

건물이 흔들린다구요?

건축 구조물의 진동제어

정형일 / 연구개발부 사원

현 대의 건물은 구조 해석기술의 향상, 시공 기술의 발달 및 사회적인 요구에 따라 대형화, 고층화, 밀집화 되어가고 있으며, 고강도의 콘크리트 재료나 합성강관 등의 철골재의 사용으로 구조물은 점차 가벼워지고 세장화 되는 추세에 있다.

그러나 이러한 특성을 가진 건물은 외력에 대한 에너지 분산능력이 적기 때문에 바람 및 지진에 의한 진동에 매우 취약하게 되어 구조적인 안전성을 위협하는 파괴는 물론 건물의 과도한 흔들림으로 인한 거주자의 불쾌감을 유발시키는 환경적인 문제가 심각하게 등장하고 있다. 이밖에도 산업이 발달함에 따라 상시진동이 문제가 되는 정보집약형건물, 반도체공장, 핵발전소 등이 등장하였다.

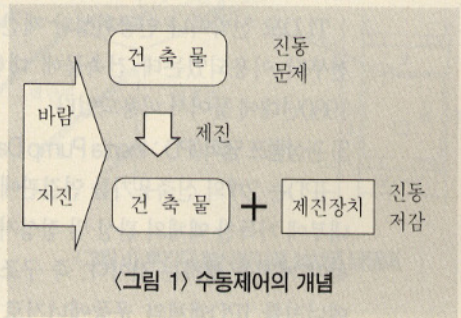
이러한 광범위한 진동문제에 대한 대안으로서 기계나 전기 분야에서 연구되고 있는 제진(制振)기법이 건축분야에 도입되었다. 제진은 건물에 특수한 장치 또는 기구를 설치하여 지진이나 바람 등에 의한 건물의 진동을 감소시키는 방법으로 에너지의 사용여부에 따라 수동형제진과 능동형제진으로 구분된다.

건축분야에서 제진기법이 본격적으로 연구되기 시작한 것은 미국, 일본 등을 중심으로 70년대 초반부터이며 80년대 중반 이후로는 실물 실험이 이루어져 몇몇의 제진장치를 갖춘 건물이 시공되어 그 성능이 확인되고 있다. 그러나 현재 우리나라의 건축분야에는 아직 제진기법이 초보적인 연구단계에 있다.

본고에서는 제어에 대한 기본개념과 사용되고 있는 장치들을 수동제어와 능동제어로 구분하여 소개한다.

수동제어시스템

에너지의 사용없이 제어를 하는 방식(그림 1)



1. 부가진동체형(그림 2)

부가진동체형 제진시스템은 질량-스프링-감쇠기구 또는 그것에 준하는 보조적인 진동체를 대상 주구조체에 부가하여, 주구조체 진동을 억제하는 것으로 다음의 것이 있다.

1) 동조질량댐퍼(TMD : Tuned Mass Damper)

TMD는 부가진동체형 댐퍼의 원형이라고도 말하며 오래전부터 동흡진기로서 알려져 있으며 최초로 이 원리가 이용된 것이 전기면도기의 진동을 제어하기 위하여 사용되었다.

현재에도 기계의 제진에서부터 장대교 등 대규모 구조물의 제진까지 폭넓게 사용된다. 제진 원리를 에너지적으로 설명을 하면, 진동하고 있

는 주구조체계의 입력에너지를 부가진동체인 부구조물의 운동에너지로 변화시켜 TMD의 감쇠기구를 통해 이 에너지를 소산하는 것이다. 주 구조체로부터 에너지를 많이 받아들여 제진 효과를 크게하기 위하여 주구조체의 고유진동수와 TMD의 고유진동수를 일치시켜, 공진현상을 이용하게 된다.

