



설계기준에 따른 매입형 강합성 기둥의 압축강도

조경훈¹ · 김성보^{2*}

¹박사과정, 충북대학교, 토목공학부, ²교수, 충북대학교, 토목공학부

Compressive Strength of Concrete-Encased Composite Columns according to Design Specifications

Cho, Kyung Hun¹, Kim, Sung Bo²

¹Ph.D Course, School of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

²Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

Abstract - In this paper, the compressive strength of concrete-encased composite columns is evaluated and compared to the results by applying the criteria shown in several design specifications, i.e. AASHTO-LRFD, AISC, Korean Highway Bridge Design Code(Limit state design) and Korea Design Standard, respectively. The nominal and design compressive strength according to the length of the composite column is estimated based on the design specifications and compared to the experimental results in the literature. It is shown that Korea Design Standard(KDS 14 31 10) underestimates the design compressive strength of steel composite column comparing to the other design specifications.

Keywords - Compressive Strength, Concrete, Encased, Composite, Column, Design Specification

1. 서론

강합성 단면을 갖는 기둥은 Fig. 1.에 도시된 바와 같이 매입형, 충전형 및 조합형으로 구분된다. 매입형 합성단면은 강형이 콘크리트에 매입된 형태이며, 충전형은 원형 또는 각형 강관에 콘크리트가 충전된 형태이다. 조합형은 매입형과 충전형이 결합된 단면 형태를 나타낸다. 특히, 매입형 합성기둥은 콘크리트와 강형의 강성이 결합되어 매입된 강형의 국부좌굴이 발생하지 않고 압축강도가 증진되는 효과와 더불어 화재에 의한 강형의 강도 저하를 콘크리트가 지연시키는 장점을 가지고 있다.

이러한 구조적 장점을 가지고 있는 강합성기둥의 압축강도에 대하여 실험적 및 해석적 연구가 활발히 진행되고 있으며^[1]^[11], 여러 설계기준에 이를 반영하여 강합성기둥의 공칭 및 설계 압축강도를 규정하고 있다.

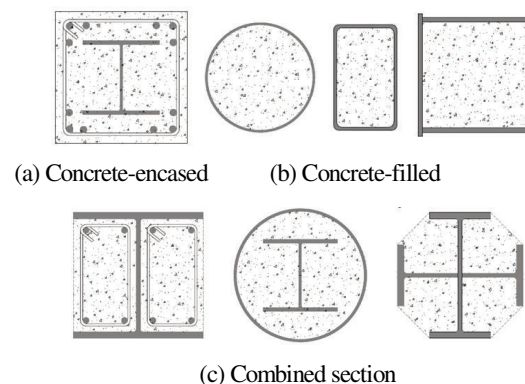


Fig. 1. Type of composite column section

도로교설계기준(한계상태설계법)^[12]에 제시된 강합성 기둥의 압축강도는 AASHTO-LRFD^[13]에서 기술된 것과 동일하다. 즉, 공칭압축강도를 비합성형 기둥에 적용하는 동일한 형태의 식을 사용한다. 단지, 합성효과를 고려하여 수정된 탄성계수 및 항복강도를 적용하며, 매입형과 충전형에 대하여 합성단면 상수값을 상이하게 사용한다.

또한, 강구조부재설계기준(KDS 14 31 10)^[14]은 AISC(2010)^[15]에서 규정된 바와 일치하며, 매입형과 충전형을 구분하여 공칭 압축강도식을 제시하고 있다. 한편, 강교설계기준(KDS 24 14 31)^[16]

Note.-Discussion open until December 31, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 23, 2019; revised June 05, 2019; approved on June 05, 2019.

Copyright © 2019 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-82-43-261-3241 Fax. +82-43-275-2377

E-mail. sbkim@chungbuk.ac.kr

은 강구조부재설계기준(KDS 14 31 10)을 따른다고 간략히 기술되어 있다.

2016년에 AISC^[17]는 종방향철근과 콘크리트의 휨강성의 영향을 기존의 AISC(2010)보다 크게 반영하여 합성단면의 유효휨강성을 적용한 강합성 기둥의 압축강도를 발표하였다. 하지만 이러한 다양한 설계 규정에 따른 매입형 강합성 기둥의 압축강도를 상호 비교하고 분석한 연구결과는 아직 미비한 실정이다.

이 논문에서는 매입형 강합성 기둥의 압축강도를 국내 · 외 여러 설계기준에 나타난 압축강도 평가식들에 의하여 산정하고 그 결과를 실험결과와 함께 비교 분석하였다. 다양한 단면과 길이를 갖는 매입형 강합성 기둥에 대하여 여러 설계기준에 따른 공칭 및 설계 압축강도를 산정하고 압축강도에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 설계기준

2.1 도로교 설계기준

도로교설계기준(한계상태설계법)^[12]에 제시된 강합성 기둥의 압축강도 산정식은 AASHTO-LRFD^[13]에서 기술된 것과 동일하다.

합성기둥의 설계압축강도는 아래의 식 (1)과 같다.

$$P_u = \phi P_n \quad (1)$$

여기서, 저항계수 $\phi = 0.9$ 이고 공칭압축강도 P_n 는 매입형과 충전형에 대하여 동일한 형태의 식 (2)를 적용하며, Table 1에 표기된 합성단면상수 값만을 다르게 적용한다. 설계 세부조건으로서, 1) 강재 또는 강판의 단면적이 전체 단면적의 4% 이하일 경우에는 철근콘크리트기둥으로 계산하고, 2) 콘크리트 압축강도는 20 MPa 이상, 55 MPa 이하로 하며, 3) 공칭압축강도 계산을 위한 강재와 종방향철근의 항복강도는 400 MPa를 넘지 않도록 하는 규정이 제시되고 있다.

