

## 골조-전단벽 구조에서 전단/코어벽의 Shear Lag 현상

### Shear Lag Phenomenon in Shear/Core Wall of Wall-Frame Structures

이 은 진\*      이 강 건\*\*      이 리 형\*\*\*  
Lee, Eun-Jin    Lee, Kang-Kun    Lee Li-Hyung

#### ABSTRACT

This study investigates the shear lag phenomenon existing in the shear wall of the wall-frame structure. Elastic analysis of such structures is carried out using a 3-D frame analysis program. The structural parameters governing the shear lag phenomenon are wall height and thickness. The analysis shows that the overturning moment due to external lateral load is resisted by both of the shear/core wall and the external frame. Severe unstable stresses are identified in height ratio of about 0.7. The taller or thinner wall shows the smaller shear lag phenomenon.

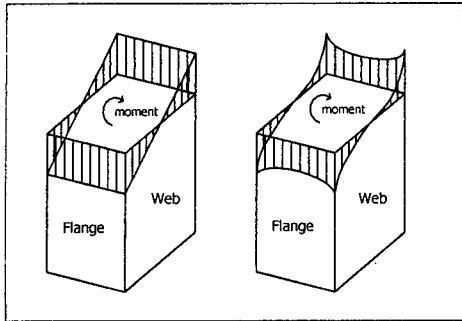
#### 1. 연구배경 및 목적

최근 전 세계적으로 건물의 고층화가 대두되면서, 고층 건물의 구조 형태 및 거동에 대한 관심이 높아지고 있다. 고층건물의 구조 시스템 중 튜브 시스템의 전단지체(이하 'shear lag'라 한다.) 현상은 건축물의 응력을 불균형하게 하여 건물의 안정성을 약화시키고 있다. 튜브 시스템은 수평하중 저항 부재가 구조물 외부 주변을 따라서 배열되어 수평하중에 저항하나, 골조-전단벽 구조 시스템은 외부 골조 튜브 내에 존재하는 코어벽이 골조와 함께 수평하중과 전단력을 분담하여 고층건물에서 문제시되는 횡력저항에 효율적이고, 고층 구조물에 경제적인 시스템이라고 평가되고 있다.

그림 1은 수평하중을 받는 튜브 구조물의 응력분포를 나타낸 것이다. 플랜지 및 웨브의 응력은 기본 힘이론과 달리 비선형 형태를 보이는데, 이러한 비선형 현상을 Shear lag 현상이라 한다.

Shear lag 현상은 접합부 부분의 응력이 중심부보다 높게 나타나는 Positive shear lag과 중심부의 응력이 접합부보다 크게 나타나는 Negative shear lag로 구분될 수 있다. Positive shear lag는 슬래브의 warping 현상을 일으켜, 2차 부재나 내부 칸막이 변형에 원인이 된다. Negative shear lag는 플랜지 패널의 압축부에서는 국부좌굴을, 인장부에서는 균열을 발생시킨다. 이러한 원인들은 구조시스템의 구조 효율성을 저하시키는 원인이 된다. 골조-전단벽 구조에서 내부 전단벽의 shear lag 현상은 구조물의 높이, 벽체 두께, 웨브폭/플랜지폭비, 높이/웨브 길이비, 높이/플랜지 길이비 등의 구조적인 변수에 따라 다르게 나타나고 있으나, 기존의 연구에서는 전단벽에 존재하는 shear lag 현상의 원인 및 주요변수에 대한 연구가 전무하며, 따라서 그 현상을 설명하지 못하고 있다. Shear lag 현상은 웨브와 플랜지의 유효성을 감소시키고 웨브-플랜지 접합부에서 수직응력과 구조물의 수평변위를 증가시킨다.

