

# 부재배치에 따른 묶음튜브 구조의 전단지연현상

김영찬<sup>†</sup> · 김 현

부경대학교 건축학부

(2005. 12. 29. 접수 / 2006. 5. 16. 채택)

## The Shear Lag Phenomenon in Bundled Tube Structure According to the Arrangement of Structural Members

Young-Chan Kim<sup>†</sup> · Hyun Kim

Division of Architecture, Pukyong National University

(Received December 29, 2005 / Accepted May 16, 2006)

**Abstract** : The purpose of this study is to examine the effect of column spacing and beam size on the lateral displacement and shear lag phenomenon in bundled tube system. According to the parametric study in which the spacing of columns, the size of columns and girders in bundled tube were selected as a parameter, it is the most efficient to increase the size of the interior columns with the largest reduction of lateral drift if the steel tonnage of a frame can be increased. It was noticed that the shear lag was affected more by the exterior stiffness factor and ratio than by the interior ones when column spacing was changed, and when the size of column was changed, the reverse phenomenon was happened. And The change of column spacing affected shear lag, lateral drift, and tonnage more than that of column size or girder size.

**Key Words** : shear lag phenomenon, bundled tube structure, high-rise building

### 1. 서 론

도시 인구의 증가로 인한 복잡한 도심지의 개발은 토지의 효율적인 이용을 요구한다. 건물의 고층화는 이러한 요구로 인해 급속하게 진행되고 있다. 초고층 건물의 정의는 명확하게 제시되어 있지 않지만, 구조 엔지니어의 입장에서 초고층 건물이란 “건물의 높이로 인하여 바람이나 지진과 같은 횡력이 구조설계에 큰 영향을 미치는 건물”이라고 할 수 있으며, 대개 20-30층 정도를 중층, 그 이상을 고층 또는 초고층이라 하고 있다<sup>1,2)</sup>.

초고층 건물은 수직하중보다 횡하중의 영향이 크다. 횡력 저항 시스템에는 전단벽 구조시스템, 아웃리거 시스템, 튜브 구조시스템, 가새 골조 시스템등이 있다. 이 중 튜브구조는 구조물의 외부에 기둥을 촘촘히 배치하고, 기둥과 기둥 사이를 큰 보로 연결하여 횡하중뿐만 아니라 연직하중도 지지하도록 한 구조

방식이다. 이것은 속이 빈 튜브와 같이 거동하여 횡력에 효과적으로 저항하는 시스템이라 할 수 있다. 하지만 구조물이 구멍 뚫린 튜브와 같은 형태를 가지고 있음으로 해서, 거동은 구멍이 뚫리지 않은 튜브의 거동보다 상당히 복잡하다. 전단지연현상(shear lag)은 구조물의 외곽기둥에 불균등한 축응력을 발생시켜 사용성에 문제를 야기시킬 수 있다(Fig. 1).

횡하중 저항 시스템중 튜브 구조물은 경제적이고 효율적인 저항시스템이다. 이러한 튜브구조물은 전단지연 제어를 위해 골조튜브구조, 가새튜브구조, 이중튜브구조, 번들튜브구조등으로 발전하였다. 기존의 연구에서 순수튜브구조나 가새튜브구조, 이중튜브구조에 대한 연구는 많이 이루어졌으나, 번들튜브구조에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구는 순수튜브 구조상태에 있는 번들튜브구조의 내외부 기둥의 간격, 크기 그리고 보를 변수로 하여 철골량과 변위의 관계를 살펴보고, 골조강성계수와 강성비에 따른 전단지연과의 관계를 고찰하여 초기구조설계시 기초자료를 제시하고자 한다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
yckim@pknu.ac.kr

