

# X-브레이싱의 면외 유효 좌굴길이 계수

## Out-of-Plane Effective Length Factor of X-Bracing System

문 지 호<sup>1)</sup> · 윤 기 용<sup>2),†</sup> · 이 학 은<sup>3)</sup>  
Moon, Ji Ho      Yoon, Ki Yong      Lee, Hak Eun

요 약 : 본 연구에서는 X-브레이싱 접합부의 경계조건에 따른 탄성 면외 좌굴하중 및 유효 좌굴길이 계수에 관한 연구를 수행하였다. X-브레이싱의 접합부는 연결방법에 따라 강접합 혹은 단순 연결로 가정할 수 있으며, 이러한 접합부의 경계 조건은 X-브레이싱의 좌굴하중에 영향을 미친다. 본 연구에서는 접합부의 경계 조건에 따른 X-브레이싱의 면외 유효 좌굴길이 계수들을 유도 하였으며, 면외 유효 좌굴계수들은 압축부재와 인장부재의 길이비  $L_P/L_T$ , 인장력과 압축력의 비  $T/P$ , 및 인장부재와 압축부재의 Euler 좌굴하중의 비  $P_{ET}/P_{EP}$ 의 함수로 나타났다. 이러한 연구결과는 기존 연구자들 및 유한요소해석결과와 비교 분석하여 그 타당성과 적용성을 검증하였다. 마지막으로 유도된 면외 유효 좌굴길이 계수들을 비교하여 접합부의 경계 조건이 X-브레이싱의 면외 좌굴하중에 미치는 영향을 분석하였다.

ABSTRACT : In this study, the elastic out-of-plane buckling load and the effective length factor of X-bracing systems were studied. Points of the intersection of diagonals were modeled as a rigid connection or a pinned connection depending on the connection method of diagonals. The boundary condition of the intersection influences the buckling load of X-bracing systems. For each boundary condition of the intersection, effective out-of-plane length factors of X-bracing systems were derived as a function of the length ratio of tension and compression diagonals  $L_P/L_T$ , the applied force ratio of tension and compression diagonals  $T/P$ , and the Euler buckling load ratio of tension and compression diagonals  $P_{ET}/P_{EP}$ . The proposed effective out-of-plane length factors of X-bracing systems were compared with the results of previous researchers and those of the finite element analysis and their properties were verified. Finally, the effects of the boundary condition of the intersection on the out-of-plane buckling load of X-bracing systems were investigated.

핵심용어 : X-브레이싱, 브레이싱, 좌굴, 유효 좌굴길이 계수  
KEYWORDS : X-Bracing, Bracing, Buckling, Effective Length Factor

### 1. 서론

X-브레이싱은 바람 혹은 지진하중과 같은 횡하중 (Lateral force)에 저항하기 위하여 건축물의 전단벽으로 사용되며, 트러스교량, 강박스거더 및 플레이트거더교에도 널리 사용된다. 횡하중을 지지하는 그림 1과 같은 트러스 구조물에서 X-브레이싱은 압축 혹은 인장력에 저항한다. 이러한 경우 압축부재는 면내 좌굴이 발생하지 않는 조건에서 그림 2와 같이 인장부재의 횡강성 (Lateral stiffness)  $S$ 에 따라 각각 다른 면외 좌굴이 발생한다. 인장부재의 횡강성  $S$ 가 0인 경우 압축부재는 그림 2(a)와 같이 사인곡선의 반주기에 해당하는 좌굴형상을 보이게 되는 반면에 인장부재의 횡강성  $S$ 가 무한한 경우는 그

림 2(b)와 같이 압축부재는 사인곡선의 한주기에 해당하는 비대칭 좌굴형상 (Anti-symmetric buckling)이 발생한다.

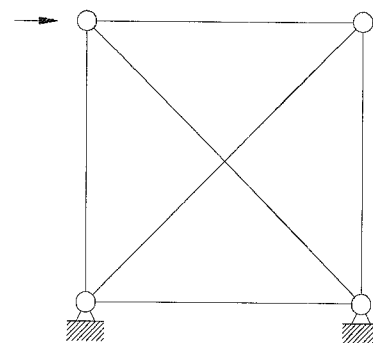


그림 1. 횡하중에 저항하는 X-브레이싱을 갖는 트러스 구조물.

1) 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사 과정(deadalive@korea.ac.kr)  
2) 교신저자, 정회원, 선문대학교 토목공학과 교수 공학박사  
(Tel. 041-530-2326, Fax. 041-530-2926, E-mail: kyoony@sunmoon.ac.kr)  
3) 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수 공학박사(helee@korea.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

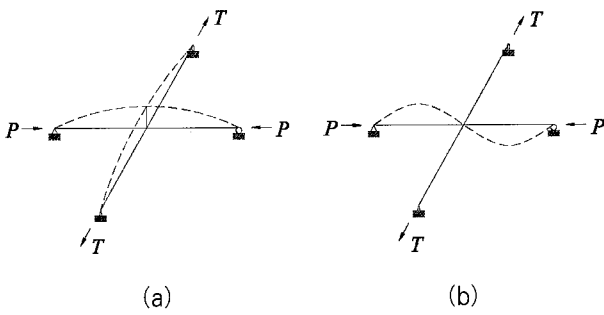


그림 2. 인장부재의 휨강성에 따른 X-브레이싱의 면외 좌굴형상:  
(a)  $S = 0$ , (b)  $S = \infty$ .

