

강성도 기준에 따른 IsoTruss[®] 그리드 고층건물의 부재선정 방법

김태현¹, 김영찬^{2*}

¹CS구조 엔지니어링, ²부경대학교 건축공학과

Member Sizing Method in IsoTruss[®] Grid High-rise Building Structures Based on Stiffness Criteria

Tae-Heon Kim¹, Young-Chan Kim^{2*}

¹C:S Structural Engineering Inc

²Department of Architectural Engineering, Pukyong National University

요약 고층건물에서 횡력 저항의 주된 역할을 하는 외주골조는 기둥과 보를 직교시켜 구성하는 것이 일반적이었으나 최근 다양한 그리드형태의 부재배치가 이루어지고 있다. 선행연구에서는 아이소트러스 그리드를 고층건물의 외주골조로 적용한 구조적 적합성이 검토되었다. 본 연구에서는 IsoTruss[®] 그리드(ITG) 구조의 예비단계 설계시 외주골조 부재의 소요단면적 산정방법을 제안하였다. 모듈의 변형과 하중과의 평형조건, 허용 횡변위, 그리고 건물의 횡변형 대 전단변형의 비를 변수로 하여 소요단면적을 유도하였다. ITG 구조에서 외주골조의 부재는 횡하중에 직각인 평면(PPR), 평행한 평면(PPL), 경사진 평면(POQ)에 배치되는데 POQ에 배치된 부재는 PPR 또는 PPL에 투영시켜 부재의 강성을 반영하였다. 소요단면적은 모듈에 작용하는 전단력과 모멘트에 의해 영향을 받는데 부재사이의 조닝을 달리하여 3가지 모델을 비교하였다. 본 연구의 효용성을 검증하기 위해 64층 건물을 설계하여 해석하였다. 최대 횡변위, 철골량, 기둥의 축력강도비를 비교분석하여 부재사이의 조닝의 효과를 알아보았다. 제안식을 이용한 횡변위가 제한치의 약 97.3%로 나와 제안식을 설계 초기단계에서 부재사이의 선정에 유용하게 적용할 수 있다.

Abstract The perimeter structure in high-rise buildings, which plays a major role in resisting lateral forces, is generally formed by the orthogonal placement of the beam and column, but currently various grid patterns are implemented. In a previous study, the adaptability of the IsoTruss[®] grid (ITG) as a perimeter structure was examined. In this study, a method of estimating the required cross sectional area of a member in a preliminary design is proposed. The members of the perimeter structure are placed in three planes, perpendicular (PPR), parallel (PPL) and oblique (POQ) to the lateral loading, and the stiffness of the members in the POQ was taken into account by projecting them onto the PPL or PPR. Three models are established for member size zoning through the height of the building, in order to investigate the effect of the shear and moment in the calculation of the required cross sectional area. To examine the effectiveness of this study, a 64-story building is designed and analyzed. The effect of the member size zoning was examined by comparing the maximum lateral displacement, required steel amount, and axial strength ratio of the columns. Judging from the maximum lateral displacement, which was 97.3% of the allowable limit, the proposed formula seems to be implemental in sizing the members of an ITG structure at the initial stage of member selection.

Keywords : IsoTruss[®] grid, Member sizing, Structural design, Tall building, Stiffness criteria

1. 서론

재료 및 건축시공기술, 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어

어의 발전으로 다양한 고층 구조시스템 설계가 가능하여 형상이 독특한 건물에 대한 노력은 건축설계에서 지속될 것이다. 최근 건축분야에서 새롭게 적용되고 있는 비틀

본 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Young-Chan Kim(Pukyong National Univ.)

Tel: +82-51-629-6091 email: yckim@pknu.ac.kr

Received September 11, 2017

Revised (1st October 23, 2017, 2nd November 8, 2017)

Accepted December 8, 2017

Published December 31, 2017

린 형태의 구조시스템[1]이나 헥사그리드 구조[2]는 혁신적 설계의 좋은 예라 하겠다.

