

강프레임 기둥 부재의 탄성 및 비탄성 유효좌굴길이 산정을 위한 가상축력계수의 적용

Application of a Fictitious Axial Force Factor to Determine Elastic and Inelastic Effective Lengths for Column Members of Steel Frames

최동호* · 유 훈** · 이윤석***

Choi, Dong Ho · Yoo, Hoon · Lee, Yoon Seok

Abstract

In design of steel frames, it is generally believed that elastic system buckling analysis cannot predict real behaviors of structures, while inelastic system buckling analysis can give informative buckling behaviors of individual members considering inelastic material behavior. However, the use of Euler buckling equation with these system buckling analyses have the inherent problem that the methods evaluate unexpectedly large effective lengths of members having relatively small axial forces. This paper proposes a new method of obtaining elastic and inelastic effective lengths of all members in steel frames. Considering a fictitious axial force factor for each story of frames, the proposed method determines the effective lengths using the inelastic stiffness reduction factor and the iterative eigenvalue analysis. In order to verify the validity of the proposed method, the effective lengths of example frames by the proposed method were compared to those of previously established methods. As a result, the proposed method gives reasonable effective lengths of all members in steel frames. The effect of inelastic material behavior on the effective lengths of members was also discussed.

Keywords : steel frame, effective length, fictitious axial force factor, system buckling analysis, inelastic stiffness reduction factor

요 지

강프레임 부재의 설계에서 탄성 시스템좌굴해석은 프레임의 실제 거동을 예측하기 어려운 반면, 비탄성 시스템좌굴해석은 압축부재의 세장비에 따른 비탄성 거동이 고려됨으로써 보다 현실적인 부재의 좌굴거동을 예측할 수 있다. 그러나 시스템좌굴해석 수행후 오일러좌굴식을 이용한 방법은 압축력이 비교적 작게 발생하는 부재에서 과도한 유효좌굴길이를 산정한다는 문제점을 내포하고 있다. 본 연구에서는 강프레임 구조의 모든 부재의 탄성 및 비탄성 유효좌굴길이계수를 산정할 수 있는 새로운 해석방법을 제안하였다. 제안된 방법은 가상축력계수 개념을 기반으로 비탄성 강도감소계수를 도입하고 반복고유치해석을 수행하여 각 부재의 유효좌굴길이계수를 산정한다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 예제 강프레임 구조물을 제안된 방법에 의거한 유효좌굴길이와 기존 방법에 의거한 결과를 비교하였다. 검증 결과, 제안된 방법은 강프레임의 모든 부재의 탄성 및 비탄성 유효좌굴길이계수를 합리적으로 산정할 수 있었다. 부가적으로 재료의 비탄성 거동이 부재의 유효좌굴길이에 미치는 영향도 논의되었다.

핵심어 : 강프레임, 유효좌굴길이, 가상축력계수, 시스템좌굴해석, 비탄성 강도감소계수

1. 서 론

강프레임 구조의 설계에서 각 부재의 좌굴강도를 결정하기 위한 유효좌굴길이 접근법은 합리적인 이론 전개와 적용상의 유용성 때문에 현재까지 가장 광범위하게 적용되어 왔다 (Duan and Chen, 1988). 이러한 유효좌굴길이 접근법에서는 강프레임의 각 부재의 유효좌굴길이와 대상 부재의 원래 길이의 비를 의미하는 유효좌굴길이계수(K-factor)를 산정하여

부재의 좌굴강도를 결정한다.

강프레임 부재의 유효좌굴길이계수를 산정하는 방법은 적절한 가정과 수계산이 요구되는 이론적 해석방법과 컴퓨터를 적용한 수치해석방법으로 분류될 수 있다. 이론적인 해석 방법에는 인접 부재의 회전 강성을 고려하여 부재의 유효좌굴길이계수를 산정하는 전통적인 Alignment Chart 방법 이외에도 강프레임 구조의 각 층간 상관관계를 고려한 Story-based 방법(Story-buckling 방법 및 Story-stiffness 방법) 등

*정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : samga@hanyang.ac.kr)

**정회원 · 교신저자 · 현대건설 기술품질개발원 과장 · 공학박사 · 전 한양대학교 건설환경공학과 박사후과정 (E-mail : hoonyoo@hanyang.ac.kr)

***전문이엔지니어 · 기획이사 · 공학석사 · 전 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (E-mail : lysga77@hanyang.ac.kr)

이 존재한다(ASCE, 1997). 언급한 바와 같이 이론적인 해석방법들은 각 해석법에 따라 이론식의 전개를 위한 특수한 가정사항이 필요하다. 예를 들면, Alignment Chart 방법은 부재는 모두 동일한 단면을 가지며 모든 접속부는 강철이고 각 부재의 강성인자는 동일하다고 가정한다 (AISC, 2006). Story-based 방법에서도 강-프레임의 좌굴은 각 층별로 발생하며 각 층의 좌굴강도는 층 내 기둥의 좌굴강도를 합산한 것과 같다는 등의 가정 사항이 요구된다(White와 Hajjar, 1997a). 또한, 부재의 비탄성 거동을 고려하는 경우, 이론적인 해석방법들은 이런 가정 사항들과 더불어 자동화하기 어려운 수계산 과정을 필요로 하기 때문에 복잡하고 다양한 형태의 강-프레임 구조 설계시에는 그 효용성을 기대하기 어렵다. 한편, 수치해석방법은 고유치해석(Eigenvalue analysis) 으로부터 전체 강-프레임의 좌굴모드를 예측하고 전체 구조의 좌굴고유치를 이용하여 각 부재의 유효좌굴길이계수를 결정하는 방법으로 이론적인 해석법에서 요구되는 특정한 가정 사항이 요구되지 않는다는 장점이 있다.

또 다른 분류 방법으로 강프레임 부재의 유효좌굴길이계수를 결정하는 방법은 각 부재의 항복 거동을 무시한 탄성 좌굴해석과 이를 고려한 비탄성 좌굴해석으로도 분류될 수 있다. 탄성 좌굴해석의 경우, 구조물이 선형탄성 거동함을 가정하기 때문에 프레임의 실제 거동을 완전하게 예측하기 어렵다. 반면, 비탄성 좌굴해석의 경우 기둥 부재의 세장비에 따른 항복 및 비탄성 거동이 고려됨으로써 보다 현실적인 기둥 부재의 좌굴모드를 예측할 수 있다.

Yura(1971)에 의하여 최초로 제안된 비탄성 좌굴해석법의 개념은 많은 연구자에 의하여 전통적인 이론해석법에 대하여 우선적으로 적용되었다. Disque(1973)는 대표적인 이론해석법인 Alignment chart 방법에 비탄성 강도감소계수를 도입하여 비탄성 유효좌굴길이계수를 산정할 수 있는 방법을 체계화 하였다. 이 연구를 기점으로 다양한 후속 연구에서 Story-buckling 방법 및 Story-stiffness 방법에서도 비탄성 좌굴의 개념이 도입된 해석 방법이 등장하게 되었다. 다양한 해석법의 비교 연구로 White와 Hajjar(1997b)는 비탄성 강도감소계수법을 적용한 Alignment chart 방법 및 Story-based 방법의 해석 과정을 정리하고 결과를 비교하였다.

한편, 시스템좌굴해석법으로 대표되는 수치해석 방법에서도 비탄성 좌굴의 개념이 도입된 연구들이 진행되기 시작하였다. 실험을 통하여 검증된 기둥강도곡선과 비탄성 강도감소계수를 적용한 점선계수를 이용한 비탄성 좌굴해석이 수행된 바 있으며 기둥강도곡선과 반복고유치해석을 적용한 다양한 응용 연구가 진행되었다(Iwasaki *et al.*, 2001; 최동호 등, 2005; Choi and Yoo, 2009). 이러한 비탄성 강도감소계수를 적용한 해석법과 반복 고유치해석을 적용한 해석법은 적용 방법에서 약간의 차이가 있을 뿐, 적용 개념과 해석 결과는 동일하다.

그러나 고유치해석에 기반을 둔 시스템좌굴해석 수행후 오일러좌굴식을 이용한 유효좌굴길이 결정 방법은 강프레임의 고층부, 즉 비교적 작은 압축력을 받는 부재에서는 비합리적으로 과도한 유효좌굴길이를 산정한다는 문제점이 있다. 이러한 문제점 때문에 미국토목학회에서는 설계자의 적절한 판단에 따라 수치해석에 기반을 둔 시스템좌굴해석과 함께 기

존의 이론적인 Alignment chart 방법 및 Story-based 방법을 검증 목적으로 사용할 수 있음을 지적한 바 있다 (ASCE, 1997). 이와 관련한 최근의 연구로 최동호 등 (2007)이 가상축력계수를 적용한 시스템좌굴해석법을 제안한 바 있으나 이 연구는 탄성 시스템좌굴해석을 기반으로 한 연구로서 비탄성 시스템좌굴에 대한 폭넓은 연구는 현재까지 진행된 바 없다.

본 논문에서는 최동호 등(2007)에 의하여 제안된 바 있는 가상축력계수 개념을 비탄성 시스템좌굴해석에 도입하여 강 프레임 구조 부재의 비탄성 유효좌굴길이를 합리적으로 산정할 수 있는 해석법을 제안하였다. 본 논문에서 제안된 방법은 점선탄성계수이론을 바탕으로 강프레임 부재의 비탄성 강도감소계수를 산정하고 가상축력계수를 사용하여 탄성강성행렬과 기하강성행렬을 변화시키며 반복 고유치 해석을 수행한다. 본 연구에서 제안된 가상축력계수를 도입한 비탄성 시스템좌굴해석의 타당성을 검증하기 위하여 집중하중과 등분포 하중을 받는 강프레임 모델을 대상으로 제안된 방법을 이용하여 비탄성 유효좌굴길이계수를 계산하였고 기존의 Story-based 방법과 비교하였다. 부가적으로 동일한 강프레임의 부재에 대하여 탄성 및 비탄성 유효좌굴길이를 비교하여 본 논문에서 제안된 비탄성 시스템좌굴해석의 효용성에 대해서도 논의하였다.

