



초고밀도 고층복합빌딩시스템의 최적설계

조태준¹ · 김태수²

대전대학교 건설시스템공학과 부교수¹, 한밭대학교 건축공학과 부교수²

Optimum Design For a Highly Integrated Tall Building System

Cho, Taejun¹ · Kim, Tae-Soo²

¹Associate professor, Dept. of Civil Engrg., Daejin Univ., Pocheon, Gyeonggi-do, 487-711, Korea.

²Associate professor, Dept. of Architectural Engrg., Hanbat National Univ., Daejeon, 305-719, Korea.

Abstract: In this study, we propose an innovative lateral force distribution building system between tall buildings by utilizing the difference of moment of inertia, as the alternative design for highly integrated city area. Considering a tri-axial symmetric conditions and boundary conditions for the three-dimensional building structure system, a two-dimensional model is composed. In the proposed indeterminate structural model, important design variables are determined for obtaining minimum horizontal deflections, reactions and bending moments at the ground level of the buildings. Regarding a case of the provided two spatial structures connected to 4 buildings, the optimum location of middle located spatial structure is 45% from the top of the building, which minimize the end moments at the bottom of the buildings. In the considered verification examples, reduced drifts at the top location of the building systems are validated against static wind pressure loads and static earthquake loads. The suggested hybrid building system will improve the safety and reliability of the system due to the added internal truss-dome structures in terms of more than 30% reduced drift and vibration through the development of convergence of tall buildings and spatial structures.

Key Words: hybrid building system, spatial structure, highly integrated, optimization

1. 서론

1.1 기존 초고층빌딩의 횡력저항시스템

고층빌딩의 설계, 시공 및 거주시 수평하중인 풍하중과 지진하중에 대한 최상층의 수평변위, 층간변위 및 진동제어 문제가 중요하다. 고층건물에 발생하는 횡력과 변위를 감소시키기 위한 가새골조 구조형식, 튜브형식, 아웃리거 벨트트러스형식, 메가프레임 형식 또는 다이어그리드 형식 등이 있다. 그 중 70%이상의 초고층빌딩설계에 채택되고 있는 (Kim et al., 2011) 아웃리거 벨트트러스(Outrigger-Belt Truss) 형식의 형상과 빌딩내부의 횡력분배에 의한 모멘트감소효과

(Madison R Paulino, 2010)를 본 연구에선 제안하는 빌딩외부 반력분배방식과 비교하면 Fig. 1(b)의 휨모멘트 결과도와 같다.

Fig. 1.에서 보이는 바와 같이 기존의 초고층빌딩에 채택되고 있는 네 개동의 Outrigger-Belt Truss 빌딩사이의 중앙에 대공간구조를 추가하여 그 효과를 살펴본다. 본 연구에서 제안된 4개 빌딩으로 구성된 빌딩시스템을 돔 상부구조와 하부에 역돔과 케이블구조를 이용하여 연결한 복합빌딩시스템을 구성하였다. Fig. 2와 같이 돔-트러스 보강구조의 수평압축반력(1. Dome-Truss)과 역돔과 케이블구조에 연결된 케이블에 의한 빌딩상부로 연결된 인장반력(2. Cable tension)에 의한 횡방향 수평외력의 분배감소(2.1절 참조)와 빌딩하부

주요어: 복합빌딩시스템, 대공간구조, 고밀도, 최적화

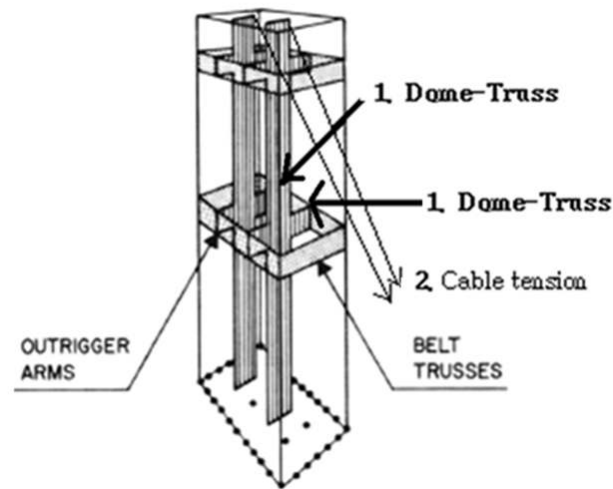
Corresponding author: Tae-Soo Kim

Dept. of Architectural Engrg., Hanbat National Univ., Daejeon, 305-719, Korea.