선행연구[3]에서는 다이아그리드 구조와 ITG의 주골조의 횡강성을 비교하기 위하여 모듈의 초기 부재사이즈를 결정할 때 다이아그리드 구조 모듈과 동일한 부재사이즈를 적용하였다. 그러나 다이아그리드 구조 모듈의 소요단면적 산정식[4]은 다이아그리드 모듈의 변형과 부재의 소요강도를 이용하여 유도되었기 때문에 형태가 다른 ITG 구조에 적용할 수 없다.

본 연구에서는 ITG 구조 모듈의 변형과 부재력과의 관계식을 유도하고 허용 횡변위를 기준으로 하여 첫 번째 부재선정 시 적용할 소요단면적 식을 제안하였다. ITG 구조에서 대각부재는 3차원 공간으로 배치되기 때문에 부재를 평면상에 투영시켜 산정식의 유도과정을 단순화하였다. 제안식의 적절성을 검토하기 위해 64층 건물을 설계하여 건물의 최대 횡변위, 철골량, 그리고 기둥의 축력강도비에 대한 분석을 하였다.

2. ITG 구조 모듈의 변형과 부재력

2.1 전단력에 의한 모듈의 변형

ITG 구조의 형태는 선행연구[3]에 소개되어 있고 여기서는 3차원 부재배치의 이해를 돕기 위해 층의 평면과 기둥부재의 배치를 기술한다. Fig.1에는 모듈의 최하층 및 최상층의 평면도와 입면이 나와 있고 기둥의 번호는 대각방향으로 배치되는 기둥을 나타낸다. 따라서 모듈에는 4개면에 수직기둥 8개와 8개 평면에 대각부재 16개, 총 24개의 부재가 배치되어 있다.

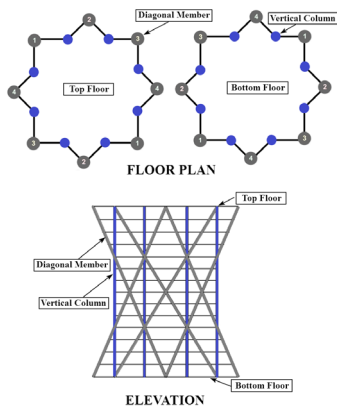


Fig. 1. Floor Plan and Elevation of ITG module

모듈에 작용하는 횡하중은 Fig.2와 같이 8개 평면에 배치된 부재가 저항하는데 평면은 하중에 수직인 평면(PPR), 평행한 평면(PPL) 그리고 경사진 평면(POQ)으로 구분할 수 있다.

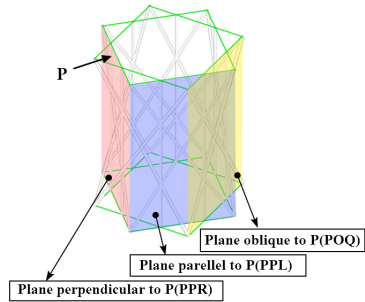


Fig. 2. Structural members in three kind of planes

모듈에 작용하는 전단력 V 는 PPL의 대각부재(Fig.3a)가 저항하는데 Fig.3b와 같이 모듈이 변형하면 대각부재의 축방향 변형률은

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta u \cos \theta}{h} = \frac{\cos \theta \sin \theta}{\sin \theta} \gamma_V \quad (1)$$

이다. 여기서 h 는 모듈의 높이, θ 는 대각부재의 각도, γ_V 는 모듈의 전단변형률이다. 대각기둥의 축력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

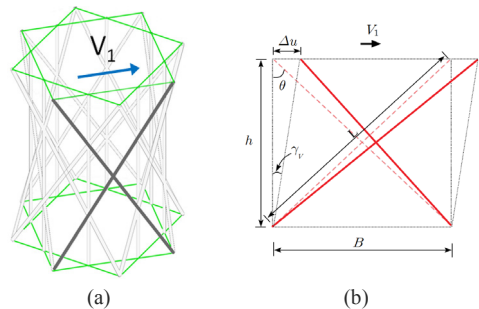


Fig. 3. Deformation of diagonal members in PPL due to shear

$$F_V = A_V E \varepsilon_V \quad (2)$$

2개의 PPL에 총 4개의 대각기둥이 있으므로 대각부

재가 저항하는 전단력은 다음과 같다.

