

## 적층고무형 면진 장치를 갖는 철근콘크리트 건물의 면진 특성

장극관<sup>1)</sup>·천영수<sup>2)\*</sup>·김동영<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> 서울산업대학교 건축학부 <sup>2)</sup> 대한주택공사 주택도시연구원 <sup>3)</sup> DRB 동일

(2005년 5월 2일 원고접수, 2005년 10월 31일 심사완료)

## Base Isolation of the 1/3 Scaled RC Building with the Laminated Rubber Bearings

Kug-Kwan Chang<sup>1)</sup>, Young-Soo Chun<sup>2)\*</sup>, and Dong-Young Kim<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> School of Architectural Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul, 139-743, Korea

<sup>2)</sup> Housing and Urban Research Institute, Korea National Housing Corporation, Sungnam, 463-704, Korea

<sup>3)</sup> Dong-il Rubber Belts, Seoul, 400-400, Korea

(Received May 2, 2005, Accepted October 31, 2005)

### ABSTRACT

Scientific community agrees about the fact that base isolation provides interesting solutions to minimize the seismic risk. Reliability of such a technique is nowadays proofed by a large number of applications like public buildings, nuclear plants, bridges, etc. This paper reports the results of performance verification tests of the base isolated RC building with the laminated rubber bearings which is manufactured by enterprise in Korea. The shaking table tests were performed using a three story model scaled to 1/3 of the prototype RC apartment building. Several major earthquake records were scaled to different peak ground accelerations and used as input base excitations. Especially in this study, effect of earthquake characteristics on response reduction and effect of the intensity of excitations are studied. Through the verification tests, the validity of the applied base isolation device and the response reduction effect against earthquakes are confirmed.

**Keywords :** base isolation, laminated rubber bearing, reinforced concrete building, shaking table test

### 1. 서 론

국내의 경우 1988년 내진기준이 정립된 이후 현재까지 건설된 대부분의 건물들은 지진과 같은 동적인 하중에 대하여 안전하도록 구조부재의 연성능력을 고려한 내진설계(耐震設計)를 채용하여 왔다. 그러나 내진은 어느 정도 건물의 피해를 허용하는 설계법 이므로, 2차 재해의 예방이나 도시의 기능마비 방지라는 차원에서 공공성이 있는 건물에 대하여 지진재해 이후 확실하게 기능이 발휘될 수 있을지의 여부를 장담할 수 없다는 문제점이 있다. 더욱이 최근에는 시설의 고 기능화와 건물의 부가가치를 유지해야 할 필요성이 증대하고 있으며, 컴퓨터, 온라인 네트워크 등의 정보 인프라설비는 물론 정보화시대를 생존하기 위한 기업의 경영자원들이 항상 재해에 의한 손실이라고 하는 위협에 노출되어 있어 내진에 있어서의 한계성을 극복하기 위한 많은 노력들이 행해지고 있다.

면진 기술은 상기와 같은 문제점을 극복하기 위한 새로운

내진설계기술의 하나로서, 건물과 지반사이에 전단변형 장치를 설치하여 지반과 건물을 분리(base isolation)시키는 방법이다<sup>1-3)</sup>. 이러한 지반분리 기술은 설치공법의 단순함 그리고 지진하중에 대한 진동제어 효과의 탁월성 등으로 인하여, 현재 세계 여러 나라에서 강진으로부터 중요한 건물들을 보호하고, 구조물의 장수명화와 내진성능 향상을 도모하기 위한 실무적인 해결책으로서 받아들여지고 있다<sup>4-6)</sup>. 하지만 국내의 경우, 재해 시 항상 문제가 되는 정보, 통신, 의료체계 및 사회공공 시설물의 피해로 인한 혼란 방지라는 차원에서 면진 구조의 도입이 종종 거론되고는 있으나 아직까지 구체적인 설계기술은 정착되지 못하고 있는 실정이다<sup>7)</sup>. 본 연구는 면진기술의 국내 기반구축을 위하여 순수 국내기술에 의해 제작된 면진 장치를 채용함에 따른 면진 효과를 실험적으로 검증함으로써, 향후 유사구조 설계를 위한 기초 자료를 제공하고자 하는데 그 목적이 있으며, 본 논문에서는 순수 국내 기술에 의해 제작된 적층고무형 면진 장치(laminated Natural Rubber Bearing, 이하 NRB라 함)를 채용한 철근콘크리트 구조를 대상으로 지진파의 특성 및 지진동의 입력레벨에 따른 면진 효과를 검증하기 위하여 수행된 1/3 축소 모델 진동대 실험 결과가 제시될 것이다.

\* Corresponding author

E-mail : cysoo@ijugong.co.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

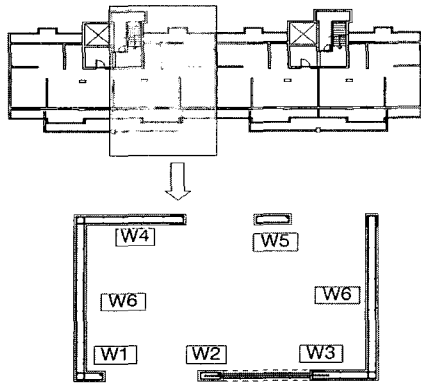


Fig. 1 Plan view of the building and modeling

## 2. 실험체

본 연구에 적용된 실험체는 3층 규모의 철근콘크리트 벽식 구조로서 전형적인 아파트 구조에 있어서 단위세대를 단순화하여 모델링 한 것이다. Fig. 1은 실험체 모델링에 대한 개념도를 나타낸 것이며, Table 1에 실험 모델의 구성을 위한 상사법칙을 정리하여 나타내었다<sup>8)</sup>.

