

제진 장치를 이용한 고층 건물 High-Rise Buildings Using Vibration Control Devices

민 경 원*

1. 서언

현대의 건물은 건축 재료와 구조 관련 기술, 그리고 컴퓨터의 발달로 인하여 고층화가 가능하게 되었다. 이때 건물에 가해지는 수평 하중, 즉 바람이나 지진에 어떻게 저항할 수 있는가 하는 구조적인 문제의 해결이 구조 설계의 핵심인 것이다. 따라서 세계에서 제일 높은 건물인 미국의 시카고에 있는 110층 443m의 씨어즈 타워는 튜브 시스템을 여러개 조합한 묶음형 튜브 시스템을 이용하여 구조적인 문제를 해결하였다. 그러나 건물이 초고층화 그리고 세장화 되어가면 수평 하중에 의한 과다 변위 뿐만 아니라 진동이 발생하게 되며 이것은 건물의 구조적 안전성은 물론 외벽체의 파괴, 내부 부속물의 손상에 따른 건물의 운영 문제, 그리고 쾌적한 공간을 요구하는 입주자들의 심리적인 거주성에 심각한 영향을 미치게 된다. 또한 병원, 컴퓨터 센터, 반도체 제조 시설, 그리고 통신 시설 등이 있는 중요한 곳은 구조적 안전성에 이상이 없는 진동도 막대한 영향을 미칠수가 있는 것이다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 구조 시스템적인 접근외에도 기계 공학등에서 쓰이는 진동 제어 이론(vibration control theory)에 바탕을 둔 진동 제어용 장치를 건물에 설치하여 사람의 신체 기능을 갖도록 하는 방법이 최근 적용이 되고 있다. 즉 사람은 달리는 버스내에서도 적당히 중심을

이동시켜 가면서 평형을 유지하는 것과 마찬가지로 기계 장치가 설치된 건물도 예측 불허한 바람이나 지진에 대해서도 사람과 유사하게 평형을 유지하여 과다변위와 진동을 상당히 감소시켜 줄 수 있는 것이다. 미국과 일본에서는 20년 전부터 진동제어용 장치를 이용한 건물의 연구 개발에 착수하기 시작하여 여러 고층 건물이 세워졌으며 최근 일본에서 건설되고 있는 고층 건물은 태풍이 지나가도 건물 내의 사람이 느끼지 못할 정도로 진동을 제어할 수 있도록 설계되어 있다. 이러한 사실에 비추어 볼 때 진동 제어용 장치로 이용이 많이 되고 있는 동조 질량 감쇠 장치(tuned mass damper devices, 이하 TMD라 칭함)의 이론적인 배경, 그리고 해외에서의 TMD를 이용한 건물과 기술현황을 살펴보는 것이 건물의 진동 제어 기술에 관한 연구 개발이 전무한 국내의 현실에 의미가 있다고 생각된다.

2. TMD의 이론적 배경

TMD는 건물에 진동 제어를 목적으로 부착되어 감쇠 기능을 하는 질량과 주변 설비를 말하며, 건물과 질량의 상호 작용에 의해 건물의 거동을 감소시키는 역할을 한다. 그림 1에서 보듯이 건물과 TMD를 2자유도계로 모델화하였을 때 바람이나 지진같은 수평하중이 건물에 가해지면 TMD가 관성력 효과에 의해 건물 거동의 반대 방향으로

* 정회원, 삼성종합건설 기술연구소

로 움직여서 건물의 진동을 제어시켜 주는 것이다. 수학적으로 표현하면 TMD의 고유 진동수를 건물의 고유 진동수와 일치시켜 줌으로써 건물에 가해지는 진동을 TMD가 흡수하여 건물의 진동을 최소화하는 일종의 진동 흡수 장치(vibration absorber)의 역할을 말하는 것이다. 실제 고층 건물의 거동에 있어서 1차 모드의 영향이 가장 크기 때문에 TMD의 고유 진동수를 건물의 1차 고유 진동수와 일치되게 TMD를 구조 설계함으로써 진동을 감소시켜 주고 있다.

