면진층을 가지는 1/10 축소된 15층 무량판 아파트건물의 진동대 실험

Shaking Table Test of a 1/10 Scale Isolated Fifteen-story Flat Plate Apartment Building

천영수¹

Young-Soo Chun¹

(Received May 26, 2011 / Revised July 5, 2011 / Accepted July 18, 2011)

요 약

본 논문은 적층고무형베어링을 갖는 15층 면진 무량판 아파트건물의 내진거동을 진동대실험을 통하여 검증한 결과를 제시하고 있다. 진동대실험은 중국의 CABR에서 1/10규모의 모형실험체를 대상으로 수행되었다. 실험의 진행은 4개의 지진파를 이용하여 X, Y, X+Y방향으로 다양한 크기의 지진동이 입력되었다. 실험결과, 비 면진건물은 중진레벨에서 진동주기가 현저히 감소하고, 비선형적인 거동을 보였으며, 가속도가 건물의 높이에 따라 현저하게 증가하고, 층간변위도 허용한계를 넘는 거동을 보였다. 반면, 면진건물은 중진레벨에서 거의 일정한 진동주기의 탄성적인 거동을 나타내었으며, 지진하중과 층 가속도가 현저하게 감소하는 응답을 나타내었다. 또한 면진층의 변위는 허용범위 내에서 거동하고, 층간변위는 무시할 수 있을 만큼 작은 강체거동을 나타내었다. 결론적으로 면진은 건물에 대한 지진의 영향을 감소시키는데 매우 효과적이며, 층 가속도의 감소를 통하여 사용성을 증가시키고, 건물 내 설비 등을 안전하게 보호할 수 있음이 입증되었다.

주제어 면진, 진동대실험, 지진동, 가속도, 층간변위, 최대변위

ABSTRACT

This paper presents the results of performance verification tests of the isolated flat plate apartment building with the laminated rubber bearings. The shaking table test is carried out in CABR(China Academy of Building Research) with two 1/10 scale isolation and non-isolation models under 4 excitation waves. The shaking table test is proceeding from x axis, y axis and x+y axis with different amplitude of acceleration values. The results show that, to non-isolated model, the natural vibration period is remarkably decreased and entered non-linear condition after moderate earthquake. Its accelerations become larger with increasing storey number and completely collapsed under large earthquake. The inter-storey shifts largely exceed the limit values of regulated displacement angles. But to isolated model, the natural vibration period of isolated modal is almost the same in all conditions and still in its elastic condition. The earthquake loading is greatly reduced and the accelerations of superstructure are greatly reduced. The inter-storey drifts are very small and can be neglected. The isolated model is in translational state and can be seen as a rigid whole. The displacements of isolation layer are in the allowable range. This experiment demonstrates that the seismic isolation is very effective to mitigate the influence of earthquake on structures and it is possible to increase the serviceability due to decrease the floor acceleration. facilities from their good states that is superior to non-isolated structure.

Key words Base-isolation, Shaking table test, Earthquake, Acceleration, Inter-storey drift, Displacement

1. 서 론

면진(免震)은 건물과 기초 사이에 특별한 장치를 삽입하여 건물의 진동주기를 장주기화 함으로서 건물에 대한 지진효과를 감소시키는 방법으로 상부구조의 내진거동을 크게 개선할 수 있는 효과적인 기술이다(Tan et al., 2001). 이 기술은 일본, 미

국, 뉴질랜드, 중국 등과 같이 지진에 대한 경험이 많은 나라들을 중심으로 실증되고 상용화된 기술로서 그 우수성을 인정받고 있으나, 국내에는 아직까지 구체적인 설계기준이나 지침들이 매우 부족한 상황이다. 국내의 연구논문은 주로 내진건물과 면진건물의 비교를 통한 지진하중 감소 등에 대한 해석적 연구가 주를 이루고 있으며, 면진설계절차 및 설계방법에 있어서는

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

대한주택공사(현 LH, 2002), (사)한국면진제진협회(2009), (사)대한건축학회(2010), 그리고 (사)한국구조물진단유지관리공학회(2010) 등에서 발행된 연구보고서가 전부라고 할 수 있다. 이러한 기술적 문제가 현존하는 상황에서도 우리나라에는 현재 6개의 면진건물이 존재하며 4개 정도의 건물이 추가로 건설을 계획 중에 있다. 최근 강진으로 인한 피해보고가 한반도 주변에서 날로 증가하고 있어 국내에서도 지진에 대한 관심도가 높아지고 있다는 점을 고려할 때 면진건물은 향후에도 지속적으로 증가할 것으로 예상됨으로 기술적인 기반구축이 시급하다.

초기 면진건축은 주로 저층건물이나 강성이 높은 건물을 대상으로 하고 있으며, 그 탁월한 효과 또한 이미 실증된 바 있다. 하지만 최근의 건축경향은 점차 고층화, 경량화, 세장화되고 있으며, 면진기술도 이에 대응하여 발전하고 있다. 국내 아파트건물의 경우에 있어서도 최근에는 그간 구조시스템의 대명사로 알려져 온 벽식구조 이외에 무량판 구조와 같이 구조시스템의 수평강성이 낮아 유연성이 높은 건물이 자주 사용되고 있다. 하지만 이러한 건물에 있어서 면진이 얼마만큼의 효과가 있을지에 대해서는 아직까지 미확인된 상태이다.

