

교량의 진동제어

고 현 무 · 박 관 순

(서울대학교 지구환경시스템공학부)

1. 머리말

인간은 자연을 관찰하면서 자연의 법칙을 배우고 자연의 힘을 이용하며 자연으로부터의 커다란 재해를 방지하려고 노력하면서 여러 종류의 다양한 공학기술을 발전시켜왔다. 특히 토목공학은 인류문명의 발달과 함께 태동하기 시작하여 인류발전에 커다란 공헌을 하였을 뿐 아니라 그 분야가 세분화되며 많은 공학의 발전에도 기여하여 왔다. 토목공학의 태동과 함께 그 역사를 같이 하는 교량은 초기에는 생존을 위한 원시적인 형태이었으나 산업혁명시대 이후 본격적인 건설이 이루어지게 되었다. 오늘날에는 교통망의 확장에 따라 교량구조물의 수요가 증대되고 있으므로, 시가지의 고속도로는 물론 입지조건이 험악한 산악지대나 해협에까지도 건설하게 되었다.

한편, 과학기술의 지속적인 발전은 확률론과 구조물의 식별론을 통하여 작용하는 하중과 구조물의 특성을 파악할 수 있게 하였고, 새로운 재료의 개발과 구조물의 해석, 설계방법에도 많은 개선을 가져왔다. 이러한 공학기술의 발전은 종래의 교량에서 스패를 장대화하는 연구가 추진되어 신형식의 교량을 차례로 건설하는 것이 가능하게 되었다.

그러나 거대하고 유연한 장대교량의 건설은 종래의 구조물들과 비교하여 여러 가지 문제점이 있는 것으로 파악되고 있다. 즉, 종래의 구조물은 충분한 강성과 무거운 질량으로 고유감쇠능력을 확보할 수 있었으나, 현대의 장대교량이 가지는 유연성과 낮은 감쇠특

성은 지진이나 바람등의 자연계의 불규칙한 하중뿐 아니라 차량등에 의한 동적하중에 대하여 진동발생 가능성을 증가시키게 된 것이다. 불규칙한 외부교란에 따른 큰 진폭의 진동발생 가능성이 커짐에 따라 구조물 또는 일부 부재의 직접적인 파괴 또는 피로문제와 더불어 사용성 및 기능성 저하, 사용자의 심리적 불안감이 문제점으로 지적될 수 있다.

교량의 진동을 일으키는 주된 원인으로는 주로 돌발적인 진동을 발생시킴으로서 큰 피해를 가져올 수 있는 지진이나 풍하중이 있으며, 이와는 달리 반복적인 동적하중을 교량의 각 부재에 전달함으로써 피로문제를 일으키는 차량하중등이 있다. 특히 외부 하중의 진동수와 교량구조물의 진동수가 일치하여 공진이 발생하게 되면 진폭이 매우 커지므로 교량의 붕괴가 발생하게 될 수도 있다. 그림 1은 미국의 Tacoma Narrow Bridge가 공기역학적 불안정성(aerodynamic instability) 현상의 하나인 플러터(flutter)에 의해 붕괴되는 모습이다(1940).

이러한 교량의 진동에 의한 문제점을 해결하기 위해서는 강성을 증대시키기 위한 추가적인 설계와 보강재의 필요성 등으로 많은 비용이 요구되기도 한다. 이에 설계상의 경제성을 유지하면서도 교량의 안정성과 사용성을 높이기 위한 방법으로 진동제어의 원리⁽¹⁾가 교량에도 적용되기 시작하였다.

진동발생의 원인인 지진, 풍하중, 차량하중 등 주된 하중의 형태와 교량의 특성에 따라 여러 가지 종류의 진동제어장치와 제어알고리즘에 대한 연구가 이루어지고 있다. 교량의 진동문제를 해결하기 위한 다각적인 연구와

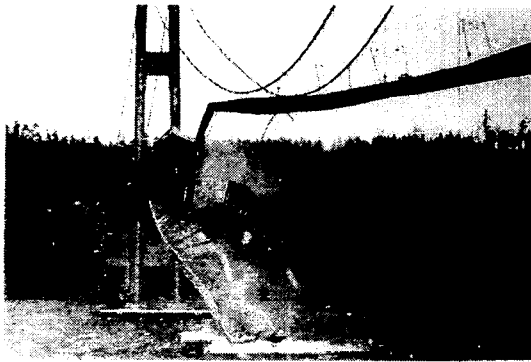


그림 1 플러터에 의해 붕괴되는 Tacoma Narrow Bridge

노력은 실제교량에 적용가능한 제진기구의 개발로 이어졌으며, 교량의 종류와 동적특성에 따라 실제 건설중인 교량이나 완성교량의 진동감소에 큰 제진효과를 발휘하고 있다.

