

# 저층 경량건물의 고성능 내진을 위한 복합면진시스템의 적용

## Application of Hybrid Seismic Isolation System to Realize High Seismic Performance for Low-rise Lightweight Buildings

천영수<sup>1</sup>

Young-Soo Chun<sup>1</sup>

(Received February 18, 2013 / Revised April 24, 2013 / Accepted April 24, 2013)

### 요 약

이 논문에서는 저층 경량건물을 대상으로 고성능 내진을 구현하기 위하여 적용된 복합면진시스템의 적용효과가 비선형해석과 현장실험을 통하여 제시되었다. 이 연구에서 적용된 복합면진시스템은 슬라이딩베어링(sliding bearing)과 적층고무베어링(laminated rubber bearing)을 혼용하는 방법으로 전체 면진시스템의 고유주기를 신장시키는데 있어서 적층고무베어링이 지니는 한계를 극복하기 위한 것이다. 비선형해석결과, 복합면진시스템을 채용하여 설계된 면진건물은 아주 드물게 발생하는 강진에 대해서도 최대응답변위가 허용설계변위 이내이며, 최대응답전단력이 설계지진력 이하임으로 안전하게 유지될 수 있음을 알 수 있었다. 또한 현장실험결과, 면진층의 강성은 설계 등가강성 값의 약 95.8%에 해당하는 값을 나타내 전체 면진시스템의 실제 특성이 설계값과 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

**주제어 :** 저층 경량건물, 면진, 복합면진시스템, 비선형시간해석, 현장실험

### ABSTRACT

This study presents application effects of hybrid seismic isolation system to realize high seismic performance for low-rise lightweight buildings through a non-linear analysis and onsite experiments. The complex seismic isolation system applied in this study is a method of mixing sliding bearing and laminated rubber bearing in order to overcome limitation of laminated rubber bearing in increasing natural period of the whole seismic isolation system. As a result of the non-linear analysis, seismic isolation buildings designed with complex seismic isolation system are safe because its maximum response displacement is within allowable design displacement even for a strong earthquake which rarely occurs and its maximum response shear is less than design seismic force. As a result of the onsite experiment, the rigidity of seismic isolation stories corresponds to approximately 95.8% of the design equivalent stiffness value. This indicates that actual properties of the whole seismic isolation system correspond to design values.

**Key words:** Low-rise Light-weight Building, Seismic Isolation, Hybrid-type Seismic Isolation System, Nonlinear Time- history Analysis, Full-scale Field Test

## 1. 서 론

면진기술은 현재 지진지역에서 내진설계의 효과가 상대적으로 작은 강성구조물과 같은 신축건물은 물론이고 내진설계가 되어 있지 않은 기존건물에 대해서도 효과적으로 적용시킬 수가 있기 때문에 설치공법의 단순함 그리고 지진하중에 대한 진동제어 효과의 탁월성 등으로 인하여 세계 여러나라에서 강진으로부터 중요한 건물들을 보호하고, 구조물의 장수명화와 내진성능 향상을 도모하기 위한 실무적인 해결책으

로서 받아들여지고 있다(Gao, 2006; Adriana, 2008; Pan et al., 2012; Warn and Ryan, 2012; Higasino et al., 2012). 우리나라도 1988년 내진기준을 도입하면서 지진위험도를 낮추기 위한 꾸준한 노력들이 경주되고 있는 가운데 면진에 대한 기술기반이 부족한 상황에서도 다수의 면진건물들이 건설되어 사용되고 있는 실정이며, 이러한 여건을 반영하여 2013년 개정 예정인 건축구조설계기준(KBCs2013)에서는 기술적인 기반확립을 위하여 면진기준의 마련을 준비 중에 있다.

면진시스템은 기초와 상부 구조물 사이에 베어링과 감쇠

1) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원(교신저자: cysoo@lh.or.kr)

장치를 설치함으로써 구성된다. 베어링은 건물의 1차 고유진동수를 설계지진동의 지배 진동수로부터 멀어지게 이동시키기 위하여 요구되는 유연성을 제공하며, 이러한 조치는 관성력과 가속도를 크게 감소시키는 결과를 가져온다. 면진의 뒤에 숨은 이러한 아이디어는 수세기동안 반복되어 제안되어져 왔으나 현재와 같은 면진기술이 정착된 것은 1970년대 적층고무 면진장치의 출현에 힘입은 것이라 할 수 있다.

