

구조물의 진동제어 시스템

A Vibration Control System of Structures



석근영*
Suk, Keun-Young



김기철**
Kim, Gee-Cheol



강주원***
Kang, Joo-Won

1. 서론

시대적 요구에 의한 초고층 및 장경간 구조물은 재료, 설계 및 시공 기술 등의 발달로 꾸준히 건설되고 있다. 이러한 구조물은 높이와 길이에 대한 장점에도 불구하고 연성증가 및 감쇠부족 등으로 처짐과 진동에 과도하게 발생하고 있어 사용자에게 불쾌감을 유발시키거나 심하면 구조적 손상을 초래하기도 한다.

지진, 바람, 차량 및 열차 운행 등, 다양한 진동원에 의한 구조물의 진동은 구조물의 형상, 강성, 질량, 감쇠 조절 등의 다양한 측면에서 제어가 이루어질 수 있으며 또한 수동 또는 능동(준능동) 시스템의 형태로 진동제어가 가능하다. 질량이나 강성 조절을 통한 구조시스템의 개선에 있어서 구조물의 질량 또는 강성은 조절이 쉽지 않으며 구조물이 완성되기 전까지는 정확히 예측하기가 어렵다. 특히, 구조물의 변위와 속도 응답에 대한 상관관계로 인하여 이상적인 구조시스템을 선정하는데 어려움이

있다. 그리고 구조물의 감쇠효과를 증가시키기 위한 방법으로 구조, 토질 및 공기 역학적 접근이 가능하나 이러한 방법은 적용에 있어서 한계가 있다. 따라서 구조물 본래의 감쇠가 부족한 경우에 부가적인 감쇠장치를 설치하게 된다.

지금까지 부가적인 감쇠장치 설치에 의한 구조물의 진동제어에 관한 몇몇 방법들은 성공적으로 적용되고 있으며 새롭게 제안되는 방법들도 적용범위의 확대와 제어효과 개선 가능성을 보여주고 있다. 현재, 건설분야의 구조물 진동제어 기술은 빠르게 발전하고 있으며 많은 연구자들의 관심과 함께 연구가 수행되고 있다.

본 기고에서는 초고층 건축물의 진동제어를 위한 부가적인 진동제어 장치에 대하여 알아보고 이에 대한 적용 방법을 고찰하고자 한다.

2. 진동제어 시스템의 분류

2.1 수동제어(Passive Control)

수동제어 시스템은 외부 동력원이 필요 없으며 구조물의 감쇠, 강성, 강도를 강화하여 직·간접적으로 에너지

* 정회원 · 영남대학교 건축학부 박사과정

** 정회원 · 서일대학 건축과 부교수

*** 정회원 · 영남대학교 건축학부 부교수

를 소산시키는 방법이다. 수동 제어장치를 포함한 구조 시스템에 수동 제어장치에 의한 에너지가 증가되지 않음 시스템의 간편성과 신뢰성으로 그 적용성이 우수하다.

2.2 능동제어(Active Control)

능동제어 시스템은 액추에이터와 같은 외부 가력원을 이용, 구조물 거동의 반대방향으로 구조물에 가력하여 구조물의 에너지를 소산시키는 방법이다. 액추에이터로 보내지는 제어알고리즘에 의한 신호들은 다양한 센서에 의하여 계측된 구조물의 응답에 관한 함수에 의해서 결정된다. 능동제어 시스템은 가력원에 대한 외부 동력원이 항상 필요하므로 이에 대한 고려가 필요하다.

2.3 복합제어(Hybrid Control)

"Hybrid Control"용어의 일반적인 사용은 능동제어와 수동제어 시스템들의 조합으로 수동제어 시스템의 성능을 개선하고 보완하기 위해서 능동제어 시스템이 사용된다. 예를 들어, 구조물의 최상부에 능동의 질량감쇠기와 함께 구조물에 분포된 추가적인 수동의 점탄성 감쇠기가 설치된 경우 또는 수동의 기초면진 시스템에 구조물의 성능향상을 위하여 능동적으로 제어가 가능한 액추에이터가 추가로 설치되는 제어 시스템이다. 복합제어 시스템은 일반적으로 수동제어 시스템의 단점을 극복하고 제어성능을 향상시키기 위하여 능동제어 시스템을 부가적으로 설치한 것이다.