## 2. 전단지연현상

초고층 건물에서 완벽한 튜브구조는 캔틸레버처럼 거동한다. 튜브 구조가 속이 찬 보와 같은 경우 횡하중에 의한 이상적인 응력분포는 Fig. 1의 점선과 같이 나타나지만 속이 빈 튜브구조의 경우는 실선처럼 나타난다. Fig. 2는 횡력에 저항하기 위한 철골량을 등가의 벽체두께로 치환했을 경우를 나타내며, 얇은 전단벽체를 가진 보(thin-walled beam)와 같은 거동을 하는 경향이 있다(Fig. 2). 얇은 전단벽체 보에서 전단응력과 전단변형은 속이 찬(solid)보에서의 전단응력과 변형보다 매우 크고, 그 결과 휨응력에 심각한 영향을 주는 큰 전단변형이 일어난다. 큰 전단변형 때문에, 휨이론에 사용되는 Bernoulli의 평면 유지의 가정이 위배된다. 얇은 벽체 구조물에서 전단변형에 의해 평평한 단면에 뒤틀림이 발생한다. 플랜지 중간부분의 응력은 모서리부분의 응력에 비해 벽체 패널의 강성부족으로 작은값을 가진다. 이러한 현상을 전단지연이라 하고, 초고층 튜브 구조물의 설계에 있어 중요한 역할을 한다<sup>3)</sup>.

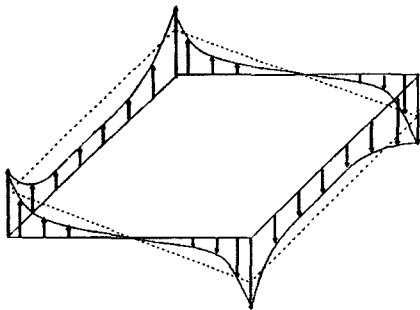


Fig. 1. Stress distribution in tube under lateral load.

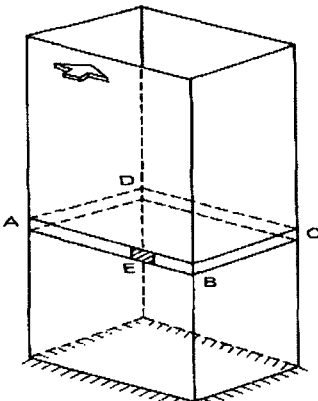


Fig. 2. Cantilever tube under lateral load.

## 3. 강성계수와 강성비

내외부 기둥, 보에 의한 강성계수와 강성비를 구하기 위해 Fig. 3과 같은 단위골조를 고려한다.

수평전단력을 Q라고 할 때 수직 전단력은 다음과 같이 표현한다<sup>4)</sup>.

$$V_g = \frac{h}{d_f} \times Q \quad (1)$$

기둥 단부의 구속정도가 전단지연 현상에 미치는 영향을 살펴보기 위해 강성비를 아래의 식으로 산정한다<sup>4)</sup>.

$$S_r = \frac{I_c d_f}{I_b h} \quad (2)$$

여기서  $I_c$ ,  $I_b$ 는 각각 기둥, 보의 단면2차모멘트이다. 전단지연현상을 수치화시키기 위해 전단지연계수는 내부기둥응력을 모서리기둥응력으로 나누어 구한다. Fig. 3에서 전단력 Q에 의한 수평변위  $\Delta_1$ 과 강성계수  $S_r$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>5)</sup>.

$$\Delta_1 = Q h^2 \left[ \frac{1}{12E} \left( \frac{d_f}{I_b} + \frac{h}{I_c} \right) + \frac{1}{G} \left( \frac{1}{d_f A_b} + \frac{1}{h A_c} \right) \right] \quad (3)$$

여기서 E는 탄성계수, G는 전단탄성계수,  $A_c$ ,  $A_b$ 는 각각 기둥, 보의 단면적이다.

