

## 구조변수에 의한 튜브 구조의 거동

### Behaviour of Tube Structures in terms of Structural Parameters

이 강 건\*      이 리 형\*\*  
Lee, Kang-Kun    Lee, Li-Hyung

---

#### ABSTRACT

The global behavior of tube structures (including tube and tube(s)-in-tube constructions) is investigated for the behavioral characteristics of the structures and their performance in relation to the various structural parameters. The stiffness factor in terms of the axial stiffness of the columns and the bending stiffness of both columns and beams is chosen as a parameter to explain the global behavior of the structures. The shear-lag phenomenon is also discussed to explain the general behavior of the structures. Three types of tube structures, with various structural parameters, are analysed for the comparative study, and the results are compared to investigate the structural response and performance of such structures. As a result of the comparison, it is obtained that the axial stiffness of the columns is the most important factor governing the response of the tube structures under lateral loading

---

#### 1. 서 론

고층건물 구조시스템에 대한 최근의 연구는 재료사용에 있어서 경제적이고 효율적인 새로운 개념의 구조시스템을 발전시켰다. 구조물의 높이가 증가함에 따라 구조 안전성이 강도되어, 수평하중에 대한 중요성이 크게 대두되고 있으며, 특히 일정한 높이 이상부터는 수평 변위가 매우 증가하여 구조물의 강도보다는 강성이 구조설계를 좌우하게 된다. 일반적으로 강성의 크기는 구조시스템에 따라서 그 크기가 결정되며, 구조물의 효율성은 사용된 재료의 양에 직접적으로 좌우된다. 따라서, 일정한 높이의 구조물에 효율적으로 적용할 수 있는 혁신적이고 경제적인 구조시스템에 대한 개발이 필요하게 된다.

그러한 개념의 구조시스템이 강접합 골조로 구성된 튜브 구조이다. 이 시스템은 넓은 범위의 높이에 걸쳐 사용되고 있는 경제적인 시스템으로서 평가받고 있다. 튜브 시스템은 좁은 기둥 간격으로 구성된 수평저항 구조로서, 이 튜브시스템의 기본 개념은 수평저항 부재가 외주에 배치되는 것이다. 최근에는 초고층 구조물을 경제적인 설계를 하기 위한 새로운 시스템으로서 outrigger로 보강된 튜브 구조 시스템이 많이 사용되고 있다.

이러한 튜브 구조물의 전반적인 거동 특성을 평가하기 위하여, 3가지 형태의 튜브 구조물의 거동이 여러 가지 구조적인 변수를 사용하여 그 성능과 거동특성이 조사되었다. 기둥, 보의 휨 강성과 기둥의 축 강성의 변수로 구성된 강성계수가 전반적인 튜브구조의 거동을 설명하기 위한 변수로서 선택되었다. 이러한 구조 변수로서 구성된 21개의 튜브 구조물이 3차원 해석 프로그램<sup>(1)</sup>을 사용하여 해석되었으며, 그 결과가 튜브 구조물의 반응 특성을 평가하기 위하여 비교 평가되었다. 또한, 해석된 튜브 구조물의 전단지체 현상이 전단지체계수와 강성계수로서 설명되었다.

