

고무를 이용한 구조물의 지진격리장치와 감쇠기에 관한 개발 및 적용현황

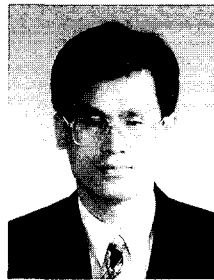
김 두 훈

우리나라는 얼마 전까지만 해도 지진발생 가능성을 과소평가하여 구조물의 설계에 지진의 영향을 고려하지 않았다. 그러나 역사지진과 계기지진을 토대로 수행되어온 지진학 전문가들의 최근 연구결과에 의하면 한반도도 구조물에 상당한 영향을 줄 수 있는 지진이 발생할 가능성이 큰 것으로 제기되고 있다. 실제로 우리나라에서는 1978년 홍성지진 이후 지진에 대한 관심이 증대되어 왔으며, 특히 1995년 일본 고베지역에 규모 7.2의 지진이 발생한 이후 국내 내진설계의 필요성 및 일반인들의 지진에 대한 관심이 고조되었다.

한반도에서는 최근 연평균 17회 정도의 지진이 발생하고 있으며, 역사적으로 볼때도 15~17세기에 활발하였던 한반도의 지진활동이 그 후 20세기 초까지 감소하였다가 최근 중소규모의 지진활동이 다시 증가하는 추세를 보이고 있으며, 콜럼비아 지진, 대만 지진, 터키 지진 등 대규모 지진들이 빈번히 발생하고 있다. 이러한 지진발생과 그 피해 가능성에 대한 인식으로부터 국내에서도 1988년초에 고층건물에 대한 내진설계 기준을 제정/시행하고 있으며, 도로교에도 내진설계의 필요성이 인식되어 1992년 개정된 건설교통부의 도로교 표준시방서에 내진설계편을 신설하여 모든 도로교에 대해서 내진설계를 의무화하고, 2000년 6월에는 도로교 표준시방서의 설계편에 해당하는 내진설계부분을 별도의 설계기준으로 편성하여 도로교 내진설계기준 강화를 위한 도로교 설계기준을

제정하였다.

일반적으로 구조물 내진설계의 기본원칙은 두가지 측면으로 나눌 수 있다. 첫째, 소규모의 지진에 대해서는 구조물이 손상을 입지 않아야 하고 둘째, 대규모의 지진에 대해서는 구조물의 손상을 피할 수는 없으나 최소한 구조물의 붕괴로 인한 인명피해는 막아야 한다는 것이다. 이를 위하여 내진성능을 확보하는 방법으로는 지진하중에 적절히 대항할 수 있도록 주요부재나 구조세목에 대해 강성을 증대시키는 방법과 지진격리장치 및 감쇠장치를 이용하여 지진하중을 감소시키거나 소산시킴으로써 구조물의 내진성능을 높이는 방법으로 나눌 수 있다. 전자는 구조물에 가해질 지진력을 구조부재가 직접 감당할 수 있도록 부재를 설계하는 방법으로써 적용할 수 있는 지진규모에 한계가 있고,



김두훈

- 1978~ 서울대학교 공과대학, 기계 설계, 학사
- 1982~ 한국과학기술원, 기계공학, 석사
- 1984~ 대우 중공업(주) 선박설계부 1987 (대리)
- 1987~ 호주 MONASH University, 1991 기계공학, 박사
- 1992~ 호주 MONASH University, 1992 기계공학과(연구원)
- 1993~ (주) 대우기획조정실 (차장) 1994
- 1994~ 유니슨산업(주) 기술연구소 현재 (소장)

지진시 구조물의 구조부재가 소성영역에까지 도달할 수 있는 단점이 있다. 이에 반해 후자는 구조물에 가해진 지진하중을 지진격리장치 및 감쇠기 등을 이용하여 지진력 자체를 감소시키거나 소산시킴으로써 설계지진 수준에서는 구조물이 탄성영역내에서 거동하도록 함으로써 지진후에도 별다른 보수 없이 구조물 본래의 기능을 수행할 수 있게 한다.

여러 가지의 지진격리 및 제진 장치들이 개발되어 사용되고 있지만 주로 많이 사용되는 제품으로는 고무와 강판을 겹친 복합구조를 갖는 탄성받침(Elastomeric Bearing), 탄성받침에 납을 삽입한 납면진받침(Lead Rubber Bearing), 두 접촉면의 미끄럼을 이용한 활동형 받침(Sliding Bearings), 강재감쇠기(Metallic Damper), 마찰감쇠기(Friction Damper), 점성감쇠기(Viscous Damper), 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper), 능동제어 시스템(Active Control System) 등을 들 수 있다. 본 글에서는 지진을 고려한 토목/건축 구조물의 지진격리 및 제진 장치들 중에서 고무를 이용한 장치에 대해 기본구조, 작동원리, 성능, 적용사례 등을 중심으로 서술하고자 한다.

