



## 내진설계 되지 않은 공동주택의 진동대 실험에 의한 내진성능 평가

정 란<sup>1)</sup> · 이정우<sup>1)</sup> · 박태원<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>단국대학교 건축공학과

## Shaking Table Test for Seismic Performance Evaluation of Non-Seismic Designed Wall-Type Apartment

Lan Chung<sup>1)</sup>, Joung-Woo Lee<sup>1)</sup>, and Tae-Won Park<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Dankook University, Seoul 140-714, Korea

**ABSTRACT** Earthquakes are reported that building structures have been colossal damaged, but before 1988 designed structures which were not applicate seismic design code have no seismic performance. Especially, for the apartment structures were indicated that it have no resist wall element of earthquake before 1988 designed structures. We have to evaluate for seismic performance this structures, therefore it will be retrofitted for seismic index sufficient structures. We performed seismic performance evaluation for model structures by MIDAS which is general structure analysis software. In this study, it was performed shaking table test to evaluate model structure which is reinforcement concrete and 5 floors for seismic performance index. We made specimens by similar's law and tested shaking table test. In the shaking table test, it is not performed prototype model test because of space and equipment condition. So we had made scale-down model for 1/5 by similar's law. That's why it needs for the evaluation of performance. However, it is not possible to do an experiment of prototype owing to the shortage of space and the limit of an experimental instrument in the shaking table test. Then, modeling and reducing the part of prototype do the experiment. In this experiment, a shaking table test is done and seismic performance of model structures is evaluated by using similitude laws for scale down specimen. As a result, it is proved that non-seismic design structures need to retrofit since seismic performance shows life safe grade in 0.12 g of an earthquake.

**Keywords** seismic design, shaking table test, similitude laws, seismic performance, wall-type apartment

### 1. 서 론

#### 1.1 연구의 배경 및 목적

우리나라에는 1950년대부터 공동주택이 보급되어 현재는 매년 50만호 이상의 공동주택이 공급되고 있다. 또한 국민들의 주거생활도 60% 이상이 공동주택에 거주하고 있는 것으로 건설교통부<sup>1)</sup>에서 발표하였다. 이러한 공동주택은 생활의 편리함과 쾌적한 주거환경으로 더욱 더 국민들의 사랑을 받고 있지만 준공된 지 20년이 지난 공동주택들은 설비의 노후화 및 공간사용의 비효율성, 구조물의 안전에 대한 불확신 등으로 최근 사용자들의 개선요구가 높아지고 있다. 특히 1988년 이전에 지어진 공동주택들은 내진설계가 적용되지 않아 구조성능에 심각한 문제가 있을 것으로 판단<sup>2)</sup>된다. 이는 당시에 공기단축과 시공의 편의성을 위하여 Fig. 1과 같이 터널 폼으

로 시공하여 장변방향으로는 벽을 배치하지 않아 지진 발생 시 횡력 저항 요소가 되는 전단벽이 배치되지 않았기 때문<sup>3)</sup>이다. 최근 지구촌 곳곳에서 발생하는 지진으로 인한 피해가 보고되고 있으며 그 피해규모를 짐작해 볼 때 이에 대한 대책이 시급한 실정이다. 특히 지진 발생 시 내진설계가 되어 있지 않은 구조물의 경우 대부분 붕괴 등 큰 피해로 이루어지고 있는 점을 살펴볼 때 구조물에 내진성능을 부여하는 것이 매우 시급한 과제이다. 이러한 구조물에 내진성능을 부여하기 위해서는 구조물이 현재 보유하고 있는 내진성능을 파악하고 부족한 성능을 파악해야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 내진설계가 이루어 지지 않은 노후 공동주택에 대한 횡 하중에 의한 저항시스템과 지진 저항 성능을 파악하기 위한 축소실험체의 제작과 진동대 실험을 수행하여 성능보강의 수준을 제시하기 위한 기초자료를 제시하여 국내 공동주택의 리모델링을 활성화 하는데 연구의 목적이 있다.

\*Corresponding author E-mail : tw001@dankook.ac.kr  
Received January 27, 2006, Accepted September 20, 2006  
©2006 by Korea Concrete Institute

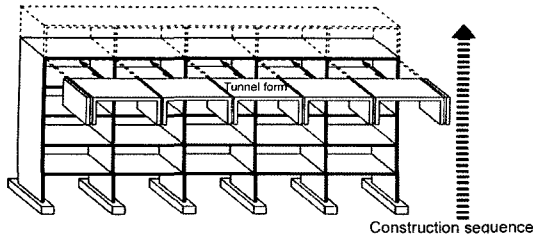


Fig. 1 Apartment structure constructed by tunnel forms

## 2. 모델 구조물

### 2.1 모델 구조물의 개요

연구에 이용된 구조물은 현존하는 구조물로서 서울특별시에 위치하고, 1982년에 준공되어 약 23년이 경과된 16~25평형의 9세대가 각 층에 조합된 구조물이다(Table 1). 단변방향의 양쪽에 캔틸레버 보로 복도가 매달려져 있으며, Fig. 2와 같이 구조물의 최외곽 세대에만 전단벽의 역할을 하는 전단벽이 장변방향으로 배치되어 있고, 내부세대에는 장변방향으로 배치된 벽이 없어 횡강성이 매우 낮을 것으로 예상된다. 구조물에 적용된 구조 도서 또는 구조 계산서는 현존하지 않으며, 현재 유지관리를 위한 건축도면만 존재하고 있었다. 따라서 재료강도나 하중산정은 동시대에 건설된 자료를 참고하여 콘크리트의 압축강도 21 MPa, 철근의 항복강도는 240 MPa로 추정하여 연구를 수행하였다.