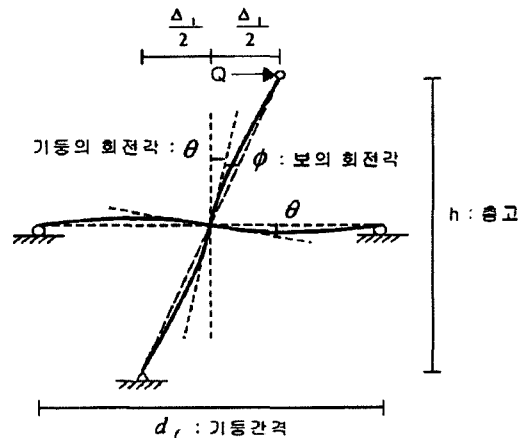


Fig. 3. Deformation of unit frame.

$$S_f = \frac{1}{EA_c h \left( \frac{\alpha}{12E} + \frac{\beta}{G} \right)} \quad (4)$$

여기서,  $\alpha = \frac{d_f}{I_b} + \frac{h}{I_c}$ ,  $\beta = \frac{1}{d_f A_b} + \frac{1}{h A_c}$

#### 4. 해석모델의 개요

본 연구에서는 80층 철골조 묶음튜브구조(Bundled tube structure)를 기본모델로 하였고 내외부 기둥간격과 층고는 3m이며, 기본평면은 Fig. 4와 같다. 바닥은 격막으로 가정하여 수평하중을 보와 기둥만 전달하도록 한다. 그리고 외주부의 골조가 수평하중을 지지한다고 가정한다. 풍하중은 부산지역을 기준으로 하여 기본설계풍속 40m/s, 노풍도 C, 가스트 계수(Gf) 1.9, 중요도 계수(Iw) 1.1로 하여 질량중심의 X방향으로만 작용시켰다<sup>6)</sup>. 본 연구는 구조해석 프로그램인 MIDAS<sup>7)</sup> ver 4.2.2를 사용하여 해석하였다.

묶음튜브의 내외부 기둥간격, 기둥크기, 보크기의 변화에 따른 전단지연의 영향을 알아보기 위해 Table 1, 2, 3과 같이 기둥의 간격과 기둥, 보부재의 크기를 변화시켰다.

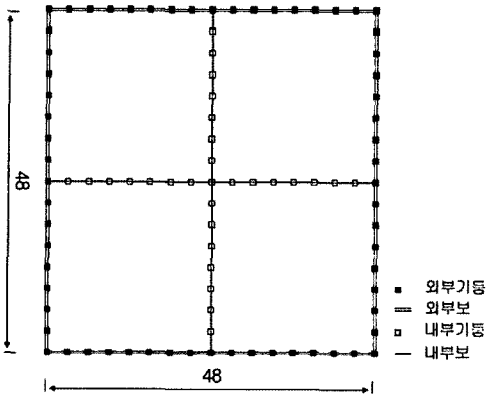


Fig. 4. Framing plan of model.

Table 1. Column spacing of models

모델명	내부기둥(m)	외부기둥(m)
A1	2	3
A2	3	2
A3	3	3
A4	3	4
A5	4	3

주) 내외부 기둥크기(mm) : 800×800×40  
내외부 보크기(mm) : 800×400×40×50

Table 2. Column size of models

모델명	외부기둥(mm)	내부기둥(mm)
B1	800×800×40	700×700×40 <sup>1)</sup>
B2	800×800×40	800×800×40 <sup>2)</sup>
B3	800×800×40	900×900×40 <sup>3)</sup>
B4	700×700×40	800×800×40
B5	900×900×40	800×800×40

주) 내외부 기둥간격 : 3m

내외부 보크기(mm) : 800×400×40×50

부재의 단면적(cm<sup>2</sup>), 단면2차모멘트(cm<sup>4</sup>)는 각각 1) 1056, 769472 2) 1216, 1173845 3) 376, 1699818

