

튜브-전단벽 구조의 무차원 구조변수에 따른 전단지연 현상

Shear Lag Phenomenon of Tube Structure with Core Wall in Relation to Nondimensional Structural Parameters

유 은 정* 이 강 건** 이 리 형***
Yu, Eun-Jeong Lee, Kang-Kun Lee, Li-Hyung

ABSTRACT

The tube structures act like cantilevered box beams and effectively resist lateral loads. In result, they are adopted as a high-rise buildings system. However, the shear lag in tube system prevents the idealized tube behavior such as a cantilevered box beam. Therefore, the studies on shear lag phenomena are necessarily requested. The presented papers are almost studied on framed tube structures and tube in tube structures. However, the study on the shear lag in the tube structure with core wall is lack. Thus, in this paper, the shear lag of the structure is studied. The shear lag coefficient is defined to investigate shear lag phenomena. However, existing shear lag coefficients are not adequate for understanding them. Therefore, on this study, new shear lag coefficient is suggested. In addition, the shear lag in the tube structure with core wall is analyzed by changing the five structural parameters of stiffness factor in frame, stiffness factor in wall, stiffness ratio, the number of stories and the number of bays.

1. 서 론

건물이 고층화되어 높이가 증가함에 따라 전체적인 건축물의 경제성에 미치는 요소는 연직하중에 의한 것 보다는 건물에 가해지는 바람, 지진과 같은 수평하중에 의한 것이 크다. 그러므로 고층건물의 설계에서 경제성과 함께 사용성의 확보가 중요한 요소로서 1차적으로 횡변위, 층간 변위를 조절해야 하는데, 횡변위 조절을 위해서는 구조재료의 강도보다는 구조체의 강성에 대한 고려가 중요하다. 따라서 고층건물 설계에서는 수평력의 효과를 최소화하기 위하여 적절한 구조방식을 선택하여야 한다.⁽¹⁾

튜브구조시스템은 이러한 고층건물의 구조시스템 중 널리 사용되고 있는 구조시스템이다. 이것의 기본개념은 건물의 외부 벽체에 최소한의 개구부를 뚫으로써 건물이 횡하중에 대하여 튜브와 같은 거동을 하도록 하여 휨강성을 최대화하고 건물의 높이를 최대화할 수 있도록 하는 방식으로 횡력에 대하여 건물 전체가 캔틸레버 보와 같은 거동을 하도록 하는 것이다.^{(2),(3)} 그러나 튜브구조시스템에 나타나는 전단지연현상은 이러한 캔틸레버 보와 같은 거동을 방해하여 기둥에 비선형적으로 응력을 분포시킨다. 이 현상은 튜브구조방식의 거동과 경제성에 큰 영향을 미치므로 이 현상을 방지하거나 감소시키는 방향으로 구조방식이 연구되고 있다.⁽¹⁾ 그 중 내부에 전단벽이 있는 이중튜브구조(이하 '튜브-전단벽 구조'라 한다.)는 다른 튜브구조에 비해 전단지연 현상을 제어하는데 매우 효과적이다. 그러나 전단지연 현상을 완전히 없앨 수는 없으므로 좀 더 효과적으

* 정회원, 한양대학교 건축공학부 석사과정

** 정회원, 삼성중공업주식회사, 공학박사

*** 정회원, 한양대학교 건축공학부 교수, 공학박사

로 제어하기 위해서 튜브-전단벽 구조시스템에 대한 더 많은 연구가 필요하다. 기존의 연구는 거의 단순 골조튜브구조⁽⁴⁾와 내부에 튜브가 있는 이중튜브구조^{(5),(6)}(이하 '튜브-튜브 구조'라 한다.)에 관한 것이고 튜브-전단벽 구조에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 그러므로 이에 대한 연구가 절실히 요구된다.

튜브구조의 전단지연 현상을 수치적으로 평가하기 위하여 전단지연 계수가 사용된다. 그러나 기존 연구들에 의하면 전단지연 계수에 대한 정의는 여러 가지로 제시되어 있지만 이것들은 튜브구조시스템들의 전단지연 현상을 정확히 표현하지 못하고 있다. 그러므로 전단지연 현상을 명확히 평가할 수 있는 전단지연 계수의 정의가 요구된다.

