

복수의 내부 튜브를 가진 골조 튜브 구조물의 Shear Lag

Shear Lag in Framed Tube Structures with Multiple Internal Tubes

이 강 건*
Lee, Kang-Kun

이 리 형**
Lee, Li-Hyung

요 지

복수의 내부튜브를 가진 골조 튜브 시스템의 전단지체 영향을 평가하기 위하여 수치적인 모델링 기법이 제안되었다. 이러한 튜브 구조물의 모든 튜브는 전단지체 영향 뿐만 아니라 휨과 전단변형의 영향을 설명할 수 있는 보로 각각 모델링된다. 수치적인 해석은 최소 포텐셜 에너지 원리에 근거한 변분 접근법에 기초한다. 복수의 내부튜브를 가진 튜브 구조물의 전단지체 현상이 부가적인 휨 응력에 의해서 조사되었다. 또한 튜브 구조물의 전단지체를 지배하는 구조변수를 연구하기 위하여 33개의 튜브구조물이 해석되었다.

핵심용어 : 부가적인 휨 응력, 고층건물, 전단지체, 튜브-튜브 상호작용

Abstract

A simple numerical modelling technique is proposed for estimating the shear lag effects of framed-tube system with multiple internal tubes. The tube(s)-in-tube structure is analysed by using an analogy approach in which each tube is individually modelled by a beam that can accounts for the flexural and shear deformations, as well as the shear lag effects. The numerical analysis is based on the minimum potential energy principle in conjunction with the variational approach. The shear lag phenomenon of such structures is studied with additional bending stresses. Structural parameters governing the shear lag behaviour in tube(s)-in-tube structures are also investigated through thirty-three numerical examples.

Keywords : additional bending stress, highrise building, shear lag, tube-tube interaction

1. 서 론

튜브 시스템으로 지어진 현대 고층건물은, 튜브 내에 존재하는 shear lag 현상으로 인하여 구조 효율성에 있어서 어느 정도의 손실을 갖고 있다. 이러한 결점에도 불구하고, 그 튜브 시스템은 구조효율성을 최대화할 수 있는 경제적인 시스템으로서 오늘날 널리 사용되고 있다. 이것은, 튜브 구조물의 수평하중 저항

부재가 구조물 외부주변을 따라서 배열되기 때문이다. 특히, 복수의 내부튜브를 가진 튜브 구조물(이하, "tube(s)-in-tube 구조물"이라 한다)은 내부튜브의 효과적인 수직하중 지지와 수평하중에 대한 각 튜브의 저항강성으로 인하여 엔지니어에게 관심을 받고 있는 시스템중의 하나이다.

그림 1의 수평하중을 받는 튜브 구조물의 응력 분포에서, 플랜지 패널(flange panel)에 있는 응력은

* 정희원 · 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터, 연구조교수
** 정희원 · 한양대학교 건축공학부, 교수

· 이 논문에 대한 토론을 2000년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2001년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

비균일하게 분포되고 있으며, 웹 패널(web panel)에 있는 응력은 비선형으로 분포되고 있어, 기본 휨 이론에 의한 거동과는 다르게 거동하는데, 이러한 비선형 현상을 shear lag 라고 한다. Positive shear lag는 플랜지 패널의 모서리 기둥에 있는 응력이 중앙 기둥에 있는 응력을 초과하는 경우를 말한다. 이것은 슬래브의 이그러짐 현상을 일으켜, 2차 부재나 내부 칸막이 변형에 원인이 된다. 중앙부 기둥의 응력이 모서리 기둥의 응력을 초과하는 negative shear lag 경우, 플랜지 패널의 압축부에서는 국부좌굴을, 인장부에서는 균열을 발생시킨다. 더욱이, 튜브-튜브 상호작용에 의한 응력, 즉 부가적인 휨 응력은 shear lag 예측을 더욱 어렵게하고 있다. 실질적으로, 튜브 구조물 내에 존재하는 negative shear lag와 함께 튜브-튜브 상호작용은 튜브구조물의 거동 및 성능평가를 어렵게하는 주요한 요소들이다.

Shear lag 현상은 튜브 구조물 뿐만 아니라, 공동 박스 보(hollow box girder)에서 오래 전부터 관찰되어 왔다. Chang 과 Zheng¹⁾ 그리고 Foutch 와 Chang⁴⁾은 박스 보에서 negative shear lag를 연구한 이후, negative shear lag영향이 박스 보 설계에서 고려되었다. 그러나, shear lag 현상에 대한 특성과 원인을 규명하기 위한 많은 연구가 이루어지지 않았다. 최근에는, Kristek와 Bauer⁶⁾ 그리고 Singh와 Nagpal⁹⁾이 골조 튜브 구조물에서 negative shear lag의 존재를 관찰하였으나, 튜브-튜브 상호작용과 shear lag 현상의 원인을 규명하는 연구는 거의 없는 실정이다.

이 논문에서는, 각 튜브에 있는 부가적인 휨 응력을 해석하기 위해서, 수치적인 모델링기법을 제안하였다. 튜브-튜브 상호작용에 의한 부가적인 휨 응력은, 튜브에 있는 shear lag 현상을 설명할 수 있는 한 방법으로 고려되고 있으나, 기존의 해석 방법^{2),7)}과 기존의 상업용 3 차원 골조해석 프로그램들은 이러한 shear lag 현상의 원인이 되는 부가적인 휨 응력을 설명할 수 없다.

3개의 40층 골조 튜브 구조물 (각각 1, 2, 3개의 내부튜브를 가진)의 shear lag 거동과 그 영향을 평가하기 위하여, 제안된 수치해석 방법에 의해 그 구조물의 부가적인 휨 응력을 해석하였다. 또한, tube(s)-in-tube 구조물의 shear lag 거동을 지배하는 4개의 무차원 구조 변수가 조사 되었으며, 그 영향이 비교 연구되었다. 사용된 무차원 구조 변수는 다음과 같다.

