

진동제어 시스템 고층건물 적용 사례

Case Study of Vibration Control System in Highrise Buildings



이정혜*
Yee, Jung-Hae



방중석**
Bang, Joong-Suk



최성모***
Choi, Sung-Mo

1. 서론

건물에 발생하는 진동을 제어하기 위하여 여러 진동제어장치에 대한 연구가 진행되고 있다. 크게 수동제어장치와 능동제어장치로 구분되는 진동제어시스템은 지진에 의한 구조물의 진동을 흡수하거나 소산하는 방법으로 구조적 안정성을 확보하고 있다. 최근에는 지진 뿐만 아니라 바람에 의한 진동을 저감하고자 고층건물에 외관형태의 변화 혹은 진동제어 장치의 부착이 적용되고 있다. 그러나 외관형태변화에 의한 진동 감소폭이 크지 않아 진동제어시스템을 통한 직접적인 풍진동 제어 방안의 연구의 필요성이 증가하고 있다. 뿐만 아니라 버즈칼리파가 162층, 828m규모로 완공됨에 따라 1킬로미터 이상의 극초고층 건물의 등장이 가까워지고 있다.

본 기사에서는 진동제어장치를 분류하고 지진하중 및 풍하중에 의한 진동을 제어하는 적용사례를 통하여 향후 초고층 건물의 진동제어장치 발전 방향을 고찰하고자 한다.

* 서울시립대학교 건축공학과 석사과정
** 대림산업 차장
*** 서울시립대학교 건축공학과 부교수

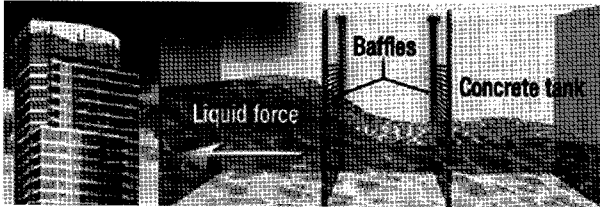
2. 진동제어 시스템 분류

2.1 수동형 진동제어 시스템 (Passive Control)

수동형 진동제어 시스템은 외부의 동력원 없이 구조물의 진동에너지를 소산 시키는 방법으로 TMD, TLD, Viscous Damper, Viscos-Elastic Damper 등이 있다. 동조질량감쇠장치(TMD)는 구조물의 진동수에 따른 이력 거동을 위한 강성장치, 감쇠장치 및 추가적인 질량으로 구성된다. TMD의 주기는 주 구조물의 기본주기에 동조되어, 주구조물의 fundamental mode가 발생될 때, TMD는 구조물의 관성과 반대로 작용을 하며 전체적인 구조물의 진동을 제어한다. 이와 같은 TMD는 John Hancock Building(Boston), Citicorp Building(New York)에서 볼 수 있다. 또한 Taipei 101에는 진자형 TMD가 설치되어 진동제어역할 뿐만 아니라 관광객의 흥미를 유발하는 훌륭한 인테리어효과를 보인다.

TLD는 수영장이나 물탱크 등을 건물 상부에 설치하여 수조내 물의 높이를 이용, 구조물의 고유진동수를 외부진동수와 동조시키는 제진장치이다. 이는 1)설치장소와 위치에 큰 제약조건을 받지 않아 기존 건물에 설치가

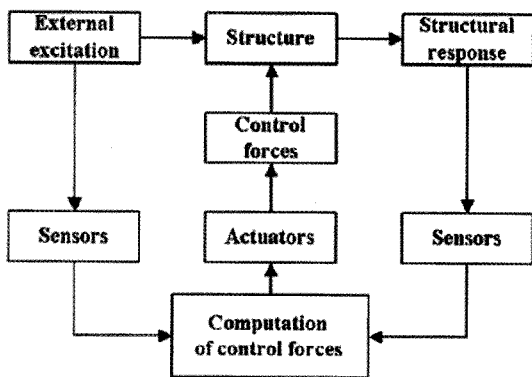
용이하고, 2)초기설치 비용이 TMD와 비교하여 50~70%정도 절약할 수 있고, 유지보수비용 등 경제적인 장점이 매우 높다. 3)또한, 서로 다른 진동수를 갖는 다자유도계(수평, 연직, 비틀림)진동에 대해서 제어가 가능하다.