$$V_1 = 4A_V E \cos^2 \theta \sin \theta \gamma_V \quad (3)$$

POQ에 있는 대각기둥의 전단저항은 PPL에 투영시켜 단순화(Fig.4)하였고 축방향 변형률을 구하면

$$\varepsilon_V^p = \frac{\Delta u \cos \theta_2}{h} = \cos \theta_2 \sin \theta_2 \gamma_V \quad (4)$$

이다. 총 8개의 투영된 기둥이 저항하는 전단력은 식(5)와 같다.

$$V_2 = 4A_V E (2 \sin \theta_2 \cos^2 \theta_2) \gamma_V \quad (5)$$

따라서 식(3)과 식(5)을 이용하여 전단력을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = V_1 + V_2 \quad (6)$$

$$= 4A_V E (\cos^2 \theta \sin \theta + 2 \sin \theta_2 \cos^2 \theta_2) \gamma_V$$

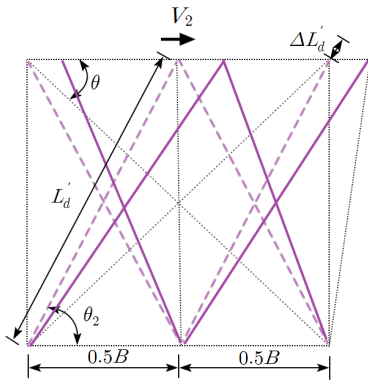


Fig. 4. Deformation of diagonal members in POQ projected to PPL due to shear

2.2 모멘트에 의한 모듈의 변형

모듈에 작용하는 모멘트는 PPR과 PPL에 있는 수직기둥과 PPR의 대각기둥과 PPR에 투영한 부재가 저항하는 것으로 가정하였다. Fig.5a에서 보는 것과 같이 수직

기둥이 저항하는 모멘트는 M_1 으로 나타내었다.

Fig.5b에서 M_1 에 의해 PPR과 PPL의 수직기둥에 발생하는 축력을 각각 F_1^R , F_1^L 라 하면 다음과 같은 모멘트 평형식을 세울 수 있다.

$$M_1 = 2F_{M_1}^1 \times B + 2F_{M_1}^2 \times 0.42B \quad (7)$$

수직기둥의 축방향 변형률은

$$\varepsilon_1^R = \frac{\Delta v_{M_1}}{h} = \frac{0.5B \Delta \beta_{M_1}}{h} = 0.5B \chi_1 \quad (8)$$

$$\varepsilon_1^L = 0.42 \varepsilon_1^R = 0.21B \chi_1$$

이다. 여기서 χ_1 는 모듈의 곡률이다. 따라서 식(8)을 식(7)에 대입하여 모멘트는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_1 = 2B(A_{M_1} E \frac{B}{2} \chi_1) + 0.84B(A_{M_1} E \frac{0.42B}{2} \chi_1) \quad (9)$$

$$= 1.1764B^2 A_{M_1} E \chi_1$$

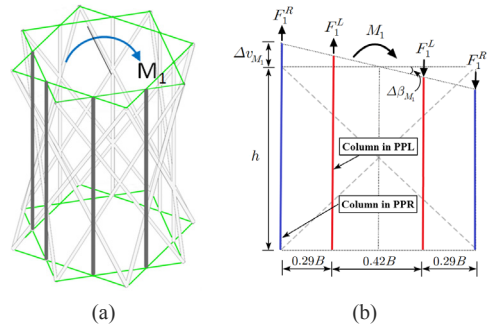


Fig. 5. Deformation of vertical columns in PPL and PPR due to moment

PPL의 대각기둥이 저항하는 모멘트는 Fig.6a에서 M_2 로 나타내었다. Fig.6b에서 M_2 에 의한 대각기둥의 축방향 변형률은

$$\varepsilon_2 = \frac{0.5B \Delta \beta_{M_2} \sin \theta}{h} = 0.5B \sin^2 \theta \chi_2 \quad (10)$$