\* 한양대학교 건축공학과 대학원 박사과정  
\*\* 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터 연구조교수, 공학박사  
\*\*\* 한양대학교 건축공학과 교수, 공학박사



(a) Shear Lag 무시 (b) Shear Lag 고려  
그림1 축응력분포

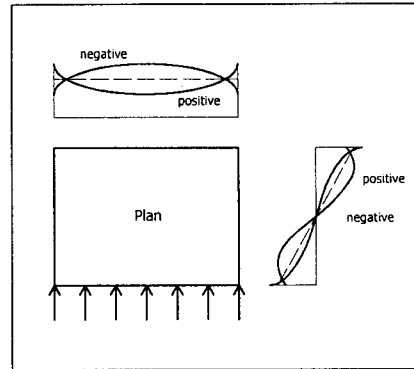


그림2 Positive/Negative Shear Lag

Shear lag 현상은 교각 데크나 전단/코어 벽체와 같은 넓은 웨브를 가지는 구조물 그리고 골조튜브와 같이 캔틸레버 거동을 하는 구조물에서 가장 잘 나타난다. 그러나 교각 데크와 골조튜브에서 전단 지체 현상에 대한 연구<sup>1),2)</sup>는 많이 수행되고 있으나, 대부분 웨브의 shear lag 현상을 무시하고 있을 뿐만 아니라 특히 플랜지와 웨브에 존재하고 있는 Negative shear lag 현상에 대한 연구가 부족하다. Kwan<sup>3)</sup>은 전단/코어 벽체의 shear lag 현상에 대해 유한요소 해석을 수행하였으나, 역시 Negative shear lag에 대해 전혀 고려하지 못하고 있다. 구조물의 안정성을 확보하고 구조효율성을 높이기 위하여 shear lag에 대한 평가는 설계 이전 단계에서 고려되어야 하며, 구조 시스템별로 정확하면서도 유용한 방법이 요구된다.

이에 본 연구에서는 골조-전단벽 구조 시스템에서 내부 전단/코어 벽체의 shear lag 현상을 표현할 수 있는 수치해석 모델링 개발을 위한 선행단계로 shear lag 현상에 영향을 주는 변수를 선정하여 해석을 수행한 후, 변수에 따른 전단/코어 벽체의 shear lag 현상을 살펴보고자 한다.

## 2. 해석 모델링

골조-전단벽 구조시스템에서 내부 전단/코어벽체의 shear lag 현상에 대한 영향을 평가하기 위하여, 첫 번째 단계로서 여러 가지 변수 중 가장 영향이 클 것으로 예상되는 벽체의 높이 및 벽체 두께에 변화를 주어 표 1과 같이 해석 대상 모델을 선정하였고, 범용 해석 프로그램인 ETABS ver 6.2를 이용하여 탄성해석을 수행하였다. 그림 3은 해석 대상 구조물의 평면도를 보이고 있고, 그림 4는 3차원 해석을 위한 모델링 그림을 보여주고 있다.

표 1 해석 대상 모델

모델명	P20-40	P40-40	P60-40	P40-60	P40-80
층높이	3 m				
건물높이	60 m	120 m	180 m	120m	
기둥간격(골조)	2.5 m				
기둥 및 보 크기(골조)	80 × 80				
골조튜브의 크기	30m × 15m (12 × 6 bay)				
내부 전단벽의 크기	15m × 5m				
내부 전단벽의 두께	40 cm		60 cm		80 cm
하중	900 kgf/m(외부 골조에서의 하중)				
탄성계수	$2.1 \times 10^9 \text{ kgf/cm}^2$				