### 2.2 모델 구조물의 내진성능 평가 결과

구조물은 고층에서는 축력의 감소로 상층부에서 얇은 두께의 벽체를 사용하였다. 또한 CSM(capacity spectrum method)법<sup>4)</sup>에 의한 모델구조물의 내진성능 평가를 수행해 본 결과 Fig. 3과 같이 강도증진형 내진성능 보강이 필요한 것으로 나타났다. 이는 구조물이 설계·시공될 당시에는 내진설계에 관련된 규정이 제정되어 있지 않았으며 시공의 편의성으로 인하여 터널 폼을 사용하였기 때문으로 판단된다. 또한 벽체 배근이 W1의 경우 복배근이 되어 있으나 W3, W4의 경우 단배근이 적용되었으며, Table 2에 나타난 바와 같이 5층 이상부터는 W3, W4만 배치되어 있어 반복하중에는 치명적인 약점을 가질 것으로 예상된다.

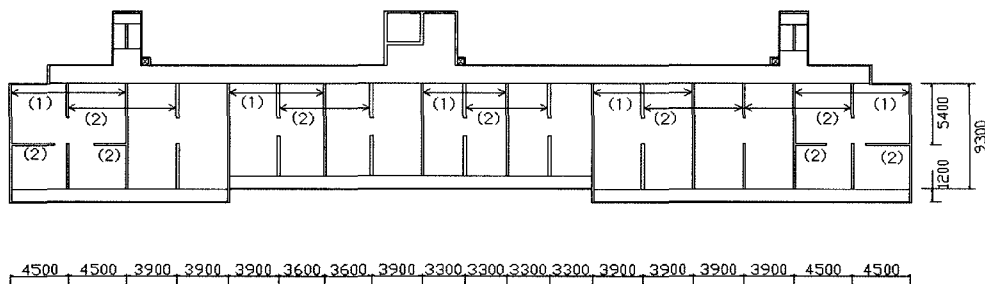


Fig. 2 Structural plan of model(unit : mm)

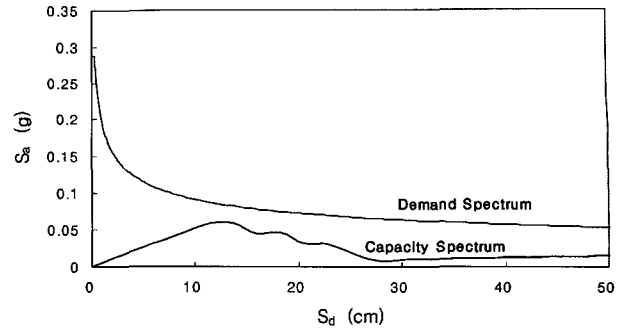


Fig. 3 Results of seismic performance evaluation

Table 1 Summary of model structure

Site	Seoul in Korea			
Structural type	Reinforced concrete wall			
Using	Dwelling			
Scale	15th floor, floor height 2.6 m			
Material	Concrete	21 MPa	Steel	240 MPa

Table 2 Summary of structural walls

Floor	(1) at Fig. 2	(2) at Fig. 2	Wall thickness
10~15	W4	W4	W1: 200mm W3: 170mm W4: 140mm
8~9	W4	W3	
5~7	W3	W3	
1~4	W3	W1	

## 3. 진동대 실험 개요

### 3.1 실험 개요

구조물이 횡하중에 의한 저항시스템과 보유하고 있는 내진성능을 알아보기 위하여 모델 구조물을 1/5로 축소하여 지진 모의 실험을 수행하였다.

동적하중을 받는 다자유도 구조물의 거동을 모형화하면 다음과 같다.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (1)$$

여기서  $\ddot{x}$ : 가속도벡터  $\dot{x}$ : 속도벡터  $x$ : 변위벡터  $M$ : 질량행렬,  $C$ : 감쇠행렬  $K$ : 강성행렬을 나타낸다.

$$M\ddot{x}(t) + Kx(t) = 0 \quad (2)$$

윗식을 전개하여 각 행을 분리하면

$$\sum_{j=1}^n m_{ij} \ddot{x}_j + \sum_{j=1}^n k_{ij} x_j = 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