2.4 준능동제어(Semi-active Control)

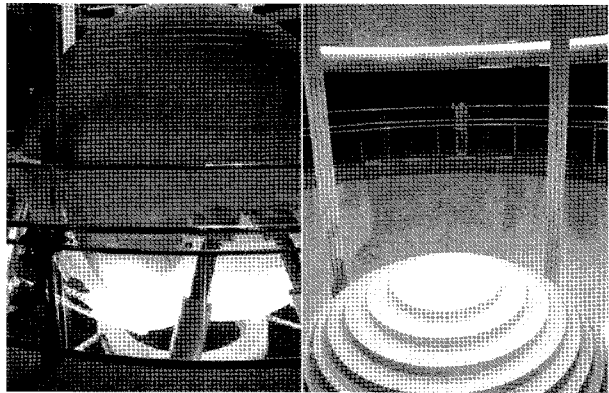
준능동제어 시스템은 능동제어 시스템과 유사하나 능동제어 시스템보다 에너지 요구량이 작다. 준능동제어 장치는 구조시스템에 기계적인 에너지를 추가하지 않으므로 제한된 입력과 출력의 안정성이 보장된다.

그리고 최근에는 ER, MR과 같은 스마트 재료의 이용으로 준능동제어 시스템의 우수성이 한층 더 높아지고 있다. 이러한 준능동제어 시스템은 수동제어 시스템의 신뢰성과 능동제어 시스템의 적응성에 대한 장점을 가지고 있다.

3. 수동제어 시스템

3.1 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper)

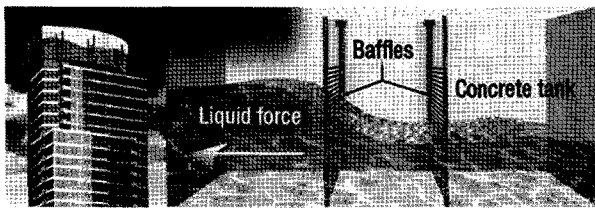
동조질량감쇠기(TMD)는 주구조물에 진동수에 따른 이력거동을 제공하기 위해 적절한 강성장치, 감쇠장치 그리고 부가적인 질량으로 구성된다. 구조물의 1차 고유 주기에 동조하도록 TMD를 설계 및 장착한 구조물의 1차 모드 응답은 상당히 감소하지만, 다른 고차모드 응답은 아주 미미하게 감소되거나 심지어 증폭되기도 한다. 이러한 진동수와 관련된 TMD의 한계를 극복하기 위하여 다양한 탁월진동수에 각각 동조될 수 있는 여러 개의 동조질량감쇠기를 설치하는 다중 동조질량감쇠기(Multiple TMD)가 사용되기도 한다.



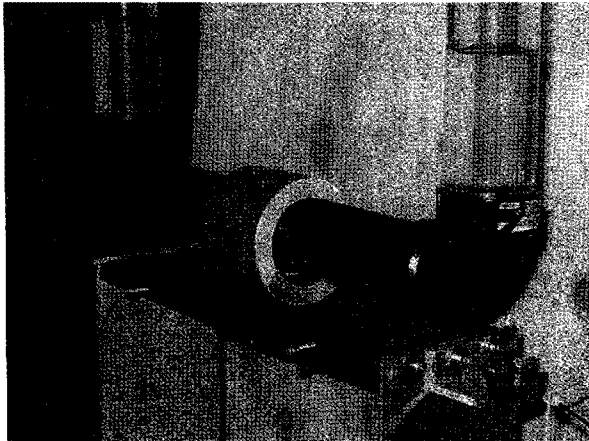
〈그림 1〉 동조질량감쇠기

3.2 동조액체감쇠기(Tuned Liquid Damper)

TMD와 비슷한 개념의 동조액체감쇠기(TLD)와 동조액체기동감쇠기(TLCD)는 구조시스템에 간접적으로 감쇠력을 전달하여 구조물의 진동을 제어한다. 동조액체감쇠기는 액체의 점성거동과 진동파 단절을 통하여 구조물의 에너지를 흡수한다. 동조액체기동감쇠기는 내부의 수두 손실 특성을 가지는 구멍을 통해 액체가 지나감으로써 에너지를 소산시키는 기능을 한다. TMD와 유사한 원리로 작동되는 동조액체감쇠 시스템은 구조물의 거동 한계와 관계없이 항상 가동되지만, TMD는 구조물의 거동에 대한 어느 한계점 이상에서 가동되도록 하는 메카니즘이 있어야만 한다.