따라서 본 연구에서는 튜브구조의 전단지연현상을 정확히 파악할 수 있는 새로운 전단지연 계수를 제안하고, 그것을 사용하여 튜브-전단벽 구조의 무차원 구조변수가 전단지연 현상에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 그래서 튜브-전단벽 구조시스템의 전단지연 현상을 효율적으로 제어할 수 있는 방안의 기틀을 마련하고자 한다.

2. 전단지연(Shear Lag) 현상

튜브구조는 외부벽체에 최소한의 개구부만을 두어 마치 속이 빈 튜브와 같이 횡하중에 저항하는 시스템을 말한다. 이상적인 튜브구조의 경우 캔틸레버와 같은 거동을 하게 되며⁽¹⁾ 횡하중에 대한 응력분포는 휨이론의 가정에 의해 그림1의 점선과 같이 선형적으로 균등하게 분포하게 된다. 그러나 이것은 전단력이 없거나 무한한 전단강성을 가지는 이상적인 구조물에서만 적용될 수 있다. 일반적으로는 외부 튜브면에 포함되는 개구부로 인해 횡하중에 대한 실제 튜브구조의 거동은 순수 캔틸레버와 순수 골조의 중간형태를 취한다.⁽¹⁾ 횡하중에 평행한 면은 여러 스패너로 구성된 독립의 강성골조처럼 작용하여 스패너 드릴 보에 유연성이 생기고 이로 인해 그림 1의 실선과 같은 비선형적인 응력분포를 나타내게 된다.⁽²⁾ 이러한 불균등한 응력분포 현상을 전단지연 현상이라고 하며 이것은 튜브구조방식의 거동과 경제성에 큰 영향을 미치고 건축물의 응력을 불균형하게 하여 건물의 안정성을 약화시킨다.

전단지연 현상은 그림2와 같이 정 전단지연(Positive Shear Lag)과 부 전단지연(Negative Shear Lag)으로 구분된다.⁽⁷⁾ 정 전단지연은 플랜지에서 모서리부분의 축응력의 절대값이 중앙부분의 축응력의 절대값보다 큰 경우 즉, $\Delta F = |\text{모서리부분의 축응력}| - |\text{중앙부분의 축응력}|$ 가 양인 경우를 말하며, 부 전단지연은 ΔF 가 음인 경우를 말한다. 정 전단지연은 슬래브의 뒤틀림 현상을 일으켜 2차부재나 내부 칸막이 변형에 원인이 된다. 그리고 부 전단지연은 플랜지의 압축부분에서는 국부좌굴, 인장부분에서는 균열을 발생시킨다. 이러한 현상들은 구조시스템의 효율성을 저하시키는 원인이 된다.

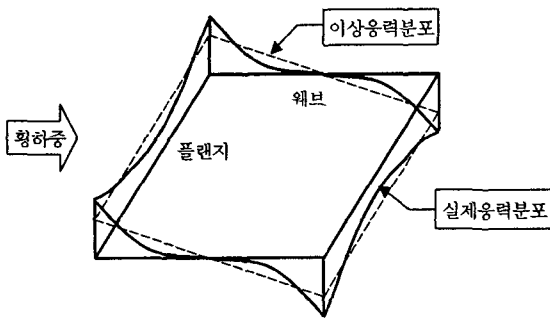


그림1. 전단지연 현상

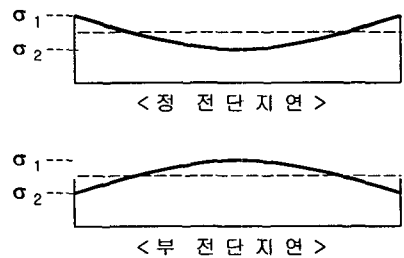


그림 2. 정, 부 전단지연

3. 전단지연 계수(λ) 산정

전단지연 계수는 전단지연 현상을 한눈에 알 수 있도록 표현하는 계수로서 그 값에 따라 전단지연 현상의 정도를 파악할 수 있다. 그러나 기존에 제시된 전단지연 계수의 식은 여러가지로 표현되며 이것들은 전단지연 현상을 효과적으로 나타내는데 문제점을 안고 있다. 여기서는 그 문제점에 대해 살펴보고 이를 해결할 수 있는 전단지연 계수를 새로 제안하고자 한다. 그림3은 기존에 제시된 전단지연 계수식과 그 식을 이용하여 전단지연 현상의 정도를 표현한 그래프와 문제점 등을 각각 나타낸 것이다.

