

철근 콘크리트 골조 튜브 구조물의 Shear Lag (전단지체) 현상에 대한 구조적인 변수

- Structural Parameters for Shear Lag Phenomenon in RC Framed Structures of Tube Construction -



이강건*



이리형**

1. 일반사항

RC 골조 튜브 구조는 외주에 배열된 좁은 간격의 기둥이 춤이 큰 스펀드럴 보에 의하여 결합된 구조물을 말한다. 이러한 구조물은 지표면에서 돌출된 하나의 캔틸레버 보 처럼 수평하중에 대하여 저항하며, 내부튜브나 core 전단벽의 존재에 의하여 그 수평저항능력은 더욱 향상될 수 있다. 특히, 골조-코어 전단벽 구조와는 달리 외부 골조 튜브 내에 존재하는 코어 벽이나 내부튜브가 외부튜브 골조와 함께 수평하중과 전단력을 분담하여, 고층건물에서 문제시되는 횡력 저항에 효율적인 시스템이다. 이러한 골조튜브 구조는 수평하중에 저항하는 강한 내외부튜브 강성과 더불어 수직하중을 지지하는 기둥의 이용성으로 인하여, 그 튜브 시스템은 구조효율성을 최대화할 수 있는 경제적인 시스템으로서 오늘날 널리 사용되고 있다. 최근에는 건축물의 초 고층화에 대한 관심이 높아지면서, 고층 건물의 구조 형태 및 거동에 대한 연구에 관심이 집중되고 있다.

특히, 2001년 9월 테러리스트에 의한 World Trade Center (WTC)의 붕괴는 튜브 구조시스템에 대한 세계적인 이목을 끌기에 충분하였다.

튜브 구조로 지어진 고층건물은, 스펀드럴 보의 자연적인 휨 성능에 의하여 외부하중에 의해 받은 응력을 다른 측에 있는 외주 튜브에 충분히 전달하지 못하고 처지게 되는 전단지체 (이하 shear lag 라 한다) 현상을 보이고 있으며, 이는 건축물의 응력을 불 균등하게 하여 구조 효율성 및 안정성을 악화시키는 원인이 되고 있다. 이러한 단점에도 불구하고, 튜브 구조는 수평하중 저항 부재가 구조물 외주 튜브 주변을 따라서 배열되는 튜브기본개념에 의해 공간의 효율적인 사용에 유리한 구조시스템으로 평가 받고 있다. 따라서, 본고에서는 ASCE의 Structural Engineering 과 Computational Mechanics 논문에서 발표된 내용^{1,2)}을 중심으로 철근콘크리트 골조 튜브구조의 플랜지에 작용하는 shear lag 거동과 그 현상에 중요한 영향을 주는 구조적인 변수를 소개 함으로서,

튜브구조 시스템의 효율성을 최대화하기 위한 자료로서 제공하고자 한다.

2. Shear Lag 현상

캔틸레버 보 거동을 하는 구조물은 Bernoulli-Euler가정에 의해, 하중을 받아 휨 변형을 한 후에도 그 평면은 변함없이 일정하게 유지된다는 이론에 기초하여 해석하게 된다. 이러한 가정에 따라서, 튜브 구조물의 플랜지나 웨브 골조의 기둥이 갖는 응력 분포는, <그림 1>의 점선라인의 선형분포를 갖게 된다. 이 가정은 구조체의 거동을 간단하게 해석하기 위한 초기설계과정에서 사용될 수 있으며, 또한 무한한 전단강성을 가진 구조체나, 어떠한 전단력도 발생되지 않는 구조체에만 이 가정이 적용될 수 있다. 실제로, 구조체가 수평하중에 의한 전도 모멘트에 저항하기 위해서, 구조체의 플랜지와 웨브골조 접합부에 전단력이 발생한다. 그리고, 이 전단력에 의하여 각 웨브 및 플랜지 골조는 전단 변형을 하게 된다. 이러한 보 전단변형에 의하여 플랜지와 웨브골조 접합부에서 떨어진 부분에 있는 기둥의 변위분포는 접합

* 정회원, 한양대학교 초고층구조시스템연구센터 연구조교수

** 정회원, 한양대학교 건축공학과 교수

부 모서리 기둥의 변위분포보다 더 크거나 더 작게 된다. <그림 1>의 실선은 이러한 전단변형에 의한 플랜지와 웨브골조에 존재하는 비선형 분포의 응력을 나타낸 것이다.

