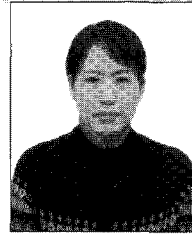
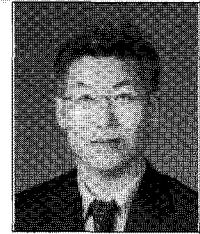


중간층 면진시스템을 적용한 고층건물 설계사례

Design of High-rise Building with Seismic Isolation



최선영*



임인식**

* (주)한빛구조엔지니어링 연구소장

** (주)한빛구조엔지니어링 대표이사

1. 서론

지진에 의한 건물의 피해를 줄이기 위한 방법 중 하나인 면진(seismic isolation)은 절연체(isolator)를 이용하여 지반과 구조물을 분리함으로써 지진력이 건물로 전달되는 것을 차단하고 댐퍼(damper)를 조합하여 에너지를 소산하는 효과적인 지진저항시스템으로 알려져 있고, 최근에서는 기압을 이용해 구조물 전체를 기초의 일부와 함께 띄워 지진에너지를 건물에 전달하지 않는 기술까지 개발되고 있다.

면진구조는 내진 및 제진구조에 비해 고가인 것이 단점으로 지적되지만, 구조체의 안전성뿐만 아니라 비구조재나 집기 등이 전도 또는 파손되는 것을 방지하여 지진 후 보수·보강에 소요되는 비용의 절감과 자산가치의 유지가 가능하고, 건물자체에 미치는 지진하중의 영향을 감소시킴으로써 내진구조보다 설계자유도가 높고 응답가속도 저감으로 사용성이 개선되는 등 내진성능 면에서 탁월한 효과가 있다. 따라서 이런 면진구조는 고성능 내진설계로 건축물의 지진피해 방지 및 경감은 물론, 성능제어설계로 구조물의 안정성과 품질을 향상하기 위한 목적으로 적용되고 있다.

일반적으로 면진은 중·저층 건물에 효과적인 것으로 알려져 있으나, 최근 몇 년간 일본을 비롯해 지진 발생빈도가 높은 지역에서 고층건물에 면진시스템을 도입하는 예가 계

속 증가하고, 국내도 실제 면진을 도입한 고층건물의 사례가 있고 적용을 검토하는 경우도 점차 늘고 있다. 또한 고층건물에서는 설계조건에 따라 기초, 지면 또는 지상 일부층(중간층)에 면진층을 구성하여 건물의 면진화 범위를 전층 또는 일부층으로 조절함으로써 합리적인 전체 구조시스템을 구축할 수 있다.

본 기사에서는 면진구조에 대한 일반사항과 설계에 대한 이해를 증진하기 위하여 고층 주상복합건물의 중간층에 면진시스템을 적용한 설계사례를 소개하고자 한다.

2. 면진의 개요

면진구조는 연직하중을 지지하면서 수평방향 변위가 가능한 절연체를 구조물 하부에 설치하여 지반 등과 건물의 절연을 피하는 것으로, 구조물 자체로 지진하중에 대하여 저항하고 항복 후 연성적으로 거동하도록 하는 일반적인 내진구조와 달리 건물에 전달되는 지진하중의 영향을 최소화하기 위한 지진저항시스템이다. 면진화된 건물은 일반적으로 내진설계된 건물에 비해 면진층의 응답변위는 증가하지만 상부 각층에서는 상대변위가 저감하고, 전체 구조물의 설계지진하중 및 가속도응답 역시 저감하므로 경제적인 설계와 사용성 증대효과를 기대할 수 있다.