1. 적층고무받침

적층고무받침은 흔히 탄성받침으로 널리 알려져 있으며, 기존의 강재받침이 설치된 교량의 경우 고정받침이 설치된 교각으로 지진, 차량하중 등의 수평하중이 집중되어 과도한 단면

이 요구된다. 하지만, 탄성받침이 설치된 교량의 경우 수평력을 탄성받침이 설치된 각 교각으로 분산하게 되므로 효과적으로 수평력을 전달하게 된다. 이런 적층고무받침은 수평방향으로 고무의 유연성을 유지하면서 수직강성을 키우고 좌굴현상을 방지하기 위하여 고무와 고무 사이에 내부보강판을 적층하여 쌓은 구조이다. 그리고, 상·하부에는 철골 및 콘크리트 구조물에 고정하기 위한 플렌지 철판을 갖고 있다. 평면적인 형상은 모든 움직임에 대하여 방향성이 없는 원형으로 사용하는 것이 바람직하나, 구조물의 구조나 거동특성에 따라 사각형으로 제작되는 경우도 있다.

일반적으로 고무의 경우 산화반응에 취약하지만, 탄성받침은 구조적으로 산소가 고무 내부에 침투할 수 있는 부분은 극히 미미한 표면적에 불과하므로, 표면에서는 미미한 산화열화가 발생하더라도 내부고무는 건전한 상태를 유지하게 된다. 일례로, 100년 전에 오스트레일리아의 멜본 철도교에서 방진용으로 설치된 천연고무를 수거하여 고무의 산화 정도를 조사한 적이 있었다. 그 결과 표면에서 5mm 정도까지는 오존 및 산소에 의한 산화열화로 균열이 발견되었으나, 내부는 거의 산화가 진행되지 않았다. 또한 이러한 오존에 의한 산화현상은 고무가 인장된 상태에서는 급속히 진행되지만, 고무를 압축한 상태에서는 거의 진행되지 않는 특성을 갖고 있다. 따라서, 탄성받침의 경우 사하중에 의해 항상 압축력이 작용하므로 산화의 진행이 늦고, 산화에 강한 합성고무를 사용하

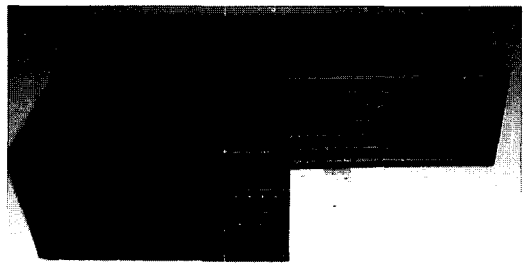
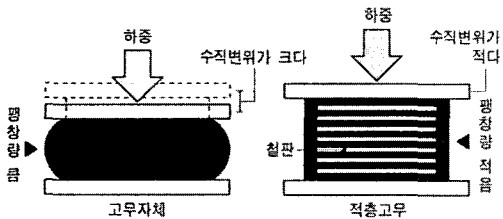


그림 1. 탄성받침의 특징 및 형상

거나 내구성이 강한 피복고무로 5~10mm정도를 피복두께를 확보하도록 설계되었으므로, 표면에서 일부분이 산화되더라도 구조물을 안전하게 지지할 수 있다.

탄성받침의 거동 양상은 상시 온도, 수축, 크리프 등에 의한 변형에는 작은 수평강성으로 인하여 작은 수평력을 하부구조로 전달하게 되며, 지진시에는 상부관성력을 줄이므로 지진격리효과가 있다. 하지만, 일반적으로 적층고무받침에 사용되는 고무는 약 3-5% 정도 낮은 등가감쇠비를 가지므로 지진시 과도한 수평변위가 발생할 수도 있다. 이러한 변위를 제어하기 위해 내부에 납을 삽입한 납면진받침(Lead Rubber Bearing)과 고감쇠 고무를 사용한 고감쇠 고무받침(High Damping Rubber Bearing)이 사용되기도 한다. 고감쇠 고무받침은 제조공정이 적층고무받침과 동일하고, 고무의 배합을 변화함에 따라 여러 가지로 이력특성을 변화시킬 수 있는 장점이 있다. 하지만, 감쇠성능이 납면진받침에 비해 떨어지고, 온도 및 하중변화에 따른 거동특성이 크게 좌우된다는 단점이 있다. 그림 3은 고감쇠 고무받침의 전형적인 이력곡선을 나타낸 것으로 초기변형이 적은 경우에는 받침의 강성이 크고, 강성증가(Hardening) 구간이 나타나기 전까지는 작은 수평강성을 일