〈그림 2〉 동조액체감쇠기



〈그림 3〉 동조액체기동감쇠기

3.3 기타 수동감쇠기

- 강재항복감쇠기(Metallic Yield Damper)

지진으로부터 구조물에 입력되는 에너지의 소산시키기 위한 효과적인 메카니즘 중에 강재의 비탄성 변형을 이용하는 방법이 있다. 이들 장치들의 특성은 안정적인 이력거동, 저반복 피로특성, 장기적인 신뢰성 그리고 환경적 온도에 상대적으로 민감하지 않다는 것이다. 실제 이 장치들이 효과적으로 거동하기 위해서는 임의의 반복 하중에서 요구되는 이력거동 특징을 가져야 한다.

- 마찰감쇠기(Friction Damper)

마찰은 에너지 소산을 위한 또 다른 메카니즘 중에 하나이다. 구조물이 탄성거동을 하는 동안 마찰 시스템이 소성거동을 하도록 하는 것으로 장치의 사용연한 동안 일정한 마찰계수를 유지할 수 있는 재료를 사용해야 한다.

- 점탄성감쇠기(Viscoelastic Damper)

점탄성감쇠기는 점탄성 고체의 변형정도에 따라서 구조물의 에너지를 소산시키는 장치이다. 점탄성감쇠기는

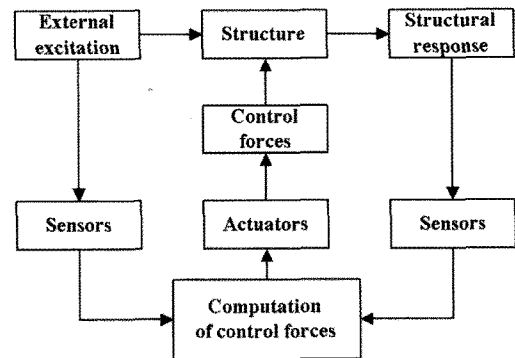
점탄성 재료들의 층간에 발생하는 전단변형을 통하여 에너지를 소산시키므로 점탄성감쇠기의 거동은 가진원의 진동수, 점탄성재료의 변형률과 주변의 온도에 영향을 받는다.

- 점성유체감쇠기(Viscous Fluid Damper)

점성유체를 변형을 이용하여 구조물의 에너지를 소산시키는 장치로 점성의 액체가 들어있는 실린더 내에 피스톤을 삽입한 형태 또는 점성유체를 벽체 내에 삽입하는 형태가 있다. 점성유체감쇠기의 점성은 변위와 다른 위상을 가지는 감쇠력을 생성시키는 역할을 하게 된다.

4. 능동제어 시스템

능동제어 시스템은 수압, 공기압, 전자기력 등을 이용한 액추에이터를 가력장치로 활용하는 제어 시스템이다. 능동제어 시스템에서 가장 중요한 부분은 제어를 위한 외부 동력원이 항상 공급될 수 있어야 하며, 액추에이터의 가력 크기가 적절하게 조절되어야 한다.

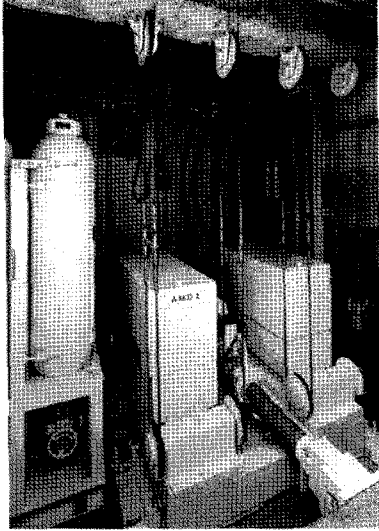


〈그림 4〉 능동제어 시스템의 개념도

수동제어 시스템은 그 시스템에 실시간으로 변화를 주지 않으므로 구조물에 불안정성도 유발시키지 않는다. 그러나 능동제어 시스템은 실행 시스템과 실시간으로 이루어지는 제어과정에서의 부정적인 거동을 야기시키는 실행에러가 심각하다면, 구조물을 불안정하게 만들 수 있다. 이러한 이유로 외부 가력원에 대한 최상의 제어 알고리즘을 구현하는 것이 필요하다.

4.1 능동질량감쇠기(Active Mass Damper)

부가적인 질량이 구조물 거동의 반대방향으로 움직이도록 부가적인 질량을 액추에이터로 가력하는 장치이다. 액추에이터의 제어력은 구조물의 응답 속도 및 가속도를 기반으로 결정되며 부가적인 질량은 미끄럼 또는 진자 움직임을 한다.



