

면진연구WG-0901

면진설계 매뉴얼 및 실무 자료집



SIViC

2009. 12

SIViC 면진연구 WG



Sivvic

(사) 한국면진제진협회

서울특별시 성동구 행당동 17 한양대학교 HIT 308호
전화 : (010)9453-1272 전 송 : (02)2672-6423
www.sivvic.co.kr

면진설계 매뉴얼 및 실무 자료집

2009. 12

SIViC 면진연구 WG

면진설계 매뉴얼 및 실무 자료집

Design and Practical Manual for Seismic Isolation



천영수, 김재건, 이덕한, 허무원, 이명규

2009

(사)한국면진제진협회 면진연구 WG

연구책임자

천영수 LH 토지주택연구원 수석연구원

연구원

김재건 현대건설 차장

이덕한 현대건설 건축사업본부 차장

허무원 DRB동일 대리

이명규 (주)유니슨 대리

자문위원 (가나다순)

김종호 창민우구조건설тан트 대표이사

박영욱 한미파슨스 부장

이동우 (주)아이스트 대표이사

이영진 (주)아이스트 소장

이현호 동양대학교 건축소방행정학과 교수

정연기 창민우구조건설тан트 소장

발 간 사

최근 국내외에서 발생한 일련의 대규모 지진으로 지진피해가 얼마나 심각하게 국가 경제에 영향을 미치는지 다시 한번 확인되었다고 생각합니다. 특히 2008년 쓰촨성지진은 중국 내에서도 중·약진 지역으로 분류되던 지역에서 발생한 것으로 우리나라도 언제든지 대규모 지진의 발생가능성이 있다는 점을 고려할때 상기시켜 주었습니다. 현재 우리나라의 경우 인구의 분포로 보아 도시국가로 규정할 수 있으므로 만약 이러한 대도시에 지진이 발생한다면 국가의 존망과도 연결되는 심각한 피해가 예상되므로 이에 대한 대비를 철저히 하여야 할 것으로 생각합니다.

우리협회는 상기 이슈와 관련하여 지진에 대한 보다 효과적인 대책마련의 일환으로 지진을 다루는 기술 중 현재까지 가장 효과적인 대책으로 알려져 있는 면진·제진 기술의 개발과 국내 보급을 목표로 2004년 발족하였으며, 그간 도서발간 및 기술세미나 개최 등 여러 방면으로 노력하여 면진 및 제진에 대한 국내 관심도를 높이고 관련 실무업체들을 지원하여 면진·제진 건물의 건설을 적극 지원하여 왔습니다.

하지만 아직도 국내에는 면진·제진기술을 적용하기 위한 관련 기준이나 기술지침 등이 부재하여 실무적용에 어려움이 많은 것이 현실이므로 면진기술의 보다 적극적인 보급을 위하여 실무적인 관점에서 엔지니어들이 쉽게 접근할 수 있도록 설계절차서 및 관련 자료들을 수록한 “면진설계매뉴얼 및 실무 자료집”을 발간하게 되었습니다.

본 서는 면진기술이 적용된 신축건물의 건설은 물론 기존 주택의 내진보강을 위한 지침서로서도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대됩니다.

그간 본 서의 완성을 위하여 각고의 노력을 기울여 준 집필진 및 많은 조언과 지적을 해주신 관계자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 전하며, 앞으로도 지속적으로 면진기술의 발전을 위하여 노력할 것을 약속드립니다.

2009. 12.

(사)한국면진제진협회장 이 리 형

서 문

일반적으로 내진설계는 구조체의 비선형거동에 기반을 둔 것으로 설계지진이 왔을 경우 구조물은 반드시 피해를 입는다고 할 수 있습니다. 이러한 내진설계의 철학은 인명보호에 목적을 둔 것으로 극단적으로는 지진이 발생할 경우 사람이 피신할 수 있을 때까지 건물은 붕괴되지 않으면 성공한 내진설계로 간주할 수 있다고 생각합니다. 따라서 지진 이후에도 건물 본연의 기능을 유지해야하는 관공서, 소방서, 경찰서, 병원 및 주요 전산센터 그리고 지진 발생 시 막대한 인명피해가 예상되는 고층 건물, 학교, 기타 대형구조물 및 결코 복원 또는 대체될 수 없는 문화재의 경우는 지진발생시 성능을 명확히 규정하고 적절한 대책을 세워야 할 필요가 있습니다.

상기 이슈와 관련하여 면진기술은 금세기 지진을 다루는 기술로서 가장 효과적인 대책 중의 하나로 알려져 있으며, 국내에서도 다수의 건설실적이 있습니다. 하지만 이러한 건설실적에도 불구하고 실무적인 관점에서는 아직까지 면진설계에 대한 적절한 기준이나 설계실무절차 등에 대한 지침과 매뉴얼 등이 거의 전무한 실정이므로 기술적용에 많은 어려움이 있는 것이 현실입니다.

(사)한국면진제진협회 면진연구 WG에서는 면진기술의 보다 적극적인 개발과 보급을 위하여 우선적으로 국내 면진장치 생산업체들의 현황을 정확히 파악하여 정리하고, 실무적인 관점에서 엔지니어들이 쉽게 접근할 수 있도록 설계절차서 및 관련 자료들을 정립할 필요가 있다고 판단하고 “면진설계매뉴얼 및 실무 자료집”을 발간하게 되었습니다.

본 서는 구조실무자들이 면진장치를 적용하여 구조설계를 원활히 수행할 수 있도록 설계절차와 해설, 예제 그리고 면진장치와 설비관련 자료들을 수록한 것으로 국내 기술력에 의한 면진기술의 실용화에 크게 기여하리라 기대됩니다.

본 책자의 발간을 위하여 자료제공 및 많은 조언과 지적을 해 주신 관계자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 전하며, 부족한 부분은 앞으로도 지속적으로 보완·발전토록 노력하겠습니다.

2009. 12.

면진연구 WG

제 1 장 | 면진구조 설계매뉴얼 / 13

1.1 개요	15
1.2 용어	16
1.3 기호	16
1.4 면진구조의 설계절차	21
1.5 기본계획 수립	21
1.5.1 설계계획	21
1.5.2 면진 층의 위치	21
1.5.3 응답해석 및 설계방법 결정	23
1.6 건물의 특성 파악 및 기본 설계변수 설정	24
1.6.1 기본 설계변수 설정	24
1.6.2 풍하중	26
1.7 목표 면진주기 설정	28
1.8 등가수평력해석의 적용 또는 예비설계	28
1.8.1 감쇠계수 선정	29
1.8.2 면진시스템의 유효 강성 및 허용 수평변위 결정	30
1.8.3 최소 수평변위 산정	32
1.8.4 면진장치 설계 및 면진 층의 구성	33
1.8.5 최대변위 검토	33
1.8.6 면진 층 상·하부 구조 설계	34
1.9 동적해석절차의 적용 또는 본 설계	37
1.9.1 모델링	37
1.9.2 입력지진동의 결정	39
1.9.3 동적해석 수행	41
1.9.4 목표 설계변위와 면진주기의 결정	42
1.9.5 면진 층 상·하부 구조 설계	42
1.9.6 설계검토 및 수정	44

2.1 일반사항	49
2.2 설계의 흐름도	49
2.3 NRB(Natural Rubber Bearing) 설계	52
2.3.1 설계조건 설정	52
2.3.2 목표 수평·수직방향 강성 산정	52
2.3.3 고무의 재료특성 결정	54
2.3.4 설계방향 선정	54
2.3.5 고무 1층의 두께 산정	58
2.3.6 적층 수 결정	59
2.3.7 좌굴, 한계변형 검토	60
2.3.8 보강철판 검토	62
2.3.9 수평·수직 강성 검토	62
2.3.10 허용 변형량 검토	63
2.3.11 접합 볼트 및 플랜지	63
2.4 LRB(Lead Rubber Bearing) 설계	63
2.4.1 설계조건 설정	64
2.4.2 목표 수평·수직방향 강성 산정	64
2.4.3 납봉 단면적 및 직경 산정	64
2.4.4 고무의 재료특성 결정	65
2.4.5 전단변형률 설정	65
2.4.6 고무의 총 두께 산정	65
2.4.7 고무의 단면적 및 크기 산정	66
2.4.8 면압 및 2차 형상계수 산정	66
2.4.9 고무 1층의 두께 산정	66
2.4.10 적층 수 결정	67
2.4.11 좌굴, 한계변형 검토	67
2.4.12 보강철판 검토	68
2.4.13 수평·수직 강성 검토	68
2.4.14 허용 변형량 검토	69
2.4.15 접합 볼트 및 플랜지	69

제 3 장 | 면진설비 / 71

3.1 일반사항	73
3.2 일본 면진건축물 설비공사 관련 시방서	73
3.2.1 JSSI 면진구조시공표준 2005(건축설비)	73
3.2.2 면진건축의 설계와 상세(건축설비 분야)	76
3.2.3 면진설계를 위한 상품기술자료 (건축설비분야)	85
3.2.4 면진건물의 JSSI 유지관리기준(건축설비)	97
3.3 국내 면진건축물 설비공사 시공사례	98

부 록 / 101

- A. 국내 면진장치 생산업체 및 제품리스트
- B. 면진건축 설비관련 업체리스트
- C. ISO22762-3:2005:7 Design rules



1

면진구조 설계매뉴얼

1. 면진구조 설계매뉴얼

1.1 개 요

본 장은 면진구조를 설계하고자 하는 구조기술자들이 보다 쉽게 면진설계를 접할 수 있도록 면진구조의 설계절차 및 주요 실무지침을 내용으로 담고 있다. 본 장의 내용은 기본적으로 ASCE 7-05 제17장을 따르고 있으며, 실무적인 관점에서 내용을 보다 알기 쉽게 요약정리하고, 부족한 기술정보들을 제공하여 구조설계자로 하여금 면진구조를 설계하는데 있어서 그 이해도를 높이고자 한 것이다. ASCE 7-05 제17장에 기술된 내용 이외에 내진설계와 관련된 기본적인 사항들은 국내 내진설계 기준인 KBC 2005를 따르도록 한다.

내진과 면진은 기본적으로 그 설계철학이 다르므로 기준의 내용과 구성 또한 다르다. 본 절에서는 먼저 두 기준의 차이에 대하여 간략하게 소개하여 설계자의 이해를 돕고자 한다.

내진은 지진 시 구조물의 붕괴를 방지하기 위하여 구조물 자체를 어느 정도 파괴시켜 이곳에서 지진에너지를 소산시킴으로서 구조물 전체의 안전을 도모하고자 하는 개념이므로, 내진기준에서는 지진하중의 산정 및 해석방법과 함께 연성적인 구조물의 거동을 확보하기 위한 배근상세에 대한 규정이 필연적으로 요구되고 있다. 반면 면진은 강진 시에도 구조물의 손상 방지는 물론 내부 수용요소까지 피해가 없도록 하는 것을 기본 철학으로 하고 있기 때문에 면진기준은 내진기준과는 다르게 의도된 위치에서 지진에너지를 대부분이 흡수될 수 있도록 새로운 개념의 면진 층에 대한 설계를 필요로 하며, 상부 구조물에 대하여는 연성적인 거동 확보를 위한 배근상세와 같이 별도의 규정을 필요로 하지 않는다. 따라서 내진기준은 크게 하중 규정과 연성설계를 위한 배근상세 규정을 기본 골격으로 하고 있는 반면, 면진기준은 설계와 구조의 기본계획에서부터 구조설계, 시공, 유지·관리에 이르기까지 면진구조의 구현을 위한 포괄적인 내용을 담고 있다는 점에서 차이가 있다. 이는 면진구조가 핵심기술 요소로서 일반구조와는 다른 면진장치라는 특수한 장치를 포함하여 설계되는 것이기 때문에 이 부분에 대한 설계와 유지·관리에 특히 주의할 필요가 있기 때문이다.

기본적인 설계철학이 다르므로 인한 두 기준 사이의 또 다른 큰 차이점으로 적용한계를 들 수 있다. 내진은 기본적으로 건물이 지진과 대항하여 싸워 이겨내도록 설계하는 개념이므로 높은 내진성이나 거주성 그리고 중요도를 요하는 건물에는 적용이 불가능하다는 한계가 있다. 또한 강진 후에는 큰 피해를 초래할 수 있으므로 건물 본래의 기능 유지가 어려울 수도 있다는 문제를 안고 있어 병원이나 소방서 등과 같이 지진 후에도 기본적인 기능의 유지를 요하는 건물에는 적용 상 다소 한

계가 있다. 반면 면진은 기본적으로 상부 구조물의 피해를 허용하지 않는다는 개념을 가지고 있으므로 상기 내진과 같은 적용상의 한계는 없다. 다만 면진에 있어서는 면진 층의 기능적인 특성상 일정 크기 이상의 축 하중이 작용해야 하는 문제가 있으므로 경량 구조물에는 적용하는데 다소 기술상의 한계가 있으며, 중진 또는 약진과 같이 낮은 내진성을 요하는 건물에 적용 시에는 과다 설계의 우려가 높다는 문제가 있다.

