

죽전 신세계 백화점 Sky Bridge 진동제어 장치 및 낙교방지 장치



김종수
Kim, Jong-Soo



박수용
Park, Soo-Yong



박유복
Park, Yoo-Bok



최동섭
Choi, Dong-Sub

1. 서론

본 프로젝트의 목적은 죽전사거리에 신축되는 신세계 백화점과 주차장을 연결하는 통로로서, 길이 50.4m 장스팬 Sky Bridge(<그림 1>)에 대한 사용성 검토에 관한 것이다. 장스팬 구조물은 사람의 움직임(걷는 경우, 땀 튀기 하는 경우, 달리는 경우), 풍하중 등에 의하여 진동이 발생하고 가진 하중과 구조물 고유진동수의 동적관계로 공진이 발생한다. 이에 따른 과도한 진동현상은 사용자에게 심리적 불쾌감을 유발시키는 등 구조물의 사용성에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 또한 지속적인 미진동은 강구조물의 경우 국부적 피로현상이 발생하여 사용성 뿐만 아니라 장기적으로는 구조물 전체의 안전성을 위협할 수도 있다.

따라서, 상시진동에 대한 적절한 대책을 세우는 것은 구조물의 공용수명 확보와 유지관리 비용의 절감

차원에서 적극적으로 고려하여야 하는 부분이라 판단된다. 이에 따라 진동제어장치를 설치하였으며, 이를 설계하기 위해서 Sky Bridge 수직방향의 진동고유주기(고유진동수)를 해석 및 진동실험을 통하여 정확히 도출하였다. 또한, 분석데이터를 바탕으로 진동제어장치를 설계/제작하였으며, 본 구조물에 시공함으로써 진동제어장치의 시공 전과 후의 진동을 계측하고 진동감소효과를 비교 분석하여 제시하고자 한다.



<그림 1> Sky Bridge 전경

* 회장, (주) C·S 구조엔지니어링 대표
** 한국해양대학교 해양공간건축학부 교수
*** 정회원, (주) 세일 B&C 대표
**** 정회원, 건축구조기술사 (주) C·S 구조엔지니어링 실장

추가로 국내에서 처음으로 도입한 낙교방지장치 (<그림 13, 14>)를 소개하고자 하며, 이 장치는 불의의 사고에 의해 Sky Bridge가 철도로 떨어지는 것을 방지시켜주는 장치이다.

2. 이론적 배경

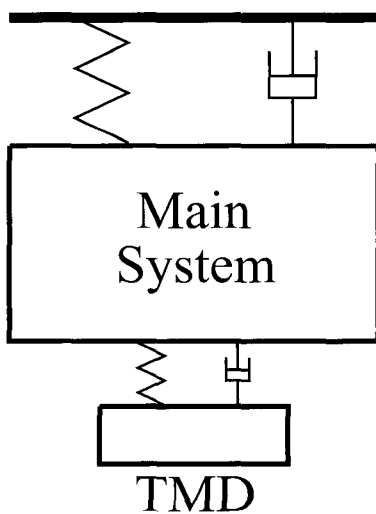
2.1 감쇠기(Damper)의 역할 및 종류

구조물에 부착되어 여러 가지 요인들에 의하여 발생하는 진동을 흡수, 또는 소산시킴으로써 구조물의 진동을 제어하는 기능을 하는 것을 감쇠기라 한다.

수동형 감쇠기의 종류는 다음과 같은 것들이 있다.

- ① 동조질량 감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)
- ② 금속 항복형 감쇠기(Metallic Yield Damper)
- ③ 마찰형 감쇠기 (Friction Damper)
- ④ 점탄성형 감쇠기 (Viscoelastic Damper)
- ⑤ 동조유체 감쇠기 (Tuned Liquid Damper)

위와 같은 감쇠기중 본 Sky Bridge에 적용된 동조질량 감쇠기(이하 TMD)는 진동을 일으키는 구조물에 질량체와 스프링, 오일댐퍼로 이루어진 기계장치를 부착하여 구조물이 가지고 있는 진동 에너지를 본 기계장치가 대신 흡수하도록 함으로써 구조물의 진동을 제어하는 장치이며, 그 개념도는 <그림 2>와 같다.



<그림 2> TMD 개념도

TMD는 다른 제진 방법에 비하여 그 적용이 간편하고 구조물의 강성을 직접 증가시키지 않고도 제진 효과를 발휘할 수 있으므로 비용이 적게 든다는 장점을 가지고 있다.