이상과 같은 현상을 shear lag라 하며, 이 현상에 의하여, 웨브와 플랜지 골조의 구조적인 효율성은 떨어지며, 구조체의 처짐을 증가시킨다. 플랜지에 있는 shear lag 현상은 교량데크, 캔틸레버 박스거더,

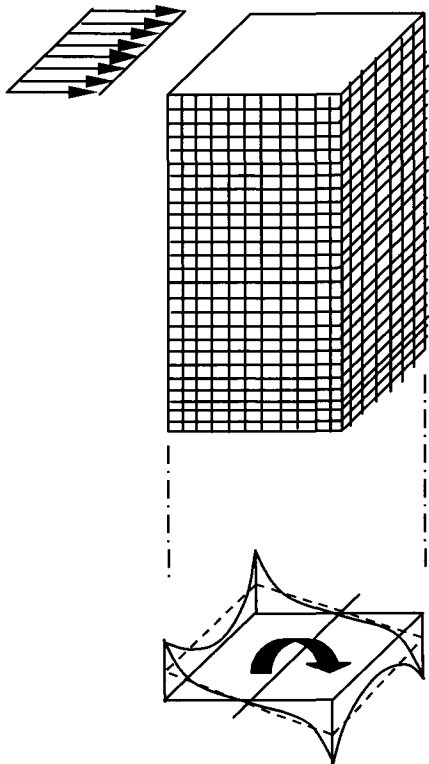


그림 1. 골조튜브 구조물 외주 기둥의 응력분포

전단코아 그리고 튜브 구조처럼 플랜지가 웨브 골조 보다 상대적으로 큰 구조물에 발생한다. 웨브에 있는 shear lag는 웨브 골조의 크기가 플랜지 골조의 크기 보다 상대적으로 큰 구조물에 많이 발생하며³⁾⁸⁾, 특히 전단강성이 작은 보로 구성된 구조물에서 그 현상이 매우 현저하다. 기존의 연구는 교량에 많이 쓰이는 박스거더⁴⁾⁵⁾⁶⁾와 골조튜브¹⁾²⁾⁷⁾ 구조물의 shear lag 현상에 대하여 설명하고 있으나, 튜브 구조물에 대한 연구는 최근에 이루어진 것이며, 특히, 튜브의 플랜지와 웨브 골조에 존재하는 negative shear lag에 대한 연구²⁾⁷⁾는 매우 초기 단계라 할 수 있다.

3. Shear lag에 영향을 주는 구조적인 변수

3.1 일반사항

수평하중을 받는 RC 골조 튜브 구조물에 있어서, 플랜지 골조에 있는 기둥 응력은 비 균일하게 분포되며, 웨브 골조에 있는 응력은 비선형으로 분포한다. Positive shear lag는 플랜지와 웨브 골조의 기둥에 있는 응력분포가 아래로 볼록한 경우를 말한다 (<그림 2>의 실선). 이것은 슬래브의 warping현상을 일으켜, 2차 부재나 내부 칸막이 변형에 원인이 된다. 이와는

반대로, 플랜지와 웨브골조에 있는 응력 분포가 위로 오목한 형태를 Negative shear lag(<그림 2>의 굵은 점선)라 하며, 이는 플랜지 골조의 압축부에서 국부 좌굴을, 인장부에서는 크랙을 발생시키는 원인이 된다. 이와 같은 현상들은 튜브 구조시스템의 구조 효율성을 저하 시키며, 건축물 사용기간 동안의 균열발생 및 진동의 원인이 되기도 한다. 더욱이, 외부 튜브내에 코어나 내부튜브의 존재는, 튜브와 튜브 상호작용에 의한 응력, 즉 추가적인 휨 응력 발생을 촉진시켜 shear lag 예측을 더욱 어렵게 한다. 또한, 보의 회전에 대한 기둥의 구속 정도가 shear lag 거동에 영향을 끼치는 변수로서 작용하며, 여기서 보의 전단강성이 강조되고 있다.