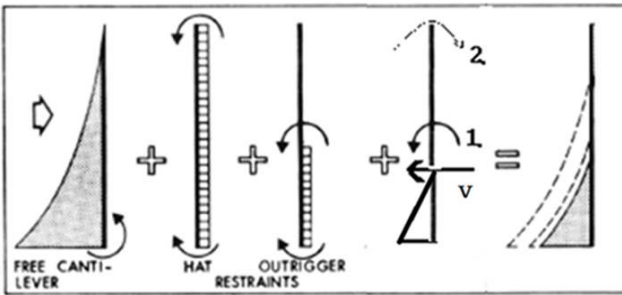
Tel: +82-42-821-1121, Fax: +82-42-821-1590-, E-mail: tskim0709@daum.net

Received December 16, 2015 / Revised January 26, 2015 / Accepted February 2, 2015

휨모멘트의 감소되는 효과가 나타난다(Taejun CHO, 2014).



(a) Reactions to Outrigger by Proposed Spatial Structure



(b) Resultant Bending Moment Diagram

Fig. 1 The Reduced Moment Effect of Proposed Hybrid Tall Building System Subjected to Wind Pressure

40층 이상의 고층건축물의 설계시 풍하중에 의해 부재크기가 결정되기 때문에 본 연구에서는 풍하중에 대해서만 검토하였다. Fig. 1(b)에서 보이는 바와 같이 수평반력은 빌딩에 작용하는 풍하중에 대한 저항력을 다른 주변 빌딩에 연결된 돔구조의 압축반력에 의하여 분산되며, 이 분산 반력 V 는 빌딩하부에 수평외력에 대하여 반대방향 휨모멘트를 발생시켜서 결과적으로 빌딩하단의 휨모멘트를 감소시키고, 또한 빌딩최상단의 횡방향 처짐(Drift)을 감소시키게 된다.

빌딩사이에 제공된 대공간구조는 상부 돔구조와 하부 역돔구조로 구성되며, 하부 역돔구조의 자중에 의한 모멘트는 다음절에 소개된 경사빌딩에 의하여 평형구조를 만들 수 있다.

초고층복합빌딩의 기술혁신과 미래도시 기반기술개발을 위한 기초연구로서 본 연구의 주요목적

은 다음과 같다.

- (1) 과밀도시문제의 해결을 위한 초고층빌딩과 대공간구조를 결합한 융복합 빌딩시스템 개발,
- (2) 초고층빌딩의 수평변위 및 진동제어를 위한 빌딩사이 대공간구조의 위치에 대한 최적설계.

1.2 기존 초고층빌딩과 제안시스템의 횡력저항 특징비교

Fig. 2(a)와 같이 제안된 초고밀도 복합빌딩시스템을 현재 세계 최고층 빌딩인 Burj Dubai 빌딩의 단면도(Fig. 2(b))와 비교해 보면 다수의 빌딩구조의 복합시스템에 있어 공통점은 풍하중 등의 횡력에 대한 구조내부 재분배의 특징이 있다. 비교우위 사항은,

- (1) 빌딩구조시스템의 단면2차모멘트 극대화를 위한 공간배치로, 기존의 초고층 빌딩이 빌딩자체의 상하층간의 변형차이를 이용하는 점에 비교하여, 그보다 더 응답이 큰 다른 빌딩과의 변형차이를 이용하므로 구조적 안전성이 효율적으로 증대되는 특징,
- (2) 횡력을 2개소 이상의 빌딩구조로 재분배하여 풍하중에 대한 반력을 다른 빌딩들에 분배하는 특징과,
- (3) 동일한 물량이 투입되는 경우, 기존빌딩들의 사이 중앙공간에 대공간 구조를 추가로 제공하는 공간이용성의 효율적 특징이 있다.