- (1) 강성계수(stiffness factor) S_f (또는, 기둥 축 강성(column axial stiffness)에 대한 전단 강성 (shear rigidity)비)
- (2) 강성 비(stiffness ratio) S_r (또는, 보의 휨 강성 (beam bending stiffness)에 대한 기둥의 휨 강성(column bending stiffness)비)
- (3) g (또는, 플랜지 패널에 있는 bay수에 대한 total 층수 비)
- (4) 내부튜브 수 q .

2. 복수의 내부튜브가 있는 튜브 구조물의 shear lag를 위한 해석

2.1 구조 모델링

그림 1은 2개의 내부튜브를 가진 튜브 구조물의 패널에 작용하는 응력의 기호를 나타내고 있다. 그 구조물의 각 튜브는 균일한 두께를 가진 4개의 정방형 (orthotropic) 패널로서 모델링⁸⁾ 된다. 그러므로, 각 튜브들은 연속적인 구조물로서 해석될 수 있다. 이러한 튜브 구조물의 각 층 슬래브는 그들 자신 평면에서 견고한 강막으로 고려되며, 그 슬래브의 높은 면내 강성은 튜브 사이의 상대변위를 구속한다.

모델링에 있어서, 튜브 구조물은 그 단면의 중앙을 통과하는 수직 축(z)과 두개의 수평 대칭축(x 와 y)을 갖고 있는 것으로 가정한다. 그러므로, 외부 웹 패널에 있는 변위 분포의 크기와 부호는 동일한 반면, 외부 플랜지 패널에 있는 변위 분포는 크기는 같으나

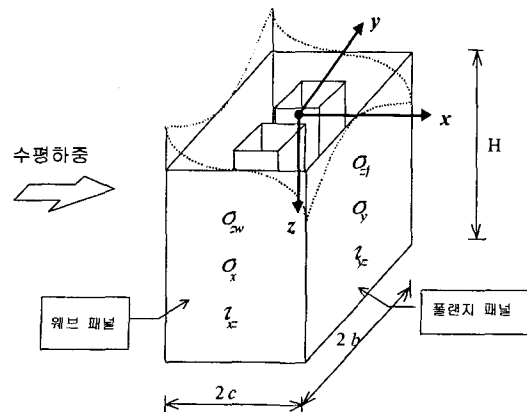


그림 1 2개의 내부튜브를 가진 튜브 구조물의 패널에 있는 응력 기호

부호가 반대가 된다. 이러한 가정이 내부 튜브의 변위 분포를 가정하는데 또한 적용된다.

2.2 플랜지와 웨브 패널에 있는 수직 변위 함수

2.2.1 외부튜브

플랜지 패널의 변위 함수를 표현하기 위해서 수정된 Reissner 함수⁸⁾가 사용되었다. 이 함수는 net shear lag의 영향을 포함하는 독립적인 수직변위 함수이다. 웨브 패널에 있는 수직 변위분포를 위한 함수는 3차원 함수로 가정하였다. 단일 내부튜브를 가진 튜브 구조물의 shear lag 현상에 대한 기존 연구⁸⁾는 그 가정된 변위 함수가 튜브 구조물의 전반적인 거동을 평가하는데 있어서 shear lag 현상의 특징을 잘 반영하고 있음을 보여주고 있다.

다음의 식(1a)와 (1b)는 각각 가정된 외부 플랜지 패널의 변위 함수($U_1(z, x)$)와 외부 웨브 패널의 변위 함수($U_2(z, y)$)이다.

$$U_1(z, y) = c \left[\frac{dw}{dz} + \left(1 - \left(\frac{y}{b} \right)^3 \right) u_1(z) \right] \quad (1a)$$

$$U_2(z, x) = \left[\frac{dw}{dz} + \left(\frac{x}{c} - \left(\frac{x}{c} \right)^3 \right) u_2(z) \right] \quad (1b)$$

여기서, b 와 c 는 각각 플랜지와 웨브 패널 폭의 반(half), w 는 수평하중에 의한 구조물의 수평 처짐, $u_1(z)$ 와 $u_2(z)$ 는 각각 플랜지와 웨브의 전단변형에 의한 shear lag 계수를 포함하고 있는 미지 함수이다. 그리고 x , y 그리고 z 은 3축의 좌표를 의미한다.

외부튜브의 변위분포를 표현하기 위해 가정된 식(1a)와 (1b)는 내부튜브의 플랜지와 웨브에 있는 변위함수를 결정하기 위한 기본 함수로서 사용된다.

2.2.2 내부튜브

내부튜브의 수 (N)가 2, 4, 6 또는 8 등 일 경우, 플랜지 패널의 변위 함수 ($U_{i1}(z, y)$)는 다음과 같다.

$$n_1 \leq y \leq n_2$$

$$U_{i1}(z, y) = c_i \left[\frac{dw}{dz} + \left(1 + 8 \left(\frac{y - n_1}{2b_i} - \frac{1}{2} \right)^3 \right) u_{i1}(z) \right] \quad (2a)$$

$$n_2 \leq y \leq n_3$$

$$U_{i1}(z, y) = c_i \left[\frac{dw}{dz} + \left(1 - 8 \left(\frac{y - n_1}{2b_i} - \frac{1}{2} \right)^3 \right) u_{i1}(z) \right] \quad (2b)$$

여기서,

$$n_1 = \frac{(n-1)}{2} a + 2 \left(\frac{n}{2} - 1 \right) b_i,$$

$$n_2 = \frac{(n-1)}{2} a + (n-1) b_i,$$

$$n_3 = \frac{(n-1)}{2} a + n b_i \text{ 그리고}$$

$$n = \left(\frac{N}{2} \right)! \times 2 \text{ 이다.} \quad (3)$$

식(3)에서, a 는 내부튜브 사이의 간격, b_i 와 c_i 는 각각 내부튜브의 플랜지와 웨브 패널 폭의 반 이며, $u_{i1}(z)$ 는 전단변형에 의한 shear lag 계수를 포함하는 미지 함수이다.

