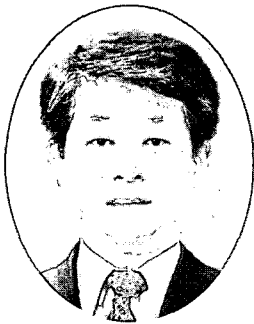


대형구조물의 지능형제어시스템으로, 제어알고리즘과 이미 실용화에 성공하여 각종 첨단건설현장에서 사용되고 있는 Hybrid Mass Damper(HMD)와 차세대 제진장치로서 연구가 진행중인 반능동형제어장치를 들 수 있으며, 눈앞에 다가온 21세기에는 구조제어를 위한 지속적인 노력으로 초고층, 초장대 구조물의 등장을 예고하고 있다.

대형구조물의 진동제어



고 현 무

서울대학교
지구환경시스템공학부 교수

1. 서론

고강도-신재료의 개발과 해석 및 설계기술의 발전으로 최근의 토목구조물은 경량화, 장대화, 대형화되고 있다. 종래에는 건설하기 어려웠던 초고층 빌딩이나 타워, 초장대 교량의 건설이 가능해 졌으며, 특히 구조물의 유연성에 기초함으로써 주변환경과의 미적 조화를 고려한 다양한 설계가 시도되고 있다. 그러나, 이러한 경향은 구조물의 유연성을 증대시키고 낮은 감쇠비를 유발하여, 지진이나 바람등의 불규칙한 자연계의 하중과 차량의 이동하중이나 기계진동 등의 사용하중에 대하여 과도한 진동과 피로현상 및 수명감소를 일으킬 수 있으므로, 이에 대한 적절한 대책이 필요하게 되었다.

이러한 구조물의 진동에 의한 문제점을 해결하기 위해서 사용되던 전통적인 방법은 주로 강성을 증가시킴으로서 진동을 줄이는 방법이다. 이 방법은 추가적인 설계와 보강재의 필요성 등으로 많은 비용이 요구되기도 하며 구조물의 설계에 있어서 다양한 설계를 가로막는 요인으로 작용하기도 한다. 이에 설계상의 경제성과 다양성을 유지하면서도 안정성과 사용성을 높이기 위한 방법으로 진동제어의 원리가 토목구조물에도 최근 적용되기 시작하였다. 기존의 진동방지대책이 주로 강도개념에 기초한 것이었다면 제어개념은 하중작용시 구조물의 적응성을 선택적으로 높여 대처하는 개념이라 할 수 있다. 특히 지능형진동제어시스템은 토목, 건축, 기계, 전기, 전자, 제어 및 컴퓨터기술의 집약체로서 종래에는 불가능했던 특수구조물의 건설이 현실로 나타나고 있다.

이 글에서는 다양한 외부의 진동원에 대하여 능동적으로 반응함으로써 진동을 억제시키는 지능형시스템을 중심으로 대형구조물의 진동제어기술에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 대형구조물의 지능형진동제어시스템

시스템의 변형 또는 에너지의 증감을 통하여 지진이나 풍하중 또는 차량 등의 사용하중에 의한 구조물의 동적응답을 조정함으로써 구조물의 적응성을 높이는 진동제어 방법은 제어에너지의 공급여부, 구조물의 동적응답에 관한 정보를 제공하는 센서와 데이터 입출력 장치의 유무에 따라 수동

제어시스템(passive control system), 반능동제어시스템(semi-active control system), 능동제어시스템(active control system), 이러한 여러 방식들을 혼합한 복합형 진동제어시스템(hybrid control system)으로 나눌 수 있다. 특히 반능동, 능동, 복합형제어시스템은 외부환경을 감지하고 최적의 제어력을 구조물에 전달함으로써 진동을 감소시키므로 일종의 지능형진동제어시스템이라고 할 수 있다. 수동 제어방법에서는 여러 개의 주파수 성분이 있는 하중에 대해서는 충분한 제어효과를 얻기 힘들지만, 지능형제어방법에서는 동특성변경을 용이하게 실현할 수 있으므로, 지진이나 바람과 같은 넓은 주파수영역의 하중에 의하여 발생한 진동을 효과적으로 제어할 수 있다.