공칭압축강도 P_n 은 세장비파라미터에 따라 비합성형 단면을 갖는 기둥의 압축강도 산정식과 동일한 형태의 식 (2)로부터 얻는다. 단, 식 (3)에 나타난 바와 같이 합성기둥의 세장비파라미터(λ)에서 강재의 항복강도(F_y) 대신에 강재와 종방향철근 및 콘크리트의 영향을 함께 고려하여 수정된 압축강도(F_e)를 적용하고, 강재의 탄성계수(E) 대신에 강재와 콘크리트 단면적을 고려하여 수정된 탄성계수(E_e)를 적용한 형태이다.

$$P_n = \begin{cases} 0.66 \lambda^2 F_e A_s & (\lambda \leq 2.25) \\ \frac{0.88 F_e A_s}{\lambda} & (\lambda > 2.25) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } \lambda = \left(\frac{KL}{r_s \pi} \right)^2 \frac{F_e}{E_e} \quad (3)$$

$$F_e = F_y + C_1 F_{yr} \left(\frac{A_r}{A_s} \right) + C_2 f'_c \left(\frac{A_c}{A_s} \right)$$

$$E_e = E \left[1 + \left(\frac{C_3}{n} \right) \left(\frac{A_c}{A_s} \right) \right]$$

윗 식 (3)에서, 합성형 기둥의 세장비파라미터(λ)는 강합성형 기둥에 매립된 강형의 회전반경(r_s)을 사용하여 계산하되, 이 값은 휨을 받는 합성단면 전체 폭의 0.3배 이상이어야 한다. 수정된 압축강도(F_e)는 강형의 압축강도, 종방향철근의 영향 및 콘크리트의 환산강도를 모두 포함하고 있는 반면에, 수정된 탄성계수(E_e)는 종방향철근의 영향을 무시하여 강형과 콘크리트의 영향만을 고려하고 있다. 또한, 합성단면을 갖는 기둥의 좌굴하중 평가에 적용되는 수정된 탄성계수(E_e)에서 강재와 콘크리트의 단면2차모멘트의 비가 사용되지 않고, 단면적의 비를 사용하는 특징이 있다. 또한, 식 (3)에 사용되는 매입형과 충전형 합성기둥에 대한 합성단면상수, C_1 , C_2 , C_3 를 Table 1과 같이 다르게 적용한다.

Table 1. Composite column constants

	C_1	C_2	C_3
Encased shapes	0.7	0.6	0.2
Filled tubes	1.0	0.85	0.4

2.2 강구조 설계기준

강구조부재설계기준(KDS 14 31 10)^[14]에 제시된 강합성 기둥의 압축강도 산정식은 AISC(2010)^[15]에서 규정된 것과 동일하다. 또한, 강교설계기준(KDS 24 14 31)^[16]은 강구조부재설계기준(KDS 14 31 10)을 따른다고 간략히 기술되어 있다.

$$P_n = \begin{cases} P_{no} \left(0.658 \frac{P_{no}}{P_e} \right) & \left(\frac{P_{no}}{P_e} \leq 2.25 \right) \\ 0.877 P_e & \left(\frac{P_{no}}{P_e} > 2.25 \right) \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{여기서, } P_{no} = F_y A_s + F_{ysr} A_{sr} + 0.85 f'_c A_c \quad (5)$$

$$P_e = \frac{\pi^2 E_{eff}}{(KL)^2}$$

$$E_{eff} = E_s I_s + 0.5 E_s I_{sr} + C_1 E_c I_c$$

$$C_1 = 0.1 + \frac{2 A_s}{A_c + A_s} \leq 0.3$$

강합성기둥의 설계압축강도는 도로교설계기준(한계상태설계법)^[12]과 동일한 식 (1)과 같으나, 저항계수가 $\phi = 0.75$ 으로서 도로

교설계기준의 저항계수 $\phi = 0.9$ 와 상이하다. 또한, 공칭압축강도 P_n 를 산정하는 식은 매입형 합성기둥과 충전형합성기둥을 구분하여 다르게 제시되고 있으며 매입형의 경우 식 (4)와 같다.

식 (4)에서, 비탄성좌굴과 탄성좌굴영역을 구분하는 세장비 파라미터가 P_{no}/P_e 으로서 도로교설계기준의(λ)와 상이하다.

또한, 식 (5)에 나타난 바와 같이, 길이효과를 무시한 압축력 P_{no} 는 매입된 강형의 항복하중($F_y A_s$), 종방향철근의 항복하중($F_{ysr} A_{sr}$) 및 콘크리트의 압축강도($0.85 f'_c A_c$) 영향을 모두 고려하여 산정한다. 그리고, 합성기둥의 휨좌굴하중(P_e)에서 유효휨강성(EI_{eff})은 강형의 휨강성($E_s I_s$), 종방향철근의 휨강성($E_s I_{sr}$)의 50%, 콘크리트의 휨강성($E_c I_c$)에 합성단면상수 C_1 을 곱하여 산정한다. 여기서, 합성단면상수 C_1 은 콘크리트와 강형의 단면적의 합($A_c + A_s$)에 대한 강형의 단면적(A_s)의 비에 따라 계산되며, 종방향 철근의 영향은 무시하고 있다.

한편, AISC(2016)^[17]은 합성기둥의 유효휨강성(EI_{eff})에서 매입된 강형과 종방향 철근의 휨강성을 모두 반영하여 콘크리트 휨강성의 영향을 기존의 AISC(2010) 보다 크게 평가하고 있다. 즉, AISC(2010)과 강구조 설계기준에서는 합성기둥의 유효휨강성(EI_{eff}) 계산 과정에서 종방향 철근의 휨강성을 50%로 포함하고 있으나, AISC(2016)에서는 식 (6)에 나타난 바와 같이 종방향 철근 휨강성을 100% 반영한다. 또한, 콘크리트 압축강도의 기여분을 반영하는 합성단면상수 C_1 은 합성단면을 구성하고 있는 모든 요소-콘크리트, 강재, 종방향 철근-의 단면적의 합($A_g = A_c + A_s + A_{sr}$)에 대한 강재와 종방향 철근의 단면적($A_s + A_{sr}$)의 비에 따라 식 (6)과 같이 수정되었다.