2. 강프레임 기둥 부재의 유효좌굴길이계수 산정법

2.1 Alignment Chart 방법

Alignment Chart 방법은 강프레임 구조에서 기둥 부재를 독립적으로 고려하고 기둥 양 끝단에 연결된 보의 강성과 기둥의 상대 강성비를 도출하여 기둥 부재의 유효좌굴길이를 결정하는 방법이다. Alignment Chart 방법에서 기둥 부재의 유효좌굴길이 계산법은 강프레임 구조의 횡변위 (Sidesway) 발생 여부에 따라 두 가지 유형으로 나뉜다. 즉, 횡변위가 구속된 강프레임의 경우에는 식 (1)을 사용하고, 횡변위가 구속되지 않은 강프레임의 경우에는 식 (2)를 사용한다(Chen과 Lui, 1987).

$$\frac{G_A G_B (\pi/K)^2}{4} = \left(\frac{G_A + G_B}{2} \right) \left[1 - \frac{\pi/K}{\tan(\pi/K)} \right] + \frac{2 \tan(\pi/2K)}{\pi/K} - 1 = 0 \quad (1)$$

$$\frac{G_A G_B (\pi/K)^2 - 36}{6(G_A + G_B)} - \frac{(\pi/K)}{\tan(\pi/K)} = 0 \quad (2)$$

여기서, 계산되는 K 는 해당 기둥 부재의 유효좌굴길이계수를 의미한다. 해당 기둥 부재의 상하단에 연결된 거더의 강성과 기둥 부재의 강성의 상대적인 비를 의미하는 상대강성계수 (Relative stiffness factor) G 값은 식 (3)과 같이 정의된다.

$$G_A = \frac{\sum (\tau EI/L)_c}{\sum (EI/L)_g}, \quad G_B = \frac{\sum (\tau EI/L)_c}{\sum (EI/L)_g} \quad (3)$$

여기서, A 와 B 는 해당 기둥 부재의 아래와 위쪽의 연결부재를 의미하는 첨자이며, c 와 g 는 각각 기둥과 보를 의미하는 첨자이다. E , I 와 L 은 각 부재의 탄성계수, 단면 2차모멘트 및 부재의 길이를 나타낸다. 식 (3)에서 사용된 변수 τ 는 부재의 비탄성 거동을 고려하기 위한 비탄성 강도감소계수

(Inelastic Stiffness Reduction Factor)로서 탄성 유효좌굴길이 계산을 하는 경우에는 1.0을 적용하고, 비탄성 유효좌굴길이 계산을 하는 경우에는 2.4절에 언급된 반복 계산절차에 의거하여 적용한다.

한편, 식 (3)의 적용 시에 거더의 원래 길이 L_g 대신 거더에서 발생하는 모멘트를 고려한 수정된 거더 길이 L'_g (식 (4))을 적용하면, 식 (3)의 상대강성계수는 보다 정확하게 계산된다(AISC, 2006).

$$L'_g = L_g \left[2 - \frac{M_F}{M_N} \right] \quad (4)$$

여기서, M_F 는 거더의 원단모멘트, M_N 은 거더의 근단모멘트이다.

2.2 Story-based 방법

Story-based 방법은 강프레임 구조의 각 층에서 기둥 부재 사이에서 전달되는 전단력을 고려하여 층별로 발생하는 좌굴 현상을 반영한 유효좌굴길이 산정법이다. 현재 AISC(2006) 설계기준에서는 Story-based 방법에 속하는 두 가지의 다른 계산법을 제안하고 있다.

첫 번째 방법은 Story-Buckling 방법으로 각 층의 기둥의 좌굴응력을 Alignment Chart 방법을 적용하여 산정한 뒤, 해당 기둥 부재의 유효좌굴길이계수를 식 (5)를 이용하여 결정한다.

$$K_{K_n} = \sqrt{\frac{1}{P_u} \frac{\pi^2 \tau EI \Sigma P_u}{L^2 \Sigma P_{cr}}} \quad (5)$$

여기서, P_u 는 해당 기둥 부재에 작용하는 압축력, ΣP_u 는 해당 기둥 부재가 위치한 층 내의 모든 기둥에 작용하는 압축력의 합, ΣP_{cr} 은 그 층에 있는 모든 기둥의 좌굴강도의 합을 말한다. E , I , L 및 τ 는 해당 기둥 부재의 탄성계수, 단면 2차모멘트, 부재 길이 및 비탄성 강도감소계수를 의미한다.

두 번째 방법은 Story-Stiffness 방법으로 각 기둥 부재의 유효좌굴길이계수를 식 (6)에 의하여 결정한다.

$$K_{R_L} = \sqrt{\frac{1}{P_u} \frac{\pi^2 \tau EI \Sigma P_u}{L^2 \frac{\Sigma HL}{\Delta_{oh}} (0.85 + 1.5 R_L)}} \quad (6)$$

여기서, ΣH 는 해당 기둥 부재가 위치한 층에 작용하는 횡방향하중의 합, R_L 은 층 내 기둥들의 축력의 합에 대한 기댄 기둥(Leaning column)의 축력의 비, Δ_{oh} 는 횡방향 하중이 작용할 때의 횡방향 변위를 의미한다.

Alignment Chart 방법에서 언급한 바와 같이 식 (5)와 (6)에서 기둥의 비탄성 거동을 고려하기 위한 비탄성 강도감소계수(τ)는 탄성 유효좌굴길이를 계산하는 경우에는 1.0을 적용하고 비탄성 유효좌굴길이를 계산하는 경우에는 반복 계산법에 의거하여 적용한다.

2.3 시스템좌굴해석 방법

앞에서 언급되었던 이론적인 방법 이외에 전체 구조 시스템에 대한 고유치 해석을 적용하여 부재의 유효좌굴길이를 계산하는 시스템좌굴해석법이 있다. 이 방법은 순수한 수치해석적 접근법으로 강프레임 구조의 기둥과 보를 유한 요소

로 모델링 하고 식 (7)에 제시된 좌굴 고유치 방정식을 적용한다.

$$[K_{E_i}] + \kappa[K_G] = 0 \quad (7)$$

여기서, K_{E_i} 는 전체 구조물의 접선강성행렬, K_G 는 전체 구조물의 기하강성행렬을 의미하며 κ 는 좌굴 고유치를 의미한다. 식 (8)과 식 (9)는 일반적인 강프레임 구조의 보와 기둥을 모델링하기 위하여 주로 사용되는 2차원 보 요소의 접선강성행렬(k_{E_i})과 기하강성행렬(k_G)을 나타낸 것이다. 전체 구조의 접선강성행렬 및 기하강성행렬은 일반적인 유한요소해석의 절차에 따라 전체좌표계에서 요소의 접선강성행렬과 기하강성행렬을 자유도별로 조합하여 작성된다.

$$[k_{E_i}] = \begin{bmatrix} \frac{AE_i}{L} & 0 & 0 & -\frac{AE_i}{L} & 0 & 0 \\ & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ & & \frac{4EI}{L} & 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ & & & \frac{AE_i}{L} & 0 & 0 \\ \text{symm.} & & & & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ & & & & & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[k_G] = \frac{P_u}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ & \frac{6}{5} & \frac{L}{10} & 0 & -\frac{6}{5} & \frac{L}{10} \\ & & \frac{2L^2}{15} & 0 & \frac{L}{10} & \frac{L}{30} \\ & & & 1 & 0 & 0 \\ \text{symm.} & & & & \frac{6}{5} & \frac{L}{10} \\ & & & & & \frac{2L^2}{15} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서, A , L 과 I 는 각각 부재의 단면적, 부재 길이 및 단면 2차모멘트를 의미하며 P_u 는 부재에 발생하는 압축력을 의미한다. 식 (8)의 접선강성행렬에서 E_i 는 부재의 접선탄성계수를 나타낸다. 앞선 두 방법에서와 같이 부재의 비탄성 강성감소계수 τ 는 탄성 유효좌굴길이를 계산하는 경우에는 1.0을 적용하며 비탄성 유효좌굴길이를 계산하는 경우에는 2.4절에서 소개될 반복 해석법에 의거하여 적용한다.

식 (7)에서 좌굴고유치 κ 는 전체 구조물이 불안정 상태가 되는 하중에 대한 현재 하중의 비를 의미한다. 따라서, 전체 구조가 불안정 상태가 되는 시점에서 개별 부재도 동시에 불안정 상태에 도달한다는 가정을 도입하면, 각 부재의 좌굴 하중은 식 (10)과 같이 계산할 수 있다.

$$P_{cr} = \kappa P_u \quad (10)$$

오일러 좌굴공식에 식 (10)을 이용하면, 각 부재의 유효좌

굴절이계수는 식 (11)로 계산될 수 있다.

$$K = \frac{\pi}{L\sqrt{P_{cr}}} = \frac{\pi}{L\sqrt{\kappa P_u}} \quad (11)$$

2.4 비탄성 강도감소계수(Inelastic stiffness reduction factor)

2.1절~2.3절에서 언급된 이론 혹은 수치해석적인 부재의 유효좌굴길이 계산방법에서는 재료적 비탄성 거동에 따른 부재의 유효좌굴길이를 계산하기 위하여 비탄성 강도감소계수 (τ)를 적용한다. 비탄성 강도감소계수는 부재의 접선계수(E_t)와 탄성계수(E)의 비를 의미하며 식 (11)과 같이 정의된다 (AISC, 2006).

$$\tau = E_t/E \quad (12)$$

부재의 재료가 탄성 거동함을 가정하는 경우, 식 (12)에 의하여 부재의 비탄성 강도감소계수는 1.0을 적용하며, 각 방법에 의거하여 부재의 유효좌굴길이를 계산하는 과정은 반복 계산과정이 요구되지 않는다. 반면, 부재의 재료가 비탄성 거동함을 가정하는 경우에는 유효좌굴길이를 계산하는 과정에서 식 (13)에 의하여 계산된 비탄성 강도감소계수를 적용한다(AISC, 2006).

$$\tau = -2.724 \left(\frac{P_n}{P_y}\right) \ln\left(\frac{P_n}{P_y}\right) \quad \text{if } \frac{P_n}{P_y} \geq 0.39$$

$$\tau = 1.0 \quad \text{if } \frac{P_n}{P_y} < 0.39 \quad (13)$$

여기서, P_y 와 P_n 은 해당 부재의 항복하중과 공칭강도를 의미한다. 식 (13)은 AISC(2006)에 규정된 압축 부재의 기동강도곡선에 비탄성 강도감소계수(τ)를 대입하고 이 계수를 기준으로 변형한 식이다.

