Journal of Korean Society of Steel Construction
Vol.38, No.5, pp.297-305, October, 2026

ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054
DOI https://doi.org/10.7781/kjoss.2026.38.5.297

삼중 크로스암을 갖는 프리스트레스트 사장 기둥의 휨좌굴 특성

김문영[1] · 김성보[2*]
[1]명예교수, 성균관대학교, 건설환경공학부, [2]교수, 충북대학교, 토목공학부

Flexural Buckling Characteristics of Prestressed Cable-Stayed Columns with Triple Cross-Arms

Kim, Moon Young[1], Kim, Sung Bo[2*]
[1]Emeritus Professor, School of Civil, Architectural Engineering and Landscape Architecture, Sungkyunkwan University, Suwon-si, 16419, Korea
[2]Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Korea

Abstract – This study investigates the flexural buckling behavior of stayed columns with three cross-arms subjected to compressive forces. Analytical solutions for the elastic flexural buckling load of columns with three vertical cross-arms were derived by considering the $P-\delta$ and $P-\Delta$ effects. Using the derived analytical solutions, the initial prestressing forces that maximize buckling strength were evaluated with respect to variations in the total length of the stayed column, the outer-to-middle span ratio, the cross-arm length, and the cross-sectional area of the PS cables, followed by an analysis of the flexural buckling characteristics. Additionally, the slenderness ratio regions dominated by symmetric and antisymmetric buckling modes corresponding to the maximum buckling load under varying parameters were determined. The validity of these exact solutions was verified by comparing them with numerical analysis results obtained using the general-purpose structural analysis program ABAQUS.
Keywords – Triple Cross-arms, Flexural Buckling, Prestressed, Cable-stayed Column

1. 서 론

강재 기둥의 휨좌굴 거동은 최근까지 연구가 활발히 진행되고 있는 주요 연구 주제이다[1]-[3]. 특히, 주기둥(main column), 크로스 암(cross-arms), 그리고 프리텐션 케이블(pre-tensioned cable)로 구성된 사장 기둥(Cable-stayed column)은 초기 긴장력이 도입된 케이블과 기둥 중앙부의 횡 변위를 억제하는 크로스암을 통하여 기둥 전체의 좌굴 저항성을 크게 향상시킬 수 있다[4]. 또한, 외부에서 긴장된 케이블이 활용된 강재 보의 횡좌굴 거동 특성에 대한 연구도 발표되고 있다[5],[6].

Note.-Discussion open until April 30, 2027. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 7, 2026; revised on October 4, 2026; approved on October 4, 2026.
Copyright © 2026 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.
Tel. +82-43-261-3241 Fax. +82-43-275-2377
E-mail. sbkim@chungbuk.ac.kr

프리스트레스트 사장 기둥에 대한 초기 연구로서 Smith[7]는 임계 좌굴 하중을 스테이(stay) 강성 및 초기 장력 수준과 연관시키는 간소화된 해석 공식을 제안하였다. 한편, Hafez *et al.*[8]은 단일 크로스암(single cross-arm)을 갖는 사장 기둥에 대해 초기 장력 수준과 그에 따른 임계 좌굴 하중 간의 관계를 규명하였다. Jemah와 Williams[9]는 부피와 자중을 획기적으로 줄인 복합 사장 기둥 시스템을 도입하였으며, 이후 매개변수 실험[10]을 통해 세장한 크로스암으로 얻을 수 있는 안정성 향상 효과를 정량적으로 분석하였다. Saito와 Wadee[11]-[13]는 사장 기둥의 비선형 안정성에 대한 다수의 연구를 수행하였으며, 이후 Osofero *et al.*[14]은 사장 기둥의 내하력에 대한 실험적 연구를 발표하였고, Wadee *et al.*[15]은 실제 구조물에 적용할 수 있는 사장 기둥의 설계 방법을 제안하였다.

다중 크로스암과 다양한 케이블 구성과 같은 여러 조건에서 최적 초기 장력과 이에 대응하는 최대 좌굴 하중을 산정하는 것은 프리스트레스트 사장 기둥의 효율

적 설계를 위해 매우 중요하다. 그러나 대부분의 연구는 특정한 지간 길이 및 단면 형상 조건을 갖는 사장 기둥의 휨좌굴 강도에 대하여 초점을 맞추었으며, 사장기둥의 길이, 기둥 및 케이블의 단면적 및 내·외측 경간 구성 변화에 따른 사장 기둥의 최적 초기 장력 계산과 최대 좌굴 하중에 대한 해석적 연구는 제한적으로 수행되었다.

본 연구에서는 압축력을 받는 세 개의 크로스암을 갖는 프리스트레스트 사장 기둥의 휨 좌굴 거동 특성을 분석하였다. 면외방향으로 충분한 횡지지를 가정한 면내 휨좌굴에 대하여, 좌굴 발생 시 부재 별 평형방정식을 유도할 때, 부재 내부에서 축력에 대한 모멘트 증폭($P-\delta$효과)과 부재 단부 변위에 의한 모멘트 증폭($P-\Delta$효과)을 함께 고려하여 사장 기둥의 탄성 휨좌굴 하중에 대한 해석해를 도출하였다. 도출된 해석해를 적용하여 사장기둥 전체 길이, 내·외측 경간 구성비, 크로스암의 길이, 그리고 PS케이블 단면적의 변화에 따른 사장 기둥의 휨좌굴 특성을 분석하였다. 또한, 해석 변수 값의 변화에 따른 최대 좌굴하중에 대응하는 좌굴모드에서 대칭좌굴모드 및 역대칭좌굴모드가 지배하는 세장비 영역을 도출하였다. 이러한 엄밀해의 유효성은 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 적용한 해석결과와의 비교를 통해 검증하였다.