$$EI_{eff} = E_s I_s + E_s I_{sr} + C_1 E_c I_c \quad (6)$$

$$C_1 = 0.25 + 3 \left(\frac{A_s + A_{sr}}{A_g} \right) \leq 0.7$$

도로교설계기준에서 적용되는 합성효과를 고려한 수정된 압축강도(F_e)는 강구조설계기준에서 나타난 길이효과를 무시한 압축력(P_{no})에 대응된다. 즉, 식 (3)의 F_e 에 강재의 단면적을 곱하면 다음의 식을 얻는다.

$$F_e A_s = F_y A_s + C_1 F_{ysr} A_{sr} + C_2 f'_c A_c \quad (7)$$

여기서 매입형 합성기둥인 경우 표 1에 제시된 바와같이 합성단면상수 $C_1=0.7$, $C_2=0.6$ 이다. 식 (7)을 식 (5)의 강구조설계기준의 P_{no} 에 비교하면 $C_1=1.0$, $C_2=0.85$ 를 적용하는 것에 해당함을 알 수 있다. 즉, 도로교설계기준에서는 길이효과를 무시한 합성기둥의 공칭압축강도를 강구조설계기준보다 다소 저평가하고 있다.

3. 분석 및 고찰

매입형 강합성 기둥의 압축강도에 대한 실험적 연구결과는 다수의 문헌에 발표되었다. Janss and Anslin^[4]은 240x240mm와 320x210mm 크기의 직사각형 단면을 갖는 강합성 기둥에 서로 다른 두 개의 강형을 매입하고, 강형의 항복강도, 콘크리트의 압축강도 및 유효좌굴길이를 변수로 압축강도를 실험적으로 평가하였다. Table 2에 도로교설계기준(AASHTO), 강구조설계기준(KDS14 31 10, AISC2010) 및 AISC(2016)에 의한 공칭압축강도 P_{AASHTO} , P_{KDS} , P_{AISC16} 가 Janss and Anslin^[4] 실험결과와 함께 수록되었으며, Fig. 2에 실험결과와 설계기준에 의한 공칭압축강도가 비교되어 있다. Table 2에서 계산된 P_{AASHTO} , P_{KDS} , P_{AISC16} 의 공칭압축강도와 실험값의 비에 대한 평균 백분율은 각각 87%, 83%, 98%으로서 AISC(2010)에 근거한 강구조설계기준(KDS 14 31 10)에 의한 공칭압축강도가 실험값에 비하여 매입형 강합성 기둥의 압축강도를 가장 저평가하고 있음을 알 수 있다.

한편, Stevens^[8]은 127x89mm와 178x165mm 크기의 직사각형 단면을 갖는 강합성 기둥에 서로 다른 두 개의 강형을 각각 매입하고, 강형의 항복강도, 콘크리트의 압축강도 및 유효좌굴길이를 변수로 압축강도 실험을 수행하였다. 이 실험의 특징은 대부분의 실험시편에서 종방향 철근을 배근하지 않고 수행된 점이다.

Table 3에 도로교설계기준(AASHTO), 강구조설계기준(KDS14 31 10, AISC2010) 및 AISC(2016)에 의한 공칭압축강도 P_{AASHTO} , P_{KDS} , P_{AISC16} 가 제시되었으며 Fig. 3과 4에 실험결과와 설계기준에 의한 공칭압축강도와 함께 도시되었다. P_{AASHTO} , P_{KDS} , P_{AISC16} 의 공칭압축강도와 실험값의 비에 대한 평균 백분율은 각각 89%, 66%, 81%으로서 강구조설계기준(KDS 14 31 10)이 압축강도를 가장 저평가하고 있으며 AASHTO-LRFD에 근거한 도로교설계기준(한계상태설계법)이 비교적 실험결과와 유사한 공칭압축강도를 제시하고 있다.

또한, Chen et al.^[9]은 비교적 단면이 큰 356x356mm 단면을 갖는 강합성 기둥의 압축강도를 실험적으로 도출하였다. Table 4에 여러 설계기준에 의한 공칭압축강도와 함께 제시되었으며 Fig. 5에 도시되어 있다. P_{AASHTO} , P_{KDS} , P_{AISC16} 의 공칭압축강도와 실험값의 비에 대한 평균 백분율은 각각 75%, 80%, 89%으로서 이전의 실험결과와 유사하게 AISC2016에 의한 압축강도가 실험결과와 가장 근접하고 있다. 합성기둥의 단주영역에서는 도로교설계기준(AASHTO)의 의한 공칭압축강도가 다른 설계기준의 60 ~ 85%의 수준으로 산정되며, 장주영역에서는 강구조설계기준(KDS 14 31 10)에 의한 결과는 다른 설계기준에 비하여 50 ~ 60% 수준으로 압축강도를 가장 저평가하고 있음을 확인하였다.

Table 2-4 및 Fig. 2-5.에서 분석한 결과, 단주영역과 장주영역에서 각각 도로교설계기준과 강구조설계기준(KDS14 31 10)이 매입형 강합성 기둥의 공칭압축강도를 가장 저평가하고 있음을 확인하였다. 이는 식 (7)에서 분석한 바와 같이 도로교설계기준에서는 길이효과를 무시한 합성기둥의 공칭압축강도를 다소 저평가하고 있으며, 강구조설계기준(KDS14 31 10)에서는 강합성 기둥의 유효휨강성(EI_{eff})을 나타내는 식 (5)에서 종방향철근의 휨강성을 50%만 반영하고 콘크리트의 휨강성을 다른 설계기준에 비하여 작게 반영한 결과이다. 한편, AISC2016에서는 강합성 기둥의 유효휨강성(EI_{eff})을 산정할 때 콘크리트 기여분을 AISC2010보다 크게 반영하는 식 (6)을 적용하고 있다.

Fig. 6.에 500x500mm 단면에 두 종류의 강형이 매입된 강합성 기둥의 단면 및 재료 물성치를 도시하였다. 매입된 형강은 각각

H250x250x9x14와 H350x350x12x19이다. 형강의 탄성계수는 210GPa, 항복강도는 355MPa, 콘크리트의 탄성계수는 30GPa, 압축강도 35MPa, 철근의 탄성계수는 200MPa, 항복강도는 400MPa이다. 합성기둥의 길이 증가에 따른 압축강도를 산정하기 위하여 강구조설계기준 및 도로교설계기준에서 정의된 세장비파라미터를 계산하여 Fig. 7.과 Table 5-6에 나타내었다.