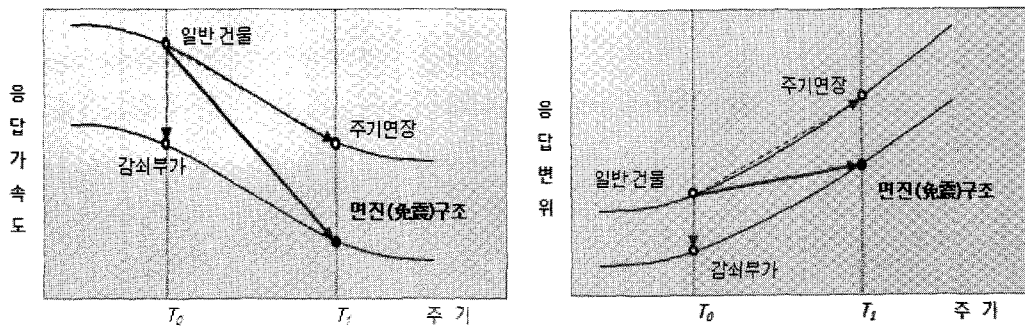


그림 1 면진의 원리

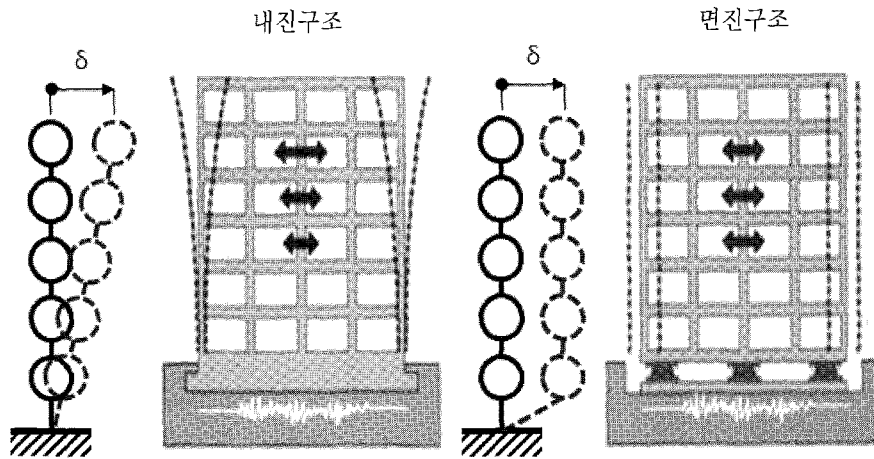


그림 2 지진 시 내진구조와 면진구조의 거동

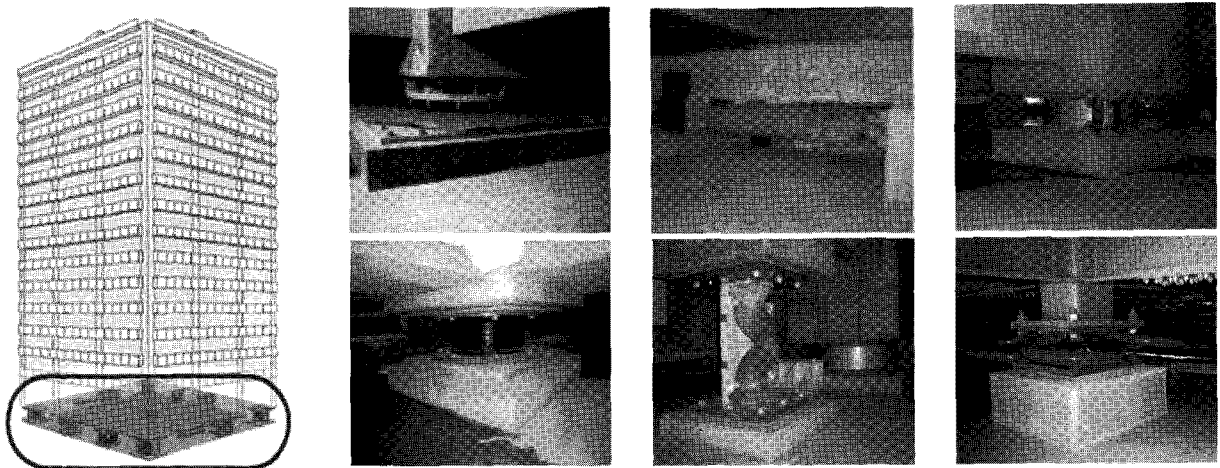
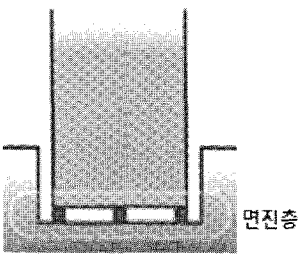
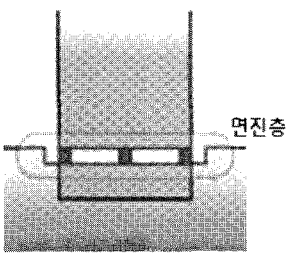
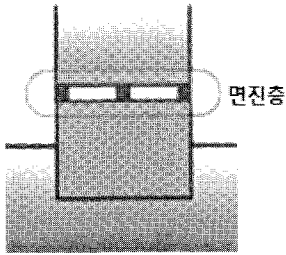