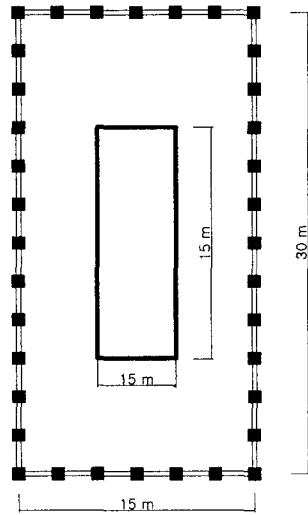


그림 3 대상 모델 평면도

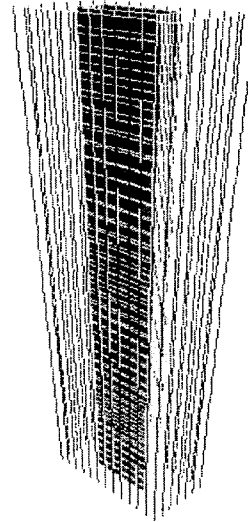


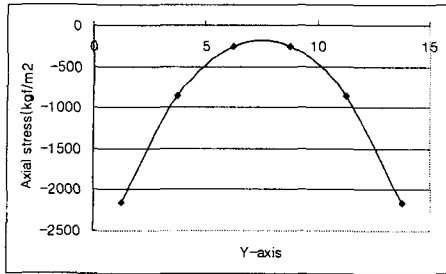
그림 4 해석 모델링

### 3. 해석 결과

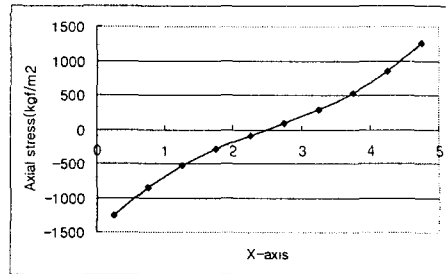
각 대상모델 중 P20-40 구조물의 층별 응력 분포에 대해 플랜지와 웨브로 나누어 각각 그림 5, 6에 나타내었다. (a)는 최상층에서의 응력, (b)모멘트 변곡지점에서의 응력분포로서 응력값이 불안정하게 나타남을 알 수 있다. (c)는 shear lag 변곡지점으로서 모서리에서의 응력이 중앙부에서의 응력보다 작아지게되어 Positive shear lag에서 Negative shear lag로 전환되는 지점이다. (d)는 shear lag 현상을 가장 두드러지게 볼 수 있는 최하층에서의 응력분포이다.

그림 7는 각각 20층, 40층, 60층인 3개의 구조물에 대하여 높이에 따른 플랜지 벽체 모서리 부분의 응력분포도이다. 전체 구조물 높이에 대한 층별 비교를 원활히 하기 위하여  $z/H$ 가 그래프의 세로축에 사용되었다. 구조물의 하부로 갈수록 응력 집중 현상이 현저한 것을 알 수 있으며, 특히 구조물의 높이가 높을수록 그 응력 분포는 더욱 더 현저하게 나타난다. 일반적으로 벽체 높이가 2배로 증가하면 모서리 부분 1층바닥 레벨에서의 응력분포는 2~3배정도 증가되었다. 그림 8은 구조물 높이가 일정할 때 벽체 두께 변화에 대한 플랜지 벽체의 높이에 따른 응력 분포를 나타낸 그림이다. 벽체가 두꺼울수록 응력값이 더 크게 나타나며, 벽체 두께 증가에 따른 플랜지 모서리 부분 1층 응력값의 증가는 거의 선형 관계를 보이고 있다. 그림 9, 10은 높이 변화와 두께 변화에 대한 웨브 벽체의 응력분포를 나타낸 그림으로서, 플랜지 벽체에 대해 웨브 벽체는 응력값이 작게 나타날 뿐, 전체적으로 플랜지 벽체의 응력 분포와 비슷한 양상을 보인다.

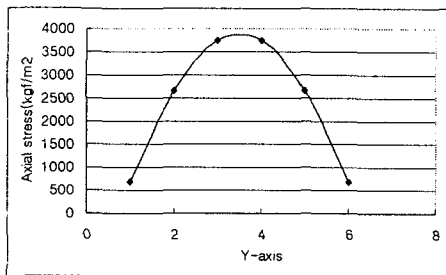
이상과 같이, 구조물 높이와 벽체 두께는 그 응력분포의 차이를 현저하게 만드는 주요 변수라고 할 수 있다. 또한 이러한 변수는 shear lag에 영향을 주는 구조적 변수인 벽의 단면적 및 보의 전단 강성과 밀접한 관계를 가지고 있어 구조체 거동에 대한 주요 변수라 할 수 있다.



