

## 건축구조물의 상부구조-하부구조 분리해석과 일체해석의 비교분석

김 재 요<sup>1</sup> · 김 진 용<sup>2</sup> · 강 수 민<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>광운대학교 건축공학과, <sup>2</sup>충북대학교 건축공학과

## Comparison of Super Structure-Sub Structure Separation Analysis and Unification Analysis about Building Structures

Jae-Yo Kim<sup>1</sup>, Jin-Yong Kim<sup>2</sup> and Su-Min Kang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Architectural Engineering, Kwangju University, Seoul, 01897, Korea

<sup>2</sup>Department of Architectural Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk, 28644, Korea

### Abstract

In the case of structural analysis for building structures, the super-structure and the sub-structure are analyzed by using separate structural models in the field because of time saving, facile result interpretation and easy analysis of dynamic behavior. However this separate structural model violated the compatibility condition of structural analysis and it can not consider the interaction of super- and sub- structures. In the present study, the analysis results of this separate model were compared to those of the unified model of super- and sub- structures which can consider the interaction of super- and sub- structures and reflect the realistic boundary conditions. According to the comparison results, the the analysis model using separate models can underestimate the member force and deflection of structural members in the super-structures and overestimate the deflection and member force of sub-structures. Therefore, in the case of high-rise buildings, irregular shaped buildings, buildings which are expected to be affected by large differential settlement and remodeling buildings, the unified structural model for super- and sub- structures was recommended for structural analysis instead of the separate structural model.

**Keywords** : building analysis, separate model, unified model, interaction of super- and sub-structures

### 1. 서 론

최근 건축물의 구조해석과 설계에 있어 컴퓨터의 발달로 인하여 매트릭스해법을 이용한 유한요소해석을 대부분 사용한다. 그런데 실무에서는 건축물을 구조설계함에 있어 기초 구조물(sub-structure 또는 footing)을 상부구조(super-structure)와 분리하여 해석/설계한다. 이와 같이 건축물의 기초 구조물을 상부구조물과 분리하여 구조해석을 수행하는 이유는 일반적으로 건축물의 상부구조물은 보-기둥요소와 면내요소로 모델링이 가능한 반면 기초구조물은 면외방향 하중을 받는 면부재 또는 입체부재 형태로 모델링을 해야 하기 때문에

하부구조물과 상부구조물을 함께 구조해석을 수행할 경우에는 요소생성의 어려움, 매트릭스 구조해석을 위한 절점수 및 해석량의 급격한 증가, 동적해석을 위한 모드해석의 어려움, 수치해석결과의 복잡성(일반적인 경우, 건축구조설계에서는 축력, 모멘트, 전단력과 같은 부재력 차원에서 구조설계를 수행하나 면부재 또는 입체부재 등을 사용하여 구조해석을 수행하는 경우, 해석결과값이 응력단위로 표현되기 때문에 실무에서는 이를 부재력으로 치환하는 작업을 한번 더 수행해야 하고 이로 인해 작업의 효율성이 떨어진다.) 등이 수반되기 때문이다. 따라서 상·하부 구조 일체해석 및 설계시, 구조해석 시간이 크게 증가하여, 구조해석 및 설계의 실무적 작업효율을

\* Corresponding author:

Tel: +82-43-261-2436; E-mail: kangsm@cbnu.ac.kr

Received August 31 2015; Revised October 1 2015;

Accepted October 2 2015

©2016 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.

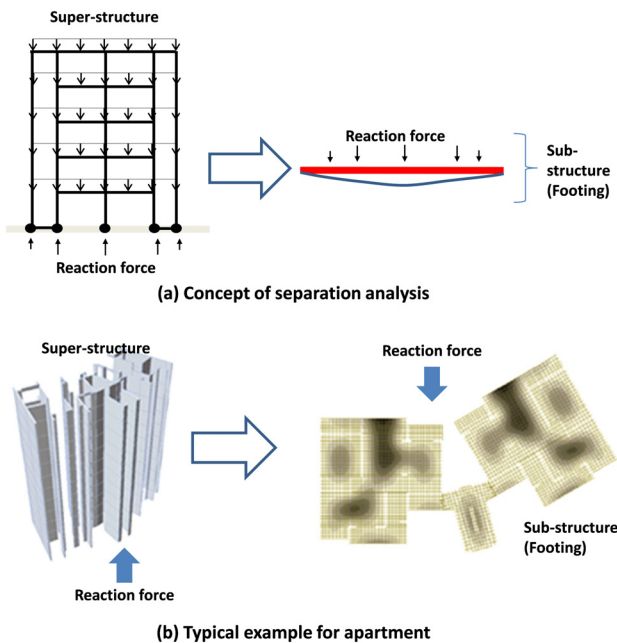


Fig. 1 Typical structural analysis process for building structure

저하시킨다. 이와 같은 이유로 현재 실무에서는 건축물의 구조 해석/설계를 수행함에 있어 Fig. 1과 같이 상부구조물 지지점에서의 변위는 모두 고정으로 가정한 후에, 상부 구조물을 우선적으로 구조해석/설계하고 해석결과로 산출되는 고정지지점에서의 반력을 기초구조물의 하중으로 사용한다. 기초구조물 설계와 해석을 위해서는 기초구조물에 최적화된 프로그램을 사용하여 사전에 상부구조물 해석으로 구한 하중을 별도로 모델링된 기초구조물에 재하함으로써 구조해석과 설계를 수행한다(Lee *et al.*, 2009).

하지만 이와 같이 상부구조물과 기초구조물을 별도로 구조해석할 경우, Fig. 2와 같이 상부구조물의 고정지지점과 변형된 기초구조물은 실제 연결된 지점에서 변위차가 발생하여 구조해석의 기본요건인 변형적합성 조건을 만족하지 못하게 된다. 뿐만 아니라 상부구조물과 기초구조물의 구조적 상호작용을 고려하지 못하기 때문에 실제 거동과는 상이한 해석결과를 가져올 수 있다. 한편, 기계 및 항공분야 등에서는 대형구조물의 구조해석 효율을 증대시키기 위해서 Global-local analysis method(Voleti *et al.*, 1996), Parallel computational method(Liu and Wu, 1993; Yagawa and Shiyao, 1993) 등과 같은 해석기법이 제안되었으나 건축 실무에서는 앞서 언급한 상부구조물-기초구조물 분리해석 방법이 철저한 검증없이 사용되고 있는 실정이다. 최근 국내에서도 건축물의 기초구조물의 설계에 있어서 상부구조물의 강성을 반영하기 위한 방안(Lee *et al.*, 2009)이 제안되었다. 또한 구조물의 지진하중에 대한 동적해석에 있어 상부구조물-하부구조물