그런데 토목구조물의 진동제어문제는 일반적인 제어문제와는 달리 구조물의 규모가 거대함으로 기인하는 특성들로 인하여, 전기, 전자 등 타분야에서 개발된 기존의 제어이론을 그대로 적용할 수 없는 몇 가지 문제점을 지닌다. 토목구조물은 매우 많은 자유도를 가질 뿐 아니라 센서로부터 얻을 수 있는 응답정보는 센서의 수만큼으로 제한되어 있다. 특히 구조물의 동특성과 작용하중의 특성에는 많은 불확실성이 내재되어 있다. 또한 구조물의 중량에 비하여 공급 가능한 제어력의 크기가 한정되어 있으며, 구조물의 사용성과 안정성을 확보하기 위하여 변위나 응력이 일정한 값을 넘지 않아야 한다. 그러므로 이러한 제한조건을 고려하여 구조계의 특성과 제어목적에 적합한 제어알고리즘을 선정하고 주어진 시스템에 알맞은 제어를 구성해야 목표한 성

과를 얻을 수 있다. 대형구조물의 지능형제어시스템은 제어알고리즘에서 고려해야할 특수성 이외에도 실제로 시스템을 적용하는 데 고려해야할 기술상의 문제점이 있다. 이것들은 대부분 구조물의 거대함에 기인한 것으로서, 여기에는 첫째로 강진시에도 작동될 수 있는 하중제하기의 개발, 둘째, 경제성과 유지관리문제, 셋째, 외부동력에 의한 의존도문제와 시스템의 신뢰도와 강인성을 증대시켜야 하는 점들이 포함된다. 이러한 문제들에 대한 해결책으로 복합형제어방식이나 반능동제어방식이 떠오르고 있다.

여기에서는 대형구조물의 지능형제어시스템에 사용되는 제어알고리즘과 이미 실용화에 성공하여 각종 첨단건설현장에서 사용되고 있는 Hybrid Mass Damper(HMD)와 차세대 제진장치로서 연구가 진행중인 반능동형 제어장치에 관하여 기술한다.

2.1 제어 알고리즘

대형구조물의 지능형제어시스템에서 핵심적인 부분은 필요한 제어력을 계산하는 제어기이다. 제어기는 컴퓨터, 또는 상용하는 연산처리능력을 가진 기기로 구현되는데, 이때 미리 정해진 제어 알고리즘이 제어기에 탑재되어 운용된다. 따라서, 어떠한 제어 알고리즘을 사용하여 구조물을 제어하는지가 지능형제어시스템의 성능을 좌우

하게 된다.

구조물의 지능형제어시스템에 사용되는 제어알고리즘은, 초기에는 이미 개발된 일반 제어이론을 직접적으로 적용하는 단계였으나, 현재는 대형구조물제어에 적합한 새로운 제어 알고리즘이 연구, 개발 사용되고 있다. 지능형제어시스템의 연구가 본격적으로 활발하게 시작되던 80년대 말에서 90년대 초 사이에는 주로 선형 최적제어이론에 바탕을 둔 제어알고리즘들이 소개되었다. 선형최적제어이론은 1960년

대 우주개발과 맞물려 발전한 이론으로서, 다중입출력시스템의 제어가 가능하고, 수학적인 최적해를 사용함으로써 최적의 제어성능을 확보한다. 그러나, 설계변수를 정하는데 있어서 기본적으로 시행착오법에 의존하기 때문에, 이를 조직적으로 설계할 수 있는 방법에 대한 연구가 많이 수행되었다. 또한 이 시기 이후