2. 삼중 크로스암을 갖는 사장 기둥의 휨좌굴

Fig. 1에 압축력을 받으며 단순지지된 삼중 크로스암을 갖는 사장 기둥이 도시되어 있다. α_e, α_m는 각각 외측 케이블과 중앙 케이블의 경사각이다. l_s^e, l_s^m는 각각 외측 케이블과 중앙 케이블의 길이를 나타낸다. β는 사장 기둥 전체 길이에 대한 중앙 크로스암의 길이비를 나타내고, γ는 중앙 크로스암의 길이에 대한 외측 크로스암의 길이비이며, η는 외측 경간과 내측 경간의 길이비를 나타낸다. 케이블의 초기 긴장력의 변화에 따른 사장 기둥의 선형 해석과 탄성 좌굴 해석은 이전의 문헌[3]에 기술되었으며, 최적긴장력과 최대 휨좌굴 하중의 산정 과정을 자세히 제시하면 다음과 같다.

케이블의 초기 긴장력(T_0), 최종 케이블 장력(T_f) 그리고 압축력으로 인한 케이블력(T)의 관계는 식 (1)과 같다.

$$T_f = T_0 - T \tag{1}$$

여기서, T는 압축력(P)으로 인하여 발생하는 케이블력을 나타낸다. 사장 기둥의 압축력에 의한 외측 및 중앙부 케이블력을 각각 T_e, T_m으로 두고 최소 일의 원리를 적용하면, 압축력과 케이블력과의 관계식이 도출된다. 즉, 식 (2)와 같이 C_1^e, C_1^m의 계수를 도입하여 압축력에 의한 외측 및 내측 경간의 케이블력을 얻는다. 특히, 일반적인 삼중 크로스암을 갖는 사장 기둥에서 압축력에 의한 외측 경간의 케이블력 감소 효과(C_1^e)가 중앙 지간의 케이블력 감소 효과(C_1^m)보다 크게 발생한다.

$$T_e = C_1^e P \tag{2a}$$

$$T_m = C_1^m P \ , \ (\ C_1^e > C_1^m\ ) \tag{2b}$$

Fig. 2에 사장 기둥의 부재력 성분이 도시되어 있다. 케이블력, 사장기둥의 축력, 크로스암의 축력이 각각 T, P, F로 표기되었다. 부재력 성분에서 위첨자 'e', 'm'은 각각 외측경간과 중앙경간을 나타내고, 아래첨자 'f'는 최종적인 좌굴상태에서의 변수를 의미한다.

케이블의 초기 장력(T_0)의 크기에 따라 사장기둥의 좌굴 거동은 매우 상이하다. 초기 장력이 아주 작은 경우에서는 압축력에 의한 좌굴 발생 시에 케이블이 느슨

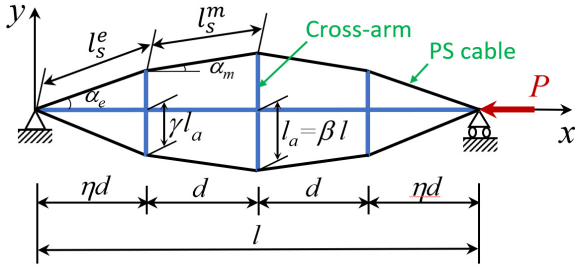


Fig. 1. Cable-stayed column under compression

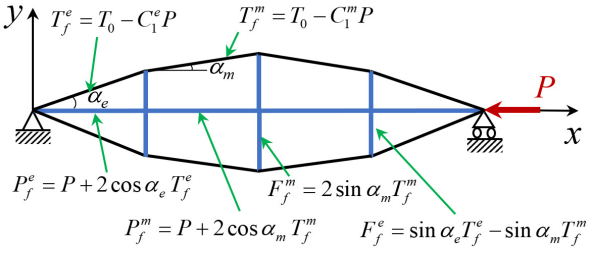


Fig. 2. Member forces under compression

(Slack)하게 되어, 초기 장력보다 압축력에 의한 케이블력의 감소량이 증가하여, 최종적인 케이블력이 음수가 된다. 즉, 케이블은 사장 기둥의 좌굴 강도에 영향을 미치지 않는다. 한편, 초기 장력이 매우 큰 영역에서는 초기 장력의 증가와 함께 좌굴하중은 감소하고 초기 장력만으로도 사장기둥은 좌굴될 수도 있다. 그러므로 사장기둥의 좌굴하중이 최대가 되는 초기 장력의 산정이 사장 기둥 설계에 가장 중요한 요소가 된다.

일반적인 삼중 크로스암을 갖는 사장 기둥에서 압축력에 의한 케이블력의 감소효과는 외측케이블이 중앙케이블보다 크게 발생하므로, 결과적으로 좌굴 발생 시에 외측 경간의 최종적인 케이블 장력이 '영'이 될 때 사장 기둥의 좌굴하중은 최대가 된다. 사장 기둥의 좌굴하중이 최대($P_{\max}$)일 때의 케이블의 초기장력(T_0)을 최적장력(T_{opt})이라고 하면, 식 (2)를 고려하여 식 (3)과 같이 최대좌굴하중($P_{\max}$)에 대응하는 외측케이블력이 도출된다. 즉, 초기장력 값에 $T_0 = T_{opt} = C_1^e P_{\max}$를 대입하여 좌굴해석을 수행하면 사장기둥의 최대 좌굴하중을 산정할 수 있다.

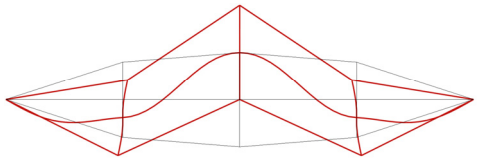
$$T_f^e = T_{opt} - C_1^e P_{\max} = 0 \tag{3}$$

Fig. 3(a), Fig. 3(b)는 각각 삼중 크로스암을 갖는 사장 기둥의 대칭 휨좌굴과 역대칭 휨좌굴 형상을 나타낸다. 대칭 좌굴은 사장 기둥 중앙점에서의 축변위와 회전각($u_m = \theta_m = 0$)이 "영"이고, 역대칭 좌굴은 사장 기둥 중앙점에서의 횡변위($v_m = 0$)가 "영"이 된다.