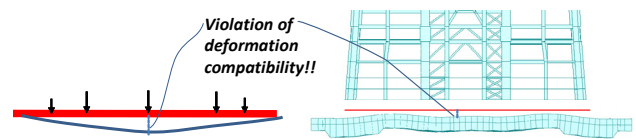


Fig. 2 Typical structural analysis process for building structure

상호작용에 대한 연구(Kim *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2011)도 진행되었으나 아직까지 분리해석 방법의 유효성과 한계에 대한 종합적인 분석자료는 부족한 실정이라고 할 수 있다. 또한 지진하중과 같은 동적 횡하중 뿐만 아니라 구조물의 부등침하 등에 큰 영향을 미치는 상재(常載)하중(고정하중이나 적재하중)에 대한 분리해석 방법의 유효성 검증도 추가되어야 할 것이다. 본 연구에서는 실무에서 사용하는 상부구조물-기초구조물 분리해석 방법의 유효성과 한계를 분석하기 위하여, 현존하는 초고층 건축물 중에서 대표적인 철골구조물을 대상으로 상부구조물과 기초구조물을 전체를 모델링하여 구조체의 거동을 실제와 가깝게 구조해석 했을 경우(이하 “일체해석”이라 칭함)와 현재 실무에서 사용하는 방법과 같이 상부구조물과 기초구조물을 분리하여 구조해석했을 경우(이하 “분리해석”이라 칭함)의 해석결과 차이를 종합적으로 비교분석하였다. 특히 본 연구에서는 구조물의 부등침하 등에 큰 영향을 미치는 상재(常載)하중에 대한 분리해석 방법의 유효성을 분석하였다. 또한 분석결과를 토대로 현재 실무에서 사용하는 분리해석 방법의 한계와 설계고려사항을 제안하였다.

## 2. 철골구조 초고층 건축물의 상부구조-하부구조 분리해석과 일체해석 구조해석모델

초고층 건축물의 경우, 상부구조-하부구조의 상호작용이 클 것으로 예상되기 때문에, 본 연구에서는 초고층 철골구조 건축물을 연구대상으로 선정하였다. 초고층 철골구조 건물에 대한 3차원 구조해석모델 구현에 있어 일반적으로 실무에서 사용하는 방식인 상부구조-하부구조 분리해석 모델과 비교분석을 위한 상부구조-하부구조 일체해석 모델을 구성하였다. 대상 건물은 실제 현존하는 높이 500m 이상의 초고층 건물로서(Shieh *et al.*, 2003; Kang *et al.*, 2010), 횡력저항 시스템은 철골 가새 코어(22.5m×22.5m)와 CFT 각형 기둥(최대 단면 2.4m×3.0m), 철골 트러스 아웃리저로 구성되어 있으며, 기초시스템은 전면기초(두께 3.0~4.7m)와 파일(직경 1.5m, 총 381개)로 구성된 파일지지 전면기초시스템(piled mat foundation system)이 적용되었다(Fig. 3 참조). 본 건축물을 선택한 이유는 비교결과 분석을 용이하게 하기 위해서 실제 존재하는 초고층 건축물 중에서 대칭의 구조형식을

가지고 있는 건축물을 선택하였다. 본 건축물의 구조해석을 위하여, MIDAS-GEN 프로그램이 사용되었으며, 기둥 및 보는 보 요소로, 가새는 트러스 요소로 모델링되었다. 전면기초는 입방체 요소로서, 파일은 축강성만을 갖는 스프링 지지요소로 모델링되었다. 이 때, 기초 침하의 분포만을 연구대상으로

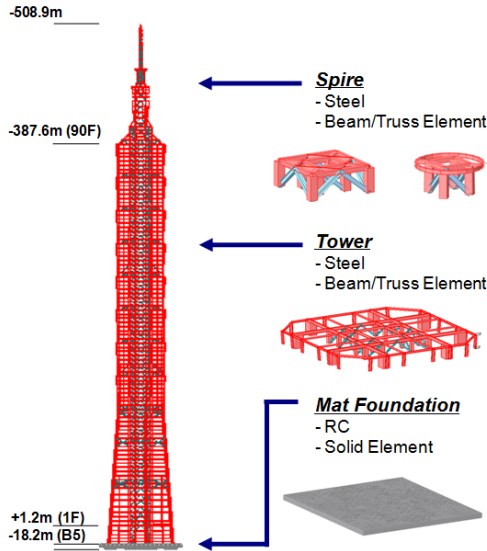
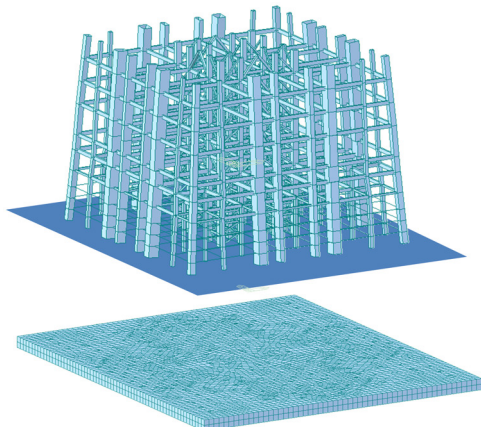
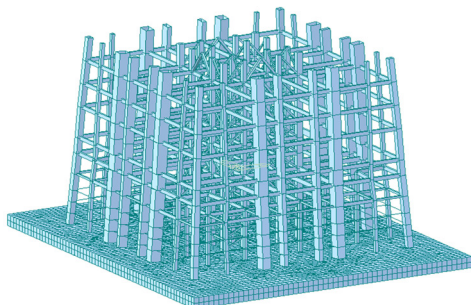


Fig. 3 High-rise building for analysis study



(a) Super-/Sub-structure separation model ( model A)



(b) Super-/Sub-structure unification model (model B)

Fig. 4 Separation model(model A) vs. unification model(model B)

하므로, 해석의 단순화를 위하여 파일의 비선형 거동 특성은 무시하고, 파일 스프링 강성은 상수값(900kN/mm)을 적용하였다. Fig. 4(a)는 분석대상 초고층 건축물을 일반적으로 실무에서 사용하는 방식으로 구조해석모델을 구현한 상부구조-하부구조 분리해석 모델(model A)을 보여주고 있으며 Fig. 4(b)는 비교분석을 위한 일체모델(model B)를 보여주고 있다.