X-브레이싱은 두 직선부재가 X 형태로 결합되어 형성된다. 각각의 직선부재는 단순지지 혹은 양단 고정지점을 갖게 되며, 직선부재의 교차점 또한 단순 혹은 강접합으로 연결된다. X-브레이싱의 부재의 크기가 커지는 경우는 그림 3과 같이 거셋 플레이트를 이용하여 두 부재를 연결한다. 이러한 경우 거셋 플레이트의 면외 휨강성이 무시할 정도로 작기 때문에 X-브레이싱의 교차점은 단순지지로 가정할 수 있다.

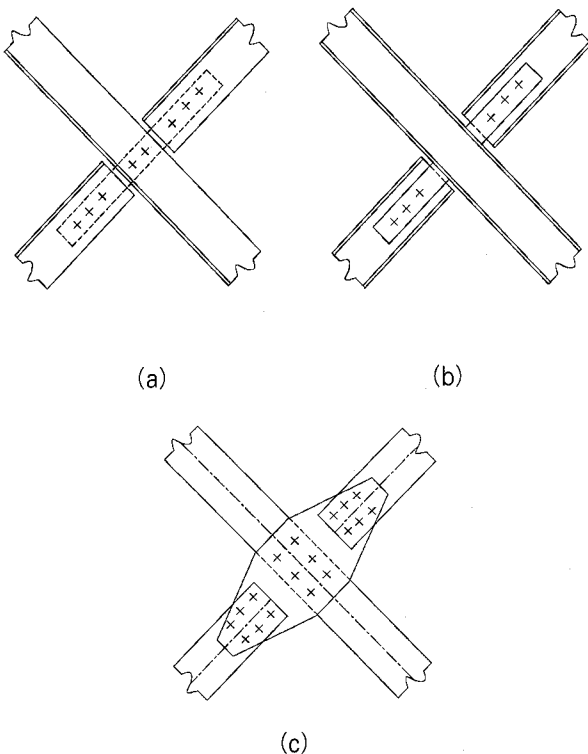


그림 3. 거셋플레이트로 연결된 X-브레이싱.

X-브레이싱의 탄성 면외 좌굴하중 및 유효 좌굴길이 계수에 관한 연구는 여러 연구자들에 의하여 수행되었으며, 대부분의 기존 연구는 교차점이 강접합으로 연결된 X-브레이싱을 대상으로 하였다. DeWolf et al. (1979)과 Kitipornchai & Finch (1986)는 단순 지지된 X-브레이싱의 탄성 면외 좌굴

하중에 관한 연구를 수행하였다. X-브레이싱의 교차점은 강접합이며, 제안된 면외 유효 좌굴길이 계수는 인장부재와 압축부재의 휨강성비와 작용하고 있는 인장력의 함수로 나타났다. Stoman (1989a, 1989b)과 Wang & Boreisi (1992)는 여러 가지 경계 조건을 갖는 X-브레이싱의 탄성 면외 좌굴하중 및 유효 좌굴길이 계수에 대해 연구하였으며, 이들은 인장부재와 압축부재의 휨강성비 (Flexural rigidity)와 인장력과 압축력의 비의 함수로 정의된 면외 유효 좌굴길이 계수를 제안하였다. 이 밖에 Segal et al. (1994)은 편심하중 및 지지점의 회전 강성이 X-브레이싱의 면외 유효 좌굴길이 계수에 미치는 영향에 대하여 연구 하였다. 위에서 언급된 연구자들은 모두 인장 부재와 압축 부재의 교차점이 강접합으로 연결된 경우를 연구 대상으로 하였다. 단순 연결된 X-브레이싱에 대한 연구는 최근에 Davaran (2001)에 의하여 수행되었지만 Davaran이 제안한 탄성 면외 좌굴강도 및 유효 좌굴길이는 삼각 함수 혹은 하이퍼볼릭 함수가 포함된 음함수의 꼴로 주어져 계산이 복잡하며, 인장부재와 압축 부재의 길이가 동일한 상태에서 유도 되었다. 또한 압축부재가 단순 연결된 경우 유효 좌굴길이 계수는 동일한 단면2차 모멘트를 가지는 경우에만 탄성 면외 좌굴 강도를 결정 할 수 있어 그 적용이 제한적이다.

국내에서는 이성철 외 (2001) 및 심낙훈, 박영석 (2006)에 의하여 개구제 강박스 거더의 수평 브레이싱에 관한 연구가 수행되었다. 하지만 이 연구들은 브레이싱 자체의 좌굴 문제이기 보다는 수평 브레이싱에의 작용력을 구하는 문제와 비틀강성을 확보하기 위한 효과적인 브레이싱 선택에 관한 연구이다.

본 연구에서는 X-브레이싱 접합부의 경계조건에 따른 탄성 면외 좌굴하중 및 유효 좌굴길이 계수에 관한 연구를 수행하였다. 본 연구에서 제안된 접합부의 경계 조건에 따른 X-브레이싱의 면외 유효 좌굴길이 계수들은 압축부재와 인장부재의 길이비  $L_P/L_T$ , 인장력과 압축력의 비  $T/P$ , 및 인장부재와 압축부재의 Euler 좌굴하중의 비  $P_{ET}/P_{EP}$ 의 변수들의 대수식으로 나타난다. 제안된 면외 유효 좌굴길이 계수들은 기존 연구자들 및 유한요소해석결과와 비교 분석하여 그 타당성과 적용성을 검증하였으며, 각각의 면외 유효 좌굴길이 계수를 비교하여 접합부의 경계 조건이 X-브레이싱의 면외 좌굴하중에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. X-브레이싱의 면외 유효 좌굴길이 계수

### 2.1. 강접합으로 연결된 X-브레이싱의 면외 유효 좌굴길이 계수

그림 4는 강접합으로 연결된 X-브레이싱을 나타낸다. 여기

서  $P$ 는 압축력,  $T$ 는 인장력,  $L_p$ 는 압축부재의 길이, 그리고  $L_T$ 는 인장부재의 길이를 나타낸다. 그림 4와 같은 X-브레이싱은 인장부재를 인장력에 따라 강성이 변하는 탄성 스프링으로 치환하여 압축부재의 좌굴하중 및 유효 좌굴길이 계수를 계산할 수 있다.

