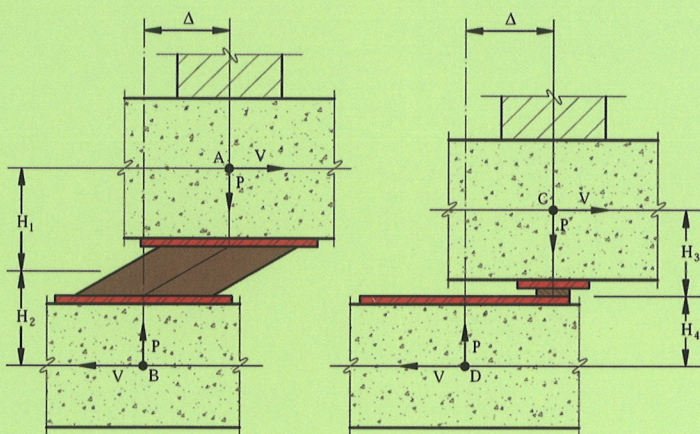
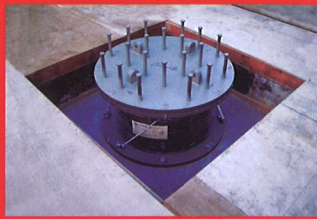
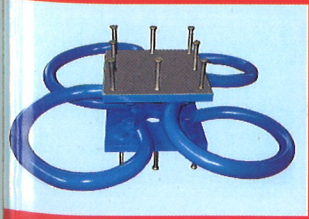
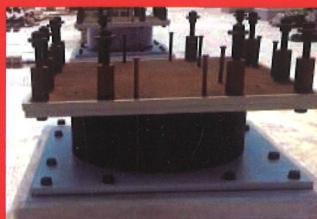
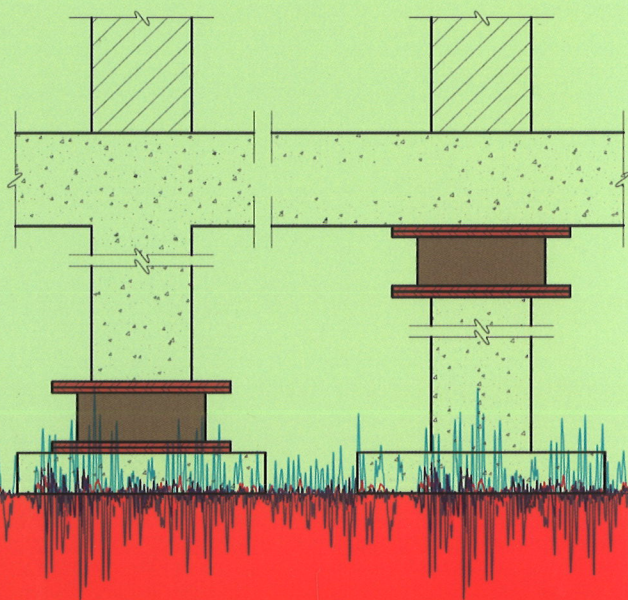
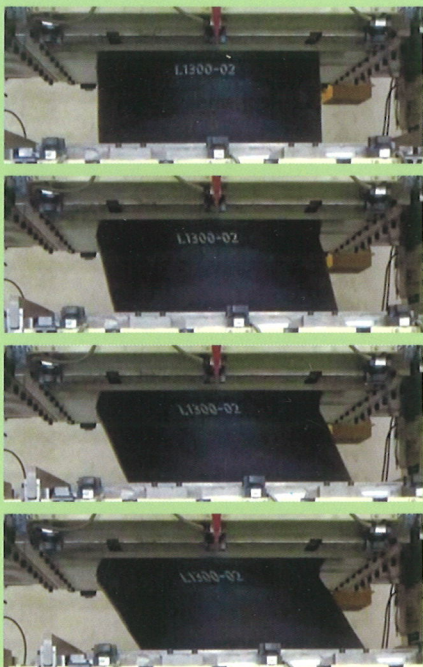


면진구조 설계기법 및 국내 적용사례



Sivic 사단법인 한국면진제진협회
Korea Society of Seismic Isolation and Vibration Control





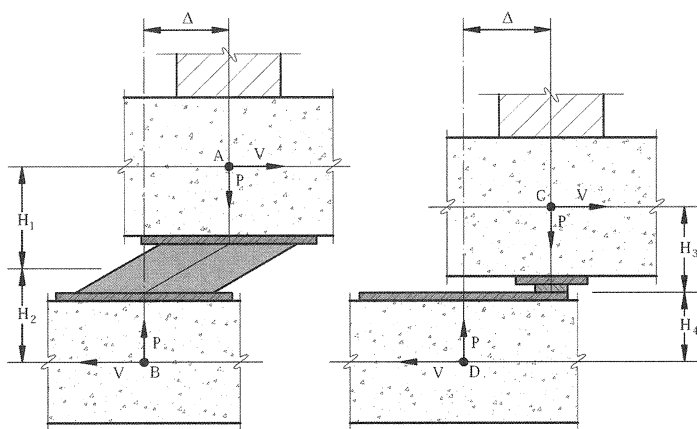
9 788962 256505

ISBN 978-89-6225-650-5

정가 15,000원

면진구조 설계기법 및 국내 적용사례

이원호 안태상 김영주



머리말

(사)한국면진제진협회의 창립 10주년을 기념하기 위하여 기술총서를 발간하는 것은 매우 큰 기쁨이며, 무한한 영광으로 생각하고 있습니다. 그동안 협회를 이끌어 온 초대 회장님이신 고 김진재 회장님과 2, 3대 이리형 회장님, 그리고 단체회원사 및 회원에게도 그 동안의 수고와 헌신에 깊은 감사를 드립니다.

2008년 5월 중국 쓰촨성 대지진에 이어 2010년 1월 아이티 지진 및 2010년 2월 칠레 지진으로 학교 건물들이 힘없이 붕괴되는 현장을 목격하였습니다. 더구나 지난 2005년 10월 파키스탄 북부 지역에서 발생한 지진으로 7천여 개의 학교 건물이 무너져, 1만 7천여 명의 어린 학생들이 희생되는 안타까운 일도 있었으며, 2011년 3월에는 일본에서 리히터 규모 9.0의 대지진이 쓰나미를 동반하여 수많은 사람들이 희생되었습니다.

최근 전 세계적으로 1년에 평균 50만 번의 크고 작은 지진이 일어나고 있으며, 그 중 사람이 느낄 수 있는 지진은 약 10만 건이라고 합니다. 이렇듯 지진이 자주 발생하고 있으며, 피해규모 또한 대형화되고 있는 추세입니다. 지진의 안전지대로 알려져 있는 우리나라의 2000년대 이전 및 이후의 지진발생 횟수는 2배 이상 급증하고 있는 추세입니다.

(사)한국면진제진협회는 국내 유일한 면진 및 제진기술 관련 분야의 전문단체로서, 구조물의 내진설계방법을 더욱 다양화, 고도화하여 보다 안전한 구조물을 실현시키려는 목표를 가지고 2004년에 출범한 지 어느덧 10년이 지났습니다.

회원들의 부단한 노력 덕분에 국내의 면진 및 제진에 대한 인식이 높아지는 한편 실제 건물에 적용 사례도 늘어나고 있습니다. 우리 협회의 창립 10주년을 기념하기 위하여 면진구조의 설계개념과 설계절차 등을 기술하고, 그동안 국내에서 면진장치를 사용한 건축물의 시공 사례를 모아 “면진구조 설계기법 및 국내 적용 사례”란 제목의 기술총서를 발간하면서 지난 10년을 돌아보고 앞으로의 100년을 도모해 보고자 합니다. 그동안 우리 협회의 발전에 도움을 주신 모든 회원들께 심심한 감사의 마음을 전합니다.

2015년 4월

한국면진제진협회 회 장 이 원 호

한국면진제진협회 면진기술위원회 위원장 안 태 상

제1장 서론

1.1 면진설계의 배경 및 목적	7
-------------------	---

제2장 면진설계의 일반사항

2.1 면진설계의 개념	9
2.1.1 기본개념	9
2.1.2 면진설계의 특징	11
2.1.3 면진설계시 고려사항	13
2.1.4 면진구조의 적용	14
2.1.5 중간층 면진 적용	15
2.2 면진장치의 종류	16
2.2.1 적층고무의 적용 현황 분석	16
2.2.2 면진장치의 종류	18
2.2.3 면진장치의 요구성능	21
2.2.4 면진장치용 에너지 흡수장치의 종류 및 성능	26
2.3 면진설계 절차	32
2.3.1 기본 요구사항	32
2.3.2 면진시스템에 대한 지반운동	34
2.3.3 면진 해석 절차	34
2.4 면진구조계획	39
2.4.1 일반사항	39
2.4.2 구조설계 순서	45
2.4.3 연약지반에 건설하는 면진건물	51
2.4.4 면진구조와 상하 지진동	51
2.4.5 상부 구조형식과 수평강성	51
2.4.6 면진층의 수평강성을 작게 하는 구조계획	52

2.4.7 적층고무에 인장력을 발생시키지 않는 구조계획	52
2.4.8 이격거리	54
2.4.9 면진부재 배치	55
2.4.10 면진부재 교환	55

제 3 장 면진구조 설계방법

3.1 강도설계법에 의한 면진구조설계	57
3.1.1 개요	57
3.1.2 내진성능 평가절차	58
3.1.3 내진보강을 위한 성능수준과 성능목표	67
3.1.4 내진성능 상세평가를 위한 비선형 해석방법	71
3.1.5 면진설계 예제	89
3.2 에너지법에 의한 면진구조설계	133
3.2.1 에너지평형에 근거한 면진구조설계법	133
3.2.2 건축물이 흡수하는 에너지	136
3.2.3 건축물에 작용하는 에너지	140
3.2.4 설계용 에너지스펙트럼	141
3.2.5 에너지법에 의한 면진구조설계 예제	145

제 4 장 면진구조물 설계 사례

4.1 데이터 센터	151
4.2 공동주택	154
4.3 고급빌라	158
4.4 연구소 건물	160
4.5 플랜트	162
4.6 기타	163

부록 : 관측 기록으로 본 면진효과	165
---------------------	-----

참고문헌	173
------	-----

서론

1.1 면진설계의 배경 및 목적

1.1 면진설계의 배경 및 목적

오래 전부터 국내·외적으로 내진설계를 통하여 건물이 지진에 저항하여 피해를 최소화하고자 많은 관련 분야 전문가들의 노력이 계속되어 왔다. 그러나 미국의 노스리지 지진(1994)과 일본의 고베지진(1995) 이후에는 내진설계에 의한 건물보다 성능을 더욱 향상시키는 방법인 면진설계가 주목을 받고 있는 것이 사실이다. 내진과 면진은 기본적으로 그 설계철학이 다르므로 기준의 내용과 구성 또한 다르다.

면진은 강진 시 구조물의 손상방지는 물론 내부 요소까지 피해가 없도록 하는 것을 기본 철학으로 하고 있기 때문에 면진기준은 내진기준과 다르게 의도된 위치에서 지진에너지의 대부분이 흡수될 수 있도록 새로운 개념의 면진층에 대한 설계를 필요로 하며, 상부 구조물에 대해서는 연성거동 확보를 위한 배근상세와 같이 별도의 규정을 필요로 하지 않는다. 따라서 내진기준은 크게 하중규정과 연성설계를 위한 배근상세 규정을 기본 골격으로 하고 있는 반면, 면진기준은 설계와 구조의 기본계획에서부터 구조설계, 시공, 유지·관리에 이르기까지 면진구조 구현을 위한 포괄적인 내용을 담고 있다는 점에서 차이가 있다. 이는 면진구조가 핵심기술 요소로서 일반구조와 다른 면진장치라는 특수한

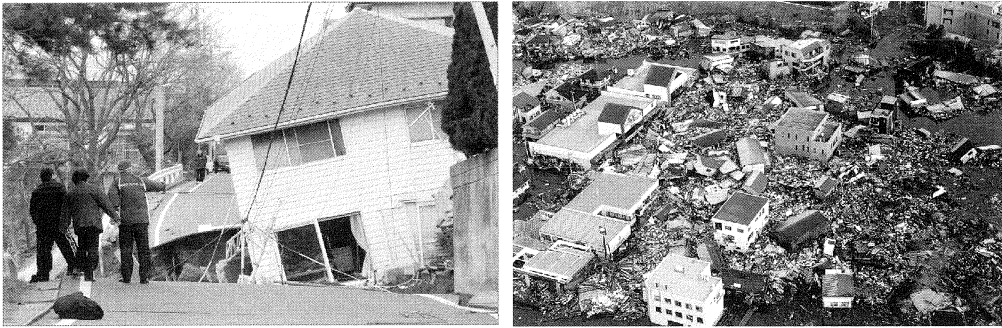


그림 1.1 일본 대지진 피해 사례(2011)

장치를 포함하여 설계되는 것이기 때문에 이 부분에 대한 설계와 유지·관리에 특히 주의할 필요가 있다.

국내 「지진재해대책법(2009)」의 제14조에는 “관계 중앙행정기관의 장은 지진이 발생할 경우 재해를 입을 우려가 있는 다음 각호의 시설 중 대통령령으로 정하는 시설에 대하여 관계 법령 등에 내진설계기준을 정하고, 그 이행에 필요한 조치를 취하여야 한다.”는 항목이 기록되어 있다. 또한 「전기통신기본법(2011)」의 적용을 받는 데이터센터 같은 경우에는 각종 서버랙과 같은 통신설비가 대량으로 설치되어 있다. 이러한 건물은 기존의 일반적인 건물의 내진설계 시 인명안전 수준을 훨씬 상회하는 목표가 설정되어 있어 데이터센터와 같은 통신 관련 건물은 보다 상위의 내진설계방법이 요구되며, 그 중의 하나가 바로 면진설계라고 할 수 있다.

면진설계 기준에 관해서는 ASCE 7-05에 반영되었고, 17장은 「면진구조물 내진설계 요구사항」을 규정하고 있다. 즉 17장은 설계에 필요한 기본요구사항, 해석방법, 실험방법 등의 절차를 나타내었다. 국내에서는 향후 발간 예정인 KBC기준에 면진설계에 대한 기준이 반영될 예정이며, 이로 인해서 국내에 면진설계 적용이 확대될 전망이다.

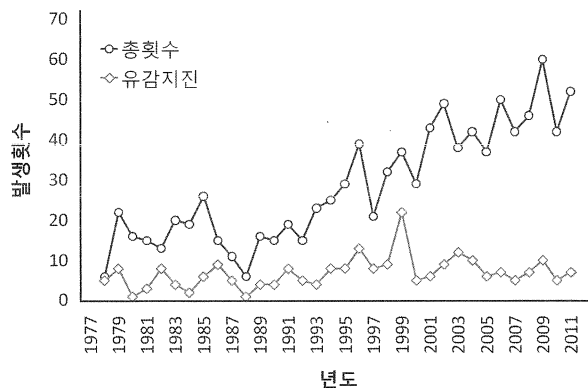


그림 1.2 국내 지진발생 추이

면진설계의 일반사항

- 2.1 면진설계의 개념
- 2.2 면진장치의 종류
- 2.3 면진설계 절차
- 2.4 면진구조계획

2.1 면진설계의 개념

2.1.1 기본개념

지진의 피해를 겪을 때마다 사람들은 그 피해를 줄이기 위해 여러 방법으로 노력해 왔다. 그 중에서 수직방향으로의 강성은 매우 강하면서 동시에 수평방향으로의 강성은 유연한 장치를 사용하여 지면과 건물을 분리시킴으로써 지진의 영향이 건물로 전달되는 것을 최소화하는 방법이 면진설계의 기본적인 개념이라고 할 수 있다. 면진설계 외에도 지진 발생 시 예상되는 소성힌지 발생 부위 또는 접합부의 내진상세를 통하여 구조물의 연성을 증가시켜 지진에너지를 흡수하는 내진설계와 특수한 장치로 지진에너지를 집중시켜 건물의 피해를 줄이는 제진설계 등의 방법이 있다.

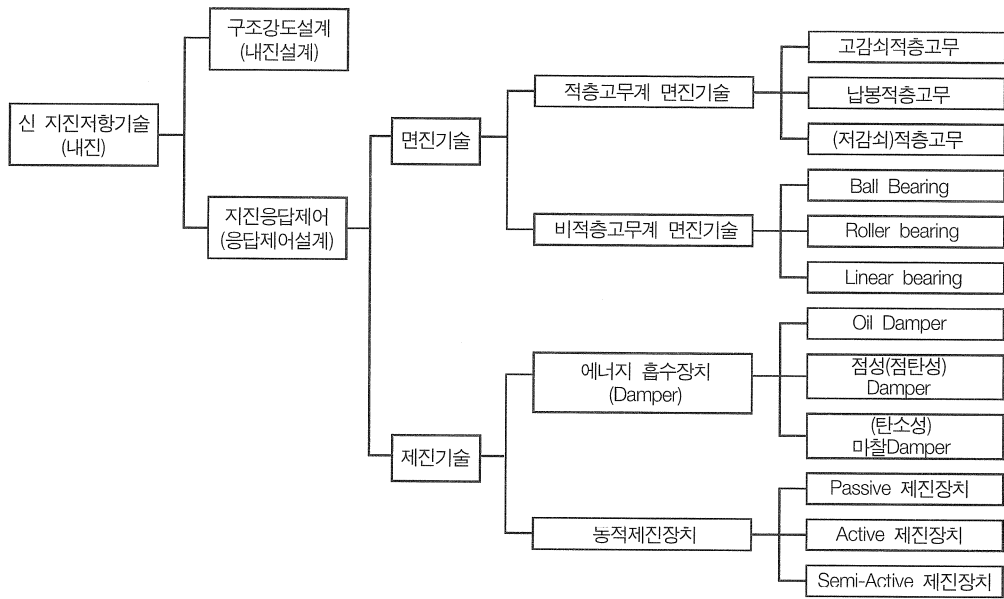


그림 2.1 내진설계의 분류

내진설계는 지진이 발생할 때 건축물이 붕괴되지 않는 것을 목표로 하는 설계법으로써 지진력에 의해 구조체에 피해가 가거나 건물의 기능이 정지하는 범위까지도 허용하고 있다. 추가 장치 없이도 건물 자체의 강도 및 연성도를 증가시켜 지진에 저항하는 설계법으로 ‘구조강도설계’라고도 하며, 구조물의 상부층으로 갈수록 지진에 대한 응답변위와 가속도가 더 커지게 되는 단점이 있다. 지진 후에도 구조체의 균열과 잔류변형 등이 심하므로 손상이 간 부분에 대한 대대적인 보수와 보강이 필요하다.