이고 식(9)를 이용하여 M_2 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} M_2 &= (A_{M_2} E \varepsilon_2 \sin \theta) \times B \times 2 \\ &= B^2 A_{M_2} E \sin^3 \theta \chi_2 \end{aligned} \quad (11)$$

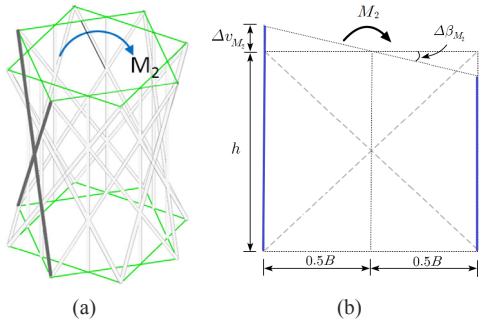


Fig. 6. Deformation of vertical columns in PPR due to moment

Fig.7에서 POQ의 대각기둥을 PPR에 투영시킨 대각기둥의 축방향 변형률은

$$\varepsilon_{M_2^p} = \frac{\Delta M_2^p}{L_d} = 0.5B \chi_{M_2^p} \sin^2 \theta_2 \quad (12)$$

이다. 그리고 PPR에 투영된 4개의 부재가 저항하는 모멘트는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} M_2^p &= 4 \times (A_{M_2} E \varepsilon^p \sin \theta_2) \times B \\ &= 2B^2 A_{M_2} E \sin^3 \theta_2 \chi_2 \end{aligned} \quad (13)$$

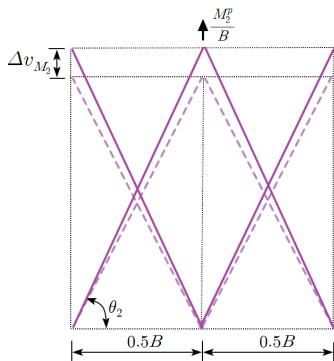


Fig. 7. Deformation of diagonal members in POQ projected to PPL due to moment

모멘트에 의한 모듈의 곡률은 같다고 단순화하여 식(9), (11), (13)을 더하여 모멘트에 대한 평형을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$M = A_M B^2 E (1.1764 + \sin^3 \theta + 2 \sin^3 \theta_2) \chi \quad (14)$$

2.3 강성기반 소요단면적의 산정

고층건물의 횡변형을 다음과 같이 휨과 전단변형의 성분으로 나타낼 수 있다[4].

$$u = \gamma H + \frac{\chi H^2}{2} \quad (15)$$

여기서 γ 는 전단변형률, χ 는 곡률이다. 휨변형 대 전단변형의 비(s)는

$$s = \frac{\frac{\chi H^2}{2}}{\gamma H} = \frac{H \chi}{2 \gamma} \quad (16)$$

이다. 최대 허용 횡변위를 $H/500$ 라 가정하고 식(16)를 이용하면 γ 와 χ 를 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{H}{500} &= (1 + \frac{H \chi}{2 \gamma}) H \gamma \\ \therefore \gamma &= \frac{1}{500(1+s)} \\ \therefore \chi &= \frac{s}{250(1+s)H} \end{aligned} \quad (17)$$

식(17)을 식(6)과 식(14)에 적용하여 부재의 소요단면적을 구하면 아래와 같고 A_V 와 A_M 중 큰 값에 의해 부재 소요단면적이 결정된다.

$$A_M = \frac{250(1+s)HM}{s B^2 E (1.1764 + \sin^3 \theta + 2 \sin^3 \theta_2)} \quad (18)$$

3. 제안식을 적용한 설계

제안식을 적용한 부재선정방법의 효율성을 분석하기 위해 64층 건물을 설계하였고 1층의 기준 평면도[3]는

Fig.8과 같다. 층고는 3.75m로 건물의 높이는 240m이고 대각부재의 경사각은 59°이다. 고정하중은 4kN/m², 활하중은 2.5kN/m², 풍속은 38m/s로 하였다[5]. 부재간 접합은 강접합, 보와 외주기둥과의 접합은 핀접합으로 하였다. 구조해석은 Midas[6]를 이용하였고 Fig. 9는 구조모델링에 의한 골조의 투시도이다. 부재는 원형강관을 사용하였다.