3.2 강성 계수

shear lag현상은 기둥의 강성에 의한 보의 구속 정도에 의하여 결정될 수 있다. 이러한 가정에 의하여 튜브에 있는 shear lag를 설명하기 위한 기본 골조 단위모델이 제안되었다. 그 대표적인 모델은 <그림 3>과 같다. <그림 3>의 기본골조 단위모델로부터, shear lag 현상에 대한 크기를 결정하기 위하여, 기둥의 축 강성에 대한 보의 전단강성 비인 강성계수가 식 (1)과 같은 형태로 정의된다.

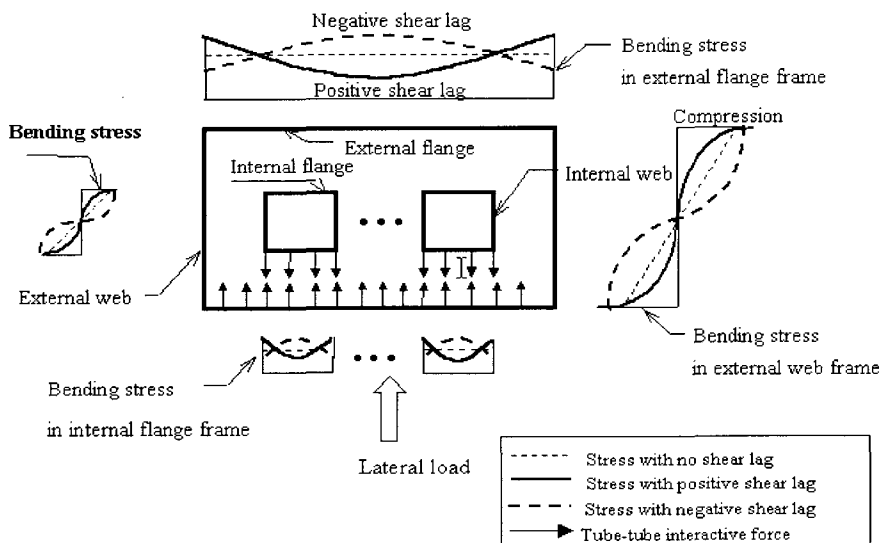


그림 2. 수평하중을 받고 있는 내부튜브가 있는 골조 튜브 구조물의 응력분포

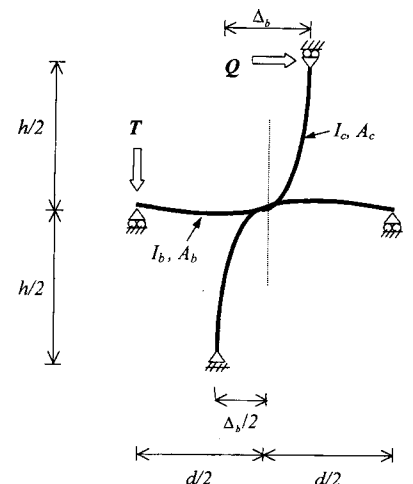


그림 3. Shear Lag를 위한 기본골조 단위모델

식 (1)로부터, 강성계수는 기둥과 보의 단면 2차 모멘트 보다는 기둥의 단면적 (A_c), 기둥 간격(d) 에 의해서 그 크기가 결정됨을 알 수 있다.

$$S_f = \frac{12h}{A_c d^2} \frac{1}{\left(\frac{h}{I_c} + \frac{d}{I_b}\right)} \quad (1)$$

여기서, h 는 층고, A_c 는 기둥 단면적, d 는 기둥간격, I_c 는 기둥단면 2차 모멘트 그리고 I_b 는 보의 단면 2차 모멘트이다.

〈표 1〉는 강성계수를 결정하는 변수인 기둥 휨강성, 보 휨강성 그리고 기둥의 축강성의 변화에 따라 조사된 RC 튜브 골조 구조물의 property 비율을 나타낸 것이다. 각 구조체별 비율은 기준튜브

골조의 부재 property에 대한 대상 튜브의 property이다.

〈그림 4〉는 〈표 1〉에서 설명된 각 구조체별 모서리 기둥의 축하중 분포를 비교한 것이다. 이 비교로부터, 튜브 구조물의 거동은 기둥과 보의 휨 강성(RI_b 와 RI_c) 보다는 기둥의 축강성(RA_c)에 의해서 결정됨을 알 수 있다.