이 글에서는 교량의 진동을 발생시키는 원인인 동적하중과 이에 대한 영향을 알아보고 교량의 진동제어에 적용되었거나 연구중인 여러 종류의 제진기구, 그리고 진동제어의 동향에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 교량의 진동제어

교량의 진동문제를 일으키는 주된 원인으로서는 지진이나 바람 또는 차량의 운행 및 제동 등에 의한 동적하중이 대표적인 것으로 과도한 진폭의 진동은 구조부재의 피로문제, 국부적인 파괴뿐 아니라 심지어는 교량전체의 붕괴를 유발시킬 수도 있다. 동적불안정성을 지닌 진동을 막기 위해서는 먼저 설계과정에서 교량이 건설될 지역의 특성을 파악하여 교량구조물 자체의 진동수를 작용가능한 하중의 진동수와 공진이 발생하지 않도록 설계하는 것이 중요하다. 그러나 공진현상 이외에도 다양한 진동원에 의하여 여러 형태의 진동이 발생할 수 있다. 여기에서는 진동제어 시스템의 종류, 진동을 야기하는 여러 가지 하중과 이에 따른 적절한 진동제어방법에 관하여 기술하고자 한다.

2.1 진동제어시스템의 종류

시스템의 변형 또는 에너지의 증감을 통하여 지진이나 풍하중 또는 차량 등의 사용하중에 의한 구조물의 동적응답을 조정함으로

써 구조물의 적응성을 높이는 진동제어 방법은 제어에너지의 공급유무와 구조물의 동적응답에 관한 정보를 제공하는 센서와 데이터 입출력 장치의 유무에 따라 수동제어시스템 (passive control system), 능동제어시스템 (active control system), 반능동제어시스템 (semi active control system)과 이러한 방식을 혼합한 복합형진동제어시스템 (hybrid control system)으로 나눌 수 있다⁽²⁾.

수동제어시스템

수동제어시스템은 제어를 수행하기 위한 별도의 에너지를 공급받지 않는다. 구조물의 진동수를 조절하거나 에너지 흡수 등의 방법으로 외란에 의한 진동의 영향을 감소시켜 저주파수 영역의 하중에 대하여 안정성을 확보하기 위해 사용되는 방법이다. 일반적으로 비용과 유지관리측면에서 능동제어에 비하여 유리한 면이 있으나 시스템의 특성이 고정되므로 다양한 진동수 성분이 중첩된 하중에 대하여 대응이 힘들다는 단점이 있다. 대표적인 예로는 기초격리 시스템 (base isolation system), 에너지 흡수기구 (metallic yield damper, friction damper, viscous damper, visco-elastic damper)와 동조질량감쇠기 (tuned mass damper, TMD), 동조액체감쇠기 (tuned liquid damper, TLD), aerodynamic attachment 등이 있다.

능동제어시스템

외부하중에 의해 발생한 구조계의 동적응답을 감소시키기 위하여 별도의 에너지를 하중재하기에 공급하여 능동적으로 제어하는 시스템을 말한다. 하중재하기에서 발생하는 제어력은 설정된 제어알고리즘에 의하여 결정된다.

수동제어의 진동감쇠 방법의 효과는 구조물의 특성이 고정됨으로써 예측할 수 없는 여러 하중에 대한 최소한의 안전성과 사용성을 확보하는 데 그치고 있으나, 능동제어방법은 이러한 제한을 극복함으로써 안전성과 사용성의 확보를 동시에 꾀할 수 있다. 능동제어의 개념을 좀 더 자세히 살펴보면 다음과 같다. 구조물의 진동을 제어하기 위한 능동제어 시스템은 다음과 같이 크게 세 부분으

로 구성되어 진다고 볼 수 있다.

첫째, 외부교란에 의한 구조물의 상태, 응답특성을 감지하거나 외부교란 특성을 감지하는 센서(sensor), 둘째, 설계자에 의하여 결정된 제어 알고리즘에 기초하여 구조물의 진동제어에 필요한 제어력을 계산하고, 이 값을 하중재하기에 전달하는 제어기(controller), 마지막으로 제어기에서 계산된 제어력을 발생시키고 이 힘을 구조물에 직접 전달하는 하중재하기(actuator) 등으로 구분할 수 있으며 제어 시스템의 구축에 있어서 없어서는 안될 구성요소들이다. 센서에서 얻어진 하중정보나 구조물의 응답정보는 최적의 제어력 산출에 사용되므로 정확한 계측도 중요한 부분이었으나, 이는 주로 사용되는 센서에 그 정확도가 크게 의존된다고 볼 수 있다. 이러한 센서나 하중재하기는 능동제어시스템에 있어서 하드웨어에 해당하는 부분으로 제어 시스템의 특성에 맞는 적절한 선정 또한 능동제어시스템의 효과를 결정하는 중요한 인자이다. 무엇보다 중요한 것은 능동제어시스템의 두뇌역할을 담당하는 제어기의 설계이다. 능동제어시스템의 효과를 결정짓는 제어력을 이 부분에서 결정하기 때문이다. 잘못된 제어력의 산출은 전체 시스템의 불안정으로 이어질 수도 있다. 따라서 토목구조물의 진동제어를 위해서는 구조계의 특성과 제어목적에 적합한 제어알고리즘을 선정하고 주어진 시스템에 알맞은 제어기를 구성해야 목표한 성과를 얻을 수 있을 것이다.

일반적인 능동제어시스템의 구성을 그림 2에 나타내었다.

