

# 내풍설계를 위한 초고층 무량판 건축물의 횡강성 및 고유주기 산정

## Lateral Stiffness and Natural Period Evaluation of Flat Plate Tall Buildings for Wind Design

박 제 우\*      김 홍 진†      조 지 성\*\*  
Park, Je-Woo      Kim, Hongjin      Jo, Ji-Seong

### 요 지

건축물의 풍진동은 건축물의 사용성평가에 중요한 구조설계 요인 중 하나이다. 신뢰성있는 풍하중 및 풍진동을 구하기 위해서는 정확한 고유주기의 예측이 필요하며 이러한 고유주기에 오차가 있을 경우 하중을 과대 또는 과소평가하게 되는 문제를 유발한다. 본 논문에서는 최근 본격적으로 증가하고 있는 초고층 무량판 구조시스템의 건축물에 대하여 계측을 통한 횡강성 산정식의 유효성을 검증하였다. 이를 위하여 최근 건설된 초고층 무량판 구조시스템이 적용된 3개의 건물에 대하여 계측 결과와 해석 모델의 고유주기를 비교·분석하였다. 이때, 무량판 구조물의 횡강성에 영향을 미치는 요인들에 대하여 각 케이스별로 해석을 수행하였으며, 특히 일반적으로 사용되고 있는 콘크리트의 할선탄성계수와 동탄성계수가 적용되었을 때의 구조물의 고유주기 변화를 비교하였다. 그 결과 풍진동에 의한 건물의 변형률은 매우 적기 때문에 할선탄성계수의 적용보다는 동탄성계수의 적용이 보다 정확한 해석의 결과를 가져올 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 초고층, 무량판구조, 고유주기, 내풍설계, 사용성

### Abstract

Wind-induced vibration is one of the important structural design factors for serviceability of tall buildings. In order to evaluate the reliable wind-loads and wind induced-vibration, it is necessary to obtain the exact natural period of buildings. The discrepancy in the natural period estimation often results in the overestimation of wind loads. In this study, the effectiveness of lateral stiffness estimation method for tall buildings with flat plate system is evaluated. For this purpose, the results of finite element analysis of three recently constructed buildings are compared with those obtained from field measurement. For the analysis, factors affecting on the lateral resistance such as cracked stiffness of vertical members, elastic modulus of concrete, effective slab width, and cracked stiffness of link beam are considered. From the results, it is found that the use of non-cracked stiffness and application of dynamic modulus of elasticity rather than initial secant modulus yields closer analysis result to the as-built period.

**Keywords** : tall building, flat plate system, natural period, wind design, serviceability

### 1. 서 론

건축물의 초고층화에 따른 풍하중 대책의 필요성은 증가하고 있으며, 이에 따른 정확한 설계풍하중 산정 및 풍진동에 의한 사용성(Serviceability) 평가는 중요한 구조설계 요인 중 하나이다. 풍하중 산정 및 사용성 검토는 설계기준이나 풍동

실험을 통한 일정 재현주기별 설계하중과 응답가속도를 산정하여 설계단계에서 수행한다(Kim 등, 2005). 이때 풍하중 및 풍진동의 신뢰성 향상에는 정확한 고유주기의 예측이 큰 영향을 미친다(Simiu 등, 1996). 설계단계에서 일반적으로 고유치해석 등을 통해 고유주기를 산정하는데, 비구조재의 모델링 등의 어려움으로 실제 건물의 정확한 고유주기를 예

† 책임저자, 정회원 · 경북대학교 건축토목공학부 조교수  
Tel: 053-950-7539 ; Fax: 053-950-6590  
E-mail: hjk@knu.ac.kr

\* 정회원 · 경북대학교 건축토목공학부 석사과정

\*\* 정회원 · 포스코건설 기술연구소 차장

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

측하는데는 큰 어려움이 있다. 연구 결과에 의하면 계층에 의한 고유진동수가 해석값보다 평균 20%정도 큰 것으로 보고되고 있다(Shinoya, 1996; 윤성원 등, 2003). 또한 국내 “건축구조설계기준”(대한건축학회, 2005)에서 고유주기 산정식을 제시하고 있지만, 이는 풍하중에 대한 설계를 위한 고유주기 산정식이 아니라 내진설계를 위한 산정식으로 내풍 설계 적용에 무리가 있다.

최근 국내에서 시공이 증가되고 있는 무량판 구조시스템의 경우 횡력저항 요인 중 하나인 보가 생략되어 있으며, 따라서 풍하중에 대한 횡력저항 설계에 있어 기존 구조시스템에 비하여 차이점을 갖는다. 즉, 보가 생략되어 있는 무량판 구조시스템은 기둥, 코어벽체 및 슬래브에 의해 횡하중이 저항되는 시스템으로 2차원의 슬래브부재와 1차원의 기둥 골조모델이 동시에 존재하므로 기존의 벽식구조나 모멘트골조 구조물에 비하여 횡력에 저항하는 강성 산정에 어려움이 있다.