2.1절~2.3절에서 언급된 부재의 유효좌굴길이 계산방법을 참고하면 식 (13)의 비탄성 강도감소계수는 비탄성 거동을 고려한 부재의 유효좌굴길이를 계산하기 위하여 반드시 먼저 결정되어야 한다. 그러나, 식 (12)가 적용되는 시점에서 부재의 유효좌굴길이는 미지값이므로 식 (13) 내의 부재의 공칭강도 P_n 을 계산할 수 없으며, 따라서 부재의 비탄성 강도감소계수를 결정할 수 없게 된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 부재의 비탄성 유효좌굴길이를 계산하는 과정은 다음과 같은 반복 계산과정이 요구된다. 그림 1은 반복 계산과정의 흐름도를 나타낸 것이다.

(1) $P_n^* = \gamma P_u$ 를 이용하여 해당 부재의 공칭강도를 가정한다. 여기서, P_n^* 는 가정된 공칭강도를 의미하고 P_u 는 부재의 압축력을 의미한다. γ 는 1.0보다 작은 임의의 감소계수이다.

(2) 식 (13)과 가정된 공칭강도를 이용하여 부재의 비탄성 강도감소계수를 계산한다.

(3) 2.1절~2.3절에 언급된 방법에 의하여 부재의 비탄성 유효좌굴길이를 계산한다.

(4) 계산된 부재의 유효좌굴길이를 강도곡선에 대입하여 부재의 공칭강도(P_n)를 결정한다.

(5) (1)에서 가정된 공칭강도(P_n^*)와 (4)에서 계산된 공칭강도(P_n)의 수렴도를 판단한다. 두 값이 수렴되지 않은 경우에는 새로운 γ 를 이용하여 과정 (1)~(4)를 반복한다. 두 값이 수렴된 경우에는 반복 계산을 멈추고 계산된 유효좌굴길이와 강도감소계수를 최종 값으로 결정한다.

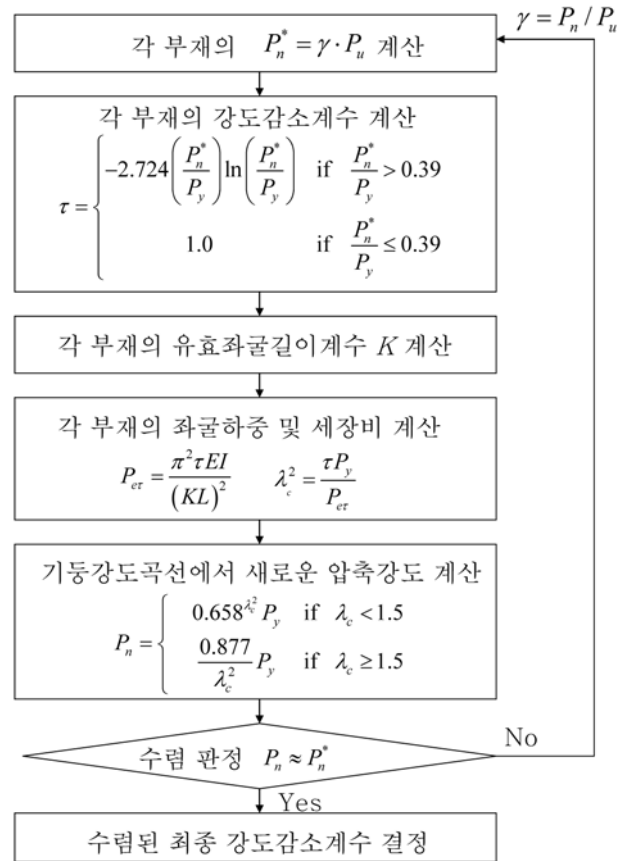


그림 1. 비탄성 강도감소계수 산정절차

3. 가상축력계수(η)를 적용한 유효좌굴길이 산정법 제안

3.1 시스템좌굴해석 수행후 오일러좌굴식을 이용한 유효좌굴길이 산정방법의 문제점

시스템좌굴해석법은 Alignment Chart 방법 및 Story-Based 방법에서 요구되는 복잡한 수식 계산을 필요로 하지 않으며, 단순한 수치해석적 접근법으로 유한요소 해석과 고유치 해석을 적용하기 때문에 컴퓨터를 이용하여 빠르게 수행할 수 있는 장점이 있다.

그러나, 부재의 유효좌굴길이를 결정하기 위한 시스템좌굴 해석법에는 해결해야 할 문제점이 존재한다. 시스템좌굴해석법을 이용하여 부재의 유효좌굴길이를 결정하기 위한 식 (11)은 전체 시스템이 불안정 상태에 도달할 때, 각 부재도 동시에 불안정 상태에 도달한다는 가정하에서 유도된 식이다. 이러한 가정 사항은 강프레임 구조에서 각 부재의 강성이 고르게 배치되고 외부 하중에 대한 부재들의 하중 분담률이 거의 동등한 경우에는 타당하다고 할 수 있으나, 특정 부재의 불안정성에 의하여 전체 시스템의 불안정성이 야기되는 경우에는 합리적이라 할 수 없다. 즉, 전체 시스템의 불안정성을 야기한 부재를 제외한 다른 부재는 불안정 상태에 도달하였다고 결론지을 수 없기 때문에, 식 (11)을 적용하여 모든 부재의 좌굴강도를 계산하는 것은 타당하지 않다 (최동호 등, 2007).

일례로 그림 2에 나타난 2경간 7층 강프레임 구조 부재의 탄성 유효좌굴길이를 Alignment Chart 방법, Story-Based 방법 및 시스템 좌굴해석 방법으로 계산하고 결과를 비교하였다. 강프레임의 기둥과 보의 W8×13과 W12×14 단면으로

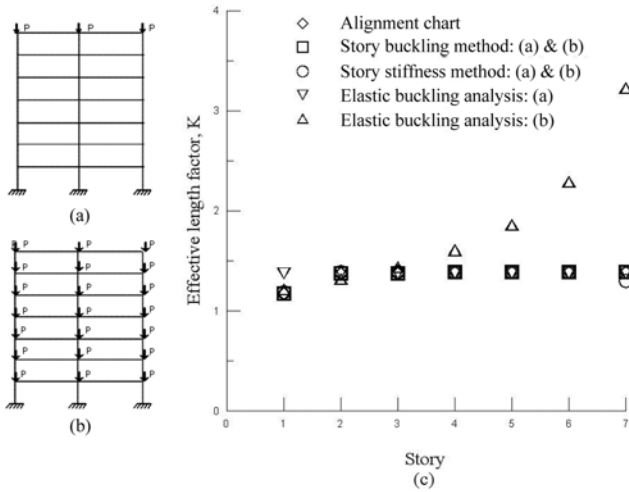


그림 2. 고정지지된 프레임의 층별 유효좌굴길이계수 비교

이루어져 있으며 작용하중 P 는 10 kN이다. 부재의 재료는 탄성 거동함을 가정하였다. 하중 Case는 최상층의 기둥에만 하중이 작용하는 경우(그림 2(a))와 각 층의 기둥에 하중이 작용하는 경우(그림 2(b))로 나누어 고려하였다.

그림 2(c)는 두 가지의 하중 재하 Case에 대하여 각 방법에 의하여 계산된 외부 기둥의 유효좌굴길이 계수(중축)를 각 층(횡축)에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 그림 2(a)의 하중 재하 Case에서는 각 기둥의 강성이 일정하고 또한 동일한 축력이 발생하기 때문에, 모든 부재가 전체 시스템의 불안정성에 기여한다고 볼 수 있다. 즉, 시스템 좌굴해석법의 적용은 타당하며, 그림 2(c)의 비교에서도 시스템 좌굴해석법을 적용하여 얻은 모든 층의 기둥의 유효좌굴길이는 Alignment Chart 방법 및 Story-Based 방법에 의하여 얻은 결과와 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

반면, 그림 2(b)의 하중 재하 Case에서는 각 층별로 부재력이 다르며 최하단에서 가장 큰 부재력이 발생하기 때문에 좌굴에 가장 취약한 부재는 최하층에 위치한 기둥이다. 따라서, 전체 시스템의 불안정성은 최하층의 기둥으로부터 야기되며 다른 층에 위치한 기둥 부재는 좌굴한계에 도달하였다고 볼 수 없다. 그림 2(c)의 비교 그래프에서 시스템 좌굴해석으로 계산된 기둥의 유효좌굴길이는 최하층의 기둥에 대해서는 Alignment Chart 및 Story-Based 방법에서 얻은 결과와 유사하였으나 상층의 기둥으로 갈수록 과도하게 긴 유효좌굴길이를 산정함을 알 수 있다.