본 연구는 무량판 구조와 같이 상부구조의 강성이 낮은 고층건물의 면진효과에 초점을 맞추고 있다. 국내의 경우 현재까지의 실험적 검증은 대부분 전통적인 내진구조에 있어서 조차도 단위 부재 또는 부분 구조체 실험을 통해서만 수행되어 왔으며, 면진구조의 경우도 대부분 면진구조의 성능을 좌우하는 면진장치에 대한 독립적인 실험이나 건물을 포함하는 실험으로서 단위 부재 또는 부분 구조체 실험, 모의 상사된 변형모델 실험 등을 통하여 수행되어 왔을 뿐 전체 구조시스템을 대상으로 실시된 실증적인 검증실험은 전무하다. 전체 구조시스템의 지진 시 거동은 해석적인 툴(tool)을 이용하여 시뮬레이션해 볼 수 있지만 전체 구조시스템의 내진거동이 실제 해석모델로부터 얻어진 결과와 동일한 것인가 하는 문제에 대해서는 아직까지 검증되지 못한 과제로 남아있는 상태이다.

본 실험연구에서는 이러한 문제를 고려하여 무량판구조를 갖는 15층 규모의 아파트를 대상으로 전체 구조시스템의 면진과 비면진 지진응답을 비교하고, 전체 구조시스템의 지진거동을 해석적인 결과와 비교하여 구조해석 모델의 적정성을 검증해 보고자 한다. 또한 천영수와 허무원(2010)은 최근 논문에서 고정기초 건물의 강성과 면진층 강성의 차이에 따른 면진효과에 대하여 연구하고, 고정기초 건물의 주기 대비 일정 주기 이상의 면진층 주기를 확보하도록 최소 기준을 제안한 바 있어 면진주기 설정에 따른 면진효과를 실험을 통하여 검증해 보고자 한다.

2. 실험계획

본 연구는 면진기술의 적용과 이를 통한 효과의 검증이 연

구의 주목적이므로 면진층의 분포와 구성에 따른 차이는 주요 실험변수로서 채택하지 않았다(그림 1(a), (b) 참조). 따라서 실험모델은 건물의 기초부분을 단순화하여 그림 1(c), (d)에 주어진 바와 같이 면진과 비 면진구조에 대한 물리적인 모델을 구성하였다. 실험체는 진동대의 성능을 고려하여 1:10로 축소한 2개의 면진과 비 면진건물을 계획하였으며, 건물의 내진거동에 대한 기초와 건설부지의 영향은 서로 다른 특성을 갖는 지진파를 사용하여 고려하였다. 실험은 중국 북경건축과학연구원 지진연구소(China Academy of Building Research, CABR)에서 실시하였다.

3. 실험체 설계

3.1 실험크기모델 설계 및 해석결과 비교

그림 2에 연구대상 건물의 평면과 진동대 위에 설치된 실험체의 입면을 나타내었다. 실험체의 실험크기모델은 그림 2(a)에 나타난 바와 같이 코아와 세대간벽을 제외하고는 무량판 구조와 동일한 면진구조 공동주택으로 15층 규모 4호조합의 판상형 중형평형 아파트이다. 건물의 높이는 2개 층의 물탱크실

그림 1. 면진층의 구성과 실험모델링 개념도

(a) 연구대상 건물 평면도(A~E : 가속도계 설치위치)

(b) 실험모델

(c) 면진장치(축소모형)

그림 2. 연구대상 건물의 평면, 실험모델, 면진장치

표 1. 면진장치의 특성 값

그 룹	LRB700	RB700
개수	19	45
직경(mm)	700	700
유효면적(cm^2)	3,736	3,839
수직강성(KN/mm)	2,800	1,800
수직내력(KN)	5,600	4,400
수평변형 50%에서의 유효강성(KN/mm)	2.72	0.95
수평변형 50%에서의 감쇠비	0.27	0.05
수평변형 100%에서의 유효강성(KN/mm)	1.98	0.89
수평변형 100%에서의 감쇠비	0.22	0.05
초기강성(KN/mm)	9.90	-
항복강도(KN)	94.1	94.1
항복후 강성비	0.1537	0.1537

을 포함하여 45,800mm, 평면치수는 50,720mm×12,270mm이며, 건물 각 층의 층고는 2,800mm이며, 물탱크실의 층고는 1,400mm이다. 실험물고기모델은 KBC2005기준의 내진규정에 준하여 설계하였다.

건물의 모델링 및 구조해석에 사용한 프로그램은 ETABS v8.48로 상부 구조물은 3차원 유한요소모델을 사용하여 모델링 하였으며, 면진장치는 동 프로그램에서 제공하는 경계비선형해석이 가능한 isolator1 요소를 사용하였다. 동적해석은 기본적으로 시간이력해석을 수행하였으며, 거주내진성능평가용 설계지진동으로 110gal을 적용하였고, 본 건물의 내구 년 한 중 발생 가능한 최대지진동을 가정하여 안전성능 확인용 지진동으로 450gal을 설정 이에 대하여 안전하도록 설계하였다.