1.2 용어

설계변위 : 면진시스템의 설계에 필요한 설계지진 수평변위. 단, 실제적이고 우발적인 비틀림에 의한 추가 변위를 제외함

최대변위 : 최대 고려지진(Maximum Considered Earthquake)에 대응하는 수평 변위. 단, 실제적이고 우발적인 비틀림에 의한 추가 변위를 제외함

전 설계변위 : 면진시스템 또는 그 요소의 설계에 필요한 설계지진 수평 변위. 단, 실제적이고 우발적인 비틀림에 의한 추가 변위를 포함

전 최대변위 : 면진시스템 또는 그 요소의 안정성 확인, 구조물 분리설계 그리고 면진장치 개별모델(Prototype)의 재하시험에 필요한 최대 고려지진(Maximum Considered Earthquake)수평변위. 단, 실제적이고 우발적인 비틀림에 의한 추가 변위를 포함

변위구속시스템 : 최대 고려지진(Maximum Considered Earthquake)에 의한 면진구조물의 수평변위를 제한하는 구조요소의 집합

유효감쇠 : 면진시스템의 반복응답 시 소산되는 에너지에 상당하는 등가점성 감쇠 값

유효강성 : 면진시스템 또는 그 요소의 수평력을 수평변위로 나눈 값

면진층 : 분리된 구조물의 상부와 지반과 함께 강체로 움직이는 하부의 경계

면진시스템 : 모든 개별 면진 유니트(Units)를 포함하는 구조요소, 면진시스템의 요소 사이에 힘을 전달하는 구조요소, 다른 구조요소와의 접합부의 집합. 또한 면진시스템은 풍저항시스템, 에너지소산장치, 변위제어시스템 등이 이 장의 설계요건을 만족하도록 사용된다면 그러한 시스템과 장치도 포함함

1.3 기호

B_D = 유효감쇠(β_D)에 대한 수치계수

B_M = 유효감쇠(β_M)에 대한 수치계수

D_D = 고려하는 방향에 대한 면진시스템 강성중심에서의 설계변위, 식 (1.7)

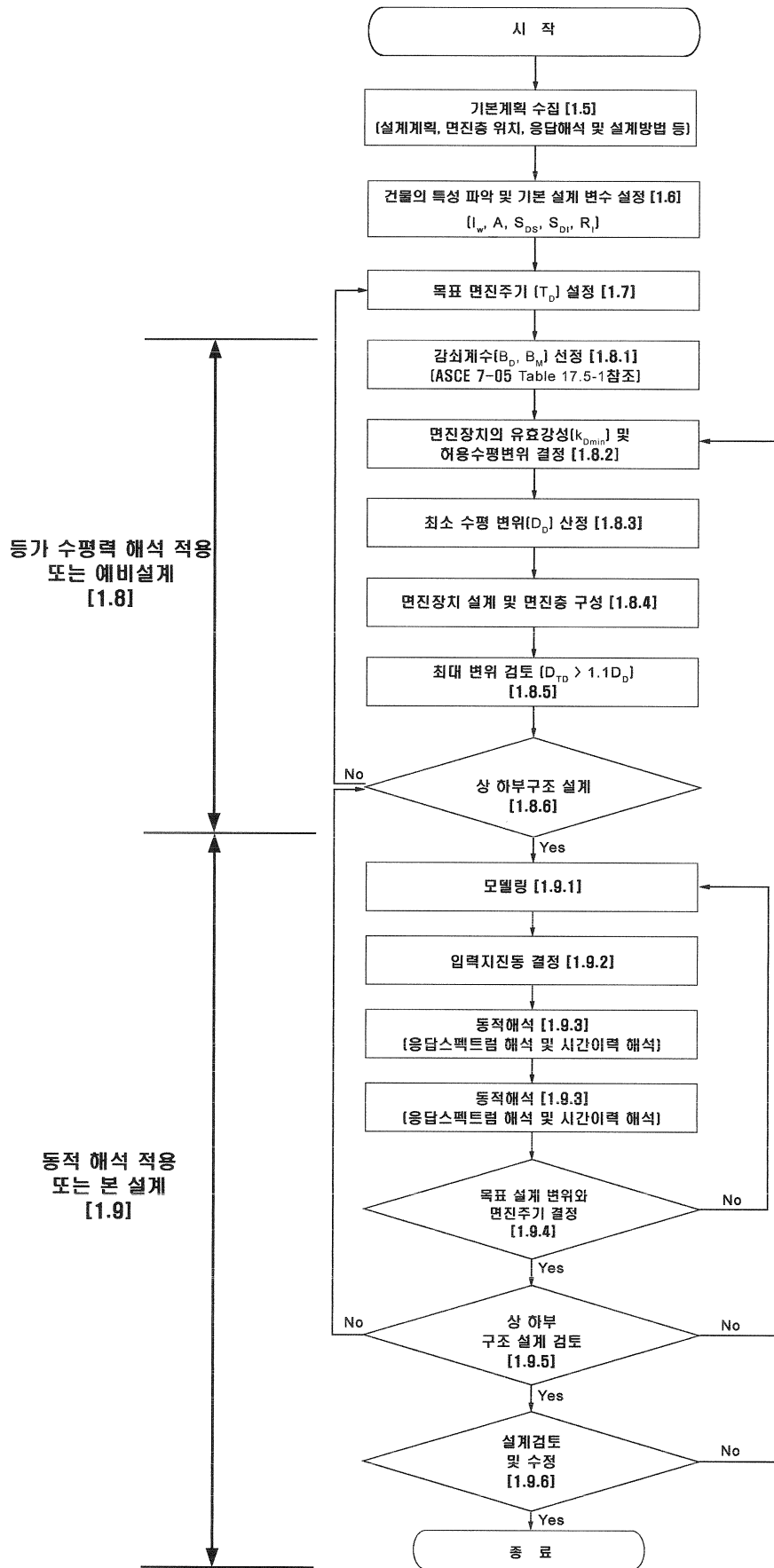
D'_D = 고려하는 방향에 대한 면진시스템 강성중심에서의 설계변위, 식 17.6-1

- D_M = 고려하는 방향에 대한 면진시스템 강성중심에서의 최대변위, 식 (1.8)
- \dot{D}_M = 고려하는 방향에 대한 면진시스템 강성중심에서의 최대변위, 식 17.6-2
- D_{TD} = 고려하는 방향에 대한 강성중심에서의 이동변위와 비틀림 변위의 그 방향 성분을 포함하는 면진시스템의 한 요소의 전 설계변위
- D_{TM} = 고려하는 방향에 대한 강성중심에서의 이동변위와 비틀림 변위의 그 방향 성분을 포함하는 면진시스템의 한 요소의 전 최대변위
- e = 면진층 위 구조물의 질량 중심과 면진시스템의 강성중심 사이에서 측정된 실제 편심거리에 고려한 힘의 방향에 수직한 최대 건물치수의 5%로 구해지는 우발편심거리를 더한 값
- k_{Dmax} = 고려하는 수평방향에 대하여 설계변위에서 면진시스템의 최대 유효강성
- k_{Dmin} = 고려하는 수평방향에 대하여 설계변위에서 면진시스템의 최소 유효강성
- k_{Mmax} = 고려하는 수평방향에 대하여 최대변위에서 면진시스템의 최대 유효강성
- k_{Mmin} = 고려하는 수평방향에 대하여 최대변위에서 면진시스템의 최소 유효강성
- T_M = 고려하는 방향에 대하여 최대변위에서 면진구조물의 유효주기
- V_b = 면진시스템 또는 면진시스템 밑 요소들의 전 수평지진 설계력 또는 전단력
- V_s = 면진시스템 위 요소들의 전 수평지진 설계력 또는 전단력
- y = 면진시스템의 강성중심과 특정 요소사이의 고려하는 지진하중의 방향에 수직한 거리
- β_D = 설계변위에서 면진시스템의 유효감쇠
- β_M = 최대변위에서 면진시스템의 유효감쇠

1.4 면진구조의 설계절차

[그림 1.1]은 면진구조 설계의 일반적인 절차를 나타낸 것이며, 설계의 주요 항목들에 대해서는 이후 절에서 자세하게 설명하기로 한다. 후술되는 주요 항목의 설명에서는 ASCE7-05 17장 관련 절의 원문을 번역하여 함께 수록함으로써 실무자들의 이해를 돕고자 하였다.

면진구조의 설계에서는 먼저 면진구조로서 건물의 동적특성을 목표성능에 맞춰 정하고 이후 각부 설계로 진행하는 것을 원칙으로 하며, 일반적으로 면진구조의 안전성 및 목표성능은 면진부재를 포함한 건물모델을 대상으로 시간이력해석에 의해 검토하는 것을 원칙으로 한다. 설계는 등가수평력해석에 의한 예비설계와 동적해석에 의한 최종설계로 나누어 수행하며, 건물이 일정조건을 만족할 경우 등가수평력해석(ASCE7-05 17.4.1)이나 응답스펙트럼해석(ASCE7-05 17.4.2.1)을 설계에 직접 사용할 수 있다.



| 그림 1.1 면진구조의 설계절차 |

면진구조의 해석과 설계는 사용될 면진장치의 실증적인 변형특성에 근거하여야 하나(ASCE 7-05 17.5.2), 면진장치의 변형특성은 건물에 직접 사용될 면진장치를 대상으로 한 실험이 수행되기 전에는 알 수 없으며, 이러한 면진장치는 건물의 목표성능을 만족하기 위한 변수들이 설계를 통하여 선행적으로 결정되어야만 제작이 가능하므로, 면진구조의 최초 설계단계에서는 면진장치의 변형특성을 가정하여 시작하고, 설계의 반복적인 수행을 통하여 가정한 설계 값과 실험을 통한 실증 값이 수렴하는지의 여부를 확인하는 시행착오적인 방법으로 설계를 진행하도록 한다.

등가수평력해석은 면진장치의 비선형적인 특성을 등가강성과 등가감쇠로 치환하여 설계하도록 한 약식 설계방법으로서 예비설계를 위한 방법으로 채택하고, 이로부터 결정된 면진시스템의 요구강성과 감쇠조건 등을 토대로 실증적인 면진장치들의 특성 값을 결정한 후 시간이력해석을 통하여 목표성능을 만족하는지의 여부를 확인하는 순서로 설계를 진행하도록 한다. 이 경우 전술하였듯이 건물이 일정 조건을 만족한다면 예비설계 단계에서 사용되었던 등가수평력해석이나 응답스펙트럼해석이 직접 반복하여 설계에 사용될 수도 있다.

이상에서 설명된 각 단계별 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 예비설계 단계

면진시스템의 목표주기에 따른 적절한 설계변위와 최대변위를 설정하고 면진층의 강성과 감쇠비를 구성하여 각각의 면진장치로 강성과 감쇠성능을 분배한다. 이 때 개개의 면진장치는 감쇠기능을 포함한 장치와 감쇠기능이 없는 장치로 구분되며 설계변위 시 강성수준과 최대변위 시 안정성을 만족시켜야한다.

예비설계 시 입력 값으로 목표 면진주기(T_D), 상부구조의 자중(W), 그리고 면진시스템의 감쇠비(β)를 결정하면 면진층의 설계변위를 응답스펙트럼의 가속도계수(S_{D1})와 응답변위와의 관계로부터 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$D_D = \frac{g S_{D1} T_D}{4\pi^2 B_D} \quad (1.1)$$

면진층의 유효 강성은 고유주기와 강성과의 관계에서 다음 식과 같이 유도된다.

$$K_{eff} = \frac{4\pi^2 W}{T^2 g} \quad (1.2)$$

유효 강성(K_{eff})과 자중(W)은 개개의 면진장치에서 강성의 병렬조합과 축력의 총합으로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{eff} = \sum_i^n K_i, \quad W = \sum_i^n F_{Vi} \quad (1.3)$$

예비설계에서 결정된 축력과 분배된 강성을 만족하도록 개개의 면진장치를 설계한다. 이 때 주의할 점은 설계지진의 수준과 최대지진의 수준을 구분하여 설계지진 시 총 설계변위에서 설계 강성을 만족하도록 설계하고 최대지진 시 총 최대변위에서 안정성을 만족하도록 설계하여야 한다.

적층고무 면진장치는 ISO22762-Part3 : Building편의 설계원칙에 따라 아래와 같이 세부규격을 검토하는 것으로 한다.