Table 3. Beam size of models

모델명	외부보(mm)	내부보(mm)
C1	800×400×40×50	700×400×40×50 <sup>1)</sup>
C2	800×400×40×50	800×400×40×50 <sup>2)</sup>
C3	800×400×40×50	900×400×40×50 <sup>3)</sup>
C4	700×400×40×50	800×400×40×50
C5	900×400×40×50	800×400×40×50

주) 내외부 기둥간격 : 3m

내외부 기둥크기(mm) : 800×800×40

부재의 단면적(cm<sup>2</sup>), 단면2차모멘트(cm<sup>4</sup>)는 각각 1) 640, 495333 2) 680, 677666 3) 720, 894000

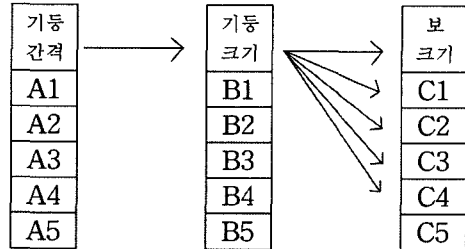


Fig. 5. Parameter combination for model structure.

상기의 모델들은 기둥간격, 기둥크기, 보크기만을 변화시킨 모델인데, 3개의 변수를 조합한 125개의 모델(model 1부터 model 125까지)을 만들어 해석하였다(Fig. 5).

#### 5. 해석결과와 분석

골조의 철골량과 횡변위와의 관계는 4가지의 경우가 있을 수 있다. 그 중 철골량이 증가하면서 횡변위가 증가하면 비효율적이므로 제외하였다. 철골량이 증가하였지만 횡변위가 감소한 경우가 Fig. 6에 나와 있으며, Fig. 7에는 철골량이 감소하였으나 횡변위가 증가한 경우를 제시하였다.

철골량증가-횡변위 감소의 경우 C3이 변위/철골량비의 절대값이 가장 커 효율적이라고 할 수 있다.

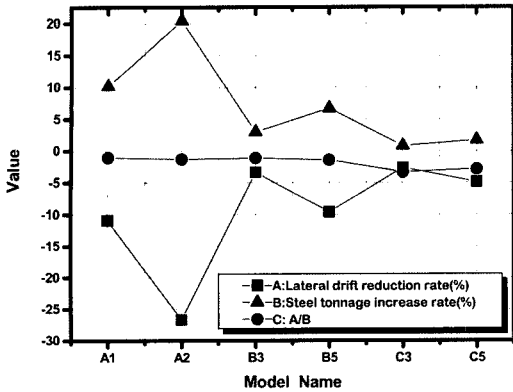


Fig. 6. Case of more tonnage and less lateral drift.

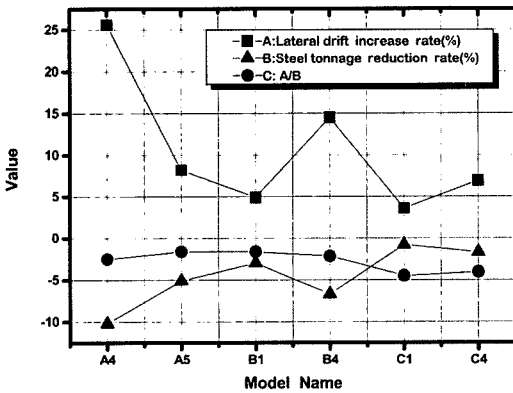


Fig. 7. Case of less tonnage and more lateral drift.

이는 적은 량의 철골을 증가시켜 횡변위가 크게 감소한 모델이다. 이 모델은 기준모델(내외부동일부재: 기둥간격 3m, 기둥크기 800×800×40, 보크기 800×400×40×50)과 비교해서 내부기둥의 크기만을 증가시킨 모델로 철골량을 증가시켜 횡변위를 제어하고자 할 경우 유용하다고 할 수 있겠다.