그림 3 면진장치: 절연체 및 댐퍼

면진시스템에 사용되는 절연체로는 적층고무계가 널리 사용되고 있지만 이 외에도 강재나 합성수지계 등이 있고, 이것은 면진층에 흡수된 에너지를 소산하기 위한 별도의 댐퍼와 함께 또는 일체화된 형태로 면진장치로서 사용된다. 이때 사용되는 댐퍼는 종류나 감쇠량 등을 조절하여 면진구조의 성능을 높일 수 있다.

면진구조는 전체 구조물에 대한 면진 외에도, 본 기사에서 소개하는 건물과 같이 일부층을 대상으로 하는 경우도 포함된다. 이 경우 건물 내 면진위치는 설계와 시공에 영향을 미치기 때문에 구조계획 시 면밀한 검토를 필요로 하며, 면진화되지 않는 하부 구조물은 일반 건물과 같이 지진하중에 대한 내진설계가 필요하다.

표 1 면진층 위치

기초 면진	지면 면진	중간층 면진
		
<ul style="list-style-type: none"> • 면진장치를 설치하기 위한 하부 기초판 필요 • 면진부재의 변형 시 움직임에 장애가 없도록 지하 저면에서 지표까지 충분한 이격 거리 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 면진층 하부 슬래브 강성을 확보하거나 수직부재를 면진장치 설치용 하부 구조로 이용 • 면진부재의 변형 시 움직임에 장애가 없도록 해당 레벨 구간의 이격 거리 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 면진부재의 변형에 대처하기 위한 이격 거리 확보 불필요 • 노출부 면진으로 인한 건축 마감 등 고려 사항 추가

면진층은 대체로 건물의 기초, 지면 또는 지상 일부층(중간층)에 계획하는데, 구조적 효율성뿐만 아니라 주변환경이나 시공조건 등이 면진층의 결정에 영향을 미치는 요소가 된다. 건물과 인접한 구조물에 영향을 받지 않거나 지하층이 깊지 않으면 기초 또는 지면에 면진층을 형성하는데 큰 문제가 없지만, 도심지의 지하층이 깊은 건물에서는 면진층의 수평변위 확보를 위한 이격거리 및 인접 건물과의 상호 영향 등을 고려하여 전체적으로 효율적인 구조시스템을 계획해야 한다.

3. 설계 사례

3.1 건물 개요

본 기사에서 소개하는 면진건물은 지하 6~7층, 지상 33~

36층의 주상복합 건물로, 지하와 지상 7층까지 저층부는 각각 상업시설과 주차장, 지상 8층부터 4개 동으로 형성된 상층부는 공동주택으로 사용된다. 자세한 건물개요는 그림 4와 같다.