〈그림 5〉 능동질량감쇠기

4.2 능동가변강성장치(Active Variable Stiffness System)

능동가변강성장치는 역V형태의 가새 끝단에 잠금장치 실린더를 설치하고 이 잠금장치의 개폐에 의하여 가새의 강성을 변화시키는 제어 장치이다. 제어기에 의한 잠금장치의 잠김과 해제에 의하여 가새의 적절한 강성을 선정되므로 구조물의 공진을 피할 수 있다.

5. 복합제어와 준능동제어 시스템

구조물의 진동제어를 위한 능동제어 시스템이 실제 구조물에 적용된 이래 엔지니어와 건설분야 전문가에 의해 피드백 제어기술이 받아들여지기까지는 해결해야 할 문제들이 많았다. 특히, 강한 지진에 대한 제어 액추에이터의 개발, 설치 및 유지관리비용 저감, 외부동력원에 대한 의존성 등에 대한 문제점이 발생하였으며 이러한 문제들

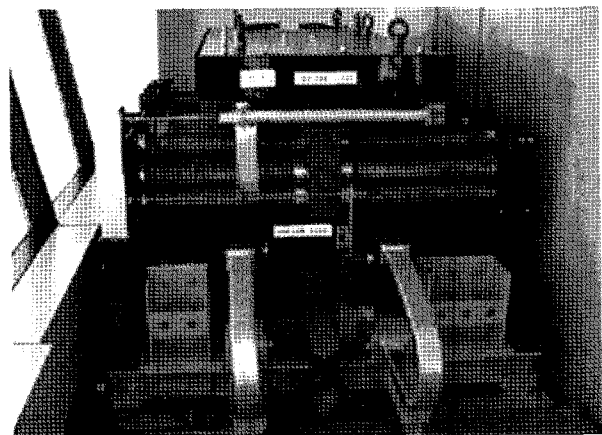
을 해결하기 위한 방안으로써 복합제어와 준능동 제어 시스템이 등장하게 되었다.

5.1 복합제어 시스템

복합제어는 제어되는 구조물의 전반적인 신뢰성과 효율성을 증가시키기 위한 제어 시스템으로 많은 연구자에 의하여 연구가 수행되고 있다. 본 기사의 서두에서 언급한 것처럼, 복합제어는 수동제어 장치와 능동제어 장치의 조합으로 정의되어진다. 수동 및 능동 제어장치가 따로 사용되어질 때 필요한 제한과 한계를 복합제어 장치가 극복할 수 있다.

5.1.1 HMD (Hybrid Mass Damper)

HMD는 실제 건설분야의 적용에 있어서 일반적인 제어장치이다. 이는 TMD와 능동제어 액추에이터의 조합으로 구조물의 응답을 줄이기 위한 장치의 성능은 주로 TMD의 거동에 의해 이루어진다. 제어 액추에이터는 TMD의 효율성을 증가시키고 구조물의 동적특성의 변화를 대해 장치를 더욱 견고하게 만들어준다. 전형적인 HMD를 가동시키기 위해 필요한 에너지와 가력원은 온전한 능동의 질량조절 시스템에서보다 적게 소요된다.

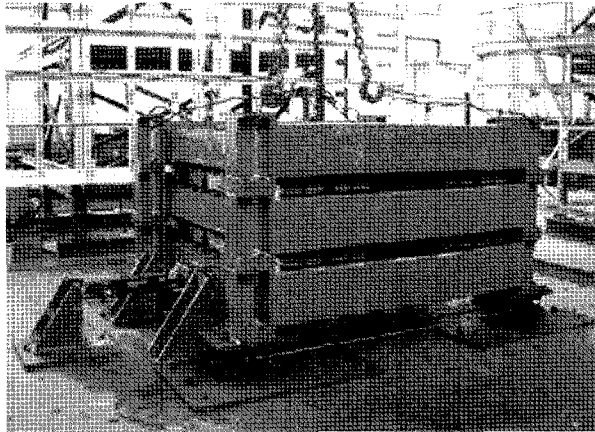


〈그림 6〉 Hybrid Mass Damper

5.1.2 HBI(Hybrid Base Isolation)

HBI는 수동 기초면진 장치에 제어 액추에이터를 조

합한 장치이다. 기초면진 장치에 의하여 기초 부위의 절대변위를 늘림으로써 구조물의 층간변위와 절대가속도를 감소시킬 수 있으며 능동제어 장치에 의한 제어력으로 층간변위를 작게 하고 기초변위를 제한할 수 있다.