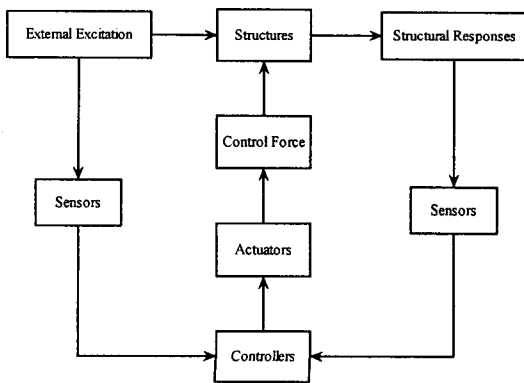


그림 2 능동제어시스템의 구성도

구조물에 사용되는 능동제어시스템은 제어 알고리즘에서 고려해야 할 문제점 외에 실제로 제어장치를 적용하는 데 따르는 기술상의 문제점도 있다. 상대적으로 매우 큰 제어력을 가해야 하는 하중재하기의 문제나 태풍이나 지진과 같은 극한 상태에서도 시스템이 원만하게 작동될 수 있도록 하는 문제 등이 지적되어 왔다. 현재까지의 이론과 실험적 연구를 통하여 이러한 제약들이 완전히 해결된 것은 아님에도 불구하고, 능동제어장치의 사용은 증가하고 있는 추세이며, 부분적인 결합이 있어도 안정한 시스템 등에 관한 연구 적용이 이루어지고 있다.

반능동제어시스템

제어를 위한 제어에너지의 차수가 능동제어에 비하여 낮은 시스템으로 반능동제어시스템은 종종 수동제어시스템으로 분류되기도 한다. 일반적으로 반능동제어장치는 기계적인 에너지를 구조계에 추가시키지는 않으며, 축전지정도의 적은 동력으로도 작동하는 경우가 많다. 따라서 전원공급이 차단될 수 있는 강진 등의 상황에서도 작동될 수 있는 장점이 있다. 반능동장치의 적절한 적용은 수동제어방식보다 나은 효과를 얻을 수 있으며, 경우에 따라서는 능동제어방식과 동등하거나 더 좋은 성능을 기대할 가능성이 있다는 연구결과가 있다⁽³⁾. 최근 연구가 활발히 진행 중이며 적용되고 있는 장치는 variable orifice damper, variable friction damper, variable stiffness device, semi impact damper 등이 있다.

복합형제어시스템

일반적으로 쓰이는 복합제어의 의미는 수동제어와 능동제어를 혼합한 것으로 각각의 장점을 살려 진동제어효과를 높일 수 있다. 강한 돌풍이나 강진 또는 중진 발생시, 부족한 제어력을 수동제어장치가 분담하게 함으로써 제어 목적에 따라서 효과적인 제어성을 얻을 수 있다. 대표적인 것으로는 연구가 진행중인 기초격리장치와 하중재하기의 연계 시스템과 hybrid mass damper(HMD)가 있으며 특히 HMD는 이미 상용화에 성공하여 널리 사용되고 있다.

2.2 진동제어시스템의 적용

앞서 기술한 바와 같이 진동제어시스템의 적용은 진동의 발생원인에 따라 달리 적용되므로 지진, 풍하중, 차량하중에 대한 제어기구의 적용과 연구분야에 관하여 알아본다.

지진에 대한 제진대책

기존교량의 지진에 대한 내진설계방법은 구조물의 강성에 의해 지진하중에 저항하도록 설계를 하였다. 그러나 근래에 들어 지진하중의 주기특성을 이용한 면진설계방법이 교량의 내진설계방법으로 자리를 잡아가고 있으며, 실제적용이 늘어나는 추세이다.

여기에서는 지진격리장치^(4~6)(base-isolation system)를 사용한 면진설계방법에 관하여 알아보도록 하자. 지금까지 관측된 지진자료와 연구를 통해 지진파의 주기특성이 단주기에 많은 에너지를 가지고 있는 것으로 나타났다. 또한 대부분 교량구조물의 주기도 0.4초에서 1.0초에 이르며 단주기에 속해 있다. 따라서 지진이 발생했을 때 교량구조물의 동적거동이 상당히 증폭될 가능성이 존재한다. 기존의 설계방법으로는 지진하중을 교량의 강성으로 저항하도록 설계하기 때문에 하부구조가 매우 튼튼해야 되므로 많은 공사비가 들게 된다. 그러나 수평방향으로 유연하게 움직일 수 있는 지진격리장치를 사용하면 교량구조물의 주기를 2.0초 이상의 장주기로 이동시킬 수 있게 되어 하부구조에 작용하는 지진력을 감소시켜 하부구조의 공사비를 절감할 수 있는 효과가 있다. 그림 3은 지진격리장치를 사용한 교량의 내진설계개념을 나타낸 것이다.

그림 4는 지진발생시, 지진격리장치가 설치된 교량이 주기이동으로 인하여 갖는 가속도 및 변위응답의 특성을 나타낸 것이다. 그림 4에서 알 수 있듯이 지진격리장치를 사용

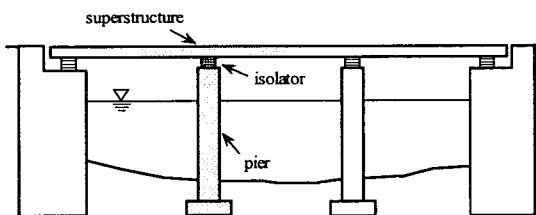


그림 3 지진격리장치를 사용한 교량의 내진설계

RESPONSE SPECTRUM

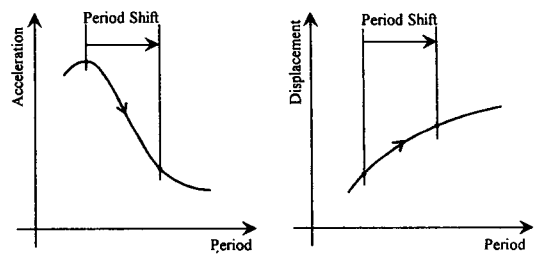


그림 4 지진격리장치에 의한 교량의 응답특성변화

한 교량은 전달되는 지진력을 줄여주는 장점이 있으나 상부구조의 과도한 변위를 초래하여 낙교가 발생할 가능성이 커진다. 따라서 구조물에 발생하는 과도한 변위를 막기 위해 감쇠능력을 증가시켜 변위를 허용범위안에 들도록 줄여 주어야 한다.