무량판 구조시스템의 횡강성 산정과 이에 따른 고유주기를 계산하는데 있어 일반적인 구조시스템과 가장 차이점을 보이는 부분이 바로 슬래브의 유효강성이다. 슬래브의 유효강성을 산정하기 위한 해석기법으로는 유한해석모델(Plate bending finite element model), 유효보폭모델(Effective beam width model), 등가골조모델(Equivalent frame model)을 이용하는 방법이 있다. 이 중 유한해석모델을 이용할 경우 실제 건물과 가장 유사하게 모델링할 수 있는 장점이 있으나 해석과 모델링에 필요한 시간이 길며, 등가골조법은 3차원 골조에 적용하기 어려운 단점이 있다(최정욱 등, 2001). 슬래브를 등가의 유효폭을 갖는 보요소로 치환하여 해석하는 유효보폭 모델은 해석에 소요되는 시간이 유한요소해석모델보다 짧으며 등가골조모델에 비해 모델링이 간편하다는 이점을 가지고 있다. 무량판 슬래브의 유효보폭 산정을 위한 연구는 1970년대 말부터 많이 연구되고 있으며(Grossman, 1997; 최정욱 등, 2001), 국내에서는 Grossman이 제안한 유효보폭 제안식을 많이 사용하고 있다. 슬래브의 유효강성산정과 더불어 무량판 구조물의 고유주기를 예측함에 있어 수직부재의 균열 강성을 어떻게 규정하는가에 따라 많은 영향을 받는다.

본 논문에서는 무량판 구조물의 고유주기에 영향을 주는 주요 요인을 선정하고, 각 요인들에 대하여 해석상의 고유주기와 실 계측으로 얻은 구조물의 고유주기를 분석·비교하여 내풍설계를 위한 무량판 구조시스템의 횡강성 및 주기 산정을 위한 연구를 수행하였다. 본 논문에서는 이를 위해 구조 해석 프로그램인 MIDAS-Gen을 이용하여 실무에서 사용이 많은 유효보폭 모델을 적용하여 무량판구조물 슬래브 유효강성 해석을 수행하였다. 해석결과의 검증은 위하여 최근에 완공되어 사용 중인 3개의 건물을 대상으로 계측을 통하여 구

한 동적특성과 해석결과를 비교·분석하였다.

## 2. 무량판 구조물의 고유주기 산정 영향 요인

### 2.1 횡강성 영향 요인

무량판구조 시스템은 기둥, 코어벽체, 슬래브로 이루어진 보가 없는 구조시스템이므로 횡하중은 코어의 벽체 및 기둥과 슬래브에 의해 저항된다. 따라서 무량판 구조물의 고유주기를 예측함에 있어 슬래브 강성과 수직부재의 균열 강성을 어떻게 규정하는가에 많은 영향을 받는다. 수직부재강성은 코어벽체의 강성, 기둥의 강성, 그리고 코어 인방보의 강성으로 나누어진다.

코어벽체와 기둥 균열 강성의 경우 일반적으로 횡저항 분담률이 건물의 하부에서는 전단벽인 코어벽체가 크고 건물의 상부로 갈수록 무량판 슬래브와 기둥간의 모멘트 골조의 분담률이 커져, 코어벽체와 기둥의 균열이 하부에 집중되기 때문에 콘크리트의 균열을 고려하여 건물의 높이에 따라 균열강성을 달리 계산한다. 예를 들어, 지면에서 건물 1/6 높이까지는 비균열 강성의 50%, 1/6 높이에서 1/2높이까지는 비균열강성의 80%, 1/2높이 이상에서는 비균열강성의 100%를 가정하여 계산한다. 이는 실무에서 내진설계 시 일반적으로 적용되고 있는 방법으로 주로 경험적 판단에 의거한다.

이 외에도 기존의 보-기둥 구조시스템의 경우와 동일하게 마감하중의 설계하중과 실제하중의 차이 등에 영향을 받으며, 경량칸막이벽, 조적칸막이벽, 외장재 및 커튼월 등의 비구조재 강성의 고려여부에 영향을 받는다.

### 2.2 해석조건

본 연구에서는 무량판 구조시스템의 횡강성 및 고유주기에 영향을 미치는 요소 중에서 1) 수직부재(코어벽체 및 기둥) 강성, 2) 인방보 강성, 3) 슬래브 강성, 4) 콘크리트 탄성계수의 4가지 요인을 선정하여 해석을 수행하였다. 마감하중의 경우 전체 하중에서 차지하는 비율이 낮기 때문에 구조물 주기 예측에 미치는 영향이 일반적으로 매우 적다. 또한 경량칸막이벽 같은 비구조재의 경우 바닥 슬래브와 천정 슬래브에 닿지 않거나, 외장재 및 커튼월의 경우 열팽창을 고려하여 구조물과 유격을 갖고 설치되기 때문에 실제 강성기여가 미미할 것으로 판단되며 정확한 강성의 산정이 매우 어렵다. 또한 최근 초고층 건축물의 경우 조적칸막이벽을 사용하는 경우가 매우 제한적이어서 본 연구에서 고려대상에서 제외되었다.