### 3. 분리해석과 일체해석에 따른 상부구조물 해석결과 분석

#### 3.1 구조체의 축력 분포에 대한 영향

일반적으로 실무에서 사용하는 방식인 상부구조-하부구조 분리해석 모델과 실제 구조물의 구성방식을 반영한 상부구조-하부구조 일체해석 모델의 거동차이를 분석하기 위해 먼저 연직부재인 기둥들에서의 중력하중 분포에 대하여 검토하였다. 일반적으로, 초고층 건물은 풍하중의 동적 효과를 감소시키기 위하여, 각 층의 평면형상을 변화시키거나 상부층으로 갈수록 평면이 좁아지는 셋백(setback) 혹은 테이퍼(tapered) 형상이 자주 사용된다(Baker *et al.*, 2007; Irwin *et al.*, 2008). 이러한 형상의 건물에서는 평면 내에서 중력하중의 분포가 균등하지 않는 경우가 많다. 중력하중의 불균등 분포는 골조 뿐만 아니라 부등침하 등에 따른 기초의 안정성에 큰 위해요소가 될 수 있으며, 특히 중력하중은 상재(常載)하중이므로 영향력이 크다고 할 수 있다. 따라서 중력하중의 분포양상을 합리적으로 예측할 수 있어야 한다(Taranath, 1988; Eom and Kim, 2009; Kang *et al.*, 2010).

해석 대상의 건물도 최상부층들의 평면이 상부층으로 갈수록 축소되는 형상으로서(Fig. 3), 91층과 상부의 층면적이 현저하게 감소되며 이 층들의 하중은 하부층 중앙코어 기둥들로

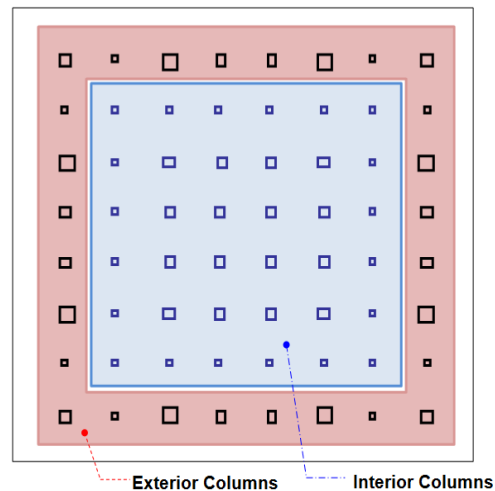


Fig. 5 Exterior columns vs. interior columns

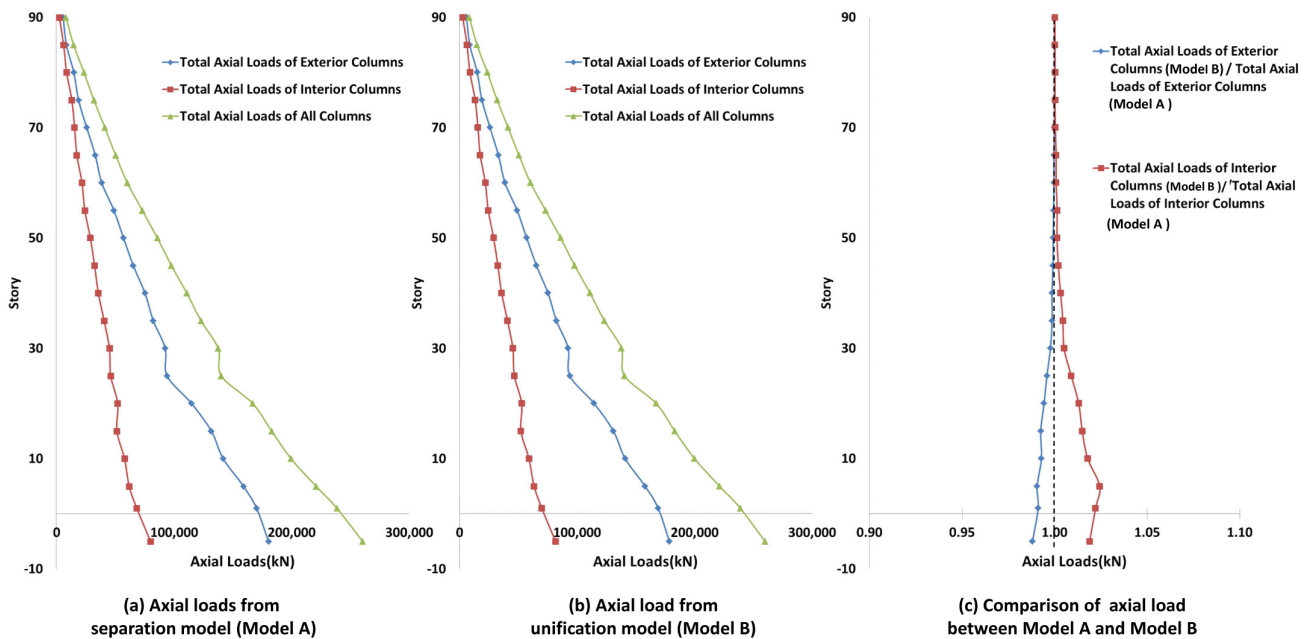
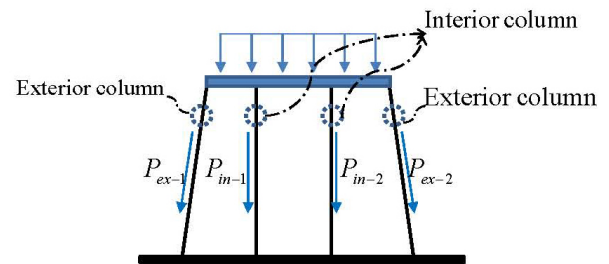


Fig. 6 Axial force distribution of interior and exterior columns according to analysis method

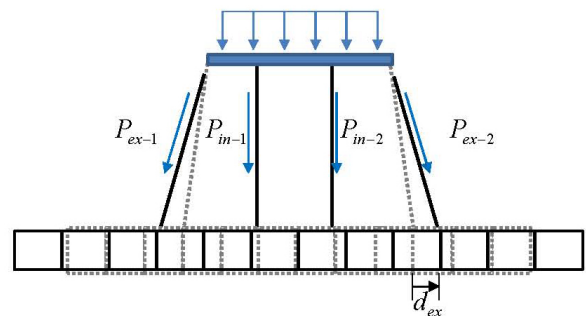
직접 전달된다(Shieh *et al.*, 2003). 중력하중의 균등한 분포를 위하여, Fig. 3과 같이 아웃리거 트러스의 경사재가 중앙코어 기둥의 축력을 외부 메가기둥으로 분산시킬 수 있도록 배치되어 있다.

내외부 기둥들의 축력 분포를 분석함으로써, 이러한 중력 하중 분포에 대한 상-하부 구조 분리해석 모델과 일체해석 모델의 거동차이를 분석하기 위해 Fig. 5와 같이, 대상 건물의 기둥들을 내부기둥(interior columns)과 외부기둥(exterior columns)으로 분류하여, 3차원 구조해석 결과로부터 각 층에서의 내부기둥들과 외부기둥들의 축력 총합을 각각 분리하였다. 이 때, 고정하중과 활하중의 중력하중만을 적용하였으며, 비계수 하중 조합(unfactored load combination)에 의한 사용하중 상태를 분석 대상으로 하였다.