3.2 면진층 및 면진장치

본 건물의 저층부와 상부층은 각각 라멘조와 전단벽 구조의 상이한 구조형식을 취하고 있고, 공동주택 부분의 하층은 지상 8층 바닥의 하중전이층을 통해 하부골조 및 기초로 전달된다.

저층부의 규모가 크고 지하층이 깊은 건물의 특성상 기초면진을 할 경우 면진층에서 발생하는 수평변위를 흡수할 이격거리를 확보하기 위해 횡도압 저항용 지하벽체를 별도로 설치해야 하고, 넓은 기초 바닥면적 전체에 면진장치를



- 위치 : 서울 성북구 하월곡동
- 용도 : 주상복합
- 구조형식
 - 지하 : SRC 라멘조
 - 저층부 : RC 라멘조
 - 상층부 : RC 전단벽+무량판
- 규모
 - 지하 : 6~7층
 - 지상 : 33~36층
- 면적
 - 대지면적 : 13,809 m²
 - 건축면적 : 8,112.61 m²
 - 연면적 : 184,473.39 m²

그림 4 대상 건물

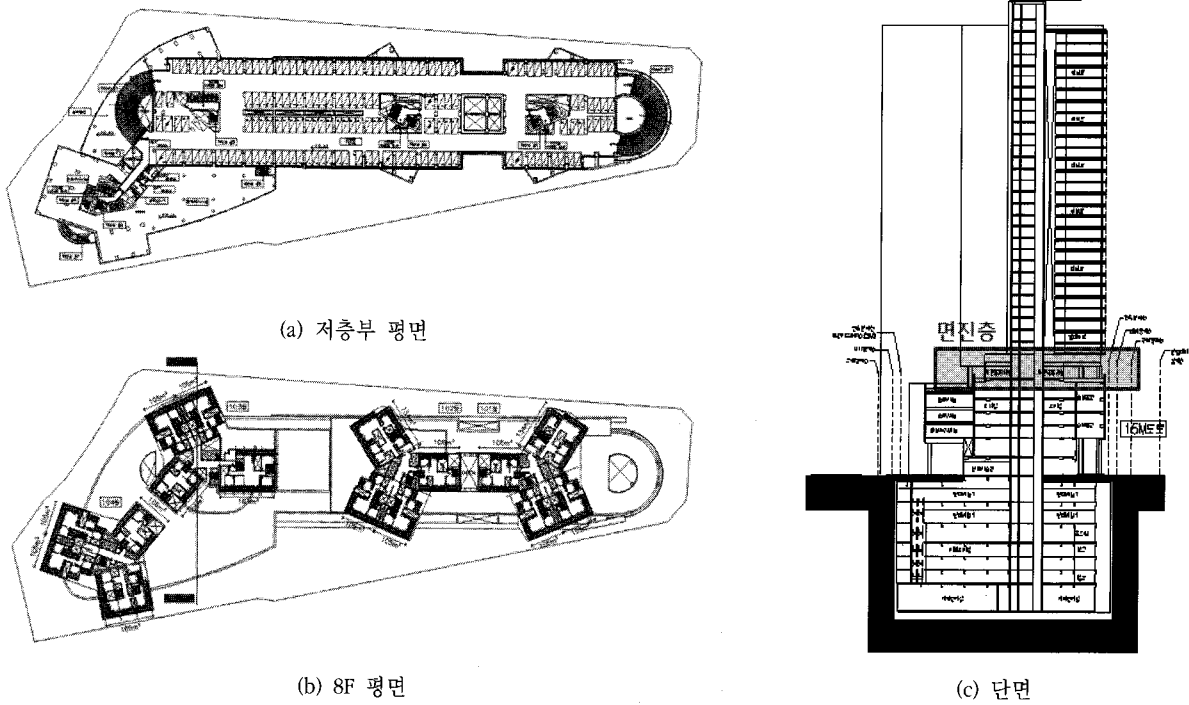


그림 5 대상 건물의 평면 및 단면

배치할 경우 비용 면에서 상당한 부담이 예상되었다. 따라서 본 건물에서는 면진설계의 일반사항과 함께 언급한 실질적인 문제들과 시공성 및 경제성 측면을 고려하여 중간층 면진을 선택하였다. 또한 면진장치가 설치되는 면진층은 건물의 특성에 적합한 효율적인 면진구조시스템을 구축하기 위해 전이층과 하부골조 사이에 계획하였다.

