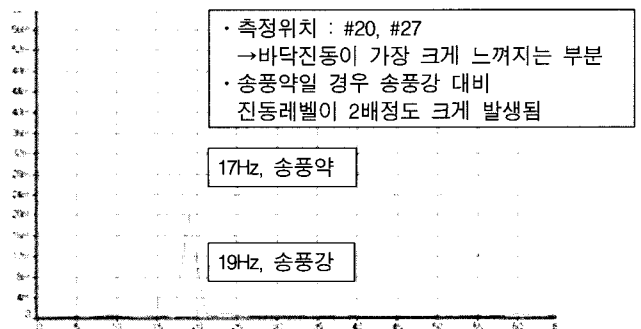


그림 2.5 주파수 분석

DVM 실내기 진동이 슬래브에 전달되어 진동이 발생되었다. 고무 와셔 Type의 방진재가 정확히 진동 차단을 시키지 못해 장비의 진동이 슬래브 고유진동과 일치하여 공진에 의한 진동이 발생하였다.

2.2 진동기준

일반적으로 구조물 관점에서 다루고 있는 국제적인 규격의 진동허용 규제치 주파수 범위는 1~100Hz 범위에서 이루어지고 있다. 인체의 진동반응을 제한하고 있는 ISO 2631에서는 주파수 범위를 1~80Hz로 한정하고 있으며, 건물의 피해정도를 규정하고 있는 DIN 4150에서는 100Hz이하, Bachmann&Ammann이 제안하고 있는 인간 지각기준에서도 1~100Hz까지 다루고 있다. 이와 같이 진동의 관점에서 다루고 있는 주파수 범위는 특별한 경우가 아니고는 100Hz를 넘지 않고 있다. 인간지각 특성은 주관적이고 정성적이기 때문에 이에 대한 기준이 여러 가지 형태로 제시되고 있다. 따라서 진동허용 규제치를 결정하는 문제는 건물의 사용용도와 피해특성에 의하여 결정하는 것이 우선하며, 용도에 적합한 진동수준을 합리적으로 결정하는 것이 바람직하다.

2.2.1 진동영향에 대한 지각기준

인체관점에서의 진동 허용기준은 사람의 감성과 관련된 안락한 거주환경과 환경 규제치 차원에서 평가하는 항목이 있으며, 아래 표 2.1은 느끼는 진동 지각정도이다.

표 2.1 진동영향에 대한 지각수준 (Bachmann & Ammann)

지각 정도	가속도 (mm/s ²)	속도 (mm/s)
	1 - 10Hz	1 - 10Hz
지각하지 못함	10	0.16
약간 지각	40	0.64
확실히 지각	125	2.0
짜증을 일으킴	400	6.4
불쾌하고 지속 시 고통스러움	1000	16.0
해를 끼침	> 1000	> 16.0

2.2.2 ISO 2631 기준

1) ISO 2631규정에 따른 장소별 진동가속도 기준은 아래 그림 2.6과 표 2.2를 이용하여 결정한다. 그림 2.6은 ISO에서 규정하는 기준곡선으로써 표 2.2를 이용하여 각 장소별 곱셈 인자를 기준곡선에 곱하여 결정된다.

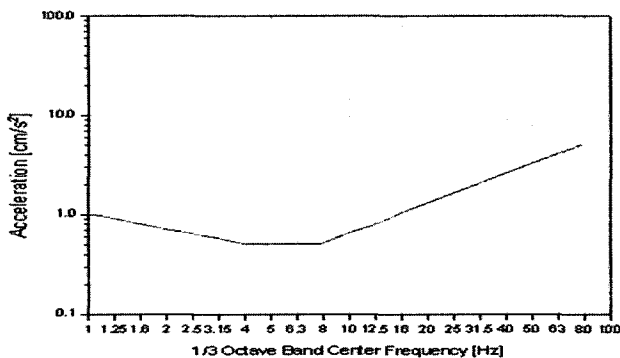


그림 2.6 가속도에 대한 건물진동 수직증가 반응곡선: 기준곡선

표 2.2 인체응답에 대한 건물진동의 만족스러운 진폭을 평가하기 위한 곱셈인자의 범위

장소	시 간	연속 진동
중요한 작업 장소(병원의 수술실, 정밀도를 요하는 실험실 등)	낮/밤	1
	낮	2 ~ 4
주거지역	밤	1.4
	사 무 실	4
작업장	낮/밤	8

2) ISO 2631규정에 따른 인체 진동 응답에 따른 각 장소별 진동 허용기준을 나타내면 아래 그림 2.7과 같다.