해석에 사용된 지진파는 총 4개로 국내 지반조건 S_c 에 부합하도록 결정된 3개의 지진파(CENTRAL CHILE EQ S2A059, 이하 059라 함; SAN FERNANDO EARTHQUAKE S3A103, 이하 103이라 함; 北京人工波, 이하 ZG라함)와 연약지반의 가능성을 고려하기 위하여 장주기성분이 지배적인 EUREKA EARTHQUAKE S2A105(이하 105라 함) 지진파 1개를 사용하였다.

실험물고기모델의 목표 면진주기는 3.0초로 설정하였다. 목표 면진주기의 설정은 상부구조와 면진층이 약 2.0배의 강성차를 갖도록 결정된 것으로 선행연구(천영수, 2010)에서 제안된 최소 면진주기를 확보하도록 설정된 값이다. 목표 면진주기 확보를 위하여 19개의 LRB700과 45개의 RB700이 면진층의 구성에 사용되었으며, 각 면진장치의 특성값은 표 1과 같다.

3.1.1 풍하중 응답

풍하중 응답에 있어서 면진건물의 설계조건은 항복하지 않아야 한다는 것이다. 이는 거주성확보를 위하여 바람에 의한 흔들림으로 인하여 면진장치가 움직이지 않도록 하기 위함이다. 해석결과, 풍하중 작용 시 면진층의 수평변위는 X방

그림 3. 면진구조와 비 면진구조의 총 전단력비 비교

향 2.1mm, Y방향 8.2mm로 설계된 면진장치 LRB700의 항복 시 수평변위(9.5mm)를 넘지 않는 것으로 나타났으며, 설계된 면진층은 풍하중 작용 시 항복하지 않는 것으로 확인되었다.

3.1.2 지진하중 응답

(1) 면진 상부구조 설계를 위한 총 전단력비 결정

면진구조와 비 면진구조의 총 전단력비(면진구조의 총 전단력/비 면진구조의 총 전단력)는 면진구조의 하중감소 효과를 직접적으로 보여주는 자료이며, 면진구조 설계의 중요한 설계인자이다. 그림 3은 면진구조와 비 면진구조의 총 전단력비를 비교하여 나타낸 것으로, 지진파 103과 105의 경우 다른 지진파와 비교하여 상대적으로 감소효과가 적은 것으로 나타났다. 그림 3으로부터 알 수 있는 바와 같이 설계를 위한 X방향과 Y방향의 평균 총 전단력비의 최대값은 각각 0.31과 0.27로 나타나 면진 상부구조의 설계를 위한 총 전단력비 0.31을 적용하여 설계하였다.

(2) 면진구조와 비 면진구조의 최대 총 가속도 비교

그림 4는 지진동의 직교성을 고려하여 X+Y방향의 지진동을 작용시켰을 때 각 방향에 대하여 얻어진 가속도와 비틀림 가속도를 비교하여 나타낸 것이다.

그림으로부터 비 면진구조(가선 실선)의 경우 상부 층으로 갈수록 응답가속도가 증가하는 양상과 고차모드에 의한 S자

그림 4. 면진구조와 비 면진구조의 층별 최대응답가속도 비교(PGA=110gal, X+Y)

형 가속도 응답분포를 보이고 있는 반면 면진구조(진한 실선)의 경우는 가속도의 감소효과는 물론 각 층별로도 거의 일정한 값의 분포를 나타내고 있어 사용성면에서 향상된 거동을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 X+Y방향의 지진동 작용 시 비틀림의 개선효과는 면진구조에 있어서의 우수성을 잘 대변해 주고 있다. 면진구조와 비 면진구조의 최대 응답가속도 비율은 X방향이 4.8-7.8, Y방향이 4.8-11.2로 나타났다.

(3) 면진층의 최대변위

면진층의 최대변위는 면진구조에 있어서 전체 시스템의 안전성과 관련된 문제로 지진동 하에서의 변형이 면진장치의 한계 변형능력을 초과하는지의 여부를 검토하고자 하는 것이다. 검토를 위하여 사용된 지진동은 성능화인용 지진동(450gal)이며, 면진층의 유효 강성은 수평변위 100%에 해당되는 유효강성을 사용하였다.

검토결과, 면진장치의 최대 수평변위는 모두 기준¹⁾을 만족하는 것으로 평가되어 설계된 면진장치는 목표로 하는 면진성능을 충분히 발휘할 수 있는 것으로 나타났다. 여기서 주목되는 점은 105지진파의 최대 변위값(X=286.8mm, Y=276.1mm)이 기준의 한계 값(0.55d=385mm, 3t_r=313.5mm)에 가장 근접하게 나타난 것으로 이 지진파가 연약지반에 의한 장주기파의 영향을 고려하기 위하여 선정된 지진파라는 점을 고려한다면 충분히 예측되는 결과이다. 따라서 본 연구에서는 특히 이 지진파에 주목하여 면진장치가 한계변형을 넘는 지의 여부와 그 안전성을 실험을 통하여 확인하였다.