3.2 가상축력계수(η)를 도입한 시스템좌굴해석과 유효좌굴길이

그림 2의 예제에서 확인한 바와 같이 시스템좌굴해석법은 특정 부재에 의하여 전체 시스템의 불안정성이 야기되는 구조의 경우, 압축력이 미소한 일부 부재에 대하여 과도하게 긴 유효좌굴길이를 산정하는 문제점을 가지고 있다. 즉, 전체 시스템의 불안정성을 야기하는 부재의 경우에는 식 (10)과 식 (11)의 적용이 타당하나, 그 외 부재는 좌굴한계에 도달하였다고 볼 수 없으며 이러한 부재의 실제 좌굴강도는 식 (10)에 의하여 계산된 좌굴한계 보다 상당히 클 것으로 예상된다.

따라서 본 논문에서는 식 (10)에 의하여 계산된 부재의

좌굴한계가 부재의 실제 좌굴강도와 일치하는 시점의 유효좌굴길이를 계산하기 위하여 가상축력계수(η)의 적용을 제안하였다. 이 방법은 현재 부재의 압축력에 가상축력계수를 도입하여 식 (10)에 의하여 계산된 부재의 좌굴한계를 부재의 실제 좌굴강도와 일치시키는 방법이다. 전체 구조물의 불안정성에 거의 영향을 미치지 않는 압축력이 미소한 기둥 부재는 가상축력계수의 도입으로 전체 구조물의 불안정성을 야기하는 부재로 변화한다. 따라서 가상축력계수를 도입하면 식 (10)과 식 (11)의 성립을 위한 가정사항은 충족되며 시스템좌굴해석법을 적용하여 모든 기둥 부재의 합리적인 유효좌굴길이를 계산할 수 있다.

임의 부재에 가상축력계수를 도입하면 부재의 압축력이 변화하기 때문에 식 (9)에 제시되었던 부재의 기하강성행렬은 식 (14)와 같이 가상축력계수(η)가 도입된 새로운 형태로 변화한다.

$$[\bar{k}_G] = \eta \frac{P_u}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ & \frac{6}{5} & \frac{L}{10} & 0 & \frac{6}{5} & \frac{L}{10} \\ & & \frac{2L^2}{15} & 0 & -\frac{L}{10} & \frac{L}{30} \\ & & & 1 & 0 & 0 \\ \text{symm.} & & & & \frac{6}{5} & -\frac{L}{10} \\ & & & & & \frac{2L^2}{15} \end{bmatrix} \quad (14)$$

식 (14)는 평가하고자 하는 해당 층의 기둥들에 대하여 임의의 가상축력계수를 도입하고 기하강성행렬에 반영되는 해당 층의 기둥 부재의 압축력을 변화시킨다는 것을 의미한다. 식 (14)와 같이 변화된 기하강성행렬을 적용하면, 시스템 좌굴해석법의 기본식 (7)은 식 (15)과 같이 변화한다.

$$[K_E] + \bar{\kappa}[\bar{K}_G] = 0 \quad (15)$$

여기서, $[\bar{K}_G]$ 는 해당 층의 부재에 대하여 가상축력계수가 고려된 전체 시스템의 기하강성행렬이며 $\bar{\kappa}$ 은 고유치해석으로부터 산정된 새로운 좌굴고유치이다. 따라서 식 (10)과 식 (11)에 의하여 결정되었던 부재의 좌굴하중 P_{cr} 과 유효좌굴길이 K 는 식 (16)과 식 (17)로 새롭게 계산되어야 한다.

$$P_{cr} = \bar{\kappa} \eta P_u \quad (16)$$

$$\bar{K} = \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{\tau EI}{\bar{\kappa} \eta P_u}} \quad (17)$$

본 논문에서 제안된 가상축력계수의 적용상의 문제점은 각 기둥 부재에 어느 정도의 가상축력계수가 적용되어야 하는지가 명확하지 않으며, 또한 각 부재에 따라서 적합한 가상축력계수의 크기도 다를 수 있다는 점이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 강프레임 구조의 각 층에 대하여 가상축력계수를 순차적으로 증분하여 도입하고 고유치해석을 반복하는 방법을 적용하였다.

가상축력계수법을 적용하기 위한 첫 단계는 강프레임 부재의 탄성 또는 비탄성 유효좌굴길이를 2.2절과 2.3절에서 언급된 일반적인 시스템좌굴해석법으로 결정하는 것이다. 다음 단계로 해당 층의 모든 기둥 부재의 기하강성행렬에 임의의

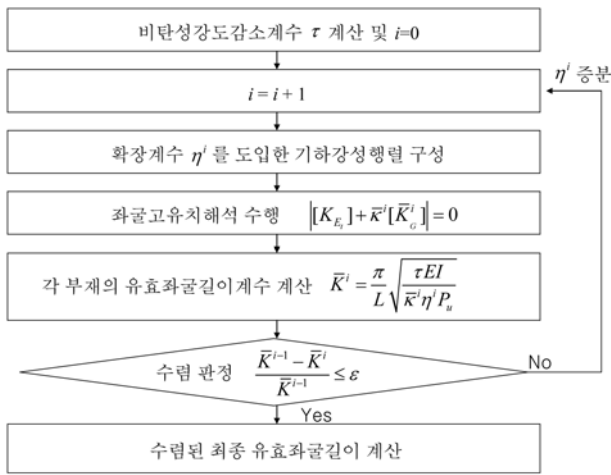


그림 3. 가상축력계수 적용의 흐름

가상축력계수를 도입하고 전체 구조시스템의 기하강성행렬을 새롭게 구성한다. 이 때, 접선강성행렬은 가상축력계수에 의하여 변화하지 않는다. 접선강성행렬과 새롭게 구성된 기하강성행렬을 이용하여 고유치해석을 수행하고 새로운 좌굴고유치를 계산한다. 가상축력계수가 도입되었던 해당 층의 기둥에 대한 유효좌굴길이를 고유치해석으로부터 얻어진 좌굴고유치와 식 (17)을 이용하여 계산한다. 이전 단계의 결과와 새롭게 계산된 기둥의 유효좌굴길이의 수렴성을 판단하고 수렴되지 않은 경우에는 해당 층에 대한 가상축력계수를 충분한 뒤, 시스템좌굴해석을 반복한다. 해당 층에 대한 유효좌굴길이의 수렴성이 확인되면 수렴된 결과를 최종 유효좌굴길이라고 결정한다. 이와 같은 과정을 강프레임 구조의 각 층의 모든 기둥에서 대해서 반복 적용한다. 그림 3은 제안된 가상축력계수를 도입하여 기둥 부재의 유효좌굴길이계수를 산정하는 방법을 흐름도로 나타낸 것이다.

4. 검증 및 적용예제

4.1 집중하중이 작용하는 2경간 6층 강프레임

본 논문에서 제안된 가상축력계수(η)를 적용한 시스템좌굴 해석 방법의 타당성을 검증하기 위하여 그림 4와 같은 2경간 6층 강프레임을 예제로 선택하였다. 강프레임의 모든 기둥 단면은 W14×38, 거더 단면은 W18×60으로 가정하였으며 탄성계수는 2.1×10⁸ MPa를 사용하였다. 외부 하중으로 강프레임의 각 층 거더와 기둥이 교차하는 점에 집중하중 10 kN을 재하 하였다.

본 논문 2.1절~2.3절에 언급된 방법 중에서 Story-based 방법 및 시스템좌굴해석법과 제안된 가상축력계수법을 적용하여 예제 강프레임 외곽 기둥의 탄성 및 비탄성 유효좌굴길이를 계산하고 결과를 정리하였다. 이 때, 제안된 가상축력계수를 적용한 시스템좌굴해석의 경우에는 유효좌굴길이계수의 수렴기준을 0.005(0.5%)로 하였다.

또한, 그림 5는 예제 강프레임의 외곽 기둥 부재에 대하여 각 방법에 의하여 계산된 유효좌굴길이계수(종축)를 층별(횡축)로 비교한 그래프이다. 한편, 언급된 방법을 적용할 경우, 본 예제의 내부에 위치하는 기둥의 유효좌굴길이는 외곽 기둥의 유효좌굴길이 계산 결과와 동일하여 결과 정리에서

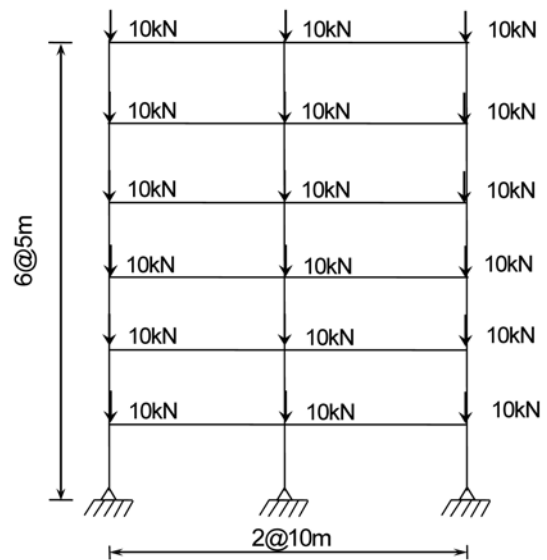


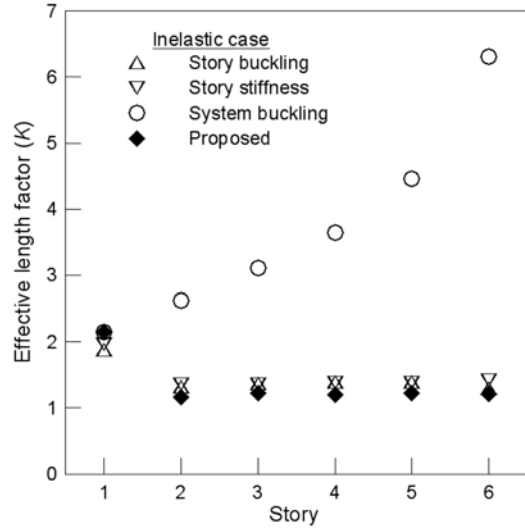
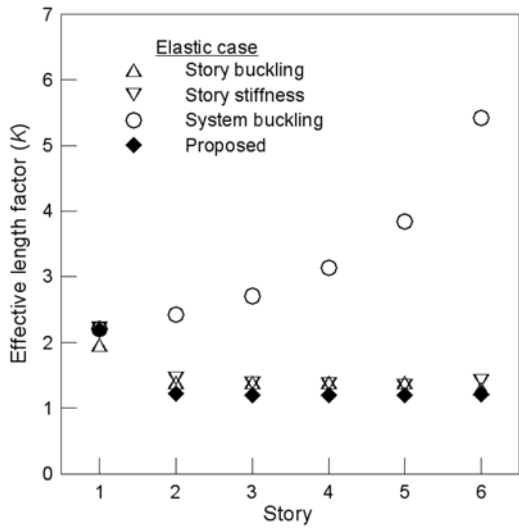
그림 4. 집중하중을 받는 2경간 6층 강프레임

제외하였다.

