

교량받침을 사용한 교량의 내진설계 및 면진설계



전 규 식**

1. 서 론

금세기에 들어 강진에 대한 경험이 부족했던 우리나라는 70년대 후반 원자력발전소의 건설을 통하여 내진설계란 새로운 설계개념이 도입되기 전만 하더라도 토목/건축구조물의 설계에 있어서 풍하중을 제외한 지진력과 같은 수평력에 대한 고려는 전무하였다고 할 수 있다. 그러다가 급속한 경제발전과 더불어 교량구조물에도 내진설계의 필요성이 인식되어 1992년 12월에 개정된 도로교표준시방서에서 교량의 내진설계개념이 도입되고 최근에는 내진규정이 상당히 강화되고 있는 추세에 있다.

길이방향으로 장대한 형상을 갖는 교량구조물에 있어서 지진하중을 고려하느냐, 고려하지 않느냐에 따른 설계의 중요한 차이점은 건축물과는 달리 온도신축에 대한 고려이다. 즉, 지진하중이 지배적인 하중조건이 아닌 교량구조물은 교량상판의 온도변화에 따른 거대한 온도하중을 하부구

조로 전달하지 않기 위하여, 교량상판과 하부구조 사이에 가동단 및 고정단이라는 교량받침을 배치하고 온도에 의한 교량상판의 신축이 고정단을 중심으로 가동단에서 원활히 수용하도록 설계하여 왔다.

그러나 지진하중을 고려하는 경우에는 평상시 온도신축에 대한 중심점으로서의 역할을 수행하던 고정단에 모든 수평하중이 집중하게 되어, 소수의 고정단 교각이 모든 지진하중을 수용하기 어려운 문제에 봉착하게 된다. 그러므로 소수의 고정단 교각에 모든 지진하중을 집중하게 할 것이 아니라, 온도하중을 구속하지 않으면서도 모든 교각에 지진하중을 배분하게 하는 효과적인 방법을 고안하게 되었다.

여기서 효과적인 설계방법이란 지금까지 관측된 여러 종류의 지진파에 포함된 주기특성을 이용하여 지진파와 구조물과의 공진현상을 방지하여 구조물의 질량에 대한 관성력으로 표현되는 지진력의 크기를 줄여주고, 각 교각에 지진력을

* 유니온산업주식회사 기술개발부장, 공학박사

배분하여 줄으로서 안전성과 경제성을 동시에 만족하는 교량구조물의 설계방법을 의미한다.

지진이러는 지반의 움직임에 대하여 구조물의 내진설계를 함에 있어서 지진파의 특성을 정확히 파악하지 못한 1950년대까지는 단지 구조물을 튼튼히 설계하여 지진에 대비하였으나, 지진파에는 단주기 성분보다 장주기 성분은 상대적으로 에너지가 적게 내포하고 있다는 사실을 알고 난 1960년대부터는, 구조물을 부드럽게 설계하여 고유주기를 길게하는 면진설계법이 오히려 지진에 대하여 보다 안전한 설계법이라는 사실을 인지하기 시작하였다. 이와 같이 구조물을 부드럽게 설계하는 방법으로서, 초고층 건축물과 같이 높이를 높게하여 고유주기를 길게하는 방법이 있으나, 저층건축물 및 일반적인 교량구조물은 통상적인 설계하중을 유지하기 위한 주요부재의 최소단면적이 필요한 관계로 구조물의 고유주기를 임의로 길게할 수가 없다.

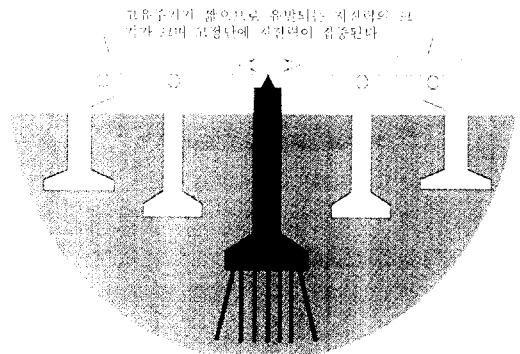
그러므로 구조물을 지지하는데 필요한 부재의 단면적을 유지한 상태에서 인위적으로 구조물의 고유주기를 길게하기 위한 방법으로서 1970년대 후반부터는 고무와 철판을 적층으로 구성하여 수평강성은 적으나, 수직강성은 강한 면진설계법의 개념에서 이상적인 적층고무받침이 개발되어 건축/토목구조물에 적용되기 시작했다.

그러나 국내에서는 적층고무받침이 소개되기 시작할 1980년대 초반에는 소성체인 고무원료에 탄성력을 부여하는 가황처리기술의 미숙 및 고무와 철판의 접착불량에 따른 품질의 불신으로 한동안 사용이 금지되었다가 1980년대 후반부터 교량지지용 탄성받침에 대한 KS F4420 (1987년)이 제정되어 신뢰도가 향상된 관계로 국내에서도 교량받침용으로 널리 사용되고 있으므로, 탄성받침에 대한 기술적인 내용을 기술하여 토목 기술자들의 이해를 돕고자 한다.

2. 내력설계와 면진설계의 개념

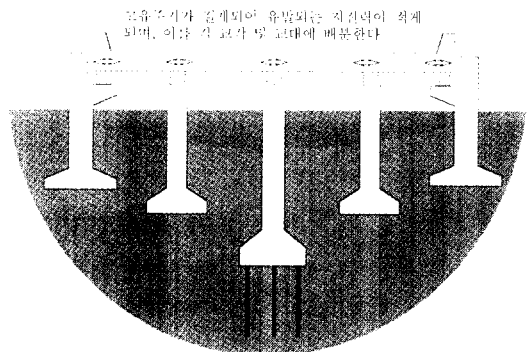
내력설계와 면진설계란 구조물을 지진에 대비하여 안전하게 건설하고자 하는 보다 높은 차원