2) 동조액체댐퍼(TLD : Tuned Liquid Damper)

TLD는 용기내의 액체의 진동을 이용한 것으로 기본적으로는 물등의 액체를 담은 용기를 주구조체위에 올려 놓은 것 뿐이다. 즉 구조체의 입력에너지를 용기내 액체의 요동에너지로 흡입하여, 이것을 액체의 마찰, 액체 혹은 용기내의 벽과의 충돌에 의해, 최종적으로 열로 소산되어 제어효과를 일킨다.

TLD도 선박이나 인공위성의 제진등에는 이 전부터 이용되었는데 건축물에 대한 응용은 1980년대에 들어서 이용되었다.

3) 관성펌프 댐퍼(IPD : Inertia Pump Damper)

IPD는 2개의 신축용기를 연결관에 연결하여 내부에 가득찬 액체의 관성 및 점성저항을 이용하여 제진을 행하는 것이다. 즉 구조체의 진동 에너지를 IPD액체의 운동에너지로 받아들여져, 액체가 관내를 지날때 점성저항으로서 소산

된다.

4) 부가진동체형 장치의 설치예

TMD : 토론토의 CN 타워 (1975년)

보스톤의 John Hancock 타워(1977년)

시드니의 시드니타워 (1981년)

일본 쓰구바의 포트타워 (1986년)(그림3)

TLD : 일본의 골든타워(1988년)

2. 에너지 흡수기구(댐퍼)

종래에는 편심브레이스나 K형 브레이스 등을 사용하였으나 최근에는 구조재와는 별도로 특별한 장치나 기구를 건물내외에 부가하여 적극적으로 감쇠성능을 높여 건물의 응답을 저감하는 것이 최근에 행해지고 있다.

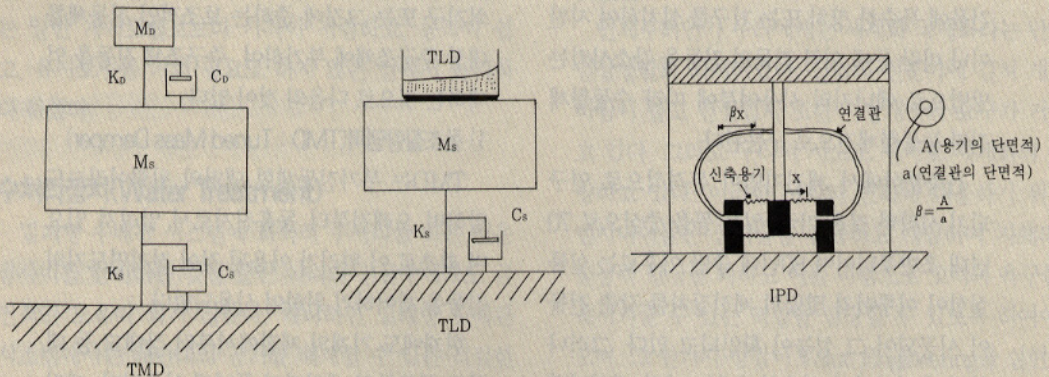
1) 마찰댐퍼

마찰댐퍼는 마찰을 이용하여 건물에 입력된 진동에너지를 열에너지로 변환하여 건물의 진동을 억제하는 감쇠장치이다.

2) 점탄성댐퍼

점성체 혹은 점성체의 점성감쇠에 의해 에너지를 흡수하는 것이다.

이 댐퍼는 비교적 작은 진폭에서도 감쇠효과를 발휘하며, 건물의 고차진동의 저감효과도 크다. 그러나 일반적으로 온도 의존성, 진폭 의존



〈그림 2〉 부가진동체형 장치의 개념도

성이 크다.

3) 납댐퍼(그림 4)

납의 초가소성을 이용한 댐퍼이며, 납의 이력 흡수에너지를 이용하는 것이다.