---

\* 한양대 초대형구조시스템 연구센터, 연구조교수

\* 한양대 건축공학부, 교수

## 2. 강성계수의 모델링

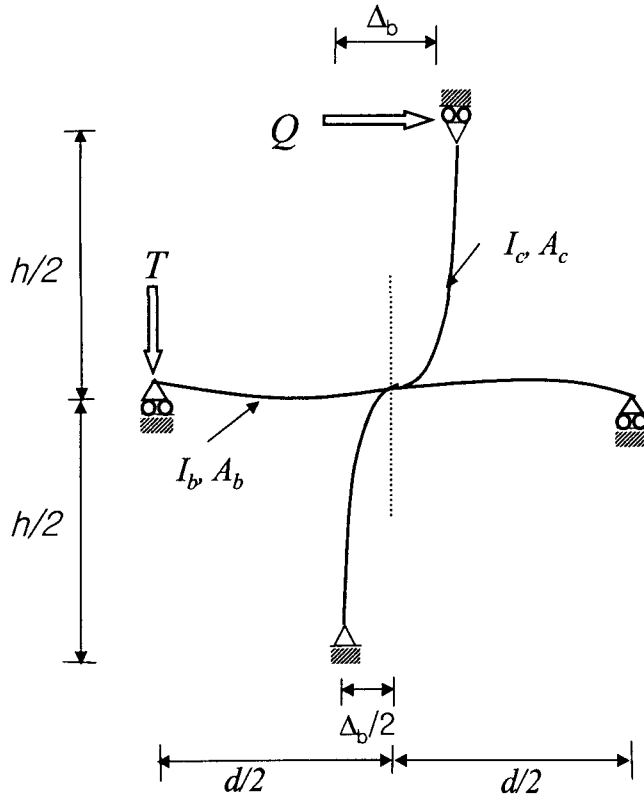


그림 1 강성계수를 위한 단위 골조 모델

튜브 구조물에 있어서 주요한 관심의 대상은 그 튜브 구조물의 일정한 층에서의 축력 변환이다. 이러한 변환이 튜브 구조물의 안정성에 가장 중요한 영향을 끼치는 전단지체현상이다. 따라서, 튜브 구조물의 거동을 평가할 때 전단지체 현상에 영향을 끼치는 요소에 대해서 확인하는 것이 중요하다. 전단지체 현상을 일으키는 요소들이 튜브 구조물의 휨 변형을 통하여 확인되었다. 강성골조구조에 작용된 전단력은 기둥과 보의 휨 변형에 의해 저항되며, 이러한 변형에 의해 골조 평면상에 전단지체 현상이 발생하게 된다. 따라서, 전단지체에 대한 골조의 단위를 모델링하기 위하여 보와 기둥의 중앙점을 힌지로 가정하여 그 변형상태를 그림 1과 같이 모델링 하였다.

휨 변형,  $\Delta_b$ , 는 다음과 같이 기둥과 보의 휨 변형 합으로서 표현된다.

$$\Delta_b = \Delta_c + \Delta_B \quad (1)$$

여기서,

$$\Delta_B = \frac{T(d-d_c)^3}{12EI_b} = Q \left( \frac{h}{d} \right)^2 \frac{(d-d_c)^3}{12EI_b}$$

$$\Delta_c = \frac{Q}{12EI_c} (h-d_b)^3$$

$I_b$  와  $I_c$ 는 각각 보와 기둥의 단면 2차 모멘트이며,  $d_b$  와  $d_c$ 는 각각 보와 기둥의 춤이다.

식(1)는 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$Q = S \cdot \Delta_b \quad (2)$$

여기서, 
$$S = 12E \left[ \frac{(h-d_b)^3}{I_c} + \left( \frac{h}{d} \right)^2 \frac{(d-d_c)^3}{I_b} \right]^{-1}$$

기둥의 축강성에 대한 전단강성(S)의 비가 전단지체현상의 크기를 결정한다. 그 비가 강성계수로서 정의되며, 그것은 다음과 같다.

$$S_f = \frac{12h}{A_c d^2} \frac{1}{\left( \frac{h}{I_c} + \frac{d}{I_b} \right)} \quad (3)$$

식(3)으로부터, 다음과 같은 구조변수들의 튜브 구조 거동에 끼치는 영향을 평가할 수 있다. 즉, 강성계수( $S_y$ )는 기둥과 보의 단면 2차 모멘트(각각  $I_c$  그리고  $I_b$ ) 보다 기둥 span( $d$ ), 기둥 단면적( $A_c$ ) 그리고 층고 ( $h$ )에 의해 결정된다. 강성계수에서, 1 보다 큰 값은 한 bay의 전단강성이 기둥의 축 강성보다 더 큰 것을 의미한다. 즉, 강성계수가 증가할수록 전단지체 현상이 감소하고, 강성계수가 감소할수록 전단지체현상이 증가한다. 본 연구에서는, 구조물의 전단변형에 영향을 주는 요소로서,  $A_c$ ,  $I_c$  그리고  $I_b$ 을 선택하여 변수연구를 수행하였다.

### 3. 해석대상 구조물의 모델링

강성계수를 구성하고 있는 여러 구조변수에 따른 튜브 구조물의 거동현상을 조사하기 위하여, 각각 다른 내부튜브를 가진 3개의 40층 철근 콘크리트 튜브 구조물을 그림 2와 같이 모델링 하였다. 이 3개의 구조물이 기준튜브 구조물로서 고려되었다. 3개의 기준 튜브 구조물의 재료 특성과 하중조건 그리고 기하학적인 수치들이 표 1에 요약되었다. 선택된 구조물의 수평하중에 대한 불리한 조건을 고려하기 위하여, 수평하중이 구조물 전 높이에 걸쳐서 플랜지 패널( 그림 2의 y 축 패널)에 작용하는 것으로 가정하였다.

