

정형 및 비정형 건물에 대한 비선형 면진장치의 적용

Application of Non-linear Seismic Isolators in Regular and Irregular Buildings

김 대 곤*
Kim, Dae Kon

이 동 곤**
Lee, Dong Guen

정 재 은***
Jung, Jae Eun

남 궁 계 홍***
Nam Gung, Kye Hong

국문요약

면진기술은 주로 저층 구조물의 내진설계에서 적용되는 방법으로 건물과 기초 사이에 면진장치를 설치하여 상부로 전달되는 지진하중을 효과적으로 감소시킨다. 그러나 이 방법을 중·고층 구조물에 그대로 적용하기에는 여러가지 기술적 문제가 따르므로, 구조물의 중간층 일부를 분리시켜 상부로 전달되는 지진력을 감소시킬 수 있을 것이다. 본 논문에서는 저층 뿐만 아니라, 중·고층 정형 구조물 및 주상복합건물과 같은 비정형구조물에 대하여 구조물의 중간층 일부를 비선형 면진장치로 면진시키고 그 효과를 분석하였다. 이러한 중간층 면진 구조물의 경우, 고정기초 구조물에 비하여 적은 층간변위나 층전단력이 발생하였으며, 특히 주상복합건물에서 상당한 효과를 볼 수 있었다.

주요어 : 면진건축물, 중간층 면진 효과, 등가선형모델, 주상복합건물

ABSTRACT

Base isolation technique has been applied mainly in low rise buildings. The seismic isolators are normally installed between superstructure and footings, therefore they can effectively reduce seismic forces which are transferred to the superstructure. However, direct application of the base isolation technique on medium-high rise buildings would be technically difficult so that the mid-story isolation technique could be applied to reduce earthquake forces.

In this paper, various height of regular shape shear buildings as well as irregular shape residential-commercial building are isolated by non-linear seismic isolators. Isolators are located at some mid-story level to evaluate the seismic effectiveness of the application of the mid-story isolation technique. It was found that mid-story isolation technique, especially in the residential-commercial building, could reduce the inter-story drift and story shear forces comparing to the conventional fixed base case.

Key words : seismically isolated building, mid-story isolation effect, equivalent linear model, residential-commercial building

1. 서 론

일반적으로 내진설계에서는 지진이 발생하는 경우에 구조물이 견딜 수 있도록 부재의 강도를 증가시키거나 연성을 증가시켜서 부재의 소성거동으로 인한 에너지소산 방법을 이용한다. 그러나, 강도를 증가시키는 방법은 초기건설비용이 많이 들며, 규모가 큰 지진이 발생하였을 경우에는 구조물이 붕괴될 우려가 있다. 반면에 연성을 증가시켜 소성거동을 이용하는 방법에서는 구조물의 붕괴를 방지할 수 있으나, 발생한 소성현지를 보수·보강하기가 쉽지 않으며 또한 비구조재의 피해로 인하여 보수비용이 많이 든다. 따라서 바람직하지 못한 구조적 피해가 발생하는 경우와 기존의 중요구조물에 대한 내진성능 향상이 요구되는 경우에는 면진기술의 적용이 매우 강력한 대안이 되고 있다. 최근 30여년간 면진기술은 경제적인 내진설계와 기존의 중요구조물에 대한 내진성능을 향상시키기 위한 목적으로 활발히 연구되었다. 면진구조물의 초기건설비용은 일반구조물과 비슷한 수준 내지는 약간 높은 편이지만 지진 후의 보수비용을 현저히 저감

할 수 있으며, 지진이 발생하는 경우에 구조물을 지반과 격리시키므로 거주자 및 내부설비를 보호할 수 있다. 특히 고베 지진(1995)을 계기로 그 안전성을 인정받아 신축건물이나 기존건물에 적용되는 사례가 급증하고 있다. 최근 국내에서도 몇몇 구조물에 적용된 사례가 있고, 거주 안전성을 높이기 위하여 면진설계를 도입한 주거용 건축물이 건설 중에 있다.⁽¹⁾

면진기술은 저층 건물의 내진설계에서 잘 알려진 접근법으로 건물과 기초 사이에 면진장치를 설치하여 상부로 전달되는 지진에너지를 효과적으로 감소시킨다. 이 방법을 중·고층 건물에 그대로 적용하기에는 여러 가지 기술적 문제가 따르므로, 기초면진 대신 건물의 중간층을 분리시킴으로써 상부로 전달되는 지진력을 역시 감소시킬 수 있을 것이다.⁽²⁾ 점성감쇠비 5%를 가정한 선형시스템(적층고무 면진장치)을 사용하여 중간층 면진효과를 살펴본 결과, 면진효과에 의한 내진성능은 상당히 증가하였으나, 면진층에서 과도한 변위가 발생하였다.⁽³⁾ 본 논문에서는 면진층의 횡변위를 감소시킬 수 있는 비선형시스템(납-고무 면진장치)을 사용하여 저층 뿐만 아니라, 중·고층 정형 건물의 중간층 면진의 효율성을 살펴본 후 최종적으로 주상복합건물의 상부 거주공간과 하부 상업공간이 만나는 transfer girder 바로 위를 면진시켜, 주상복합 건물과 같은 비정형구조물의 중간층 면진 효과를 살펴보고자 한다.

* 정희원 · 서울산업대학교 구조공학과 전임강사(대표저자 : dkkim@duck.snut.ac.kr)

** 정희원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

*** 학생희원 · 성균관대학교 건축공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2001년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

2. 면진구조의 적용

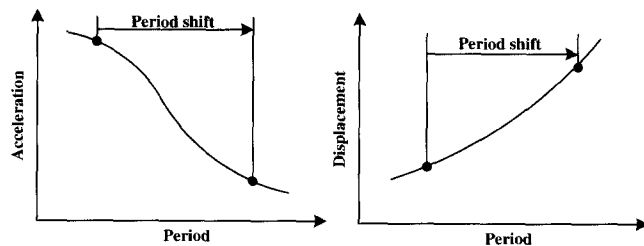
2.1 기초면진 적용

멕시코 지진과 같이 지반이 매우 연약한 경우를 제외한 일반적인 경우에 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 각 층에서의 가속도는 커지게 된다. 이렇게 증폭된 가속도는 건물골조의 응력을 증가시키고 과도한 층간변위를 유발시켜 건물이 구조적인 파괴에 이르지 않더라도 건물내의 사람이나 시설물에 심각한 피해를 입히게 된다.