전단지연 계수는 플랜지에서의 모서리와 중앙 부분의 축응력의 차이의 정도를 표현하는 것으로 상대적인 값이어야 한다. 그러므로 이것은 응력의 비로 나타내어야 한다. 이에 대해 모서리부분의 축응력(σ_1)과 중앙부분의 축응력(σ_2)에 대해 살펴보면 어떤 시스템이든 σ_1 이 σ_2 보다 변동폭이 크고 시스템에 따라서는 σ_1 이 양에서 음으로 변하는 부분이 발생한다. 그러므로 이 경우 기존 계수식 1, 2와 같이 σ_1 을 기준으로 하면 σ_1 이 0에 근접할 때 전단지연 계수 λ 는 그림3의 (1),(2)와 같이 높이비(z/H) 0.8부근에서 상당히 큰 값을 가지게 된다.

그리고 계수식 2, 3과 같이 단순히 σ_1 과 σ_2 의 비로만 표현될 경우에는 전단지연 현상의 정도를 판단하는 기준이 1이 된다. 이로 인하여 σ_1 과 σ_2 의 부호가 서로 다른 경우에는 전단지연 현상을 파악하는데 혼돈을 준다.

따라서 본 연구에서는 전단지연 계수를 다음과 같이 중앙부분의 축응력(σ_2)에 대한 모서리(σ_1)와 중앙부분(σ_2)의 축응력차의 비로 제안하고자 한다.

$$\lambda = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_2} \quad (1)$$

위의 계수는 전단지연 현상의 정도를 정확히 표현할 뿐 아니라 응력의 부호와 상관없이 모든 경우에 대해 효율적으로 사용이 가능하다.

제안한 전단지연 계수 λ 는 기준이 0이 되어 λ 가 0에 가까울수록 전단지연 현상이 작다는 것을 의미한다. 그리고 $\lambda > 0$ 또는 $\lambda < -2$ 일 경우는 정 전단지연, $-2 < \lambda < 0$ 일 경우는 부 전단지연을 나타내어 λ 값만으로 정·부 전단지연을 구분할 수 있다.