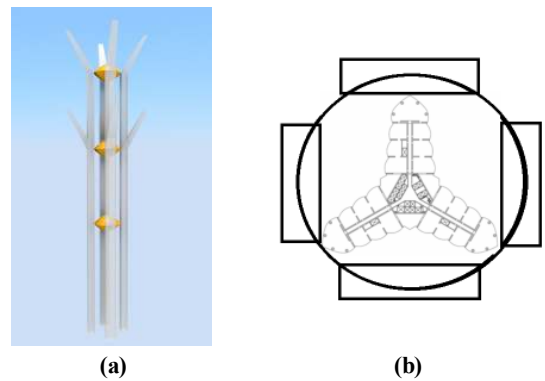


Fig. 2 (a) Side View of the Proposed Hybrid Tall Building System Subjected to Wind Pressure, (b) Proposed Pan Compared with the Plan of Burj Dubai Building

2. 초고밀도 복합빌딩시스템의 수평변위 최소화

2.1 변위감소를 위한 단면과 2차원 모델링

본 연구에서는 횡력의 분배에 의한 수평변위와 진동저감을 위하여 다음과 같은 설계를 제안하였다.

1) Fig. 3(a)의 101과 104빌딩의 x축 방향 풍하중에 대한 102, 103 빌딩의 단면2차모멘트 저항차이에 의해 구조물의 횡변위를 저감시킬 수 있다. 풍하중이 x축방향에서 발생하는 경우, 101과 104빌딩은 휨방향에 대하여 약한 단면 2차 저항모멘트를 가지는 반면, 102빌딩과 103빌딩은 강한 단면2차모멘트(I)를 가지게 된다. 예를 들어서 단면이 $50m \times 100m$ 인 경우, 단면2차모멘트는 x축 휨에 대하여 $50^3 \times 100^3 / 12$ 는 y축 휨에 대한 단면2차모멘트 $50^3 \times 100 / 12$ 보다 4배의 휨강성을 가지게 되고, 휨모멘트에 의한 수평변위는 단면 2차모멘트에 반비례하므로 1/4로 감소하게 된다.

2) 대공간 돔구조 (중양)연결부에 트러스(스프링)와 댐퍼를 보강한다. Fig. 3에서 K1은 트러스의 스프링강성값으로 $K1 = EA/L$ (E =탄성계수, A : 단면적, L : 트러스의 길이)로 계산되며, C1은 101 또는 104빌딩에 최대풍하중이 작용하는 경우의 충격을 완화하기 위한 댐퍼의 설치시 해당 댐핑계수이다.

3) 돔구조자체의 강성과 질량(M2)에 의한 TMD 역할로 수평변위와 진동을 제어한다. 기존의 초고층빌딩에서는 1,000kN에서 3,000kN규모의 별도의 TMD를 설치하여 동적진동을 감소시키는 설계를 하지만, 본 제안 빌딩시스템에서는 대공간 돔구조를 TMD대체구조로 설계하며 설계는 동적진동을 감소시키는 질량과 강성, 댐퍼의 설계로 이루어진다.

여기서 빌딩시스템의 단면은 x, y축에 대한 각각의 이축 대칭구조로 설계시 Fig. 3의 102와 103 빌딩은 대칭조건에 의하여 면외변형이 없이 풍하중과 평행한 방향으로 변위가 발생된다. 또한 대칭조건을 이용하면 101과 102(또는 103과 104)빌딩만의 강성과 질량만을 모델링하여, Fig. 3(b)와 같이 4개의 빌딩과 돔구조의 거동 단면도에 대하여 2차원 해석이 가능해진다.