따라서, 중·저층 건물의 피해를 줄이기 위해서는 건물내의 가속도를 감소시켜야 한다. 이렇게 하기 위해서는 그림 1(a)의 가속도 응답스펙트럼에서도 알 수 있듯이 건물의 기본진동주기를 길게 하여 구조물에 전달되는 횡하중을 감소시켜야 한다. 이러한 목적으로 사용되는 것이 건물의 연직방향의 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 유연(flexible)해지게 되어 면진장치에서의 수평변위는 그림 1(b)에서 알 수 있듯이 비교적 크다.

2.2 중간층 면진의 적용

기초면진을 중층이나 특히 고층건물에 적용하기에는 여러 가지 기술적 문제가 발생한다. 이러한 건물의 기초가 고정된 건물들에서 고유주기는 이미 상대적으로 길기 때문에 면진장치를 이용하여 주기를 더욱 길게 만들면 그림 1(b)에서 보는 바와 같이 면진장치에서의 수평변위는 매우 크게 발생하며 동시에 큰 연직하중과 횡하중에 의한 전도모멘트(overturning moment)가 커져 면진장치에 인장력이 발생할 가능성이 증가하는데 이는 중요한 기술적 문제로 거론된다. 즉 구조물이 높아질수록 면진장치가 견뎌야 하는 상부구조물의 무게도 상당하며, 고층구조물은 더 이상 전단지배구조물이 아니므로 기초부분에서 발생하는 휨은 무시되지 않는다.



(a) 가속도 응답스펙트럼 (b) 변위 응답스펙트럼

그림 1 지진하중에 대한 면진시스템의 효과

따라서 여전히 큰 수평 유연성을 가지고 상부구조물의 무게를 견디며 건물 기초의 회전자유도를 막을 수 있을 정도의 수직강성을 확보하는 면진장치를 제공하기는 어렵다.

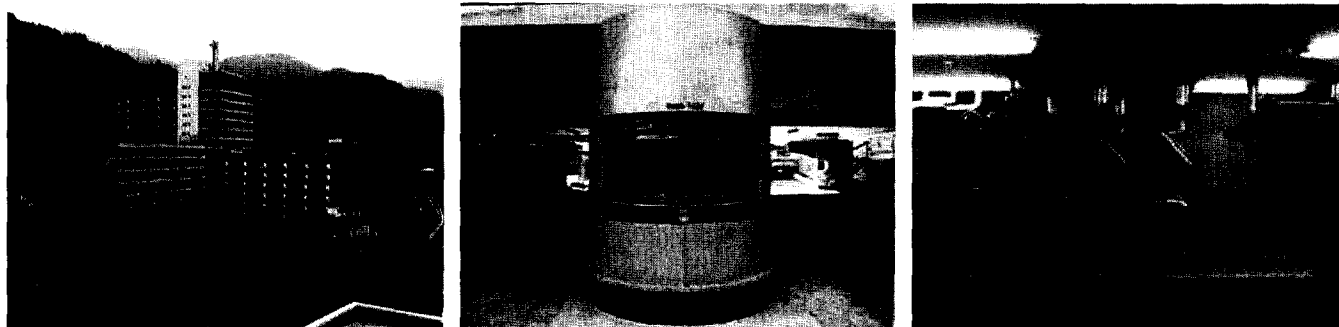
따라서 중·고층 건물에 있어서 면진구조의 적용은 구조물의 전체질량을 분리하는 기초면진(base isolation)보다는 부분적으로 질량을 분리시키는 중간층면진(mid-story isolation)의 방법을 시도할 수 있다. 이는 건물의 중간에 면진장치를 설치하여 기초면진에 따른 기술적 문제를 유발시키지 않으면서 구조물에 전달되는 지진력을 감소하여 지진에 대한 구조물의 피해를 줄이는 것이다. 특히, 주상복합구조물과 같이 질량이나 강성이 매우 큰 transfer girder에 의한 비정형성이 강하고 횡하중에 약한 구조물의 경우, 상부 주거공간과 하부 상업공간사이에 면진층을 설치하여 관성력의 감소와 하부골조의 소성흔지 발생을 방지하는 것이 가능하다.

또한 면진기술은 공사기간중 건물의 사용성에 저해가 거의 없고, 보수비용이 저렴하며, 공사도 용이하기 때문에 구조물의 내진성능 향상을 위한 보수, 보강의 방법으로 적용성을 인정받고 있다. 실제로 일본에서는 1995년 이후 구조물의 보수, 보강을 위하여 면진구조를 다수 적용하였으며 그 한 예로서, 그림 2의 湯河原研修 club은 17층 구조물의 8층 높이에 면진층을 위치시켰다.⁽⁴⁾

3. 면진장치의 모델링 및 해석 프로그램

3.1 면진장치

흔히 사용하는 수동형 면진 장치에는 적층고무 베어링(laminated elastomeric bearing)과 납-고무 베어링(Lead-



(a) 湯河原研修 club

(b) 면진장치 설치

(c) 설비배관

그림 2 중간층면진 적용에

rubber bearing)이 있다. 그림 3(a)와 그림 3(b)는 적층고무베어링과 납-고무베어링의 전단력-전단변위 특성을 각각 보여 준다.

그림 3(a)의 적층고무 베어링은 약간의 hysteresis loop를 보이지만, 보통 이러한 타입에서 베어링의 전단강성은 그림 3(a)에서 보여주는 유효 기울기 k_v 를 채택하여 선형시스템으로 가정하고, 약간의 이력감쇠는 등가의 점성감쇠로 치환하여 고려한다. 적층고무베어링(선형시스템)으로 면진된 건물들의 지진하중에 대한 거동은 기초가 고정된 건물에 비하여 매우 우수하다.⁽⁵⁾ 그러나 기초 면진층에서의 과도한 횡변위를 수용할만한 공간 확보가 필요하며, 과도한 상부구조 횡변위는 인접 건물과의 충돌(pounding) 가능성이 있는 것이 단점으로 지적될 수 있다.