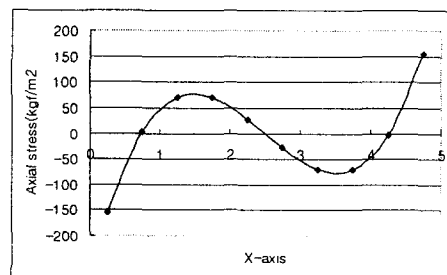
(a) 20층



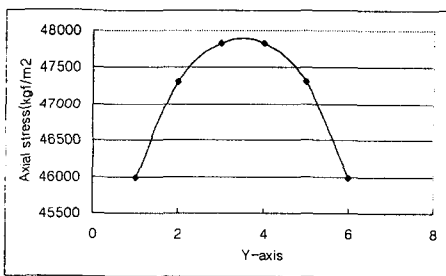
(a) 20층



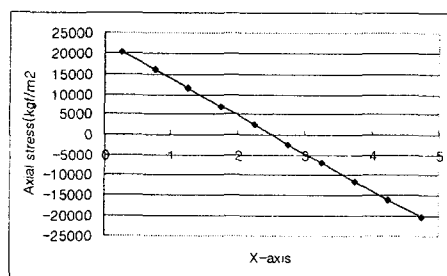
(b) 14층



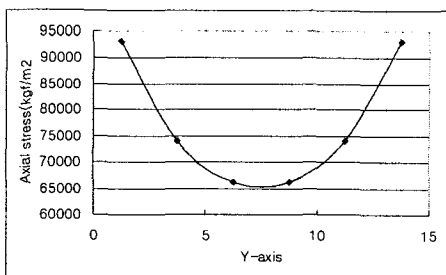
(b) 14층



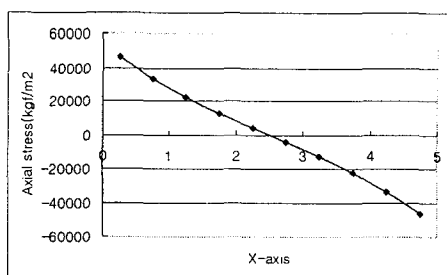
(c) 4층



(c) 4층



(d) 1층



(d) 1층

그림 5 플랜지 응력분포(P20-40)

그림 6 웨브 응력분포(P20-40)