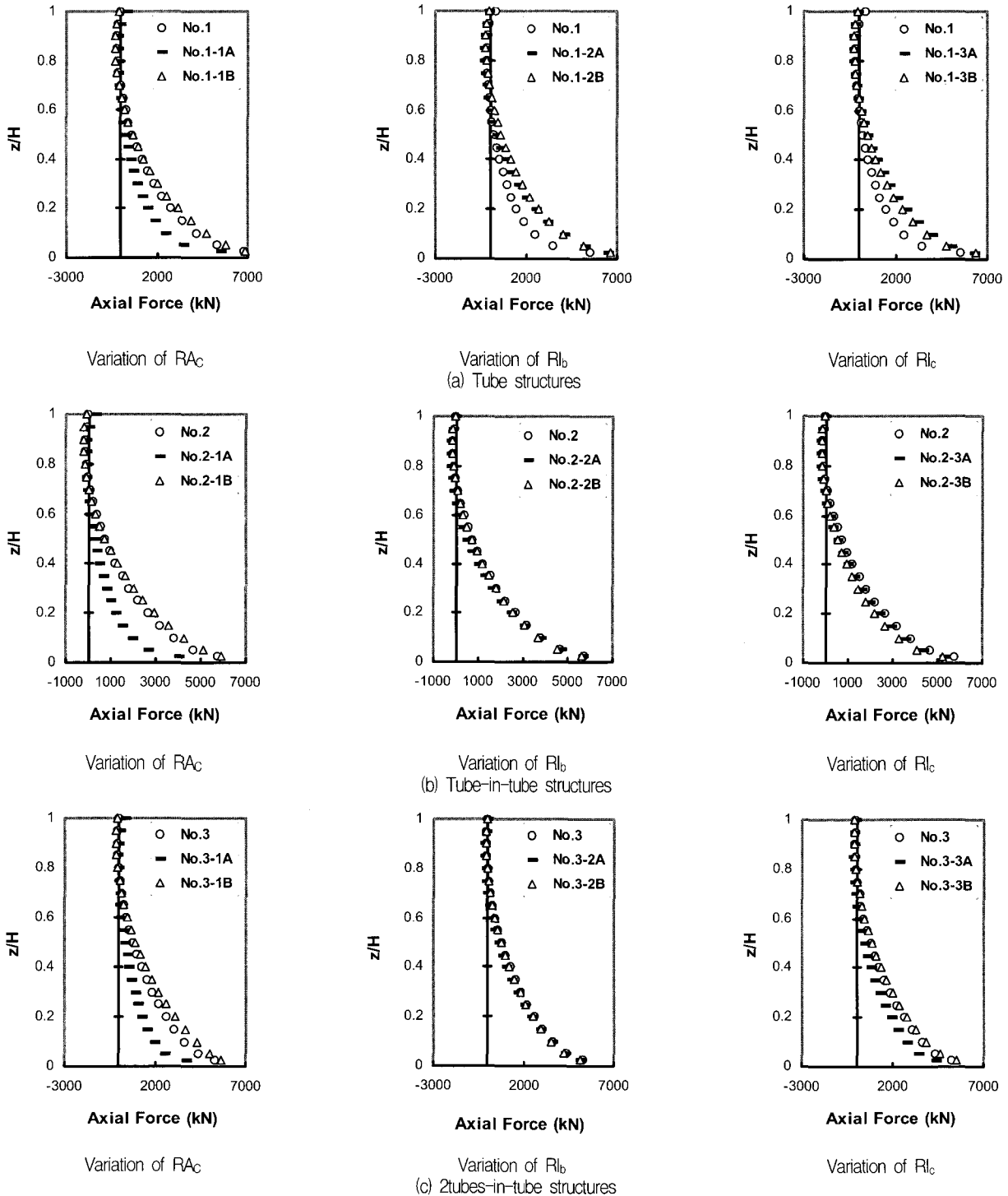


그림 4. 튜브 구조물의 외부 모서리 기둥에 있는 축 하중 분포

표 1. 골조튜브 구조물의 부재 property

System	Model No.	RA _c (A _c /A _c [*])	RI _b (I _b /I _b [*])	RI _c (I _c /I _c [*])
Tube structures	1*	1	1	1
	1-1A	0.5	1	1
	1-1B	1.5	1	1
	1-2A	1	0.5	1
	1-2B	1	1.5	1
	1-3A	1	1	0.5
	1-3B	1	1	1.5
Tube-in-tube structures	2*	1	1	1
	2-1A	0.5	1	1
	2-1B	1.5	1	1
	2-2A	1	0.5	1
	2-2B	1	1.5	1
	2-3A	1	1	0.5
	2-3B	1	1	1.5
2 tubes-in-tube structures	3*	1	1	1
	3-1A	0.5	1	1
	3-1B	1.5	1	1
	3-2A	1	0.5	1
	3-2B	1	1.5	1
	3-3A	1	1	0.5
	3-3B	1	1	1.5

