

# 모드해석을 통한 벽식구조 아파트건물의 System Identification

## System Identification of Apartment Buildings with Wall-Slab Configuration using Modal Analysis

장극관\*                      천영수\*\*  
Chang, Kug Kwan      Chun, Young Soo

### 국문요약

本論文은 20層 벽식아파트를 대상으로 실시된 常時微振動 測定結果와 그로부터 얻은 모달變數들을 바탕으로 數學的인 解析모델의 精確성을 평가하는 내용을 다루고 있다. 實物測定結果로부터 固有振動數와 모드형태가 산정되었으며, 動的解析結果와 實驗結果를 비교·수정함으로써 실제 건물의 動的인 舉動을 묘사할 수 있는 모델이 구성되었다. 研究結果 ETABS를 이용한 3次元 解析을 통하여 아파트건물의 動的인 특성이 비교적 精確히 묘사될 수 있었음을 알 수 있었으며, 壁體와 壁體를 연결하는 커플링보와 地盤의 영향이 건물의 動的인 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

주요어 : 固有振動數, 모드形態, 아파트建物, 動的解析모델

### ABSTRACT

This paper described the dynamic characteristics of 20-story apartment buildings from the results of full-scale measurements and analysis. The natural frequencies and mode shapes are quantified by measuring and analyzing ambient vibrations of the structure and compared with the results from dynamic analysis. Comparison with computed mode shapes and frequencies shows good agreement with the experimental results. It proved that it is important to estimate coupling beam and soil parameters through a comparison of the measured results with calculated results.

**Key words** : natural frequency, mode shape, apartment buildings, dynamic model

### 1. 序 論

건물이 건설되기 이전에 예상되는 荷重에 대하여 그 거동을 평가하는 것은 유사한 건물들을 바탕으로 한 엔지니어의 判斷이나 經驗뿐 아니라 數學的인 모델에 의한 解析에 근거한다. 이 경우 주어진 하중조건에 대해서 그 거동특성을 예측하기 위하여 일반적으로 動的解析 수행되며, 이러한 종류의 解析은 건물의 剛性이나 減衰率 그리고 質量과 같은 시스템변수의 변화에 매우 민감하다. 그러므로, 대부분

최종적인 결과의 오류를 가져오는 주요 要因은 잘못된 모델의 構成으로 인한 것이다. 動的解析은 일반적으로 기본적인 工學的 原則들에 의하여 무리없이 수행될 수 있으나 그러한 原則들을 적용하여 구한 최종적인 건물의 응답이 精確한지의 여부는 반드시 검증될 필요가 있다. 數學的 모델에 의한 값이 精確한 값을 예측하지 못하는 주요 이유로는 건물의 舉動에 대한 불충분한 理解로 실제 건물의 거동을 내포하는 解析모델을 설정하지 못한데 있거나, 설사 거동에 관하여 어느 정도 지식을 갖고 있다 하더라도 칸막이 壁體나 外壁材 등과 같은 부가적인 강성증가 요소들을 數學的으로 精確하게 묘

\* 정희원 · 서울산업대학교 건축과 조교수

\*\* 대원주택공사 주택연구소, 연구원

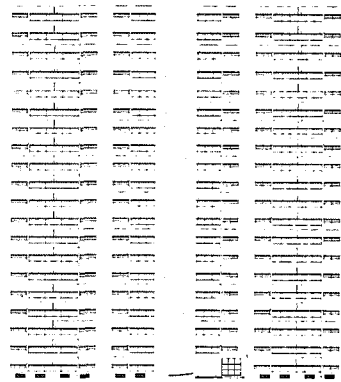
사하기가 불가능하기 때문일 것이다. 따라서, 보다 더 정확한 예측을 위해서는 건물의 전체적인 擧動에 대한 더 나은 이해를 필요로 하며, 이는 實驗的인 결과와 解析的인 결과를 상호 比較함으로써 성취될 수 있다. 즉, 實驗으로부터 얻은 情報를 바탕으로 數學的인 모델을 수정함으로써 建物の 실제거동을 나타낼 수 있는 모델을 얻을 수 있는 것이다.

