

콘크리트 압축 모델에 따른 휨부재의 설계 강도에 대한 비교 연구

최승원
조선이공대학교 토목건설과

A Comparative Study on Design Strength of Flexural Members according to Concrete Compression Model

Seung-Won Choi
Department of Civil and Construction Engineering, Chosun College of Science & Technology

요 약 철근콘크리트 구조물의 휨-압축 해석을 위해서는 콘크리트와 철근의 합리적 재료모델에 대한 제시가 필수적이다. 최근 개정된 콘크리트구조 학회기준(2017)에서는 콘크리트 압축력 산정을 위해 두 가지 압축응력 모델이 제시되었다. 첫 번째 모델은 등가직사각형 압축응력블록이고, 두 번째 모델은 포물선-사각형 응력-변형률 곡선이다. 포물선-사각형 응력-변형률 곡선은 도로교설계기준에서 제시된 모델과 동일한 형태를 가지고 있으며, 극한시 강도 뿐만 아니라 사용성 검토 등에도 이용될 수 있다는 장점이 있다. 또한, 등가직사각형 압축응력블록은 기존의 콘크리트구조기준(2012)에서 제시한 재료모델과 동일한 형태를 가지고 있으며, 이는 극한 강도를 쉽게 산정할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 기존 모델과는 압축 응력 분포의 폭과 중립축 깊이를 산정하는 과정에 차이가 있다. 이 연구에서는 콘크리트구조기준(2012)과 콘크리트구조 학회기준(2017)의 콘크리트 압축 모델에 대하여 살펴보고, 이 압축 모델에 대하여 철근콘크리트 휨-압축 부재의 거동을 고찰하였다. 이로부터 휨-압축 해석을 위한 합리적인 콘크리트 압축모델에 대하여 분석하였다. 해석 결과 콘크리트구조 학회기준(2017)의 등가직사각형 압축응력블록은 특히, 고강도 콘크리트에 대하여 보수적인 설계 강도를 나타내었다.

Abstract For the flexure-compression analysis of RC structures, it is essential to present a rational material model of concrete and steel. In the recently revised KCI(2017), two compressive stress models were proposed to calculate the compressive force of concrete: an equivalent rectangular stress block and a parabola-rectangular curve (p-r curve). A p-r curve is the same as the Korea Highway Bridge Code, and can be used for ultimate strength and serviceability analysis. An equivalent rectangular stress block has the same shape as the material model presented in the existing KCI(2012) and can easily calculate the ultimate strength. On the other hand, there is a difference in the process of calculating the width of the stress block and the depth of the neutral axis from the existing model. In this study, the concrete compression models of KCI(2012) and KCI(2017) were examined, and the behavior of RC flexural-compression members was investigated for this compression model. From this, a rational concrete compression model was analyzed for axial-flexural analysis. The equivalent rectangular stress block in KCI(2017) led to a conservative design strength, especially for high-strength concrete.

Keywords : KCI(2012), KCI(2017), Equivalent Rectangular Stress Block, P-R Curve, Flexure-Compression

*Corresponding Author : Seung-Won Choi(Chosun College of Science & Technology)

email: swchoi@cst.ac.kr

Received May 6, 2021

Accepted September 3, 2021

Revised June 8, 2021

Published September 30, 2021

1. 서론

철근콘크리트 휨-압축부재의 휨-압축 거동을 정확하게 파악하기 위해서는 우선 재료 거동에 대한 이해가 필수적이다. 즉, 콘크리트와 철근의 응력-변형률 모델에 대한 정확한 규명이 반드시 필요하다. 우리나라 설계 기준에서는 철근의 응력-변형률에 대한 모델로서 탄-소성 모델을 사용하고 있다. 또한, 콘크리트의 압축응력 모델의 경우 콘크리트구조기준(2012)(Korea Structural Concrete Design Code 2012, 이하 KCI 2012)에서는 등가직사각형 압축응력블록을 이용하여 비선형인 거동을 직사각형 형태로 단순화하였다[1]. 이러한 등가직사각형 압축응력블록 모형은 그 크기와 압축 합력의 작용점 위치를 쉽게 구할 수 있다는 장점 때문에 강도설계법을 기반으로 한 설계 방식에서 널리 사용되어 왔다. 그러나 기존의 등가직사각형 압축응력블록을 고강도 콘크리트 거동에 적용할 경우 압축 지배 구역에 대한 축력-휨강도가 실험 결과보다 과대평가될 수 있다[2]. 이에 콘크리트구조 학회 기준(2017)(KCI Model Code 2017, 이하 KCI 2017)에서는 기존의 KCI 2012와 같은 등가직사각형 압축응력블록을 사용하지만, 콘크리트 설계기준 압축강도에 따라 응력블록의 크기가 변하는 방식을 채택하였다[3].