의 내진설계 개념에서는 동일하다. 단지, 지진파에 내포하고 있는 지진에너지를 주기특성별로 분류하여, 지진력의 크기를 증가하는 구조물의 저항능력으로 안전을 도모할 것인가, 지진력의 주기특성을 이용하여 지진력의 강한 주기대역으로부터 구조물의 고유주기를 벗어나게 하여 공진현상을 피하게 할 것인가의 차이에 불과하다. 지금까지 관측된 다양한 지진파의 주기성분을 조사한 결과, 지진파에는 단주기성분의 에너지는 많이 포함되어 있으나 장주기성분의 에너지는 많이 포함되어 있지 않다는 특징을 알게 되었다. 즉 면진설계의 개념이란 지진파에는 장주기성분을 많이 내포하고 있지 않다는 주기특성을 이용하여 구조물의 고유주기를 길게함으로써 지진력의 유발을 적게하는 것이며, 지진다발지역에서 초고층



내진설계의 적용시 기초재질의 강기로 하부공사에 증가

그림 1 내진설계의 개념



면진설계의 적용시 기초재질의 강도로 하부공사에 절감

그림 2 면진설계의 개념

건물의 건설 및 고무계열의 탄성받침을 사용한 구조물이 이러한 면진설계의 개념을 도입한 설계에 해당한다.

이와는 반대로 단주기영역에서 유발되는 큰 지진력에 대하여 부재를 튼튼히 설계하여 구조물의 강도로서 지진력에 대항하고자 하는 것이 내력설계의 개념이며, 다점고정방식(多点固定方式)의 교량구조물 및 원자력발전소의 경우가 이에 해당한다. 이와 같이 내력설계 및 면진설계의 개념은 구조물의 설계에 있어서 지진파의 주기특성을 이용하느냐, 하지 않느냐의 여부에 따라 우리들이 편의적으로 분류하는데 불과하다.

3. 내진장치를 사용한 내력설계

상부구조인 교량상판과 하부구조인 교대 및 교각을 가동단과 고정단의 형식으로 연결하는 교량받침의 형식으로서, 지반운동에 의한 지진력의 발생을 고정단 교각에서 전부 부담해야 하므로 고정단 교각에서의 단면이 증가하고, 교각의 회전모멘트에 저항하기 위해서는 기초 지반에서의 보강이 절대적으로 필요하므로 기존방식의 내력설계에서는 하부공사비의 증가가 필연적이다.

또한 고정단 교각에서 상부구조와 하부구조를 연결하는 교량받침이 교량상판의 관성력인 수평력을 교각에 전달되도록 완전히 고정되지 못한 경우에는

교각의 단면에 지진하중을 견딜 수 있는 여력이 있음에도 불구하고 교량상판의 어긋남 및 낙교의 위험성을 내포하는 불합리한 점이 발생한다.

이러한 내력설계의 방법이 어떤 의미에서는 고정단 교각에 모든 지진하중을 집중하게 함으로서 오히려 경제적인지 모른다는 착각을 할 수 있으나, 실제의 설계에서는 강성의 비대칭성으로 인하여 구조물에 회전모멘트를 유발할 가능성이 있으며, 설계지진력에 대하여 부분적인 손상을 입더라도 완전한 붕괴는 예방하여 인명의 손상을 막는다는 내진설계의 기본개념을 위반할 가능성이 높으므로, 가동단 교각에도 고정단 교각과 동일한 단면 및 하부구조를 갖도록 설계하게 되는 경우가 많다.

그러므로 온도하중과 지진하중이 작용하는 시간적인 차이를 이용하여 평상시에는 모든 교각이 가동단으로 지진시에는 고정단 역할을 수행하는 다점고정방식을 채용하는 것이 효과적인 방법이 될 수 있다. 즉, 운전자의 통상적인 움직임은 방해하지 않으면서 차량의 충돌시에는 운전자를 운전석에 고정시킴으로서 운전자를 보호하는 자동차의 안전벨트와 같은 개념을 갖는 충격전달장치 또는 충격흡수장치를 교량상판과 교각사이에 체결하여 온도변화에 의한 변위는 쉽게 수용하면서 바람이나 지진하중과 같은 순간적인 하중에 대해서는 잠금장치로 작동하여 교량상판에 유발된 지

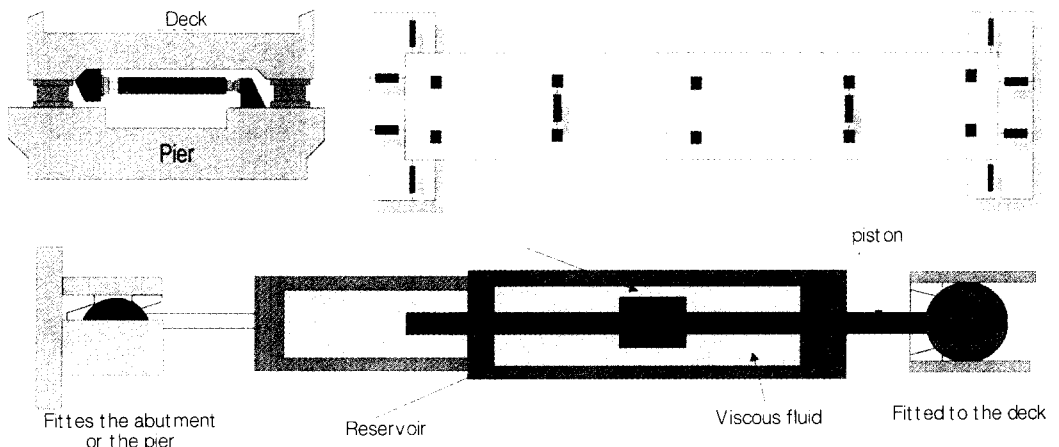


그림 3 충격전달장치 또는 점성댐퍼의 개념도

진력을 각 교각에 배분하는 하중분산의 효과가 있는 내진장치를 사용하는 방법이다.

충격흡수장치는 그림 3과 같이 실린더 내부에 반고체상의 액체를 충전하고 돌기부를 갖는 피스톤의 왕복운동으로 하중을 흡수 또는 전달하는 자동차의 안전벨트와 같은 기능을 갖고 있는 내진장치의 일종이다. 돌기부의 크기를 적게 하여 피스톤과 실린더 사이의 틈새가 크다면 실린더의 내부에 충전된 액체의 점성이 적은 경우에는 액체의 적은 저항력으로 피스톤이 왕복운동을 하며, 돌기부의 틈새가 적다면 액체의 점성이 강하면 강할수록 큰 저항력으로 왕복운동을 하게 된다.