3.2 축소모형 실험체 설계

축소모형 실험체는 사용 진동대(6m×6m, 800KN, 6DOF)의

- 1) 《叠层橡胶支座隔震技术规程CECS126 : 2001》(4.3.5)에서는 최대 수평변위 한계를 $u_{max} = 0.55d$ 과 $3t_r$ 중 작은 값으로 결정하도록 하고 있다. 여기서 d 는 면진장치의 직경, t_r 은 면진장치 고무층의 총 두께이다.

표 2. 축소모델의 상사율(Scale Factor)

Quantity	Dimension	Ratio	Quantity	Dimension	Ratio
Length	L	1/10	E.Modulus	FL^{-2}	1/2.5
Stress	FL^{-2}	1/2.5	Frequency	T^{-1}	1/0.2236
Mass	FT^2L^{-1}	1/500	Time	T	1/4.472
Stiffness	FL^{-1}	1/25	Acc.	LT^{-2}	2/1

성능을 고려하여 제작 가능한 최대 크기로 1/10의 축소율을 갖도록 전체 건물을 모델링 하였으며, 장변과 단변이 각각 5,070mm×1,230mm이고, 전체 높이가 4,600mm인 15층 모델이다. 표 2에는 실험모델의 구성을 위하여 본 연구에서 적용된 혼합상사모형의 상사법칙이 정리되어 있다.

적층고무 베어링은 LRB와 RB를 포함하여 총 41개의 베어링을 사용하였으며, 각각 직경 80mm, 두께 1mm×20(17)층의 천연고무로 구성되어 있다. 이 베어링의 전단변형 100%에서의 수평강성은 각각 62(100)N/mm로, 상사법칙에 따라 실험 모델은 0.67초의 주기를 갖도록 제작하였다.

4. 실험체 제작 및 실험방법

4.1 실험체 제작

실험체는 중국에서 제작하였으며, 콘크리트는 작은 골재 콘크리트를 사용하였다. 시멘트는 525호 일반시멘트, 모래는 세립재, 물시멘트비는 0.6~0.7을 사용하였다. 실험크기모델 콘크리트의 강도 등급은 C30(30MPa), C35(35MPa), C40(40MPa)을 사용하였으며, 이에 대응하는 축소모형 콘크리트의 강도는 M5.5(5.5MPa), M6.0((6.0MPa), M6.5(6.5MPa)이다. 철근은 상사조건에 근거하여 직경 0.9~2.2mm의 소둔 소직경 강선(回火镀锌铁丝, annealed fine-drawn steel bars)을 사용하였다. 표 3은 작은 골재 콘크리트의 시험결과를 나타낸 것이며, 철근의 역학 성능시험결과는 표 4와 같다.

실험체는 실험이 실시된 中国建筑科学研究院工程抗震研究

표 3. 작은 골재 콘크리트의 시험결과

강도구분	강도 평균값 (MPa)	탄성계수 평균값 ($\times 10^4$ MPa)
M5.5	7.5	1.12
M6.0	8.5	1.21
M6.5	10.0	1.40

표 4. 축소모형 철근의 역학적 성능

종류	직경 (mm)	철근 번호	탄성계수 (N/mm^2)	항복강도 (N/mm^2)	극한강도 (N/mm^2)	연신율
14#	2.2	2#	0.8×10^5	310	400	0.26
		6#	0.8×10^5	300	400	0.30
16#	1.6	3#	0.7×10^5	360	420	0.13
		4#	1.0×10^5	360	420	0.12
18#	1.2	5#	0.65×10^5	360	480	0.32
		7#	0.65×10^5	300	420	0.26

그림 5. 축소모형 실험체 제작과정

所振动台实验室内 야적공간을 이용하여 제작하였다. 실험체는 먼저 철근콘크리트 기초판을 제작하고, 그 위에 축소 제작된 면진장치를 설치한 후 보양하고 상부구조 제작을 위한 기초판과 상부구조를 형성하는 순서로 제작하였다. 상부구조는 먼저 선 조립된 기둥과 벽체 철근을 하부 층의 바닥슬래브와 연결하고 준비된 거푸집을 고정한 후 콘크리트를 타설하였다. 콘크리트의 타설은 1개 층씩 수행하였으며, 콘크리트 타설 후 약 3일간 양생하고 상부 층 공사를 순차적으로 수행하였다. 그림 5는 실험체 제작과정을 사진으로 나타낸 것이다.

(a) 실험체 설치전경

(b) 부가질량 설치사진

그림 6. 실험체 설치전경 및 부가질량 설치

4.2 실험방법

그림 6은 진동대 위에 설치된 실험체 전경을 나타낸 것으로, 실험체를 진동대 위에 완전하게 고정한 후 상사법칙에 따라 부족한 부가질량을 그림 6(b)와 같이 설치하였다. 부가 인공질량은 0.1KN의 철괴를 각 층 바닥슬래브 위에 1단으로 가능한 한 균등하게 분포시켰다. 지진동은 모델의 X, Y, 그리고 X+Y방향으로 순차적으로 적용되었으며, 최대 입력가속도(PGA)가 0.07g, 0.1g, 0.22g, 0.4g, 0.9g가 되도록 점진적으로 증가시키면서 실험을 실시하였다. 지진동의 적용시간은 상사법칙에 따라 기록된 시간에 대하여 1/4.472비율로 축소되었다. 측정은 각 층의 수평가속도(그림 2(a) 참조)와 3개 층 단위로 상대변형을 계측하였다(EI-Atter et al., 1991).