적층고무 베어링의 이러한 문제점을 완화하기 위해서 적층고무 베어링의 중앙에 원통형의 납을 삽입하여 에너지 소산능력을 상당히 증가시킬 수 있으며, 동시에 기초분리도 쉽게 실현될 수 있다. 그림 3(b)는 납-고무베어링의 전형적인 이력특성을 보여준다. 이 베어링은 바람에 의한 횡하중과 같이 일상적으로 작용하는 약한 전단력이나 작은 지진하중에는 납이 항복할 때까지는 높은 초기 전단강성 $k_{v,e}$ 를 가지고 탄성적으로 작용한다. 매우 드물게 작용하는 강한 지진 하중에는 납이 항복하고, 베어링은 감소된 전단강성 $k_{v,p}$ 를 가지고 지진하중에 의한 에너지를 발산한다. 실험적 연구에 의하면 납이 항복한 후의 전단강성 $k_{v,p}$ 는 납이 없는 경우의 전단강성 k_v (그림 3(a))의 값과 거의 같고, 납이 항복하기 전 전단강성 $k_{v,e}$ 는 $k_{v,p}$ 값의 약 9~15배이며 납의 항복응력은 약 10MPa이다.⁽⁶⁾

선형시스템(적층고무베어링)과 비선형시스템(납-고무베어링)을 사용하였을 경우에 대하여 면진구조물의 지진거동을 비교하기 위하여 그림 4(a)와 같은 기초 면진구조물을 El Centro(1940, NS) 지진가속도를 가하여 시간이력해석을 수행하였다. 면진장치는 표 1과 같이 설계하였다.⁽⁷⁾ 선형 면진장치의 감쇠는 면진장치 자체의 점성감쇠를 2%로 가정하였을 때, 그림 3(a)에서와 같이 약간의 hysteresis loop를 보이므로 이보다 조금 큰 5%로 하였고, 비선형 면진장치에서는 자체의 점성감쇠 2%와 이력거동에 의한 감쇠가 비선형 해석에 의하여 고려되었다.

그림 4(b)에서 비선형 면진장치(NL)를 사용한 경우가 선형면진장치(L)를 사용한 경우에 비하여 면진층의 최대 층

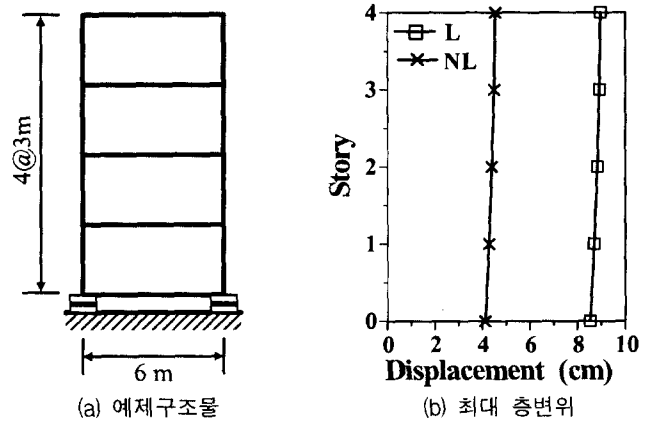


그림 4 예제 구조물과 최대 층변위

표 1 면진장치 전단강성, 이력특성 및 감쇠계수

		비선형면진장치 (납-고무베어링)	선형면진장치 (적층고무베어링)
전단강성 (kgf/cm)	항복전	14,800	1,480
	항복후	1,480	
항복변위 (cm)		0.6	-
점성감쇠비 (%)		2	5

변위가 약 반으로 감소하는 것을 관찰할 수 있으며, 이것은 비선형 면진장치의 이력거동(그림 3(b))에 의한 에너지 소산능력이 크기 때문이다.

이상과 같이 비선형 면진장치는 선형면진장치에 부가적인 에너지 소산능력을 부여하여 기초분리 효과와 에너지 소산을 동시에 쉽게 실현할 수 있는 면진장치이기 때문에, 본 논문에서는 비선형 면진장치만을 대상으로 기초면진 또는 중간층 면진효과를 살펴보았다.

3.2 비선형시스템의 모형화

비선형 면진장치로 면진된 구조물의 해석 모델은 그림 5(a)와 같이 bilinear스프링과 점성감쇠기구조써 모형화 할 수 있다.

이 경우 스프링은 비선형 부재이기 때문에 비선형해석을 수행하여야 하며, 비록 면진된 구조물의 거동을 정확하게 파악할 수 있으나, 구조물이 대형화 될수록 해석에 필요한 노력과 시간이 막대해지는 문제가 있다.

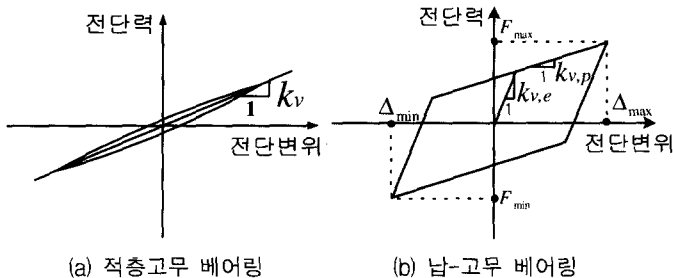


그림 3 면진장치의 전단력-전단변위 특성

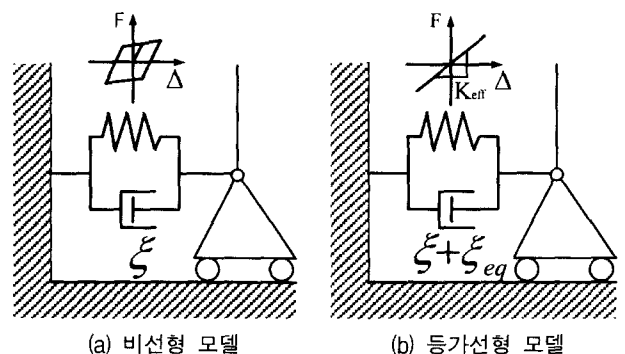


그림 5 비선형 시스템의 모형화

이러한 노력과 시간을 절약하면서도 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있는 해석방법은 그림 3(b)의 비선형 이력특성 즉, 그림 5(a)의 bilinear 스프링을 그림 5(b)의 등가 선형 스프링(K_{eff})으로 치환하고 비선형 이력특성으로부터의 이력 감쇠 또한 등가점성감쇠(ξ_{eq})로 치환할 수 있다. 등가 선형 스프링의 강성 K_{eff} 와 등가점성감쇠비 ξ_{eq} 는 그림 3(b)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_{eff} = \frac{F_{max} - F_{min}}{\Delta_{max} - \Delta_{min}} \quad (1)$$