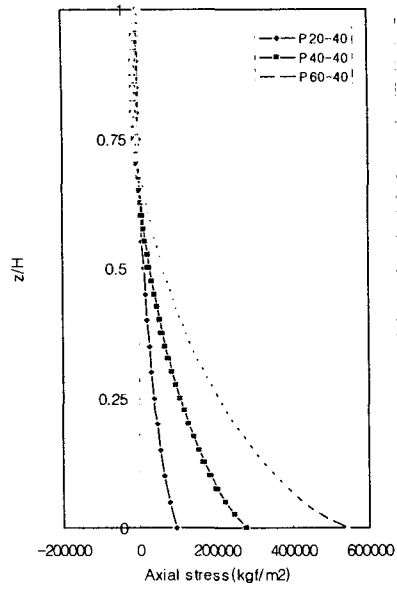


그림 7 높이 변화 모델의 플랜지 모서리  
응력 비교

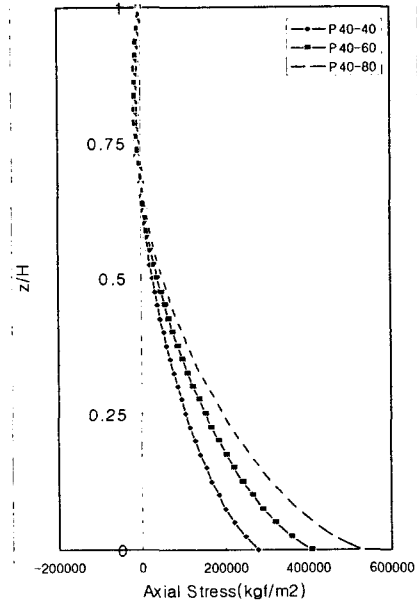


그림 8 두께 변화 모델의 플랜지 모서리  
응력 비교

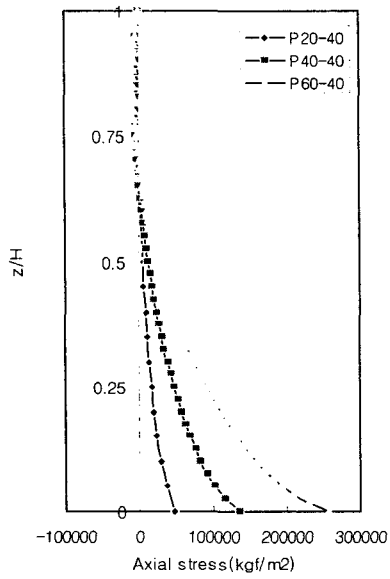


그림 9 높이 변화 모델의 웨브 모서리  
응력 비교

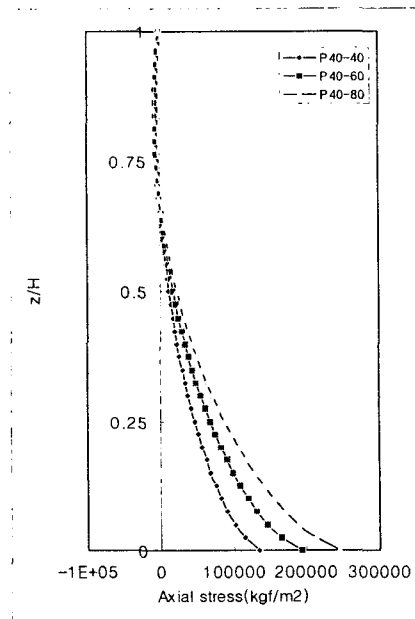


그림 10 두께 변화 모델의 웨브 모서리  
응력 비교

골조-전단벽 구조 시스템에서는 외부 골조 튜브에 횡력이 작용할 때, 외부 골조와 내부 전단벽이 횡하중을 분담하게 되는데, 그림 11은 골조와 전단벽이 각각 분담하는 모멘트도를 나타낸 그림이다. 외부에 등분포 하중이 작용할 때 내부 전단벽이 받는 모멘트는 식(1)로서 구할 수 있다. 그림 11에서 보는 바와 같이 내부 전단벽의 모멘트 분포는 구조물의 상부에서 변곡점을 보이면서 일반 골조 시스템에서 예측할 수 없는 변형을 초래하게 된다.

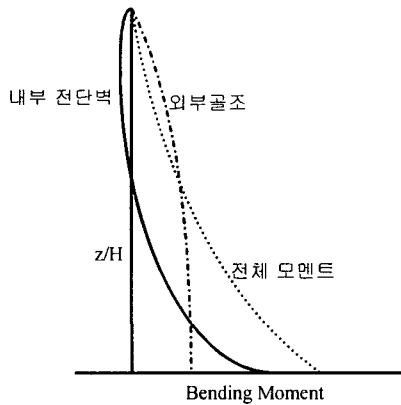


그림 11 골조-전단벽 구조시스템의 각 요소들의 모멘트도

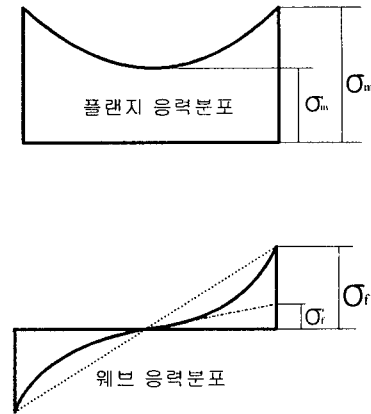


그림 12 전단지체계수

$$M_z(b) = wH^2 \left[ \frac{1}{(\alpha H)^2} \left[ \frac{(\alpha H \sinh \alpha H + 1)}{\cosh \alpha H} (\cosh \alpha z) - \alpha H \sinh \alpha z - 1 \right] \right] \dots \text{식(1)}$$