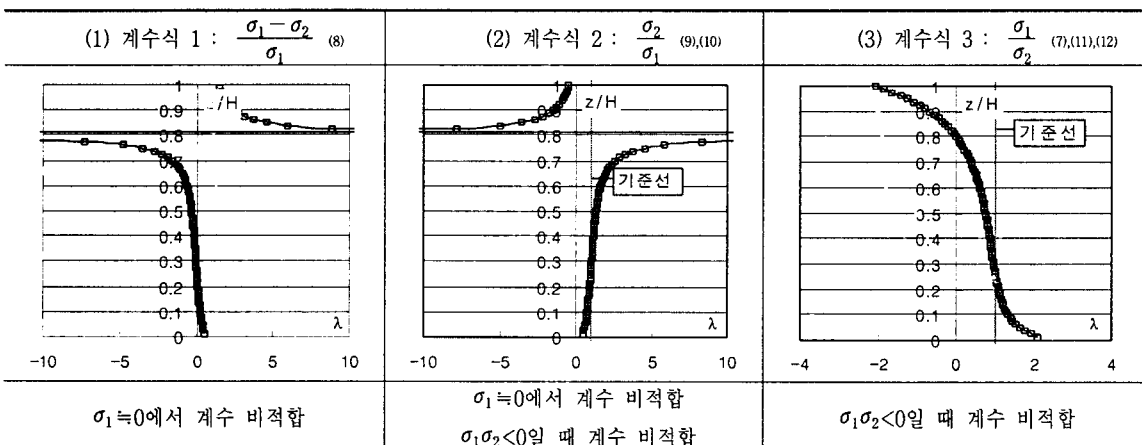


그림3. 각 전단지연 계수식에 의한 그래프

4. 구조변수 산정

건물의 구조적 특성에 따라 응력분포가 변하고 이로 인해 전단지연 현상은 달라진다. 본 연구에서는 건물의 구조변수가 전단지연 현상에 미치는 영향을 살피기 위하여 다음과 같은 무차원 구조변수들을 사용하였다.

4.1 골조의 강성계수 S_{ff}

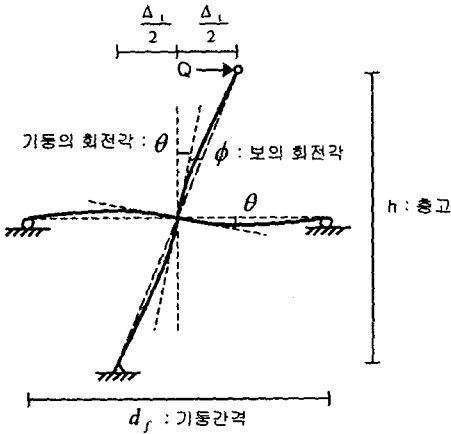


그림4. 기본 단위골조

외부골조의 강성계수를 조사하기 위하여 그림4와 같은 단위골조를 고려한다. 먼저 전단력 Q에 의한 수평변위 Δ_1 과 전단강성 S는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= h(\theta + \phi) \\ &= h \left[\left(\frac{Qd_f h}{12EI_b} + \frac{Qh}{d_f GA_b} \right) + \left(\frac{Qh^2}{12EI_c} + \frac{Q}{GA_c} \right) \right] \\ &= Qh^2 \left[\frac{1}{12E} \left(\frac{d_f}{I_b} + \frac{h}{I_c} \right) + \frac{1}{G} \left(\frac{1}{d_f A_b} + \frac{1}{h A_c} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

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

여기서,

I_b, I_c : 각각 보, 기둥의 단면2차 모멘트

A_b, A_c : 각각 보, 기둥의 단면적

이식을 이용하여 축강성에 대한 전단강성의 비로 표현되는 골조의 강성계수 S_{ff} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{ff} = \frac{1}{EA_f h \alpha} \quad (4)$$

여기서, $\alpha = \frac{1}{12E} \left(\frac{d_f}{I_b} + \frac{h}{I_c} \right) + \frac{1}{G} \left(\frac{1}{d_f A_b} + \frac{1}{h A_c} \right)$

4.2 전단벽의 강성계수 S_{fw}

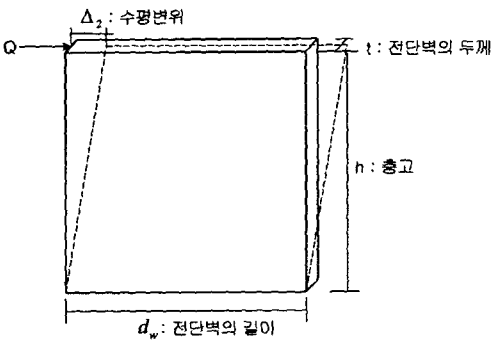


그림5. 내부 전단벽

골조의 강성계수 S_{ff} 와 마찬가지로 전단벽의 강성계수를 구하기 위하여 전단력 Q를 받는 그림5에서의 수평변위 Δ_2 와 전단강성 S를 구하면 다음과 같다.

$$\Delta_2 = Qh \left(\frac{h^2}{3EI_w} + \frac{1}{GA_w} \right) \quad (5)$$

$$S = \frac{1}{h \left(\frac{h^2}{3EI_w} + \frac{1}{GA_w} \right)} \quad (6)$$

여기서,

I_w : 전단벽의 단면2차 모멘트

A_w : 전단벽의 단면적

이 식을 이용하여 전단벽의 강성계수 S_{fc} 를 나타내면 다음과 같다.