$$\xi_{eq} = \frac{W_D}{2\pi K_{eff} \Delta_{max}^2} \quad (2)$$

여기서, W_D : 그림 3(b) hysteresis loop의 면적

면진장치를 등가선형으로 모델링한 결과의 타당성을 살펴보기 위하여 1경간 4층 기초면진 건물(그림 4(a)) 및 동일 건물에서 면진장치를 기초가 아닌 3층과 4층 사이에 위치시킨 중간층 면진건물에 대하여 면진장치를 비선형으로 모델링한 경우와 등가선형으로 모델링한 경우 각각에 대하여 El Centro(1940, NS) 지진가속도에 대한 시간이력해석을 수행하였다.

그림 6(a)와 그림 6(b)는 기초면진된 건물과 중간층면진된 건물에 사용된 비선형 면진장치에 사용된 이력 특성 및 등가강성을 각각 보여준다. 비선형 면진장치의 등가강성값 K_{eff} 와 등가점성감쇠비 ξ_{eq} 는 식 (1)과 식 (2)에서 전단변형량 Δ 의 크기에 따라서 변한다. 따라서 구조해석시 어떤 전단변형량을 기준으로 이들 값을 구할지 공학적 판단을 요구하며, 흔히 전단 변형률(면진장치의 고무층의 총 높이에 대한 면진장치의 전단변형량의 비) $\gamma=50\%$ 일 때를 기준으로 삼는다.

그림 7(a)와 그림 7(b)는 기초면진과 중간층면진인 경우의 최대 층변위가 면진장치를 비선형(NL)으로 모델링했을 때와 등가선형(Eq_L)으로 모델링했을 때 해석결과가 최대 7%의 오차를 보일 뿐 비교적 일치하는 것을 보여주고 있다. 그림 7(c)는 기초면진의 경우 최상층(4층)의 시간이력 해석 결과를 보여준다. 일부 시간범위에서 약간의 차이를 보이나 최대 변위값은 두 해석모델의 결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 층간변위, 층전단력등도 두 해석모델의 경우 잘 일치함을 관찰할 수 있었으므로, 비선형 면진장치를 등가 선형으로 모델링한 해석결과 만을 제시하여 기초면진 또는 중간층 면진효과를 본 장 이후에 언급하였다.

3.3 면진구조물의 강성행렬 구성

면진구조물의 해석을 위하여 본 연구실에서 개발한 BIAS 프로그램⁽⁸⁾에서 구성되는 강성행렬은 그림 8 및 그림 9와 같이 간단하게 표현할 수 있다. 기초면진 구조물의 경우,

그림 8(a)와 같은 구조물은 강막가정과 행렬응축을 이용하여 그림 8(b)와 같이 각 층에서 평면의 이동과 회전을 고려하는 3개의 자유도로 변환되고, 구조물의 강성행렬 S_5 를 구성한 후 면진장치의 자유도에 해당하는 부분에 별도로 구성된 면진장치의 강성행렬 S_1 를 조합한다.

중간층면진 구조물의 경우에는 면진장치 설치부분에 수평이동 및 회전에 대한 자유도가 고려되어야 하므로 그림 9(b)와 같이 각각 상부와 하부의 부재에 연결된 두 개의 절점들

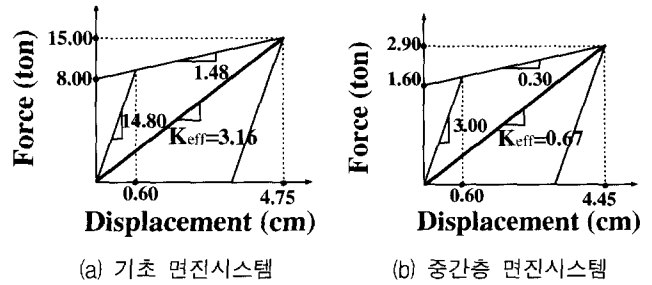
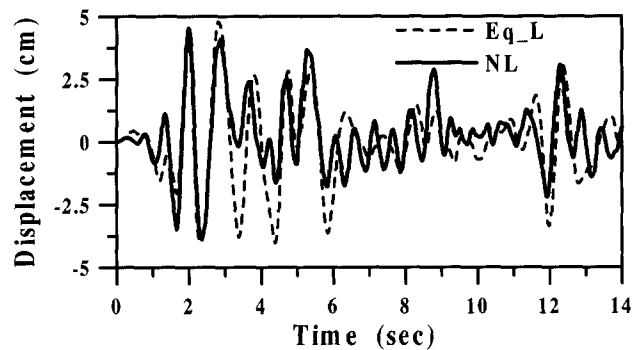
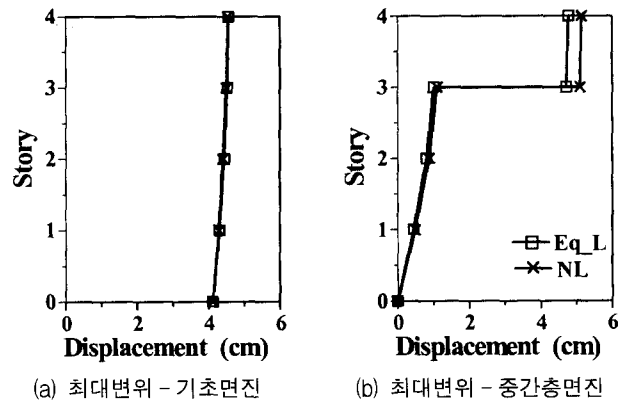


