



포물선-직선 압축응력-변형률 관계를 이용한 철근콘크리트 부재의 횡구속 효과

최승원 ^{1)*} · 김 우 ²⁾

¹⁾조선이공대학교 토목건설과 ²⁾전남대학교 토목공학과

Confinement Effect of Reinforced Concrete Members Using a Parabola-Rectangular Compressive Stress-Strain Relationship

Seung Won Choi^{1)*} and Woo Kim²⁾

¹⁾Dept. of Civil and Construction, Chosun College of Science & Technology, Gwangju, 501-744, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Chonnam University, Gwangju, 500-843, Korea

ABSTRACT In general, RC columns are reinforced by spiral or tied steel and a strength of confined concrete is more increased than this of unconfined concrete. And strength and ductility of column are increased by a confinement effect. A confinement effect is affected by concrete strength, spacing, volume and strength of confinement steel. Many researchers suggested various confinement models which reflected these parameters by many experimental results. In this study, a load-strain relationship is evaluated by a confinement model in EC2, and it is compared with Mander model, Saatchioglou-Razvi model and Cusson et al. model. As results, it is appeared that a confinement model in EC2 is able to apply all kinds of concrete strength and a consistency in sectional analysis can be secured using material models in EC2. In parameter studies using material models in EC2, a confinement effect is more affected by a confinement steel than a concrete strength.

Keywords : confinement effect, EC2, Mander model, Saatchioglou-Razvi model, Cusson et al. model

1. 서 론

일반적으로 철근콘크리트 기둥에는 띠철근과 나선철근과 같은 횡방향 철근이 배근되고 횡방향 철근은 콘크리트를 횡구속하여 기둥의 하중저항능력 및 연성능력을 증가시킨다. 이러한 횡방향 구속 효과는 콘크리트 압축강도, 횡방향 철근의 간격, 횡방향 철근 체적비 및 항복강도 등의 영향을 받는데 이는 특히 기둥의 연성도와 같은 내진거동에 큰 영향을 미친다. 콘크리트 압축강도는 횡구속 효과에 직접적인 영향을 미치는 인자로서 많은 연구자^{1)~3)}들에 의해 다양한 모델이 제시되었다. 이들 연구자들은 주로 콘크리트 압축강도 및 횡철근의 배근 간격 등을 고려한 실험을 통해 횡구속 효과에 대한 모델을 제시하였다. Mander 등(1988)¹⁾ 과 Saatchioglou-Razvi (1992)²⁾는 보통강도 콘크리트에 대한 띠철근 및 나선철근 기둥의 부재 실험을 통해 횡구속 콘크리트의 응력-변형률 모델을 제시하였다. 그러나 이 모델을 고강도 콘크리트에 적용할 경우에는 연성거동이 과대평가되는 경향을 보인다.

이에 1980년대 후반부터 Fafitis-Shah (1985), Muguruma (1983, 1991), Cusson-Paultre (1995)³⁾ 및 Saatchioglou-Razvi (1999) 등에 의해 고강도 콘크리트의 구속모형에 대해 연구가 진행되었다. 그러나 제안된 모델들은 구속 효과에 영향을 미치는 다수의 영향 인자들을 각각의 실험을 통해 산정하였고 이에 고강도 콘크리트의 특성을 정확하게 예측하는 모델은 아직도 거의 없는 실정이다.⁴⁾ 이와 같이 현재까지 다양한 형태의 콘크리트 구속모델에 대한 연구가 진행되어 왔으나, 콘크리트 강도 및 다양한 변수에 관계없이 적용 가능한 횡구속 모델은 아직까지 제시되고 있지 않다. 이로 인해 기둥의 단면 해석시 횡구속 되지 않은 피복콘크리트 및 횡구속된 심부콘크리트에 각각 다른 형태 즉, 응력-변형률 모델의 유도 배경이 다른 모델이 적용되기 때문에 해석에 일관성도 결여되어 있다.

유로코드 2 (Eurocode 2, EC2)⁵⁾에서는 비구속 콘크리트의 압축응력-변형률 관계가 포물선-직선 형상(parabola-rectangular curve, p-r 곡선)으로 제시되어 있고, 횡구속 철근이 배치된 콘크리트에 대해서도 일반 콘크리트와 동일하게 p-r 곡선 형태의 응력-변형률 모델을 제시되어 있다. 이러한 EC2의 횡구속 모델은 기존의 횡구속 모델들이 콘크리트의 강도에 따라 각각 다른 형태로 적용되고 있는데 반해, p-r 곡선 형

*Corresponding author E-mail : swchoi@cst.ac.kr

Received May 29, 2014, Revised July 25, 2014,

Accepted December 12, 2014

©2015 by Korea Concrete Institute

태의 횡구속 콘크리트 응력-변형률 모델을 보통강도 콘크리트 뿐만 아니라 고강도 콘크리트에도 적용할 수 있다는 점에서 기존의 모델과 큰 차이가 있다. 즉, 콘크리트 강도의 영향은 최대강도가 발현되는 점에서의 변형률 및 극한 변형률을 변화시키며 그 특성을 고려하고 있다.

따라서 이 연구에서는 횡구속된 축압축부재에 대하여 EC2에서 제시한 비구속 및 구속 콘크리트의 재료 모델을 기반으로 하중-변형 관계를 해석적으로 산정하여 이 모델의 특성을 분석하고자 하였다. 그리고 EC2의 모델에 의해서 산정된 횡구속 효과를 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트에 대한 기존의 연구자들의 제안 모델과 비교·분석하였다. 마지막으로 EC2에서 제시한 재료모델을 적용하여 콘크리트 압축강도, 횡철근 항복강도 및 횡철근 배치 간격에 따른 구속효과의 차이를 분석하여 EC2 모델에 의한 단면 해석의 일관성을 살펴보고자 하였다.

2. 횡구속된 콘크리트의 구성모델

2.1 횡구속 압력

띠철근이나 나선철근과 같은 횡철근이 배치된 단면에서는 횡철근이 파단되기 전까지 심부콘크리트를 횡방향으로 구속한다. 이러한 철근이 항복력을 발휘할 때 횡구속 압력(f_l)은 Fig. 1과 같이 나선철근을 일정한 두께로 콘크리트 표면에 균일하게 분포시켜서 다음 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$f_l = \frac{2A_{sp}f_y}{d_c s} \quad (1)$$

여기서, A_{sp} 는 횡구속 철근의 단면적, f_y 는 횡구속 철근의 항복강도, d_c 는 횡구속된 원형 단면의 지름이고, s 는 횡구속 철근의 수직 간격을 나타낸다.