내부튜브수가 홀수인 경우, 내부튜브의 플랜지 패널에 있는 변위 분포 함수는 다음과 같다.

$$0 \leq y \leq b_i$$

$$U_{i1}(z, y) = c_i \left[\frac{dw}{dz} + \left(1 - \left(\frac{y}{b_i} \right)^3 \right) u_{i1}(z) \right] \quad (4a)$$

$$n_1 \leq y \leq n_2$$

$$U_{i1}(z, y) = c_i \left[\frac{dw}{dz} + \left(1 + 8 \left(\frac{y - n_1}{2b_i} - \frac{1}{2} \right)^3 \right) u_{i1}(z) \right] \quad (4b)$$

$$n_2 \leq y \leq n_3$$

$$U_{i1}(z, y) = c_i \left[\frac{dw}{dz} + \left(1 - 8 \left(\frac{y - n_1}{2b_i} - \frac{1}{2} \right)^3 \right) u_{i1}(z) \right] \quad (4c)$$

식(4)에서, $N=3, 5$ 또는 7 등 이고 $n = \left(\frac{N-1}{2} \right)! \times 2 + 1$ 이다.

외부 웨브 패널에 있는 변위 함수에 대한 유사한 가정이 내부 웨브 패널의 변위 함수를 결정하기 위하여 사용된다. 그 변위함수 ($U_{i2}(z, x)$)는

$$U_{i2}(z, x) = \left[\frac{dw}{dx} x + \left(\frac{x}{c_i} \right) - \left(\frac{x}{c_i} \right)^3 u_{i2}(z) \right] \quad (5)$$

여기서, $u_{i2}(z)$ 는 전단변형이 원인이 되는 shear lag

계수를 포함하고 있는 미지 함수이다.

식(1), (2), (4) 그리고 (5)를 z 에 대하여 미분하면, 외부와 내부 튜브의 플랜지와 웨브 패널에 있는 수직 변형함수를 얻을 수 있다.

2.3 최소 포텐셜 에너지 원리에 의한 수치해석

복수의 내부튜브를 가진 튜브 구조물의 전체 포텐셜 에너지 (V)는 작용하중에 의한 전체 외부 일과 내부·외부 튜브의 전체 변형에너지의 합으로서 얻어진다. 즉,

$$V = \text{외부튜브의 전체 변형에너지} + \Sigma \text{내부튜브의 전체 변형에너지} + \text{작용하중에 의한 전체 외부 일} \quad (6)$$

내부·외부 튜브의 변위 분포 함수에 대한 간단한 가정을 통하여, 복잡한 2중 적분방정식으로 구성된 전체 포텐셜 에너지(식(6))는 2차 선형 미분 방정식으로 줄어든다. 그 수치해석은 최소 포텐셜 에너지 원리에 근거한 변분 접근법(variational approach)⁵⁾에 의하여 이루어진다.

식(6)의 전체 포텐셜 에너지는 z, w', u_1, u'_1, u_n 그리고 u'_n 에 대한 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$V = \int_0^H F(z, w', u_1, u'_1, u_n, u'_n) dz \quad (7)$$

여기서, F 는 다음과 같은 지배 미분 방정식(governing differential equations)을 유도하는 함수이다.

외부 튜브인 경우,

$$\frac{d}{dz} [u'_1(z) \alpha_2(z) + w''(z) \alpha_1(z)] - u_1(z) \alpha_3(z) = 0$$

$$\frac{d}{dz} [EI_e w''(z) - u'_1(z) \alpha_1(z)] = -P_e(z) \quad (8)$$

내부 튜브인 경우,

$$\frac{d}{dz} [u'_n(z) \beta_2(z) + w''(z) \beta_1(z)] - u_n(z) \beta_3(z) = 0$$

$$\frac{d}{dz} [EI_i w''(z) - u'_n \beta_1(z)] = -P_i(z) \quad (9)$$

여기서, $u_1(z)$ 그리고 $u_n(z)$ 는 각각 식(1)과 (2)에서 정의되었으며, P_e 그리고 P_i 는 각각 내부와 외부 튜브에 있는 전단력이고, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2$ 그리고 β_3 는 경계조건을 사용하여 얻어진 상수이다. 그리고 I_e, I_i 와 I 는 각각 외부와 내부튜브 그리고 전체 튜브 구조물의 단면 2차 모멘트 이다.

2.4 부가적인 휨 응력

식(8)과 (9)의 지배 미분방정식은 수평하중을 받는 tube(s)-in-tube 구조물의 전체적인 거동을 나타내고 있다. Shear lag 현상의 원인이 되는 부가적인 휨 응력을 포함하고 있는 튜브 구조물의 휨 응력은 내부·외부튜브의 수직 변형 함수에 영 계수를 곱함으로써 얻어진다. Tube(s)-in-tube 구조물의 외부튜브에 있는 휨 응력은 다음과 같다.

외부 플랜지 패널 :

$$\sigma_{zf} = -E \left[\frac{M}{EI} c - \left(1 - \frac{y^3}{b^3} + \frac{I_N}{I} \right) cu'_1(z) - \frac{I_{IN}}{I} cu'_n(z) \right]$$

$$= Ew''_c (= \sigma_f) + \sigma_{fs} \quad (10)$$

외부 웨브 패널:

$$\sigma_{zw} = -E \left[\frac{M}{EI} x + \left(\frac{15}{2} \frac{b}{c} x - \frac{15b}{2} \left(\frac{x}{c} \right)^3 - \frac{I_N}{I} x \right) u'_1(z) - \frac{I_{IN}}{I} xu'_n(z) \right] = Ew''_x (= \sigma_w) + \sigma_{ws} \quad (11)$$

식(11)과 식(12)에서, σ_{fs} 와 σ_{ws} 는 각각 튜브-튜브 상호작용에 의한 플랜지 그리고 웨브 패널에 있는 부가적인 휨 응력이다. 외부 튜브에 작용하는 부가적인 휨 응력을 구하는 과정이 또한 내부튜브의 부가적인 휨 응력을 평가하기 위해서 적용된다.