분리해석과 일체해석에 의한 내외부 기둥들의 축력분포는 Fig. 6(a), (b)와 같다. Fig. 6(a), (b)에서 볼 수 있듯이 분리해석과 일체해석의 경우 모두, 외부기둥들이 중앙코어부의 내부기둥보다 많은 축력을 분담하고 있는 것을 관찰할 수 있으며 저층부로 갈수록 기둥의 축력부담이 커지는 것을 볼 수 있다. 분리해석과 일체해석의 차이점을 보다 명확히 분석하기 위하여 해석방법에 따른 내외단의 축력 분담률을 분석하였다 (Fig. 6(c) 참조). Fig. 6(c)는 내외부 기둥들에 관해 일체해석에 의한 축력총합과 분리해석에 의한 축력총합의 비율을 나타낸 그래프이다. Fig. 6(c)를 통해 볼 때 고층부에서는 분리해석과 일체해석의 축력분담 비율이 해석방법과 상관없이 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 하지만 저층부로 내려올수록 일체해석의 경우가 분리해석의 경우보다 중앙부



(a) Super-/Sub-structure separation model (Model A)



(b) Super-/Sub-structure unification model (Model B)

Fig. 7 Structural behavior of super structure according to analysis method

코어 내부기둥 쪽에서의 축력분담 비율이 커지는 것을 볼 수 있다. 반대로 분리해석의 경우, 일체해석에 비해 저층부로 내려올수록 외부기둥의 축력분담 비율이 커지는 것을 볼 수 있다.

이와 같이 일체해석의 경우가 분리해석에 비해 저층부에서 내부기둥의 축력기여도가 커지는 이유는 Fig. 7에 나타난 바와 같다. 분리해석의 경우, Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이, 기둥의 최하층 지지점을 고정단으로 이상화하여 변형을 허용하지



않고 구조해석을 수행한다. 하지만 실제거동과 유사한 상-하부 일체해석의 경우, 최하층 기둥에서 기초의 강성에 따라 변위가 발생한다. 특히 외부기둥의 경우에는 지지점에서 횡변위가 상당부분 발생한다(Fig 7(b)의  $d_{ex}$  참조). 이와 같이 상하부 일체해석의 경우, 외부기둥의 최하층에 변위가 발생하므로 축력에 대한 강성이 저하된다. 반면 내부 기둥의 경우 횡방향 변위가 거의 발생하지 않기 때문에 축력에 대한 강성변화가 크지 않다고 할 수 있다. 따라서 일체해석의 경우에는 기둥의 최하층 지지점의 변형에 의한 강성변화로 저층부 외부기둥의 축력에 대한 강성이 작아지고 내부기둥은 축력에 대한 강성이 거의 동일하게 유지되기 때문에 강성비에 따라 외부기둥의 축력 기여도가 작아지게 된다. 하지만 분리설계의 경우에는 이러한 외부기둥의 축력강성저하가 고려되지 않기 때문에, 축력에 대한 외부기둥의 기여도는 과대평가되고 내부기둥의 기여도는 과소평가될 수 있다.

### 3.2 기둥에 발생하는 부재력과 변형에 대한 영향

분리해석과 일체해석의 핵심적인 차이는 기초의 강성에 의한 최하부에서의 변형을 상부구조물 해석 및 설계에 반영하는지의 여부에 있다. 이러한 최하부의 변형은 수평부재의 응력보다는 수직부재 응력에 더 큰 영향을 미치므로 기둥부재의 부재력과 변형을 집중적으로 조사하였다.

Fig. 8은 상·하부 구조물 분리해석시, 대상건축물의 모든 기둥 중에서 가장 큰 모멘트가 발생하는 기둥의 위치를 나타낸 그림이다. Fig. 8에 나타난 분리해석 결과에 의하면 수직 부재중에서 가장 큰 부재력에 저항하는 외부 메가기둥이 가장 큰 모멘트를 분담한다. 그리고 메가기둥의 설치각도가 변화하는 연결부에서 가장 큰 모멘트가 발생한다(Fig. 8참조). 반면 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 일체해석의 경우에는 가장 큰 모멘트가 발생하는 메가기둥의 위치가 다른 것을 볼 수 있다. 일체해석의 경우에는 메가기둥의 최하층에서 가장 큰 모멘트가 발생하였다. 따라서 분리해석과 일체해석에서 가장 큰 부재력이 발생하는 지점이 서로 다른 것을 알 수 있다.

일체해석과 분리해석의 부재력이 차이나는 이유를 파악하기 위하여 가장 큰 부재력이 발생하는 ①번 메가기둥(Fig. 10 참조)과 경향성을 확인하기 위하여 평면상 유사한 위치에 자리하는 ②번 메가기둥(Fig. 10 참조)의 부재력과 상대 변위를 전층에 걸쳐 조사하였다(Fig. 11과 12 참조). Fig. 11과 12에서 축력(axial loading)은 기둥의 주축방향으로 작용하는 압축력을 의미하고 모멘트는 Fig. 13(a)에서 나타난 바와 같이 각 층별 기둥하부에서의 양방향( $x$ 축방향,  $y$ 축방향) 모멘트( $M_x$ ,  $M_y$ )를 식 (1)과 같이 조합하여 계산하였다. 또한