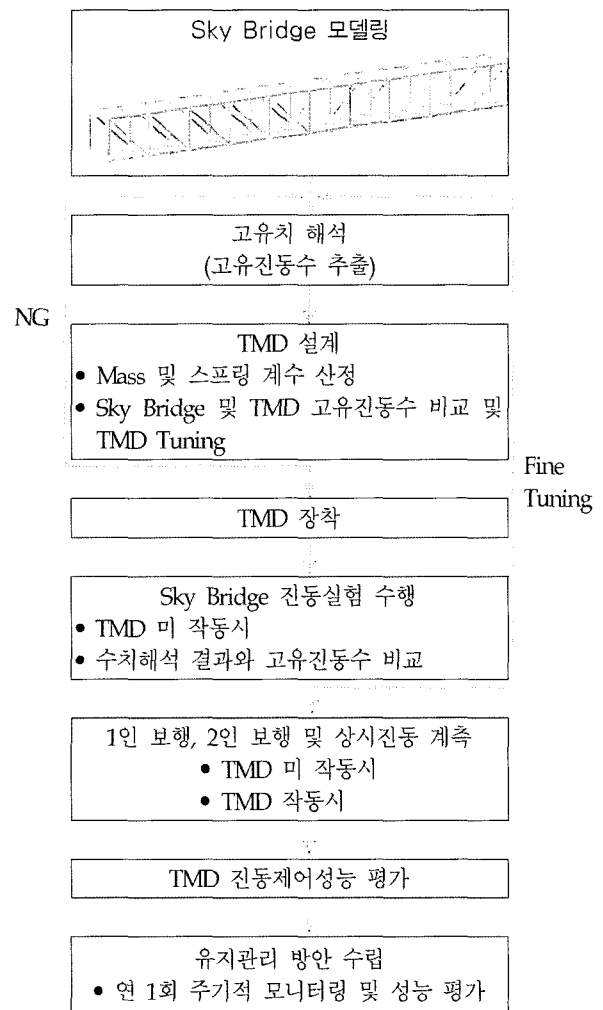
3. 프로젝트 수행과정

본 프로젝트에서 수행한 내용은 다음과 같다.

3.1 Sky Bridge 제원 확보

3.2 사전 해석(Simulation)

- 3차원 구조해석 모델링
- 고유치해석을 통한 고유진동수 분석
- TMD 설치 전후 진동응답비교 및 진동감소효과 분석



<그림 3> Sky Bridge 진동제어 순차도

3.3 TMD 설계 및 제작

- TMD Mass 및 스프링 계수 산정
- Sky Bridge 및 TMD 고유진동수 비교 및 TMD Tuning

3.4 TMD 장착

3.5 진동제어성능 시험

- 상시진동 및 강제진동시험을 통한 Sky Bridge 고유진동수 산출
- 사전 해석치와 비교 및 필요시 TMD Tuning
- 1인 보행, 2인 보행 및 상시 진동시 가속도 응답 계측
- TMD 작동 및 미 작동시 응답비교 및 제어성능 평가

3.6 유지관리 방안 및 결론

- 위의 개략적 수행과정을 도식화하면 <그림 3>과 같다.

