

# 1/12 축소 철근콘크리트 상부벽식-하부골조 건축물의 진동대 실험

## Shaking Table Tests of 1/12-Sale R.C. Bearing-wall system with Bottom Piloti Frames

이 한선\*      고 동우\*\*      권 기혁\*\*\*      김 병현\*\*\*\*  
Lee, Han-Seon      Ko, Dong-Woo      Kwon, Ki-Hyuk      Kim, Byung-Hyun

---

### ABSTRACT

The severe shortage of the available sites in the highly developed downtown area in Korea necessitates the construction of high-rise buildings which meet the need of residence and commercial activity simultaneously. The objective of this study is to investigate the seismic performance of this type of building structures.

For this purpose, two 1:12 scale 17-story reinforced concrete model structures were constructed according to the similitude law, in which the upper 15 stories have a bearing-wall system while the lower 2-story frames have two different layouts of the plan : The one is a moment-resisting frame system and the other is a moment-resisting frame system with a infilled shear wall. Then, this model was subjected to a series of earthquake excitations. The test results show that the existence of shear wall reduced the shear deformation at the piloti frame, but has almost the negligible effect on the reduction of the overturning-moment angle.

---

### 1. 서론

최근 인구의 도시집중이 심화되고 교통 및 토지이용에 문제가 발생함에 따라 이를 효율적으로 해결하기 위한 방안으로 주상복합건물이 급증하고 있다. 이러한 주상복합건물의 경우 상부주거공간은 벽식구조로 되어 있고, 하부 상가 또는 주차공간은 골조구조로 되어 있다. 또한 이러한 구조는 용도상 주간에는 상가로서 많은 유동인구가 발생하고, 야간에는 주거기능으로 인해 거주민이 많아 안전에 문제가 생길 경우 대형인명 사고로 발전할 가능성이 크다. 그러나 이런 구조는 그 구조시스템이 벽식구조인지, 골조구조인지, 아니면 기타구조인지에 대해 명확하게 규정되어 있지 않기 때문에 지진하중을 결정하는데 중요한 요소인 고유주기, 반응수정계수등의 산정이 불분명하여 지진하중을 결정하기가 모호하고, 상부벽식구조와 하부골조부분의 강성과 강도의 차이로 인한 수직적 비정형인 형태를 이루므로 동적특성을 파악하거나 지진하중을 결정하기가 불확실하며, 코어

---

\* 고려대학교 건축공학과 부교수, 정회원      \*\* 고려대학교 건축공학과 박사과정, 학생회원  
\*\*\* 서울시립대학교 건축공학과 조교수      \*\*\*\* 한국기계연구원 책임연구원

표 1 상사성 원리

Item		True replica model	Modified replica model
Length,	$L$	1/12	1/12
Area,	$L^2$	1/144	1/144
Force,	$MLT^{-2}$	1/144	1/144
Displacement	$L$	1/12	1/12
Acceleration	$LT^{-2}$	1	2
Frequency	$T^{-1}$	$\sqrt{12}$	$\sqrt{24}$
Time	$T$	1/ $\sqrt{12}$	1/ $\sqrt{24}$
Base shear coefficient	1	1	2
Axial stress for long sustained loading	$ML^{-2}$	1	1/2

표 2 실험프로그램

Test	Model (PGA)	Prototype (PGA)	Remark(Return period <sup>0</sup> )
Taft011	0.11g	0.055g	
Taft022	0.22g	0.11g	Design earthquake (500years)
Taft030	0.3g	0.15g	$I_E = 1.5$ (1,000years)
Taft040	0.4g	0.2g	Max. earthquake (2,000years)
Taft060	0.6g	0.3g	Max. considered earthquake (5,000years)
Taft080	0.8g	0.4g	