예제 강프레임 구조는 각 층에 집중하중이 작용되고 있으므로 상층부의 기둥에는 상대적으로 미소한 압축력이 발생하는 반면, 최하층에서 최대 압축력이 발생한다. 모든 층에서 기둥의 강성은 동일하므로 최하층의 기둥이 좌굴에 가장 취약한 층이라 할 수 있으며, 전체 시스템의 불안정성은 최하층의 기둥에 의하여 결정된다.

재료가 탄성 거동함을 가정하고 계산된 유효좌굴길이를 나타낸 그래프(그림 5(a))를 살펴보면, Story-buckling 방법과 Story-stiffness 방법은 최하층 기둥의 유효좌굴길이를 다소 길게 산정하고, 기타 다른 층의 기둥에 대해서는 거의 일정한 유효좌굴길이를 산정하고 있음을 알 수 있다. 기둥 부재의 유효좌굴길이가 길어지게 되면 설계기준에 규정된 압축 부재의 기둥강도곡선에서 얻어지는 해당 부재의 공칭강도는 작아지게 되므로, Story-buckling 방법과 Story-stiffness 방법은 다른 층의 기둥에 비하여 최하층 기둥의 공칭강도를 가장 작게 평가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 최하층의 기둥이 좌굴에 가장 취약할 것이라는 전술된 예상과 잘 부합되는 결과이다.

반면, 그림 5(a)에서 시스템좌굴해석은 최하층 기둥에 대해서는 다른 해석방법과 거의 일치되는 유효좌굴길이를 산정하였으나 고층부로 갈수록 해당 기둥의 유효좌굴길이를 점차 길게 평가하여, 최고층부에 위치한 기둥의 공칭강도를 최하층의 기둥에 비하여 오히려 작게 평가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 시스템좌굴해석에 의한다면 예제 강프레임 구조에서 좌굴에 가장 취약한 부재는 최고층에 위치한 기둥이라는 잘못된 해석 결과를 얻게 된다. 따라서 시스템좌굴해석 수행후 오일러좌굴식을 이용한 식 (11)에 의한다면 예제 강프레임 구조에서 좌굴에 가장 취약한 부재는 최고층에 위치한 기둥이라는 잘못된 해석 결과를 얻게 된다. 이러한 불합리한 해석 결과는 전체 시스템이 불안정하게 되던 각 부재도 동시에 불안정 한계에 도달한다는 가정으로부터 기인하는 것이다. 식 (17)은 전체 시스템의 좌굴고유치와 각 부재의 축력의 함수이며, 좌굴고유치는 모든 부재에 공통으로 적용 되므로 각 부재의 유효좌굴길이는 부재의 축력의 크기에



(a) 탄성 유효좌굴길이 (b) 비탄성 유효좌굴길이
 그림 5. 2경간 6층 강프레임(집중하중 재하) 외곽 기둥 부재의 유효좌굴길이계수 비교

따라 결정된다. 그러므로 시스템좌굴해석에서는 압축력이 가장 큰 최하층 기둥에 대해서 가장 작은 유효좌굴길이를 산정하며, 압축력이 비교적 미소한 상층부의 기둥의 경우에는 불합리하게 긴 유효좌굴길이를 산정하게 된다.

제안된 가상축력계수법을 적용한 시스템좌굴해석의 경우에는 각 층별로 서로 다른 가상축력계수가 도입되었으며, 수립된 유효좌굴길이를 최종 결과로 산정한다. 그림 5(a)에 나타난 바와 같이 제안된 가상축력계수법은 시스템좌굴해석에서 발생하는 문제점을 해결하고 실제 강프레임 구조 부재의 유효좌굴길이 변화 양상을 적절히 반영하고 있음을 알 수 있다. 제안된 가상축력계수법에서 계산된 기둥의 유효좌굴길이는 Story-buckling 방법 및 Story-stiffness 방법에 의하여 계산된 결과와 모든 층에서 잘 일치하였다.

한편, 재료 거동을 비탄성으로 가정하고 비교된 경우(그림 5(b))에도 탄성의 경우와 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다. 재료 거동을 비탄성으로 가정하면, 각 부재의 비탄성 강도감소계수를 계산하기 위하여 반복 계산과정이 요구되기 때문에 복잡한 수식 계산 과정이 요구되는 이론적인 방법, 즉, Story-buckling 방법이나 Story-stiffness 방법은 실용적이지 못하다. 제안된 가상축력계수법은 비탄성 강도감소계수 계산 과정과 고유치 해석과정 및 가상축력계수 계산과정이 모두 컴퓨터를 이용한 수치해석 방법으로 수행되기 때문에 계산 효율면에서 매우 뛰어난 해석 방법임을 알 수 있다.

한편, 재료적인 거동에 따른 기둥 부재의 좌굴 거동을 살펴보기 위하여 탄성 및 비탄성을 가정한 기둥의 유효좌굴길이를 비교하였다. 그림 6은 언급된 방법을 적용하여 계산된 2경간 6층 강프레임의 외곽 기둥의 탄성 및 비탄성 유효좌굴길이의 차이를 비탄성 유효좌굴길이를 기준으로 백분율로 나타낸 것이다. 그래프 상에서 양의 값은 탄성 유효좌굴길이에 비하여 비탄성 유효좌굴길이가 보다 긴 것임을 나타낸다.

이론적인 해석법인 Story-buckling 방법 및 Story-stiffness 방법에서는 각 층에서 다소간 차이가 있으나 최하층과 2층을 제외하고는 대략적으로 탄성과 비탄성 유효좌굴길이의 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 예제 강프레임의 상층부의 기둥들은 전술한 바와 같이 비교적 작은 압축력을 받게 되

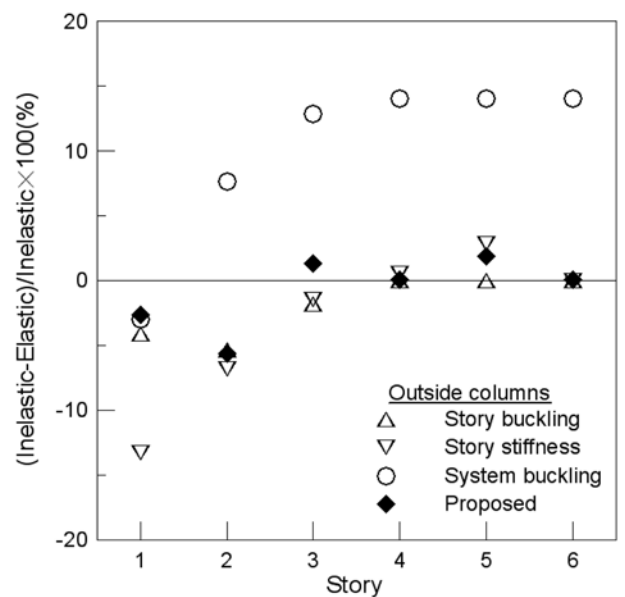


그림 6. 2경간 6층 강프레임(집중하중 재하) 외곽 기둥부재의 탄성 및 비탄성 유효좌굴길이계수 비교

기 때문에 사실상 좌굴에 취약한 부재라고 할 수 없으며, 비탄성 재료 거동을 고려한다고 하더라도 전체 프레임의 좌굴 파괴 시에도 여전히 탄성 거동을 유지할 것으로 예측된다. 이와 같은 이유로 인하여 고층부 기둥들의 탄성 및 비탄성 유효좌굴길이는 거의 동일하게 나타나는 것으로 생각된다. 그러나, 최하층과 2층에 위치한 기둥의 경우에는 비탄성 유효좌굴길이가 탄성의 경우에 비하여 아주 짧게 산정되고 있음을 볼 수 있는데, 이것은 동일한 기둥 부재에 대하여 비탄성을 가정한 경우가 탄성을 가정한 경우에 비하여 기둥의 공칭강도를 보다 크게 산정함을 의미한다. 따라서, 기둥의 유효좌굴길이와 좌굴강도를 계산함에 있어서 기둥의 거동을 비탄성으로 가정하는 경우에는 탄성의 경우에 비하여 단면 절감 효과가 있을 것이며, 이는 경제성 측면에서 비탄성 영역을 고려한 현 설계기준의 기본 가정에 부합하는 결과이다.