변위벡터  $x$ 는 공간적 형상함수와 시간적 형상함수의 곱으로 표현되므로 비감쇠 구조물의 자유진동거동은 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^n m_{ij} \ddot{x}_j \hat{q}(t) + \sum_{j=1}^n k_{ij} x_j \hat{q}(t) = 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots)$$

이를 정리하면

$$\frac{\hat{q}(t)}{\hat{q}(t)} = \frac{\sum_j k_{ij} \hat{x}_j}{\sum_j m_{ij} \hat{x}_j} = -\omega^2 \quad (4)$$

여기서  $\omega$ 는 구조물의 동적 특성을 나타내며, 운동방정식을 이용하여 구조물의 동적 특성을 알 수 있다. 구조물의 동적 특성과 지진동의 동적 특성을 고려하여 내진설계에 반영시킴으로써, 유사시 피해를 최소화 시킬 수 있으며 강성행렬을 조절하여 구조물의 내진성능을 증진시키는 방안에 관한 연구를 수행하였다.

### 3.2 실험체 계획

실험체는 모델 구조물의 1개 프레임을 대상으로 제작하였으며 상사법칙에 의거하여 축소된 재료를 사용하였다.

진동대 실험은 구조물을 직접 지진파에 노출시켜 지진 작용 시 구조물에 가해지는 힘과 변위, 가속도 등을 재현하여 확인시켜 볼 수 있는 장점이 있으나 실험장비가 고가이고, 실제 구조물을 실험하는데 공간적·기술적인 제약이 발생한다. 따라서, 실험체를 원형(prototype) 그대로 만들지 못하고 축소하여 제작하여야 하는데, 이때 원형과 똑같은 결론을 얻을 수 있도록 하기 위하여 모델에 실험체의 제반 특성을 유지하도록 하는 상사성원리의 적용이 필요하다.

본 실험에서는 실험체의 운반과 진동대의 크기의 제한으로 인하여 실험체 실험체의 1/5로 축소시켜 이상 모델로 삼았다. 기존의 연구를 보면 Gulkan과 Sozen의 연구<sup>5)</sup>에서 1/4 축소 모델과 1/8 축소 모델에 대하여 원형 구조물의 거동과 축소 모델의 거동이 유사함을 확인하였고, 국내에서도 정관, 박현수<sup>6)</sup> 등의 연구자에 의해서 상사법칙의 적용성이 확인된 바 있다.

본 실험에 적용된 상사성 필요 조건은 Table 4에 나타난 바와 같으며, Table 5는 본 실험에 적용한 실험체의 부재치수를 나타낸 것이다.

### 3.3 실험체의 제작

#### 3.3.1 이형철근의 제작

원형 구조물의 경우 D10철근이 사용되었다. D10철근

**Table 3** Summary of specimen

Name	Contents	Ratio of reduction factor	Other
V-N	Non seismic design	1/5	Application for Similar law

**Table 4** Condition of similarity law

Contents	Unit	Reduction factor at 1/5	Content	Unit	Reduction factor at 1/5
Length	L	0.2	Acceleration	F·L <sup>-2</sup>	1
Section	L <sup>2</sup>	0.04	Moment	FL	0.04
Volume	L <sup>3</sup>	0.008	Mass	FL <sup>-1</sup> T <sup>2</sup>	0.04
Strain	-	1	Time	T	0.447
Stress	F·L <sup>-2</sup>	1	Frequency	Hz	1

**Table 5** Similar law for model structure

Elements	Prototype			Reduction		
	Left	Right	Slab	Left	Right	Slab
Section (mm)	200×600	170×600	150×600	40×300	35×300	30×300
Length (mm)	2600	2600	3300	520	520	660
Steel	D10+D13			D2		
f <sub>y</sub> (MPa)	300			350		
f <sub>ck</sub> (MPa)	21			24		
Maximum agg. size(mm)	25			5		

의 단면적은 71 mm<sup>2</sup>이며, 상사성을 적용하여 1/5로 축소하면 2.84 mm<sup>2</sup>의 단면적을 가진 철근이 필요하다. 이는 1.9 mm의 직경을 가지는 철근을 구하면 얻어지는 단면이다. 따라서 본 실험에서는 2 mm의 직경을 가지는 철근을 이용하였으며, D2로 축소하기 위하여 시중에서 판매되는 2 mm의 철선을 구입하여 이형철근을 제작하였다.

이형철근의 제작은 압출형 프레스(press)를 이용하여 이형화하였다. 2.1 mm의 철선을 프레스에 압출시키면 이형화 된 철선이 생산된다. 이 철선의 직경을 버어니어 캘리퍼스로 측정하여 본 결과 골 부위가 1.952 mm로 측정되었으며 산 부위는 2.133 mm로 측정되었다. 이렇게 축소된 철근의 인장실험을 실시한 결과 철근의 응력-변형도 곡선은 Fig. 4와 같이 연성이 확보되지 못한 형태를 나타낸다. 이는 철근을 이형화 시키는 작업을 수행하면서 압출형 프레스를 통과시키게 되는데 이 때 철근이 신장하기 때문이다. 이미 신장된 철선은 연성을 잃어 건축 구조물에 사용할 수 없는 재료가 된다. 따라서 Fig. 5의 일반철근의 물성과 같이 연신을 30%이상의 철근의 요구성능을 만족할 수 없다. 따라서 철근을 이형화 시킨 후, 다시 열처리 과정을 수행하여 철근의 강도와 연성을 부여하였으며 본 연구에서는 조건에 대한 예비 실험을 수행하였으며, 요구되는 연신율과 강도를 얻기 위한 열처리 조건을 얻을 때 까지 예비 실험을 수행하여 필요한 물량