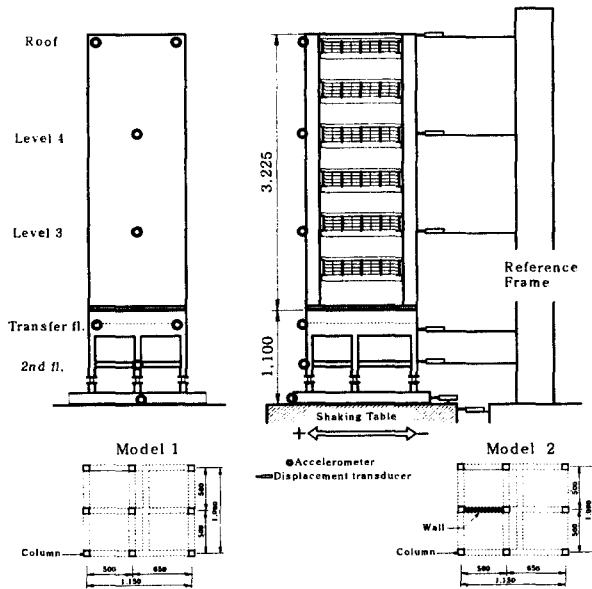


그림 1 실험체 세팅 (단위 : mm)

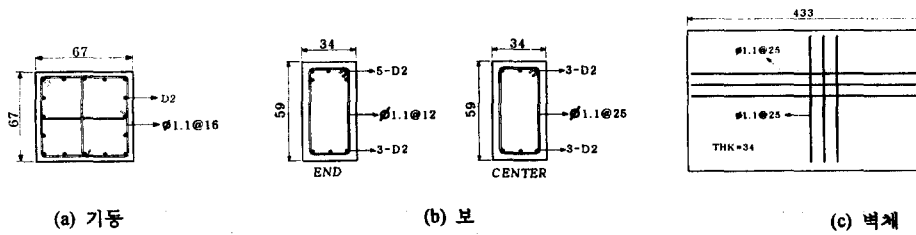


그림 2 부재 단면 (단위 : mm)

로서 역할을 하는 전단벽의 효과 또한 그 구조물의 동적특성에 어떻게 기여하는 지 밝혀져 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 4m×4m 진동대를 이용하여 1/12 축소 철근콘크리트 주상복합구조물의 실제 지진파에 대한 거동을 연구하였다.

## 2. 모델 실험체 및 실험장치

본 연구를 위하여 현재 우리나라에서 시공중인 철근콘크리트구조 주상복합건물을 조사한 후<sup>1)</sup> 하부골조부분 2층 상부벽식부분 15층의 전형적인 모델을 선정하였다. 건물설계 시 한국콘크리트학회에서 제정한 콘크리트구조설계 기준 및 해설<sup>2)</sup>과 대한건축학회에서 제정한 건축물하중조합 및 해설<sup>3)</sup>을 기준으로 설계하였다.

진동대의 성능을 고려하여 실험체의 축소율을 1/12로 결정하였으며, 그림 1에서 실험체의 입면과 평면을 보여주고 있다. 상부구조물의 경우 실물과 동일한 강성을 갖는 콘크리트덩어리로 제작하였으며, 하부골조프레임은 상사성<sup>4)</sup>을 만족하도록 실물을 그대로 축소제작 하였다. 그림 2에서 하부골조의 주요 부재의 단면을 보여주고 있다. 상부구조물의 경우 하부골조보다 강성이 훨씬 크기 때문에 실험체의 제작과 실험상의 편의를 위해 별도로 제작하여 실험할 때 하부골조와 볼트접합하여 실험할 수 있도록 하였다. 그런데, 상부구조물에 부가질량을 설치할 공간이 부족하여 부가질량은 필요량의 1/2만 설치하였고, 이에 따라 표 1과 같은 별도의 상사성의 원리를 적용하였다.<sup>5)</sup> 따라서, 질량이 감소함에 따라 수평력을 동일하게 묘사하기 위하여 모델에 적용되는 가속도는 실제의 2배를 적용하였다.

주근(D2)의 경우 요구되는 항복강도와 충분한 연성을 얻고, 성분의 변질을 막기 위해 강선을 이형화 시킨 후 진공전기로에서 열처리하여 사용하였으며, 전단철근( $\phi 1.1$ )은 시중에서 판매하는 철사를 사용하였다. 주근과 전단철근의 항복강도는 각각 4,689kgf/cm<sup>2</sup>와 5,001kgf/cm<sup>2</sup>로 공칭항복강도(4,000kgf/cm<sup>2</sup>)보다 각각 17%와 25% 높게 나왔다. 모델콘크리트는 골재를 축소율만큼 줄인 후 증량비 0.4:1:1:1.1 (물:시멘트:잔골재:굵은골재)로 배합한 결과 28일 평균강도는 352kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났다.