〈그림 1〉 동조액체감쇠기 (TLD)

2.2 능동형 진동제어 시스템 (Active Control)

능동형 진동제어 시스템은 외부의 동력원을 이용하여 주구조물의 진동에너지를 제어하는 시스템으로 주로 수압, 공기압, 전자기력등을 이용한 액추에이터를 가력장치로 활용하고 있다. 특히 능동제어 시스템은 실행시스템과 실시간으로 이루어지는 진동제어과정에서 에러가 발생할 경우 구조물을 불안정하게 만들 수 있다. 따라서 외부가력원에 대한 최상의 진동제어 알고리즘을 구현하는 것이 필요하다.



〈그림 2〉 능동제어 시스템의 개념도

대표적인 능동제어시스템은 능동질량감쇠기와 능동가변강성장치 등이 있다. 능동질량감쇠기(Active Mass Damper)는 액추에이터에 의해 부가적인 질량이 구조물 거

동의 반대방향으로 작용하여 진동을 제어하는 장치이다. 능동가변강성장치(Active Variable Stiffness System)은 A형 태의 가새 끝단에 잠금장치 실린더를 설치하고 이 잠금장치의 개폐에 의해 가새의 강성을 변화시키는 제어장치이다. 제어기에 의한 잠금장치의 잠김과 해제에 의하여 가새의 적절한 강성이 선정되므로 구조물의 공진을 피할 수 있다.

2.3 준능동 진동제어 시스템 (Semi-Active Control)

준능동 진동제어 시스템은 수동제어와 능동제어의 장점을 조합한 시스템으로 큰 동력원 없이 능동제어 장치의 적응성을 제공한다는 점에서 주목을 받고 있다.

준능동 유체 감쇠기는 전기력 또는 자기력으로 조절이 가능한 ER(Electro Rheological)유체와 MR(Magneto Rheological)유체를 이용하여 신뢰성 높은 진동제어 시스템이다. 이와 같은 유체의 주요 특징은 유동적이며 점성이 있으며 유체가 전기장 또는 자기장에 노출되면 약 1/1000초만에 항복강도를 가지는 반고체로 변화했다가 전기장이나 자기장이 없어지면 원래의 상태로 되돌아가는 특징이 있다. 이외에 가변마찰감쇠기, 준능동 동조액체 감쇠기 등이 준능동 진동제어 시스템의 대표적인 시스템으로 분류된다.

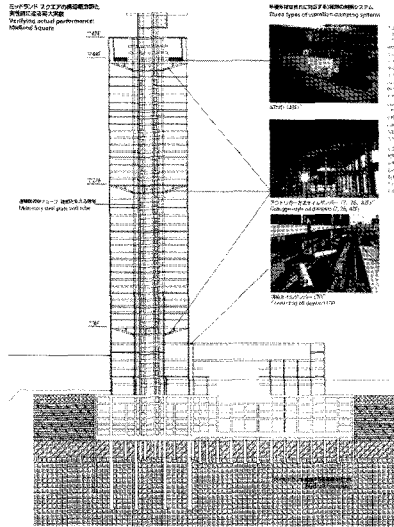
3. 적용사례 분석

3.1 Midland Square (ATMD , Oil Damper)

위치 : 일본 나고야
용도 : 오피스, 상업
구조 : 철골조
규모 : 지상 47층 / 지하 6층
완공 : 2006년 9월

일본 나고야시의 247m 높이의 Midland Square는 건물 내부에 고강도강판튜브($F_y=780N/mm^2$)를 설치하여 건물 전체의 강도와 강성을 확보하였다. 건물의 진동제어를 위하여 세가지 유형의 진동제어시스템을 적용하였다. 건물의 상층부(43층)에는 ATMD를 설치하였고, 7, 26, 42층에 아웃리거 형식의 오일댐퍼를 설치하여 건물

의 횡변위 및 진동을 제어한다. 또한 고층부와 저층부 사이에 설치된 연결오일댐퍼를 통해서도 진동을 제어하고 있다.