그림 6 등가선형 모형화



(c) 기초면진에서의 최상층(4층) 변위

그림 7 비선형해석과 선형해석 결과비교

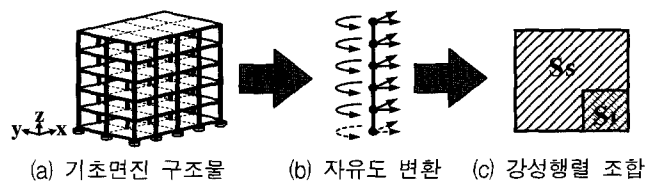
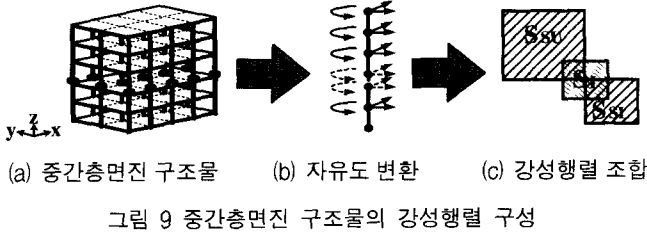


그림 8 기초면진 구조물의 강성행렬 구성



가지게 되며, 면진층 상부의 구조물과 하부의 구조물에 대하여 각각 강성행렬을 구성한다. 구성방법은 기초면진 구조물과 동일하게 강막가정과 행렬응축기법을 이용하여 효율적으로 구성한다. 구성된 상부구조물의 강성행렬 S_{SU} 와 하부구조물의 강성행렬 S_{SL} 에서 그림 9(c)와 같이 면진장치의 자유도에 해당하는 부분에 면진장치의 강성행렬 S_f 를 조합하였다.

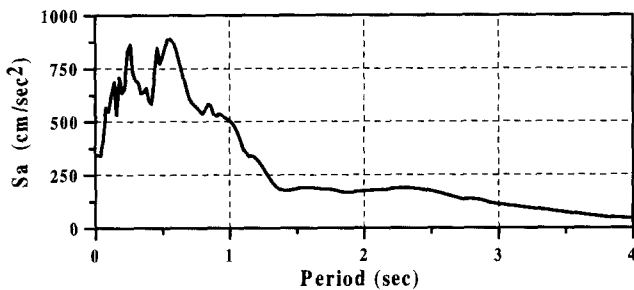
4. 기초고정 및 면진 구조물의 해석

4.1 정형 건물

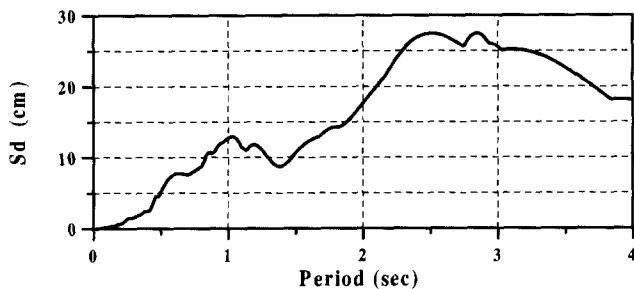
저층 및 중·고층 정형 건물의 중간층 면진의 효율성을 살펴보기 위하여 4층, 9층, 20층의 구조물에 대하여 BIAS 프로그램을 이용하여 그림 10의 El Centro(1940, NS) 지진에 대한 동적 해석을 수행하였다. 구조물은 전단지배구조물로서 강성이 매우 큰 보와 50cm×50cm의 기둥으로 이루어졌으며, 면진장치의 전단강성은 지진파의 응답스펙트럼 및 실제 설계된 면진장치의 크기로부터 구하였다.⁽⁷⁾

4.1.1 고유치 해석 결과

4층, 9층, 및 20층의 정형 구조물에 대하여 기초면진 및 중간층 면진의 형상은 각각 그림 11(a), 그림 12(a) 및 그림 13(a)와



(a) 가속도 응답스펙트럼



(b) 변위 응답스펙트럼

그림 10 El Centro(1940, NS) 지진의 응답스펙트럼 ($\xi=0.05$)

같다. 각 경우의 모드형상은 그림 11(b), 그림 12(b), 그리고 그림 13(b)에 기초고정, 기초면진, 중간면진에 대하여 나타내었고, 주기 및 질량참여율은 표 2, 표 3 그리고 표 4와 같다.

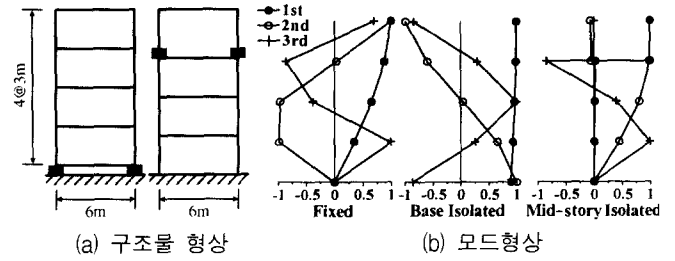


그림 11 4층 정형 구조물

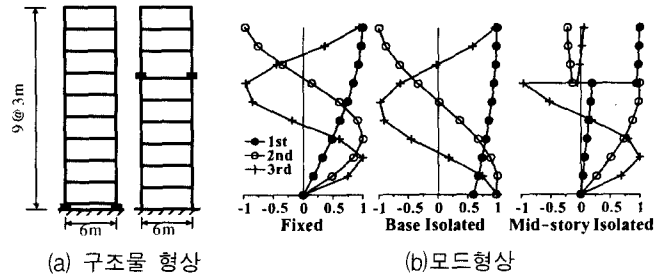


그림 12 9층 정형 구조물

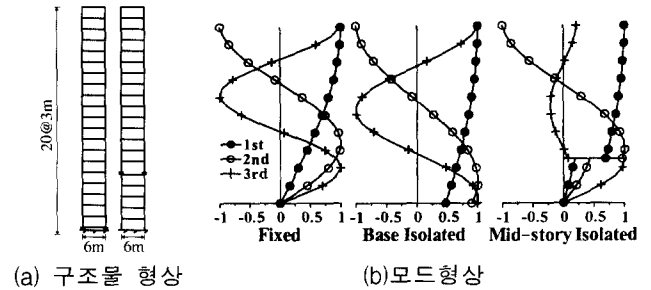


그림 13 20층 정형 구조물

표 2 4층 정형 구조물의 주기 (질량참여율)