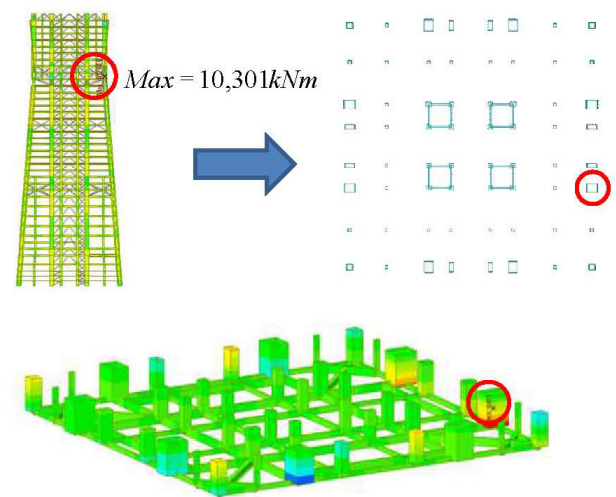


Fig. 8 Maximum column moment from separation model

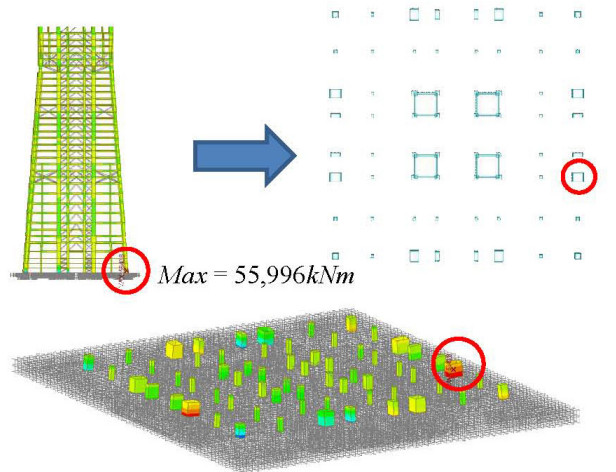


Fig. 9 Maximum column moment from unification model

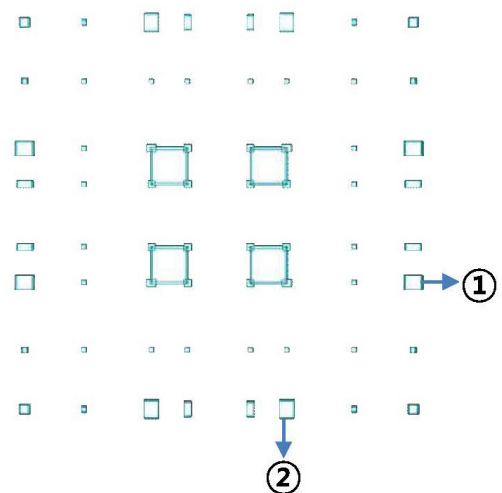


Fig. 10 Column location for analysis of member force

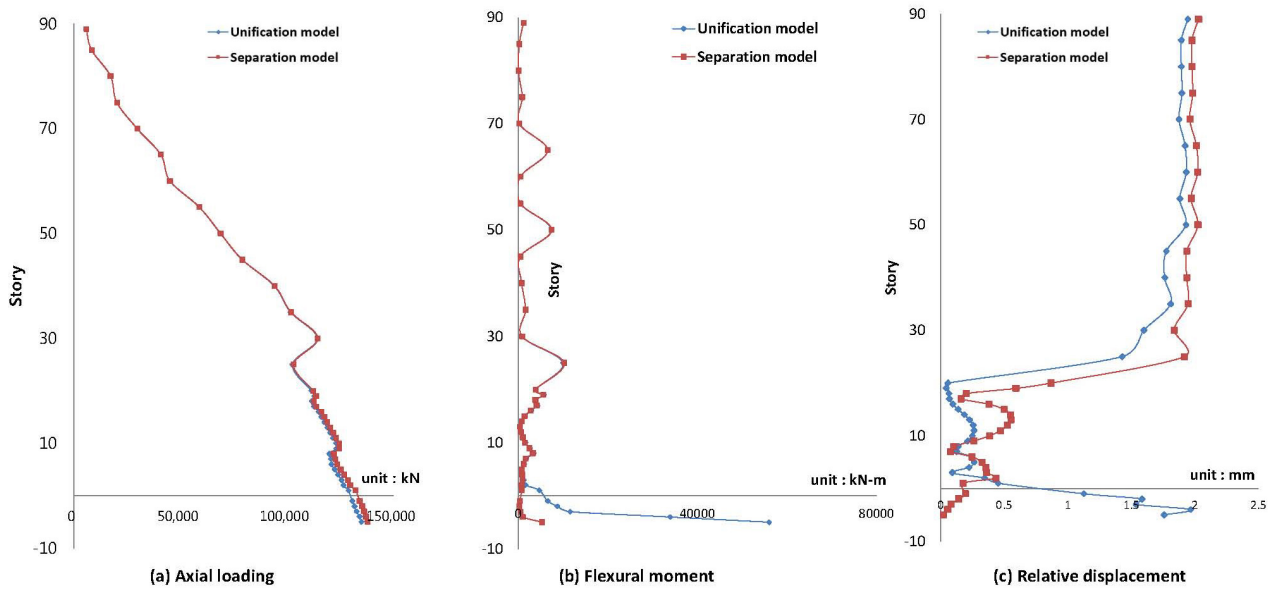


Fig. 11 Member force and relative displacement of column ① according to structural analysis method

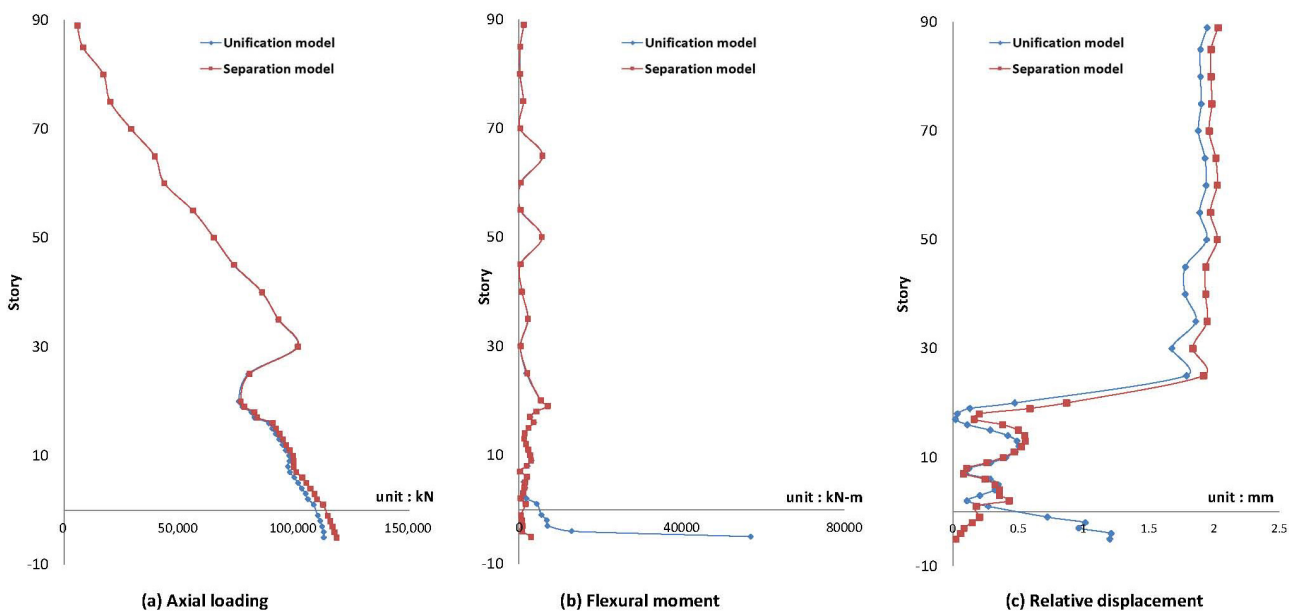


Fig. 12 Member force and relative displacement of column ② according to structural analysis method