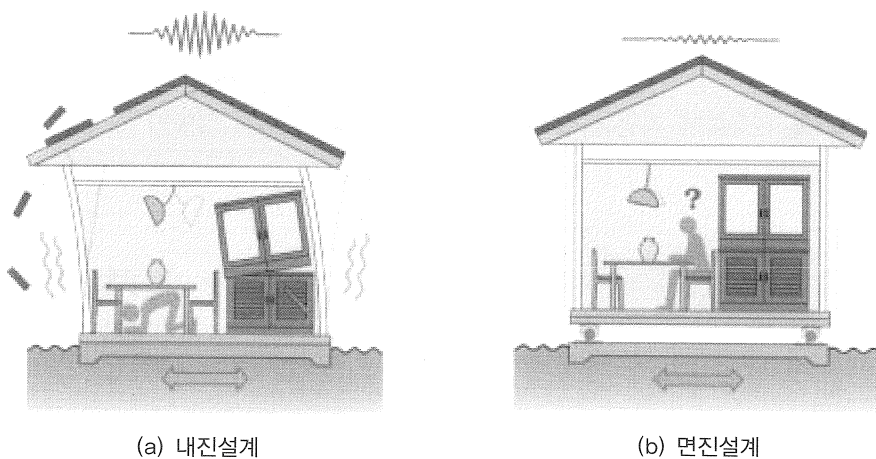


그림 2.2 내진설계와 면진설계

제진설계는 건물 내부나 외부에 특수한 장치를 설치함으로써 지진이 발생할 경우 건물에 제어력을 가하여 구조물의 응답을 제어하도록 하는 설계법이다. 따라서 ‘응답제어설계’라고도 하며, 제진장치의 종류에 따라 구조물의 진동을 저감시키거나 구조물의 강성, 감쇠 등을 순간적으로 변화시키는 등 다양한 역할을 하게 된다. 이러한 효과를 통하여 내진설계보다는 구조물의 진동을 감소시킬 수 있으며, 지진 후에도 손상된 제진장치(댐퍼)만 교체하면 되므로 보수·보강 역시 간편하다고 할 수 있다.

면진설계는 지진격리, 지반분리, 기초분리 등 다양한 용어로도 설명할 수 있으며, 지반과 구조물이 분리되어 있기 때문에 내진설계와 제진설계에 비해 구조물의 진동을 크게 감소시킬 수 있는 방법이다. 면진설계를 하면 건물의 고유주기를 지진파의 고유주기보다 인위적으로 길게 만들어 주므로 건물과 지진의 공진현상에 의한 피해를 미연에 방지할 수 있다. 따라서 건물의 응답가속도를 크게 줄여주기 때문에 구조체뿐만 아니라 비구조체(건물 내부의 가구, 칸막이벽 등)에 대한 손상 역시 거의 발생하지 않는다.

면진설계가 구조물을 지반과 분리시키는 것을 기본 개념으로 하고 있지만, 현실적으로 구조물을 지반에서 ‘분리’시키는 것은 불가능하다. 따라서 차선택으로 수직하중은 충분히 지지하되 수평하중에 대해서만 큰 변위를 일으키도록 하는 방법을 선택하고 있다. 이러한 성능을 구현하기 위해서 구조체의 기둥 하부와 기초 사이에 수평방향으로만 움직일 수 있는 적층고무 받침을 사용하거나 미끄러운 면, 볼베어링 등을 설치한다. 이처럼 다양한 면진장치에 대한 설명은 2.4절에 자세히 기술하였다.

이처럼 면진구조물은 지반과 구조물이 완전히 분리된 상태가 아니라 수평방향으로 작은 강성을 갖는 물질로 연결되어 있는 상태이므로 지진에 대해서 면진 상부 구조물도 어느 정도는 진동을 하게 된다. 그러나 대지진동의 크고 빠른 진동에 대해서 면진장치는 지진파의 에너지를 흡수하면서 천천히 움직이게 된다. 그 결과 면진장치 상부의 구조물은 수평방향으로 천천히 평행이동하게 되다. 따라서 처음 작용한 강한 지진파에 비해 면진장치 상부의 거주자는 느린 속도의 수평변위 밖에 느낄 수 없으며, 이것이 면진설계에서의 주요 성능이라고 할 수 있다.

2.1.2 면진설계의 특징

(1) 안전성 향상

면진구조물은 지반과 구조물이 분리되어 있으므로 면진장치의 상부 구조물에 전달되는 지진하중이 큰 폭으로 줄어들어서 건물의 전체적인 안전성이 향상된다. 따라서 면진장치

를 적용한 건물은 지진 후에도 그 기능을 유지할 수 있으므로 내부의 인명보호뿐만 아니라 건물의 사회적 기능(소방서, 관공서 등)을 통해서도 인명구조, 복구작업 등이 원활히 진행될 수 있도록 해준다.

(2) 2차 피해 방지

지진에 의한 피해는 건물의 손상에 따른 1차적인 피해뿐만 아니라 건물 내부의 비구조부재 파괴나 전기, 수도, 가스관과 같은 설비 시설의 손상에 따른 화재, 폭발 등의 2차적인 피해도 큰 부분을 차지한다. 면진구조물은 면진층 상부의 응답가속도를 감소시키는 원리를 이용하여 이와 같은 2차 피해를 방지할 수 있다. 이와 같은 특성은 건물에 적용하는 것뿐만 아니라 박물관, 미술관 등에서의 전시대 하부에 국부적으로 사용하여 귀중한 유물이나 고가의 미술품 등을 안전하게 보호하는 역할을 하기도 한다.

(3) 사용성 향상

지진에 따른 진동과 응답가속도는 그 자체로 인해 구조체에 손상을 입히지는 않더라도 일정 범위를 넘어서면 사용자에게 불편감을 줄 수 있으므로 꼭 확인해야 하는 부분이다. 면진설계된 건물은 지진이 올 때 지진에너지의 대부분을 면진장치가 흡수하므로 지반의 강한 진동에 의한 영향을 거의 받지 않는다. 따라서 면진장치 상부의 구조물은 지진에 의한 진동이 일반 구조물에 비해 큰 폭으로 감소하게 된다. 이는 구조적인 안전성뿐만 아니라 사용자의 심리적 불안감을 감소시키는 역할을 한다.

(4) 건축계획 측면의 효율성 증가

면진설계는 위에 열거한 구조적 측면 외에도 건축계획면으로도 매력적인 방법이다. 면진장치는 연직방향 하중이 지반으로 전달되는 기둥의 하부에 설치되기 때문에 사용자가 거주하는 공간에서는 알아챌 수 없는 장치이다. 따라서 내진설계나 제진설계된 건물의 경우 구조체의 크기 증가에 따른 사용 면적 감소 및 댐퍼 등의 제진장비로 인한 조망 침해 등의 단점이 있는데 비해, 훨씬 효율적인 평면계획과 조망계획이 가능하다.

(5) 건축물의 장수명화, 친환경건축 실현 가능

면진구조물은 지진 발생 시 구조체가 입는 피해가 다른 구조물에 비해 미미하므로 적은 보수·보강이 필요한 다른 구조물에 비해 그 사용 기간이 오래 지속될 수 있다. 또한 지진 시의 구조물 피해로 인한 각종 건축폐기물이 발생하지 않으므로 친환경적인 내진설

계 방법이라고 할 수 있다.

2.1.3 면진설계시 고려사항

(1) 면진구조계획의 목표

건물의 내진안전성능을 구조체의 내진안전성뿐만 아니라 내부 집기물과 설비기기 등을 포함하여 건물 전체의 손상 방지, 기능 유지, 자산 보호를 하는 데 중요한 의의가 있다. 따라서 이런 전체적인 사항을 고려하기 위해서는 지진에 대한 건물의 응답가속도를 제어하는 것이 필요하다. 따라서 해당 건물의 사용 목적이나 중요도 등을 고려하여 적절한 수준의 최대응답가속도를 설정한 후, 지진 시 각층의 반응이 그 범위 안에서 가능한 한 낮은 값을 나타내도록 해야 한다.

(2) 면진층 및 상부 구조체 강성에 대한 고려

면진층의 수평강성은 큰 층간변위를 통해 지진에너지를 소산할 수 있도록 충분히 낮게 설정해야 한다. 반면에 상부 구조부재는 지진에너지를 흡수하여 소성화되며 손상을 입는 것을 방지해야 하므로 충분히 높은 강성을 확보해 주어야 한다. 이는 건물의 계획단계에서 면진 상부 구조체의 층수가 많아질 경우에 특별히 주의해야 하는 것으로, 2차 모드의 발생을 통해 응답가속도가 증가될 경우에는 상부구조체에도 지진에너지 흡수를 위한 장치를 설치하는 등의 대책이 필요하다.

(3) 변형능력에 대한 여유도 확보

면진구조물은 지진에 대한 응답가속도는 감소시켜 주지만, 지진에너지의 대부분은 변위를 발생시켜서 소산하므로 응답변위는 크게 나타난다. 따라서 면진장치의 수평변위 발생 능력을 최대한 크게 잡아서 불확실한 지진에도 대처할 수 있도록 노력해야 한다.

(4) 면진장치의 배치와 비틀림에 대한 고려

면진장치는 수평강성이 매우 적은 특성이 있으므로 비틀림강성 역시 매우 적게 나타난다. 이는 상부 구조체에서 발생한 편심을 어느 정도는 보완해 줄 수 있는 수준이므로 적절한 설계를 통해 지진에 의한 비틀림응답도 제어할 수 있어야 한다. 또한, 면진층 내에서 면진장치의 배치 역시 전체의 강성 중심과 질량 중심이 일치하도록 계획해야 한다.

(5) 설치 환경, 내구성에 대한 배려

면진장치는 그 종류에 따라 직사광선에 노출되거나 화재의 피해를 입을 경우 내구성능이 저하될 우려가 있으므로 설치 환경에 대한 주의가 필요하다. 또한, 지진력에 의한 수평변위가 발생할 때를 대비하여 주변, 기타 시설물과의 적절한 유격거리를 고려해야 한다.

2.1.4 면진구조의 적용

(1) 기초 면진 적용

멕시코 지진과 같이 지반이 매우 연약한 경우를 제외한 일반적인 경우의 지진에너지는 진동주기가 짧은 영역에 집중되어 있으므로 비슷한 진동주기를 가지는 중·저층 건물의 피해가 고층건물의 피해보다 더 크게 발생할 위험이 있다. 이러한 중·저층 건물은 지진에 의한 지반운동을 증폭하게 되어 각층에서의 가속도는 커진다. 이렇게 증폭된 가속도는 건물골조의 응력을 증가시키고 과도한 층간변위를 유발시켜 건물이 구조적인 파괴에 이르지 않더라도 건물 내의 사람이나 시설물에 심각한 피해를 입히게 된다.

따라서 중·저층 건물의 피해를 줄이기 위해서는 건물 내의 가속도를 감소시켜야 한다. 이렇게 하기 위해서는 그림 2.3(a)의 가속도응답 스펙트럼에서도 알 수 있듯이 건물의 기본 진동주기를 길게 하여 구조물에 전달되는 횡하중을 감소시켜야 한다. 이러한 목적으로 사용되는 것이 건물의 연직방향 하중을 지지하면서 동시에 작은 전단강성을 가지고 있는 면진장치이다. 기본적으로 건물이 면진장치에 의해 지반과 분리되어 있으면 건물에서 발생하는 가속도와 층간변위를 동시에 줄일 수 있다. 그러나 건물의 주기가 길어지면 건물이 유연해지게 되어 면진장치에서의 수평변위는 그림 2.3(b)에서 알 수 있듯이 비교적 크다.

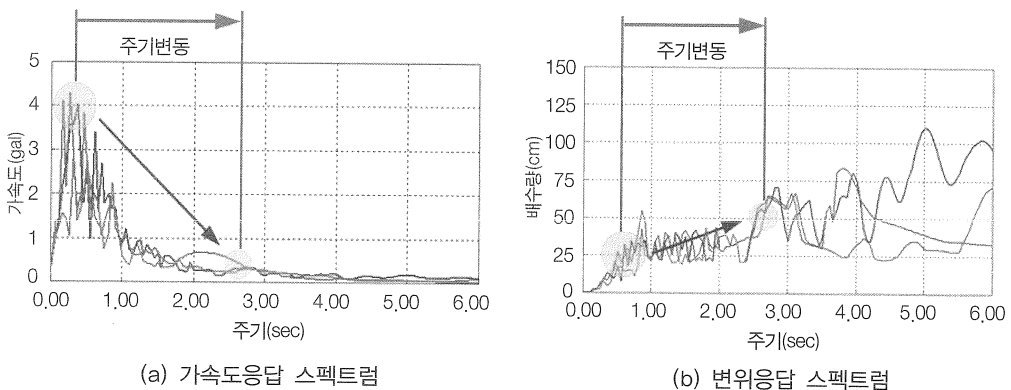


그림 2.3 지진하중에 대한 면진시스템의 효과

2.1.5 중간층 면진 적용

면진장치는 설치 위치에 따라 그림 2.4와 같이 분류된다.

기초 면진을 중층이나 특히 고층건물에 적용하기 위해서는 여러 가지 기술적 문제가 발생한다. 이러한 건물의 기초가 고정된 건물에서 고유주기는 이미 상대적으로 길기 때문에 면진장치를 이용하여 주기를 더욱 길게 만들면 그림 2.3(b)에서 보는 바와 같이 면진장치의 수평변위는 매우 크게 발생하며 동시에 큰 연직하중과 횡하중에 의한 전도모멘트가 커져 면진장치에 인장력이 발생할 가능성이 증가하는데, 이는 중요한 기술적 문제로 거론된다. 즉 구조물이 높아질수록 면진장치가 견뎌야 하는 상부 구조물의 무게도 상당하며, 고층구조물은 더 이상 전단지배구조물이 아니므로 기초 부분에서 발생하는 힘은 무시되지 않는다. 따라서 여전히 큰 수평 유연성을 가지고 상부 구조물의 무게를 견디며 건물 기초의 회전자유도를 막을 수 있을 정도의 수직강성을 확보하는 면진장치를 제공하는 어렵다.

따라서 중·고층 건물에 있어서 면진구조의 적용은 구조물의 전체 질량을 분리하는 기초 면진보다는 부분적으로 질량을 분리시키는 중간층 면진의 방법을 시도할 수 있다. 이는 건물의 중간에 면진장치를 설치하여 기초 면진에 따른 기술적 문제를 유발시키지 않으면서 구조물에 전달되는 지진력을 감소시켜 지진에 대한 구조물의 피해를 줄이는 것이다. 특히, 주상복합구조물과 같이 질량이나 강성이 매우 큰 전이보에 의한 비정형성이 강하고 횡하중에 약한 구조물의 경우 상부 주거공간과 하부 상업공간 사이에 면진층을 설치하여 관성력 감소와 하부 골조의 소성흔치 발생을 방지하는 것이 가능하다. 또한, 면진기술은 공사기간 중 건물의 사용성에 저해가 거의 없고, 보수비용이 저렴하여 공사도 용이하기 때문에 구조물의 내진성능 향상을 위한 보수·보강의 방법으로 적용성을 인정받고 있다. 실제로 일본에서는 1995년 이후 구조물의 보수·보강을 위하여 면진구조를 다수 적용하였다.

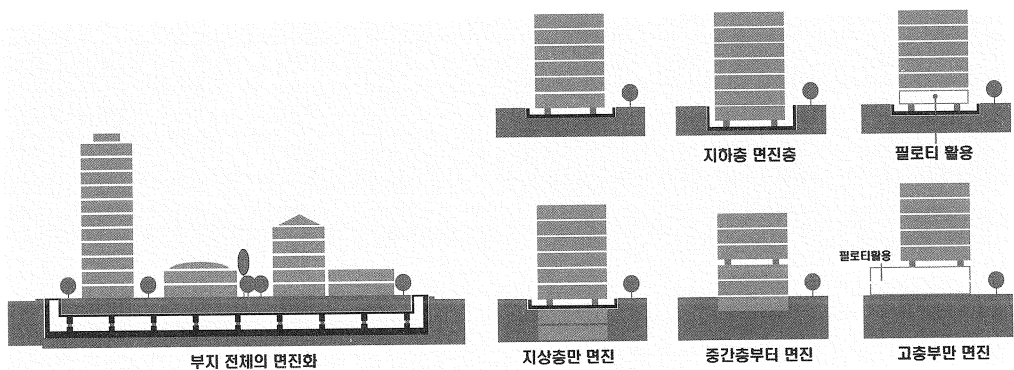


그림 2.4 면진장치의 설치 위치에 따른 분류

2.2

면진장치의 종류

2.2.1 적층고무의 적용 현황 분석

일본건축센터에서 발행한 1998년까지의 성능평가시트로부터 직경 및 동일제품에 대한 적층고무가 30개 이상 사용된 19개 건물을 선정하여 조사하였다. 적층고무의 내역은 천연 고무계 적층고무(이하, NRB)가 10건, NRB와 납봉삽입형 적층고무(이하, LRB)의 혼용이 3건, LRB가 5건, 고감쇠고무계 적층고무(이하, HDR)가 1건이다. 조사한 적층고무의 총수는 1926개, NRB가 1304개(68%), LRB가 539개(28%), HDR이 83개(4%)이다.

HDR의 빈도가 적은 원인으로는 면압과 편심의 처리를 위해 작은 크기의 적층고무를 30개 이상 사용한 건물이 적었기 때문으로 판단된다. 실제 본조사에 의한 HDR의 결과에서는 83개의 적층고무에 대해 7종류의 크기가 사용되었다.

적층고무의 직경에 대해서 NRB와 LRB의 편차를 표 2.1에 나타내었다. NRB에서는 직경 800 ϕ 가 가장 많았고, 700 ϕ 와 800 ϕ 의 점유비가 전체 사용량의 약 70%를 차지하고 있다. 한편 LRB는 1,000 ϕ , 1,100 ϕ 의 적층고무 사용빈도가 NRB에 비해 많았다. 이는 납봉 삽입 적층고무는 적층고무의 중간에 납봉 삽입용 구멍이 있어 단면적을 증가시킬 필요성이 있었던 것으로 판단된다.

