

# 주상복합건물에 대한 면진기술의 적용

## Application of Seismic Isolation Technique in Residential-Commercial Building

이동근\*  
Lee, Dong-Guen

김대곤\*\*  
Kim, Dae-Kon

정재은\*\*\*  
Jung, Jae-Eun

---

### ABSTRACT

Seismic isolation technique has been applied mainly in low rise buildings and its seismic performance was satisfactory during Kobe Earthquake. However, in the case of medium and/or high-rise buildings, mid-story isolation could be more technically feasible than base isolation to reduce earthquake forces.

In this paper, the seismic effectiveness of mid-story isolation in medium and/or high-rise shear building as well as low rise shear building was evaluated analytically. After verifying the effectiveness of mid-story isolation technique, this method also applied in residential-commercial building. It was found that mid-story isolation, that is isolation between upper residential area and lower commercial area, could reduce inter-story drift and floor shear forces comparing to the conventional fixed base.

---

### 1. 서론

일반적인 내진설계에서는 지진이 발생하는 경우에 구조물이 견딜 수 있도록 부재의 강도를 증가시키거나 연성을 증가시켜서 부재의 소성거동으로 인한 에너지소산 방법을 이용한다. 하지만, 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, 소성힌지를 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 비슷

---

\* 성균관대학교 건축공학과 교수, 정회원

\*\* 서울산업대학교 구조공학과 전임강사, 정회원

\*\*\* 성균관대학교 건축공학과 석사과정, 학생회원

한 수준이지만 지진 후의 보수비용을 현저히 저감할 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<sup>1)</sup>.

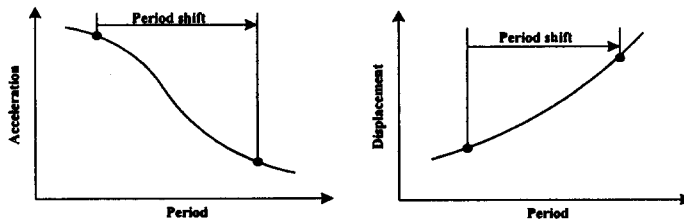
면진기술은 저층 건물의 내진설계에서 잘 알려진 접근법으로 기초 위에 면진장치를 설치하여 상부로 전달되는 지진에너지를 효과적으로 감소시킨다. 이 방법을 중·고층 건물에 그대로 적용하기에는 여러 가지 기술적 문제가 따르므로, 기초면진 대신 건물의 중간층을 분리시킴으로서 상부로 전달되는 지진력을 역시 감소시킬 수 있을 것이다<sup>2)</sup>. 본 논문에서는 저층 뿐만 아니라, 중·고층 건물의 중간층 면진의 효율성을 살펴본 후 최종적으로 주상복합건물의 상부 거주공간과 하부 상업공간이 만나는 transfer girder 바로 위를 면진시켜, 주상복합 건물과 같은 비정형구조물의 중간층 면진 효과를 살펴보고자 한다.

## 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 전단저항강성을 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.



(a) 가속도 응답스펙트럼

(b) 변위 응답스펙트럼

그림 1 지진하중에 대한 면진시스템의 효과

## 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 힘은 무시되지 않는다. 따라서 여전히 큰 수평 유연성을 가지고 상부구조물의 무게를 견디며 건물 기초의 회전자유도를 막을 수 있을 정도의 수직강성을 확보하는 면진장치를 제공하는 것은 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 소성변형을 방지하는 것이 가능하다.