한편, 시스템좌굴해석의 경우에는 이러한 경향이 나타나지

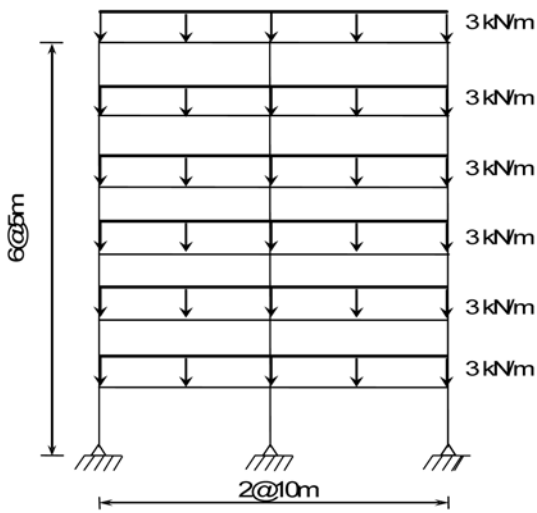


그림 7. 등분포 하중을 받는 2경간 6층 강프레임

않았으며 고층부의 기둥에 대해서는 오히려 탄성 유효좌굴 길이가 비탄성 유효좌굴 길이에 비하여 약 15% 정도 길게 나타났다. 이러한 결과는 앞서와 마찬가지로 시스템좌굴 해석이 강프레임의 고층부의 유효좌굴 길이를 과도하게 길게 산정하기 때문에 나타난 것이라고 할 수 있다. 한편, 제안된

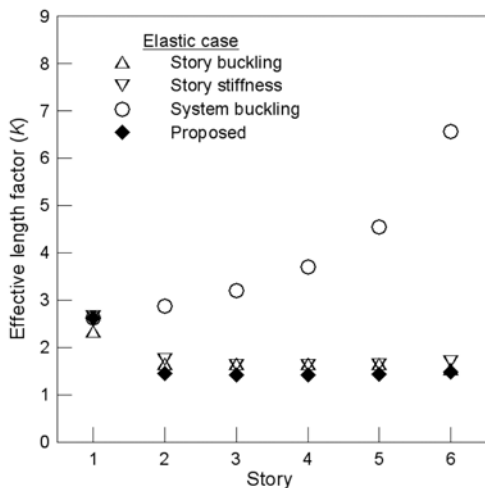
가상축력계수법은 효율적으로 결과를 계산함과 동시에 기존의 이론적인 해석 결과와 일치하는 합리적인 결과를 산정함을 볼 수 있다.

4.2 등분포 하중이 작용하는 2경간 6층 강프레임

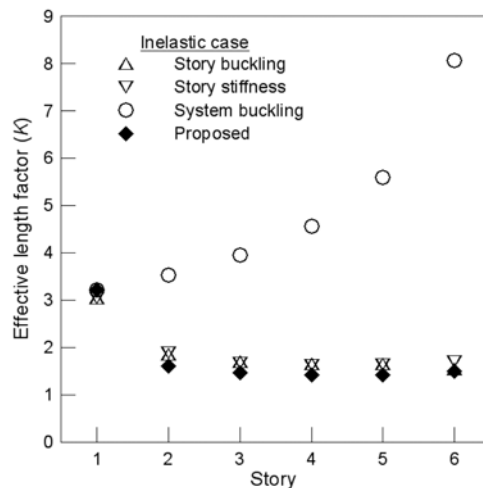
4.1절에서 해석되었던 동일한 강프레임 구조에 대해서 그림 7과 같이 하중 조건을 등분포 하중으로 변화시키고 해석을 수행하였다. 강프레임 구조의 기둥 및 거더 부재의 제원 및 재료 물성은 4.1절에 제시된 것과 동일하며, 각 층에 재하된 등분포 하중의 크기는 3 kN/m이다. 거더에 등분포 하중이 작용하게 되면 강프레임의 내부와 외곽 기둥에 작용하는 압축력에 차이가 생길 뿐 아니라, 각 층의 거더의 양 끝에 모멘트가 발생하게 된다. 따라서 각 층에 집중하중이 작용하는 경우와는 달리 강프레임의 외부와 내부 기둥의 유효좌굴 길이는 서로 다르게 된다.

그림 8과 그림 9는 등분포하중이 작용하는 강프레임의 내외곽 기둥의 유효좌굴 길이를 Story-buckling 방법, Story-stiffness 방법, 시스템좌굴해석법 및 제안된 가상축력계수법에 의거하여 계산하고 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

그림 8과 그림 9에서 확인 할 수 있는 바와 같이 등분포 하중이 작용하는 강프레임의 경우에도 집중하중이 작용하는

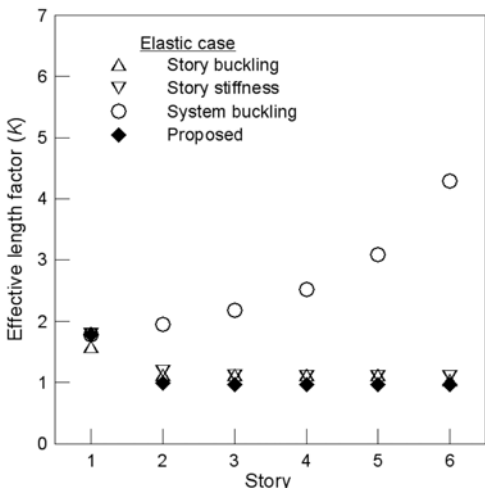


(a) 탄성 유효좌굴길이

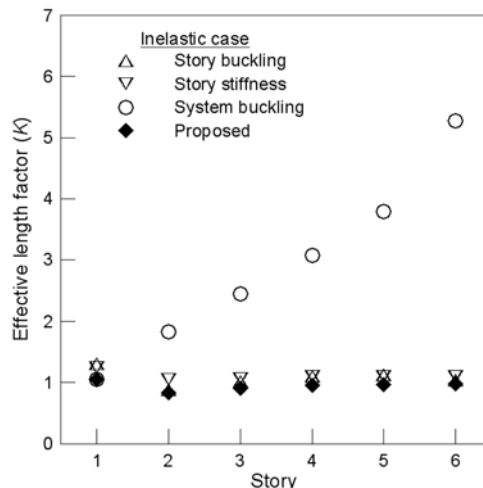


(b) 비탄성 유효좌굴길이

그림 8. 2경간 6층 강프레임(등분포하중 재하) 외곽 기둥 부재의 유효좌굴길이계수 비교

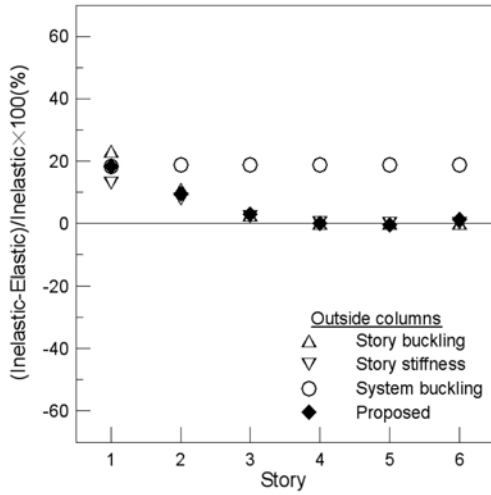


(a) 탄성 유효좌굴길이

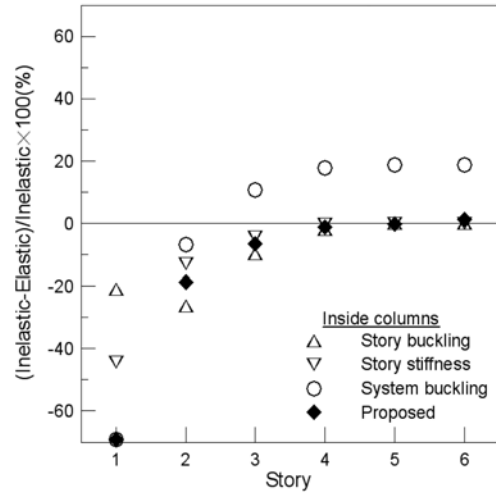


(b) 비탄성 유효좌굴길이

그림 9. 2경간 6층 강프레임(등분포하중 재하) 내부 기둥 부재의 유효좌굴길이계수 비교



(a) 외곽 기둥



(b) 내부기둥

그림 10. 2경간 6층 강프레임(등분포하중 재하) 탄성 및 비탄성 유효좌굴길이계수 비교

강프레임과 거의 유사한 해석 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 즉, 기존의 이론적인 해석법(Story-buckling 방법 및 Story-stiffness 방법)이 최하층 기둥에 대해서 다소 긴 유효좌굴길이를 산정하고 고층부의 기둥에 대해서는 거의 일정한 유효좌굴길이를 산정하는 것에 반하여, 시스템좌굴해석법은 고층부 기둥의 유효좌굴길이를 과도하게 길게 산정한다. 이러한 경향은 기둥의 거동을 비탄성으로 가정한 경우(그림 8(b) 및 그림 9(b))에서 보다 심하게 나타난다. 제안된 가상축력계수법은 모든 층의 기둥에 대해서 기존의 이론적인 해석법에 의한 결과와 잘 일치하는 합리적인 탄성 및 비탄성 유효좌굴길이를 산정함을 알 수 있다.

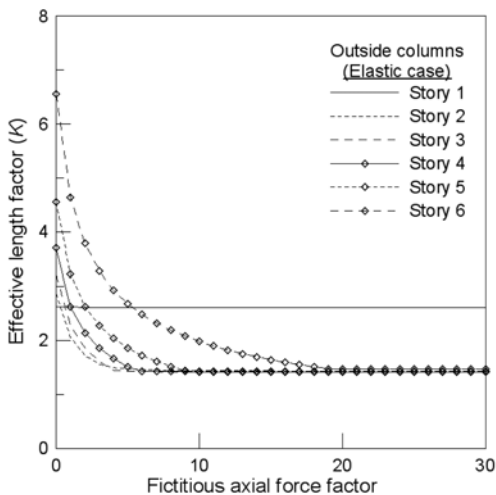
그림 10은 등분포하중이 작용하는 강프레임 구조에 대해서 각 해석법에 따른 탄성 및 비탄성 유효좌굴길이의 차이를 비탄성 유효좌굴길이를 기준으로 백분율로 비교한 것이다. 앞 선 예제와 마찬가지로 그래프 상의 양의 값은 비탄성 유효좌굴길이가 탄성 유효좌굴길이에 비하여 길게 산정되었음을 의미하는 것이다.