4) 조합댐퍼

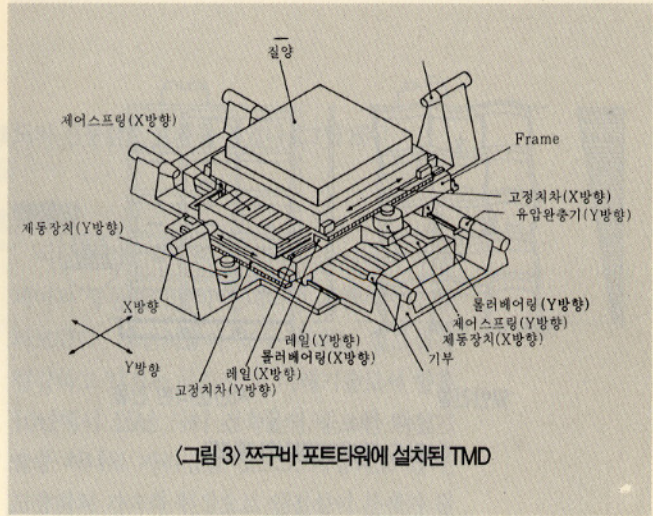
두가지 이상을 조합하여 만든 댐퍼이다.

5) 댐퍼의 설치 예

뉴욕의 월드트레이드센터(1976년)

시애틀의 콜롬비아 센터(1985년)

동경 후지다 본사빌딩 (1990년)



〈그림 3〉 쓰구바 포트타워에 설치된 TMD

3. 지반분리시스템 〈그림 5〉

지반분리시스템의 기본원리는 구조물의 기초와 지반사이에 수직방향으로는 매우 강성이 높고 수평방향으로는 유연한 요소를 설치하여 구조물의 고유진동수를 이동시켜 상부 구조물에 전달되는 지진에너지를 감소시키는 것이다. 우리나라에서 가장 연구가 진전된 분야로 핵 발전소 등의 적용에 관하여 실험도 이루어 졌다.

1) LRB : Laminated Rubber Bearing

고무와 강판을 서로 겹쳐 놓은 베어링으로 전달에너지를 최소화할 수 있는 장점이 있으나 기초와 지반사이에 상대변위가 크게 발생하고 초기 강성이 충분하지 못한 단점이 있다.

2) Lead Rubber Bearing

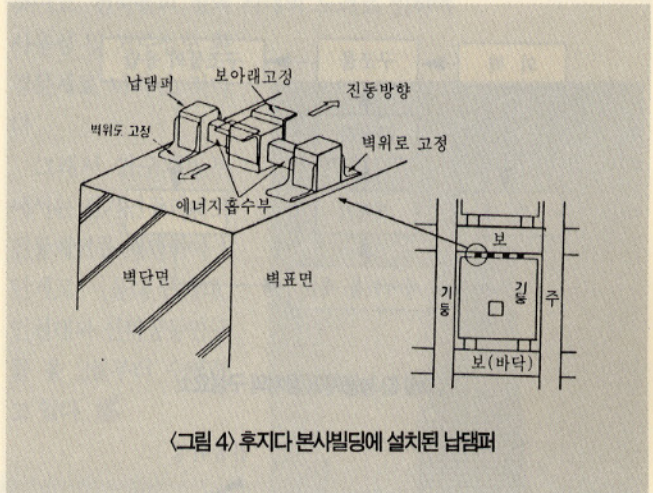
LRB의 단점을 보완하기 위하여 원주형의 납을 LRB의 중심부에 설치하여 상대변위를 조정한다.

3) 활동분리 시스템(Sliding Isolation System)

기초와 지반사이에 활동 마찰판을 설치하여 상부 구조물의 진동수 이동 보다는 마찰로 인한 에너지 감쇄결과로 지반분리효과를 얻는 예이다.