(진동 허용기준 = 기준곡선 * 장소별 인자)

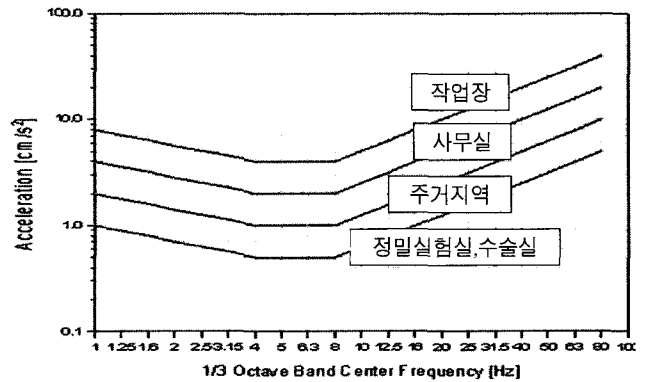


그림 2.7 장소별 기준에 따른 가속도에 대한 건물진동 수직 증가 반응곡선

2.2.3 본 연구소 건물 진동기준

아래 표와 같이 ISO 주거지역수준인 1.0gal로 설정한다.

표 2.3 당 건물에서의 진동기준

장 소	출 처	허용진동레벨
사 무 실	ISO 2631	2.0 gal (cm/s ²)
주거지역	ISO 2631	1.0 - 2.0 gal (cm/s ²)
본 건물 진동기준 (주거지역 수준)	ISO 2631	1.0 gal (cm/s ²)

Note 1) 3인 보행 시 기준 임.

2) Inertance 0.034gal/N 은 진동가속도레벨 1.02gal에 해당.

3. 성능개선

3.1 8층 슬래브 성능개선

8층은 1차와 2차로 나누어 성능개선공사를 실시하였다. 1차 성능개선공사는 Duct행거 방진스프링 설치, Duct 지지 방식 변경, Duct 진동 전달부위 Flexible처리, 보와 간섭부위 이격 등으로 개선하였다. 2차 성능개선공사는 지지대 설치로 슬래브 보강, Duct Chamber설치, 공조기 운전모드 조정, 공조기 내부의 지주보강, 공조기에 연결된 전선관 Flexible처리, 공조기 내부 필터 교환/청소, OA급기 Damper 등으로 개선하였다.

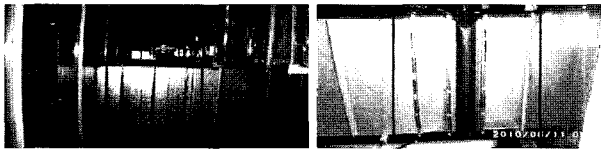
3.1.1 8층 슬래브 1차 성능개선

- 1) 저주파 특성의 진동을 상부 슬래브에 전달하는 것을 차단할 목적으로 상부 지지에서 하부 지지로 변경하였다.
- 2) Duct진동에 의한 슬래브 진동차단을 위해 Duct와 보의 면을 분리하였다.
- 3) Duct Hanger에 진동차단을 위한 Hanger Rod Type을 방진 Spring Type으로 변경 설치하였다.



<설치전> <설치후>
그림 3.1 Duct Hanger 방진Spring 설치

- 4) Duct진동 전달부위에 Flexible로 설치하였다.



<설치전> <설치후>
그림 3.2 Duct 진동 전달부위 Flexible Joint

3.1.2 8층 슬래브 2차 성능개선

- 1) 7층에 지지대를 설치하여 슬래브 보강을 유도하였으나 진동에 대한 강성은 높인 반면 효과는 미흡하였다.
- 2) 공조기 자체 진동축소를 위한 내부보강을 설치하였다.
- 3) 실 부하 감소로 저점운전이 되어 맥동현상에 의한 진동 발생을 억제하기 위해 공조기 운전영역을 저점운전이 되지 않도록 운전프로그램 조정 및 공조기 대수 운전 실시 등의 공조기 운전모드를 조정하였다.

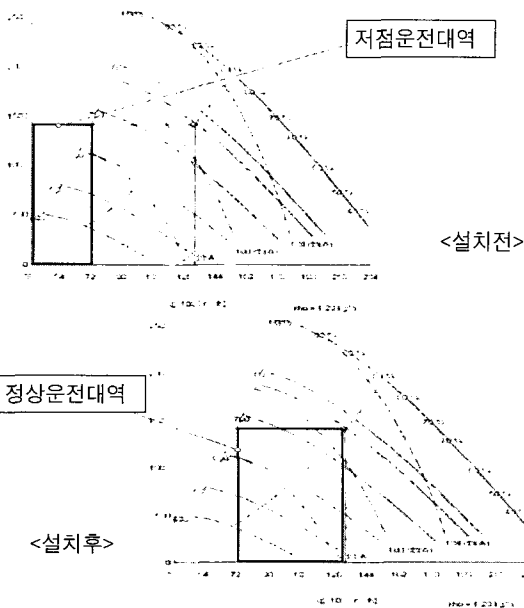
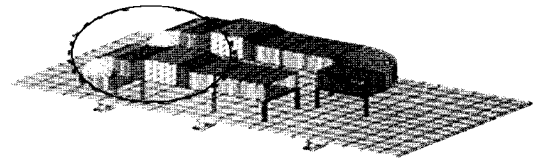
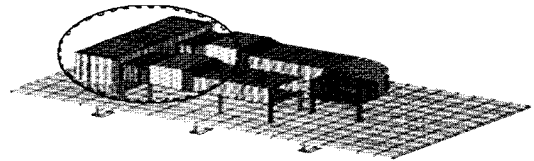


그림 3.3 공조기 운전모드 조정

- 4) 맥동현상 저감을 위해 공조기 토출 부위에 닥트 챔버 (Duct Chamber)를 설치하였다.