한편, 한계상태설계법에 기반한 도로교설계기준(한계상태설계법) (Korea Highway Bridge Design Code (Limit State Design), 이하 KHBDC) 해설에서는 포물선-사각형 응력-변형률 곡선(parabola-rectangular curve; 이하 p-r곡선)으로 콘크리트 압축응력-변형률을 제시하였다[4]. 이러한 p-r곡선은 유로코드 2(Eurocode 2)에 기반한 재료모델이다[5].

한계상태설계법은 재료계수를 적용한다는 점에서 강도감소계수를 적용하는 강도설계법과 큰 차이가 있다. 그런데 KCI 2017의 본문과 부록에서는 이러한 한계상

태설계법의 일부를 차용하고 있다. 즉, KCI 2017의 본문에서는 콘크리트 압축모델로 직사각형, 사다리꼴, 포물선형 또는 강도의 예측에서 광범위한 실험의 결과와 실질적으로 일치하는 어떤 형상으로도 가능하다고 규정하면서 대표적인 형태로 등가 직사각형 응력블록과 p-r 곡선을 제시하고 있다[3]. 이러한 압축모형을 바탕으로 강도감소계수를 적용한 설계 휨강도 ϕM_n 를 제시하는데 반해, KCI 2017 부록에서는 p-r곡선과 재료계수를 적용하여 설계 휨강도를 산정하는 방법을 제시하고 있으며 이는 한계상태설계법에 기반한 것이다.

특히, 국가 건설 기준 체계가 코드 체계로 전환되면서 최근 KDS 14(Korea Design Standard)는 KCI 2017을 바탕으로 개정되었다[6]. 따라서 이 연구에서는 KDS 14의 기본 바탕이 되는 KCI 2012와 KCI 2017의 콘크리트 압축 모델에 따른 설계 휨강도를 동일한 철근비에서 비교하여 재료모델에 따른 거동 특성을 이론적으로 살펴보고자 하였다. 즉, 등가직사각형 압축응력블록과 p-r곡선을 이용하여 각 설계기준에서 제시하고 있는 설계 휨강도 산정법을 통해 설계 휨강도를 산정하고 그 크기를 비교 분석하였다. 또한, 단면의 휨-압축거동에 대한 재료모델에 따른 차이를 살펴보고자 P-M 상관도를 분석하였다.

2. 설계기준의 재료모델

2.1 콘크리트구조기준(2012)

KCI 2012에서는 휨부재의 설계 휨강도 해석을 위한 콘크리트 압축모델로서 Fig. 1(c)에서와 같은 등가직사각형 압축응력블록을 사용하였다. 이 콘크리트 압축응력 분포는 압축응력 크기는 $0.85f_{ck}$ 로 일정하고, 등가직사

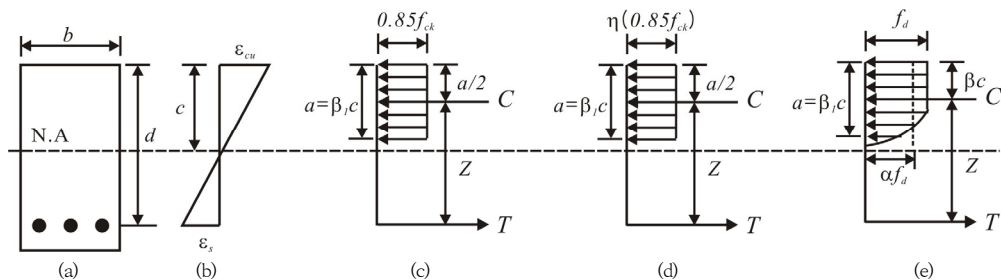


Fig. 1. Distribution of stress and strain

(a) Cross section (b) Strain distribution (c) Stress in KCI 2012(equivalent rectangular stress block) (d) Stress in KCI 2017(revised equivalent rectangular stress block) (e) Stress in KCI 2017(p-r curve)

각형 압축응력블록 깊이(a)는 $\beta_1 c$ 이다. 이 때, c 는 중립축 깊이, 계수 β_1 은 식 (1)에서와 같이 콘크리트 설계기준 압축강도 f_{ck} 에 따라 0.65~0.85 사이 값을 갖는다[1].

$$\beta_1 = 0.85 \quad \text{for } f_{ck} \leq 28 \text{ MPa} \quad (1-a)$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.007(f_{ck} - 28) \geq 0.65 \quad \text{for } f_{ck} > 28 \text{ MPa} \quad (1-b)$$