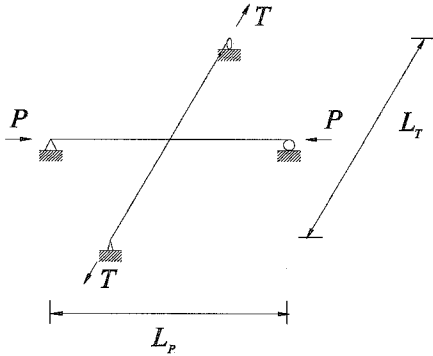


그림 4. 강접합으로 연결된 X-브레이싱.

중앙에 집중하중을 받는 인장부재는 그림 5와 같이 나타난다. 중앙에 집중하중  $Q$ 가 작용하는 경우 수직변위  $\delta$ 가 발생하게 되며,  $Q$ 와  $\delta$ 의 관계에서 인장부재의 횡강성  $S$ 를 계산할 수 있다.

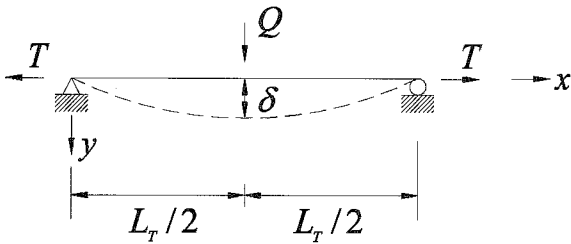


그림 5. 중앙 집중하중이 작용하는 인장부재.

그림 5에서 인장부재의 지배미분방정식은

$$y'' - \beta^2 y = -\frac{Qx}{2E_T I_T}, \quad 0 \leq x \leq L_T/2 \quad (1)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{T}{E_T I_T}}$$

과 같다. 식 (5)에서  $E_T$ 는 인장부재의 탄성계수, 그리고  $I_T$ 는 인장부재의 단면2차 모멘트를 나타낸다. 식 (1)을 Galerkin 방법을 이용하여 단순화할 수 있으며, Galerkin 방법을 적용하기 위하여 변위 함수를 식 (2)와 같이 가정하였다.

$$y = a \sin \frac{\pi x}{L_T} \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하고 Galerkin 방법을 이용하면, 식

(1)은

$$a \frac{\pi^2}{L_T^2} \frac{L_T}{4} + a \frac{T}{E_T I_T} \frac{L_T}{4} = \frac{Q}{2E_T I_T} \frac{L_T^2}{\pi^2} \quad (3)$$

과 같이 변형된다. 식 (3)을 인장부재의 Euler 좌굴 하중  $P_{ET} = \pi^2 E_T I_T / (L_T^2)$ 을 이용하고  $a$ 에 관하여 간단하게 나타낸 후 이를 식 (2)에 대입하여 중앙 집중하중  $Q$ 와 이와 대응되는 수직변위  $\delta$ 와의 관계를 나타내면

$$Q = \frac{\pi^2 (P_{ET} + T)}{2L_T} \delta \quad (4)$$

와 같이 된다. 따라서 그림 5와 같은 인장 부재의 횡강성  $S$ 는

$$S = \frac{\pi^2 (P_{ET} + T)}{2L_T} \quad (5)$$

와 같다. 그림 6은 부재 중앙이 탄성 스프링으로 지지된 압축 부재를 나타낸다.

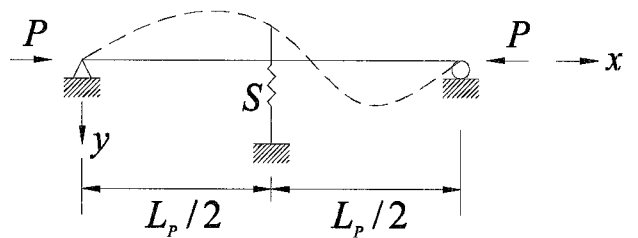


그림 6. 부재 중앙이 탄성 지지된 압축부재.

그림 6에서  $S$ 는 탄성 스프링의 횡강성, 그리고  $P$ 는 압축력을 나타낸다. 그림 6과 같이 탄성 스프링으로 지지된 압축부재의 탄성 좌굴 강도는 Timoshenko & Gere (1961)에 의하여

$$P_{cr}^E = P_{EP} + \frac{3SL_p}{16} \leq 4P_{EP}, \quad P_{EP} = \frac{\pi^2 E_P I_P}{L_p^2} \quad (6)$$

과 같이 나타난다. 식 (6)에서  $P_{cr}^E$ 는 탄성 스프링으로 지지된 압축부재의 좌굴하중,  $P_{EP}$ 는 압축부재의 Euler 좌굴하중,  $E_P$ 는 압축부재의 탄성계수, 그리고  $I_P$ 는 압축부재의 단면2차 모멘트를 나타낸다. 압축부재의 면외 유효 좌굴길이 계수  $k$ 는 현재 작용하고 있는 압축력이 임계 좌굴하중이라고 가정하는 경우

$$k = \sqrt{\frac{P_{EP}}{P_{cr}^E}} = \sqrt{\frac{P_{EP}}{P}} \quad (7)$$

과 같이 나타나므로 식 (5)에서 계산된 인장부재의 횡강성  $S$ 를 식 (6)에 대입하고 식 (7)을 이용하여 유효 좌굴길이 계수를 계산하면

$$k = \sqrt{\frac{1 - 0.93 \frac{L_P}{L_T} \frac{T}{P}}{1 + 0.93 \frac{L_P}{L_T} \frac{P_{ET}}{P_{EP}}}} > 0.5 \quad (8)$$