기능적인 측면에서 고점도의 점성체는 작용하는 충격하중을 크게 전달하기 때문에 교각에 전달되는 하중의 측면에서는 불리하나 누수의 위험성이 적으며, 저점도의 점성체는 피스톤의 유격으로 충격하중이 작용하는데 필요한 시간적인 지연현상 및 반복하중에 의한 감쇠효과로 교각에 전달되는 최대하중의 크기가 줄어드는 장점이 있는 반면에 누수의 위험성을 갖고 있다.

최근에는 내구성의 향상을 위하여 실린더와 피스톤 사이에는 마모에는 강하면서 마찰저항이 적은 특수한 재질을 사용하나, 장기간에 걸친 마모로 인하여 실린더 내부에 충전된 점성체의 누수현상이 발생할 경우에는 성능이 저하될 가능성이 있다. 그러나 최근에는 충전되는 점성체의 특성을 저속에서는 점도가 낮으며 고속에서는 점도가 높은 특수한 재질인 실리콘 계열을 사용함으로써 누수현상에 대한 염려가 없으며 감쇠의 효과가 큰 재질이 개발되고 있다.

이와 같이 하중배분을 도모하는 내진장치와 다음절에서 설명하는 탄성받침을 사용하여 고유주기를 길게 하는 면진장치는 모든 교각에 수평하중을 배분하는 측면에서는 동일한 기능을 수행한다. 그러나 각 교각에 잠금장치로 작동하는 내진장치는 모든 교각이 강성으로 작용하기 때문에 고유주기가 짧게 되어 큰 지진력이 유발되나, 면진장치는 고유주기를 길게 하여 적게 유발된 지진력을 각 교각에 균등 배분함으로써 하중의 측면

에서는 면진장치가 유리하며, 변위의 측면에서는 내진장치가 유리하다.

또한 일반적으로 교량구조물이 건설되는 하상구조가 육지부에서는 낮고 교량의 중앙부에서는 깊은 형상적인 특징으로 인하여 모든 교각이 동일한 전단력을 받지 않고 대부분의 수평력을 짚은 교각이 받게 되는 현상을 나타낼 수 있으므로, 내진장치가 적용되는 교량에 있어서는 각 교각의 높이에 따라 내진장치의 이동유격을 적절히 조절하여 각 교각이 적절한 전단력을 받을 수 있도록 하는 배려가 필요하다.

4. 면진장치를 사용한 면진설계

교각의 높이가 그다지 높지 않은 일반적인 교량구조물의 경우, 상부하중을 지탱할 수 있는 정도의 교각의 단면으로서는 교량구조물의 고유주기를 지진에너지가 강한 주기대역을 벗어나게 할 수는 없으므로(일반적인 교량구조물의 교축직각방향 고유주기는 0.3초~0.6초 정도임), 고무와 같은 수평강성이 약한 재료를 사용하여 교량구조물의 고유주기를 인위적으로 길게 하여 지진파의 강한 주기대역을 벗어나게 하는 방법을 생각할 수 있다.

그러나 순수한 고무받침만으로는 교량구조물과 같이 큰 사하중에 대하여 좌굴현상을 나타내므로 고무와 고무사이에 보강용 강판을 수평으로 설치하여 수직하중에 대하여는 안정적으로 견디면서 수평하중에 대해서는 고무의 유연성을 유지하여 상부구조물의 고유주기를 인위적으로 길게 하는 탄성받침이 고무재질의 발달과 더불어 실용화되게 되었다. 그러나, 연약한 갈대는 바람에 부러지지는 않으나 바람에 흔들리기 쉬운 특징이 있는 것과 마찬가지로 교량상판의 하부에 수평방향으로 강성이 약한 탄성받침을 설치하면 바람하중이나 차량의 제동하중에 의해 교량상판이 흔들리는 단점이 발생할 수 있다.

그러므로 물체의 속도에 비례하여 저항력이 크게 되는 점성댐퍼나 재료의 비선형거동으로 인하여 진동 에너지를 흡수하여 진동변위를 억제하게

하는 특별한 장치의 필요성이 요구되며, 이러한 진동에너지를 흡수하는 한 방법으로 탄성고무 내부에 코아(core)의 형태로 납을 삽입하여 탄성고무에 의해 구조물의 고유주기를 늘여주는 기능과 납의 비선형기동으로 진동에너지를 흡수하는 기능을 갖춘 납면진받침(L.R.B)이 개발되어 있으며, 다음 절에서 상세히 논하기로 한다.

4.1 탄성받침(Laminated Rubber Bearing)

고무는 고분자화합물(고분자재료 : 약 10만개 이상)로서 기본적인 화학구조는 한 개의 분자가 고리로 연결된 형상(鎖狀)으로 뒤엉켜있는 구조를 갖고 있다. 이러한 고무분자에 탄력구조를 갖기 위하여 고무원료에 유황, 카본, 연화제, 노화방지제 등을 혼합하여 고온·고압으로 가열하면 유황분자가 고무분자에 영구적인 가교(架橋)를 형성하여 고무제품은 탄력성을 갖게된다.

고무제품의 품질을 결정하는 가장 중요한 요소는 사용되는 고무원료의 품질에 우선하여 사용된 혼화제에 따라 가장 적합한 가열온도, 가열시간 및 압력과 같은 가황처리절차에 의해 결정되며, 이러한 최적의 조건을 구하기 위하여 네오메타(Rehometer)라고 하는 측정기기를 사용한다. 즉 고무제품은 붕어빵의 제조공정과 같이, 고열을 일시적으로 가하면 결단 타고 속은 익지 않으며, 저열에 장시간 방치하면 설익는 것처럼, 가황처리절차가 고무제품의 품질을 결정하는 가장 중요한 요인이 된다. 그러나 고무제품은 강도의 증진을 위하여 카본이 필수적으로 함유되어 외관상의 색깔이 검은 관계로 소비자가 육안으로 제품의 품질을 확인할 수 없는 한계점이 있으며, 국내에 탄성받침이 도입된 1980년대 초반에 토목기술자들에게 제품의 불신을 받은 이유도 가황처리의 미숙에 있었다.