Fig. 1(c)의 재료모델을 통해 콘크리트 압축력 C 와 철근 인장력 T 는 각각 식 (2)와 식 (3)을 통해 구할 수 있고, 이 두 힘의 우력 모멘트가 식 (4)와 같이 공칭 휨강도 M_n 이 된다. 여기서, z 는 모멘트 팔길이로 $d - a/2$ 이고, b 는 단면의 폭이며, A_s 는 인장철근의 단면적이다. 마지막으로 공칭 휨강도에 강도감소계수 ϕ 를 곱함으로써 설계 휨강도를 구할 수 있다[1].

$$C = 0.85 f_{ck} a b = 0.85 f_{ck} (\beta_1 c) b \quad (2)$$

$$T = A_s f_y \quad (3)$$

$$M_n = C z = T z \quad (4)$$

2.2 콘크리트구조 학회기준(2017)

2.2.1 등가직사각형 압축응력블록

Fig. 1(d)에서는 KCI 2017에서 제시하고 있는 등가직사각형 압축응력블록을 나타내었다. 이 콘크리트 압축응력 분포에서 압축응력 크기는 $\eta(0.85 f_{ck})$ 로 일정하고, $a = \beta_1 c$ 이다. 이 때, η 및 β_1 은 Table 1에서와 같이 f_{ck} 에 따라 변한다[3]. 즉, KCI 2017은 KCI 2012와 동일한 형상의 콘크리트 압축응력 모델을 사용하고 있지만, 압축응력의 크기를 특히, 고강도하($f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$)에서 $\eta < 1.0$ 를 사용하여 압축력을 감소시키고 있다. 또한, 등가직사각형 압축응력블록의 깊이 a 역시 KCI 2012에서는 식 (1)에서와 같이 f_{ck} 에 따른 함수로 0.65~0.85의 값을 갖지만, 개정된 KCI 2017에서는 0.7~0.8의 값을 갖도록 함으로써 압축력의 크기를 감소시키고 있다.

Fig. 1(d)의 재료 모델을 통해 콘크리트 압축력은 다음 식 (5)와 같이 산정할 수 있고, 철근 인장력, 공칭 휨강도 및 설계 휨강도는 KCI 2012와 동일한 방법으로 계산할 수 있다.

$$C = \eta(0.85 f_{ck}) a b = \eta(0.85 f_{ck}) (\beta_1 c) b \quad (5)$$

Table 1. Variables of equivalent rectangular stress block

f_{ck} [MPa]	≤ 40	50	60	70	80	90
η	1.00	0.97	0.95	0.91	0.87	0.84
β_1	0.80	0.80	0.76	0.74	0.72	0.70

2.2.2 포물선-사각형 응력-변형률 곡선(p-r곡선)

KCI 2017에서는 등가직사각형 압축응력블록 외에 Fig. 1(e)와 같은 p-r곡선을 제시하고 있다. 콘크리트 설계 강도 $f_d = 0.85 \phi_c f_{ck}$ 이고, 철근의 설계 강도는 $\phi_s f_y$ 이며, 이로부터 압축력과 인장력은 각각 식 (6)과 식 (7)과 같이 산정한다. 이 때, ϕ_c 와 ϕ_s 는 콘크리트와 철근의 재료계수로 각각 0.65와 0.9이다. 이 두 힘의 우력 모멘트가 설계 휨강도(식 (8))가 된다[3]. 이상과 같이 p-r곡선을 사용하여 설계 휨강도를 산정할 경우에는 공칭 휨강도를 산정한 후 강도감소계수를 적용하는 등가직사각형 압축응력블록과 달리, 압축력과 인장력을 계산하는 과정에서 각각의 재료계수를 적용함으로써 안전율을 반영하고 있다는 점에서 차이가 있다. 즉, 재료계수를 1로 적용할 경우 공칭 휨강도를 산정할 수 있다.

$$C = \alpha f_d b c = \alpha(0.85 \phi_c) f_{ck} b c \quad (6)$$

$$T = \phi_s A_s f_y \quad (7)$$

$$M_d = C(d - \beta c) = T(d - \beta c) \quad (8)$$

여기서, α 는 압축력의 크기를 나타내는 계수, β 는 콘크리트 압축력 작용점 위치를 나타내는 계수이다.

3. 직사각형 보의 설계 휨강도 해석

3.1 해석 단면 및 변수

KCI 2012 및 KCI 2017의 재료모델에 따른 설계 휨강도의 차이를 비교하기 위하여 Table 2와 같은 해석 변수를 사용하였다. 콘크리트 설계기준 압축강도 f_{ck} , 철근 설계기준 항복강도 f_y 및 철근비 ρ 에 따른 설계 휨강도의 변화를 살펴보았다. 철근비는 균형철근비 ρ_b 의 10 %, 50 % 및 100 %이고, KCI 2017에 의한 균형철근비에 대한 비율로 표현하였다. 또한, 해석 단면은 $b \times h = 300 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 인 단철근 직사각형 단면이다.