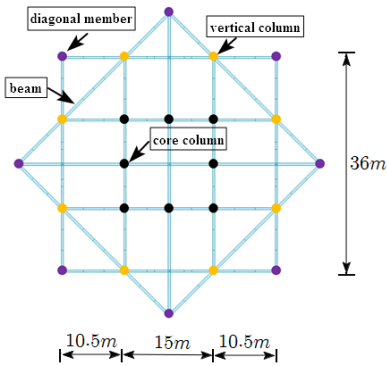


Fig. 8. Typical floor plan of IsoTruss[®] grid structure

식(18)에서 모듈의 전단력과 모멘트의 크기에 따라 소요단면적이 달라져 모듈의 높이가 소요단면적을 결정하는 요소가 된다. 모듈에서는 수직 및 대각부재사이즈가 같기 때문에 모듈내의 부재력 산정 위치를 다르게 하여 3개의 모델을 설정 하였다. 식(18)에 적용하는 전단력과 모멘트 값을 산정하는 위치를 (1) M-1 모델은 모듈의 최하층, (2) M-2 모델은 모듈의 최하층과 중간층, (3) M-3 모델은 모듈의 최하층, 그리고 모듈의 수직형태인 부분에서 최상층과 최하층으로 하였다.

Fig.9에서 맨 아래의 모듈을 보면 조닝번호가 M-1 모델은 101, M-2 모델은 201 202, 그리고 M-3 모델은 301, 302, 303으로 부재사이즈를 다르게 적용하였다. Table 1에는 M-3 모델의 조닝별 부재사이즈가 제시되어 있다. 각 조닝의 위치에서 전단력과 모멘트의 크기를 산정해서 식(18)을 이용하여 소요단면적을 산정하고 A_V 와 A_M 중 큰 값(굵은 숫자)으로 부재사이즈를 결정하였다.

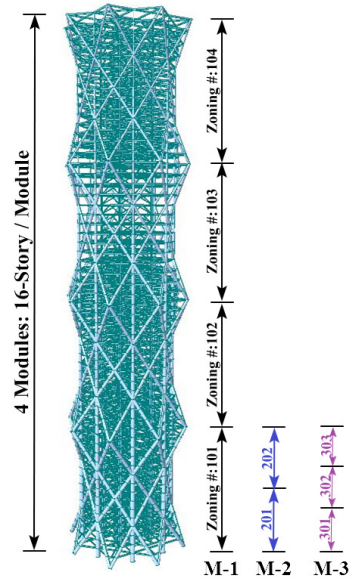


Fig. 9. Member size zoning along building height

Table 1. Member sizing for M-3 model(s=3)

Z_n^*	V (kN)	M (MN-m)	A_M (cm ²)	A_V (cm ²)	ϕ^* (mm)	t^* (mm)
312	2,974	30.3	26	188	320	20
311	6,719	158.4	133	424	350	45
310	9,661	306.6	258	610	440	50
309	12,605	509.0	429	797	460	65
308	15,845	869.2	732	1,001	560	65
307	18,339	1,173.3	988	1,159	630	65
306	20,788	1,522.8	1,282	1,314	710	65
305	23,393	2,077.4	1,750	1,478	740	85
304	25,303	2,508.3	2,112	1,599	840	90
303	27,073	2,972.8	2,504	1,711	940	95
302	28,729	3,670.5	3,082	1,815	1040	105
301	29,706	4,185.5	3,526	1,877	1130	110

*) Z_n -Zoning number(Fig. 9), ϕ -diameter, t -thickness

4. 해석결과의 분석

3개의 모델에 대하여 s=2, 3, 4, 5를 적용하여 설계한 건물을 해석하여 최대 횡변위와 외주골조의 철골량을 비교하였다. Fig.10에서 최대 횡변위가 s=3일 때 허용 횡

변위(48cm)에 가장 근접하는 것을 알 수 있다. s=3일 때 허용 횡변위(H/500)를 기준으로 하여 M-1 모델은 82.5%, M-2 모델은 93.5%, M-3 모델은 97.3%의 횡변위를 나타내었다.