Mode	Fixed	Base isolated	Mid-story isolated
1	0.28 (89.43%)	0.97 (99.86%)	0.95 (28.92%)
2	0.10 (8.29%)	0.15 (0.13%)	0.22 (64.80%)
3	0.06 (1.92%)	0.08 (0.00%)	0.08 (5.48%)

표 3 9층 정형 구조물의 주기 (질량참여율)

Mode	Fixed	Base isolated	Mid-story isolated
1	0.60(85.19%)	1.01(97.63%)	1.02(49.48%)
2	0.20(9.12%)	0.28(2.09%)	0.37(42.12%)
3	0.12(3.03%)	0.15(0.21%)	0.14(5.71%)

표 4 20층 정형 구조물의 주기 (질량참여율)

Mode	Fixed	Base Isolated	Mid-story Isolated
1	1.30 (83.01%)	1.88 (95.87%)	1.91 (80.36%)
2	0.43 (9.15%)	0.57 (3.51%)	0.45 (2.92%)
3	0.26 (3.24%)	0.32 (0.45%)	0.30 (13.60%)

4.1.2 지진파 해석결과 및 분석

본 절에서는 각 정형 구조물에 대한 최대 층변위, 최대 층간 변위, 최대 절대가속도 및 최대 층전단력을 그림 14~그림 16에 나타내었으며, 범례에서 F, BI, MI는 각각 기초고정, 기초면진, 그리고 중간층면진 구조물을 의미한다.

4층 구조물에 El Centro(1940, NS)지진을 가하여 해석을 한 결과, 그림 14(a)와 같이 기초면진 및 중간층면진 구조물의 면진층에서 대부분의 변위가 발생하나, 구조적 피해를 유발하는 최대 층간변위는 고정기초 구조물에 비하여 기초면진 구조물은 약 40% 이하로, 중간층면진 구조물은 약 60%이하로 줄어들었다(그림 14(b)). 또한, 면진장치에서 총 고무층의 두께에 대한 면진층의 변위 즉, 면진장치의 전단변형율은 기초면진에서는 46%, 중간층면진에서는 45%이다. 그림 14(c)에서 고정기초구조물에 대하여 중간층 면진구조물의 면진층

하부 최대 절대가속도는 감소량이 적지만, 최대 층전단력은 크게 줄어들었다. 밀면전단력의 감소량을 살펴보면 기초면진의 경우에는 37%로, 중간층면진의 경우에는 60%로 감소하였다.

9층 정형 구조물에서도 면진구조물의 거동은 4층의 경우와 비슷하나, 중간층 면진효과는 기초를 면진시킨 경우에 근접한다. 그림 15(b)의 최대 층간변위는 더욱 작아져서 기초면진과 중간층면진 모두 기초 고정 의 경우보다 약 1/3정도로 감소되는 것을 볼 수 있으며, 면진장치의 전단변형율은 기초면진과 중간면진에서 각각 45%와 36%이다. 절대가속도 역시 줄어들었는데, 중간층면진의 경우 면진층의 상부뿐 아니라 하부에서도 대부분 반 이하로 감소하였다. 밀면전단력도 고정기초구조물에 대하여 기초면진은 32%로, 중간층면진은 34%로 상당히 감소하였다.