정하게 유지하는 거동특성을 보이고 있다. 따라서, 이러한 고감쇠 고무받침의 거동특성을 이용하면, 풍하중, 제동하중 등의 상시하중에 대해서는 저항력이 크고, 지진시 예상되는 대변형 구간에서 작은 수평강성으로 지진격리효과를 발휘할 수 있다. 그리고, 과도한 전단변형 구간에서 수평강성이 급격히 증가하므로 설계변위 이상의 과도한 변위를 억제하게 된다.

2. 납면진받침

납면진받침은 적층고무받침과 납전단감쇠기를 혼용한 구조로서 지진시 구조물의 장주기화와 거동형상 변화로 인하여 지진력의 크기를 줄이고, 내부에 원통형의 납을 삽입하여 받침의 전단변형시 납의 소성거동으로 에너지 소산을 통해 지진변위를 감소시킬 수 있다. 일반적인 납면진받침의 거동은 온도하중과 같이 장기간에 걸쳐 서서히 작용하는 형태의 하중에 대해서는 작은 강성으로 저항하며, 풍하중, 차량의 제동하중 등과 같은 충격하중에 대해서는 큰 강성으로 저항함으로써 변위를 구속하는 효과가 있다. 그리고 지진하중과 같은 큰 수평력에 대해서는 납이 완전히 항복하여 고무의 탄성 거동이 발생하는 이차 강성으로 지진력을 줄이고, 납의 소성 거동으로 변위와 지진력을

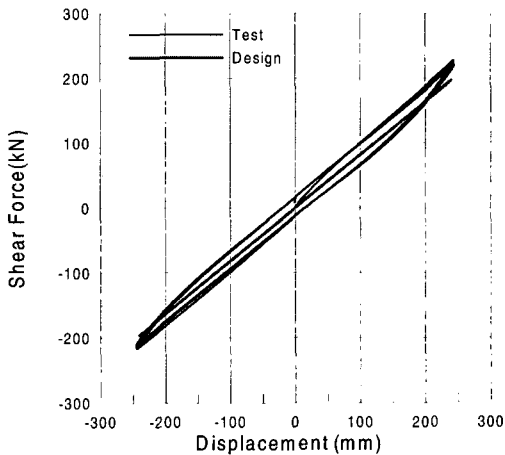


그림 2. 탄성받침의 하중-변위 이력 특성

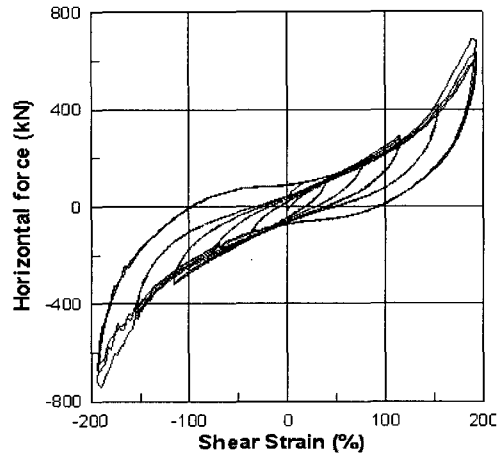
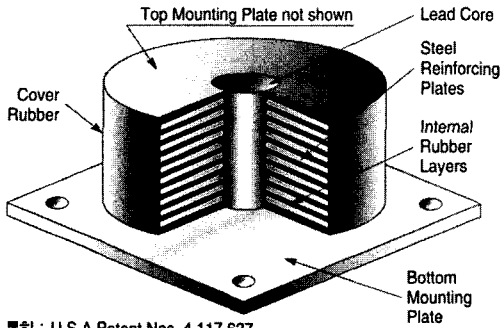
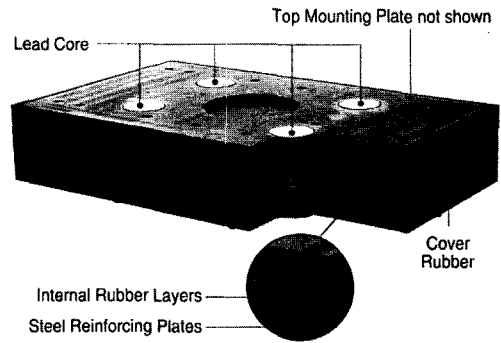