구조해석은 각각의 요인이 주기산정에 미치는 영향을 분석

하기 위하여 다음과 같이 2개의 극한수준을 선정하여 실시하였다. 따라서 4개의 요인에 대한 2개 수준의 모두 16가지의 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

2.2.1 수직부재(코어벽체, 기둥) 균열 강성

수직부재의 균열강성은 지면에서 건물 1/6 높이까지는 비균열 강성의 50%, 1/6 높이에서 1/2높이까지는 비균열 강성의 80%, 1/2높이 이상에서는 비균열 강성의 100%를 적용한 경우와 전 층에 대하여 균열이 없는 경우의 두 가지를 고려하였다.

2.2.2 인방보 균열 강성

코어 벽체의 개구부에 설치되는 인방보는 구조물의 거동을 일체화 시키는 역할을 하게 된다. 이러한 인방보는 구조물의 횡저항에도 영향을 미치며, 이것은 구조물의 강성, 즉 고유주 기에도 영향을 준다. 이를 고려하여 기본 해석모델인 인방보 강성을 100%로 할 때와 인방보의 강성이 75% 저감된 해석 모델의 구조해석을 수행하였다.

2.2.3 슬래브 유효보 강성

무량판 구조물은 보가 없는 구조시스템이므로 유효보폭 모델에서는 바닥 슬래브의 일정부분이 보의 역할을 한다고 가정한다. 무량판 슬래브의 유효보폭( $al_2$ )은 다음 식으로 구할 수 있다(대한주택공사, 2005).

$$al_2 = K_d[0.3l_1 + C_1(l_2/l_1) + (C_2 - C_1)/2](d/0.9h)(K_{FP}) \quad (1)$$

그리고 식 (1)에서 계산되는 슬래브의 유효보폭은 식 (2)에 의해 그 크기가 제한된다.

$$(0.2)(K_d)(K_{FP})l_2 \leq al_2 = (0.5)(K_d)(K_{FP})l_2 \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서  $l_1$ 은 횡력방향과 평행한 방향의 기둥간 중심거리,  $l_2$ 는 횡력방향에 직교하는 방향의 기둥간 중심거리,  $C_1$ 은 횡력방향과 평행한 방향의 기둥크기,  $C_2$ 는 횡력방향에 직교하는 방향의 기둥크기이며,  $d$ 는 슬래브의 유효두께,  $h$ 는 슬래브의 두께이며,  $K_{FP}$ 는 기둥위치에 따른 강성감소계수로 내부기둥, 외부기둥, 코너기둥 등 기둥의 위치에 따라 각각 감소계수를 적용한다.

$K_d$ 는 횡하중에 대한 구조물의 균열을 고려한 강성감소계수로 층간변위가  $h_s/400$ 을 기준으로 1.0으로 하여 층간변위가  $h_s/400$ 보다 작을 때, 즉 풍하중에 의한 균열강성의 경우 큰 유효보폭을 갖도록 하며, 층간변위가  $h_s/400$ 보다 클 때, 즉 지진하중과 같은 극한하중에 의한 균열강성의 경우

표 1 횡하중에 대한 구조물의 균열을 고려한 강성감소계수,  $K_d$

층간변위	$h_s/800$	$h_s/400$	$h_s/200$	$h_s/100$
$K_d$	1.1	1.0	0.8	0.5

작은 유효보폭을 갖도록 하여 하중의 크기에 따라 슬래브의 유효보폭을 달리하도록 하였다. 표 1에서 국내에서 일반적으로 사용되는  $K_d$ 값을 정리하였다.

이와 달리 Grossman(1997)은 풍하중에 의한 진동 및 사용성문제 등을 고려할 때  $K_d$ 의 값을 위의 표 1에서 주어진 값보다 큰 1.5 또는 2.0을 사용하도록 규정하였는데 완공된지 얼마되지 않은 건물의 경우  $K_d=2.0$ , 시간이 경과한 건물의 경우  $K_d=1.5$ 를 사용하도록 하였다.

본 연구의 대상건물들은 모두 2007년 이후에 완공된 신축 건물이며, 슬래브 유효강성 산정을 위하여  $K_d=1.0$ 과  $K_d=2.0$ 의 두 가지 경우를 적용하였다.

2.2.4 콘크리트 탄성계수

탄성적인 거동에서 말하는 탄성계수와 가장 가까운 근사값을 가지는 초기접선 탄성계수는 아주 작은 응력 및 변형률에만 해당되기 때문에 콘크리트 구조물의 설계에는 일반적으로 보수적인 설계를 위하여 활선탄성계수를 이용한다(정영수 등, 2008). 그러나 풍진동에 의한 건물의 변형률은 매우 적으며 거동도 활선탄성계수보다는 초기접선 탄성계수(동탄성계수)와 밀접한 관련이 있다.

또한 콘크리트 탄성계수는 강도의 제곱에 비례하며 현장 타설콘크리트 강도가 설계강도보다 대부분 높게 나타나기 때문에 콘크리트 탄성계수가 설계값보다 높은 것이 일반적이다(김지영 등, 2009). 건축구조설계기준(2005)에 의하면 실제 현장타설 콘크리트의 배합강도 설계를 평균 21%증가하여 수행하도록 하고 있으며, ACI(2002)에 의하면 압축강도로부터 탄성계수를 산정할 경우 실제 탄성계수의 차이가  $\pm 20\%$ 에 이르는 것으로 보고된다.