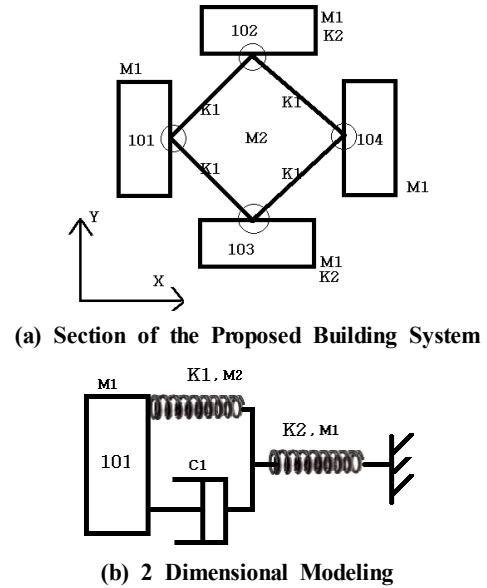


Fig. 3 2D modeling for the 4 Building with Spatial Structures

2.2. 횡력 및 변위 감소효과의 최적설계

2.1절에 제시된 3차원 구조의 2차원 단면모델링 가정을 적용하여 1차 부정정구조로 치환한 빌딩시스템모델에 균일한 풍하중(기본풍속=44.7 m/sec, 지표면조도: B, 중요도계수=1.0, 피크외압계수=2.2 (강체구조물 적용시) 작용하는 경우의 도식화는 Fig. 4와 같다.

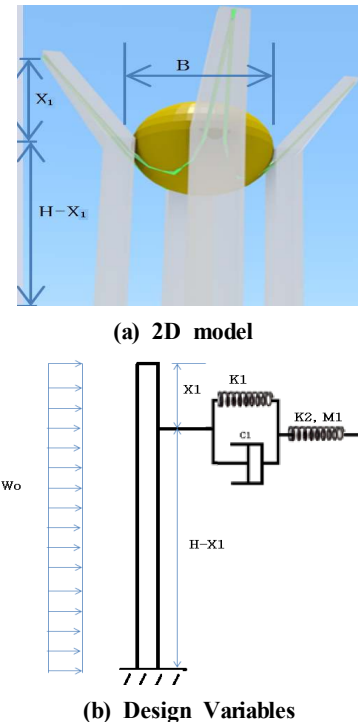


Fig. 4 Structural Model and Variables

수평변위 최소화 및 진동제어를 위한 대공간 돔 구조의 제공을 위하여 중요한 설계변수는 Fig. 4(b)에 도시된 돔구조의 스패(B)와 연직방향 높이 (X1, H)이다. 돔구조의 스패는 아치로 보강된 스페이스프레임 상부돔으로 50-350m의 스패가 가능하며, 150m의 스패에서 약 5000 kN의 자중이 예상되고 돔 하부구조에 비교하면 중요성이 작다. 돔구조 중앙부 횡력분배를 위한 트러스구조는 다음 2.3절의 구조해석결과 각형강관 400*200*12(박스형)부재 사용시 경계조건의 영향이 작고 응력이 작게 발생하였다. 횡력, 처짐 및 응력의 분배를 통한 감소효과에 가장 영향이 큰 대공간 돔구조의 연직방향 높이(X1, H)는 Fig. 4(a)와 같이 1차원 부정정구조로 모델링하였으며, 본 파일럿테스트에서는 댐핑효과(댐핑계수 C1)를 고려하지 않고, 빌딩사이의 강성 차이가 4배인 경우(장단변 비율=1:2), 돔구조에서의 반력 R을 구하기 위한 변형적합방정식은 다음과 같다.

$$\alpha \frac{W_o H^4}{8EI} - \frac{R(H-X_1)^2}{6EI} (2H+X_1) = \frac{R}{K_{eq}},$$

$$\alpha = \left(\frac{W_o H^4}{8EI} + \frac{0.5 * W_o H^4}{8E(4*I)} \right) / \left(\frac{W_o H^4}{8EI} \right) \quad (1)$$

