

# 철근콘크리트 초고층 주상복합 건물의 시공 중 구조성능 분석

황 영 진<sup>1</sup> · 김 재 요<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>광운대학교 건축공학과

## Analyses of Structural Performances for RC High-Rise Residential Complex Building under Construction

Young-Jin Hwang<sup>1</sup> and Jae-Yo Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Architectural Engineering, Kwangwoon Univ., Seoul, 139-701, Korea

### Abstract

Recently, the most of domestic high-rise residential complex buildings are constructed with reinforced concrete structures, which may bring structural problems during construction. This study is aimed to analyze structural safety and lateral load-resisting performance of RC high-rise residential complex building under construction. The tower-typed building with 60 floors is selected as a sample model, and numerical analyses are performed. The structural performances of building structures at construction stages, which are resulted from the analyses of numerical models completed up to 10th, 20th, 30th, 40th, 50th, or 60th floor, are compared to those of the completed building structure. For the comparisons of structural performances, modal shapes and fundamental periods of building structures, lateral load-resisting performances, and structural design performances of structural members are considered. The lateral displacement and story drift ratio are analyzed for lateral load-resisting performances, and comparisons of design ratios at construction and design stages are performed for structural design performances of structural members. The guideline of design loads and structural analysis schemes for checking the safety of RC high-rise building under construction is presented.

**Keywords** : high-rise, residential complex, reinforced concrete, construction, construction sequence analysis

### 1. 서 론

#### 1.1 연구의 배경 및 목적

초고층 건물은 적절한 횡력저항시스템의 사용으로 지진과 바람 등의 횡력에 저항하며 이는 전체 부재의 설계에 영향을 준다. 이러한 횡력저항시스템은 초고층 건물의 전체에 걸쳐 분포되거나 일부 층에서 조합되어 있으며, 시공 중에는 부분적으로 완성되어 있지 않거나 시공이 이루어지지 않은 시공 단계가 발생한다. 따라서 건물의 시공 중에는 설계 상태와는 다르게 구조시스템이 완전히 형성되어 있지 않다.

또한 건물의 시공 중에는 당초 설계의 목적 용도와 다르게 사용된다. 주거 건물을 예로 들면, 당초 건물의 설계 목적은 주거 공간일지라도 시공 중에는 건설인력, 장비, 가설물, 적

재물 등이 공간을 점유하여 설계와 다른 하중이 구조체에 작용하게 된다(ASCE 37-02, 2002).

철근콘크리트 건물의 시공 중에는 콘크리트의 강도·강성이 완전히 발휘되지 않는 부재가 존재한다. 따라서, 일부 부재들의 경우에는 콘크리트의 재령으로 인해 설계단계에서 요구한 강도가 만족되지 않을 수 있으므로, 건물의 구조안전성에 영향을 줄 가능성이 있다.

이와 같은 이유들로 인해 설계단계의 가정 사항과 조건들이 시공단계에서는 유효하지 않을 수 있다. 따라서 시공 상태를 반영한 해석조건 및 하중조건을 제시하고 이에 따른 구조적 검토가 필요하다.

기존 연구에서는 초고층 건물의 시공 중 구조거동을 분석하기 위해 시공 중 구조거동, 시공 구획별 검토, 수직하중에 의해 발생하는 횡변위 검토, 부재의 내력에 미치는 영향 등이

\* Corresponding author:

Tel: +82-2-940-5637; E-mail: kimjyo@kw.ac.kr  
Received July 2 2014; Revised September 12 2014  
Accepted October 6 2014

©2015 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이루어졌다. 이는 풍하중과 지진하중이 제외된 중력하중만을 대상으로 하는 연구들이 대부분이었다(Eom and Kim, 2009; Ha *et al.*, 2011; Kim and Shin, 2010; Kurc and Lulec, 2013; Kwak and Kim, 2006; Lee *et al.*, 2013; Jayasinghe and Jayasena, 2004; Pan and Liu, 1993).

따라서 이 연구에서는 앞서 제시한 시공 중 발생하는 구조체의 문제들을 고려하여 철근콘크리트 주상복합 초고층 건물을 대상으로 구조성능 검토를 수행하였다. 탑상형의 철근콘크리트 60층 초고층 예제 건물을 대상으로 시공 중 적용되는 중력하중 뿐만 아니라 시공조건에 적합한 풍하중 및 지진하중을 적용하였다. 또한 골조 완성도에 따라 여러 해석모델을 구성하고 횡력저항성능과 단면의 하중저항능력 등에 대한 해석결과들을 검토하며, 일반적인 구조설계시 검토대상인 완공상태 모델과 구조성능을 비교·분석하였다. 이를 바탕으로, 철근콘크리트 초고층 건물의 시공 중 구조성능 검토를 위한 주요 조건 및 과정에 대한 가이드라인을 제시하고자 하였다.

## 2. 해석 조건

### 2.1 예제 모델

이 연구에서 사용된 예제 모델은 탑상형의 철근콘크리트 60층 규모의 주상복합 초고층 건물이다. 아웃리저를 통해 코어와 외부골조가 함께 횡력에 저항하는 횡력저항시스템이 적용되었으며, 바닥구조시스템으로는 무량판구조가 적용되었다. 1층부터 3층까지의 높이는 각각 5.9m, 4.5m, 6.9m이며 기준층의 높이는 2.9m이다. 30층에는 층고 5.9m의 기계실층이 존재하며 아웃리저 벽체가 배치되어 있다(Fig. 1). 60층 완공 모델의 높이는 186.2m이며 세장비는 7.1이다. 평