본 연구에서는 설계강도에 의한 탄성계수가 적용된 기본 해석모델과 현장타설 콘크리트 강도의 증가와 풍진동에 의한 작은 변형률을 고려하여 20%증가된 동탄성계수가 사용된 해석모델을 비교하였다.

4가지 요인별 2개의 극한수준을 다음 표 2에 정리하였다. 표 2에서 Ig는 각 부재의 비균열강성을 의미한다.

표 3은 주요 요인별 극한 수준의 값을 적용한 해석 모델별 CASE를 정리한 것이다. 표 3에서 CASE 1은 구조물의 내풍 설계에 실제 적용된 값이며, 음영으로 표시된 CASE 7은 가장 작은 강성을 가지며 CASE 10은 가장 큰 강성을 갖는 경우를 의미한다.

표 2 주요 요인별 극한 수준의 값

번호	요인	극한 수준의 값
1	수직부재(코어벽체, 기둥) 균열 강성	0.5I <sub>g</sub> / 0.8I <sub>g</sub> / 1.0I <sub>g</sub>
		1.0I <sub>g</sub>
2	코어 인방보 균열 강성	0.25I <sub>g</sub>
		1.0I <sub>g</sub>
3	슬래브 유효보 강성	K <sub>d</sub> =1.0
		K <sub>d</sub> =2.0
4	콘크리트 탄성계수	할선탄성계수
		동탄성계수

표 3 CASE별 해석 조건 16가지

	슬래브 유효보 강성(K <sub>d</sub> )	수직부재 코어강성	인방보 강 성	콘크리트 탄성계수(E)
CASE 1	1.0	100	100	할선탄성계수
CASE 2	1.0	100	100	동탄성계수
CASE 3	1.0	100	25	할선탄성계수
CASE 4	1.0	100	25	동탄성계수
CASE 5	1.0	50-80-100	100	할선탄성계수
CASE 6	1.0	50-80-100	100	동탄성계수
CASE 7	1.0	50-80-100	25	할선탄성계수
CASE 8	1.0	50-80-100	25	동탄성계수
CASE 9	2.0	100	100	할선탄성계수
CASE 10	2.0	100	100	동탄성계수
CASE 11	2.0	100	25	할선탄성계수
CASE 12	2.0	100	25	동탄성계수
CASE 13	2.0	50-80-100	100	할선탄성계수
CASE 14	2.0	50-80-100	100	동탄성계수
CASE 15	2.0	50-80-100	25	할선탄성계수
CASE 16	2.0	50-80-100	25	동탄성계수



그림 1 대상건물 1 전경



그림 2 대상건물 2 전경



그림 3 대상건물 3 전경

### 3. 계측 대상 건물

본 연구의 대상 구조물은 3개이며 모두 무량관 구조시스템, 콘크리트 기둥과 코어벽체가 횡하중에 저항하는 시스템이다. 각 대상 건물은 부산, 인천, 서울에 위치하여 있다.

대상건물 1은 부산 해운대구 우동에 위치한 주상복합건물로 3개의 47층 건물과 각 건물을 연결하는 3층의 Podium으로 이루어져 있다. 건물의 구조형식은 철근콘크리트구조로 주동부는 무량관구조를, 지상층 Podium 및 지상 1층 바닥의 경우 옥외 설계하중과 거푸집 및 동바리의 효율성을 고려하여 보-기둥 시스템을 적용하였다. 기준층 및 지하에 적용된 슬래브의 두께는 250mm이며, 기초 형식은 파일기초이다.

대상건물 2는 서울 광진구에 위치하고 있으며 58층, 35층, 50층, 45층의 4개동으로 이루어진 주상복합건물이다. 슬래브의 두께는 250mm이며 매트지내력기초가 사용되었다.

계측이 이루어진 건물은 58층의 최고높이 192.6m인 건물에서 실시하였다.

대상건물 3은 인천 송도에 위치한 연면적 52,000m<sup>2</sup>에 237m 높이의 64층 주거용 건물 4개동과 주변의 중저층 건물로 이루어졌다. 슬래브의 두께는 260mm, 기초형식은 파일기초이며 네 개 동 모두 동일한 높이와 평면을 가지고 있다. 계측은 64층 건물에서 실시하였다.

#### 4. 상시진동 계측 및 동특성 산정

대상건물들의 고유주기를 구하기 위하여 각 대상건물의 최상층에서 상시진동을 계측하였다. 슬래브의 강막작용(Rigid Diaphragm)의 가정을 바탕으로 두 직각방향의 병진운동과 회전운동을 계측하기 위하여 Kinematics사의 서보타입 가속도계인 ES-U2를 3개 설치하였으며, 데이터 수집을 위한 데이터 로거는 NetPod 4003을 사용하였다(그림 4). 측정에는 200Hz의 샘플링 간격으로 최소 30분간 진행하였으며, 바닥에 설치된 가속도계의 수평과 외부 요인에 의해 가속도계가 움직이는 것을 방지하기 위해 가속도계의 바닥판을 제작하여 원활한 데이터 수집이 되도록 하였다(그림 5).