$$S_{fc} = \frac{1}{EA \left(\frac{h^2}{3EI_w} + \frac{1}{GA_w} \right)} \quad (7)$$

4.3 강성비 S_r

높은 부정정 차수인 실제 구조물의 경우 기둥부재의 단부에 연결되어 있는 보와 같은 주변 부재들과의 상대적인 강성에 따라 기둥단부의 고정도가 달라진다.⁽¹³⁾ 이와같은 기둥 단부의 구속정도가 전단지연 현상에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 다음과 같은 강성비를 고려한다.

$$S_r = \frac{I_c d_f}{I_b h} \quad (8)$$

5. 해석모델의 개요

본 연구에서 사용한 기본 해석모델은 그림6과 같이 42×42m의 정방형평면을 가지고 내부에 전단벽 코아를 가지는 80층의 철근 콘크리트 튜브-전단벽 구조시스템이다. 내부 코아는 21×21m로 외부 면적의 25%를 차지하도록 하였고, 건물의 총 높이는 280m로 세장비는 약 6.67이다.

구조변수에 따른 전단지연 현상을 효과적으로 보기 위하여 층고 3.5m, 기둥간격 3m, 기둥과 보의 크기는 1×1m, 벽의 두께는 0.524m로 전 층에 동일하게 적용하였다.

풍하중은 대한건축학회 건축물 하중기준(2000)에 따라 서울지역을 기준으로 하였고, 노풍도는 A, 풍속할증계수 $K_{zt}=1.0$, 중요도 계수 $I_w=1.10$ 으로 하여 산정하였다. 그리고 이 풍하중은 각 층의 질량중심에 X방향으로만 작용시켰다.

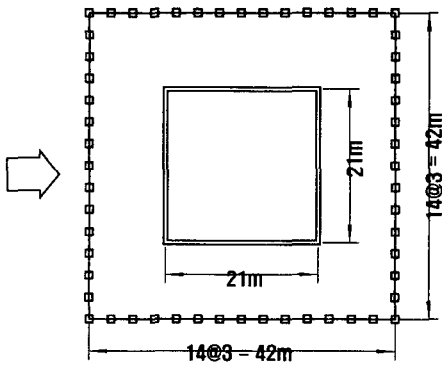


그림6. 해석모델의 기본평면

표1. 해석에 사용된 구조변수들

변수	모델명	S_{ff}	S_{fc}	S_r	N_{st}	N_b
	SFF1	0.026				
S_{ff}	SFF2	0.036	0.398	0.86	80	14
	SFF3	0.046				
	SFW1		0.388			
S_{fc}	SFW2	0.036	0.398	0.86	80	14
	SFW3		0.408			
	SR1			0.46		
S_r	SR2	0.036	0.398	0.86	80	14
	JR3			1.26		
	NST1				60	
N_{st}	NST2	0.036	0.398	0.86	80	14
	NST3				100	
	NB1					12
N_b	NB2	0.036	0.398	0.86	80	14
	NB3					16

(단, 음영부분은 기본 해석모델을 나타낸다.)

본 연구에서는 건물의 구조변수가 튜브-전단벽구조의 전단지연 현상에 미치는 영향을 조사하였으며 그때 고려된 무차원 구조변수들은 다음과 같다. 표1은 해석에 고려된 무차원 구조변수들의 값을 나타낸 것이며, 이를 바탕으로 각 구조변수에 따른 전단지연 현상을 비교·분석하였다.

(1) 골조의 강성계수 S_{ff}

- (2) 전단벽의 강성계수 S_{fw}
- (3) 강성비 S_r
- (4) 층수 N_{st} ($N_{st} = H/h$, H : 건물전체높이, h : 층고)
- (5) 플랜지면에서의 기둥간격 수 N_b ($N_b = L/d_f$, L : 플랜지면의 길이, d_f : 기둥간격)

6. 해석결과

6.1 무차원 구조변수

본 해석은 그림6과 같은 기본해석모델을 중심으로 하고, 앞에서 제시한 무차원 구조변수를 변화시켜 구조변수들에 따른 전단지연현상을 조사하고자 하였다. 그리고 무차원 구조변수는 다음과 같은 개념에 의하여 변화시켰다.