심부콘크리트 부피에 대한 횡방향 철근 부피비(ρ_{sp})는 다음 식 (2)와 같이 정의할 수 있다. 또한, 식 (2)를 횡구속 철

근의 단면적(A_{sp})으로 정리하여 식 (1)에 대입하면 다음과 같이 횡구속 압력을 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_{sp} = \frac{4A_{sp}}{d_c s} \quad (2)$$

$$f_l = 0.5\rho_{sp}f_y \quad (3)$$

2.2 EC2의 횡구속 모델

횡구속 압력은 횡철근의 간격에 따라 변하는데 이러한 효과를 반영하기 위해 EC2에서는 횡방향 철근 형태와 철근 배치 간격에 따른 유효구속면적을 반영하는 감소계수(α_s)를 적용한 유효 횡구속 압력(f_{lc})을 적용하였다.

$$f_{lc} = 0.5\alpha_s\rho_{sp}f_y \quad (4)$$

이때, 횡철근으로 후프철근(hoop) 및 나선철근(spirals)을 사용한 경우 감소계수는 각각 다음 식 (5)와 같다.

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s}{d_c}\right)^2 \quad (5-a)$$

$$\alpha_s = 1 - \frac{s}{d_c} \quad (5-b)$$

EC2에서는 식 (1)~(5)에 의해 산정된 횡구속 압력에 의해 증가된 횡구속 콘크리트의 최대강도($f_{ck,c}$) 및 한계 변형률($\epsilon_{cu2,c}$)을 다음 식 (6) 및 (7)을 통해 산정하도록 하고 있다. 또한, 횡구속 콘크리트의 최대강도에 대응하는 변형률($\epsilon_{co,c}$)은 비구속 콘크리트의 최대강도에 대응하는 변형률(ϵ_{co})의 향으로 다음 식 (8)과 같이 산정한다.

$$\begin{aligned} f_{ck,c} &= f_{ck} + 2.5\alpha_s\rho_{sp}f_y \text{ for } 0.5\alpha_s\rho_{sp}f_y \leq 0.05f_{ck} \\ f_{ck,c} &= 1.125f_{ck} + 1.25\alpha_s\rho_{sp}f_y \text{ for } 0.5\alpha_s\rho_{sp}f_y > 0.05f_{ck} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\epsilon_{cu2,c} = \epsilon_{cu2} + 0.1\alpha_s\rho_{sp}f_y/f_{ck} \quad (7)$$

$$\epsilon_{co,c} = \epsilon_{co}(f_{ck,c}/f_{ck})^2 \quad (8)$$

이와 같이 EC2에서는 압축 영역 콘크리트의 응력-변형률 관계를 p-r 곡선(Fig. 2(a))으로 제시하였고, 띠철근이나 나선철근으로 보강된 압축 영역 콘크리트 응력-변형률 관계 또한 비구속 콘크리트의 p-r 곡선을 기반으로 증가된 p-r 곡선 형태의 응력-변형률 관계를 사용하고 있다.

2.2 Mander 모델

Mander 등은 1973년 Popovics가 제안했던 응력-변형률식

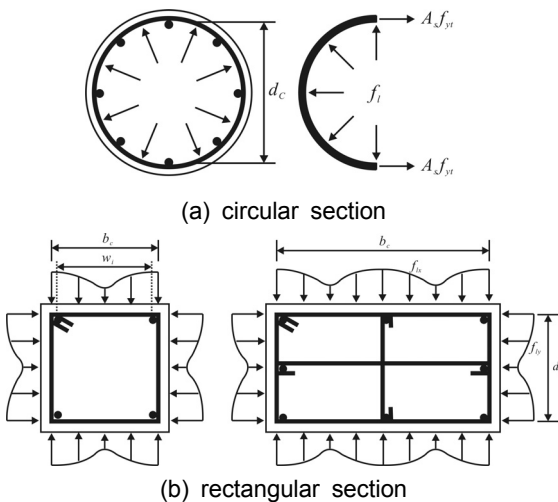


Fig. 1 Confining effect

을 기반으로 하여 심부콘크리트 면적(A_{cw})에 대한 유효 구속 심부콘크리트 면적(A_c)의 비로 표현되는 유효구속계수(k_c)를 통해 유효 횡구속 압력(f_{le})을 식 (10)과 같이 산정하였다. 여기서, ρ_{cc} 는 심부콘크리트 면적에 대한 축방향 철근비, w 는 축방향 철근의 순간격을 나타낸다.

$$k_c = \frac{A_c}{A_{cw}} = \frac{\left(1 - \sum \frac{w^2}{6b_c d_c}\right) \left(1 - \frac{s}{2d_c}\right) \left(1 - \frac{s}{2d_c}\right)}{1 - \rho_{cc}} \quad (9)$$

$$f_{le} = 0.5k_c \rho_{sp} f_y \quad (10)$$

이를 통해 횡구속 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 다음 식 (11)과 같이 나타낸다. 여기서, $x = \epsilon_c / \epsilon_{cc}$, $r = E_c / (E_c - E_{sec})$, $E_{sec} = f'_{cc} / \epsilon_{cc}$ 이고, ϵ_{cc} 는 횡구속 콘크리트의 최대강도(f'_{cc})에 대응하는 변형률이다. f'_{cc} 은 비구속 콘크리트의 최대강도이다.

$$f_c = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (11)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (12)$$

횡구속 콘크리트의 최대강도(f'_{cc})는 1975년 William과 Warnke 이 제시한 다축 파괴면에 대한 5변수(five-parameters) 모델을 통해 다음 식 (13)과 같이 산정하였다.

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_{le}}{f'_{co}}} - 2 \frac{f_{le}}{f'_{co}} \right) \quad (13)$$

2.3 Saatchioglou-Razvi 모델

Saatchioglou와 Razvi는 Richart 등⁶⁾이 제안한 횡구속 콘크리트의 최대 응력($f'_{cc} = f'_{co} + 4.1 f_l$)을 바탕으로 횡구속 콘크리트의 최대응력(f'_{cc})을 다음 식 (14)와 같이 유효 횡구속 압력(f_{le})의 함수로 표현하였다.