철골량감소-횡변위증가의 경우 A5가 변위/철골량비의 절대값이 가장 작아 효율적이라고 할 수 있다 (Fig. 7). 이는 골조의 철골량을 최대한 줄이면서 최소한의 횡변위증가를 가져오는 경우이다. 이 모델은 기준모델과 비교해서 내부기둥의 간격만을 넓힌 모델이다. 내부기둥의 크기를 작게 한 B1은 아주 근소한 값의 차이지만 거의 A5와 유사한 변위/철골량비를 갖는다.

Table 4는 기둥간격, 기둥크기, 보크기를 각각 변화시킨 모델의 내외부 강성계수, 강성비와 전단지연계수를 A, B, C모델별로 나누어 정리한 것이다.

기둥의 간격을 변화시킨 A모델에서 외부강성계수와 강성비가 일정할 때(내부기둥간격 증가), 내부

강성계수가 18.4% 감소했으나 강성비는 100% 증가하였고 전단지연계수는 12% 감소하였다. 반대로, 내부강성계수와 강성비가 일정할 때(외부기둥간격증가)에는 전단지연계수가 25% 증가하였다. 외부강성계수와 강성비가 내부보다 더 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

기둥크기를 변화시킨 B모델에서 외부기둥의 크기가 일정하고 내부기둥의 크기가 증가한 경우, 강성계수가 2.9% 감소하였으나 내부강성비는 120% 증가하였고 전단지연계수는 4.4% 증가하였다. 그러나, 내부기둥이 일정하고 외부기둥의 크기가 증가하는 경우, 전단지연계수는 4.3% 감소하였다.

보크기를 변화시킨 C모델에서 내부보의 크기를 증가시킬 때, 내부강성계수가 34% 증가하였으나 강성비는 45% 감소하였고 전단지연계수는 6.8% 증가하였다. 그러나, 외부보의 크기가 증가할수록, 전단지연계수는 4.4% 증가하였다. 내부강성계수와 강성비가 외부보다 더 크게 전단지연에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

강성계수와 강성비는 반비례 관계에 있으며 전단지연에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그리고 기둥간격의 변화가 기둥크기와 보크기의 변화보다 전단지연에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다.

Table 4. Stiffness factor, ratio and shear lag factor

모델	외부		내부		전단지연 계수	
	강성계수	강성비	강성계수	강성비		
A	A1		0.038	1.155	0.49	
	A3	0.035	1.732	0.035	1.732	0.45
	A5			0.031	2.310	0.43
	A2	0.038	1.155			0.40
	A3	0.035	1.732	0.035	1.732	0.46
	A4	0.031	2.310			0.50
B	B1		0.035	1.136	0.45	
	B2	0.035	1.732	0.035	1.732	0.46
	B3			0.034	2.509	0.47
	B4	0.035	1.136			0.47
	B2	0.035	1.732	0.035	1.732	0.46
	B5	0.034	2.509			0.45
C	C1		0.030	2.370	0.44	
	C2	0.035	1.732	0.035	1.732	0.46
	C3			0.040	1.313	0.47
	C4	0.030	2.370			0.45
	C2	0.035	1.732	0.035	1.732	0.46
	C5	0.040	1.313			0.47

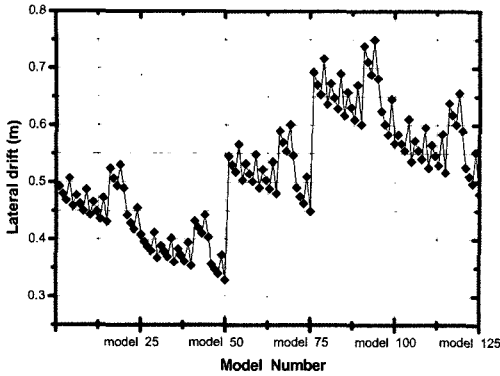


Fig. 8. Lateral drift of models.