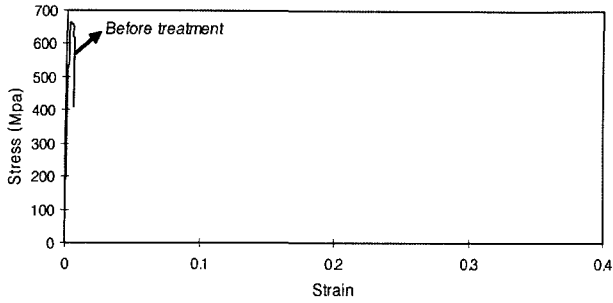


Fig. 4 Stress-strain curve of reduce deformed bar

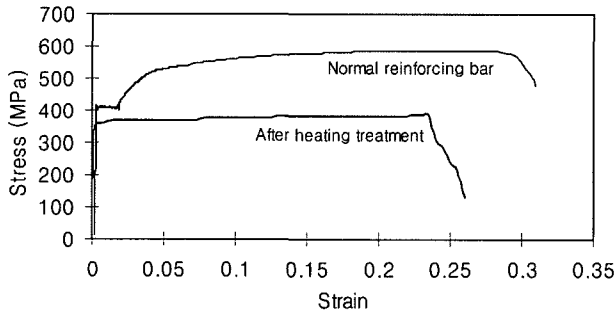


Fig. 5 Stress-strain curve for each reinforced bar

에 대한 열처리를 가공업체에 의뢰하여 수행하였다. 열처리의 조건은 노 내에서 550°C로 12분간 열처리 후, 공기 중으로 철근을 내어 놓은 후, 10분 동안 서냉시켜 제작하였다.

이를 기초로 열처리 과정을 거친 후 철근의 인장실험을 수행해 본 결과 Fig. 5의 열처리한 축소 철근과 같이 연신율이 확보된 철근을 얻을 수 있었다. 이 철근은 연신율이 30%에는 미치지 못하지만, 축소 실험을 수행하기에는 충분한 20%이상의 연성을 확보하고 있으며 강도 또한 SD 30급의 철근과 유사한 350 MPa의 강도를 유지하고 있는 것으로 나타났다.

### 3.3.2 마이크로 콘크리트의 제작

콘크리트에 사용되는 시멘트는 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며 골재는 상사법칙에 따라 굵은골재와 잔골재를 나누어서 재료를 준비하였다. 굵은골재의 경우 표준 구조물에서 최대 골재지름 25 mm의 골재를 사용하였으므로, 축소된 모델에서 골재지름이 5 mm이하의 골재를 사용하기 위한 분류 작업을 거쳤으며 각 체를 통과한 재료를 Table 6과 같이 조립률을 맞추어 최대 골재지름 5 mm이하의 골재를 혼합하여 사용하였다. 5 mm의 체를 통과한 시험체의 표본을 채취하여 본 결과 4 mm 정도의 골재만이 걸러지는 결과를 나타내어 5 mm이하의 골재가 채취되어 나오는 6 mm체를 이용하여 제작하였다. 표준 모래는 각각 1 mm와 0.5 mm체에 걸러진 것을 각각 50%씩 섞어 사용하였다.

### 3.3.3 실험체의 제작

실험체는 단국대학교 실험실에서 제작되었으며 모델

Table 6 Fineness of coarse aggregate

Prototype		Reduction model (1/5)	
Sieve (mm)	Remand ratio (%)	Sieve (mm)	Remand ratio (%)
25	25	6	25
10	65	4	65
5	95	2	95
2.5	98	1	98
1.2	99	0.5	100
0.6	100	-	-

구조물을 상사법칙에 의거하여 1/5로 줄여 Fig. 6과 같이 배근하였다. 축소 실험체에도 모델 구조물과 동일하게 세대간벽에는 단배근이 적용되었고 세대내벽에는 복배근이 적용되었으나 세대외벽의 접합부에는 접합부 보강철근이 배근되어 있다. 하지만 횡방향 하중에 대한 지지 요소가 충분하지 않아 내진성능이 매우 취약할 것으로 예상된다.