그림 10(a)의 외곽기둥에 대한 그래프를 보면, 기존의 이론적인 해석법은 최하층과 2층 기둥을 제외한 다른 층의 기둥에 대해서는 탄성과 비탄성 유효좌굴길이를 거의 동일하

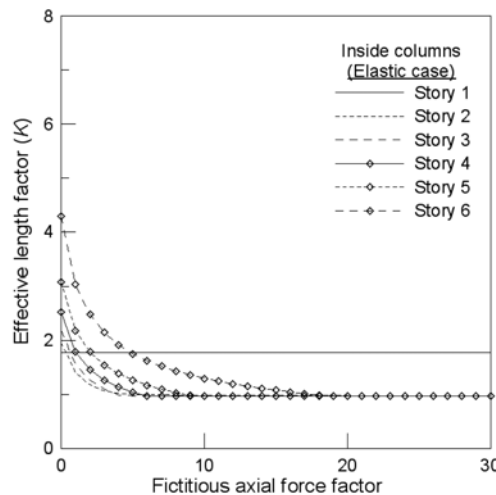
게 산정함을 알 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 고층에 위치한 기둥에서는 압축력이 미소하게 발생하므로 해석에서 거동을 어떻게 고려했는가와는 관계없이 기둥은 탄성 거동(비탄성 강도감소계수는 1.0을 유지)을 하기 때문이다. 시스템좌굴해석이 이와는 상이한 경향을 나타내는데 반하여 제안된 가상축력계수법은 기존의 방법에서 보이는 경향과 잘 일치하고 있다.

그림 10(b)의 내부 기둥의 경우에도 기존의 이론적인 해석법은 강프레임 구조의 최하층과 2층을 제외하면 탄성과 비탄성 유효좌굴길이를 거의 동일하게 산정하고 있음을 알 수 있다. 최하층과 2층의 기둥에서는 비탄성 유효좌굴길이가 탄성 유효좌굴길이에 비해서 상당히 작게 산정됨을 알 수 있는데 이것은 등분포하중을 받는 강프레임 구조에서 좌굴에 가장 취약한 층이 최하층의 내부 기둥이기 때문에 해당 기둥은 비탄성 거동을 하며 또한 비탄성 강도감소계수가 상당히 감소하기 때문이라고 할 수 있다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 제안된 가상축력계수방법은 기존의 이론적인 해석법이 보이는 경향과 잘 일치하는 경향을 나타내고 있다.

그림 11과 그림 12는 본 연구에서 제안된 가상축력계수방

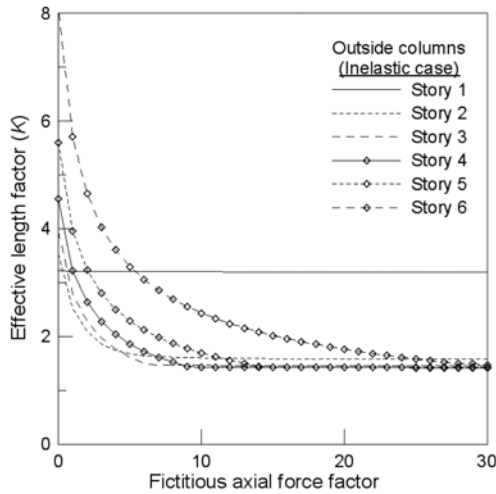


(a) 외곽기둥

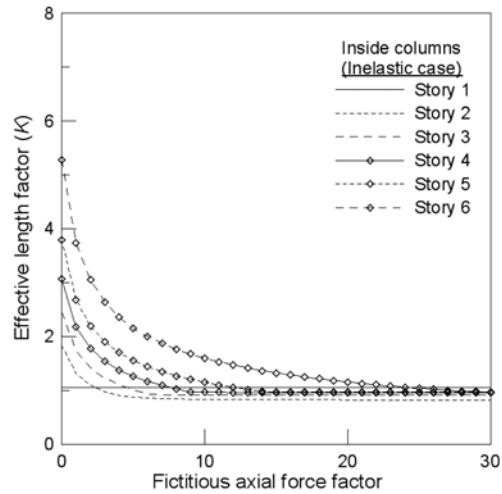


(b) 내부기둥

그림 11. 2경간 6층 강프레임(등분포하중 재하) 탄성 유효좌굴길이의 수렴 경향



(a) 외곽기둥



(b) 내부기둥

그림 12. 2경간 6층 강프레임(등분포하중 재하) 비탄성 유효좌굴길이의 수렴 경향

법을 적용한 경우, 등분포하중이 작용하는 강프레임 구조의 탄성 및 비탄성 유효좌굴길이의 수렴 기준을 가상축력계수에 따라 나타낸 것이다. 그림 11과 그림 12의 종축은 부재의 유효좌굴길이계수를 의미하고 횡축은 각 반복과정에서 적용된 가상축력계수를 의미한다.

그림 11의 탄성 유효좌굴길이의 경우, 외곽기둥과 내부기둥의 유효좌굴길이는 가상축력계수가 도입됨에 따라서 각 층에 대하여 일정한 값으로 단조 수렴함을 알 수 있다. 등분포하중이 작용하는 강프레임 구조에서 최하층의 기둥은 좌굴에 가장 취약한 층이기 때문에 탄성 좌굴해석의 기본 가정, 즉, 전체 구조가 좌굴상태에 도달할 때, 해당 부재도 좌굴한계에 도달한다는 가정을 만족하게 되며, 따라서 최하층 기둥의 유효좌굴길이는 기존의 탄성 좌굴해석으로도 합리적인 결과를 도출할 수 있다. 그림 11에서 확인할 수 있는 바와 같이 최하층의 기둥은 가상축력계수가 적용된다 하더라도 유효좌굴길이의 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 가상축력계수는 기존의 탄성 좌굴해석으로부터 합리적인 결과를 얻을 수 있는 좌굴에 취약한 부재에 대해서는 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 좌굴에 취약한 층을 제외한 상층부의 기둥에서는 가상축력이 도입됨에 따라 유효좌굴길이계수가 일정한 값으로 수렴하게 된다. 또한, 고층부의 기둥일수록 수렴되기 위하여 필요한 가상축력계수의 크기가 증가함을 알 수 있다. 그림 12의 비탄성 유효좌굴길이의 수렴 경향도 탄성 유효좌굴길이의 수렴 경향과 거의 비슷함을 확인 할 수 있다.

4.3 집중하중이 작용하는 3경간 4층 강프레임

기둥의 경계조건, 층간 기둥 길이, 하중조건 및 경간을 변화시킨 3경간 4층 강프레임 구조를 세 번째 해석 예제로 고려하였다(그림 13 참조). 서로 다른 종류의 단면 사용에 따른 해석 결과의 변화를 확인하기 위하여 기둥 내부와 외부 및 층간 거더의 단면상수를 표 1과 같이 결정하였다. 그림 13에서 확인할 수 있는 바와 같이 강프레임의 내부 기둥에는 70 kN의 집중하중을 재하하였고 외부 기둥에는 40 kN의 집중하중을 재하하였다. 기둥의 최하단은 고정 지점으로 지지되었고 하단 1층의 기둥 길이는 4.5 m이며 나

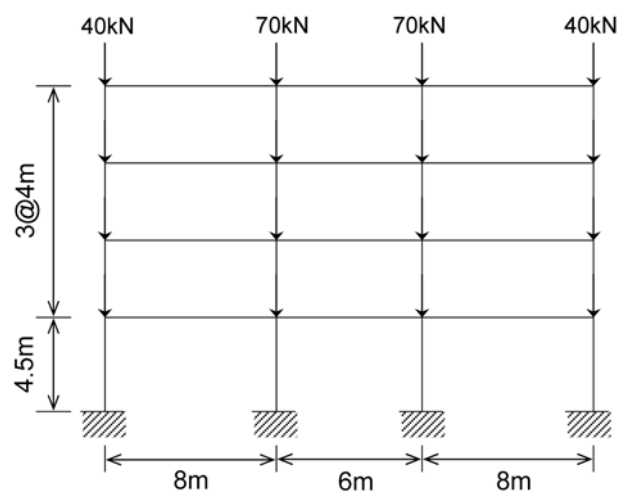


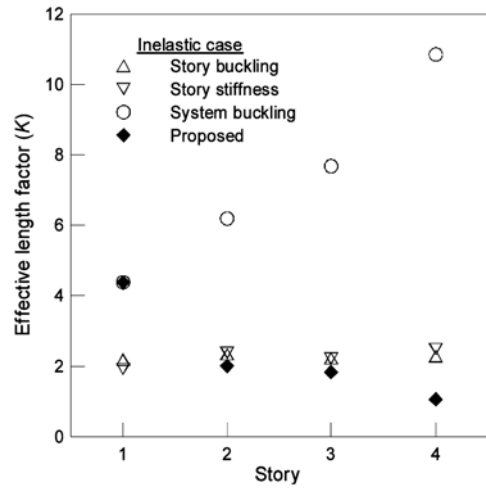
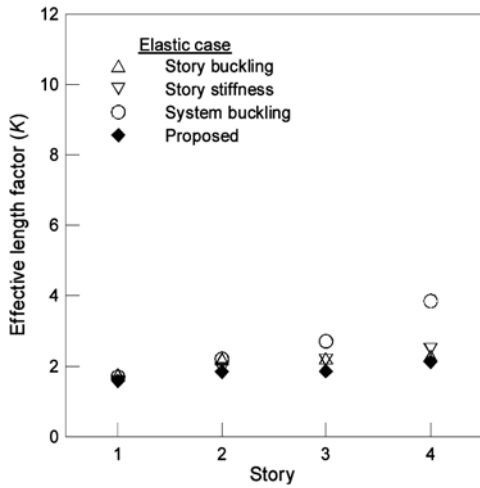
그림 13. 집중하중을 받는 3경간 4층 강프레임

표 1. 3경간 4층 강프레임의 단면상수

구분		면적 (cm ²)	단면2차모멘트 (cm ⁴)
기둥	내부	94.8	61975.6
	외부	102.1	30650.0
거더	1-3층	103.7	62534.2
	최상층	73.2	25896.4

머지 상층부의 기둥 길이는 모두 4m로 선택하였다. 또한, 강프레임의 양 측면의 거더 길이는 8m이며 중앙경간의 거더 길이는 6m로 결정하였다.