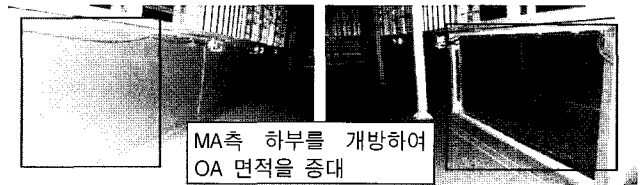
<설치전>



<설치후>

그림 3.4 Duct Chamber 설치

- 5) 공조기 필터의 막힘으로 기내정압 상승이 되어 내부기류 및 정압감소를 위해 필터의 교환/청소를 하였다.
- 6) 전선관에 의한 진동 전달 방지목적으로 공조기에 연결된 전선관을 Flexible로 처리하였다
- 7) 7층 공조실 공조기에 외기 도입 시 기내 정압 상승으로 맥동현상이 발생되어 이를 해소하기 위해 OA면적을 확대하는 개선공사를 시행하였다.



<설치전> <설치후>
그림 3.5 공조기 OA급기 Damper 추가설치

- 8) 7층 공조실 공조기의 성능개선 후 안정성 확보 및 진동 저감을 위해 8층 바닥 슬래브에 총 28개의 동조질량감쇠기(TMD : Tuned Mass Damper)를 설치하였다.

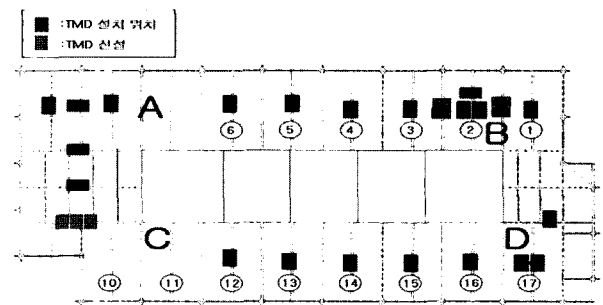
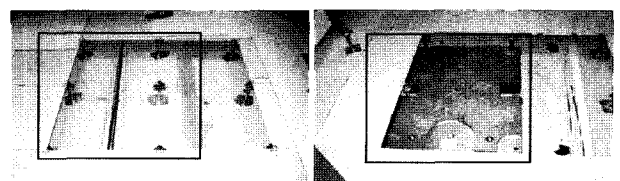


그림 3.6a 8층 바닥슬래브 TMD 배치도



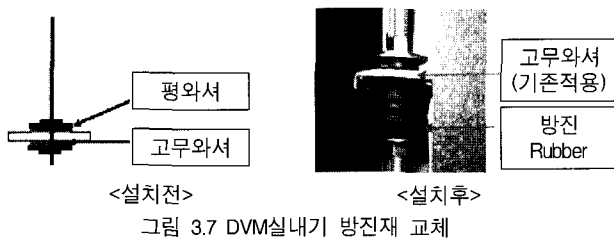
<TMD 설치전> <TMD 설치후>
그림 3.6b 8층 바닥슬래브 TMD 설치 전/후

3.2 기준층 슬래브 성능개선

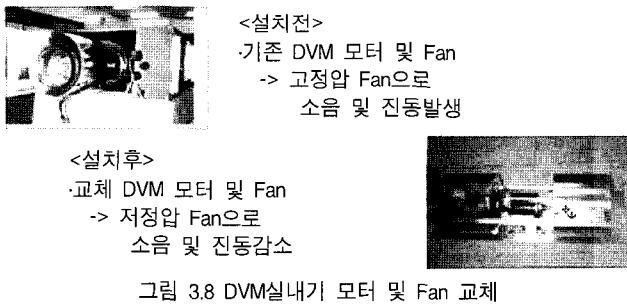
기준층 슬래브는 1차와 2차로 나누어 성능개선을 실시하였다. 1차 성능보완은 진동방지 고무DAMPER 물성치 변경, DVM 실내기 모터 및 Fan 교체 등으로 완료하였으나 추가 요청에 의하여 시행한 2차 성능개선은 현장 시뮬레이션을 통한 각층별 고유진동수 측정 후 동조질량감쇠기(TMD : Tuned Mass Damper)를 설치하여 주거지역 수준인 1.0 gal 이하로 개선하였다.