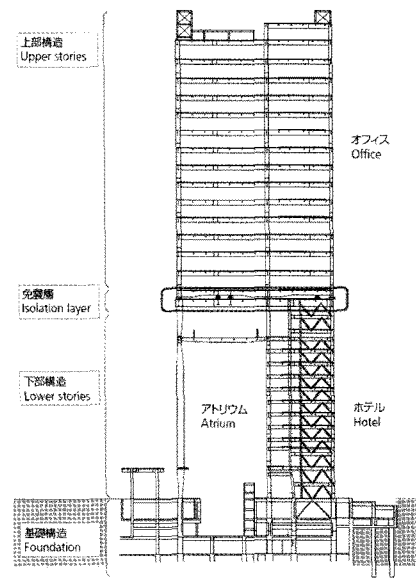
〈그림 3〉 Midland Square의 진동제어시스템

3.2 Sumitomo Building (Isolation System)

위치 : 일본 도쿄
 용도 : 오피스, 상업, 호텔
 구조 : RC, S, SRC
 규모 : 지상 27층 / 지하 3층
 완공 : 2004년 7월

최근 건물에 적용되는 구조시스템은 경제성 및 효율성 확대를 위하여 서로 다른 구조시스템을 적용하는 경우가 빈번하게 이루어지고 있다. 일본 도쿄의 Sumitomo Building의 경우 atrium과 호텔의 저층부와 오피스 상층부로 이루어진 27층 높이의 건물이다. 특히, 건물 중간층에 Isolation Layer를 두어 지진에 견딜 뿐만 아니라 저층부의 넓은 atrium을 가능하게 하고 있다.

기존의 Isolation Layer는 건물 하부에 설치하여 기초와 건물을 분리하는 기능을 갖지만, 최근에는 상층부와 하층부 사이에 Isolation Layer를 두는 “Mid-Story Isolation System”을 적용하고 있다. 이와 같은 시스템은 하층층이 기초와 같은 역할을 하도록 강하게 설계하여 상층부와 하층부를 분리하는 기능을 한다.

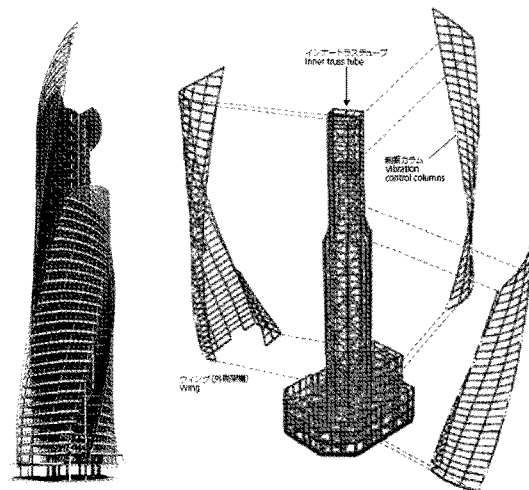


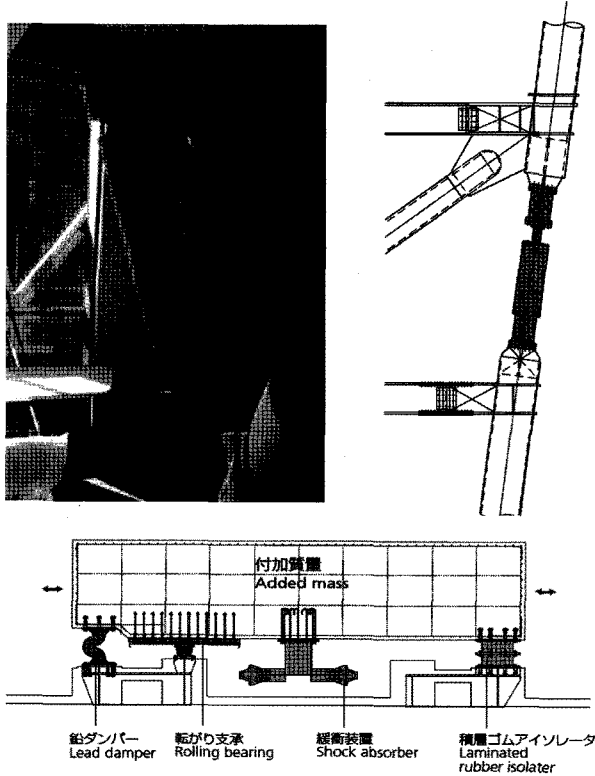
〈그림 4〉 Sumitomo Building과 Isolation Layer

3.3 Mode Gakuen (Damping Column)

위치 : 일본 나고야
 용도 : 학교, 상업
 구조 : S, SRC, RC
 규모 : 지상 36층 / 지하 3층
 완공 : 2008년 2월

최근 초고층건물 형태의 추세인 3T(Twist, Tilt, Taper)에 대표적인 일본 건물이 Mode Gakuen Spiral Towers는 지상 36층, 지하3층 규모로 주요 구조시스템은 내부의 트러스튜브를 Wing이라고 부르는 외부 구조