실험 모델의 원형건물은 국내 주거문화를 대표해 온 일반적인 벽식구조 아파트(84m<sup>2</sup>-90세대-15층)로서 당초 목적으로는 완전한 한 세대를 모델링 하고자 하였으나, 사용진동대 성능상의 제약으로 인하여 Fig. 1과 같이 모델을 단순화하였으며(원형 모델), 실험체 제작상의 난이도를 고려하여 1/3의 축소율을 갖도록 원형건물의 하부 3개 층만을 모델링 하여 실험 모델(축소 모델)을 구성하였다. 실험 모델은 단변과 장변이 각각 1.5m×2.45m이고 전체 높이가 3.0m인 3층 건물로서, 벽체와 슬래브의 두께는 각각 100mm, 80mm이며, 모델의 전체 중량은 147kN이다.

Table 2는 실험 모델이 상사법칙에 따른 상사성을 만족

Table 1 Summary of scale factors for modeling

Quantity	Dimension	Ratio	Quantity	Dimension	Ratio
Length		1/3	Moment	$L_s^3$	1/27
Stress		1.0	Period	$m_s^{0.5} L_s^{-0.5}$	0.53
Mass (force)	$L_s^2$	1/9	Time	$m_s^{0.5} L_s^{-0.5}$	0.53
Stiffness	$L_s$	1/3	Acc.	$L_s^2/m_s$	1

Table 2 Comparison of the natural periods of prototype and scaled model

Mode	Period(second)		Scale factor
	Prototype	Scaled model	
First	0.119	0.059	0.50
Second	0.060	0.037	0.61
Third	0.050	0.026	0.53

하는지 알아보기 위하여 원형 모델과 축소 모델의 동적특성 중 고유치 해석 결과를 비교한 것으로, 비교결과 상사법칙에 따른 축소율과 근사 값을 나타내고 있어 축소 모델이 원형 모델을 대변하는데 무리가 없음을 알 수 있다.

본 연구에서 고려하고 있는 면진시스템은 기초면진이므로 실험체는 면진 장치와의 연결 및 기초변형에 의한 파괴로 전체 실험데이터가 왜곡되지 않도록 기초부를 300mm로 두껍게 제작하였으며, 기초 하면에 면진 장치와의 연결이 용이하도록 철판에 구멍을 뚫어 매립하였다. 실험체 제작에 사용된 콘크리트의 강도는 24MPa이며, 철근의 직경은 D6으로서 항복강도는 400MPa이다. 축소된 실험체의 입면과 배근상황을 Fig. 2에 나타내었다.

## 3. 면진 장치(NRB) 설계 및 성능 평가

본 연구에 적용된 면진 장치는 천연고무를 사용한 적층

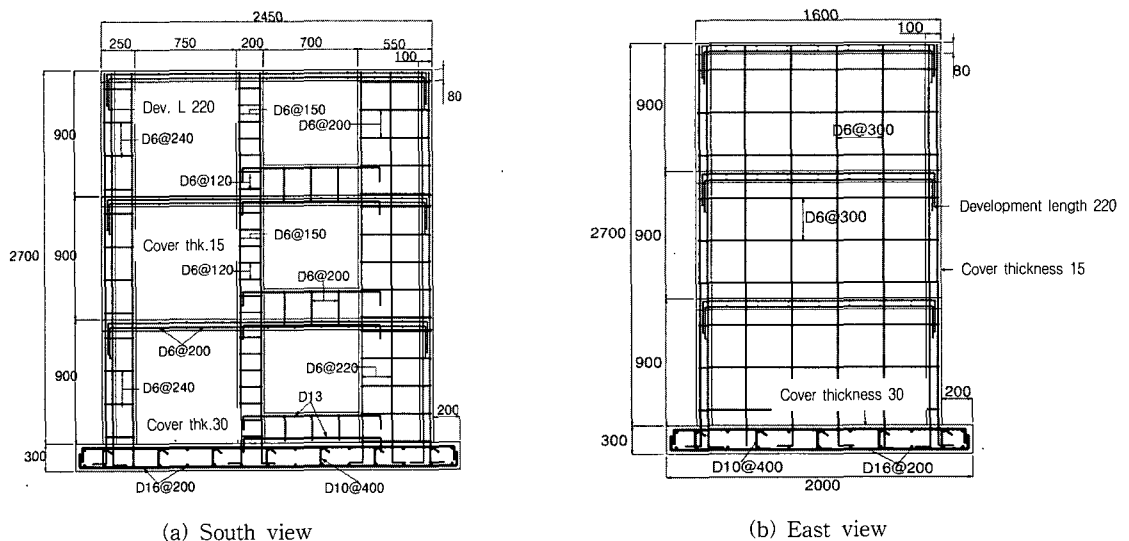
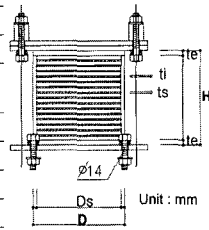


Fig. 2 Elevation view and reinforcement details

**Table 3 Specifications of NRB**

Name of parameter	Symbol	Value
Overall diameter	D	200
Diameter of steel layer	$D_s$	184
Overall thickness of rubber layers	$T_r$	128
Number of rubber layers	n	16
Thickness of rubber layer	$t_{ri}$	8
Thickness of steel layer	$t_{si}$	3
Thickness of end plates	$t_e$	10
Overall height	H	193



**Table 4 Loading condition for vertical stiffness tests**

Stress $\sigma_v$ (MPa)	Vertical load $P_v$ (KN)	Ratio of amp. $\Delta P_v$ (%)	Vert. amplitude $P_v$ (KN)
80	25	$\pm 10$	22~28