면진장치는 상부층의 연직하중을 충분히 지지하면서 큰 수평변위에 대한 복원력 제공과 동시에 지진에너지를 소산할 수 있도록 NRB(Natural Rubber Bearing)와 LRB(Lead Rubber Bearing)를 조합하여 적용하였다. NRB는 낮은 감쇠성(등가감쇠정수 2~3%정도), 우수한 선형성, 안정된 복원력을 특성으로 하고, 축력의 변동과 변위이력에 의한 의존성이 거의 없어서 대변형에도 안정된 강성을 보유한다. LRB는 감쇠성이 높은 납플러그를 사용한 적층고무로 천연고무계는 스프링 기능, 납은 감쇠기능을 발휘하므로 별도의 댐퍼가 필요없고, 탄소성적인 이력특성을 유지하며 납경의 증감으로 감쇠량의 조절이 가능하다.

3.3 설계기준 및 성능목표

면진건물의 설계기준으로는 KBC2005를 적용하였고, ACI 318-05, American Concrete Institute 2005, UBC-97 및 IBC 2006을 참고규준으로 하여 결과를 일본의 면진설계지

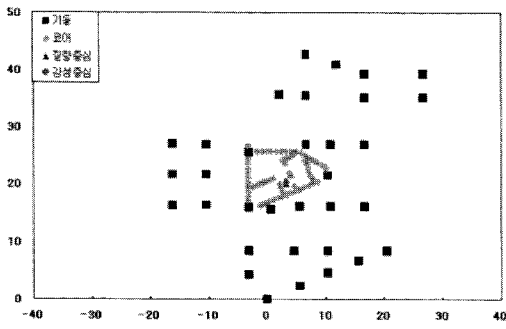
표 2 건물 및 면진장치의 성능목표

구분	항목	성능목표	
건물	상부구조	층간변형각	H/100 이하
		최대변위	H/500 이하
	하부구조	부재응력	탄성한계내력 이하
		부재응력	탄성한계내력 이하
면진장치	수평변위	안전변형 이하 ($\gamma = 100\%$)	
	면압	인장력이 발생하지 않음	

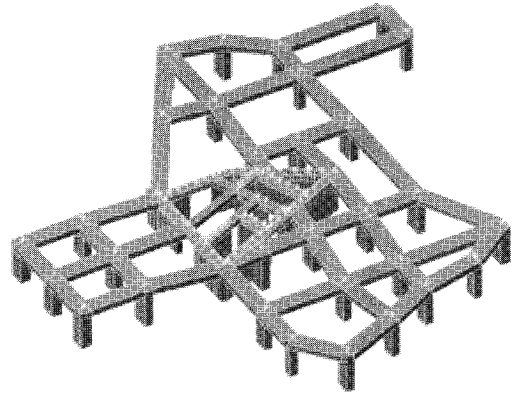
침에 따른 설계결과와 비교하였다. 면진장치의 경우는 풍하중에 대해서는 항복하지 않고, 목표로 설정한 지진하중 레벨에서 항복할 수 있도록 기준을 설정하였다. 건물과 면진장치에 대해 설정한 각각의 성능목표는 표 2에 나타내었다.