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_{le} \quad (14)$$

그리고 유효 횡구속 압력은 다음 식 (15)와 같이 평균 횡구속 응력(f_l)의 함수로 나타냈다. 이때, 계수 $k_1 = 6.7(f_{le})^{-0.17}$

이고, k_2 는 나선철근이 배근된 원형기둥일 경우 1.0이며, 사각형 단면에서는 식 (17)과 같이 산정할 수 있다.

$$f_{le} = k_2 f_l \quad (15)$$

$$f_l = \frac{\sum A_s f_y \sin \alpha}{s b_c} \quad (16)$$

$$k_2 = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_c}{s}\right) \left(\frac{b_c}{s_l}\right) \left(\frac{1}{f_l}\right)} \leq 1.0 \quad (17)$$

이로부터 Saatchioglou와 Razvi는 Fig. 2(c)에서와 같이 포물선 형태의 상승부(식 (18))와 직선형태의 하강부를 갖는 횡구속 콘크리트의 응력-변형률 모형을 제안하였다.

$$f_c = f'_{cc} \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc,c}} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc,c}} \right)^2 \right]^{1+2K} \leq f'_{cc} \quad (18)$$

이때 심부콘크리트의 최대응력에 대응하는 변형률($\epsilon_{cc,c}$)은 다음 식 (19)와 같고, $K = k_1 f_{le} / f'_{co}$ 이다.

$$\epsilon_{cc,c} = \epsilon_{co} [1 + 5K] \quad (19)$$

2.4 Cusson-Paultre 모델

Cusson과 Paultre는 Richart 등이 제안한 횡구속 콘크리트의 최대 응력과 실험 결과를 바탕으로 횡구속된 고강도 콘크리트의 응력-변형률 관계를 제안하였다. 횡구속된 콘크리트의 최대 응력(f'_{cc})은 유효 횡구속 지수(f_{le} / f_{co})를 통해 다음 식 (20)과 같이 산정하였다.

$$f'_{cc} / f'_{co} = 1.0 + 2.1 (f_{le} / f_{co})^{0.7} \quad (20)$$

Fig. 2(d)의 응력 상승부(OA)에는 1973년 Popovics가 제안한 응력-변형률 모델(식 (11))이 적용되었고, 응력 하강부(ABC)는 1985년 고강도 콘크리트에 대해 Fafitis와 Shah가 제안한 식을 수정하여 적용하였다(식 (21)).

$$f_c = f'_{cc} \cdot \exp[k_1 (\epsilon_c - \epsilon_{cc}) k_2] \quad (21)$$

여기서, k_1 과 k_2 는 각각 응력 하강부의 경사를 결정하는 계

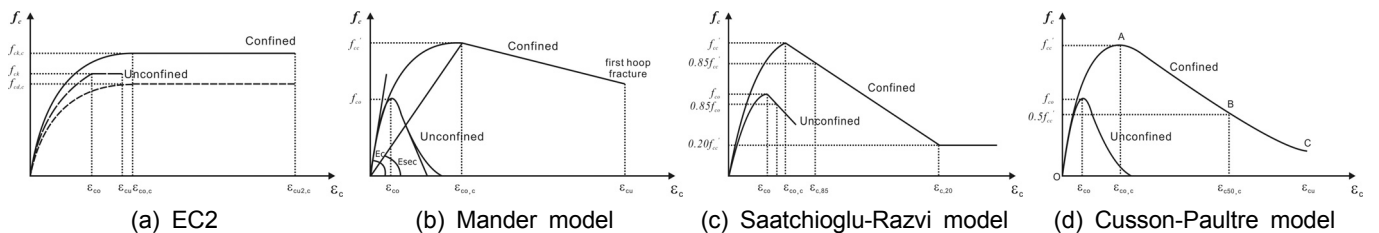


Fig. 2 Design diagram for confined concrete

수 및 응력 하강부의 곡률을 결정하는 계수로서 다음 식 (22) 및 (23)과 같다. 적절히 확보된 콘크리트의 경우 k_1 및 k_2 는 큰 값을 갖고, 이에 따라 응력 하강부는 완만해지고 볼록한 형태가 된다.

$$k_1 = \frac{\ln 0.5}{(\epsilon_{c50,c} - \epsilon_{\omega,c})^{k_2}} \quad (22)$$

$$k_2 = 0.58 + 16(f_{le}/f_{\omega})^{1.4} \quad (23)$$

여기서, $\epsilon_{c50,c}$ 는 횡구속 콘크리트 최대응력(f'_{cc})의 50%에 해당하는 응력에 대응하는 변형률로서 $\epsilon_{c50,c} = \epsilon_{c50,u} + 0.15(f_{le}/f_{\omega})^{1.1}$ 이고, $\epsilon_{c50,u} = 0.004$ 이다.

$$\epsilon_{\omega,c} = \epsilon_{\omega} + 0.21(f_{le}/f_{\omega})^{1.7} \quad (24)$$

3. 해석 대상 및 해석 결과

3.1 해석 대상 및 변수

일축 압축력이 작용하는 기둥에서 횡구속 콘크리트 모델에 따른 하중-변형 관계를 살펴보기 위하여 Sheikh와 Uzumeri가

수행한 사각형의 단면 기둥을 검토 대상으로 선정하였다. Sheikh와 Uzumeri는 단면이 305×305×1,960 mm인 정사각형의 보통강도(35 MPa) 콘크리트를 사용한 24개의 횡구속된 기둥에 대하여 일축 압축 실험을 수행하였다. Fig. 3과 Table 1(a)에서는 Sheikh와 Uzumeri의 24개의 시험체 중 이 연구에서 사용한 8개의 기둥 단면의 형상 및 실험 변수를 나타내었고, 이 실험 결과를 EC2, Mander, Saatchioglu-Razvi

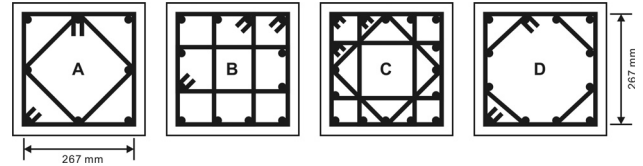


Fig. 3 Cross-section by Sheikh and Uzumeri's test

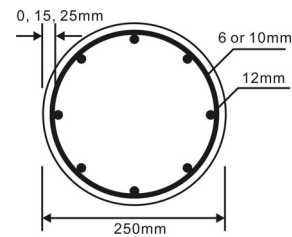


Fig. 4 Detail of column tested by Liu et al.