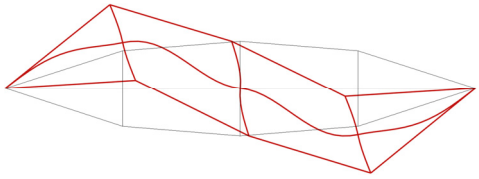
대칭 및 역대칭 휨좌굴모드에 대한 절점 변위 성분을 도시하면 Fig. 4와 같고, 대칭모드에 대한 좌굴하중을 산정하기 위하여, Fig. 4(a)에 도시된 절점변위를 고려하여 사장기둥의 부재별 평형방정식과 경계조건식을 정리하면 다음과 같은 식 (4)를 얻는다.

$$\left(\frac{\theta_e}{k_1} - \frac{2f_v^e}{k_1 P_f^e}\right)\tan(k_1\eta d) + \frac{2f_v^e \eta d}{P_f^e} - v_e = 0 \tag{4a}$$

$$\frac{(f_h^e - f_h^m)\gamma l_a}{F_f^e} - \left(\frac{\theta_m}{k_e} + \frac{(f_h^e - f_h^m)}{k_e F_f^e}\right)\tan(k_e\gamma l_a) - u_e = 0 \tag{4b}$$

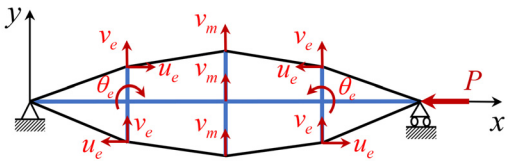


(a) Symmetric buckling mode

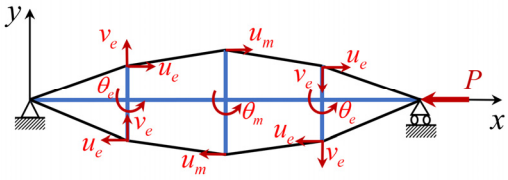


(b) Anti-symmetric buckling mode

Fig. 3. Buckling modes of cable-stayed column



(a) Symmetric buckling mode



(b) Anti-symmetric buckling mode

Fig. 4. Nodal displacements of cable-stayed column

$$\frac{M_m}{P_f^m}(1-\cos(k_2 d)) + \left(\frac{\theta_e}{k_2} - \frac{2f_v^m}{k_2 P_f^m}\right)\sin(k_2 d) + \frac{2f_v^m d}{P_f^m} - v_m + v_e = 0 \tag{4c}$$

$$\frac{M_m}{P_f^m}\sin(k_2 d) + \left(\frac{\theta_e}{k_2} - \frac{2f_v^m}{k_2 P_f^m}\right)\cos(k_2 d) + \frac{2f_v^m}{k_2 P_f^m} = 0 \tag{4d}$$

여기서,

$$M_m = 2f_h^m \gamma l_a - P v_e - 2T_f^m s_m u_e \tag{5a}$$

$$\kappa_1 = \sqrt{\frac{P_f^e}{EI}} \tag{5b}$$

$$\kappa_2 = \sqrt{\frac{P_f^m}{EI}} \tag{5c}$$

$$\kappa_e = \sqrt{\frac{F_f^e}{EI_a}} \tag{5d}$$

$$c_e = \cos\alpha_e \tag{5e}$$

$$s_e = \sin\alpha_e \tag{5f}$$

$$c_m = \cos\alpha_m \tag{5g}$$

$$s_m = \sin\alpha_m \tag{5h}$$

식 (4)에서 f_h^e, f_v^e, f_h^m, f_v^m는 외측경간(e)과 중앙경간(m)에서 케이블 장력의 수평성분(h) 및 수직성분(v)이다. 이때, 식 (3)으로부터 초기장력 $T_0 = C_1^e P_{\max}$으로 설정하고 u_e, v_e, v_m, θ_e에 대한 계수들로 구성된 행렬식이 영이 되는 좌굴조건을 도입하면 대칭모드에 대한 최대 좌굴하중(P_{max}) 및 케이블의 최적장력(T_{opt})이 산출된다.

한편, 역대칭 휨좌굴모드에 대한 좌굴하중을 산정하기 위하여, Fig. 4(b)에 도시된 절점변위를 고려하여 사장기둥의 부재별 평형방정식과 경계조건식을 정리하면 다음과 같은 식 (6)을 얻는다.

$$\left(\frac{\theta_e}{k_1} - \frac{2f_v^e}{k_1 P_f^e}\right)\tan(k_1\eta d) + \frac{2f_v^e\,\eta d}{P_f^e} - v_e = 0 \tag{6a}$$

$$\frac{(f_h^e - f_h^m)\gamma\, l_a}{F_f^e} - \left(\frac{\theta_m}{k_a} + \frac{(f_h^e - f_h^m)}{k_a F_f^e}\right)\tan(k_a\gamma\, l_a) - u_e = 0 \tag{6b}$$

$$\frac{M_m}{P_f^m}(1-\cos(k_2 d)) + \left(\frac{\theta_e}{k_2} - \frac{2f_v^m}{k_2 P_f^m}\right)\sin(k_2 d) + \frac{2f_v^m d}{P_f^m} + v_e = 0 \tag{6c}$$

$$\frac{M_m}{P_f^m}\sin(k_2 d) + \left(\frac{\theta_e}{k_2} - \frac{2f_v^m}{k_2 P_f^m}\right)\cos(k_2 d) + \frac{2f_v^m}{k_2 P_f^m} = \frac{\theta_m}{k_2} \tag{6d}$$

$$u_m + \left(\frac{\theta_m}{k_m} + \frac{2f_h^m}{k_m F_f^m}\right)\tan(k_m l_a) - \frac{2f_h^m\, l_a}{F_f^m} = 0 \tag{6e}$$

$$k_m = \sqrt{\frac{F_f^m}{EI_a}} \tag{6f}$$

식 (3)으로부터 초기장력 $T_0 = C_1^e P_{\max}$으로 설정하고 u_e, v_e, u_m, θ_e, θ_m에 대한 계수들로 구성된 행렬식이 영이 되는 좌굴조건을 도입하면 역대칭모드에 대한 최대 좌굴하중(P_{max}) 및 케이블의 최적장력(T_{opt})이 산출된다.