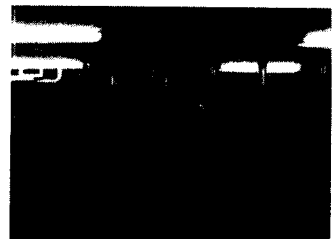
또한 면진기술은 공사기간중 건물의 사용성에 저해가 거의 없고, 보수비용이 저렴하며, 공사도 용이하기 때문에 구조물의 내진성능 향상을 위한 보수,보강의 방법으로 적용성을 인정받고 있다. 실제로 일본에서는 1995년 이후 구조물의 보수,보강을 위하여 면진구조를 다수 적용하였으며 그 한 예로서, 그림 2의 湯河原研修 club은 17층 구조물의 8층 높이에 면진층을 위치시켰다.<sup>3)</sup>



(a) 湯河原研修 club



(b) 면진장치 설치

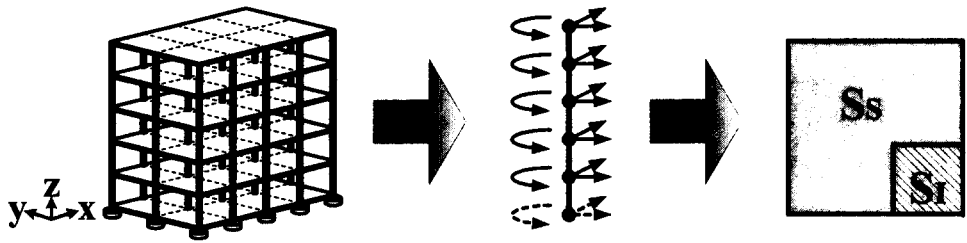


(c) 설비배관

그림 2 중간층면진 적용에

## 3. 면진 구조물의 해석방법

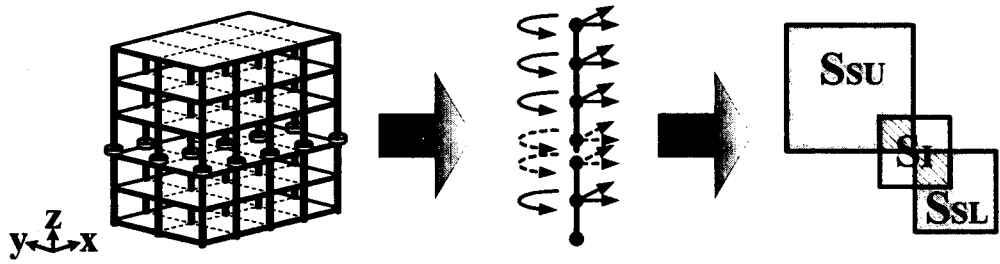
면진구조물의 해석을 위하여 구성되는 강성행렬은 그림 3.1, 3.2와 같이 간단하게 표현할 수 있다. 기초면진 구조물의 경우, 그림 3.1(a)와 같은 구조물은 강막가정과 행렬용축을 이용하여 그림 3.1(b)와 같이 각 층에서 평면의 이동과 회전을 고려하는 3개의 자유도로 변환되고, 구조물의 강성행렬  $S_0$ 를 구성한 후 면진장치의 자유도에 해당하는 부분에 별도로 구성된 면진장치의 강성행렬  $S_1$ 를 조합한다.



(a) 기초면진 구조물 (b) 자유도 변환 (c) 강성행렬 조합

그림 3.1 기초면진 구조물의 강성행렬 구성

중간층면진 구조물의 경우에는 면진장치 설치부분에 수평이동 및 회전에 대한 자유도가 고려되어야 하므로 그림 3.2(b)와 같이 각각 상부와 하부의 부재에 연결된 두 개의 절점을 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 3.2(c)와 같이 면진장치의 자유도에 해당하는 부분에 면진장치의 강성행렬  $S_I$  를 조합하였다.