(1) 골조의 강성계수 S_{ff} 의 변화에 따른 전단지연 현상을 조사하기 위하여 내부 전단벽의 구조변수, 외부 골조의 d_f , h 등 나머지 구조변수들은 모두 동일하게 두었다. 그리고 외부 골조의 구조변수 S_r 을 일정하게 하기 위하여 I_b 와 I_c 는 상수로 두고 A_c 만을 조절하여 표1과 같이 변화시켰다.

(2) 전단벽의 강성계수 S_{fw} 는 기본해석 모델에서 외부 골조튜브의 구조변수와 내부 전단벽의 A_w 는 고정시키고 I_w 만을 변화시켜 비교하였다.

(3) 강성비 S_r 는 내부 전단벽의 구조변수와 외부 골조의 d_f , h 는 상수로 놓았다. 그리고 S_{ff} 를 고정시키고 S_r 만을 변화시키기 위하여 I_c 와 I_b 를 조절하여 변화시켰다.

(4) 층수 N_{st} 는 S_{ff} 와 S_{fw} , S_r 을 고정시키기 위하여 층고는 일정하게 두고 높이만을 조절하여 변화시켰다.

(5) 기둥간격 수 N_b 는 S_{ff} 와 S_r 을 고정시키기 위하여 기둥간격 d_f 는 일정하게 두고 플랜지면의 길이만을 조절하였다.

6.2 무차원 구조변수에 따른 전단지연 현상

위의 값들을 이용하여 해석한 결과는 각각 다음과 같이 설명된다.

(1) S_{ff} 에 따른 해석결과를 전단지연 계수에 대해 도표화하면 그림7.(1)과 같다. 여기서 S_{ff} 가 증가함에 따라 전단지연현상이 감소함을 알 수 있다. S_{ff} 의 증가는 A_c 의 감소에 의한 것으로, A_c 의 감소는 기본골조의 전단강성에 비해 축강성에 더 많은 영향을 미친다. 그러므로 A_c 의 감소로 인하여 축강성이 감소하고, 전단