Table 2. Analysis variables

f_{ck} [MPa]	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90
f_y [MPa]	300, 400, 500
ρ	$0.1\rho_b$, $0.5\rho_b$, ρ_b

3.2 콘크리트 압축력 해석 결과

KCI 2012와 KCI 2017에서는 모두 등가직사각형 압축응력블록을 사용하고 있다. 그러나 동일한 형상의 압축 모델을 사용함에도 앞선 식 (2)와 식 (5)에서와 같이 압축력의 크기를 나타내는 데 차이가 있으므로 식 (9)와 같이 두 모델간의 압축력의 차이가 발생한다. Fig. 2에서는 두 설계 기준 사이의 총 압축력의 비를 나타내었다.

$$\frac{C_{KCI\ 2012}}{C_{KCI\ 2017}} = \frac{\beta_1}{\eta\beta_1} \quad (9)$$

동일한 형태의 재료모델을 사용하고 $f_{ck} \leq 30$ MPa 이고 $f_{ck} \geq 80$ MPa인 경우에 대하여 KCI 2017에 의한 압축력은 KCI 2012 압축력의 약 (90~96) % 수준으로 작게 나타났으나, 이 외의 경우에는 반대로 약 (4~11) % 크게 나타났다. 이러한 차이는 Table 1에서와 같이 콘크리트 설계기준 압축강도에 따라 계수 η 및 β_1 가 변하기 때문이다.

3.3 설계 휨강도 해석 결과

Fig. 3에서는 KCI 2012와 KCI 2017에서 사용된 등

가직사각형 압축응력블록을 사용하여 계산된 설계 휨강도의 비율을 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 $\rho = 0.1\rho_b$ 인 경우, 개정된 기준에서 적용된 계수 η 및 β_1 와 관계 없이 설계 휨강도는 거의 동일한 값을 나타냈다. $f_{ck} \geq 50$ MPa인 경우 KCI 2017에 의한 설계 휨강도는 KCI 2012에 비해 다소 크게 산정되었으나, 그 차이는 (0.1~0.5) % 정도로 매우 작게 나타났다. 그러나 철근비가 증가할수록 동일한 직사각형 형태의 모델을 사용할지라도 계수 η 및 β_1 의 영향에 따라 KCI 2012의 설계 휨강도 값이 약 (1~10) % 커질 수 있는 것으로 나타났다.

Fig. 4에서는 콘크리트 설계기준 압축강도에 따른 설계 휨강도의 변화를 나타내었다. 이 때, 철근비는 $0.1\rho_b$ 이다. 등가직사각형 압축응력블록과 p-r곡선 사이의 관계를 살펴보면 $\rho = 0.1\rho_b$ 인 경우, 재료 강도에 관계 없이 등가직사각형 압축응력블록을 사용한 설계 휨강도가 p-r곡선을 사용한 경우의 약 95 % 수준으로 작게 나타났다. 그러나 Fig. 5에서와 같이 철근비가 $\rho = 0.5\rho_b$ 로 증가한 경우에는 두 재료모델에 의한 설계 휨강도의 비율이 약 (99~100) % 수준으로 재료모델에 의한 차이가 더욱 줄어드는 것으로 나타났다. 즉, $\rho \leq 0.5\rho_b$ 인 경우에는 재료 모델에 따른 설계 휨강도 차이는 약 5 % 미만으로 p-r곡선을 사용한 설계 휨강도가 작게 나타났다.

Fig. 6에서는 $\rho = \rho_b$ 인 경우에 대한 설계 휨강도 해석 결과를 나타내었다. 이 때, 철근 항복강도는 300 MPa와 500 MPa이다. 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 철근 강도에 관계없이 설계 휨강도는 KCI 2012가 가장 크