3.2.1 기준층 슬래브 1차 성능개선

1) DVM 실내기 방진재 교체 : 천정에 매달린 DVM 실내기 진동이 위층 바닥에 미치고, 인접한 DVM 실내기와의 파동 중첩으로 진동이 증폭되는 현상 발생하는 것을 방지하기 위해 DVM 실내기 방진재를 당초 고무와서 Type에서 방진 Rubber Type으로 변경하였다.



2) DVM실내기 모터 및 Fan 교체 : 고정압 Fan을 저정압 Fan으로 교체하여 소음과 진동이 감소되었다.



3.2.2 기준층 슬래브 2차 성능개선

Rubber형 방진재 설치와 DVM 실내기 모터 및 Fan 교체 등의 1차 성능개선공사에도 불구하고 정숙한 환경을 요구하는 연구소 건물의 특성상 오피스 건물보다 낮은 진동수준이 요구되어 현재의 진동수준 파악 후 추가 진동저감을 위한 대책이 필요하였다. 건물에 대한 진동응답을 분석한 결과 그림 3.9와 같이 대부분의 층에서 P01 ~ P17 평균 진동 가속도 레벨은 3인보행 시에 1.0gal을 전/후하였으며, 각 Beam에 대해 전층을 평균한 진동 가속도 레벨은 P02와 P16이 1.2gal로 다소 높았고 나머지 Beam경우는 1.0gal의 진동수준을 보였다. 전체 Beam의 1/3 정도가 1.0gal이 넘는 것으로 나타났다. 본 건물의 경우 사무실 기준인 2.0gal의 진동수준에는 만족하였으나, 연구소 진동기준인 1.0gal에는 미흡하여 정숙한 진동환경을 위해서는 기준이 넘는 Beam에 대하여 추가 진동개선이 필요하였다. 이를 위해 1.0gal이 넘는 Beam에 대한 진동 개선책으로 다양한 방안을

검토한 후 동조질량감쇠기(TMD)를 이용한 개선안을 선정하고, 각각의 보(Beam)에 맞는 동조질량감쇠기(TMD)를 설계한 후 설치하여 진동수준을 개선하였다.

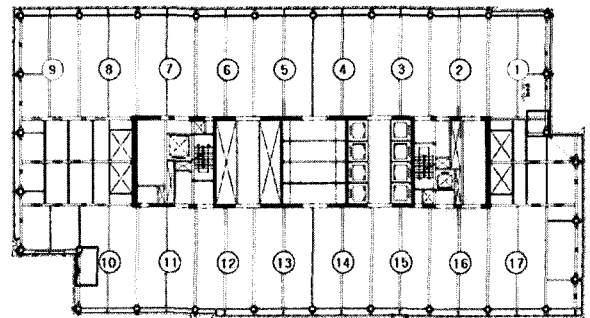


그림 3.9 진동평가를 위한 빔 위치 및 진동수준 표시도

3.3 동조질량감쇠기(TMD)

1) 동조질량감쇠기(TMD) 설치 프로세스는 아래와 같다.

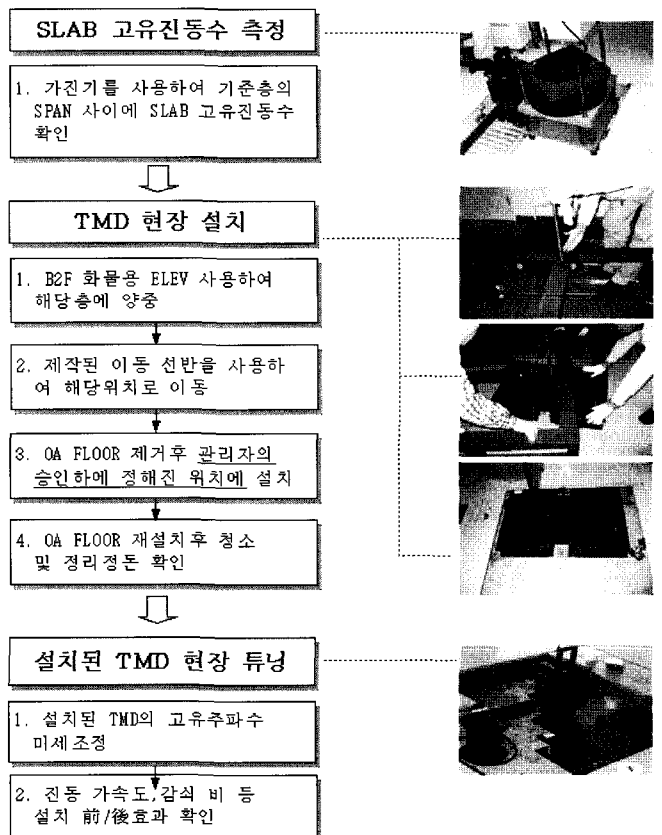
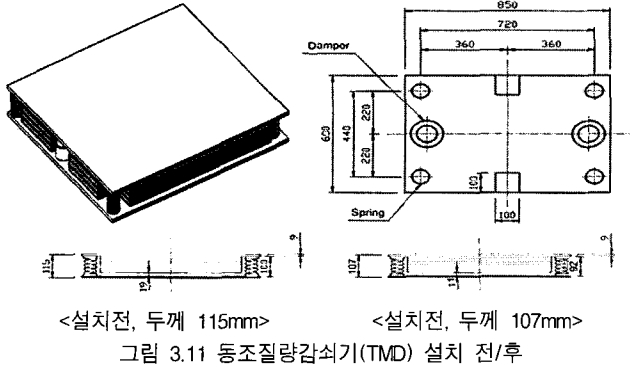