* 기준골조튜브 구조물의 property : I_b^{*} = 0.03413 m⁴, I_c^{*} = 0.03413 m⁴, A_c^{*} = 0.64 m².

표 2. 강성계수 (S_r) 와 shear lag 계수 (p)

Model No.	S _r	p	Model No.	S _r	p	Model No.	S _r	p
1	0.04	3.55	2	0.04	3.41	3	0.04	3.35
1-1A	0.08	3.15	2-1A	0.08	3.11	3-1A	0.08	2.92
1-1B	0.026	4.25	2-1B	0.026	4.02	3-1B	0.026	3.80
1-2A	0.026	4.57	2-2A	0.026	4.38	3-2A	0.026	4.14
1-2B	0.046	3.35	2-2B	0.046	3.35	3-2B	0.046	3.29
1-3A	0.026	4.50	2-3A	0.026	4.24	3-3A	0.026	3.91
1-3B	0.046	3.26	2-3B	0.046	3.31	3-3B	0.046	3.11

〈표 2〉은 〈표 1〉에 있는 튜브 구조물의 강성계수와 shear lag 계수를 비교한 것이다. shear lag 계수 (p)는 shear lag 크기를 측정하기 위하여 중앙기둥의 축 하중에 대한 모서리 기둥의 축하중 비로 정의된다. 〈표 2〉으로 부터 강성계수가 작은 (S_r=0.026) 튜브 구조물의 shear lag 계수가 상대적으로 크게 증가함을 알 수 있다. 따라서, 〈그림 4〉과 〈표 2〉으로부터, 강성계수는 shear lag 현상의 크기를 예측할 수 있는 구조적인 변수 함수라고 할 수 있다.

3.3 부가적인 휨 응력

골조 튜브에 존재하는 shear lag 현상에 영향을 주는 원인은 강성계수 외에도, 튜브와 튜브 또는 튜브와 전단 코어가 상

호작용하여 발생한 부가적인 휨 응력 (additional bending stress)이 튜브의 shear lag 현상에 영향을 끼친다. 이를 설명하기 위한 해석 모델이 Lee, Loo 그리고 Guan (2001)에 의해 소개되었으며, 튜브-튜브 상호작용에 의한 부가적인 휨 응력이 수치적으로 제안되었다. 부가적인 휨 응력은 구조체의 기하적인 수치와 구조체 property로 구성되어, 튜브내의 shear lag 현상을 설명할 수 있으며, 또한 shear lag를 줄일 수 있는 한 방안으로 고려될 수 있다.

다음은 외부 또는 내부 튜브의 shear lag 현상에 영향을 주는 부가적인 휨 응력 함수를 열거한 것이다.

$$\sigma_{fs} = \left(1 - \frac{y^3}{b^3} + \frac{I_N}{I}\right) E c u_i(z) + \frac{I_N}{I} E c u_n(z) \quad : \text{외부튜브 (2)}$$

$$\sigma_{fs} = \left(1 - \frac{y^3}{b_i^3} + \frac{I_{iN}}{I_i}\right) E c_i u_{i1}'(z) \quad : \text{내부튜브(1개 인 경우) (3)}$$

$$\sigma_{fs} = \left(1 \pm 8 \left(\frac{y-n_i}{2b_i} - \frac{1}{2}\right)^3 + \frac{I_{iN}}{I_i}\right) E c_i u_{i1}'(z) \quad : \text{내부튜브(1개 이상인 경우) (4)}$$

여기서,

$$n_i = \frac{(n-1)}{2} a + 2 \left(\frac{n}{2} - 1\right) b_i \quad \text{이며,}$$

u_i'(z) 와 u_{i1}'(z) 는 각각 플랜지와 웨브의 전단변형에 의한 shear lag 계수를 포함하고 있는 미지 변수 함수이다. 그리고 I_i 와 I_{iN} 는 각각 내부튜브와 내부튜브 플랜지의 단면 2차 모멘트이다.