4) 지반분리시스템의 적용 예

미국의 Foothill Communities Law and Justice Center에 98개의 LRB 설치



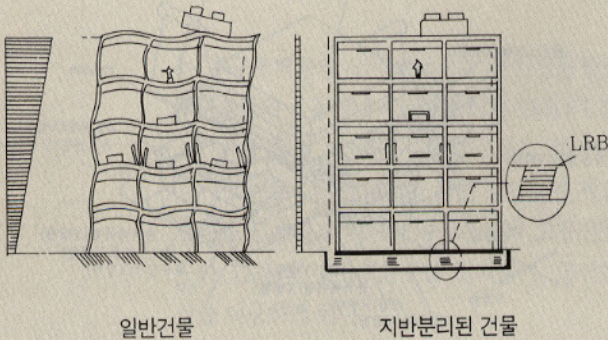
〈그림 4〉 후지다 본사빌딩에 설치된 납댐퍼

뉴질랜드 Claton Building에 80개의 Lead Rubber Bearing 설치

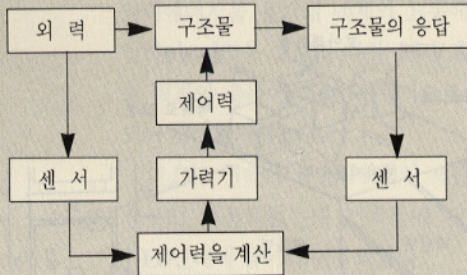
능동제어시스템

능동제어시스템이란 건물의 제진을 위하여 에너지가 요구되어지는 방식으로 외력 또는 건물의 응답을 감지하는 센서부분과, 주어진 제어 알고리즘에 근거하여 센서를 통하여 전달받은 정보를 이용하여 제어력을 계산하는 부분 및 건물에 제어력을 가하는 부분의 3가지로 구성된다.

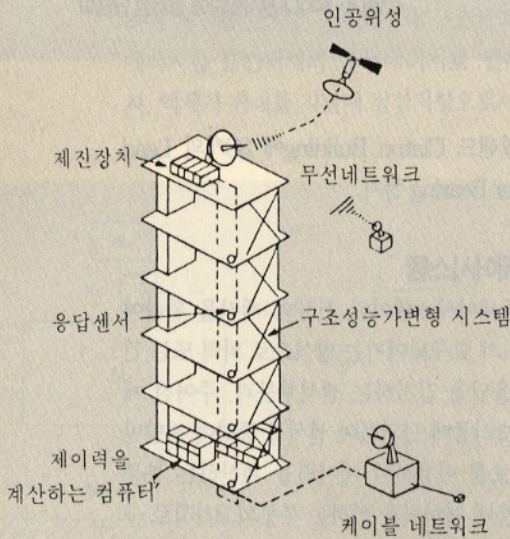
〈그림 6〉에 능동제어장치의 구성요소를 나타내었으며 〈그림 7〉에는 개념도를 나타내었다.



(그림 5) 지반분리장치의 개념도



(그림 6) 능동제어 장치의 구성요소



(그림 7) 능동제어의 개념도

1. 능동 동조 질량형 감쇠장치(Active Tuned Mass Damper : ATMD)

기존의 TMD(동조 질량형 감쇠장치)에 가력 장치를 덧붙인 것으로써, 가진 에너지를 소산시키는 수동제어효과와 더불어 능동적으로 구조물의 진동을 억제시키는 제어력을 가한다.

2. 능동 텐돈시스템(Active Tendon System)

구조물의 골조에 텐돈을 설치하고 텐돈에 인장력 및 압축력을 가하여 하중의 에너지를 흡수하게 하는 방식이다.

3. 능동 강성 조절장치(Active Variable Stiffness Controller)

구조물에 가해지는 하중의 주파수 특성을 측정하여 구조물의 강성을 조절함으로써 진동을 제어하는 방식이다.

4. 공기역학적 부가장치(Aerodynamic Appendages)

강풍하에서 빌딩의 상층거주자의 안락감을 저해하는 과도한 진동을 억제시키는데 이용될 수 있다. 이 방법의 특징은 제어력을 얻기 위해 풍력 그 자체를 이용하며, 부가장치의 조절은 측정된 구조응답에 의해 능동적으로 조절된다.

5. 충격 발생기(Pulse Generators)

순간적인 공기분사장치를 이용하여 제어력을 발생시키는 방법으로 제어 알고리즘으로는 펄스 제어가 적합하다.