비탄성좌굴과 탄성좌굴 영역을 구분하는 세장비파라미터는 도로교설계기준에서는 식 (3)의 λ 이고 강구조설계기준에서는 식 (4)의 P_{no}/P_e 이다. 강합성 기둥의 길이가 증가할수록 강구조설계기준(KDS 14 31 10)에서 적용되는 세장비파라미터가 도로교설계기준(AASHTO) 및 AISC2016에 적용되는 세장비파라미터에 비하여 급격하게 증가하여 공칭압축강도를 저감시키는 요인이 됨을 확인할 수 있다.

Table 2. Comparison of experimental results carried out by Janss and Anslin(1974) and design specifications

No.	Cross Section [mm]		Steel shape [mm]				A_r [mm ²]	F_y [MPa]	f'_c [MPa]	F_{yr} [MPa]	KL [m]	P_{test}	P_{AASHTO}	P_{AISC16}	P_{KDS}
	H	B	d	b_f	t_f	t_w									
1	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	284.8	37.9	413.7	4.28	2147.1	1871.0	2073.2	1580.3
2	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	284.8	35.0	413.7	4.28	2176.5	1871.0	2073.2	1580.3
3	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	273.0	33.5	413.7	4.27	2088.4	1872.3	2075.2	1582.9
4	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	292.3	33.5	413.7	3.48	2343.3	2078.1	2377.2	1985.6
5	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	292.3	29.2	413.7	3.47	2176.5	2081.2	2381.8	1992.1
6	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	292.3	35.0	413.7	3.48	2578.6	2080.0	2380.0	1989.5
7	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	275.8	37.5	413.7	2.49	2627.6	2299.4	2712.1	2474.2
8	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	275.8	37.9	413.7	2.48	2235.2	2301.8	2715.9	2479.9
9	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	275.8	33.5	413.7	2.49	2343.3	2299.4	2712.1	2474.2
10	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	275.8	33.5	413.7	1.29	2548.8	2483.9	2999.0	2926.2
11	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	275.8	29.2	413.7	1.28	2470.5	2484.4	2999.9	2927.6
12	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	275.8	35.3	413.7	1.25	2745.0	2487.7	3005.0	2936.0
13	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	378.5	31.2	413.7	3.49	2353.1	2076.9	2375.3	1983.0
14	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	378.5	33.6	413.7	3.48	2627.6	2078.7	2378.1	1986.9
15	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	378.5	31.9	413.7	3.48	2470.5	2078.1	2377.2	1985.6
16	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	501.2	31.2	413.7	4.27	2353.1	1872.3	2075.2	1582.9
17	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	501.2	33.6	413.7	4.27	2156.9	1872.3	2075.2	1582.9
18	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	496.4	32.0	413.7	4.27	2480.3	1872.3	2075.2	1582.9
19	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	487.5	31.8	413.7	3.49	2470.5	2076.9	2375.3	1983.0
20	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	487.5	33.7	413.7	3.49	2617.8	2077.5	2376.2	1984.3
21	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	487.5	32.0	413.7	3.49	2568.4	2077.5	2376.2	1984.3
22	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	499.2	33.5	413.7	2.48	2431.4	2300.4	2713.6	2476.5
23	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	499.2	37.9	413.7	2.48	2362.9	2300.4	2713.6	2476.5
24	240.0	240.0	140.0	140.0	12.0	7.0	451.6	499.2	37.5	413.7	2.49	2548.8	2299.4	2712.1	2474.2
25	320.0	210.1	220.0	110.0	9.2	5.9	451.6	272.3	29.2	413.7	3.49	2284.2	1902.6	1901.2	1417.1
26	320.0	210.1	220.0	110.0	9.2	5.9	451.6	272.3	37.5	413.7	3.49	2529.2	1902.6	1901.2	1417.1
27	320.0	210.1	220.0	110.0	9.2	5.9	451.6	272.3	33.7	413.7	3.48	2058.6	1903.0	1902.2	1418.4
28	320.0	210.1	220.0	110.0	9.2	5.9	451.6	487.5	33.5	413.7	3.48	2303.7	1903.0	1902.2	1418.4
29	320.0	210.1	220.0	110.0	9.2	5.9	451.6	487.5	31.0	413.7	2.48	2705.8	2021.1	2247.2	1935.9
30	320.0	210.1	220.0	110.0	9.2	5.9	451.6	491.6	31.9	413.7	3.48	2362.9	1903.3	1903.1	1419.7

Table 3. Comparison of experimental results carried out by Stevens(1965) and design specifications