① 하중지지 유효면적 결정 : 관례적으로 적층고무 면진장치(RB, LRB, HDRB)는 설계변위에서 최상의 면진성능을 발휘하도록 고안된 장치로서 수직방향으로 상부하중을 지지하고 수평방향으로 최대변위까지 안전성을 확보하도록 수직 면압 6~12MPa에서 하중지지 유효면적을 결정한다.

② 총고무두께(T_c) 결정 : 설계변위 시 수평강성을 만족하도록 총 고무높이를 조정하며 일반적으로 설계변위의 0.8~1.2배 정도로 결정한다.

③ 최대변위 시 안전성 확보 : 최대 변위에서 지지성능의 안전성은 한 층 고무 두께에서 고무면적과 둘레면적의 비인 1차형상비(S_1)와 면진장치 직경과 총 고무두께의 비인 2차형상비(S_2)가 지지성능의 주요 변수이다. 최대지진 시 전단 변위를 고려하여 총 고무높이의 200%까지는 고무의 파단 및 면진장치의 좌굴 안전성능을 확보하도록 한다.

(2) 설계수정 단계

예비설계에서 선정된 각 면진장치의 힘-변위 특성을 근거로 전제 면진시스템을 구성하고 적당한 설계변위를 가정하여 면진층의 유효강성(K_{eff})과 면진주기(T_D) 및 설계변위(D_D)를 재산정하고, 시행착오법을 적용하여 반복계산에 의해 설계변위(D_D)를 결정한다.

면진장치의 타입시험을 수행하여 면진의 거동특성을 확보한다. 이 때 최적의 면진시스템을 구성하기 위하여 개별 면진장치의 규격을 변경해 가면서 설계수정 단계를 반복 수행하여 최종적으로 설계변위(D_D)를 결정한다.

(3) 검증 단계

예비설계와 설계수정 단계를 거쳐서 선정된 면진시스템의 설계변위와 최대변위의 시스템특성을 이용하여 시간이력해석을 수행하여 검증한다. 면진장치의 현장적용 시 적합성을 검토하기 위하여 시방서 기준에 따른 성능시험 전수검사를 실시하며, 시공자와 감리자의 승인을 득한 후 현장적용을 확정하도록 한다.

1.5 기본계획 수립

1.5.1 설계계획

설계계획에서는 건물의 규모, 형상, 중요도 및 요구 성능 등에서 면진구조를 이용할 필요성, 목적 및 의의를 확인하고 목표로 하는 성능(Design Criteria)을 설정하는 것이 중요하다. 이것에 따라서 지반 및 상부건물의 특성을 고려하고 이 성능을 만족시키는 가장 적합한 면진부재를 선택, 설계를 진행시켜 가야하며, 이 경우 고려해야할 요인으로는 다음과 같은 것들이 있다.

- 상부구조의 조건
- 지반조건
 - 연약지반의 경우 면진주기를 좀더 여유 있게 설계하도록 한다.
- 지하실
- 부지의 여유
 - 보통 상부구조 변형량의 1.5~2.0배를 확보하도록 한다.
- 목표성능(설계범위)

1.5.2 면진 층의 위치

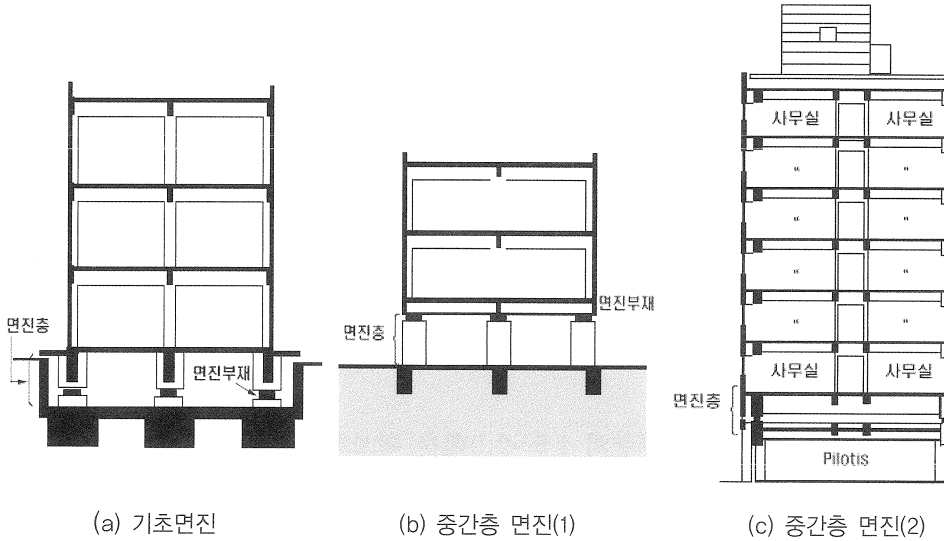
면진 층의 위치는 [그림 1.2]와 같이 건물의 최하부에 설치하는 기초 면진과 건물의 중간층에 설치하는 중간층 면진으로 크게 나눌 수 있다.

① 기초면진

기초면진은 가장 기본적인 면진구조의 형식으로서 건물의 최하층 기초부분에 면진 층을 두고 여기에 면진장치를 설치하는 방식이다. 기초면진으로 대상건물 전체를 면진화할 수도 있지만 건물 아래에 미리 면진 층을 구성해야 하기 때문에 터파기양이나 구체수량이 증대함에 따라 공기도 그만큼 늘어나게 된다. 또 건물이 지반과 절연되어 천천히 크게 흔들리게 되기 때라 공기도 그만큼 늘어나게 된다. 또 건물이 지반과 절연되어 천천히 크게 흔들리게 되기 때문에 특히 출입구 등에서는 상대변형에 대해 충분히 배려한 디테일이 필요하다. 면진에 대한 적용사례가 많은 일본의 경우 최근 면진 건물로 가장 많은 집합주택은 대부분이 이런 기초면진의 형식을 취하고 있다. 이 형식을 채용할 경우 설계상의 유의점은 아래와 같다.

- 건물 외주에 건물기초보다 큰 면진 층 부분이 필요하므로 부지에 여유가 있는지를 확인한다.
- 면진 층 외주에 벽면의 턱(Scarcement) 등이 설치되기 때문에 지진 시 상부구조가 이동했을 때 문제가 발생하지 않음을 확인해야 한다(면진 클리어런스 확보).

- 향후 증축 등을 고려할 경우 면진장치의 점검이나 교체가 용이해야 한다.
- 설비배관은 면진 층의 변형에 대응한 유연접합부(Flexible Joint 또는 Ball Joint)로 해야 한다.
- 면진건물과 다른 건물과의 사이를 잇는 연결통로는 상대변형에 대응하는 상세가 필요하다.



|| 그림 1.2 면진 층의 위치 ||

② 중간층 면진

중간층 면진은 기초보다 위의 레벨인 임의 층에 면진 층을 만들고 하부구조는 일반적인 건물과 같이 지반과 접하게 된다. 중간층 면진은 기초면진의 경우에서와 같은 터파기양이나 구채수량의 문제는 해소되지만 면진 층보다 아래층(하부구조)에서는 면진효과를 크게 기대할 수 없다는 단점이 있다. 또한 면진 층을 통과하는 계단, 엘리베이터 샤프트나 설비배관에 대한 면진 층의 변형대책이 필요하다. 계단, 엘리베이터 샤프트에 대한 대책의 한 예로서 이들을 상부구조로부터 내리고 하부구조와는 이격거리를 확보하여 충돌하지 않도록 하는 방법이 있다. 최근에는 엘리베이터 레일을 변형시킴으로써 변형에 대응하는 예도 있다.

면진 층을 건축적으로 이용할 경우에는 면진장치의 내화성능 확보를 위해 내화피복이 요구되는 경우도 있다. 도시에서 부지에 여유가 없는 경우 중간층이 지상에 설치되어 공중에서 변형하게 되고 면진 클리어런스(Clearance) 만큼이 유리해지는 경우도 있다. 또한 지하굴착을 줄일 필요가 있는 경우에도 지상에 면진 층을 설치하는 것이 유리하다. 이런 형식을 채용할 경우의 설계상 유의점은 다음과 같다.

- 면진 층 부분의 건물 외벽은 면진 층의 변형에 대응하여 큰 수평이동이 가능한 이음구조를 지녀야 하며, 지수성능, 차음성능 및 방화성능을 확보하면서 외관상도 위화감을 주지 않도록 해야 한다.
- 면진 층을 관통하는 계단, 엘리베이터샤프트 및 설비배관 등에는 변형대책뿐만 아니라 방화구획에 대한 배려가 필요한 경우도 있다.
- 면진장치나 내화피복의 점검과 교체가 용이해야 한다.

1.5.3 응답해석 및 설계방법 결정

ASCE 7-05 제17장에서 제시하고 있는 면진구조의 해석 및 설계방법은 크게 등가수평력해석(Equivalent Lateral Force Procedure), 응답스펙트럼해석(Response-Spectrum Procedure), 그리고 시간이력해석(Response History Procedure)으로 나눌 수 있으며, 건물이 일정조건을 만족할 경우 등가수평력해석(17.4.1)이나 응답스펙트럼 해석(17.4.2.1)을 사용할 수 있도록 규정하고 있다.

17.4.1 등가수평력해석

아래와 같은 면진구조의 설계는 등가수평력해석 절차를 사용하는 것이 허용된다.

1. 건물은 0.6g이하인 S₁ 지반에 위치한다.
2. 건물은 지반분류 A, B, C, 및 D로 분류된 지반에 위치한다.
3. 면진 층 상부구조의 높이가 4층 또는 65ft(19.8m)이하이다.
4. 최대변위에서 면진건물의 유효 주기(T_M)가 3.0초 이하이다.
5. 설계변위에서 면진건물의 유효 주기(T_b)가 식 12.8-7 및 12.8-8(KBC2005, 0306.5.4)에 의해 결정되는 면진 시스템 상부구조의 탄성, 기초고정(Fixed-Base) 고유주기의 3배 이상이다.
6. 면진시스템 상부의 구조물은 정형이다.
7. 면진시스템이 아래의 조건을 만족한다.
 - a. 설계변위에서 면진시스템의 유효강성이 설계변위의 20%에서 유효강성의 1/3을 초과한다.
 - b. 면진시스템이 17.2.4.4에 규정된 복원력을 발휘할 수 있다.
 - c. 면진시스템이 최대예상지진 변위를 전 최대변위 이하로 제한하지 않는다.

17.4.2.1 응답스펙트럼해석

아래조건을 만족하지 못하면 면진건물의 설계에 응답스펙트럼해석을 사용해서는 안 된다.

1. 구조물이 지반분류 A, B, C 또는 D인 지반에 있다.
2. 면진시스템이 17.4.1절의 7번 항목의 조건을 만족한다.

등가수평력해석은 일반적으로 예비설계와 응답스펙트럼해석이나 시간이력해석으로 평가되는 주요 설계변수(변위와 밀면전단력)에 대한 기준값을 설정할 목적으로 수행된다. 등가수평력해석은 간단한 방법이지만 정확하게 사용하면 설계력과 변위를 합리적으로 예측할 수 있다. 이 방법은 일정속도 영역에서 $1/T$ 에 비례하는 스펙트럼의 형태에 근거한 해석법이므로 아래와 같이 스펙트럼에 대한 요구조건이 가정된 스펙트럼에 의하여 그 특성을 반영할 수 없는 경우에는 적용할 수 없으며, 또한 비선형성이 큰 면진시스템에 대해서도 적용할 수 없다.

- 활성단층과 근거리에 위치한 면진건물
- 연약지반 상의 면진건물
- 정 속도영역을 넘어서는 장주기 면진건물
- 스펙트럼의 형태가 가정된 것과 다를 수 있는 중약진 지역의 건물들

응답스펙트럼해석은 부지의 지반특성을 반영한 스펙트럼의 구성이 요구되는 매우 연약한 지반위에 놓인 건물과 매우 높은 비선형성을 나타내는 면진시스템에 의하여 지지되는 건물을 제외하고는 모든 면진건물의 설계에 적용될 수 있다.

시간이력해석은 가장 기본적인 해석법이다. 등가수평력해석과 응답스펙트럼해석의 제한조건을 만족할 수 없을 경우 반드시 이 해석법이 사용되어야 하며, 또한 임의의 면진건물 해석을 위해서도 사용될 수 있다. 이 경우 해석결과는 과다 또는 과소설계를 피하기 위하여 매우 주의 깊게 검토되어야 한다.

1.6 건물의 특성 파악 및 기본 설계변수 설정

1.6.1 기본 설계변수 설정

① 설계에 필요한 기본 설계변수로서 건물의 형상, 평면치수, 중량, 고정기초 주기 등을 파악하여 구조설계 시 반영한다.

