



1. 머리말

현대의 장대교량은 장시간에 기인한 구조적 유연성과 낮은 감쇠특성 때문에 지진, 바람, 파랑 등과 같은 자연계의 동적하중 뿐 아니라 차량 통과 등에 의한 동적하중에 대하여 매우 큰 진동이 발생될 문제점을 가지고 있다. 이러한 진동은 구조계 또는 일부 부재에 직접적인 손상 또는 구조적 피로를 유발할 수 있고, 아울러 사용성 및 기능성 저하를 초래할 수 있다.

이러한 교량의 진동에 의한 문제점을 해결하기 위해 강성을 증대시키는 방법은 많은 비용과 교량 설계의 전면적인 수정이 요구된다. 이에 따라 경제성을 유지하면서도 교량의 안전성과 사용성을 높이기 위한 방법으로 진동제어가 교량에도 적용되기 시작하였다.<sup>(1)</sup>

진동발생의 원인인 지진, 풍하중, 차량하중 등 주된 하중의 형태와 교량의 특성에 따라 여러 가지 종류의 진동제어장치와 제어 알고리즘에 대한 연구가 이루어지고 있다.

본고에서는 교량의 진동제어에 적용되는 여러 가지 시스템과 현재 국내/외의 R & D 및 실제 적용 현황에 대해서 알아보려고 한다.

\* E-mail : saangkim@uiuc.edu

2. 진동제어시스템의 종류

시스템의 변형 또는 입력에너지의 조정을 통하여 지진이나 풍하중 또는 차량 운행 등에 의한 구조물의 동적응답을 제어함으로써 구조물의 사용성을 높이는 진동제어 방법은 제어에너지의 공급 유무에 따라 수동제어시스템, 능동제어시스템, 반능동제어시스템, 혼합제어시스템으로 나눌 수 있다.<sup>(2)</sup> 본고에서는 능동제어시스템과 반능동제어시스템에 대해서 알아보도록 하겠다.

2.1 능동제어시스템

외부하중에 의해 발생한 구조계의 동적응답을 감소시키기 위하여 별도의 에너지를 하중재하기(actuator)에 공급하여 능동적으로 진동을 제어하는 시스템을 말한다. 하중재하기에서 발생하는 제어력은 설정된 제어알고리즘에 의하여 결정된다. 수동제어를 이용한 진동감쇠 방법의 효과는 구조물의 특성이 고정됨으로써 예측할 수 없는 여러 하중에 대한 최소한의 안전성과 사용성을 확보하는데 그치고 있으나, 능동제어방법은 이러한 제한을 극복함으로써 안전성과 사용성의 확보를 동시에 꾀할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이러한 능동제어의 경우는 항상 에너지의 공급을 필요로 하기 때문에 강진과 같은 큰 재해 시에 에너지의 공

급이 차단되면 제어력을 상실하게 되는 단점이 있다. 구조물의 진동을 제어하기 위한 능동제어 시스템은 다음과 같이 크게 세 부분으로 구성된다.

첫째, 외부교란에 의한 구조물의 상태, 응답특성을 감지하거나 외부교란 특성을 감지하는 센서. 둘째, 설계자에 의하여 결정된 제어 알고리즘에 기초하여 구조물의 진동제어에 필요한 제어력을 계산하고, 이 값을 하중재하기에 전달하는 제어기. 마지막으로 제어기에서 계산된 제어력을 발생시키고 이 힘을 구조물에 직접 전달하는 하중재하기 등으로 구분할 수 있으며 제어시스템의 구축에 있어서 없어서는 안될 구성요소들이다.

일반적인 능동제어시스템의 구성을 그림 1에 나타내었다.

2.2 반능동제어시스템

반능동제어시스템은 장치의 강성이나 감쇠 특성을 구조물의 진동에 따라 변화시키는 방법으로 외부 에너지는 장치의 특성 변화에만 사용되고 구조물의 에너지 흡수 자체는 수동제어시스템과 같은 메카니즘으로 행해진다. 반능동제어장치는 기계적