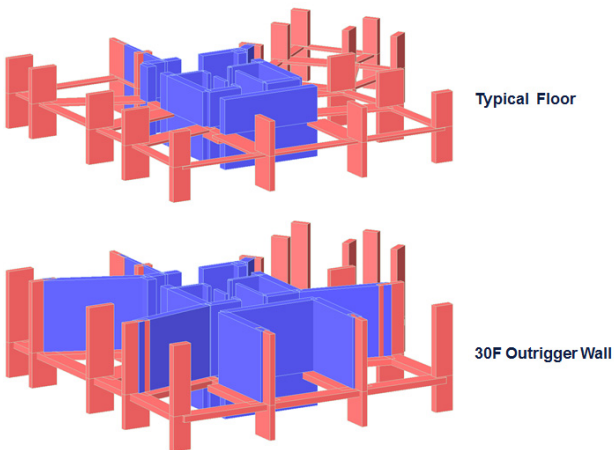


Fig. 1 Typical and mechanical floors

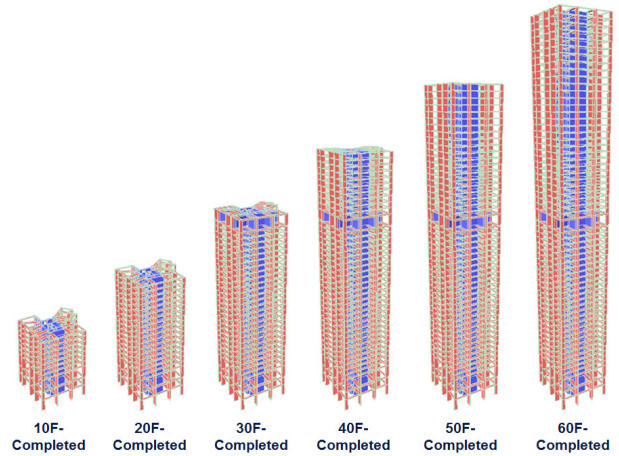


Fig. 2 Numerical models for construction stages

면의 구성은 중앙에 코어 벽체가 존재하며 외부 테두리에 기둥이 존재한다(Fig. 1). 코어 벽체의 두께는 800mm 또는 300mm이며, 아웃리저 벽체의 두께는 800mm이다. 콘크리트 강도는 기둥과 코어벽체의 경우 위치에 따라 60MPa부터 30MPa의 강도를 사용하였다. 무량판 슬래브의 경우 전 층 21MPa를 사용하였고, 아웃리저 벽체의 경우 60MPa의 강도를 사용하였다.

이와 같은 예제 모델에 대하여, 범용구조해석 프로그램인 MIDAS-GEN 8.0.0(MIDAS IT, 2013)을 사용하여 구조해석을 수행하였다. 시공 시점별 분석을 위해 10층, 20층, 30층, 40층, 50층, 60층 완료모델들을 만들어 골조완성도에 따라 분석하였다. 코어벽체의 경우 Wall 요소를 사용하였고 기둥/보의 경우 Beam 요소를 사용하였다. 무량판 슬래브의 경우 유효보(Lee and Kim, 2003)로 치환하여 모델링하였다.

### 2.2 시공 조건

이 연구에서 적용된 예제 모델의 1개 층 시공 기간은 5일로 전 층 동일하게 적용했으며, 마감은 골조 시공 후 5개 층 후행하여 시공함을 가정하였다. 완공 단계를 제외한 6개의 시공 단계 예제 모델들에서 최상부 5개 층은 골조 공사는 완료되었으나 마감은 완료되지 않은 것으로 가정하였다.

콘크리트의 강도와 강성은 콘크리트 구조기준(KCI, 2012)에서 제시하는 식을 적용하여 산정하였다. 골조가 시공되는 건물 상부 5개 층에는 각각 재령 5일, 15일, 20일, 25일의 압축강도와 강성을 적용했고, 나머지 층은 재령 28일에 해당하는 압축강도와 강성을 적용하였다.

콘크리트의 균열에 의한 강성감소를 유효단면으로 고려하기 위한 강성감소 계수를 완공단계와 시공단계 동일하게 적용하였다. 지진하중에 의한 층간변위 검토시와 단면설계를

할 시에는 설계하중 조건을 적용하여 기둥, 벽체(비균열벽체)에는  $0.7I_y$ , 연결보에는  $0.35I_y$ , 유효보에는  $0.25I_y$ 를 사용하였다. 풍하중에 의한 횡변위 검토 시에는 사용하중 조건을 적용하여 기둥, 벽체(비균열벽체)에는  $I_y$ , 연결보에는  $0.5I_y$ , 유효보에는  $0.35I_y$ 를 사용하였다(KCI, 2012).

### 2.3 하중 조건

#### 2.3.1 시공 중 설계하중

시공 중 예제 모델의 구조성능 평가를 하기 위해서 하중조합은 ASCE 37-02(2002)에 따라 적용하였다. 전체적으로 국내 구조기준에서 제시하는 설계조합하중과 비슷하지만, 고정하중 및 풍하중·지진하중과 함께 조합되는 시공활하중의 하중조합계수는 '0.5'를 적용하였다. 시공 단계 및 완공 단계의 활하중에 대한 저감계수는 0.5로 단순화하여 적용했으며, 이와 같은 사항은 Table 1과 같다.

ASCE 37-02에서 제시하는 시공 중 최소 설계하중(minimum design load)을 적용하였으며, 주요사항들은 다음과 같다.

- ① 중력하중은 시공 기간에 따른 저감계수를 적용하지 않는다.
- ② 작업자 및 장비하중 등에 대한 시공 활하중을 적용할 경우 활하중 저감계수를 적용할 수 있다.
- ③ 설계풍속은 시공 기간을 고려하여 기본 풍속을 저감하

여 정의한다.

- ④ 시공 단계에서의 풍하중에 대한 중요도계수는 1.0을 적용한다.
- ⑤ 시공 단계에서의 지진하중에 대한 중요도계수는 1.0을 적용한다.
- ⑥ 고정하중 및 풍하중·지진하중과 함께 조합되는 시공활하중의 하중 조합계수는 0.5를 적용한다.

초고층 건물의 시공 기간이 일반적으로 2~5년인 것을 고려하여 ASCE 37-02에서 제시하는 기본풍속 저감계수 0.9를 적용하였다(Rowsky, 1995; Choe *et al.*, 2013).