그림 3.10 동조질량감쇠기 설치 프로세스

2) 건물의 바닥진동을 줄이기 위해서 사용한 방법은 기계의 제진으로부터 대규모 구조물의 제진까지 폭넓게 사용되고 있는 동조질량감쇠기(TMD : Tuned Mass Damper)이다. TMD의 제진원리는 주 구조체의 입력에너지(바닥진동)를 부가 진동체의 운동에너지 및 TMD의 감쇠를 통해 에너지를 소산하는 방식으로 바닥진동을 저감한다. TMD는 질량, 스프링, 감쇠장치로 구성되어 있으며, 본 건물 TMD중량은

280kgf이며, 설치위치는 OA Floor와 바닥슬래브 사이의 120mm 공간에 설치하였다. TMD 설계방법은 바닥의 고유진동수와 TMD의 고유진동수를 일치시켜 공진현상이 발생하도록 하는 방법이다. 진동측정결과, 1.0gal이 초과되는 Beam은 Beam 중앙 슬래브위에 TMD를 설치하여 진동수준을 개선하였다.



4. 개선 전/후 성능평가

개선 전/후 성능평가를 통하여 8층 슬래브(7층 공조실) 진동과 기준층 슬래브 진동에 대한 성능개선공사의 합리적인 방안을 검증하였다.

4.1 8층 슬래브 개선 전/후 진동분석

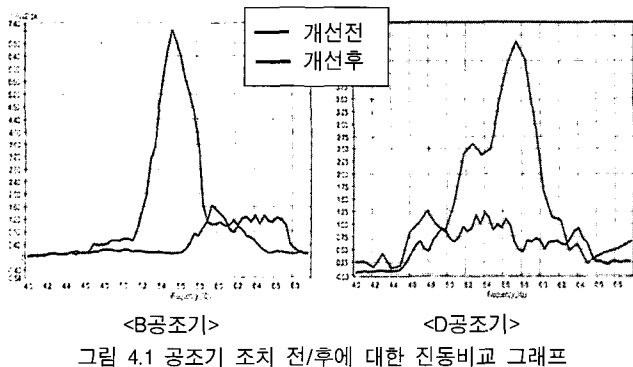


그림 4.1 공조기 조치 전/후에 대한 진동비교 그래프

표 4.1 진동 Test 결과

구분	진동가속도(gal)	비고
조치前	B: 7.20 D: 4.65	5.7Hz 대역에서 공진발생
조치後	풍량 60,000 (CMH)이상 B: 0.40 D: 0.25	진동 인지 불가
	풍량 60,000 (CMH)이하 B: 1.32 D: 1.21	· 풍량 60,000CMH 이하 가동 시 1.32gal 진동발생 · 65,000CMH 이상 조정 운영 시 진동인지 불가

표 4.1과 같이 개선 전 특이운전모드(정상운전 조건을 벗어나 과도한 진동을 일으키는 운전모드 : 풍량 72,000CMH이하)

에서 발생하던 4.65~7.2gal의 진동수준이 개선 후 1.2~1.3gal의 낮은 진동수준으로 저감하였으며, TMD 및 지주보강 등의 추가적인 개선책 보완 후, 1.0gal 이하로 진동이 저감되어 연구소 기준으로 선정한 1.0gal의 진동수준을 만족하는 것으로 나타났다. 한편 정상운전모드(풍량 72,000CMH)이상에서는 공조기로 인한 진동을 느끼지 못하였다. 특이운전모드에서 성능이 크게 개선되었으며 개선 전/후 성능비교는 그림 4.1과 같다.

4.2 기준층 슬래브 개선 전/후 진동분석

4.2.1 1차 성능개선 후 평가결과

Rubber형 방진재 설치와 DVM 실내기 모터/Fan 교체 등의 1차 성능개선 후 개선 전에는 0.64gal~4.06gal로 나타났으나 개선 후에는 0.14gal~0.74gal로 개선되었다.