**Table 5 Loading condition for lateral stiffness tests**

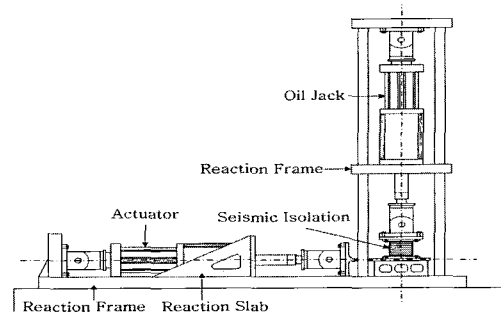
Stress $\sigma_v$ (MPa)	Vertical load $P_v$ (KN)	Shear strain $\gamma$ (%)	Hori. amplitude $\delta$ (cm)
80	25	$\pm 50$	$\pm 6.4$
		$\pm 100$	$\pm 12.8$

고무형 면진 장치(NRB)로, 먼저 원형 모델의 면진 후 목표 주기를 4.5초, 전단탄성계수 0.4MPa, 감쇠비 0.08로 하여 참고문헌 7에서 제시하는 방법에 따라 설계한 후 이와 유사한 성능을 갖도록 1/3로 장치를 축소 제작하여 실험을 수행하였다. 실험용 NRB에 사용된 고무의 인장강도는 25.8 MPa, 신장률은 630%, 전단탄성계수는 0.4MPa로 설계된 면진 장치의 상세를 Table 3에 나타내었다.

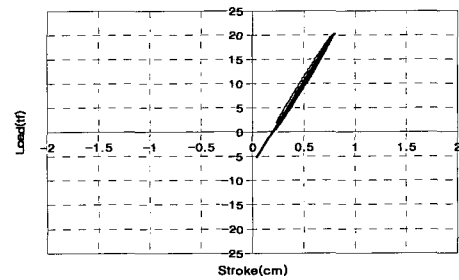
본 연구에서는 본 실험에 앞서 축소된 면진 장치의 성능을 확인하고자 축소된 NRB를 대상으로 압축성능과 수평저항성능 시험을 선행 수행하였으며, 시험장치의 설치모습을 Fig. 3에 나타내었다. 시험 장치는 수직·수평방향으로 각각 1대씩 설치된 2대의 유압가력기(actuator)와 가력장치 설치를 위한 철골 구조물로 구성되어 있으며, 가력기의 최대용량은 각각 20 KN이고, 최대 스트로크(stroke)는  $\pm 200$  mm이다. 수평전단시험 수행 중에 면진 장치의 상부판과 하부판이 평행을 유지하고 수직방향 재하하중을 충실히 전달할 수 있도록 하기 위하여 철골 구조물 하부에 충분한 강성을 가진 구조물을 제작하여 고정시키고, 면진 장치 하부에 철골 Jig plate를 부착하였다. 하부 철골 Jig plate에 수평방향 가력기를 부착하여 면진 장치의 전단변형을 제어하였고, Jig plate 하부에는 슬라이딩 베어링을 설치하여 수평방향 가력 시 마찰력을 최소화시켰다.

### 3.1 시험 방법

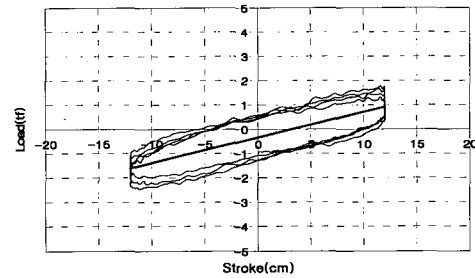
연직강성 평가 시험은 면진 장치에 연직하중을 4사이클 이상 작용시켜 하중-연직변위 관계를 측정하였으며, 하중 진폭의 최대값과 최대변위, 최소값과 최소변위를 각각 교점으로 연결한 기울기를 연직강성으로 평가하였다. 시험은 시



**Fig. 3 Test set-up of NRB**



(a) Vertical stiffness



(b) Horizontal stiffness

**Fig. 4 Test results of the 1/3 scaled NRB**

험기기의 성능을 고려하여 면압 80MPa을 기준으로  $\pm 10\%$ 의 하중제어로 수행하였으며, 하중 조건은 Table 4와 같다.

수평 방향 강성 평가를 위한 압축전단시험은 설계면압에 대한 연직하중을 작용시킨 상태에서 Table 5와 같은 진폭의 복원력으로 평가하였다.

### 3.2 시험 결과

시험 결과 중 대표적인 NRB 1의 이력 특성을 Fig. 4에 나타내었으며, 본 실험에 적용된 4개의 NRB에 대한 시험 결과를 Table 6에 나타내었다.

NRB의 연직강성은 Fig. 4(a)와 Table 6에 나타난 바와 같이 일반적으로 안정된 이력특성을 나타낸 반면, 수평강성은 설계면압 80MPa을 작용시킨 후 전단변형 50%에서는 안정적인 강성을 지니고 있는 것으로 나타났으나, 2차 형상비와 압축력의 영향으로 전단변형률이 커짐에 따라 대체적으로 수평강성이 저하하는 현상을 나타내었다. 이것은 NRB

**Table 6 Performance of the 1/3 scaled NRB**

Specimens	Verti. stiffness $K_v$ (KN/m)	Hori. stiffness, $K_H$ (KN/cm)	
		$\gamma$ (50%)	$\gamma$ (100%)
NRB 1	2567	2.25	3.08
NRB 2	3486	2.41	2.01
NRB 3	3207	2.58	1.68
NRB 4	3361	2.42	3.54

의 직경이 너무 작는데 따른 제작상의 어려움으로 인하여 압축좌굴이 빨리 일어나 내력이 저하한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 본 실험 시 실험체의 편심 등을 고려하여 다수의 NRB를 제작 시험한 후, Table 6과 같이 시험된 NRB 중 전단변형 50%에서 비교적 안정적인 강성을 지닌 4개의 장치를 선정하여 실험을 실시하였으며, 이를 이용한 실험은 연구 목적을 달성하는데 큰 무리가 없다고 판단하였다.