본 실험은 대덕연구단지에 위치한 한국기계연구원의 4m×4m 6자유도 진동대에서 실험을 수행하였다. 실험체의 동적특성을 알아보기 위해 지진모의실험(Earthquake Simulation Test) 전과 후에 백색파실험(White Noise Test)을 수행하여 지진에 의한 구조물의 동적특성의 변화를 살펴보았다. 지진모의실험을 위해서 사용된 지진파는 Taft N21E성분으로 표 2에 나타낸 바와 같이 입력지진파

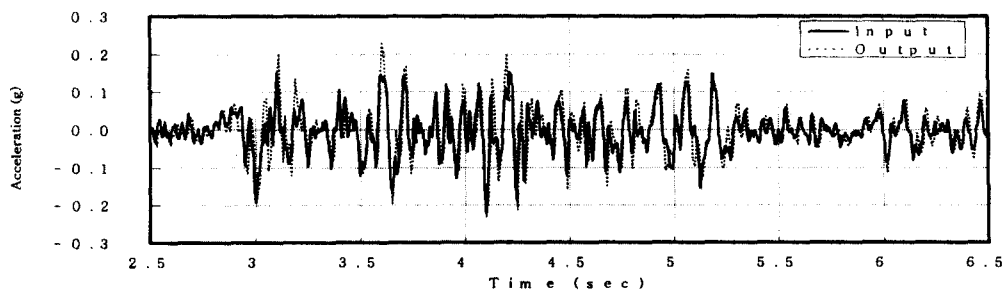


그림 3 진동대 가속도 비교 (모델 2 : Taft022)

의 최대가속도 크기를 조정하였으며, 시간축은 상사성의 원리에 따라  $1/\sqrt{2}$ 로 줄였다.

### 3. 실험결과

모델 2의 Taft022실험에 대한 진동대의 입력 가속도와 실험체의 기초에서 취득한 가속도를 그림 3에서 비교한 결과 최고점에서 약간의 차이를 보이고 있으나, 두 개의 지진가속도는 거의 일치하였다.

#### 3.1 모델의 동적특성 변화

그림 4에서는 두 가지 실험체에 대한 고유주기의 변화를 보여주고 있다. 우리나라의 하중기준 및 해설에서 제시하는 기타구조의 고유주기 산정식에 해당하는 0.188sec.와 비교했을 때, 전단벽이 없는 실험체의 경우(모델 1)는 0.193sec.로 거의 일치하였으나, 전단벽이 있는 실험체(모델 2)는 0.149sec.로 22% 작은 값을 보여주었다. 실험강도가 증가하면서 실험체의 고유주기는 지속적으로 증가하여 Taft080실험 후에는 모델 1의 경우는 0.347sec., 모델 2의 경우는 0.193sec.로서 모델 2의 고유주기가 모델 1의 고유주기의 55%를 보여주었다. 그림 5에서는 실험체의 동적확대계수의 변화를 보여주고 있다. 동적확대계수는 Taft011일 때 모델 1과 모델 2는 각각 1.50과 2.30을 보여주었으나, Taft080에서는 비선형거동에 따른 구조물의 손상 등으로 인해 각각 1.05와 1.09로 감소하였다.