과 같이 나타난다. 식 (8)은 강접합으로 연결된 X-브레이싱의 면외 변위 유효 좌굴길이 계수를 나타낸다. 식 (8)에서  $P_{EP}$ 는 압축부재의 Euler 좌굴 하중을 나타내며,  $P_{ET}$ 는 인장부재의 Euler 좌굴 하중을 나타낸다. 면외 유효 좌굴길이 계수는 0.5보다 작아질 수 없음을 식 (8)에서 알 수 있으며,  $k=0.5$ 인 경우 좌굴 형상은 비대칭 좌굴 형상이 나타나는 것을 의미한다.

### 2.2. 인장부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 면외 유효 좌굴길이 계수

X-브레이싱의 부재 크기가 커지는 경우 일반적으로 두 부재는 거셋플레이트를 이용하여 연결하게 된다. 이러한 경우 거셋플레이트의 면외 휨강성은 무시할 정도로 작은 경우가 대부분이므로 거셋플레이트와 연결된 교차점을 단순 연결되었다고 가정하여도 무방하다. 이러한 거셋플레이트를 이용한 단순 연결은 인장부재와 압축부재 어떠한 부재에도 가능하다. 그림 7은 인장부재가 단순 연결된 경우 X-브레이싱을 나타낸다.

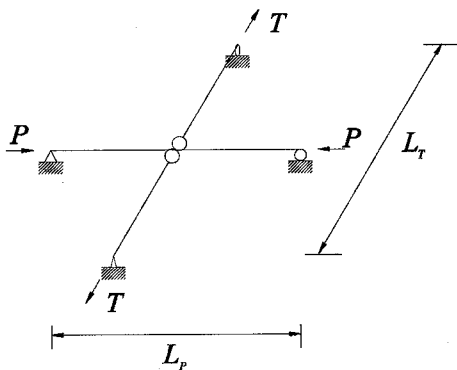


그림 7. 인장부재가 단순 연결된 X-브레이싱.

그림 8은 중앙 힌지를 갖는 인장부재와 탄성 스프링으로 지

지된 압축부재의 해석 모델을 나타낸다.

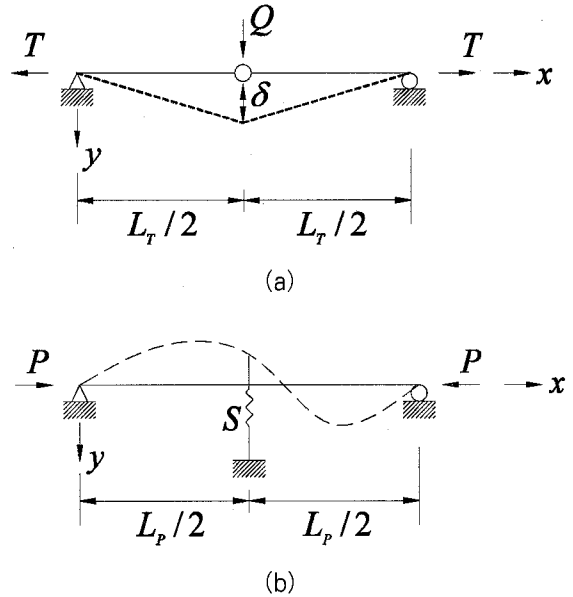


그림 8. 해석모델: (a) 중앙 힌지를 갖는 인장부재, (b) 탄성 스프링으로 지지된 압축부재.

그림 8(a)에서  $Q$ 는 중앙에 작용하는 집중하중, 그리고  $\delta$ 는 부재 중앙의 수직처짐을 나타내며, 그림 8(b)에서  $S$ 는 탄성 스프링의 강성을 나타낸다. 그림 8(a)의 지배미분방정식은  $0 \leq x \leq L_T/2$ 에서 식 (1)과 동일하다. 다만 중앙 지점의 힌지로 인하여 변형 형상은  $y = ax$ 와 같은 1차식으로 나타낼 수 있다.  $y = ax$ 를 식 (1)에 대입하고 중앙 집중하중  $Q$ 와 이에 대응되는 수직변위  $\delta$ 와의 관계를 나타내면

$$Q = \frac{4T}{L_T} \delta \quad (9)$$

와 같이 변형된다. 따라서 중앙 힌지를 갖는 인장부재의 중앙에서 횡강성  $S$ 는

$$S = \frac{4T}{L_T} \quad (10)$$

과 같다. 그림 8(b)와 같이 탄성 스프링으로 지지된 압축부재의 좌굴하중은 Timoshenko & Gere에 의하여 제안된 식 (6)과 같으므로 식 (10)을 식 (6)에 대입하고 유효 좌굴길이 계수  $k = \sqrt{P_{EP}/P_{cr}^E}$ 인 관계를 이용하여 면외 유효 좌굴길이 계수  $k$ 를 계산하면

$$k = \sqrt{1 - 0.75 \frac{L_P}{L_T} \frac{T}{P}} > 0.5 \quad (11)$$

과 같이 나타난다. 인장부재가 단순 연결된 경우 면외 유효 좌굴길이 계수  $k$ 는 인장부재와 압축부재의 길이비와 인장력과 압축력의 비로 나타남을 알 수 있으며, 인장부재와 압축부재의 휨강성과는 무관한 것으로 나타났다. 즉, 인장부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 면외 유효 좌굴길이 계수는 단면의 재료 성질과 기하학적 형상과는 무관하다.