(a) 중간층면진 구조물 (b) 자유도 변환 (c) 강성행렬 조합

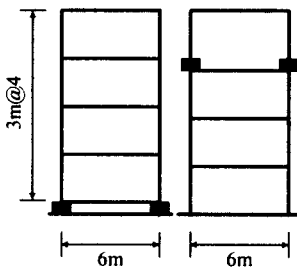
그림 3.2 중간층면진 구조물의 강성행렬 구성

#### 4. 예제구조물의 해석

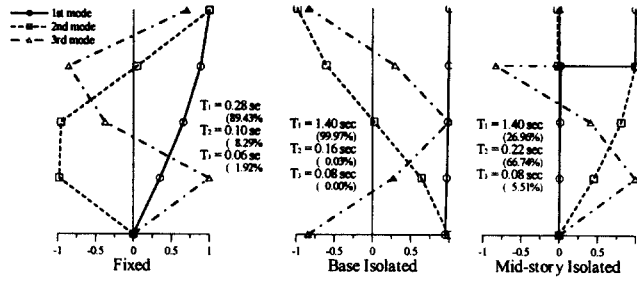
##### 4.1 저층(4층), 중층(9층), 고층(20층) 건물

저층 및 중·고층 건물의 중간층 면진의 효율성을 살펴보기 위하여 4층, 9층, 20층의 예제구조물에 대하여 동적해석을 하였으며, 각 예제구조물의 형상 및 고유치 해석의 결과는 그림 4.1 ~ 4.3과 같다. 구조물은 전단지배구조물로서 강성이 매우 큰 보와 50cm×50cm의 기둥으로 이루어졌으며, El Centro(1940, NS) 지진을 수평방향으로 가하였다. 면진장치의 전단강성은 지진파의 응답스펙트럼 및 실제 설계시 면진장치의 크기를 고려하여 적용하였다.<sup>4)</sup>