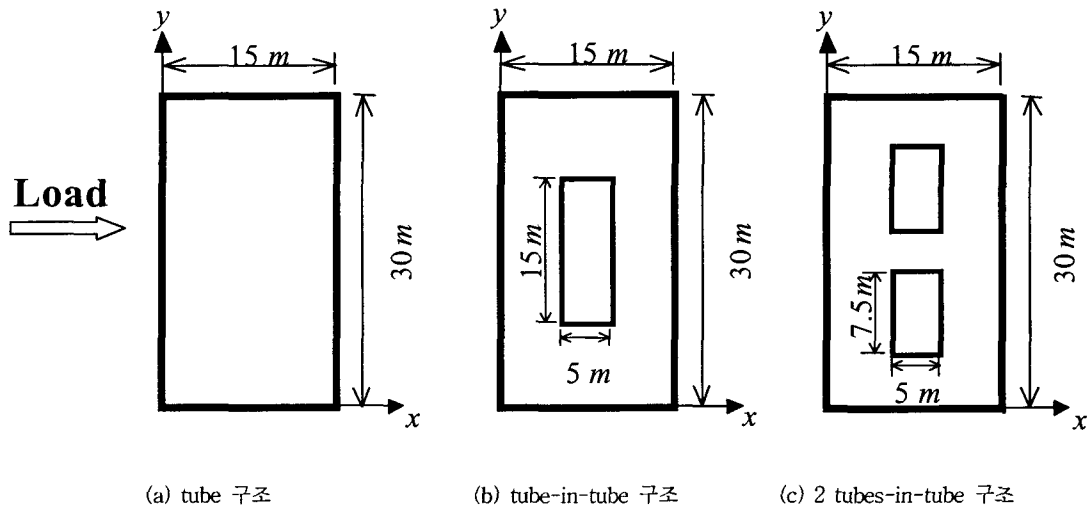


그림 2 기준 튜브 구조물의 평면모델

3개 기준 구조물의 거동이 다음과 같은 3개의 지배적인 변수를 변환시킴으로써 조사하였다.

- (1) 기둥의 축 강성
- (2) 보의 휨 강성
- (3) 기둥의 휨 강성

변수 변환에 따른 적용 구조물의 부재 특성이  $RA_c$ ,  $RI_b$ ,  $RI_c$ 의 형태로 표 2에 열거되었다.  $RA_c$ 는 기준 구조물의 기둥 단면적에 대한 적용구조물의 기둥 단면적 비( $A_c/A_c^*$ ),  $RI_b$ 는 기준 구조물의 보 단면 2차 모멘트에 대한 적용 구조물의 보 단면 2차 모멘트 비( $I_b/I_b^*$ )이며,  $RI_c$ 는 기준 구조물의 기둥 단면 2차 모멘트에 대한 적용 구조물의 기둥 단면 2차 모멘트 비( $I_c/I_c^*$ )이다.

표 2에 열거된 총 21개의 튜브 구조물을 해석하여 처짐, 기둥 축력 및 전단력이 변수별로 비교되었다.

표1 3개의 기준 튜브 구조물의 Geometry, 하중 그리고 재료 특성

	Tube	Tube-in-tube	2 tubes-in-tube
층고	3 m		
구조물 높이	120 m		
기둥 간격 (center-to-center)	2.5 m		
기둥과 보의 크기	80 cm × 80 cm		
외부튜브 크기	30 m × 15 m (12 × 6 bays @ 2.5 m)		
내부튜브의 크기	없음	15 m × 5 m (6 × 2 bays @ 2.5 m)	2 - 7.5 m × 5 m (2-3 × 2bays @ 2.5m)
수평하중	88.24 kN/m		
$E$ (탄성계수)	$2.06 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$		
$G$ (전단계수)	$1.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$		