5. 실험결과 및 분석

실험결과는 축소모형 실험체에 대한 결과와 이를 통하여 유도된 실물 크기 건물의 응답으로 나누어 비교·분석하였으며, 실험체의 동특성 변화와 함께 지진동의 규모와 종류에 따른 층별 가속도와 전단력, 층간변위와 변형각의 변화를 통하여 전체 면진구조의 지진응답을 비 면진구조의 지진응답과 비교·분석하고, 해석적인 결과와 비교하여 구조해석 모델의 적정성을 검증하였다.

5.1 축소모형 실험체

5.1.1 균열 및 파괴형태

면진구조와 비 면진구조는 지진동의 규모와 종류에 따라 현저한 차이를 나타내었다. 먼저 균열 및 파괴상태를 살펴보면, 면진구조의 경우에는 안전성능 확인용 지진동에 이르기까지 상부 구조에 육안으로 확인 가능한 어떠한 균열도 나타나지 않았으며, 실험의 종료 시까지 아무런 파괴의 징후도 나타나지 않았다. 이러한 면진구조의 거동은 상부구조가 실험 종료 시까지 탄성 상태에 머물러 있었다는 것을 의미하며, 면진구조의 우수성과 성능설계의 개념으로서 목표성능을 충분히 달성하였음을 입증하는 것이라 할 수 있다. 반면, 비 면진구조의 경우 작은 지진하중 작용 하에서는 탄성 상태를 유지

(a) 기둥 균열 및 파괴 (b) 전단벽체의 균열 (c) 실험체 전면 균열

그림 7. 안전성능 확인용 지진동 후 비 면진구조의 균열 및 파괴

하는 것으로 나타났으나, 거주내진성능평가용 설계지진동 하에서는 구조부재의 일부분에 균열이 발생하였다. 특히 균열이 육안으로 뚜렷이 관측된 부위는 상부구조의 A축과 1축이 교차된 부위의 하부벽체, A축과 2축이 교차된 부위, A축과 5축이 교차된 부위, C축과 3축이 교차된 부위, C축과 4축이 교차된 부위의 하부기둥이다(그림 2(a) 참조). 또한 안전성능 확인용 지진동을 경험한 후에는 비탄성 상태에 이르렀음을 확연하게 보여주었으며, 많은 균열과 일부 부재에서 파괴현상이 관측되었다. 균열이 특히 심화되어 나타난 부위는 상부구조 하부 A축과 1축이 교차된 부위의 전단벽체, 1축과 3축 간의 B, F축 전단벽체, 4축과 6축, 10축과 12축, 18축과 20축, 24축과 26축 간의 H축 전단벽체, A축과 2축, A축과 5축, C축과 3축, C축과 4축이 교차된 부위의 기둥하부이며, 일부에서는 파괴 현상을 나타내었다(그림 7 참조).

5.1.2 가속도 응답

그림 8에 층별 최대가속도 응답 분포를 면진구조와 비면진구조를 비교하여 나타내었으며, 그림 9에 각 지진파에 대한 최상층의 최대응답가속도를 나타내었다.

이들 실험결과를 분석해 보면, 응답가속도의 경우 비 면진구조는 상부 층으로 갈수록 응답가속도가 점진적으로 증가하는 전형적인 내진구조의 응답분포를 나타내고 있는 반면 면진구조는 거의 일정한 응답분포와 비면진구조 대비 약 2/3의 최상층 가속도 감소를 나타내고 있어 사용성 면에서 향상된 거동을 기대할 수 있을 것으로 판단되며, 안전성능 확인용으로 설정한 지진동(0.9g)에 이르기까지 상부구조의 응답가속도 증폭현상은 거의 나타나지 않았다(그림 8). 이는 분명한 면진효과를 말해주는 것으로 사용성 증가와 함께 내진구조와 비교하면 상부구조에서 층 전단력의 감소라는 이점을 얻을 수 있음을 의미한다. 층 전단력의 감소는 결국 상부 구조의 부재설계에 있어서 작용하는 하중의 감소를 의미하므로 상부구조를 보다 경제적으로 설계할 수 있음을 의미하며, 무량판구조도 면진을 이용하면 내진설계의 안전성을 확보하면서 경제적인 설계를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

다만, 본 실험결과와 비교한 경우 면진구조의 응답가속도 분포형

(a) 0.22g

(b) 0.9(0.6)g

그림 8. 지진하중별 각층의 최대 응답가속도 분포(Y방향)

그림 9. 최상층 최대응답가속도

태가 완전 강체거동이 아닌 K자형에 가까운 분포를 보이고 있어 고차모드에 의한 영향이 다소 포함된 것으로 판단되며, 이로 인해 가속도 값은 입력값 대비 크게 감소하여 나타나지 않았다. 이러한 사실은 당초 목표로 설정한 면진주기가 고성능 면진효과를 얻기에 충분치 않았던 것으로 판단된다. 결론적으로 고성능의 면진효과를 얻기 위해서는 선행연구(천영수와 허무원, 2010)에서 지적하였듯이 면진층의 강성비를 고정기초 대비 2.5배 이상으로 충분한 배려할 필요가 있다고 판단된다.