상기 목적을 달성하기 위한 한 方法은 건설된 건물의 振動測定을 통하여 그 건물의 動的特性을 결정한 후, 이러한 특성들을 解析 모델을 통하여 결정된 값과 비교하는 것이며, 周波數를 바탕으로 한 모달解析(Frequency-based modal approach)이 이를 실현하기 위한 일반적인 方法으로 채용되고 있다. 모달實驗과 해석을 이용하는데 있어서의 잇점은 방대한 양의 데이터를 사용하는 대신 모드형태나 共振周波數 그리고 모달減衰率과 같은 간편하게 정량적인 형태로 표현될 수 있는 정보를 사용한다는 점과 유한요소나 프레임해석과 같이 모든 자유도에 대한 모달벡터의 정보를 얻을 필요가 없다는 점이다. 이러한 변수들은 건물의 강성을 대표하고 또한 건물의 응답을 대표하며 測定된 모달값과 비교를 위한 이상적인 근거를 제공한다.

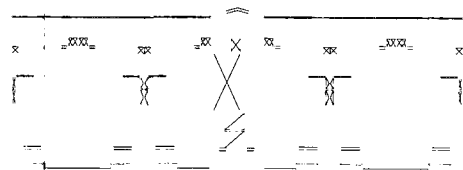
국내 주택건설의 대명사로서 자리매김 해온 壁式構造 아파트건물의 경우 현재 연간 50만호('97 기준)라는 방대한 물량이 건설되고 있음에도 불구하고 국내에서는 아직까지 이에 대한 연구실적이 매우 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 高層의 아파트建物を 대상으로 실시된 常時微振動 測定結果와 이로부터 예측된 모달變數들을 바탕으로 同建物の 실제적인 動的解析모델의 구성에를 제시함으로써 수학적모델 구성시 요구되는 조건들에 대한 판단근거를 마련코자 한다.

## 2. 研究對象 建物

연구대상 建物は 최근 인천광역시에 壁式構造 건설된 아파트로서 세대당 면적  $59m^2$ , 층당 4호조합에 의하여 총 80세대로 구성된 건물을 대상으로 하였다. 건물의 층수는 20층이며, 1층에서 15층까지는 2.6m, 16층 이상에서는 2.7m의 層高를 갖고 있다. 건물의 長邊方向과 短邊方向의 길이는 각각 30.94m와 12.38m로 약 2.5의 形狀比를 갖고 있으며, 壁量은 각각  $0.13m/m^2$ ,  $0.23m/m^2$ 이다. 그림 1은 同建物の 입면도와 평면도를 나타낸 것이며, 그림 2는 地盤의 構成(Soil profile)을 나타낸 것이다.



(a) 立面圖 (Elevation)



(b) 基準層 平面圖 (Typical floor plan)

그림 1 연구대상 건물(59m<sup>2</sup>-80세대-20층)

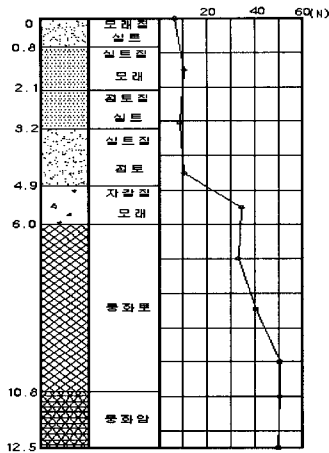


그림 2 지반의 구성(Soil profile)

### 3. 固有振動數와 모드形態 推定

연구대상 건물의 固有振動數와 모드형태를 추정하기 위하여 常時微振動測定이 수행되었다. 測定에 사용된 센서는 B&K사의 모델 Type 8318이며, 증폭장치는 자체 제작된 것으로서 10dB 간격으로 80dB까지 증폭이 가능하다. 신호의 기록은 Sony사의 모델 PC204를 이용하였는데, 동 기록장치는 DAT 기록방식을 사용하며 자체내에서 A/D변환이 가능한 특징을 갖고 있다. 본 연구에서 사용된 장치들은 모두 70dB 이상의 S/N비와 동적범위(Dynamic range)를 지니고 있으며, 0.1Hz로부터 1kHz까지 측정이 가능하다. 각 장치들에 의하여 구성된 측정시스템의 개념도가 그림 3에 주어져 있다.