Table 1 Column properties

a) Sheikh and Uzumeri's test

Specimen	Longitudinal steel			Tie steel				Concrete
	d_b [mm]	ρ_s [%]	f_y [MPa]	d_h [mm]	ρ_v [%]	s [mm]	f_{yh} [MPa]	
2A1-1	15.8	1.72	387	4.76	0.80	57.1	540	37.5
2A6-15	15.9	1.71	403	6.35	2.32	35.1	480	31.7
4B3-19	19.0	3.67	392	7.94	1.80	101.6	480	33.4
4B6-21	19.0	3.67	392	6.35	2.40	47.8	480	35.5
2C1-16	12.7	2.22	407	3.18	0.76	50.8	700	32.5
2C5-17	12.7	2.22	407	7.94	2.37	101.6	480	32.9
4D4-23	19.0	3.67	392	4.76	1.70	28.7	540	35.8
4D6-24	19.0	3.67	392	6.35	2.30	38.1	480	35.9

b) Liu et al.'s test

Specimen	Tie steel					Concrete		
	d_h [mm]	A_h [mm ²]	ρ_v [%]	f_{yh} [MPa]	E_s [MPa]	s [mm]	f_c [MPa]	ϵ_c [mm/m]
2C60-10S50-15	10.0	78.5	6.0	470	219,000	50	59	42,000
2C60-10S100-15	10.0	78.5	3.0	470	219,000	100	59	42,000
2C60-10S150-15	10.0	78.5	2.0	470	219,000	150	59	42,000
2C80-10S50-15	10.0	83.3	6.4	660	217,000	50	82	46,300
2C80-6S50-15	7.1	39.6	3.0	620	210,000	50	82	46,300
Longitudinal steel	d_h [mm]	A_h [mm ²]	ρ_s [%]	f_{yh} [MPa]	E_s [MPa]			
	12.1	920	1.8	430	198,000			

ρ_v : volumetric ratio of lateral reinforcement

및 Cusson 등이 제시한 횡구속 콘크리트 모델을 적용한 단면 해석 결과와 비교·분석하였다. 그러나 Cusson 등이 제시한 횡구속 모델은 고강도 콘크리트에 적용되는 모델이므로 고강도 콘크리트를 사용한 Liu 등의 일축 압축 실험 결과⁷⁾를 동일한 방법으로 비교·분석하였다. Fig. 4에서와 같이 Liu 등은 지름이 250 mm, 높이가 1,600 mm인 고강도 콘크리트 (60 및 80 MPa)를 사용한 원형기둥을 대상으로 일축 압축 실험을 수행하였고, Table 1(b)에서는 Liu 등의 실험 중 이 연구에서 사용한 단면에 대한 재료 특성을 나타내었다. 이 연구에서는 구속되지 않은 피복콘크리트의 압축 모델로서 EC2에서 제시하는 p-r 곡선을 사용하였고, 최대강도에 대응하는 변형률(ϵ_{cr})은 0.002, 극한변형률(ϵ_{cu})은 0.0033으로 적용하였다.

3.2 Sheikh-Uzumeri 실험의 해석 결과

Table 2에서는 각 실험체의 최대하중을 나타내었고, Fig. 5에서는 각 실험체의 실험 및 해석을 통한 하중-변형률 관계를 나타내었다. A타입의 단면을 갖는 실험체(2A1-1, 2A6-15)의 경우 최대하중의 해석값은 실험값의 약 111~176% 수준으로 나타났고, B타입의 단면을 갖는 실험체(4B3-19, 4B6-21)의 경우 최대하중의 해석값은 실험값의 약 94~122% 수준으로 나타났다. 그리고 C타입의 실험체(2C1-16, 2C5-17)의 경우 최대하중의 해석값은 실험값의 약 101~130% 수준이며, D타입의 실험체(4D4-23, 4D6-24)의 경우 최대하중의 해석값은 실험값의 약 97~156% 수준으로 나타났다. 이와 같이 대부분의 해석 모델을 통해 산정된 최대하중은 실험값에 비해 과대평가되었으나, EC2의 모델에 의한 최대하중은 실험값의 약 94~111% 수준으로 다른 연구자들의 모델에 의한 약 99~176% 수준에 비해 최대하중을 잘 예측하고 있는 것으로 나타났다. 심부콘크리트의 최대응력-변형률 값을 나타낸 Table 3에서 볼 수 있듯이 횡구속 콘크리트의 응력-변형

률 관계는 각 해석모델에 따라 최대강도가 나타나는 변형률에 차이가 발생하였는데, 이러한 차이는 피복콘크리트가 하중의 일부를 부담하기 때문으로 판단된다.

최대하중 이후의 결과를 비교해 보면, Mander 모델에 의한 해석값은 실험값보다 과대평가되었고, Saatchioglou-Razvi 모델에 의한 값은 실험값과 비교적 유사한 값을 갖는 것으로 나타났는데, 이는 Saatchioglou-Razvi 모델에서는 응력 상승부와 하강부가 각각 별개의 식으로 산정되기 때문으로 사료된다. 그리고 EC2에 의한 해석값은 실험값에 비해 과소평가되어 보수적인 결과를 나타내는 것으로 나타났다. Cusson

Table 2 Maximum load calculated of Sheikh-Uzumeri's test [kN]

Name	Test	EC2	Mander	Saatchioglou-Razvi	Cusson et al.
2A1-1	3416.2 [1.00]	3795.5 [1.11]	4490.6 [1.31]	4012.6 [1.17]	4480.1 [1.31]
2A6-15	2945.4 [1.00]	4078.4 [1.38]	5190.7 [1.76]	4167.2 [1.41]	4638.5 [1.57]
4B3-19	4092.4 [1.00]	4161.5 [1.02]	4962.9 [1.21]	4389.4 [1.07]	4972.4 [1.22]
4B6-21	4757.4 [1.00]	4487.0 [0.94]	5362.8 [1.13]	4695.9 [0.99]	5327.5 [1.12]
2C1-16	3397.3 [1.00]	3493.8 [1.03]	4256.6 [1.25]	3875.2 [1.14]	4242.6 [1.25]
2C5-17	3522.9 [1.00]	3564.9 [1.01]	4566.3 [1.30]	3899.8 [1.11]	4497.7 [1.28]
4D4-23	3447.8 [1.00]	4490.0 [1.30]	5377.5 [1.56]	4774.2 [1.38]	5341.4 [1.55]
4D6-24	4780.9 [1.00]	4649.6 [0.97]	5485.8 [1.15]	4768.0 [1.00]	5334.8 [1.12]