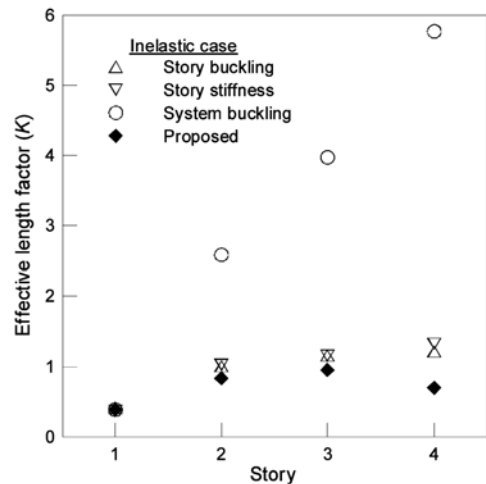
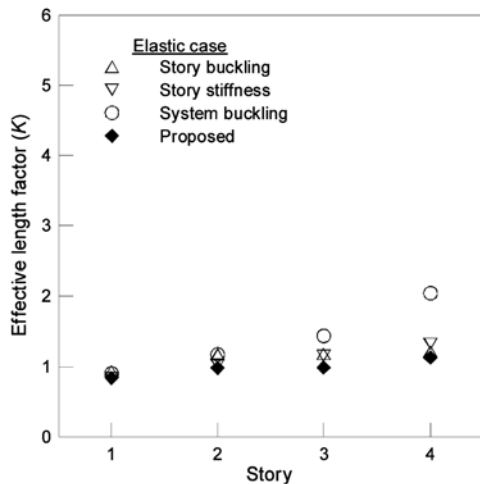
그림 14와 그림 15는 3경간 4층 강프레임의 내부와 외곽 기둥에 대해서 Story-based 방법 및 시스템좌굴해석으로 계산된 유효좌굴길이와 논문에서 제안된 가상축력법에 의한 유효좌굴길이를 비교한 것이다. 그림 14와 그림 15에서 확인할 수 있는 바와 같이 3경간 4층 강프레임의 해석 결과 역시 앞 선 두 예제와 거의 유사한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 시스템좌굴해석법을 적용한 식 (11)은 압축력이 비교적 미소한 상층부의 유효좌굴길이를 과도하게 길게 산정한다. 이러한 경향은 특히 비탄성 거동을 고려한 해석일 경우, 탄성 거동을 고려한 해석에 비하여 보다 크게 나타난



(a) 탄성 유효좌굴길이

(b) 비탄성 유효좌굴길이

그림 14. 3경간 4층 강프레임 외곽 기둥 부재의 유효좌굴길이계수 비교



(a) 탄성 유효좌굴길이

(b) 비탄성 유효좌굴길이

그림 15. 3경간 4층 강프레임 내부 기둥 부재의 유효좌굴길이계수 비교

다. 반면, Story-based 방법 및 제안된 가상축력법에 의한 유효좌굴길이는 탄성 및 비탄성 거동을 고려한 경우 모두 합리적인 범위에서 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 제안된 가상축력법은 기둥의 지점 조건, 경간의 길이 변화 및 층간 기둥 길이의 변화와 같은 다양한 조건 하에 있는 강프레임의 해석에 적용 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 강프레임의 각 기둥의 탄성 및 비탄성 유효좌굴길이를 합리적으로 산정하기 위한 방법으로 가상축력계수법을 제안하였다. 기존의 이론적인 산정방법인 Story-buckling 방법 및 Story-stiffness 방법과 수치해석방법인 시스템좌굴해석을 적용하여 탄성 및 비탄성 유효좌굴길이계수를 산정하는 방법을 논의하였다. 강프레임 구조에서 압축력이 비교적 작게 발생하는 기둥에서 나타나는 기존 시스템좌굴해석 수행후 오일러좌굴식을 이용한 유효좌굴길이계수 산정법의 문제점을 분석하였고, 이러한 분석을 바탕으로 층별 가상축력계수를 도입하여 시스템좌굴해석을 반복수행하는 유효좌굴길이 산정법을 제안하였다. 또한 비탄성 유효좌굴길이를 계산하기 위하여 접선계수이론을 적용한 비탄성 강도감

소계수를 이용하였다. 제안된 해석법의 검증을 위하여 하중 조건 및 경간길이 등을 달리한 세 가지 종류의 강프레임 기둥에 대한 탄성 및 비탄성 유효좌굴길이를 산정하였으며 해석 결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

1. 기존의 시스템좌굴해석 수행후 오일러좌굴식을 이용한 유효좌굴길이 산정법은 고층 강프레임 구조에서 전체 구조물의 좌굴강도에 큰 영향을 미치는 기둥에 대해서는 합리적인 유효좌굴길이가 산정되었으나, 압축력이 상대적으로 작게 발생하는 부재에 대해서는 불합리하게 과도한 유효좌굴길이가 산정되는 문제점이 발생하였다.
2. 본 연구에서 제안된 가상축력계수를 적용한 시스템좌굴해석방법은 강프레임 구조의 각 층의 기둥에 가상축력계수를 도입한 반복 고유치해석을 이용하여 각 기둥의 유효좌굴길이계수를 산정하는 방법이며, 기존의 이론적인 해석법인 Story-based 방법의 결과와 잘 일치하는 합리적인 해석 결과를 도출하였다.
3. 좌굴에 가장 취약한 층의 기둥에서는 부재의 강도감소계수가 감소하였으며 이에 따라 탄성거동을 가정한 유효좌굴길이에 비하여 재료적인 비탄성 거동을 고려한 기둥의 유효좌굴길이가 작게 산정되었다. 이는 비탄성 좌굴해석을 적용하는 경우에 해당 기둥의 공칭강도를 보다 크게 결정

할 수 있다는 의미이다. 따라서, 비탄성 좌굴해석을 도입하는 경우, 탄성을 가정한 경우에 비하여 단면 절감 효과가 있을 것이며 경제성 측면에서 비탄성 영역을 고려한 현 설계 기준에 잘 부합하는 결과이다.

4. 제안된 가상축력계수를 적용한 시스템좌굴해석방법은 컴퓨터를 이용한 해석이 가능하기 때문에 기존의 이론적인 해석방법(Alignment chart 방법 및 Story-based 방법)에 비하여 보다 효율적으로 부재의 유효좌굴길이계수를 산정할 수 있다. 특히 기둥의 비탄성 거동을 고려하는 경우, 제안된 가상축력계수법은 기존의 이론적인 해석법에서 비탄성 거동의 고려를 위하여 요구되는 복잡한 비탄성 강도 감소계수 계산과정을 일괄적으로 수치해석화 하여 보다 효율적인 해석이 가능하였다.

감사의 글

이 연구는 초장대교량 사업단 제1핵심과제를 통하여 지원된 국토해양부 건설기술혁신사업(08기술혁신E01)에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. KRF-2008-313-D01043).

참고문헌

최동호, 유 훈, 하동현(2005) 사장교의 극한 내하력 평가를 위한

비탄성 좌굴해석의 적용성 검토. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제6A호, pp. 1143-1155.

최동호, 유 훈, 신재인, 김성연(2007) 수정된 탄성좌굴해석을 적용한 강프레임의 유효좌굴길이계수산정. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제5A호, pp. 681-689.

AISC (2006) *Steel Construction Manual*. 13rd Edition. American Institute of Steel Construction, USA.

ASCE (1997) *Effective length and notional load approaches for assessing frame stability*. ASCE Technical Committee on Load and Resistance Factor Design, New York.

Chen, W.F. and Lui, E.M. (1987) *Structural stability; theory and implementation*. Elsevier, USA.

Choi, D.H. and Yoo, H. (2009) Iterative system buckling analysis, considering a fictitious axial force to determine effective length factors for multi-story frames. *Engineering Structures*, Vol. 31, pp. 560-570.

Duan, L. and Chen, W.F. (1988) Effective length factor for columns in braced frames. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 10, pp. 2357-2370.

Disque, R.Q. (1973) Inelastic K-factor for column design. *Engineering Journal*, AISC, Vol. 10, No. 2, pp. 33-35.

White, D.W. and Hajjar, J.F. (1997a) Buckling models and stability design of steel frames: a unified approach. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 42, No. 3, pp. 171-207.

White, D.W. and Hajjar, J.F. (1997b) Accuracy and simplicity of alternative procedures for stability design of steel frames, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 42, No. 3, pp. 209-261.

Yura, J.A. (1971) The effective length of column in unbraced frames. *Engineering Journal*, AISC, Vol. 8, No. 2, pp. 49-67.

(접수일: 2008.10.2/심사일: 2008.11.20/심사완료일: 2009.12.18)