하지만 적층고무 면진장치는 장치 자체가 가지고 있는 물성 때문에 전체 면진시스템의 고유주기를 신장시키는데 있어서 어느 정도 능력의 한계가 있다. 특히 이 연구에서 대상으로 하고 있는 바와 같이 저층이면서 경량인 건물의 경우에는 장치의 적정 면압을 얻기 위하여 작은 크기의 장치를 사용할 수 밖에 없게 되고, 이로 인하여 변형능력이 감소함으로써 건물의 주기를 목표로 하는 주기까지 신장시키는데 한계를 갖게 된다. 또한 연직방향의 지지능력을 확보하기 위하여 적층고무의 전단탄성계수 값을 일정 수준 이하로 저하시키기 어려운 점도 적층고무 면진장치 만으로 동 건물의 고성능 면진을 어렵게 만드는 요인이라 할 수 있다.

최근 연구결과(Toshiyuki, 2000)에 따르면 이러한 어려움은 저마찰력을 지닌 슬라이딩형 면진장치를 혼용함으로써 해결 가능한 것으로 보고되고 있으나 아직까지 국내에서 이러한 시스템의 사용을 고려한 적은 없다. 따라서 이 연구에서는 기존 연구결과를 준용하여 면진건물에 복원력을 확보하기 위한 적층고무베어링과 함께 건물 전체무게의 57%를 지지하는 슬라이딩베어링이 저층 경량건물의 고성능 면진을 위하여 적용되었다. 이 연구에서 제안된 복합면진시스템은 지진 시 건물의 주기가 슬라이딩베어링이 미끄러지는 동안 단지 적층고무베어링의 강성에 의해 결정되기 때문에 면진건물의 공진주기를 4-5초까지 상당히 길게 가져갈 수 있다. 그럼으로 이 복합면진시스템은 약 3초 정도까지 면진건물의 공진주기를 만들 수 있는 적층고무베어링만을 사용한 일반적인 면진시스템의 한계를 넘어 고층건물이나 세장한 건물에도 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

이 논문에서는 이러한 계획에 의하여 실증적인 프로젝트로서(주택도시연구원과 DRB동일, 2005) 시도된 저층, 경량 건물의 복합면진시스템 적용효과가 고정기초 건물의 경우와 비교하여 비선형시간이력해석을 통하여 제시될 것이며, 면진층 강성의 신뢰성확보를 위하여 실제 건물을 대상으로 실시된 실험결과가 함께 제시될 것이다.

## 2. 연구대상 건물 및 면진장치

연구대상 건물은 지상 2층, 지하 1층 규모의 철근콘크리트 조 건물로서 구조형식은 보-기둥 골조이다. 전체 설계면적은 1,097.8m<sup>2</sup>이며, 면진층 상부구조의 중량은 24,420kN이다. 그

림 1은 연구대상 건물의 1층 구조평면도를 나타낸 것이다. 면진설계와 관련하여 이 건물의 제약조건 및 특징을 요약하면 ① 평면 비대칭으로 인한 강성의 불균형 문제, ② 기둥의 낮은 축력으로 인한 고성능 면진구현의 어려움, ③ 건물 주위 여건에 따른 허용 수평이동변위 제한, ④ 건물의 수평이동부(horizontal clearance)에서의 배수 및 방수 문제로 정리될 수 있으며, 이 조건들이 건물의 면진화를 위한 기본계획에 반영되었다.

면진시스템은 1층 바닥슬래브의 바로 아래 부분에 형성되도록 하여 중간층 면진의 형태를 취하도록 계획하였으며, 목표 면진주기는 4.24초, 허용설계변위는 200mm로 설계하였다. 중간층 면진을 택한 이유는 기존에 형성되어 있는 건물주위의 이격공간(dry area)을 이용할 수 있어 면진으로 인한 터파기 공사비 상승요인을 최소화할 수 있고 ④번째 조건을 수용하기 용이하다는 점에 착안한 것이며, 평면 비대칭으로 인한 강성 불균형 문제는 적층고무베어링을 X2와 X7열에 슬라이딩베어링을 X4와 X5열에 배치하여 면진층에서 면진장치의 강성중심을 상부구조의 질량중심과 일치하도록 배치하여 해결하였다.

또한 그림 1로부터 알 수 있는 바와 같이 이 건물의 X방향 열의 스패간격은 4.8m, 5.7m이며, Y방향 열의 스패간격은 3.9m, 4.5m, 5.4m로 다양하나 전체적으로 스패간격이 좁고 건물의 층수가 낮아 기둥 하나가 부담하는 축력이 작다. 이러한 조건은 고성능 면진설계에 가장 큰 걸림돌이 될 수 있다. 단순하게 각 기둥 아래에 하나의 적층고무베어링을 설치한다는 기본적인 방침을 선택할 경우 면진장치의 면압(面壓) 의존성으로 인하여 고성능의 면진을 구현하기 어렵기 때문이다. 따라서 이 프로젝트에서는 적층고무베어링과 함께 건물 전체무게의 57%를 지지하는 슬라이딩베어링이 적용되었으며, 2종류