### 2.3. 압축부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 면외 유효 좌굴길이 계수

압축부재가 단순 연결된 경우 X-브레이싱은 그림 9와 같이 나타난다.

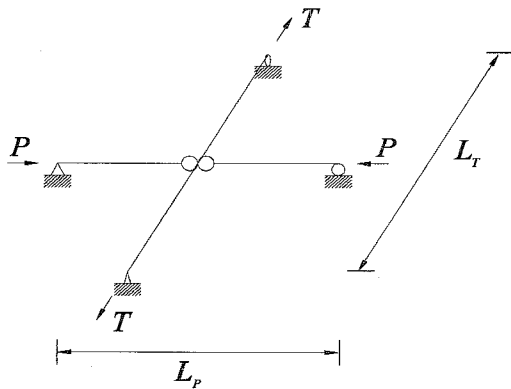


그림 9. 압축부재가 단순 연결된 X-브레이싱.

그림 9의 경우 인장부재와 압축부재의 해석 모델은 그림 10과 같이 나타난다.

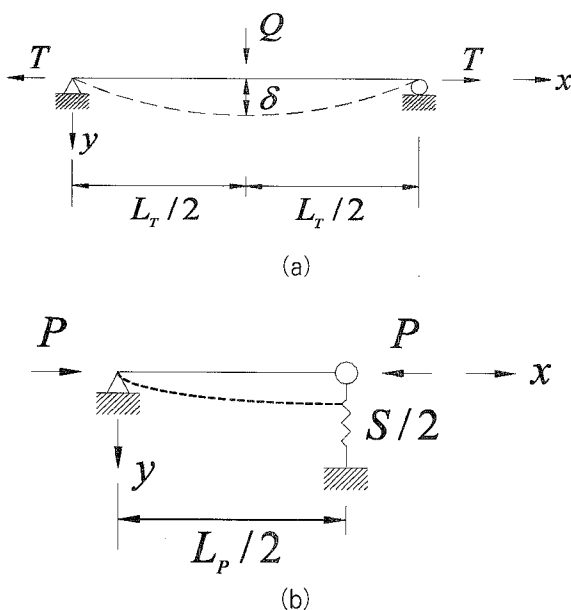


그림 10. 해석모델: (a) 중앙 집중하중을 받는 인장부재, (b) 중앙 힌지가 탄성 스프링으로 지지된 압축부재.

그림 10(a)와 같은 인장부재의 중앙 지점에서의 휨강성은 식 (5)와 같음을 알 수 있으며, 그림 10(b)의 해석 모델의 지배미분방정식은

$$y''' + \beta^2 y' = -\beta^2 \frac{S\delta}{2P}, \quad 0 < x < L_P/2 \quad (12)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{P}{E_P I_P}}$$

와 같이 나타난다. 여기서 탄성 스프링의 강성이  $S/2$ 인 이유는 압축부재의 절반만 나타내었기 때문이다. 경계 조건  $y''(0) = y''(L_P/2) = 0$ ,  $y(0) = 0$ 과 식 (12)를 이용하여 탄성 좌굴하중을 결정하면, 탄성 좌굴하중  $P_{cr}^E$ 는

$$P_{cr}^E = \frac{S L_P}{4} \quad (13)$$

과 같이 나타난다. 식 (5)와 (13)을  $k = \sqrt{P_{EP}/P_{cr}^E}$  인 관계에 대입하여 정리하면 압축부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 면외 유효 좌굴길이 계수  $k$ 는

$$k = \sqrt{\frac{1 - 1.23 \frac{L_P}{L_T} \frac{T}{P}}{1.23 \frac{L_P}{L_T} \frac{P_{ET}}{P_{EP}}}} > 0.5 \quad (14)$$

와 같다.

## 3. 제안된 면외 유효 좌굴길이 계수의 검증 및 분석

### 3.1. 강접합으로 연결된 X-브레이싱

본 연구에서는 강접합으로 연결된 X-브레이싱의 경우 면외 유효 좌굴길이 계수를 식 (8)과 같이 나타내었다. Stoman (1989)은 강접합으로 연결된 X-브레이싱의 유효 좌굴길이에 관한 연구를 수행하였으며,

$$k = \sqrt{\frac{1 - \frac{L_P}{L_T} \frac{T}{P}}{1 + \frac{L_P^3}{L_T^3} \frac{E_T I_T}{E_P I_P}}} > 0.5 \quad (15)$$

와 같이 나타났다. 본 연구에서 제안된 식 (8)과 Stoman이 제안한 식 (15)를 비교 하였을 때 일부 계수만 다를 뿐 거의

유사한 것을 알 수 있다. 식 (8)과 (15)를 유한요소해석을 통하여 검증하였다. 검증에 사용된 해석 프로그램은 ABAQUS (2001)이며, 해석 방법은 고유치 해석을 사용하였다. 인장부재와 압축부재 모두 50개의 3절점을 갖는 3차원 보 요소를 사용하였으며, 지점 조건은 단순 지지이다. 인장부재와 압축부재의 길이  $L_T$ 와  $L_P$ 는 5m로 동일하며, 탄성 계수  $E_T$ 와  $E_P$ 는 210000MPa, 인장부재와 압축부재의 단면2차 모멘트  $I_T$ 와  $I_P$ 는  $5.124 \times 10^6 \text{mm}^4$ 로 동일하다.

