

대형구조물의 진동제어기술

박관순*, 옥승용**



박 관 순

동국대학교 건축공학과 교수
kpark@dongguk.edu

서울대학교 토목공학과 학사

서울대학교 대학원 토목공학 석사/박사

일본 동경대학교 교량연구실 객원연구원

서울대학교 지구환경시스템 공학부 BK조교수

1. 서론

인간은 자연을 관찰하면서 자연의 법칙을 배우고 자연의 힘을 이용하며 자연으로부터의 재해를 방지하려고 노력하면서 여러 종류의 다양한 공학기술을 발전시켜왔다. 특히, 토목건축공학은 인류문명의 발달과 함께 태동하기 시작하여 인류발전에 커다란 공헌을 하였을 뿐 아니라 그 분야가 세분화되며 많은 공학의 발전에도 기여하여 왔다. 초기 원시적 형태의 건설기술은 산업혁명시대 이후 제반 산업과 더불어 급속한 기술적 진보를 이루어 왔으며, 오늘날에는 100층을 훨씬 웃도는 초고층빌딩이나 험악한 산악지대 및 해협을 가로지르는 초장대교량의 건설도 가능하게 되었다. 최근에는 단순히 기능적이면서 실용적인 구조물뿐만 아니라 조형미나 경관미 등의 심미적 가치에 기초하여 자연환경과 어우러진 유연하면서 날렵한 형상의 구조물

이 요구되고 있다.

이와 같은 구조물의 고층화 및 장대화 추세는 구조물의 유연성을 증대시키고 고유 감쇠능력을 저하시켜서 지진이나 바람 등 자연계의 하중과 차량 등 인공적인 하중을 포함해서 구조물에 작용하는 불규칙한 외부교란에 의하여 큰 폭의 진동발생 가능성을 증대시켰다. 이에 따라 구조물을 구성하는 주요 부재의 피로를 증대시키든지 구조물의 직접적인 파괴를 유발함으로써 구조물의 안정성 및 사용성을 확보하기 위한 적절한 대책이 요구되었다.

이러한 구조물의 진동문제를 해결하기 위한 고전적인 방법으로는 부재보강을 통한 강성증대를 들 수 있다. 이 방법은 새로운 설계가 이루어져야 할 뿐만 아니라 추가적인 보강재를 필요로 하기 때문에 많은 비용이 요구되기도 하며, 때로는 구조물의 미학적 설계를 가로막는 요인이 되기도 한다. 이에 구

** 서울대학교 지구환경시스템공학부 연구원

구조물의 미학적 설계를 가능하게 하면서도 구조물의 안정성과 사용성을 높일 수 있는 방안으로 진동제어의 원리가 토목구조물에 적용되기 시작하였다.

이러한 진동제어시스템은 진동발생의 원인인 지진, 바람, 차량 등의 하중형태와 빌딩, 교량 등 구조물의 형식별 특성에 따라 다양한 방식으로 적용될 수 있으며, 적용의 효율성과 효율성을 높이기 위하여 여러 가지 종류의 제진장치 및 제어알고리즘이 개발되었다. 이 글에서는 먼저 제어시스템의 종류 및 개념을 소개하고, 실제 대형구조물에의 적용사례를 중심으로 진동제어기술의 현황을 살펴보고자 한다.

2. 진동제어시스템의 종류

시스템의 변형 또는 에너지의 증감을 통하여 외부하중에 의한 구조물의 동적응답을 조정함으로써 구조물의 적응성을 높이는 진동 제어 방법은 제어에너지의 공급여부, 구조물의 동적응답에 관한 정보를 제공하는 센서와 데이터 입출력 장치의 유무에 따라 수동 제어시스템 (passive control system), 준능동 제어시스템 (semi-active control system), 능동 제어시스템 (active control system), 그리고 여러 방식들을 혼합한 복합형 진동제어시스템 (hybrid control system) 으로 나눌 수 있다. 여기에서는 각 진동제어시스템의 개념 및 종류별 특징에 관하여 기술한다.