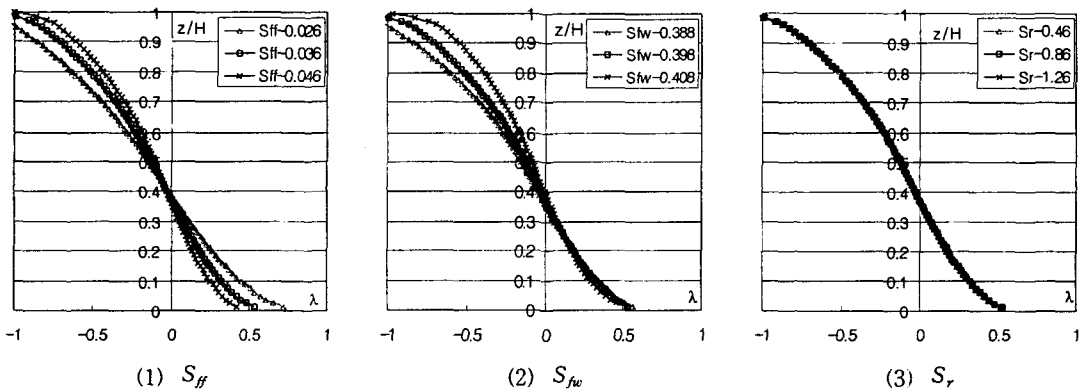


그림7. 구조변수에 따른 전단지연 현상 - S_{ff} , S_{fw} , S_r

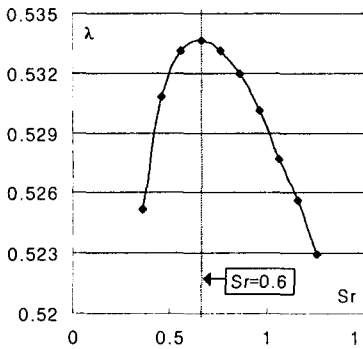
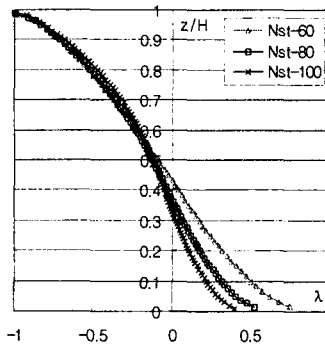
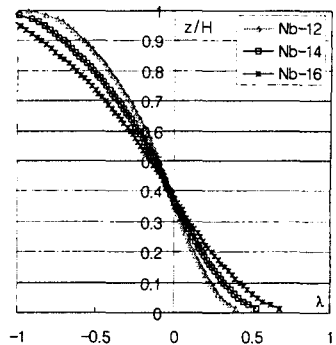


그림8. S_r 에 따른 전단지연 계수



(1) N_{st}



(2) N_b

그림9. 구조변수에 따른 전단지연 현상 - N_{st} , N_b

강성은 상대적으로 적게 감소한다. 이것은 축강성에 비하여 전단강성이 증가하는 효과를 나타내며, 그 결과로 기둥의 축응력의 분포는 더 균일해지는 것이다.

(2) S_{fc} 의 변화에 따른 전단지연 계수의 분포는 그림7.(2)와 같으며 S_{ff} 와 마찬가지로 S_{fc} 가 증가함에 따라 전단지연 현상은 감소한다. 특히, S_{fc} 의 변화는 정 전단지연에 비해 부 전단지연에 매우 지배적임을 알 수 있다. 이것은 튜브-전단벽구조의 거동 특성에 의한 것으로 내부 전단벽의 강성계수인 S_{fc} 의 값을 변화시키면 건물의 하부에 비해 전단벽의 휨변형이 최대가 되는 상부에 더 많은 영향을 끼치게 되고, 이로 인해 부 전단지연에 큰 변화를 초래한 것으로 사료된다.

(3) 강성비 S_r 이 전단지연현상에 미치는 영향을 자세히 살펴보기 위하여 그림8과 같이 S_r 의 변화에 따른 전단지연계수 λ 의 변화를 살펴보았다. 그 결과 다른 변수와는 달리 $S_r=0.66$ 을 변환점으로 하여 전단지연 현상이 다르게 나타났다. 즉, $S_r < 0.66$ 인 경우에는 S_r 이 클수록 전단 지연 현상도 크게 나오지만, $S_r > 0.66$ 인 경우는 S_r 이 클수록 전단지연 현상이 작게 나온다. 또한, 그림7.(3)에서 알 수 있듯이 S_r 의 변화는 전단지연 현상에 거의 영향을 미치지 않는다. 이러한 현상들은 보의 강성과 기둥의 강성의 증가가 모두 전단지연 현상을 감소시키는 원인이 되므로, 이러한 두 요소의 상호작용에 의한 것으로 판단된다.

(4) 층수 N_{st} 에 따른 해석결과는 그림9.(1)과 같으며 층수 N_{st} 의 증가에 따라 전단지연 현상은 감소한다. 이것은 층수가 증가함에 따라 보에 축적되는 전단강성이 증가하기 때문으로, 층수가 많아지면 축응력은 증가하지만 그 증가량에 비해 모서리부분과 중앙부분의 축응력의 차는 상대적으로 적게 나타난다. 이 결과는 높이를 일정하게 두고 층고만을 변화시켰을 때에도 동일하게 나타난다. 이것은 층고의 감소에 의해 N_{st} 가 증가하면 골조의 전단강성이 증가하게 되고, 이것은 전단지연 현상을 감소시키는 원인이 되기 때문이다.

(5) 그림9.(2)는 N_b 에 따른 전단지연 계수의 분포를 나타내는 것으로 N_b 가 증가할수록 전단지연 현상도 증가한다. 기둥간격 수가 증가하면 축응력이 감소하는 횡수가 증가되어 모서리와 중앙부분의 축응력의 차가 커지게 되며, 이로 인해 전단지연 현상은 증가한다. 또한 N_b 에서 플랜지면의 길이를 일정하게 하고 기둥간격 d_f 를 변화시켜도 위와 동일한 결과가 나온다.