그림 3. 고감쇠 고무받침의 하중-변위 이력 특성



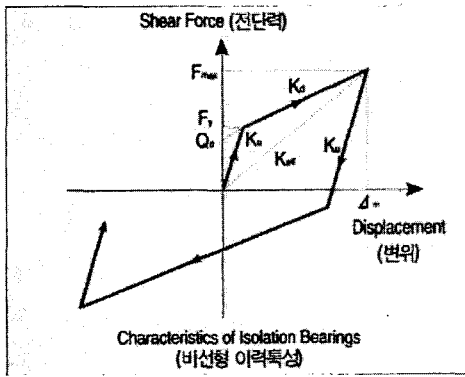
특허 : U.S.A Patent Nos. 4,117,637, 4,499,694 and 4,593,502

(a) 원형 단면

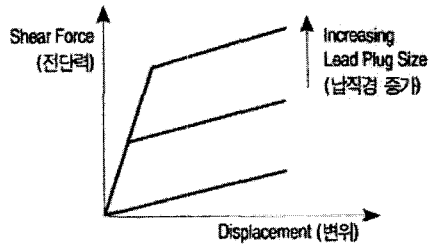


(b) 사각형 단면

그림 4. 납면진반침(L.R.B) 형상



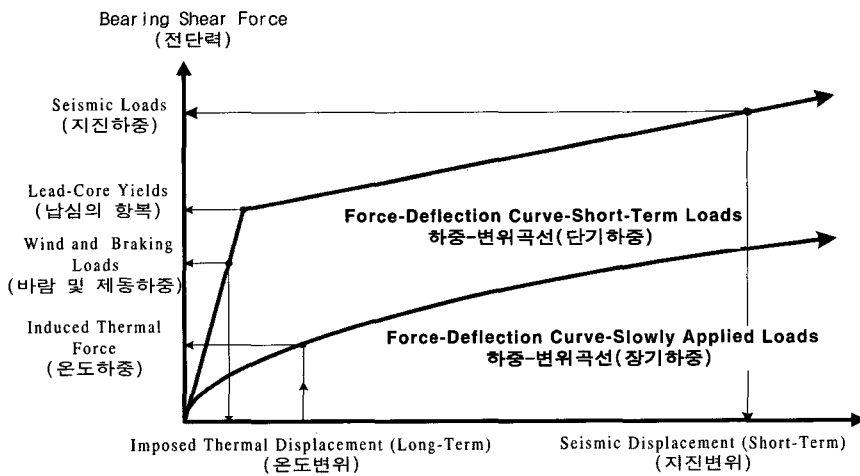
(a) 비선형 이력거동 특성 (비선형 이력특성)



Force-Deflection Characteristics due to Variations in the Lead Core Diameter (납심 증가에 따른 영향)

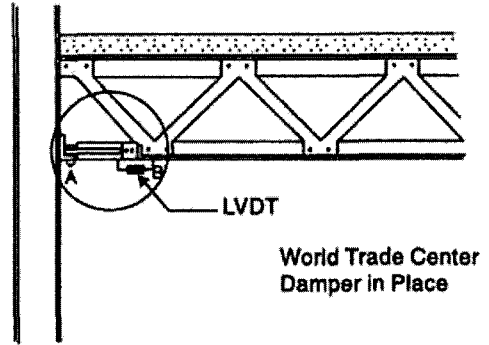
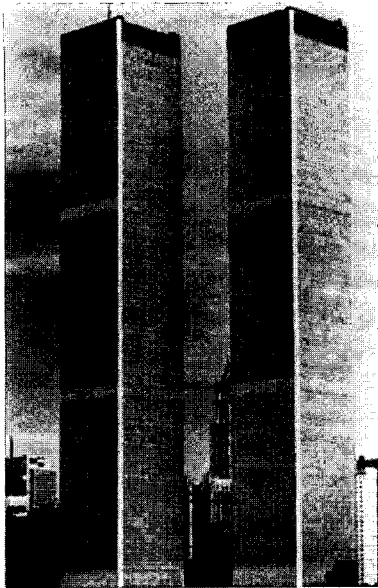
(b) 납면적 변화에 따른 이력거동 특성