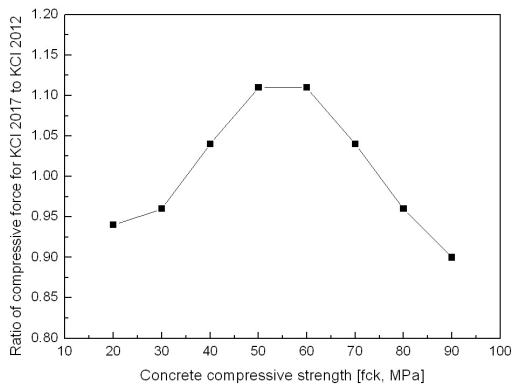


Fig. 2. Compression force ratio of KCI2017 to KCI2012

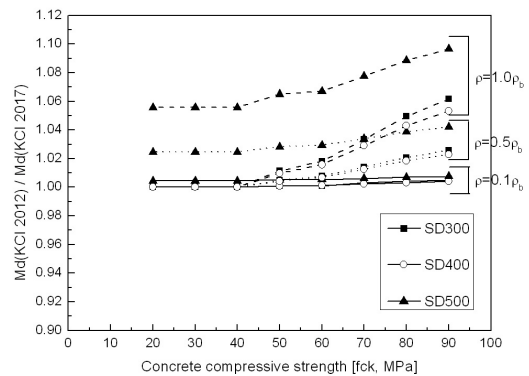


Fig. 3. Ratio of design flexural strength in KCI 2012 and KCI 2017

고, KCI 2017 그리고 p-r곡선의 순서로 나타났다. $f_y = 300$ MPa인 경우, KCI 2017에 의한 설계 휨강도는 p-r곡선을 사용한 경우에 비해 약 10 % 크게 산정되었고, KCI 2012에 의한 값에 비해서는 약 6 % 크게 산정되었다. 또한, $f_y = 500$ MPa인 경우, KCI 2017에 의한 설계 휨강도가 p-r곡선을 사용한 경우에 비해 약 6 % 크고, KCI 2012에 의한 값에 비해서는 약 (6~10) % 큰 값을 보였다.

Fig. 3~Fig. 6의 결과를 종합해 보면 낮은 철근비에서는 등가직사각형 압축응력블록을 사용한 경우의 설계 휨강도가 전반적으로 작게 산정되지만, 최대철근비에 근접하는 높은 철근비에서는 반대로 p-r곡선을 사용한 경우의 설계 휨강도가 작게 산정되는 것으로 나타났다. 이

는 낮은 철근비에서는 등가직사각형 압축응력블록을 사용한 경우 사용된 계수(η , β_1)가 설계 휨강도에 큰 차이를 발생시키지 않지만, 높은 철근비에서는 이 계수들에 의해 약 (6~10) %의 설계 휨강도 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 7에서는 등가직사각형 압축응력블록을 사용한 KCI 2012와 KCI 2017에서 철근비에 따른 설계 휨강도의 비율($M_{d,KCI2012}/M_{d,KCI2017}$)을 나타내었다. 그림에서와 같이 $f_y \leq 400$ MPa인 경우 설계 휨강도는 두 재료 모델에 의한 차이가 거의 없지만, $f_y = 500$ MPa일 경우에는 KCI 2012에 의한 설계 휨강도가 KCI 2017의 설계 휨강도에 비해 약 (2~6) % 크게 산정되었다.

