

# 수평 방향 지진파를 차단하라

# 07

글\_ 고희무 서울대 지구환경시스템공학부 교수 hmkoh@snu.ac.kr



세계 최고층 대만 '101 빌딩' 내진장치

김도현

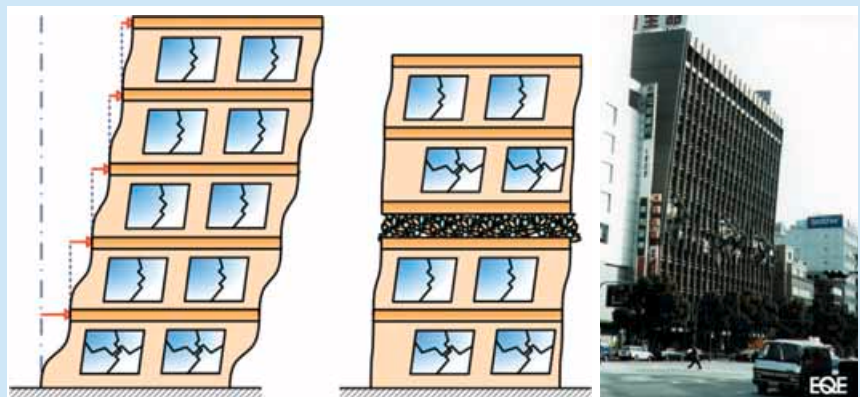
**지**진 격리 장치는 말 그대로 땅 위에 세워진 건물과 땅을 분리시켜 땅이 흔들려도 같이 흔들리지 않도록 하는 장치다. 건물을 공중부양시키는 것과 같은 다소 엉뚱한 아이디어를 어떻게 실현 가능하도록 하는지 알기 위해서는 먼저 지진의 어떤 특성 때문에 건물이 피해를 보는 것인지를 알아야 한다.

## 철판과 고무 겹쳐쌓아 지진파 전달 차단

영화나 만화 같은 곳에서 흔히 표현하는 지진은 땅이 갈라지고 꺼지면서 땅 속으로 건물이 가라앉는 그야말로 대재앙이다. 하지만, 현실에서 빈번하게 일어나는

지진은 그런 재앙과는 다소 거리가 있다. 잘 알려진 바와 같이 지진은 단층의 활동으로 생성된 에너지가 지층을 통해 파동으로 전달되는 것이며, 특히 수평 방향의 파동이 건물의 기초를 포함한 밑 부분에 이르러 건물을 흔들게 된다. 이때 건물 전체에는 지진에 의한 지반 움직임의 가속도에 비례하는 힘이 수평 방향으로 가해지게 되는데, 건물이 이 수평 방향 힘을 견디지 못하면 피해를 보게 되는 것이다(그림 1 참조).

현실적인 지진 격리 장치의 아이디어는 바로 이 수평 방향 힘의 전달을 차단하는 것으로부터 출발한다. 건물 자체의 무게는 지반으로 전달하여 지탱하면서 동시에 지반의 수평 움직임은 건물로 전달하지 않도록 하는 것, 이것이 바로 실현 가능한 지진격리장치인 것이다. <그림 2>의 지진 격리장치는 현재 사용되고 있는 여러 가지 형식의 격리장치



<그림 1> 지진의 발생은 구조물의 수평 관성력을 발생시켜 구조물의 파괴를 유발한다(왼쪽). 오른쪽 사진은 1995년 일본 고베지방에서 발생한 지진으로 인하여 파괴가 일어난 모습이다.



〈그림 2〉 지진격리장치는 고무와 철판의 적층구조에 금속이 중앙에 들어 있는 구조로 되어 있기 때문에 (왼쪽) 수직방향으로는 강한 강성을 가지면서도 수평방향으로 유연하게 거동한다(오른쪽).



〈그림 3〉 (왼쪽) 충남 천안의 (주)유니슨기술연구소 건물에 설치된 지진격리장치(오른쪽)와 인천 국제공항 고가교에 설치된 지진격리장치

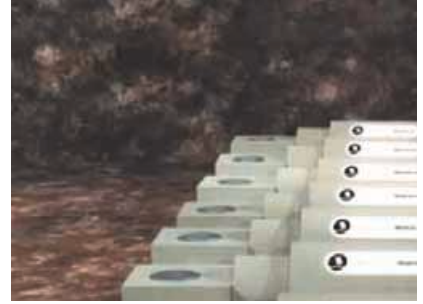
중에서 가장 대표적인 것으로서, 중앙에 금속봉을 삽입하고 그 주위로 철판과 고무를 번갈아 가면서 겹쳐 쌓는 적층식 구조를 가지고 있다.