90년대 중반까지는 sliding mode제어와 같은 비선형제어,

적응제어, 인공지능제어와 같은 다양한 영역의 제어이론의 적용이 시도되었고 연구되었다. 이러한 연구결과, 대형 구조물의 제어문제가 일반제어문제와는 차별되는 여러 특징을 가지고 있음을 알게되면서 90년대 중반이후는 이러한 특징에 알맞은 제어 알고리즘의 연구 개발이 진행되고 있다. 중요시되는 차별적인 특징중 대표적인 것은 구조물의 거대성에 기인한 구조물 모델

“
**각 분야의 과학기술과
 더불어 구조제어를 위한
 지속적인 노력은
 외부환경의 변화를 스스로
 감지하고 적극적으로
 반응하는 지능형구조물의
 시대를 앞당기는 계기가
 될 것이다.**
 ”

링 문제, 하중재하기의 용량제한 및 방법 문제 등이다. 구조물의 모델링 문제는 무한자유도의 연속체인 구조물을 제한된 자유도의 수학적 모델로 근사시키는 데서 발생한다. 이때 필연적으로 수학적 모델과 실제 구조물 사이에 오차가 존재하게 되는데, 이러한 오차가 있더라도, 전체 시스템의 안정성을 보장하고, 원하는 제어 목적을 달성할 수 있도록 하는 강인제어(robust control)에 대한 연구가 진행되고 있다. 하중재하기는 계산된 제어력을 실제로 구조물에 전달하는 장치로서, 주로 모터나 유압식이 사용된다. 그러나 이러한 하중재하기의 능력이 구조물 크기나 중량에 비하여 상대적으로 매우 작기 때문에 제한된 범위 내에서 최대한으로 하중재하기의 능력을 발휘할 수 있도록 제어기를 설계하고, 하중재하기

자체의 능력도 개선시키는 연구가 진행되고 있다.

2.2 복합형제어장치

일반적으로 쓰이는 복합제어의 의미는 수동제어와 능동제어를 혼합한 것으로 각각의 장점을 살려 진동제어효과를 높일 수 있다. 강한 돌풍이나 지진의 발생시, 부족한 제어력을 수동제어장치가 분담하게 함으로써 제어목적에 따라서 효과적인 제어 성능을 얻을 수 있다. 능동제어장치라고 불리는 대부분의 시스템은 복합형에 속한다고 볼 수 있으며 제어에 필요한 모든 에너지를 하중재하기에만 의존하는 형식은 요즘 거의 쓰이고 있지 않다. 대표적인 복합형제진장치인 HMD는 수동형인 Tuned Mass Damper(TMD)와 능동형 하중재하기의 조합으로 이루어진다. 따라서 능동형과 수동형을 함께 사용하는 복합형 제어장치인 HMD는 능동형 또는 수동형을 단독으로 사용하는 것보다 뛰어난 제어효과를 나타낼 뿐 아니라 제어장치의 구성방법에

