

## 고층건물의 진동제어

동 조 질 량 형 감 쇠 장 치

### 1. 개 요

고층건물의 설계시에는 진동에 대한 고려가 필수적이다. 고층건물의 진동을 유발시키는 하중원으로서는 지진과 바람이 대표적이며 그밖에 빌딩 내에 설치된 기계에 의한 기계진동과 빌딩 주변의 여러 환경들로부터 전달되는 진동 등이 있다. 이들 진동원에 의해 발생하는 과도한 진동은 구조물의 사용성에 큰 문제를 일으킬 수 있으며, 심한 경우에는 구조적인 파괴를 유발시키기도 한다.

지진의 경우, 발생 빈도는 낮지만 한번 발생하였을 경우에는 큰 피해를 발생시킬 수 있으므로 고층건물의 설계시에는 내진설계가 필수적이며, 지진의 주요 주파수 영역을 피하여 유연하게 설계하는 것이 보통이다.

그러나 이와같이 내진설계된 유연한 구조물은 강한 바람에 의해 과도하게 진동할 위험이 있으며, 이로 인해 고층건물에 살고있는 사람들의 불안감을 초래하는 등 사용성이 문제된다. 바람에 의한 고층건물의 진동을 적절한 수준으로 감소시키는 방법에는, 구조물의 형상을 공기역학적으로 유리하게 설계하는 방법, 동조 질량형 감쇠장치(TMD: Tuned Mass Damper), 동조 유동형 감쇠장치(TLD: Tuned Liquid Damper), Base Isolator 등 수동적인 기구를 구조물에 부착하는 방법, 그리고 능동 질량형 감쇠장치(AMD: Ac-

tive Mass Damper), 능동 동조질량형 감쇠장치(ATMD: Active Tuned Mass Damper), 능동 강성 조절장치(AVS: Active Variable Stiffness) 등을 사용한 능동적인 방법이 있다.

공기역학적인 고려를 통하여 구조물의 형상을 설계하여 구조물의 과도한 동적 거동을 줄이는 데에는 한도가 있으므로, TMD 등 수동적인 방법들이 많이 연구되어 왔으며 일부 구조물에 사용되고 있다. 그러나 수동적인 방법의 실제 적용에는 다음과 같은 몇 가지 문제점이 지적되고 있다. 즉, 적절한 TMD의 동조 계수들을 결정하고 이에 맞추어 설치하기가 힘들다는 점과, 구조물에 가해지는 동적하중의 주된 주파수 영역이 동조된 주파수 영역과 달라질 경우에는 오히려 구조물의 거동을 크게 할 수도 있다는 점, 그리고 어느 정도의 감진 효과를 보기 위해서는 구조물 전체 질량의 1% 정도나 되는 질량의 장치가 필요하며, 고층건물과 같은 대형구조물에서 이를 설치하기가 매우 힘들다는 점이다.

최근에는 이와같이 여러 문제점들을 갖는 수동적인 진동제어기법의 대안으로 능동제어기법이 제안되어 활발히 연구되고 있다.

### 2. 수동제어장치

수동제어는 동적하중에 의해 구조물에 전달되는 에너지를 수동제어장치가 대신 소산시켜줌으로써 구조물 자체의 진동이 감소되도록 한다. 그림 1에서와 같이 주구조물의 기본자유진동수와 같

\* 한국과학기술원 토목상학과 교수

\*\* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

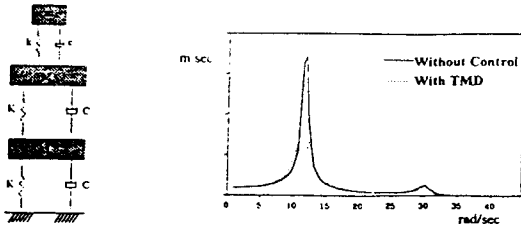


그림 1. TMD가 설치된 구조물과 전달함수의 비교

은 자유진동수를 갖도록 동조된 TMD를 설치했을 경우 동조된 주파수에서 주구조물의 응답이 급격히 감소됨을 알 수 있다.