고무분자는 형상적으로는 고체이면서도 다른 고체분자와의 차이점은 유체분자와 유사한 특징을 갖고 있다는 점이다. 고무는 상당히 긴 쇠상형(鎖狀形)의 분자가 뱀이 파리를 틀고 있듯이 복잡하게 엉켜 있어 분자전체로서의 이동 및 회전

이 발생하지 않는 관계로 액체와 같은 유동성은 없으나, 각개의 분자는 그림 4와 같이 열운동에 의해 결합점 간에 회전하는 마이크로브라운 운동으로 인하여 액체분자의 운동형태를 나타낸다.

탄성받침은 이러한 성질을 갖는 고무와 고무 사이에 보강용 강판을 층상형태로 설치하여 수직하중에 대해서는 고무의 좌굴현상을 방지하여 큰 강성을 유지하며, 수평방향으로는 고무의 유연성을 그대로 유지하는 면진설계용 교량받침의 일종이다.

국내에서 생산되는 탄성받침의 대부분은 유지보수의 편리성을 위하여 상·하판 철판과 고무받침이 분리되어 있으므로 수평방향의 움직임에 대한 고무와 철판의 미끄러짐을 방지하기 위하여, 상/하부철판에 돌기형 췌기를 설치하여 바람하중이나 차량의 제동하중과 같은 일상적인 하중에 대해서는 상/하부판에 용접으로 맞물린 췌기의 전단력으로 지지하고, 바람하중을 능가하는 지진하중시에는 췌기가 부러지면서 상부구조물의 고

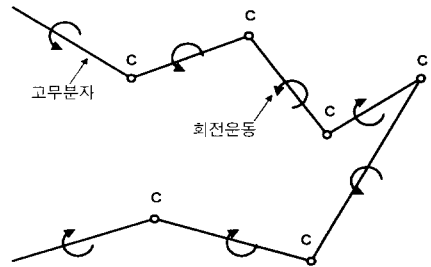


그림 4 고무분자의 마이크로브라운 운동

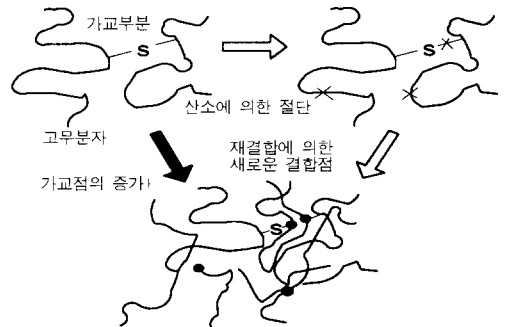


그림 5 고무분자의 산화에 의한 영향

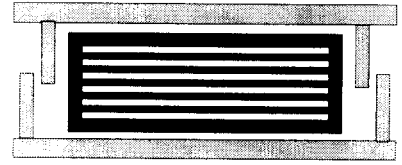
유주기를 길게하여 유발되는 지진력의 크기를 줄이는 메커니즘을 갖고 있다.

현재 우리나라에서 널리 사용되는 탄성받침은 고무받침의 기본적인 기능을 충족하기 위해서는 고정단 및 가동단으로 구성할 필요성은 없으나, 강재받침에서 요구되는 가동단 및 고정단의 기능을 답습하려는 기술자들의 고정관념과 가황처리된 적층고무와 상/하철판을 부착하는 제조상의 기술적인 문제가 장애요인으로 작용한 것으로 판단된다. 그리고 평면적인 형상은 모든 움직임에 대하여 방향성이 없는 원형으로 사용하는 것이 바람직하나, 상부구조 및 하부구조의 형상에 따라 사각형으로 제작되는 경우도 많다.

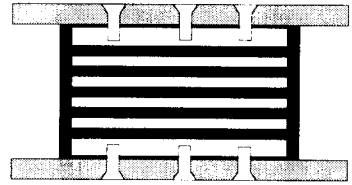
특히 우리나라의 경우에는 교량지지용 탄성받침에 대한 한국표준규격 (KS F 4420, 1987년)이 제정될 당시에 "탄성받침의 모양은 직육면체로서..."라는 항목이 있었으며, 고무의 성형을 위한 금속몰드의 제작도 사각형이 편리한 제조상의 이유 및 탄성받침에 대한 표준도가 PC-BEAM의 형상에 적합한 사각형이 정의되어 있는 관계로 탄성받침의 형상은 사각형이라는 인식이 토목기술자들에게 각인되어 있다.

또한 고무에 대한 내구성이 신뢰받지 못한 초기단계에서 탄성받침의 교체를 용이하게 하기 위한 관습이 아직도 상존하여, 현재 국내에서 생산되는 대부분의 탄성받침은 탄성받침과 상·하부철판이 분리되어 제작되고 있다.

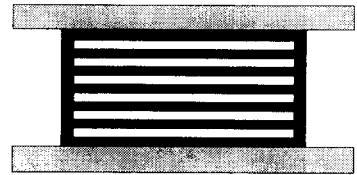
앞으로는 탄성받침의 내구성이 교량의 수명기간 이상의 신뢰성을 갖게 되었고, 유지보수를 위한 교체보다는 기능적인 측면을 증시하여 상·하부철판을 탄성받침과 일체로 제작된 일체형 탄성받침의 사용이 증가할 것으로 기대된다. 일체식으로 제조하는 제조공법상에 있어서, 탄성받침의 제작시에 연결용 강판을 삽입하여 제작하고 상·하부철판을 연결용 강판과 볼트로 체결하는 볼트식 체결방법과, 탄성받침과 상·하부철판을 고무로 접착하는 일체식 접착방법이 있다. 일체식 접착방법은 가황처리된 탄성받침을 다시 한번 가황처리해야 하는 고도의 기술이 요구되며, 납면진받침(L.R.B)과 같이 고품질의 탄성받침에서



(a) 고무와 상하철판의 분리형



(b) 볼트식 일체형



(c) 접착식 일체형

그림 6 탄성받침의 구조

주로 사용되는 접착방법으로서 연결용 강판의 두께만큼 받침의 높이가 적어지는 이점이 있다.