그림 5은 RC 골조 튜브 구조물의 부가적인 응력을 수치화하여 도식화한 것이다. 튜브-튜브 상호작용에 의한 shear lag 분포와 shear lag reversal를 조사하기 위하여, 플랜지 골조의 중앙과 모서리에 있는 부가적인 휨 응력이 구조물 높이에 따라서 비교된 것이다. 그 부가적인 응력 분포도로부터, 내부튜브 수의 증가는 내부튜브에 있는 중앙 기둥에서부터 모서리 기둥에 작용하는 부가적인 휨 응력의 증가를 점차 감소시킨다. 즉, 응력 감소가 중앙 기둥과 모서리 기둥 사이에 발생하여 shear lag 가 감소한다. 그러나, 내부 튜브의 단면 2차 모멘트가 같은 구조물인 위의 예제 구조물에서는, 내부튜브 수의 증가는 외부튜브에 있는 부가적인 휨 응력 현상에 큰 영향을 주지 못하고 있다.

또한, positive shear lag의 영향은 구조물의 최하층부에서 가장 크고, 외부튜브에 있는 negative shear lag는 구조물 높이의 약 1/4지점에서 부터 시작되며, 내부튜브의 shear lag reversal은 외부튜브의 shear lag reversal보다 더 낮은 층에서 발생하는 것을 보이고 있다.

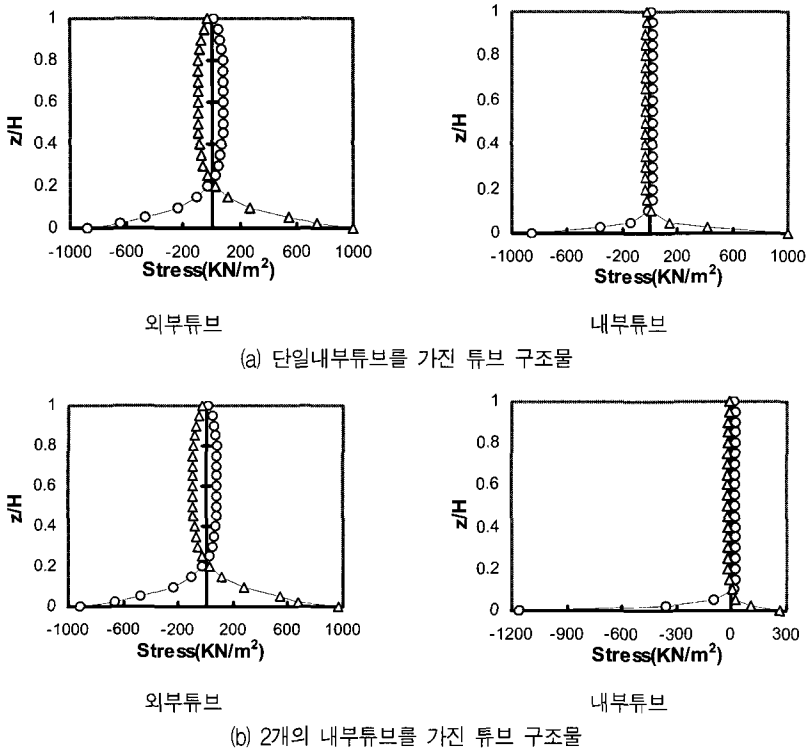


그림 5. 튜브 구조물의 중앙과 모서리 기둥에 있는 부가적인 휨 응력

3.4 기타 무 차원적 구조변수에 의한 shear lag

RC 골조 튜브 구조물의 shear lag 거동을 평가하기 위한 방안의 하나로, 강성 계수(S_r) 외에 shear lag에 영향을 끼치는 비차원 구조 변수가 또한 사용되었다. 그 비차원 구조 변수는 다음과 같다.

강성계수(stiffness factor) S_r [또는, 기둥 축 강성(column axial stiffness)에 대한 보의 전단 강성 (shear rigidity)비], 강성 비(stiffness ratio) S_r [또는, 보의

휨 강성(beam bending stiffness)에 대한 기둥의 휨 강성(column bending stiffness)비], g (또는, 플랜지 골조 패널에 있는 bay수에 대한 total 층수 비).