현재 이러한 지진격리장치와 감쇠장치(damper)의 개발과 적용이 활발히 이루어지고 있으며 대표적인 지진격리장치로는 적층고무받침(laminated rubber bearing)과 납면진받침(lead rubber bearing) 그리고 마찰을 이용한 마찰받침 등이 있다. 그림 5는 지진발생시 적층고무받침의 변형에 의하여 진동에너지를 흡수하고 있는 모습을 나타낸다.

적층고무받침의 경우 감쇠능력이 작아 거의 선형으로 거동하므로 탄성받침이라고도 하며 이 받침을 사용할 경우는 부가적인 감쇠장치를 사용하여야 한다. 추가적인 감쇠장치로는 visco-elastic damper, hydraulic damper, steel damper등이 사용되고 있다.

납면진받침은 탄성받침에 납봉을 삽입한

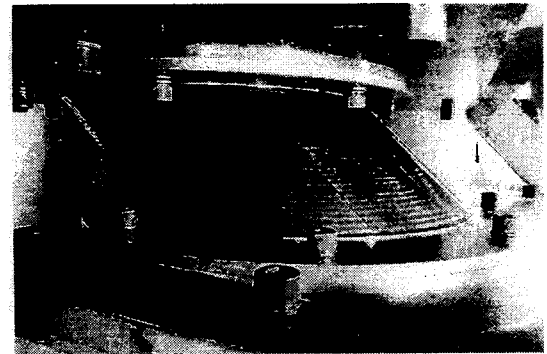


그림 5 지반운동에 의하여 수평변위가 발생한 적층고무받침

것으로써 납봉의 소성변형에 의해 지진에너지를 흡수하는 감쇠능력을 가지고 있어 부가적인 감쇠장치가 필요없으며 납이 상온에서 재결정화하는 특성이 있고 고무의 복원력에 의해 지진시 변형후 다시 원래 상태로 돌아오기 때문에 지진후 받침을 교체할 필요가 없어 지진격리교량에 점차 많이 쓰이고 있다. 마찰을 이용한 마찰받침의 경우는 수평강성이 없으므로 주로 감쇠장치로 쓰이며 적층고무받침과 병행하여 사용되고 있다.

현재까지 많은 연구를 통해 지진격리장치의 성능이 입증되고 있으며 또한 지진격리장치의 최적설계에 관한 연구도 진행되고 있다. 장주기의 지진에 대해서는 지진격리장치의 성능이 떨어지는 단점이 있으므로 앞으로 많은 연구를 통해 보완이 필요하다.

풍하중에 대한 제진대책

현수교나 사장교와 같이 긴 지간을 갖는 장대교량의 경우, 바람에 의한 풍하중이 교량설계의 주요인자가 된다. 장대교량은 상대적으로 유연한 구조물이므로, 진동 제어의 필요성이 매우 크다. 특히, 플러터현상과 같이 동적 불안정성을 유발하는 진동은 설계 풍속이 내에서 발생하지 않도록 해야 하며, 와류진동과 같은 제한 진동의 경우도 사용성과 구조물의 피로문제등을 고려해서 그 진동을 제어해야 한다. 이러한 풍하중에 대한 진동문제를 파악하고 평가하기 위해서, 일반적으로 풍동실험을 수행하고, 설계변경이나 제진장치 장착 등을 통해 진동문제를 해결하는 절차를 거친다. 교량에 작용하는 풍하중에 의한 진동을 억제하는 제진 방법은 크게 공기역학적 방법과 기계적 방법으로 나눌 수 있다.

공기역학적 방법이란 단면 주위에 흐르는 기류의 형태를 변화시켜서 진동을 완화시키는 방법이다. 기본적으로는 설계 초기부터 내풍성이 좋은 단면을 선택하는 것이 바람직하나, 기본단면 형태의 선정에 있어서, 구조적인 요인이 우위를 차지하므로 Tacoma Narrow 교와 같이 내풍성이 나쁜 단면이 될 수 있다. 교량의 주형(보, 거더)이나 주탑 등의 단면은 일반적으로 각진 단면이 많고, 이러한 단면은 기류의 박리가 발생하여 공기력 진동현상을 유발하는 경우가 많다. 따라서 그림 6