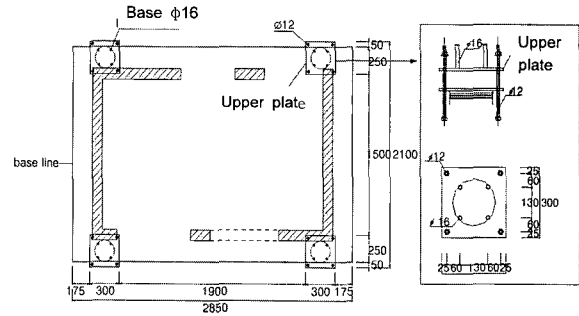
#### 4. 실험체 설치 및 실험 방법

본 연구의 주요 목적은 NRB의 채용으로 인한 지진동의 감소효과와 지진동의 특성에 따른 변화를 살펴보는 데 있으므로, 기초고정 상태의 응답특성을 기준으로 면진 장치의 채용에 따른 응답특성을 상대적으로 비교 평가하는 방식으로 진행되었으며, 목적에 따라 면진 장치를 설치한 경우와 기초고정인 경우로 나누어 2회의 실험이 실시되었다.

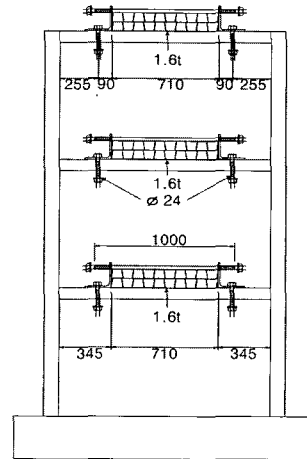
실험은 현대건설 기술연구소 구조실험동 내 5m×3m의 1자유도 진동대를 사용하여 수행되었으며, 실험체의 설치는 Fig. 5와 같이 진동대와의 연결을 위해 H형강으로 구성된 프레임을 먼저 진동대 위에 고정하고, 이 프레임과 실험체의 기초를 연결하는 방식으로 설치하였다.

면진 실험체의 경우에는 기초와 프레임 사이에 Fig. 5(a)와 같이 4개의 면진 장치가 추가로 설치되어 고정되었으며, 상사법칙에 따라 각 층에 부족한 인공질량이 부착되었다. Fig. 5(b)는 각 층에 부착된 인공질량의 상세를 나타낸 것으로 납을 미리 준비된 케이지 내에 적층식으로 쌓아 설치하였으며, 인공질량으로 사용된 납은 실험동안 진동에 의한 영향을 받지 않도록 슬래브에 구멍을 뚫어 앵글을 4면에 설치하고 납피가 이동하지 않도록 강봉으로 고정하였다. 각 층에 추가된 질량의 양은 1, 2, 3층 각각 16KN씩 이다.

면진시스템의 효과와 다양한 진동수 특성을 지닌 지진파에 의한 응답 특성을 얻기 위하여 4개의 지진파가 사용되었다<sup>9,10)</sup>. 이들 지진파는 그 특성이 국내 내진설계 기준에서 제시하고 있는 설계스펙트럼과 부합하며, 국내 지반 분류에 따른 다양한 지반 특성을 반영하는 지진파로서 Taft 1952( $S_1$ ), San Fernando 1971( $S_1$ ), Loma Prieta 1989( $S_2$ ), Mexico City 1985( $S_3$ ,  $S_4$ )가 사용되었다. 지진동은 모델의 장변방향으로 적용되었으며, 최대지반가속도(PGA)가 0.06g, 0.12g, 0.2g, 0.3g, 0.4g, 0.5g가 되도록 점진적으로 증가시키면서 실험을 실시하였다. 지진동의 적용시간은 상사법칙에 따라 기록된

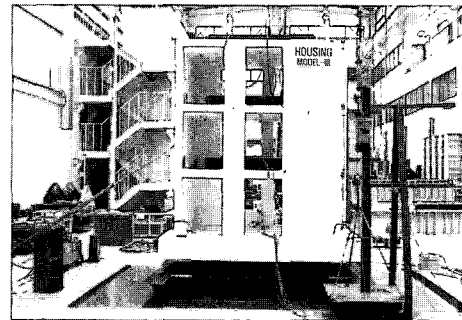


(a) Details of test set-up on the shaking table



(b) Set-up of additional mass

**Fig. 5 Configuration of the specimen on the shaking table**



**Fig. 6 Picture of with the base isolation model on the shaking table**

시간에 대하여  $1/\sqrt{3}$ 의 비율로 축소되었다. 측정은 각 층의 수평가속도와 상대변형을 계측하였다. Fig. 6은 최종적으로 진동대 위에 설치된 실험 전 상태의 면진 실험 모델이다.