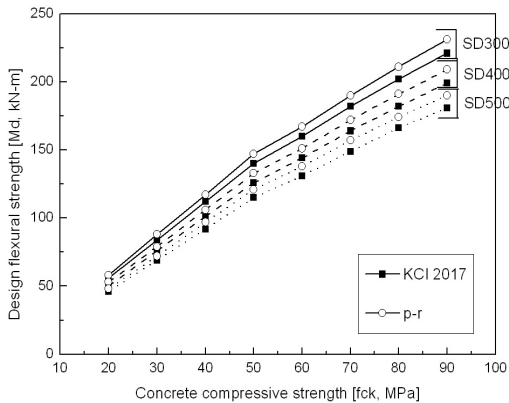


Fig. 4. Design flexural strength according to fck at $0.1\rho_b$

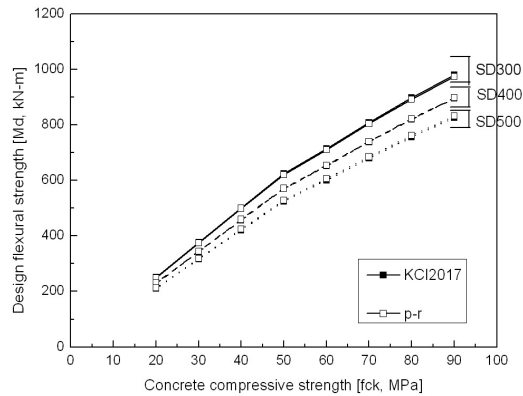


Fig. 5. Design flexural strength according to fck at $0.5\rho_b$

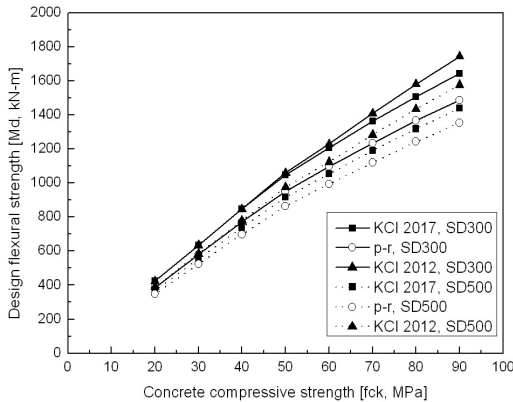


Fig. 6. Design flexural strength according to fck at ρ_b

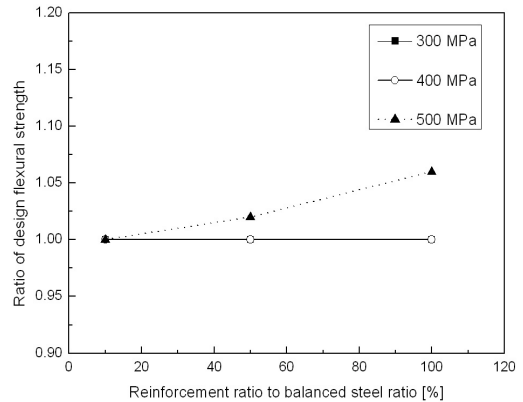


Fig. 7. Ratio of design flexural strength according to ρ

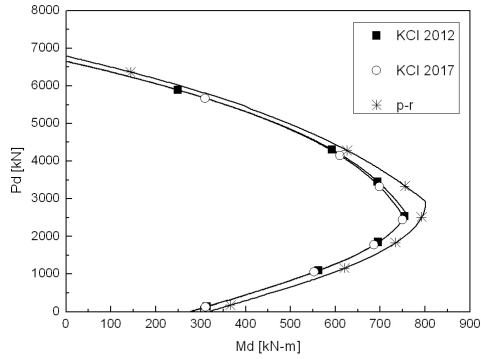


Fig. 8. P-M interaction diagram for $f_{ck}=30$ MPa & $\rho = 1 \%$

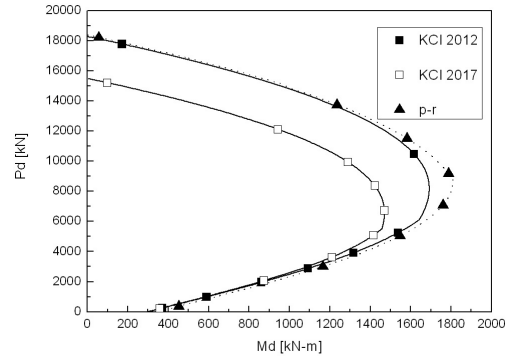


Fig. 9. P-M interaction diagram for $f_{ck}=90$ MPa & $\rho = 1 \%$

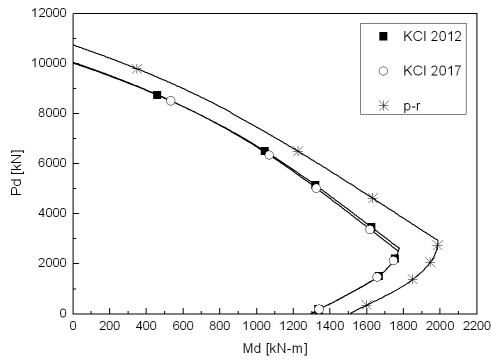


Fig. 10. P-M interaction diagram for $f_{ck}=30$ MPa & $\rho = 5 \%$

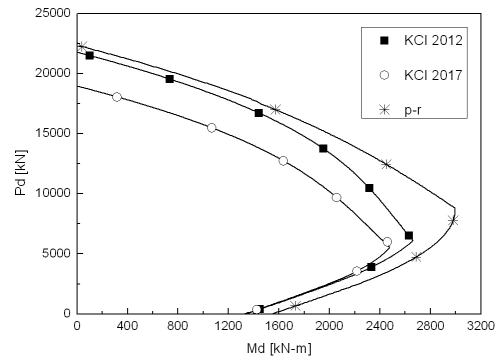


Fig. 11. P-M interaction diagram for $f_{ck}=90$ MPa & $\rho = 5 \%$

Table 4. Results of design strength for $e=40$ mm

fck [MPa]	$\rho = 1 \%$						$\rho = 5 \%$					
	KCI 2012		KCI 2017		p-r curve		KCI 2012		KCI 2017		p-r curve	
	Md [kN · m]	Pd [kN]	Md [kN · m]	Pd [kN]	Md [kN · m]	Pd [kN]	Md [kN · m]	Pd [kN]	Md [kN · m]	Pd [kN]	Md [kN · m]	Pd [kN]
30	238	5,929	237	5,933	242	6,047	363	9,050	361	9,037	388	9,672
90	651	16,203	551	13,741	658	16,277	778	19,386	677	16,920	809	19,938