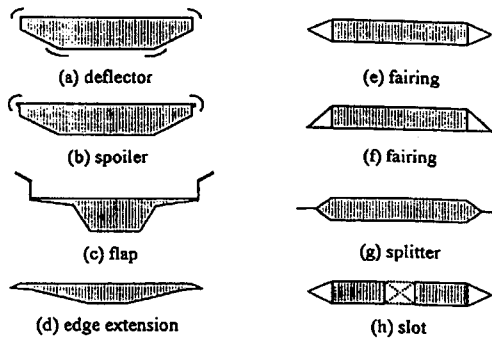


그림 6 교형의 진동억제를 위한 공기역학적장치

과 같이 이러한 박리를 억제하거나 제어함으로써 내풍성을 향상시키는 방법이 주로 사용된다. 주탑의 경우는 교량 전체의 외관을 좌우하므로 주형(보, 거더)과 같이 부착물을 붙이는 방법보다는 모서리의 일부분을 자르는 corner cut등이 주로 쓰인다. 또한 최근에는 비행기 날개의 flap과 같이 교량 주위의 기류를 변화시킬 수 있는 제어판을 사용하여 능동제어를 시도하는 연구가 이루어지고 있다.

공기역학적 방법이 진동제어에 충분하지 않거나 시공중과 같이 짧은 기간 동안만 필요한 경우, 단면의 대폭적인 수정이 불가능한 기존 교량의 진동제어에는 기계적 방법이 사용된다. 일반적으로 가장 많이 사용되는 형식으로는 질량형 감쇠장치의 일종인 tuned mass damper(TMD), tuned liquid damper (TLD) 등이 있으며, active mass damper(AMD), hybrid mass damper(HMD)와 같은 능동 또는 복합형 제어시스템도 사용되고 있다. 특히 복합형인 HMD는 수동형에 비하여 작은 질량으로도 충분한 제진효과를 발휘하므로 기존의 방법으로는 해결키 어려웠던 진동문제를 해결하는 성과를 거두기도 하였다.

그림 7은 현재 일본동경에 건설되어 있는 Rainbow Bridge의 시공당시 모습이다. 건설당시 약 7m/sec의 풍속에서 와류진동현상으로 인한 큰 폭의 진동이 예상되어 시공상 문제가 있을 것으로 지적되었다. 그 대안으로서 아치형상의 HMD가 사용되었으며(그림 8) 성공적으로 진동감소능력을 발휘한 것으로 보고된 바 있다⁽⁷⁾.

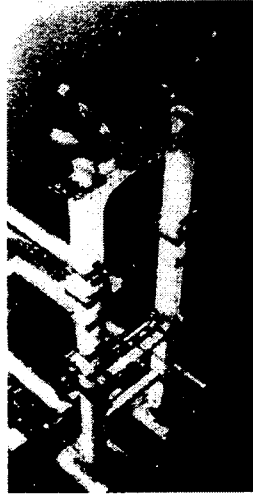


그림 7 시공당시 Rainbow Bridge

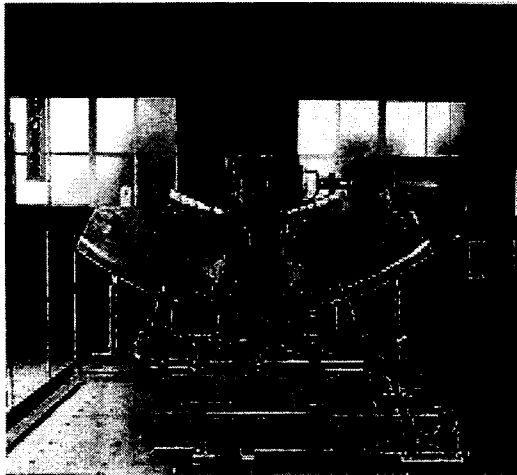


그림 8 Rainbow Bridge에 사용된 HMD

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

또한 발생 풍하중이 큰 경우에는 여러 개의 제진장치를 함께 사용하기도 한다. 그림 9는 현재 세계에서 가장 긴 중앙지간을 가진 현수교인 Akashi Kaikyo교의 주탑시공 당시 사용되었던 제진장치를 나타낸다. 시공 당시 HMD와 TMD가 함께 사용되었으며, 완공 후에도 TMD는 주탑내부에 장착되어 진

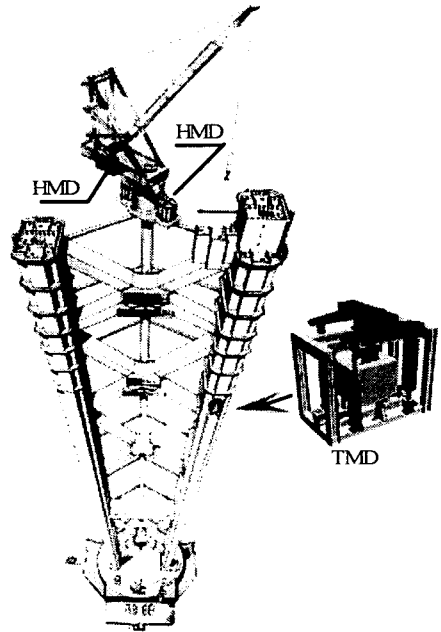


그림 9 Akashi Kaikyo교의 주탑에 사용된 HMD와 TMD

동제어효과를 발휘하고 있다.