4.2.2 2차 성능개선 후 평가결과

동조질량감쇠기(TMD)설치 등의 2차 성능개선 후 개선 전/후의 성능평가는 두 가지로 평가하였다. 한 방법은 ISO 2631 평가방법인 1/3 Octave Band에 따른 정량적인 진동수준에 대한 평가이고, 다른 방법은 사람이 인지하는 진동시간이 얼마동안 지속되는지에 대한 노출정도 평가이다. 노출시간에 대한 평가는 TMD가 설치된 Beam에서 TMD - On/Off시에 측정된 시간이력 선도를 이용하여 구한 정상화된 댐핑을 이용한 방법이다.

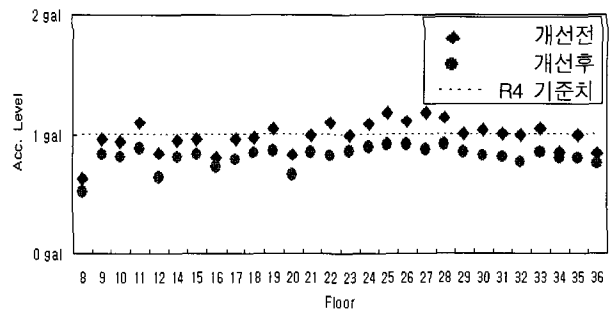


그림 4.2 Beam P01 - P17의 진동 가속도레벨을 평균한 각 층에서의 진동비교 그래프

표 4.2 각 층의 Beam별 개선 전/후 진동평가

Unit : gal (cm/sec²)

층	개선전	개선후	저감(%)	층	개선전	개선후	저감(%)
8	0.63	0.53	12.1	23	1.00	0.87	12.9
9	0.96	0.84	12.0	24	1.09	0.90	17.2
10	0.94	0.82	12.4	25	1.18	0.92	22.0
11	1.10	0.89	18.5	26	1.11	0.92	17.4
12	0.85	0.65	22.9	27	1.19	0.88	25.8
14	0.95	0.82	14.3	28	1.14	0.92	19.6
15	0.96	0.84	12.1	29	1.01	0.86	14.6
16	0.81	0.73	9.8	30	1.04	0.83	19.9
17	0.96	0.79	17.5	31	1.01	0.82	18.9
18	0.97	0.85	12.6	32	0.99	0.77	22.2
19	1.05	0.87	16.6	33	1.05	0.86	17.6
20	0.84	0.67	23.0	34	0.86	0.80	7.1
21	0.99	0.86	13.5	35	0.99	0.80	21.8
22	1.10	0.83	24.6	36	0.85	0.76	10.8

1) ISO2631에 의한 진동평가 : 개선 전에는 전체 Beam의 1/3 정도가 1.0gal을 초과하였으나 개선 후에는 모든 Beam에서 1.0gal의 진동기준을 만족하였다.

각층 Beam전체(P01~P17) 평균한 진동가속도 레벨도 그림 4.2 및 표 4.2와 같이 뚜렷한 진동개선이 이루어진 것을 파악하였다.

바닥위치에 따른 개선특성을 평가하기 위해 Beam P01~P17에 대해 전층 평균을 구한결과 0.9gal ~1.2gal의 진동레벨이 0.8~0.9gal로 개선된 것을 알 수 있었으며 그림 4.3에 결과를 그래프로 나타내었다.

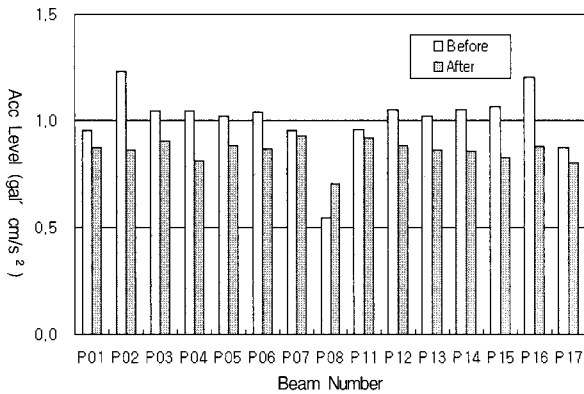


그림 4.3 각 층의 Beam별 개선 전/후 비교 그래프

2) 댐핑(Damping)에 의한 바닥진동 평가 : 건물 전 층 평균 댐핑값은 아래 표 4.3과 같이 개선 전에는 4.6%, 개선 후에는 11.6%로 평가되어 평균 2.7배 댐핑이 개선되었음이 파악되었다. 시간이력 선도에서도 개선 전에 비해 상당히 빠른 속도로 보행하중이 발생하기 전의 진동수준으로 돌아가는 것을 알 수 있었다.