Table 5. Results of design strength for $e=1,000$ mm

fck [MPa]	$\rho = 1 \%$						$\rho = 5 \%$					
	KCI 2012		KCI 2017		p-r curve		KCI 2012		KCI 2017		p-r curve	
	Md [kN · m]	Pd [kN]	Md [kN · m]	Pd [kN]	Md [kN · m]	Pd [kN]	Md [kN · m]	Pd [kN]	Md [kN · m]	Pd [kN]	Md [kN · m]	Pd [kN]
30	378	370	380	378	437	434	1,693	1,690	1,693	1,690	1,931	1,933
90	416	400	408	390	478	455	1,840	1,833	1,818	1,812	2,122	2,103

4. P-M 상관도 해석

P-M 상관도를 분석하기 위하여 $b \times h = 500 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ 인 직사각형 단면의 기둥을 가정하였다. 단, 설계 축강도 산정시 최소 편심에 대한 영향은 무시하였다.

Fig. 8은 $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$, $f_y = 400 \text{ MPa}$ 이고 철근비는 1 %인 기둥의 해석 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 등가직사각형 압축응력블록을 사용한 KCI 2012 및 KCI 2017의 P-M 상관도 상의 값은 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 3장에서의 설계 휨강도 해석 결과와 동일하다. 또한, 등가직사각형 압축응력블록을 사용한 P-M 상관도는 p-r곡선을 사용한 P-M 상관도에 비해 작게 나타났다. 즉, 기둥 설계에 있어 동일 편심거리를 갖는 부재의 설계 시 등가직사각형 압축응력블록을 사용할 경우 보수적인 설계와 해석이 가능한 것으로 나타났다.

Fig. 9에서는 $f_{ck} = 90 \text{ MPa}$, $f_y = 400 \text{ MPa}$ 이고 철근비는 1 %인 기둥의 해석 결과를 나타내었다. 그리고 Table 4에서는 압축지배 구간인 편심 거리 $e = 40 \text{ mm}$ 일 때의 설계 강도를 나타내었고, Table 5에서는 인장지배 구간인 편심거리 $e = 1,000 \text{ mm}$ 일 때의 설계 강도를 나타내었다. 그림과 표에서 볼 수 있듯이 $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ 인 경우에는 인장 및 압축 지배 구간에서 각 설계 기준에 따른 설계 강도의 차이가 크지 않았다. 그러나 $f_{ck} = 90 \text{ MPa}$ 인 경우 압축 지배 구간에서 KCI 2017에 따른 설계 강도는 KCI 2012 및 p-r곡선을 사용한 설계 강도의 약 84 % 수준으로 가장 작게 산정되었다. 즉, 압축 지배 구간에서 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 KCI 2017에 의한 설계 강도는 다른 모델에 비해 작게 평가되어 보수적인 해석 및 설계를 유도하는 것으로 나타났다. 그리고 전반적으로 KCI 2012와 p-r곡선에 의한 설계 강도는 유사한 값을 보였다.

철근비는 5 %이고 $f_y = 400 \text{ MPa}$ 일 때, $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ 와 $f_{ck} = 90 \text{ MPa}$ 일 때 P-M 상관도 해석 결과를 각각 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ 일 경우, 철근비가 증가(1 %→5 %)하더라도 Fig. 8과 동일한 경향을 보였다. 그리고 $f_{ck} = 90 \text{ MPa}$ 일 경우에도 Fig. 9에서와 같이 압축지배 구간에서 KCI 2012와 KCI 2017에 의한 차이가 증가하는 동일한 경향을 보였다. 압축지배 영역에서 p-r곡선에 의한 설계 강도가 가장 크고, 다음으로 KCI 2012 및 KCI 2017의 설계 강도 순으로 나타났다.

철근비가 5 %이고, 편심 거리 $e = 40 \text{ mm}$ 인 경우,

철근비가 1 %인 경우와 마찬가지로 $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ 인 경우에는 KCI 2012 및 KCI 2017의 설계 강도의 차이는 거의 발생하지 않았지만, $f_{ck} = 90 \text{ MPa}$ 인 경우에는 KCI 2017의 설계 강도는 KCI 2012의 약 87 % 수준으로 나타났다. 이는 두 기준 모두 동일한 형태의 재료모델을 사용하지만, KCI 2017에서는 콘크리트 압축강도에 따라 계수 η 를 적용하여 압축응력블록의 폭이 최대 84 %까지 감소하므로 결국 설계 축강도가 작은 값으로 유도되는 것으로 판단된다. 그러나 p-r곡선을 사용한 경우에는 $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ 인 경우 KCI 2017의 약 93 %, $f_{ck} = 90 \text{ MPa}$ 인 경우에는 KCI 2017의 약 84 % 수준으로 나타났다.