철판과 고무의 적층식 구조는 수직 방향으로 철판이 건물의 무게를 지탱할 수 있을 만큼 충분히 튼튼하고, 수평 방향으로 고무가 상당히 유연하게 움직일 수 있도록 한다. 따라서 평상시에는 구조물을 지탱하고 있지만, 지진시에는 격리 장치에 수평 방향으로 큰 변형이 발생, 위쪽의 건물과 지반 사이의 격리 효과를 낼 수 있도록 만들어진다. 뿐만 아니라, 격리 장치 중앙에 장착된 금속봉은 지반 운동으로 건물에 전달되는 에너지가 격리 장치 내부에서 흡수, 소산될 수 있도록 하는 역할을 한다. 〈그림 3〉은 지진 격리 장치가 설치된 우리나라의 건물과 교량의 예이다.

**‘에너지 소산장치’로 진동에너지 흡수·소산**

다른 또 하나의 지진 대처 방법으로는 ‘구조 제어시스템’이라 불리는 별도의 제어장치를 사용하는 방법이 있다. 구조 제어시스템은 제어장치가 별도의 외부 제어에너지를 사용하는가의 여부에 따라 수동형과 능동형으로 크게 나눌 수 있으며, 최근에는 능동형과 수동형의 장점을 딴 준 능동형 방법도 각광받고 있다.

수동형 제어시스템의 기본 원리 중 하나는 에너지 소산 장치를 이용하여 지진이나 바람으로 구조물에 발생하는 진동에너지를 흡수, 소산 시키는 것이다. 우리가 일상생활에서 흔히 접할 수 있는 대표적인 에너지 소산장치로는 자동차의 충격과 진동을 흡수하는 현가장치의 오일 댐퍼를 들 수 있다. 지진에 대해서도 비슷한 장치가 사용되는데, 지진



〈그림 4〉 교량의 진동 제어에 사용되는 대형 실린더 댐퍼(미국 Taylor Devices).

으로 발생한 진동 에너지를 대형 감쇠기가 흡수하여 건물을 보호하는 것이다(그림 4 참조). 재료의 일그러짐과 같은 소성 변형을 이용하는 것도 에너지 소산 장치를 만드는 다른 방법이 될 수 있는데, 진동 에너지가 어떤 재료(주로 금속)를 찌그러뜨리고 변형시키는데 사용되도록 장치를 만드는 것이다(그림 5 참조).

수동형 제어시스템의 다른 방법 중 하나는 바로 동조원리를 이용한 방법이다. 이 방법은 구조물의 규칙적인 진동을 제어하는데 주로 사용되며, 원래 구조물의 고유 진동수와 적절하게 동조된 새로운 진동 구조계를 원래 구조물에 덧붙이면, 원래 구조물의 그 고유 진동수에 해당하는 진동을 상쇄하는 반력이 나타나는 것을 이용한 것이다(그림 6). 마치 덧붙인 진동 제어장치가 원래 구조물을 대신해서 진동해주는 것과 같은 효과를 이용한다고 할 수 있다. 이 원리를 이용해서 동조 질량 감쇠기(TMD), 동조 액체 감쇠기(TLD)와 같은 장치들이 진동 제어를 위해 건물이나 교량에 장착되어 사용되고 있다(그림 7 참조).