#### 5. 실험 결과 및 분석

기초고정 실험체와 면진 실험체에 대한 진동대 실험 결과를 최대 입력가속도, 밀면전단력계수, 최상층 변위 그리고 최대 입력가속도와 최상층 최대 응답가속도의 비율로 정리하여 Table 7에 나타내었다. 다만 Mexico 지진파의 경

**Table 7 Summary of test results**

EQ	PGA (g)	$\left(\frac{V_b}{W}\right)_{max}$		Roof drift(%)		$\left(\frac{Roof Acc.}{PGA}\right)_{max}$	
		(1)*	(2)*	(1)*	(2)*	(1)*	(2)*
Taft	0.06	0.11	0.03	0.30	0.38	2.53	0.62
	0.12	0.21	0.04	0.41	0.51	2.34	0.43
	0.20	0.27	0.08	0.67	0.84	2.01	0.45
	0.30	0.38	0.10	0.91	1.09	1.91	0.40
	0.40	0.50	0.14	1.11	1.55	1.92	0.41
San Fernando	0.06	0.12	0.02	0.13	0.29	2.78	0.45
	0.12	0.19	0.04	0.28	0.31	2.20	0.40
	0.20	0.24	0.11	0.32	0.91	1.77	0.67
	0.30	0.43	0.17	0.79	1.72	2.27	0.68
	0.40	0.62	0.24	0.88	2.61	2.45	0.67
Loma Prieta	0.06	0.08	0.03	0.12	0.15	1.63	0.63
	0.12	0.15	0.08	0.25	0.48	1.76	0.74
	0.20	0.32	0.11	0.41	0.72	2.38	0.65
	0.30	0.44	0.16	0.58	1.42	2.03	0.62
	0.40	0.69	0.20	0.77	1.97	2.53	0.58
Mexico	0.06	0.07	0.04	0.78	2.14	1.50	0.75
	0.12	0.11	0.07	1.04	3.99	1.20	0.67
	0.20	0.16	0.12	1.80	3.98	0.99	0.67

\* (1) base fixed, (2) base isolation

우, 실험 시 과도한 변위와 비틀림의 발생으로 부가질량이 이동하는 현상이 발생함에 따라, 안전상의 문제로 0.2g에서 실험을 종료하였으며, 따라서 동 지진파에 대해서는 다른 지진파와 동일한 조건에서 비교가 수행되지 못하였다.

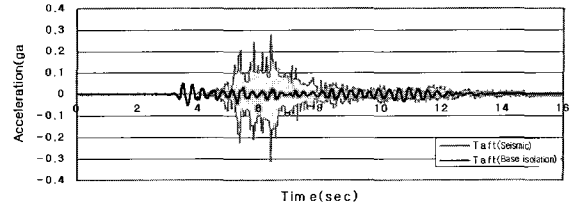
면진 구조에 있어서의 면진 효과는 주로 층별 가속도와 전단력 그리고 층간변위 및 변형각의 감소로 이야기될 수 있으므로, 여기서는 이 변수들을 중심으로 실험결과를 비교·분석하고자 하며, 지진파의 크기에 있어서는 국내 내진기준에 의한 지진동 레벨과 유사한 0.12g와 강진의 경우를 대변하는 0.5g에 대한 결과를 중심으로 분석하였다.

### 5.1 응답가속도

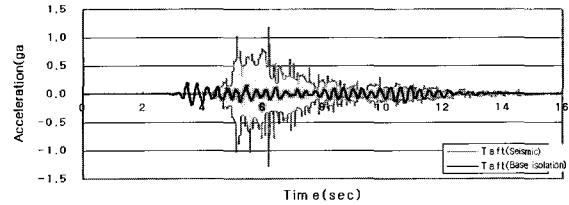
실험에 사용된 4개의 지진파 중 대표적인 Taft 지진파에 대하여 최대 입력가속도 0.12g와 0.5g에 대한 기초고정 실험체와 면진 실험체의 최상층 가속도 응답의 시간이력을 Fig. 7에 나타내었으며, 4개 지진파에 대한 면진 실험체의 최상층 최대가속도 응답과 각 층별 최대가속도 응답 분포를 각각 Fig. 8과 9에 나타내었다.

먼저 최상층 가속도 응답의 시간이력을 나타낸 Fig. 7을 보면, 면진으로 인한 가속도 응답의 현저한 감소로부터 면진 효과를 확실하게 확인할 수 있는데, 이러한 응답은 모든 지진파에 대하여 유사한 결과로서 나타나고 있으며 최대 입력가속도 0.12g에서는 약 1/3로, 0.5g에서는 약 1/5의 감소를 나타내었다.

또한, 이러한 면진 효과는 면진 실험체의 최상층 최대응

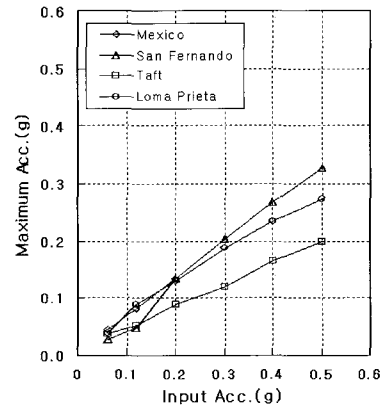


(a) Taft EQ(PGA 0.12g)



(b) Taft EQ(PGA 0.5g)

**Fig. 7 Acceleration of top story**



**Fig. 8 Comparison of maximum acceleration of top story**

답가속도를 비교한 Fig. 8로부터 보다 확실히 알 수 있는데, 그림에서 보는 바와 같이 입력가속도 0.06g에서도 작기는 하나 면진으로 인한 분명한 응답가속도 감소효과가 있는 것으로 나타나고 있으며, 그 때 입력지진가속도에 대한 최대 응답가속도의 비율(가속도 감소율)은 약 0.45~0.73이었다. 이후, 입력가속도가 증가함에 따라 면진 효과가 현저하게 나타났으며, 0.5g에서 0.39~0.65의 가속도 감소율을 나타내 입력가속도의 증가에 따라 그 효과 또한 증가하는 경향을 나타내었다.