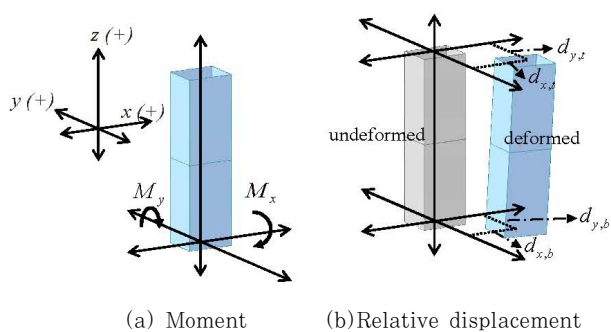


Fig. 13 Moment and relative displacement calculation of column

각 층에서 기둥에서 발생한 상대변위는 Fig. 13(b)에 나타난 바와 같이 기둥의 상부에서 발생한 변위와 기둥하부에서 발생한 변위의 차이를 식 (2)와 같이 계산하였다.

$$M = \sqrt{(M_x^2 + M_y^2)} \quad (1)$$

$$d = \sqrt{(d_{x,t} - d_{x,b})^2 + (d_{y,t} - d_{y,b})^2} \quad (2)$$

여기서,  $M_x(M_y)$  = 각층 기둥 하부에서  $x(y)$  축 방향 모멘트,  $d_{x,t(y,t)}$  = 각층 기둥 상부에서의  $x(y)$  축 방향 변위,  $d_{x,b(y,b)}$  =

각층 기둥 하부에서의  $x(y)$  축 방향 변위.

우선 Fig. 11은 중력하중 재하상태에서 가장 큰 모멘트 부재력을 보이는 ①번 메가기둥의 전체층수에서의 축력, 모멘트 그리고 상대변위를 분리해석과 일체해석에 의해 구한 결과를 보여주고 있다. Fig. 11(a)에서 볼 수 있듯이 ①번 메가기둥은 평면상 외주부에 위치하고 있기 때문에 저층부에서 분리해석에 산출된 축력이 일체해석에 의해 산출된 축력보다 큰 것을 알 수 있다. 하지만 그 차이는 크지 않은 것을 볼 수 있다. 반면, 저층부에서 일체해석에 산출된 모멘트는 분리해석에 의해 산출된 모멘트보다 큰 것을 알 수 있으며 모멘트 차이 역시 매우 큰 것을 볼 수 있다. 이렇게 저층부로 갈수록 일체해석에 의한 모멘트 부재력이 커지는 이유는 일체해석의 경우 Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이 최하부층 기둥 지지점에서의 변형을 실제와 유사하게 묘사하기 때문에 저층부로 갈수록 기둥 상·하부의 상대변형이 커지고 또한 축력의 크기 역시 저층부로 갈수록 커지기 때문에 상대변형과 축력의 크기에 비례하는 모멘트값이 커지는 것으로 판단된다. Fig. 11(c)는 ①번 메가기둥의 각 층에서의 상대변위를 나타낸다. Fig. 11(c)에 나타난 바와 같이 고층부에서의 기둥의 상·하 지점에서의 상대변위는 일체해석과 분리해석 결과가 거의 동일하나, 저층부에서는 일체해석 결과에 의한 기둥의 상대변위가 분리해석의 경우보다 매우 큰 것을 볼 수 있으며, 이는 일체해석의 경우 저층부에서 모멘트가 크게 산출되는 것의 직접적인 원인이 된다고 할 수 있다. 일체해석의 경우가 변형적합성 조건을 만족하여 실제와 더 유사한 구조물 해석결과를 보여줄 수 있다고 판단되기 때문에 분리해석을 수행할 경우, 저층부 ①번 메가기둥의 휨모멘트 값을 지나치게 과소평가하여 비안전측의 설계결과를 가져올 수 있음을 알 수 있다. 이와 같은 경향성은 ①번 메가기둥 뿐만 아니라 모든 외곽부 메가기둥에서 유사하게 나타난다. Fig. 12에는 ①번 메가기둥과 다른 외곽부에 위치한 ②번 메가기둥(Fig. 10 참조)의 부재력과 상대변위를 나타낸 그림이다. Fig. 12에 나타난 바와 같이 ②번 메가기둥의 경우에도 분리해석과 일체해석의 해석결과의 차이가 ①번 메가기둥의 경우와 거의 동일한 해석경향을 보여주는 것을 볼 수 있다. 따라서 상부구조물의 구조해석에 있어 일반적으로 사용하는 분리해석을 사용할 경우, 기초(또는 하부) 구조물의 실제적인 변형을 고려하지 못하여 저층부 구조부재의 부재력을 과소평가하게 되어 비안전측 구조설계가 수행될 수 있음을 의미한다. 이러한 경향은 건축물의 층수가 높고, 비정형성이 강하고, 기초의 강성이 작은 경우에 더 커질 것으로 예상된다. 따라서 상기 경우에 해당하는 건축물의 구조설계에 있어서는 하부구조물의 변형을 반영할 수 있는 해석 및 설계방법을 적용해야 할 것이다.

#### 4. 분리해석과 일체해석에 따른 하부구조물 해석결과 분석

초고층 건물에서 중력하중의 불균등한 분포는 골조의 구조적 성능뿐만 아니라, 기초 구조시스템의 안정성에도 영향을 줄 수 있다. 일반적인 초고층 기초시스템으로 사용되는 파일지지 전면기초 시스템에서 중력하중의 불균등 분포는 전면 기초에서의 부등침하 및 일부 파일의 과도한 축력 집중을 발생시킬 수 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이, 중력하중은 상재하중이므로 기초의 안정성에 미치는 영향이 매우 크다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 일체해석과 분리해석에 따른 기초 해석결과의 차이를 분석하여 분리해석 사용시의 발생할 수 있는 해석결과의 오류에 대하여 살펴보았다. 해석방법에 따른 예제건축물의 기초 해석결과를 비교 분석하기 위해 예제 건축물에서 가장 큰 파일기초 압축력과 기초슬래브 변형(침하량)이 예상되는 위치를 Fig. 14와 같이 선정하였다. Fig. 14에서와 같이 외부 메가컬럼과 내부 코어컬럼을 지지하는 기초의 위치를 ①~⑥으로 표시하였으며 각각의 위치에서 중력하중에 의해 발생한 슬래브 침하량과 파일압축력을 해석방법에 따라 Table 1과 같이 정리하였다. Fig. 15는 Table 1에서 각

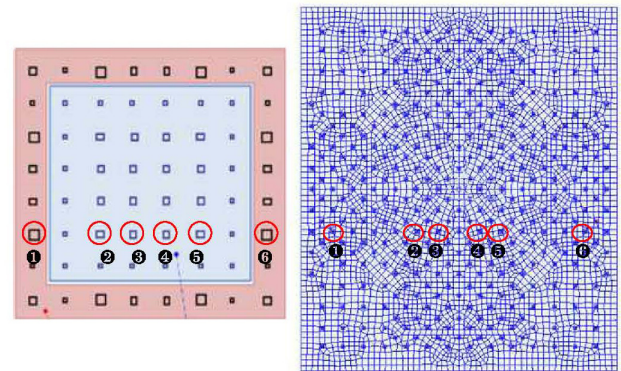


Fig. 14 Locations for measurement about deflection of footing slab and axial force of pile