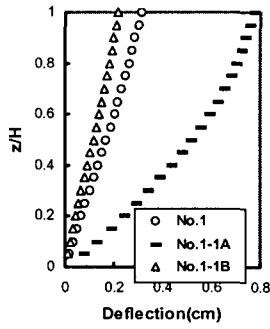
표 2 해석된 튜브 구조물의 구조적 특성

구조시스템	모델 No.	$RA_c (A_c/A_c^*)$	$RI_b (I_b/I_b^*)$	$RI_c (I_c/I_c^*)$
Tube 구조	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 구조	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 구조	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

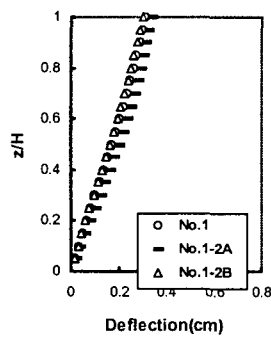
\* 기준구조물:  $I_b^* = 0.03413 \text{ m}^4$ ,  $I_c^* = 0.03413 \text{ m}^4$ ,  $A_c^* = 0.64 \text{ m}^2$ .

### 3.1 처짐 변환

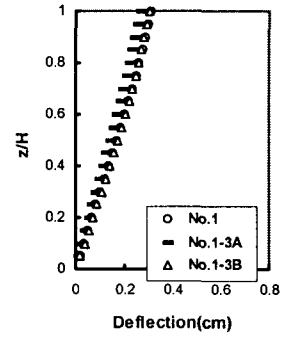
그림 3, 4, 5는 여러 가지 구조 변수에 따른 3가지 형태의 튜브 구조물의 수평처짐을 비교한 것이다. 그림 3(a), 4(a), 5(a)로부터, 기둥의 축 강성이 감소(즉, 모델 1-1B에서 1-1A, 모델 2-1B에서 2-1A 그리고 모델 3-1B에서 3-1A)할 때 캔틸레버 휨 변형 모드가 더욱 현저함을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나, 기둥과 보의 휨강성 변환(즉,  $RI_b$  와  $RI_c$ 의 변환)은 수평처짐에 큰 영향을 주지 못하고 있다. 이 현상은 그림 3(b)와 3(c), 그림 4(b)와 4(c) 그리고 그림 5(b)와 5(c)의 비교로부터 알 수 있다.