$$\lambda = \frac{\sigma_f}{\sigma_f'} \dots \text{식(2)}$$

$$\chi = \frac{\sigma_w}{\sigma_w'} \dots \text{식(3)}$$

본 연구에서는 shear lag를 평가하는 방법으로 전단지체 계수를 사용하였다. 플랜지 패널에서의 전단지체 계수( $\lambda$ )를 중앙부 응력값에 대한 모서리 부분의 응력값으로서 정의하였다.  $\lambda$ 가 1보다 큰 값을 가지면 Positive shear lag라 하고, 1보다 작은 값을 가지면 Negative shear lag라 한다. 또한 웹 패널에 대한 전단지체 계수( $\chi$ )는 모서리부분에서 최대응력을 갖고 웹 중심에서 제로(0)응력을 갖는 직선분포의 기울기에 대한 웹 중심에서의 축응력 분포의 접선 기울기로 정의하였으며, Positive shear lag에서는  $\chi$ 가 1보다 큰 값을, Negative shear lag에서는  $\chi$ 가 1보다 작은 값을 가지게 된다. 그림 12은 전단지체 계수를 나타내었고, 각 계수는 식(2)와 (3)으로 구할 수 있다.

그림 13, 14는 높이 변화 모델에 대한 플랜지 전단지체 계수( $\lambda$ )와 웹 전단지체 계수( $\chi$ )를 각각 비교한 그림이다. 세로축(X좌표=1.0)을 중심으로 오른쪽은 Positive shear lag를, 왼쪽은 Negative shear lag현상을 나타낸다. 또한 전체 곡선의 기울기가 클수록 shear lag의 영향을 덜 받는다. 그림에서 보면 플랜지 벽체가 Positive값을 가지면 웹에서도 Positive를 보여, shear lag 반전 위치가 거의 비슷하게 나타난다. 그리고 플랜지 벽체에서 shear lag 현상이 더 심하게 나타나며, 벽체의 높이가 높을수록 shear lag가 감소됨을 알 수 있다. 그림 15, 16은 두께 변화 모델에 대한 전단지체 계수이다. 벽체 두께가 두꺼울수록 shear lag 현

상이 두드러지게 나타남을 알 수 있다. 이는 강성계수가 축강성, 즉 벽체 단면적에 반비례하기 때문이다. 또한 높이비 0.7부근에서는 다른 시스템에서 볼 수 없는 응력의 불균형이 발생하는데, 이는 골조-전단벽 구조 시스템에서 내부 전단벽이 분담하는 하중분포 때문이라 판단된다.