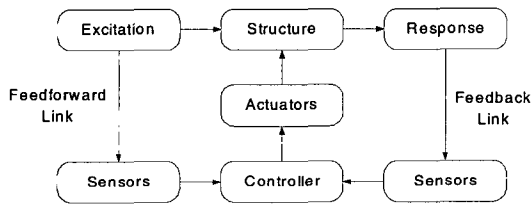


그림 1 능동제어시스템의 구성도

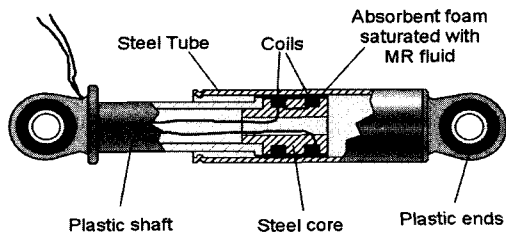


그림 2 MR damper

인 에너지를 구조계에 추가시키지는 않으므로 축전지 정도의 적은 동력으로도 작동하는 경우가 많다. 따라서 전원공급이 차단될 수 있는 강진, 태풍 등의 상황에서도 작동에 대한 신뢰성이 큰 장점이 있다. 반능동장치의 적절한 활용은 수동제어 방식보다 우수한 효과를 얻을 수 있으며, 경우에 따라서는 능동제어방식과 동등한 성능을 기대할 수 있다.<sup>(3)</sup> 여러 종류의 반능동제어장치에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, 실제로 적용이 되고 있는 장치는 variable orifice damper, variable friction damper, variable stiffness device, controllable fluid damper 등이 있다. controllable fluid damper 중에서 magneto-rheological (MR) damper를 그림 2에 나타내었다.

3. 진동제어시스템의 적용

3.1 능동제어시스템의 적용

구조물에 사용되는 능동제어시스템은 제어알고리즘에서 고려해야 할 문제점 외에 실제로 제어장치를 적용하는데 따르는 기술상의 문제점도 있다. 상대적으로 매우 큰 제어력을 가해야 하는 하중재하기의 문제나 태풍이나 지진과 같은 극한상태에서도 시스템이 원만하게 작동될 수 있도록 하는 문제 등이 지적되어 왔다. 현재까지의 이론과 실험적 연구를 통하여 이러한 제약들이 완전히 해결된 것은 아니나, 풍하중에 대한 건설작업 능력의 향상이나, 사용성의 향상을 위하여 능동제어장치의 사용은 증가하고 있는 추세이다.

능동시스템에는 active bracing system, active mass damper(AMD), hybrid mass damper(HMD)와 같은 능동 또는 복합형 제어시스템이 사용되고 있다. 특히 복합형인 HMD는 수동형에 비하여 작은 질량으로도 충분한 제진 효과를 발휘하므로 기존의 방법으로는 해결하기 어려웠던 진동문제를 해결하는 성과를 거두기도 하였다.

그림 3은 일본 동경에 건설된 Rainbow bridge

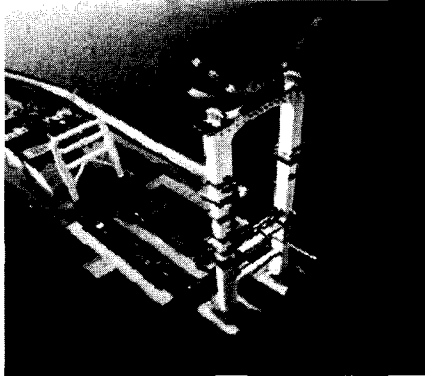


그림 3 시공시의 Rainbow bridge



그림 4 Rainbow bridge에 사용된 HMD



그림 5 인천국제공항 관제탑

의 시공 당시 모습이다. 건설 당시 약 7m/s의 풍속에서 와류진동현상으로 인한 큰 폭의 진동이 예상되어 시공상 문제가 있을 것으로 지적되었다. 그 대안으로서 아치형상의 HMD가 사용되었으며(그림 4) 성공적으로 진동감소능력을 발휘한 것으로 보고되었다.<sup>(4)</sup>

당시 사용된 HMD의 무게는 2 tonf 로 11 kW의 AC servomotor에 의해 구동되었다. 이 무게는 주탑의 1차 모드질량의 0.14 %에 해당되는 값으로 TMD를 사용했다면 HMD의 7배에 달하는 질량체를 사용해야 했던 것으로 알려져 있다.

국내에서 능동제어장치가 설치된 교량은 없으나, 인천국제공항의 관제탑(그림 5)에 풍하중에 대한 사용성을 증대시키기 위하여 HMD가 설치되어 가동 중에 있다.<sup>(5, 6)</sup> 이는 국내에서 최초로 능동진동제어시스템이 대형 건설구조물에 도입된 예이다.

### 3.2 반능동제어시스템의 적용

능동제어시스템의 단점인 재해시 에너지공급의 차단으로 인한 제어능력 상실의 문제를 해소하기 위하여, 반능동제어방식에 대한 연구가 현재 미국, 중국, 우리나라 등에서 활발히 연구 중에 있다. 사장교의 케이블 진동을 제어하기 위하여 소규모의 MR damper를 사용한 실제 사장교에 대한 실험이 중국의 Tong ting bridge에서 실시되어 우수한 제어성능을 나타내었다는 결과가 보고되었다.<sup>(7)</sup>

그림 6과 7은 Tong ting bridge에서 실시된 실험과 사용된 MR damper를 나타내었다.