### 3. 능동제어장치

능동제어의 기본개념을 살펴보면 다음과 같다. 즉, 구조물에 가해지는 하중과 이로인한 구조물의 거동을 측정하고, 측정된 신호를 바탕으로 하중의 영향을 최대한으로 상쇄시킬 수 있는 힘을 계산하여, 가력장치를 통해 구조물에 인위적인 힘을 가한다. 이 과정에서 실제 구조물의 거동을 모든 점에서 측정하기란 불가능하므로, 측정하지 못한

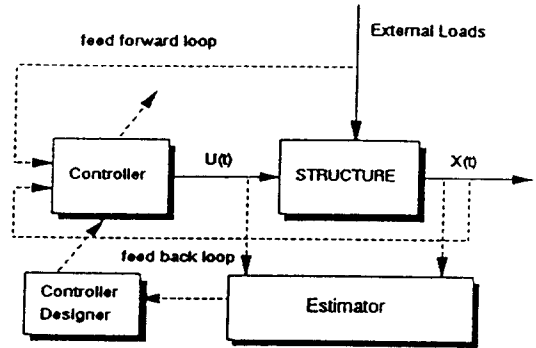


그림 2. 능동제어의 도식화

지점의 거동추정(State Estimator)이 필요하다. 이를 그림 2에서 도식적으로 나타내었다.

효율적이며 안정적인 제어장치를 구성하기 위해 다음과 같은 많은 제어기구들이 제안되어 왔다.

#### 1) 능동 동조 질량형 감쇠장치(Active Tuned Mass Dapmer : ATMD)

기존의 동조 질량형 감쇠장치에 가력장치를 덧붙인 것으로써, 가진 에너지를 소산시키는 수동제

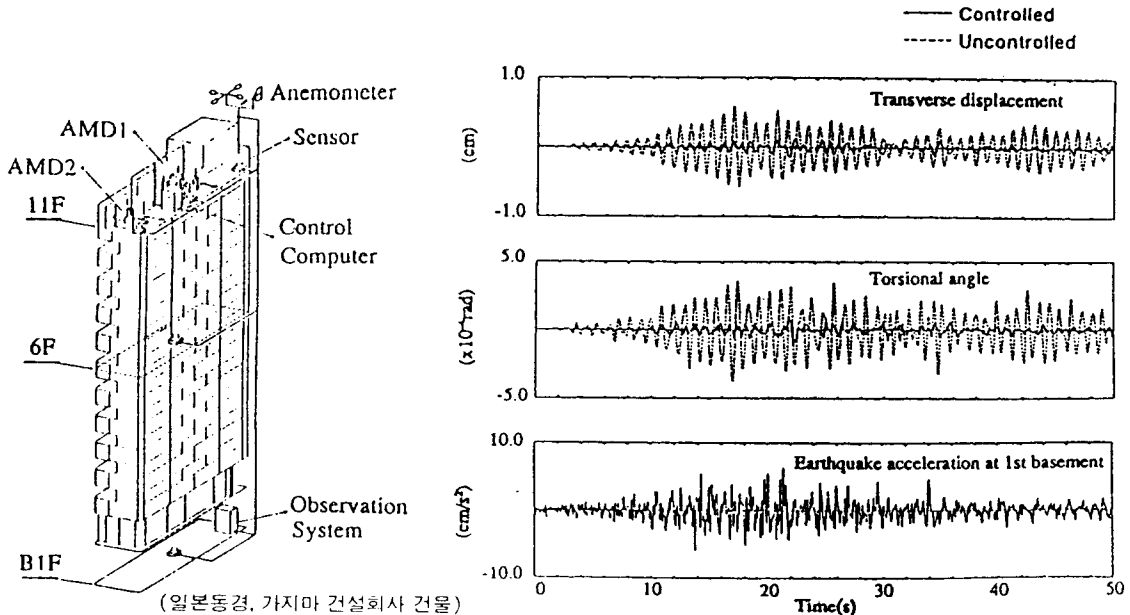
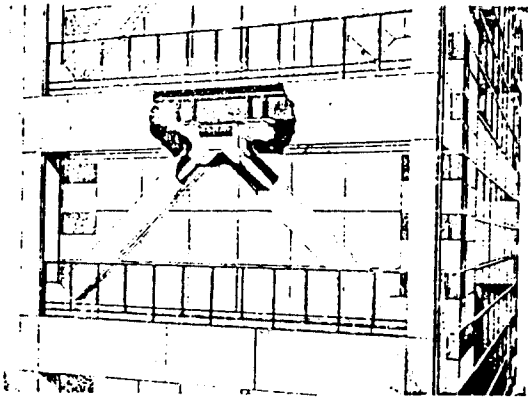
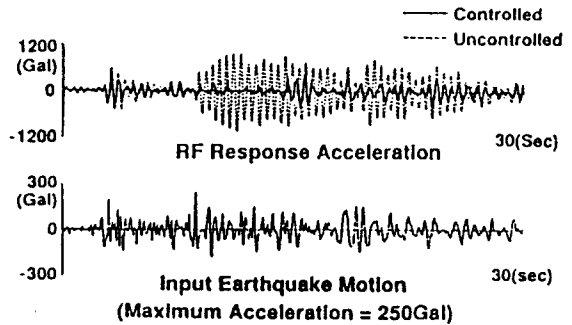