② 지진위험도 결정

지역계수(A)와 지반계수(S)는 KBC2005 표 0306.3.1과 표 0306.3.2를 이용하여 결정하도록 하며, 결정된 지역계수와 지반계수를 이용하여 설계스펙트럼 가속도(S_{DS}, S_{DI})를 작성하고, 내진설계범주를 결정한다.

KBC 2005 0306.3 지진위험도 결정

〈표 0306.3.1〉 지진지역 및 지역계수(A)

지진지역	행정구역	지역계수(A)
1	지진지역 2를 제외한 전 지역	0.11
2	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도	0.07

〈표 0306.3.2〉 지반의 분류

지반 종류	지반종류의 호칭	상부 30m에 대한 평균 지반특성		
		전단파속도 (m/s)	표준관입시험 \bar{N} (타격횟수/300mm)	비배수전단강도 \bar{s}_u ($\times 10^{-3} \text{N/mm}^2$)
S_A	경암 지반	1500초과	S_B	-
S_B	보통암 지반	750에서 1500		
S_C	매우 조밀한 토사 지반 또는 연암지반	360에서 760	>50	>100
S_D	단단한 토사 지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
S_E	연약한 토사 지반	180 미만	<15	< 50

〈표 0306.3.3〉 단주기 설계스펙트럼 가속도(S_{DS})

지반종류	지진지역	
	1	2
S_A	2.0 M ¹⁾ A	1.8 MA
S_B	2.5 MA	2.5 MA
S_C	3.0 MA	3.0 MA
S_D	3.6 MA	4.0 MA
S_E	5.0 MA	6.0 MA

1) M=1.33 (이 경우 스펙트럼 가속도의 크기는 재현주기 2400년에 대한 2/3 수준의 극한하중임)

〈표 0306.3.4〉 주기 1초의 설계스펙트럼 가속도(S_{D1})

지반종류	지진지역	
	1	2
S_A	0.8 M ¹⁾ A	0.7 MA
S_B	1.0 MA	1.0 MA
S_C	1.6 MA	1.6 MA
S_D	2.3 MA	2.3 MA
S_E	3.4 MA	3.4 MA

〈표 0306.4.2〉 단주기 설계스펙트럼 가속도에 따른 내진설계 범주

S_{DI} 의 값	내진등급		
	특	I	II
$0.50 \leq S_{DS}$	D	D	D
$0.33 \leq S_{DS} \leq 0.50$	D	C	C
$0.17 \leq S_{DS} \leq 0.33$	C	B	B
$S_{DS} < 0.17$	A	A	A

〈표 0306.4.3〉 주기 1초의 설계스펙트럼 가속도에 따른 내진설계 범주

S_{D1} 의 값	내진등급		
	특	I	II
$0.20 \leq S_{D1}$	D	D	D
$0.14 \leq S_{D1} \leq 0.20$	D	C	C
$0.07 \leq S_{D1} \leq 0.14$	C	B	B
$S_{D1} < 0.07$	A	A	A77

③ 중요도 계수

건물의 중요도계수(I_E)는 용도와 규모에 따른 내진등급과는 무관하게 1.0으로 한다(ASCE 7-05 17.2.1).

17.2.1 중요도 계수

면진시스템 상부구조를 포함한 건물의 모든 부분은 표 1-1 (표 0306.4.2 및 표 0306.4.4 참조)과 일치하는 점유범주로 나뉘어져야 한다. 면진건물은 점유범주에 관계없이 중요도 계수를 1.0으로 한다.

1.6.2 풍하중

건물에 작용하는 수평력에는 크게 풍하중과 지진하중이 있다. 건물의 내풍설계는 일반적으로 면진설계에서 설정되는 지진하중이 풍하중을 상회하기 때문에 지진하중으로 건물의 강도를 확인하고 내풍설계는 생략하는 경우가 많다. 면진구조의 경우 풍하중 상태에서 면진장치가 작동할 경우 사용성 문제를 야기할 수 있다. 따라서 건물이 위치한 지역의 설계기본풍속(V_0)과 노풍도를 파악하여 면진설계 시 이를 반영하여야 한다.

1.7 목표 면진주기 설정

면진건물의 유효주기는 면진시스템의 변형특성을 이용하여 결정되어야 하며, 면진시스템의 변형특성을 결정짓는 목표 면진을 달성하기 위해 필연적으로 수반되어야 한다. 면진 층의 최소 수평변위는 유효 주기에 의해 영향을 받게 되므로 유효주기와 면진시스템의 변형특성은 상호 연관된 순환 고리를 갖고 있어 어느 것을 먼저 결정하여야 하는가에 대해서는 정답이 없다. 다만, 면진주기의 설정은 설계하고자 하는 건물의 성능을 결정하는 것이므로 성능설계의 관점에서는 설계절차에서 가장 선행되어야 하는 단계이고, 실무적으로도 목표 면진주기를 먼저 설정하고 설계변위와 최대변위, 그리고 수평력 등을 검토해 가는 과정으로 접근하는 것이 편리하기 때문에 엔지니어는 클라이언트와 협의하여 목표 면진주기를 먼저 설정해 둘 필요가 있다.

면진주기를 얼마로 할 것인가 즉 건물의 성능목표를 어떻게 설정할 것인가 하는 것은 전적으로 설계자의 몫이지만 면진주기 설정 시 유효한 면진효과를 얻기 위해서는 면진주기와 고정기초 주기와의 비 즉 상부구조와 면진 층의 강성 비의 설정에 주의할 필요가 있다.

면진건물의 경우 건물의 진동주기를 결정하는 강성은 면진 층의 강성에 의하여 대표되기 때문에 상부구조와 면진건물의 주기 비율은 결국 상부구조와 면진 층의 강성 비율을 나타낸다고 볼 수 있다. [그림 1.3]은 15층 건물을 대상으로 상부구조에서 골조 보-기둥 간의 강성비(ρ)¹⁾가 각각 $\rho=0.05$ 와 $\rho=2.0$ 인 두 경우에 대하여

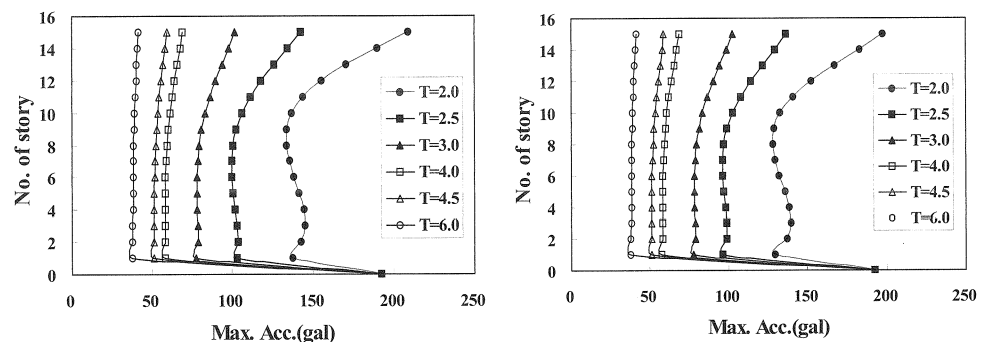
$$1) \rho = \frac{\sum_{beam} (EI_b/L_b)}{\sum_{column} (EI_c/L_c)}$$

여기서, E 는 탄성계수, I_b, I_c, L_b, L_c 는 각각 보와 기둥의 단면2차모멘트와 부재의 길이를 나타내며, ρ 값은 건물 중간층에서의 값을 취하는 것으로 한다. 극한 값 $\rho=0$ 는 절점의 회전에 어떠한 구속도 갖지 않는 보로 이루어진 캔틸레버이고 극한 값 $\rho=\infty$ 는 절점 회전이 완전하게 구속되어 있는 전단건물(Shear Building)을 나타낸다. 계산상의 편의를 위하여 본문의 예제에서는 $\rho=0.05$ 와 $\rho=2.0$ 인 경우가 각각 상기 두 극한 값을 대표하는 것으로 가정한다.

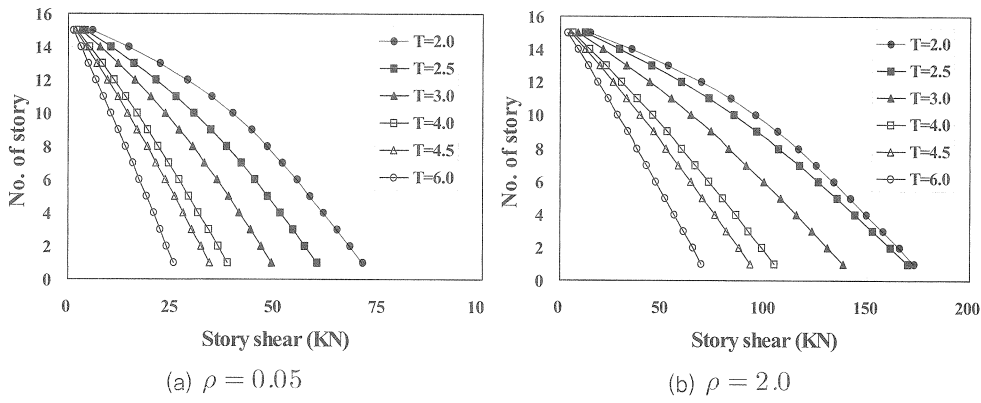
상부 구조와 면진 층간의 강성비를 다양하게 가정하였을 때 상부구조에서의 응답가속도 분포를 나타낸 것이며, [그림 1.4]는 그에 따른 층 전단력 분포를 나타낸 것이다. [그림 1.3]을 보면 크게 2가지 주목되는 특징을 찾아볼 수 있는데 그 첫 번째는 $\rho = 0.05$ 와 $\rho = 2.0$ 인 경우 모두 면진건물의 주기가 증가함에 따라 건물 각 층의 응답가속도 분포가 고차모드의 영향을 포함하는 형태로부터 강제거동에 가깝게 일정한 분포를 갖는 형태로 변화하고 있다는 점이며, 두 번째는 같은 상부구조와 면진 층 강성비 하에서는 보-기둥 강성비(ρ)의 변화와는 무관하게 거의 유사한 응답을 나타나고 있다는 점이다. 이러한 사실은 결국 면진설계 시 목표 면진주기를 어떻게 설정하느냐에 따라 면진응답이 크게 달라질 수 있음을 의미하며 골조의 특성은 유효한 면진효과를 얻는데 주요한 변수가 아니다 라는 점을 시사하고 있다.

첫 번째 응답특성의 경우 가속도의 감소라는 관점에서 보면 상기 건물들은 모두 감소효과를 얻고는 있으나 상부구조와 면진 층간의 강성비(또는 진동주기 비)가 낮은 경우에는 면진 층에서 감소된 가속도가 일정하게 유지되지 못하고 건물 최상층에서 다시 증가되는 양상을 나타내고 있어 효과적인 면진을 기대하기 어렵다. 상부구조에서 가속도의 감소는 곧 부재설계에 있어서 하중의 감소를 의미한다는 점을 감안한다면 유효한 면진효과를 얻기 위해서는 상부구조와 면진 층간의 강성비(또는 진동주기 비)를 일정 수준 이상으로 유지하여 설계할 필요가 있다. 또한 상부구조와 면진 층간의 강성비(또는 진동주기 비)가 낮은 경우에는 고차모드의 영향으로 응답가속도 분포가 일정하지 않아 건물의 사용성이라는 측면에서 크게 향상된 효과를 기대하기 어렵고 예상치 못한 특정 층에 하중이 크게 작용하여 연약 층을 형성함으로써 건물의 전체적인 거동과 위험예측을 어렵게 할 가능성이 높아 설계 시 주의할 필요가 있다는 점에서 역시 상부구조와 면진 층간의 강성비(또는 진동주기 비)를 일정 수준 이상으로 유지하여 설계하는 것이 바람직하다고 판단된다.

이러한 관점에서 볼 때 실무적인 입장에서는 유효한 면진효과를 얻기 위하여 어느 정도의 강성비가 반드시 확보될 필요가 있는지에 대하여 정량적인 기준을 설정할 필요가 있지만 아직까지 특정 응답의 형태로부터 면진효과가 있는지 없



(a) $\rho = 0.05$ (b) $\rho = 2.0$
 [그림 1.3 상부구조와 면진 층의 강성비에 따른 응답가속도 분포(15층)]



| 그림 1.4 상부구조와 면진 층의 강성비에 따른 층 전단력 분포(15층) |

는지에 대한 정량적인 기준은 정확히 정립되어 있지 않은 상태이며 실제적으로 그러한 기준은 설계자에 의하여 판단되어야 할 문제이다. 다만 [그림 1.3]과 [그림 1.4]의 비교결과를 토대로 볼 때 면진설계로부터 얻고자 하는 바가 응답 가속도의 감소와 함께 사용성 증가를 목적으로 한 일정한 응답가속도 분포라면 중고층 건물에 있어서 유효한 효과를 얻기 위해서는 상부구조와 면진 층의 강성비(또는 상부구조와 면진건물의 주기비율)는 최소한 2배 이상을 채택하여 설계할 것을 추천한다.