4. 사전해석 및 TMD 설계

4.1 Sky Bridge 현황 및 제원

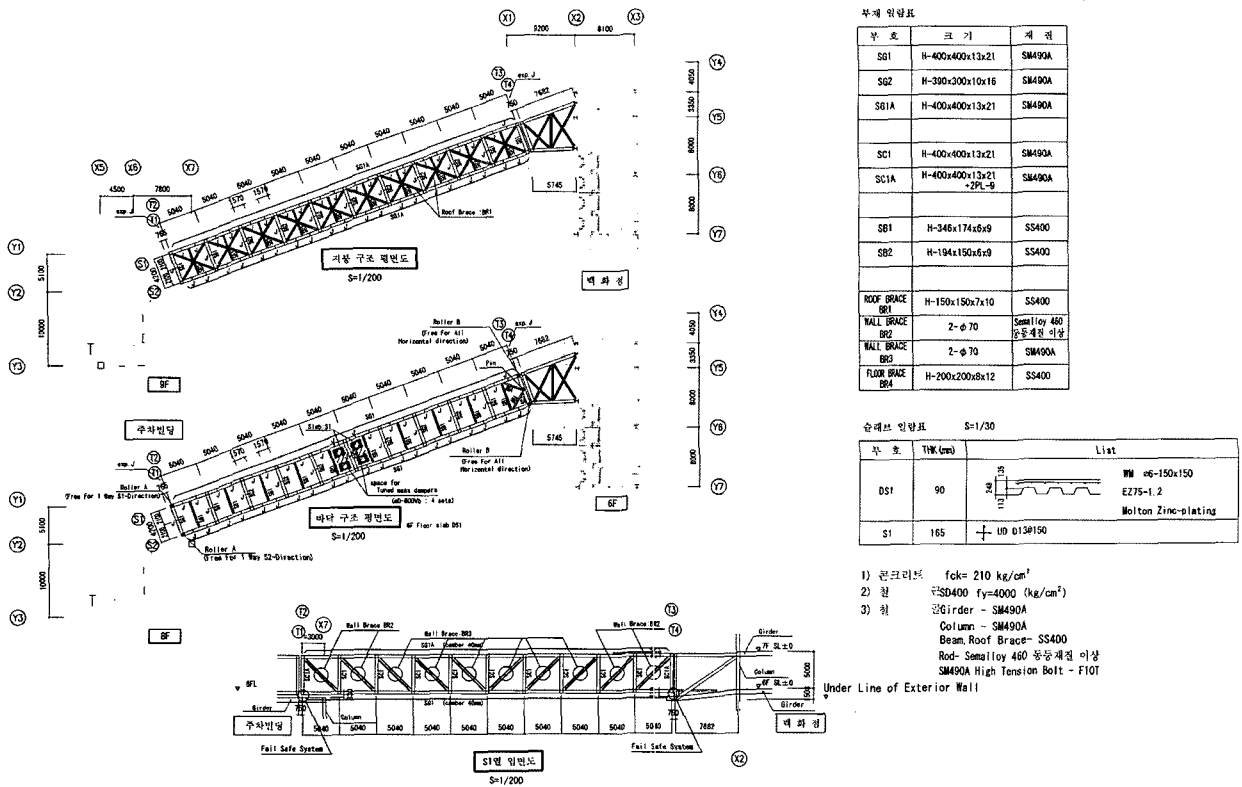
백화점 본동과 주차장 빌딩을 연결하는 Sky Bridge의 스패ん 길이는 50.4m이고 구조형식은 철골 트러스로서 10개의 격자로 이루어져 있으며, 트러스 경사재는 인장재가 되도록

설계한 프랫 트러스(pratt truss)이다. 트러스 제원은 <그림 4>와 같다.

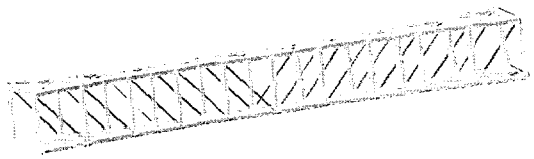
TMD의 설치위치는 <그림 4>와 같이 트러스 중앙부 하부이며 바닥 구조 골조에 연결하도록 설계되어 있다.

4.2 사전해석

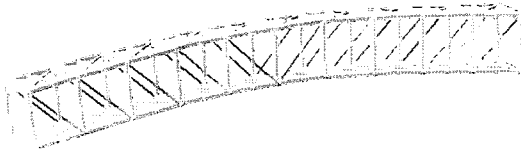
진동제어장치를 설계하기 위해서는 사전에 구조물의 고유주기(고유 진동수)를 정확히 파악하여야 한다. Sky Bridge의 예상 고유진동수를 파악하기 위하여 구조해석 프로그램인 MIDAS를 이용하여 3차원으로 트러스를 모델링 하였으며, 고유치해석을 통



<그림 4> Sky Bridge 제원



(a) 1차모드 (수평방향 휨 모드)



(b) 2차모드 (수직방향 휨 모드)



(c) 3차모드 (비틀림 모드)