5.1.3 최대변위 및 층간변위

그림 10과 그림 11은 각각 층간변위의 분포와 최대 응답변위 분포를 나타내고 있다.

그림 10은 구조적인 피해의 원인이 되는 층간변위에 대한 응답을 나타낸 것으로 면진구조는 비 면진구조와 비교하여

(a) 0.22g

(b) 0.9(0.6)g

그림 10. 층간변위(Y방향)

(a) 0.22g

(b) 0.9(0.6)g

그림 11. 최대 응답변위(Y방향)

높이에 따라 거의 일정하면서도 약 1/3로 감소된 응답을 보여주고 있다. 현행 구조기준의 경우 건물의 내진성능을 확보하기 위한 수단으로서 층간변위 제한을 두고 있다는 점을 고려한다면 면진구조에 있어서 감소된 층간변위 값은 결국 향상된 내진성능을 대변하는 것으로 볼 수 있으며, 그 만큼 상부구조의 안전도가 확보될 수 있음을 의미한다. 더욱이 이러한 경향은 지진동의 규모가 증가함에 따라 그 효과가 더욱 크게 나타나고 있어 고성능 내진설계를 위해 면진구조가 상당히 효과적임을 확인할 수 있다.

면진구조는 가속도의 감소로 인한 내진성능 향상 효과를 얻는데 반하여 변위의 증가를 감수해야만 하며, 이는 면진구조에 있어서 그 성능을 결정하는 또 다른 중요 요소이다. 그림 11을 보면 면진구조는 면진층에서 상당히 큰 변위를 경험하고 있음을 알 수 있으며, 본 연구의 경우 변위는 $0.55d$ (d = 면진장치 직경)와 $3t_r$ (t_r = 면진장치 고무층의 총 두께) 중 작은 값인 44.0mm를 넘지 않아야 한다. 실험결과 설계지진동으로 설정된 0.22g(원형건물의 경우 0.11g)의 경우 면진층의 최대 응답변위는 약 14.76mm로 허용변위보다 상당히 낮은 수준에 머물러 있는 것으로 나타났으며, 안전성능 확인용 지진동 레벨인 0.9g(원형건물의 경우 0.45g)에 있어서도 최대 응답변위는 26.46mm로 나타나 목표성능에 적합한 설계가 수행되었음을 확인할 수 있었다.

이상의 결과로부터 무량판 구조의 적층고무 면진장치 채용에 따른 면진효과를 분명히 확인할 수 있었으며, 강진에 대한 실험모델의 안전성 또한 분명히 확인할 수 있다.

5.2 실물크기 건물의 응답

본 절에서는 축소모형 실험으로부터 환산된 실물크기 건물의 동특성과 응답가속도, 변위 등을 해석결과와 비교하여 구조해석 모델의 적합성을 검증해 보고자 한다.

5.2.1 동특성 변화

표 2에 제시된 상사법칙을 고려하여 축소모형실험체의 고유진동수로부터 환산된 실물크기 건물의 진동주기를 해석결과와 비교하여 표 5에 나타내었다.

표 5를 보면 실험으로부터 측정된 건물의 고유주기는 이론적인 해석 값보다 약간 짧은 것을 알 수 있다. 상기와 같은 원인이 발생한 이유는 ① 해석모델로는 슬래브와 기둥 및 벽체 연결부의 강성 역(域)을 정확히 고려하기 어렵다는 점, ② 실제 구조물은 구성부재 간에 매우 복잡한 연결 관계를 가지고 있으며 질량분포, 재료특성, 시공기술 등에 따라 구조물의 강성이 다양하게 변할 수 있기 때문에 해석모델 구성 시 이에 대한 정확한 판단이 어렵다는 점, 그리고 ③ 축소모형의 동적탄성계수는 정적탄성계수보다 높은 값을 가지게 된다는 점 등으로 분석해 볼 수 있다.

물론 이러한 차이가 건물의 실제적인 동적거동의 차이를 가져올 것이라는 것은 분명한 사실이지만 진동모드의 분포에 따른 특성을 고려해 볼 때 해석모델과 실험모델은 모두 전단 모드 진동에 가깝게 유사한 거동을 하게 될 것이라 판단되며, 이러한 점에서 두 모델의 직접적인 비교 또한 의미가 있을 것으로 판단된다.

5.2.2 가속도 응답

실물크기 건물의 가속도 응답은 상사관계를 고려하여 다음의 관계식으로부터 얻을 수 있다.

$$a_i = K_i a_g \quad (1)$$

표 5. 실물크기 건물의 고유주기(초, Sec.)