위의 과정을 통해 얻어진 상시진동 계측 데이터를 바탕으로 시스템식별을 수행하여 각 대상건물의 고유주기, 고유진동수 및 감쇠비를 구하였다. 시스템식별 시 데이터의 수를 줄이기 위해

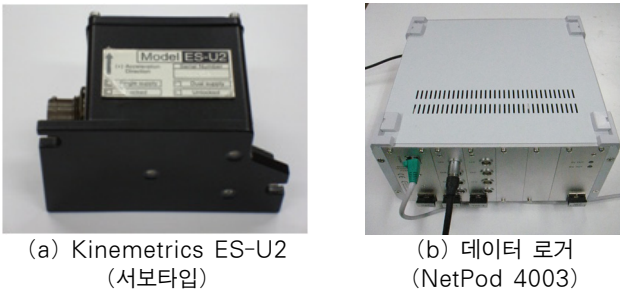


그림 4 측정에 사용된 가속도계 및 데이터 로거



그림 5 계측을 위한 시스템 구성 및 가속도계 설치

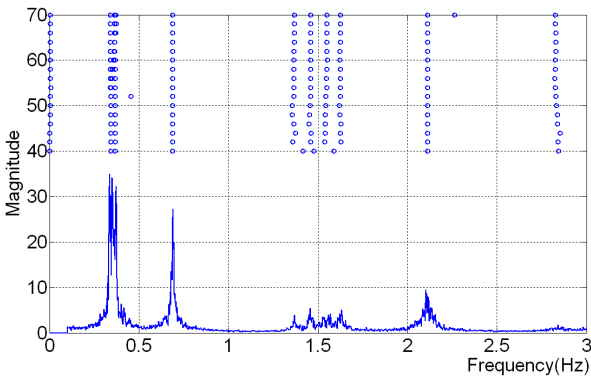


그림 6 대상건물 1의 Stabilization Chart

10Hz로 리샘플링하였으며 SSI기법(Stochastic Subspace Identification) 기법을 이용하였다.

그림 6~8은 각 대상건물의 시스템식별로부터 얻어진 Stabilization Chart를 나타내며, 이를 바탕으로 구한 대상건물의 고유주기 및 진동수 그리고 감쇠비는 표 4~6에 나타내었다.

표 4 대상건물 1의 시스템식별 결과

	고유진동수(Hz)	고유주기(초)	감쇠비(%)
1차모드	0.344	2.90	1.66
2차모드	0.365	2.72	1.02
3차모드	0.689	1.45	0.61

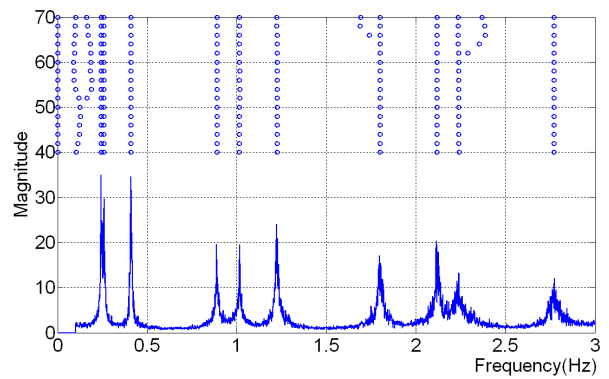


그림 7 대상건물 2의 Stabilization Chart

표 5 대상건물 2의 시스템식별 결과

	고유진동수(Hz)	고유주기(초)	감쇠비(%)
1차모드	0.247	4.04	0.84
2차모드	0.259	3.86	0.76
3차모드	0.411	2.43	0.54

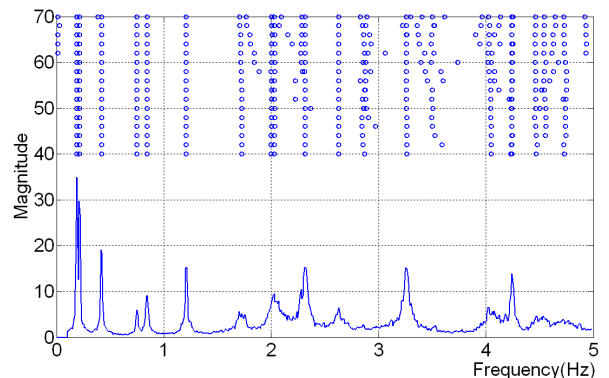


그림 8 대상건물 3의 Stabilization Chart

표 6 대상건물 3의 시스템식별 결과

	고유진동수(Hz)	고유주기(초)	감쇠비(%)
1차모드	0.189	5.29	0.46
2차모드	0.214	4.67	0.56
3차모드	0.418	2.39	0.60

5. 해석 결과와 계측 값의 비교

횡강성 주요 영향요인을 고려한 16 CASE의 해석을 수행하기 전에 앞에서 언급한 요인 중 중요도가 적을 것으로 판단된 실제 마감하중 고려여부에 대한 영향을 해석적으로 분석하였다. 해석은 건물간 연결 Podium이 있는 대상건물 1에 대하여 실시하였고 마감하중은 경량 칸막이벽의 변경으로 인하여 설계하중과 실제하중이 각각 1.2kN/m<sup>2</sup>과 0.8kN/m<sup>2</sup>이다.