다이아그리드 구조의 제안식[4]은 모듈의 높이가 6개 층인 42층, 60층 건물의 설계에서 최대 횡변위가 목표값의 약 89%인 결과를 보였다. 형태는 다르지만 본 연구에서 제안한 식이 4개의 모듈(모듈당 16개층)로 이루어진 64층 건물의 설계에서 최대 횡변위가 목표값의 82.5%인 결과를 보인 것은 제안식의 정확성이 비교적 양호하다고 판단된다. 허용 횡변위를 기준으로 부재의 소요단면적을 추정하는 방법으로 유도된 산정식에는 전단력과 모멘트의 크기가 포함되기 때문에 이 값들의 산정위치가 소요단면적 결정에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 따라서 부재사이즈 조닝을 적용한 모델(M-2, M-3)에서는 정확도가 크게 향상되었다.

Fig.11은 외주골조의 철골량으로 M-1 모델이 M-3 모델보다 19%정도 많은 것을 알 수 있다. Table 1에서 첫 번째 모듈(1~16층)의 부재를 보면 M-3 모델의 부재사이즈가 $\phi 1130 \times 110$ (1~7층), $\phi 1040 \times 105$ (8~12층), $\phi 940 \times 95$ (12~16층)이지만 M-1 모델의 부재사이즈는 $\phi 1130 \times 110$ (1~16층)으로 횡강성이 필요이상 커져 횡변위가 감소하면서 철골량은 증가하는 결과를 가져왔다.

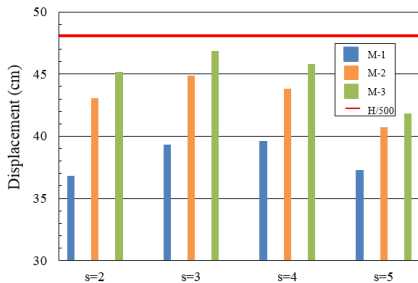


Fig. 10. Maximum lateral displacement

기둥이 받는 축응력의 수준을 나타내는 축력강도비는 Fig.12에 나와 있는데 강도비가 1.0에서 멀리 있을수록 부재의 강도에 여력이 많다는 의미이다. 모든 모델의 강도비가 건물의 중하부에서 0.3~0.6정도이나 상부에서 M-1 모델과 M-2 모델은 강도비의 분포가 왼쪽으로 구부러진 형태를 보인 반면 M-3 모델에서는 분포가 약간 수직적 형태로 상부에서 부재들이 균일하게 응력을 받고 있어 부재 배치가 다른 모델에 비해 효과적임을 알 수 있다.

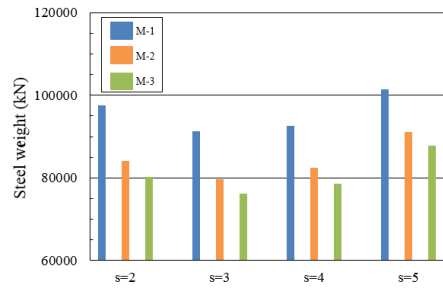


Fig. 11. Total steel weight of perimetal frame

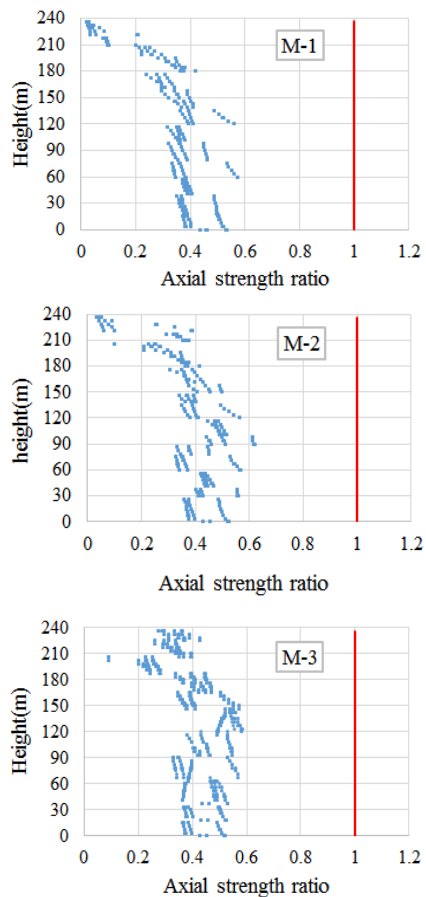


Fig. 12. Axial strength ratio of three models(s=3)