표 2.1 적층고무의 직경분포

직경	NRB		LRB	
	개수	빈도(%)	개수	빈도(%)
600 ϕ	63	4.8	0	0.0
700 ϕ	368	28.2	75	13.9
800 ϕ (850 ϕ)	548	42.0	145	26.9
900 ϕ	111	8.5	78	14.5
1,000 ϕ	123	9.4	132	24.5
1,100 ϕ	76	5.8	96	17.8
1,200 ϕ	15	1.2	4	0.7
1,300 ϕ	0	0.0	9	1.7
합계	1304	100.0	539	100.0

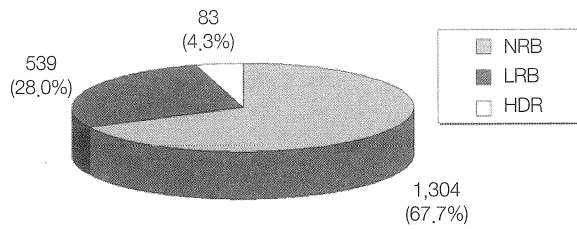


그림 2.5 적충고무의 적용 현황

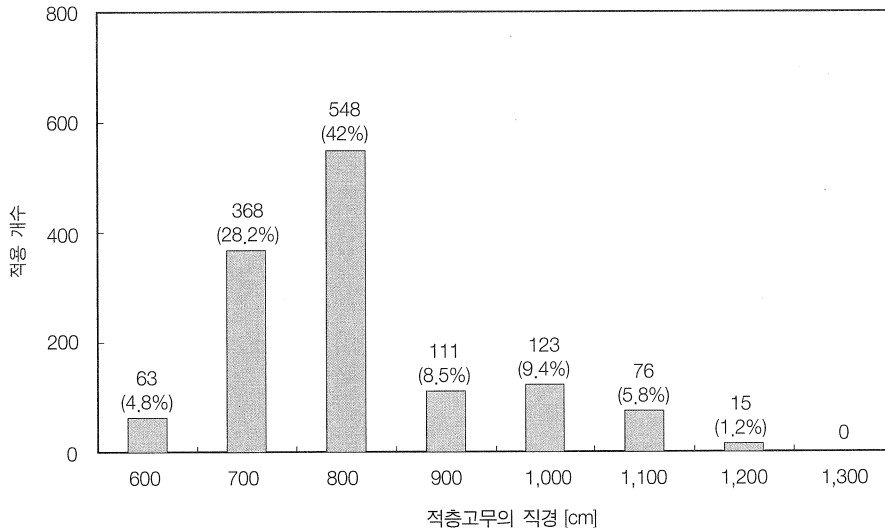


그림 2.6 적용된 천연고무계 적충고무의 직경

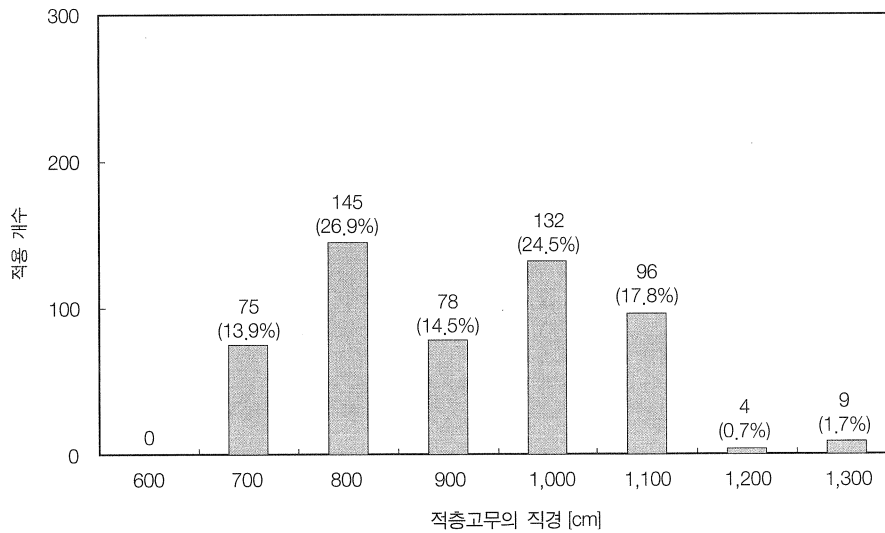


그림 2.7 적용된 나뭇잎형 적충고무의 직경

2.2.2 면진장치의 종류

면진부재란 건물의 기초와 상부구조와의 사이에 두는 것으로 지면으로부터 진동이 건물에 가능하면 전달되지 않도록 하는 부재이다. 면진구조에 사용되는 면진장치는 받침의 형식에 따라 적층고무방식, 미끄러짐방식, 롤러방식 등으로 분류할 수 있다. 면진구조에 있어서 분리장치는 기둥과 같이 장기에 걸쳐 건물의 하중을 지지하여야 하며, 지진 시에는 일반 기둥에 비하여 보다 큰 수평변형에 대해 안정된 거동성능이 요구된다.

면진장치는 격리기능을 하는 분리장치와 에너지흡수기능을 하는 댐퍼를 총칭하여 지칭할 경우에 사용하며, 분리장치라고 할 경우에는 적층고무계 격리장치와 미끄럼베어링(슬라이딩베어링), 구름베어링(롤베어링) 등의 분리장치를 지칭한다. 그리고 분리장치가 갖 추어야 할 성능은 다음의 4가지이다.

- 수직지지성능
- 수평변형성능
- 복원성능
- 감쇠성능

표 2.2 분리장치의 종류 및 요구성능

분리장치의 종류		수직지지 성능	수평변형 성능	복원 성능	감쇠 성능
적층고무방식	천연고무 받침	○	○	○	×
	고감쇠고무 받침	○	○	○	○
	납봉삽입고무 받침	○	○	○	○
미끄러짐방식	저마찰형 받침	○	○	×	×
	PTFE	○	○	×	○
	탄성강체와 저마찰형 지주의 직렬결합방식	○	○	○	×
	오목형 받침	○	○	○	×
롤러방식	롤러형 받침	○	○	×	×
	볼베어링 받침	○	○	×	×
	오목형 받침	○	○	○	×

[○ : 있음, × : 거의 없음]

분리장치란 지반으로부터 건물을 분리·절연하는 장치 및 기구를 말한다. 지진이 일어났을 경우에 완전한 절연이란 건물 전체를 공중에 뜨게 하는 것이지만 현재의 기술 수준으로는 불가능하다. 따라서 분리장치는 건물 전 중량을 지지할 수 있는 강도와 강성을 가지고 있으면서 수평방향으로는 충분히 유연한 특성을 지니고 있을 필요가 있다. 분리장치의 수평강성을 작게 하면 할수록 절연에 완전 가깝고, 건물에의 지진입력은 저감되어 응답가속도는 매우 작아진다. 한편, 지반과 건물과의 상대변위는 수평강성이 작을수록 증가하는 경향이 있다.

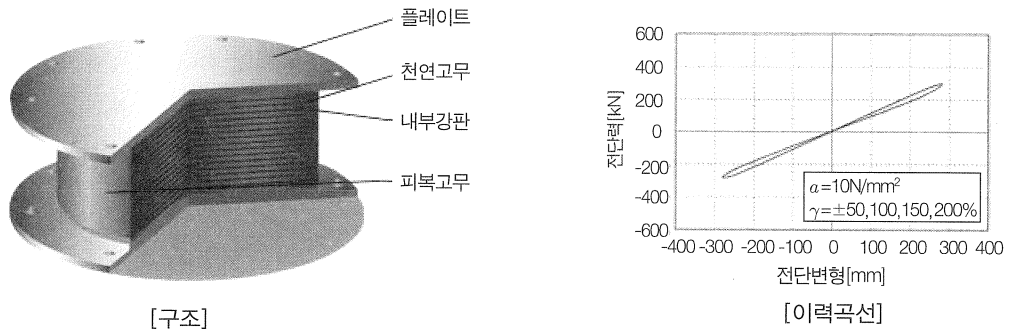
이와 같이 응답가속도와 면진층 변위의 관계는 상반되는 성질을 나타낸다. 그러나 감쇄성능을 적절하게 부여함으로써 응답가속도를 가감하고 상대변위도 적절한 범위 내에 머물게 하는 것이 가능하다. 분리장치에는 하중지지능력, 대변형성능 및 지진 종료 시에 원위치로 복귀하는 복원성능 등이 요구된다. 또 경제성, 시공성, 내구성능 등도 중요한 요구성능이다.

분리장치의 요구성능을 공학적 정량성을 가지고 경제적으로 실현한 것이 적층고무 분리장치이다. 적층고무 분리장치는 얇은 고무시트와 중간 강판을 교대로 적층한 구조로 되어 있다. 고무 단독의 경우 연직방향으로 큰 하중을 작용시키면 변형되어 횡방향으로 부풀어 올라 안정되게 지지할 수 없다. 그에 비해 적층고무와 같이 견고한 강판을 고무 사이에 삽입함으로써 연직방향의 변형이 크게 억제되고 수평방향으로의 유연성은 고무 단독인 경우와 거의 비슷한 값을 유지하게 된다.

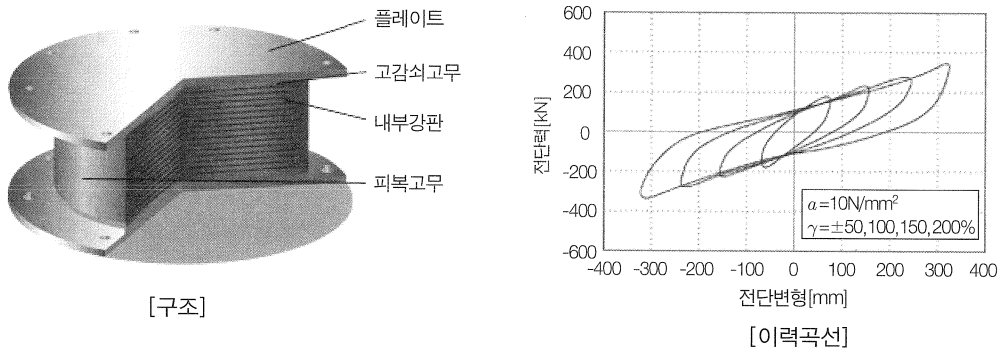
적층고무의 연직강성은 통상 기둥 하나와 비슷한 크기이다. 한 예로서 적층고무의 직경을 70cm, 전 고무의 두께를 14cm($0.7\text{cm} \times 20\text{층}$)로 하고, RC기둥으로서 단면은 $70 \times 70\text{cm}$, 길이는 400cm인 기둥을 가정한다. 적층고무의 연직강성은 약 $2,140\text{t/cm}$ 이고 RC기둥의 강성은 $2,500\text{t/cm}$ 이 되어 적층고무의 압축강성이 RC기둥의 강성과 비슷함을 알 수 있다. 적층고무의 수평방향 성능은 고무의 특성이 충분히 발휘되어 매우 작은 수평강성과 큰 변형능력을 가지고 있다. 이러한 적층고무의 수평강성과 수직강성의 비는 1:1,000 정도이다.

적층고무와 RC기둥의 수평변형능력을 위에 열거한 예로써 비교하면, 직경 70cm 적층고무의 수평변형능력은 40cm 정도이고, RC기둥의 층간 변형각을 $1/200$ 으로 하면 수평변형량은 약 2cm이다. 따라서 적층고무의 수평변형능력은 20층분 기둥의 수평변형량 총합에 상당한다.

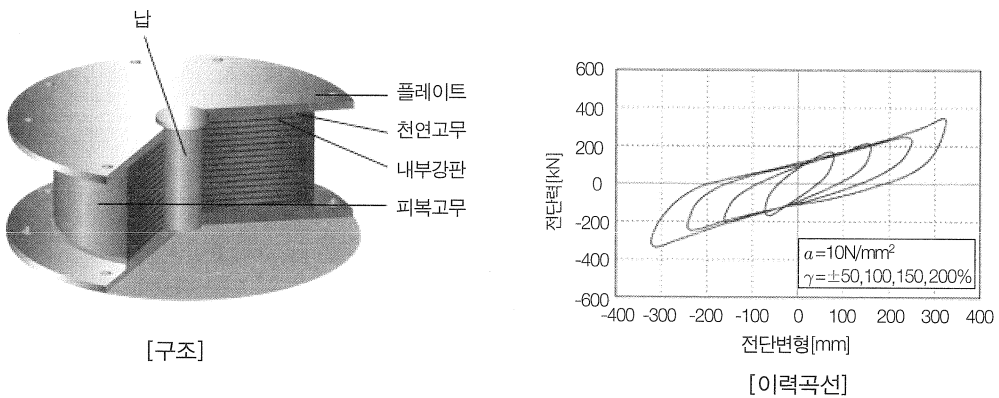
분리장치에는 고무시트와 강판을 교대로 겹쳐 쌓은 적층고무 분리장치(그림 2.8)와 마찰저항을 작게 한 미끄럼 받침(그림 2.9), 굴림 받침(그림 2.10) 등이 있다.



(a) 천연고무 받침



(b) 고감쇠고무 받침



(c) 납붕삼입고무 받침

그림 2.8 적층고무 분리장치의 종류

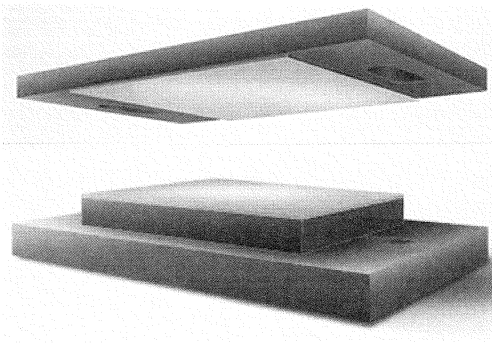


그림 2.9 미끄럼 받침

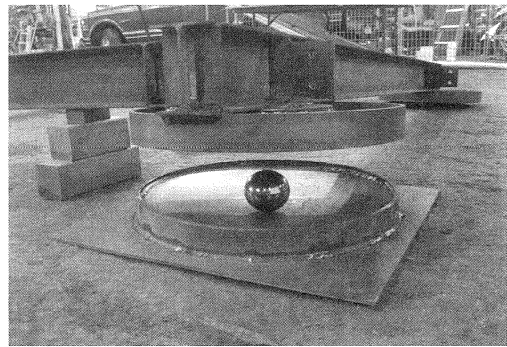


그림 2.10 굴림받침

분리장치의 기능만으로는 지진 시 건물과 지면과의 진폭은 너무 크다. 이 진폭을 적절히 감소시키기 위해서는 감쇄기능이 필요하다. 감쇄장치는 지진 시 건물의 진폭과 속도에 따라 지진에너지를 흡수하고 진동을 제어하는 작용을 한다. 댐퍼의 주된 종류로는 강재와 납을 이용한 금속감쇄장치(그림 2.11~2.12), 오일과 같은 유연한 유체재료를 이용한 유체감쇄장치, 마찰감쇄장치 등이 있다.

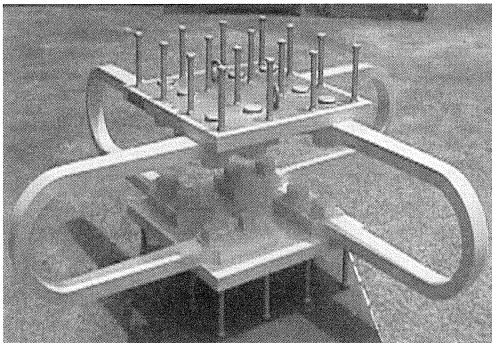


그림 2.11 강재댐퍼

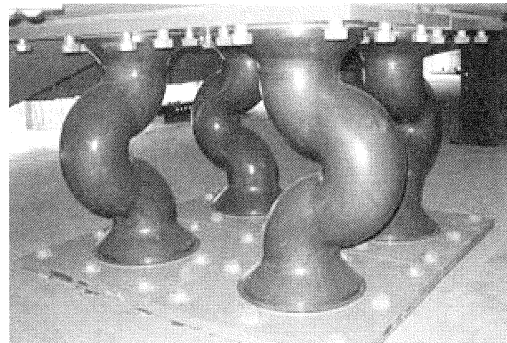


그림 2.12 납댐퍼

2.2.3 면진장치의 요구성능

분리장치는 상시하중에 대한 장기간의 안정된 지지능력이 요구되고 경년변화에 따른 성능열화가 발생하지 않아야 하는 요구조건을 만족해야 한다. 변형성능에서는 분리장치가 요구변형량 이상의 변형능력을 가짐과 동시에 연직하중을 지지할 수 있도록 요구된다. 이때 수직하중은 상시하중의 2배 정도까지 고려하고 있다. 분리장치가 큰 변형성능을 가지고 있어도 건물을 원래의 위치로 복원시키는 강성이 필요하다. 복원능력의 정도는 지진

후에 잔류변형의 크기에 영향을 미치며, 면진성능도 높여야 할 필요가 있으므로 가능한 한 유연한 수평강성을 가지도록 설계한다. 면진건물의 해석 및 설계의 신뢰성을 높이기 위하여 수평강성과 복원력 특성이 축력의 변동에 따라 크게 영향을 받지 않도록 하는 것이 필요하다. 또한 미소한 변형에서 파단에 이르기까지의 이력특성, 면압 및 속도 등에 의한 의존성에 대한 검토 및 정량적 평가가 중요하다. 역학적 특성과 내구성뿐만 아니라 면진부재로서의 품질 안전성은 매우 중요하다. 품질로서는 분리장치의 제작정밀도, 수평강성과 한계변형의 균일성이 요구된다.

분리장치의 설계에서는 면진건물에 상정한 응답변형량과 목표성능을 만족하도록 크기, 강성 및 변형능력 등을 결정한다. 이때 중요한 것은 축력의 변동에 대해 영향을 적게 받는 시스템으로 설계하여야 한다.

(1) 적층고무의 구조와 특징

적층고무의 형상은 얇은 강판과 고무시트를 겹쳐서 적층한 구조를 이룬다. 고무층이 두꺼운 경우 압축 시에 고무층은 크게 수축되어 고무가 옆으로 빠져나오게 되고 압축하중에 대한 지지능력이 떨어질 것이다. 고무 1층의 두께를 얇게 하면 옆으로 빠져나오는 현상을 줄일 수 있고, 압축하중에 대한 수축량도 줄일 수 있다. 전단변형 시에는 강판이 전단변형을 구속하지 않으므로 수평강성은 고무의 탄력이 좌우하게 된다.