2.1 수동 진동제어시스템

수동제어시스템은 구조물의 진동수를 조절하거나 진동에너지를 흡수함으로써 외부하중에 의한 구조물의 진동을 감소시켜 구조물의

안정성을 확보하는 방법이다. 이 장치들은 제어를 수행하기 위한 별도의 에너지를 공급받지 않기 때문에, 비용과 유지관리측면에서 일반적으로 다른 제어시스템에 비하여 경제적이거나, 시스템의 특성이 고정되므로 다양한 진동수 성분이 중첩된 하중에 대하여 대응이 힘들다는 단점이 있다. 대표적인 장치로는 구조물의 주기 (진동수) 특성을 변화시키는 방식으로서 빌딩에 적용되는 기초격리시스템 (base isolation system)과 동일한 장치로서 교량에 적용되는 지진격리시스템 (seismic isolation system), 구조물의 고유진동수와 동조 (tuning) 시킴으로써 구조물의 진동에너지를 흡수하는 동조질량감쇠기 (tuned mass damper: TMD) 와 동조액체감쇠기 (tuned liquid damper, TLD), 그리고 장치의 마찰, 점성, 소성변형 등에 의해서 구조물의 진동에너지를 소산시키는 방식의 장치로서 금속항복감쇠기 (metallic yield damper), 마찰감쇠기 (friction damper), 점성유체감쇠기 (viscous fluid damper), 점탄성감쇠기 (visco-elastic damper), 납압출감쇠기 (lead extrusion damper) 등이 있다. 한 예로서 국내 서해대교의 케이블 진동제어를 목적으로 적용된 점성유체감쇠기가 그림 1에 제시되어 있다.

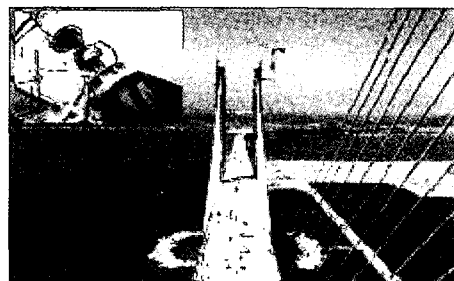


그림 1. 서해대교 및 케이블 감쇠기

2.2 능동 진동제어시스템

외부하중에 의해 발생한 구조계의 동적응답을 감소시키기 위하여 별도의 에너지를 하중재하기 (actuator) 에 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. 대표적 장치로는 능동질량감쇠기 (active mass damper: AMD) 및 텐던형식의 질량감쇠기 (active tendon mass damper: ATMD) 가 있다

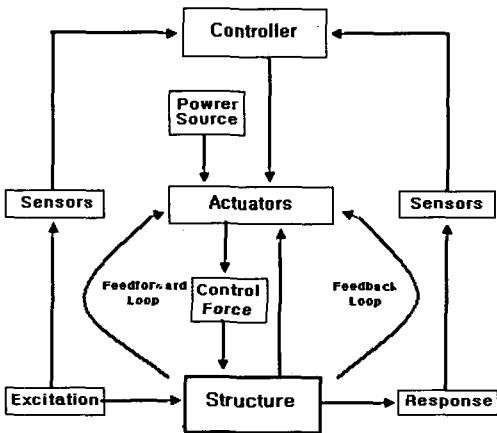


그림 2. 능동제어 시스템의 구성도

이러한 능동 제어시스템은 그림 2와 같이 크게 세 부분으로 구성 되어진다고 볼 수 있다. 첫 번째로는 외부교란에 의한 구조물의 상태, 응답특성을 감지하거나 외부교란 특성을 감지하는 센서 (sensor) 이며, 두 번째로는