No.	Cross Section [mm]		Steel shape [mm]				A_r [mm ²]	F_y [MPa]	f'_c [MPa]	F_{yr} [MPa]	KL [m]	P_{test}	P_{AASHTO}	P_{AISC16}	P_{KDS}
	H	B	d	b_f	t_f	t_w									
31	127.0	88.9	76.0	38.0	6.4	4.1	0.0	279.9	17.7	275.8	1.17	362.1	296.0	306.1	264.4
32	127.0	88.9	76.0	38.0	6.4	4.1	0.0	279.9	12.7	275.8	1.63	267.3	271.6	255.6	192.5
33	127.0	88.9	76.0	38.0	6.4	4.1	0.0	279.9	15.4	275.8	2.08	280.2	242.2	201.2	126.4
34	127.0	88.9	76.0	38.0	6.4	4.1	0.0	279.9	13.8	275.8	2.54	193.9	210.0	149.3	85.0
35	127.0	88.9	76.0	38.0	6.4	4.1	0.0	279.9	17.4	275.8	3.00	225.1	177.0	107.5	61.1
36	127.0	88.9	76.0	38.0	6.4	4.1	0.0	279.9	15.2	275.8	3.45	160.6	145.0	80.9	46.0
37	127.0	88.9	76.0	38.0	6.4	4.1	0.0	279.9	19.0	275.8	3.91	150.8	114.9	63.1	35.9
38	177.8	165.1	127.0	114.0	13.0	7.4	0.0	283.4	16.0	275.8	0.33	1565.8	1317.2	1417.3	1414.4
39	177.8	165.1	127.0	114.0	13.0	7.4	0.0	285.4	14.3	275.8	1.17	1370.0	1282.4	1358.9	1324.3
40	177.8	165.1	127.0	114.0	13.0	7.4	0.0	285.4	16.0	275.8	3.00	1281.1	1090.1	1052.6	888.5
41	177.8	165.1	127.0	114.0	13.0	7.4	0.0	285.4	17.1	275.8	3.89	1027.5	956.7	857.3	644.8
42	177.8	165.1	127.0	114.0	13.0	7.4	0.0	285.4	15.7	275.8	2.08	1409.2	1203.6	1230.0	1133.3
43	177.8	165.1	127.0	114.0	13.0	7.4	0.0	291.6	16.8	275.8	3.00	1311.3	1203.6	1230.0	1133.3
44	177.8	165.1	127.0	114.0	13.0	7.4	0.0	291.6	15.2	275.8	3.00	1223.3	1119.3	1077.8	904.5
45	177.8	165.1	127.0	114.0	13.0	7.4	0.0	291.6	16.0	275.8	3.00	1203.7	1119.3	1077.8	904.5
46	177.8	165.1	127.0	114.0	13.0	7.4	0.0	291.6	19.0	275.8	3.00	1174.3	1119.3	1077.8	904.5
47	177.8	165.1	127.0	114.0	13.0	7.4	129.0	291.6	18.5	275.8	3.00	1370.0	1119.3	1077.8	904.5
48	177.8	165.1	127.0	114.0	13.0	7.4	129.0	291.6	16.0	275.8	3.00	1213.5	1119.3	1077.8	904.5
49	177.8	165.1	127.0	114.0	13.0	7.4	0.0	291.6	16.5	275.8	3.00	1184.1	1119.3	1077.8	904.5
50	177.8	165.1	127.0	114.0	13.0	7.4	0.0	291.6	15.4	275.8	3.00	1242.8	1119.3	1077.8	904.5

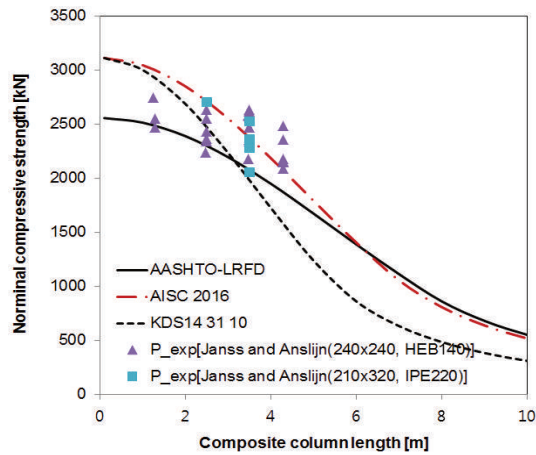
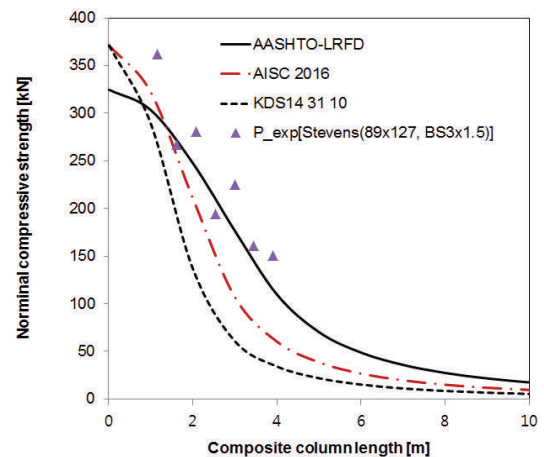
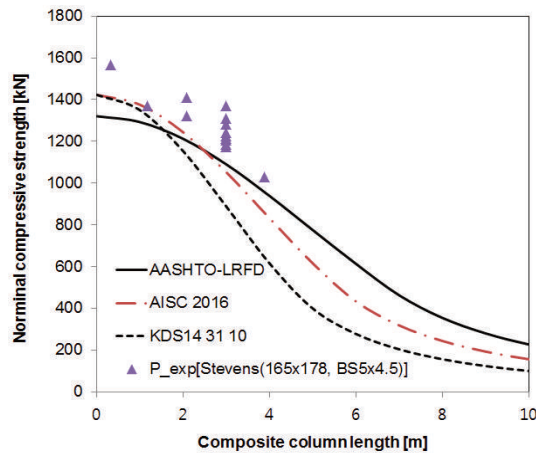
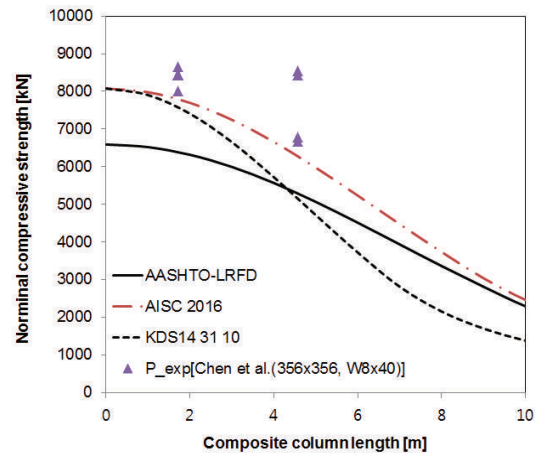
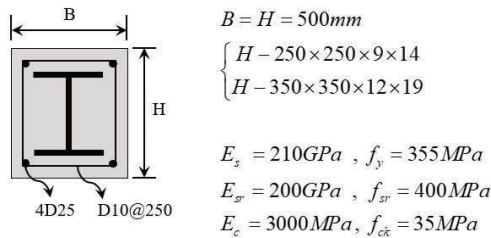
**Fig. 2.** Axial strength of composite column(240x240)**Fig. 4.** Axial strength of composite column(89x127)**Fig. 3.** Axial strength of composite column(165x178)**Fig. 5.** Axial strength of composite column(356x356)