[] : ratio of the model result to the test result

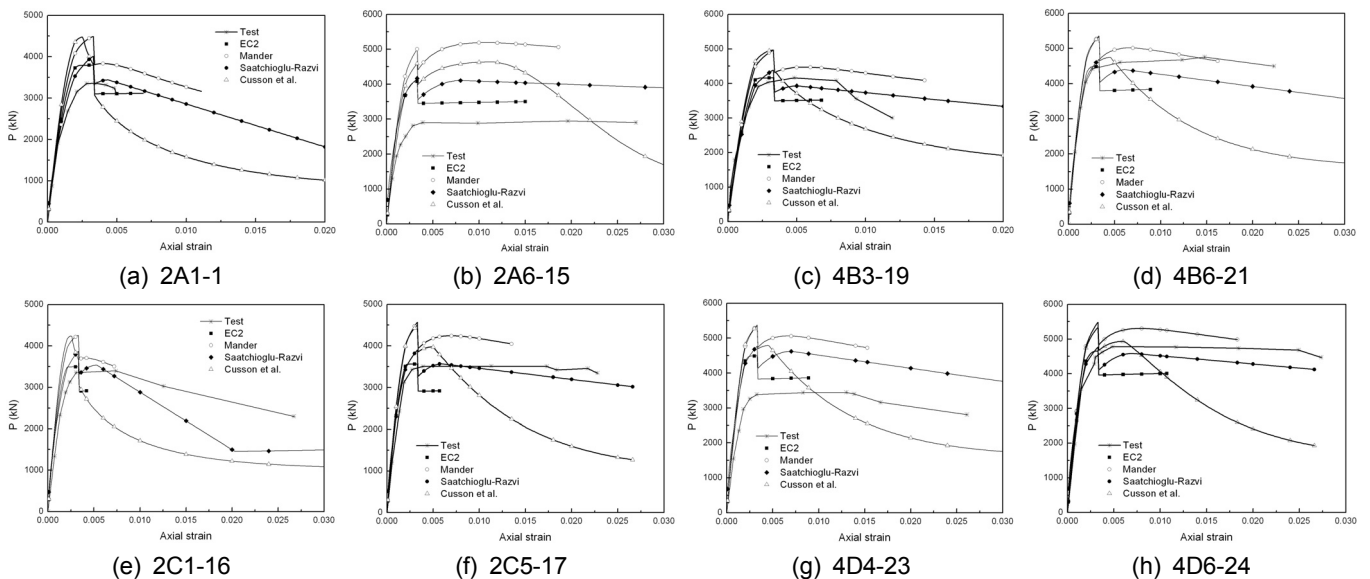


Fig. 5 Load-strain curve of Sheikh-Uzumeri's test

Table 3 Stress-strain calculated of core concrete of Sheikh-Uzumeri's test

Model column	EC2		Mander		Saatchioglu-Razvi		Cusson et al.	
	Stress [MPa]	Strain	Stress [MPa]	Strain	Stress [MPa]	Strain	Stress [MPa]	Strain
2A1-1	34.7 [1.00]	0.0023 [1.00]	44.9 [1.29]	0.0042 [1.83]	42.7 [1.23]	0.0054 [2.35]	44.4 [1.28]	0.0025 [1.09]
2A6-15	35.6 [1.00]	0.0033 [1.00]	59.9 [1.68]	0.0102 [3.09]	44.7 [1.26]	0.0079 [2.39]	52.0 [1.46]	0.0112 [3.39]
4B3-19	30.9 [1.00]	0.0023 [1.00]	44.8 [1.45]	0.0054 [2.35]	36.6 [1.18]	0.0048 [2.09]	42.7 [1.38]	0.0035 [1.52]
4B6-21	34.8 [1.00]	0.0026 [1.00]	51.8 [1.49]	0.0065 [2.5]	43.1 [1.24]	0.0061 [2.35]	48.2 [1.39]	0.0045 [1.73]
2C1-16	28.6 [1.00]	0.0021 [1.00]	39.6 [1.38]	0.0040 [1.90]	37.2 [1.30]	0.0053 [2.52]	39.0 [1.36]	0.0025 [1.19]
2C5-17	29.7 [1.00]	0.0023 [1.00]	48.6 [1.64]	0.0068 [2.96]	37.2 [1.25]	0.0053 [2.30]	44.9 [1.51]	0.0049 [2.13]
4D4-23	34.8 [1.00]	0.0026 [1.00]	51.8 [1.49]	0.0064 [2.46]	45.7 [1.31]	0.0069 [2.65]	48.2 [1.39]	0.0045 [1.73]
4D6-24	37.2 [1.00]	0.003 [1.00]	55.9 [1.50]	0.0076 [3.30]	52.1 [1.40]	0.009 [3.91]	50.7 [1.36]	0.006 [2.61]

[] : ratio of result of a model to the result in EC2

Table 4 Maximum load calculated of Liu et al.'s test [kN]

Name	Test	EC2	Mander	Saatchioglu-Razvi	Cusson et al.
2C60-10S50-15	2812.2 [1.00]	3509.3 [1.25]	3848.0 [1.37]	3482.5 [1.24]	3673.9 [1.31]
2C60-10S100-15	2335.0 [1.00]	3335.1 [1.43]	3671.9 [1.57]	3254.7 [1.39]	3738.9 [1.60]
2C60-10S150-15	2176.3 [1.00]	3204.1 [1.47]	3587.0 [1.65]	3199.6 [1.47]	3315.9 [1.52]
2C80-10S50-15	3563.6 [1.00]	4697.3 [1.32]	5003.9 [1.40]	4581.5 [1.29]	4864.2 [1.36]
2C80-6S50-15	3846.3 [1.00]	4442.9 [1.16]	4864.0 [1.26]	4334.1 [1.13]	5015.8 [1.30]

[] : ratio of result of a model to the test result

등이 제안한 모델을 사용한 경우 하중-변형관계의 상승부분은 다른 모델들과 마찬가지로 비교적 실험값을 잘 예측하는 것으로 나타났으나, 곡선의 하강부분에서는 실험값 뿐만 아니라 다른 모델에 의한 값과 비교할 경우에도 큰 차이가 발생하였다. 이는 근본적으로 Cusson 등이 제시한 응력-변형률 모델이 고강도 콘크리트에 적용되는 모델이기 때문으로 판단된다. 각 실험체의 극한변형률은 각 모델 해석값 및 실험값에 따라 차이가 발생했고, 이는 각 모델에서 주어지는 극한변형률의 산정 배경 및 실험 오차에 기인하는 것으로 판단된다. 또한, 실험체 4B3-19와 4B6-21에서와 같이 횡철근비가 약 33% 증가함에 따라 EC2 모델에 의한 단면의 최대강도는 약 8% 증가하였고, 부재의 극한변형률 역시 약 13% 증가하여 연성적으로 거동함을 볼 수 있다.