설계자에 의하여 결정된 제어 알고리즘에 기초하여 구조물의 진동제어에 필요한 제어력을 계산하고, 이 값을 하중재하기에 전달하는 제어기 (controller) 이며, 마지막으로 제어기에서 계산된 제어력을 발생시키고 이 힘을 구조물에 직접 전달하는 하중재하기 등으로 구분할 수 있다. 센서에서 얻어진 하중정보나 구조물의 응답정보는 최적의 제어력 산출에 사용되므로 정확한 계측이 요구되며, 주로 사용되는 센서의 정확도에 크게 의존된다. 이러한 센서나 하중재하기는 능동 제어시스템에 있어서 하드웨어에 해당하는 부분으로 제어시스템의 특성에 맞는 적절한 선정 또한 능동 제어시스템의 효과를 결정하는 중요한 인자이다. 무엇보다 중요한 것은 능동 제어시스템의 두뇌역할을 담당하는 제어기의 설계이다. 이는 능동 제어시스템의 효과를 결정짓는 제어력이 이 부분에서 결정되기 때문이다. 구조물에 사용되는 능동제어시스템은 제어알고리즘에서 고려해야 할 문제점 외에도 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 아니지만 능동제어장치의 높은 제어성능과 외부교란에 대한 적응능력 등의 여러 장점으로 인하여 그 적용은 증가하고 있는 추세이며, 아울러 부분적인 장치의 결함이 있어도 시스템이 안정적인 성능을 구현할 수 있도록 하는 연구 등이 이루어지고 있는 실정이다.

2.3 복합형 진동제어시스템

일반적으로 복합제어의 의미는 수동제어와 능동제어를 혼합한 것으로 각각의 장점을 살려 진동제어효과를 높일 수 있다. 즉, 강한 돌풍이나 지진의 발생 시 요구되는 제어력을 수동 제어장치와 능동제어장치가 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 쓰이지 않고 있다. 대표적인 복합형 제진장치인 복합질량감쇠기(hybrid mass damper: HMD)는 수동형인 TMD와 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 따라 능동형 모드나 수동형 모드만을 사용할 수도 있다. 일반적으로 사용되는 HMD에 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 요구되며, 통상적으로 제진장치의 고유주기가 구조물의 1차 고유주기에 동조되도록 한다. 능동형 제어장치인 하중재하기로는 주로 AC-서보모터가 사용된다. 이 서보모터의 용량은 중요한 설계인자이므로 설계하중과 제어기준 등을 고려하여 결정한다. 하중재하기의 동력을 전달하기 위한 동력전달장치로는 rack & pinion이나 ball-screw형식 등이 사

용되며 그밖에 필요에 따라 감속기, 클러치 등이 사용된다. 운동을 유도하기 위한 guide rail은 진동방향으로 설치되는데, 목적에 따라 1방향 또는 2방향으로 설치한다. 이 때 진동을 감쇠시키는 질량체 (moving mass) 의 운동거리를 고려하여야 하며, 하중재하기의 오작동이나 과부하 등을 방지하기 위한 능동-수동 전환 기구를 설치하기도 한다.

2.4 준능동 진동제어시스템

준능동 제어장치는 외부교란에 따른 구조물의 응답상태를 감지하는 센서를 통하여 구조물의 응답을 계측하고, 제어를 통하여 소규모의 전력으로 장치의 동특성을 조절하게 된다. 즉, 능동 또는 복합형 제어시스템과 같이 제어력을 직접 구조물에 가하기보다는, 장치의 강성이나 감쇠를 변화시켜서 원하는 제어력을 간접적으로 구조물에 가해줌으로써 제어 효과를 얻는다. 이러한 준능동 제어 시스템은 높은 전력량에 대한 필요성은 없는 반면, 원하는 제어력을 감쇠력의 소산성(dissipativeness) 을 만족하는 영역 내에서만 발휘하게 된다. 따라서 소산성을 만족하지 않는 영역에서는 수동 제어시스템과 동일한 방식으로 운동하게 되는 한계를 가지지만 이는 또한 준능동 시스템의 안정성을 보장하는 장점이 되기도 한다. 따라서 일반적으로 제어 에너지의 차수가 능동 제어시스템에 비하여 낮은 시스템이라 할 수 있다. 이는 축전지 규모의 작은 전원으로도 작동할 수 있기 때문에 전원공급이 차단될 수 있는 강진 등의 상황에서도 작동될 수 있다는 장점을 갖는다. 적용방식에 따라 가변강성감쇠기(variable

stiffness damper), 가변오리피스감쇠기 (variable orifice damper), 가변마찰감쇠기 (variable friction damper), 제어성유체감쇠기 (controllable fluid damper), 제어성동조질량 (액체) 감쇠기 (controllable TMD (TLD)) 등이 있다. 덧붙여 제어성 유체감쇠기로는 ER감쇠기(electro-rheological damper) 와 MR감쇠기 (magneto-rheological damper) 등이 있다.