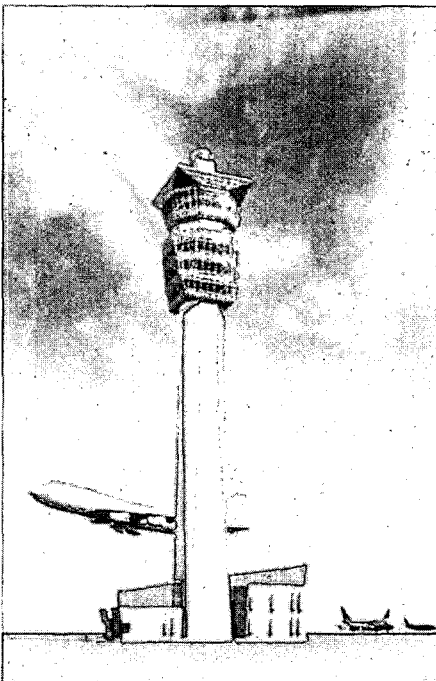


그림1. 인천국제공항관제탑의 조감도

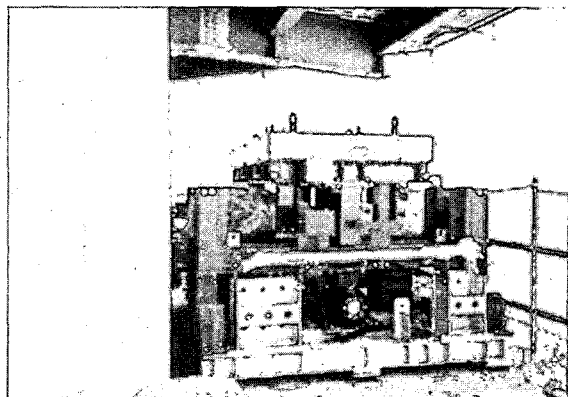


그림2. 인천국제공항 관제탑에 설치된 HMD

따라 능동형 모드나 수동형 모드만을 사용할 수도 있다. 일반적으로 사용되는 Hybrid Mass Damper에 있어서 수동형에 해당되는 부분은 질량, 스프링, 댐퍼 등으로 되어 있다. 사용되는 질량이나 스프링의 강성 등은 전체 시스템의 거동에 큰 영향을 주게 되므로 설계에 있어서 특별한 주의가 요구된다. 대개 고유주기가 원구조물의 1차 고유주기에 동조되도록 한다. 능동형장치인 하중재 하기로는 주로 AC-서보모터가 사용된다.

한편 국내에서는 영종도에 건설중인 인천국제공항관제탑의 풍하중에 대한 사용성 문제를 해결하기 위하여 HMD가 설치되었다. 그림 1은 현재공사가 진행중인 인천국제공항관제탑의 조감도이며 그림 2는 관제탑에 장착된 HMD이다. 용량이 11kW인 2개의 AC-서보모터에 의하여 양방향으로 작동되며 동력전달에는 Ball-Screw를 사용한다.

2.3 반능동제어장치

반능동제어장치는 진동을 제어하기 위한 에너지를 직접 구조물에 가하기 보다는, 강성이나 감쇠력을 적절히 변화시켜서 제어 효과를 얻는다. 따라서, 축전지정도의 적은 동력으로도 작동하는 경우가 많고, 전원공급이 차단될 수 있는 강진 등의 상황에서도 작동될 수 있는 장점이 있다.

그림 3은 가변오리피스형 반능동감쇠기가 실제로 장착된 미국 Oklahoma주의 교량이다. 이 방법은 보의 수직 진동을 모멘트 팔을 사용하여 감쇠기에 전달되도록 하는 방법으로, 교량의 동적응답에 따라서 가변오리피스밸브의 단면적을 조절함으로써 최적의 감쇠효과를 얻도록 설계된 시스템이다. 그림 4에는 그림 3의 단점을 보완하여 한단계 발전한 지능형 보강재 시스템으로서 기본적인 원리는 같다.