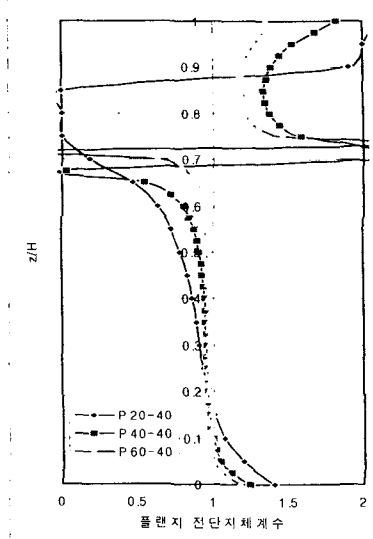


그림 13 높이 변화에 따른 플랜지 전단지체 계수

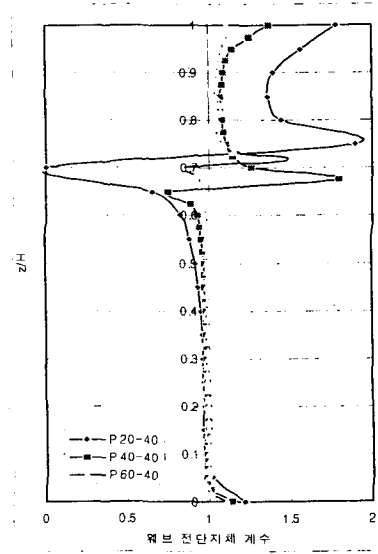


그림 14 높이 변화에 따른 웨브 전단지체 계수

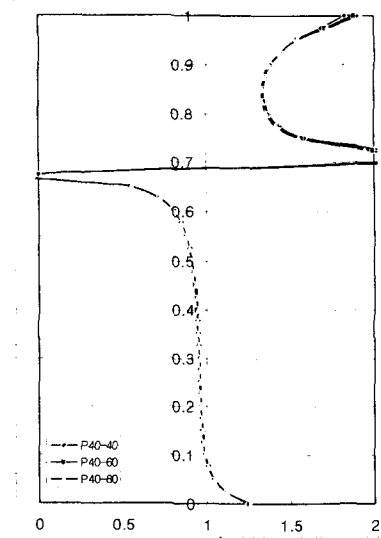


그림 15 두께 변화에 따른 플랜지 전단지체 계수

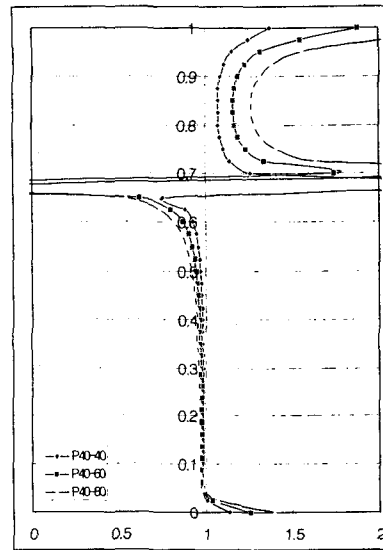


그림 16 두께 변화에 따른 웨브 전단지체 계수

#### 4. 결 론

- ① 벽체의 높이가 높을수록 shear lag 현상은 감소되는데, 이는 벽체의 높이에 비례하여 전단강성이 증가되기 때문이다.
- ② 벽체의 두께가 클수록 shear lag 현상은 증가하는데, 이는 단면적에 비례하는 축강성의 증가로 강성비가 감소되기 때문이다.
- ③ 웨브 벽체의 응력은 플랜지 벽체에 비해 값은 현저히 작으나, shear lag 변곡 위치, 모멘트 변곡지점에서의 불균형 현상등 전체적인 특성은 플랜지와 유사하게 나타난다.
- ④ 골조-전단벽 시스템에서 내부 전단/코어 벽체의 거동은 다른 시스템과 달리 하중 분담의 특성상 높이비 0.7 부근에서 심한 불균형 현상이 나타난다.
- ⑤ 추후 전단/코어 벽체의 shear lag 현상에 영향을 미치는 다른 구조적 변수들에 대한 연구가 계속되어 아직 규명되지 않은 골조-전단벽 시스템에서의 전단/코어 벽체에 대한 shear lag 현상을 명확히 해석할 수 있는 방법 개발이 요구된다.

#### 감사의 글

본 연구를 지원한 한양대학교의 초대형 구조 시스템 연구센터의 지원에 깊이 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Connor, J.J., Pouangare, C.C., "Simple Model for Design of Framed-Tube Structures", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 117, No. 12, January 1992, pp. 3623~3643.
2. Shih Toh Chang and Fang Zhen Zheng, "Negative Shear Lag in Cantilever Box Girder with Constant Depth", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 113, No. 1, January 1987, pp. 20~35.
3. A. K. H. Kwan, "Shear Lag in Shear/Core Walls", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 122, No. 9, September 1996, pp. 1097~1104.
4. Lee, K. K., Loo Y. C., Guan H., "Simplified analysis of stress distribution in framed tube structures with multiple internal tubes", Proceedings of the Fifth International Conference on Tall Buildings, Hong Kong, China, December 1998, pp. 345~350.
5. Bryan Stafford Smith, Alex Coull, "Tall Building Structures : Analysis and Design", John Wiley & Sons, Inc, pp. 255~282.
6. Kang-Kun Lee, "Orthotropic Box Beam Analogy for Analysis of Framed Tube Structures with Multiple Internal Tubes", Grittith University Gold Coast Campus, March 1999.
7. Ashraf Habibullah, "ETABS Version 6.2 User's Manual", Computers & Structures Inc., 1997
8. A. M. Neville, "The Properties in Concrete", Longman, 1995