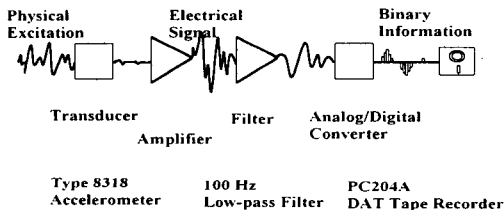


그림 3 振動測定 시스템

건물의 모드형태를 얻기 위해서 반드시 모든 層에서의 振動값이 동시에 測定될 필요는 없다. 이는 모드형태가 振動의 절대값을 얻고자 하는 것이 아니라 그 形象만을 결정하기 위한 것임으로 각 층 振動의 상대적인 크기만을 아는 것으로 충분하기 때문이다. 모달實驗에 있어서 이러한 특징은 다자유도계 구조물의 實驗에 있어서 특히 유용하다. 따라서, 본 연구에서는 最上層에 설치된 센서를 基準으로 下部層으로 내려가면서 3개층 단위로 반복측정을 실시하였으며, 이 測定값들을 상호 조합함으로써 최종적인 모드형태를 얻는 방법을 선택하였다. 測定된 振動데이터로부터 固有振動數와 모드形態를 얻기 위하여 最上層부에 설치된 기준센서와 각 이동센서들로부터 측정된 信號들 사이의 振動의 크기(Amplitude)와 位相角(Phase angle) 그리고 相關度(Coherence)가 계산되었으며, 각 振動數點들에서 이 값들을 조합하여 모드형태를 평가함으로써 定意된 振動數들이 固有振動數인지 다른 부가적인 하중으로 인해 유도된 振動數인지의 여부가 평가되었다. 상기 과정을 통하여 얻은 건물의 固有振動數를 表 1에 나타내었으며, 모드형태는 해석결과와 비교하여 그림 5-그림 7에 나타내었다.

表 1 固有振動數 測定結果

Mode	1	2	3	
固有振動數 [ $f_i$ (cps) ]	長邊	0.49	2.36	5.72
	短邊	0.98	4.92	11.76
	비틀림	1.05	5.40	-

본 연구에서는 測定時 地盤特性에 따른 舉動의 변화를 관찰하기 위하여 건물의 바닥레벨에서 加速度를 함께 測定하였다. 일반적으로 연약지반에 의해 지지된 고층건물의 경우 測定된 振動數와 해석적인 방법으로 얻은 振動數의 差를 설명하는 한 요인으로써 건물과 지반과의 상호작용이 고려된다. 만약, 지반조건

이 건물의 固有振動數를 변화시킬 만큼 충분한 지반의 움직임을 同伴한다면, 건물의 밀면에서 가시적인 모드형태의 변화가 있어야 할 것이다. 그림 5-그림 7은 이러한 결과를 보여주고 있다.

#### 4. 解析모델

해석적인 방법에 의하여 연구대상 아파트건물의 固有振動數와 모드형태를 계산하기 위하여 同 建物の 구조해석용으로 일반적으로 채용되고 있는 컴퓨터 프로그램 ETABS v5.11을 사용하였다. 이 프로그램은 바닥판을 面內剛體(Rigid diaphragm)로써 간주하며, 面外剛性은 없는 것으로 간주한다. 모든 要素들은 먼저 2차원적인 鉛直骨造에 배치되며, 骨造의 內部剛性은 각 층의 質量中心에서 3개의 自由度(2개의 수평방향 自由度와 1개의 回轉自由度)를 갖는 것으로 변환된다. 質量은 각 층에 집중되는 것으로 가정되며 이를 근거로 固有振動數와 모드形態가 결정된다.