3.4 면진장치의 배치

면진장치는 상부구조물의 하중에 충분히 저항할 수 있도록 NRB를 배치하고 면진층의 질량과 강성중심이 일치하도록 LRB를 배치하는 한편, 횡강성과 비틀림강성을 확보하기 위해 코어와 외부에 더 많은 LRB를 배치하였다. 그림 6은 4개동의 공동주택 중 한 곳의 면진층에서 면진장치의 배치상태를 나타낸 것으로, 다른 동의 경우도 같은 방식으로 면진장치를 배치하였다.



(a) 면진층의 질량 및 강성중심



(b) 면진장치의 배치

그림 6 면진장치 배치계획

표 3 입력지진파

(단위: cm/sec², s)

지진파	최대가속도응답스펙트럼	설계용 최대가속도	지속시간
El Centro NS	898.2	305.2	53.7
Northridge NS	1140.4	446.8	60.0
Hachinohe NS	944.3	354.0	120.0
인공지진파	314.4	289.2	25.0

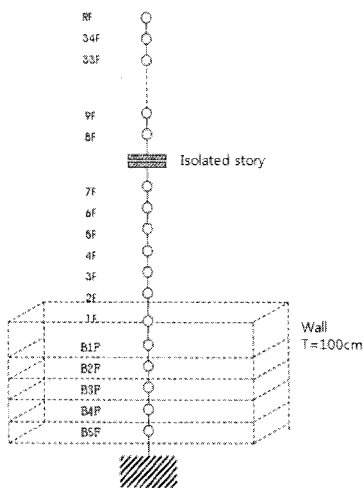
3.5 시간이력 해석

3.5.1 입력지진파

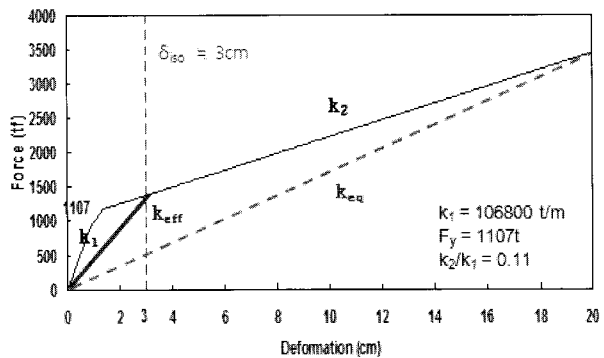
응답해석용 지진파로는 표 3의 관측파 3개와 인공지진파를 사용하고, 지진파의 크기는 ASCE 7-05에서 제시하는 방법에 따라 응답스펙트럼의 평균값이 해당영역에서 설계스펙트럼의 평균값과 같도록 크기를 조정하였다.

3.5.2 해석모델

면진구조의 동적특성을 파악하기 위한 시간이력해석용 모델은 각층 1질점 집중질량계로 치환한 전단스프링 다자유도계 모델로 하였다. 지상 8층 이상의 상부구조는 각층을 등가전단모델로 하고, 3D모델의 정적탄성해석으로부터 구한 각층의 유효질량과 하중-변위곡선에 근거한 전단스프링의 복원력 특성을 입력값으로 사용하였으며, 면진층의