20층 정형 구조물에서도 그림 16(b)과 그림 16(d)의 층간

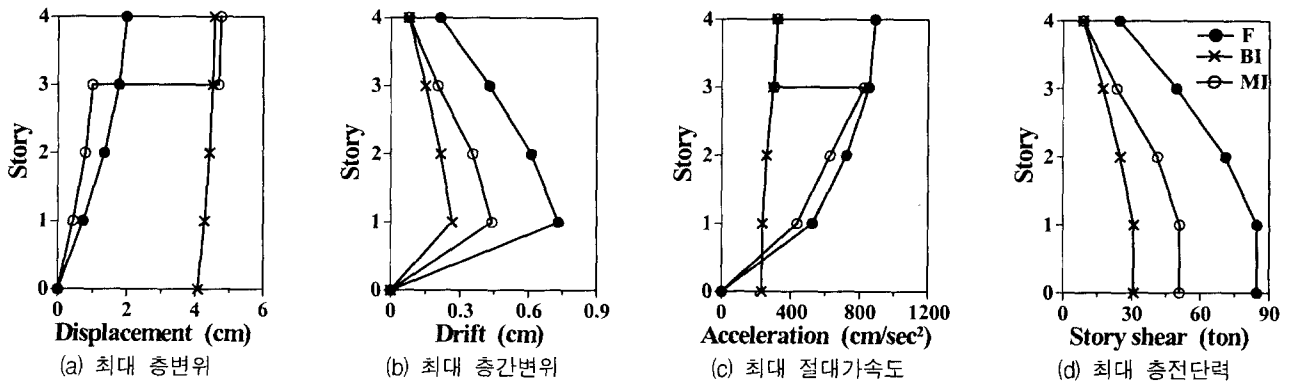


그림 14 4층 정형 구조물의 해석결과

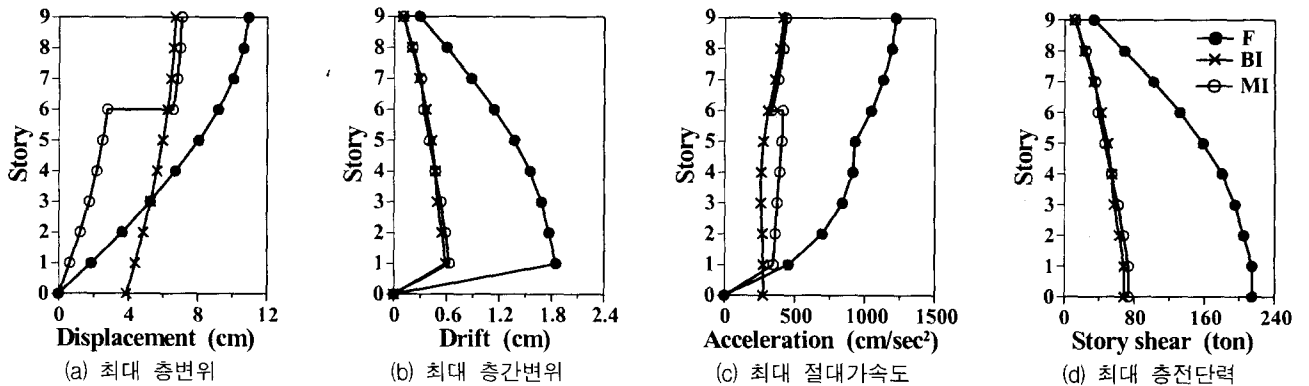


그림 15 9층 정형 구조물의 해석결과

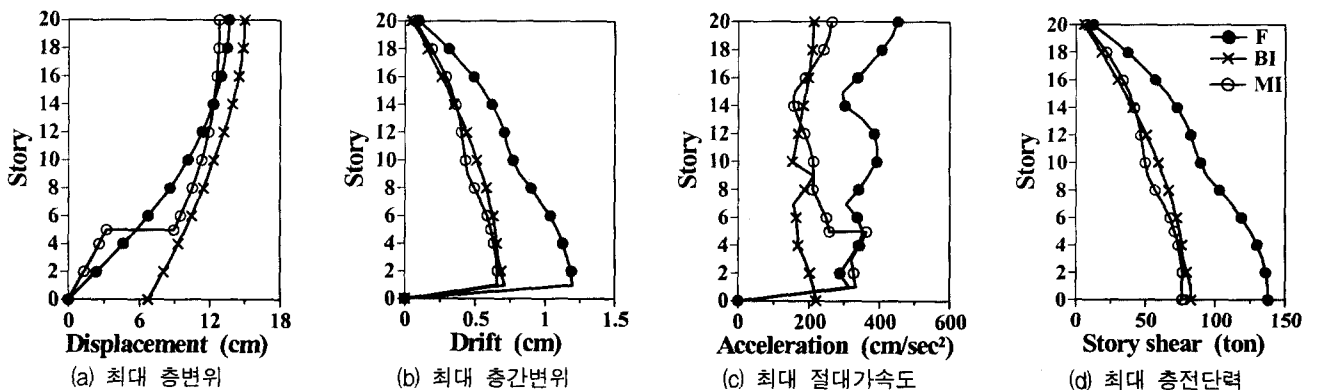


그림 16 20층 정형 구조물의 해석결과

변위와 층전단력은 두 면진구조물 모두 고정기초구조물보다 감소하였다. 면진장치의 전단변형율은 기초면진과 중간층면진 모두 약 20%이다. 절대가속도의 경우 그림 16(c)에서와 같이 중간층면진 상부에서는 고정기초구조물보다 상당히 감소하였으나, 하부에서는 약간 증가하였다. 밀면전단력은 고정 기초에 비하여 기초면진의 경우에는 60%로 감소하였고, 중간층면진의 경우에는 55%로 감소하였다.

이상과 같이 세 가지 정형 구조물을 통하여 저층 및 중·고층 건물의 중간층 면진의 효율성을 살펴본 결과, 면진층에 의하여 건물의 층간변위가 줄어들어 고정기초구조물에 대하여 밀면전단력이 각각 60%, 34%, 55%로 감소하였음을 확인하였다.

4.2 비정형 건물(주상복합건물)

4.2.1 구조물 형상 및 고유치 해석 결과

주상복합구조물에서의 중간층 면진 효과를 살펴보기 위하여 그림 17(a)와 같이 구조물의 상부주거공간과 하부 상업공간 사이에 면진장치를 설치하여 해석을 하였다. 주상복합 건물의 면진층에서 전도모멘트에 의한 수직하중은 341kN 이고, 베어링 한 개에 작용하는 자중에 의한 중력은 2086kN 이므로 면진베어링에 인장력이 생길 가능성은 없다. 하부는 골조방식이고 상부는 전단벽방식이며, 점선으로 표시된 전단벽을 등가의 골조로 치환하여 El Centro(1940, NS) 지진에 대하여 해석하였다. 모드형상과 주기 및 질량참여율은 그림 17(b) 및 표 5와 같다.

4.2.2 지진파 해석결과 및 분석

그림 18(b)에서 중간층 면진구조물의 층간변위를 살펴보면 구조물의 하부와 상부 모두 층간변위가 고정기초구조물에 비하여 크게 줄어들었음을 알 수 있다. 면진장치의 전단 변형율은 기초면진과 중간면진에서 각각 31%와 30%이다. 절대가속도의 경우, 하부에서는 큰 감소가 없었으나, 상부에서는 기초면진 이상의 수준으로 감소하였으며, 층전단력 또한 상당히 감소하였고, 밀면전단력은 고정기초구조물에 대하여 52%로 줄어들었다.

주상복합건물에서는 대부분의 횡변위가 골조형식인 하부에서 발생한다. 기초나 중간층에 면진장치를 설치하면 이러한 하부의 횡변위를 감소시켜 골조의 소성힌지의 발생을 방지할 수 있으며, 전달되는 지진력이 감소되므로 경제적인 구조물의 설계가 가능할 것이다.