그림 3. ATMD가 설치된 건물의 개념도 및 지진에 대한 응답의 비교



(일본 가지마 건설회사)

그림 4. AVS가 설치된 건물의 개념도 및 지진에 대한 응답의 비교



어의 효과와 더불어 능동적으로 구조물의 진동을 억제시키는 제어력을 가한다. 초기에는 용량이 큰 유압식 가력장치를 사용하였으나 최근에는 전기식으로 바뀌는 추세이다. 그림 3은 ATMD가 설치된 일본 동경에 있는 11층 건물의 개념도와 지진에 대한 제어의 효과를 보인 것 같다.

### 2) 능동 강성 조절 장치(Active Variable Stiffness System : AVS)

구조물에 가해지는 하중의 주파수 특성을 측정하여 구조물의 강성을 조절함으로써 진동을 제어하는 방법이다. 그림 4에 AVS의 개념도 및 제어 효과를 보였다.

3) 그 밖에 Aerodynamic Appendages, MSBC (Moving Surface Boundary Layer Control), Pulse Generators 등이 있다.

### 3. 제어력 산정기법

작은 제어력으로 효율적이고 안정적인 진동감소 효과를 보기위해 여러가지의 제어력 산정기법들이 제안되어 왔으며, 각각을 살펴보면 다음과 같다.

#### 1) Optimal Control

구조물의 거동과 Control Force로 구성된 목적

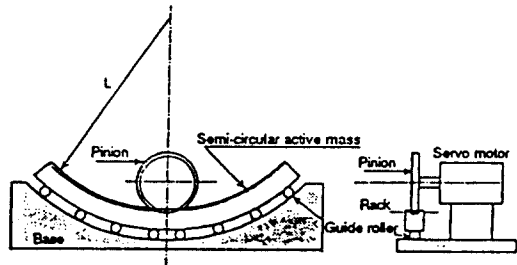
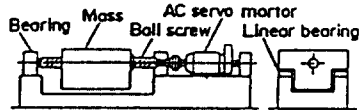


그림 5. 여러종류의 ATMD 개념도

함수를 구성하고, 구조물의 특성과 가력장치의 성능에 맞게 적절히 선택된 목적함수의 계수에 대해서 전체시간에 걸쳐 최적화시킴으로써, 최소한의 제어력만으로 최대의 제어효과가 보장되도록 Control Force를 구한다.