#### 2.3.2 예제모델 하중조건

##### 1) 중력하중 및 시공활하중

완공단계에서 적용되는 중력하중은 Table 2와 같다. 시공 단계의 해석 모델들에는 마감의 완료 여부에 따라, 골조시공 및 마감이 진행되는 상부 5개 층과 마감이 완료된 층으로 구분하여 시공활하중을 적용하였다. 골조 및 마감 시공이 진행되고 있는 상부 5개 층에는 실제 시공과 유사하게 하중을 적용하기 위해 코어외측과 코어내측을 구분지어 하중을 적용하였다. 코어외측에는 시방서(AIK, 2013)에서 제시하는 콘크리트 타설시 최소 활하중인  $2.5\text{kN/m}^2$ 을 적용했고, 코어내측에는 시스템 거푸집, 타워크레인 등의 중량기기의 하중을 감안하여 전동식 카트장비를 이용한 콘크리트 타설하중인  $3.75\text{kN/m}^2$ 을 적용하였다.

마감이 완료된 나머지 하부 층에는 장비나 건설인원이 거의 출입하지 않는다고 가정하여, 건축구조기준(AIK, 2009)에서 제시하는 최소 활하중( $1.0\text{kN/m}^2$ )을 코어외측과 내측 동일하게 적용하였다.

##### 2) 풍하중 및 지진하중

완공단계의 풍하중 및 지진하중은 국내 구조기준(AIK, 2009)에 따라 적용했으며, 시공단계에 따른 조건은 ASCE 37-02를 반영하여 일부 조정하였다.

Table 1 Load combinations

	Models During Construction	Design Model
LCB1	1.4D	1.4D
LCB2	1.2D+1.6(0.5CL)	1.2D+1.6(0.5L)
LCB3	1.2D+1.3Wx+0.5(0.5CL)	1.2D+1.3Wx+0.5L
LCB4	1.2D+1.3Wy+0.5(0.5CL)	1.2D+1.3Wy+0.5L
LCB5	1.2D-1.3Wx+0.5(0.5CL)	1.2D-1.3Wx+0.5L
LCB6	1.2D-1.3Wy+0.5(0.5CL)	1.2D-1.3Wy+0.5L
LCB7	1.2D+1.0Rx+0.5(0.5CL)	1.2D+1.0Rx+0.5L
LCB8	1.2D+1.0Ry+0.5(0.5CL)	1.2D+1.0Ry+0.5L
LCB9	1.2D-1.0Rx+0.5(0.5CL)	1.2D-1.0Rx+0.5L
LCB10	1.2D-1.0Ry+0.5(0.5CL)	1.2D-1.0Ry+0.5L
LCB11	0.9D+1.3Wx	0.9D+1.3Wx
LCB12	0.9D+1.3Wy	0.9D+1.3Wy
LCB13	0.9D-1.3Wx	0.9D-1.3Wx
LCB14	0.9D-1.3Wy	0.9D-1.3Wy
LCB15	0.9D+1.0Rx	0.9D+1.0Rx
LCB16	0.9D+1.0Ry	0.9D+1.0Ry
LCB17	0.9D-1.0Rx	0.9D-1.0Rx
LCB18	0.9D-1.0Ry	0.9D-1.0Ry

D: Dead Load, L: Live Load, CL: Construction Live Load, Wx, Wy: Wind Load, Rx, Ry: Earthquake Load

Table 2 Floor loads

Side	Floor	Load(kN/m <sup>2</sup> )		
		DL	SDL	LL
Outside Core	Typical	5.04	2.38	2.0
	Roof	5.04	2.65	2.0
	Outrigger	12.0	2.38	2.0
Inside Core	Typical	4.32	1.3	3.0
	Roof	5.04	2.65	2.0
	Outrigger	12.0	1.3	2.0

DL : Dead Load(Self-Weight)

SDL : Superimposed Dead Load, LL : Live Load

풍하중의 경우 기본풍속 30m/sec를 완공단계에 적용했으며 시공단계의 경우 기본풍속 저감계수 '0.9'를 반영하여 27 m/sec를 적용하였다. 완공단계의 중요도계수는 1.1을 적용했으며 시공단계의 경우 1.0을 적용하였다. 지형계수는 완공 단계와 시공단계 모두 1.0을 적용했으며, 가스영향계수는 공진효과를 무시할 수 없는 건축물이라 가정하여 유연구조물로 각 해석모델의 고유치해석 결과에 따라 기본진동수를 적용하여 산정하였다.

지진하중의 경우 지역계수는 서울시에 해당하는 0.176을 사용했으며, 지반조건은  $S_c$ 로 가정하였다. 완공단계의 경우 중요도계수를 5층 이상인 오피스텔로 하여 1.2를 적용했으며 시공단계는 1.0을 적용하였다. 내진 설계 범주는 'C'에 해당하여 동적해석법을 적용했으며, 지진력저항시스템은 완공 단계에서 철근 콘크리트 특수전단벽을 적용하였다.

시공 중 일부 해석모델의 경우 골조 시공 순서에 따라 아웃리거 층에 도달하기 전의 시공단계이다. 따라서, 아웃리거의 시공 유무에 따라, 코어와 외부 골조의 횡력저항 기여 비율이 달라질 수 있으며, 지진하중을 적용하기 위한 지진력 저항시스템을 다르게 정의할 필요가 있다. 이를 분석하기 위하여 해석 모델별로 코어벽체와 외부 골조의 횡강성비 및 기본 지진력 저항시스템을 검토하였다(Table 3).