진동모드 ^a	실험결과				해석결과			
	1(X)	2(Y)	3(X)	4(Y)	1(X)	2(Y)	3(X)	4(Y)
실험 전	1.45	0.82	0.47	0.32	1.53	0.90	0.57	0.33
거주성능평가용 설계지진동	2.50	2.46	2.24	2.20	2.69	2.50	2.30	2.13
안전성능 확인용 지진동	2.79	2.71	2.50	2.43	2.91	2.75	2.54	2.40

* a : 진동모드의 차수(방향)

여기서, a_i : 실물크기 건물 i 층의 최대 가속도 응답(g)
 a_g : 입력지진동의 최대 가속도 값(g)
 K_i : 실물크기 구조의 입력지진동과 대응되는 축소 모형 i 층의 동적확대계수

그림 12는 각 지진파에 대하여 실험결과와 해석결과로부터 얻은 각 층의 최대 가속도응답을 거주성능평가용 지진동과 안전성능 확인용 지진동으로 구분하여 비교한 것이다.

그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 실험값은 이론값과 비교하여 거주성능 평가용 지진동의 경우 약간 큰 값을 나타내고 있으나 안전성능 확인용 지진동의 경우에는 거의 2~3배에 가까운 매우 큰 차이를 보이고 있다. 또한 모드 형상 면에 있어서도 해석결과는 거의 강체거동에 가까운 결과를 나타낸 반면 실험결과는 고차모드의 영향이 다수 포함된 결과를 보여주고 있다. 이러한 차이는 축소모형 제작에 따른 기술적인 오차가 주된 원인인 것으로 판단되며 특히 면진장치에 계변수들이 이론적인 값과 상당히 다를 수 있다는 점이 가장 크게 작용하였을 것으로 판단된다.

진동레벨별로 보면 거주성능 평가용 지진동 응답의 경우 실험값에 의한 응답가속도의 크기가 이론값과 비교하여 다소 크다는 점은 전 절에서도 검토되었듯이 실험체의 고유주기가 이론값과 비교하여 다소 짧다는 점에 의하여 예측 가능한 결

그림 12. 지진파별 가속도 응답 비교(Y방향)

과이다. 모드형상의 경우에는 일방향 지진동의 경우 거의 유사한 형태의 진동을 나타내고 있으나 직교성분이 동시에 입력된 경우에는 지진파별로 큰 차이를 보여주고 있다. 특히 이러한 결과는 X방향의 응답보다 Y방향의 응답에서 더 큰 차이를 나타내고 있는데 이는 축소된 면진장치의 강성이 이론적인 값과 비교하여 일률적으로 모두 동일하게 축소되지 못함으로서(제작오차) 실물크기 건물의 편심률과 축소모형의 편심률이 서로 다를 수 밖에 없다는 점이 가장 큰 원인인 것으로 사료된다. 이러한 문제점은 축소모형 실험에서 뿐 아니라 실무에 있어서도 똑같이 발생 가능한 문제로서 현장적용 시 면진장치에 대한 철저한 실험적 검증과 면진장치의 특성을 고려한 재검토가 반드시 필요하다고 판단된다.

안전성능 확인용 지진동의 경우 상기의 문제점은 더욱 크게 나타나고 있는데 먼저 상부구조와 면진층 간의 강성차가 목표 값보다 크게 작아짐에 따라 상부구조에서의 면진효과가 크게 감소하여 나타나고 있다는 점과 상부구조와 면진층 간의 편심률 증가로 인하여 강진동 하에서 고차모드 효과와 비틀림에 의한 효과가 크게 심화된 모드형상을 보여주고 있다는 점이 가장 큰 응답의 차이를 가져온 것으로 사료된다.

하지만 거주성능 평가용 지진동의 응답에서 보여주고 있듯이 실험과 해석상의 강성 차이로 인한 약간의 응답가속도 차이를 제외하고는 일방향 지진동의 경우 거의 유사한 응답

을 보이고 있다는 점에 비추어 면진장치의 성능확인에 주의를 하고 면진층의 강성을 적절히 모델링 한다면 해석적인 면진 모델은 충분히 신뢰할 수 있는 응답을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

5.2.3 변위응답

실물크기 건물의 변위응답은 상사관계를 고려하여 다음의 관계식으로부터 얻을 수 있다.

$$D_i = \frac{a_{mg} D_{mi}}{a_{tg} S_d} \quad (2)$$

여기서, D_i : 실물크기 건물 i 층의 변위 응답(mm)

D_{mi} : 축소모형 i 층의 변위 응답(mm)

a_{mg} : 축소모형 실험 진동대의 최대 입력가속도(g)

a_{tg} : D_{mi} 에 대응되는 축소모형 실험 진동대의 최대 입력가속도(g)

S_d : 축소모형 변위 상사계수

그림 13과 그림 14는 각각 거주성능평가용 지진동 레벨에 해당하는 최대 층간변위 응답과 최대 변위응답을 실험결과와 해석결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있

그림 13. 지진별 층간변위 응답 비교(0.11g, X방향)