본 연구에서 대상으로 하고 있는 아파트건물은 기둥과 보가 없이 耐力壁의 역할을 겸한 剪斷壁과 슬래브로만 구성된 壁式構造 方式를 채택하고 있다. 하지만, 세대 前·後面에 위치하는 壁體들은 많은 開口部로 인하여 수평력에 저항하는 壁體로써의 역할을 담당하는 부분이 매우 한정적인 특징이 있다. 즉, 저항벽체는 건물의 전체 높이에 대하여 缺損部分이 없어야 하며 기초면까지 연장 지지됨으로써 荷重을 전달할 수 있어야 하므로 長邊方向의 경우 많은 壁體들이 실제적으로는 단속적인 壁體들로 모델링되어야 한다. 그러므로, 본 연구에서는 壁體의 開口部 등과 같이 剪斷壁에 있어서 단속적인 部分과 이 들을 연결하는 인방보는 모델링하지 않았으며, 1.0m를 넘지 않는 매우 짧은 壁體들은 패널要素가 아닌 기둥要素로써 모델링하여 순수 剪斷壁의 역할을 할 수 있는 壁體와 슬래브로만 구성된 모델을 기본모델로 설정하였다. 주요 抵抗體로써의 역

할을 하는 세대 간벽과 階段室 및 엘리베이터 홀을 포함하는 코아壁體는 모든 開口部를 고려하여 剪斷壁式 패널로 모델링되었으며, 이 패널들의 剛性은 설계도면상에 주어진 바와 같이 건물의 전층에 대하여 동일한 콘크리트 壁體의 두께로써 모델링되었다. 바닥슬래브는 직접 모델링되지 않았는데, ETABS 프로그램은 이를 프로그램 內에서 無限剛性의 다이아프램(Rigid diaphragm)으로 假定하기 때문이다. 그러나, 固有置解析(Eigenvalue analysis)을 수행하기 위하여 슬래브의 질량분포는 고려되었다. 기본 모델에서는 철근콘크리트의 단위중량으로 2.4 t/m<sup>3</sup>의 값이 사용되었으며, 각 층의 質量은 그 층에서 균등분포하는 것으로 가정되었다. 콘크리트의 강도는 설계도서에 준하여 1층에서 5층까지는  $f_c' = 270\text{kg/cm}^2$ 을 적용하였고, 6층 이상에서는  $f_c' = 210\text{kg/cm}^2$ 을 적용하였다. 그러므로, 두 그룹으로 나뉘어진 콘크리트의 탄성계수는 1층에서 5층까지  $E = 246,475\text{kg/cm}^2$ 값이, 6층에서 20층까지는  $E = 217,371\text{kg/cm}^2$ 의 값이 적용되었다. 건물의 기초는 실험결과를 토대로 地盤의 剛性이 고려된 柔軟한 基礎와 剛한 基礎의 경우가 모델링되어 비교되었다. ETABS v5.11의 경우 건물의 밀면에서 地盤의 剛性을 고려하기 위한 스프링의 설치를 허용하지 않음으로 본 연구에서는 地盤의 水平剛性과 回轉剛性을 모델링하기 위하여 건물의 밀면 아래로 假想的 층을 설치하였다. 이러한 모델링 方法은 이미 여러 연구자들<sup>(1)~(6)</sup>에 의해서 시도된 바 있으며, 실험결과와 비교하여 좋은 결과를 얻을 수 있는 것으로 보고 되고 있다. 假想層의 層數는 다음과 같은 2自由度 시스템에 대하여 힘-變位關係를 만족시키도록 결정되었다.