<그림 5> Sky Bridge 모드형상

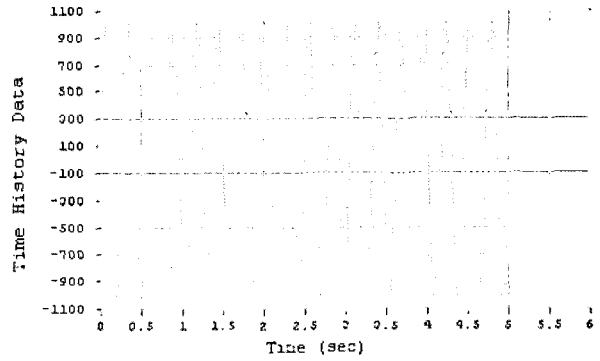
<표 1> 고유진동수

모드	고유진동수 (Hz)	모드참여 질량 (수직방향)	비고
1차	2.97	3.22%	수평방향 모드
2차	3.77	76.77%	수직방향 탁월모드
3차	4.84	1.25%	비틀림 모드

하여 <그림 5>와 같이 모드별 변형형상을 추출하였으며, 고유진동수는 <표 1>과 같다.

그 결과 수직방향 1차 휨 모드의 고유진동수는 3.77 Hz이며, 모드참여 질량은 76.77%로 대부분을 차지하고 있다. 따라서 수직진동을 제어하기 위해서는 제어장치 고유진동수도 3.77Hz에 근접하게 설계를 하여야 한다.

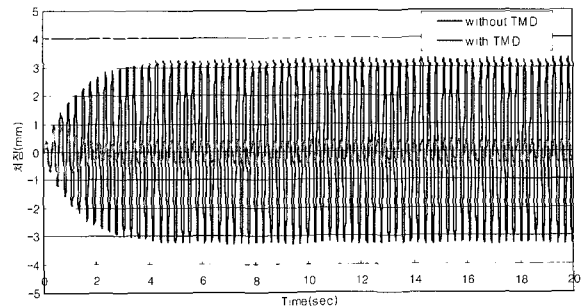
또한, Sky Bridge에 장착할 TMD의 제어성능을 사전에 수치해석적으로 평가하기 위하여 다음 장에 소개한 스프링-매스 시스템을 모델링 하였으며, TMD 미 작동시와 작동시의 응답을 비교하였다. 이때 사용한 가진은 <그림 6>과 같이 최대 1톤의 힘을 트러스 하부 중앙점에서 3.77Hz의 진동주기로 시뮬레이션하여 5초 동안 가진하였고, 그 결과는



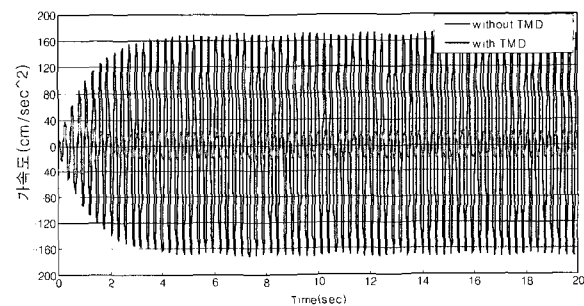
<그림 6> 가진 데이터

<표 2> 시뮬레이션 결과

	TMD 미 작동시	TMD 작동시	제어효과
중앙부 처짐	3.27 mm	0.39 mm	88% 감쇠효과
중앙부 가속도	170 cm/sec ²	20.2 cm/sec ²	88% 감쇠효과



(a) 처짐응답

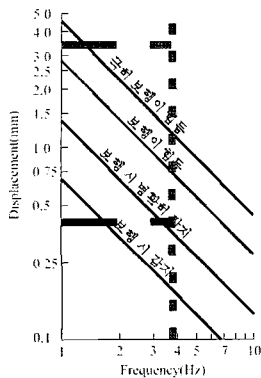


(b) 가속도 응답

<그림 7> TMD 작동시 및 미 작동시 진동응답 비교

<표 2>와 같다.

TMD 작동시와 미 작동시의 처짐 및 가속도 응답을 <그림 7>에 수록하였고 최대 처짐 및 가속도를 <표 2>에서 비교하였다. 시뮬레이션의 결과는 TMD

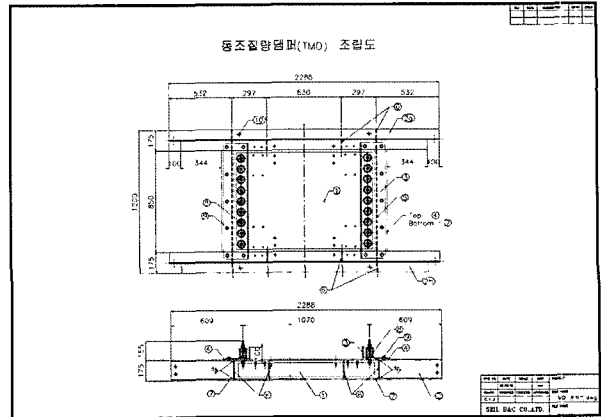


Vibration Effects	Frequency 1~10Hz 가속도 (mm/sec ²)
감지못함	10 (0.001g)
약간감지	40 (0.004g)
명확히 감지	125 (0.013g)
보행이 힘들	400 (0.040g)
불쾌함 (극히 힘들)	1000 (0.100g)
위험함	> 1000 (0.100g)