MR damper와 같은 제어성 유체감쇠기(controllable fluid damper)는 구조물의 진동에 감지하여, 이에 따라 자기장을 발생시켜서 유체가 반응하여 반고체상태로 전환되어 감쇠력을 증가시키는 장치로서, 현재는 지진하중에 대한 진동까지도 제어가 가능한 대용량 MR damper가 연구 중에 있다.<sup>(8, 9)</sup>



그림 6 Tong ting bridge 실험전경

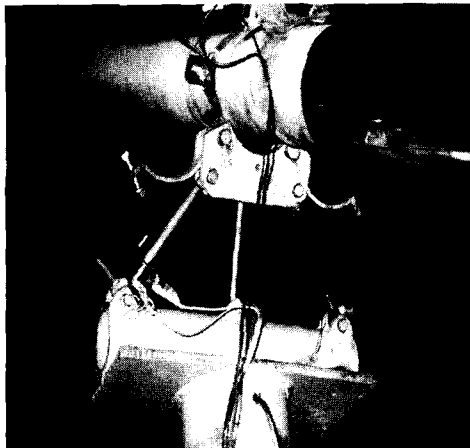


그림 7 Setup of MR damper

#### 4. 맺음말

본고에서는 교량에 발생하는 진동문제와 제어방법 및 연구동향에 대하여 개략적으로 살펴보았다. 국내의 경우 아직까지는 교량에 대한 능동제어

시스템의 적용이 외국에 비해서 적극적으로 받아들여지고 있지는 않지만, 능동제어알고리즘 개발 및 반능동제어에 관한 실험적 연구가 계속되고 있다.<sup>(10, 11)</sup> 특히 외국의 경우, 일본을 중심으로 교량의 진동제어에 능동제어기법을 도입하여 시공중인 교량에 성공적으로 적용된 사례가 늘어가고 있으며, 우리나라에서도 사장교와 현수교와 같은 장기간을 갖는 교량건설에 관심이 높아짐에 따라 교량의 진동문제에 대한 체계적인 연구와 이에 따른 진동제어시스템의 도입이 이루어질 것으로 판단된다.

점차적으로 발전하고 있는 공학기술을 이용하여 다양한 형식과 조형미를 가진 교량건설이 증가할수록 교량의 진동문제는 동적안정성 뿐만 아니라 사용성의 측면에서도 고려되어야 한다. 진동제어 시스템의 경제성, 안정성 및 신뢰성을 높이려는 보다 적극적인 연구는 신소재 개발, 시스템의 계측, 구조제어에 적합한 알고리즘 개발을 위한 이론 및 실험적 연구뿐 아니라 보다 나은 제진기구의 개발, 제작 및 적용 등의 분야에 걸쳐 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

#### 참고 문헌

- (1) Yao, J. T. P. 1972, "Concept of Structural Control", ASCE Journal of Structural Division, pp. 1567~1574.
- (2) Soong, T. T. 1990, "Active Structural Control : Theory and Practice", Longman Science and Technical.
- (3) Carlson, J. D. and Spencer, Jr. B. F., "Magnetorheological Fluid Dampers for Semi-active Seismic Control", Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Motion and Vibration Control, Vol. III, 35-40.
- (4) Tanida, K., "Active Control of Bridge Towers During Erection", Proc. 3<sup>rd</sup> Colloquium on Vibration Control of Struct., Part A, pp.173~



184.

(5) 고현무, 박관순, 박원석, 박규선, 1997, "풍하중에 의한 인천국제공항관제탑의 진동제어 및 사용성 평가", 대한토목학회 학술발표대회 논문집.

(6) Koh, H. M., Park, K. S., Park, W., Park, K. S. and Kim, Y. S., 1998, "Active Vibration Control of Air Traffic Control Tower at Incheon International Airport under Wind Excitation", Proc. 2<sup>nd</sup> World Conference on Structural Control, Japan.

(7) Ko, J. M., Ni, Y. Q., Chen, Z. Q. and Spencer Jr., B. F., 2002, "Implementation of MR dampers to Dong Ting Lake Bridge for Cable Vibration Mitigation", Proc. 3<sup>rd</sup> World Conference on Structural Control, Como, Italy.

(8) Yang, G., Spencer, Jr., B. F., Carlson, J. D. and Sain, M. K., 2002, "Large-scale MR Fluid

Dampers: Modeling and Dynamic Performance Considerations," Engineering Structures, 24 : 309-323.

(9) Yang, G., Jung, H. J. and Spencer, Jr., B. F., 2001, "Dynamic Modeling of Full-scale MR Dampers for Civil Engineering Applications," US-Japan Workshop on Smart Structures for Improved Seismic Performance in Urban Region, Seattle, WA, Aug. 14-16.

(10) Kim, S. B. and Yun, C. B., 2000, "Sliding Mode Fuzzy Control : Theory and Verification on a Benchmark Structure", Earthquake Engineering and Structural Dynamics", Vol. 29, pp. 1587~1608.

(11) 구자인, 2001, "자기유변유체댐퍼를 이용한 대형구조물의 풍하중에 대한 반능동제어", 공학석사학위 논문, 한국과학기술원.