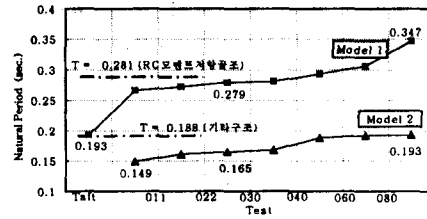


그림 4 고유주기 변화

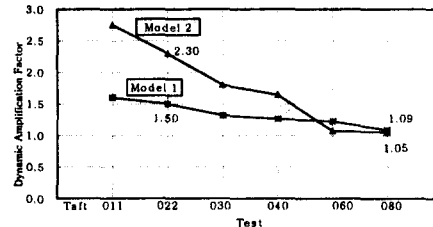


그림 5 동적확대계수

#### 3.2 횡변위 거동

지붕층의 횡변위는 그림 6에서 볼 수 있듯이 하부골조의 전단변형에 의한 변위와 상부골조에 작용하는 전도모멘트에 의해 전이층이 회전함으로써 발생하는 변위로 구분하여 볼 수 있다. 그림 7(a)와 (b)에서는 모델 1과 모델 2의 지붕층횡변위가 최대일 때 각층의 횡변위를 보여주고 있다. 모델 1은 지붕층변위 중 전이층변위의 비율이 50%에 달하였으나, 모델 2는 Taft011에서는 26%, Taft080에서는 19%로 작은 값을 보여주었다. 그림 7(c)와 (d)는 층간변위각을 보여주는데, 상부골조의 층간변위각은 모델 1과 모델 2가 거의 비슷한 값을 보여주었으나, 하부골조의 층간변위각은 모델 1이 모델 2보다 3배 큰 값을, 모델 1은 Taft 060과 Taft080에서 하부골조의 층간변위각이 상부구조물의 층간변위각의 3.5배에 이르는 값을 보여주었으며, 모델 2는 상부구조물과 하부골조의 층간변위각이 비슷한 값을 보여주어 전체적으로 선형분포를 보여주었다. 이로부터 보면 하부골조의 전단벽은 하부골조의 전단변형감소에는 큰 효과가 있지만, 전도모멘트에 의한 전이층의 회전에는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

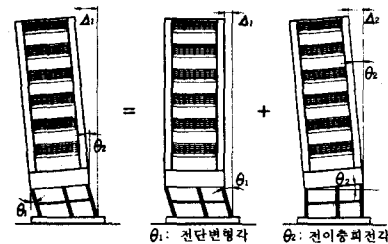
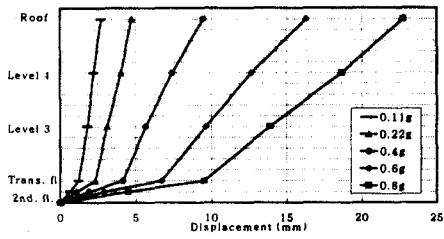
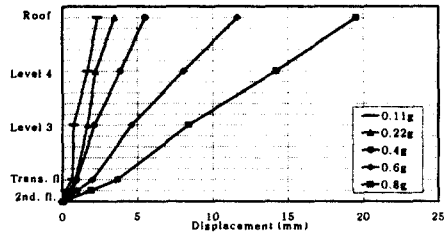


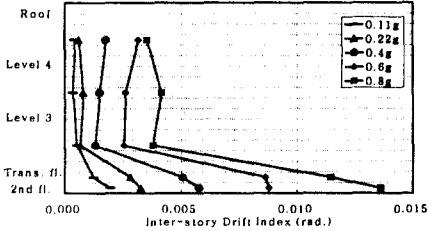
그림 6 지붕층 변위



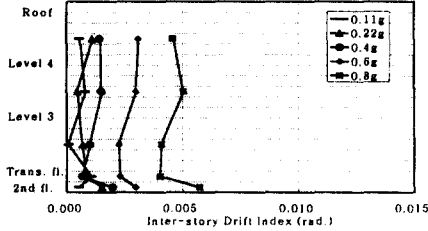
(a) Taft022 (모델 1)



(b) Taft022 (모델 2)



(c) Taft080 (모델 1)



(d) Taft080 (모델 2)

그림 7 층변위 응답 비교

### 3.3 밀면전단력과 전이층변위의 관계

밀면전단력은 구조물의 가속도와 질량의 곱으로부터 구하였으며, 이를 통해 측정된 전단력을 바탕으로 계산한 밀면전단계수의 변화를 그림 8에서 보여주고 있다. 밀면전단계수 값은 모델 1과 모델 2가 비슷한 값을 보여주었다. 그림 9는 밀면전단력과 전이층변위의 관계를 보여주고 있다. 우리나라의 설계지진하중에 해당하는 Taft022에서 모델 2의 전이층 강성은 2.278 tf/mm로서 모델 1의 전이층강성의 2.64배를 보여주었으며, Taft080에서는 0.924 tf/mm로서 2.90배를 보여주었다. 모델 1의 경우 Taft080일 때의 층강성이 Taft022일 때의 층강성의 37%로 감소하였으며, 모델 2는 40%로 감소하여 전이층의 강성감소 양상은 전단벽의 유무와 거의 관계가 없었다. 두가지 실험체 모두 설계지진하중에서는 선형탄성적인 이력곡선을 보여주었으며, Taft080에서는 에너지소산량이 급증하고 비선형적인 거동도 보여주었다.