**‘제어 알고리즘’ 통해 건물 스스로 진동 제어**

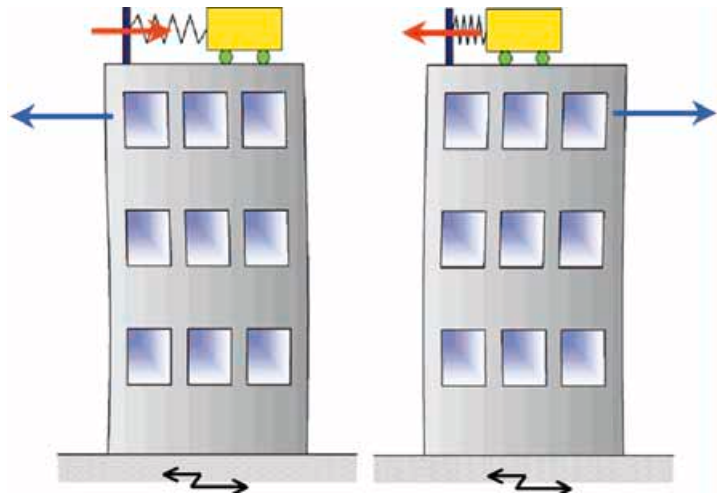
제어장치를 이용한 방법 중에 가장 혁신적이고 미래적인 모습은 아마도 능동

제어시스템에서 찾아볼 수 있을 것이다. 능동 제어시스템은 '건물이 사람과 같이 외부의 변화에 스스로 적응해서 움직일 수 있으면 어떨까'라는 아이디어에서 출발한다. 버스 안에 서있는 사람을 생각해 보자. 버스가 급출발하거나 급정거할 경우에 사람은 흔들림을 감지하고, 어떻게 해야 쓰러지지 않을 것인지 판단을 한 후, 근육에 적절한 힘을 가해서 쓰러지지 않도록 능동적으로 대처한다.

발달된 센서 기술과 컴퓨터 기술은 이와 같은 상상을 현실로 바꾸어 놓았다. 가속도계, 변위계와 같은 여러 가지 센서를 통해 구조물에 발생하는 진동을 감지하고, 감지된 진동은 전기 신호로 바뀌어 중앙 제어기(컴퓨터)에 전달된다. 제어기에서는 이 진동을 가장 효과적으로 억제하기 위한 최선의 방법이 무엇인지 판단하고, 구조물에 힘을 가할 수 있는 장치에 신호를 보내서 가장 적절한 힘을 필요한 곳에 가하게 된다(그림 8 참조). 이러한 일련의 과정은 1/100초 단위의 짧은 시간

안에 연속적으로 이루어지며, 결과적으로 지진이나 바람에 의한 진동을 효과적으로 막을 수 있게 된다. 어떠한 힘이 가장 적절한 것인가를 판단하는 것은 여러 가지 제어 알고리즘을 통해 결정하게 되며, 그 효율을 극대화하기 위하여 현실적으로는 능동형 제어시스템만 단독으로 사용되기보다는 수동형 시스템과 함께 복합형 제어시스템으로 구성되는 것이 보통이다.

〈그림 9〉는 우리 나라에서 최초로 적용된 제어시스템인 인천 국제공항 관제탑의 복합형 질량 감쇠기(HMD) 시스템을 나타낸다. 평상시에는 바람에 의해 심하게 흔들리는 관제탑의 진동을 제어하여 관제사들이 편안한 환경에서 안전하게 임무를 수행할 수 있도록



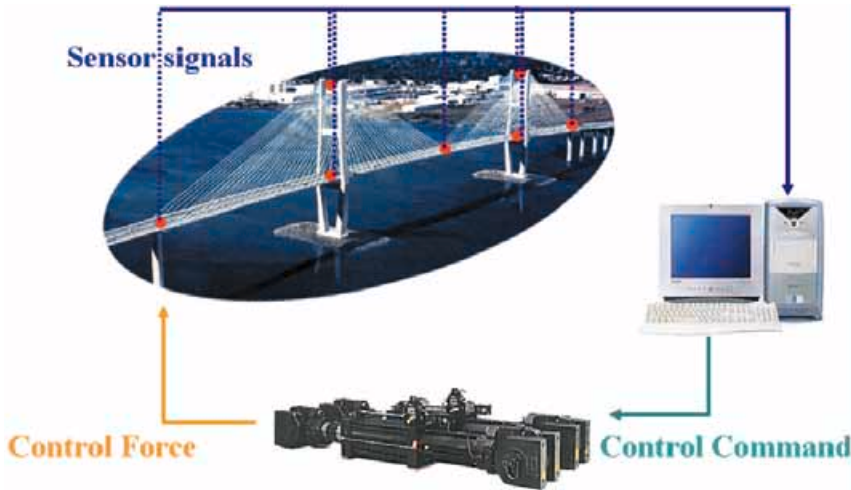
〈그림 6〉 TMD의 작동개념 : 지진에 의해 건물이 좌(우)측으로 움직이면 건물 위의 TMD는 우(좌)측으로 움직여서 진동을 상쇄한다.