$$\begin{pmatrix} M_o \\ V_o \end{pmatrix} = EI \begin{bmatrix} 4/L & -6/L^2 \\ -6/L^2 & 12/L^3 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_m \\ \gamma_v \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $M_o$ =밀면에서의 전도모멘트,  $V_o$ =밀면 전단력,  $\gamma_m$ =밀면의 회전,  $\gamma_v$ =밀면의 변위,  $EI$ =

假想層의 휨강성, 그리고  $L$ =假想層의 높이를 나타낸다. 밀면전단력과 전도모멘트는 각 층의 質量과 水平方向의 기본 진동모드에 대하여 測定된 加速度값을 사용하여 계산할 수 있으며, 건물 밀면에서 測定된 加速度값으로부터 실제 밀면의 變位를 계산하고, 1층과 2층 사이의 모드形態를 통하여 밀면의 회전을 근사화함으로써 식 (1)로부터  $EI$ 와  $L$ 을 구할 수 있다. 表 2에는 상기 과정을 통하여 계산된 假想層의 높이와 휨剛性이 제시되어 있다. 이 경우 假想層의 높이와 휨剛性은 測定값으로부터 長邊方向과 短邊方向에 대한 값이 각각 계산될 수 있으나 실제적으로는 두 방향에 대하여 같은 높이를 취해야 하므로 최적의 높이를 결정할 필요가 있다. 그러므로, 본 연구에서는 假想層의 높이를 3.0m에서 5.0m까지 변화시켜 가면서 여러번 解析함으로써 최적의 높이를 결정하였으며, 假想層의 높이를 3.2m로 하였을 경우 건물의 동적특성이 실험결과와 매우 근접한 것으로 나타났다.

表 2 假想層의 높이

振動方向	固有振動數 (cps)	假想層의 높이(m)	$EI(kg \cdot m^2)$
長邊方向	0.49	3.0	$1.92 \times 10^{10}$
短邊方向	0.98	4.6	$5.2 \times 10^{10}$

기본 모델을 사용한 固有置解析을 수행한 후 이를 실험결과와 비교한 결과 약 100%의 振動數差를 나타내 구성된 모델의 剛性이 實測값과 비교하여 크게 부족한 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 이를 보정하기 위하여 약 20회에 걸쳐 모델을 수정하였으며, 그 중 건물의 固有振動數에 큰 영향을 미친 주요 수정사항은 다음과 같다. 먼저, 실제 건물의 구성요소들을 고려하여 인방보와 壁體의 開口部를 제외한 나머지 壁體들을 壁體와 壁體를 연결하는 보로써 모델링하였다. 이러한 수정

은 건물의 固有振動數 값에 가장 큰 변화를 가져다 주었다. 다음으로 콘크리트의 彈性係數를 설계도서상의 값이 아닌 실제 현장시공 후 強度增加로 인한 영향을 고려하여 평균 약 10%의 強度增加를 고려함으로써  $E = 258,505$ 와  $227,980kg/cm^2$ 의 값으로 변경하였다. 또한, 건물 上層部에서 壁體와 슬래브의 철근 배근량을 고려하여 철근콘크리트의 비중을 줄임으로써 감소된 質量을 적용하였다. 최종적으로 수정된 모델이 그림 4에 주어지 있다.

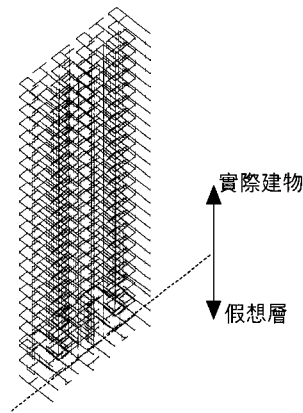


그림 4 解析모델

### 5. 解析結果와 實測結果 比較

실험결과와 최종적으로 수정된 모델을 사용하여 얻은 固有振動數의 비교결과가 表 3에 제시되어 있으며, 振動모드별 形態의 比較結果가 그림 5-그림 7에 주어지 있다.