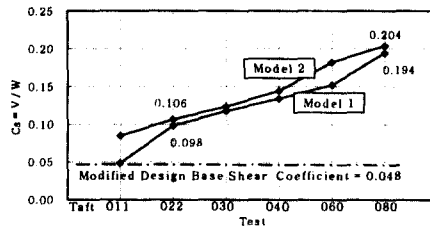


그림 8 밀면전단계수 비교

### 3.4 전도모멘트와 전이층회전각의 관계

그림 10은 전도모멘트와 전이층회전각의 관계를 보여주고 있다. 전도모멘트는 상부구조물에 작용하는 가속도의 평균과 상부구조물의 질량을 곱하여 구한 횡력에 해당위치로부터 전이층까지의 거리를 곱하여 구한 모멘트이다. 전도모멘트로 인해 하부골조의 기둥에서는 축변형이 생김으로써 전이층에서 회전이 발생하게 된다. 설계지진하중에 해당하는 Taft022에서는 모델 2의 전도모멘트

강성( $M_i/\theta_i$ )이 4760 tf-m/rad.로서 모델 1의 1.4배의 값을 보여주었으나, Taft080에서는 1663 tf-m/rad.으로서 모델 1의 0.8배로 작은 값을 보여주었다. Taft080에서 모델 1의 전도모멘트강성은 2039 tf-m/rad.로 Taft022일 때의 59%인 반면, 모델 2는 Taft022일 때의 34%로 급격하게 감소하여 지진동이 커지면서 모델 2에서 전도모멘트의 영향이 모델 1과 비교하였을 때 상대적으로 증가하였음을 보여주었다.

두 개의 실험체 모두 Taft022에서는 선형탄성적인 모습을 보여주었으나, Taft080에서 에너지소산량이 급증하고 비선형적인 거동의 양상이 극심하게 나타났다.