지진파 별로 보면, Taft 지진파와 San Fernando 지진파의 면진 효과가 Loma Prieta 지진파와 Mexico 지진파에 비하여 더 큰 것으로 나타났는데, 먼저 최대 입력가속도 0.12g의 경우를 살펴보면, Taft와 San Fernando 지진파의 경우 기초고정 실험체의 최상층 가속도는 최대 입력가속도에 비하여 약 2.3배의 증폭 효과를 나타낸 반면, 면진 실험체에 있어서는 최상층 응답가속도가 최대 입력가속도에 비하여 약 0.4배로 감소하는 것으로 나타났다. Loma Prieta와

Mexico 지진파에 있어서는 기초고정 실험체의 경우 약 1.2배~1.7배로 오히려 Taft와 San Fernando 지진파의 경우보다 낮은 증폭효과를 나타낸 반면, 면진 실험체에 있어서는 약 0.7배의 감소를 나타내 면진 효과 면에서 Taft와 San Fernando 지진파의 경우보다 효과가 덜한 것으로 나타났다.

다음으로, 최대 입력가속도 0.5g의 경우를 살펴보면, Taft와 San Fernando 지진파의 경우 기초고정 실험체의 최상층 가속도는 최대 입력가속도에 비하여 약 2.0배의 증폭 효과를 나타낸 반면, 면진 실험체에 있어서는 최상층 응답가속도가 최대 입력가속도에 비하여 약 0.4배~0.65배로 감소하는 것으로 나타나, 최대 입력가속도의 크기 증가에도 불구하고 입력가속도에 대한 응답가속도의 비율을 크게 달라지지 않는 것으로 나타났다. 오히려, San Fernando 지진파의 경우 0.5g에서의 면진 효과는 0.12g의 경우보다 약간 감소하는 것으로 나타났다. 반면 Loma Prieta 지진파에 있어서는 기초고정 실험체의 경우 최대 입력가속도에 대한 최상층 응답가속도의 비율은 약 2.4배로 Taft와 San Fernando 지진파의 경우와 유사한 증폭효과를 나타낸 반면, 면진 실험체에 있어서는 약 0.55배의 감소를 나타내 비록 면진 효과 면에서는 Taft와 San Fernando 지진파의 경우보다 효과가 덜한 것으로 나타났으나, 지진파의 크기 증가에 따른 감소비율은 커지는 것으로 나타났다.

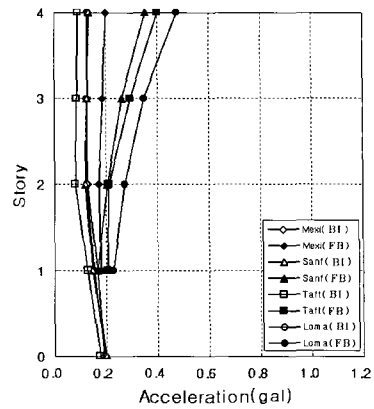
또한 층별 응답가속도 분포를 비교한 Fig. 9를 보면 기초고정 실험체의 경우 상부층으로 갈수록 응답가속도가 증가하는 양상을 보이고 있는 반면, 면진 실험체의 경우는 0.5g에 이르기까지 각 층별로 거의 일정한 값의 분포를 나타내고 있어 강진 하에서도 사용성 면에서 향상된 거동을 기대할 수 있을 것으로 판단되며, 동 건물의 거동이 거의 1차 모드에 의해 지배되고 있음을 알 수 있다. 뿐만 아니라 이러한 경향은 그림에서도 알 수 있는 바와 같이 지진동 레벨이 증가함에 따라 그 경향이 더욱 뚜렷해지는 것으로 나타났다.

이 상의 결과로부터 NRB의 채용에 따른 면진 효과를 분명히 확인할 수 있었으며, 강진에 대한 실험 모델의 안전성 또한 분명히 확인할 수 있었다. 응답가속도의 감소라는 관점에서 면진 효과를 정리해 보면, 지진동 레벨에 관계없이 Taft 지진파에 대한 면진 효과가 가장 우수한 것으로 나타났으며, 최대 입력가속도의 증가에 따른 응답가속도의 감소율의 관점에서는 Loma Prieta 지진파가 가장 우수한 것으로 나타났다.

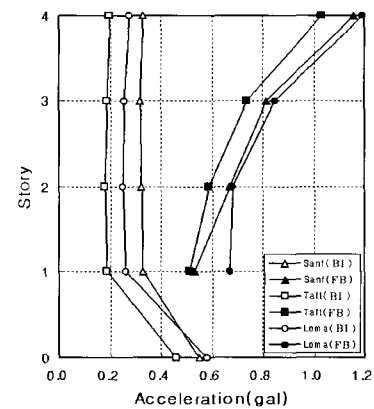
### 5.2 층간 변위 및 최대 변위

실험 결과 계측된 면진층의 최대 변위를 Fig. 10에 나타내었으며, 0.12g와 0.5g에서의 층간변위 값을 Fig. 11에 각각 나타내었다.

면진 설계의 경우, 가속도의 감소로 인한 면진 효과를 얻는데 반하여 변위의 증가를 감수해야만 하며, 이는 면진 설



(a) PGA 0.12 g



(b) PGA 0.5 g

Fig. 9 Distribution of maximum story acceleration

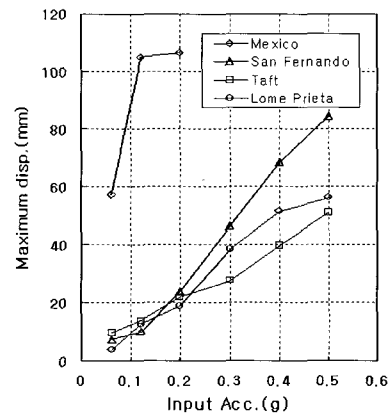
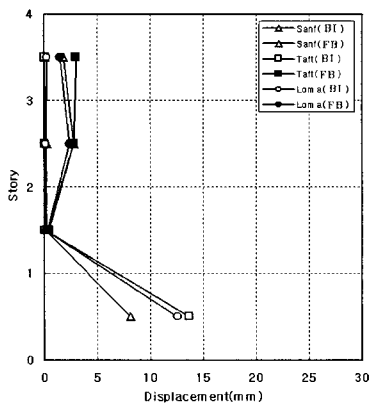
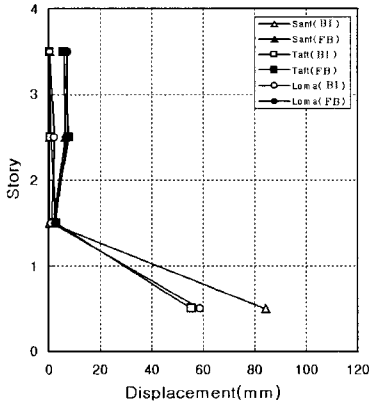