축소된 철근과 콘크리트용 골재 등의 재료를 준비한 후 손비빔을 통하여 타설을 실시하였다. 1배합 당 0.05 m<sup>3</sup>을 배합하였으며, 타설이 중지되는 것을 방지하기 위하여 2곳에서 시간 차이를 두고 배합을 실시하였다. 혼합된 마이크로 콘크리트의 슬럼프 값은 160 mm로 나타났으며 공기량은 2.9%로 나타나 공기량이 다소 부족한 것으로 나타났다. 또한 실험체 제작 시 강도테스트를 위하여 KS F 2403기준에 따라 공시체를 따로 제작하였다. 실험체는 Fig. 7과 같이 타설한 후 28일간 대기양생을 시켰으며, 사용된 철근과 콘크리트의 물성은 Table 7과 같다. 실험체는 실험실에서 4주 양생 후, 경기도의 실험실로 옮겨서 실험을 실시하였으며, 이동 중에 실험체의 손상은 없는 것으로 확인되었다.

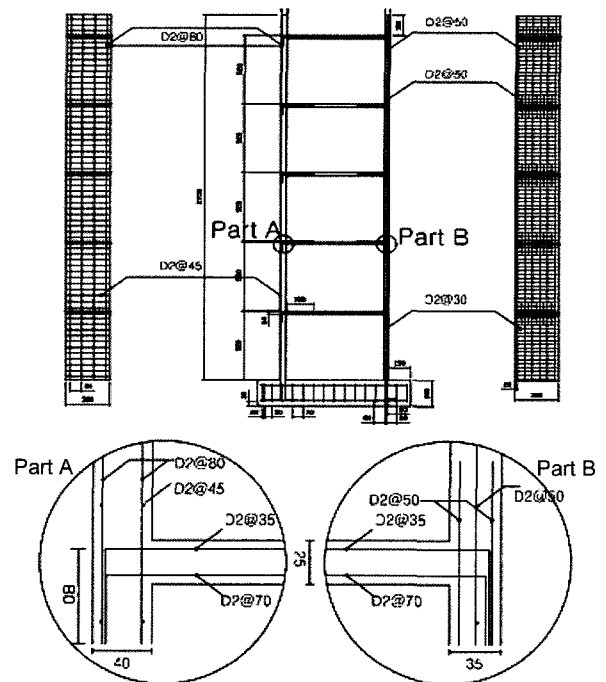


Fig. 6 Reinforced arrangement diagram



Fig. 7 Pour the micro concrete into the form

Table 7 Property of material

	Concrete	Reinforced bar	
	Compress strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Extension ratio (%)
1	25.61	372.86	21
2	27.45	373.47	19
3	26.94	359.59	17
Average	26.67	368.64	19

실험체 제작 시 상사조건에 의해 축소 모델을 제작하면, 체적의 감소에 대한 중량의 감소분에 대한 차이가 발생한다. 이에 대한 보정을 위하여 실험 모델에 벽과 슬래브에 납피를 이용하여 각각의 부재에 부가질량을 설치하였다. 부가질량은 Table 8과 같이, 구조물의 벽체는 각각 좌측벽, 우측벽, 슬래브 순으로 18,345 N, 15,591 N, 17,463 N을 가지고 있으나, 이를 상사법칙에 따라 1/5의 축소율을 적용하면 질량은 1/5<sup>2</sup>로 축소되어 각각 733.82 N, 623.67 N, 698.54 N을 가져야 한다. 하지만 체적은 1/5<sup>3</sup>으로 축소되어 각각의 벽체가 146.8 N, 79.83 N, 90.75 N의 중량을 갖게 된다. 따라서 각각의 부재에 550 N~600 N의 납피를 부착하여 질량손실분을 보정해 주었다.

### 3.4 실험 장비 및 제원

본 실험에서 사용한 진동대는 H기술연구소에 설치된 것으로 지진파, 진동 등과 같은 진동하중에 의한 구조물의 성능 및 구조적 안정성을 측정할 수 있는 실험 장비이다. 진동대와 실험체의 중량은 4개의 정압 베어링에 의해서 지지되며, 실험 중 진동이 주변에 전파되는 것을 차단하기 위하여 진동대의 기초는 에어스프링에 의해 지반과 격리시켰다. 진동대는 수평방향의 유압가력기에 의

Table 8 Plan of additional weight

Element	Weight of prototype (N)	Weight of reduced model (N)	Weight of addition mass (N)	Error ratio (%)
Left	18,345	733.82	734.80	0.2
Right	15,591	623.67	618.38	2.7
Slab	17,463	698.54	678.74	3.6

해서 가진되며 입력최대가속도는 1.0 g이며 입력가능한 주파수 대역은 30 Hz까지이다. 데이터의 취득은 32개의 채널로 이루어진 데이터 취득시스템을 이용하여 데이터를 취득하였다. 이는 릴레이 박스에 입력된 신호를 앰프와 멀티플렉스(Multiplexer)를 거쳐서 디지털변환기(A/C converter)를 통해서 컴퓨터로 입력된다. 연결된 컴퓨터에서 데이터를 취득하며 분석 프로그램을 이용하여 분석을 실시하였다. 본 연구에서 사용된 진동대의 제원은 Table 9와 같다.