국내 구조기준(AIK, 2009)에서 이중골조시스템에서 전체 지진력은 각 골조의 횡강성비에 비례하여 분배하되 모멘트 골조가 설계지진력의 최소한 25%를 부담하도록 정의하고 있다. Table 3에서 각 해석 모델별로 동일한 설계 지진력에 대하여 코어벽체와 외부 골조가 함께 저항하는 횡변위 ( $\Delta_{W+F}$ )와 외부 골조를 제외한 코어벽체만으로 저항하는 횡변위 ( $\Delta_W$ )를 산정하여, 코어벽체의 횡강성 기여비율( $\Delta_{W+F}/$

**Table 3** Seismic force-resisting systems

Model	Displacement(mm)		Rigidity Contribution of Core Wall, $\Delta_{W+F}/\Delta_W$ (%)	Seismic Force Resisting System
	Dual System Model, $\Delta_{W+F}$	Core Wall Model, $\Delta_W$		
Design	238.6	478.5	50	Dual
10F-Completed	6.4	6.8	94	Building Frame
20F-Completed	21.4	23.5	91	Building Frame
30F-Completed	40.2	63.0	64	Dual
40F-Completed	60.8	112.4	54	Dual
50F-Completed	123.2	243.4	51	Dual
60F-Completed	235.0	471.0	50	Dual

$\Delta_W$ )을 통해 코어벽체와 외부 골조의 지진력 부담 비율을 확인하였다. 아웃리거가 설치된 이후의 시공단계인 30층, 40층, 50층, 60층 완료모델의 경우, 아웃리거에 의해 외부 골조의 횡력저항 기여도가 충분히 높으므로(25% 이상), 특수모멘트 골조를 가진 이중골조시스템의 철근콘크리트 특수전단벽에 해당하는 반응수정계수(R)인 7을 적용하였다. 이에 반해, 아웃리거가 설치되지 않은 시공단계인 10층, 20층 완료모델의 경우(외부 골조의 지진력 부담비율 25% 미만), 건물골조시스템의 철근콘크리트 특수전단벽에 해당하는 반응수정계수 6을 적용하였다.

### 3. 시공 중 구조거동 분석

#### 3.1 고유치 해석결과

완공단계와 각 시공단계별 횡력저항성능을 비교하기 위해 고유치해석을 수행하였다. 기본주기 값이 클수록 건물은 유연하고, 기본주기의 값이 낮을수록 횡력저항성능이 높은 구조물로 평가될 수 있다. Table 4는 완공단계와 설계단계의

**Table 4** Result of modal analysis

Model	1st Mode	2nd Mode	3rd Mode
Design	6.0s Dx 66.8 %	4.7s Dy 65.6 %	3.6s Rz 77.4 %
	0.6s Rz 64.0 %	0.5s Dx 64.1 %	0.4s Dy 69.6 %
	0.8s Dx 63.5 %	1.1s Rz 59.5 %	0.9s Dy 61.2 %
10F Completed	2.3s Dx 71.8 %	1.9s Rz 54.3 %	1.7s Dy 48.3 %
20F Completed	3.2s Dx 72.1 %	2.6s Dy 48.4 %	2.3s Rz 53.1 %
30F Completed	4.5s Dx 69.9 %	3.5s Dy 63.7 %	2.9s Rz 72.7 %
40F Completed	6.0s Dx 66.8 %	4.7s Dy 65.6 %	3.6s Rz 77.4 %

고유치해석 결과로서, 각 시공 시점별 해석 모델들의 1~3차 모드의 고유형상과 고유주기 및 주방향과 질량참여율을 제시하고 있다.

완공단계에서의 최저차 모드는 X방향의 휨변형으로 확인되었으며, 시공단계의 해석모델들의 경우에는 골조의 완성도가 완공단계에 가까워짐에 따라 최저차 모드와 주기가 완공단계 해석모델의 결과와 비슷해졌다. 골조 완성도가 가장 낮은 10층 시공단계의 경우 최저차 모드로 비틀림이 발생하였는데, 이는 골조의 높이가 낮아 휨에 대한 강성이 크기 때문이다.

### 3.2 횡하중에 의한 안정성 검토

Fig. 3은 완공단계 모델과 시공단계의 골조완성도에 따른 각 예제모델들의 풍하중(층하중), 층전단력, 전도모멘트를 비교한 그림이다. 골조의 높이가 증가함에 따라 동일 층에서 발생하는 풍하중이 증가하였는데, 이는 지붕면의 평균높이가 증가하여 풍하중의 설계풍압이 증가했기 때문이다. 시공단계에서 기본풍속과 중요도계수의 저감에 따라 층하중이 상당히 감소하여, 층전단력과 전도모멘트가 완공단계에 비하여 낮게 산정됐다.

Table 5는 각 예제모델의 풍하중에 의한 최상층의 횡변위비를 나타낸 것이다. 시공단계는 골조의 높이가 낮을수록 바람에 대한 횡변위비가 낮음을 알 수 있다. 시공 중인 60F 모델의 경우에도 완공단계에 비하여 횡변위가 현저히 낮음을 보였는데, 이는 앞서 층하중의 결과처럼 중요도계수의 감소와 기본풍속의 저감으로 인한 결과로 해석된다. 결론적으로 예제모델에서는 완공단계에서 풍하중에 대한 구조적 안정성이 검증된다면 시공 중에는 풍하중에 의한 구조적 문제가 없

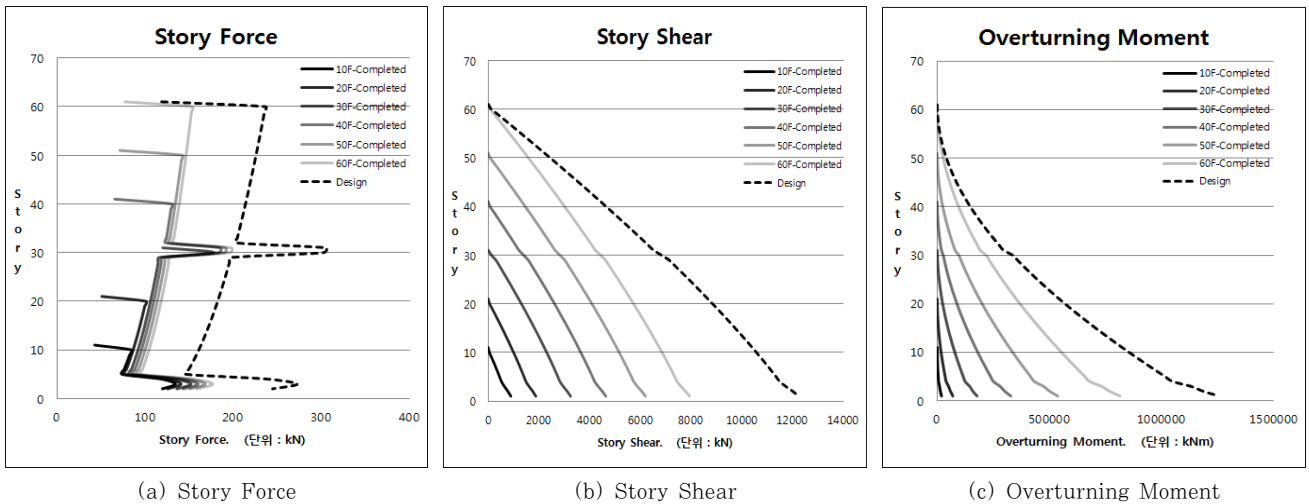
**Table 5** Lateral displacements ratio for wind load