Fig. 10 Maximum displacement of base isolation level

계에 있어서 면진의 성능을 결정하는 또 다른 중요한 요소로서 고려되어야 한다. Fig. 10으로부터 알 수 있듯이, 본 실험의 경우 면진층의 최대 수평변위는 Mexico 지진을 제외하고는 0.12g에서 약 17mm 이하였으며, 0.5g하에서도 90mm를 넘지 않는 것으로 나타나 강진 상태에서도 허용 설계변위인 100mm(면진 장치 직경의 1/2)를 넘지 않는 것으로 나타났다. 다만 Mexico 지진의 경우 0.2g에서 이미 허용설계변위를 넘는 변형을 나타내 실험을 중단하였음



(a) PGA 0.12 g



(a) PGA 0.5 g

Fig. 11 Maximum inter-story drift profile

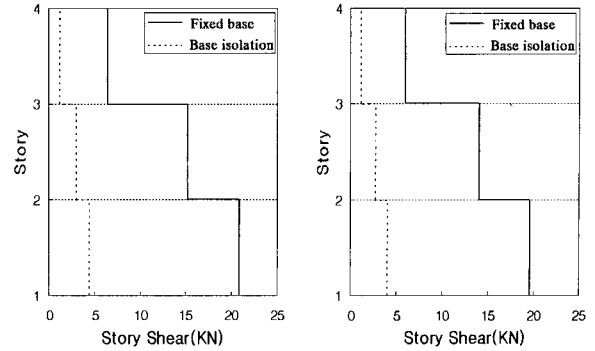
로 이후 최대변형에 대한 데이터를 얻을 수 없었으며, 동지진에 대해서는 감소효과를 증가시키거나 최대설계변위를 크게 하는 등 특별한 조치가 필요한 것으로 판단된다.

다음으로, 구조적인 피해의 원인이 되는 층간변위에 대한 응답을 비교해 보면, Fig. 11로부터 알 수 있듯이 면진 설계로 기초고정 실험체와 비교하여 약 1/3 정도의 감소효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 현 내진기준의 경우 건물의 내진성능을 층간변위로 제한하고 있다는 점을 감안한다면 이 결과는 결국 면진 설계된 건물의 향상된 내진효과를 대변하는 것이라 할 수 있으며, 이러한 감소효과는 최대 입력 가속도의 크기가 증가할수록 더 커지는 것으로 나타났다.

### 5.3 층 전단력

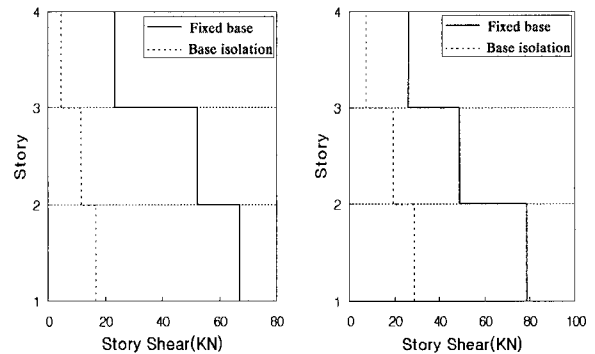
실험 결과로부터 얻은 Taft와 San Fernando 지진에 대한 층별 전단력 분포를 Fig. 12에 나타내었으며, 지진동의 크기 변화에 따른 면진 실험체의 1층 전단력계수(V/W)의 변화를 Fig. 13에 나타내었다.

Fig. 12로부터 알 수 있는 바와 같이 실험결과 층 전단력



(a) Taft(0.12 g)

(b) San Fernando(0.12 g)



(a) Taft(0.5 g)

(b) San Fernando(0.5 g)

Fig. 12 Maximum story shear profile

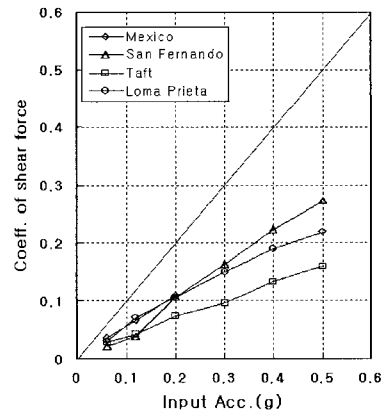


Fig. 13 Comparison of base shear coefficient(V/W)

은 0.12g의 최대 입력가속도에서 Taft 지진과 San Fernando 지진의 경우 기초고정 실험체와 비교하여 면진 실험체가 약 80% 감소하는 것으로 나타났으며, Loma Prieta 지진에서는 50%, Mexico 지진에서는 40%의 감소 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한, 0.5g의 최대 입력가속도에서는 Taft 지진과 Loma Prieta 지진의 경우 약 70%, San Fernando 지진에서는 약 60% 감소하는 것으로 나타났으며, Mexico 지진의 경우에는 최대 입력가속도 0.2g에서 약 25%의 감소효과가 있는 것으로 나타났다.