〈그림 6〉 (a)는 S_r , g 의 크기는 같고 강성계수(S_r)가 다른 경우의 플랜지 골조에 있는 shear lag 변화를 나타낸 것이다. 〈그림 6〉 (b)그리고 (c)는 각각 다른 비차원적인 변수는 같으면서 강성비(S_r) 그리고 g 값이 다른 경우에 shear lag 변화를 나타낸 것이다. 여기서, shear lag 계수(p)가 또한 플랜지에 있는 shear lag

크기를 조사하기 위하여 사용되었다. 〈그림 6〉의 비교는 튜브 구조 설계시 shear lag의 크기를 줄일 수 있는 방안을 간접적으로 제시하고 있다. 즉, S_r , S_r , 그리고 g 의 증가는 shear lag 현상을 감소시키지만, 작은 값의 S_r , S_r , 그리고 g 가진 구조물은 shear lag 현상을 증가시킨다. 그 변수 중에서 S_r 값의 변화는 튜브 구조물의 shear lag 변화에 크게 영향을 주지 않지만, S_r , 그리고 g 값의 변화는 보의 전단강성에 큰 영향을 주어, shear lag 현상에 영향을 끼치는 중요한 구조적인 변수라고 할 수 있다.

4. 결론

철근 콘크리트 튜브 구조물의 shear lag 현상에 영향을 끼치는 구조적인 변수에 대하여 문헌에서 발표된 내용을 소개하였다. shear lag 현상은 튜브 구조물에 있어서 구조적인 안전성 과 효율성을 저하시키는 구조적인 단점임에 틀림이 없다. 그러나, 지금까지의 많은 초고층 건물이 이러한 단점에도 불구하고 튜브 구조 개념 위에서 설계되고 있음은 말할 나위 없다.

shear lag는 기둥의 축강성과 보 기둥의 휨 강성으로 구성된 강성 계수 크기에 따라서 그 거동이 크게 영향을 받으며, 또한 내부튜브나 내부 코아와의 상호작용에 의한 부가적인 휨 응력에 의하여 그 거동 양상이 결정된다고 할 수 있다. 따라서,

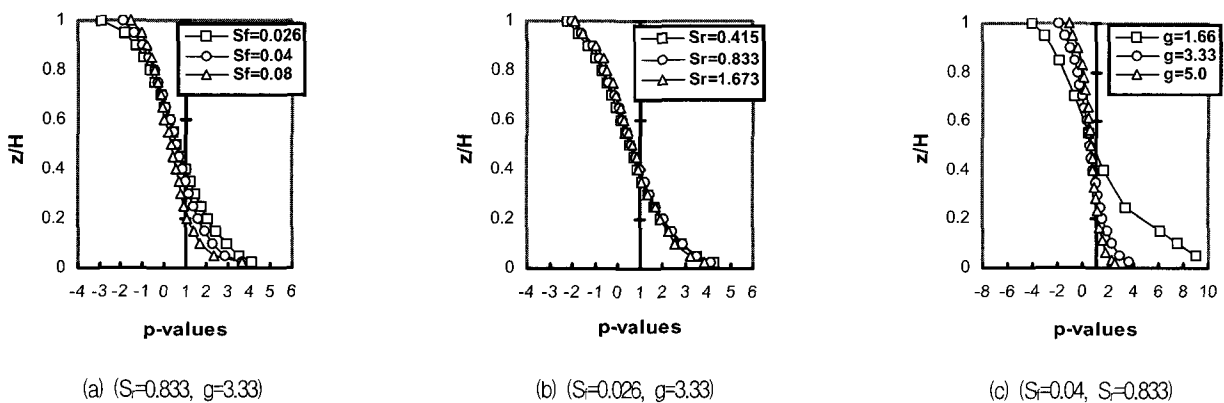


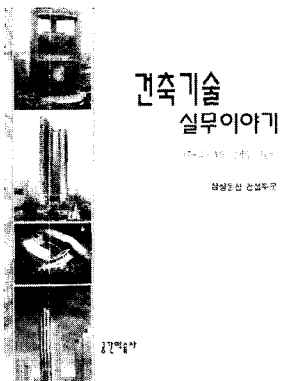
그림 6. 철근콘크리트 튜브 구조물의 플랜지에서의 Shear lag 계수(p) 변화

이러한 변수적인 구성요소 들이 초기 설계단계에서부터 분석되어 적용된다면, shear lag 현상의 크기를 줄임으로서, 구조물의 life cycle 동안에 발생할 수 있는 구조적인 문제 및 균열 발생에 따른 보수 보강을 사전에 예측하거나 계획 및 통제 할 수 있다고 판단된다.