이상과 같이 P-M 상관도를 분석한 결과 인장지배 구간에서는 KCI 2012 및 KCI 2017의 설계 강도 차이가 크지 않지만, 압축 지배 구간에서는 콘크리트 압축모델에 따라 설계 강도의 차이가 크게 발생하였다. 즉, KCI 2017의 등가직사각형 응력블록을 사용할 경우 가장 보수적인 설계 및 해석이 가능한 것으로 나타났고, 이러한 경향은 콘크리트 압축강도와 철근비가 증가할수록 더욱 뚜렷하였다. 철근콘크리트 휨부재의 휨-압축 해석을 위해서는 합리적인 재료모델이 전제되어야 한다. 설계기준에서는 이상에서 살펴본 바와 같은 다양한 재료모델들을 제시하고 있지만, 재료모델과 재료 강도에 따라 설계 강도는 약 16 % 까지 차이를 나타낼 수 있다. 이에 휨-압축 해석을 위한 재료모델의 선정과 적용에 있어 면밀한 검토가 있어야 할 것으로 판단된다.

이 연구에서는 우리나라에서 사용되는 콘크리트 재료 모델 즉, 등가직사각형 압축응력블록과 p-r곡선 특히, 개정된 등가직사각형 압축응력블록과 기존 모델과의 차이에 대하여 이론적으로 분석하였다. 그러나 이러한 모델에 대한 휨부재 실험 결과와의 분석에 대한 내용은 미흡하므로 재료모델의 합리성을 분석하는데 한계가 있을 것으로 판단된다. 따라서 추후 이론 모델과 실험 결과에 대한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

이 연구에서는 KCI 2012와 KCI 2017에서 제시하고 있는 콘크리트 압축모델을 통한 설계 휨강도에 대하여 살펴보았다. 특히, KCI 2017에서는 두 가지 재료모델을 제시하고 있으므로 재료모델에 따른 휨부재의 설계 휨강

도 및 휨-압축 부재에서의 P-M 상관도를 분석하였다. 이 연구의 해석 결과를 토대로 한 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) KCI 2017에서는 콘크리트 압축력 산정을 위해 KCI 2012에서와 동일한 형태의 등가직사각형 압축응력블록 모델을 사용하고 있으나, 압축응력블록의 크기를 산정시, 콘크리트 설계기준 압축강도에 따른 계수 η 를 적용한다는 점에서 차이가 있다.
- 2) 직사각형 단면을 갖는 휨부재에서 p-r곡선을 사용한 설계 휨강도는 등가직사각형 응력블록을 사용한 경우에 비해 약 10 % 이내의 작은 값을 보였다.
- 3) 직사각형 단면을 갖는 휨-압축부재에서 인장지배 구간의 설계 강도는 재료모델에 따라 큰 차이가 없다. 그러나 압축지배 구간의 설계 강도는 p-r곡선에 의한 값이 가장 크고, 다음으로 KCI 2012 그리고 KCI 2017 순으로 평가되었다. 특히 이러한 경향은 콘크리트 압축강도와 철근비가 증가할수록 증가하였다.
- 4) KCI 2017의 등가직사각형 압축응력블록을 사용할 경우 압축지배 구간에서 설계 강도가 가장 작게 평가되므로 보수적인 설계 및 해석이 가능하였다. 이에 재료모델에 따른 설계 강도 차이가 약 16 % 까지 발생할 수 있으므로 휨-압축 해석을 위한 재료 모델 선정에 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.
- 5) 이 연구는 재료모델에 대한 이론적 해석을 통한 비교만을 수행하여 재료모델의 합리성을 분석하는데 한계가 있다. 이에 추후 철근콘크리트 부재의 휨-압축 실험결과에 대한 비교 분석이 필요할 것으로 판단된다.

- [4] Korean Institute of Bridge and Structural Engineers, Korea Highway Bridge Design Code(Limit State Design), p.9-80, Gunsulbook, 2015, pp.5-121-5-130.
- [5] CEN, Eurocode 2 : Design of Concrete Structures, p.227, European Committee for Standardization, 2002, pp.33-37.
- [6] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Concrete Structure Flexure and Compression Design Code(KDS 14 20 20), p.23, Korea Construction Standards Center, 2021, pp.5-9.

최 승 원(Seung-Won Choi)

[정회원]



- 2003년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학석사)
- 2008년 8월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학박사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 조선이공대학교 토목건설과 부교수

<관심분야>

콘크리트 구조 및 재료

References

- [1] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea Structural Concrete Design Code, p.342, Korea Concrete Institute, 2012, pp.96-110.
- [2] J. H. Lee, K. S. Lim, D. K. Hwang, "Compressive Stress Distribution of Concrete for Performance-Based Design Code", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 3, pp.365-376, June, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2011.23.3.365>
- [3] Korea Concrete Institute, KCI Model Code, p.637, Korea Concrete Institute, 2017, pp.121-158, pp.529-536.