여기서, 풍하중 외력에 의한 캔틸레버 구조의 수평처짐에 대한 증가계수는 Fig. 3(a)의 101빌딩과 102빌딩의 단면 2차 모멘트 차이와 내풍면적의 차이에 의하여 증가되는 처짐의 비율이다. K_{eq} 는 횡력의 수평배분감소를 위한 트러스구조와 Fig. 3(a)의 빌딩102 또는 103(두 빌딩 중에서 대칭조건에 의하여 1개빌딩만 적용)의 강성계수를 직렬 연결한 Fig. 4(a)의 합성강성으로 그 크기는 다음과 같다.

$$K_1 = \frac{E_T A_T}{L_T}, K_2 = \frac{0.5 W_o H}{0.5 W_o H^4} = \frac{32EI}{H^3} \quad (2)$$

$$K_{eq} = \frac{1}{1/K_1 + 1/K_2} \quad (3)$$

여기서, K_1 은 트러스의 스프링강성 (E_T =탄성계수, A_T : 단면적, L_T : 트러스의 길이), K_2 는 Fig. 3(a)의 빌딩102 또는 빌딩103의 횡강성, K_{eq} 는 K_1 과 K_2 의 직렬방식 합성 강성값이다.

식(1)의 최적해는 풍하중 W_o 에 대하여,
 (1) 빌딩상단 최대 수평처짐량,

$y_{max} = \frac{W_o H^4}{8EI} - \frac{V(H-X_1)^3}{3EI}$ 에 대한 X_1 의 연직방향 높이에 대한 1차 편미분을 이용한 최적해,

(2) 대공간구조를 사용하는 임차인의 사용성 증대를 고려한 반력 R의 최소화 최적해, 그리고

(3) 초고층빌딩과 같이 빌딩하단의 재료과피에 대한 위험성이 있는 경우의 빌딩 최하단 휨모멘트에 대한 최소화를 위한 최적방안의 검토가 필요할 수 있다.

상기에서 언급한 (1)번과 (2)번 최적화 대상인 빌딩상단의 수평처짐과 반력 R의 최소화는 빌딩중앙부에 1개의 돔구조가 존재하는 경우 아래식과 같이 돔구조의 위치에 관한 변수 X_1 으로 편미분한 결과 빌딩의 최상단에 위치하는 것이 최적값임을 알 수 있다.

$$\frac{dy_{max}}{dX_1} = \frac{d}{dX_1} \left(\frac{W_o H^4}{8EI} - \frac{V(H-X_1)^3}{3EI} \right) = 0 \quad (4)$$

돔형상의 대공간 구조가 2개 이상 존재하는 경우에는 X_1, X_2 등의 설계변수에 대하여 연립방정식의 풀이가 필요하다. 두 개의 대공간 돔이 있는 경우, 상층 돔의 위치 X_1 을 0으로 고정시키고, X_2 의 최적 위치를 구하기 위하여 돔구조에 작용하는 반력 R과 각 위치의 재단모멘트 M_{ab}, M_{ba}, M_{bc} 에 대한 최소화를 위하여 처짐각방법을 이용한 각 재단모멘트를 구하면 다음과 같다 (최적화 대상 단일변수 $X_2=x$ 를 사용).