해석결과 실제 시공콘크리트를 고려한 해석모델의 고유주기는 마감하중을 재산정하여 해석하였을 경우 약 0.8%감소하여 요인이 주기산정에 미치는 영향이 아주 작음을 알 수 있었다. 이는 마감하중의 경우 바닥 슬래브 자중(6kN/m<sup>2</sup>)에 비해 차이가 작아 그 영향이 미비한 것으로 판단된다.

표 7~9에 실제 내풍설계에 사용된 해석모델인 CASE 1 해석모델의 고유주기와 실제측을 통한 건물의 고유주기를 비교하였다. 표에 7~9에서 내풍설계를 위해 사용된 고유주기와 계측을 통해 구한 고유주기와의 오차는 최소 23.1%이상임을 알 수 있다. 특히 내풍설계에서 중요한 역할을 하는 1차모드 고유주기의 경우 평균 30.3%의 오차를 보임을 알 수 있다.

무량판 구조물의 횡강성 산정의 주요 요인별 극한 수준 경우에 대한 해석을 수행한 결과는 아래 표 10~12, 그림 9~11에 정리하였다. 그림 12에는 계측값 대비 해석 CASE 별 1차~3차모드 고유주기 오차의 평균값을 나타내었다. 2장에서 언급하였던 것과 같이 세 건물 모두 CASE 7의 고유주기가 가장 길고 계측주기와 오차가 가장 크게 나타났고 CASE 10의 고유주기가 가장 짧고 오차가 가장 작은 것으로 나타났다. 그림 9~11에서 가장 작은 강성이 고려된 CASE 7의 경우는 최고 86%의 오차를 보이고 있으며 평균 73%의

표 7 대상건물 1의 내풍설계/계측 고유주기 비교

	계측값(초)	해석값(초)	오차(%)
1차모드	2.90	3.81	31.3
2차모드	2.72	3.74	37.5
3차모드	1.45	2.33	60.6

표 8 대상건물의 2의 내풍설계/계측 고유주기 비교

	계측값(초)	해석값(초)	오차(%)
1차모드	4.04	5.41	33.9
2차모드	3.86	4.87	26.1
3차모드	2.43	2.99	23.1

표 9 대상건물의 3의 내풍설계/계측 고유주기 비교

	계측값(초)	해석값(초)	오차(%)
1차모드	5.29	6.65	25.7
2차모드	4.67	6.05	29.5
3차모드	2.39	3.08	28.8

오차를 가지고 있음을 알 수 있다.

표 10~12에서 수직부재의 균열강성을 달리하여 모델링한 CASE 1과 CASE 5, CASE 2와 CASE 6, CASE 9와 CASE 13, CASE 10과 CASE 14를 비교해 보면 수직부재의 균열강성을 고려하는 경우 구조물의 고유주기가 최소 25% 증가 되는 것을 알 수 있다. 이는 수직부재의 강성이 구조물의 고유주기에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

인방보의 균열강성만을 변경시켜 모델링하였을 때 인방강성을 100% 고려한 CASE 1과 인방강성을 75% 저감시킨 CASE 3과는 대상건물 모두 평균 15%정도 고유주기의 차이가 발생함을 나타내고 있다. 이는 인방보가 구조물의 슬래브와 코어를 연결하여 구조물의 횡력저항을 위한 구조물의 일체화 거동에 상당히 영향을 미치고 있음을 나타낸다.

표 10 대상건물 1의 CASE별 해석 결과 주기값

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6	CASE7	CASE8	CASE9	CASE10	CASE11	CASE12	CASE13	CASE14	CASE15	CASE16
1차모드	3.81	3.33	4.29	3.77	4.53	3.97	5.00	4.38	3.63	3.18	4.07	3.57	4.25	3.72	4.66	4.09
2차모드	3.74	3.28	4.01	3.52	4.53	3.97	4.82	4.23	3.55	3.11	3.80	3.33	4.21	3.69	4.48	3.93
3차모드	2.33	2.04	3.25	2.85	2.52	2.21	3.55	3.12	2.29	2.01	3.14	2.75	2.47	2.17	3.42	3.00

표 11 대상건물 2의 CASE별 해석 결과 주기값

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6	CASE7	CASE8	CASE9	CASE10	CASE11	CASE12	CASE13	CASE14	CASE15	CASE16
1차모드	5.41	4.74	5.89	5.17	7.14	6.26	7.52	6.60	4.87	4.24	5.22	4.58	6.20	5.44	6.51	5.71
2차모드	4.87	4.27	4.88	4.28	6.30	5.53	6.31	5.53	4.27	3.72	4.25	3.73	5.40	4.73	5.40	4.74
3차모드	2.99	2.62	3.75	3.29	3.71	3.26	4.53	3.97	2.85	2.45	3.41	2.99	3.43	3.00	4.05	3.55

표 12 대상건물 3의 CASE별 해석 결과 주기값

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6	CASE7	CASE8	CASE9	CASE10	CASE11	CASE12	CASE13	CASE14	CASE15	CASE16
1차모드	6.65	5.84	7.19	6.30	8.20	8.06	8.65	8.52	6.42	5.66	6.87	6.06	7.76	6.84	8.15	7.18
2차모드	6.05	5.30	6.41	5.62	7.39	7.27	7.73	7.61	5.85	5.13	6.18	5.43	6.99	6.14	7.31	6.42
3차모드	3.08	2.70	3.91	3.42	3.37	3.34	4.16	4.14	3.02	2.65	3.79	3.32	3.23	2.86	4.01	3.51