이밖에도 현재 에너지감쇠기구의 일종으

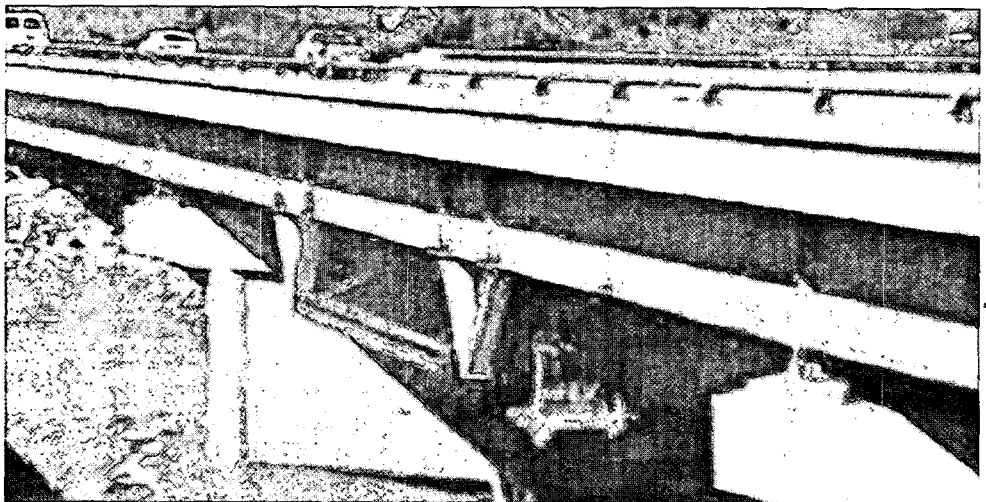


그림 3. Variable-Orifice Damper System
(A Bridge on Interstate highway 35 in Oklahoma)

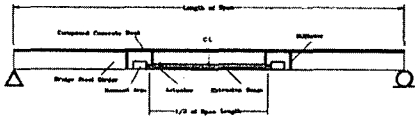


그림 4. 지능형 보강재(Intelligent Stiffner)가 설치된 교량

로 연구가 진행중인 제어성 유체감쇠기(Controllable Fluid Damper)가 있다.

제어성 유체감쇠기는 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(그림 5).

3. 전망

지금까지 실제 적용되고 있거나 활발한 연구가 진행중인 지능형제어장치에 대하여

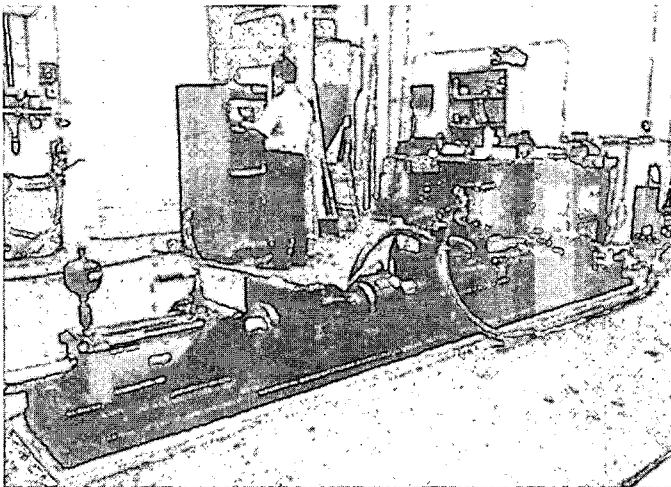


그림 5. 실험적 연구가 진행중인 대용량 MR Fluid Damper

알아보았다. 국내의 경우 아직까지는 대형 구조물에 대한 지능형제어시스템의 적용이 적극적으로 받아들여지고 있지는 않지만, 능동제어알고리즘 개발 및 실험적 연구가 계속되고 있다. 특히 외국의 경우, 일본을 중심으로 구조물의 진동문제에 능동제어기법을 도입하는 사례가 늘어가고 있다. 우리나라에서도 초고층빌딩과 사장교, 현수교와 같은 장지간을 갖는 교량 등의 건설에 관심이 높아짐에 따라 진동제어 시스템의 도입이 증가할 것으로 판단된다.

발달된 토목공학기술을 이용하여 다양한 형식과 색다른 조형미를 추구하는 대형구조물의 건설은 계속해서 증가할 것이며 눈앞에 다가온 21세기는 초고층, 초장대 구조물의 등장을 예고하고 있다. 이와 함께, 진동제어 시스템의 경제성, 안정성 및 신뢰성을 높이려는 보다 적극적인 연구는 신소재개발, 시스템의 계측 및 신호처리, 구조제어에 적합한 알고리즘 개발을 위한 이론 및 실험분야 뿐 아니라 고성능의 제진장치

개발, 제작 및 적용 등의 여러 분야에 걸쳐 진행되고 있다. 발달하는 각 분야의 과학기술과 더불어 구조제어를 위한 지속적인 노력은 외부환경의 변화를 스스로 감지하고 적극적으로 반응하는 지능형구조물(Smart Structure)의 시대를 앞당기는 계기가 될 것이다.