그림 2.13은 적층고무의 단면을 나타낸다. 적층고무의 형상을 결정하는 파라미터는 고무직경 D , 고무 1층 두께 t_R 및 고무층수 n 이다. 이는 1차 형상계수 S_1 과 2차 형상계수 S_2 로 결정된다. 1차 형상계수 S_1 은 다음 식으로 정의된다.

$$S_1 = \frac{\text{고무의 유효면적(수압면적)}}{\text{고무 1층의 자유표면적(측면적)}}$$

2차 형상계수 S_2 는 다음과 같이 정의된다.

$$S_2 = \frac{\text{고무 직경}}{\text{전 고무층 두께}}$$

S_1 은 주로 수직·휨강성에, S_2 는 좌굴하중과 수평강성에 관계한다. 원형단면 적층고무의 경우 S_1 과 S_2 는 식 (2.1)에 의해 계산된다. 구속면적은 중간 강판에 의해 고무층이 구속되어 있는 면적이다. 중심에 홀이 있는 경우는 구속면적과 자유표면적 산출시 고려한다.

$$S_1 = \frac{\pi D^2/4}{\pi D t_R} = \frac{D}{4t_R}, \quad S_2 = \frac{D}{nt_R} \quad (2.1)$$

적층고무가 압축을 받으면 고무는 바깥쪽으로 변형하려 하지만 중간 강판에 의해 구속되어 고무재질의 비압축성(푸아송비 약 0.5)에 의해 고무 중심부에 3축 압축응력상태가 형성된다. 이는 물이 고무 안에 갇혀 고무층이 ‘새지 않는 물’과 같이 되는 것과 같다. 따라서 압축에 의한 변형량은 매우 작고 같은 단면적을 가진 RC기둥 1개와 같은 정도의 높은 압축강성을 발휘할 수 있다. 또한 적층고무의 압축파괴시험에서 중간 강판의 인장 파괴에 의해 고무의 구속이 약해지는 것으로 보아 압축한계내력은 중간 강판의 강도에 지배되는 것으로 판단된다.

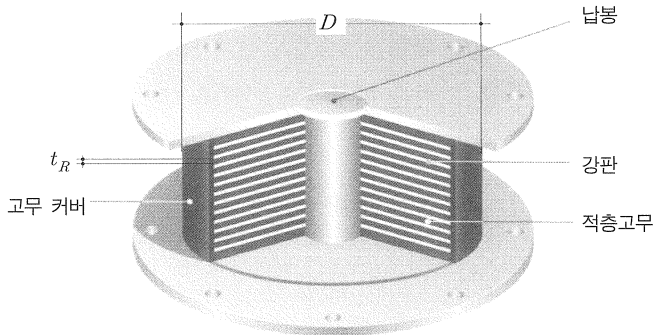


그림 2.13 적층고무의 단면

적층고무는 전단력이 작용할 때 중간 강판은 고무층의 전단변형(체적변화 없음)을 구속하지 않으므로 고무시트만의 탄력으로 수평강성을 발휘한다. 적층고무가 크게 변형된 경우도 하중지지능력은 보유하고 있다. 이는 그림 2.14에 나타낸 바와 같이 적층고무의 최상하면의 중복 부분(유효지지부라 칭함)에 대해 지속적으로 3축 압축응력상태가 유지되기 때문이다. 이 유효지지 부분에서 대부분의 압축하중이 지지되어 이 부분의 압축응력도(반력)는 매우 커지지만 반면 인장반력은 매우 작아진다. 또한 전단변형 시에는 고무에 의한 ‘물’의 구속효과가 작아지므로 압축강성은 거의 유효지지부의 단면적에 비례하여 작아질 것으로 사료되지만 수직 축소량에 미치는 영향은 미비한 수준이다. 이와 같이 적층고무는 큰 하중을 지지하면서 수평방향으로 크게 변형하는 것이 가능하다.

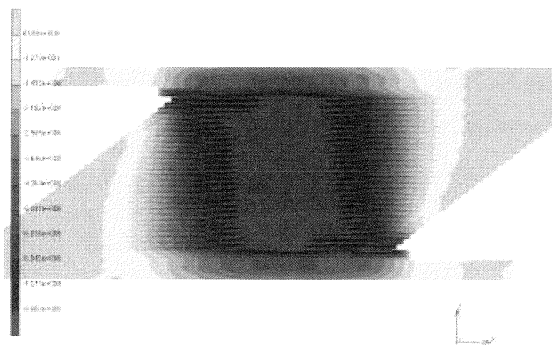


그림 2.14 적층고무의 수직방향 응력분포($\sigma=300\text{kg/cm}^2$, $\gamma=300\%$)의 해석 예

(2) 면진장치의 성능

면진구조에 있어서 분리장치는 기둥과 같이 장기에 걸쳐 건물의 하중을 지지하는 연직 성능과 지진 시 일반 기둥에 비하여 보다 큰 수평변형에 대해 안정된 수평성능이 요구되며, 이러한 성능은 제품의 편차를 고려한 경우에도 만족하여야 한다.

① 연직성능

- i) 면진장치는 장기하중 시 축력과 수평변형을 동반하는 지진 시 축력 하에서도 건축물을 안전하게 지지할 수 있는 것으로 한다.
- ii) 장기하중 시의 면진장치 상호 간의 연직변형량에 큰 차이가 발생하지 않도록 장기면압을 적절히 설정한다.

적층고무의 압축강성 K_v 는 종탄성계수 E_c 를 이용하여 다음 식으로 계산한다.

$$K_v = \frac{E_{cb} A}{T_R} \quad (2.2)$$

여기서, $E_{cb} = \frac{E_c E_b}{E_c + E_b}$, $E_c = 3G(1 + 2\kappa S_1^2)$, T_R : 전고무층 두께, A : 단면적

전단변형이 커지면 유효지지면적이 감소하기 때문에 이때 압축강성도 저하한다. 단, 전단변형이 커지면 고무재료의 변형경화에 의해 비례적으로 저하되지 않는 경우도 확인된 바 있다. 따라서 식 (2.3)과 같이 전단변형 시의 압축강성 하한값 K_{ve} 를 정의한다.

$$K_{ve} = \frac{A_e}{A} K_v \quad (2.3)$$

여기서, A_e : 유효지지면적

전단변형이 δ 일 때 유효지지면적은 적층고무의 최상하면의 중복 부분 면적에 의해 다음 식으로 계산 가능하다.

$$A_e = \left[1 - \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{\delta}{D} \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{D} \right)^2} + \sin^{-1} \left(\frac{\delta}{D} \right) \right\} \right] A \quad (2.4)$$

$$\cong \left[1 - 1.2 \frac{\delta}{D} \right] A \quad \left(\frac{\delta}{D} \leq 0.6 \right)$$

적층고무의 중심에 구멍이 있는 경우에는 구멍을 고려한 1차 변형계수를 이용하여 구한다.

적층고무가 인장을 받을 경우 적층고무 내부는 부압상태가 되고 고무층 내부에 손상이 발생한다. 따라서 인장강성에 대한 이론식은 없으며, 인장강성에 대해 인장시험 등의 결과로부터 압축강성에 비해 1/5~1/10 정도를 보유하는 것으로 나타났다. 인장강성은 전단 변형의 크기에는 영향을 받지 않으나 큰 인장을 경험한 경우 인장강성은 저하한다. 인장 강성에 대해서는 적층고무의 부착방법과 플랜지의 치수 등에도 영향을 받기 때문에 실험 결과를 적절히 평가할 필요가 있다.

② 수평성능

면진장치는 지진 시 축력 하에서도 복원력을 상실하지 않고 수평한계변형까지 안정되게 변형할 수 있는 것으로 한다.

적층고무의 수평강성 K_H 는 탄성체의 수평력과 압축력이 작용하는 경우 다음 식으로 구할 수 있다.

$$K_H = \frac{P^2}{2k_r q \tan\left(\frac{qH}{2}\right) - PH}, \quad q = \sqrt{\frac{P}{k_r} \left(1 + \frac{P}{k_s}\right)} \quad (2.5)$$

여기서, P : 압축하중, H : 고무층과 중간 강판의 총두께(= $T_R + T_S$)

T_S : 중간 강판 전두께

유효전단강성 K_s 와 유효휨강성 k_r 은 다음 식으로 구한다.

$$k_s = (G_A)_{eff} = G_A \frac{H}{T_R}, \quad k_r = (EI)_{eff} = E_{rb} I \frac{H}{T_R} \quad (2.6)$$

여기서, $E_{rb} = \frac{E_r E_b}{E_r + E_b}$, $E_r = 3G \left(1 + \frac{2}{3} x S_1^2\right)$, I : 단면 2차모멘트

식 (2.6)의 우변에서 H/T_R 은 고무층과 중간 강판을 고려한 유효강성이다. 즉 고무층만의 전단강성과 휨강성인 G_A/T_R , $E_{rb}I/T_R$ 과 적층고무 전체의 유효강성 $(G_A)_{eff}/H$, $(EI)_{eff}/H$ 를 등가시켜 구할 수 있다.

식 (2.5)는 압축하중 P 가 0에 근접할 때 $\tan(qH/2) \cong qH/2$ 가 되는 것을 고려하면 압축하중이 0일 때의 수평강성 K_{H0} 는 다음과 같이 구할 수 있다. 이는 고무층의 전단강성만을 고려한 식과 동일하다.

$$K_{H0} = \frac{GA}{T_R} \quad (2.7)$$

식 (2.7)은 적층고무의 수평강성을 평가하기 위해 매우 유효한 식이다. 단, 식의 적용에 대해서는 적층고무의 전단변형이 탁월하고 휨변형 성분에 대해서는 무시 가능한 형상이어야 한다. 압축하중의 변동에 대해 수평강성의 변동이 작아지는 형상이어야 한다는 것이 식 (2.7)의 적용조건이며, 이는 적층고무의 설계에서도 중요하다.

2.2.4 면진장치용 에너지 흡수장치의 종류 및 성능

(1) 면진장치용 댐퍼의 종류

면진장치용 댐퍼는 여러 가지 형태, 기구, 재질을 가진 것이 다양하게 개발되어 사용되고 있다. 면진구조 초기에는 강재와 납을 사용한 댐퍼가 개발되었고, 그 후 마찰을 이용한 댐퍼와 점탄성체를 이용한 댐퍼 등도 개발되었다. 현재까지는 분리장치에 댐퍼기능을 복합시킨 분리장치도 이용되고 있다. 이러한 복합형 분리장치에는 하중지지능력도 요구되지만 분리장치와 독립된 댐퍼에는 하중지지능력은 필요 없다. 분리장치와 조합하여 사용하는 댐퍼를 작동원리면에서 분류하면 다음과 같다.

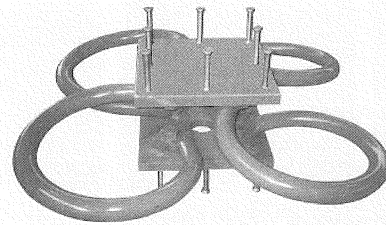
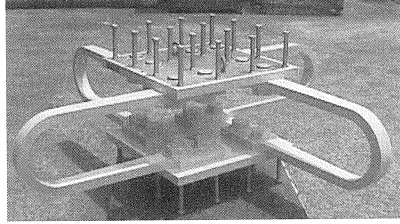
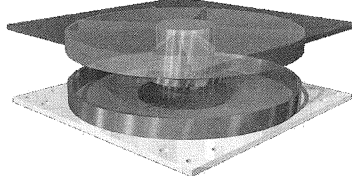
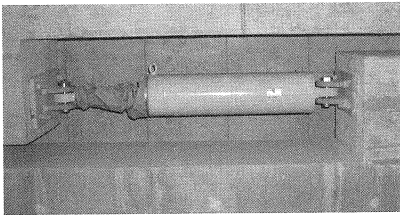
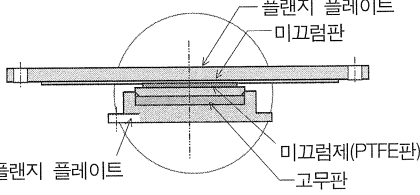
- ① 이력감쇠형 : 강봉댐퍼, 납댐퍼, 마찰댐퍼 등과 같이 주로 변형이력에 의한 에너지 소비를 이용하는 것.
- ② 점성감쇠형 : 점탄성댐퍼, 오일댐퍼 등과 같은 주로 속도 의존형의 점성저항을 이용하는 것.

또한 댐퍼의 요구성능으로는 다음이 있다.

- 감쇠성능
- 변형성능
- 방향성
- 내구성

면진장치에 사용되는 댐퍼의 종류를 분류하여 표 2.3에 나타냈다.

표 2.3 면진장치용 댐퍼의 분류

댐퍼의 종류			방향성
이력감쇠형 댐퍼	납붕댐퍼		이방향
	강봉루프 강재댐퍼		이방향
	U형 강재댐퍼		이방향
점(탄)성 감쇠형 댐퍼	고분자계 점성체 댐퍼		이방향
	오일댐퍼		일방향
마찰감쇠형 댐퍼	미끄러짐 받침 마찰댐퍼	 플랜지 플레이트 미끄럼판 미끄럼제(PTFE판) 고무판	이방향

(2) 면진장치용 에너지흡수장치의 성능조사

① 납봉댐퍼

현재 사용되고 있는 납봉댐퍼의 전단변형성능 및 이력특성을 조사한 결과를 그림 2.15~2.16에 나타냈다. 납봉댐퍼의 경우 보통 면진구조에서 사용하고 있는 이격거리 400mm 이상의 변형능력을 확보하고 있으며, 400mm 이상의 변형 후에도 안정된 이력 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

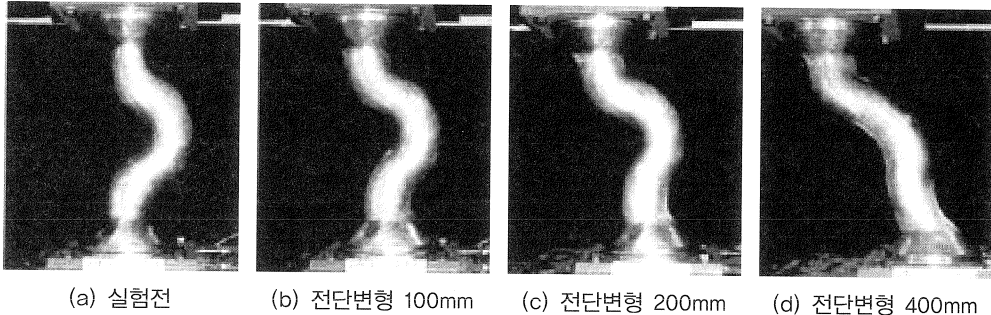


그림 2.15 납봉댐퍼의 전단변형 실험

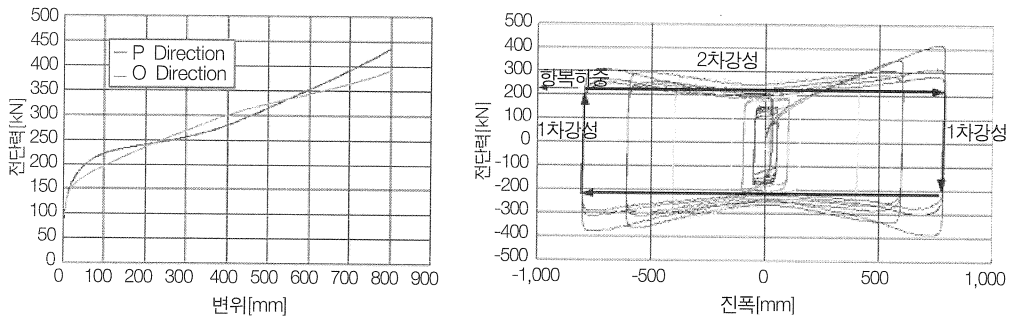


그림 2.16 납봉댐퍼의 하중-전단변형 관계

② U형 강재댐퍼

㉠ 면진U형 댐퍼

면진U형 댐퍼의 적용 사례 및 복원력 특성을 그림 2.17에 나타내었다. 최대변형 800mm 정도까지 안정된 이력특성을 나타내고 있다. 면진U형 댐퍼의 수평성능 및 한계 성능에 대해 표 2.4에 나타냈다. 댐퍼를 안정적으로 사용할 수 있는 한계변형량은 최소 550mm 이상을 확보하고 있으며, 면진구조용 댐퍼로서 매우 적합한 성능을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 이 댐퍼에 사용된 강재의 화학성분을 표 2.5에 나타냈다. 사용강재는 SN490B(건축구조용 압연강재)를 사용하고 있으며, 강재의 감쇠성능은 거의 없는

것으로 나타났다. 그리고 SN490B 강재는 보통 연신을 30% 정도를 나타내고 있으므로 사용강재의 연신율을 더욱 높일 경우 한계변형량을 더 크게 할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 현재 시판되고 있는 면진U형 댐퍼의 품질기준 일람표를 표 2.6에 정리하였다.