(a) 변위 제한(일본기준)

(b) 가속도 제한(유럽기준)

<그림 8> 진동 사용성 평가기준



<그림 9> TMD 제원

작동시 최대 88%의 진동저감효과를 나타내고 있다.

<그림 8>은 외국 진동 사용성 평가 기준으로 TMD 미 작동시 변위 및 가속도 응답 모두 “극히 보행이 힘들고” 위험한 상태이지만 TMD 작동시에는 처짐 및 가속도 기준 모두 “명확히 감지” 수준으로 진동이 저감되었음을 알 수 있다.

4.3 TMD 설계

진동제어장치를 설계하기 위해서는 사전에 구조물의 고유주기(고유 진동수)에 대하여 해석 및 실험을 통한 정확한 값의 추출이 필요하며, 이를 기반으로 진동을 저감시킬 수 있는 제어장치를 설계하여야 한다. 사전 수치해석 결과 제어하여야 할 Sky Bridge의 고유진동수는 3.77 Hz이다. 또한, 실제구조물의 고유진동수는 해석 및 실험에 의한 값과 차이를 나타낼 수 있으므로 시공 후 상시진동 및 강제진동 실험을 통하여 구할 예정이다.

설계시 Sky Bridge의 TMD는 <그림 9>와 같이 매스-스프링 시스템 형식으로 총 4개의 TMD가 한 set로서 트러스 하부에 장착될 예정이다. 본 구조물의 진동에 동조하는 TMD 자체 1개의 중량은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$W = 1.15m \times 0.81m \times 0.11m \times 7,850kgf/m^3 \quad (1)$$

$$= 804.3kgf$$

진동제어를 위해서는 수직방향 모드의 고유진동수 3.77 Hz에 동조할 수 있도록 TMD 자체의 고유

진동수도 3.77 Hz로 맞추어 설계하여야 한다. 이는 TMD의 매스를 지탱하는 스프링의 스프링계수로써 조절할 수 있다. 스프링은 총 18개가 사용되어 좌우 대칭으로 9개의 스프링이 양쪽 끝에서 TMD의 무게를 지지할 수 있도록 설계되었다.

고유진동수 3.77 Hz에 동조하는 스프링계수(K)의 산정은 다음과 같다.