Sheikh-Uzumeri의 실험에 대한 해석결과 EC2의 모델에 의한 하중-변형 관계는 비교적 실험 및 다른 연구자들의 해석값과 유사한 형태의 거동 예측이 가능한 것으로 나타났고, 다른 모델에 비하여 보수적인 결과를 산출하는 것으로 나타났다. 또한, 횡구속 단면의 피복 및 심부 콘크리트 부

분에 EC2에서 제시하는 응력-변형률 모델만을 적용함으로써 해석의 일관성도 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

3.3 Liu et al. 실험의 해석 결과

Table 4에서는 고강도 콘크리트를 사용한 Liu 등의 일축 압축 실험에 대한 최대하중을 나타내었다. EC2 모델에 의한 최대하중은 실험값에 비해 약 16~47% 과대평가되었으나, 다른 모델들에 의한 최대하중은 실험값에 비해 약 13~65% 과대평가되어 EC2의 모델에 의한 최대하중도 비교적 실험값을 잘 예측하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 횡철근 간격이 증가함에 따라 각 모델에 의한 해석값과 실험값의 차이는 증가하였다. 즉, 횡철근 간격이 증가함에 따라 EC2 모델에 의한 최대강도는 횡철근 간격이 50 mm인 경우에 비해 약 91~95% 수준으로 감소하였고, 극한변형률 역시 약 41~56% 수준으로 감소하여 횡구속 철근비가 감소하면서 횡구속 효과가 작아지는 경향을 보였다.

Fig. 6은 Liu 등의 실험에 의한 하중-변형률 관계를 나타

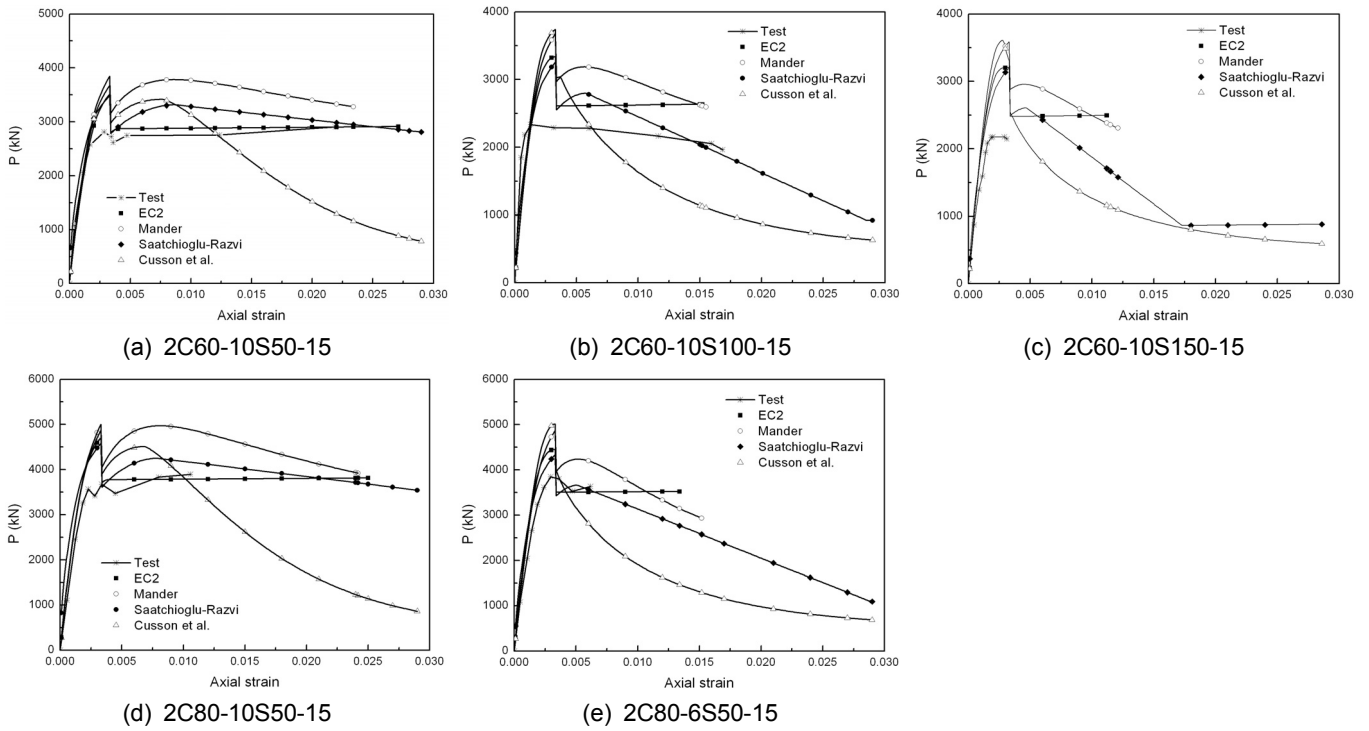


Fig. 6 Load-strain curve of Liu et al.'s test

Table 5 Stress-strain calculated of core concrete of Liu et al.'s test

Model	EC2		Mander		Saatchioglu-Razvi		Cusson et al.	
	Stress [MPa]	Strain	Stress [MPa]	Strain	Stress [MPa]	Strain	Stress [MPa]	Strain
2C60-10S50-15	71.4 [1.00]	0.0041 [1.00]	97.5 [1.37]	0.0085 [2.07]	83.9 [1.18]	0.0087 [2.12]	86.9 [1.22]	0.0076 [1.85]
2C60-10S100-15	63.9 [1.00]	0.0033 [1.00]	80.4 [1.26]	0.0056 [1.70]	69.2 [1.08]	0.0057 [1.73]	79.2 [1.24]	0.0037 [1.12]
2C60-10S150-15	60.1 [1.00]	0.0029 [1.00]	73.8 [1.23]	0.0045 [1.55]	63.7 [1.06]	0.0047 [1.62]	71.9 [1.20]	0.0028 [0.97]
2C80-10S50-15	97.4 [1.00]	0.0040 [1.00]	131.7[1.35]	0.0081 [2.03]	110.9[1.14]	0.0079 [1.98]	118.5[1.22]	0.0068 [1.70]
2C80-6S50-15	87.2 [1.00]	0.0032 [1.00]	107.7[1.24]	0.0051 [1.59]	91.5 [1.05]	0.0051 [1.59]	103.3[1.18]	0.0033 [1.03]

[] : ratio of result of a model to the result in EC2

낸다. 실험에 의한 실험체 파괴 전까지에서 최대하중 이후 Mander 모델 및 Saatchioglu-Razvi 모델에 의한 하중값은 실험값보다 과대평가되었고, Cusson 등의 모델에 비해 최대하중 이후의 하중을 과대평가하는 것으로 나타났다. 이는 Mander 모델 및 Saatchioglu-Razvi 모델이 보통강도 콘크리트에 적용되는 모델이기 때문으로 사료된다. 최대하중 이후 실험체의 파괴시까지를 살펴볼 때, Cusson 등의 모델을 적용한 하중-변형 관계에서 하중은 다른 모델에 비해 과소평가되는데, 이러한 차이는 각 모델의 최대하중 이후 하강부를 정의하는 방법 및 실험체 단면의 특성 등에 따른 것으로 판단된다.