3. 진동제어시스템의 적용

3.1 빌딩 및 타워형 구조물에의 적용사례

능동제어시스템이 구조물에 적용된 것은 그림 3의 1989년 일본의 Kyobashi Seiwa 빌딩에 설치된 AMD가 최초이다. 이는 총 면적 423 m²의 11층 사무실용 빌딩으로서, 종방향 및 비틀림에 대한 진동제어를 목적으로 그림 4와 같이 2개의 AMD가 설치되어 있다. 종방향의 진동을 감소시키기 위한 AMD1의 무게는 4 ton이며 비틀림 운동을 담당하는 AMD2의 무게는 1 ton이다. 이 장치는 강한 바람과 중간정도 규모의 지진에 대하여 거주자의 편의성을 높이고자 설치되었으며 능동형 제어장치의 실용화를 앞당기는 계기가 되었다.

이 후, Rainbow Bridge에 설치되었던 HMD의 운동주기를 일정한 범위 내에서 조절할 수 있도록 보완/개량한 V형 HMD가 개발되어 그림 5의 신주쿠 파크타워에 설치되었다. 이 장치 (그림 6) 는 제작사에 의하여 TRIGON으로 명명되었으며 후에 일본내의 우수기계기술상을 받은 제품이기도 하다.

다음으로 Kansai 공항의 관제탑 (그림 7) 에 적용된 진자형 HMD가 있다. 관제탑이 가지는

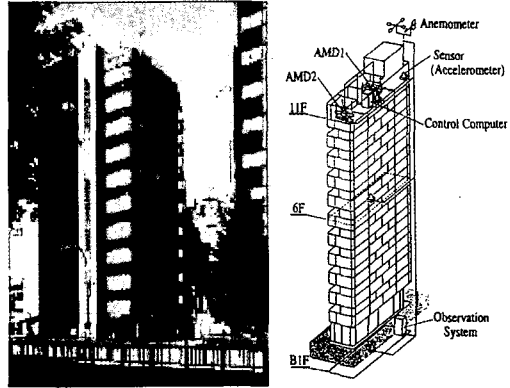


그림 3. Kyobashi Seiwa 빌딩(좌)

그림 4. AMD 설치 개념도(우)



그림 5. Shinjuku Park tower

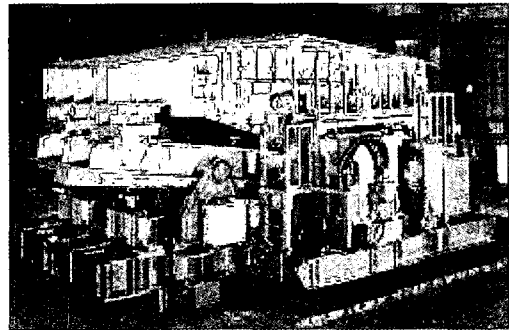


그림 6. V-shaped HMD

기하학적 형상과 지형적 요건(해안지역)으로 인한 강한 바람은 풍동실험 결과 관제사들의 사용성에 큰 지장을 줄 것으로 판단되어 제진수단으로서 HMD를 설치하게 되었다. 이 장치(그림 8)는 높이 86.35 m, 총 무게 2570 ton의 관제탑에 발생하는 과도한 진동을 억제하기 위하여 진자형식으로 구성된 5 ton의 HMD가 관제탑 상부에 2개씩 설치되었으며, 각각 7.5 kW의 AC 서보모터에 의해 구동된다. 실험에 의하면 비제어시 1% 이하이던 감쇠비가 제어 후 10배 이상 증가되어 사용성 개선에 크게 기여한 것으로 조사되었다.