Table 1 Deflection of footing slab and axial force of pile

Location	Unification model		Separation model	
	Slab deflection (mm)	Axial force of pile (kN)	Slab deflection (mm)	Axial force of pile (kN)
1	-8.672	12,375	-12.189	13,733
2	-7.807	11,666	-5.414	10,374
3	-8.079	12,566	-8.238	12,641
4	-7.938	12,312	-8.081	12,359
5	-7.263	11,057	-5.137	9,858
6	-9.192	13,097	-13.187	14,712
Average	-8.15 (100%)	12,178 (100%)	-8.70 (106.7%)	-12,279 (101%)
STDEV	0.68 (100%)	717.4 (100%)	3.36 (493%)	1879.2 (261%)



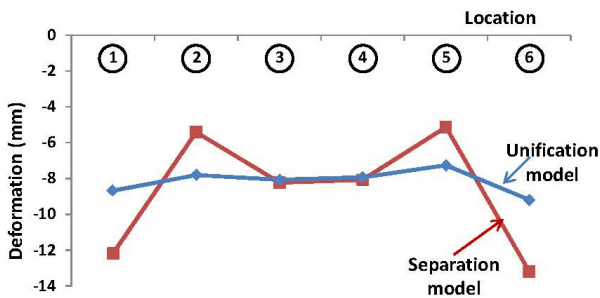


Fig. 15 Deflection of footing slab

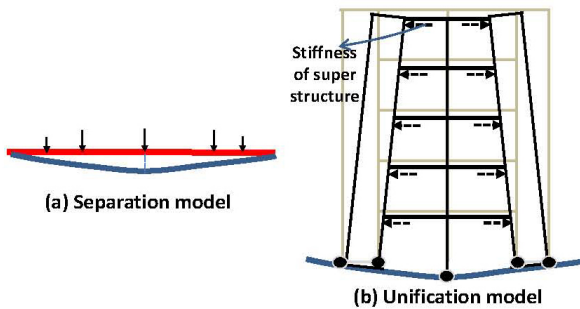


Fig. 16 Effect of super structure stiffness on structural analysis of footing

위치별 기초슬래브 침하량을 그림으로 나타낸 것이다. Fig. 15와 Table 1에서 알 수 있듯이 일체해석의 경우, 기초슬래브 침하량이 8mm내외로 일정한 것을 볼 수 있다(평균 8.15mm, 표준편차 0.68mm). 하지만 분리해석의 경우에는 슬래브 침하량이 5.1~13.2mm(평균 8.7mm, 표준편차 3.36mm)로 각 위치별 침하량이 매우 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 해석결과는 분리해석을 사용할 경우, 기초의 부등침하와 이에 따른 응력을 실제보다 과대평가 할 수 있음을 의미한다.

Fig. 16(a)에서 볼 수 있듯이 분리해석을 사용할 경우, 기초구조물만을 분리해서 해석하기 때문에 기초구조물의 변형에 있어 상부구조물의 강성이 고려되지 못한다(Lee *et al.* 2009). 하지만 실제 구조물과 같이 상부구조물과 하부구조물을 함께 일체로 해석하는 경우에는 기초구조물의 변형이 발생할 때, 상부구조물은 기초구조물의 변형을 억제하는 역할을 한다(Fig. 16(b) 참조). 따라서 실제구조물에서 기초구조물의 거동은 상부구조물의 강성에 영향을 받으나 분리해석을 사용하여 기초를 구조해석 할 경우에는 상부구조물의 강성을 반영하지 못할 수 있음을 의미한다. 특히, 분리해석의 경우, 상부구조물의 슬래브와 보 부재가 가지고 있는 굉장히 큰 면내강성을 고려하지 못하기 때문에 Fig. 15에 나타난 바와 같이 기초의 부등침하가 과대평가 될 경향이 매우 높다고 할 수 있다.

Fig. 17는 Table 1에서 각 위치별 파일의 압축력 분포를 그림으로 나타낸 것이다. 일체해석의 경우, 중력하중에 대한

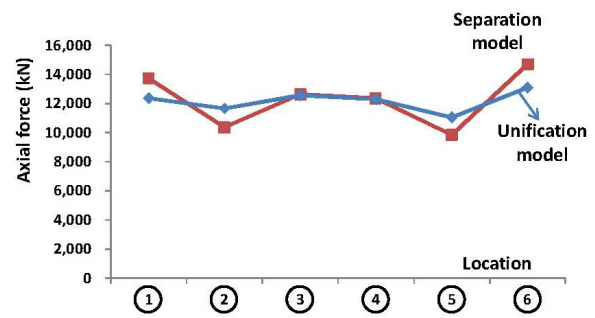


Fig. 17 Axial force of pile

파일 압축력 평균은 12,178kN, 표준편차는 714kN인데 반하여 분리해석의 경우, 파일 압축력 평균은 12,279kN, 표준편차는 1,879kN이다. 이와 같은 해석 결과는 기초슬래브 침하량 해석결과와 마찬가지로, 파일압축력의 분포도 일체해석의 경우보다 분리해석의 편차가 더 심한 것을 볼 수 있다. 이처럼 분리해석의 파일 압축력의 편차가 더 심한 것도 기초슬래브의 처짐에 대한 해석결과와 마찬가지로 상부구조물의 강성을 고려하지 못하기 때문에 국부적인 부재력집중을 허용하기 때문이다. 만약 분리해석을 사용하여 파일기초를 설계하고 파일의 공칭강도를 요구강도와 동일하게 설계를 한다면, ①과 ⑥번 위치의 파일의 경우는 비경제적인 설계가 될 수 있으며, ②과 ⑤번 위치에서는 안전하지 못한 설계결과를 초래할 수 있다(Fig. 17참조). 이처럼, 분리해석의 사용하여 기초구조물을 설계한다면, 기초의 부등침하가 과대평가될 수 있으며 일부 기초구조물에 대해서는 비경제적이고 불안정한 설계결과를 가져올 수 있다. 한편, 본 연구에서는 실무에서 사용하는 상부-하부구조물 분리해석의 유효성과 한계를 분석하기 위하여 상부-하부구조물 일체해석의 결과가 실제 구조물의 거동과 유사하다고 가정하였으나 본 연구에서 수행한 일체해석의 경우에도 탄성거동 및 지지점 가정 등이 실제 구조물의 거동과 상이할 수 있는 한계를 가지고 있으며 따라서 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 할 수 있다.