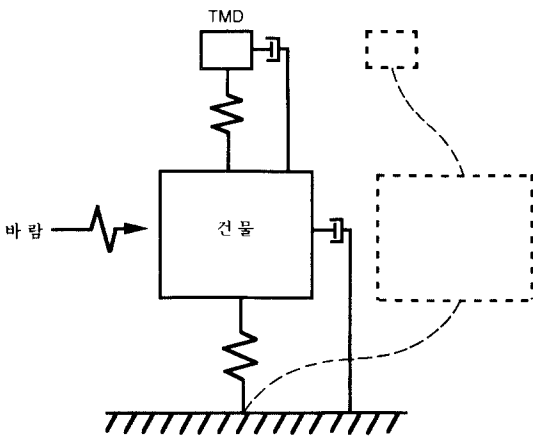


그림 1. 2자유도계의 건물과 TMD

위에서 설명한 TMD는 일종의 수동 제진 시스템(passive vibration control system)이다. 사람의 신체와 같이 건물에 가해지는 하중을 느끼고 즉각적으로 반응을 하여 진동을 제어하는 능동 제진 시스템(active vibration control system)과는 대응되는 것으로 외력에 대하여 건물의 감쇠력을 증대시켜 건물의 1차 모드에 관계된 진동만을 감소시키는 수동적인 시스템인 것이다. 이러한 시스템은 불규칙한 바람이나 지진에 대하여 건물의 1차 모드 역할이 지배적이기 때문에 많은 양의 진동 제어를 할 수 있으나(필자의 연구 결과에 의하면 상층에 TMD를 설치한 5층 건물을 해석한 결과 약 40%의 변위 감소 효과를 보았다.) 고차 모드의 생략으로 인한 진동 제어의 한계, 부속물의

국부 파괴 손실로 인한 운영 제한, 그리고 좀 더 나은 환경을 바라는 입주자의 요구 등이 문제가 됨으로 능동 제진 시스템이 필요로 하게 되었다.

전술한 바와 같이 능동 제진 시스템은 그림 2에서 보듯이 달리는 기차나 버스안에 서있는 사람이 무의식적으로 전체의 평형을 유지하는데서 원리를 찾은 것이다. 즉 사람의 신체와 같이 지진이 나 태풍이 왔을 때 건물 곳곳에 설치된 센서를 통하여 감지하고 정보를 컴퓨터로 분석·판단한 다음 건물에 설치된 TMD를 움직여 건물의 중심을 이동시키고 궁극적으로는 평형을 유지하는 것이다.

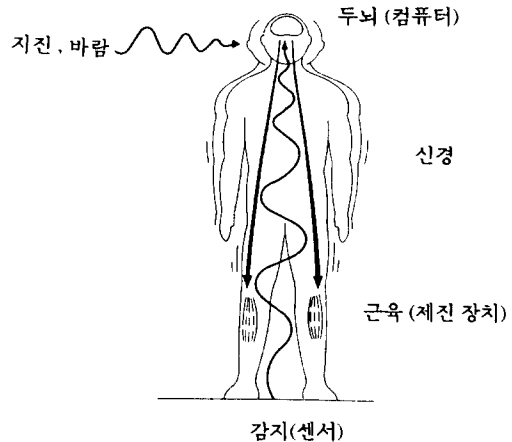


그림 2. 제진시스템의 개념도

3. 미국과 일본에서의 제진 장치 적용 예

미국에서는 수동 제진 장치인 TMD를 건물 상층에 설치하여 바람과 지진에 의한 진동을 제어하고 있는 고층 건물과 전망대등이 여럿 있다. 대표적인 고층 건물로는 뉴욕에 있는 시티콕 센터(59층, 278m, 1977년에 완공)와 보스톤에 있는 존 핸콕 타워(60층, 241m, 1973년에 완공)를 들 수 있다.

그림 3과 4는 시티콕 센터의 최상층에 있는 TMD와 주변 설비장치를 나타내는데 400톤에 해당되는 콘크리트 덩어리, 압축 공기 스프링과 가력기등으로 이루어져 있다. TMD의 고유 진동

수를 건물의 1차 고유 진동수에 일치시켜야 제진 장치로서의 역할을 하는데 건물이 완공되기까지는 정확한 고유 진동수를 알 수 없을 뿐만 아니라 시간에 따른 건물의 상태도 변하기 때문에 주변 설비장치를 조정하여 TMD를 동조시키고 있다. 풍동 실험한 결과 최상층에서 38%의 진동 가속도 감소 효과를 보았으며 TMD없이 단순히 철골량을 증가시켜 같은 효과를 얻으려면 약 5배의 비용이 소요되는 비경제성이 있는 것으로 나타났다.