表 3 解析結果와 實測結果 比較

Mode	固有振動數 [ $f_i$ (cps) ]								
	長邊方向			短邊方向			비틀림		
	實測	解析	差異	實測	解析	差異	實測	解析	差異
1	0.49	0.49 (0.54)	0.0	0.98	0.98 (1.08)	0.0	1.05	1.08 (1.19)	+0.03
2	2.36	2.34 (2.55)	-0.02	4.92	4.94 (5.40)	+0.02	5.40	5.45 (5.95)	+0.05
3	5.72	5.64 (6.13)	-0.08	11.73	11.76 (12.70)	+0.03	-	-	-

\* ( ) : 강한기초로 모델링한 경우임.

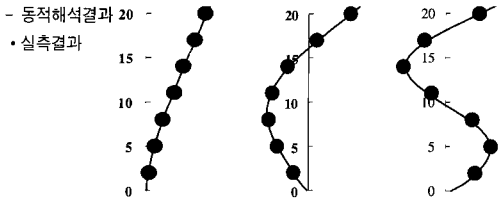


그림 5 解析結果와 實測結果 比較(長邊)

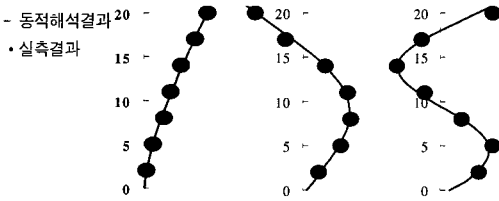


그림 6 解析結果와 實測結果 比較(短邊)

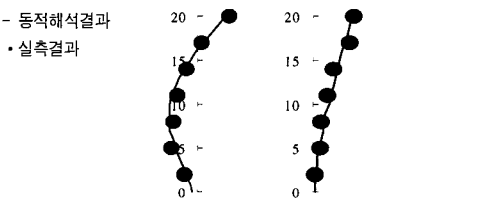


그림 7 解析結果와 實測結果 比較(비틀림)

固有振動數와 모드形態에 가장 큰 변화를 발생시키는 要素는 長邊方向으로 배치된 壁體의 開口部 連結要素로써 同 要素의 모델링 여부에 따라 固有振動數 값이 100%까지도 차이를 보이고 있어 건물의 모델 구성시 상기 요소는 매우 주의 깊게 선택되어야 할 것으로 사료된다. 다음으로 振動數의 변화에 가장 큰 영향을 미친 要素들로는 층 질량과 콘크리트 彈性係數의 변화를 들 수 있으나 약 10% 내외의 振動數 변화를 나타내고 있어 開口部 連結要素의 모델링 여부와 비교하여 볼 때 그리 큰 영향은 없는 것으로 사료된다. 특히, 콘크리트 彈性係數의 경우 본 연구에서는 콘크리트의 強度의 함수로써 일반화된 값을 사용하고 있음에도 불구하고 이에 따른 振動數의 변화는 전체적인 값에 그리 큰 영향을 미치지 않고 있어 이로 인한 解析모델 구성상의 誤差

는 그리 크지 않을 것으로 사료된다. 하지만, 각각의 要素들이 포함하고 있는 誤差가 累積된다면 상당한 誤差가 유도될 수도 있음으로 이에 대해서도 주의할 필요가 있다. 基礎의 剛性は 實測된 값을 토대로 결정되었으며, 地盤의 유연성을 모델링 하지 않은 경우와 비교하여 이를 모델링한 경우가 실측결과와 解析모델에 의한 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 비록, 본 연구에서 대상으로 하고 있는 건물들의 경우 振動數의 差異가 그리 크게 평가되고 있지는 않지만 일치된 결과는 基礎의 실제적인 剛性を 모델링함으로써 얻어진 결과이며, 이전의 연구결과<sup>(1)</sup>에서는 地盤條件의 영향이 전체 振動數에 약 80%까지도 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있음으로 地盤의 상대적인 剛性は 건물의 동적인 舉動을 검토하는 조건에서 결코 무시될 수 없는 要素인 것으로 판단된다.