납면진반침(L.R.B)의 거동특성

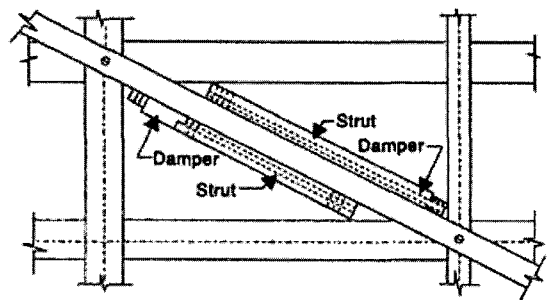
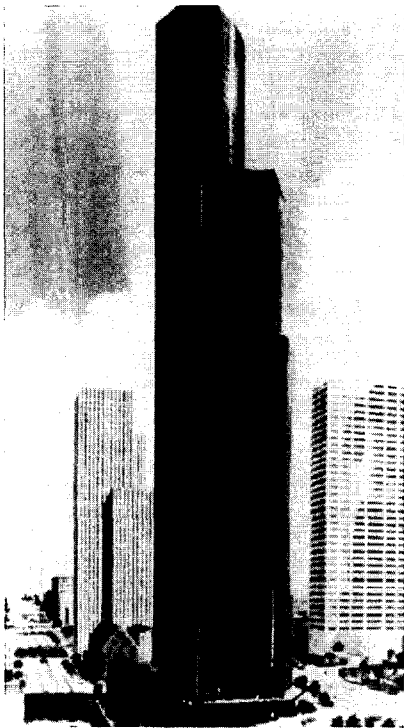


(c) 단기하중 및 장기하중에 대한 거동곡선

그림 5. 납면진반침의 하중-변위 이력특성



(a) World Trade Center(뉴욕)



(b) Columbia SeaFirst 빌딩

그림 6. 점탄성감쇠기의 적용 사례

줄이게 된다. 이때 열에너지로의 에너지 소산에 의해 뜨거워진 납은 냉각되면서 상온에서도 원래의 분자구조로 되돌아가므로 지진을 겪은 후에 잔류변형이 작아서 별다른 조치를 취할 필요가 없다. 또한 설계상의 기법으로서 교각 기초가 설치되는 지반구조는 각 교각을 지지하는 하부지반이 동일한 지지능력을 갖고 있지 못하며, 부분적으로 매우 취약한 지지조건을 갖고 있는 경우에는, 납의 크기를 조절함으로써 특정한 교각에 지진하중을 적게 전달하게 하는 하중조절기능이 가능하다.

3. 점탄성 감쇠기

최근 세계적으로 고강도 재료의 개발 및 구조설계 분야에서의 기술발전과 더불어 초고층 빌딩, 타워 및 관제탑과 같이 유연한 구조물의 건설이 증가하는 추세이며 국내에서도 초고층 주상복합형 아파트, 영종도 신공항 관제타워 등과 같이 유연한 고층 구조물 건설이 증가하고 있다. 특히 감쇠가 작은 고강도 재료가 사용된 유연한 구조물에서는 풍하중 및 지진하중 등의 외부 동하중에 의해 구조물에 발생하는 진동응답이 크고, 오래 지속됨으로써 구조물의 안전성과 사용성에 영향을 줄 가능성이 높아지게 된다.

구조물의 진동을 제어할 목적으로 다양한 형태의 감쇠기가 개발되어 적용되고 있다. 이들 감쇠기중 실린콘 합성재료, 고감쇠 고무등의 점탄성재료를 사용해서 개발된 점탄성 감쇠기는 건물에 브레이싱 형태로 설치함으로써 풍하중 및 지진하중에 의해 건물의 층간 상대변위가 발생될 때 전단변형에 의해 건물에 입사되는 에너지를 소산시킴으로써 건물의 진동응답을 저감시키도록 개발된 장치로, 1969년 뉴욕의 세계무역센터 건물의 풍하중에 대한 대책으로 적용된 이후 꾸준히 초고층 건물의 감쇠성능을 향상시키는 방법으로 널리 사용되고 있다. 그림 6에서 처럼 트러스보에 설치된 경우 최대 풍하중으로 인한 감쇠비가 2.5 ~ 3% 까지 증가한 것으로 계측를 통해 확인되었다. 시애틀의 Columbia SeaFirst 건물에 점탄성 감쇠기 260개를 설치한 경우, 폭풍때 계측된 건물의 1차모드의 감쇠비는 0.8 ~ 6.4% 정도 증가되었으며, 설계풍하중 수준에서는 3.2% 까지 증가되었다. 이 외에도 레드우드시(캐나다)의 Crosby Group 사옥의 경우 지진시 계측된 지진동 대해 1차모드의 감쇠비가 17%까지 증가되었다.