5. 결론

본 연구에서는 ITG 구조 고층건물의 부재선정 초기 단계에서 적용할 소요단면적 산정식을 제안하였다. 제안

식을 적용하여 64층 건물을 설계하고 해석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 모듈의 변형과 부재력의 관계를 수립하는 과정에서 공간상에 있는 부재의 강성을 평면에 투영시켜 유도식을 단순화시킨 방법은 최대 횡변위가 목표값의 82.5%(M-1 모델)에 도달하여 부재선정이 효과적이지 못한데 이는 모듈이 16개 층으로 전 층에 동일 부재를 적용한 결과이다.
- (2) 소요단면적 제안식(식 18)은 모듈의 전단력과 모멘트를 산정하는 층의 위치에 따라 소요단면적이 달라지기 때문에 모듈에서 부재사이즈를 다르게 적용한 모델에서 최대 횡변위가 목표값의 93.5%(M-2 모델), 97.3%(M-3 모델)로 향상되어 부재사이즈 조닝을 통한 부재선정 방법이 효율적이라는 것을 알 수 있다.
- (3) M-1 모델 대비 M-3 모델의 철골량 감소율(19%)은 최대 횡변위의 증가율(18%)과 유사하게 나와 제안식에 따른 부재사이즈 변화가 적절하게 외주골조의 횡강성을 배분하는 것으로 보인다.
- (4) 기둥의 축력강도비는 건물의 중하부에서 0.3~0.6 정도이나 상부로 갈수록 강도비가 작아졌는데 M-3 모델이 비교적 고른 강도비를 보이고 있어 다른 모델에 비해 부재선정이 효율적이라 할 수 있다.

이상의 결과를 토대로 본 연구에서 제시한 방법은 ITG 구조의 설계 시 엔지니어에게 유용한 도구로써 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

References

- [1] M. Piekarski, "Structural system concept for twisted Buildings", Proceedings of the third conference on Structures and Architecture, Guimares, Portugal, 27-29 July, pp. 1120-1127, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1201/b20891-154>
- [2] J. H. M de Meijer, Lateral Stiffness of Hexagrid Structures, Master's thesis, Eindhoven University of Technology, Department of the Built Environment, 2012.
- [3] T. H. Kim, Y. C. Kim, "Characteristics of Building Structural System with IsoTruss[®] Grid", Journal of the Korean Academia-Industrial Cooperation Society, vol. 18, no. 2, pp. 737-742, 2017.

DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.2.737>

- [4] K. S. Moon, J. J. Connor, J. E. Fernandez, Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design, The Structural Design of Tall and Special Buildings, vol. 16.2, pp. 205-230, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1002/tal.311>
- [5] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korean Building Code-Structural, 2016.
- [6] MIDAS, Gen2017, vol. 860 R3.

김 태 헌(Tae-Heon Kim)

[정회원]



- 2015년 8월 : 부경대학교 건축공학과 (공학사)
- 2017년 2월 : 부경대학교 대학원 건축공학과 (공학석사)
- 2017년 1월 ~ 현재 : CS구조엔지니어링 엔지니어

<관심분야>

합성구조, 철골구조

김 영 찬(Young-Chan Kim)

[정회원]



- 1983년 2월 : 서울대학교 건축학과 (공학사)
- 1985년 2월 : 서울대학교 대학원 건축학과 (공학석사)
- 1995년 5월 : West Virginia University 토목공학과 (공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 건축공학과 교수

<관심분야>

합성구조, 철골구조