3. 매개 변수 해석

삼중 크로스암을 갖는 프리스트레스트 사장 기둥의 휨좌굴 특성을 분석하기 위하여, 사장 기둥의 전체 길이, 기둥 단면적에 대한 케이블 단면적 비, 크로스암의 길이비, 내·외측 경간 구성비 등을 변수로하여 최대 좌굴하중, 최적 장력 및 좌굴 모드에 대한 휨좌굴 거동 특성을 분석하였다.

Table 1에 수치해석에 사용된 변수들의 조건이 제시되었다. 5개의 해석 변수들의 변화에 따른 대칭좌굴모드와 역대칭좌굴모드에 대하여 총 23,760 경우에 대한 사장기둥의 휨좌굴 거동을 분석하였다. 한편, 사장기둥의 재질 및 기하적 특성은 이전의 문헌[3]에서 사용한 바와 동일한 값을 적용하였으며 Table 2에 제시되어있다.

식 (2)에 제시한 압축력과 케이블력과의 비례 관계를 나타내는 상수(C_1^e, C_1^m) 값을 산정하여 ABAQUS[16]를 사용한 유한요소 해석결과와 Table 3에서 비교하였다. 압축력에 의한 외측 및 내측 케이블력을 나타내는 비례

Table 1. Analysis parameters

Parameters	Min.	Max.	Inc.
Cable-stayed column length (l) [m]	2.1	12.1	0.5
Area ratio of cable to column (As/A) [%]	5	30	5
Length ratio of middle cross-arm to column (β)	0.06	0.16	0.02
Length ratio of edge cross-arm to middle cross-arm (γ)	0.7	0.9	0.1
Length ratio of edge span to middle span (η)	0.8	1.6	0.2

Table 2. Geometric and material properties

Elastic modulus of column [GPa]	201
Elastic modulus of cables [GPa]	202
Thermal expansdion coefficient [1/℃]	1.2E-5
Area of cable-stayed column and cross-arm cross-section [mm^2]	633.384
2-nd moment of inertia of cable-stayed column and cross-arm cross-section [mm^4]	83003.831

Table 3. Cable force parameters ($l = 6.1m$, $\beta = 0.1$, $\gamma = 0.8$, $\eta = 1.0$)

	This study	ABAQUS
C_1^e	0.02637	0.02637
C_1^m	0.02550	0.02550

상수(C_1^e, C_1^m)들이 유한요소 해석결과와 일치하고 있음을 알 수 있다. ABAQUS 모델에서 주기둥과 크로스암은 전단변형을 고려하지 않고 2차원 면내 거동을 하는 2절점 보요소(B23)를 적용하였고, 케이블은 2절점 트러스요소(T2D2)를 사용하였다. 주기둥과 크로스암의 연결부는 강결로 설정하였고, 일반적으로 평면 휨 거동을 모사하기 위하여 부재당 4개 보이상의 요소를 사용한다는 점을 고려하여, 주 기둥은 외측 및 중앙 기둥 부재 당 15개의 보요소 그리고 크로스암은 부재 당 5개의 보 요소를 사용하여 모델링하였다.

Table 4에서 케이블의 초기 장력(T_o)의 변화에 따른 좌굴하중을 산정하여, ABAQUS 해석모델의 결과와 비교하였다. ABAQUS 좌굴해석에서 케이블의 초기 장력은 온도 변화 조건(Predefined Field)을 적용하였다. 즉, Step-1에서 온도 변화 조건을 케이블에 부여하여 발생하는 케이블력을 산출한다. Step-2에서 단위 압축력을 재하한 고유치 해석(Eigenvalue analysis) 으로부터 Step-1에서의 케이블 장력이 재하된 경우에 대응하는 좌굴하중을 산정한다. 본 연구의 해석적 결과가 ABAQUS 해석 모델의 결과와 최대 오차 1.29 % 이하로 매우 근접하게 일치하고 있다.

Table 5에서 PS 케이블의 단면적이 사장 기둥 단면적의 10 %인 경우, 사장기둥의 길이 변화 및 여러 가지 경간 구성비에 따른 사장 기둥의 최대 좌굴하중($P_{\max}$), 최적 긴장력(T_{opt}), 유효좌굴길이계수($K = \sqrt{P_e/P_{\max}}$)에 대한 좌굴 해석 결과를 나타내었다. 또한, PS 케이블의 단면적과 사장 기둥 단면적의 비가 5 %에서 30 %까지 5 %씩 증가시키는 경우에 대한 매개 변수 해석 결과는 Fig. 5–Fig. 6에 도시하였다.