Table 4. Comparison of experimental results carried out by Chen et al.(1992) and design specifications

No.	Cross Section [mm]		Steel shape [mm]				A_r [mm ²]	F_y [MPa]	f'_c [MPa]	F_{yr} [MPa]	KL [m]	P_{test}	P_{AASHTO}	P_{AISC16}	P_{KDS}
	H	B	d	b_f	t_f	t_w									
51	355.6	355.6	209.6	205.0	14.2	9.1	1548.4	395.1	43.1	482.6	1.73	8442.7	6385.9	7791.3	7574.2
52	355.6	355.6	209.6	205.0	14.2	9.1	1548.4	395.1	43.1	482.6	1.73	8451.6	6385.9	7791.3	7574.2
53	355.6	355.6	209.6	205.0	14.2	9.1	1548.4	395.1	56.5	482.6	1.73	8002.3	6385.9	7791.3	7574.2
54	355.6	355.6	209.6	205.0	14.2	9.1	1548.4	395.1	56.5	482.6	1.73	8656.2	6385.9	7791.3	7574.2
55	355.6	355.6	209.6	205.0	14.2	9.1	800.0	395.1	56.5	482.6	1.73	8438.2	6385.9	7791.3	7574.2
56	355.6	355.6	209.6	205.0	14.2	9.1	1548.4	395.1	56.5	482.6	1.73	8438.2	6385.9	7791.3	7574.2
57	355.6	355.6	209.6	205.0	14.2	9.1	1548.4	371.6	65.6	470.9	4.57	8442.7	5288.6	6277.8	5150.2
58	355.6	355.6	209.6	205.0	14.2	9.1	1548.4	371.6	61.5	470.9	4.57	6667.9	5288.6	6277.8	5150.2
59	355.6	355.6	209.6	205.0	14.2	9.1	800.0	371.6	62.7	585.4	4.57	6774.6	5288.6	6277.8	5150.2
60	355.6	355.6	209.6	205.0	14.2	9.1	1548.4	371.6	64.7	470.9	4.57	8549.4	5288.6	6277.8	5150.2
61	355.6	355.6	228.6	210.3	23.7	14.5	1548.4	380.6	65.4	470.9	4.57	9772.7	7714.5	8796.5	7350.0
62	355.6	355.6	204.7	166.0	11.8	7.2	1548.4	344.7	64.5	470.9	4.57	8215.8	5196.6	6439.2	4580.6
63	355.6	355.6	228.6	210.3	23.7	14.5	1548.4	380.6	29.9	470.9	4.57	6552.2	6141.1	6797.5	5982.4

**Fig. 6.** Sectional and material properties**Table 5.** Slenderness parameter of composite column according to design specifications(H250x250x9x14)

Composite column length [m]	Design specifications		
	AASHTO	AISC2016	KDS14 31 10
1	0.012	0.014	0.000
2	0.047	0.055	0.027
3	0.107	0.123	0.107
4	0.189	0.278	0.241
5	0.296	0.343	0.541
6	0.426	0.493	0.668
7	0.580	0.672	0.962
8	0.758	0.877	1.310
9	0.959	1.110	1.711
10	1.184	1.371	2.165
11	1.432	1.659	2.673
12	1.704	1.974	3.234
13	2.000	2.317	3.849
14	2.320	2.687	4.517
15	2.663	3.084	5.238
16	3.030	3.509	6.014
17	3.421	3.962	6.842
18	3.835	4.441	7.724
19	4.273	4.948	8.660

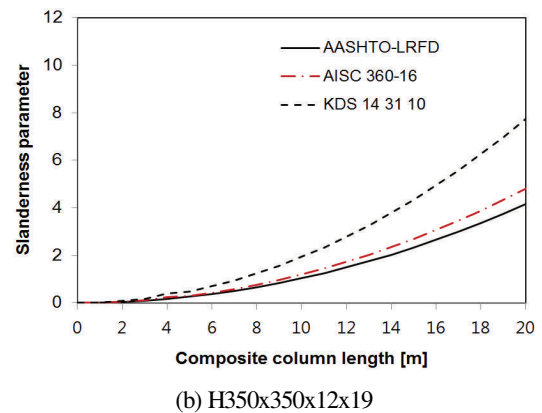
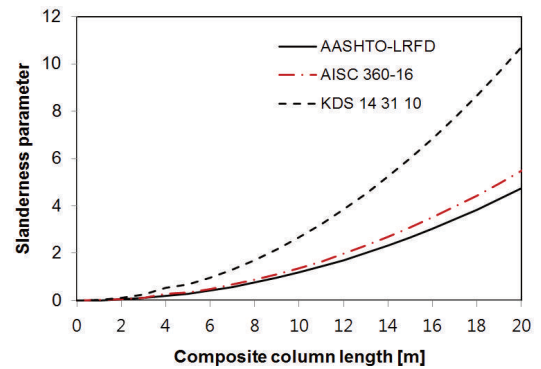
**Fig. 7.** Slenderness parameter

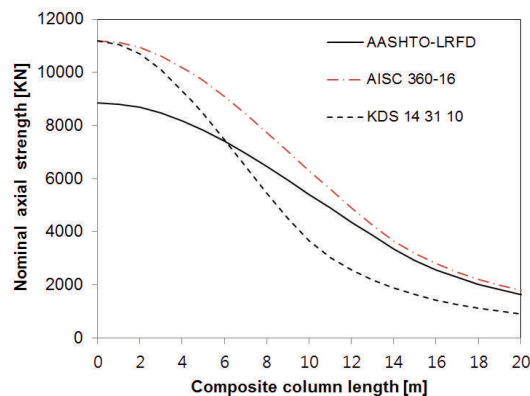
Fig. 8-9.에서 Fig. 6.에 도시된 두가지 제원의 강합성기둥에 대하여 여러 설계기준에 제시된 (a)공칭압축강도와 (b)설계압축강도를 나타내었다. 공칭압축강도는 Fig. 2-5.에서 분석된 바와 같이 AASHTO-LRFD에 근거한 도로교설계기준과, AISC2010에 근거한 강구조설계기준(KDS 14 31 10), AISC2016의 결과가 상이하게 나타났다. 특히, 길이가 작은 단주 영역에서 도로교설계기준(AASHTO)에 의한 공칭압축강도는 다른 두 설계기준에 비해