5. 결론 및 추후연구과제

본 논문에서 저·중·고층 정형 구조물 및 주상복합건물과 같은 비정형구조물에 대하여 구조물의 상부 층 일부를

표 5 주상복합 구조물의 주기 (질량참여율)

Mode	Fixed	Base isolated	Mid-story isolated
1	1.40(83.13%)	2.86(98.76%)	3.19(51.30%)
2	0.44(5.57%)	0.70(1.18%)	0.79(37.84%)
3	0.24(6.86%)	0.39(0.05%)	0.37(0.00%)

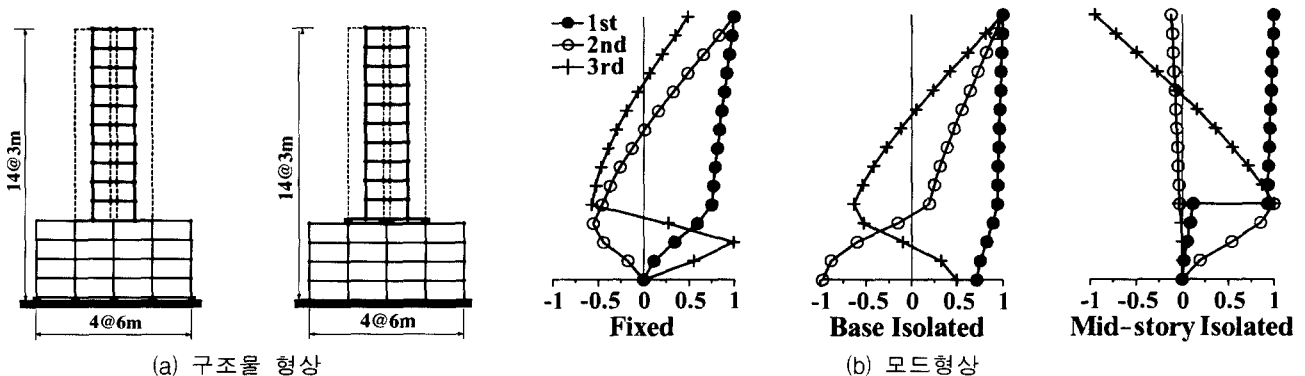


그림 17 주상복합 구조물

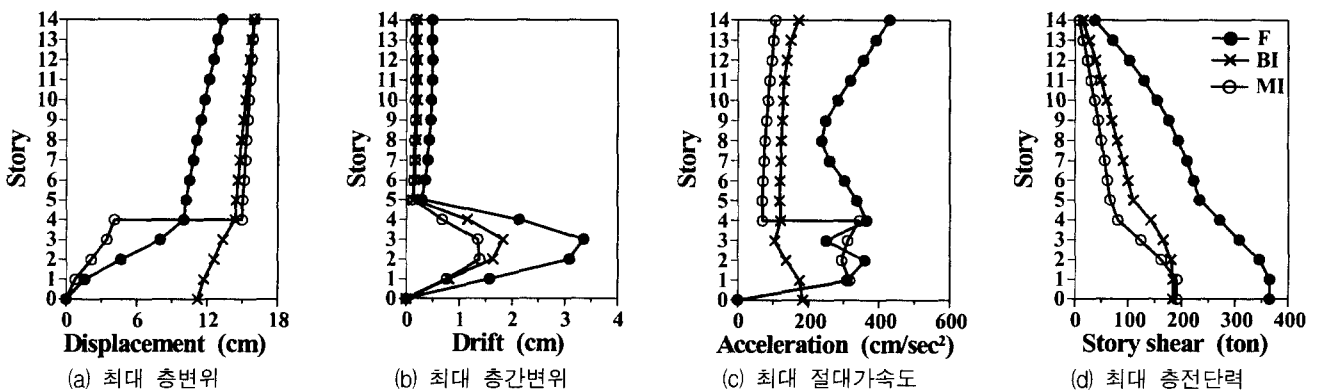


그림 18 주상복합 구조물의 해석결과

면진시키고 그 효과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 등가선형모델을 사용하면 적은 노력과 시간으로 비선형 모델을 사용하는 것과 거의 같은 해석 결과를 얻을 수 있다.
- (2) 구조물의 중간층에 면진구조를 적용하면, 고정기초 구조물에 비하여 층간변위나 전달되는 가속도 및 층전단력등을 감소시킬 수 있다. 주상복합건물에서는 중간층면진의 효과가 두드러졌으며, 하부 및 상부의 층간변위와 층전단력 감소로 인하여 지진에 의한 구조물의 피해를 감소시킬 수 있다.
- (3) 중간층 면진은 기초면진을 적용하기 어려운 중·고층 구조물이나 기존 구조물의 사용성을 고려한 보수, 보강법으로 적용될 수 있으며, 또한 구조물의 특정 중요부분등을 보호하기 위하여 적용하면 효과적이다.

본 논문에서는 납-고무 베어링의 거동특성을 고려한 bilinear형 면진시스템을 적용한 면진구조물에서, 중간층 면진효과를 지진하중의 가력 방향이 일방향일 경우에만 해석적으로 살펴보았다. 지진하중이 구조물에 임의의 각도를 가지고 오는 경우, 면진장치는 비틀림 변형을 일으키며, 이 비틀림에 의한 구조물의 거동을 해석적으로 연구할 필요가 있다. 이러한 구조물의 거동을 파악하기 위해서는 지진하중의 양방향성을 고려한 3차원해석이 향후 연구과제로 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2000년도 두뇌한국21사업 핵심분야 사업비에 의하여 지원되었으며, 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다. 이에 감사드립니다

참고 문헌

1. Structural Design Group, TRAUM HAUS III A단지 구조 설계 설명서, 2000.
2. Ziyaeifar, M. and Noguchi, H., "Partial mass isolation in tall buildings," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, No. 1, 1998, pp. 49-65.
3. 이동근, 김대곤, 정재은, "주상복합건물에 대한 면진기술의 적용", 2000년도 한국지진공학회 추계학술발표회논문집, Vol. 4, No. 2, 2000, pp. 465-472.
4. Kawamura, S. and Sugisaki, R., "Seismic isolation retrofit in Japan," *12 WCEE 2000*, 2000, pp. 25-33.
5. 김대곤, 이상훈, 안재현, 박칠림, "면진 장치 적용 전, 후의 철골조의 내진 성능 평가", 한국지진공학회논문집, 제2권, 제1호(통권 제5호), 1998. 3, pp. 47-62.
6. Skinner, R. I., Robinson, W. H., and McVerry, G. H., *An Introduction to Seismic Isolation*, John Wiley & Sons, 1993, pp. 354.
7. 김대곤, 이상훈, 안재현, 박칠림, "내진 설계되지 않은 철골조에 사용될 면진 장치", 한국강구조학회지, 제10권, 제2호, 1998, pp. 63-94.
8. 이동근, "효율적인 면진시스템 및 통합설계기술 개발", 한국지진공학센터, 2000.