Model	Height (m)	Displacement (mm)		Displacement Ratio to Height
		X-dir	Y-dir	
Design	186.2	X-dir	399.5	H/466
		Y-dir	315.4	H/590
10F-Completed	37.7	X-dir	1.1	H/34559
		Y-dir	1.5	H/27100
20F-Completed	66.8	X-dir	7.6	H/8843
		Y-dir	7.5	H/8878
30F-Completed	98.9	X-dir	23.9	H/4136
		Y-dir	23.3	H/4242
40F-Completed	127.9	X-dir	57.9	H/2210
		Y-dir	53.3	H/2400
50F-Completed	157.1	X-dir	127.4	H/1229
		Y-dir	108.8	H/1443
60F-Completed	186.2	X-dir	259.1	H/718
		Y-dir	205.4	H/906

는 것으로 판별된다. 다만, 부등축소에 의한 아웃리거의 부가응력 발생을 방지하기 위하여 지연접합 등을 통해 전체 골조의 완공 시점에 아웃리거가 횡력저항시스템에 포함될 경우, 시공 중 골조의 횡력저항성능이 크게 감소하므로 이에 대한 추가적인 검토가 필요할 수 있다.

지진하중에 대하여 Fig. 4와 같이 층하중과 층전단력, 전도모멘트를 검토하였다. 10F, 20F 완료단계 모델들은 기본주기의 증가에 따른 응답가속도값의 증가로 지진하중이 상대적으로 컸으며, 골조완성도가 같은 60F 완료단계 모델과 완공단계의 모델은 장주기 효과에 의해 거의 같은 지진하중을 가졌다.

지진하중에 대한 층간변위비의 비교 결과를 보면(Fig. 5), 완공단계 모델과 시공단계의 60F 모델의 경우 지진하중은 거의 같은 값이었으나 층간변위비의 경우 중요도계수의 차이