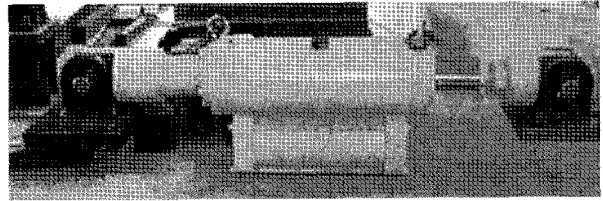
〈그림 7〉 Hybrid Base Isolation system

5.2 준능동제어 시스템

준능동제어 시스템은 수동제어와 능동제어의 장점을 조합한 시스템으로 큰 동력원이 없이 능동제어 장치의 적응성을 제공한다는 점에서 주목을 받고 있다. 그리고 준능동제어 장치는 구조시스템을 불안정하게 만들 요소를 가지고 있지 않다.

5.2.1 준능동 유체 감쇠기

준능동 제어장치에 조절이 가능한 유체를 이용하는 방법이 제안되었다. 전기적 또는 자기적으로 조절이 가능한 ER(Electro Rheological)유체와 MR(Magneto Rheological)유체를 이용하는 장치는 피스톤 외에는 움직이는 부분이 없어서 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 조절이 가능한 이러한 유체의 주요 특징은 유동적이며 점성이 있으며 유체가 전기장 또는 자기장에 노출되면 약 1/1000초 만에 항복강도를 가지는 반고체로 변화되었다가 전기장이나 자기장이 없으면 원래의 상태로 되돌아가는 특징이 있다.



〈그림 8〉 MR 유체 감쇠기

5.2.2 기타 준능동 감쇠기

- 가변 오리피스 감쇠기

가변적인 감쇠장치 중에 하나로 종래의 오리피스 감쇠기의 유체흐름에 대한 저항을 변화시키기 위해서 전기적 및 기계적으로 제어가 가능한 가변 오리피스 밸브를 사용하는 것이다.

- 가변 마찰 감쇠기

가변 마찰 감쇠기는 구조시스템에서 진동에너지를 소산시키기 위하여 표면 마찰에 의해 생성되는 힘을 이용하여 마찰 접촉면에서의 힘은 미끄럼량에 의해서 조절된다.

- 준능동 동조액체 감쇠기

조절 가능한 동조액체 감쇠기는 구조물의 응답을 감쇠시키기 위해 액체 또는 액체기둥의 거동을 이용하는 장치이다. 이 장치는 수동 동조액체감쇠기 또는 동조액체기둥감쇠기를 기반으로 한다. 수동액체(기둥)감쇠기는 가동범위가 좁게 설계되어지므로, 다양한 하중조건에 효과적인 못하게 된다. 그래서 가변적인 길이의 슬러싱 탱크를 채용하거나 가변적인 오리피스를 채용하는 방식의 준능동 시스템이 제안되었다.

6. 결 론

본 기사에서 구조물의 진동제어에 대한 대략적인 분류와 이에 대한 적용방법을 살펴보았다. 구조물의 진동제어를 위한 방법과 장치가 매우 다양하며 장치에 따라서 많은 장단점을 가지고 있다. 최근 구조물의 진동제어 관련 기술은 재료, 센서, 통신 기술의 발전과 더불어 이 꾸준히 발전해가고 있으며 이를 실제 구조물에 적용하기

위한 시공기술 또한 많은 발전을 하고 있다. 그러므로 바람과 지진 등에 의한 구조물의 진동제어 있어서 구조물에 적합한 최적의 진동제어 시스템을 적용하기 위해서는 우수한 제어성능은 물론 경제성, 시공성, 적합성 등에 대한 분석이 필요하다.

-감사의 글-

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호# '06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.

-참고문헌-

1. G.W. Housner and et al., 'Structural Control: Past, Present, and Future', Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123, No. 9 (1997), pp. 897-971
2. B.F. Spencer, Jr. and Michael K. Sain, 'Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback', Special Issue of the IEEE Control Systems Magazine on Emerging Technology, Vol. 17, No. 6(1997), pp. 19-35
3. Ahsan Kareem, Tracy Kijewski and Yukio Tamura, 'Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Example of Recent Applications', Wind and Structures, Vol. 2, No. 3 (1999), pp. 201-251
4. B. F. Spencer Jr. and S. Nagarajaiah, 'State of the Art of Structural Control', Journal of Structural Engineering, July, 2003, pp. 845-856