(a)  $RA_c$ 의 변환

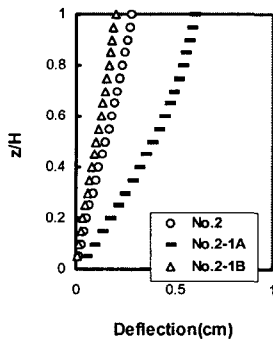


(b)  $RI_b$ 의 변환

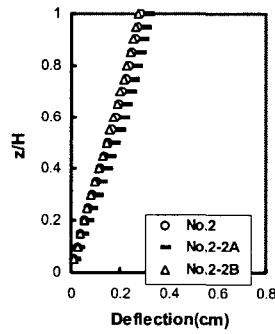


(c)  $RI_c$ 의 변환

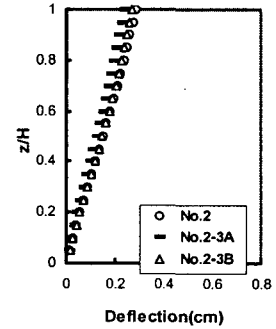
그림 3 Tube 구조물의 처짐



(a)  $RA_c$ 의 변환

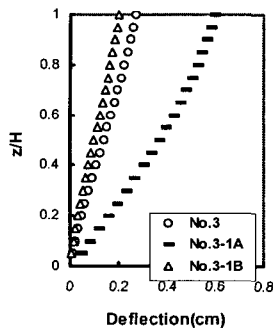


(b)  $RI_b$ 의 변환

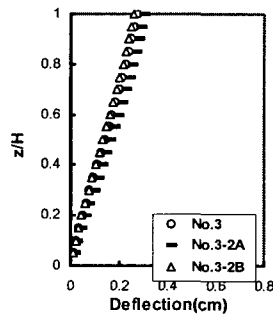


(c)  $RI_c$ 의 변환

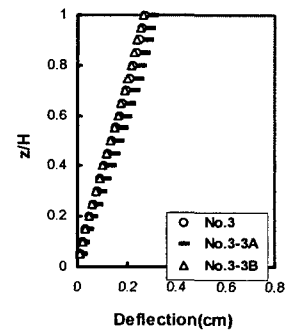
그림 4 Tube-in-tube 구조물의 처짐



(a)  $RA_c$ 의 변환



(b)  $RI_b$ 의 변환



(c)  $RI_c$ 의 변환

그림 5 2 tubes-in-tube 구조물의 처짐

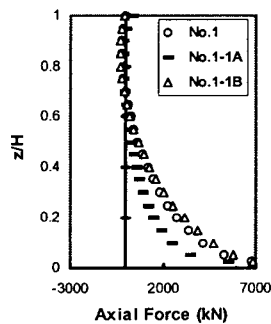
### 3.2 기둥축력 변환

그림 6, 7 그리고 8는 3가지 형태의 튜브 구조물의 높이에 따른 모서리 기둥의 축력 분포 변환이다. 이전의 처짐 비교로부터 알 수 있듯이, 축력 또한 기둥의 축 강성 변화에 크게 영향을 받고 있었다. 이것이 그림 6(a), 7(a) 그리고 8(a)에 잘 비교되어 있다. 그러나, 기둥과 보의 휨 강성은 기둥의 축력 변환에 크게 영향을 주지 못하고 있다. 이것은 그림 6(b)와 (c), 그림 7(b)와 (c) 그리고 그림 8(a)와 (c)의 비교로부터 알 수 있다.

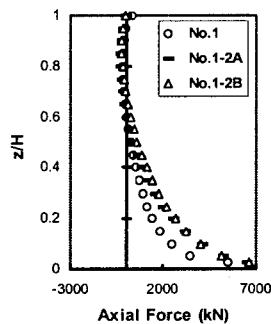
진단지체현상의 크기를 측정하기 위하여, 중앙부 기둥의 축력에 대한 모서리 기둥의 축력 비( $p$ )가 진단지체 계수로서 정의되었다. 표 3은 각 튜브 구조물의 강성계수와 진단지체 계수의 값을 열거한 것이다. 표 3으로부터, 강성계수의 값이 작은 구조물(즉, 구조물 모델 1-1B, 1-2A, 1-3A, 2-1B, 2-2A, 2-3A, 3-1B, 3-2A 그리고 3-3A)들의 진단지체 현상이 매우 현저하다는 것을 알 수 있다.

표 3 강성계수( $S_f$ )와 진단지체 계수( $p$ )

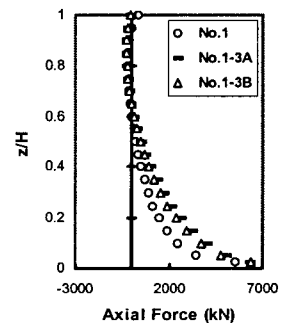
모델 No.	$S_f$	$p$	모델 No.	$S_f$	$p$	모델 No.	$S_f$	$p$
1	0.04	3.55	2	0.04	3.41	3	0.04	3.35
1-1A	0.08	3.15	2-1A	0.08	3.11	3-1A	0.08	2.92
1-1B	0.026	4.25	2-1B	0.026	4.02	3-1B	0.026	3.80
1-2A	0.026	4.57	2-2A	0.026	4.38	3-2A	0.026	4.14
1-2B	0.046	3.35	2-2B	0.046	3.35	3-2B	0.046	3.29
1-3A	0.026	4.50	2-3A	0.026	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