다음은 tube(s)-in-tube 구조물의 외부와 내부 튜브에 작용하는 부가적인 휨 응력이다.

Tube(s)-in-tube 구조물의 외부 플랜지 패널:

$$\sigma_{fs} = \left(1 - \frac{y^3}{b^3} + \frac{I_N}{I} \right) Ecu'_1(z) + \frac{I_{IN}}{I} Ecu'_n(z) \quad (12)$$

Tube(s)-in-tube 구조물의 외부 웹 패널:

$$\sigma_{ws} = \frac{I_{iN}}{I} Exu'_n(z) - \left(\frac{15}{2} \frac{b}{c} x - \frac{15b}{c} \left(\frac{x}{c} \right)^3 - \frac{I_{iN}}{I} x \right) Eu'_1(z) \quad (13)$$

내부튜브가 하나인 튜브 구조물의 내부 플랜지 패널:

$$\sigma_{fis} = \left(1 - \frac{y^3}{b_i^3} + \frac{I_{iN}}{I_i} \right) Ec_i u'_n(z) \quad (14)$$

Tube(s)-in-tube 구조물의 내부 플랜지 패널:

$$\sigma_{fis} = \left(1 \pm 8 \left(\frac{y-n_1}{2b_i} - \frac{1}{2} \right)^3 + \frac{I_{iN}}{I_i} \right) Ec_i u'_n(z) \quad (15)$$

Tube(s)-in-tube 구조물의 내부 웹 패널:

$$\sigma_{wis} = \left(\frac{15b_i}{2} \left(\frac{x}{c} \right)^3 + \frac{I_{iN}}{I_i} x - \frac{15}{2} \frac{b_i}{c_i} x \right) Eu'_n(z) \quad (16)$$

식(14)~(16)에서, σ_{fis} 와 σ_{wis} 는 shear lag 영향에 의한 각각 내부 플랜지와 웹 패널에 있는 부가적인 휨 응력이다. 그리고, $M(z)$ 와 $M_i(z)$ 는 각각 튜브 구조물 전체의 휨 모멘트와 내부튜브의 휨 모멘트이다.

식(12), (14) 그리고 (15)에서, $\sigma_{fs(y=b)}$ 와 $\sigma_{fs(y=b, \text{ or } a/2)}$

는 각각 외부와 내부 플랜지 패널의 모서리 기둥에 작용하는 부가적인 휨 응력이다. 부가적인 휨 응력 ($\sigma_{fs(y=b)}$)이 휨 응력($\sigma_{fs(y=b)}$)과 부호가 같으면, 식(11)의 $\sigma_{fs(y=b)}$ 는 기본 휨이론에 의하여 계산된 응력 값보다 더 크다. 이것은 positive shear lag 영향에 의한 것이다. 그러나, 부가적인 휨 응력과 휨 응력의 작용 방향이 반대인 경우, $\sigma_{fs(y=b)}$ 이 기본 휨 이론에 의해 계산된 값보다 크거나 작을 수 있다. 이것을 negative shear lag 효과라고 한다. 이러한 shear lag 영향의 크기는 σ_{fs} 에 대한 σ_f 의 비 (ratio σ_f/σ_{fs})로서 표현된다. 이와 같이, 부가적인 휨 응력(σ_{fs})은 positive와 negative shear lag의 영향을 설명할 수 있는 중요한 응력이 된다.

3. 수치적 해석 결과의 비교와 평가

Tube(s)-in-tube 구조물의 shear lag 현상을 조사하기 위하여, 1, 2, 3개의 내부튜브를 가진 3개의 40층 RC 골조 튜브 구조물의 부가적인 휨 응력을 조사하였다. 이 구조물은 3.0m의 층고와 2.5m의 기둥간격으로 구성되어 있으며, 각 내부튜브의 단면 2차 모멘트를 $90m^4$ 으로 하였다. 또한, 모든 외부기둥과 보의 횡단면적은 $0.64m^2$, 슬래브는 120mm 두께로 하였으며, 영 계수 E 와 전단 계수 G 는 각각 $2.06 \times 10^{10} N/m^2$ 와