탄성받침의 설계에 있어서 가장 중요한 요소는 고무의 전단탄성계수 G , 경도보정계수 x 와 같은 고무의 재료정수 및 적층고무의 형상을 결정하는 고무직경 D , 고무 한층의 두께 t_k , 그리고 사용되는 고무층수 n 이다. 특히 사용되는 고무 한층의 형상에 따라 결정되는 형상계수는 1차형상계수 및 2차형상계수로 나눌 수 있으며, 1차형상계수 S_1 은 고무 한층의 구속면적과 자유표면적(측면적)의 비로서 정의되며, 2차형상계수 S_2 는 탄성받침의 직경과 고무층의 총두께 비로 정의된다. S_1 은 주로 수직강성, 회전강성에 관계하는 파라미터이며, S_1 이 크면 클수록 직경에 대한 고무 한층의 두께가 얇게 되고 수직강성 및 회전강성이 크게 된다. 또한 S_2 는 재하능력 및 수평강성에 관계하는 파라미터로서 S_2 가 크면 클수록 탄성받침은 평편하게 되고 좌굴에 대한 저항력이 크게 된다.

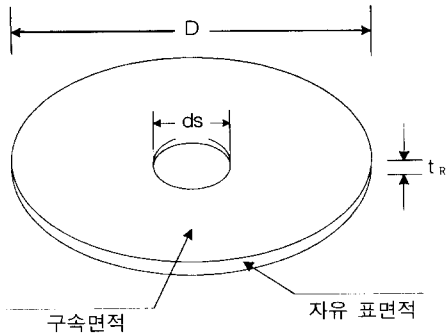


그림 7 고무 한층의 형상

$$\text{수평강성} : K_H = \frac{A \cdot G}{n \cdot t_r} \quad (1)$$

$$\text{수직강성} : K_V = \frac{A \cdot E_c}{n \cdot t_r} \quad (2)$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E_{ab}} + \frac{1}{E_b}, \quad E_c = \frac{E_{ab} \cdot E_b}{E_{ab} + E_b}$$

$$E_{ab} = E_0(1 + 2xS_1^2) \quad (3)$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D^2 / 4}{\pi \cdot D \cdot t_r} = \frac{D}{4 \cdot t_r}$$

또는

$$S_1 = \frac{\pi(D^2 - d_s^2) / 4}{\pi(D + d_s)t_r} = \frac{D - d_s}{4 \cdot t_r}, \quad S_2 = \frac{D}{n \cdot t_r}$$

여기서, A : 고무 한층의 지압면적 G : 고무의 전단탄성계수 E_c : 고무의 수직탄성계수 E_{ab} : 겹보기 수직탄성계수 E_b : 고무의 체적탄성계수 E₀ : 고무의 탄성계수 x : 경도보정계수 D : 고무의 외경(강판외경) d_s : 고무의 내경(강판내경) t_r : 고무 한층의 두께 n : 고무 층수 S₁ : 1차형상계수 S₂ : 2차형상계수

4.2 고무의 내구성

일상적으로 우리들이 사용하고 있는 양말 및 의류에 사용되고 있는 고무제품은 쉽게 열화되는 현상을 경험적으로 인지하고 있는 관계로, 탄성 받침과 같은 고무제품을 교량구조물과 같이 장기

간 사용되는 구조물에 적용하기 위해서는 고무의 내구성에 대한 불안감이 있으나, 탄성받침의 구조형식이 그 해답을 갖고 있다. 탄성받침에 사용되는 재료는 고무와 보강철판이며 보강철판은 고무로 보호되어 있으므로 탄성받침의 내구성이란 결국 고무의 경년변화(經年變化)를 의미한다.

고무재료는 유기물임으로 기본적으로 사용년수에 따라 점차 변화하나, 이러한 변화의 형태는 외부에서의 자극(빛, 열, 외력)에 기인하는 기계적인 요인과 내부적인 자극(포리마, 충전재, 가교변태)에 의한 화학적인 변화로 분류된다. 탄성 받침은 빛이나 열과 같은 영향이 적은 환경에서 사용되는 관계로 특히 주의해야 하는 요인으로서 는 주로 고무의 산화반응과 크라이프 특성이다. 즉, 그림 5와 같이 고무분자가 유황분자를 통하여 결합하고 있는 가교점을 산소가 결합하여 결합점을 절단하고, 또한 다른 포리마와 결합하는 관계로 망목구조(網目構造)가 증대하여 고무분자의 움직임을 제한하여 경화하는 메커니즘을 갖는다. 고무의 경년열화를 지배하는 산화현상에 대하여 탄성받침은 얇은 고무와 철판이 적층형태로 구성되어 산소가 고무 내부에 침투할 수 있는 부분은 극히 미미한 표면적에 불과하므로, 표면에서는 미미한 산화열화가 발생하나 내부고무는 건전한 상태를 유지한다.

지금까지 전세계적으로 장기간 사용된 대형 고무받침의 열화상태에 관해 조사한 대표적인 예로서 100년 전에 오스트레일리아의 멜본 철도교에서 방진용으로 사용된 천연고무를 수거하여 조사한 결과, 표면에서 5mm 정도까지는 오존 및 산소에 의한 산화열화로 균열이 발생하였으나, 내부는 거의 변화하지 않았다는 사실이 확인되었다. 또한 이러한 오존에 의한 산화현상은 고무가 인장된 상태에서는 급속히 진행하나, 고무를 압축한 상태에서는 거의 진행되지 않는 특성을 갖고 있으며, 특히 천연고무는 합성고무에 비하여 산화하는 성질이 강함으로 탄성받침은 합성고무를 사용하거나 내구성이 강한 피복고무로 5~10mm 정도를 피복하여 사용하고 있다. 이와 같이 탄성 받침이 내구성이 요구되는 구조물의 받침으로 사

용되는 이유는 사하중에 의해 항상 압축력을 받고 있는 상태에서 사용되므로 산화의 진행이 늦고, 또한 산화현상은 항상 표면에서 진행되므로 고무줄과는 달리 평면적으로 큰 크기를 갖는 탄성받침은 표면에서 일부분이 산화되더라도 구조물을 지지하는 충분한 단면적이 확보되기 때문이며, 최근 화학공업의 발달에 비추어 보면 적어도 60년간 이상의 내구성은 보장되고 있다.