국내에서도 영종도에 위치한 인천국제공항 관제탑(그림 9)의 풍하중에 대한 사용성문제가 야기되어 진동제어시스템에 대한 타당성 조사가 이루어졌으며, 관제사의 원활한 업무수행을 보장하기 위한 사용성 확보의 목적으로 최종적으로 HMD가 결정되어 관제탑의 19층에 설치되었으며, 현재 운용되고 있다.(그림 10) 이 장치는 용량 11 kW AC-서보모터 2개에 의하여 양방향으로 작동되며 동력전달방식으로는 ball-screw를 사용한다

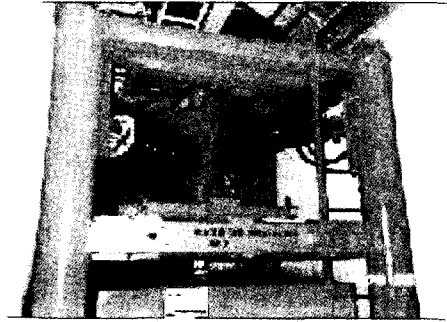


그림 8. 진자형 HMD



그림 9. 인천국제공항 관제탑

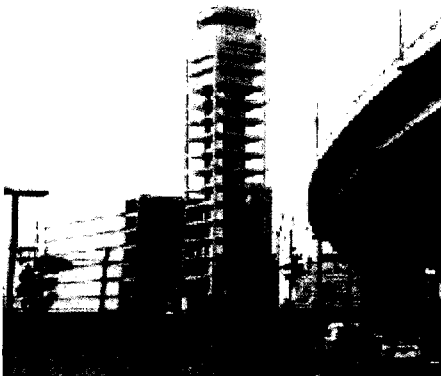


그림 7. Kansai 공항 관제탑

이는 국내 건설현장에서 최초로 도입된 복합형 진동제어시스템이다.

또한, 빌딩구조물의 내진성능을 향상시키기 위한 목적으로 3층 빌딩구조물인 일본의 Kajima 기술연구소(그림 11)에 가변강성시스템(그림 12)이 최초로 적용된 바가 있다. 이 시스템은 구조물 기초에서 측정되는 가속도로부터 구조물의 응답을 최소화할 수 있도록 각 층에 설치된 가변강성감쇠기의 강성을 20 W의 작은 전력으로 0.03초 이내에 변화시킴으로써 준능동 제어방법을 운용한다.

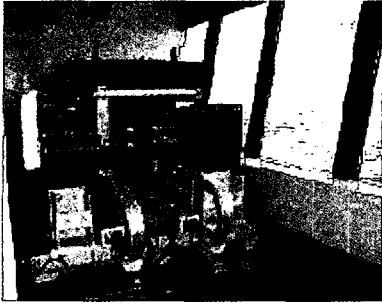


그림 10. 관제탑 내부에 설치된 HMD

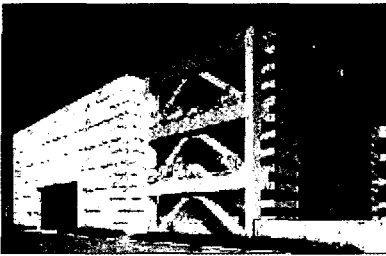


그림 11. Kajima 기술연구소



그림 12. 가변강성시스템

11 kW의 AC 서보모터를 동력으로 작동되었다. 이 무게는 주탑 1차 모달질량의 0.14 %에 해당되며, 만약 수동 제어시스템인 TMD를 사용한다면 HMD의 7배에 달하는 질량체가 요구되는 것으로 평가되었다.

풍하중이 큰 경우에는 여러 개의 제진장치를 함께 사용하기도 한다. 그림 15는 현재 세계에서 가장 긴 중앙지간을 가진 현수교인 Akashi Kaikyo Bridge의 주탑 시공 당시 사용되었던 제진장치를 나타낸다. 시공 당시 HMD와 TMD가 함께 사용되었으며, 완공 후에도 TMD는 주탑 내부에 장착되어 진동제어효과를 발휘하고 있다.