또한, Fig. 13으로부터 1층의 전단력계수는 0.2g에서

Taft, San Fernando, Loma Prieta, Mexico 지진에 대하여 각각 0.07, 0.1, 0.1, 0.11로 낮게 나타났으며, 강진인 0.5g에서도 최대 0.27을 넘지 않는 것으로 나타났다.

상기 결과의 의미를 살펴보면, 비록 지진파별로 다소간의 차이는 있으나 면진으로 인한 층 전단력의 감소결과는 결국 상부 구조의 부재설계에 있어서 작용하는 하중의 감소를 의미하므로 상부 구조를 보다 경제적으로 설계할 수 있음을 의미하며, 이러한 효과는 지진동의 레벨이 높아질수록 또한 증가하는 것으로 나타났다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 현재 가장 널리 채용되고 있는 적층고무형 면진 장치(NRB)를 적용한 철근콘크리트 건물의 응답특성을 진동대 실험을 통하여 평가하였으며, 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 적용한 NRB는 실험결과 응답가속도의 감소와 층 전단력의 감소가 확실히 관측되어 면진 설계의 기본 개념과 일치하게 건물의 주기를 장주기 영역으로 이동시켜 지진동에 의한 하중효과를 크게 줄일 수 있는 것으로 나타났다.
- 2) 본 실험에 사용된 면진 장치의 목표 허용변위는 100 mm로서, Mexico 지진파를 제외하고는 최대 입력가속도 0.5g에 이르기까지 응답변위가 이 허용치를 넘지 않는 것으로 나타나, 사용된 지진파의 특성을 고려하여 설계한다면 목표 지진동을 0.5g까지 설정하여 설계 가능한 것으로 나타났다.
- 3) 본 연구에 적용된 NRB로 인한 면진 효과는 기초고정에 대한 면진 시 응답가속도의 감소율은 0.12g에서 약 69%, 0.5g에서 약 79%로 지진강도의 레벨이 증가함에 따라 그 감소정도가 함께 증가하는 것으로 나타났다.

- 4) 면진 효과는 지진파의 특성에 따라 그 정도의 차가 다르게 나타나는 것으로 확인되었으며, 장주기 성분이 많이 포함되어 있는 Mexico지진파와 같은 지진동 고려 시 특히 설계허용수평변위 설정에 주의가 필요한 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. ICBO, *Uniform Building Code: Structural Engineering Design Provision*, Vol.2, Whittier, CA, 1997, pp.405~412.
2. 日本建築學會, 免震構造設計指針, 日本建築學會, 1993.
3. Naem, F. and Kelly, J. M., *Design of Seismic Isolated Structures*, John Wiley & Sons, Inc., 1999, 289pp.
4. Skinner R. I., Robinson, W. H., and Mcverry, G. H., *An Introduction to Seismic Isolation*, John Wiley & Sons, Inc., 1992, 304pp.
5. 日本コム協會, 免震用積層コムの 利用技術の關の研究報告書(2), 日本コム協會, 1995.
6. 無田水一, 建築物의 免震, 防震, 制震, 技報堂出版, 1988, pp.1985~1988.
7. 장극관외 18인, "RC건물의 면진기법 적용을 위한 설계 지침서 작성 및 실용화연구", 대한건축학회, 대한주택공사, DRB 통일, 2002.
8. El-Atter, A. G., White, R. N., and Gergely, P., *Shake Table Test of a 1/8 Scale Three-Story Lightly Reinforced Concrete Building*, Technical Report NCEER-91-0081, Cornell University, 1991, pp.2-1~2-5.
9. 대한건축학회, 건축물의 하중기준 및 해설, 대한건축학회, 2000, 354pp.
10. 이현호, 한상환, 이리형, "지진위험도를 고려한 설계지진기록 선정", 대한건축학회 논문집, 16권 9호, 2000, pp.37~44.

## 요 약

면진은 현재 설치 공법의 단순함 그리고 지진하중에 대한 진동제어 효과의 탁월성 등으로 인하여 세계 여러 나라에서 강진으로부터 중요한 건물들을 보호하고, 구조물의 장수명화와 내진성능 향상을 도모하기 위한 실무적인 해결책으로서 받아들여지고 있다. 하지만, 국내의 경우, 재해 시 항상 문제가 되는 정보, 통신, 의료체계 및 사회공공 시설물의 피해로 인한 혼란 방지라는 차원에서 면진 구조의 도입이 종종 거론되고는 있으나 아직까지 구체적인 설계기술은 정착되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 면진 기술의 국내 기반 구축을 위하여 순수 국내기술에 의해 제작된 면진 장치(NRB)를 채용함에 따른 면진 효과를 실험적으로 검증함으로써, 향후 유사 구조 설계를 위한 기초 자료를 제공하고자 하였으며, 철근콘크리트 구조를 대상으로 지진파의 특성 및 지진동의 입력 레벨에 따른 면진 효과가 1/3 축소 모델 진동대 실험을 통해 제시되었다. 실험 결과, 본 연구에서 적용한 NRB는 응답가속도의 감소와 층 전단력의 감소가 확실히 관측되어 면진 설계의 기본 개념과 일치하게 건물의 주기를 장주기 영역으로 이동시켜 지진동에 의한 하중 효과를 크게 줄일 수 있는 것으로 나타났으며, 면진 효과는 지진파의 특성에 따라 그 정도의 차가 다르게 나타나는 것으로 확인되었고, 장주기 성분이 많이 포함되어 있는 Mexico지진파와 같은 지진동 고려 시 특히 설계허용수평변위 설정에 주의가 필요한 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 면진, 적층고무형 면진 장치, 철근콘크리트 건물, 진동대