4.3 탄성받침의 최대압축응력

고무라는 재질은 부드러운 물질이므로 고무를 원료로 사용하여 제작된 탄성받침은 압축응력에 대하여 취약할 것이라는 일반적인 인식을 개선하기 위하여 "일본 건축학회 학술강연회(1991.9)"에서 발표된 『적층고무받침의 한계내력에 관한 실험연구』의 결과를 소개한다.

본 실험은 천연고무 적층받침의 한계압축내력을 확인하기 위해 수직하중 8,000톤의 압축시험기를 사용하여 동적압축 파괴시험을 수행했다. 시험체는 직경 500mm의 탄성받침으로, 보강철판은 두께 3.2mm의 냉간압연재로 중심부에 20mm의 구멍을 갖고 있다. 시험은 단순압축시험 및 140mm의 전단변형을 가한 상태에서 압축시험을 수행하였으며, 시험에서 구한 하중-변위와의 관계를 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 알 수 있는 것처럼 시험체는 압축응력 1,200kg/cm² (압축하중 2,400톤)에서 항복하였으며, 압축응력 1,500kg/cm² (압축하중 3,000톤)에서 파단하였다. 또한 전단변형 140mm를 가한 실험에서는 파단시의 내력이 약간 저하하였으나, 단순압축 재하시험의 경우와 거의 비슷한 경향을 나타내고 있다. 일본에서는 이러한 논문이 발표됨에 따라 '천연고무와 같이 부드러운 재질을 사용한 적층고무로 무거운 중량물을 지지할 수 있을 것인가?'에 대한 불안감이 해소되었다고 한다.

4.4 납면진받침(Lead Rubber Bearing)

교량받침으로서 우수한 기능을 갖고 있는 탄성받침의 가장 큰 단점은 수평하중에 대하여 변위

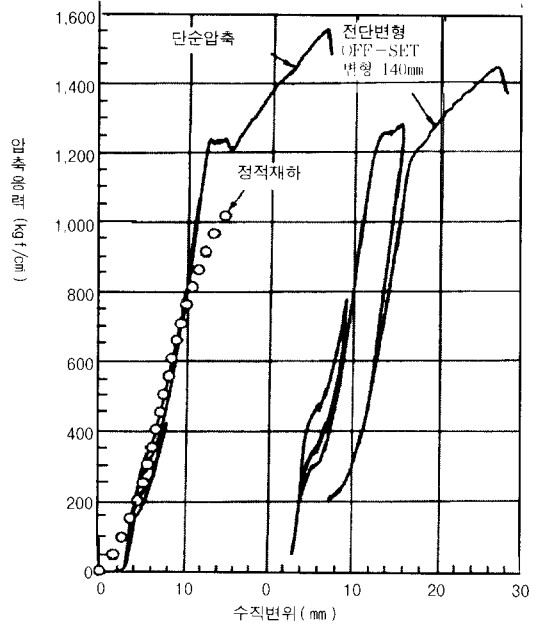
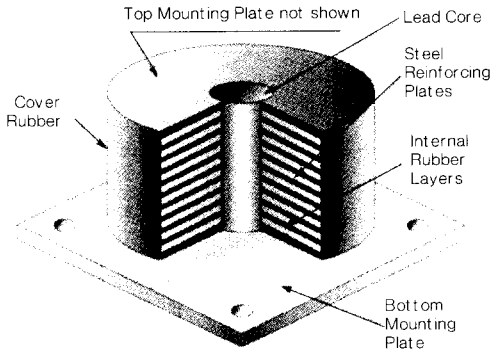


그림 8 최대 압축파괴 시험

가 크게 발생하는 점이며, 이러한 변위를 제어할 수 있는 방법으로서는 속도에 비례한 점성댐퍼를 사용하거나 금속체의 비선형거동을 이용하여 진동에너지를 흡수하는 방법을 널리 사용하고 있다.

납면진받침(Lead Rubber Bearing)은 탄성받침과 동일하게 상부구조물의 고유주기를 길게하여 상부구조에 유발되는 지진력의 크기를 줄이고자 하는 면진받침의 일종으로, 에너지 흡수기구로서 탄성받침의 내부에 코아형태의 납을 삽입하여 금속의 비선형성을 이용한 댐퍼의 특성과 고유주기의 장주화를 한개의 장치로 간략화한 것이 특징이다(그림 9 참조).

교량의 내진장치로서 납면진받침의 적용은 교량상판의 신축에 대하여 납의 전단저항력으로 교량상판에 무리한 온도하중을 전달할지도 모른다는 의문이 납면진받침의 사용에 걸림돌이 되어왔다. 그러나 수평하중에 대한 납의 재료적인 특성은 그림 11에서와 같이 온도하중과 같이 장기간에 걸쳐 서서히 작용하는 형태의 하중에 대해서는 납의 크리이프 특성에 의하여 쉽게 항복하는 성질이 있으므로 교량상판의 온도하중을 교각에



특허 : U.S.A Patent Nos. 4,117,637,
4,449,664 and 4,593,502

그림 9 납면진받침의 기본형상

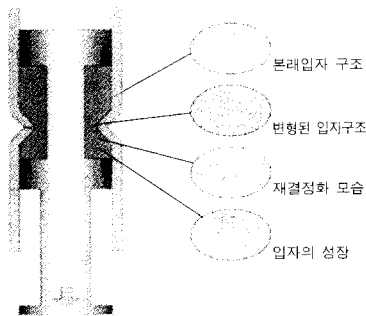


그림 10 납분자의 재결정화 과정

적게 전달하며(수직하중의 5% 미만), 바람하중이나 차량의 제동하중과 같이 단기간에 작용하는 하중에 대해서는 큰 강성으로 저항함으로써 변위를 억제하는 효과가 있다. 그리고 지진하중과 같이 바람하중을 능가하는 하중에 대해서는 납이 완전히 항복하여 고무의 탄성주기에 의하여 지진력의 유발을 줄이면서 교량상판의 진동에너지를 납의 비선형거동으로 흡수하여 교량상판의 진동을 억제하는 기능을 갖는다.