(a)  $RA_c$ 의 변환



(b)  $RI_b$ 의 변환



(c)  $RI_c$ 의 변환

그림 6 Tube 구조물의 모서리 기둥의 축력 분포

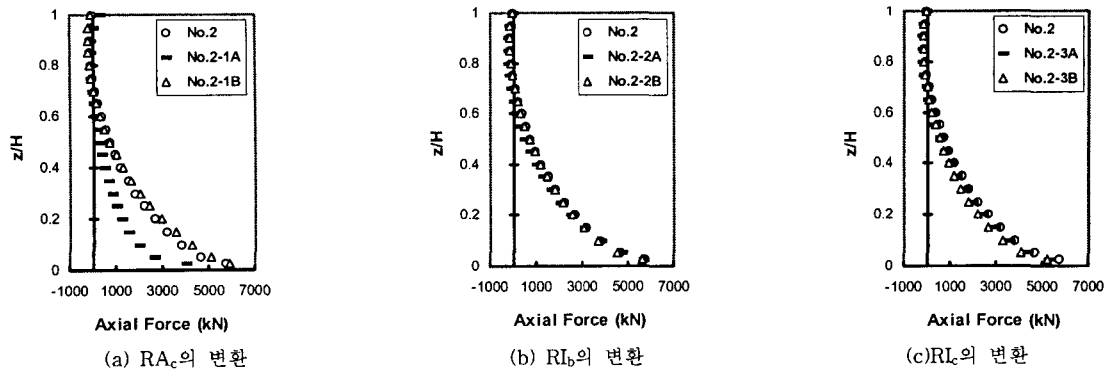


그림 7 Tube-in-tube 구조물의 모서리 기둥의 축력

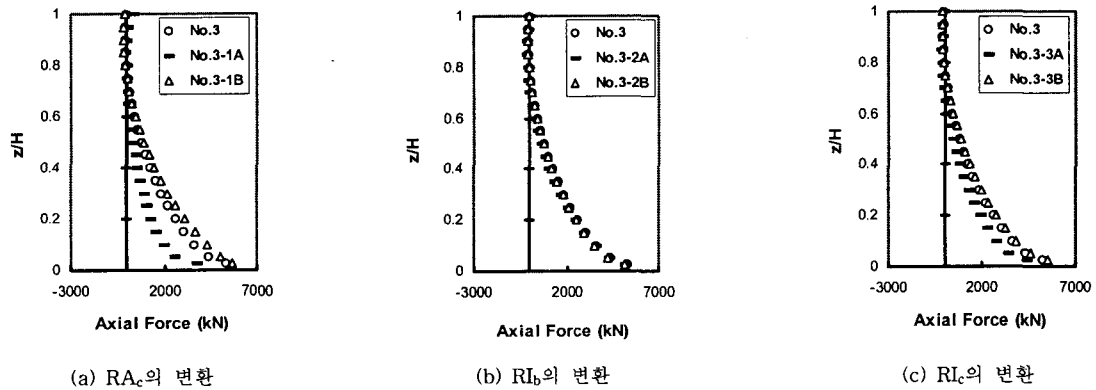


그림 8 2 tubes-in-tube 구조물의 모서리 기둥의 축력

### 3.3 전단력 분포

튜브 구조물 플랜지에 있는 중앙과 모서리 전단력 분포를 그림 9, 10, 11에 나타내었다. 이미 3.1장과 3.2장에서 알 수 있듯이, 강성계수를 구성하는 기둥 단면적( $A_c$ )은 튜브 구조물의 거동에 영향을 끼치는 가장 중요한 변수 중에 하나이다. 따라서, 기둥 단면적이 다른 튜브 구조물(즉, 구조 모델 1, 1-1A, 1-1B, 모델 2, 2-1A, 2-1B, 그리고 모델 3, 3-1A, 3-1B) 이 21개의 튜브 구조물 중에서 전단력 분포를 비교하기 위하여 선택되었다. 각 그림의 플랜지에 분포하는 전단력 비교로부터, 강성계수( $S$ ) 값이 작은 구조물(즉, 구조 모델 1-1B, 2-1B 그리고 3-1B)가 강성계수 값이 더 큰 구조체 (즉, 구조 모델 1, 1-1A, 2, 2-1A, 3 그리고 3-1A)보다 전단력 분포의 반전 발생지점이 더 상부층에서 발생하였다.

## 4. 결론

21개의 튜브구조물이 구조변수에 따른 거동 특성을 연구하기 위하여 해석 비교되었다. 튜브 구조물의 전반적인 거동 및 전단지체 현상을 평가하기 위하여, 강성계수가 튜브골조의 캔틸레버 거동과 휨 거동사이의 관계를 이용한 단위골조 모델링을 통하여 수치화 되었으며, 그 구성변수들이 해석대상 구조물에 적용되었다. 강성계수는 기둥과 보의 휨 강성과 기둥의 축 강성으로 설명될 수 있으며, 그 중에서 기둥의 축 강성이 수평하중을 받는 튜브 구조물의 거동에 큰 영향을 끼치는 가장 중요한 변수이다.

감사의 글

본 논문을 위해 지원하여 주신 한양대 초대형 구조시스템 연구 센터에 감사 드립니다.

참고문헌

1. ETABS (1996), *Three Dimensional Analysis of Building System-Users Manual*, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, U.S.A.