1.8 등가수평력해석의 적용 또는 예비설계

1.8.1 감쇠계수 선정

감쇠계수(B_D or B_M)는 설계변위와 최대변위의 결정 시 요구되는 계수로서 면진시스템의 유효감쇠(β_D or β_M)와 관련된 계수이며, ASCE 7-05 17.8.5.2에 의해 결정된 면진시스템의 유효감쇠에 근거하여 아래 표(ASCE 7-05 Table 17.5-1)에 의하여 산출하고, 표에서 제시한 값 이외의 감쇠계수는 유효감쇠를 직선보간 한 값으로 한다.

| Table 17.5-1 감쇠계수 B_D 또는 B_M |

유효 감쇠, β_D 또는 $\beta_M(\%)^{a,b}$	B_D 또는 B_M
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

주) a. 감쇠계수는 17.8.5.2의 요구조건과 일치하도록 결정된 면진시스템의 유효감쇠에 근거해야 한다.

b. 주어진 유효감쇠 값 이외의 유효감쇠에 의한 감쇠계수는 선형보간에 의해 구하도록 한다.

17.8.5.2 유효감쇠

설계변위에서 면진시스템의 유효감쇠(β_D)는 17.8.2.2절 2항(면진장치 프로토타입 실험의 순서와 반복회수)의 반복하중실험에 기초하고 다음 식에 의하여 계산되어야 한다.

$$\beta_M = \sum [E_D / (2\pi k_{Dmax} D_D^2)] \quad (17.8-7)$$

식 17.8-7에서 설계변위응답의 사이클당 소산된 전체에너지(ΣE_D)는 D_D 와 같은 실험변위에서 측정된 모든 면진유닛에서 사이클당 소산된 에너지의 합으로 산정하여야 하고, 유효감쇠의 최소값을 나타내는 실험변위(D_D)에서 프로토타입 실험의 사이클에 의한 하중과 변위에 기초하여야 한다. 최대변위에서 면진시스템의 유효감쇠(β_M)은 17.8.2.2절 2항(면진장치 프로토타입 실험의 순서와 반복회수)의 반복하중실험에 기초하고 다음 식에 의하여 계산되어야 한다.

$$\beta_M = \sum [E_M / (2\pi k_{Mmax} D_M^2)] \quad (17.8-8)$$

식 17.8-8에서 설계변위응답의 사이클당 소산된 전체에너지(ΣE_M)는 D_M 와 같은 실험변위에서 측정된 모든 면진유닛에서 사이클당 소산된 에너지의 합으로 산정하여야 하고, 유효감쇠의 최소값을 나타내는 실험변위(D_M)에서 프로토타입 실험의 사이클에 의한 하중과 변위에 기초하여야 한다.

1.8.2 면진시스템의 유효 강성 및 허용 수평변위 결정

설계변위(D_D)와 최대변위(D_M)에서 면진건물의 유효주기는 다음의 식 (1.4)에 따라 면진시스템의 변형특성을 이용하여 결정될 수 있다. 따라서 기 설정된 목표 면진주기를 이용하여 역으로 목표 면진주기를 만족시키기 위한 면진시스템의 변형특성(유효 강성)을 식 (1.5) 및 식 (1.6)과 같이 결정한다.

$$T_D \text{ (or } T_M) = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{Dmin} \text{ (or } k_{Mmin}) \cdot g}} \quad (1.4)$$

$$K_{Dmin} = \frac{4\pi^2 \cdot W}{T_D^2 \cdot g} \quad (1.5)$$

$$K_{Mmin} = \frac{4\pi^2 \cdot W}{T_M^2 \cdot g} \quad (1.6)$$

여기서, W = 면진 층 상부구조의 유효 중량

k_{Dmin} = 고려하는 수평방향으로 설계변위에서 면진시스템의 최소 유효강성

k_{Mmin} = 고려하는 수평방향으로 최대변위에서 면진시스템의 최소 유효강성

g = 중력가속도

17.5.3.2 설계변위에서의 유효 주기

설계변위(D_D)에서 면진건물의 유효 주기는 다음 식에 따라 면진시스템의 변형특성을 이용하여 결정되어야 한다.

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{Dmin}g}} \quad (17.5-2)$$

여기서, $W = 12.7.2$ 절에서 정의된 면진 인터페이스 상부구조의 유효 지진중량

k_{Dmin} = 식 17.8-4에 나타낸 바와 같이 고려하는 수평방향으로의 설계변위에서 면진시스템의 최소 유효 강성

g = 중력가속도

17.5.3.4 최대변위에서의 유효 주기

최대변위(D_M)에서 면진건물의 유효 주기는 다음 식에 따라 면진시스템의 변형특성을 이용하여 결정되어야 한다.

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{Mmin}g}} \quad (17.5-4)$$

여기서, $W = 12.7.2$ 절에서 정의된 면진 인터페이스 상부구조의 유효 지진중량

k_{Mmin} = 식 17.8-4에 나타낸 바와 같이 고려하는 수평방향으로의 설계 변위에서 면진시스템의 최소 유효 강성

g = 중력가속도

허용 수평변위는 부지의 여유, 상부구조 기둥의 크기, 면진장치의 허용 수평변위 및 인장력의 발생 억제 등 설계요인에 따른 여러 가지 사항들을 고려하여 결정하도록 한다. 특히 면진장치와 관련하여서는 허용 최대 수평변위가 면진장치 직경의 1/2을 넘지 않도록 한다.

1.8.3 최소 수평변위 산정

면진시스템의 설계레벨과 최대 변형레벨에서의 변위(D_D 와 D_M)는 아래 식 (1.7)과 식 (1.8)에 따라 산정한다. 변위 D_D 와 D_M 은 각각 면진시스템 강성중심에서의 설계변위와 최대변위를 나타낸다. 만약 이 값이 현재 프로젝트에서 허용하는 값보다 큰 경우 면진시스템의 강성을 증가시켜야 한다.

$$D_D = \frac{g \cdot S_{D1} \cdot T_D}{4\pi^2 \cdot B_D} \quad (1.7)$$

$$D_M = \frac{g \cdot S_{M1} \cdot T_M}{4\pi^2 \cdot B_M} \quad (1.8)$$

여기서, g = 중력가속도

$S_{D1}(S_{M1})$ = 주기 1초에서 5%감쇠 설계(최대)스펙트럼 가속도 변수

$T_D(T_M)$ = 식 (1.4)에 주어진 바와 같이 고려하는 방향의 설계(최대) 변위에서 면진건물의 유효 주기

$B_D(B_M)$ = 설계(최대)변위에서 1.8.1절에서 계산된(ASCE 7-05 Table 17.5-1) 면진시스템의 유효감쇠(β_D 또는 β_M)와 관련된 계수. 현 단계에서 실험값이 유효하지 않을 경우 약 20% 정도의 유효감쇠를 가정하여 설계하도록 한다.

17.5.3 최소 수평 변위

17.5.3.1 설계변위

면진시스템은 다음 식에 따라 건물의 각 수평 주축방향으로 발생하는 최소 수평변위 (D_D)를 견딜 수 있도록 설계되고 시공되어야 한다.

$$D_D = \frac{g \cdot S_{D1} \cdot T_D}{4\pi^2 \cdot B_D} \quad (17.5-1)$$

여기서, g = 중력가속도

S_{D1} = 주기 1초에서 5%감쇠 설계스펙트럼 가속도 변수

T_D = 식 (1)에 주어진 바와 같이 고려하는 방향의 설계변위에서 면진건물의 유효 주기

B_D = 설계변위에서 Table 17.5-1에 따른 면진시스템의 유효감쇠(β_D)와 관련된 계수

17.5.3.2 최대변위

가장 큰 수평응답 방향에서 면진시스템의 최대변위(D_M)는 다음 식에 따라 계산되어야 한다.

$$D_M = \frac{g \cdot S_M \cdot T_M}{4\pi^2 \cdot B_M} \quad (17.5-3)$$

여기서, g = 중력가속도

S_M = 주기 1초에서 5%감쇠 최대스펙트럼 가속도 변수

T_M = 식 (1)에 주어진 바와 같이 고려하는 방향의 최대변위에서 면진건물의 유효 주기

B_M = 최대변위에서 Table 17.5-1에 따른 면진시스템의 유효감쇠(β_M)와 관련된 계수

1.8.4 면진장치 설계 및 면진 층의 구성

1.8.1 및 1.8.2에서 구한 면진시스템의 유효강성과 감쇠특성을 이용하여 상부구조의 수직하중, 횡력, 그리고 변위 요구조건에 적합하도록 면진장치를 설계한다(면진장치의 설계에 대해서는 제2장을 참조한다). 이 경우 개개 면진장치의 크기와 강성 그리고 배치의 건물의 형상, 개개 기둥이 부담하는 수직하중, 허용 수평변위 등과 크게 관련되므로 이를 고려하여 설계하여야 한다.

먼저 면진장치의 크기는 면압과 허용 수평변위 등을 고려하여 결정되어야 한다. 면압은 면진장치의 성능과 관계된 것이므로 각 기둥이 부담하는 수직하중의 크기를 고려하여 가능한 한 일정하게 유지되도록 면진장치의 크기를 결정하는 것이 좋다. 하지만 면압 조건만을 강조하다 보면 면진 층이 다양한 크기의 면진장치들로 구성되는 경우가 발생한다. 이 경우 실제 면진 층의 허용 수평변위는 가장 작은 면진장치의 크기에 의해 결정되어지므로 비경제적인 설계가 되는 경우가 많다. 그러므로 면진장치의 크기 종류는 이러한 상황을 잘 고려하여 가능하면 그 종류가 최소화될 수 있도록 면진 층을 구성하도록 한다. 또한 면진장치의 배치와 관련하여서는 기본적으로 각 기둥 아래에 1개의 면진장치를 설치하는 것을 원칙으로 한다. 그러나 기둥 개수가 많고 각 기둥 아래에 1개의 면진장치를 배치하는 경우 면진장치의 면압이 작아져 건물 중량에 비해 면진 층의 수평강성이 커지는 경우가 있다. 이런 경우에는 상부구조의 최하층에 강한 바닥판 또는 보 등을 설치하고 면진장치의 개수를 작게 하여 수평강성을 낮추는 방법도 고려할 수 있다.

면진장치의 수평강성은 면진장치의 배치에 따른 영향을 고려하여 그 크기와 종류를 결정하도록 한다. 먼저 면진장치의 배치는 면진 층이 비틀림 진동을 일으키지 않도록 하기 위해서 상부구조의 질량중심과 면진 층의 강성중심을 일치시키도록 하는 것이 바람직하다. 상부구조가 정형이고 면진장치의 면압이 일정하다면 각 면진장치의 수평강성은 요구되는 면진 층의 총 강성을 설치하고자 하는 면진장치의 수로 나누어 쉽게 계산할 수 있다. 그러나 실제 설계에서 이러한 경우는 거의 없으며, 상부구조의 중심과 면진 층의 강성을 일치시키도록 하기 위하여 여러 종류의 면진장치가 사용된다. 그러나 면진장치의 수평강성을 다양하게 선택한다면 면진장치 제조상의 어려움 및 비용적인 문제 그리고 관리상의 어려움도 따르게 되므로 가능하면 그 수를 줄이는 것이 유리하다. 따라서 면진 층의 수평강성과 관련해서는 제한된 종류의 면진장치를 사용하여 상부구조의 중심과 면진 층의 강성이 일치되도록 반복계산에 의하여 최적화된 설계를 수행하도록 한다. 또한 기둥 개수가 많고 각 기둥 아래에 1개의 면진장치를 배치하는 경우 적층고무형 면진장치만을 사용하면 면진장치 제조기술상의 한계로 인하여 면진 층의 강성이 크게 되어 목표 면진주기를 만족시키기 어렵게 되는 경우가 발생한다. 이 경우 지진 시 수평강성을 무시할 수 있는 미끄럼운동 혹은 구름운동을 하는 장치 등을 혼용하여 면진 층의 수평강성을 줄이는 방안을 사용하도록 한다.