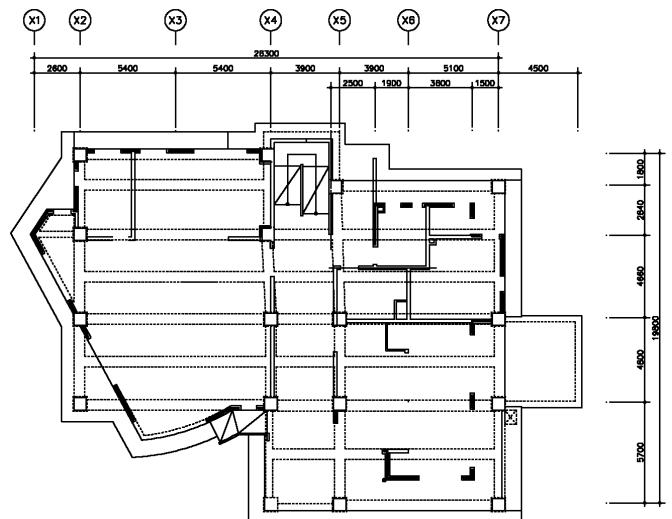


그림 1. 연구대상 건물의 기준층 구조평면도

의 면진장치를 사용하는 새로운 형태의 복합면진시스템이 제안되었다. 이와 같이 면진층의 강성에 영향을 주지 않는 슬라이딩베어링을 적층고무베어링과 혼용하는 경우 지진 시 면진 건물의 주기는 오직 적층고무베어링의 강성에 의해 좌우되므로 면진장치의 혼용비율에 따라 면진의 성능이 달라지게 되며, 슬라이딩베어링의 마찰계수에 따라 전체 면진시스템의 구동레벨이 결정되므로 항복레벨에 대한 고려에 주의하여야 한다. 이 연구에서는 이러한 점에 주의하여 설계용 풍하중에 대한 전단력계수(V/W) 0.01, 면진장치 전체의 항복전단력 계수 0.024, 설계입력지진동 20Kine을 목표로 설계하였다. 슬라이딩베어링은 여러가지 종류가 있으나 이 연구에서는 시공성과 현장적용성을 고려하여 그림 2(b)와 같은 미끄러짐 형식의 면진장치(BSL)를 채용하였으며, 각 면진장치의 제원은 표 1~표 3과 같다. 최종적으로 설계된 면진건물의 단면 및 면진장치 배치도는 그림 2와 같으며, 면진건물의 설계 후 진동주기는 표 3으로부터 알 수 있듯이 4.23초, 이에 따른 면진층의

등가강성은  $K_{eq} = 8.32kN/mm$ 이다.

### 3. 비선형시간이력해석을 통한 복합면진시스템 적용효과 분석

연구대상 건물의 동적특성과 면진효과 검증에 위한 수학적모델이 그림 3에 주어져 있다. 상부구조는 3질점의 탄성 집중질량모델(Lumped mass model)로 하고, 지진동의 입력위치는 지하층 주두레벨로 하였다. 면진장치는 적층고무베어링과 슬라이딩베어링의 복원력 특성에 따라 복합 구성된 이력특성을 갖는 스프링으로 치환하여 모델링하였다. 상부 구조물의 감쇠값은 1차 고유모드 진동에 대하여 2% 상당의 강성비례형 점성감쇠로 가정하였으며, 면진층은 이력감쇠 이외에 점성감쇠를 고려하지 않았다. 응답해석을 위한 입력지진동은 El Centro NS(1940), Taft EW(1952), Hachinohe NS(1968), Hachinohe EW(1968), KKAU 2M7, KKAU 2M8로 총 6개의