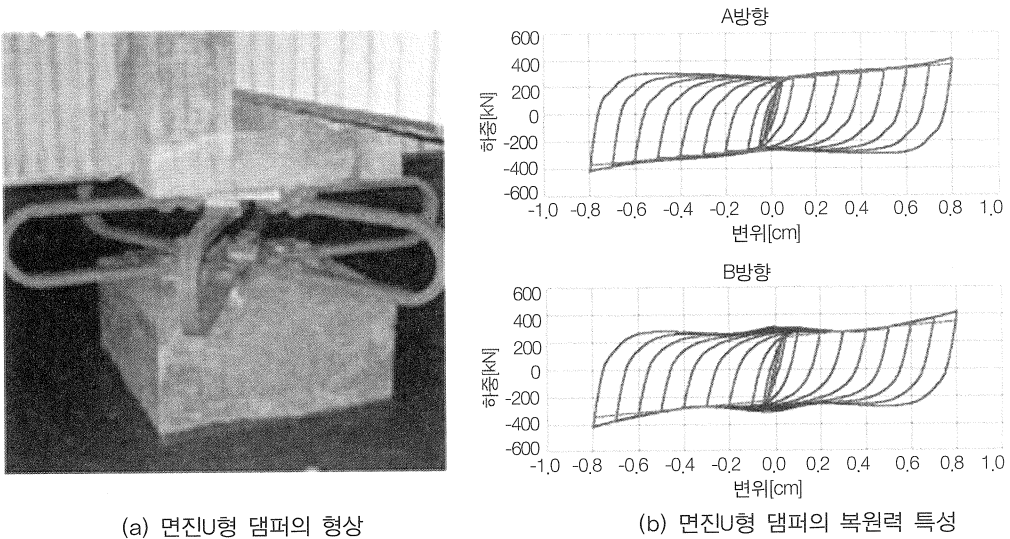


그림 2.17 면진U형 댐퍼의 형상 및 성능

표 2.4 면진U형 댐퍼의 수평성능 및 한계성능

호칭(형식)	성능				
	댐퍼 본수	1차 강성 (kN/m)	2차 강성 (kN/m)	항복과중 (kN)	한계변형 (mm)
SSUD40×4	4	5,920	100	112	550
SSUD40×6	6	8,800	150	168	
SSUD40×8	8	11,800	200	224	
SSUD45×4	4	7,600	128	184	650
SSUD45×6	6	11,400	192	276	
SSUD45×8	8	15,200	256	368	
SSUD50×4	4	8,320	144	232	750
SSUD50×6	6	12,500	216	348	
SSUD50×8	8	16,600	288	464	
SSUD55×4	4	9,600	160	304	850
SSUD55×6	6	14,400	240	456	
SSUD55×8	8	19,200	320	608	

표 2.5 면진U형 댐퍼 강재의 화학성분

SN490B(건축구조용 압연강재 : JIS G 3136)의 화학성분								
종류의 기호	두께(mm)	C	Si	Mn	P	S	Ceq	Pcm
SN490B	6 이상	0.18	0.55	1.60	0.030	0.015	두께 40mm 이하	0.29
	50 이하	이하						
	50 초과 100 이하	0.20 이하					두께 40mm 초과 0.46 이하	

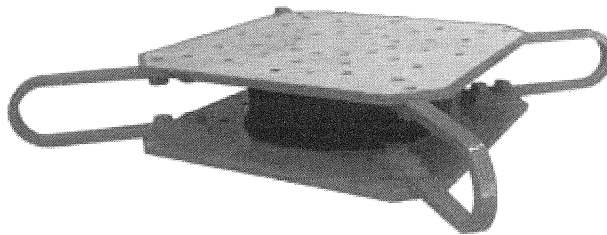
표 2.6 면진U형 댐퍼의 품질기준 일람표

항목			SSUD 40×4	SSUD 40×6	SSUD 40×8	SSUD 45×4	SSUD 45×6	SSUD 45×8	SSUD 50×4	SSUD 50×6	SSUD 50×8	SSUD 55×4	SSUD 55×6	SSUD 55×8
재료의 구성	댐퍼부 댐퍼용 볼트 플랜지 플레이트		SN490B JIS G3136 F10T 상당 JIS B1180 SM490A와 SS400와 SN490B JIS G3106와 JIS G3130와 JIS G3136											
	댐퍼본수(본)		4	6	8	4	6	8	4	6	8	4	6	8
형상 크기	베이스 플레이트 두께	기준치(mm)	28			36			40			45		
		교차(mm)	-2.5~+1.3			-2.5~+1.3			-2.5~+1.6			-2.5~+1.6		
	댐퍼부 길이	기준치(mm)	416			517			602			673		
		교차(mm)	±8			±10			±12			±13		
	댐퍼부 높이	기준치(mm)	231			284			335			374		
		교차(mm)	±10			±10			±12			±10		
한계 성능	한계변형량(mm)		550			6350			750			850		
수평 성능	항복하중 Q_y (kN)		112	168	224	184	276	368	232	348	464	304	456	608
	일차강성 K_1 (kN/m)		5,920	8,880	11,800	7,600	11,400	15,200	8,320	12,500	16,600	9,600	14,400	19,200
	이차강성 K_2 (kN/m)		100	150	200	128	192	256	144	216	288	160	240	320
	항복변위 Q_y/K_1 (mm)		18.9			24.2			27.9			31.7		
제조 격차	Q_y 의 격차(%)		±10											
	K_1 의 격차(%)		±10											
	K_2 의 격차(%)		0											
	경년변화율(%)		감쇠재는 강재 때문에 기계적 제 성질에 경년변화가 발생하는 것은 없다.											
수평 성능의 변화율	온도 의존성	Q_y 의 변화율(%)	(-10℃)/(20℃)			1.03								
			(40℃)/20℃)			0.97								
		3사이클째의 에너지 흡수량의 변화	(-10℃)/(20℃)			1.03								
			(40℃)/20℃)			0.97								
		K_1 의 변화율(%)	(-10℃)/(20℃)			1.00								
			(40℃)/20℃)			1.00								
	주기 의존성	Q_y 의 변화율(%)	(2.8초)/(정적)			1.03								
			(1.7초)/(정적)			1.06								
			(1.1초)/(정적)			1.07								
		K_1 의 변화율(%)	(2.8초)/(정적)			1.00								
			(1.7초)/(정적)			1.00								
			(1.1초)/(정적)			1.00								
	K_2 의 변화율(%)	(2.8초)/(정적)			1.00									
		(1.7초)/(정적)			1.00									
		(1.1초)/(정적)			1.00									

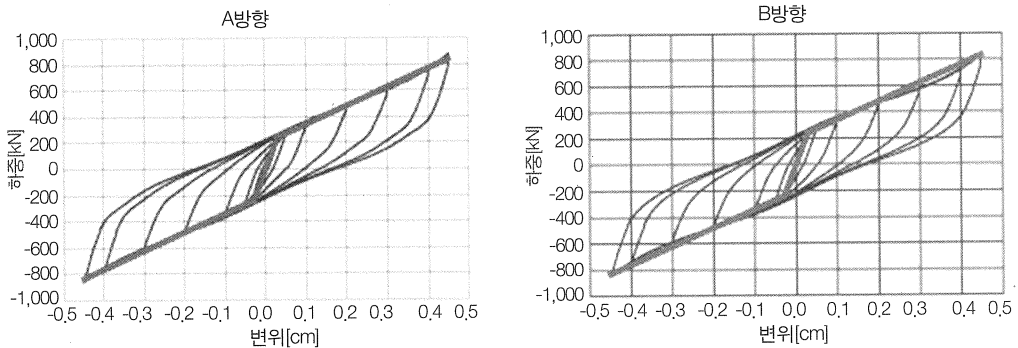
㉞ 적층고무일체형 면진U형 댐퍼

면진U형 댐퍼를 적층고무와 일체형으로 사용하는 적층고무일체형 면진U형 댐퍼의 성능평가를 실험결과 및 형상을 그림 2.18에 나타냈다. 적층고무만을 사용한 경우에는 탄성변형을 하므로 에너지를 흡수할 수 없으나 댐퍼를 함께 사용함으로써 면진장치의 에너지흡수능력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한, 면진구조설계에서 주로 사용하고 있는 이격거리 400mm 이상의 변형이 발생한 경우에도 안정된 거동을 나타내고 있음을 알 수 있다.

이러한 면진장치의 크기에 따른 수평성능 및 한계성능을 표 2.7에 나타냈다.



(a) 면진U형 댐퍼의 형상



(b) 면진U형 댐퍼의 복원력 특성

그림 2.18 적층고무일체형 면진U형 댐퍼의 형상 및 성능

표 2.7 적층고무일체형 면진U형 댐퍼의 수평성능 및 한계성능

강재댐퍼					
호칭(형식)	1차강성 (kN/m)	2차강성 (kN/m)	한계변형 (mm)	항복하중 Q_y (kN)	탄성한도 (mm)
SSUD40× 4+R45-600-4.5×26	4	5,920	100	112	
SSUD45× 4+R45-700-5.3×26	6	8,800	150	168	
SSUD45× 4+R45-800-6.0×26	8	11,800	200	224	
SSUD50× 4+R45-900-6.8×26	4	7,600	128	184	650
SSUD50× 4+R45-1,000-7.5×26	6	11,400	192	276	
SSUD55× 4+R45-1,100-8.3×26	8	15,200	256	368	
SSUD55× 4+R45-1,200-9.0×26	4	8,320	144	232	750

2.3 면진설계 절차

그림 2.19는 ASCE 7-10 17장의 면진해석절차를 기초로 한 면진설계절차를 나타낸 것이다. 면진기본계획을 수립한 후 해석을 수행하는 과정으로 이루어져 있으며, 조건에 따라 해석방법이 등가수평력해석과 동적해석으로 나누어져 있다.

2.3.1 기본 요구사항

ASCE 7-10기준은 ASCE 7-05기준에서 사용하는 점유범주(Occupancy Category)가 아니라 위험도범주(Risk Category)로 건물을 구분하고 중요도계수를 각각 선택하여 사용하도록 요구하고 있다. 이는 ASCE 7-05기준에 암묵적으로 적용된 성능기반설계(Performance-Based Design) 개념이 ASCE 7-10에서는 실제적으로 반영된 것에 따른 것이라고 할 수 있다. 면진시스템을 적용한 건물에서 상부구조를 포함한 건물의 모든 부분은 위험도범주에 상관 없이 중요도계수(I_e)로 1.0을 사용하도록 하고 있다. 응답가속도는 위험도기반최대예상지진(Risk-targeted maximum considered earthquake; MCER) 레벨의 응답스펙트럼 변수 SMS, SM1 값을 사용하여 산정하며, 면진층 상부

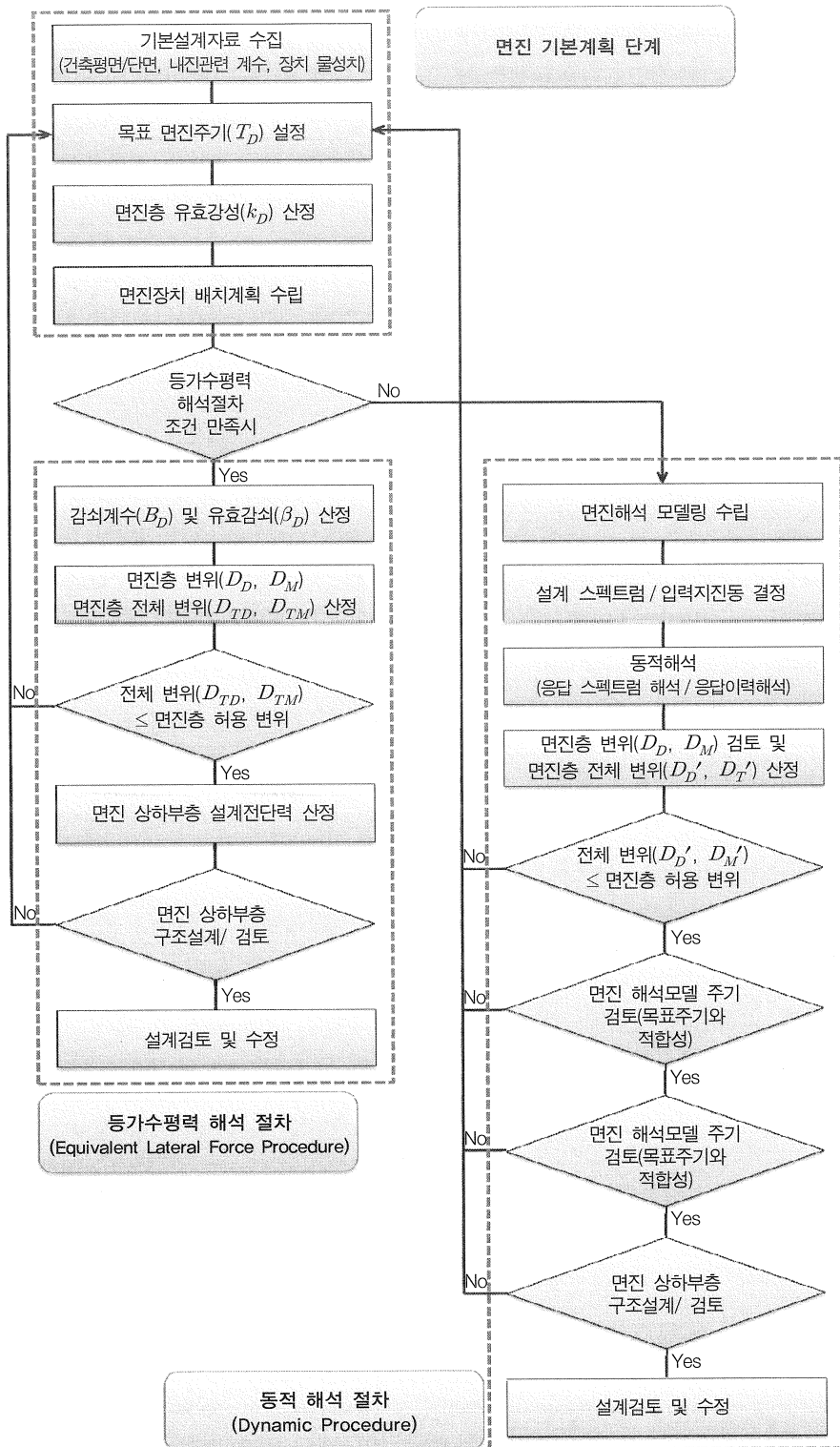


그림 2.19 면진설계 절차

구조형상에 따라 비정형을 구분한다. 또한 면진시스템은 지진 및 풍하중 이외의 환경조건(경년변화, 크리프, 피로, 작동온습도 등)에도 대비해야 하며, 풍하중에 대해서도 면진시스템의 수평변위가 면진층 상부구조의 층간변위값 이내가 되도록 저항시스템을 확보해야 한다. 내화는 기둥, 벽 및 다른 중력저항요소와 같은 요구조건을 만족해야 하며, 수평복원력은 전체 설계변위의 50%일 때의 수평력보다 최소한 $0.0025 W$ 이상 커야 한다. 그 외에도 수직하중에 대한 안전성, 전도, 검사 및 교체, 품질문제, 구조시스템, 구조요소 및 비구조요소 등의 조건을 잘 만족하도록 요구하고 있다. 면진시스템의 검사 및 교체는 반드시 등록된 설계기술자를 통해 이루어져야 한다.

2.3.2 면진시스템에 대한 지반운동

설계스펙트럼에 대해 임의구조물의 지반운동을 결정하는 데 있어서 지반을 기반으로 한(site-specific) 지반운동절차(ASCE 7-10 21)를 사용해야 한다. 특히 F 지반등급에 위치한 건물에 대해서는 지반응답해석(site response analysis)을 수행(ASCE 7-10 21.1)하고, S_1 이 0.6 이상인 지반에 있는 면진건물은 지반운동위험도해석(ASCE 7-10 21.2)을 실시해야 한다. 지반을 기반으로 한 지반운동절차를 요구 또는 적용하지 않는 구조물은 설계지진에 대한 설계스펙트럼을 사용하여 해석할 수 있다. 스펙트럼은 최대예상지진에 대한 지반운동을 통해 산정하되 설계지진스펙트럼의 1.5배보다 작지 않아야 한다.

응답이력해석을 수행할 경우에는 한 쌍의 수평지반운동의 가속도 성분으로 구성되어야 하고, 규모, 단층까지의 거리 등을 고려한 적절한 지반운동을 선택해야 한다. 단, 지반운동은 $0.5 T_D$ 와 $1.25 T_M$ 범위의 주기에 대해 5%가 감쇠된 응답스펙트럼 SRSS의 평균값에 의해 조정되어야 하고, 설계스펙트럼값 이하가 되지 않도록 해야 한다(ASCE 7-10 16.1.3.2). 여기서 면진건물의 T_D 및 T_M 은 설계변위 및 최대변위에서의 유효주기를 의미한다.

2.3.3 면진 해석 절차

면진 기본 사항 수립 및 면진장치 배치계획이 끝나면 해석을 통하여 면진건물의 거동을 확인해야 한다. 일정조건을 만족하는 건물에는 등가수평력해석(ASCE 7-10 17.5)을 사용할 수 있고, 이를 제외한 건물은 동적해석(ASCE 7-10 17.6)을 적용할 수 있다. 다음에 등가수평력해석과 동적해석 절차를 요약하였다.

(1) 등가수평력해석

등가수평력해석 절차를 따라 수행하기 위해서는 다음 열거하는 조건들을 만족해야 한다.

- ① $S_1 < 0.6$ 지역에 위치
- ② 지반분류 A, B, C, D에 위치
- ③ 지붕층 평균 높이가 19.8m(65ft) 또는 4층 이하
- ④ $T_M \leq 3.0s$, $T_D > 3 \times$ 탄성, 기초 고정인 상부 구조물의 고유주기
- ⑤ 면진시스템의 상부 구조물은 정형
- ⑥ 설계변위에서 면진시스템의 유효강성 $> 1/3 \times$ 설계변위 20%의 유효강성
- ⑦ 면진시스템의 수평복원력(ASCE 7-10 17.2.4.4) 확보
- ⑧ 면진시스템의 최대고려지진변위를 전체 최대변위 이하로 제한하지 않음

면진시스템의 변형 특성을 바탕으로 한 면진구조물의 최소수평지진 설계변위(D_D)와 힘은 풍저항시스템의 효과를 포함하고, 실험에 근거한다. D_D 는 목표 면진주기(T_D), 상부 구조물의 자중(W), 그리고 표 2.8에서 면진시스템의 감쇠비(β)를 결정하면 면진층의 설계변위를 응답스펙트럼의 가속도계수(S_{D1})와 응답변위와의 관계로부터 다음과 같이 산출할 수 있다. 표 2.8에서 B_D 는 D_D 에서의 면진시스템 유효감쇠이고, B_M 은 D_M 에서의 면진시스템 유효감쇠이다.

$$D_D = \frac{g S_{D1} T_D}{4\pi^2 B_D}, \quad (T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{Dmin} g}}) \quad (2.8)$$

위와 같은 관계로부터 최대변위(D_M)와 최대변위에서의 유효주기(T_M)는 다음과 같다.

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 B_M}, \quad (T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{Mmin} g}}) \quad (2.9)$$

표 2.8 감쇠계수 B_D or B_M

유효감쇠, β_D or β_M (percentage of critical) ^{a,b}	B_D or B_M
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

면진시스템 요소의 전체 설계변위(D_{TD})와 면진시스템 요소의 전체 최대변위(D_{TM})는 우발적인 비틀림에 의한 부가변위를 포함하여야 한다. 단, 면진시스템이 비틀림에 저항하는 형상을 갖고 있다면 D_{TD} 와 D_{TM} 은 식 (2.10), 식 (2.11)보다는 작아도 되지만, D_D 와 D_M 의 1.1배 보다 크거나 같아야 한다.