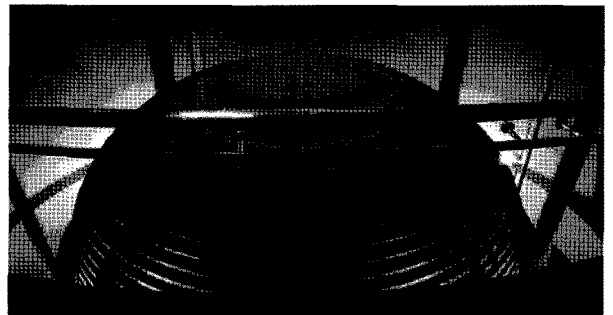
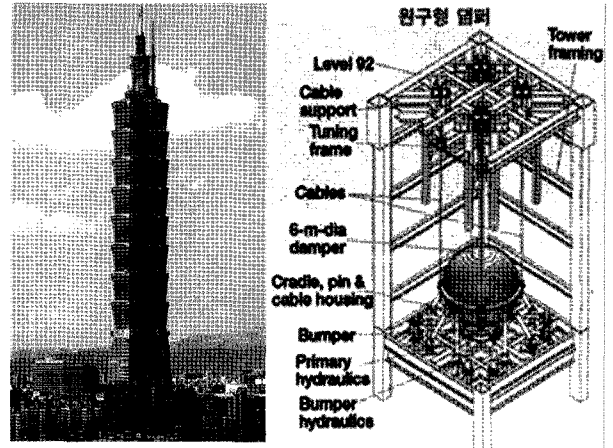
〈그림 5〉 Mode Gakuen Spiral Towers

체가 감싸고 있는 형태이다. 보는 각도에 따라 건물의 형태가 달리 보이는 역동적인 형태의 비정형 건물이다. 건물과 보를 브레이스로 연결한 내부의 트러스 튜브가 지진 에너지를 감소시키고, 건물의 횡력과 비틀림에 저항한다. 점성댐퍼를 이용한 26개의 제진기둥이 지진에너지를 효과적으로 흡수하고 있다. 뿐만 아니라 건물중량의 1%에 해당하는 질량댐퍼를 건물 최상층부에 설치하였고, 지진 발생시 건물의 변형은 댐퍼 미적용 경우에 비해 약 20% 감소하는 효과를 보인다. (Toru Kobori, 2007)

3.4 Taipei101 (TMD)

Taipei101은 지상101층 지하 5층의 508규모로 2010년 Burj Khalifa에 이어 세계 2위의 초고층 건물이다. 구조 시스템은 외곽의 콘크리트충전 메가컬럼 8개와 내부 Core가 건물 전체의 축하중과 횡하중을 제어한다. 메가컬럼과 Core는 8개층 마다 아웃리저로 연결되어 건물 전체의 횡하중제어 효율성을 높이고 있다. 특히, 풍하중에 의한 진동제어를 위하여 건물내부에 직경 6m의 진자형

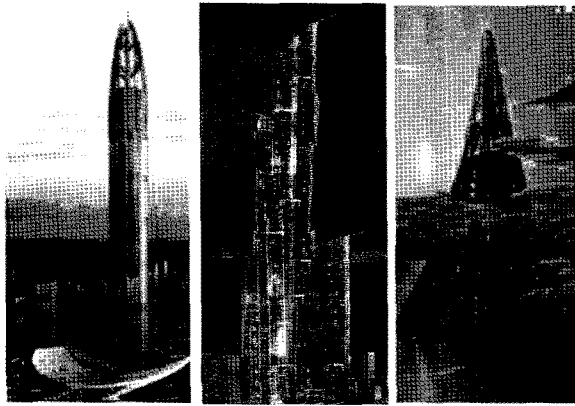
댐퍼를 설치하여 건물의 진동을 제어하고 있다. 무게 660톤에 달하는 이 댐퍼와 이를 지지하는 구조물은 5개층 높이를 차지하고 있으며 세계최대 크기이며, 건물의 일부분을 차지하는 형식으로 최초의 댐퍼이다.



〈그림 6〉 Taipei 101

4. 미래의 초고층 건물

현대의 도시는 늘어나는 인구를 수용할 수 있는 거주 공간 확보에 여러 노력을 기울이고 있다. 통계청 자료에 의하면 현재 세계인구는 약 65억명으로 추산되며 2050년에는 약 90억명으로 늘어날 것으로 예상된다. 건축가 파울로 솔레리나 여러 도시공간 연구자들은 기존의 수평적 도시확장이 아닌 도시의 수직적 확장을 제안하였고, 90년대 중반부터 일본을 중심으로 1킬로미터 이상 200층 이상의 도시형 극초고층건물이 제안되었으며 형태적으로 타워형, 묀음형, 피라미드형 세가지로 분류되고 있다.