이상 본고에서 소개한 shear lag에 영향을 끼치는 구조적인 변수는 지금까지의 발표된 논문을 참고로 하여 설명한 것이며, 이외에도 많은 구조적인 변수가 shear lag 현상에 영향을 주어 구조적인 문제의 원인이 될 수 있다. 초고층 튜브 구조물의 구조적인 단점의 최소화를 통한 효율성 극대화는 구조 시스템의 변수적 연구나 이와 관련된 이상적인 모델개발을 통하여 얻을 수 있다고 생각된다. ■

참고문헌

1. Lee, K. K., Loo, Y. C. and Guan, H., "Simple Analysis of Framed Tube Structure with Multiple Internal Tubes", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 4, April 2001, pp.450-460.
2. Lee, K. K., Guan, H. and Loo, Y. C., "Simplified analysis of shear-lag in framed-tube", Journal of Computational Mechanics, Springer, Vol.26, No.5, Nov. 22, 2000, pp.447-458.
3. A. K. H. Kwan, " Shear lag in shear/core walls", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.122, No.9, 1996, pp. 1097-1104.
4. K.R. Moffatt and P.J. Dowling, "Shear lag in Steel Box Girder Bridges", The Structural Engineer, Vol. 53, No.10, 1975, pp.439-448.
5. S. T. Chang and F. Z. Zheng, "Negative shear lag in cantilever box girder with constant depth", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 113, No.1, 1987, pp. 20-33.
6. B.O. Kuzmanovic and H.J. Graham, "Shear Lag in Box Girder", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 107 (ST9), 1981, pp.1701-1712.
7. Y. Singh and A. K. Nagpal, "Negative shear lag in framed-tube buildings", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 120, No.11, 1995, pp. 3105-3121.
8. 이은진, 이강건, 이리형, 골조-전단벽 구조에서 전단/코어벽의 Shear Lag 현상, 춘계 전산구조공학회 학술발표 논문집, 제 14권 제 1집, 2001, 4월, pp.215-222.



건축기술 실무이야기

- 저 자 : 삼성물산 건설부문
- 출판사 : 공간예술사
- 출판일 : 2001년 7월
- 정 가 : 24,000원
- 페이지 : 407면
- ISBN : 89-7799-040-8

■ 소개

오늘날 건설산업은 과거의 단순 시공 위주에서 분야별 전문화를 바탕으로 한 기획, 설계, 시공, 사후관리 등 단계별종합적인 부가가치 창출 및 효율 극대화가 요구되고 있다. 이러한 내·외부 환경 변화에 대처하고 나아가 미래의 건설시장을 선도하기 위하여 설계·구조·시공 등 건설산업 각 분야에 종사하는 실무자 개개인의 역량을 키우는 것은 기업의 기술 경쟁력 확보의 원동력으로 가장 중요하다고 할 수 있을 것이다.

이에 삼성물산 건설부문을 건축 구조 지식의 학습과 적용에 대한 인식 전환이 필요하다는 인식 하에 지난 2년간 현장 실무 기술의 응용 및 개선에 도움이 되도록 기본 사항을 요소별로 알기 쉽게 요약, 정리하여 이 책을 펴냈다. 아울러 건축 기술에 대한 인식을 넓히고 체계적인 현장 실무 교육의 필수 자료로서 최근에 개발하거나 실제로 적용한 신기술·신공법 사례를 수록하여 최근의 건설 기술에 대한 정보 공유에 도움이 되고자 하였다.

또한 이 책은 편집 디자인에서도 건축 기술이라는 딱딱하고 획일적인 전문성 때문에 오는 학습상의 거부감을 덜어 주기 위해 CG(컴퓨터 그래픽)을 이용한 전체 올 컬러화를 시도하는 등 내용 구성상의 획기적인 디자인이 돋보인다.