한편 일본은 각 건설 회사들이 중심이 되어 제진 시스템을 연구 개발하고 있으며 현재 고층 건물에 활발히 적용시키고 있다. 대표적인 것으로는 수동 TMD를 이용한 오사카에 있는 37층의 크리스탈 타워(157m, 1990년 완공)와 능동 TMD를 이용한 요코하마에 있는 70층의 랜드마크 타워(296m, 1993년 완공 예정)가 있다.

특히 랜드마크 타워는 호텔과 사무용 건물로써 진자형 능동 TMD(pendulum-type active tuned mass damper)를 이용한 것인데 이 시스템은 다음 그림 5에서 보듯이 건물 상층에 진자형의 TMD를 설치하고 건물 곳곳에 있는 센서를 통하여

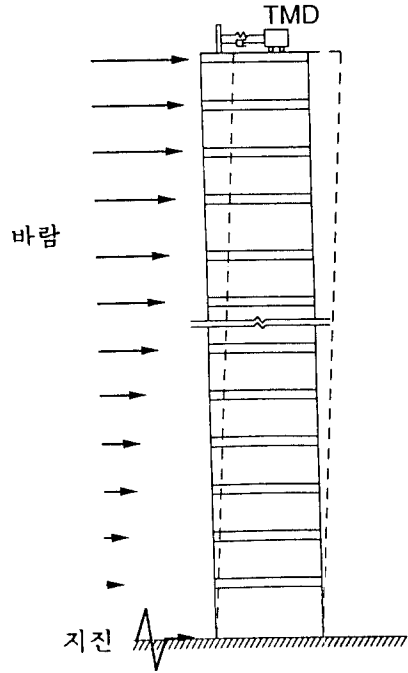


그림 3. TMD가 설치된 시티콕 센터

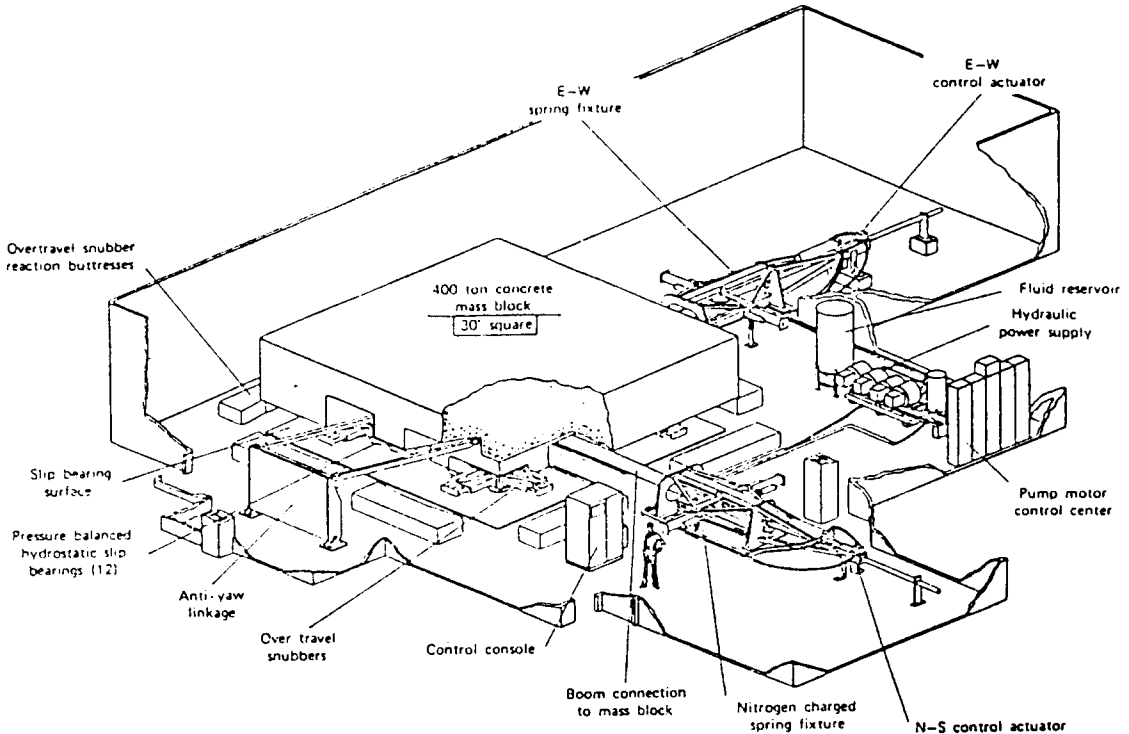


그림 4. TMD 시스템 상세도

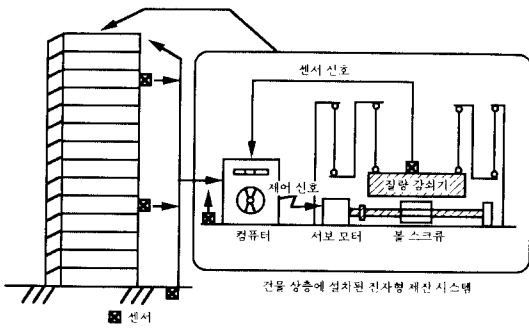


그림 5. 전자형능동 TMD가 설치된 랜드마크 타워

감지된 진동을 컴퓨터로 분석한 다음 서보 모터를 움직여 TMD의 고유 진동수를 변화시켜 진동을 흡수하는 능동 제진 장치인 것이다. 또한 진자의 길이를 1/3로 줄여 TMD가 설치된 층의 높이를 기존의 층고와 같게 하였으며 전력 공급이 중단되어 모터를 작동시키지 못할 때는 수동 TMD 역할을 하도록 되어 있다. 이 장치는 1 gal의 진동에도 효과적으로 작동할 뿐만 아니라 태풍같은 강한 바람에도 내부에서는 거의 느끼지 못하게끔 설계 되어 있다.

4. 결론

전술한 바와 같이 현대의 건물은 초고층화 되어 가기 때문에 바람이나 지진에 의한 건물의 과다 진동이 일어나며 이것은 기초 분리(base isolation) 방법 또는 제진 장치를 설치함으로써 해결할 수가 있다. 기초 분리 방법은 지진 다발 지역에서 지진에 의한 피해를 감소시키기 위하여 주로 이용되며 제진 장치는 지진은 물론 바람을 받는 고층 건물, 타워, 다리 등의 대형 구조물의 제진에 사용이 되며 병원, 컴퓨터 센터, 그리고 반도체 공장 등 정밀한 작업이 이루어지는 곳에서의 국부적인 제진에 적용이 되고 있다.

제진 장치는 수동 제진 장치와 능동 제진 장치로 대별이 되며 원리는 질량을 이용한 건물의 감쇠력을 증대시키는데 있다. 능동 제진 장치를 이용한 시스템은 과다한 설치비와 운영비 뿐만 아니라 강한 바람이나 지진이 왔을 때 전력 중단

이 되어 작동이 되지 않을 때가 있으므로 현재로써는 수동 제진 장치가 많이 이용이 되고 있다. 따라서 현재 강한 바람이나 지진에 대한 건물 전체의 거동은 수동 제진 장치에 의하여 대처하고 약한 바람과 지진 등에 대한 국부적인 제진에는 능동 제진 장치를 이용하는 복합 제진 시스템(hybrid vibration control system)이 제시되고 있다.