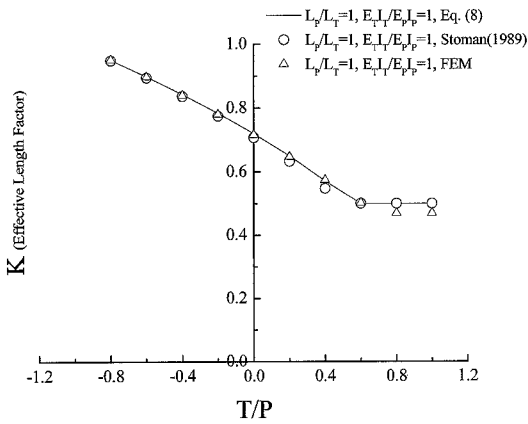


그림 11. 강접합으로 연결된 X-브레이싱의 면의 유효 좌굴길이 계수의 비교.

그림 11은 유한요소해석을 이용하여 계산된 면의 유효 좌굴 길이 계수와 본 연구에서 제안된 식 (8) 및 Stoman의 제안한 면의 유효 좌굴길이 계수를 비교한 그림이다.  $x$ 축은  $T/P$ 로 인장력과 압축력의 비를 나타내며,  $y$ 축은 면의 유효 좌굴길이 계수를 나타낸다. 그림 11에서 식 (8)과 유한요소해석, Stoman의 결과가 서로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.  $T/P$ 가 -1인 경우 즉 인장부재와 압축부재 모두에 압축력이 작용하는 경우 면의 유효 좌굴길이 계수는 약 0.95로 1에 가까운 것을 볼 수 있으며,  $T/P$ 가 0.6보다 큰 경우 즉, 인장력이 압축력의 60%이상인 경우 인장부재의 길이와 휨강성의 비가 같으면, 압축부재는 비대칭 좌굴(Anti-symmetric buckling)이 발생하며, 면의 유효 좌굴길이 계수는 0.5이다.

그림 12는 인장부재와 압축부재가 동일한 길이를 가지는 경우 부재의 휨강성 비에 따른 면의 유효 좌굴길이 계수의 변화를 나타낸다. 인장부재의 휨강성 ( $E_T I_T$ )이 압축부재의 휨강성 ( $E_P I_P$ )보다 큰 경우 면의 유효 좌굴길이 계수는 작아지는 경향을 나타내었으며, 면의 유효 좌굴길이 계수  $k$ 가 0.5인 경우 즉 압축부재에 비대칭 좌굴이 발생하는 경우  $E_T I_T / E_P I_P$ 의 비가 0.5, 1, 2로 증가 할수록 이 때 필요한 인장력과 압축력의 비  $T/P$ 는 0.8, 0.6, 0.4로 감소하였다.

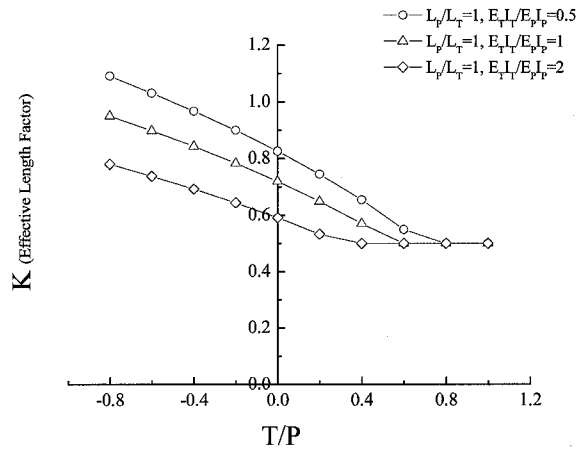


그림 12. 강접합으로 연결된 X-브레이싱의 휨강성비에 따른 면의 유효 좌굴길이 계수의 변화.

### 3.2. 인장부재가 단순 연결된 X-브레이싱

인장부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 탄성 면의 좌굴하중은 Davaran (2001)에 의하여

$$\frac{T}{P} = \frac{1}{1 - \frac{\tan \nu L}{\nu L}}, \quad \nu = \sqrt{\frac{P_{cr}^E L^2}{E_P I_P}} \quad (16)$$

과 같이 제안되었다. Davaran은 식 (16)에 의하여 탄성 면의 좌굴하중을 결정하고  $k = \sqrt{P_{EF}^E / P_{cr}^E}$ 인 관계를 이용하여 면의 유효 좌굴길이 계수를 산출 하였다. 면의 유효 좌굴길이 계수를 산출 방법은 본 연구에서 제안된 인장부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 면의 유효 좌굴길이 계수 식 (11)에 비하여 매우 복잡한 것을 알 수 있다. 유한요소해석을 이용하여 본 연구에서 제안된 면의 유효 좌굴길이 계수 식 (11)과 Davaran의 제안한 식(16) 그리고 유한요소해석 결과를 비교하였다. 해석에 사용된 해석 모델의 제원은 앞의 강접합으로 연결된 X-브레이싱의 검증 모델과 같으며, 비교 결과는 그림 13과 같다. 본 연구에서 제안된 식 (11)은 Davaran의 식 (16)에 비하여 단순함에도 불구하고 두 계산결과가 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한 유한요소해석 결과와도 잘 일치하고 있다.

식 (11)을 변형하여  $k$ 가 0.5일 조건 즉, 비대칭 좌굴이 발생할 수 있는 조건을 계산할 수 있으며, 그 결과는

$$\frac{T}{P} \geq \frac{L_T}{L_P} \quad (17)$$

과 같이 나타난다. 식 (17)에서 비대칭 좌굴이 발생하는 경우 인장력과 압축력의 비는 인장부재와 압축부재의 길이의 비로

다 커야 한다. 예를 들어 인장부재와 압축부재의 길이가 동일한 경우 면외 유효 좌굴길이 계수  $k$ 가 0.5가 되기 위해 인장력은 작용하고 있는 압축력보다 같거나 커야 한다.