7. 결 론

본 연구에서는 튜브-전단벽구조의 전단지연 현상에 대해서 살펴보고자 하였다. 이를 위하여 먼저 기존에 제시된 전단지연 계수의 문제점을 파악하고 새로운 전단지연 계수를 제안하였다. 그리고 5개의 무차원 구조

변수가 튜브-전단벽구조의 전단지연 현상에 미치는 영향을 비교·분석하였다. 이 연구로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 전단지연 현상을 정확히 파악하기 위하여 전단지연 계수를 제안하였다. 이것은 변동이 심한 모서리부분의 축응력으로 인하여 상부부분에서 값이 급격히 변하는 경우와 전단지체 현상의 정도를 판단하는 기준이 1이 되어 모서리와 중앙부분의 축응력의 부호가 다른 경우 전단지연 현상을 파악하는데 비효율적인 점 등을 해결하여 전단지연 현상의 정도를 정확히 파악할 수 있다.

(2) 골조의 강성계수 S_{ff} 와 내부 전단벽의 강성계수 S_{fw} 의 증가는 전단지연 현상을 감소시키며 S_{fw} 는 부 전단지연에 대해 매우 지배적이다. 그러나 강성비 S_r 의 변화는 전단지연 현상에 거의 영향을 주지 않는다. 층수 N_s 가 증가할수록, 플랜지면에서의 기둥간격 수 N_b 는 감소할수록 전단지연 현상이 감소한다.

(3) S_r 을 제외한 나머지 무차원 구조변수들은 모두 정 전단지연 현상에 많은 영향을 주며, 부 전단지연 현상은 S_{ff} 와 S_{fw} , N_b 에 의해 많은 영향을 받는다.

감사의 글

본 연구를 위해 지원한 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터의 지원에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. 대한건축학회 편, "구조계획", 기문당, pp. 167~219
2. Wolfgang Schueller, "High-Rise Building Structure", John Wiley & Sons
3. Bryan Stafford Smith & Alex Coull, "Tall Building Structure : Analysis and Design", John Wiley & Sons, pp. 255~307
4. A. K. H. Kwan "Simple Method for Approximate Analysis of Framed Tube Structures", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 4, April, 1994, pp. 1221~1239.
5. Kang-Kun Lee, "Orthotropic Box Beam Analogy for Analysis of Framed Tube Structures With Multiple Internal Tubes", Griffith University Gold Coast Campus, March 1999
6. Kang-Kun Lee, Li-Hyung Lee, Eun-Jin Lee "Prediction of Shear-Lag Effects in Framed-Tube Structures with Internal Tube(s)", The Structural Design of Tall Buildings, 11, 2002, pp.72~92
7. Y. Singh, A. K. Nagpal "Negative Shear Lag in Framed-Tube Buildings", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.120, No.11, November, 1994, pp.3105~3121.
8. A. K. H. Kwan "Shear Lag in Shear/Core Walls", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 122, No. 9, September 1996, pp. 1097~1104.
9. J.J. Connor, C.C. Pouangare, "Simple Model for Design of Framed-Tube Structures", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.117, No.12, January 1992, pp.3623~3643.
10. 유은중, 박효선, 송화철, 안재현, 박철립 "전단지연효과 최소화를 통한 효율적 튜브구조의 설계", 대한건축학회 논문집, 12권, 5호, pp. 181~187
11. 이강건, 이리형 "복수의 내부 튜브를 가진 골조튜브 구조물의 Shear Lag", 한국전산구조공학회 논문집, 13권, 3호, pp. 351~360
12. 이은진, 이강건, 이리형 "골조-전단벽 구조에서 전단/코어벽의 Shear Lag 현상", 한국전산구조공학회 논문집, 14권, 26호, pp. 215~222
13. 이리형, "철근콘크리트구조", 기문당, pp.148~150