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (2)$$

에서

$$K = \omega^2 \times 4\pi^2 \times M \quad (3)$$

$$= 3.77^2 \times 4\pi^2 \times \frac{804.3}{980.6} = 460.22kgf/cm$$

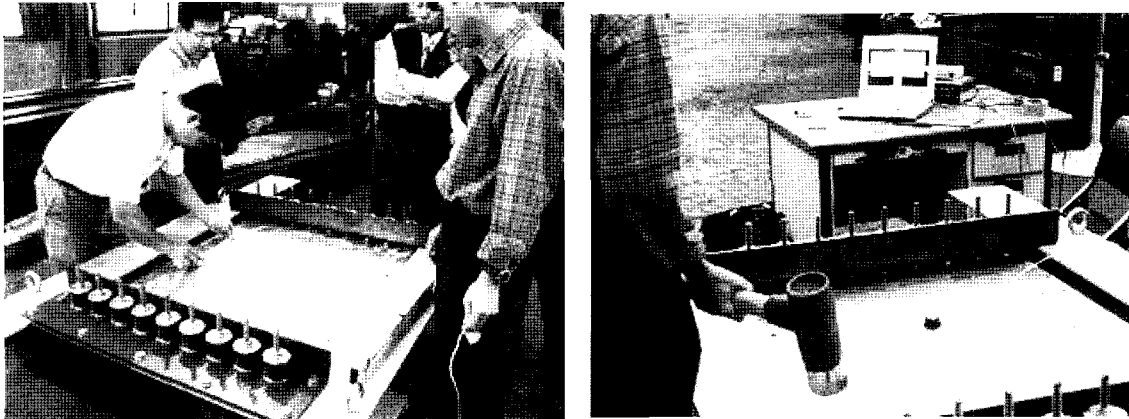
따라서 스프링 1개의 계수는

$$k = \frac{K}{18개} = \frac{460.22}{18} = 25.6kgf/cm \quad (4)$$

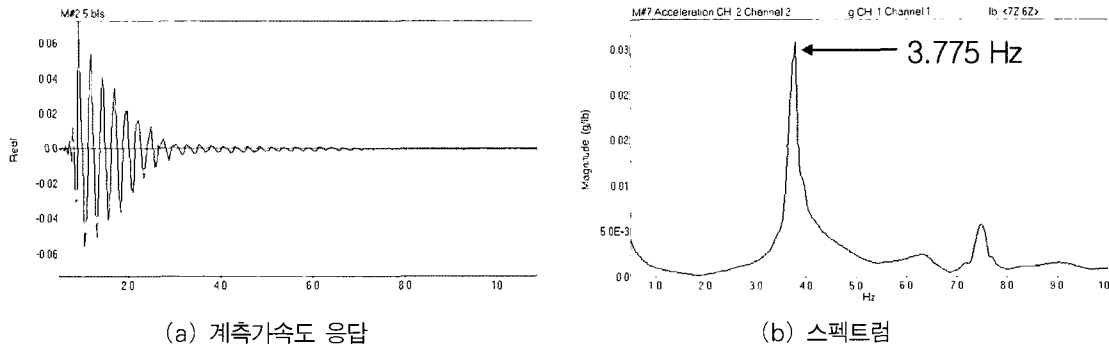
이다.

또한, 위와 같은 계산을 통하여 아래 <그림 10>과 같이 TMD를 세일비엔씨에서 제작하여 강제진동 및 상시진동 실험을 수행하였으며, 이를 기반으로 고유진동수를 추출하였다.

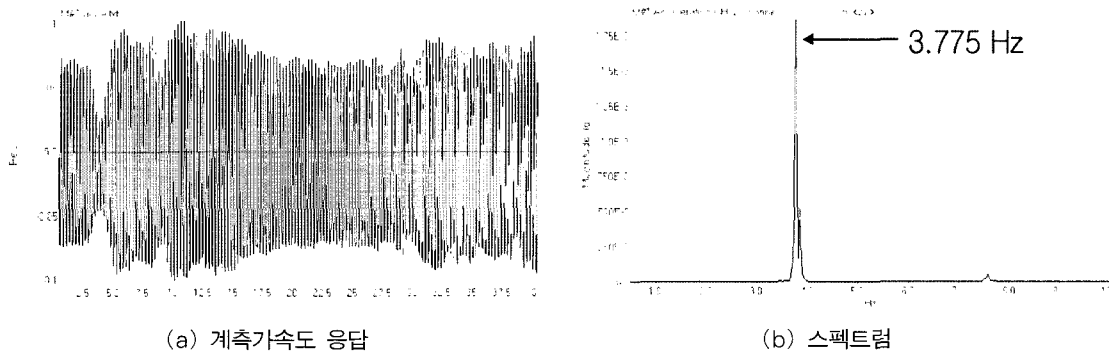
<그림 11>은 임팩트 해머로 TMD를 가진하여 중앙부에서 계측한 가속도 응답 및 스펙트럼이며, <그림 12>은 임의의 힘으로 TMD를 가진하여 계측한



〈그림 10〉 TMD 제작 및 Tuning



〈그림 11〉 Impact Test



〈그림 12〉 상시진동 Test

가속도 응답 및 스펙트럼이다.

〈그림 11 및 12〉에서와 같이 TMD의 고유진동수는 3.775 Hz에서 발생하였고, 수치해석에서 얻은 3.77 Hz와 매우 근접하게 튜닝이 되었음을 알 수 있다.

5. TMD 시공 후 진동제어성능 평가

5.1 Sky Bridge 고유진동수 측정

Sky Bridge의 시공 후 TMD가 작동하지 않는 상

태에서 강제진동 및 상시진동 실험을 수행하여 고유진동수를 측정할 예정이다.

5.2 진동제어장치 Tuning

사전 수치해석과 시공후 고유진동수를 비교하여 필요시 TMD의 고유진동수를 다시 튜닝 할 예정이며, TMD의 고유진동수는 중량이 일정하므로 3~4.5 Hz의 진동대역을 제어할 수 있는 스프링을 미리 제작하여 Sky Bridge의 고유진동수에 맞는 스프

링으로 교체가 가능하도록 계획하였다.