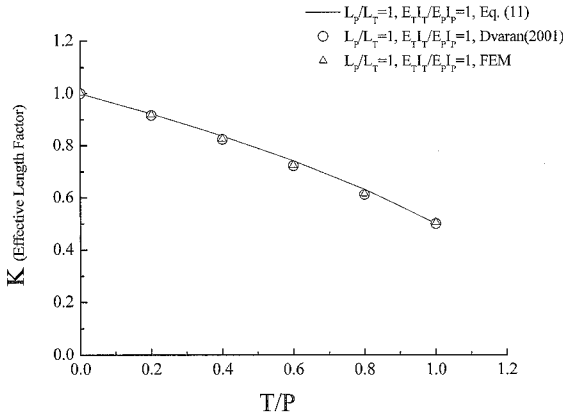


그림 13. 인장부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 면외 유효 좌굴길이 계수의 비교.

### 3.3. 압축부재가 단순 연결된 X-브레이싱

압축부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 면외 유효 좌굴길이 계수는 본 연구에서 식 (14)와 같다. Davaran (2001)은 압축부재가 단순 연결된 X-브레이싱에 관한 연구를 수행 하였으며, 탄성 면외 좌굴하중을

$$\tanh \sqrt{\frac{T}{P}} (\nu L) + \sqrt{\frac{T}{P}} (\nu L) \left( \frac{T}{P} - 1 \right) = 0$$

$$\nu = \sqrt{\frac{P_{cr}^E L^2}{E_P I_P}} \quad (18)$$

과 같이 제안하였다. Davaran은 식 (18)을 이용하여 면외 좌굴하중  $P_{cr}^E$ 을 결정하고  $k = \sqrt{P_{EP}^E / P_{cr}^E}$ 인 관계를 이용하여 유효 좌굴길이 계수를 계산하였다. Davaran이 제안한 식 (18)의 경우 수계산을 이용하여 면외 유효 좌굴길이 계수를 계산하는 것이 어려운 반면에 본 연구에서 제안한 압축부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 유효 좌굴길이 계수  $k$  식 (14)는 간단한 대수식으로 나타났으며, 사용이 용이하다. 유한요소해석을 이용하여 본 연구에서 제안된 식 (14) 및 Davaran이 제안한 식 (18)을 비교 하였다. 사용된 해석 모델의 제원은 앞의 강접합으로 연결된 X-브레이싱 및 인장부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 해석 모델과 동일하며, 해석 결과는 그림 14와 같다.

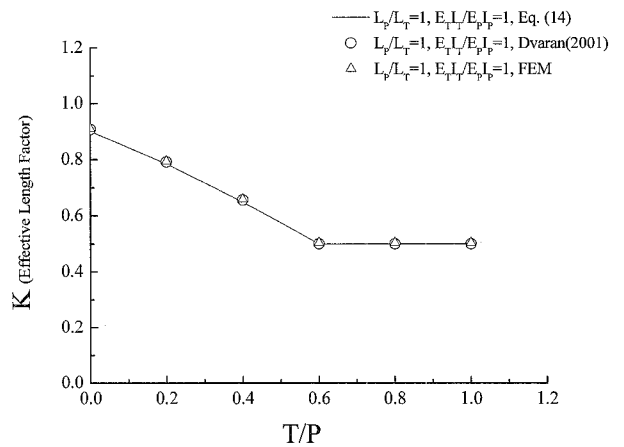


그림 14. 압축부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 면외 유효 좌굴길이 계수의 비교.

그림 14에서 유한요소해석 결과와 Davaran의 결과 및 본 연구에서 제안한 면외 유효 좌굴길이 계수가 동일하게 나타남을 알 수 있다. 식 (14)를 변형 하여 압축부재가 비대칭 좌굴이 발생할 조건 즉,  $k$ 가 0.5일 조건을 계산하면

$$\frac{T}{P} \geq 0.82 \frac{L_T}{L_P} - 0.25 \frac{P_{ET}}{P_{EP}} \quad (19)$$

와 같이 나타난다. 인장력과 압축력의 비가 식 (19)에서 제안하고 있는 조건을 만족시키는 경우 압축부재의 유효 좌굴길이 계수는 0.5이며, 비대칭 좌굴을 발생한다.

### 3.4. 교차점의 경계조건에 따른 면외 좌굴하중

X-브레이싱 사재의 교차점은 앞에서 설명하였듯이 접합 방법에 따라 강접합 혹은 단순 연결로 나타낼 수 있다. X-브레이싱의 교차점은 X-브레이싱의 좌굴하중에 영향을 미치며, 본 연구에서는 강접합으로 연결된 X-브레이싱의 경우 식 (8), 인장부재 혹은 압축부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 경우 식 (11)과 (14)와 같이 면외 유효 좌굴길이 계수를 제안하였다. 인장부재와 압축부재의 길이비 및 휨강성의 비가 1인 경우에 대하여 인장력과 압축력의 비에 따라 면외 유효 좌굴길이 계수를 그림 15와 같이 교차점의 경계 조건에 따라 나타내었다.