$$M_{ab} = \frac{2E\theta_B}{H-x} - \frac{W_o(H-x)^2}{12} \quad (5)$$

$$M_{ba} = \frac{4E\theta_b}{H-x} + \frac{W_o(H-x)^2}{12} \quad (6)$$

$$M_{bc} = \frac{3E\theta_B}{x} - \frac{W_o x^2}{8} \quad (7)$$

$$V_1 = \frac{M_{ab} + M_{ba} + 0.5 W_o(H-x)^2}{H-x} \quad (8)$$

$$V_2 = \frac{-M_{bc} + 0.5 W_o x^2}{x} \quad (9)$$

$$R = V_1 + V_2 \quad (10)$$

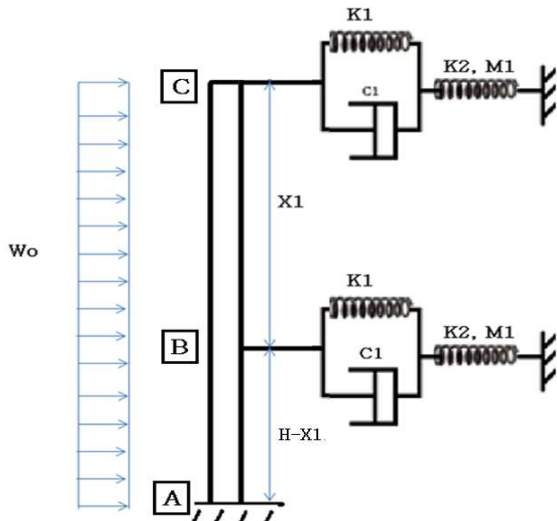


Fig. 5 Design Variables for Finding Optimum Location of Middle Spatial Structure in 2 Dimensional Model

여기서 풍압력 W_0 는 각 재단모멘트 및 전단력에 선형비례하므로, 임의의 상수를 사용할 수 있고 빌딩높이 $H=1000$ m에 대하여, 위의 식 (3-8)의 연립방정식과 변수 x 에 대한 최적해는 여러방법으로 해석이 가능하지만, 여기서는 변수들의 변화 및 상한계를 확인하기 쉬운 도해법을 사용하였다. Fig. 6과 7에 보이는 바와 같이 반력 R 은 상부로부터의 거리 $x=400$ m 위치에서 최소값에 가까운 값을 보여서 중간위치의 대공간구조는 반력과 이로 인한 추가적인 처짐이 최소화 되도록 설계가 가능하였다.

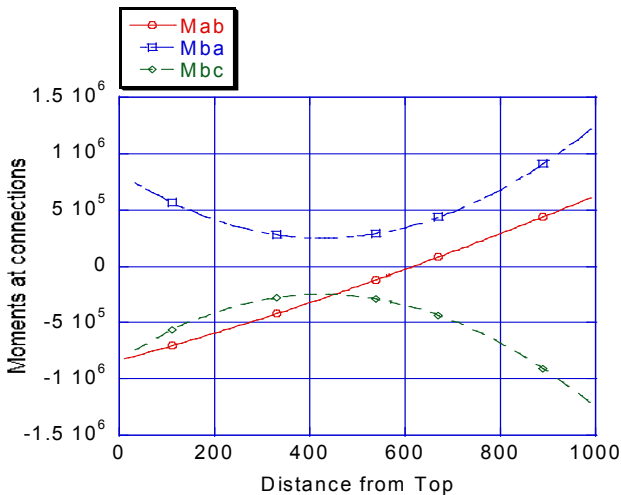


Fig. 6 Variation of End Moments for Middle Spatial Structure in 2 Dimensional Model

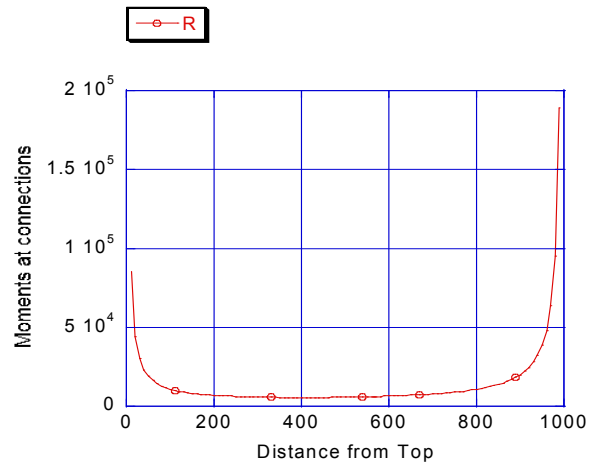


Fig. 7 Variation of Reactions for Middle Spatial Structure in 2 Dimensional Model