계측기기는 각층에 작용하는 가속도와 발생하는 변위를 측정하기 위하여 5개의 가속도계와 5개의 변위계를 Fig. 8과 같이 설치하여, 진동대에 설치된 가속도계와 변위계를 포함하여 총 6개씩의 가속도계와 변위계를 설치하여, 실험체 각 층에 발생하는 가속도와 변위를 측정하였다. 가속도계는 3.0 g규격의 가속도계를 이용하여 측정하였으며, 변위계는 변위가 상대적으로 작을 것으로 예상되는 1, 2층에는 ±50 mm규격의 변위계를, 변위가 클 것으로 예상되는 3, 4, 5층엔 ±100 mm용량의 변위계를 이용하여 측정하였다.

가력지진동 역시 상사법칙에 의해 축소하여 가력하였으며, 구조물의 거동을 가속도계와 변위계를 이용하여 측정하였다. 실험은 0.06 g의 지진동으로부터 높은 값의 지진동에 노출시켰으며 입력지진동 사이에 구조물의 피해 상황을 육안으로 관찰하였다. 구조물이 실제 지진에 노

Table 9 Specification of shaking table

Content	Spec.
Dimension	5 m×3 m
Max. specimen weight	294 kN
Table weight	98 kN
Control mode	Uniaxial horizontally
Max. stroke	±100 mm
Max. velocity	500 mm/s
Max. acceleration	1.0 g
Frequency range	30 Hz

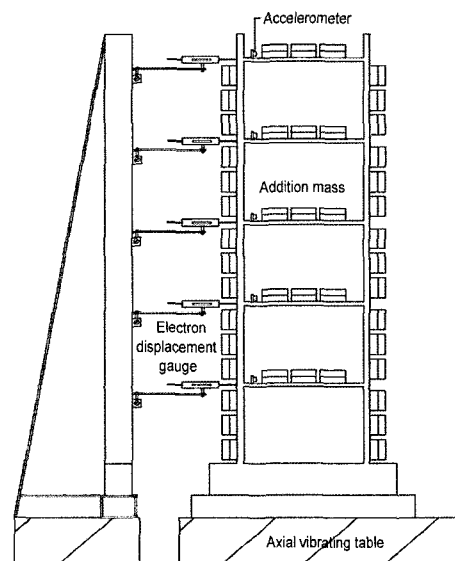


Fig. 8 Set-up diagram

출되었을 때 구조물이 입는 피해와 구조물이 갖는 동적 특성을 구명하기 위하여 모델 구조물의 저층부인 5층까지 축소 실험체를 제작하여 1/5로 축소하고 El Centro 1942입력지진파(Fig. 9)의 최고 가속도 크기를 0.06 g, 0.12 g, 0.2 g, 0.3 g, 0.4 g, 0.5 g로 조정하여 실험을 실시하였다.

#### 4. 분석 및 고찰

##### 4.1 동적 특성의 변화

실험체의 고유진동수는 구조물의 강성 및 질량을 이용하여 구할 수 있다. 구조물의 고유진동수와 강성 및 질량상호간의 관계는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

따라서

$$\frac{k_R}{k_N} = \left(\frac{\omega_R}{\omega_N}\right)^2 \quad (6)$$

$k_R$ : 손상 구조물의 강성

$\omega_R$ : 손상 구조물의 1차 고유진동수

$k_N$ : 기준 구조물의 강성

$\omega_N$ : 기준 구조물의 1차 고유진동수

기준 실험체의 고유진동수를 측정된 결과, Table 10과 같이 자유진동 실험을 통하여 얻은 1차 고유진동수는 4.37 Hz였고, 백색잡음 실험에 의해 얻은 1차 고유진동수는 4.27 Hz로서 거의 유사한 값을 나타내었다.

또한 무보강 실험체와 보강 실험체의 지진 전·후의 강성 감소율을 측정하여 지진동이 입력된 후의 강성저하 정도를 구명해 보았다. 이를 위하여 예비 실험과 같은 백색잡음을 손상 구조물에 작용시킨 후, 측정된 응답가속도를 FFT분석을 통하여 1차 고유진동수를 측정하였다. 이를 이용하여 건전 실험체의 강성과 손상 실험체의 강성을 측정하여 보았다.

기준 실험체는 Figs. 10, 11과 같이 4.26 Hz에서 1.03 Hz로 고유진동수가 감소하여 건전 실험체의 24%수준으로 강

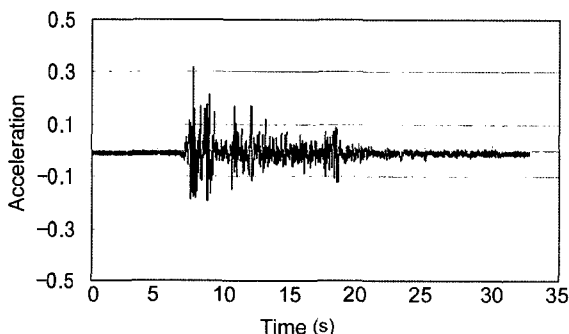


Fig. 9 Input acceleration (El centro 1942)

Table 10 1<sup>st</sup> natural frequency by vibration method

Specimen	Vibration	1 <sup>st</sup> natural frequency (Hz)	Error ratio (%)
V-N	After hammer impact	4.37	2.3
	After white noise	4.27	

성이 감소하였다. 이는 지진 발생 시 구조물에 급격한 강성 저하를 초래하여 구조물이 붕괴에 이를 수 있음을 나타내고 있다.