그림 15에서  $T/P$ 의 비가 커질수록 면외 유효 좌굴길이 계수는 0.5에 접근하는 것을 알 수 있다.  $T/P$ 가 약 0.6이하인 곳에서는 강접합으로 연결된 X-브레이싱의 면외 좌굴하중이 가장 크게 나타났으며, 그 다음으로 압축부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 면외 좌굴하중이 크게 나타났다.  $T/P$ 가 0에서

1사이의 전 구간에서 인장부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 면의 좌굴하중이 가장 작게 나타났다.  $T/P$ 가 약 0.6이상인 구간에서는 강접합으로 연결된 X-브레이싱과 압축부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 면의 유효 좌굴길이 계수가 모두 0.5로 비대칭 좌굴이 발생하는 것을 알 수 있으며, 면의 좌굴하중 또한 같은 것을 알 수 있다.

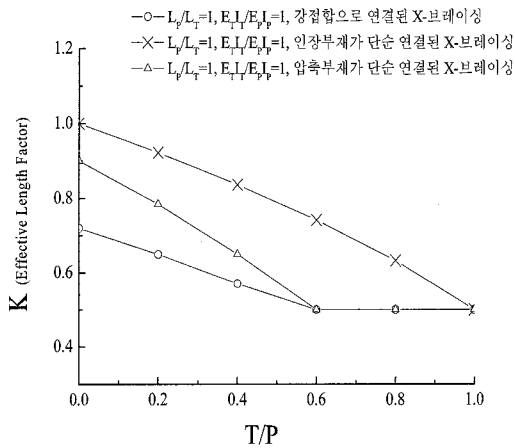


그림 15. 교차점의 경계 조건에 따른 면의 유효 좌굴길이 계수의 비교.

#### 4. 결론

본 연구에서는 X-브레이싱의 면의 유효 좌굴길이 계수에 관한 연구를 수행 하였다. X-브레이싱의 인장부재와 압축부재의 교차점을 강접합으로 연결된 경우 및 단순 연결된 경우로 구분 하였으며 각각의 경우에 관하여 면의 유효 좌굴길이 계수를 압축부재와 인장부재의 길이비  $L_P/L_T$ , 인장력과 압축력의 비  $T/P$ , 및 인장부재와 압축부재의 Euler 좌굴하중의 비  $P_{ET}/P_{EP}$ 로 이루어진 간단한 대수식으로 나타내었다. 강접합으로 연결된 X-브레이싱의 면의 유효 좌굴길이 계수는 식 (8)과 같이 나타났으며, 인장 부재 및 압축 부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 면의 유효 좌굴길이 계수는 식 (11) 및 식 (14)와 같이 나타났다. 본 연구에서 제안된 면의 유효 좌굴길이 계수 식 (8), (11), 그리고 (14)는 유한요소해석 및 기존 연구자들의 결과와 비교 하였으며, 비교 결과 서로 잘 일치 하였다. 강접합으로 연결된 X-브레이싱의 경우 기존 연구자들과 유사한 형태의 면의 유효 좌굴길이 계수가 얻어진 반면 인장 부재 및 압축 부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 면의 유효 좌굴길이 계수는 기존 연구자가 제안한 유효 좌굴길이 계수에 비하여 계산이 편하고 사용이 용이한 것으로 나타났다. 인장부재와 압축부재의 길이비 및 휨강성의 비가 1인 경우 즉, 인장부재와 압축부재가 동일한 경우 강접합으로 연결된 X-브레이싱의 면의 좌굴하중이 가장 큰 것으로 나타났다. 하지만  $T/P$ 가

0.6이상인 경우 강접합으로 연결된 X-브레이싱과 압축부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 면의 유효 좌굴길이 계수가 모두 0.5로 비대칭 좌굴이 발생하며, 면의 좌굴하중이 같다. 인장부재가 단순 연결된 X-브레이싱의 경우  $0 < T/P < 1$ 인 구간에서 면의 좌굴하중이 가장 작은 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업 에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

심낙훈, 박영석 (2006) "실물모형 시험체를 이용한 U형 강박스 거더의 상부 수평 브레이싱에 관한 실험적 연구: 비틀 강성" 한국 강구조학회 논문집, 제18권 4호 pp. 447-455.

이성철, 정운용, 최우석, 박유신 (2001) "개구재 강주형의 상부 플랜지 수평브레이싱에 관한 실험연구" 대한토목학회 학술 발표대회 논문집, pp. 1033-1036.

ABAQUS Standard user's manual version 6.2 (2001), Hibbit, Karsson and Sorensen Inc.

Davaran, A. (2001) Effective Length Factor for Discontinuous X-Bracing Systems, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 127, No. 2, pp. 106-112.

DeWolf, J. T., and Pelliccione, J. F. (1979) Cross-Bracing Design, *ASCE Journal of the Structural Division*, Vol. 105, No. ST7, pp. 1379-1391.

Kitipornchai, S., and Finch, D. L. (1987) Stiffness Requirements for Cross Bracing, *ASCE Journal of the structural Engineering*, Vol.112, No. 12, pp. 2702-2707.

Segal, F., Levy, R., and Rutenberg, A. (1994) Design of Imperfect Cross-Bracing, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 120, No. 6, pp. 1057- 1075.

Stoman, S. H. (1989<sup>a</sup>) Effective Length Spectra for Cross Bracings, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 115, No. 12, pp. 3112-3122.

Stoman, S. H. (1989<sup>b</sup>) Stability Criteria for X-Bracing Systems, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 114, No. 8, pp. 1426-1434.

Timoshenko, S. P., and Gere, J. M. (1961) *Theory of Elastic Stability*, 2nd Ed, McGraw-Hill Book Co. Inc.

Wang, D. Q., and Boresi, A. P. (1992) *Theoretical*



Study of Stability Criteria For X-Bracing Systems, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 118, No. 7, pp. 1357-1364.

(접수일자 : 2006. 9. 15 / 심사일 2006. 10. 13 /  
심사완료일 2007. 1. 10)