또한 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 빌딩 최하단의 재단모멘트 M_{ab} 는 618m위치에서 0에 가까운 값이 발견되었다. 그러므로, 대상구조와 같은 캔틸레버형 빌딩구조에서 지반과 만나는 위치에서의 모멘트를 최소화 시키는 설계가 가장 유리하다고 판단하는 경우에는 재단모멘트 M_{ab} 에 대한 최적해를 사용하는 것이 가능해진다. Fig. 9에서 보이는 바와 같이 재단모멘트 M_{ba} 와 M_{bc} 를 최소화시켜주는 위치에 대한 설계도 가능하다. 반력과 모멘트의 상기 세가지 변수를 종합적으로 고려하면 반력의 민감도가 변수 x 에 대하여 200m에서 800m사이에서 둔감하므로, Fig. 6에서 보이는 지반위치에서의 모멘트 M_{ab} 와 연결부위치에서의 모멘트 M_{ba} 가 같은 값을 가지는 위치인 450m가 적절한 것으로 판단된다.

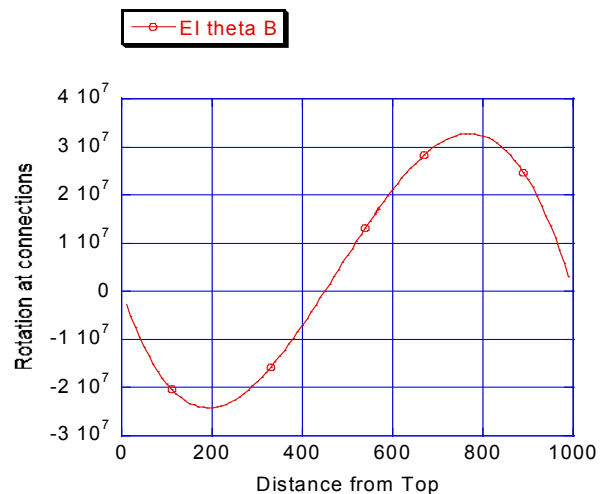


Fig. 8 Variation of Rotations for Middle Spatial Structure in 2 Dimensional Model

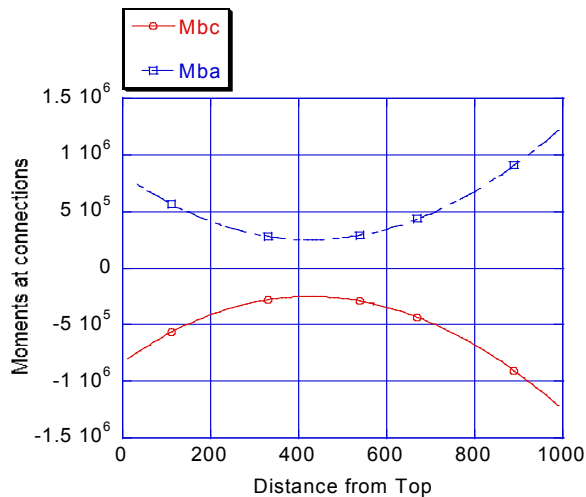
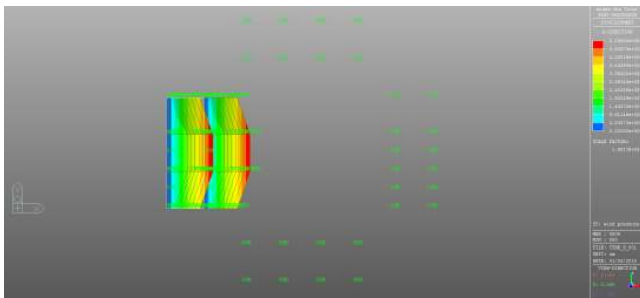


Fig. 9 Variation of End Moments for Middle Spatial Structure in 2 Dimensional Model