Table 6. Slenderness parameter of composite column according to design specifications(H350x350x12x19)

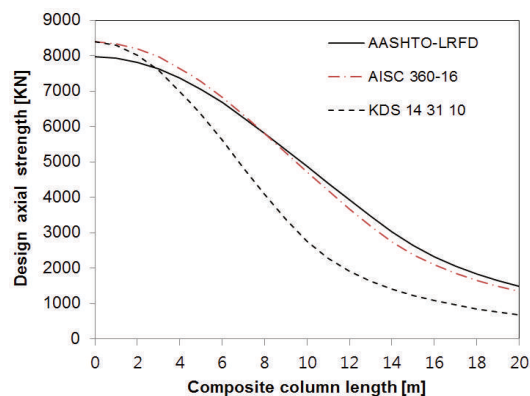
Composite column length [m]	Design specifications		
	AASHTO	AISC2016	KDS14 31 10
1	0.010	0.012	0.019
2	0.041	0.048	0.077
3	0.093	0.108	0.174
4	0.166	0.243	0.391
5	0.259	0.299	0.483
6	0.373	0.431	0.695
7	0.508	0.587	0.946
8	0.663	0.767	1.236
9	0.839	0.970	1.564
10	1.036	1.198	1.931
11	1.253	1.449	2.336
12	1.492	1.725	2.780
13	1.751	2.024	3.263
14	2.030	2.348	3.784
15	2.331	2.695	4.344
16	2.652	3.066	4.943
17	2.994	3.461	5.580
18	3.356	3.881	6.256
19	3.740	4.324	6.970

여 약 60 ~ 85%의 값을 나타내고 있다. 하지만, 기둥의 길이가 증가할수록 강구조설계기준(KDS14 31 10)에 의한 공칭압축강도의 저하가 커져서 장주영역에서는 다른 두 설계기준의 약 50 ~ 60%의 값을 제시한다. 이는 Fig. 7.에 도시된 바와 같이 기둥의 길이 증가에 따른 강구조설계기준의 세장비파라미터가 다른 두 설계기준보다 급격히 증가하여 결과적으로 공칭압축강도를 크게 저하시키기 때문이라고 판단된다.

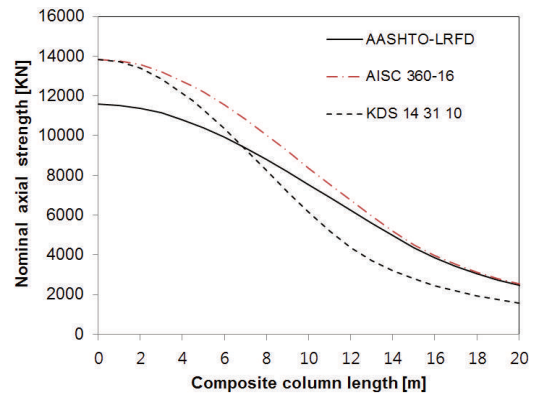
한편, Fig. 8.(b)-9.(b)에서 설계기준에 따른 저항계수(ϕ)를 고려하여 강합성 기둥의 설계압축강도를 도시하였다. 도로교설계기준(AASHTO)는 $\phi = 0.9$ 를 사용하고, 강구조설계기준(KDS 14 31 10), AISC2010, AISC2016에서는 $\phi = 0.75$ 를 적용한다. 그 결과 도로교설계기준과 AISC2016에 따른 설계압축강도는 모든 기둥의 길이에 대하여 매우 유사한 반면에 강구조설계기준(KDS 14 31 10)에 의한 설계압축강도는 다른 두 설계기준에 비하여 강합성 기둥의 설계강도를 60 ~ 70% 수준으로 저평가하고 있음을 확인하였다.



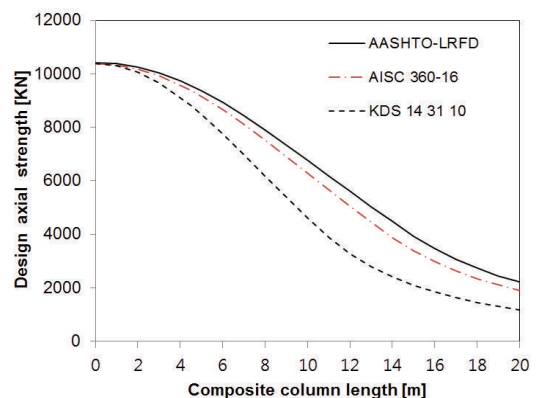
(a) Nominal compressive strength



(b) Design compressive strength

Fig. 8. Nominal and design axial strength (H250x250x9x14)

(a) Nominal compressive strength



(b) Design compressive strength

Fig. 9. Nominal and design axial strength (H350x350x12x19)