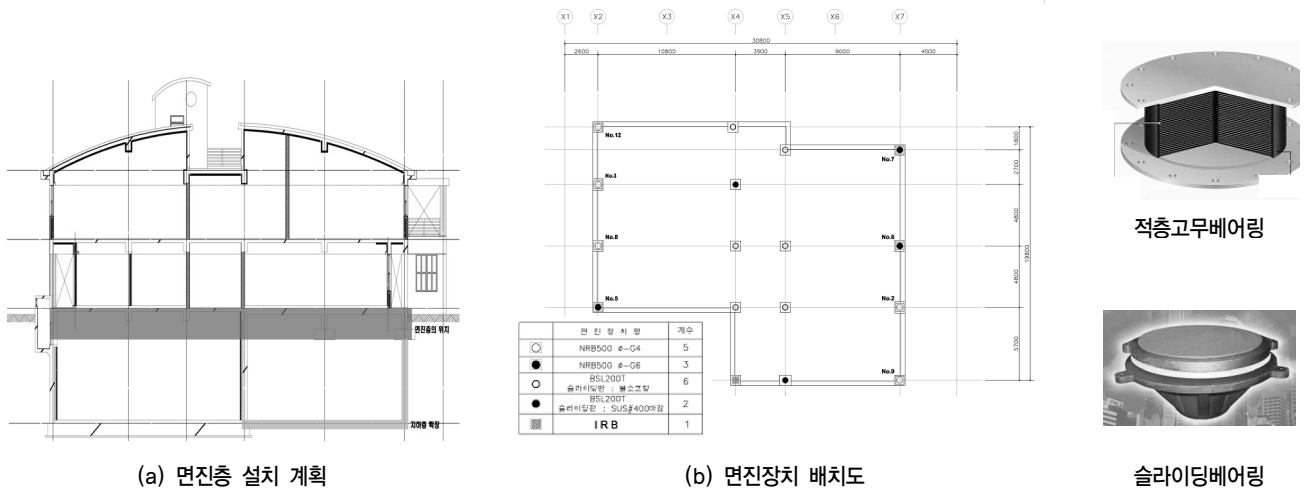


그림 2. 면진설계된 건물의 단면 및 면진장치 설치상황

표 1. 적층고무베어링의 제원

장치종류 (NRB)	유효직경 D(mm)	고무전단탄성계수 $Gr(N/mm^2)$	고무1층두께 $t_{ri}(mm)$	고무높이 $T_r(mm)$	장치수 N
NRB500-G4	500	0.4	8.0 × 20층	160	5
NRB500-G6	500	0.6	8.0 × 20층	160	3
NRB : 천연고무적층고무				합계	8

표 2. 슬라이딩베어링의 제원

장치종류 (BSL)	장치외경 D(mm)	슬라이더경 $D_{sl}(mm)$	슬라이딩판 $L_s(mm)$	장치수 N
BSL-200T	560	400	불소코팅 □ 800	6
			SUS #400 마감 □ 800	3
BSL: 슬라이딩장치			합계	9

표 3. 설계된 면진장치의 성능

NRB	고무전단탄성계수		$G_r = 0.4, 0.6 (N/mm^2)$
	유효고무단면적		$A_r = 1,683,200.65 (mm^2)$
	고무수평강성		$K_{hr} = 5.51^{(1)} (kN/mm)$
BSL	불소코팅 마감	동적마찰계수	$\mu = 0.033$
		슬라이딩전단력	$Q_{SL} = 379 (kN)$
	#400 마감	동적마찰계수	$\mu = 0.080$
		슬라이딩전단력	$Q_{SL} = 206 (kN)$
BSL+NRB 등가강성 등가주기	50mm 변형시 등가강성		$K_{eq} = 17.88^{(1)} (kN/mm)$
	50mm 변형시 등가주기		$T_{eq} = 2.35^{(2)} (sec)$
	100mm 변형시 등가강성		$K_{eq} = 11.58^{(1)} (kN/mm)$
	100mm 변형시 등가주기		$T_{eq} = 2.91^{(2)} (sec)$
	200mm 변형시 등가강성		$K_{eq} = 8.32^{(1)} (kN/mm)$
	200mm 변형시 등가주기		$T_{eq} = 3.44^{(2)} (sec)$
	고무 수평강성		$K_{eq} = 5.51^{(1)} (kN/mm)$
	고무 등가주기		$T_{eq} = 4.23^{(2)} (sec)$
	연직강성		$K_{eq} = 42,808^{(1)} (kN/mm)$
	연직강성 등가진동수		$f_{eq} = 20.9^{(2)} (Hz)$

주) 1 : 지진 시 총중량에 대한 장치종류별 지지중량의 비율  
 2 : 지진 시 총중량에 대한 장치전체의 항복전단력의 비율

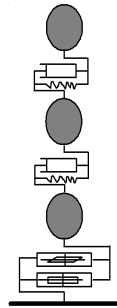


그림 3. 해석모델

지진동을 사용하였으며, 마지막 2개의 지진동은 인공지진파로서 설계된 건물의 성능한계를 확인할 목적으로 지진동의 지속시간을 M7(60 sec.)과 M8(120 sec.)에 상당하도록 설정하였다.