실제 설계에서는 축력과 수평강성의 비가 일정해지도록 면진장치를 선택하면 상부구조의 중심과 면진 층의 강성 사이에 큰 차이는 거의 발생하지 않는다. 면진 층

의 강심이 상부구조의 중심과 일치하는 경우에는 상부구조에서 강심과 중심의 차이가 있어도 면진 층의 비틀림 진동은 충분히 작고, 상부구조를 탄성설계로 하는 경우 상부구조에서 편심의 영향은 종래 내진설계에서 실시하는 방법과 같이 정적으로 구한 편심 량에 근거하여 각 골조의 응력을 할증하는 것으로 가능하다. 건물에 특별한 제약이 있고 면진 층에 큰 편심이 일어난 경우를 제외하고는 비틀림 진동 해석 등을 이용하여 편심으로 인한 동적인 영향을 조사할 필요까지는 없다.

면진 층의 구성은 풍하중의 영향을 고려하여 한다. 이 요구조건을 만족하기 위하여 면진 층의 항복하중은 설계 풍하중보다 충분히 크도록 설계되어야 하며, 항복이 전 수평강성은 풍하중으로 인한 수평변위가 허용변위 이내가 되도록 설계되어야 한다. 또한 풍하중의 요건을 만족시키기 위하여 면진 층에 면진장치와는 별도로 풍 저항시스템이 설치된다면 면진시스템의 변형특성은 풍 저항시스템의 효과를 포함하여 결정되어야 한다.

17.5.2 면진 시스템의 변형 특성

면진건물의 최소 수평지진 설계변위와 힘은 면진시스템의 변형특성에 근거해야 한다. 면진시스템의 변형특성은 만약 풍 저항시스템이 사용된다면 풍 저항시스템의 효과를 포함해야 한다. 면진시스템의 변형특성은 17.8절에 따라 수행된 실증실험에 근거해야 한다.

면진장치의 설계가 완료되면 설계된 면진장치의 힘-변위 이력곡선을 설정한다. 이 이력곡선은 면진장치 제작자에 의해 제공된 비슷한 형태, 크기 혹은 특성을 갖는 면진장치의 실험결과에 기인할 수 있다. 현 단계에서 가정된 이력특성은 실제 사용될 면진장치의 실험결과가 나왔을 때 최종 설계단계에서 확인되고 정정되어질 수 있다.

1.8.5 최대변위 검토

면진시스템의 전체 설계변위는 면진시스템의 수평강성 분포와 편심질량의 가장 불리한 위치로부터 계산된 실제 또는 우발적인 비틀림에 의한 부가 변위를 포함해야 한다. 만약, 면진시스템이 비틀림에 대하여 저항하도록 배치되었음이 계산을 통하여 입증된다면, 전체 설계변위(D_{TD})와 전체 최대변위(D_{TM})는 식 (1.9) 및 식 (1.10) 보다 작게 취할 수도 있다. 단, 각각 D_D 와 D_M 의 1.1배 보다 작아서는 안 된다.

$$D_{TD} = D_D \left[1 + \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] > 1.1D_D \quad (1.9)$$

$$D_{TM} = D_M \left[1 + \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] > 1.1D_M \quad (1.10)$$

17.5.3.5 전체 최대변위

면진시스템 요소들의 전체 설계변위(D_{TD})와 전체 최대변위(D_{TM})는 면진시스템의 수평강성 분포(Spatial Distribution)와 편심 질량의 가장 불리한 위치로부터 계산된 실제 또는 우발적인 비틀림에 의한 부가 변위를 포함해야 한다. 수평강성이 등 분포된 면진시스템 요소들의 전체 설계변위(D_{TD})와 전체 최대변위(D_{TM})는 다음 식에 나타난 것보다 작아서는 안 된다.

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (17.5-5)$$

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (17.5-6)$$

예외사항 : 전체 설계변위(D_{TD})와 전체 최대변위(D_{TM})은 면진시스템이 비틀림에 저항하는 형상을 갖고 있다면 각각 식 17.5-5와 17.5-6에 의한 값보다 작아도 되지만, D_D 와 D_M 의 1.1배 보다 작아서는 안 된다.

식 (1.7)과 식 (1.8)은 면진장치 상부의 구조물이 강체(Rigid)이며, 면진건물의 강성과 질량의 중심이 일치한다는 가정 하에 유도된 것이다. 그러므로 전체 변위의 계산 시에는 수평력이 가해지는 방향과 직각방향으로 놓인 평면길이의 5%에 해당하는 부가적인 우발편심에 의한 비틀림으로 유발되는 추가적인 변위를 식 (1.9)과 식(1.10)에 의해 고려해야 한다. 여기서 D_{TD} 와 D_{TM} 은 각각 면진 구조체 강성중심에서의 전체 설계변위와 전체 최대변위를 나타내고, y 는 면진시스템의 강성중심으로부터 수평력이 가해진 방향의 직각방향으로 임의의 위치까지의 거리이며, e 는 면진시스템의 강성중심으로부터 면진시스템 위에 있는 상부구조의 질량중심까지의 거리에 우발 편심거리를 더한 실제 편심길이이고, b 와 d 는 평면의 짧은 길이와 긴 길이를 각각 나타낸다.

1.8.6 면진 총 상·하부 구조 설계

1.8.6.1 면진 총과 면진 총 하부구조

면진시스템을 포함하여 그 하부 구조요소들의 설계는 설계기준 지진을 경험하는 동안 면진시스템으로부터 전달되는 최대 힘에 근거해야 한다. 이 최대 힘(V_b)은 면진시스템의 최대 강성(k_{Dmax})과 설계변위(D_D)의 곱과 같다.

$$V_b = k_{Dmax} \cdot D_D \quad (1.11)$$

17.5.4.1 면진시스템과 면진시스템 하부의 구조요소

면진시스템, 기초, 그리고 면진시스템 하부의 모든 구조요소는 비 면진구조에 대한 모든 적절한 요건을 사용하여 최소 수평지진력(V_b)을 견딜 수 있도록 설계되고 시공되어야 한다.

$$V_b = k_{Dmax} D_D \quad (17.5-7)$$

여기서, k_{Dmax} = 식 17.8-3에 나타난 바와 같이 고려하는 수평방향으로 설계변위에서 면진시스템의 최대 유효 강성

D_D = 식 17.5-1에 나타난 바와 같이 고려하는 방향으로 면진시스템의 강성 중심에서 설계변위

V_b 는 설계변위를 포함한 설계변위까지의 임의변위에서 면진시스템의 최대 힘보다 작아서는 안 된다.

1.8.6.2 면진 층 상부구조

(1) 면진시스템의 상부구조는 식 (1.12)와 같이 응답감소계수(R_I)에 의해 나누어진 면진시스템으로부터 전달되는 최대 힘에 근거하여 설계되어야 한다.

$$V_s = \frac{k_{Dmax} \cdot D_D}{R_I} \quad (1.12)$$

단, V_s 는 다음 값들보다 작지 않아야 한다.

- ① 기초고정이고 무게가 w , 주기가 T_b 인 시스템에 가해지는 수평지진력
- ② 설계 풍하중에 의한 밀면전단력
- ③ 면진장치가 완전히 작동하는데 필요한 수평지진력의 1.5배, 만약 V_b 나 V_s 값이 현재 과제에서 허용하는 값보다 큰 경우

첫 번째 제한은 설계 밀면전단력이 적어도 상응하는 주기를 갖는 기초고정 건물의 밀면전단력 이상이 되도록 하기 위한 것이며, 두 번째 제한은 면진시스템 상부의 요소들이 설계 풍하중 하에서 탄성 상태로 남아 있도록 하기 위한 것이다. 세 번째 제한은 면진시스템 상부 구조요소들이 면진시스템이 작동하기 이전에 비탄성적으로 변형하는 것을 막기 위한 것이다.

참고로 k_{Dmax} 는 면진장치의 강성변동으로 인한 영향을 반영하여 적용할 필요가 있으며, R_I 값은 기초고정 건물의 내진설계 시 도입된 R 값의 3/8을 취하되 1.0이상 2.0이하로 한다.

17.5.4.2 면진시스템 상부의 구조요소

면진시스템의 상부구조는 비 면진구조와 관련된 모든 적절한 요건을 사용하여 최소 전단력(V_s)를 견딜 수 있도록 설계되고 시공되어야 한다.

$$V_s = (k_{Dmax} D_D) / R_I \quad (17.5-8)$$

여기서, k_{Dmax} = 식 17.8-3에 나타낸 바와 같이 고려하는 수평방향으로 설계변위에서 면진시스템의 최대 유효 강성

D_D = 식 17.5-1에 나타낸 바와 같이 고려하는 방향으로 면진시스템의 강성중심에서 설계변위

R_I = 면진시스템 상부 내진저항시스템의 형태와 연관된 수치 계수

R_I 는 면진시스템 상부구조에 사용된 내진저항시스템의 형식에 근거해야 하고, 표 12.2-1에 주어진 R 의 3/8이어야 한다. 또한 이 값의 상계치는 2.0을 초과하지 않고 하계치는 1.0보다 작아서는 안 된다.

17.5.4.3 V_s 의 제한

V_s 의 값은 다음보다 작아서는 안 된다.

1. 동일한 유효 지진중량(W)과 면진주기(T_D)와 같은 주기를 갖는 고정기초 건물에 대하여 12.8절에 의해 요구되는 수평 지진력
2. 계수 설계 풍하중에 상당하는 밑면전단력
3. 면진시스템을 완전히 작동시키는데 필요한 수평 지진력의 1.5배(예, 유연시스템의 항복 수준, 풍저항시스템의 극한 성능 또는 슬라이딩시스템의 최대 정지마찰 수준)

(2) 식 (1.12)로부터 계산된 전단력 V_s 는 식 (1.13)을 이용하여 건물의 높이를 따라 분배하여 설계하며, 상부구조의 최대 층간변위는 $0.015h_x$ 를 초과하지 않도록 한다. 이 때 층간변위는 정의된 R_I 값을 갖는 면진구조의 C_d 값을 가지고 식 (1.14)에 의하여 계산되어야 한다.

$$F_x = \frac{V_s w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (1.13)$$

여기서, V_s = 면진시스템 상부구조의 전체 수평 설계지진력 또는 전단력

W_x = 레벨 i , n 또는 x 각각에 위치한(또는 할당된) W 의 양

h_x = 기초에서부터 레벨 i , n 또는 x 각각의 높이

w_i = 레벨 i , n 또는 x 각각에 위치한(또는 할당된) W 의 양

h_i = 기초에서부터 레벨 i , n 또는 x 각각의 높이

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I} \quad (1.14)$$

여기서, C_d = 변위증폭계수

δ_{xe} = 지진력저항시스템의 탄성해석에 의한 변위

I = 건물의 중요도 계수, 1.6.1의 ③에 따라 면진구조의 경우 1.0으로 한다.

참고로 x 로 정의된 각 레벨에서 힘 F_x 는 그 레벨에서의 질량분포에 따라 그 구조물의 면적에 작용되어야 한다.

17.5.5 힘의 수직분포

전단력 V_s 는 다음 식에 따라 면진 인터페이스 상부 구조의 높이에 걸쳐 분포되어야 한다.

$$F_x = \frac{V_s w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (17.5-9)$$

여기서, $V_s = 17.5-8$ 에 나타난 바와 같이 면진시스템 상부구조의 전 수평 설계 지진력 또는 전단력

$w_x =$ 레벨 i , n 또는 x 각각에 위치한(또는 할당된) W 의 양

$h_x =$ 기초에서부터 레벨 i , n 또는 x 각각의 높이

$w_i =$ 레벨 i , n 또는 x 각각에 위치한(또는 할당된) W 의 양

$h_i =$ 기초에서부터 레벨 i , n 또는 x 각각의 높이

x 로 정의된 각 레벨에서 힘 F_x 는 그 레벨에서 질량분포에 따라 그 구조물의 면적에 작용되어야 한다.

17.5.6 층간변위 제한

면진시스템 상부구조의 최대 층간변위는 $0.015h_{sx}$ 를 초과해서는 안 된다. 층간변위는 17.5.4.2절에서 정의된 R_i 와 같은 구조물의 C_d 를 갖는 식 12.8-15로 계산되어야 한다.

1.9 동적해석절차의 적용 또는 본 설계

시간이력해석은 면진설계의 가장 기본적인 해석법이다. 가능하다면 지침에서 요구하는 절차와는 상관없이 시간이력해석을 수행하기 전에 등가수평력해석과 응답스펙트럼해석을 수행하는 것이 바람직하다. 1.5.3에서 규정된 응답스펙트럼해석의 제한규정(ASCE 7-05 17.4.2.1)을 만족할 수 없을 경우에는 반드시 시간이력해석이 수행되어야 한다.