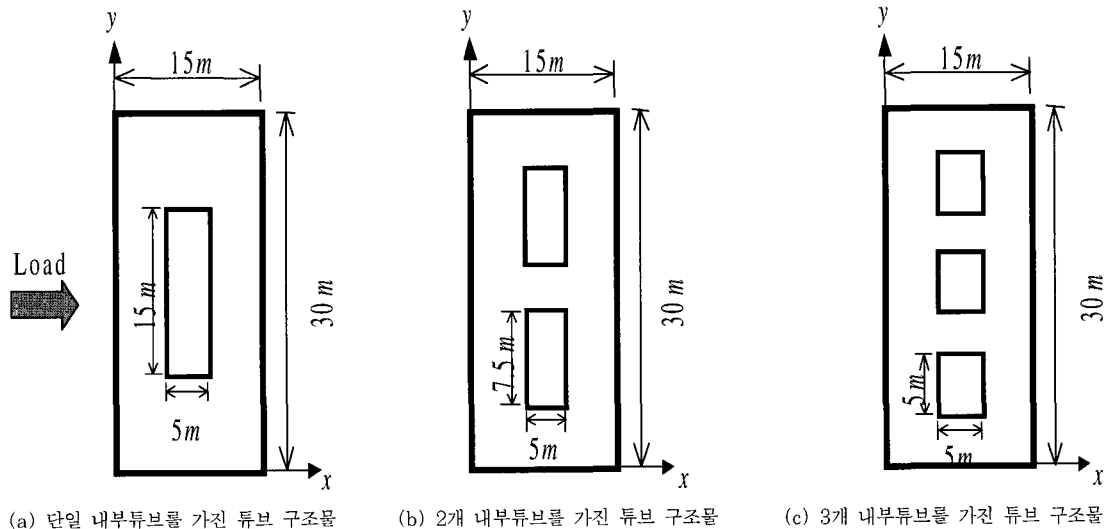
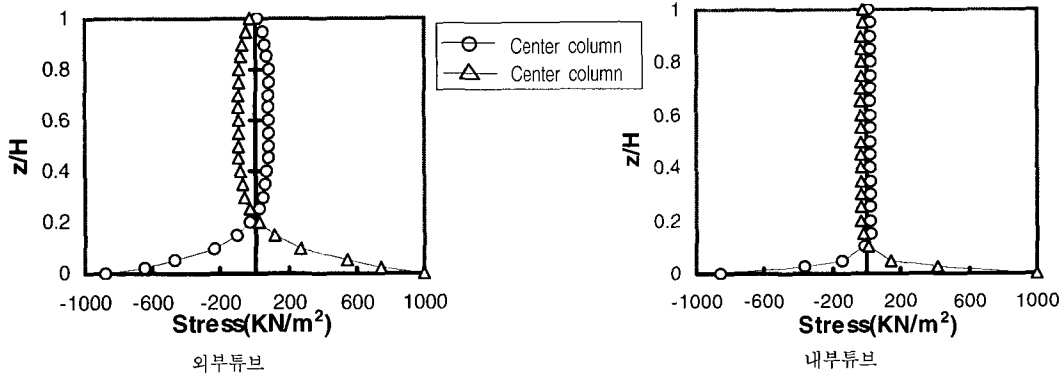


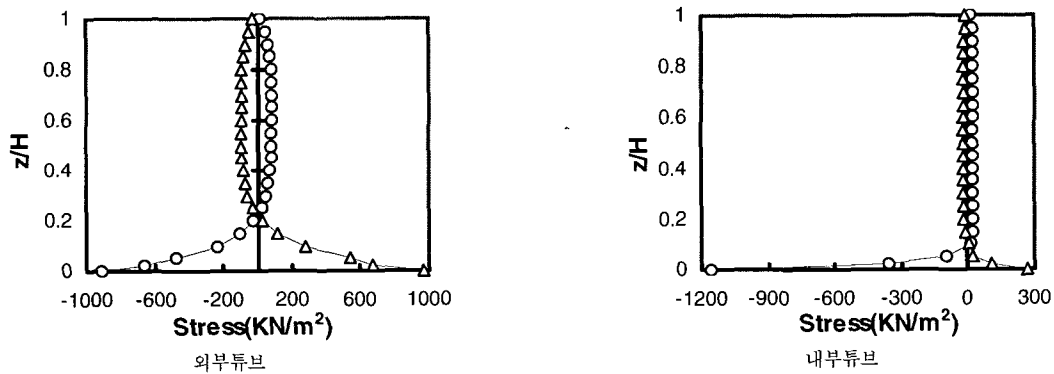
그림 2 내부튜브를 가진 3개의 튜브 구조물의 평면

0.824×10¹⁰N/m²으로 하였다. 그 구조물이 최대응력이 받는 상태를 고려하기 위해서 균일한 수평하중(88.24kN/m)이 구조물 높이와 긴 프레임 패널(플랜지)에 걸쳐서 작용하는 것으로 가정하였다. 그림 2는 여기서 해석된 3개의 튜브 구조물의 평면을 보이고 있다.

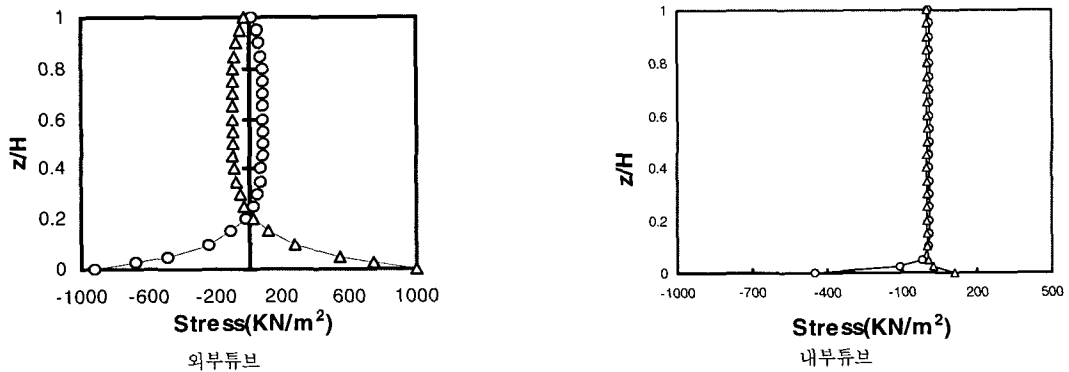
그림 3은 3개 tube(s)-in-tube 구조물의 각 튜브에 있는 부가적인 휨 응력을 표시한 것이다. 튜브-튜브 상호작용에 의한 shear lag 분포와 shear lag 반전을 조사하기 위하여, 플랜지 패널의 중앙과 모서리에 있는 부가적인 휨 응력을 구조물 높이에 따라서



(a) 단일 내부튜브를 가진 튜브 구조물



(b) 2개의 내부튜브를 가진 튜브 구조물



(c) 3개의 내부튜브를 가진 튜브 구조물

그림 3 3개의 tube(s)-in-tube 구조물의 중앙과 모서리 기둥에 있는 부가적인 휨 응력

비교하였다. 그 부가적인 응력 분포도로부터 다음과 같은 결론을 얻었다. 내부 튜브 단면 2차 모멘트가 같을 경우, 내부튜브수의 증가는 내부튜브에 있는 중앙 기둥에서부터 모서리 기둥에 작용하는 부가적인 휨 응력의 증가를 점차 감소시킨다. 즉, 응력 감소가 중앙 기둥과 모서리 기둥 사이에 발생한다. 따라서, shear lag가 감소한다. 그러나, 그 내부튜브 수의 증가는 외부튜브에 있는 부가적인 휨 응력현상에 큰 영향을 주지 못하고 있다. 또한, positive shear lag의 영향은 구조물의 최하층부에서 가장 크고, 외부튜브에 있는 negative shear lag는 구조물 높이의 약 1/4지점에서부터 시작되며, 내부튜브의 shear lag 반전 지점은 외부튜브의 shear lag 반전 지점보다 더 낮은 층에서 존재하는 것으로 확인되었다.