4. 지진격리장치의 성능평가

고무제품의 품질에서 가장 중요한 고무의 내

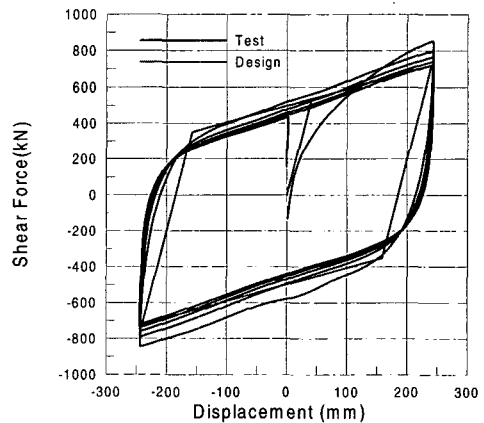
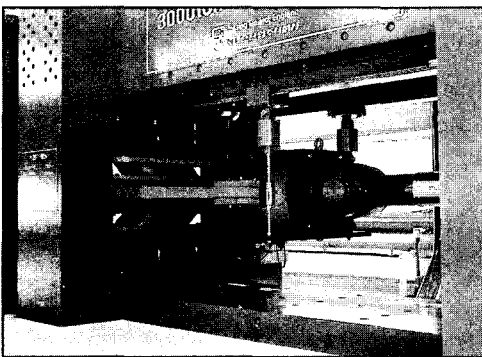


그림 7. 지진격리장치(납면진받침) 시험장비 및 결과

구성을 지배하는 중요한 인자는 적절한 배합설계와 가황처리에 의해 좌우되나, 고무는 강도를 확보하기 위하여 제조과정에서 탄소가 첨가되어 검은색을 띄고 있으므로 겉모양 및 색깔만으로는 품질을 확인하기 어렵기 때문에 완제품에 대한 품질검사 및 제조사에 대한 신뢰가 무엇보다도 중요하다. 현재 국내에서는 지진격리장치의 성능평가에 대한 제도화된 규정이 없는 관계로 미국(AASHTO)이나 일본(도로교 지진격리설계 매뉴얼)의 시방서를 참조해서 성능평가를 하고 있다. AASHTO(1999), UBC(1997)에서는 지진격리장치에 대해 물성시험, 제품의 육안검사(Visual Inspection), 시제품 시험(Prototype Test), 품질 시험(Quality Control Test)을 하도록 규정하고 있으며, 이들 시험규정중 중요한 역학적 특성으로는 수직하중지지 능력 및

수평방향의 이력특성(유효강성, 등가 감쇠비) 등이며, 지진격리 설계시 가장 중요한 요소가 된다.

5. 지진격리장치의 적용사례

최근 내진설계의 개념은 내진설계에 의존하여 인명의 피해를 최소화하자는 기존의 개념에서 이제는 어느정도의 추가 경비를 부담하더라도 재산의 보호까지 기대하고자 하는 방향으로 바뀌고 있다. 이에 따라 구조물 설계에 지진격리장치를 반영하는 사례는 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 국내의 경우에도 LNG 저장탱크, 교량의 지진격리장치 설계는 정착단계에 있으며 아직은 주로 신설 구조물에 적용되고 있다. 그러나, 미국, 일본 등의 경우에는 신설 구조물뿐만 아니라 기존 구조물의 내진보강을 위해서도 지진격리장치가 이용되고 있다.

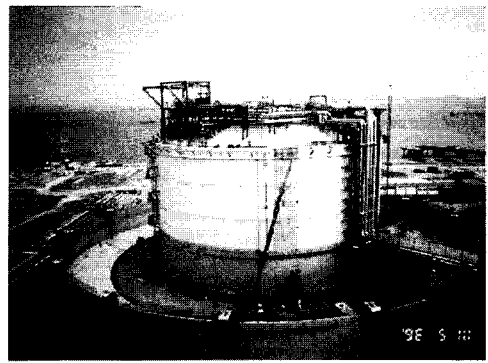
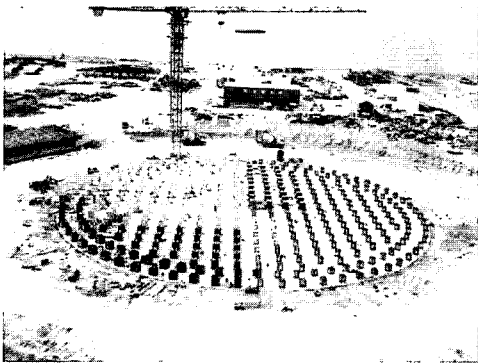