면진 전·후 건물의 주기특성이 표 4에 주어져 있다. 면진 장치의 수평강성은 변형에 따라서 다른 특성을 지니고 있기 때문에 면진건물의 진동특성도 면진장치의 응답변형에 의존하여 변화한다. 따라서 면진건물의 고유주기를 면진장치의 변형에 따른 등가강성으로 평가하였으며, 변형의 증가에 따른 면진건물로서의 진동주기 신장 정도를 표로부터 확인할 수 있다. 또한 이 건물에서 채택한 BSL은 슬라이딩하기 시작하는 변위까지의 미소변형 경우에는 아주 높은 초기 수평강성과 감쇠성을 지니고 있어 풍하중에 의한 건물의 진동을 억제하는 기능을 지니고 있다. 따라서 작은 수평력에 대해서는 기초고정 건물에 가까운 진동성상을 나타내고 강한 지진

표 4. 면진건물의 주기특성

NRB의 변형 (mm)	X 방향		Y 방향	
	1차	2차	1차	2차
$\delta=0.0$	0.47	0.19	0.55	0.23
$\delta=10$	1.28	0.30	1.30	0.38
$\delta=50$	2.37	0.30	2.38	0.39
$\delta=100$	2.94	0.30	2.94	0.40
$\delta=200$	3.46	0.31	3.46	0.40

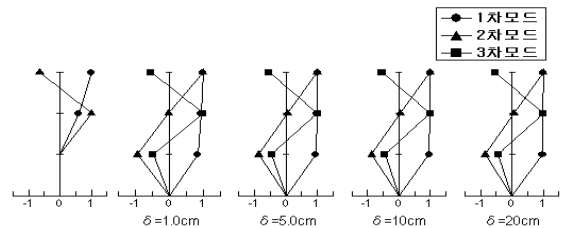


그림 4. 면진장치의 변형과 진동모드의 변화

동을 받는 경우에는 면진구조로서의 진동성상을 발휘하게 된다. 그림 4는 상부 구조체의 진동모드 및 진동모드의 변화모습을 나타낸 것으로, 강한지진을 받음에 따라 건물의 진동모드가 면진건물로서의 진동모드화 되어가는 것을 역시 확인할 수 있다.

PGV 20cm/s의 입력지진동에 대한 면진과 비면진 모델의 높이에 따른 최대응답가속도, 최대응답변위, 최대응답층간변위 그리고 최대응답전단력이 그림 5에 주어져 있다. 그림 5에

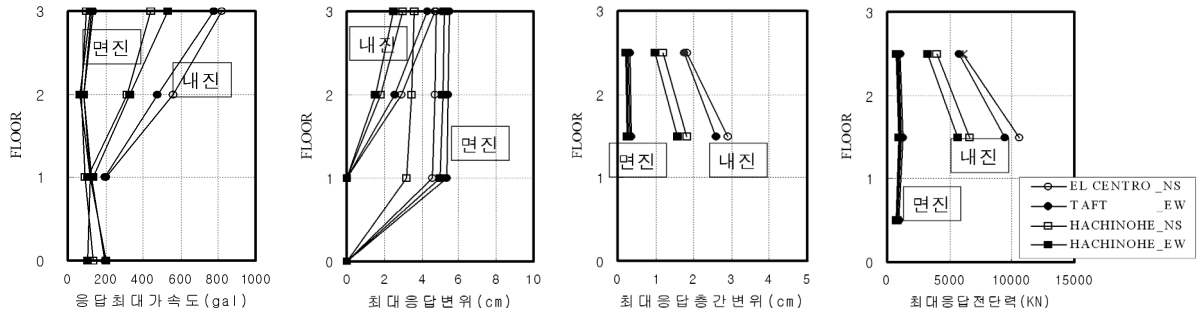


그림 5. 지진응답해석결과(PGV=20cm/s, X방향)

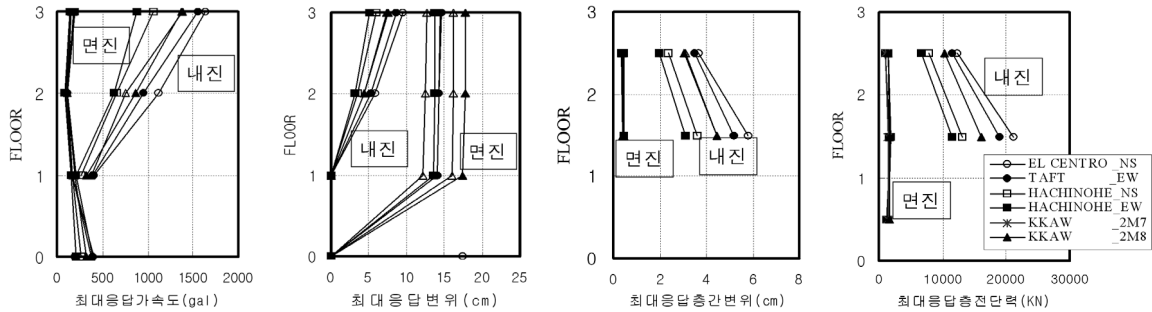


그림 6. 지진응답해석결과(PGV=40cm/s, X방향)