4. 구조적 변수

모든 층에서 매우 밀접한 간격으로 배치된 기둥을 연결하는 Spandrel 보의 자연적 휨 성능 증가에 의해, positive와 negative shear lag는 다른 구조시스템에서 보다 튜브 구조 시스템에서 매우 현저하다. 특히, tube(s)-in-tube 구조물의 각 튜브 내에 존재하는 튜브-튜브 상호작용과 함께 shear lag 현상은 구조 거동과 성능에 대한 평가를 더욱 어렵게 한다.

Tube(s)-in-tube 구조물의 shear lag 현상이 3장에서 부가적인 휨 응력과 함께 확인되었다. 여기에서는 구조적인 변수를 사용하여 shear lag 현상을 연구하였다. 해석된 구조물은 3장에서 사용된 구조물의 제원과 같은 하중 조건, 평면 그리고 재료 특성 (E 그리고 G)을 가지고 있다. Shear lag 거동에 영향을 끼치는 구조적인 요소를 조사하기 위하여 다음과 같은 4개의 무차원 구조 변수가 사용되었다.

(1) 강성계수 S_f

$$S_f = \frac{\text{전단 강성/기둥 축 강성}}{A_c d^2 \left(\frac{h}{I_c} + \frac{d}{I_b} \right)} \quad (17a)$$

여기서, I_c 와 I_b 는 각각 기둥과 보의 단면 2차 모멘트, A_c 는 기둥 휨 단면적, h 는 층고 이며, d 는 bay 폭 (또는 기둥 간격) 이다.

(2) 강성비 S_r

$$S_r = \frac{\text{기둥 휨 강성}}{\text{보 휨 강성}} = \frac{I_c d}{I_b h} \quad (17b)$$

(3) g 는 외부 플랜지 패널에 있는 bay수에 대한 전체 층수 비이다. (17c)

(4) 내부튜브 수 q . (17d)

표 1 Tube(s)-in-tube 구조물의 구조적인 변수 (S_f, S_r, g 그리고 q)

Model No.	S_f	S_r	g	q
1-1F	0.04	0.833	3.33	0
1-2F	0.08	0.833	3.33	0
1-3F	0.026	0.833	3.33	0
2-1F	0.04	0.833	3.33	1
2-2F	0.08	0.833	3.33	1
2-3F	0.026	0.833	3.33	1
3-1F	0.04	0.833	3.33	2
3-2F	0.08	0.833	3.33	2
3-3F	0.026	0.833	3.33	2
1-1R	0.026	0.833	3.33	0
1-2R	0.026	1.673	3.33	0
1-3R	0.026	0.415	3.33	0
2-1R	0.026	0.833	3.33	1
2-2R	0.026	1.673	3.33	1
2-3R	0.026	0.415	3.33	1
3-1R	0.026	0.833	3.33	2
3-2R	0.026	1.673	3.33	2
3-3R	0.026	0.415	3.33	2
1-ST40	0.04	0.833	3.33	0
1-ST60	0.04	0.833	5	0
1-ST20	0.04	0.833	1.66	0
2-ST40	0.04	0.833	3.33	1
2-ST60	0.04	0.833	5	1
2-ST20	0.04	0.833	1.66	1
3-ST40	0.04	0.833	3.33	2
3-ST60	0.04	0.833	5	2
3-ST20	0.04	0.833	1.66	2
1-DT	0.04	0.833	3.33	0
2-DT	0.04	0.833	3.33	1
3-DT	0.04	0.833	3.33	2
1-CT	0.04	0.833	3.33	1
2-CT	0.04	0.833	3.33	2
3-CT	0.04	0.833	3.33	3

표 1은 튜브 구조물의 shear lag 현상을 조사하기 위해서 고려된 tube(s)-in-tube 구조물의 S_f , S_r , g 그리고 q 이다. 33개의 tube(s)-in-tube 구조물이 해석되었으며, 그 구조물들은 F, R, ST, DT 그리고 CT Group으로 분류되었다. 표 1에 있는 회색 부분은 다음과 같이 변화하는 구조변수를 나타낸다. F Group은 I_c , I_b , S_r , q 그리고 g 가 일정하나 S_f 가 다른 구조물을 말한다. R Group은 S_f , q 그리고 g 가 일정하나 S_r 이 다른 구조물을 말한다. ST와 DT (CT) Group은 각각 g 와 q 가 다르나, 다른 변수는 일정한 구조물을 말한다. 여기서, DT와 CT Group 사이의 차이는, DT Group은 내부 튜브 단면 2차 모멘트가 다르나, CT Group은 단면 2차 모멘트가 일정한 구

구조물을 말한다.

외부튜브 플랜지 패널의 기둥에 있는 shear lag 현상을 조사하기 위하여, p 가 외부 플랜지 패널에 있는 중앙기둥의 응력에 대한 모서리 기둥의 응력비로서 정의되었다. p 가 1 보다 크면 positive shear lag를 의미하며, 작으면 negative shear lag를 의미한다. p 값이 1인 층을 shear lag 반전이 발생하는 지점이라 한다.