그림 14. 지진파별 변위 응답 비교(0.11g, X방향)

는 바와 같이 변위응답의 경우에는 인공지진파에서 해석결과가 실험값보다 약간 큰 결과를 나타낸 것을 제외하고는 거의 유사하고 일정한 응답결과를 나타내고 있어 면진장치의 한계 성능 확인 및 면진건물의 내진성능 검토 시 구축된 해석모델이 적절히 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 면진 무량판구조의 내진거동과 성능평가를 목표로 전체 아파트 건물을 1/10로 축소된 모형을 대상으로 진동대실험을 실시하였으며, 실험결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 면진구조와 비 면진구조는 지진동의 규모와 종류에 따라 거동에 현저한 차이를 나타내었다. 비 면진구조의 경우 지진동의 규모가 증가함에 따라 구조부재의 균열과 함께 급격한 강성저하를 보이면서 파괴에 이르는 형태를 나타낸 반면, 면진구조는 안전성능 확인용 지진동에 이르기까지 상부 구조에서 육안으로 확인 가능한 어떠한 균열도 나타나지 않았으며 실험 종료 시까지 아무런 파괴의 징후도 나타나지 않아 목표성능에 이르기까지 안전성이 충분히 확보될 수 있는 것으로 나타났다.

2. 가속도응답 분포의 경우, 비 면진구조는 상부 층으로 갈수록 점진적으로 증가하는 전형적인 내진구조의 응답 분포를 나타낸 반면 면진구조는 거의 일정한 응답분포를 나타내 사용성 면에서 향상된 거동을 기대할 수 있음을 확인하였으며, 이러한 기대효과는 지진동의 크기가 클수록 그 효과가 더욱 커지는 것으로 나타났다.
3. 면진구조는 비 면진구조와 비교하여 약 2/3의 최상층 가속도 감소를 나타내었으며, 안전성능 확인용 지진동의 경우 2/3 이상의 감소를 보여주어 무량판 구조의 경우에 있어서도 면진을 통하여 우수한 내진성능의 확보가 가능한 것으로 판단된다.
4. 본 실험의 경우 면진구조의 응답가속도 분포가 완전 강체거동이 아닌 K자형에 가까운 분포를 보이고 있어 실험 시 설정된 목표 면진주기가 충분치 않았던 것으로 판단되며, 무량판 구조에서와 같이 구조체의 강성이 낮은 건물에서는 면진층과의 강성비에 대하여 충분한 고려가 필요한 것으로 판단된다.
5. 면진구조는 구조적인 피해의 원인이 되는 층간변위에 대한 응답에서도 비 면진구조와 비교하여 약 1/3로 감소된 응답을 보여주고 있어 향상된 내진성능을 기대할 수 있으며 그 만큼 상부구조의 안전도가 확보될 수 있음을 알 수 있었다. 또한 이러한 경향이 지진동의 규모

가 증가함에 따라 그 효과가 더욱 크게 나타나고 있다는 점에서 고성능 내진설계를 위해 면진구조가 상당히 효과적임을 확인할 수 있었다.

6. 비 면진구조 대비 면진구조의 비틀림 응답은 약 20%~30% 정도로 면진구조는 면진층에서 면진장치의 배치를 이용하여 상부구조의 비틀림 응답을 크게 개선할 수 있음을 확인하였다. 이는 결국 상부구조에 있어서 부재의 응력부담을 줄이는 효과로서 나타나게 됨으로 역시 상부구조의 안전성에 기여할 수 있음을 의미하며, 성능향상이라는 면에서 면진구조의 신뢰도를 확인시켜주는 결과라 할 수 있다.
7. 실험에 의한 응답가속도와 해석 값을 비교한 결과, 실험과 해석상의 강성 차이로 인한 약간의 차이를 제외하고는 일 방향 지진동의 경우 거의 유사한 응답을 보이고 있다는 점에 비추어 면진장치의 성능확인에 주의하고 면진층의 강성을 적절히 모델링 한다면 해석적인 면진 모델은 충분히 신뢰할 수 있는 응답을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 대한주택공사(2002), 「R/C 건물의 면진기법 적용을 위한 설계 지침서 작성 및 실용화 연구」.
2. 한국면진계진협회(2009), 「면진설계 매뉴얼 및 실무사례집」.
3. 대한건축학회(2010), 「면진구조설계지침 및 예제집」.
4. 한국구조물진단유지관리공학회(2010), 「면진리모델링 설계지침 및 실무사례집」.
5. 천영수 · 허무원(2010), “중·저층 골조에서 면진주기 설정에 따른 면진효과”, 「구조물진단학회지」, 14(6): 1~7.
6. Tan, P., Zhou, F., and Xu, Z. (2001), “Design and Application Examples of Public and Regular Apartment Buildings using a New Isolation System in P. R. China”, 7th International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures, Assisi, Italy.
7. El-Atter, A. G., White, R. N., and Gergely, P. (1991), “Shake Table Test of a 1/8 Scale Three-Story Lightly Reinforced Concrete Building”, *Technical Report NCEER-91-0081*, Cornell University, pp. 2-1~2-5.