모든 내진장치에 요구되는 중요한 기능 중의 하나는 지진 종료후 유지보수의 측면이다. 즉, 지진의 종료시점은 교량상판의 진동이 교각의 중심부에 위치했을 때 반드시 종료되지는 않으므로, 강재받침과 같은 형식의 교량받침은 지진 종료후에 교각의 붕괴나 낙교의 현상이 발생하지 않았더라도 교량의 기능적인 회복을 위하여 교량상판을 원위치로 되돌려 놓고 교량받침을 보수해야 하며, 탄성받침의 경우에는 부러진 썬기를 재용접해야 하는 사후처리가 필요하다.

이에 비하여 납면진받침과 같은 면진장치를 적용한 교량은 교량상판이 교각의 중심부와 어긋난 위치에서 지진이 종료되더라도 고무의 탄성력으로 교량상판을 원위치로 되돌려 놓으려는 힘이 작용하며, 지진 도중에는 납의 변형과 반대방향

납면진받침(L.R.B)의 거동특성

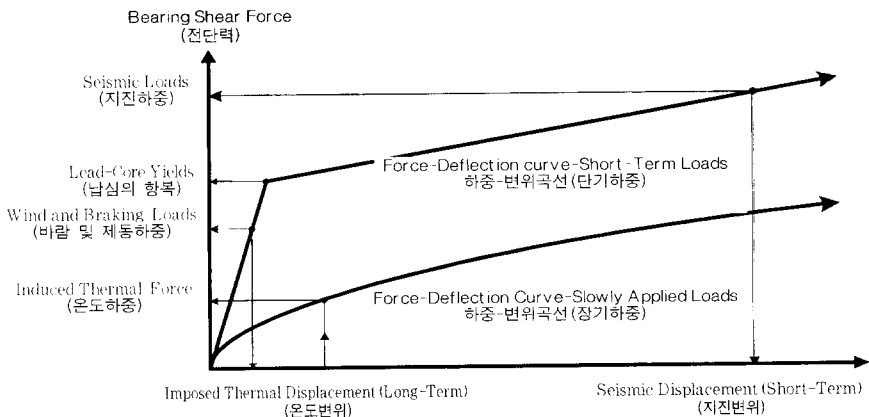


그림 11 납면진받침의 거동특성

으로 고무의 복원력이 작용하고 있으므로 잔류변위를 적게하는 특징이 있다.

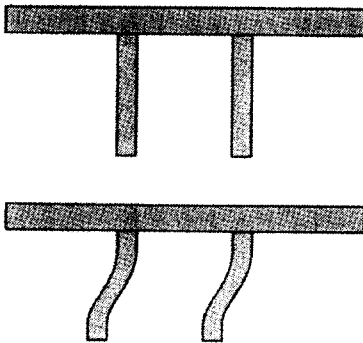
그 다음으로 중요시되는 사항은 면진장치의 재사용의 문제이다. 금속의 비선형성을 이용하여 에너지를 흡수하는 금속댐퍼는 과도한 비선형거동으로 금속분자가 소성변형을 경험하면서 부분적으로는 분자구조가 파괴됨으로 원래의 특성을 잃게 되는 단점이 있으며, 고무의 내부에 장착된 납은 손상여부를 확인할 수 없으므로 교체해야 한다는 의문이 발생한다. 그러나 모든 금속은 변형된 금속분자에 열을 가함으로서 원래의 분자구조로 되돌아 가려는 특성을 갖고 있으며, 변형된 분자의 50%가 1시간 이내에 원래의 분자구조로 되돌아 가는 온도를 금속의 재결정온도라 칭한다

(그림 10 납분자의 재결정과정 참조). 이러한 금속별의 재결정온도는 표 1과 같이 철은 450℃, 동은 200℃, 알루미늄은 150℃, 납은 20℃이다. 교량상판의 진동에너지를 흡수하여 뜨거워진 납은 상온으로 냉각되면서 원래의 분자구조로 되돌아가는 성질이 있으므로 지진종료에 따른 사후처리의 필요가 없다.

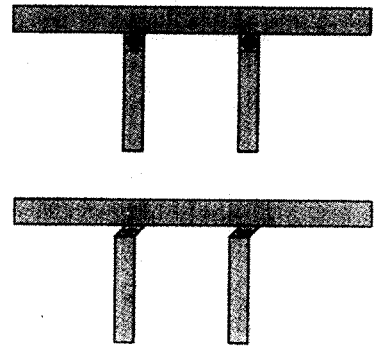
또한 설계상의 문제로서 교량의 하부구조가 설치되는 자연적인 지반구조는 각 교각을 지지하는 하부지반이 동일한 지지능력을 갖고 있지 못하

표 1 금속의 재결정 온도

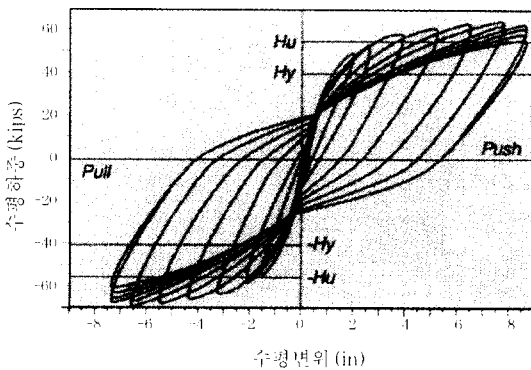
금속명	철	동	알루미늄	납
재결정온도	450℃	200℃	150℃	20℃



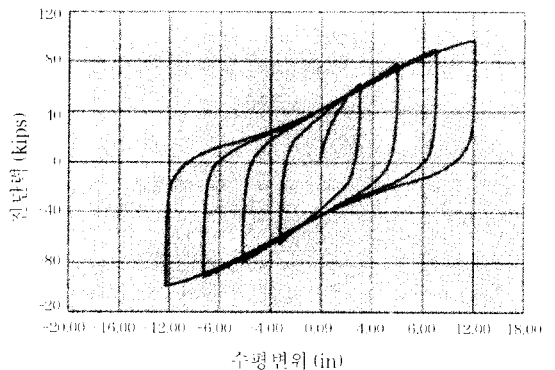
(a) 교각의 소성변형으로 부분적인 파괴 허용



(b) L.R.B의 소성변형으로 교각은 탄성거동



(c) 콘크리트 교각



(d) L.R.B

그림 12 교각의 소성거동 및 납면진받침의 소성거동

며, 부분적으로 매우 취약한 지조조건을 갖고 있는 경우에는, 납의 크기를 조절함으로써 특정한 교각에 지진하중을 적게 전달하게 하는 하중조절기능(force control system)이 가능하다.