그림 4는 I_c , I_b , S_r 그리고 g 가 일정하고, S_f 가 0.026, 0.04 그리고 0.08로 변할 때, 각 구조물의 외부 플랜지 패널에서의 p 의 변환을 높이에 따라서 나타낸 것이다. S_f 의 값의 증가는 한 bay 전단 강성의 증가의 원인이 되어, 기둥 축 응력의 균일한 분포를 초래하였다.

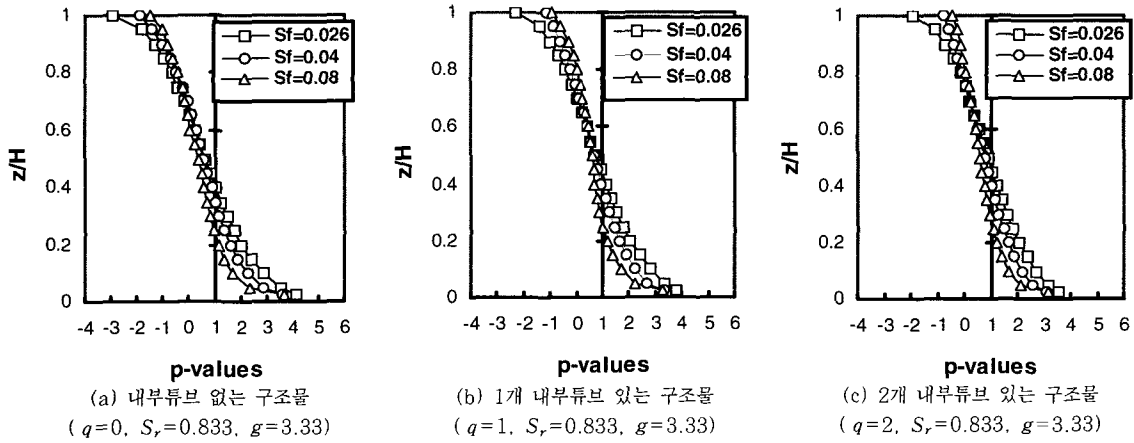


그림 4 S_f 에 대한 p 의 변환

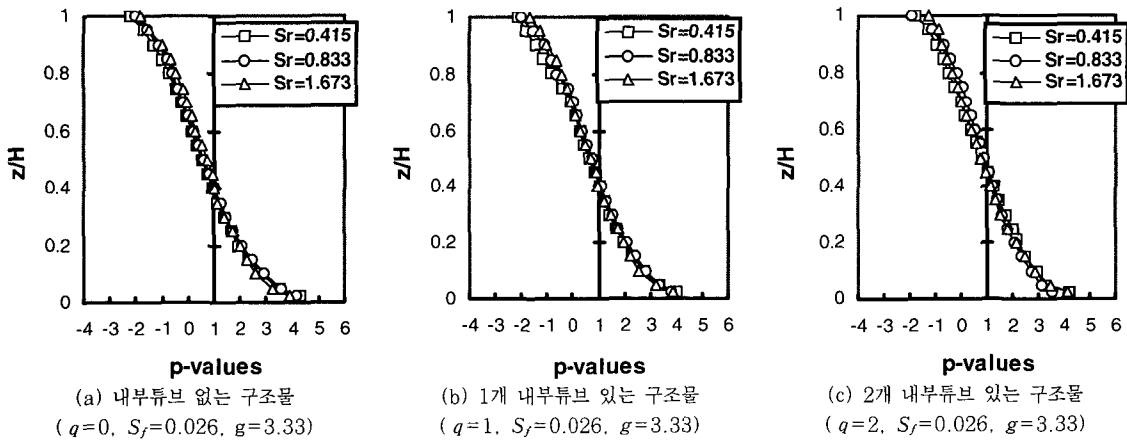
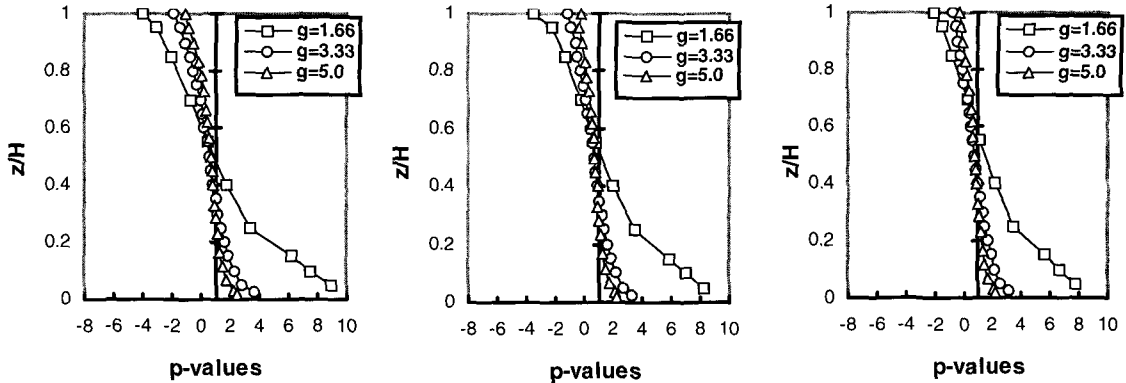


그림 5 S_r 에 대한 p 의 변환



(a) 내부튜브 없는 구조물 ($q=0, S_f=0.04, S_r=0.833$)
 (b) 1개 내부튜브 있는 구조물 ($q=1, S_f=0.04, S_r=0.833$)
 (c) 2개 내부튜브 있는 구조물 ($q=2, S_f=0.04, S_r=0.833$)

그림 6 g 에 대한 p 의 변환

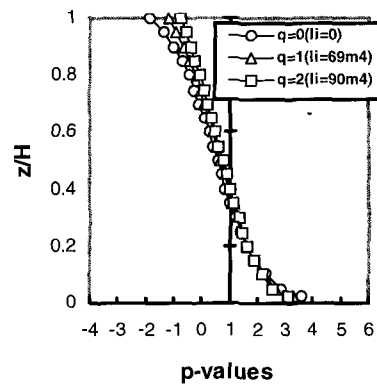
그러므로, positive와 negative shear lag 현상이 줄어들었다.