장대교량의 주탑이나 교형 이외에도 사장교나 현수교같이 케이블에 의하여 지지되는 교량들은 케이블 자체에도 진동문제가 발생한다. 케이블에 진동이 발생하면 피로에 의하여 정착구와 PE튜브의 손상을 가져온다. 이를 해결하기 위해서 케이블의 간격을 조절하거나 oil damper, spacer, tie wire등이 사용되고 있으며 케이블의 장력을 능동적으로 제어하여 교량의 진동을 제어하는 연구가 진행되고 있다.

한편 국내에서는 영종도에 건설중인 인천국제공항 관제탑의 풍하중에 대한 사용성 문제를 해결하기 위한 방법으로 HMD에 대한 타당성 조사가 이루어졌으며^(13,14), 관제탑의 사용성 개선을 위하여 장착될 예정으로 있다. 이는 국내건설현장에서 최초로 도입되는 능동형 진동제어시스템이 될 것이다.

그림 10은 현재공사가 진행중인 인천국제공항 관제탑의 조감도이며, 그림 11은 관제탑에 장착될 HMD를 나타낸다. 2개의 AC-서보모터(용량 11 kW)에 의하여 양방향으로 작동되며 동력전달방식으로는 ball-screw를 사용한다.



그림 10 인천국제공항 관제탑의 조감도

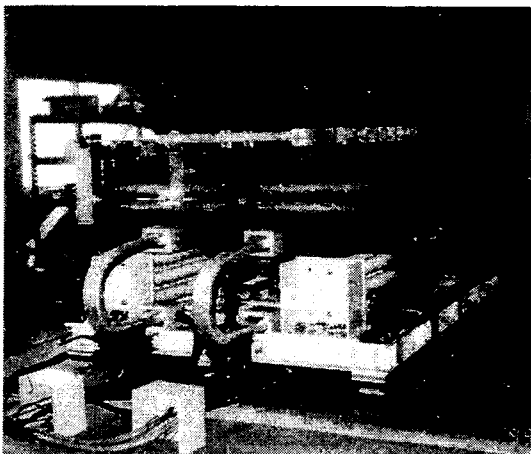


그림 11 인천국제공항관제탑에 장착될 hybrid mass damper

사용하중에 대한 진동제어

풍하중이나 지진하중과 같은 자연의 힘에 의한 진동문제 이외에, 교량의 사용에 따른 진동문제가 있다. 차량의 이동, 제동, 노면의 굴곡 등에 의해서 교량에 하중이 가해지게 되고 진동이 발생한다. 물론, 모든 교량은 이러한 사용목적에 달성할 수 있도록 설계되나 설계한 하중 이상으로 큰 하중이 교량에 작

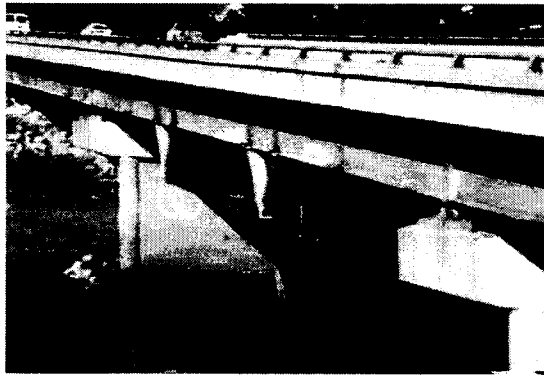


그림 12 Variable-orifice damper system (A bridge on interstate highway 35 in Oklahoma)

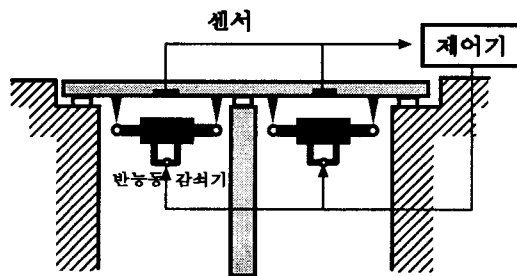


그림 13 Oklahoma교에 장착된 반응동감쇠기의 개념도

용하거나, 반복되는 하중에 의한 피로가 누적될 경우 교량의 사용성과 안정성에 문제가 있을 수 있다. 따라서 기존 교량의 성능을 개선하고, 피로 수명을 연장시키기 위해 사용하중에 대한 교량거더(보, 주형)의 수직 진동을 제어하고자 하는 연구가 이루어지고 있다. 그림 12는 미국 Oklahoma주의 교량에 실제 장착된 가변오리피스형⁽⁸⁾ 반응동 감쇠기를 나타내었으며 개념도를 그림 13에 나타내었다. 이 방법은 보의 수직 진동을 모멘트 팔을 사용하여 감쇠기에 전달되도록 하는 방법으로, 가변 반응동감쇠기의 비선형거동을 고려한 제어기 설계에 대한 연구도 이루어지고 있다.