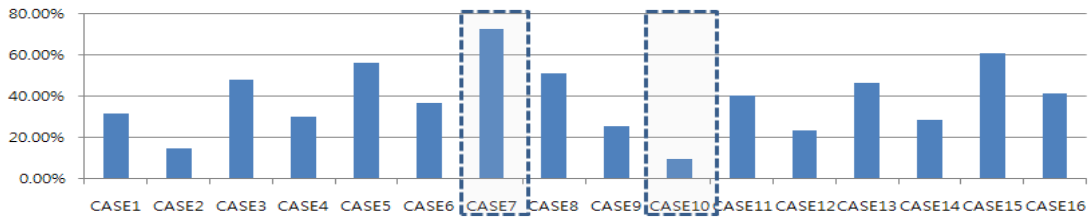


그림 9 대상건물 1 CASE별 계측값 대비 해석모델 1차모드 고유주기 오차

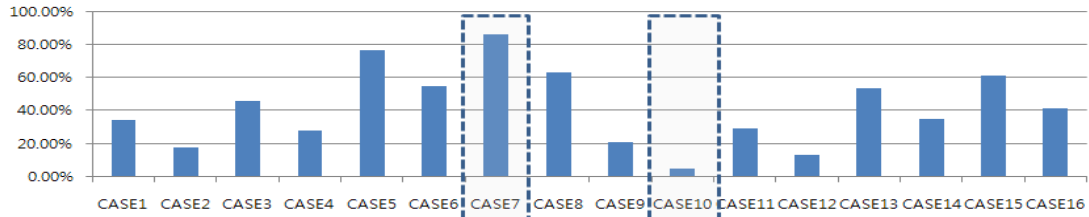


그림 10 대상건물 2 CASE별 계측값 대비 해석모델 1차모드 고유주기 오차

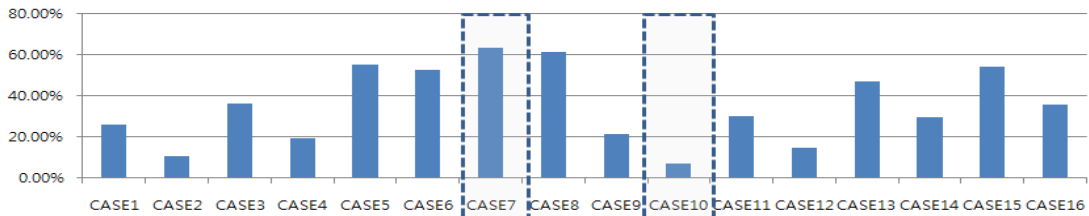


그림 11 대상건물 3 CASE별 계측값 대비 해석모델 1차모드 고유주기 오차

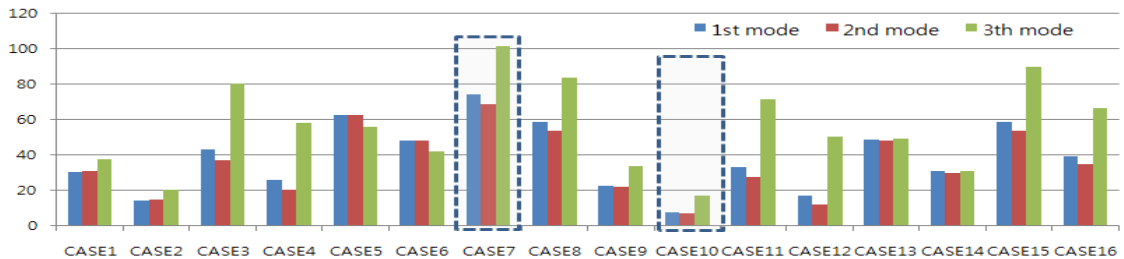


그림 12 대상건물 전체의 CASE별 고유주기 오차 평균값

또한, 대상건물 3곳이 모두 신축 건물임을 고려하여 슬래브 유효보 강성감소계수인  $K_d=2.0$ 을 사용한 CASE 9는  $K_d=1.0$ 을 사용한 CASE 1보다 최소 4%에서 최고 13% 정도 해석의 정확도가 향상되었음을 알 수 있다.

CASE 9와 동일한 조건에 콘크리트 강성만 활선탄성계수가 아닌 동탄성계수를 적용하여 해석을 수행한 CASE 10의 1차모드 고유주기는 계측값과는 5~9%의 오차를 보여주고 있다. 이는 평균 7%의 오차로 활선탄성계수를 적용한 CASE 9보다 건물의 강성이 많이 향상되었음을 알 수 있다. 또한, CASE 1과 다른 조건은 동일하게 하고 콘크리트 탄성계수를 동탄성계수를 적용한 CSAE 2의 1차모드 고유주기는 계측값과 비교하여 평균 13%의 오차를 나타내고 있으며

CASE 1보다 향상되었음을 알 수 있다. 즉, 구조물의 해석 모델링 시 활선탄성계수를 사용했을때 보다 동탄성계수를 적용했을때 정확한 건물의 고유주기를 예측할 수 있음을 알 수 있다. 전체적으로 활선탄성계수를 적용한 CASE 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15보다 동탄성계수를 적용한 CASE 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16의 1차모드 고유주기가 평균 16% 향상되었음을 알 수 있다.