## 5. 결 론

건축물의 구조해석과 설계에 있어 상부구조물과 하부구조물을 일체해석할 경우, 매트릭스 구조해석을 위한 절점수 및 해석량의 급격한 증가, 동적해석을 위한 모드해석의 어려움, 수치해석결과의 복잡성 등이 수반된다. 실무적으로 이러한 구조해석상의 어려움으로 인하여 상부구조물 지지점에서의 변위는 모두 고정으로 가정한 후에, 상부구조물을 우선적으로 구조해석하고 해석결과로 산출되는 반력을 기초구조물의 하중으로 사용하여 별도로 기초구조물을 해석/설계하는 분리해석 방법을 사용한다. 하지만, 분리해석을 사용할 경우, 상부구조물의 고정



지점과 변형된 기초구조물과는 실제 연결된 지점에서 변위차가 발생하여 구조해석의 기본요건인 변형적합성 조건을 만족하지 못하게 되어 실제 구조물의 구조적 거동을 합리적으로 예측하지 못할 수 있다.

본 연구에서는 현존하는 초고층 건축물 중에서 대표적인 철골구조물을 대상으로 분리해석과 일체해석의 해석결과 차이를 비교 분석하였다. 또한 분석결과를 토대로 현재 실무에서 사용하는 방법의 한계와 설계시 고려사항을 제안하였다.

분리해석의 의한 결과를 실제거동을 보다 근접하게 묘사하는 일체해석 결과와 비교분석해 보면, 상부구조물의 구조해석에 있어 기초의 변형을 고려하지 못하기 때문에 부재력을 과소평가할 수 있다. 특히 상부구조물 하단에 위치한 구조부재의 경우, 기초변형으로 발생하는 부재력을 반영하지 못하여 비안전측 설계결과를 가지고 올 수 있다. 하부 기초구조물을 분리해석으로 해석하였을 경우, 상부구조물의 강성을 고려하지 못하기 때문에 기초의 부등침하 과대평가, 부재력의 과대/과소 평가를 초래할 수 있어 비경제적이고 불안정한 설계결과를 초래할 수 있다. 특히, 기초의 변형이 상부구조물에 큰 영향을 미칠 수 있는 건축구조물, 지반의 강성이 작아서 기초에 큰 변형이 예상되는 건축물, 지반조건이 불균질하여 부등침하가 예상되는 건축구조물 등에는 분리해석을 지양해야 할 것이다. 향후에는 일체해석방법을 건축구조물에 적용할 수 있는 관련 기술의 개발과 검증이 보다 폭넓게 수행되어야 할 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2014년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of Chungbuk National University in 2014).

### References

- Baker, W.F., Korista, D.S., Novak, L.C. (2007) Burj Dubai: Engineering the World's Tallest Building, *Struct. Des. Tall Build.*, 16(4), pp.361~375.
- 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.
- Irwin, P., Kilpatrick, J., Robinson, J., Frisque, A. (2008) Wind and Tall Buildings: Negative and Positives, *Struct. Des. Tall Build.*, 17(5), pp.915~925.
- Kang, S.M., Eom, T.S., Kim, J.Y. (2010) Case Studies for Analyzing Effects of Outriggers on Gravity Load Managements, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 23(3), pp.255~266.
- Kim, S.R., Kang, G.H., J, J.U. (2011) A Seismic Design of Foundations in Korea and Countermeasure Methods, *2011 Fall Workshop Proceeding, Earthquake Engineering Society of Korea*, pp.543~567.
- Kim, G.C., Kang, J.W., Ko, H. (2010) Seismic Response of Large Space Structure with Various Substructures, *J. Korean Assoc. Spat. Struct.*, 10(3), pp.81~90.
- Lee, K.K., Park, H.G., Noh, J.T., Lee, S.H., Chung, L. (2009) Foundation Design of Apartment Building Considering Upper Structure Stiffness, *Korea Concrete Institute Spring Conferences Proceeding, Korea Concrete Institute*, 21(1), pp.113~114.
- Liu, J., Wu, G. (1993) An Efficient Finite Element Solution Method for Analysing Large-scale Symmetric Structures, *Comput. Syst. Eng.*, 4(4-6), pp.373~5380.
- Madiasit <http://www.midasit.com>.
- Shieh, S.S., Chang, C.C., Jong, J.H. (2003) Structural Design of Composite Super-Columns for the Taipei 101 Tower, *Proceedings of International Workshop on Steel and Concrete Composite Construction*, pp.25~33.
- Taranath, B.S. (1988) Structural Analysis and Design of Tall Buildings, McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- Voleti, S.R., Chandra, N., Miller, J.R. (1996) Global-local Analysis of Large-scale Composite Structures using Finite Element Methods, *Comput. & Struct.*, 58(3), pp.453~464.
- Yagawa, G., Shioya, R. (1993) Parallel Finite Elements on a Massively Parallel Computer with Domain Decomposition, *Comput. Syst. Eng.*, 4(4-6), pp.495~503.

## 요 지

일반적으로 건축물의 구조해석과 설계에 있어 작업효율을 확보하기 위하여 상부구조물과 하부구조물을 별도로 모델링하여 해석 및 설계를 진행하는 분리해석 방법을 사용한다. 하지만, 상기 분리해석을 사용할 경우, 상부구조물의 고정지점과 변형된 기초구조물과는 실제 연결된 지점에서 변위차가 발생하여 구조해석의 기본요건인 변형적합성 조건을 만족하지 못하게 되고 상부구조-하부구조의 상호작용을 고려하지 못하기 때문에 실제와는 다른 구조해석 및 설계결과를 초래할 수 있다. 본 연구에서는 초고층 철골구조물을 대상으로 구조물의 부등침하 등에 큰 영향을 미치는 상재(常載)하중에 대한 분리해석과 일체해석의 해석결과 차이를 비교 분석하였다. 분석결과에 따르면 분리해석방법을 사용할 경우, 상부구조물의 구조해석에 있어 기초의 변형을 고려하지 못하기 때문에 부재력을 과소평가할 수 있고 이로인해 비안전측 설계결과를 가지고 올 수 있다. 하부 기초구조물을 분리해석으로 해석하였을 경우, 상부구조물의 강성을 고려하지 못하기 때문에 기초의 부등침하 과대평가, 부재력의 과대/과소 평가를 초래할 수 있어 비경제적이고 불안정한 설계결과를 가져올 수 있다. 특히, 기초의 변형이 상부구조물에 큰 영향을 미칠 수 있는 건축구조물, 지반의 강성이 작아서 기초에 큰 변형이 예상되는 건축물, 지반조건이 불균질하여 부등침하가 예상되는 건축구조물 등에는 분리해석을 지양해야 할 것이다.

**핵심용어** : 건축물 구조해석, 분리해석, 일체해석, 상부구조-하부구조 상호작용