1.9.1 모델링

1.9.1.1 면진시스템

면진시스템은 실험에 의하여 개발되고 검증된 면진시스템의 변형특성을 이용하여 가능한 한 상세하게 모델링 되어야 한다. 모델링 시 반드시 고려해야 할 요건은 1.8.4 또는 ASCE 7-05 17.5.2 및 17.6.2.1절을 참고하기 바란다.

1.9.1.2 면진 층 상부구조

면진구조는 기본적으로 면진 층 상부구조가 지진 시 탄성 상태로 머물러 있도록 설계하는 것을 원칙으로 하므로 기준에서는 건물에 대한 수학적 모델을 탄성모델을 사용하여 모델링 할 수 있도록 허용하고 있다. 사용 가능한 모델은 기본적으로 다음의 2가지가 있다.

① 막대기모델 (Stick Model)

이 접근방법은 다양한 시간이력해석이나 최소 편심이 요구되는 건물에 대하여 여러 번의 해석을 하기에 편리하다. 대표적으로 이 모델은 건물이 기초고정일 때의 질량, 고유치(Eigenvalues, Eigenvectors)와 함께 3D-BASIS와 같은 상용 컴퓨터 프로그램을 이용하여 만들 수 있다. 이 모델의 제약은 필연적으로 층의 강막작용(Rigid Diaphragm Floors)을 가정해야 한다는 점과 순수 들어올림(Net-Uplift)을 모델링하기 어렵다는 것이다.

② 3D모델

이 접근방법은 ETABS나 SAP-2000과 같이 면진장치의 비선형 거동을 모델링 할 수 있는 상용 컴퓨터 프로그램을 이용하는 면진장치와 상부건물의 통합된 모델링 방법이다. 이 모델링 방법의 불리한 점은 실제 면진과제를 수행하기 위해 많은 전산해석 수행 시 처리해야할 데이터의 수가 방대하다는 것이다.

17.6.2.1 면진시스템

면진시스템은 17.5.2절의 요건에 따라 실험에 의하여 개발되고 검증된 변형특성을 이용하여 모델링 되어야 한다. 면진시스템은 다음의 내용들을 고려하여 충분히 상세하게 모델링 되어야 한다.

1. 면진장치들의 공간적인 분포
2. 편심질량의 가장 불리한 위치를 고려하여 면진 층 상부구조의 2방향 수평변위와 비틀림
3. 각 면진장치의 전도력(Overturning Force)과 양력(Uplift Force)
4. 면진장치의 하중-변위 특성이 수직하중, 2방향 하중 그리고 재하속도 가운데 하나 이상의 하중특성에 의하여 영향을 받는다면 이러한 하중특성을 고려하여 충분히 자세히 모델링 되어야 한다.

면진장치에 대한 전체 설계변위 및 전체 최대변위는 면진장치 내 비선형요소의 하중-변위특성과 지진력저항시스템을 통합한 면진건물의 모델을 사용하여 계산되어야 한다.

17.6.2.2 면진건물

17.6.2.2.1 핵심요소의 힘과 변위

각 층의 최대변위와 지진력저항시스템을 구성하는 요소의 설계력과 변위는 아래의 사항을 가정한 면진건물의 선형탄성 모델을 사용하여 계산되는 것이 허용된다.

1. 면진시스템의 비선형 요소들에 대하여 가정된 강성 특성은 면진시스템의 최대 유효강성에 기초한다.

2. 면진시스템 상부구조의 지진력저항시스템을 구성하는 모든 요소는 설계지진 하에서 탄성 상태에 있다.

탄성요소를 갖는 지진력저항시스템은 V_s 의 100% 이상의 횡력에 대하여 설계된 비정형 구조시스템과 V_s 의 80% 이상의 횡력에 대하여 설계된 정형 구조시스템을 포함한다. 여기서 V_s 는 17.5.4.2절에 따라 결정된다.

1.9.2 입력지진동의 결정

설계기준 지진은 면진시스템의 전체 설계변위와 면진된 건물의 수평력 및 변위 계산 시, 그리고 최대지진은 면진시스템의 전체 최대변위 계산 시 사용하도록 한다.

17.6.3.2 입력 지진

면진시스템의 전체 설계변위와 면진구조의 횡하중과 횡변위를 계산하기 위해서는 설계지진을 사용하여야 한다. 면진시스템의 전체 최대변위를 계산하기 위해서는 최대지진을 사용하여야 한다.

특정지역에 대한 지반운동의 시간이력은 실제 지진의 지반운동을 대표하는 것이어야 하고, 이 때 시간이력으로부터 얻게 되는 응답스펙트럼은 KBC 2005 0306.3.4절에 의한 설계용 스펙트럼을 근사적으로 나타낼 수 있어야 한다.

일반적으로 건물의 내진설계에 사용되는 입력지진동의 크기와 특성은 건물이 세워질 해당지역에 영향을 미칠 수 있는 활성 단층의 활동에 관한 자료와 활성 단층에서 부지까지의 거리 및 단층과 부지 사이의 지질 등에 관한 자료를 이용하여 결정되는 각 지역의 지진위험도와 건물의 중요도 및 동적특성 등에 의하여 결정된다. 면진과 내진은 방법론상의 차이는 있지만 모두 지진을 설계대상으로 하고 있다는 점에서 면진건물의 입력지진동도 같은 관점에서 고려되어야 할 것이다. 다만, 면진건물에 있어서는 내진과는 달리 강진에 대해서도 건물 구조체에 피해가 없어야 한다는 점을 기본 설계이념으로 하고 있기 때문에 면진설계를 실시하고 있는 선진 외국의 경우 2단계 혹은 3단계의 입력레벨을 두어 건물의 동적거동에 대한 평가를 수행하고 있다는 점에 주목할 필요가 있다.

〈표 1.1〉은 日本建築學會의 「免震構造設計指針」에서 제시하고 있는 입력지진동의 레벨을 나타낸 것으로 각 레벨에 따른 정의는 다음과 같다.

표 1.1 입력레벨에 따른 건물의 동적거동 평가

구 분	Level 1	Level 2	Level 3
상부구조	단기허용응력도 이하	탄성한계내력 이하	탄성한계내력 이하
층간변형각	1/500 이하	1/(200~400)이하	1/200 이하
면진장치 (전단변형)	안정변형 (120%이하)	성능보증변형 (200%이하)	성능보증변형 (300%이하)

주) Level 1: 내구연한 중 1번 이상 일어날 가능성이 높고, 건물의 탄성한도에 가까운 강도를 지닌 지진동

Level 2: 과거 혹은 앞으로 일어날 것으로 생각되어 지는 최강의 지진동

Level 3: 여유도 검토용(성능확인)으로 면진건물의 크리어런스(Clearance) 확보를 위해 평가되는 지진동

구조물별로 차이는 있으나 Level 1의 설정은 지진 발생시 구조물에 피해가 발생하지 않고 그 기본기능을 유지할 수 있도록 설계하는 것을 목표로 하고 있으며, Level 2의 설정은 지진 발생시 구조물의 피해는 어느 정도 허용하나 보수가 가능하도록 설계하는 것을 목표로 한다. 상기 설정된 입력지진동의 레벨은 정성적인 것이므로 정량적으로 각 레벨에 대하여 어느 정도 크기의 지진동을 입력해야 할 것인가의 문제는 설계자마다 그 기준이 다를 수 있다. 참고로 일본고무협회의 면진고무이용기술특별위원회는 구조설계자를 대상으로 한 앙케이트 조사결과에 근거하여 각 레벨에 따라 면진 층의 응답전단력계수로 <표 1.2>와 같이 그 크기를 정리하고 있다.

표 1.2 면진 층의 응답전단력계수

구 분	Level 1	Level 2	Level 3
응답전단력계수	0.1	0.2	0.3

여기서 면진 층의 응답전단력계수는 면진 층의 응답전단력과 면진 층 상부구조의 총 중량과의 비로 정의된다. 일본의 경우 일반적으로 내진설계에 사용되는 표준 전단력계수가 0.2이므로 위의 각 레벨에 대하여 대략적인 정량적 평가가 이루어질 수 있다. 일본의 표준 전단력계수에 해당하는 것으로 우리나라에서는 지역계수를 사용하고 있는데, 설계 식이 서로 상이하여 비례적인 일대일 대응에는 다소 무리가 있으나 국내 설계기준 설정용으로 응용 가능하다.

17.3.1 설계 스펙트럼

21장에서 규정된 특정지반(Site-Specific)의 지반운동절차는 임의 건물의 지반운동을 결정하기 위하여 사용될 수 있다. 지반분류 F에 위치한 건물에 대해서는 21.1절에 따라 지반응답 해석을 수행하여야 한다. S_d 값(주기 1초에서의 응답스펙트럼 가속도 값)이 0.6과 동등 이상인 지반에 위치한 면진건물에 대해서는 21.2절에 따라 지반운동 위험도해석을 수행하여야 한다. 특정지반 지반운동절차를 요구하지 않거나 사용하지 않는 건물은 11.4.5절에 따라 얻어진 설계지진에 대한 설계스펙트럼을 사용하여 해석되어야 한다.

설계 스펙트럼은 최대 고려지진(MCE)에 대해 만들어져야 한다. 최대 고려지진에 대한 설계스펙트럼은 설계지진에 대한 설계스펙트럼의 1.5배 보다 작아서는 안 된다.

17.3.2 지반운동 이력

응답이력해석이 사용되는 경우 지반운동은 개별적으로 기록된 지진들로부터 선택되고 크기가 조정된 한 쌍의 적절한 수평 지반운동 가속도성분으로 구성되어야 한다. 적절한 지반운동은 규모, 단층까지의 거리, 그리고 최대 고려지진을 조절하기 위한 메커니즘과 일치하는 메카니즘(Source Mechanism)을 갖는 지진으로부터 선택되어야 한다. 기록된 지반운동의 숫자가 요구치보다 부족할 경우에는 적절한 모의지반 운동을 사용하여 필요한 개수를 채워야 한다. 각 쌍의 수평 지반운동 성분에 대해 SRSS(The Square Root of the Sum of the Squares) 스펙트럼이 크기가 조정된 성분들(한 쌍의 두 성분에 대해서는 동일한 크기조정 계수가 적용된다)에 대한 5%감쇠 응답스펙트럼의 SRSS를 취함으로써 만들어져야 한다. 각 쌍의 운동은 $0.5T_D$ 와 $1.25T_M$ (여기서 T_D 와 T_M 은 17.5.3절에 정의됨)사이에서 모든 수평성분으로부터 얻어진 SRSS 스펙트럼의 평균이 17.3.1절에 따라 결정된 설계응답스펙트럼 종좌표 값의 1.3배 이하로 떨어지지 않도록 크기가 조절되어야 한다.

ASCE 7-05 면진설계지침에서도 일본의 면진설계지침과 유사하게 설계기준 지진동(Design Base Earthquake)과 최대고려 지진동(Maximum Considered Earthquake)의 2 단계로 입력지진동의 레벨을 구분하여 서로 다른 성능수준을 만족하도록 설계할 것을 규정하고 있으며, 구조물의 중요도에 따라 설계지진의 재현 주기를 달리 설정하고 있다. 설계기준 지진동의 경우 50년 동안 발생할 확률이 10%를 초과하는 지진, 즉 재현주기가 475년인 지진을 기준으로 삼고 있으며, 최대 고려 지진동에 대해서는 설계기준 지진동의 1.5배의 값을 갖는 지진동을 설계대상으로 하고 있다. 상기 지진동의 레벨별 평가로부터 지진파의 최대 속도 혹은 최대 가속도를 추정하여 대표적인 입력지진동으로 사용되는 지진동의 스케일을 조정하거나 인공지진파를 작성할 수 있다.

1.9.3 동적해석 수행

1.9.3.1 응답스펙트럼해석

부지의 지반특성을 반영한 스펙트럼의 구성이 요구되는 매우 연약한 지반 위에 놓인 건물과 매우 높은 비선형성을 나타내는 면진시스템에 의하여 지지되는 건물을 제외하고는 모든 면진건물의 설계에 응답스펙트럼해석법이 적용될 수 있다.

17.4.2.1 응답스펙트럼해석

아래조건을 만족하지 못하면 면진건물의 설계에 응답스펙트럼해석을 사용해서는 안 된다.

1. 구조물이 지반분류 A, B, C 또는 D인 지반에 있다.
 2. 면진시스템이 17.4.1절의 7번 항목의 조건을 만족한다.
-

응답스펙트럼해석 시 모드감쇠 값의 설정, 지진동의 입력방법, 최대변위 및 설계 밀면전단력의 산정방법 등은 ASCE 7-05 17.6.3.3절에 의거 수행한다.