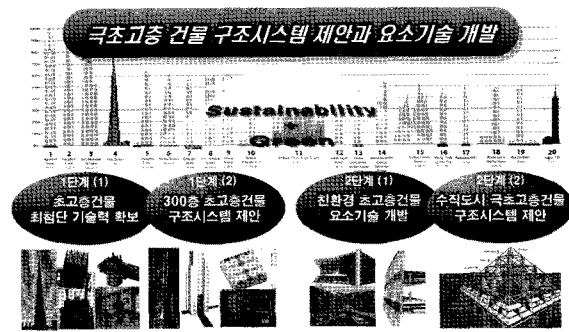
〈그림 7〉 극초고층건물의 형태별 분류

〈표 1〉 제안된 극초고층 건물

명칭	위치	높이(m)	층수	제안연도
직포aMile High Tower	미국	1610	528	1956
Sky City 1000	일본	1000	196	1988
X-Seed 4000	일본	4000	800	1990
Aeropolis 2001	일본	2001	500	1995
Super Pyramid	일본	1000	195	1995
Al Burj	UAE	1400	200	2008

미래의 극초고층 건물 적용을 위한 진동제어 시스템은 그 기본방향이 주구조물의 거동제의 성능을 향상시켜야 한다. 이는 구조물에서 발생하는 진동에너지 흡수 혹은 에너지를 소산시킬 수 있어야 한다. 특히 Mass타입의 댐핑기구의 설계에 관해서는 구조물과 질량댐퍼사이의 공간절약 방안이 개발되고 있다. 또한 설계자와 엔지니어들은 진동제어시스템의 구조적 성능 뿐만 아니라 Taipei101과 같이 미적기능도 포함되어 연구를 해야한다. (Ali & Moon 2007)

이와 관련하여 본 연구실에서는 향후 300층, 500층 규모 극초고층건물에 대한 최적 구조시스템의 선정에 관한 연구가 2007년부터 진행 중이다. 1단계 연구에서 기존 초고층 건물의 분석과 기술력확보등을 바탕으로 300층 규모 초고층 건물의 구조시스템을 제안하고, 2단계



〈그림 8〉 초고층 구조시스템 선정 평가 기술 (국기재정연구실 사업)

연구에서 친환경 요소기술을 접목한 수직도시형 극초고층 건물의 구조시스템을 제안하는 연구가 5년간(2007년~2012년) 진행되고 있다.

5. 결론

본 기사에서는 진동제어시스템에 대한 분류, 실제 적용사례, 향후적용방안에 대하여 살펴보았다.

최근 초고층 건물의 형태가 다양화 됨에 따라 풍하중에 의한 진동을 제어하기 위한 다양한 방법들이 연구되고 있다. 최적의 진동제어 시스템 적용을 위해서 구조적 성능 뿐만 아니라 경제성, 시공성, 미적기능 등 다각적인 연구가 필요하다.

또한 가까운 미래에 등장하게 될 수직도시형 초고층건물에 대한 연구가 진행되어야 필요가 있다. 좁은 국토에 인구집중이 심각한 상황의 해결을 위해서 친환경 수직도시형 초고층 건립이 불가피하다.

앞으로의 초고층에 관한 연구는 기존 건축의 3요소인 구조, 기능, 미(美)에 덧붙여 새로운 건설기술과 신재료 개발 및 자연친화적 실내 환경 구축을 위한 기술개발이 필요하다.

- 참고문헌 -

1. 석근영, 김기철, 강주원, 구조물의 진동제어 시스템, 공간구조학회, 2010.06
2. 김영문, 풍하중을 받는 고층건물의 진동제어기술, 대한건축학회, 2006.04
3. 日建設計, New Horizons in Structural Design,

2008.04

4. Mir M. Ali et al., Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects, Architectural Science Review, Vol.50,3, pp 205~223, 2007.06

5. Toru Kobori, Trends in the Structural Design of High-Rise Steel Structures in Japan, China Steel Construction Society, 2007.

6. 최성모, 초고층 구조시스템 선정 평가 기술 (국가지정연구실사업) 1단계 연구보고서, 2010. 06