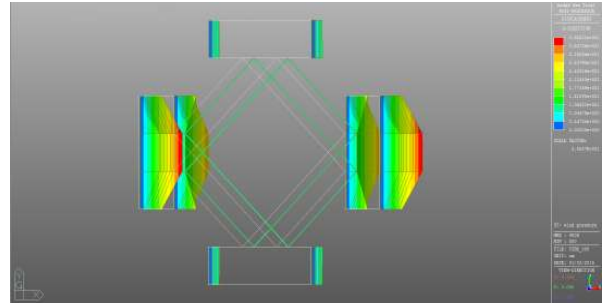
2.3 3차원 유한요소해석에 의한 횡력 및 변위의 감소효과 검증

2.2절에 제시된 식(1)의 수평처짐량의 최소를 위한 돛형상 대공간구조의 처짐의 감소효과에 대한 검증을 위하여 네 개의 빌딩과 대공간구조로 구성된 50층 복합빌딩 시스템의 3차원 구조에 대한 유한요소해석에 대한 단일빌딩의 출력과 비교하였다 (Fig. 10).

Fig. 10에서 비교된 바와 같이 정적 풍하중과 정적 지진하중에 대한 높이 200m, 50층 단일빌딩 (단면 8m*24m)과 네 개의 빌딩(단면 8m*24m)으로 구성된 제안된 초고밀도 복합빌딩시스템의 빌딩상단 변위는 각각 52.86mm와 39.02mm로 30% 정도 감소됨을 증명하였다.



(a) Top View of Single Building



(b) Top View of Hybrid Building

Fig. 10 Results of Comparison between Single Building and Hybrid Building System with Spatial Structure

3. 결론

인구밀도가 고도화된 도심지 혼잡지역의 빌딩설계시 경제성 및 안전성 제고를 위하여 다수의 빌딩으로 구성된 빌딩시스템의 빌딩간 협업제어 방식의 횡력분배 및 변위감소를 제안하였다. 도심지 인구집중과 지가상승의 필연적 결과에 대한 해결방안으로 제안된 초고밀도 복합빌딩 시스템의 설계 최적화를 위하여, 3차원 빌딩구조시스템의 2축 대칭조건과 경계조건을 이용하여 2차원 모델을 구성하고 1차부정정구조를 이루는 2차원 모델의 중요설계변수에 대하여 사용조건별 최적설계 변수를 결정하였다. 결정된 설계변수 중 빌딩상단의 최대 수평처짐과 1차부정정구조의 반력에 해당하는 대공간구조의 저항력에 대하여 두 종류의 변수에 대한 최적설계와 다수의 대공간구조를 이루는 복합빌딩시스템의 최적설계방향을 검토하였다.

대공간구조가 1개소 있는 경우에 대한 최적위치는 건물 최상단으로 평가되었으며, 2개소가 있는 경우에 상부 대공간 돛구조를 최상단에 위치시키는 경우에 하부 대공간 돛구조의 위치는 연결부 재단 모멘트와 최하층 모멘트를 동시에 최소화 시켜주는 최상단으로부터 45%로 계산되었다.

정적풍하중과 정적 지진하중에 대한 50층 단일빌딩과 제안된 초고밀도 복합빌딩시스템의 빌딩상단 변위에 대한 설계결과, 빌딩상단 변위는 각각 52.86mm와 39.02mm로 30%정도 감소됨을 증명하였다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2014R1A1A2A16055297).

References

- Kim, B. j., Lee, S. h., and Chung, L. (2011), "Design of Outrigger Damper System for Wind-Induced Vibration Control of Building Structures," *The wind engineering institute*, 15(4), pp. 163-171.
- MIDAS IT. (2014), Manual for the section property calculator.
- Madison R Paulino. (2010), PRELIMINARY DESIGN OF TALL BUILDINGS, thesis of the WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE
- Myer, R. and Montgomery, D. C. (2002), Response Surface Methodology. Wiley, New York, USA.
- Cho, T. J. (2014), "Hybrid Structural system connected by Arch and Cable structure or by dome and inverse dome with or without cable supported system on their connections," submitted patent of 10-2014-0073248.