해석모델링 시 구조물의 강성을 최대한 고려한 CASE 10의 경우 대상구조물의 계측된 1차모드 고유주기와 약 7%의 오차를 가지는 것으로 실 구조물과 100% 일치하지 않음을 알 수 있다. 이는 구조물의 모델 해석 시 고려하지 않은 비구조체가 실 구조물의 강성에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 최근 국내에서 시공이 많이 되고 있는 무량판 구조물을 대상으로 횡강성에 영향을 미치는 주요 요인인 1) 슬래브 균열 강성, 2) 수직부재(코어벽체 및 기둥) 균열 강성, 3) 인방보 균열강성, 4) 콘크리트 탄성계수에 대하여 16 CASE의 구조해석을 수행하였으며 그 결과를 구조물의 계측값과 비교하였다.

수직부재 균열강성의 경우 구조물의 고유주기가 이를 고려하지 않았을때와 비교하여 최소 25%의 고유주기가 증가함을 알 수 있었으며, 이는 수직부재의 균열 강성이 구조물의 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 그리고 인방보 균열강성을 고려한 경우 대상건물 3곳 평균 15%의 고유주기 차이가 발생함을 알 수 있었다. 이는 인방보가 구조물의 슬래브와 코어를 연결하여 구조물의 횡력저항에 의한 구조물의 일체화 거동에 상당히 영향을 미치고 있음을 판단할 수 있다. 또한 무량판 구조물의 슬래브 강성을 주요 요소로 한 모델에서는 대상건물 3곳이 모두 신축 건물임을 고려한 슬래브 유효보강성감소계수인  $K_d=2.0$ 을 사용한 CASE 9와  $K_d=1.0$ 을 사용한 CASE 1의 비교 결과 최소 4%에서 최고 13% 정도 해석의 정확도가 향상됨을 알 수 있었다. 하지만 여전히 계측값과는 큰 오차를 보여 주었다.

구조물 해석 시 일반적으로 사용하는 할선탄성계수를 이용하는 경우 실제측 값과는 평균 25%의 오차를 보여주었으며, 할선탄성계수 대신 동탄성계수로 적용할 경우 계측값과의 1차모드 고유주기의 오차는 평균 7%인 것으로 나타났다. 이는 무량판 구조물의 풍진동에 의한 건물의 변형률이 매우 적기 때문에 동탄성계수를 사용하여 구조물의 해석을 수행하는 것이 더 정확한 해석을 할 수 있는 것으로 판단된다.

모든 부재의 비균열 강성을 고려하고, 슬래브 유효보 폭을 최대한으로 가정하고, 동탄성계수를 고려하여 최대강성을 적용한 경우에도 계측 1차모드 고유주기와는 최대 9%, 평균 7%의 오차를 가지며, 이는 해석 시 고려하지 않는 비구조체가 건물의 횡저항 거동에 어느 정도 영향을 미치기 때문인 것으로 보여진다.

## 감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. KRF-2008-331-D00643).

## 참 고 문 헌

- 김지영, 김주연, 김미진, 유은중, 김대영 (2009) 실측 및 해석모델에 의한 철근콘크리트주상복합건물의 모드특성, 한국전산구조공학회 논문집, 22(3), pp.289~296.
- 대한건축학회 (2005) 건축구조설계기준(Korean Building Code, KBC 2005).
- 대한주택공사 (2005) 복합(무량판)구조설계지침.
- 윤성원, 주영규 (2003) 고층건물의 상시진동계측을 통한 고유진동수, 한국강구조학회 논문집, 15(2), pp.117~124.
- 정영수, 김진근, 최석환, 하재담, 박홍근 (2008) 콘크리트, 동화기술.
- 최정욱, 송진규, 이수곤 (2001) 횡하중을 받는 Flat-Plate 구조의 유효보폭계수, 대한건축학회 논문집(구조계), 17(6), pp.77~86.
- ACI Committee 318 (2002) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary(ACI 318-02).
- Fukuwa, N., Nishizaka, R., Yagi, S., Tanaka, K., Tamura, Y. (1996) Field Measurement of Damping and Natural Frequency of an Actual Steel-Framed Building over a Wide Range of Amplitudes, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 59(2~3), pp.325~347.
- Grossman, J.S. (1997) Verification of Proposed Design Methodologies for Effective Width of Slabs in Slab-Column Frames, *ACI Structural Journal*, 94(2), pp.181~196.
- Kim, H., Adeli, H. (2005) Wind-induced Motion Control of 76-story Benchmark Building using the Hybrid Damper-Tuned Liquid Column Damper System, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 131(12), pp.1794~1802.
- Simiu, E., Scanlan, R.H. (1996) *Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design*, John Wiley.

- 논문접수일 2009년 9월16일
- 논문심사일 2009년 9월28일
- 게재확정일 2009년11월20일