#### 2) Instantaneous Optimal Control

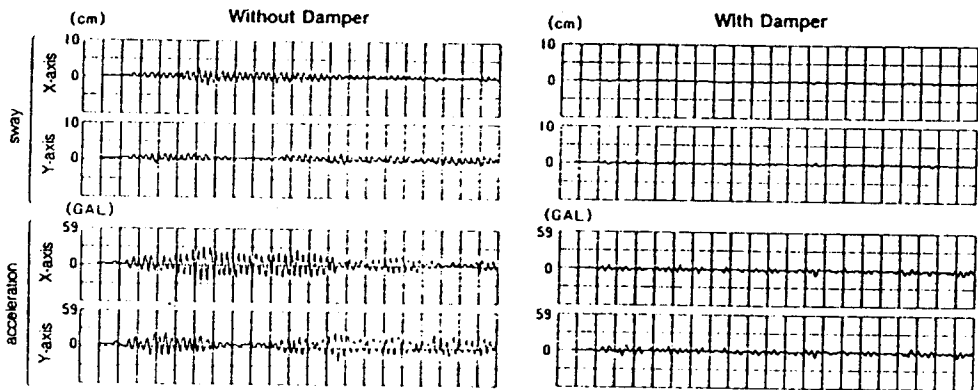
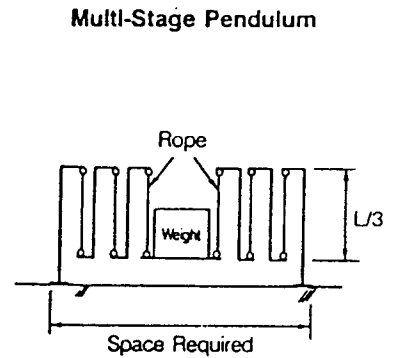
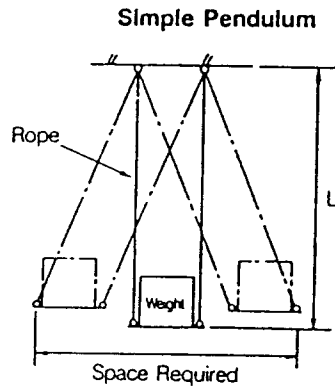
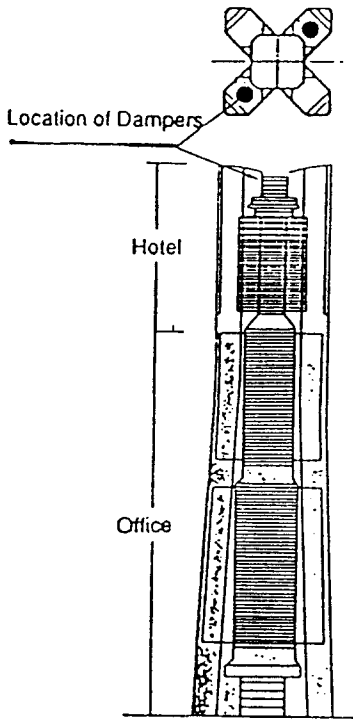
시간에 대하여 유한차분화된 구조물의 운동방정식을 바탕으로 매순간마다 구조물의 거동과 Control Force를 최적화시킴으로써 Control Force를 구한다. Optimal Control에 비해 구조물에 가해지는 외부 하중이 직접적으로 Control Force 산정에 연결되어 효율적이다. 그러나 실제

적으로 안정성이 떨어지고 구조계수에 민감하다.

### 3) Robust Control

실제 구조물의 제어효과는 구조물의 계수의 불확실성과 측정 신호의 오차, 운동 방정식에 포함되지 않은 고차 모드 및 비선형 효과등 Control

Force의 산정시에 고려되지 못한 여러요소들에 영향을 받는다. 이와같은 요소들은 확률적으로 표현될 수 있으며 적절한 과정을 통하여 제어효과는 최대한으로 보장하면서 Control System의 불확실성에는 민감하지 않도록 Control Force를 산정한다. 정의되는 목적함수에 따라  $H_{\infty}$  Control과  $H_2$



\* Aero dynamic data used are from wind tunnel tests carried out by Mitsubishi Estate Co, Ltd.

그림 6. 일본 요코하마 Landmark Tower

Control이 있다.

4) 그 밖에 Pole Assignment, Bounded State Control, Fuzzy Control, Neural Net Control 등 고전적인 방법에서 인공지능 이론에 바탕한 방법에 이르기까지 많은 방법들이 있다.