##### 4.2 실험체의 내진성능

설계개념이 성능수준에 맞춘 성능설계 개념으로 전환되면서 최근 성능수준에 따른 거동한계를 제시하고 있다. 이를 위하여 많은 지진기록과 지반분류가 이루어져야 하나 한국에서는 지진기록의 부족과 지반분류의 체계가 아직 수립되지 못하여 UBC-97 기준을 적용하고 있다.

UBC-97에서는 Table 11과 같이 설계응답스펙트럼을 이용하여 설계거동한계를 설정하였으며 본 연구에서는 이를 근거로 성능설계수준에 따른 거동한계를 분석하였다. 지진이 작용할 때 허용되는 단기 층간변위는 붕괴방지를 위한 성능단계에서는 각 층의 층고의 2.5%이내로 제한되어 있으며, 인명안전을 보장하는 수준의 층간변위는 1.5%로, 기능을 수행할 수 있으며 보수 후 즉시 재사용의 허용층간변위는 0.5%로, 지진과 관계없이 완전기능을

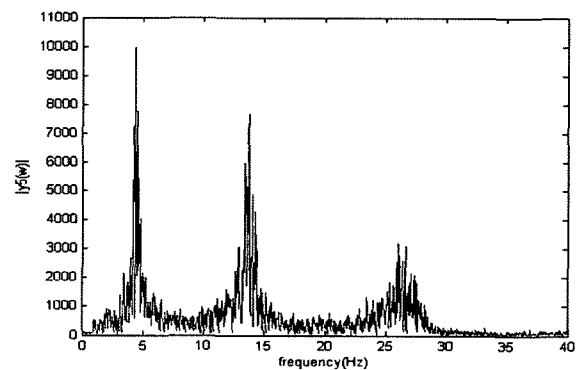


Fig. 10 Natural frequency of V-N(health)

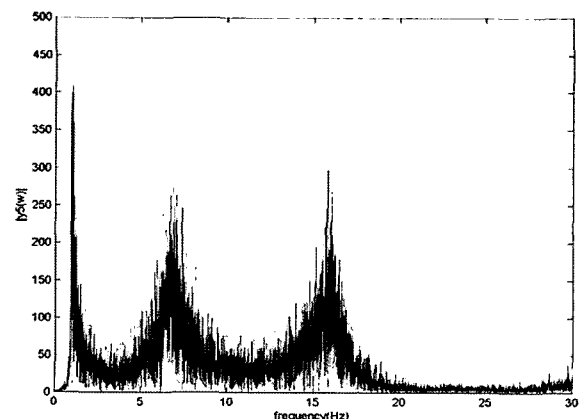


Fig. 11 Natural frequency of V-N(damage)

**Table 11** Performance limit for performance level (UBC-97)<sup>7)</sup>

State	Performance level			
	Fully uncton	Function limit	Safety limit	Prevent collapse
Overall damage	Very light	Light	Moderate	Severe
Allowable immediate drift	<± 0.2%	<± 0.5%	<± 1.5%	<± 2.5%
Allowable permanent drift	Ignore	Ignore	<± 0.5%	<± 2.5%

수행할 수 있는 허용층간변위는 0.2%의 층간변위로 제한하고 있다. 또한 허용영구층간변위도 제한되고 있으나 본 연구에서는 PGA별 층간변위를 측정하고 그 결과를 분석하여 단기층간변위에 대한 자료만을 분석하였다.

또한 2005년 개정된 우리나라의 내진설계기준에는 각 층별 허용층간변위를 규제하고 있으며 내진성능 목표 등급에 따라 그 제한치를 결정하고 있다. Table 12와 같이 내진특등급(15층 이상의 공동주택)의 성능목표를 가진 구조물의 경우 각 층의 변위가 이웃 층의 변위에 1.0%이내에서 제어되도록 설계에 적용시키고 있으며, 내진 1등급의 성능목표(일반 공동주택)를 가진 구조물의 경우 1.5%이내에서 제어되도록 설계에 적용시키고 있다.

PGA 0.2 g 진동레벨의 진동이 구조물에 작용할 경우 구조물의 층간변위는 KBC-2005규준에서 제시하고 있는 1%이내의 층간변위를 기록하고 있으며 PGA 0.3g이상의 진동레벨의 진동이 구조물에 작용할 경우 구조물은 허용 층간변위를 초과하고 있는 것으로 나타났다. 또한 UBC-97에 제시되어 있는 구조물의 성능상태는 PGA 0.06 g진동레벨에서는 기능수행수준의 성능상태에 있으나 0.12~0.4 g의 진동레벨에 노출되었을 경우 인명안전수준의 성능상태를 나타내고 있다. PGA 0.5 g진동레벨의 진동이 구조물에 작용할 경우 구조물은 붕괴방지 수준인 10.34 mm의 층간변위를 나타내고 있다. Table 13에 실험체별 기준에 따른 성능상태를 나타내었다.