그림 8. 인천 LNG 저장탱크의 시공 광경

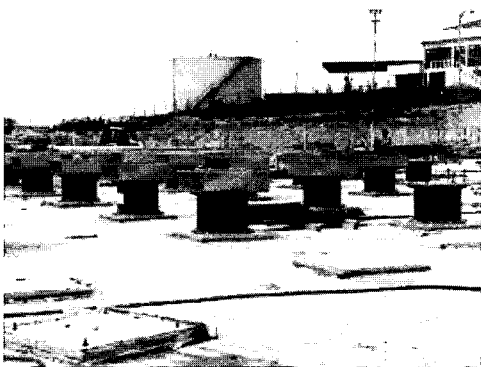


그림 9. 터키 Aliaga LNG 저장탱크의 시공광경

LNG 저장탱크

인천 LNG 저장탱크(1996)는 국내 기술로 제작된 고압식 고무받침을 사용한 최초의 지진격리 구조물이다. 탱크의 지름이 73m, 높이가 47m, 용량이 100,000 m³로, 탱크 1기당 392개의 고무받침이 설치되었다. 터키 Aliaga LNG 저장탱크는 국내 지진격리장치가 해외에 설치된 첫 사례로 탱크 1기당 적층고무받침 241개와 납면진받침 112개가 사용되었으며 현재 2기의 LNG 저장탱크를 건설중에 있다. 탱크의 제원은 지름이 80m, 높이가 28m, 저장용량은 140,000 m³이다.

교 량

탄성받침이 1970년대 초반에 설치되기 시작했으나, 고무의 품질이 확립되지 못한 관계로, 설치된 일부 탄성받침에서 보강판과 고무가 분리되는 현상이 발생해서 받침을 교체하는 사건이 발생한 후로 국내 건설기술자들의 고무제품에 대한 불신으로 한동안 사용되지 못하였다. 그러다가 1987년에 탄성받침에 대한 한국표준규격(KS F4420)이 제정되어 고무제품의 품질이 정립되면서 국내 교량에도 본격적으로 사용되기 시작했다. 초창기의 탄성받침은 교량의 고유주기를 길게 하기 위한 지진격리받침의 기능보다는 다른 강재 받침에 비해 차량의 충격하중을 완화하고 소음에 유리하다는 측면에서 사

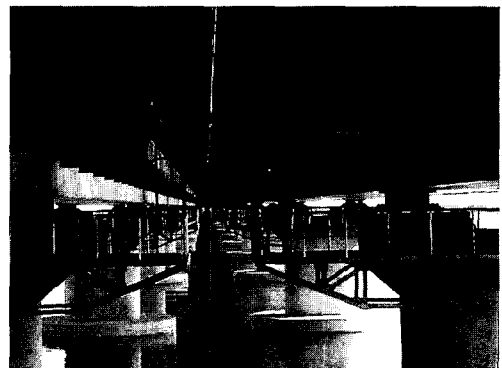
용되었으며, 현재까지 수많은 교량에 시공되고 있다. 본격적으로, 국내에서 교량의 고유주기를 길게 하고 지진에너지 소산효과를 갖는 지진격리장치의 적용은 1997년도 부터라 할 수 있으며, 다경간 연속교인 경우 기존 강재받침으로서는 고정단에 지진하중이 집중되는 문제에 대한 해결책을 찾고자 하는 측면에서 시도되었다. 일반적으로 교량을 단순교보다는 연속교로 설계함에 따라 신축이음장치가 감소하여 차량의 주행성이 향상되고, 신축부위에서의 방수 및 소음문제 등과 같은 문제가 해결되어 유지보수 측면에서 유리한 점을 갖게 된다. 국내 최초로 납면진받침이 적용된 교량은 부산시 광안동 소재 광안대교로서 광안대로 제3공구의 와렌트리스 구간에 사용되었다. 각 지점당 약 5,000톤 정도가 요구되었으나, 제조 가능한 납면진받침의 최대크기 및 현장여건에 따른 제약으로 지점당 4개의 납면진받침을 조립하는 형식으로 설치되었다. 철도교로서 국내 최초로 지진격리장치가 도입된 교량은 1998년도에 완공된 당산철교로 해상부의 주경간은 납면진받침으로 육상부는 탄성받침으로 설계되었다. 그밖에도 인천국제공항 여객터미널 전면고가교, 경기도 발안에 장안대교 등 현재까지 약 20여개 교량에 적용되었으며, 꾸준히 증가 추세에 있다.