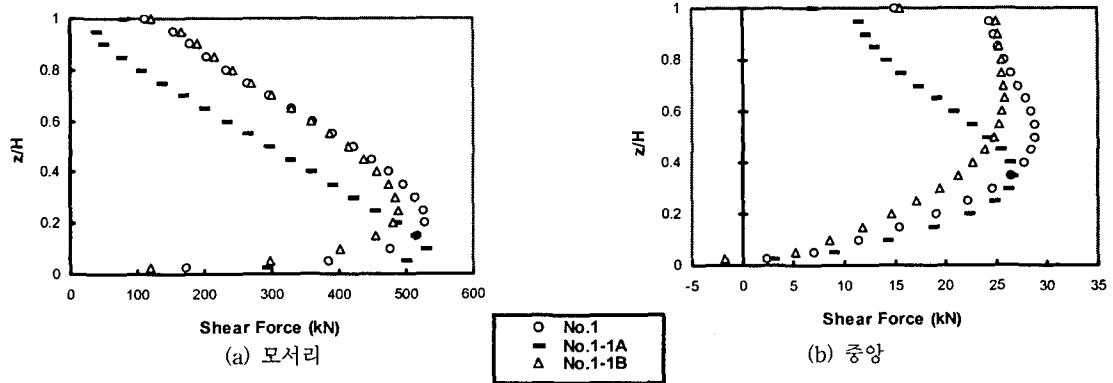


그림 9 Tube구조물의 플랜지에 있는 전단력 분포

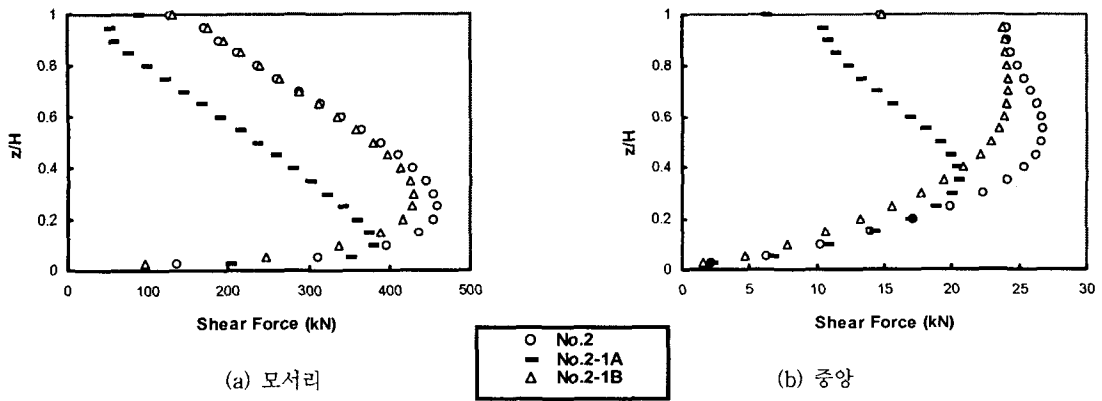


그림 10 Tube-in-tube 구조물의 플랜지에 있는 전단력 분포

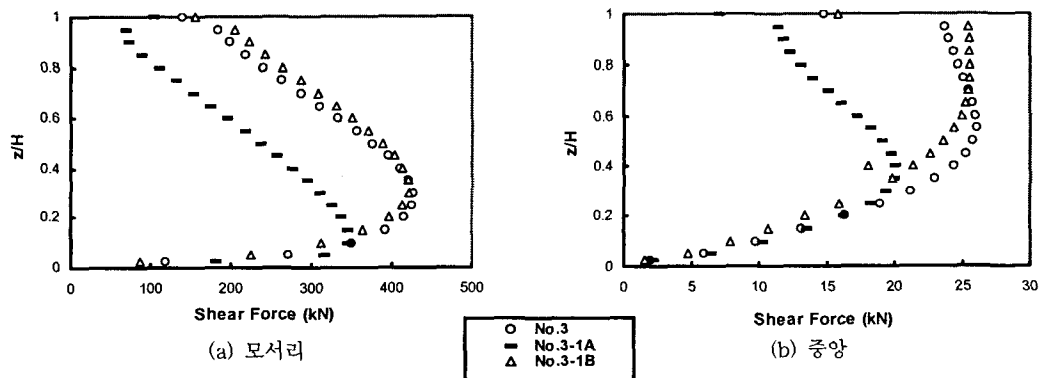


그림 11 Tube-in-tube 구조물의 플랜지에 있는 전단력 분포