표 4.3 각 층에서의 개선 전/후 Damping 비교

Unit : %

층	개선전	개선후	개선비	층	개선전	개선후	개선비
8	8.1	18.8	2.8	23	4.4	12.4	2.8
9	3.8	10.1	2.7	24	4.3	9.0	2.2
10	4.6	9.7	2.1	25	4.4	14.4	3.3
11	3.0	8.6	3.6	26	4.0	12.3	3.2
12	4.4	9.6	2.5	27	5.2	13.8	2.7
14	3.9	9.6	2.5	28	4.1	11.3	2.8
15	4.9	11.4	2.4	29	4.9	11.4	2.6
16	3.8	10.4	2.8	30	5.2	11.9	2.4
17	5.4	14.9	3.2	31	5.0	13.3	2.7
18	4.9	10.6	2.2	32	5.3	11.2	2.2
19	3.9	10.0	2.5	33	5.6	12.6	2.4
20	4.1	10.3	2.5	34	4.8	11.9	2.5
21	4.1	8.9	2.3	35	5.3	13.0	2.5
22	3.5	11.9	3.6	36	4.7	10.6	2.4

4.3 성능평가 결과

1) 8층 슬래브 진동의 경우 7층 공조기실에서 발생하는 진동 영향을 8층 사무실에서 최소화하기 위해서 덕트 챔버(Duct Chamber)설치, 공조기 운전모드 조정, OA급기 댐퍼

(Damper) 추가설치, 동조질량감쇠기(TMD : Tuned Mass Damper) 설치 등으로 성능개선 공사를 하여 개선 전 최대 7.2gal에서 개선 후 1.0gal 이하로 크게 줄었으며 선정된 1.0gal 이하의 진동기준을 만족하였다.

2) 기준층 슬래브 진동의 경우 일반사무실의 진동기준으로는 ISO 2631에서 2.0gal로 제시하고 있으며 본 건물은 이와 같은 사무실기준은 만족하나 본 건물의 경우 정숙한 진동환경을 갖는 건물특성을 고려하고, 연구소에 필요한 진동기준을 제시하기 위해 현장측정, 자료조사, 설문조사 등을 수행하여 연구소 진동기준을 1.0gal로 선정하였다. DVM 실내기 방진재 교체, DVM 실내기 모터 및 Fan 교체 등의 1차 성능공사와 동조질량감쇠기(TMD)설치의 2차 성능공사로 기준층 슬래브 진동을 1.0gal 이하로 개선하였다.

3) 개선 전/후에 대한 성능평가는 ISO 2631에 의한 진동 값에 대한 평가와 진동이 어느 정도 오래 지속되는 지에 대해 실시하였다. 개선 후 진동레벨은 20~30% 저감되었으며 3인 보행 시의 진동은 1.0gal의 기준을 전 층에서 만족하는 것을 파악하였다. 한편 진동을 인지하는데 있어서 중요한 진동 지속시간도 2~3배 정도 짧아짐을 알 수 있었다. 당 건물 바닥 진동수준은 사무실이 아닌 주거수준이며, 진동을 느끼는 시간(Damping 효과)도 크게 줄어들어 다른 건물보다 나은 진동환경을 갖추고 있는 것으로 파악되었다.

5. 결 론

본 연구에서 대형 고층 연구소 건물의 슬래브 진동에 대한 합리적인 성능개선공사를 적용하여 주거지역수준인 1.0gal 이하로 개선한 사례를 분석하였다. 사례분석 대상건물의 지상층 슬래브 진동원인을 분석하여 건물용도에 적합한 진동기준인 1.0gal을 설정하였고, 연구소 건물의 진동기준(1.0gal)으로 설정하여 기준 이하로 개선한 기준층 슬래브 진동 성능개선공사의 합리적인 방안을 분석하였으며, 개선 전/후의 성능평가를 통하여 기준층 슬래브의 진동 성능개선공사의 합리적인 방안을 검증하였고, 향후 프로젝트 대책 안을 제시하였다.

본 연구의 결과를 향후 프로젝트 대책 중심으로 요약하였으면 결과는 다음과 같다.

1) 기계설비에서 발생하는 진동문제를 해결하기 위한 방법으로는 설계 초기단계에서 설비 설치위치에 대한 동특성 자료를 확보하여 설비가 운전될 경우 건물이 요구하는 진동수준에 부합하는가를 확인하는 절차가 필요하다. 만일 예측한 진동수준이 건물이 견딜 수 있는 한계를 벗어나는 경우에는 초과되는 정도에 따라 구조대책, 설치위치 변경, 방진 시스템 재검토 등을 통해 문제를 미연에 방지하는 것이 무엇보다 중요하다.