5.3 TMD 작동 및 미 작동시 가속도 응답비교

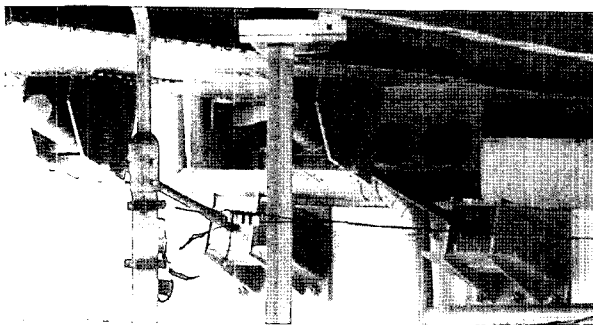
장착한 TMD의 진동제어성능을 평가하기 위하여 TMD 작동 및 미 작동시 강제진동 (임팩트 테스트) 및 상시진동(1인 보행, 2인 보행 등) 실험을 수행하여 가속도 응답을 비교함으로써 스펙트럼 분석을 통한 TMD의 진동제어성능을 정량적으로 산출할 계획이며, Sky Bridge 시공 후 진동실험기간은 2~3일 정도 소요될 것이다.

5.4 성능평가 및 결과분석

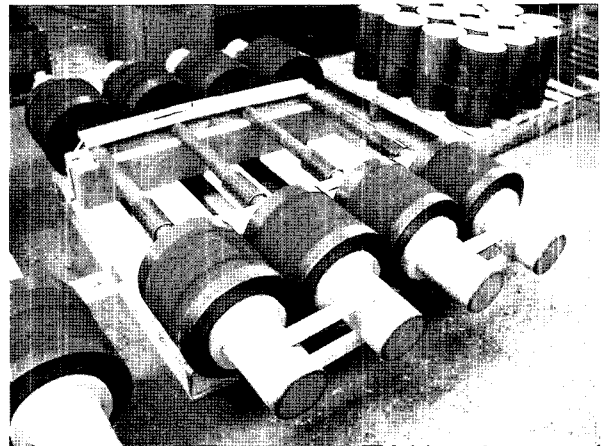
계측한 데이터를 토대로 제어성능을 평가하고, 그 결과를 바탕으로 사용성 평가(가속도 기준)를 수행할 계획이다.

6. 낙교방지장치(FailSafe System:FSS)

낙교방지장치란 보행플로어 하부에 기구를 채용하여 예상외의 큰 수평변위에 대해서도 Sky Bridge의 낙하를 방지하는 장치로, 시공된 예가 <그림 13>에 나타나 있다. 로드를 둘이상 배치하는 것에 의해 연직브레이스에 이상이 발견된 경우에도 즉시 Sky Bridge가 낙하하는 것을 방지하여 신속하게 복구하도록 한다. 세일비엔씨에서 제작한 낙교방지장치 사진은 <그림 14>에 나타나 있다. 크게 Steel Bar, 충격흡수용 Buffer Packing과 Nut로 구성이 되어있다. 이렇게 구성된 낙교방지장치는 백화점과 주차장에서 Sky Bridge와 연결되는 부분에 각각 4개씩 설



<그림 13> 낙교방지장치



<그림 14> 낙교방지장치

치되어 Sky Bridge하중의 3배까지 지지하도록 설계되었다.

7. 결 론

- (1) 시공 후 계측 데이터 분석 시 75~80% 이상의 제어효과가 기대된다.
- (2) 죽전 신세계 백화점 Sky Bridge에 적용한 스프링-매스 시스템의 감쇠기는 국내에서 드물게 사용되는 기술로써 본 프로젝트를 성공적으로 수행한다면 고부가가치의 기술력 효과가 매우 클 것으로 사료된다.
- (3) 본 프로젝트에 사용된 TMD 시스템은 동일 형식 및 다양한 장 스펠 구조물에도 적용이 가능하며 구조물의 사용성, 안전성에 대한 우려를 불식시키고, 국내 건설산업의 대외 경쟁력 향상에 기여할 것으로 기대된다.
- (4) 시공 후 상시 모니터링 시스템과 연계하여 과학적이고 효율적인 유지관리 시스템을 구축할 예정이다.