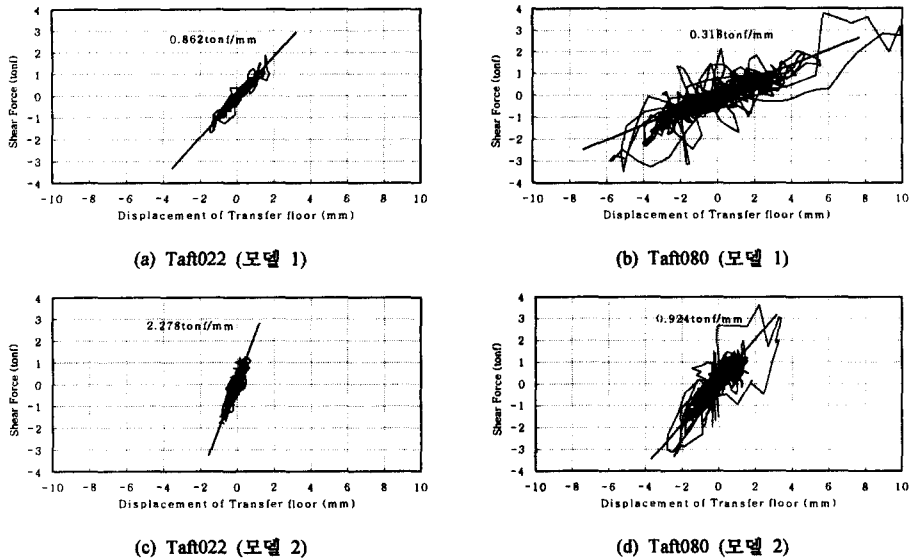


그림 9 밀면전단력과 전이층변위 비교

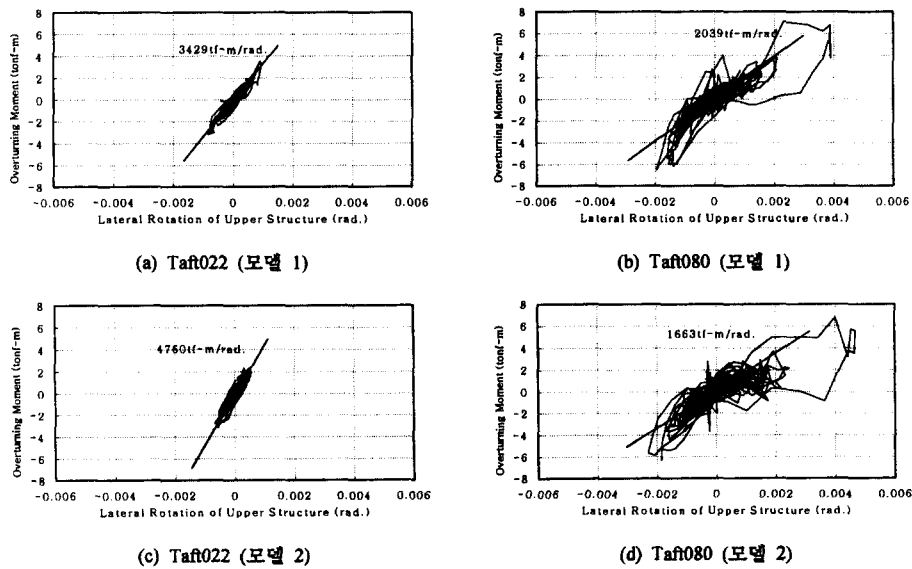


그림 10 전도모멘트와 상부구조물의 횡변위각

### 3.5 파괴양상

그림 11(a)는 모델 1의 균열 양상을 보여주고 있다. 2층기둥 상부에서 전도모멘트에 의한 인장과 휨항복에 의해 수평균열이 발생하였고, 보의 소성힌지영역에서 부모멘트균열이 발생하였다. 그림 11(b)는 모델 2의 균열양상을 보여주고 있다. 모델 2에서도 2층기둥 상부에서 수평균열이 발생하였고, 전단벽의 경우 로드셀을 설치하기 위해 1층부분의 중간 높이에서 이어치기를 했는데, 그 부분에서 미끌림파괴가 발생하였다. 1.2g에서는 이어치기부분에 발생한 균열의 미끌림 작용으로 인해 중앙부기둥의 하부에서 전단균열을 초래하였다(그림 11(d)).

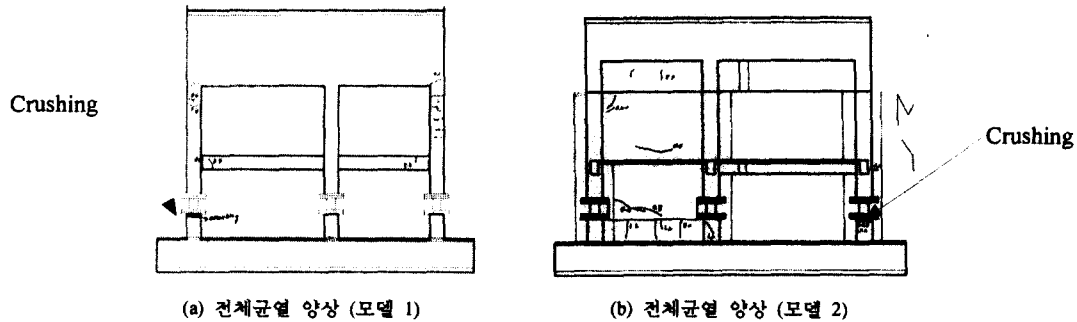


그림 11 균열 양상

### 4. 설계식과 비교

실제구조물에 대한 전단력을 우리나라의 하중기준 및 해설<sup>3)</sup>에 따라 아래와 같이 구하였다.

$$V = C_s \times W = \left( \frac{A I_E C}{R} \right) \times = (0.048) \times (2,423) = 116 \text{ tonf} \quad (1)$$

$$C = \frac{S}{1.2\sqrt{T}} = 0.868 \quad (2)$$

여기서,  $V$  : 설계밀면전단력,  $C_s$  : 지진계수,  $A$  : 지역계수 (0.11:지역 1),  $I_E$  : 중요도계수 (1.5),  $S$  : 지반계수 (1.0),  $T$  : 고유주기,  $R$  : 반응수정계수 (3.0 : 내력벽방식),  $W$  : 구조물의 자중을 의미한다. 고유주기를 구하는 식은 하중기준 및 해설에서 기타구조에 대한 경험식으로 제시하는 아래와 같은 식을 적용하였다.

$$T = 0.048 (h_n)^{3/4} = 0.922 \text{ sec.} \quad (3)$$

여기서  $h_n$ 은 m단위인 구조물의 높이를 의미한다.