**Fig. 3** Comparisons of wind load

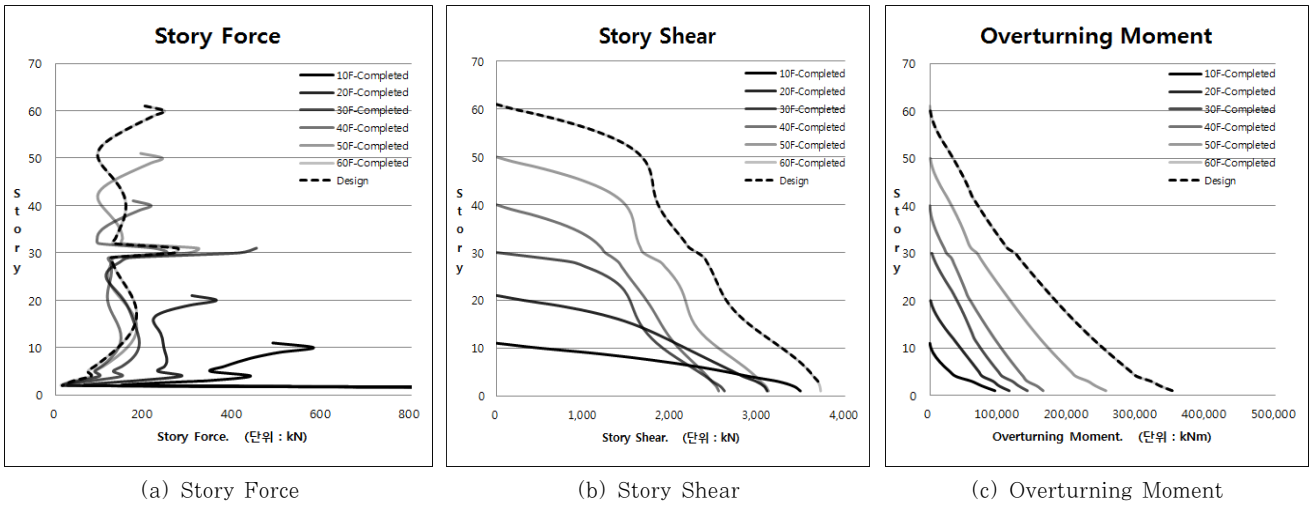


Fig. 4 Comparisons of seismic load

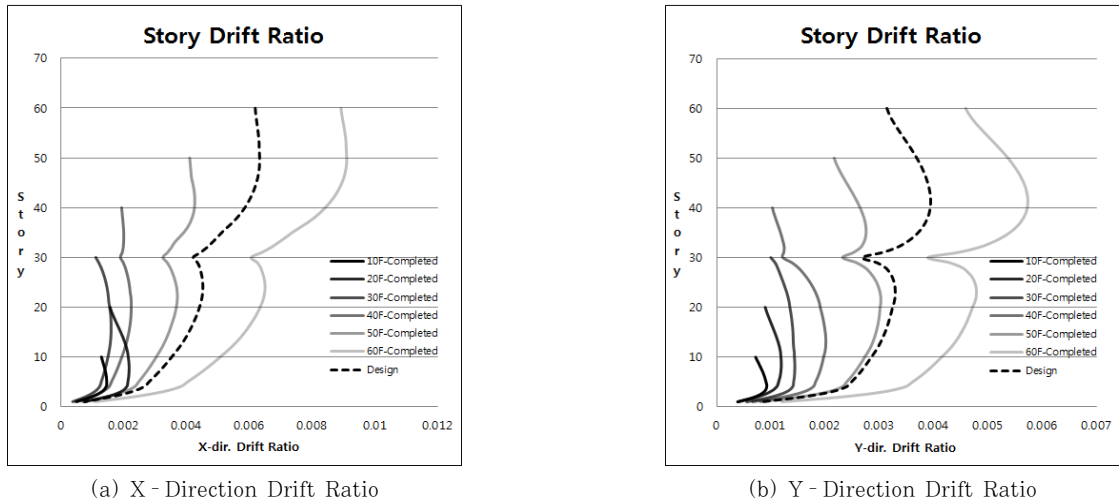


Fig. 5 Story drift ratio for seismic load

로 인해 시공단계에서 증가함을 알 수 있다. 다만, 완공단계 모델은 내진등급 'I'에 대하여 허용 층간변위비는 0.015에 해당한다. 일부 모델의 경우 시공단계에서의 층간변위비가 완공단계보다 증가함을 보였더라도 구조기준에 제시하는 허용 범위 이내를 유지하였으며 설계에 대한 특별한 변경을 요구할 정도의 증가는 발생하지 않았다. 다만, 완공단계의 설계 시 층간변위비의 충분한 여유가 없을 경우, 시공단계에서 허용 층간변위비를 초과하는 경우가 생길 수 있다.

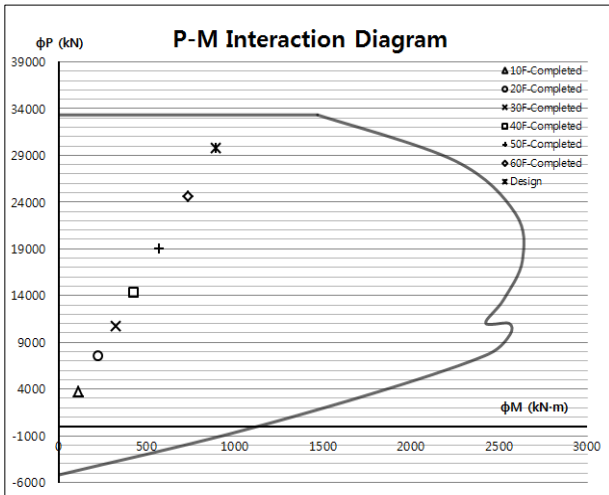
4. 시공 중 단면 성능 분석

앞서 검토한 중력하중, 풍하중, 지진하중에 대하여 Table 1에서 제시한 조합하중을 적용하여 부재의 단면 성능을 검토하였다. 예제 모델의 보, 기둥, 벽체에 대하여 완공 단계와 시공 단계에서의 부재의 설계강도에 대한 소요강도의 비율

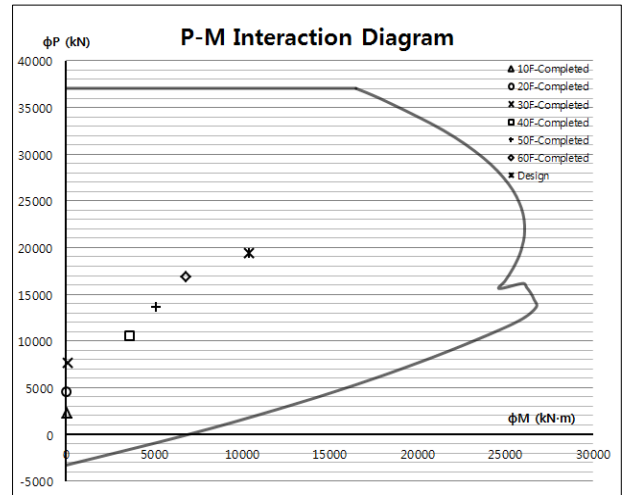
설계강도비로 정의하여 단면 성능을 검토하였다. 기둥 및 벽체와 같은 수직부재는 축력과 모멘트의 상관관계를 통해 단면성능을 검토할 수 있다. 모든 기둥과 벽체 단면의 축력-모멘트 상관관계에 대한 검토를 수행하였으며 Fig. 6은 일부 결과를 정리한 것이다. 부재 설계강도의 축력-모멘트 상관곡선에 완공단계와 시공단계에 대한 부재의 소요강도( $P_u$ ,  $M_u$ ) 데이터를 나타낸 것이다.

모든 부재들은 골조완성도가 높아짐에 따라 소요강도가 증가하며 설계강도에 근접해 갔다. Fig. 6(b)의 경우, 아웃리거 벽체의 시공 여부가 코어 벽체의 하중 분포에 영향을 줌으로써 시공단계별로 축력의 편심거리의 변화가 발생하였다.

이와 같이 기둥과 벽체의 경우 축력과 모멘트의 조합을 통해 단면 성능이 검토되나, 이 연구에서는 작용하중과 동일한 편심비를 가질 때의 설계축력과 작용축력의 비를 기둥의 설계강도비로 정의하고, 이를 통해 단면의 안전성을 검토하였다.

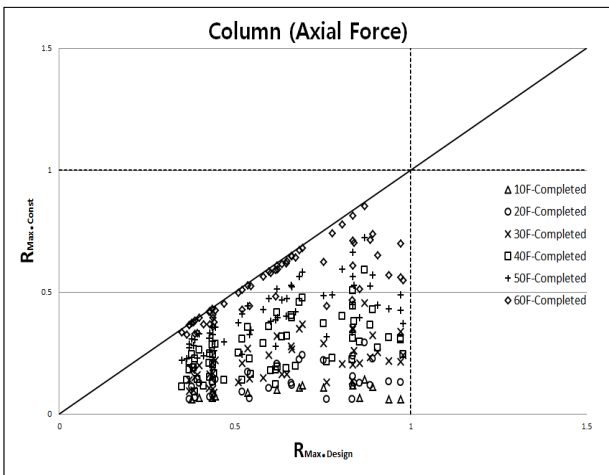


(a) Column No.4(1F-10F)