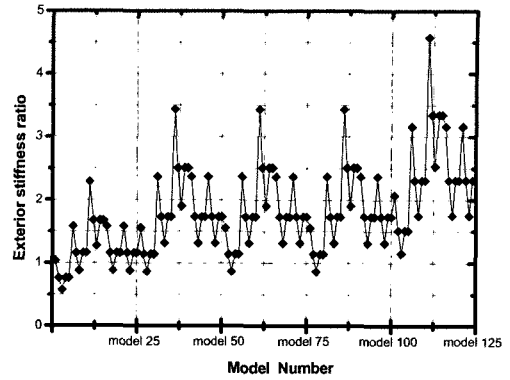


Fig. 11. Exterior stiffness ratio.

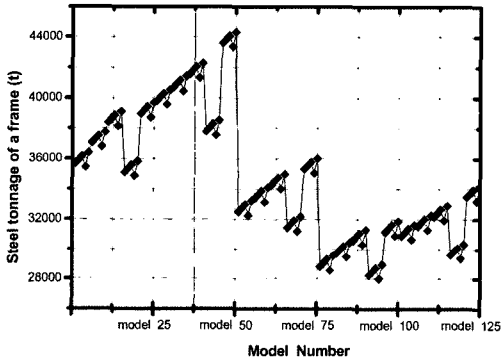


Fig. 9. Steel tonnage of models.

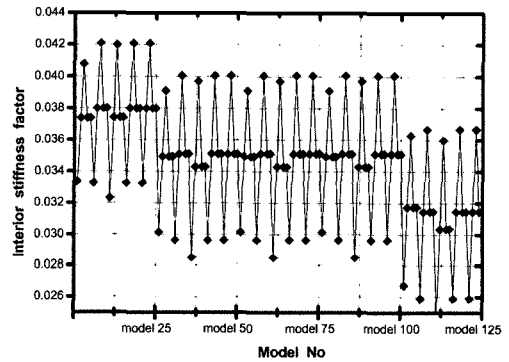


Fig. 12. Interior stiffness factor.

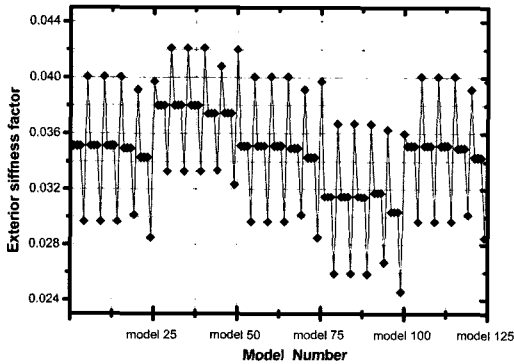


Fig. 10. Exterior stiffness factor.

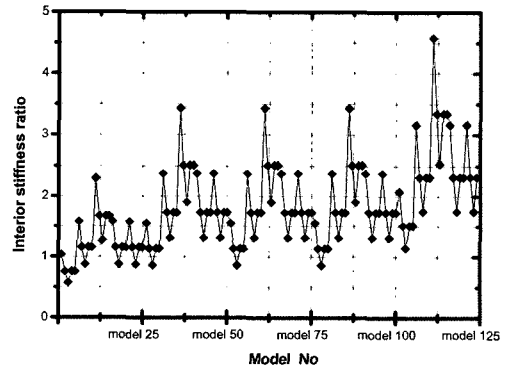


Fig. 13. Interior Stiffness ratio.

전층 같은 부재를 사용하여 조합한 125개 모델의 결과를 Fig. 8~Fig. 14에 나타내었다. 강성계수, 강성비, 전단지연, 횡변위, 철골량의 그래프는 전층 같은 부재를 사용한 모델과 20층 간격으로 부재를 줄인 모델의 결과값이 거의 비슷한 패턴으로 값이 변하여 전층 같은 부재를 사용한 모델의 강성계수, 강성비를 적용하여 해석할 수 있었다.