4. 결 론

이 논문에서는 국내·외 여러 설계기준에서 제시하고 있는 매입형 강합성 기둥의 압축강도에 대한 평가를 수행하였다. AASHTO-LRFD(2012)에 근거한 도로교설계기준(한계상태설계법), AISC(2010)를 바탕으로 제정된 강구조부재설계기준(KDS 14 31 10) 및 AISC(2016)에서 규정하고 있는 매입형 강합성 기둥의 압축강도를 산정하여 여러 문헌에서 발표된 실험결과와 함께 비교·분석하였다. 강합성 기둥의 길이에 따른 공칭 및 설계압축강도를 산정하여 설계기준에 따른 영향을 파악한 결과 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 강합성 기둥의 길이가 작은 단주 영역에서 도로교설계기준에 의한 공칭압축강도가 다른 두 설계기준에 비하여 약 60 ~ 85%의 값을 제시하고 있다. 기둥의 길이가 증가할수록 강구조설계기준에 의한 공칭압축강도의 저하가 증가하여 장주영역에서는 다른 두 설계기준의 50 ~ 60%의 값을 제시한다.
- 2) 저항계수를 적용한 도로교설계기준과 AISC(2016)에 의한 설계압축강도는 서로 매우 유사한 반면에 AISC(2010)에 근거한 강구조설계기준(KDS 14 31 10)에 의한 설계압축강도는 다른 두 설계기준에 비하여 강합성 기둥의 설계강도를 약 60 ~ 70%의 값으로 저평가하고 있다.
- 3) 현재의 강구조설계기준(KDS 14 31 10)에서 규정하고 있는 매입형 강합성 기둥의 압축강도를 도로교설계기준(AASHTO) 또는 AISC(2016)에 제시된 수준으로 개정한다면 보다 경제적인 매입형 강합성 기둥의 설계가 수행될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부장관의 지진방재분야 전문인력 양성사업으로 지원되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] El-Tawil, S., and Deierlein, G.G. (1999) Strength and Ductility of Concrete Encased Composite Columns, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.125, No.1, pp.1009-1019.
- [2] Weng, C.C., and Yen, S.I. (2002) Comparisons of Concrete-encased Composite Column Strength Provisions of ACI code and AISC Specification, *Engineering & Structures*, Elsevier, Vol.24, No.1, pp.59-72.
- [3] Yuvaraj, S., and Jamal, A. (2018) Design Comparison of Encased Composite Column Under Bi Axial Loading as Per Eurocode-4 and AISC.LRFD Code, *International Journal of Latest Engineering and Management Research*, Vol.3, No.2, pp.31-42.
- [4] Janss, J., and Ansljij, R. (1974) *Le Calcul des Charges Ultimes des Colonnes Métalliques Enrobées de Béton*, Rapport MT 89, Centre de Recherches Scientifiques et Techniques de l'Industrie des Fabrications Métalliques, Belgium (in French).
- [5] Chaves, L.E.A., Caldas, R.B., Fakury, R.H., and Pimenta, R.J. (2015) Application of General Method for Design of Concrete Columns and Encased Composite Steel and Concrete Columns, *IBRACON Structures and Materials Journal*, Instituto Brasileiro do Concreto, Vol.8, No.6, pp.755-762.
- [6] Ellobody, E., and Young, B. (2011) Numerical Simulation of Concrete Encased Steel Composite Columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.67, No.2, pp.211-222.
- [7] Soliman, K.Z., Arafa, A.I., and Elrakib, T.M. (2013) Review of Design Codes of Concrete Encased Steel Short Columns Under Axial Compression, *HBRC Journal*, Housing and Building National Research Center, Vol.9, No.2, pp.134-143.
- [8] Stevens, R.F. (1965) Encased Stanchions, *The Structural Engineer*, The Institution of Structural Engineers, Vol.43, No.2, pp.59-66.
- [9] Chen, C., Astaneh-Asl, A., and Moehle, J.P. (1992) Behavior and Design of High Strength Composite Columns, *Proceedings of Structural Congress '92*, American Society of Civil Engineers, USA, pp.820-823.
- [10] 오명호, 장태영, 김명한, 김대중, 김상대(2005) 비조밀단면을 가진 SC 합성 기둥의 비선형 해석, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제17권, 제1호, pp.63-71.
Oh, M.H., Jang, T.Y., Kim, M.H., Kim, D.J., and Kim, S.D. (2005) Inelastic Analysis of Steel-Concrete Composite Column with Non-Compact Steel Section, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.17, No.1, pp.63-71 (in Korean).
- [11] 김창수, 박홍근, 최인락, 정경수, 김진호(2010) 800MPa 강재 및 100MPa 콘크리트를 적용한 매입형 합성기둥의 구조성능,

- 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권 제5호, pp. 497-509.
- Kim, C.S., Park, H.G., Choi, I.R., Chung, K.S., and Kim, J.H. (2010) Structural Performance of Concrete-Encased Steel Columns Using 800MPa Steel and 100MPa Concrete, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.5, pp.497-509 (in Korean).
- [12] 국토교통부(2016) 도로교설계기준(한계상태설계법). Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016) *Highway Bridge Design Standard (Limit State Design)*, Korea (in Korean).
- [13] American Association of State Highway and Transportation Officials (2012) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (6th Ed.), USA.
- [14] 국토교통부(2017) 강구조부재설계기준(KDS 14 31 10). Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017) *Design Standard of Steel Structural Members* (KDS 14 31 10), Korea (in Korean).
- [15] American Institute of Steel Construction (2010) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-10), USA.
- [16] 국토교통부(2017) 강교설계기준(KDS 24 14 31). Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017) *Design Standard of Steel Bridge* (KDS 24 31 10), Korea (in Korean).
- [17] American Institute of Steel Construction (2016) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-16), USA.

요 약: 이 논문에서는 여러 설계기준에서 제시하고 있는 매입형 강합성 기둥의 압축강도에 대한 평가를 수행하였다. AASHTO-LRFD(2012)에 근거한 도로교설계기준(한계상태설계법), AISC(2010)를 바탕으로 제정된 강구조부재설계기준(KDS 14 31 10) 및 AISC(2016)에서 규정하고 있는 매입형 강합성 기둥의 압축강도를 산정하여 여러 문헌에서 발표된 실험결과와 비교·분석하였다. 다양한 단면과 길이를 갖는 매입형 강합성 기둥에 대하여 여러 설계기준에 따른 공칭 및 설계 압축강도를 산정하고 여러 가지 변수들이 압축강도에 미치는 영향을 분석하였다. 현행 강구조부재설계기준(KDS 14 31 10)은 다른 기준들에 비하여 강합성 기둥의 압축강도를 저평가하고 있는 것으로 평가되었다.

핵심용어: 압축강도, 콘크리트, 매입형, 강합성, 기둥, 설계기준