이상과 같이 구한 값을 상사성의 원리에 따라 환산하여 실험값과 비교한 결과를 표 3에서 보여주고 있다. 상사성을 고려하면 Taft022가 실물의 설계지진하중에 해당하는 0.11g이나, 실물설계시 중요도계수를 1.5로 적용하였기 때문에 이를 고려하면 지진하중은 0.144g가 그에 해당하여<sup>6)</sup>, Taft030의 실험결과와 설계 시 구한 값을 비교하면 다음과 같다. 1) 고유주기의 경우 진동대실험 전에 측정된 고유주기가 하중기준 및 해설에서 제시하는 고유주기와 비교했을 때 모델 1은 거의 일치하는 모습을 보여주었으나, 모델 2는 80%를 보여주었다. 2) 밀면전단계수는 설계밀면전단력에

비해 Taft030에서 모델 1은 2.45, 모델 2는 2.57배를 보여주어 설계시 사용되는 반응수정계수의 값이 설계에서 사용하는 3보다 작은 1.2정도를 사용해야 함을 알 수 있다. 3) 층간변위률은 모든 실험에 대해 1.5%이내에 들어 변위제한은 문제가 되지 않음을 보여주고 있다.

표 3 설계변수의 비교

	T (sec.)	Cs (=V/W)	Vmax. (tf)	Inter-story drift index at piloti story(%)	
Design (AIK)	0.188	0.048	0.80	1.5	
모델 1	Taft022	0.193*	0.098	1.67	0.30
	Taft030	0.281	0.118	2.00	0.45
	Taft080	0.347	0.194	3.30	1.24
모델 2	Taft022	0.149*	0.106	1.81	0.11
	Taft030	0.168	0.124	2.10	0.15
	Taft080	0.193	0.204	3.46	0.48

\* 실험전 고유주기

#### 4. 결론

본 연구의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 하부골조에 전단벽이 있음으로 해서 하부골조의 전단에 의한 변형을 감소시키는데 큰 효과가 있음을 보여주었으나, 전도모멘트에 의한 변형은 전단벽의 유무에 따라 큰 차이를 보여주지 않았다.
- (2) 주상복합구조물의 고유주기는 현재 설계기준에서 제시하고 있는 식이 실제보다 클 수 있음을 나타내어 불안전축으로 설계될 가능성을 보여주고 있다. 반응수정계수 또한 현재의 내력 벽방식에 적용되는 3.0보다 작은 1.2로 줄여야 할 것으로 보인다.

#### 감사의 글

본 연구는 1999년도 건설교통부 국책과제인 “복합구조(전단벽+골조)의 내진설계기법 연구”의 일부로 수행되었으며, 건설교통부와 참여업체인 쌍용건설(주), 대한주택공사, 코오롱건설(주), (주)형상구조안전의 지원에 감사드리며, 진동대실험에 도움을 주신 한국기계연구원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 이한선 외 (1999) “상부전단벽과 하부골조로 구성된 복합구조의 설계실무 현황 분석,” 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제 11권 1호, pp.223-228
2. 한국콘크리트학회 (2000), “콘크리트구조설계기준, 해설,” 한국콘크리트학회
3. 대한건축학회 (2000), “건축물 하중기준 및 해설,” 대한건축학회
4. P.Zia (1970), "Principles of Model Analysis," ACI sp-24, Michigan, pp19-39
5. Hiroshi Hosoya, (1995), "Shaking Table Tests of Three-Dimensional scale Models of Reinforced Concrete High-Rise Frame Structures with Wall Columns," ACI Structural Journal, Vol 92, No.6, pp. 765-780
6. 건설교통부 (1997), “내진설계기준연구(II)-내진설계성능기준과 경제성평가,” 건설교통부