건축물

1999년도에 천안시 수신면에 위치한 유니슨



(a) 광안대교



(b) 장안대교

그림 10. 교량의 납면진받침의 적용 사례

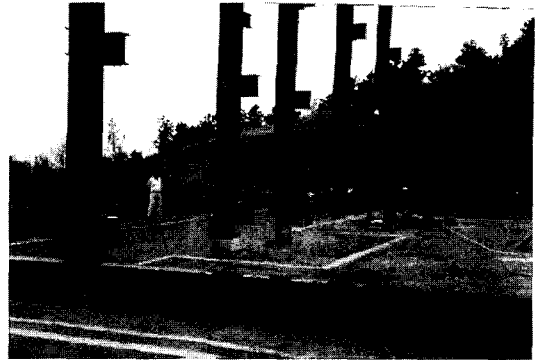
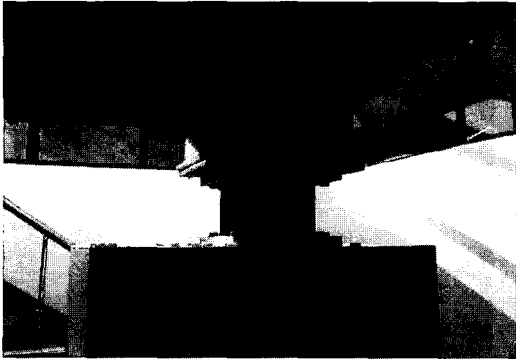


그림 11. 건축구조물에 납면진반침의 적용 사례

산업(주) 기술연구소 연구동에 국내 최초로 지진격리장치가 도입되었다. 건축물 지진격리설계에 대한 국내규정이 없는 관계로 UBC 97 과 ASSHTO 91 에서 규정하는 설계시방서를 근거해서 설계되었다. 연구동은 지하 1층, 지상 3층으로 연면적 740 평인 철골조 건물로 암반에 파일기초를 한 Pedestal 위에 설치된 12개의 납면진반침위에 시공되었다. 설계지진력은 최대 0.12g의 설계가속도 계수에 대해 내진설계를 하였는데 이는 국내에서 채택하고 있는 MMI 진도 8에 해당한다. 전단탄성계수 0.7 MPa 인 천연고무를 사용한 납면진반침은 고무층 총 두께 161mm(23개의 고무층), 지름 350mm, 중앙에 지름 100mm의 납봉이 삽입된 형상을 갖도록 설계되었다. 설계지진시에 납면진반침과 연구동 구조물로 구성된 계의 고유주기는 약 2초 정도이고, 최대설계변위는 70mm이다. 국내에서는 아직 건축물에 대한 지진격리장치 적용사례가 거의 없는 실정이기는 하지만 최근에 대신 주택에서 서울시 서초동에 고급빌라(트라움하우스Ⅲ)에 볼 베어링과 납면진반침을 조합한 지진격리시스템을 적용하는 등 서서히 건축물의 지진격리장치 적용에 관한 설계반영이 고려되고 있다.

6. 향후 전망

본 글에서는 고무를 이용한 구조물의 지진격

리장치/제진 장치에 관한 기본구조, 작동원리, 성능, 적용사례 등을 중심으로 전반적으로 살펴보았다. 현재 지진격리장치/제진장치 분야는 초기의 이론적인 개념단계에서 지난 수십년간에 걸쳐, 시험설비 개발, 장치개발, 적용 단계로의 급격한 기술 발전이 이루어지고 있다. 특히, 납면진반침(LRB)이 개발되면서 지진격리시스템이 보편화 되기 시작하였으며, 최근 발생한 미국 Northridge 지진과 일본 고베 지진시에 지진격리구조물이 좋은 거동을 보임에 따라 구조물의 지진격리방법은 종래의 강성증가 설계법과 상호보완적인 내진설계법으로서 확실하게 자리를 잡아가고 있다. 지진격리시스템은 신규 구조물의 내진설계뿐만 아니라 기존구조물의 내진성능향상에 널리 사용되고 있으며, 원자력시설, LNG탱크 등 고도의 안전성이 요구되는 구조물은 물론 고층 아파트를 비롯한 병원, 도서관 등의 대형 건물, 문화재, 교량 및 반도체 생산시설과 같은 주요 산업 시설 등에도 폭넓게 적용되고 있으며, 현재도 지진격리장치/제진장치에 대한 성능 개선 및 새로운 형태의 지진격리장치/제진장치 개발에 관한 연구투자가 활발하게 이루어지고 적용분야도 계속해 야 확대되고 있는 추세여서, 지진격리장치/제진장치의 세계 시장은 지속적으로 성장할 것으로 예상된다.