서 Floor 1은 면진층 상부 또는 지면레벨을 나타냄으로 내진 건물의 경우 0층에 대한 결과는 없는 것으로 표기하였다. 그림 5로부터 알 수 있듯이 이 연구에서 적용된 복합면진시스템은 가속도를 감소시키는데 매우 효과적이며, 비면진 대비 1/4~1/8 정도로 가속도응답을 억제할 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 효과는 결국 설계전단력을 감소시켜 최대응답 전단력이 설계지진력 이하로 유지되고 있음을 확인할 수 있으며, 사용성 면에서 우수한 성능의 확보가 가능한 것으로 판단된다. 또한 층간변위 역시 1/5~1/10로 감소가 가능하여 우수한 내진성능의 확보가 가능하고, 최대응답변위는 허용설계 변위 이내임을 확인할 수 있다. 그림 6은 PGV 40cm/s의 입력 지진동에 대한 면진과 비면진 모델의 응답을 나타낸 것으로, 적용된 규모의 강진에 대해서도 이 건물은 허용설계변위 안에서 안전하게 거동하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 면진층 강성확인을 위한 현장실험

이 건물의 면진성능을 직접적으로 확인하기 위한 방법으로는 정적인 하중에 의해 면진층의 수평강성을 확인하는 방법과 동적인 하중에 의해 건물의 진동주기를 설계값과 비교하는 방법이 있으나 본 실험에서는 전자의 방법만이 수행되었다. 이는 이 건물에 설치된 복합 면진장치 중 BSL이 마찰에 의한 자체감쇠를 지니고 있는 장치이기 때문에 시공이 완료된 시점에서는 동적실험이 불가능하기 때문이다.

#### 4.1 실험방법

실제 시공된 건물을 대상으로 적용된 면진시스템의 설계와 시공의 차이를 알아보기 위하여 1층 바닥의 보 레벨에서 건물에 정적인 수평하중이 적용되도록 특별한 가력시스템이 고안되었다. 그림 7은 변위레벨에 따른 면진시스템의 수평강성을 알아보기 위하여 고안된 가력시스템과 계측시스템을 도식화 한 것이며, 그림 8은 실제현장에서 실시된 실험상황을 나타낸 것이다.

그림 7로부터 알 수 있는 바와 같이 가력시스템은 적층고무베어링이 설치되어 있는 건물의 최외곽부 X2와 X7열을 대상으로 건물로부터 3,000mm 떨어진 지점에 콘크리트 반력블럭(reaction block)을 설치하고, 건물 1층 바닥의 보와 반력블럭을 오일 잭(oil jack)으로 연결하여 가력하는 방법을 채택하였다. 이 건물에 적용된 면진시스템은 비틀림에 대한 저항성을 높이기 위하여 가력방향으로 건물의 외곽부에는 적층고무베어링을 배열하고 중앙부에는 슬라이딩 베어링이 설치되어 있기 때문에 수평력에 의하여 슬라이딩 베어링이 움직이기 시작하는 일정 하중에 도달한 이후에는 건물의 외곽에 배치된 적층고무 베어링만이 수평력에 대한 저항성을 갖게 된다. 따라서 수평하중 적용 시 힘의 전달을 원활히 하기 위하여 본 건물이 1층 바닥레벨에서 충분한 면내 강성을 가지는 것으로 가정하여 적층고무 베어링이 설치되어 있는 열을 따라 건물 외곽의 X2열과 X7열을 동시에 가력 하는 방법을 선택하였으며, 가력방향과 평행하게 적층고무 베어링이 배열되어 있는

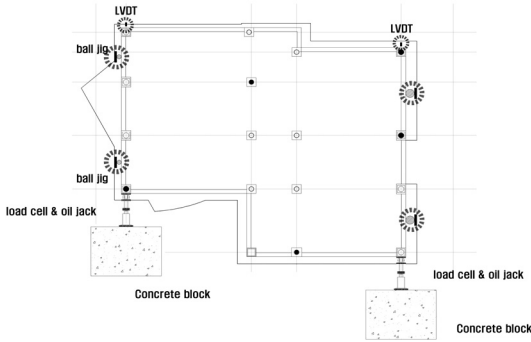


그림 7. 가력장치 및 계측장치 설치도



그림 8. 실험체 설치 및 가력상황 사진

건물 최외곽부의 보에는 좌·우 2개씩의 볼 지그(ball jig)를 설치하여 만약에 발생할지도 모르는 비틀림으로 인하여 건물이 가력방향과 직각방향으로 움직이는 것을 방지하였다.