**Table 12** Allowable story drift (KBC-2005)<sup>8)</sup>

	Seismic grade		
	Special	I	II
Allowable story drift	0.010hx	0.015hx	0.020hx

**Table 13** Performance level by code

PGA step	V-N		
	Story drift of specimen (mm)	Allowable (KBC 2005) (5.2 mm)	Performance level (UBC-97)
0.06 g	1.21	O.K	Function limit
0.12 g	1.74	O.K	Function limit
0.2 g	3.26	O.K	Function limit
0.3 g	6.69	N.G	Safety limit
0.4 g	6.70	N.G	Safety limit
0.5 g	10.34	N.G	Prevent collapse

## 5. 결 론

벽식구조 노후공동주택의 실제 지진에 대한 피해 예측과 동적특성 거동을 구명하기 위한 진동대 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고유진동수를 측정하여 각 실험체의 강성 보강효과를 비교해보면 기준 실험체의 경우 4.30 Hz(자유진동), 4.26 Hz(백색잡음)로 나타났다.
- 2) 지반에 입력되는 가속도와 응답가속도비를 이용한 전달함수를 측정하여 보면 각 PGA 가속도 등급별로 강성저하가 이루어지고 있으며 PGA 0.2 g가속도 등급에서 급격한 강성저하를 나타내고 있어 유사시 취성파괴가 있을 것으로 판단된다.
- 3) 실험체는 PGA 0.06g에서 완전기능수준의 변위한계를 넘는 것으로 나타났으며 0.2 g에서는 기능수행수준의 변위한계, 0.5 g에는 인명안전수준의 변위한계를 넘는 것으로 나타나 구조물은 내진성능보강이 필요한 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 연구는 2004학년도 단국대학교 대학연구비(일반연구비) 지원으로 연구되었음.

## 참고문헌

1. 건설교통부 정기주택 통계자료, www.moct.go.kr.
2. 정 란, 우운택, 박태원, 나승욱, “전단변식 구조시스템의 내진성능평가 지표 산정”, 한국지진공학회 추계학술표대회 논문집, 경희대학교, 수원, 6권 1호, pp.223~230.
3. 박태원, 벽식구조 공동주택의 내진성능 보강효과, 단국대학교 박사학위 논문, 2005, 8pp.
4. Applied Technology Council, *Seismic Evaluation and retrofit of Concrete Buildings*, ATC-40 Redwood, C.A., 1996.
5. Gulkan P. and Aozen M, “Response and Energy Dissipation of Reinforced Concrete Frames Subjected to Strong Base Motion”, *Structural Research Series*, No.3, Civil Engineering Studies, University of Illinois, Urbana, 1971, pp.336~342.
6. 박현수, 정란, 민정규, “상사법칙을 이용한 R/C부재의 모델링 기법”, 대한건축학회 논문집 Vol.8, No.1 pp.191~199.
7. International Conference of Building Officials, *Uniform Building Code*, UBC-97, SEAOC, California, 1997, Chapter 19.
8. 건설교통부, 건축구조설계기준, KBC-2005, pp.III-15.

---

**요 약** 지진은 구조물에 막대한 피해를 발생시키는 것으로 보고되고 있으나, 우리나라에 내진설계규정이 도입되기 전인 1988년 이전에 설계된 건물은 이에 대한 대책이 없다. 특히 공동주택의 경우 지진저항요소가 없는 구조물이 다수 있는 것으로 조사되었다. 이러한 구조물에 대하여 내진성능의 정도를 파악하고, 성능지수가 부족한 구조물에 대해서는 적절한 보강이 이루어져야 할 것이다. 본 연구에서는 이전의 연구에서 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS를 이용하여 모델 구조물의 내진성능을 평가하여 얻어진 내진성능의 부족함을 기초로 5층 규모의 철근콘크리트 벽식 구조물에 상사법칙을 적용하고, 진동대 실험을 수행하여 국내의 규준에 의한 모델 구조물의 내진성능을 평가하였다. 진동대 실험의 경우 실험의 공간적 제약으로 인하여 원형 구조물에 대한 실험을 할 수 없어, 구조물의 원형크기를 상사법칙에 의하여 필요한 규모로 축소하여 제작하였다. 성능수준을 평가해 본 결과 내진설계가 수행되지 않은 구조물은 PGA 등급 0.2g의 지진에 대하여 사용한계수준의 내진성능을 나타내었으며 허용충간변위를 평가해 본 결과 0.2g의 지진등급까지만 허용한계수준의 충간변위를 나타내어 내진성능에 대한 보강이 필요할 것으로 판단되었다.

**핵심용어** : 내진설계규정, 진동대 실험, 상사법칙, 내진성능, 허용충간변위