2) 주파수대역에 따른 진동기준으로 사무실 경우 ISO기준 2631에서는 2.0gal, 설계기준(국내)은 1.4gal을 일반적으로 적용하고 있으나 연구소건물은 건물특성을 고려하여 1.0gal의 진동기준으로 적용하여 주거수준으로 개선하였다. 향후에는 초기건물설계 시 사용용도를 고려한 합리적인

- 진동기준을 우선적으로 설정하는 절차가 필요하다.
- 3) 건물 내 사람이나 장비이동 등 이동하중에 의한 바닥 진동문제는 Girder나 Beam의 고유진동수, 초기 진동응답, 그리고 댐핑에 의한 영향이 지배적인 것으로 확인되었다. 일반적으로는 보행으로 인한 바닥의 진동응답은 주파수가 낮을수록 보다 많은 힘이 바닥에 전달되어 초기응답 값은 높아짐으로 고유진동수 측면에서는 주파수가 높을수록 좋은 것으로 나타났다. 따라서 향후 건물설계 시에는 바닥의 기본 진동수에 대한 동특성을 초기에 파악하여 추후 진동환경을 미리 예측하는 절차가 필요하다.
 - 4) 댐핑의 경우는 Slab 두께, 하부바닥구조, Girder 및 Beam배치, Pier & Core와의 연결조건, 내부 파티션 등에 의해 다양한 영향을 받으며 바닥진동에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다. AISC(American Institute of Standard)에 따르면 댐핑 8~10%일 경우 추가적인 대책을 고려할 필요가 없으며, 양호한 진동환경을 갖는 건물의 경우 6~8%의 댐핑값을 갖는 것으로 제시하고 있어 향후 진동에 민감한 건물설계 시 6~8% 댐핑 값을 갖도록 설계하면 바람직하다.
 - 5) 건물 내 진동문제는 문제를 발생시키는 장비 진동원의 특성, 구조물을 통한 매질의 전파특성, 건물 슬래브의 진동 특성 등에 의해 다양한 형태로 나타난다. 따라서 진동 문제를 해결하기 위해서 구조물의 진동특성 분석, 전파특성 분석, 구조물의 형식, 지지조건, 측정/분석 기술로 집약되는 총체적인 엔지니어링기술이 요구됨에 따라 진동방지 프로세스 구축이 필요하다. 진동문제를 해결하기 위한 단계별 프로세스는 아래 그림 5.1과 같다.

- 6) 본 대상 건물의 사례를 분석하여 설정한 연구소 건물의 진동기준 제안이며, 아래 표 5.1은 연구소 건물 건축 시 진동에 영향을 미치는 인자별 기준이고, 아래 4가지 인자 중 3가지 이상을 만족해야 한다.

표 5.1 연구소 건물 진동기준 안

인 자	기 준	비 고
진동 가속도	1.0 gal (cm/sec ²)이하	ISO 2631-2 주거용 수준(3인 보행 시)
고유 진동수	5.5 - 6.0Hz 이상	보행하중에 의한 공진발생 억제
동특성	0.034gal/N 이하	이너턴스(Inertance)
감쇠비	6% 이상	예측이 어려움

본 연구에서 사례분석 대상건물의 진동저감을 위해 적용한 슬래브 진동 성능개선공사의 합리적인 방안과 결론에서 제시한 향후 프로젝트 대책이 추후 유사 Project 적용 시 설계 및 공사 관리에 도움이 되고자 한다.

참 고 문 헌

1. 김강부, 준경험적 방법을 이용한 충격성 진동에 대한 구조물의 동적 응답의 예측, 한국소음진동공학회, '2000 춘계학술대회 논문집 pp. 1945~1950, 2000.
2. 민경원, 정형일, 이영욱, 황재승, 홍성목, 안원수, 질량감쇠기를 이용한 건물의 진동제어 실험, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 1996.10
3. 안상경, 오정근, 고층건물의 진동제어를 위한 점탄성 감쇠기의 설치, 대한건축학회 학술발표논문집, 2003.10
4. 안상경, 오정근, 김형규, 동조질량감쇠기를 이용한 바닥슬래브의 진동제어, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 2006.10
5. 유성규, 건물진동이 인체에 미치는 영향에 관한 연구, 대한건축학회, 1975.10
6. 전호민, 이성수, 발 뒤꿈치 충격에 의한 전단벽식 공동주택 수직방향 진동전달 특성, 대한건축학회, 2007.04
7. 한국소음진동공학회, "소음 진동 편람", 한국소음진동공학회 1995,
8. Blevins, R.d., 1988, Shock and Vibration Handbook, Chapter 29, Part I Vibration of Structures Induced By Fluid Flow, 3rd Edition
9. Blevins, R.D., 1990, flow-Induced Vibration, Von Nostrand Reinhold, 2nd Edition
10. D. J. Ewins, 1995, "Modal Testing : Theory and Practice", Research Studies Press Ltd.
11. DIN,1986, Structural vibration in building(Effect on structures)", DIN4150 Part3, group 5.
12. Eric E. Ungar, Vibration control design of high technology facilities, sound and vibration, July, 1990.
13. ISO 2631-1:1997, Mechanical vibration and shock Evaluatio of Human exposure to whole body vibration, Part1: General requirements
14. ISO 2631-2:2003, Mechanical vibration and shock Evaluatio of Human exposure to whole body vibration, Part2: vibratio in buildings



그림 5.1 진동방지 프로세스