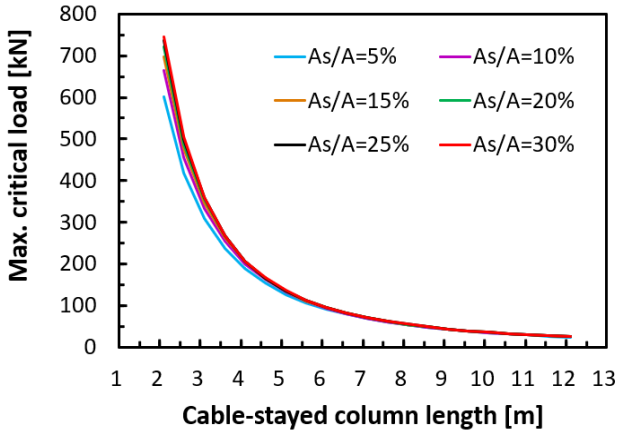
Table 4. Critical buckling load according to initial cable force ($l = 6.1m$, $\beta = 0.1$, $\gamma = 0.8$, $\eta = 1.0$)

Initial cable force [kN]	Critical load [kN]				
	This study		ABAQUS		
	Symm. mode	Anti-symm. mode	Initial temperature [℃]	Symm. mode	Anti-symm. mode
17.058	66.752	66.935	-400	66.847	66.700
34.115	56.507	57.412	-800	56.457	56.777
51.173	31.278	31.599	-1200	30.990	31.197

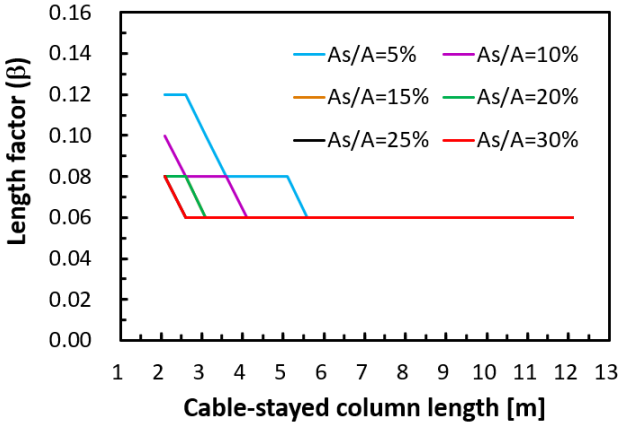
Table 5. Buckling behavior of cable-stayed columns (A_s/A=10 %)

l [m]	β	γ	η	$P_{\max}$ [kN]	T_{opt} [kN]	K	$\frac{T_{opt}}{P_e}$	Buckling mode
2.1	0.1	0.9	1.4	664.546	53.839	0.237	1.442	Anti-Sym.
2.6	0.08	0.9	1.4	455.698	37.325	0.231	1.532	Anti-Sym.
3.1	0.08	0.9	1.4	333.615	27.365	0.227	1.597	Anti-Sym.
3.6	0.08	0.9	1.4	253.548	20.817	0.224	1.638	Anti-Sym.
4.1	0.06	0.9	1.4	200.379	16.572	0.221	1.692	Anti-Sym.
4.6	0.06	0.9	1.4	162.173	13.419	0.219	1.724	Anti-Sym.
5.1	0.06	0.9	1.4	132.715	10.986	0.218	1.735	Sym.
5.6	0.06	0.9	1.4	110.440	9.145	0.218	1.742	Sym.
6.1	0.06	0.9	1.4	93.308	7.729	0.218	1.746	Sym.
6.6	0.06	0.9	1.4	79.858	6.616	0.218	1.750	Sym.
7.1	0.06	0.9	1.4	69.110	5.726	0.217	1.753	Sym.
7.6	0.06	0.8	1.4	60.638	5.028	0.217	1.764	Anti-Sym.
8.1	0.06	0.8	1.4	53.617	4.446	0.216	1.772	Anti-Sym.
8.6	0.06	0.8	1.4	47.736	3.959	0.216	1.778	Anti-Sym.
9.1	0.06	0.8	1.4	42.763	3.547	0.216	1.784	Anti-Sym.
9.6	0.06	0.8	1.4	38.522	3.195	0.215	1.788	Anti-Sym.
10.1	0.06	0.8	1.4	34.878	2.893	0.215	1.792	Anti-Sym.
10.6	0.06	0.8	1.4	31.724	2.632	0.215	1.796	Anti-Sym.
11.1	0.06	0.8	1.4	28.977	2.404	0.215	1.799	Anti-Sym.
11.6	0.06	0.8	1.4	26.570	2.204	0.215	1.801	Anti-Sym.
12.1	0.06	0.8	1.4	24.449	2.028	0.214	1.804	Anti-Sym.

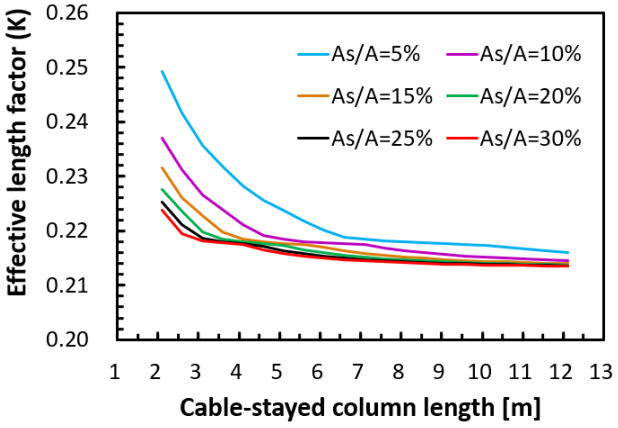
매개변수 해석결과, 프리스트레스트 사장 기둥의 최대 좌굴하중은 기둥 길이의 증가와 함께 급속히 감소하며(Fig. 5(a)), 기둥 단면적에 대한 케이블 단면적 비의 영향이 큼을 알 수 있다. 즉, 케이블 단면적이 기둥 단면적의 5 % 경우, 사장 기둥의 유효 좌굴길이는 사장 기둥의 길이가 증가할수록 약 0.25에서 0.22까지 감소하고 있으나, 케이블 단면적이 증가할수록 기둥 길이 증가에 따른 유효 좌굴길이의 감소효과는 크지 않음을 확인하였다(Fig. 5(b)).