Table 5에서는 Liu 등이 수행한 실험체에 대한 심부콘크리트의 최대응력과 변형률의 값을 나타내었다. 모든 구속 모델에 대해서 콘크리트 강도가 증가할수록 최대응력은 약 32~36% 증가하였으나, 최대응력이 발생하는 변형률은 약 2~10% 감소하여 콘크리트 강도가 증가함에 따라 취성이 증

가하는 경향을 보였다. 또한, 횡철근 간격이 감소함에 따라 최대응력 및 최대응력이 나타나는 변형률은 모두 증가하여 연성능력이 증가하는 경향을 보였다. 실험체 2C60-10S150-15를 제외하면 구속콘크리트의 최대응력이 발생하는 시점은 EC2의 재료모델을 사용할 경우 가장 빠르게 나타났고, 최대응력 역시 다른 모델값에 비해 EC2 모델을 사용할 경우 작게 산정되었다. 즉, EC2 모델을 사용할 경우 다른 구속 모델에 비해 하중이나 변형량이 작게 산정되므로 보수적인 설계 및 해석이 이루어질 수 있는 것으로 사료된다.

Liu 등의 실험에 대한 해석 결과 EC2 모델에 의한 해석 값은 최대하중 전후의 거동에 있어 실험값과 유사한 형태를 보여 이 모델을 통해 고강도 콘크리트를 사용한 일축 실험체의 압축 거동을 잘 예측할 수 있는 것으로 판단된다. 또한, 앞선 Sheikh-Uzumeri의 실험에 대한 해석결과와 마찬가지로 고강도 콘크리트를 사용한 횡구속 단면에 대해서도 피복 및 심부콘크리트 부분에 EC2에서 제시하는 포물-직사

각형 응력-변형률 모델만을 적용함으로써 해석의 일관성도 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 매개변수해석

4.1 해석 대상 및 변수

3장의 실험 결과와 해석 결과를 바탕으로 횡구속된 철근 콘크리트 단면의 횡구속 효과를 EC2의 재료모델을 통해 해석적으로 살펴보았다. 주요 해석변수는 콘크리트 압축강도 (f_c), 횡철근 간격(s) 및 횡철근 강도(f_{yh})이다. 해석 단면은 Fig. 7에서와 같이 400×400 mm (폭×깊이)이고, 피복두께는 50 mm이며, 띠철근이 배치된 정사각형 단면으로 설정하였다. 횡구속 효과는 횡철근의 종류 및 배근 형태에 의해서도 영향을 받지만, 이 연구에서는 Fig. 7에서와 같이 2가지 종류의 형태로 배치된 띠철근 단면에 대한 횡구속 효과 특성만을 살펴보았다. 또한, 주철근과 횡철근의 항복강도와 극한강도의 비인 경화비(hardening ratio)는 모두 1.0으로 가정하였고, 주철근 강도는 400 MPa, 주철근 비는 1%로 가정하였다. Table 6에서는 매개변수해석을 위한 변수와 이에 따른 재료 물성 및 해석 결과를 나타내었다.

4.2 매개변수해석 결과

Table 6에는 포물선-직선 압축응력-변형률 관계를 적용한 압축부재의 최대강도(f_{cc}) 및 극한변형률($\epsilon_{cu,c}$)의 매개변수 해석 결과를 나타내었다. 표에서와 같이 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 최대강도는 약 32~221% 증가하였으나, 극한변형률은 0.0055에서 0.0040까지 지속적으로 감소하여 변형 능력은 압축강도가 30 MPa인 경우에 비하여 약 73~91% 수준으로 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 콘크리트 압축강도가 증가하면 강도는 증가하지만, 변형능력은 감소하므로 변형 능력이 크게 요구되는 부재에서 고강도 콘크리트를 사용할 경우에는 세심한 주의가 필요할 것으로 판단된다. 횡철근 강도가 증가함에 따라 최대강도는 약 2~3% 증가하였고, 극한변형률은 약 15~27% 증가하여 강도의 증가율보다 변형 능력의 증가율이 더 큰 것으로 나타났다. 그리고 횡철근 간격이 증가함에 따라 최대강도는 약 95% 수준까지 감소하였고, 극한변형률 또한 65% 수준까지 감소하였다. 횡철근의 배치는 Type B와 같고 횡철근 간격을 100 mm으로 할 경우 시험체 No. 1의 최대강도와 극한변형률과 동일

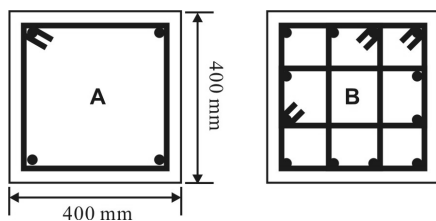


Fig. 7 Cross-section analyzed

한 효과를 나타내도록 하는 횡철근 직경은 10 mm에서 6.1 mm로 감소되는 것으로 나타났다. 또한, 횡철근 직경을 동일하게 적용하면 횡철근 간격을 100 mm에서 120 mm로 약 20% 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다. 즉, 횡철근이 Type B와 같이 배치된 횡구속 효과가 Type A의 횡구속 효과에 비해 우수하므로 동일한 횡철근 직경을 사용할 경우에는 횡철근 간격을 증가시킬 수 있고, 횡철근을 동일한 간격으로 배치할 경우에는 횡철근 직경을 감소시킬 수 있는 것으로 판단된다. 이러한 결과로부터 횡구속 효과에 따른 부재의 변형 성능은 콘크리트 강도보다는 횡철근의 특성 즉, 횡철근 강도 및 횡철근 간격에 의해 크게 영향을 받게 됨을 알 수 있다. 따라서 지진하중 등에 의해 변형 능력이 크게 요구되는 부재의 설계에 있어서 횡철근에 대한 배치를 조정함으로써 소요 연성능력을 확보할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, EC2에서 제시하고 있는 구속 콘크리트 및 비구속