6. 복합제어장치(Hybrid System)

수동제어계는 높은 진동수영역의 진동에너지를 효과적으로 흡수할 수 있는 반면 낮은 진동수 영역을 제어하고자 할때 아주 큰 용량의 제어장치가 필요하게 된다. 능동제어장치는 외

부에너지 공급장치를 이용하여 낮은 진동수 영역을 능률적으로 처리할 수 있다.

결과적으로 능동제어장치와 수동제어 장치의 조합은 경제적인 이득과 함께 구조안정성 측면에서도 유리하다. 왜냐하면 능동제어에서는 갑작스러운 정전이나 예상하지 못한 제어장치의 고장 등으로 제어계의 작동이 불가능한 경우 수동제어계가 제어기능의 일부를 수행하는 것도 바람직한 것이다.

7. 능동제어장치의 설치 예

능동제어장치의 경우 1989년 일본 동경에 京橋成和빌딩을 최초로 시작하여 몇몇의 건물에 설치되었는데 1993년 일본 요코하마 랜드마크 빌딩의 경우, 높이 296m, 70층의 초고층 건물로 이지역에 매년 불어오는 태풍에 의한 진동을 줄이고자 능동제어장치(AMD)를 설치하였다. 수동제어의 경우 1500톤이 넘는 추가질량이 요구되므로 능동제어장치를 설치하였다.

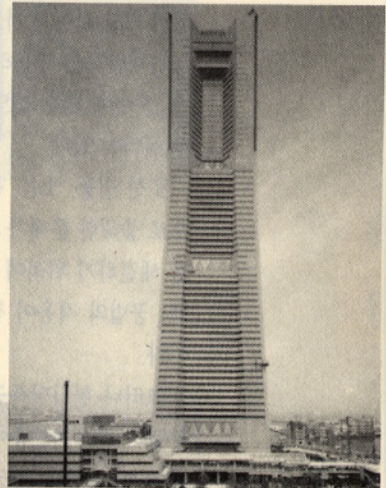
170톤 용량을 갖는 제어장치를 2개 설치하여 실제 43m/sec의 강풍에서 실험한 결과 50%정

도의 진동감소 효과를 얻었다.(그림 8)

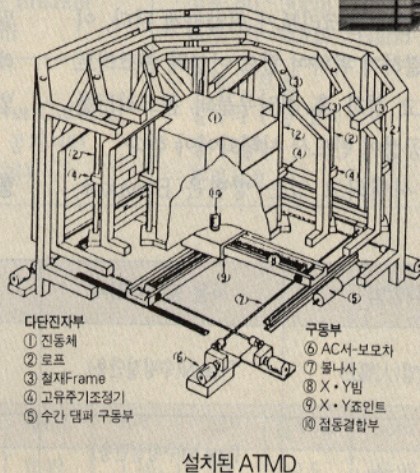
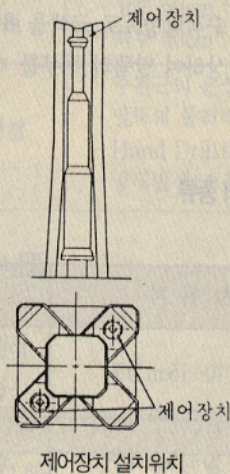
맺음말

이상으로 건축물의 진동제어의 개념과 수동제어와 능동제어방식에 대하여 개괄적으로 살펴해보았다. 제진기술의 경우 현재는 필요성을 절감하고 있지는 못하지만, 미래기술로서 향후 10년에서 15년 사이 건축물의 중요한 핵심기술중 하나로 자리잡을 것으로 예상되고 있다. 고층화의 가속화 현상으로 안전성이 문제가 될 것이고, 건축물의 질의 시대의 도래로 인하여 사용성 및 거주성도 환경문제로 나타날 것이다.

그래서 연구개발부에서는 장기연구과제로 진동제어를 채택하여 1 단계로 서울대, 연세대, 인천대와 산학공동연구를 올 2월부터 수행하고 있다. S



전경



(그림 8) Landmark 빌딩