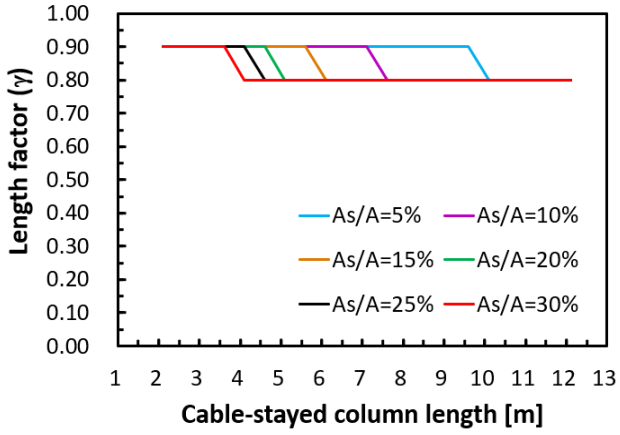
(a) Max. critical load



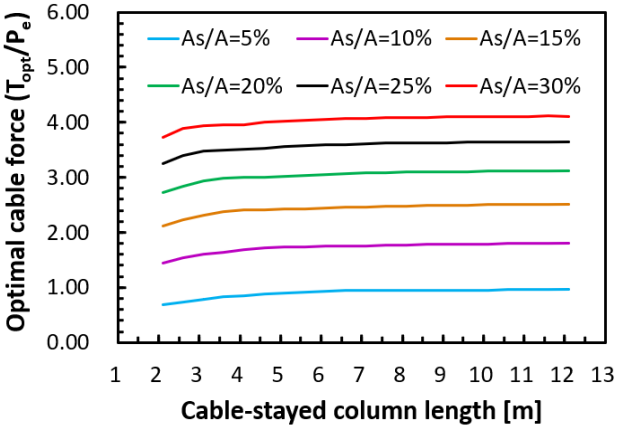
(d) Length factor of middle cross-arm



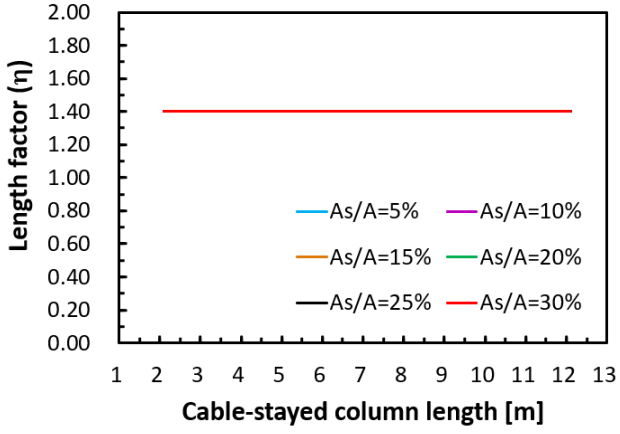
(b) Effective length factor



(e) Length factor of edge cross-arm

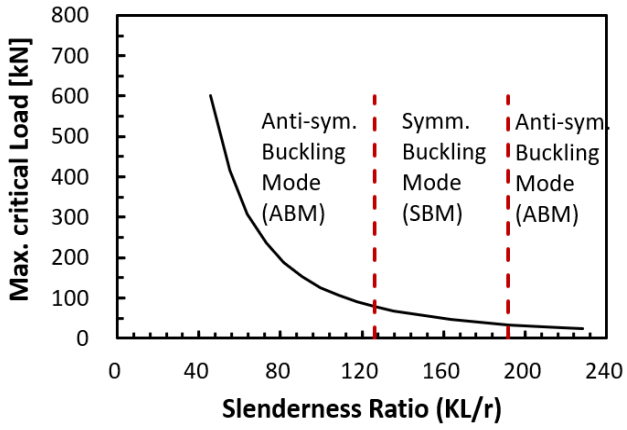


(c) Optimal cable force ratio

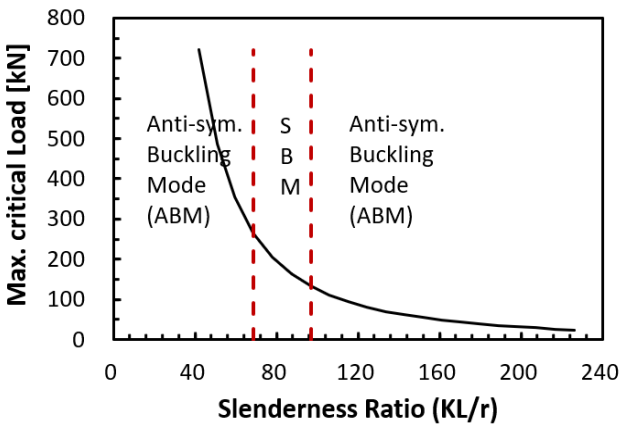


(f) Length factor of edge span

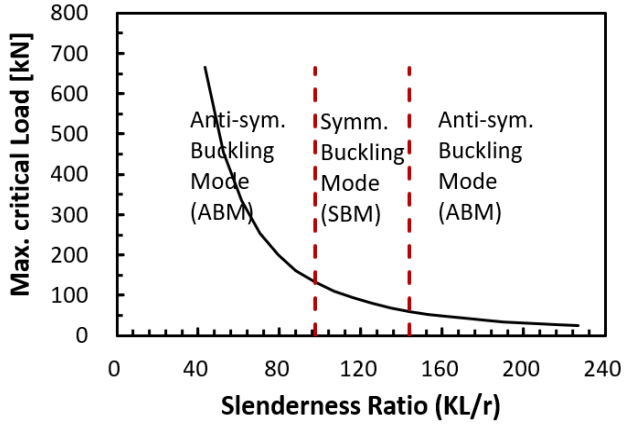
Fig. 5. Buckling behavior of cable-stayed columns