5. 교량의 내진여유도 및 사회적 기능

구조물의 내진설계를 위하여 어떤 국가에서 적용되는 설계지진력의 크기란, 지진학적인 측면에서 발생 가능한 최대크기의 지진만으로 결정되는 것이 아니라, 지진학적인 측면 이외에도 자국의 경제력을 고려하여 사회적으로 국민의 공감대에 의해 결정된 지진이라 할 수 있다. 우리나라 도로교 표준시방서에서 적용하고 있는 최대가속도 0.14g의 지진이란 대체적으로 교량의 수명기간인 50년 동안에 초과하지 않을 확률이 80%~95%로 정의된 것으로 교량의 수명기간 동안에 이를 능가하는 지진이 결코 발생하지 않는다는 가정에서 출발하고 있지는 않다. 그러므로 설계지진력을 능가하는 지진의 발생은 언제나 가능한 것이며, 설계지진의 발생시 교량의 부분적인 피해는 허용하나 전체적인 붕괴는 방지한다는 내진설계의 기본개념에서 본다면 설계지진력을 능가하는 지진에 대해서는 구조물의 전체적인 붕괴를 감수할 수밖에 없다.

관측된 최대지진가속도가 0.8g로 설계지진력을 능가한 일본의 고베지진(정식명칭 : 兵庫縣南部地震)에서 경험한 것처럼, 우리들이 아무리 내진설계를 한다고 하더라도 설계지진력을 능가하는 지진에 대해서는 어쩔 수 없는 한계점이 있다. 그러므로 면진장치를 적용한 면진교량은 교각의 소성변형을 내진설계에 비하여 적게 허용함으로써 설계지진력을 능가하는 지진에 대한 내진여유도가 그만큼 크다고 할 수 있다.

그림 12에서 알 수 있는 것처럼 일반적인 내진설계는 교각의 소성변형을 통하여 설계지진 이상의 지진에너지를 흡수함으로써 붕괴를 방지하는 개념이라면, 면진설계는 납의 소성거동을 통하여 지진에너지를 흡수하는 것이라고 할 수 있다. 즉 내진설계는 설계지진력 또는 설계지진력을 능가

하는 지진에 대해서 피해를 입은 교각을 전면적으로 보수하던지 교량을 재건설해야 하는데 반하여, 면진설계는 납의 소성변형을 통해 부분적으로 손상을 입은 납분자는 상온에서 재결정화 과정을 거쳐 재사용이 가능하며 교량상판은 고무의 탄성변형으로 원위치함으로써 지진을 경험하더라도 즉각적인 재사용이 가능하다.

1923년에 일본에서 발생한 관동대지진과 같은 지진피해의 경험에 의하면, 대부분의 지진피해란 구조물의 직접적인 붕괴에 의한 인명피해보다는 현대도시의 혈관이라 할 수 있는 수도권 및 가스관의 파열로 인한 화재에 의한 이차적인 피해가 대부분이며, 그 사후조치로서 화재진압, 식수 및 비상식량의 공급, 부상자의 수송 등과 같은 피해 복구활동으로 이차적인 지진피해의 확산을 줄이는 긴급조치가 무엇보다도 중요하다. 그러므로 국가의 대동맥이며 피해복구의 생명줄인 교량의 완전붕괴는 교량 자체의 피해가 중요한 것이 아니라, 지진피해의 확산을 방지하는 생명줄로서 기능을 수행하지 못함으로써 야기되는 이차적인 피해를 예방하는 비상통로로서의 사회적인 기능이 보다 중요하다. 이와 같이 교량의 사회학적 역할을 고려한다면 설계지진력을 능가하는 지진에 대한 내진여유도는 아무리 강조해도 지나치지 않으며, 납면진반침은 지금까지 개발된 교량반침 중에서 경제성과 안전성을 동시에 갖춘 교량반침이라 할 수 있다.

6. 맺음말

중국의 손자병법에는 [知彼知己 百戰不殆]라는 말이 있다. 이를 지진과 방재의 입장에서 보면, 적(敵)이란 지진이고, 방재(防災)는 지진이라는 적으로부터 인간의 생명과 재산을 지키는 것이 된다. 그러므로 지진관측으로부터 지진의 주기특성이나 가속도의 크기 등 지진동의 특성이라는 적을 알고, 이에 대비한 경험과 기술을 가지고 구조물을 적절하게 내진설계를 하면 인간의 생명과 재산을 지킬 수 있다. 내진설계의 궁극적인 목적은 지진으로 인한 재산이나 인명피해의

감소에 있으며, 만약 지진의 예측이 가능하다면 미리 대피하거나 이에 대비함으로써 최소한 인명의 피해를 막을 수 있다. 그러므로 지진의 피해를 막을 수 있는 가장 실용적인 방법은 지진이 발생할 장소나 시간을 예측하는데 있다. 자연현상이란 반드시 어떤 징후를 동반하고 있으나 인간이 이러한 현상을 감지하지 못하여 이에 대비하지 못하고 있는 실정이다. 현재 전세계적으로 지진이 발생할 가능성이 농후한 장소나 시기의 예측에 많은 힘을 쏟고 있으며 이에 대한 가능성도 충분히 있다. 향후 지진학적 측면에서의 지진에 대한 예측기술의 향상과 내진 공학적인 측면에서의 면진구조물 및 제진구조물이 더한층 발달하게 되면 어떠한 지진이 발생하더라도 절대 안

전하고 경제성을 갖는 구조물의 건설이 가능한 날이 올 것이라고 믿고 있다.

참 고 문 헌

1. 梅村 鬼, “耐震解析への道” 技報堂出版
2. 大崎順彦, “地震動のスヘクトル解析入門” 鹿島出版會
3. 日本免震構造協會, “免震積層고무入門”, OHM社出版局, 1997
4. 日本免震構造協會, “免震構造入門”, OHM社出版局, 1997
5. 교량 지지용 탄성받침 KS F 4420, 한국표준협회, 1998 