〈그림 5〉 고리 모양 금속봉의 찌그러짐을 이용한 감쇠기(Yield Damper). 지진이 오면 변형이 발생, 에너지가 소산된다.



〈그림 7〉 (왼쪽)일본 Chiba Port Tower에 설치된 TMD는 강한 바람에 건물이 좌우로 흔들리는 것을 막아 준다. (오른쪽) 대전 월드컵 경기장 옆 육교에 설치된 TMD는 육교가 아래 위로 출렁이는 것을 줄여준다.



〈그림 8〉 능동형 제어시스템의 구성도(개념도)

록 하고, 지진시에는 최대한 성능을 발휘하여 관제탑의 안전을 지킬 수 있도록 설계되어 있다. 이러한 능동형(복합형) 시스템은 일본을 비롯한 전세계 40여개의 건물에 설치되어 있으며, 우리 나라에서는 제어 시스템 설계·평가 기술을 보유하고 있는 서울대학교를 비롯한 학계 및 연구기관과 일부 제작 및 시공 기술을 보유한 산업체를 중심으로 하여 활발한 연구 개발이 진행되고 있다. 특히 서울대학교가 자체적으로 보유한 제어 시스템 설계 및 평가 기술은 인천 국제공항 관제탑의 제어시스템 구성 과정에 사용되었을 뿐만 아니라, 런던 히드로 공항 새 관제탑의 진동 제어장치 설계·평가에도 사용되어 그 기술력을 인정받았다.

### 차세대 구조물 제어시스템 '준 능동형 시스템'

능동 제어시스템을 사용하여 건물이나 교량과 같은 크고 무거운 구조물을 제어하기 위해서는 짧은 시간에 큰 힘을 발휘해야 하므로 반드시 외부의 전원이 필요하게 된다. 지진과 같은 비상 상황에서는 필요한 전원을 공급받지 못할 수도 있으므로, 이같은 점을 고려한 준 능동형 시스템이 근래에는 각광받고 있다. 준 능동형 시스템은 능동시스템에서와 마찬가지로 센서와 제어기를 활용하지만, 큰 전력을 필요로 하는 하중재하기 대신에 아주 작은 전력만으로도 특성을 바꿀 수 있는 가변감쇠기를 활용한다. 대표적인 것으로는 자기 유변 감쇠기가 있는데, MR 유체를 사용한 실린더형 감쇠기에 일정한 전압을 가해주면 MR 유체의 특성이 변해서 감쇠기의 움직임을 제어할 수 있는 원리를 이용한 장치이다. 준 능동형 장치는 완전 능동형 장치에 비해서 초기 비용 및 유지 보수비용이 비교적 저렴하고, 지진과 같은 극한 상황에서 보다 높은 신뢰성을 보일 수 있을 것으로 기대되어 차세대의 유력한 제어시스템으로 연구 개발이 한창 진행중이다.

최신 혹은 가까운 미래의 지진 대응 기술이라 할 수 있는 격리장치 및 제어장치와 같은 기술은 모두, 지진과 같은 자연의 거대한 힘으로부터 우리의 삶의 터전인 구조물을 안전



〈그림 9〉 인천 국제공항 관제탑에 장착된 HMD는 바람이나 지진에 의한 진동을 감지, 컴퓨터에 의해 진동을 제어하도록 되어 있다.

하게 지켜보려는 인류 노력의 하나의 산물이다. 최근 지진해일의 예에서 볼 수 있듯이 자연의 거대한 힘에 맞서는 것은 어쩌면 부질없고 헛된 일일지도 모른다. 그러나 상상 속에서만 존재하던 격리장치와 제어장치를 만들어 냈듯 지금 인류가 가진 지식을 더욱 발전시켜 우리가 할 수 있는 최선을 다하면 더욱 훌륭한 기술을 만들 수 있게 될 것이며, 그것이 바로 우리에게 주어진 책임과 의무일 것이다. ㉔



글쓴이는 서울대학교 토목공학과를 졸업 후 동대학원에서 석사학위를, 미국 일리노이대학에서 박사학위를 받았으며, 현재 교량설계핵심기술연구단 단장을 겸임하고 있다.