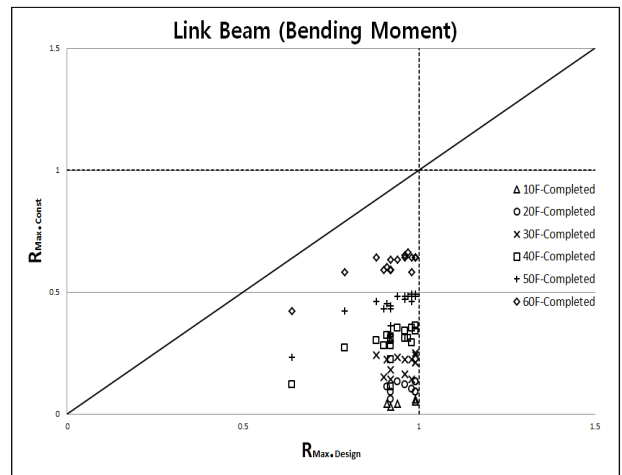


(b) Wall No.15(1F-10F)

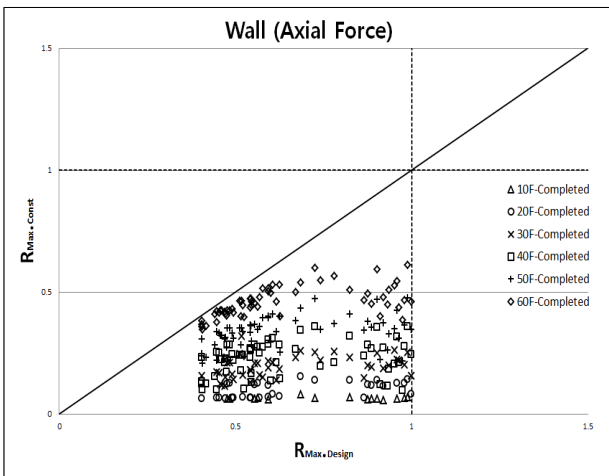
Fig. 6 P-M Interaction diagram



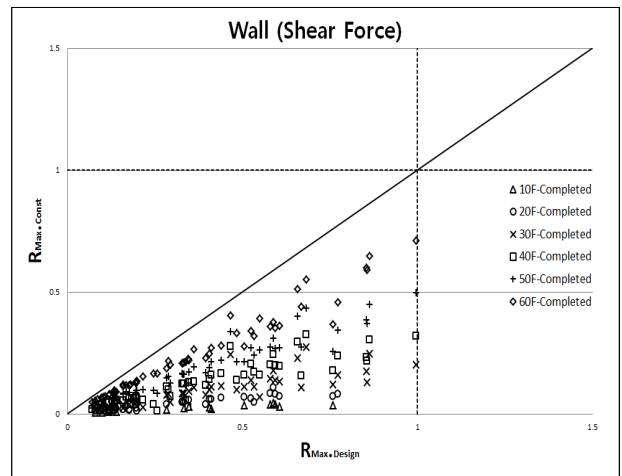
(a) Axial Force in Column



(b) Bending Moment in Link Beam



(c) Axial Force in Wall



(d) Shear Force in Wall

Fig. 7 Result summary of design ratio

식 (1)과 (2)는 각각 완공단계와 시공단계에서의 기둥 설계 강도비를 산정한 것이다.

$$R_{design} = \frac{P_{u.design}}{\phi P_{n.design}} \quad (1)$$

$$R_{const} = \frac{P_{u.const}}{\phi P_{n.const}} \quad (2)$$

여기서,  $R$  : 설계강도비,  $P_u$  : 소요압축강도,  $\phi P_n$  : 설계압축강도,  $design$  : 설계대상인 완공단계를 나타내는 아래첨자,  $const$  : 시공단계를 나타내는 아래첨자이다.

벽체에 대해서도 기둥과 같은 방법으로 설계강도비를 정의하여 완공단계와 시공단계의 설계강도비를 비교하였다. 다만, 벽체는 추가적으로 전단력에 대한 설계강도비를 추가적으로 검토했으며, 연결보의 경우 휨에 대한 검토하였다.

Fig. 7은 완공단계와 시공단계의 설계강도비 비교를 제시하고 있다. 기둥은 축력에 대한 설계강도비를 정리하였으며, 벽체는 축력과 전단력, 연결보는 휨모멘트에 대하여 정리하였다. 그래프의 세로축은 시공 중 부재단면의 최대 설계강도비( $R_{max.const}$ )를 나타내고, 그래프의 가로축은 완공단계 모델의 최대 설계강도비( $R_{max.design}$ )를 나타낸다. 부재단면의 최대 설계강도비란 동일 단면으로 설계되는 부재들의 설계강도비를 비교한 최대값을 의미한다. Fig. 7에서 각 부재의 데이터가 대각선상에 위치할 경우 완공단계와 시공단계에서 설계강도비가 동일한 단면을 의미하고, 대각선보다 아래에 있는 경우는 완공단계보다 시공단계에서 하중을 더 작게 받은 것을 의미한다. 대각선의 위쪽에 있는 것은 동일한 부재에 완공단계보다 시공 중에 더 큰 하중을 받았다는 것을 의미한다.

Fig. 7에서 부재단면의 성능을 검토한 결과, 시공 중의 연결보, 기둥, 벽체의 모든 설계강도비가 1.0을 넘지 않았다. 시공단계의 해석모델에서 골조완성도가 높아질수록 동일한 부재의 설계강도비는 증가했으나, 모든 부재들의 설계강도비는 구조설계 대상인 완공단계의 설계강도비를 초과하지는 않았다. 따라서 완공단계에서 단면의 구조성능이 충분히 확보된다면 시공단계에서도 안전이 확보될 것이다.

## 5. 결 론

60층 규모의 철근콘크리트 주상복합 건물을 대상으로 하여 시공 중 구조성능을 분석하기 위해 시공 시점별 해석모델을 구성하고 적절한 하중조건을 적용하여 횡력저항성능 및 단면성능을 분석하고 완공단계와의 비교를 수행하였다. 이에 따른 주요 검토 사항은 다음과 같다.