### 4.1.1 예제구조물

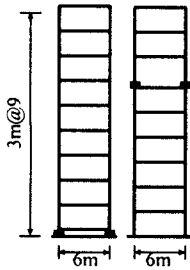


(a) 예제구조물

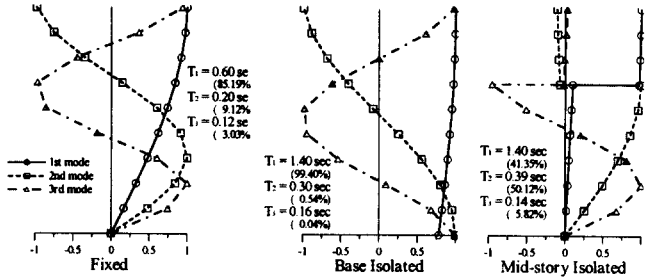


(b) 고유치해석결과

그림 4.1 4층 예제구조물

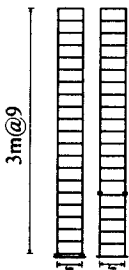


(a) 예제구조물

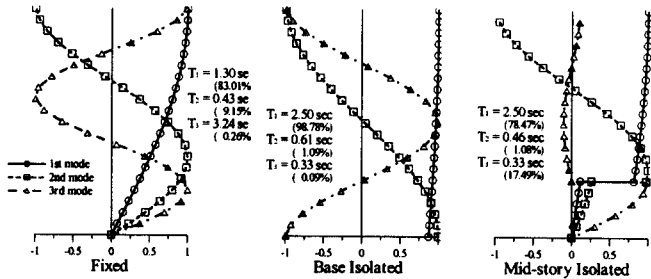


(b) 고유치해석결과

그림 4.2 9층 예제구조물

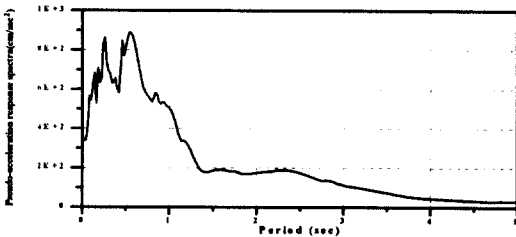


(a) 예제구조물

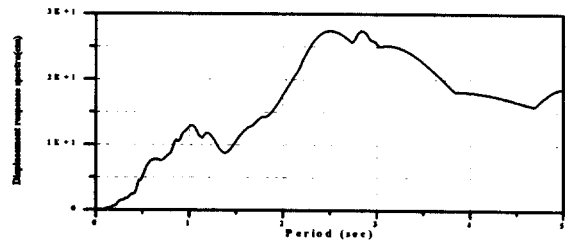


(b) 고유치해석결과

그림 4.3 20층 예제구조물



(a) 가속도 응답스펙트럼

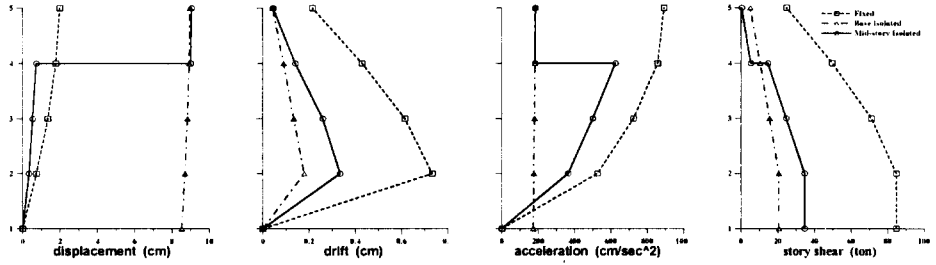


(b) 변위 응답스펙트럼

그림 4.4 El Centro (1940, NS) 지진의 응답스펙트럼

#### 4.1.2 해석결과 및 분석

4층 예제구조물에 El Centro(1940, NS)지진을 가하여 해석을 한 결과 그림 4.5(a)와 같이 기초면진 및 중간층면진 구조물의 면진층에서 대부분의 변위가 발생하나, 구조적 피해를 유발하는 최대 층간변위는 고정기초 구조물에 비하여 반 이하로 줄어들었다(그림 4.5(b)). 그림 4.5(c), (d)의 최대 절대가속도와 최대 층전단력 역시 고정기초 구조물에 비하여 줄어들었다.



(a) 최대 층변위

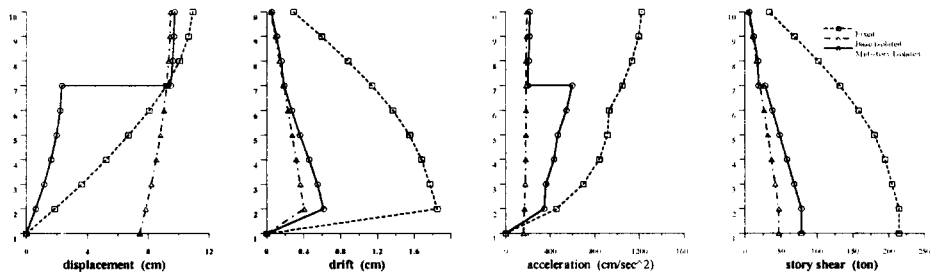
(b) 최대 층간변위

(c) 최대 절대가속도

(d) 최대 층전단력

그림 4.5 4층 예제구조물의 해석결과

9층 예제구조물에서도 면진구조물의 거동은 비슷하나, 그림 4.6(a)와 같이 고정기초구조물의 층변위가 크게 발생하여 그림 4.6(b)의 최대 층간변위는 상대적으로 더욱 작아진다. 절대가속도 역시 줄어들었으며, 면진층 상부에서는 현저한 감소를 보인다. 최대 층전단력도 고정기초구조물에 비하여 상당히 감소하였다.