건물이 허용 수평변위에 이르는 최대변형을 경험토록 하기 위해서는 약 1,664kN의 수평력이 건물에 적용되어야 하며, 이를 위해 본 실험에서 채택한 2점 가력방법을 적용하면 각 가력열에 약 832kN의 하중이 적용되어야 한다. 하지만 실제 실험조건은 사용된 오일 잭(oil jack)의 최대 스트로크(stroke)가 200mm라는 성능상의 제약이 있고, 건물이 최대변형에 이른 후 완전한 복원력이 발휘되지 않을 가능성이 있으므로, 후자의 여유로서 약 80mm를 감안하여 실험 시 최대 가력변위를 120mm로 제한하였다. 이에 따라 각 가력 열에 요구되는 하중은 약 694.8kN으로 감소가 예상된다. 실험은 처음 가력과 계측장치의 오작동 여부를 검증하기 위한 예비실험을 실시한 후 설계 최대 수평변위의 약 60%에 이르는 변위에 이르기까지 변위조절방식(displacement control)에 의해 재하(loading)와 제하(unloading)에 의한 가력실험이 실시되었다.

## 4.2 실험결과 및 분석

실험은 총 2 사이클의 가력이 수행되었으며, 실험이 종료되기까지 면진층 상·하 부재의 어느 부분에서도 균열이 관측되지 않았다. 또한 면진 베어링과 베어링 상·하 부재를 연결하는 볼트의 풀림현상도 전혀 관측되지 않았다. 이러한 사실은 비록 건물이 설계변위의 60% 밖에 변형을 경험하지 않았고, 정적인 하중재하에 의한 결과이지만 지진 시 본 건물이 안전하게 거동할 것이다 라는 것을 추론해 볼 수 있다. 그림 9는 실험결과 각 면진장치의 변형모습을 나타낸 것이다.

표 5는 실험결과를 정리한 것이며, 그림 10에 실험결과에 의한 수평하중과 수평변위와의 관계를 도식화하여 나타내었다. 표와 그림에서 변위는 수평변위만을 고려하기 위하여 2점에서 측정된 값의 평균값을 나타낸 것이며, 하중은 전체 적용하중 값으로 2점에서 계측된 값의 합으로서 나타내었다.

그림 10으로부터 알 수 있는 바와 같이 전체 면진시스템의 초기강성은  $K_p = 89.6kN/mm$ 로 설계변위에서의 등가강성 값의 약 10.8배에 해당하며, 설계 풍하중 246kN에 대하여 항복하지 않고 사용성을 충분히 확보할 수 있음을 확인할 수 있다(표 5 참조). 첫 번째 사이클에서 면진시스템이 비선형거동을 시작하면서, 즉 슬라이딩베어링이 움직임을 시작하면서 강성이 크게 감소하고 있음을 그림으로부터 쉽게 알 수 있으며 감소된 강성은 약 10.52kN/mm이다. 이러한 강성의 감소는



(a) NRB



(b) BSL

그림 9. 각 면진장치의 변형형태

표 5. 실험결과

1 step		2 step	
하중 ( $kN$ )	변위 (mm)	하중 ( $kN$ )	변위 (mm)
0.3	0.03	15.48	1.59
233.8	1.10	394.5	3.69
361.1	4.03	476.5	10.16
554.9	5.55	526.2	30.04
583.3	10.31	674.0	60.48
671.8	33.54	822.1	90.73
0.67	31.67	942.1	117.1
		237.0	115.4
		2.00	76.9

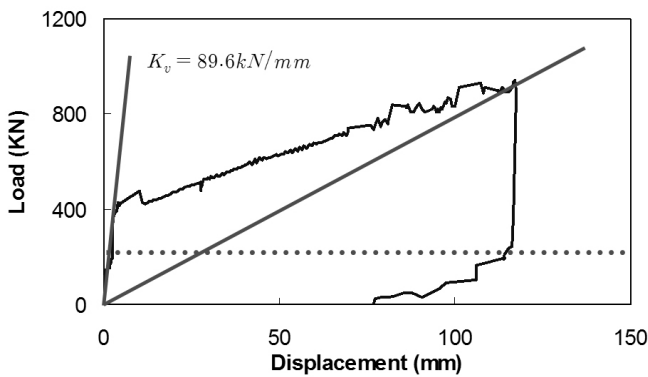


그림 10. 하중-변위 관계(2 step)

결국 예상 최대변위까지 충분히 가력이 가능하다는 것을 나타낸다. 따라서 두 번째 사이클에서는 120mm까지 가력이 수행되었다.