#### 4. 실제 적용에

최근에는 실제로 능동제어 장치를 사용하여 진동을 감소시킨 구조물의 건설이 몇차례 있었으며, 또한 앞으로 건설될 몇몇 구조물에서도 능동제어 장치의 사용이 고려되고 있다. 1993년도에 완공된 일본 요코하마 Landmark 빌딩의 경우, 높이 296meters, 총질량 2610,000 tons의 초고층 건물로써 이 지역에 매년 불어오는 태풍에 의한 진동을 줄이고자 능동제어장치를 설치하였다. 이 건물의 상층은 호텔로 계획되었는데 강풍발생시 투숙객의 불편을 감소시키기 위해 진동제어장치의 설치를 고려한 결과, 수동제어장치의 경우 1000 tons이 넘는 추가질량이 요구되므로, 능동제어장치를 설치하게 되었다. 특별히 작은 공간을 활용할 수 있도록 다단계 진자형태의 제어기구를 고안하였으며, 170 tons 용량을 갖는 제어장치를 2개 설치하였다. 실제 43 m/sec의 강풍에서 실험한 결과 50% 정도의 진동감소 효과를 얻을 수 있었다. 그림[6]에 Landmark 빌딩과 다단계 진자형 제어장치의 개념도 및 제어효과를 보이었다.

#### 6. 결 언

앞에서는, 강한 바람과 지진에 의한 고층 구조물의 진동을 감소시키기 위하여, 능동제어장치가 효과적으로 사용될 수 있음을 보이었다. 그러나 능동제어장치를 실제 구조물에 널리 적용하기에는 아직 많은 문제점들이 남아있다. 첫째, 효과에 비해 고가의 진동제어장치가 필요하며 유지관리에 많은 비용이 필요하다. 또한 진동제어장치가 원활히 작동하기 위해서는 계속된 에너지의 공급이 있어야 하는데, 지진과 같은 과도한 구조물의 진동시 이를 보장할 수는 없다. 그러므로 극한상

황에서는 진동을 오히려 증폭시킬 수도 있다. 둘째, Control Force의 산정시 사용되는 목적함수의 가중행렬을 결정하는 정형화된 방법이 아직 존재하지 않으며 효율적인 산정을 위해서는 많은 시행착오가 필요하다. 그밖에도 복잡한 실제 구조물의 단순한 모형화에 따라서 여러 문제점들이 발생하기 쉬우며, 실제 제어시에는 시간지연효과나 측정되지 못한 거동에 의한 문제등이 있다.

구조물의 진동 저감방안에 대한 지금까지의 연구결과로는, 일반적인 경우에 있어서는 Base Isolator와 같이 재료의 감쇠특성을 이용하는 방법이 추천되고 있으나, 현재 내진설계된 고층건물과 같은 대형 구조물의 바람에 대한 진동대책이나 특수 구조물의 진동 제어등의 몇몇 경우에 있어서 능동제어의 필요성이 인정되고 있다. 좀더 안정적이고 효율적인 제어기법의 개발에 의해 많은 실제 구조물에 적용 범위를 넓힐 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

1. Hiromi Kihara, Hiroaki Kunitsu, Yutaka Asami, "Structural Design and Wind Resistance of Fukuoka Tower with T.M.D.," Proc. of Natural Hazards Mitigation, 1993.
2. T.Kobori, "Active Vibration Control for Architectural Structure," Proc. of Int'l Symposium on Active Control of Sound and Vibration, Tokyo, Japan, 1991.
3. Y.Kubo, V.J.Modi, H.Yasuda, K.Kato. "On the Suppression of Aerodynamic Instabilities through the Moving Surface Boundary-Layer Control." J. of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics, Elsevier, 1992.
4. S.K.Lee and F.Kozin, "Bounded State Control of Linear Structures." Proc. of Int'l Symposium on Structural Control, 1987.
5. H.H.E. Leiopholz and M. Abdel-Rohman, Control of Structures, Martinus Nijhoff, 1986.
6. Frank L. Lewis, Applied Optimal Control and Estimation, Prentice-Hall, 1992.
7. Tadashi Nagase, Toshiharu Hisatoku, and Shinji Yamazaki, "Wind Resistant Design and Response Control of Tall Building.." Proc. of Natural

- ...ds Mitigation, 1993.
- .. Kazuto Seto, "Trends on Active Vibration Control in Japan." Proc. of 1st Int'l Conference on Motion and Vibration Control(MOVIC), 1992.
9. T.T. Soong. *Active Structural Control: Theory and Practice*. Longman Scientific & Technical, 1990.
10. 방계목, 김상범, 윤정방, "고정식 해양구조물의 능동제어", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 7(1), 1994.
11. 홍창국, 김기봉, 이우현, 우성균, "토목구조물의 제어계 설계방안에 관한 연구," 토목학회 학술발표회 논문집, 1993.