철골량과 횡변위는 반비례관계에 있으나, 철골량

이 감소함에도 불구하고 횡변위가 감소하는 모델이 2개가 있었다. model 65와 model 125로 model 65는 내·외부기둥 간격은 같고, 내부기둥을 크게 하였으며, 외부보 크기를 크게 한 경우이다. model 125는 내부기둥 간격을 넓히고, 외부기둥을 크게 하며 외부보를 크게 한 경우이다. 그중 model 125가 철골량 감소대비 횡변위 감소가 가장 큰 모델로 가장 효율적인 조합을 가진 경우라고 할 수 있다.

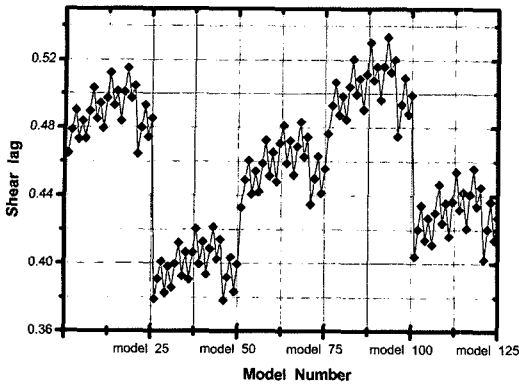


Fig. 14. Shear lag factor.

기둥크기, 보크기의 변화에 따른 영향은 25개 모델간격으로 반복적인 모습을 보이고 있다. 하지만 기둥간격에 따른 영향은 25개 모델간격으로 크게 변함을 알 수 있다. 따라서 외부강성계수, 내외강성비, 전단지연이 기둥간격의 변화에 따라 영향을 크게 받을 수 있다. 하지만 내부강성계수의 결과값은 기둥간격에 따른 강성계수의 영향이 적음을 나타내고 있다.

## 6. 결론

본 연구에서 번들튜브구조의 내외부 기둥의 간격, 기둥의 크기 그리고 보크기를 변수로한 철골량-횡변위관계와 골조강성계수, 강성비에 따른 전단지연 현상에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 내외부 기둥의 간격, 기둥의 크기, 보크기를 각각 달리 하였을 때 철골량을 증가시키는 경우 횡변

위를 가장 크게 감소시킬 수 있는 것은 내부기둥을 크게 하는 것이 효율적이었다. 반대로 철골량을 감소시킬 경우 횡변위를 가장 작게 증가시킬 수 있는 것은 내부기둥을 축소시키는 것이 가장 효율적이었다.

2) 본 연구에서 나온 결과를 근거로 전단지연현상에 유리한 경우는, 기둥간격으로 보면 외부기둥간격이 큰 경우, 기둥크기로 보면 내부기둥이 큰 경우, 보의 경우에는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.

3) 전층 같은 부재를 사용하여 조합한 125개 모델에서 외부강성계수, 내외강성비, 전단지연, 횡변위, 철골량은 기둥크기, 보크기의 변화 보다는 기둥간격의 변화에 더 민감한 변화를 보였다.

## 참고문헌

- 1) Bryan S. Smith and Alex Coull, Tall Building Structures: Analysis and Design, John Wiley & Sons, Inc. New York, pp. 2~4, 1991.
- 2) 신영수, "고층건물의 구조형식", 한국전산구조 공학회지, 제7권, 제1호, pp. 44, 1994.
- 3) Bungale S. Taranath, Structural Analysis and Design of Tall Buildings, McGraw-Hill, New York, pp. 282~284, 1988.
- 4) 이리형, 고층건물의 구조, 대건사, 서울, pp. 157~161, 255, 1992.
- 5) 유은정, 이강건, 이리형, "구조변수와 전단벽 배치에 따른 이중튜브구조의 전단지연 현상", 대한건축학회 학술발표논문집, 제19권, 제2호, pp. 41~46, 2003.
- 6) 대한건축학회, 건축구조설계기준, 기문당, 2005.
- 7) Posdata, MIDAS GEN User's Manual, 2000.