17.6.3.3 응답 스펙트럼 해석절차

응답스펙트럼 해석은 면진시스템의 유효감쇠나 임계감쇠의 30%의 작은 값보다 크지 않은 관심있는 방향의 기본모드에 대한 모드감쇠 값을 사용하여 수행되어야 한다. 고차모드에 대한 모드감쇠 값은 고정기초로 가정한 면진시스템 상부구조의 응답스펙트럼 해석에 적합한 모드감쇠 값과 일치되도록 선택되어야 한다.

전체 설계변위와 전체 최대변위를 결정하기 위하여 사용된 응답스펙트럼 해석은 주 방향 지진동의 100%와 주 방향에 직각인 수평방향 지진동의 30%가 동시에 가진된 경우를 포함하여야 한다. 면진시스템이 최대변위는 지교하는 두 변위의 벡터 합으로 계산되어야 한다.

임의 층에서의 설계전단력은 식 17.5-9를 이용하여 계산된 층 하중의 적용에 의한 층 전단력과 관심있는 방향에 대한 응답스펙트럼 해석으로부터 얻어진 밀면전단력과 같은 V_u 값보다 작아서는 안 된다.

1.9.3.2 시간이력해석

1.9.1절에서 구한 복원력 특성에 근거해서 면진시스템의 적절한 모델을 작성하고 적층고무베어링의 편차 및 경년변화를 고려해서 ASCE 7-05 17.6.3.4절에 따라 시간이력해석을 실시토록 한다. 시간이력해석은 수평방향을 주로 하는데 상·하동을 고려하여 인발이 예상되는 경우에는 상·하동에 의한 해석도 실시한다.

17.6.3.4 응답이력 해석절차

응답이력해석은 3쌍 이상의 적절한 지진동이 해석에 사용되어야 하고, 각 지진동의 쌍은 17.3.2절에 따라 선택되고 크기가 조정되어야 한다.

각 쌍의 지진동 성분은 편심 질량의 가장 불리한 위치를 고려한 모델에 동시에 적용되어야 한다. 면진시스템의 최대변위는 각 시간 단계에서 2개의 직교하는 변위의 벡터 합으로부터 계산되어야 한다.

관심있는 변수들은 응답이력해석을 위하여 사용되는 각 지진동에 대하여 계산되어야 한다. 응답이력해석을 위하여 적어도 7개의 지진동이 사용되면 설계를 위하여 특정응답 변수의 평균값을 사용하는 것이 허용된다. 만약 7개미만의 지진동이 사용된다면 설계를 위하여 특정 응답변수의 최대값이 사용되어야 한다.

1.9.4 목표 설계변위와 면진주기의 결정

목표 설계변위와 힘-응답을 만족하는 면진장치와 상부구조의 설계를 수행하기 위하여 1.9.1~1.9.3의 지침에 따라 해석과 설계를 반복 수행하고, 최종적인 설계변위 D_D 와 최대변위 D_M , 그리고 이와 상응하는 면진주기 T_D 와 T_M 을 결정하라. 이 값들은 예비설계단계에서 계산된 최소값들과 같지 않다. 선택된 D_M 은 D_D 보다 커야하고 D_D 는 예비설계 단계에서 계산된 최소값보다 커야 한다.

동적해석으로부터 구한 설계 수평변위와 수평력은 정적해석으로부터 구한 값들보다 작을 수 있다. 면진시스템의 총 설계변위(D_{TD})는 정적해석으로 구한 값의 90%이하가 되서는 안 되며, 총 최대변위(D_{TM})는 정적해석으로부터 구한 값의 80%이하가 되서는 안 된다.

1.9.5 면진 층 상·하부 구조 설계

1.9.5.1 면진 층과 면진 층 하부구조

해석결과에 근거하여 면진 층과 면진 층 하부구조를 설계한다. 단 해석으로부터 얻어진 값은 ASCE 7-05 17.6.4.1절에 의한 제한규정을 만족하여야 한다.

17.6.4.1 면진시스템과 면진시스템 아래의 구조요소

면진시스템, 기초 그리고 면진시스템 아래의 구조요소들은 비 면진구조에 대한 모든 요건과 하중의 감소 없이 동적해석으로부터 얻어진 횡력을 사용하여 설계되어야 한다. 그러나 설계 횡력은 식 17.5-7에 규정된 바에 의해 결정된 V_6 의 90%보다 작아서는 안 된다.

면진시스템의 전체 설계변위는 17.5.3.5절에 규정된 D_{TD} 의 90%보다 작아서는 안 된다.
면진시스템의 전체 최대변위는 17.5.3.5절에 규정된 D_{TM} 의 80%보다 작아서는 안 된다.

이 절에 규정된 변위의 제한치는 D_D 를 대신하여 D_D 의 사용이 허용된 경우와 D_M 를 대신하여 D_M 의 사용이 허용된 경우를 제외하고 17.5.5절에 의하여 결정된 D_{TD} 와 D_{TM} 의 값을 사용하여 평가되어야 한다. 여기서 D_D 와 D_M 은 다음과 같다.

$$D'_D = \frac{D_D}{\sqrt{1 + (T/T_D)^2}} \quad (17.6-1)$$

$$D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + (T/T_M)^2}} \quad (17.6-2)$$

여기서 D_D = 식 17.5-1에 규정된 바와 같이 면진시스템의 강성중심에서 고려하는 방향으로의 설계변위

D_M = 식 17.5-3에 규정된 바와 같이 면진시스템의 강성중심에서 고려하는 방향으로의 최대변위

T = 12.8.2절에 의하여 결정되는 면진시스템 상부건물의 탄성 고정기초 주기

T_D = 식 17.5-2에 규정된 바와 같이 설계변위에서 고려하는 방향으로의 면진 건물의 유효주기

T_M = 식 17.5-42에 규정된 바와 같이 최대변위에서 고려하는 방향으로의 면진 건물의 유효주기

1.9.5.2 면진 층 상부구조

해석결과에 근거하여 면진 층 상부구조를 설계한다. 단 해석으로부터 얻어진 값은 ASCE 7-05 17.6.4.2절에 의한 제한규정을 만족하여야 한다.

17.6.4.2 면진시스템 상부구조

이 절의 절차상 규정된 제한 값에 지배되는 면진시스템의 상부구조는 비 면진건물에 대한 적절한 요건과 17.5.4.2.절에 따라 결정된 R_f 계수에 의하여 감소된 동적해석으로부터 얻어지는 힘을 사용하여 설계되어야 한다. 형상이 정형인 경우 면진시스템 상부구조에 작용하는 설계 수평전단력은 V_s 의 80%이하 또는 17.5.4.3절에 규정된 제한 값 이하로 산정되어서는 안 된다.

예외: 형상이 정형인 경우, 면진건물의 해석에 응답이력해석이 사용된다면 면진시스템 상부 구조에 작용하는 설계 수평전단력은 V_s 의 80%이하로 산정하는 것이 허용되나 60%이하이어서는 안 된다.

형상이 비정형인 경우, 면진건물의 해석에 응답이력해석이 사용된다면 면진시스템 상부구조에 작용하는 설계 수평전단력은 V_s 이하 또는 17.5.4.3절에 규정된 제한 값 이하로 산정하여서는 안 된다.

예외: 형상이 비정형인 경우, 면진건물의 해석에 응답이력해석이 사용된다면 면진시스템 상부건물에 작용하는 설계 수평전단력은 V_s 의 100%이하로 산정하는 것이 허용되나 V_s 의 80%이하이어서는 안 된다.

1.9.5.3 해석결과의 보정

17.6.4.3 해석결과의 보정

응답스펙트럼해석이나 응답이력해석 절차를 사용하여 결정된 구조요소에 대한 계수 수평전단력이 17.6.4.1절과 17.6.4.2절에 규정된 최소치 이하이면 부재력과 모멘트를 포함하여 모든 응답변수들은 비례적으로 상향 조정되어야 한다.

1.9.5.4 변위제한

17.6.4.4 변위제한

면진시스템의 수직변형에 의한 변위를 포함한 설계수평력에 의한 최대 층 변위는 다음의 제한치를 초과하여서는 안 된다:

1. 응답스펙트럼해석에 의하여 계산된 면진시스템 상부구조의 최대 층 변위는 $0.015h_{sr}$ 를 초과하여서는 안 된다.
2. 수평력저항시스템의 비선형요소들의 하중-변위 특성에 기초한 응답이력해석으로부터 계산된 면진시스템 상부구조의 최대 층 변위는 $0.020h_{sr}$ 를 초과하여서는 안 된다.
수평변위는 17.5.4.2절에 정의된 R_f 계수와 동일한 면진건물의 C_u 계수를 포함하는 식 12.8-15를 사용하여 계산되어야 한다.

층 변위비가 $0.010/R_f$ 를 초과하는 경우, 중력하중과 조합된 면진시스템 상부구조의 최대 고려지진에 대한 수평변위의 2차 효과가 검토되어야 한다.

1.9.6 설계검토 및 수정

ASCE 7-05 17.5.2에서 설명하고 있듯이 면진건물의 최소 설계지진 변위와 힘은 면진시스템의 실제적인 변형특성에 근거해야 하므로 면진장치에 대한 성능검사가 완료되면, 설계완료 후 또는 설계의 임의단계에서라도 면진장치의 특성을 반영하여 해석 및 설계가 재검토되어야 한다.

면진장치의 유효강성은 이력곡선의 좌·우가 현저하게 대칭이 아닌 면진장치의 경우를 제외하고는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$k_{Dmax} = k_{Dmin} = \frac{DBE\text{밀면전단력}}{D_D} \quad (1.15)$$

$$k_{Mmax} = k_{Mmin} = \frac{MCE\text{밀면전단력}}{D_M} \quad (1.16)$$

여기서 DBE와 MCE는 각각 설계기준지진(Design Base Earthquake)과 최대고려지진(Maximum Considered Earthquake)을 나타낸다. 수학적 모델에서 사용한 면진장치의 상·하한 특성 값들은 다음 식들을 이용하여 실험적으로 검증하고 가정된 값과 일치하지 않을 경우 보정되어야 한다.

$$k_{Dmax} = \frac{\Sigma |F_D^+|_{max} + \Sigma |F_D^-|_{max}}{2D_D} \quad (1.17)$$

$$k_{Dmin} = \frac{\Sigma |F_D^+|_{min} + \Sigma |F_D^-|_{min}}{2D_D} \quad (1.18)$$

$$k_{Mmax} = \frac{\Sigma |F_M^+|_{max} + \Sigma |F_M^-|_{max}}{2D_M} \quad (1.19)$$

$$k_{Mmin} = \frac{\Sigma |F_M^+|_{min} + \Sigma |F_M^-|_{min}}{2D_M} \quad (1.20)$$

여기서, k_{Dmax}, k_{Dmin} = 설계변위에서 최대, 최소 유효강성

k_{Mmax}, k_{Mmin} = 최대변위에서 최대, 최소 유효강성

F_{Dmax}^+, F_{Dmax}^- = 설계변위에서 면진장치의 양과 음의 최대 전단력

F_{Mmax}^+, F_{Mmax}^- = 최대변위에서 면진장치의 양과 음의 최대 전단력

F_{Dmin}^+, F_{Dmin}^- = 설계변위에서 면진장치의 양과 음의 최소 전단력

F_{Mmin}^+, F_{Mmin}^- = 최대변위에서 면진장치의 양과 음의 최소 전단력

또한 최초 가정한 감쇠수준 혹은 수학적 모델에서 얻은 감쇠수준을 다음 식(1.21)과 식 (1.22)로 검증하고, 필요한 경우 ASCE 7-05 Table 17.5-1를 이용하여 감쇠계수를 다시 계산한다.

$$\beta_D = \frac{\Sigma E_D}{2\pi k_{Dmax} D_D^2} \quad (1.21)$$

$$\beta_M = \frac{\Sigma E_M}{2\pi k_{Mmax} D_M^2} \quad (1.22)$$

17.7 설계검토

면진시스템의 설계검토와 그와 관련된 실험프로그램들은 적절히 훈련되고 지진해석법과 면진 이론 및 적용경험이 있는 사람들을 포함하는 독립된 설계팀에 의하여 수행되어야 한다. 면진시스템의 설계검토는 다음 사항을 포함하여야 하나 제한규정은 아니다.

1. 특정지반의 스펙트럼과 지반운동이력의 개발 및 그 프로젝트를 위하여 특별히 개발된 기타 모든 설계기준을 포함한 특정지반 내진기준의 검토
2. 전체 설계변위, 전체 최대변위와 수평력의 수준 결정을 포함한 예비설계의 검토
3. 프로토타입 실험의 관찰 및 검토 (17.8절)
4. 전체 구조시스템의 최종설계와 모든 해석의 검토
5. 면진시스템 품질관리 실험프로그램의 검토 (17.2.9절)