(a) 다자유도 모델

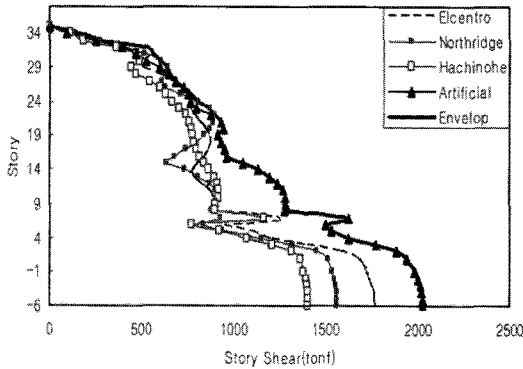


(b) 면진층의 복원력 특성

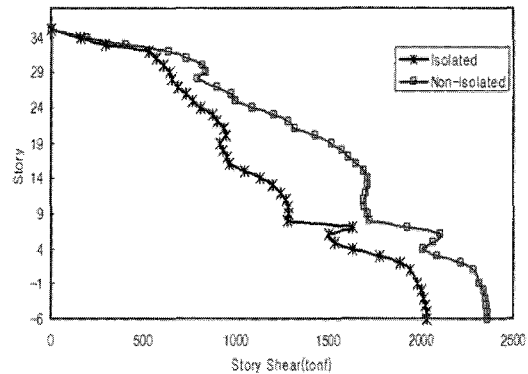
그림 7 해석 모델

표 4 지진응답해석 결과

구분	X-dir.		Y-dir.	
	성능목표	응답값	성능목표	응답값
최대층간변형각	0.01H 이하	0.0029	0.01H 이하	0.0033
최상층 최대응답가속도		225.4cm/sec ²		279.1cm/sec ²
7층 최대응답가속도		279.8cm/sec ²		317.7cm/sec ²
면진층 최대상대변위	$\gamma = 100\%$	33.1mm	$\gamma = 100\%$	35.8mm
면진층 최대응답속도		14.6cm/sec		17.4cm/sec



(a) 지진파별 층전단력



(b) 면진과 비면진시 층전단력

그림 8 최대층전단력

경우는 면진장치 전체의 복원력 특성을 중첩한 값으로 이 선형(Bi-linear) 수평스프링으로 모델화하였다.

부재설계를 위한 정적해석에서는 3D모델을 사용하고, 시각이력해석 결과로 얻은 최대값을 포락하는 전단력 분포를 지진하중으로 적용하였다. 그림 7은 1개동의 다자유도계 모델과 면진층의 복원력 특성을 나타낸 것이다.

3.5.3 해석결과

해석결과 응답값은 건물 각 동과 면진장치 모두 판정기준과 목표성능을 만족하였다. 최대층전단력은 입력지진파에 대해 모두 비면진건물보다 작은 것으로 나타났고, 특히 면진층 위상부의 층전단력은 비면진 시의 60~70%정도에 불과하여 구조물의 설계하중을 크게 떨어뜨리는 것으로 나타났다. 또한 최상층의 최대응답가속도는 0.28g로 비면진건물의 0.35g에 비해 약 25% 감소하여 건물의 사용성 증대에 있어서 면진의 효과를 보여주었다.

4. 맺음말

본 건물은 고성능 내진설계로 구조물의 안전을 도모하고 품질을 향상하기 위한 목적으로 면진을 적용하고, 건물의 특성과 효율적인 구조계획을 고려한 중간층면진을 도입하여 시간이력해석을 수행함으로써 면진설계에 따른 내진성

능을 검토하였다. 그리고 이에 따른 지진응답해석 결과는 면진건물에 대해 설정한 성능목표를 상회함으로써 판정기준을 만족하고 있음을 보였다.

덧붙여, 대상 건물의 상세설계 시에는 면진장치가 설치되는 위치와 주변 부재에 대한 상세, 장치를 지지하는 기둥과 보의 접합방법 및 각종 설비와 간섭 여부 등, 그리고 시공 시에는 구체적인 시공방법과 시공수순 등에 대한 검토를 수행하였다.

현재 공사가 완료된 본 건물은 면진시스템에 요구되는 관리와 유지보수 지침을 충실하게 지침으로서 향후 면진이 적용된 국내 최초의 고층건물로서 고성능, 고품질 면진건물의 상징이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 대한건축학회, “건축구조설계기준,” 대한건축학회, 2005.
2. 일본건축학회, “면진구조설계지침,” 일본건축학회, 2001.
3. ASCE, “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-05,” ASCE, 2005.
4. T.E.Kelley, “Base Isolation of Structures,” Holmes Consulting Group Ltd. 2001.

[담당 : 고통우, 편집위원]