## 6. 結 論

본 연구에서는 高層의 壁式構造 아파트건물을 대상으로 상시미진동 측정을 실시하고, 이로부터 얻어진 모달變數들을 바탕으로 同 建物の 실제적인 동적해석모델의 구성예를 제시함으로써 아파트건물의 數學的모델 구성시 요구되는 조건들에 대하여 판단근거를 제시하였으며, 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 常時微振動 測定結果로부터 얻은 모달變數들을 근거로 해석적인 방법에 의한 모드形態와 固有振動數를 비교한 결과, ETABS를 이용한 3차원 解析을 통하여 근사적인 모드形態와 약 10% 이내의 固有振動數 差로 同 建物の 동적인 거동이 묘사될 수 있음을 알 수 있었다.
- (2) 解析의인 모델 구성시 地盤의 剛性は 매우 주의 깊게 고려되어야 할 것으로 사료된다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 건물은 비교적 굳은 地盤위에 건설되었으며, 常時微振動 입력으로 인한 동적하중을 대

상으로 하고 있어 地盤과 건물의 相互作用으로 인한 振動數와 모드形態의 변화가 그리 크게 나타나고 있지 않지만 剛한 基礎만으로 모델링되는 경우 아파트건물의 실제적인 동적특성을 충분히 반영하기 어려우며, 이전의 연구결과에서는 이러한 차이가 건물 振動數의 약 80%까지도 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있으므로 동적인 荷重의 크기와 비교하여 基礎의 형태는 매우 주의 깊게 고려되어야 할 문제인 것으로 사료된다.

- (3) 解析的인 모델 구성시 壁體와 壁體를 연결하는 開口部 連結要素의 不在는 同 建物の 剛性を 약 100%까지도 과소평가하는 것으로 나타났다.
- (4) 解析的인 모델 구성시 層 質量과 콘크리트의 強度는 약 10% 내외의 振動數 差를 유도하는 것으로 나타났으며, 특히 콘크리트의 彈性係數에 의한 오차는 5% 이내로 콘크리트 強度로 일반화된 값을 사용하여도 무리가 없을 것으로 사료된다.

본 논문은 '98년도 서울산업대학교 교내 학술연구비에 의하여 연구되었음.

### 參 考 文 獻

1. Bouwkamp, J.G., Kollegger, J.P., and Stephen, R.M. "Dynamic properties of an eight story prefabricated panel building," Report No. UCB/EERC-80/30, Earthquake Engi-

- neering Research Center, University of California at Berkeley, October, 1980.
2. Luz, E. and Wallaschek, J., "Experimental modal analysis using ambient vibration," *International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, Vol. 7, No. 1, Jan. 1992.
3. Kwok, K.C.S., "Full-scale measurement of wind induced response of sydney tower," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, No. 14, 1983.
4. Kwok, K.C.S., "Natural frequencies of vibration and damping ratios of tall buildings and structures," *2nd International Conference on Highrise Buildings, Nanjing*, March 21-23, 1992, pp. 396-401.
5. Littler, J.D. and Ellis, B.R., "Dynamic response of nine similar tower blocks," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, No. 28, 1988, pp. 339-349.
6. Carlos, E.V., and Norman, D.S., "Structural dynamic properties of a reinforced concrete highy-rise building during construction," *Can. J. Civ. Eng.* 23, 1996, pp 950-972.
7. Irie, Y. "Dynamic characteristics of R.C. and S.R.C. apartment buildings," *Proceedings of 8th World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, Calif., July, 1984, pp. 631-638.
8. Cooley, J.W. and Tukey, J.W., "An algorithm for the machine calculation of complex fourier series," *Mathematics of Computation*, Vol. 19, No. 90, 1965.