두 번째 사이클의 실험결과로부터 변위 50mm에서의 전체 면진시스템의 등가강성은 약  $12.57kN/mm$ , 100mm에서의 등가강성은 약  $8.3kN/mm$ , 117.1mm에서의 등가강성은 약  $8.04kN/mm$ 임을 알 수 있으며, 그림으로부터 일정하게 유지되고 있는 2차 강성이 설계최대변위까지 동일하게 유지된다는 가정 하에 설계최대변위 200mm에서의 등가강성은 약  $7.97kN/mm$ 로 추정할 수 있다. 이 값은 표 5로부터 알 수 있는 바와 같이 설계등가강성 값의 약 95.8%에 해당하는 값으로 설계값과 실험값의 차이는 불과 4.2% 밖에 되지 않는다. 결국 이러한 결과는 정적 실험결과로 나타난 전체 면진시스템의 실제 특성이 설계값과 잘 일치하고 있음을 나타낸다고 볼 수 있다. 물론 설계강성은 건물이 완전히 완성되어 적재하중까지 고려된 상태에서 계산된 값인 반면 실험을 통하여 계산된 강성은 건물의 골조가 완성되고 일부 마감으로 조적벽체가 시공된 상태에서 실시된 것임으로 실험결과는 각 면진장치에 적용된 면압으로 인한 차이를 감안하여 재평가될 필요가 있다. 하지만 실험이 실시된 상태에서의 건물 중량과 설계 시 가정된

값과 의 차이는 약 10% 정도임을 감안할 때 본 실험결과는 적용된 면진장치의 신뢰도와 시공기술의 정확도를 뒷받침해 주는 좋은 자료라 사료된다.

## 5. 결론

이 논문에서는 저층 경량건물의 고성능 내진을 위한 복합 면진시스템이 제안되었으며, 그 적용효과가 비선형시간이력 해석과 현장실험을 통하여 검증되었다. 해석과 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 비선형시간이력해석을 통하여 비면진(내진)건물과 면진 건물의 내진성능을 비교한 결과, 이 연구에서 적용된 복합면진시스템은 가속도를 감소시키는데 매우 효과적이며, 비면진 대비 1/4~1/8 정도로 가속도응답을 억제할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 층간변위 역시 1/5~1/10로 감소가 가능하여 우수한 내진성능의 확보가 가능하고, 최대응답변위는 허용설계변위 이내임을 확인하였다.
- (2) 이 연구에서 제안된 복합면진시스템은 PGV 40cm/s 규모의 강진에 대해서도 건물을 허용설계변위 안에서 안전하게 거동하도록 함으로서 우수한 면진성능의 확보가 가능한 것으로 나타났다.
- (3) 현장실험결과, 전체 면진시스템의 초기강성은  $89.6kN/mm$ 로 설계변위에서의 등가강성 값의 약 10.8배로 나타났다. 이 값은 설계 풍하중  $246kN$ 에 대하여 면진시스템이 항복하지 않고 사용성을 충분히 확보할 수 있음을 나타낸다.
- (4) 현장실험결과, 설계최대변위의 60%에 해당하는 변위에서의 값을 기준으로 추정된 설계최대변위 200mm에서의 등가강성은 약  $7.97kN/mm$ 로, 설계 등가강성 값의 약 95.8%에 해당하는 값을 얻었다. 이러한 결과는 정적 실험결과로 나타난 전체 면진시스템의 실제 특성이 설계 값과 잘 일치하고 있음을 의미하며, 적용된 면진장치의 신뢰도와 시공기술의 정확도를 뒷받침해 주는 좋은 자료라 사료된다.

## 감사의 글

본 논문은 “면진기법 시험적용 및 성과분석” 연구결과의 일부이며, 한국토지주택공사(LH)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 주택도시연구원, DRB동일(2005), 「면진기법 시험적용 및 성과분석」, 대한주택공사.

2. Toshiyuki, S. (2000), "Comparison of seismic response between bridge with sliding-type base-isolation system and that with laminated rubber bearing", *Proceeding of 12WCEE*, Paper No.1221.
3. Gao, X. (2006), "Analysis on the Current State and Tendency of Seismic-isolated Retrofit Technology in China", *Proceedings of International Seminar on seismic isolation*, Lec. 4: 65~78.
4. Adriana, G. (2008), "Base isolation in architecture", *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*.
5. Pan, P., L. P. Ye, W. Shi, H. Y. Cao (2012), "Engineering practice of seismic isolation and energy dissipation structures in China", *Science China Technological Sciences*, 55(11): 3036~3046.
6. Warn, G. P. and K. L. Ryan (2012), "A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs", *Buildings*, 2(3): 300~325.
7. Higasino, M., N. Kani, Y. Ohta and H. Hamaguchi (2012), "State of the art of the development and application of seismic isolation and energy dissipation technologies for buildings in Japan", *Seismic Control Systems, State-of-the-art in Science and Engineering*, 59: 208~217.