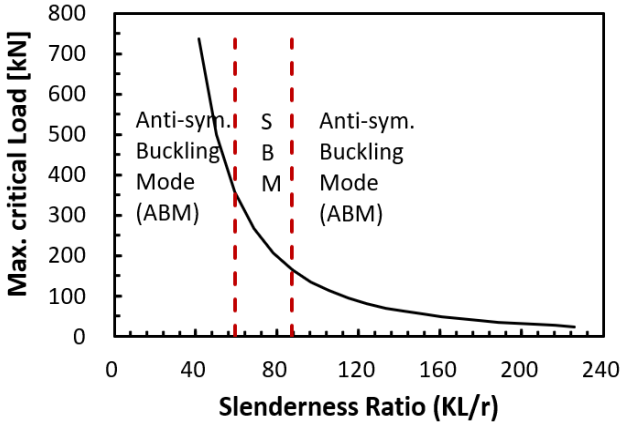
(a) As/A=5 %



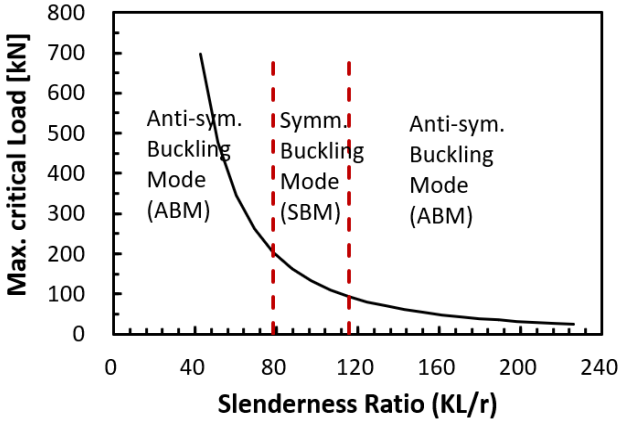
(d) As/A=20 %



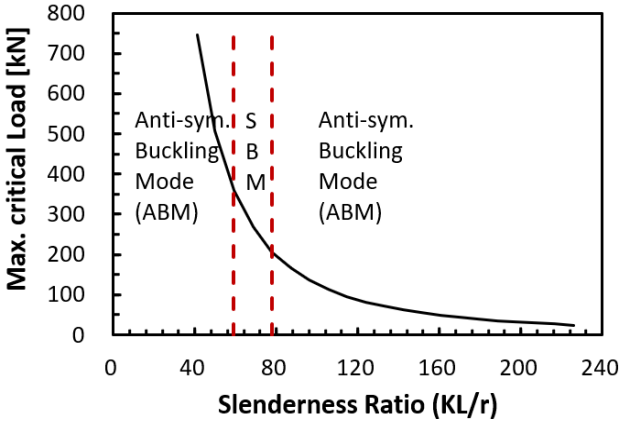
(b) As/A=10 %



(e) As/A=25 %



(c) As/A=15 %



(f) As/A=30 %

Fig. 6. Max. critical loads of cable-stayed columns

오일러 좌굴 하중에 대한 최적 장력비의 크기도 케이블 단면적이 크게 영향을 미치고 있다. 케이블 단면적비가 5 %에서 30 %로 증가함에 따라, 오일러 좌굴하중에 대한 최적 장력비는 약 0.8에서부터 4.0까지 증가하며, 케이블 단면적이 일정한 경우에 사장 기둥의 길이 증가에 따른 최적 장력비의 변화는 거의 일정하게 나타났다(Fig. 5(c)).

한편, 최대좌굴하중에 대응하는 중앙부 크로스암의 길이비(β)는, 케이블 단면적비가 5 %인 경우, 전체 기둥 길이의 증가와 함께 12 %에서 6 % 정도의 범위에 있다. 하지만 케이블 단면적비가 증가할수록 거의 일정한 범위에 있게 되어, 기둥 단면적에 대한 케이블 단면적비가 30 %이면 중앙부 크로스암의 최적 길이는 사장 기둥 전체 길이의 약 6 %의 값을 갖는다(Fig. 5(d)).

또한, 최대좌굴하중에 대응하는 외측/중앙부 크로스암의 길이비(γ)와 외측/중앙부 경간 길이비(η)는 케이블 단면적비에 크게 영향을 받지 않는다. 외측/중앙부 크로스암의 길이비(γ)는 사장 기둥 전체 길이와 케이블 단면적에 대하여 0.8에서 0.9의 범위에 있고(Fig. 5(e)), 외측/중앙부 경간 길이비(η)는 케이블 단면적과 사장 기둥 길이에 상관없이 η=1.4일 때, 최대 좌굴하중이 도출된다(Fig. 5(f)).

Fig. 6에서 프리스트레스트 사장 기둥의 세장비의 변화에 따른 최대 좌굴하중과 좌굴모드의 변화가 케이블 단면적비의 증가와 함께 도시되었다. 전체적으로 세장비의 증가와 함께 최대좌굴하중은 급격히 감소하고 있으며, 세장비가 작은 영역에서는 역대칭 좌굴모드 그리고 중간주 영역에서는 대칭 좌굴모드, 세장비가 큰 장주영역에서는 다시 역대칭 좌굴모드가 최대 좌굴하중을 지배하고 있음을 알 수 있다. 특히, 케이블 단면적이 클수록 대칭 좌굴모드가 나타나는 중간주 영역의 세장비 범위는 감소함을 확인하였다.

4. 결 론

이 논문에서는 압축력을 받는 세 개의 크로스암을 갖는 프리스트레스트 사장기둥의 휨좌굴 거동 특성을 분석하였다. 사장기둥 전체 길이, 내·외측 경간 구성비, 크로스암의 길이, 그리고 PS케이블 단면적의 변화에 따른 좌굴강도를 극대화하는 초기 긴장력을 산정하고 휨좌굴 거동을 파악하였다. 또한, 해석 변수 값의 변화에 따른 최대 좌굴하중에 대응하는 좌굴모드에서 대칭 좌굴모드 및 역대칭 좌굴모드가 지배하는 세장비 영역을 도출하였으며, 해석결과를 요약하면 다음과 같다.