Table 6 Variables and analysis results

No.	f_c [MPa]	Transverse steel			Results		Remark		
		f_{yh} [MPa]	d_b [mm]	s [mm]	f_{cc} [MPa]	$\epsilon_{cu,c}$			
1	30	300	10.0	100	31.7	0.0055	Type A		
2	40				[1.00]	[1.00]			
3	50				[1.32]	[0.91]			
4	60				[1.63]	[0.84]			
5	70				[1.95]	[0.80]			
6	80				[2.26]	[0.76]			
7	90				[2.58]	[0.75]			
8	100				[2.89]	[0.73]			
9	30				400	100		32.2	0.0063
10					500			[1.02]	[1.15]
11	30	300	10.0	34.0	0.0087				
12				50	[1.07]	[1.58]			
13				200	30.5	0.0040			
14	30	300	10.0	30.2	0.0036				
15				6.1	100	31.7	0.0062		
16				10.0	120	35.9	0.0092		
							Type B		

[] : ratio of the each result to the result of No.1

콘크리트에 대한 재료 모델을 일괄적으로 사용함으로써 콘크리트 강도 및 횡철근의 특성에 관계없이 횡구속 단면의 파괴시까지 거동을 서로 다른 배경을 갖는 재료모델을 적용하지 않고 합리적으로 해석할 수 있는 것으로 나타났다.

5. 결 론

이 연구에서는 EC2의 비구속 및 구속 콘크리트 모델을 횡구속된 철근콘크리트 단면에 적용하여 하중-변형 관계를 산정하였고, 기존의 구속모델에 의한 구속 콘크리트를 적용한 해석 사이의 차이를 살펴보았다. EC2에서는 비구속 및 구속 콘크리트에 대해 모두 포물선-직선 형상의 압축응력-변형을 관계를 제시하고 있고, 연구 결과 EC2에서 제시하고 있는 횡구속 모델은 콘크리트의 강도에 관계없이 일축 압축부재의 하중-변형 관계를 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다. 따라서 EC2의 비구속 및 구속 콘크리트 모델을 횡구속된 철근콘크리트 단면 해석에 적용함으로써 서로 다른 형태의 재료모델을 적용하는 불편함이 없이 부재의 파괴시까지의 거동을 일관되고 합리적으로 산정할 수 있는 것으로 나타났다. 이 연구의 해석 결과를 토대로 한 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 콘크리트 강도에 관계없이 비구속 및 구속 콘크리트 단면에 유도 배경이 다른 재료모델을 각각 적용하지 않고 EC2의 포물선-직선 압축응력-변형을 관계만을 일관되게 적용함으로써 단면 해석의 일관성 및 합리성을 확보할 수 있다.
- 2) 보통강도 및 고강도 콘크리트를 사용한 일축 압축부재 실험에서 EC2의 모델을 사용한 최대하중은 각각 실험값의 약 90~103% 및 68~87% 수준으로 비교적 최대하중을 합리적으로 해석하고 있는 것으로 나타났다.
- 3) 콘크리트 강도에 관계없이 횡철근 간격이 감소하여 횡구속 효과가 증가함에 따라 최대강도는 증가하고 극한 변형률도 증가하여 연성거동을 보였고, EC2 모델을 이용하여 이러한 연성거동을 잘 산정할 수 있는

것으로 나타났다.

- 4) 횡구속 효과에 대한 매개변수해석 결과 횡철근 특성 즉, 강도 및 간격을 조정함으로써 구속효과를 크게 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 고강도 콘크리트를 사용한 경우 횡구속 효과에 의해 최대강도는 증가하지만 변형 능력은 감소하므로 변형 성능이 크게 필요한 부재에서는 고강도 콘크리트 사용에 세심한 주의가 필요할 것으로 판단된다.
- 5) 횡구속 효과는 횡철근의 형태에 따라 크게 변하게 되므로 횡철근 형태 및 구속효과에 영향을 미치는 다른 인자에 대해서도 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

References

1. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., "Theoretical stress-strain model for confined concrete", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1988, pp. 1804-1825.
2. Saatchioglu, M. and Razvi, S. R., "Strength and ductility of confined concrete", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1992, pp. 1590-1607.
3. Cusson, D. and Paultre, P., "Stress-strain model for confined high-strength concrete", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1995, pp. 468-477.
4. Shin, S. W. and Han, B. S. "Confinement Effects of High Strength Reinforced Concrete Tied Columns", *Journal of the Korea Concrete Institute, KCI*, Vol. 14, No. 4, 2002, pp. 578-588.
5. European Committee for Standardization, *Eurocode 2-Design of Concrete Structures*, Brussels, 2002, pp. 61-63.
6. Richart, F. E., Brandtzaeg, A., and Brown R. L., "A study of the failure of concrete under combined compressive stresses", Bull. No. 185, University of Illinois, Engineering Experimental Station, Urbana, 104.
7. Esneyder. M., *Modeling of confined concrete*, Degree of Master, University of Toronto, Canada, 2000, 1-176 pp.

요 약 철근 콘크리트 기둥은 일반적으로 횡철근으로 보강되어 있고 횡철근에 의해 횡구속된 심부 콘크리트의 강도는 횡구속 되지 않은 콘크리트에 비해 증가한다. 그리고 횡구속 효과에 의해 기둥의 강도 및 연성은 증가하게 된다. 횡구속 효과는 콘크리트의 압축강도, 횡구속 철근의 간격, 횡철근 량 및 항복강도 등의 영향을 받는다. 이에 여러 연구자들은 실험을 통해 다양한 변수들을 반영하여 횡구속 콘크리트의 구속모델을 제시하였다. 이 연구에서는 유로코드 2의 구속모델을 통해 하중-변형률 관계를 산정하였고, 이를 Mander 모델, Saatchioglu-Razvi 모델 및 Cusson 등 모델에 의한 값과 비교·분석하였다. 해석 결과 EC2에 의한 횡구속 모델은 콘크리트 강도에 관계없이 적용이 가능하였고, EC2의 재료모델을 사용함으로써 단면해석의 일관성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. EC2의 재료모델에 의한 매개변수해석 결과 횡철근의 특성은 콘크리트 압축강도보다 횡구속 효과에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 횡구속 효과, EC2, Mander 모델, Saatchioglu-Razvi 모델, Cusson 등 모델