(a) 최대 층변위

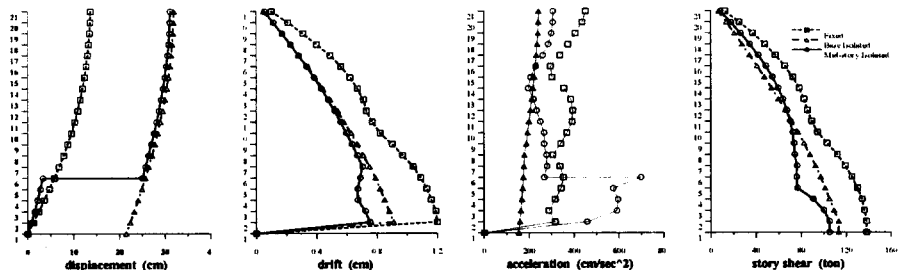
(b) 최대 층간변위

(c) 최대 절대가속도

(d) 최대 층전단력

그림 4.6 9층 예제구조물의 해석결과

20층 예제구조물의 동적해석결과를 살펴보면 앞의 두 예제에 비하여 면진효과가 줄어든다는 것을 알 수 있다. 그림 4.7(b), (d)의 층간변위와 층전단력은 두 면진구조물 모두 고정기초구조물보다 감소하였으나, 앞의 예제에 비하면 감소폭은 적다. 절대가속도의 경우, 그림 4.7(c)에서와 같이 중간층면진 상부에서는 고정기초구조물보다 다소 감소하였으나, 하부에서는 증가하였다.



(a) 최대 층변위

(b) 최대 층간변위

(c) 최대 절대가속도

(d) 최대 층전단력

그림 4.7 20층 예제구조물의 해석결과

앞의 세 예제 구조물을 통하여 저층 및 중·고층 건물의 중간층 면진의 효율성을 살펴본 결과, 면진층에 의하여 건물의 층간변위가 줄어들어 고정기초구조물에 대하여 밀면전단력이 각각 41%, 36%, 76%로 감소하였음을 확인하였다.

## 4.2 주상복합건물

### 4.2.1 예제구조물

주상복합구조물에서의 중간층 면진 효과를 살펴보기 위하여 그림 4.8과 같이 구조물의 상부와 하부 사이에 면진장치를 설치하여 해석을 하였다. 하부는 골조방식이고 상부는 전단벽방식이며, 점선으로 표시된 전단벽을 등가의 골조로 치환하여 El Centro (1940, NS) 지진에 대하여 해석하였다.

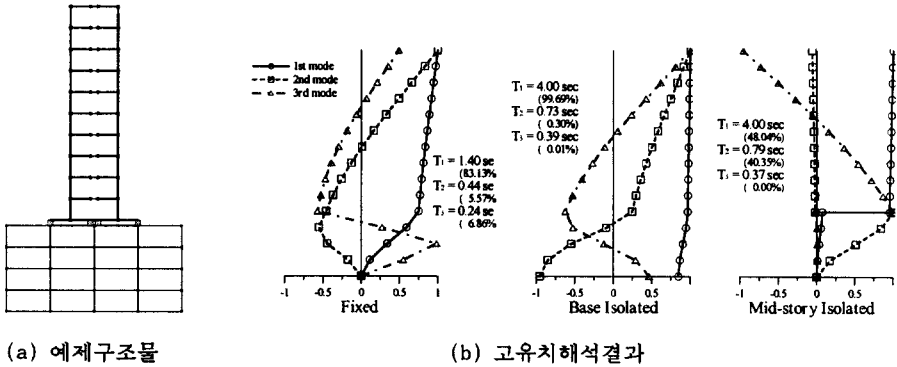


그림 4.8 주상복합 예제구조물

### 4.2.2 해석결과 및 분석

그림 4.9(b)에서 중간층 면진구조물의 층간변위를 살펴보면 구조물의 하부와 상부 모두 층간변위가 고정기초구조물에 비하여 크게 줄어들었음을 알 수 있다. 절대가속도의 경우, 하부에서는 큰 감소가 없었으나, 상부에서는 기초면진의 수준으로 감소하였으며, 층전단력 또한 상당히 감소하였고, 밀면전단력은 고정기초구조물에 대하여 53%로 줄어들었다.