일반적인 차량이외에 고속전철교량과 같은 특수 구조물은 사용성을 위한 진동의 제한 조건이 보다 엄격하다. 즉, 교량과 주행전철과의 상호작용에 의한 차량 및 교량구조물의 피로 문제와, 승차감의 저하, 궤도 형상의 변화에 따른 차량 운행 속도 제한 문제가 있다. 이러한 문제의 경우 하부 구조물의 진동과 피로 문제는 고속전철 시스템의 경제성에 가장

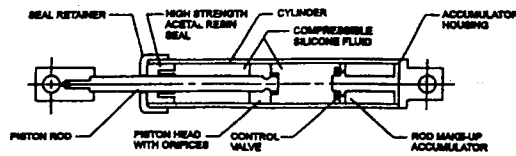


그림 14 점성유체감쇠기(Taylor devices)

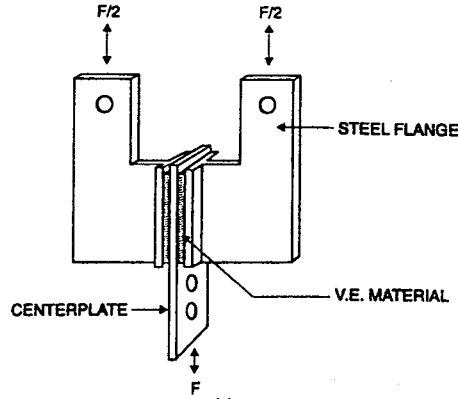


그림 15 점탄성감쇠기

큰 요인이 된다. 지금까지는 구조물의 강성을 충분히 크게 하여 이러한 진동에 저항하고자 하는 개념의 설계, 시공을 하고 있으나, 각종 감쇠기 및 진동제어장치를 사용하여 진동문제를 해결하고자 하는 시도가 이루어지고 있다.

현재 국내에서는 고속전철교량의 진동제어에 적합한 수동형 감쇠장치의 효율적인 적용을 위한 연구가 진행중이며 특히, 점성유체감쇠기(viscous fluid damper)와 점탄성감쇠기(visco-elastic damper)가 장착된 고속철도 교량의 해석을 통한 최적설계방법 및 damper의 최적위치 선정에 대한 조사가 이루어지고 있다.

그림 14는 감쇠장치내에 채워진 유체의 점성을 통하여 진동에너지가 소산시키는 점성유체감쇠기⁽⁹⁾를 나타내며, 그림 15는 점탄성감쇠기로서 금속판사이에 점탄성재료로 이루어진 층의 전단변형을 통하여 에너지를 소산시키는 장치이다⁽¹⁰⁾.

기타 에너지감쇠장치

진동하는 구조물은 마찰, 균열, 소성변형 등에 의해서 에너지가 소산된다. 이러한 구조물의 열화를 방지하면서 에너지 소산능력을 증가시키고자 부가적인 여러 가지 감쇠장치들이 사용되고 있다. 이러한 감쇠장치들은 금속

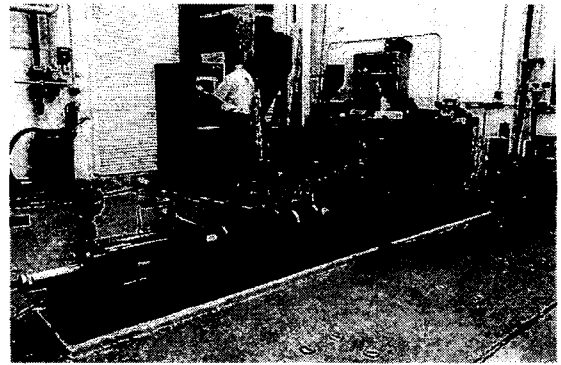


그림 16 실험적 연구가 진행중인 대용량 MR fluid damper

의 항복, 마찰에 의한 슬라이딩, 금속의 위상 변화, 점탄성 고체나 유체의 변형개념을 응용한 것으로서 금속항복감쇠기(metallic yield dampers), 마찰감쇠기(friction dampers), 제어성유체감쇠기(controllable fluid dampers) 등이 있다.

에너지 감쇠기는 주로 기계류나 소규모 구조물의 진동제어에 사용되어 왔으나 교량 등 대형구조물의 진동제어에도 적용하려는 노력이 계속되고 있는 분야이다.

특히 제어성유체감쇠기는 외부하중에 따라 전자기장을 발생시키고 이 전자기장에 유체가 반응하여 반고체상태로 전환되어 감쇠력을 증가시키는 장치로서 지진하중에 대한 진동까지도 제어가 가능한 대용량 magneto rheological fluid damper(MR fluid damper)가 연구되고 있다⁽³⁾(그림 16).

지금까지 주로 작용하는 하중에 대하여 널리 사용되고 있는 제진장치를 중심으로 교량의 제진대책에 관하여 알아보았다. 그러나 기술한 제진기구가 반드시 제한된 하중에 대하여만 효과를 나타내거나 사용이 가능한 것은 아니다. 다만 주어진 하중에 대하여 보다 효과적인 제진효과를 나타낸다고 해야 할 것이다. 예를 들어 복합형 제진기구인 hybrid mass damper는 풍하중에 의한 제진 뿐만 아니라 중, 저진지역의 지진에 대해서도 유효하게 사용될 수 있으며 각종 감쇠기는 제진 효과를 높이기 위하여 다른 제진장치와 함께 추가적으로 사용되기도 한다. 교량에 대한 진동제어기술은 교량의 형식과 특성, 부재의 성질에 따라 여러 가지가 응용될 수 있으므로 보다 안전하고 색다른 조형미를 갖는 교량의

건설에 기여할 것으로 보인다.

3. 맺 음 말

이 글에서는 교량에 발생하는 진동문제와 제어방법 및 연구동향에 관하여 개략적으로 살펴보았다.