그림 13. 시공 당시 Rainbow 교량의 주탑

3.2 교량구조물에서의 적용사례

그림 13은 현재 일본 동경에 건설되어 있는 Rainbow 교량의 시공 당시 모습이다. 건설 당시 약 7 m/sec의 풍속에서 와류진동현상으로 인한 큰 폭의 진동이 예상되어 시공상 문제가 있을 것으로 지적되어 그림 14와 같은 아치형상의 HMD가 사용되었으며 성공적으로 진동감소능력을 발휘한 것으로 보고되었다. 당시 사용된 HMD의 무게는 2 ton으로

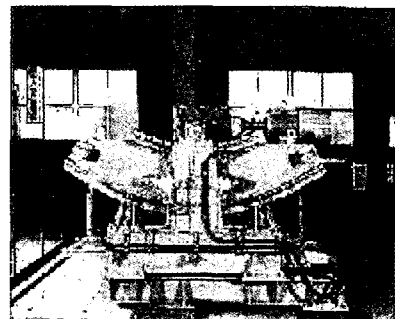


그림 14. Rainbow 교량에 사용된 HMD

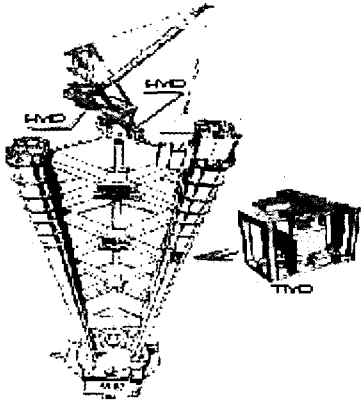


그림 15. Akashi Kaikyo Bridge의 주탑에 사용된 HMD와 TMD

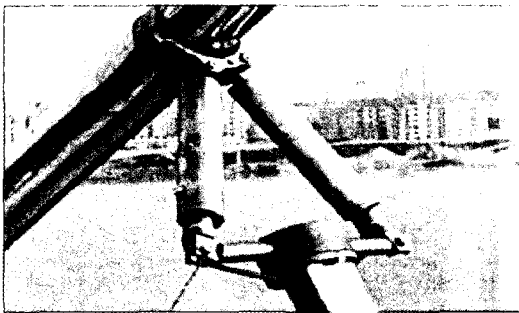


그림 16. Dongting Lake 교량의 케이블에 사용된 MR 감쇠기

장대교량의 주탑이나 교형 이외에도 사장교나 현수교같이 케이블에 의하여 지지되는 교량들은 케이블 자체에도 진동문제가 발생하게 된다. 그림 16은 중국 Hunan에 있는 Dongting Lake 교량의 케이블 보수를 목적으로 설치된 MR 감쇠기를 나타내고 있다. 이러한 케이블지 형식의 교량구조물에서는 비를 동반한 바람에 취약하기 때문에 케이블 진동현상이 발생하기 쉬우며, 이는 피로 및 부식에 의한 수명저하를 유발하게 된다. 이 교량에서는 156개의 케이블 전체에 총 312개의 MR 감쇠기를 설치하였다.

4. 맺음말

대형구조물에의 진동제어기술로서 능동, 준능동 및 복합형 등의 지능형 진동제어시스템에 대하여 알아보았다. 국외의 경우에는 일본을 중심으로 구조물의 진동문제에 이러한 지능형 제어시스템을 도입하는 사례가 늘어가고 있으나, 국내의 경우에는 몇몇 경제적, 기술적 문제점들로 인하여 그 적용이 적극적으로 받아들여지고 있지는 않은 실정이다. 그러나 최근 들어 우리나라에서도 초고층빌딩에의 관심이 높아지고 있으며 서남해안에 위치한 섬들을 잇는 연도교 및 연륙교로서 사장교 및 현수교와 같은 장지간을 갖는 교량의 건설이 다수 계획 중에 있다. 따라서 국내외적으로 21세기는 발달된 건설기술을 바탕으로 더욱 다양한 조형미를 추구하는 초고층, 초장대 구조물의 등장을 예고하고 있다. 이에 발달하는 각 분야의 과학기술과 더불어 구조제어를 위한 지속적인 노력은 외부환경의 변화를 스스로 감지하고 적극적으로 반응하는 지능형구조물 (smart structure)의 시대를 앞당기는 계기가 될 것이다. 따라서 기존의 진동방지대책이 주로 강도개념에 기초한 것이었다면 신기술로서 등장한 진동제어시스템은 건축, 토목, 기계, 전기, 전자, 제어 및 컴퓨터기술의 집약체로서 종래에는 불가능했던 특수구조물의 건설을 현실로 구현함으로써 건설기술의 새로운 지평을 열어가는 선도적인 역할을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

기획 : 임윤록 편집위원 yunmook@yonsei.ac.kr