- ① 시공 중 설계하중은 시공조건을 고려하여 구조기준에 제시된 조건을 적절히 변경하여 적용하였다. 시공할 하중은 시공조건을 고려하여 적절한 값을 적용하여야 하며, 풍하중 및 지진하중의 경우 기본풍속 및 중요도계수를 저감하여 적용할 수 있다.
- ② 풍하중에 대한 검토 결과, 기본풍속의 저감과 중요도계수의 감소로 인하여 완공단계보다 낮은 풍하중이 작용하였으며, 시공 중에는 풍하중에 의한 횡변위에 이상이 없음을 확인하였다.
- ③ 지진하중의 경우, 시공단계에서의 건물 중량이 감소하나 기본주기의 감소로 인하여 완공단계보다 지진하중과 층간변위비가 증가하는 구간이 일부 발생하나, 허용층간변위비를 초과하는 경우는 발생하지 않았다.
- ④ 부재 단면설계를 검토한 결과, 시공 중 골조완성도가 높아짐에 따라 시공 중의 설계강도비가 증가함을 알 수 있었다. 시공 중의 부재가 완공단계의 부재의 설계강도비를 초과하는 경우는 없었다. 콘크리트 재령에 의해 설계시의 강도·강성이 확보되지 않은 부재들은 단면의 성능이 확보되지 않았으나, 부재에 큰 하중이 재하되지 않아서 구조적인 안전성에는 문제가 없었다.

이와 같이 예제모델에 대하여 시공 중 구조성능을 검토하는 조건 및 과정을 제시하였으며, 이 연구에서 예제모델로 사용한 일반적인 주거용 철근콘크리트 초고층 건물에서는 설계조건에서의 안전성이 확보된다면 시공단계에서도 충분한 구조성능이 확보됨을 확인하였다. 그러나 시공 중 일부 횡력저항시스템의 시공이 지연되어 골조의 횡력저항성능이 크게 감소하거나 지진하중에 의해 구조성능이 지배되는 경우에는 시공 중 부재의 성능이 취약할 가능성이 있으므로 이에 대한 추가적인 검토가 요구된다.

## 감사의 글

이 논문은 2013년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

## References

- AIK (2009) Korean Building Code and Commentary, p.1039.
- AIK (2013) Korean Architectural Standard Specification, p.1784.
- ASCE 37-02 (2002) Design Loads on Structures During Construction, p.36.



- Choe, M.M., Eom, T.S., Kim, J.Y.** (2013) An Analysis of Structural Behaviors during Construction for Twisted High-Rise Steel Buildings, *J. Arch. Inst. Korea (Structure)*, 29(12), pp.45~53.
- Eom, T.S., Kim, J.Y.** (2009) An Application of Construction Sequence Analysis for Checking Structural Stability of High-Rise Building under Construction, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 22(3), pp.211~221.
- Ha, T.H., Lee, S.H., Tak, S.Y., Oh, B.H.** (2011) Guideline for Building Movement during Construction of High-Rise Buildings, *J. Korea Concr. Inst.*, pp.749~750.
- KCI** (2012) Concrete Design Code and Commentary, p.600.
- KIM, H.S., Shin, S.H.** (2010) Effects of Differential Column Shortening on Internal Member Forces of Tall Buildings, *J. Arch. Inst. Korea (Structure)*, 26(5), pp.35~42.
- Kurc, O., Lulec, A.** (2013) A Comparative Study on Different Analysis Approaches for Estimating the Axial Loads on Columns and Structural Walls at Tall Buildings, *Struct. Design of Tall & Spec. Build.*, 22(6), pp.485~499.
- Kwak, H.G., Kim, K.J.** (2006) Time-dependent Analysis of RC Frame Structures Considering Construction Sequences, *Build. & Environ.*, 41(10), pp.1423~1434.
- Lee, S.H., Ha, T.H., Tak, S.Y.** (2013) Prediction of Lateral Deformation of Tall Building during Construction, *J. Korea Concr. Inst.*, pp.73~74.
- Lee, Y.W., Kim, J.U.** (2003) An Analysis of the Flat Plate Structure with Simplified Equivalent Beam Model, *J. Arch. Inst. Korea (Structure)*, 19(11), pp.57~64.
- MIDAS IT** (2013) MIDAS Structural Technical Lecture Series
- Jayasinghe, M.T.R., Jayasena, W.M.V.P.K.** (2004) Effect of Axial Shortening of Columns on Design and Construction of Tall Reinforced Concrete Buildings, *Pract. Period. Struct. Design & Constr.*, pp.70~78.
- Pan, L.B., Liu, P.C., Bakoss, S.L.** (1993) Long-Term Shortening of Concrete Columns in Tall Buildings, *J. Struct. Eng.*, 119(7), pp.2258~2262.
- Rosowsky, D.V.** (1995) Estimation of Design Loads for Reduced Reference Periods, *Struct. Safety*, 17(1), pp.17~32.

## 요 지

근래 국내 초고층 주상복합 건물에는 철근콘크리트구조가 보편적으로 적용되는데, 이러한 철근콘크리트 초고층 주상복합 건물은 시공 시점에 따라 구조적인 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 시공 중인 철근콘크리트 초고층 주상복합 건물에 대하여, 시공 시점별 구조 안전성 및 횡력저항성능을 검토하고자 한다. 이를 위해, 예제 모델로 탑상형의 초고층 주상복합 60층 건물을 선정했고, 기존의 범용구조해석 프로그램을 사용하여 구조해석을 수행하였다. 각 시공 시점별 10층, 20층, 30층, 40층, 50층, 60층 완료모델과 60층 완공단계 모델의 구조성능을 비교하였다. 구조성능 비교를 위해 이 모델들의 고유치해석을 수행하였으며, 횡력저항성능과 부재별 단면성능을 검토하였다. 횡력저항성능 검토를 위해 횡변위비와 층간변위비를 검토했고, 부재별 단면성능 검토는 완공단계에 대한 설계강도비와 시공단계의 설계강도비를 비교하여 부재안전성을 검토하였다. 이 연구를 통해, 시공 중인 철근콘크리트 초고층 건물의 구조 안전성을 검토하고 시공단계에 적합한 구조해석 및 설계하중의 가이드라인을 제시하고자 한다.

**핵심용어** : 초고층, 주상복합, 철근콘크리트, 시공, 시공단계해석