앞서 기술한 바와 같이 지진, 바람, 차량하중 등 진동의 발생원인과 교량의 종류 및 형식에 따라 진동으로 인한 피해정도와 양상은 다르게 마련이며 따라서 그 제진대책도 다르게 적용된다. 그러므로 교량의 건설에 있어서는 발생가능한 진동에 대한 다양한 검토가 이루어져야 하며, 필요시에는 최적의 제어시스템 선정이 중요하다고 할 수 있다.

국내의 경우 아직까지는 교량에 대한 진동제어시스템의 적용이 적극적으로 받아들여지고 있지는 않지만 능동제어알고리즘 개발 및 실험적 연구가 계속되고 있다^(11,12). 특히 외국의 경우, 일본을 중심으로 교량의 진동제어에 능동제어기법을 도입하여 시공중인 교량에 성공적으로 적용된 사례가 늘어가고 있으며, 최근 건설되는 장대교량의 대부분의 주탑에는 수동형제진기구인 TMD가 설치되어 있다. 그러나 우리나라에서도 사장교와 현수교와 같은 장지간을 갖는 교량건설에 관심이 높아짐에 따라 교량의 진동문제에 대한 체계적인 연구와 이에 따른 진동제어시스템의 도입이 이루어질 것으로 판단된다.

발달된 토목공학기술을 이용하여 다양한 형식과 색다른 조형미를 추구하는 교량건설이 증가할수록 교량의 진동문제는 동적 안정성뿐만 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.

참 고 문 헌

(1) Yao, J. T. P., 1972, "Concept of Structural Control," ASCE Journal of

Structural Division 98, pp. 1567~1574.
 (2) Soong, T. T., 1990, "Active Structural Control : Theory and Practice," Longman Science & Technical.
 (3) Carlson, J. D., and Spencer, Jr., B.F., "Magneto-rheological Fluid Dampers for Semi-active Seismic Control," Proc., 3rd Int. Conf. on Motion and Vibration Control, Vol. III, 35-40.
 (4) B. C. Lin, I. G. Tadjbakhsh, A. S. Papageorgiou and G. Ahmadi, 1990, "Performance of Earthquake Isolation System," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 116(2), 446-461.
 (5) Chang, G. S., Liu, W. D., Nobari, F. S., Kartoum, A., and Chen, X., 1997, "Design Issues of Seismic Isolation of Major Bridges," Proc. of the National Seismic Conference on Bridge and Highways, 745-756.
 (6) Skinner, R. I., Rovinson, W. H., and McVerry, G. H., 1993, An Introduction to Seismic Isolation, John Wiley and Sons, West Sussex, England.
 (7) Tanida, K., "Active Control of Bridge Towers During Erection," Proc. 3rd Colloquium on Vibration Control of Struct., Part A, pp. 173~184.
 (8) Patten, W.N., He, Q., Kuo, C.C., Liu, L., and Sack, R.L., "Suppression of Vehicle Induced Bridge Vibration via Hydraulic Semiactive Vibration Dampers," Proc., First World Conf. on Struct. Control, FA1, 3-38.
 (9) Constantinou, M. C., Symans, M. D., Tsopelas, P., and Taylor, D.P., "Fluid Viscous Dampers in Applications of Seismic Energy Dissipation and Seismic Isolation," Proc., ATC 17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, Vol. 2, pp. 581~592.
 (10) Shen, K. L., and Soong, T. T., "Modeling of Viscoelastic Dampers for Structural Application," J. Engrg. Mech.,

- ASCE, 121(6), pp. 694~701.
- (11) 고현무, 박관순, 박원석, 1995,11, "설계 제한조건이 고려된 출력되먹임 최적제어에 의한 구조물진동의 능동제어", 대한토목학회 논문집 제 15 권, 제 6 호.
- (12) 고현무, 박관순, 박원석, 이희황, 1996, "시간지연효과 및 설계제한조건을 고려한 구조물진동의 능동제어", 대한토목학회 논문집 제 16 권, 제 I-6 호.
- (13) 고현무, 박관순, 박원석, 박규선, 1997,

- "풍하중에 의한 인천국제공항관제탑의 진동제어 및 사용성평가", 대한토목학회 학술발표대회논문집.
- (14) Koh, H. M., Park, K. S., Park, W., Park, K. S., Kim, Y. S., 1998, "Active Vibration Control of Air Traffic Control Tower at Incheon International Airport under Wind Excitation," Proceedings of 2nd World Conference on Structural Control Kyoto, Japan.

국제 학술대회 안내

17th International Modal Analysis Conference (17th IMAC)

장 소 : San Antonio, Texas, U.S.A.

일 시 : 2000년 2월 7~10일

일 정 : (1) 초록제출 마감 : 1999년 6월 4일

200자 이내 초록을 <http://www.sem.org>에 e-mail로 보내거나

A. L. Wicks, SEM/IMAC, 7 school Street, Bethel, CT. 06801, U.S.A로

3부를 우편으로 접수시킴.(채택여부는 1999년 8월 통보)

(2) 원고제출마감 : 1999년 10월 8일

분 야 : 진동(모달해석)전반, 소음/음향, 결합진단, 토목구조 모달해석, 모델개선 및 수정.

특별주제 : Computational Challes in Structural Dynamics

연락처 : sem@sem1.com 또는 meetings@sem1.com,

<http://www.sem.org>

국내문의처 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 김윤영 교수

(Tel : (02)880-7154, yykim@snu.ac.kr)