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (2.10)$$

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (2.11)$$

면진구조물은 면진시스템, 상부 구조물, 하부 구조물의 요소가 최소한 확보해야 하는 수평력에 대하여 견딜 수 있도록 설계·시공되어야 한다. 상부 구조물은 면진시스템의 효과가 반영되어 밀면전단력(V_s)이 $1/R_I$ 만큼 저감되고, 하부 구조물과 면진시스템은 비면진구조물의 요구조건이 적용되어 밀면전단력(V_b)이 저감되지 않는다. 여기서, R_I 는 면진시스템 상부의 지진력 저항시스템의 형식에 근거한 반응수정계수(R)의 3/8로, 1.0 보다 작거나 2.0를 초과해서는 안 된다.

$$V_b = k_{D_{\max}} D_D \quad (2.12)$$

$$V_s = \frac{k_{D_{\max}} D_D}{R_I} \quad (2.13)$$

상부 구조물의 수평력은 동일한 유효중량(W)과 면진주기(T_D)를 가지며 기초가 고정된 구조물에 대하여 요구되는 등가수평력, 계수설계풍하중에 상당하는 밀면전단력, 그리고 면진시스템을 완전히 작동시키는 데 필요한 수평력의 1.5배 보다 작아서는 안 된다. 층간변위는 R_I 와 같은 면진구조물의 C_d 를 식 $\delta_x = C_d \delta_{xe} / I_e$ (ASCE 7-10 Eq.12.8-15)에 대입하여 계산한 값이 $0.015h_{sx}$ 를 초과해서는 안 된다는 제한을 두고 있다.

(2) 동적해석

동적해석절차는 응답스펙트럼해석과 응답이력해석으로 구분된다. 응답스펙트럼해석은 전술한 등가수평력해석 조건 중 ②, ⑥~⑧을 만족하는 구조물에 적용하고, 응답이력해석은 모든 구조물에 적용할 수 있다.

동적해석을 위한 해석모델은 면진장치의 공간적 분포와 편심질량으로 인한 비틀림을 반영하고, 면진장치의 전도력과 양력 및 하중특성을 고려하여 비선형 이력거동 특성을 통

합한 면진구조물로 한다. 면진시스템과 지진력 저항시스템 비선형 요소들의 강성특성은 면진시스템의 최대유효강성에 근거한다.

상부 지진력 저항시스템 내의 모든 요소가 설계지진 하에서 ‘탄성상태’라고 가정하면, 지진력 저항시스템 요소의 설계내력과 변위 및 각층의 최대변위는 면진구조물의 선형탄성 모델을 사용하여 계산되는 것이 허용된다. 이때, 탄성 요소를 갖는 지진력 저항시스템은 V_s 의 100% 이상의 횡력에 대하여 설계된 비정형 구조시스템과 V_s 의 80% 이상의 횡력에 대하여 설계된 정형 구조시스템을 포함한다.

입력지진은 목표 변수값에 따라 설계지진(전체 설계변위, 횡하중, 횡변위), 최대지진(전체 최대변위)을 사용하고, 최대변위는 두 개의 직교변위의 벡터 합으로 계산한다.(단, 응답이력 시에는 각 시간단계별로 산정한다.)

응답스펙트럼해석의 감쇠는 임계감쇠의 30% 또는 면진시스템의 유효감쇠보다 크지 않은 특정방향의 기본모드에 대한 값 중 작은 값을 사용한다. 그리고 고차모드에 대해서는 고정기초로 가정한 면진시스템 상부 구조물의 응답스펙트럼해석에 적합한 모드 감쇠값을 이용한다.

응답스펙트럼해석을 위한 지진동은 주방향 지진동의 100%와 주방향에 직각인 수평방향 지진동의 30%가 동시에 가진된 진동을 포함한다.

임의 층에서 설계전단력은 식 (2.14)의 층하중(F_x)으로 구한 층전단력 값과 특정방향에 대하여 응답스펙트럼해석으로 구한 밀면전단력과 같은 V_s 값 보다 작아서는 안 된다.

$$F_x = \frac{V_s w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (2.14)$$

응답이력해석은 한 쌍으로 이루어진 적절한 지진동을 3개 이상 사용하여 이루어지는데 지진동은 2.3.2절(ASCE 7-10 17.3.2)에 따라 크기가 조정되어야 한다. 그리고 지진동을 7개 이상 사용하는 경우에는 특정 응답변수의 평균값을 7개 미만 사용하는 경우에는 최대값을 결과값으로 산출한다.

동적해석 시에도 면진시스템과 하부 구조물은 비면진구조에 대한 모든 요구조건과 저감 없는 동적해석으로부터 얻어진 횡력으로 설계하는 데, 이는 V_b 의 90%보다 작으면 안 된다. 상부 구조물은 동적해석으로 얻은 $1/R_f$ 만큼 감소된 하중과 비면진구조의 요구사항을 적용하여 설계되어야 한다. 이때 설계전단력은 상부 구조물의 형태와 해석절차에

따라 값의 허용범위가 달라진다. 응답스펙트럼해석 시 정형인 경우에는 $0.8 V_s \leq V$ or 제한치 $\leq V$ 이고, 비정형인 경우에는 $V_s \leq V$ or 제한치 $\leq V$ 이 된다. 하지만 응답이력해석 시에는 정형인 경우 $V < 0.8 V_s$ 는 허용되지만 $V < 0.6 V_s$ 는 허용되지 않고, 비정형인 경우 $V < 1.0 V_s$ 는 허용되지만 $V < 0.8 V_s$ 는 허용되지 않는다. 만약, 동적해석절차로 결정된 구조요소에 대한 계수전단력이 규정된 최소치 이하이면 모든 응답변수를 적절히 상향 조정해야 한다.

면진시스템의 전체 설계변위는 D_{TD} 의 90%보다 전체 최대변위는 D_{DM} 의 80%보다 작아서는 안 된다. 변위 제한치는 D_D 과 D_M 의 값을 사용하여 평가되어야 한다. 단, D_D 대신 D_D' 를 사용하도록 허용되고, D_M 대신 D_M' 을 사용하도록 허용된 경우를 제외한다. 여기서 T 는 탄성이며 기초가 고정된 면진시스템 상부 구조물의 주기를 나타낸다.

$$D_D' = \frac{D_D}{\sqrt{1 + (T/T_D)^2}} \quad (2.15)$$

$$D_M' = \frac{D_M}{\sqrt{1 + (T/T_M)^2}} \quad (2.16)$$

면진시스템 상부 구조물의 층간변위는 응답스펙트럼해석 시 $\delta \leq 0.015 h_{sx}$, 응답이력해석 시 $\delta \leq 0.020 h_{sx}$ 로 제한된다. 층간변위비가 $0.010 R_I$ 를 초과하는 경우에는 중력하중과 조합된 상부 구조물의 최대고려지진변위에 대한 2차 효과 검토를 필요로 한다.

2.4

면진구조계획

2.4.1 일반사항

면진구조설계는 일반적으로 다음과 같이 요약된다.

- 고정하중, 적재하중, 풍하중 및 적설하중에 대한 상부구조, 하부구조, 기초 및 말뚝의 구조 안전성은 허용응력도법에 의한 검증을 원칙으로 한다.
- 지진력에 대해서도 상부구조, 하부구조, 기초 및 말뚝이 거의 탄성영역에 머물도록 한다.
- 면진장치는 장기하중시 및 지진 시에 안전한 거동을 나타내는 것으로 한다.
- 풍하중에 대해서는 면진층의 수평변형이 작다는 것을 확인한다.
- 면진장치 주변골조와 주변부재가 지진 시에도 구조안전성이 확보되도록 한다.
- 면진장치에 발생하는 축력으로 인한 연직변형 및 크리프에 의한 연직변형량에 대하여 연직방향의 면진이격거리에 여유가 있도록 설계한다.
- 상부구조에 대한 설계 : 상부구조의 기둥과 보 등의 설계는 중력하중과 면진층의 층전단력 계수에 대한 전단력을 고려하여 결정한다.
- 면진층에 대한 설계 : 구조물은 주어진 지진입력에너지 V_E 의 레벨을 견디도록 설계한다.
- 골조의 응력과 변형은 원칙적으로 부재의 탄성강성으로 산정한다.
- 면진장치를 교체하는 것을 전제로 설계하는 경우 설계하중을 고려한다.

(1) 적재하중의 증감과 편재배치는 면진구조의 진동성상에 영향을 미치므로 고정하중에 적재하중의 비율이 큰 공장, 창고 등 건축물의 경우 적재하중 변동을 고려한 설계가 필요하다. 면진건축물에 부동침하가 발생하면 면진층의 수평강성이 상대적으로 작기 때문에 연직하중에 의한 면진층에 수평변형이 발생할 가능성이 있다. 따라서 하부구조, 기초 및 말뚝의 연직하중지지능력 및 침하량 검토는 보다 신중하게 할 필요가 있다.

(2) 상부구조의 비선형거동을 고려한 면진건축물의 지진응답성상을 고려한 면진건축물 상부구조의 손상은 비면진건축물과 비교한 경우 압도적으로 작지만 구조부재 내력의 편차에 원인이 있는 상부구조의 항복전단력 변화에 대해 민감하게 변화한다는 점이다. 이는 면진건축물은 비교적 장주기에서 진동하므로 상부구조에는 지진하중이 거의 정적으로 작용하기 때문에 상부구조가 항복내력을 넘는 지진력을 받는 경우에 급격하게 소성변형이 진행되는 것에 기인한다고 생각된다. 면진건축물에서는 상부구조가 조기에 소성변형하는 것을 허용하면 상부구조에 큰 소성변형이 발생할 가능성이 있기 때문에 면진건축

물의 상부구조는 큰 지진 시에도 거의 탄성영역에 머물도록 설계하는 것이 바람직하다. 면진건축물은 거의 대부분을 면진층에서 지진입력에너지를 흡수하는 구조형식이고 면진장치가 큰 지진 시에도 안정적인 거동을 나타내는 것을 보증하기 위해서는 하부구조, 기초와 말뚝은 탄성영역에 머물도록 설계하는 것이 바람직하다. 면진피트의 옹벽설계에도 유의해야 한다. 또 액상화의 우려가 있는 지반에 건설되는 면진건축물의 경우 기초구조 및 말뚝 설계에 있어서 가능한 한 액상화 해석결과나 동적 상호작용 등의 해석 결과를 고려하는 것이 바람직하다. 면진건축물에 있어서 거의 탄성영역에 머물도록 설계하는 상부구조의 소성변형능력은 설계에 있어서 중요하지 않다. 따라서 일반건축물의 설계법에서 변형능력 확보를 위한 여러 가지 구조관련 규정에 대해서는 설계자의 판단에 따라 적절하게 완화할 수 있다.

(3) 상부구조의 설계용 층전단력으로 전도모멘트에 의해 발생하는 변동축력으로 적층고무에 인장력(미끄럼 면진장치의 경우에는 부상력)이 발생하지 않도록 하는 것이 바람직하다. 변동축력이 크게 발생하는 경우에는 시간이력지진응답해석 등에 의한 상세 검토로 적층고무에 인장시 구조안전성을 확인하는 것이 바람직하다.

(4) 비면진건축물의 경우에는 지진하중이 풍하중을 상회하는 경우 지진하중으로 건축물의 안전성을 확인하고 내풍설계는 생략하는 경우가 많다. 그러나 면진건축물의 경우 면진층의 수평강성이 상부구조 각층의 수평강성에 비해 작기 때문에 풍하중에 의한 면진층의 응답전단력 및 수평변형을 확인하여 안전성에 지장이 없는지 확인한다. 분리장치와 댐퍼를 병용하는 경우 댐퍼의 항복내력을 풍하중에 의한 수평내력 이상으로 설정하는 것이 일반적이다. 댐퍼가 에너지흡수를 하는 경우 풍하중이 장시간 지속적으로 작용하는 현상이 있으므로 댐퍼의 에너지흡수 성능을 확인한다.

(5) 그림 2.20과 같이 건축물의 중량을 지지하는 적층고무 주변에는 수평변형시에 반력분포 합력의 위치가 이동하게 된다. 이 반력분포 합력의 위치와 부재축과의 편심거리에 따라 상, 하부구조에는 부가휨모멘트 M 가 발생한다. 상부구조에서는 이 모멘트를 적층고무 바로 상부의 보와 기둥에 저항시키고 있다. 또 하부구조에서는 기초보, 말뚝, 지반 등에서 저항시키고 있다. 미끄럼 면진장치의 경우에는 장치의 높이가 적층고무에 비해 낮으므로 수평변형시에 발생하는 축력과 부재축과의 편심에 의한 부가휨모멘트 M 은 상부구조 또는 하부구조의 어느 한쪽에 발생한다.

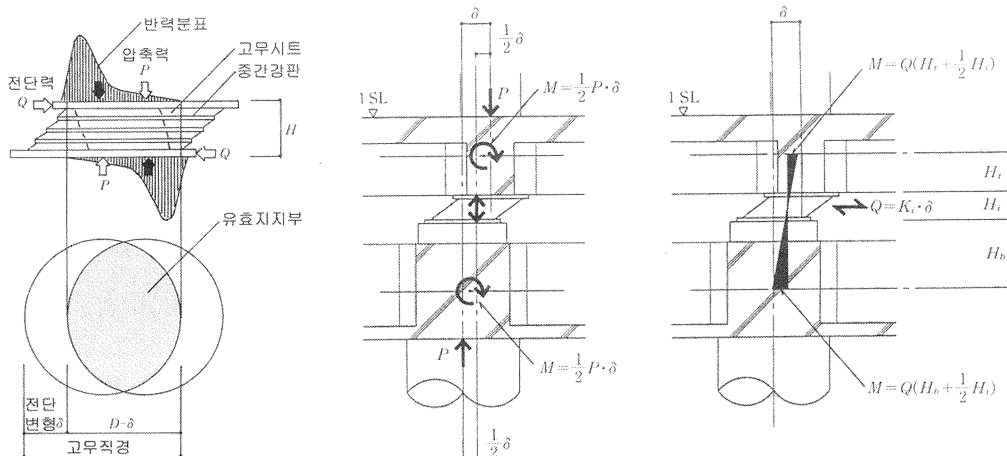


그림 2.20 적층고무의 하중기구와 유효지지부

일반적으로 면진장치는 연결볼트와 플레이트로 구조체에 연결시킨다. 따라서 면진장치의 주변부재는 면진장치의 반력을 확실하게 상부 및 하부구조에 전달할 수 있도록 해야 한다. 면진장치의 연결볼트인 앵커볼트와 스테드볼트는 수평전단력에 의한 휨모멘트에서 발생하는 인장력, 연직력에 의한 휨모멘트($P\cdot\delta$ 효과)로 발생하는 인장력의 조합응력으로 설계한다. 최근에는 면진장치의 기술개발과 해석기술의 발달로 적층고무 분리장치에 인장을 허용하는 설계를 하는 경우도 있으므로 이 경우에는 부상력도 가미하여 구조안전성을 검토한다. 연결플랜지는 앵커볼트에 발생하는 인장력에 의한 플레이트의 면외 휨모멘트에 대하여 두께를 검토한다. 연결플레이트는 플랜지 설계시의 응력을 이용하여 볼트에 발생하는 인장력과 전단력에 대해 설계를 한다. 베이스플레이트는 스테드볼트를 지점으로 하여 앵커볼트의 반력에 의해 발생하는 플레이트의 휨모멘트에 대하여 설계한다. 면진장치를 설치하는 패드 부분의 콘크리트와 배근설계는 축력, 전단력, 휨모멘트를 기초(기초보와 기초슬래브)에 확실하게 전달할 수 있도록 설계한다. 일반적으로 적층고무의 축력 N , 전단력 Q 가 발생하는 경우 스테드볼트의 검증은 다음과 같다.

플랜지 플레이트에 발생하는 휨모멘트 M 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M = Q \times H_i$$

H_i : 적층고무의 높이

스테드볼트는 유효축단면적(축방향) A_t , 축단면적(전단) A_s 의 볼트 n 개를 반경 r 의 원주에 따라 균등하게 배치하는 것으로 하면 다음과 같다.

$$I_p = A_t \times r^2 \times n$$

$$I = I_p \times \frac{1}{2}$$

$$Z = \frac{I}{r}$$

I_p : 스티드볼트의 극2차모멘트

I : 스티드볼트의 단면2차모멘트

Z : 스티드볼트의 단면계수

휨모멘트에 의해 스티드볼트에 발생하는 축방향응력도 σ_M 은 다음과 같다.

$$\sigma_M = \frac{M}{Z}$$

적층고무에 작용하는 축력 N 에 의해서 스티드볼트에 발생하는 축방향응력도 σ_t 는 다음과 같다.

$$\sigma_t = \frac{N}{(n \cdot A_t)}$$

전단력에 의해서 스티드볼트에 발생하는 전단응력도 τ 는 다음과 같다.

$$\tau = \frac{Q}{(n \cdot A_s)}$$

인장과 전단력의 조합응력상태에서 항복조건으로 스티드볼트의 검토를 한다.

$$\sigma^2 + 3\tau^2 \leq \sigma_y^2$$

σ : 스티드볼트의 인장응력도

σ_y : 스티드볼트의 항복응력도

(6) 장기하중일 때와 지진하중(단기하중)시 분리장치의 수직방향 변형과 크리프(Creep)에 의한 연직변형량에 대하여 연직방향의 면진이격거리는 충분히 여유있는 치수로 설정한다. 장기하중시 각 분리장치의 연직변형량에 큰 차이가 발생하면 상부구조체에 부동침하와 동등한 부정정응력이 발생하게 된다. 또 크리프에 대해서는 크리프량의 평가(예측식)를 각 장치 제조자가 제시하고 있지만, 제조업체와 적층고무의 종류별로 다르다는 것에 유의해야 한다. 특히 다른 종류의 적층고무 분리장치를 병용하는 경우에는 크리프의 특성을 적절하게 파악하여 설계에 반영할 필요가 있다. 또 적층고무의 크리프에 발생하는 몇 mm

정도의 연직변위에 대한 면진장치의 변형능력을 확인한다. 댐퍼의 감쇠성능은 면진층의 복원력 특성에 영향을 미치지 않도록 한다.

(7) 면진구조에서 상부구조는 허용응력도 설계를 한다. 지진입력에너지의 대부분을 면진층에서 흡수하기 때문에 원칙적으로 상부구조는 지진에너지의 흡수능력을 기대하지 않는다. 오히려 천천히 흔들리면서 면진층에서 전달되는 준정적인 수평력에 대해 강도적으로 견딜 수 있으면 된다. 따라서 상부구조에 가해지는 최대충전단력으로 구한 수평력에 대해 상부구조가 단기허용응력도 이내에 머물도록 설계한다.