참 고 문 헌

1. Lynn S. Beedle, editor, *Second Century of the Skyscraper*, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, Van Nostrand Reinhold Company, 1988.
2. K.P. Chong, S.C. Liu, and J.C. Li, editors, *Intelligent Structure*, Elsevier Applied Science, 1990.
3. International Symposium on Active Control of Sound and Vibration, Proceedings, *Journal of Acoustical Society of Japan*, April 9-11, 1991.
4. Seismic Isolation and Response Control for Nuclear and Non-nuclear Structures, Special Issue for the Exhibition of the 11th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology(SMiRT 11), August 18-23, 1991, Tokyo, Japan.
5. 민경원, "Frequency Window Method와 그 응용 범위", 한국 전산 구조 공학회, 제4권 제3호 1991년 9월, pp.31~35.
6. 민경원, "풍하중을 받는 고층 건물의 진동 조절", 대한 건축학회 학술발표 논문집, 제11권 제2호, 1991년 10월 26일, pp.441~444.
7. "건축" 특집 초고층 건축, 대한 건축학회지 제35권 제1호 1991년 1월.
8. "건축" 특집 초고층 건축과 구조, 대한 건축학회지 제31권 제2호 1987년 3월.
9. Chang, J.C.H. and Soong, T.T., "Structural Control Using Active Tuned Mass Dampers", *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 106, No.6, pp.1091~1098, 1980.
10. McNamara, R.J., "Tuned Mass Dampers for Buildings" *ASCE Journal of Structural Divisions*, Vol.103, No.9, pp.1785~1798, 1977.