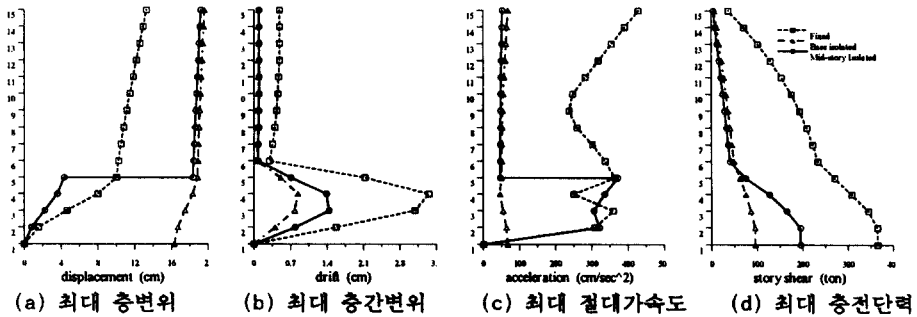


그림 4.9 주상복합 예제구조물의 해석결과

## 5. 결론 및 추후연구과제

본 논문에서 중·고층 구조물 및 주상복합건물과 같은 비정형구조물에 대하여 구조물의 일부를 면진시키고 그 효과를 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 구조물의 중간에 면진구조를 적용한 경우, 고정기초 구조물에 비하여 층간변위나 전달되는 가속도 및 층전단력등이 감소하였다.
- (2) 주상복합건물에서는 중간층면진의 효과가 두드러졌으며, 하부 및 상부의 층간변위 및 층전단력 감소로 인하여 지진에 의한 구조물의 피해가 감소될 것이다.
- (3) 중간층 면진은 기초면진을 적용하기 어려운 중·고층 구조물이나 기존 구조물의 사용성을 고려한 보수·보강, 구조물의 특정 중요부분 등을 보호하기 위하여 적용할 수 있다.
- (4) 본 논문에서는 5%의 점성감쇠를 가정한 선형 면진시스템(적층고무 면진장치)을 사용하여 특정한 지진 (El Centro 1940 NS)에 대해서 중간층 면진효과를 해석적으로 살펴보았다. 해석결과 면진효과에 의한 내진성능은 상당히 증가하였으나, 기초 면진층에서의 과도한 횡변위를 수용할만한 공간확보가 필요하며, 기초면진과 중간층 면진층에서의 과도한 상부구조 횡변위는 인접 건물과의 충돌(pounding)가능성이 있는 것이 단점으로 지적될 수 있다. 이러한 문제점을 완화하기 위해서 작은 횡하중(풍화중, 작은 지진하중)에서는 선형 면진장치보다 큰 전단강성을 보유하고, 큰 횡하중(큰 지진하중)에서는 선형면진장치보다 지진 에너지 흡수능력이 뛰어난 납-고무 면진장치와 같은 비선형시스템을 사용하는 경우가 대부분이다. 따라서 향후 연구과제로서 선형면진장치의 내진성능을 개선한 비선형 면진장치의 중간층 면진효과를 분석하기 위해서는 bilinear형 면진시스템의 점성감쇠뿐 아니라 이력감쇠까지 고려하여 El Centro 지진뿐만 아니라 다른 특성을 가진 지진에 대한 면진효과의 변화를 해석적으로 수행할 필요가 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2000년도 두뇌한국21사업 핵심분야 사업비에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Structural design Group (2000), *TRAUM HAUS III A*단지 구조설계 설명서.
2. M. Ziyaeifar, H. Noguchi (1998), "Partial Mass Isolation in Tall Buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol27 N.1, pp.49-65.
3. Soichi Kawamura, Ryoichi Sugisaki (2000), "Seismic Isolation Retrofit in Japan", 12 WCEE 2000, 2523.
4. 김대곤, 이상훈, 안재현, 박철림 (1998), "내진 설계되지 않은 철골조에 사용될 면진 장치", 한국강구조학회지, 제 10권 2호, pp63-94.