상부구조의 설계용전단력은 예비응답해석결과를 참조하여 결정한다. 상부구조의 질량, 강성의 편재로 발생하는 비틀림진동은 면진층을 비틀림이 발생하지 않도록 설계할 수 있으므로 상부구조는 비틀림진동에 의한 응답증폭이 없기 때문에 상부구조는 정적인 수평력에 대한 비틀림을 고려하여 설계하면 된다.

(8) 면진층의 설계는 분리장치와 댐퍼의 설계에서 설계된 면진장치를 편심이 발생하지 않도록 균형있게 배치하는 것이 중요하다.

① 적층고무 분리장치의 배치는 면진층에서 비틀림이 발생하지 않도록 하기 위해 상부구조의 질량 중심과 면진층의 강심을 가능한 한 일치시키는 것이 바람직하다. 실제 설계에서는 축력과 수평강성의 비율이 일정하게 되도록 적층고무 분리장치를 선택하면 중심과 강심에 큰 차이가 거의 발생하지 않는다. 기본적인 적층고무분리장치의 배치는 각 기둥 하부에 하나씩 배치하는 것을 원칙으로 한다. 그러나 기둥이 많고 각 기둥 하부에 하나의 적층고무 분리장치를 배치할 경우에 적층고무의 면압이 작아지게 되어 건축물 중량에 비해 면진층의 수평강성이 커지게 되는 경우가 있다. 이러한 경우 상부구조와 면진층 사이에 전이층을 설치하여 적층고무의 수를 작게 하여 수평강성을 작게 하는 방법도 있다.

② 댐퍼의 배치도 적층고무 분리장치 배치와 마찬가지로 면진층에서 면진장치의 강심을 상부구조의 중심과 일치시키는 것이 원칙이다. 부정형인 건축물의 기둥 하부에 한정된 크기의 적층고무 분리장치를 배치하면 면압이 일정하게 되지 않아 상부구조의 중심에 적층고무 분리장치의 강심을 일치시킬 수 없는 경우도 발생한다. 분리장치와 분리형의 면진구조에서는 댐퍼를 면진층의 강심과 상부구조의 중심과 일치시켜서 면진층에서 비틀림저항을 크게 하여 비틀림진동을 억제할 수 있다. 또 댐퍼를 건축물 외주부에 배치하여 면진층의 비틀림강성을 크게 하여 비틀림변형에 효과적으로 대응할 수 있다. 면진층의 강심과 상부구조의 중심과 일치하고 있는 경우

에는 상부구조에 강심과 중심의 차이에 의한 편심이 발생하여도 면진층의 비틀림 진동은 아주 작다.

(9) 골조의 구조해석은 탄성강성을 고려하는 것을 원칙으로 하지만, 짧은스팬의 보와 잡벽이 설치된 보 등 응력이 집중되는 부재의 균열이 층 강성저하에 큰 영향을 미치는 경우에는 균열을 고려한 등가강성을 이용하여 구조해석을 할 필요가 있다.

고층건축물과 같이 연직변형의 영향이 크다고 판단되는 경우에는 연직강성을 적절하게 평가한 모델화를 한다.

면진구조설계에 있어서 면진층의 강심과 중심을 일치시키는 것이 중요하다. 면진층에 편심이 없고 상부구조가 거의 탄성영역인 경우에는 상부구조에 발생하는 층간비틀림각은 상부구조에서 정적으로 구한 편심거리에 최대응답층전단력을 곱한 비틀림모멘트에 의한 비틀림각과 거의 일치하여 비틀림진동이 증폭되는 경우는 없다. 따라서 상부구조에 편심이 있는 경우에도 비틀림변형을 고려하지 않는 구조해석으로 구한 층전단력을 이용하여 상부구조의 비틀림변형을 정적으로 평가하면 된다.

면진층의 편심을 가능한 한 작게 되도록 면진장치를 배치한다. 면진층의 비틀림강성이 커지도록 면진장치를 배치하는 것이 바람직하다. 분리형 댐퍼의 경우 방향성에 유의한다. 유체형 댐퍼는 방향성이 있어 면진층 전체로서 감쇠성능이 방향성을 지니지 않도록 배치할 필요가 있다.

또 기존 건축물의 내진보강방법으로 면진구조를 적용하는 경우도 있다. 기존 건축물의 경우 현재 건축법을 적용하면 내진설계가 적용되지 않는 경우도 있으므로 보유수평내력이 부족한 경우도 있다. 또 건축물의 노후화와 균열 등에 의한 강성저하가 있는 경우도 많다. 따라서 기존 건축물을 면진구조로 내진보강하는 경우에는 구조해석시에 내력과 강성을 적절히 평가할 필요가 있다.

(10) 면진장치를 교체하는 것을 전제로 설계하는 경우 교체할 때의 Jack up 반력을 설계하중으로 고려할 필요가 있다. 이 경우에는 설계단계에서 교체방법에 따른 하중을 고려하여 설계하는 경우와 교체시에 면진장치의 주위를 보강하는 방법으로 하는 경우가 있다. 주위를 보강하기 위한 비용과 건축적인 제약, 교체시 필요로 한 비용을 건축주, 설계자가 종합적으로 판단하여 결정해야 한다. 특히 탄소성 복원력 특성을 지닌 이력형 댐퍼를 사용하는 경우에는 지진종료 후에 잔류변형이 발생할 가능성이 있으므로 건축물에 허용되는 잔류변형량을 최대응답변위에 대한 설계수평변위의 여유도 등을 고려한 다음에 설정하고, 원위치로 되돌리는 방법과 반력기구의 필요 여부를 검토할 필요가 있다.

2.4.2 구조설계 순서

면진구조의 설계순서는 다음과 같이 요약된다.

단계 1: 대상 건축물의 제반 조건 검토

단계 2: 설계 방침과 목적

단계 3: 면진층의 특성값 가정

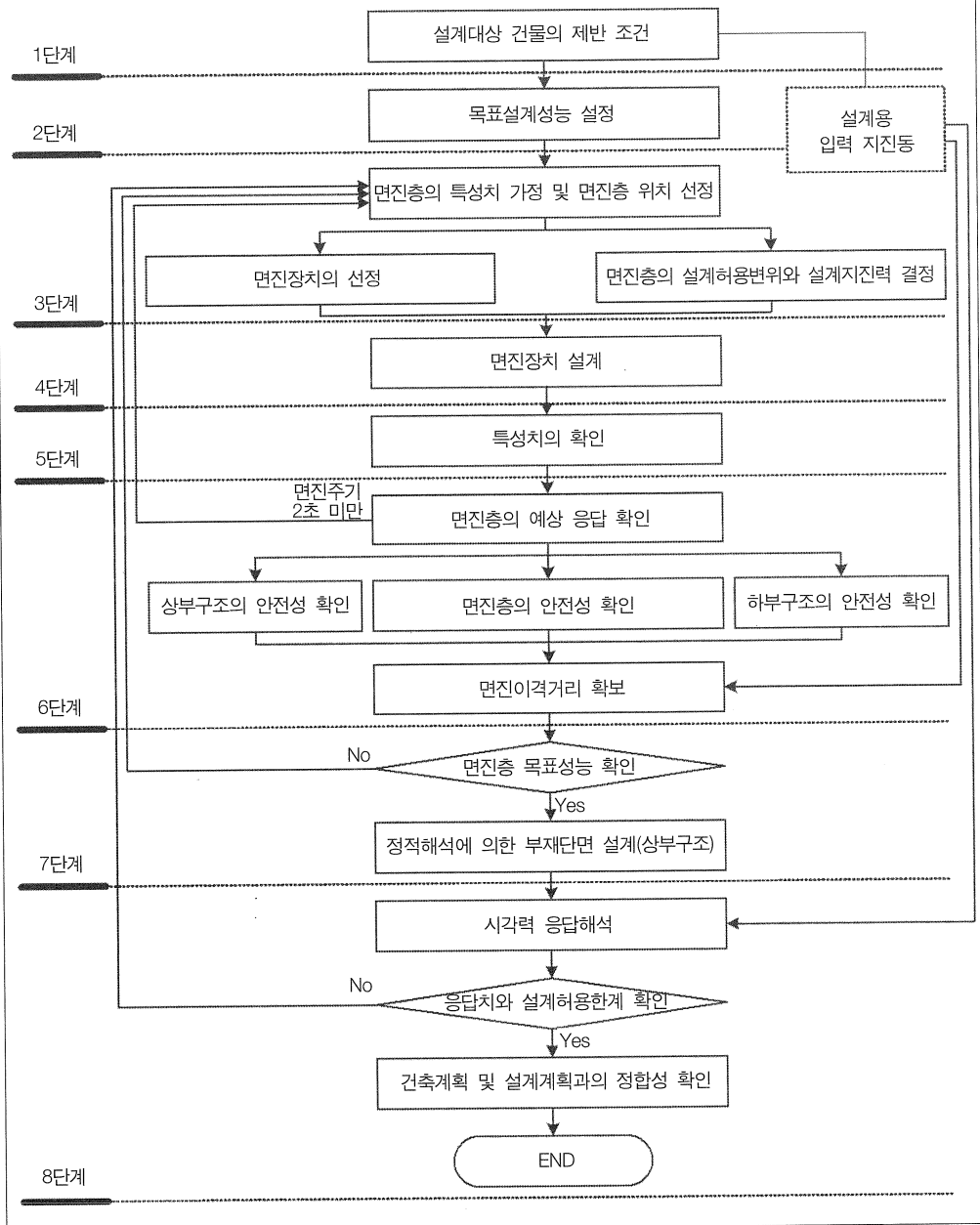
단계 4: 면진장치 설계

단계 5: 특성값 확인

단계 6: 면진층의 예상응답 확인

단계 7: 면진층 목표성능 확인

단계 8: 지진응답해석에 의한 안전성 확인



면진건축물의 구조설계시 유의해야 할 점은 다음과 같다. 면진층 계획에서는 면진장치의 모델화뿐만 아니라 면진층 전체의 중심과 강심을 맞추도록 면진장치의 배치계획과 면진층의 모델화를 하도록 한다.

시간이력해석으로 예비검토를 할 경우 해석모델은 상부구조를 강체로 간주한 1질점 모델을 이용하는 경우가 많다. 이러한 경우에는 면진층의 응답변위 파악과 상부구조의 설계용 전단력 설정을 목적으로 하고 있다. 그러나 고층 면진건축물과 같이 상부구조를 강체로 취급할 수 없는 경우에는 상부구조 진동모드의 영향을 무시할 수 없는 경우에 예비해석 단계에서도 다질점 모델을 이용하는 것이 좋다. 시간이력응답해석에 이용하는 해석 모델은 가능한 한 면진건축물의 실정에 적합한 모델을 사용하는 것이 바람직하다. 비틀림진동모델과 건축물-지반의 상호작용 해석모델에 의한 검토를 해야 하는 경우도 있다. 면진구조는 면진장치와 댐퍼로 구성되는 면진층의 응답을 예측하는 방법으로 에너지평형법을 이용한 응답포락법과 응답스펙트럼법이 있다. 여기서는 에너지평형법에 의한 응답 예측방법에 대하여 설명하고자 한다.

면진구조는 면진층의 설치 위치가 중요하다. 또 면진구조의 설계를 위한 예비해석과 시간이력해석을 어떻게 대응시키는가도 중요하다.

새로운 구조형식인 면진구조에 적용해야 하는 내진설계에 고려해야 하는 것은 다음과 같다.

- ① 기존 내진설계법과 기본 맥락을 유지한다.
- ② 면진구조 고유의 특성을 충분히 고려한다.

내진설계는 지진으로 구조물에 투입되는 지진입력에너지의 전부를 구조물이 손상을 입지 않고 구조물에 흡수되는 구조라고 할 수 있다. 면진구조는 면진층의 강성을 상부구조에 비하여 매우 작게 하여 지진으로 투입되는 지진에너지 총량(총에너지입력)을 면진층에 집중시키는 구조이다. 또 면진층의 최대변형을 억제하기 위하여 에너지 흡수장치로 댐퍼를 설치한다. 상부구조로 입력되는 에너지는 작아서 일반구조물에 요구되는 소성에너지 흡수능력을 발휘하기 위한 여러 가지 제약조건으로부터 설계가 자유로워진다.

포락응답 예측법은 시간이력 응답해석을 종합적으로 파악하는 방법이라고 할 수 있다. 이 응답예측법을 이용하여 구조계획에 여러 가지 장치의 선택 등을 가능하게 하는 설계법의 기초라고 볼 수 있다. 따라서 상세한 특징을 간과한 거시적 예측법이기에 때문에 이를 보완하기 위하여 구체적인 조건을 고려하여 상세한 해석이 필요하게 된다는 점을 잊어서는 안 된다. 적층고무 면진장치의 수평강성 k_f 는 휨변형 성분이 거의 없기 때문에 고무의 전단강성으로 나타낼 수 있다.

$$k_f = \frac{GA}{h}$$

G : 고무재료의 전단탄성계수, A : 적층고무의 단면적 ($A = \frac{\pi D^2}{4}$)

h : 고무층 전체의 두께 ($h = n_R \times t_R$, n_R : 고무 층수, t_R : 고무 1층의 두께)

적층고무 면진장치의 연직강성은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{ab} = \frac{E_c E_b}{E_c + E_b}$$

$$E_c = 3G(1 + 2\kappa S_1^2)$$

$$S_1 = \frac{\pi D^2}{4\pi D t_R} = \frac{D}{4t_R}$$

단계 1 : 설계대상 건축물의 제반조건

- ① 지진 시 건축물의 총중량 W_e 를 산정한다. W_e 는 면진건축물의 주기와 면진층에 작용하는 전단력을 산정할 때 사용한다.
- ② 지반의 종류에 대해 판단한다. S_D 지반에서는 지진 시 지반의 소성화까지 고려한 탁월주기가 면진건축물의 주기에 너무 근접하지 않도록 면진건축물의 주기를 충분히 길게 할 필요가 있다.

단계 2 : 목표설계 성능 설정

면진구조의 성능을 충분히 발휘시키기 위하여 건축물의 목적에 부응하는 설계방침을 설계자가 결정한다.

- ① 설계용 지진동의 입력에너지 속도환산치 V_E 의 크기는 지반 종류, 건축물 중요도 등을 고려하여 결정한다.
- ② 설계밀면전단력계수 α_a 를 설정한다.
- ③ 설계허용변위 δ_a 를 결정한다.
- ④ 면진건축물의 주기 T_f 를 설정한다.
- ⑤ 댐퍼의 항복전단력계수 α_s 를 결정한다. 이는 면진층에 예상되는 최대응답변위, 최대응답층전단력 등과 풍하중을 고려하여 결정한다.

단계 3 : 면진층의 특성값 가정

밀면전단력계수 α_1 이 설계밀면전단력계수 α_a 이하에서 면진층의 최대변위 $\delta_{\max}$ 가 설

계허용변위 δ_a 이하가 되도록 면진건축물의 주기 $\overline{T_f}$ 및 댐퍼의 항복전단력계수 $\overline{\alpha_s}$ 를 가 정한다.

면진장치(천연고무의 적층고무 면진장치, 납붕삽입 적층고무 면진장치, 댐퍼 등)에는 설계치에 대한 제품의 편차, 온도변화 및 경년변화 등에 의한 면진장치의 강성 변화와 댐퍼의 항복내력에 대한 편차가 존재하므로 장치제조메이커의 특성값을 파악하여 어느 정도 여유를 지닌 특성값을 설정하도록 한다.

단계 4 : 면진장치 설계

면진장치 설계는 면진층의 특성값에서 가정한 면진장치의 수평강성 $\overline{k_f}$ 및 댐퍼의 항 복전단력계수 $\overline{Q_y}$ 를 이용하여 적층고무 면진장치 및 댐퍼의 종류, 성능, 배치 등을 고려하 여 면진장치의 기본설계를 진행한다. 적층고무 면진장치와 댐퍼는 제3장을 참고로 설계한 다. 감쇠성능을 지니고 있는 적층고무 면진장치에 대해서도 적층고무 면진장치로서의 탄 성성능과 댐퍼로서의 감쇠성능으로 분리하여 고려한다면 예비설계에서 검토할 수 있다.

(1) 적층고무 분리장치 설계

- ① 상부구조 기초부에 있는 기둥의 연직력 분포와 최대치 및 최소치를 파악한다.
- ② 면진건축물의 주기 $\overline{T_f}$ 에서 적층고무 면진장치의 평균면압을 설정한다. 초기의 면 진건축물의 주기 $\overline{T_f}$ 는 2초 정도였지만, 최근에는 면진건축물의 대형화와 장치의 개수를 적게 하는 등 면압을 높게 설정하기도 한다. 면진건축물의 주기 $\overline{T_f}$ 가 4초 이상으로 면진효과가 높은 건축물의 경우 고면압으로 설정하기도 한다. 일반적으로 는 $50\text{kg/cm}^2 \sim 150\text{kg/cm}^2$ 의 면압에서 사용되고 있다.
- ③ 면진층의 설계변위 δ_a 의 2배 이상이 되도록 적층고무 면진장치의 최소직경을 결정 한다.
- ④ 각 적층고무 면진장치의 직경을 기둥축력을 기준으로 결정한다. 장치 설치기둥축력 이 작고 적층고무 면진장치의 직경이 평균 면압이 아닌 최소직경으로 결정되는 것 이 많을 경우 면진층의 강성이 커져서 면진건축물의 주기가 가정주기보다 짧아지 는 경우가 있을 수 있다. 이 경우에는 상부구조의 구조설계(기둥 배치 등)를 재검 토할 필요가 있다.
- ⑤ 각 적층고무 면진장치의 수평강성 합계가 가정한 $\overline{k_f}$ 가 되도록 각 적층고무 면진장 치를 설계한다.

(2) 댐퍼의 설계

- ① 댐퍼의 종류를 결정한다.
- ② 댐퍼의 항복변위 δ_y 가 설계변위 δ_a 에 비해 충분히 작은 것을 확인한다.
- ③ 각 댐퍼의 항복전단력 합계가 가정한 $\overline{Q_y}$ 가 되도록 댐퍼의 수량을 결정한다.
- ④ 댐퍼는 면진층에 편심이 발생하지 않도록 면진층의 강심 위치와 상부구조의 중심 위치가 일치하도록 배치한다. 또 비틀림강성을 크게 하기 위하여 댐퍼는 가능한 한 면진층 평면의 외측에 배치하는 것이 좋다.