프리스트레스트 사장 기둥의 좌굴하중은 지간 길이의 증가와 함께 급속히 감소하며, 케이블 단면적이 증가할수록 기둥 길이 증가에 따른 유효 좌굴길이의 감소효과는 크지 않음을 확인하였다. 오일러 좌굴 하중에 대한 최적 장력비는 사장 기둥 단면적에 대한 케이블 단면적비가 5 %에서 30 %로 증가함에 따라 약 0.8에서부터 4.0까지 증가하였다.

최대좌굴하중에 대응하는 중앙부 크로스암의 길이비는, 케이블 단면적비가 5 %인 경우, 전체 기둥 길이의 증가와 함께 6 %–12 % 정도의 범위에 있다. 하지만 케이블 단면적이 증가할수록 중앙부 크로스암의 길이비에 대한 변동폭은 급격히 감소한다.

프리스트레스트 사장 기둥의 세장비의 증가에 따른 좌굴모드 분석 결과, 세장비가 작은 영역에서는 역대칭 좌굴모드, 중간주 영역에서는 대칭 좌굴모드, 세장비가 큰 장주영역에서는 역대칭 좌굴모드가 최대 좌굴하중에 대응하는 모드이며, 케이블의 단면적이 증가할수록 대칭 좌굴모드가 발생하는 중간주 영역이 감소하고 있음을 확인하였다. 또한, 이 논문은 세 개의 크로스암을 갖는 프리스트레스트 사장기둥의 휨좌굴 거동 특성을 분석하였으며, 크로스암의 개수에 따라 사장 기둥의 좌굴 특성은 상이할 것으로 판단된다.

참고문헌(References)

[1] Kang, H.-S., and Kim, T.S. (2023) Experimental Study on Buckling Strength of Cold-Formed Stainless Steel SHS Compression Members with Slender Section, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.6, pp.347−356 (in Korean).

[2] Park, Y.-M. (2024) Evaluation of Buckling Coefficients for Compression Plates Reinforced with Multiple T-section Stiffeners, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.36, No.4, pp.243−251 (in Korean).

[3] Kim, M.Y., and Kim, S.B. (2025) Flexural Buckling Behavior of Pre-Stressed Cable-Stayed Columns,

Journal of Korean Society of Steel Construction, KSSC, Vol.37, No.6, pp.407−415 (in Korean).

[4] Krishnan, S. (2020) Cable-Stayed Columns and Their Applications in Building Structures, *Journal of Building Engineering*, Elsevier, Vol.27, 100984.

[5] Kim, M.-Y., Mehdi, A.I., Hayat, U., and Kim, S.-B. (2022) Stabilizing Effects of Discrete Deviators on LTB of Mono-Symmetric Thin-Walled Beams Pre-Stressed by Rectilinear Tendon Cables, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.176, 109329

[6] Kim, S.-B., Kim, M.-Y., and Mehdi, A.I. (2024) Experimental Evaluation on LTB Strength of Steel Beams Externally Pre-stressed with Un-bonded Tendon Bar, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.24, pp.488−505.

[7] Smith, E.A. (1985) Behavior of Columns with Pretensioned Stays, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.111, No.5, pp.961−972.

[8] Hafez, H.H., Temple, M.C., and Ellis, J.S. (1979) Pretensioning of Single-Crossarm Stayed Columns, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.105, No.2, pp.359−375.

[9] Jemah, A.K., and Williams, F.W. (1990) Compound Stayed Column for Use in Space, *Computers & Structures*, Elsevier, Vol.34, No.1, pp.171−178.

[10] Jemah, A.K., and Williams, F.W. (1990) Parametric Experiments on Stayed Columns with Slender Bipods, *International Journal of Mechanical Sciences*, Elsevier, Vol.32, No.2, pp.83−100.

[11] Saito, D., and Wadee, M.A. (2008) Post-Buckling Behaviour of Prestressed Steel Stayed Columns, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.30, No.5, pp.1224−1239.

[12] Saito, D., and Wadee, M.A. (2009) Numerical Studies of Interactive Buckling in Prestressed Steel Stayed Columns, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.31, No.2, pp.432−443.

[13] Saito, D., and Wadee, M.A. (2009) Buckling Behaviour of Prestressed Steel Stayed Columns with Imperfections and Stress Limitation, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.31, No.1, pp.1−5.

[14] Osofero, A.I., Wadee, M.A., and Gardner, L. (2012) Experimental Study of Critical and Post-Buckling Behaviour of Prestressed Stayed Columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.79, pp.226−241.

[15] Wadee, M.A., Gardner, L., and Osofero, A.I. (2013) Design of Prestressed Stayed Columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.80, pp.287−298.

[16] Dassault Systèmes Simulia Corp (2019) *Abaqus User's Manual*, DSS, USA.

요 약: 본 연구에서는 압축력을 받는 세 개의 크로스암을 갖는 사장 기둥의 휨 좌굴 거동을 분석하였다. $P-\delta$ 및 $P-\Delta$ 효과를 고려하여 세 개의 수직 크로스암을 갖는 기둥의 탄성 휨좌굴 하중에 대한 해석해를 도출하였다. 도출된 해석해를 적용하여 사장기둥 전체 길이, 내·외측 경간 구성비, 크로스암의 길이, 그리고 PS케이블 단면적의 변화에 따른 좌굴강도를 극대화하는 초기 긴장력을 산정하고, 휨좌굴 특성을 분석하였다. 또한, 해석 변수 값의 변화에 따른 최대 좌굴하중에 대응하는 좌굴모드에서 대칭좌굴모드 및 역대칭좌굴모드가 지배하는 세장비 영역을 도출하였다. 이러한 엄밀해의 유효성은 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 적용한 해석 결과와의 비교를 통해 검증하였다.

핵심용어 : 삼중 크로스암, 휨 좌굴, 프리스트레스트, 사장 기둥