그림 5는 S_f 와 g 가 일정하고 S_r 이 0.415, 0.833 그리고 1.673의 다른 값을 가질 때, 높이에 따른 플랜지 패널의 p 변환을 보이고 있다. 강성비(S_r)의 증가는 보 회전에 대한 기둥 구속의 증가를 의미한다. 즉, bay 전단 강성의 증가를 초래하여 shear lag가 감소한다. 그러나, 그림 5로부터, 강성비는 튜브 구조물의 shear lag 현상에 큰 영향을 주지 않고 있다.

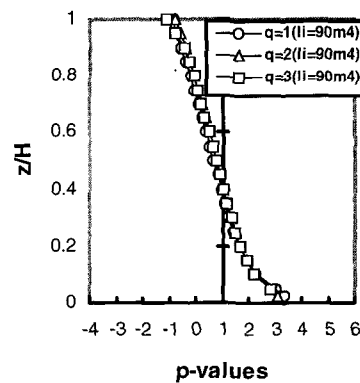
그림 6는 3개의 g 값, 즉, 1.66, 3.33 그리고 5.0를 가진 튜브 구조물의 p 변환을 비교한 것이다. 그 튜브 구조물의 플랜지에 있는 bay 수, S_f , 그리고 S_r 은 일정하게 유지되었다.

Shear lag 현상이 g 값의 증가에 따라서 감소하고 있으며, 이러한 현상은 3개의 튜브 구조물 (즉, 내부튜브가 2개, 1개 그리고 없는 구조물)에서 비슷하였다. 특히, g 값이 가장 큰 (즉, $g=5$) 구조물이 보의 축적된 전단강성을 증가시켜 shear lag 현상을 크게 감소시키고 있다.

그림 7은 튜브구조물의 내부튜브 단면 2차 모멘트 (I_i)가 같거나 다를 경우, q 값에 따른 p 의 변환을 나타낸 것이다. 그림 7(a)로부터, 구조물의 q 그리고 I_i 가 증가할 때, 내부튜브의 수평강성이 증가하여 shear lag 현상이 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나, I_i 가 같으면서 q 가 증가하는 경우, 그 튜브 구조물의 shear lag 거동에 대한 큰 차이는 발견되지 않았다. 따라서,



(a) 다른 내부튜브 단면 2차 모멘트 ($I_i(m^4)$)



(b) 같은 내부단면 2차 모멘트 ($I_i(m^4)$)

그림 7 q 에 대한 p 의 변환

tube(s)-in-tube 구조물의 구조적인 반응은 내부 튜브 수보다는 내부 튜브 단면 2차 모멘트 크기에 의존한다.

5. 결 론

이 논문에서는 수치해석 방법이 복수의 내부 튜브를 가진 튜브 구조물의 shear lag 거동을 평가하기 위하여 제안되었다. 그 방법은 튜브 구조물의 shear lag 현상에 중요한 영향을 끼치는 부가적인 휨 응력을 고려하고 있으며, 부가적인 휨 응력을 양적으로 표현함으로써 tube(s)-in-tube 구조물의 shear lag 현상을 설명하고 있다.

또한, tube(s)-in-tube 구조물의 shear lag 거동을 지배하는 구조적인 요소가 4개의 무차원 구조변수에 의하여 연구되었으며, 튜브 구조물의 구조적인 효율성을 최적화하기 위하여 net shear lag에 대한 중요한 정보가 제공되었다. 이 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) S_f , S_r , g 그리고 I_f 의 증가는 shear lag 현상을 감소시키지만, 작은 값의 S_f , S_r , g 그리고 I_f 를 가진 구조물은 shear lag 현상을 증가시킨다.
- 2) Positive shear lag가 클수록 negative shear lag 또한 크며, 튜브의 shear lag reversal 위치는 shear lag 영향이 증가함에 따라서 상부층으로 움직인다.
- 3) 내부 튜브의 플랜지 패널에 있는 shear lag reversal 위치는 외부 튜브의 플랜지 패널에 있는 shear lag reversal보다 낮은 층에서 발생한다.

감사의 글

본 논문은 건교부 및 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터의 지원에 의한 것으로서 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Chang, S. T., and Zheng, F. Z., "Negative shear lag in cantilever box girder with constant depth", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 113, No. 1, 1987, pp.20~33
2. Coull, A., and Bose, B., "Simplified analysis of framed-tube structures", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 101, No. 11, 1975, pp.2223~2240
3. ETABS, *Three Dimensional Analysis of Building System*, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, U.S.A., 1989, p.250
4. Foutch, D. A., and Chang, P. C., "A shear lag anomaly", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 108(ST7), 1982, pp.1653~1657
5. Ketter, R.L., Lee, G.C., and Prawel, S.P., *Structural Analysis and Design*, McGraw-Hill, New York, 1979, p.340
6. Kristek, V., and Bauer, K., "Stress distribution in front columns of high rise buildings", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 119, No. 5, 1993, pp.1464~1483
7. Kwan, A. K. H., "Simple method for approximate analysis of framed tube structures", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 4, 1994, pp.1221~1239
8. Lee, K. K., and Loo, Y. C., "Simplified analysis of shear lag in tube-in-tube structures", *Proceedings of Second China-Australia Symposium on Computation and Mechanics (CASCM' 97)*, IEAust., 1997, pp.113~122
9. Singh, Y., and Nagpal, A. K., "Negative shear lag in framed-tube buildings", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 11, 1995, pp.3105~3121

(접수일자 : 2000. 4. 24)