단계 5 : 특성값 확인

단계 4에서 설계한 각각의 면진장치 특성값을 이용하여 면진층의 특성값 k_f , Q_y 를 구하여 단계 3에서 가정한 $\overline{k_f}$, $\overline{Q_y}$ 에 거의 일치하는지 확인한다. 이들 값의 차이가 크고, 적절한 면진장치를 설계할 수 없는 경우에는 (3)으로 돌아가서 면진층의 특성값을 수정하여 재검토한다.

$$k_f = \sum k_h \text{ (t/cm)}$$

$$Q_y = \sum f_{yd} \text{ (t)}$$

k_f : 각 면진장치의 수평강성(t/cm), f_{yd} : 각 댐퍼의 항복내력(t)

단계 6 : 면진층의 예상응답 확인

단계 3, 4, 5에 의해 설계된 면진장치에 대한 제작 및 시공오차를 고려한 최대응답변위 및 최대전단력계수를 계산한다.

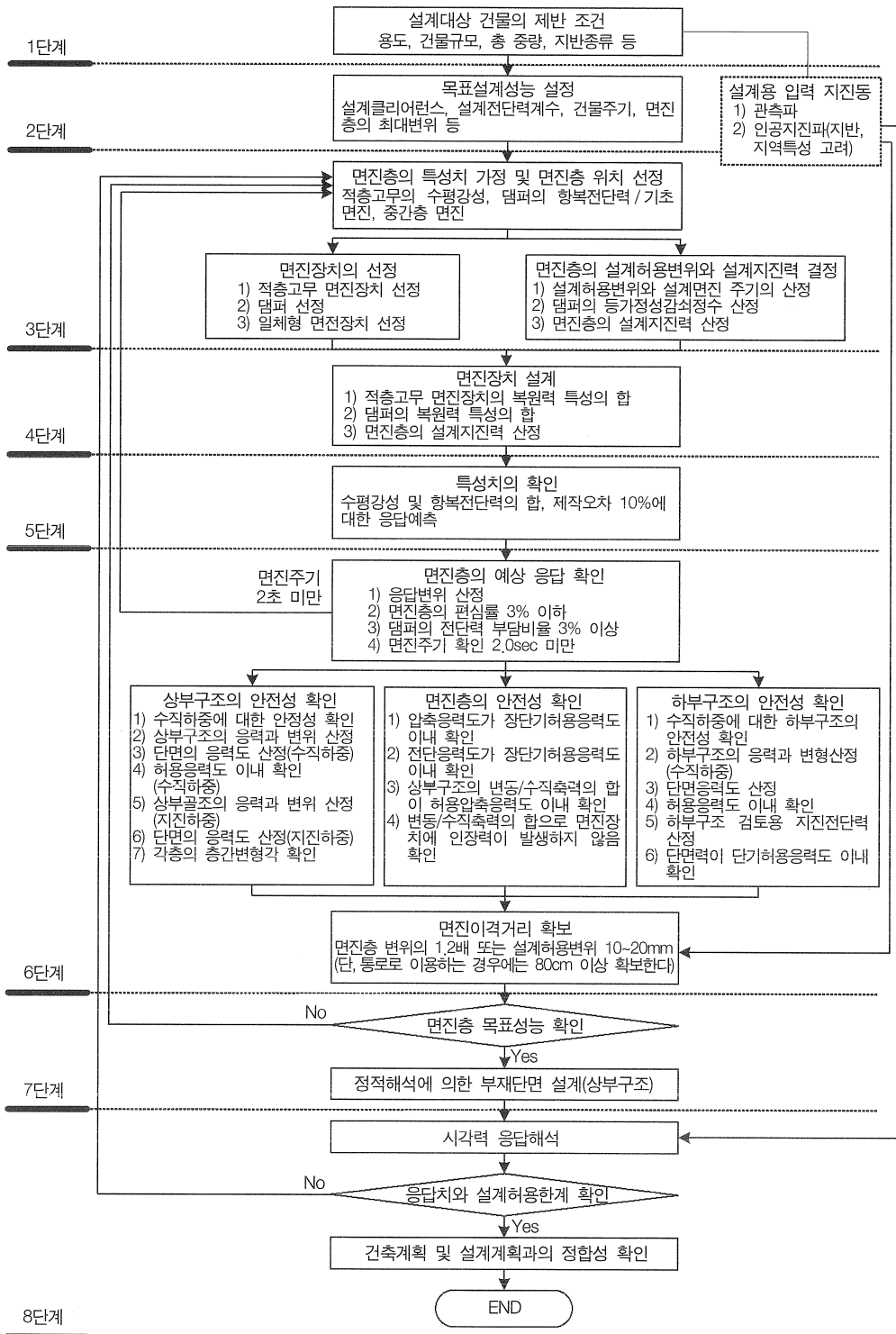
단계 7 : 면진층의 목표성능 확인

예상응답 확인에서 면진층의 예상최대변위가 설계목표치의 최대변위를 상회하지 않는 것을 확인한다. 또 면진층의 예상 응답전단력계수가 설계목표치의 전단력계수를 상회하지 않는 것을 확인한다.

단계 8 : 시간이력지진응답해석으로 안전성 확인

면진구조 건축물은 면진층에서 상부구조의 전중량을 지지하고 일반 건축물에서는 허용하지 않는 지진 시에 변형을 허용하게 되므로 최종적으로 시간이력해석을 하여 안전성과 여유도를 확인한다. 그러나 예비설계 단계에서는 포락해석법으로 지진응답을 예측하거나 면진층의 특성을 고려한 간략모델로 지진응답성능을 검토하는 것도 하나의 방법이다.

■ 설계순서 상세



2.4.3 연약지반에 건설하는 면진건물

연약지반에 설치하는 건물에는 면진, 비면진건물 상관없이 암반지반에 비하여 큰 지진 입력에너지가 작용할 가능성이 지적되고 있다. 설계자는 적절한 지진입력레벨을 설정한 후, 면진부재의 변형능력과 에너지흡수능력, 상부구조의 내력레벨 등에 대해 어느 정도 여유를 두는 것이 적절한 설계방법이라 할 수 있다. 연약지반에 건설하는 면진건물에 대한 1995년 일본의 실적은 5건이 있다. 수평강성에 작은 면진부재를 사용하여 면진층의 수평강성에 기준하여 고유주기를 매우 길게 하는 것으로 면진효과는 진도 5 정도의 지지거동 응답 기록으로 확인되었다.

2.4.4 면진구조와 상하 지진동

종래에 상하 지진동을 설계외력으로 취급하여 검토하는 경우는 적었다. 이는 구조물의 중력가속도에 의하여 받는 하중(장기하중)에 비교하여 지진에 의한 상하방향의 관성력은 작다는 판단과 상하 지진동에 의한 지진피해가 거의 없다는 것에 기인한 것이다.(1995년 한신 대지진의 영향으로 상하 지진동을 고려하기도 함.)

일반적으로 적층고무는 기둥부재와 동일한 연직강성을 가지고 있어, 면진·내진건물은 상하 지진동에 대하여 동등한 응답을 나타낸다. 또한 수평 지진동에 대해서는 면진층의 수평강성을 적게 함으로써 면진건물에서의 지진입력을 대폭적으로 저감할 수 있다.

건물이 무너지고 수용물이 전도하고 이동하는 것은 주로 수평 지진동 또는 수평 지진동+상하 지진동에 의한 것이고, 상하 지진동이 큰 직하형 지진 시에도 면진건물에서 피해는 내진건물에 비교하여 훨씬 작아진다. 그러나 컴퓨터기 등 가속도 자체의 발생이 문제가 되는 경우에는 별도의 상하 지진동에 대한 대책을 세워 안전성을 높이는 것이 유효한 대책이라고 할 수 있다.

건물 외부의 교통진동, 기계진동에 대해서는 적층고무의 연직강성과 면압 등을 적절하게 설정하는 것으로 방진효과를 기대할 수 있다.

2.4.5 상부 구조형식과 수평강성

상부 구조체만의 고유주기는 건물 높이, 구조의 종류, 가구 형식에 많이 의존한다. 면진구조는 개념적으로 우연한 수평 스프링 위에 1질점으로 간주한 강체가 있는 것이고 수평강성이 큰 건물에서는 높이방향으로 거의 일정한 바닥 응답가속도, 지진력, 층간변

위가 저감된다. 상부구조의 수평강성이 작은 건물에서는 내진구조에 비하여 면진에 의한 효과는 충분히 얻을 수 있으나 하부층에 비하여 상부층에서 큰 바닥 응답가속도가 발생된다.

수평강성이 큰 RC조, SRC조, 벽구조, 브레이스구조는 면진구조에 적합한 구조 형식이라고 할 수 있다. 후자에 해당하는 S조, 목조 등 일반적으로 수평강성이 낮은 경우에도 각층의 지진 시 응답량은 다질점계 모델을 이용하여 확인할 수 있다.

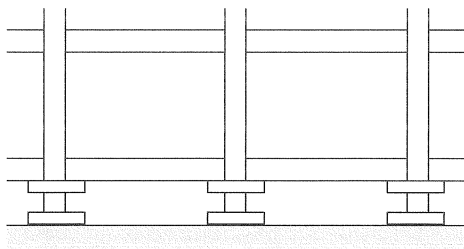
2.4.6 면진층의 수평강성을 작게 하는 구조계획

면진구조에 의한 효과를 높이기 위해서는 면진층의 수평강성을 아주 작게 하여 건물의 고유주기를 길게 할 필요가 있다. 그림 2.21에서 (a)는 적층고무의 직경을 작게 하여 면진층의 수평강성 저감을 목표로 한 것이지만 적층고무의 변형능력에 따른 제약을 받는다. (b)는 큰 직경의 적층고무로 가동변형량을 확보한 것이지만 면진층의 수평강성이 낮아지지 않아 충분한 면진효과를 기대할 수 없다. 면진효과를 높이기 위해서는 ㉔와 같이 어느 정도 큰 적층고무를 이용하고 또한 1개당 지배면적을 크게 하여 총수를 줄이는 구조계획이 바람직하다.

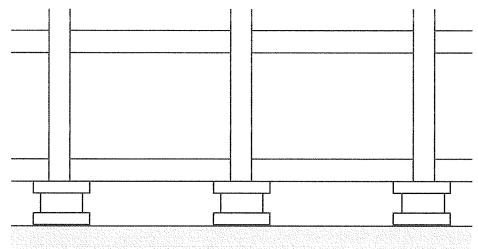
그림 (c)에 비하여 비용이 많이 들어 일반적이라고는 할 수 없지만 상부구조 최하층에 강성이 높은 기반을 설치하여 기둥과 상관 없이 적층고무를 배치(d)하는 것도 하나의 방법이다.

2.4.7 적층고무에 인장력을 발생시키지 않는 구조계획

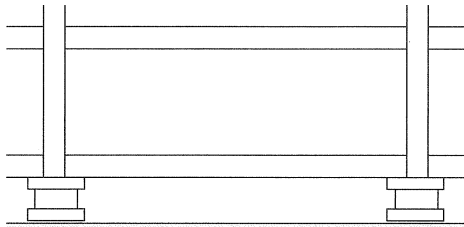
적층고무 인장전단 시의 거동은 압축전단 시에 비하여 실험데이터 수가 적어 아직 충분히 성능이 확인되어 있다고는 말하기 어렵다. 이 때문에 적층고무와 구조체의 접합을 통상 볼트접합으로 하는 대신에 앵커 핀접합으로 하여 적층고무 본체에는 인장력이 걸리지 않는 방법을 채용하는 사례도 있다. 구조계획상 형상비(H/B, aspect ratio)를 가지는 건물의 경우 축력을 건물의 양단으로 집중시킴으로써 인장력 발생을 제한하는 것도 가능하다.



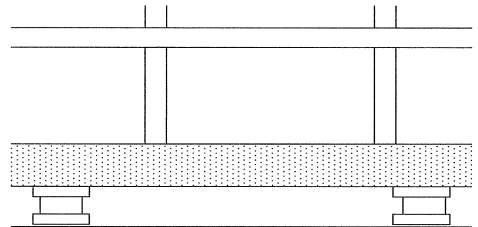
(a) 적층고무 직경이 작고 한계변형량도 작음



(b) 면진층의 수평강성이 크고 주기가 충분하지 않음



(c) 적절한 적층고무 직경과 구조계획

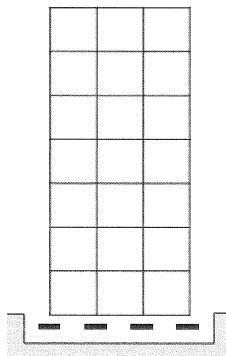


(d) 강한 지반에 대한 적층고무 배치의 자유도

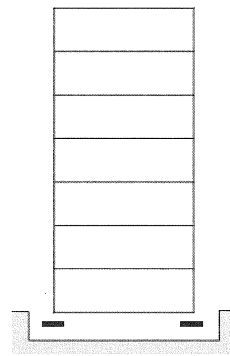
그림 2.21 면진층의 수평강성을 작게 하는 구조계획

그러나 형상비가 면진건물의 계획상 제약조건 중 하나인 것은 말할 것도 없다. 상부구조를 강체로 가정하여 입력지진에너지와 면진부재의 흡수에너지가 평형을 이루는 조건에서 지진 시 전도모멘트에 의해 적층고무에 인장력이 발생되지 않는 면진건물의 면진층 개념을 그림 2.22에 나타냈다.

이 그림에서 형상비 상한은 아이소레이터군만의 수평강성에 의한 고유주기(T_f)에 비례하여 커지게 된다. 즉 면진층의 수평강성과 면진부재 배치를 적절하게 설정하면 형상비가 큰 세장한 건물에 면진부재를 적용하는 것도 충분히 가능하다.



인장력이 생기지 않는 구조계획



인장력이 생기는 구조계획

그림 2.22 구조계획에 따른 적층고무 인장력 발생 유무

2.4.8 이격거리

면진건물의 지진 시 구조안전성은 면진층에서의 하중지지성과 변형능력 및 에너지흡수능력에 따른다고 말할 수 있다. 면진부재에 관해서는 충분한 성능을 가진 것이 개발 및 설계되고 있어 내진안전성은 충분히 확보되어 있다. 건물에 관해서는 예상하지 못한 대지진 시에 충돌시키는 것으로 변형을 멈추게 하는 방법도 있지만, 일반적으로는 충돌이나 접촉현상이 발생되지 않도록 해야 한다.

수평방향으로는 상부구조 지진 변형량의 1.5~2.0배 정도 이격거리를 확보하면 좋다. 연직방향의 이격거리는 적층고무의 변형(Creep 변형, 온도에 의한 변형, 수평변형 시의 연직변형)으로서 고무 층 두께의 몇 %를 상정하고, 이에 시공정밀도를 고려하여 설정할 필요가 있다.

또한 상부구조의 가동범위는 건물 존속기간 중 장애가 없도록 유지하여야 하고, 소유자, 사용자, 관리자 등의 유지관리를 고려하여 설계자가 건물 준공 전에 다음과 같은 조치를 마련하는 것이 바람직하다.

- ① 유효한 유지관리체제 확립
- ② 면진건물의 건축주, 사용자용의 매뉴얼 작성
- ③ 면진층 등 가동부 주변에 주의를 환기시키는 표지판 계획

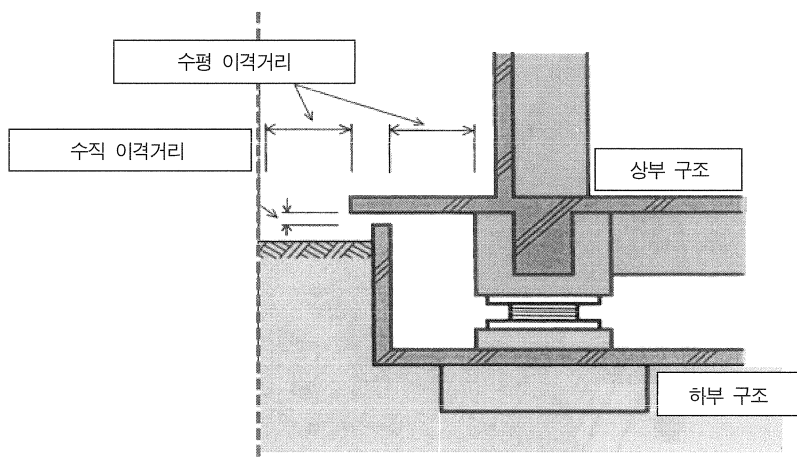


그림 2.23 면진층의 이격거리

2.4.9 면진부재 배치

면진건물 설계 시 면진부재 전체 강심을 상부구조 중심과 일치시켜 비틀림을 발생시키지 않는 것이 원칙이다.

그러나 부정형인 건물의 기둥 밑에 한정된 사이즈의 적층고무 면진부재를 배치할 경우, 면압이 일정하게 되지 않아 적층고무 면진부재만으로는 상부구조의 중심에 면진구조의 강심을 일치시킬 수 없는 경우도 발생한다.

이런 경우 면진부재와는 독립된 댐퍼를 채택하면 댐퍼의 탄성영역에서 면진층 강심과 상부구조 중심을 일치시킬 수 있어 면진층에서의 동적 비틀림 증폭 배재가 가능하다. 또한 댐퍼를 건물 외주 주변에 배치함으로써 비틀림변형을 효과적으로 억제할 수 있다.

2.4.10 면진부재 교환

면진건물에서는 변위와 에너지흡수를 면진층에 집약시키며, 또한 설치된 면진부재를 교환할 수 있다고 하는 면진구조의 장점이 있다.

특히 ‘면진부재와는 별도로 독립된 댐퍼의 교환은 일반적으로 용이하므로 지진 시 에너지를 흡수시키고 사용 불가능한 것이 있으면 새로운 부재로 교환한다.’라고 하는 명쾌한 시스템 설정이 가능하다.

면진부재는 건물의 중량을 지지하고 있기 때문에 댐퍼만큼 교환이 쉽지 않다. 이미 건설된 많은 면진건물은 기술 개발 초기에 설정된 안전대책을 답습하고 있어 건물 전체 또는 잭업(Jack Up)하여 면진부재를 교환하는 방법을 상정하고, 이를 위한 보강이 필요하다. 그러나 현재의 기술력, 미국에서의 면진 개수 시공 사례에 의하면 별도의 보강 없이도 면진부재의 교환은 기술적으로 충분히 가능하다고 할 수 있다.

면진부재의 교환에 대해서는 당초의 보강에 드는 비용과 건축적 제약, 교환의 가능성, 교환 시 필요로 하는 비용을 건축주와 설계자가 종합적으로 판단하여 결정해야 할 사항이다.

