



## 성능 중심 설계기준을 위한 콘크리트 압축응력 분포

이재훈<sup>1)</sup> · 임강섭<sup>2)</sup> · 황도규<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>영남대학교 건설시스템공학과 <sup>2)</sup>(주)서영엔지니어링

## Compressive Stress Distribution of Concrete for Performance-Based Design Code

Jae-Hoon Lee,<sup>1)</sup> Kang-Sup Lim,<sup>2)</sup> and Do-Kyu Hwang<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Korea

<sup>2)</sup>Seoyeong Engineering Co., Ltd., Seoul 135-240, Korea

**ABSTRACT** The current Concrete Structural Design Code (2007) prescribe the equivalent rectangular stress block of the ACI 318 Building Code as concrete compressive stress distribution for design of concrete structures. The rectangular stress block may be enough for flexural strength calculation, but realistic stress-strain relationship is required for performance verification at selected limit state in performance-based design. Moreover, the ACI rectangular stress block provides non-conservative flexural strength for high strength concrete columns. Therefore a new stress distribution model is required for development of performance-based design code. This paper proposes a concrete compressive stress-strain distribution model for design and performance verification. The proposed model has a parabolic-rectangular shape, which is adopted by Eurocode 2 and Japanese Code (JSCE). It was developed by investigation of experimental test results conducted by the authors and other researchers. The test results cover high strength concrete as well as normal strength concrete. The stress distribution parameters of the proposed models are compared to those of the ACI 318 Building Code, Eurocode 2, Japanese Code (JSCE) and Canadian Code (CSA) as well as the test results.

**Keywords :** concrete compressive stress, stress-strain relationship, parabolic-rectangular curve, performance-based design

### 1. 서 론

콘크리트의 압축강도는 재료 생산기술의 발전에 따라 증가하여 왔으며, 최근에는 압축강도가 200 MPa을 넘는 초고강도 콘크리트가 개발되고 있다. 높은 압축강도를 갖는 콘크리트의 개발에 따라, 고강도 콘크리트의 재료적 특성 및 응력-변형을 관계와 설계에 적용하기 위한 등가 압축응력 분포에 관한 많은 실험적 연구가 이루어져 왔다.

캐나다(CSA), 미국(ACI), 유럽(Eurocode) 등의 설계기준에서는 하나 또는 둘 이상의 콘크리트 압축응력 분포를 제시하고 있다. 우리나라의 콘크리트구조설계기준<sup>1)</sup>은 미국의 ACI 318 설계기준<sup>2)</sup>과 동일한 등가 직사각형 압축응력 분포를 규정하고 있다. 이 콘크리트 압축응력 분포는 압축응력의 높이( $\alpha_1$ )와 압축력이 작용하는 깊이( $\beta_1$ )에 대한 계수로 이루어져 있으며,  $\alpha_1$ 은 0.85로 일정한 값을 제시하고 있고  $\beta_1$ 은 콘크리트의 압축강도에 따라 0.65~0.85 사이의 값을 제시하고 있다. 이러한 ACI 318<sup>2)</sup>의 콘크

리트 압축응력 분포는 1955년에 발표된 Hognestad 등<sup>3)</sup>의 보통 강도 및 낮은 수준의 고강도 콘크리트(6.9~51.7 MPa)에 대한 실험 결과를 토대로 개발되었고, 1970년대에 수행된 Nedderman<sup>4)</sup>과 Kaar 등<sup>5)</sup>의 고강도 콘크리트 실험 결과를 검증한 것이다. 이후 Ibrahim 등,<sup>6)</sup> 이재훈 등<sup>7,8)</sup>과 같은 연구자들이 ACI 318의 콘크리트 압축응력 분포를 고강도 콘크리트 기둥에 적용할 경우 압축 지배 구역에 대한 축력-휨강도가 실험 결과보다 과대평가되어 안전율이 감소하는 문제점이 있음을 보고하였으나, ACI 318은 현재까지 동일한 압축응력 분포를 규정하고 있다. 최근에는 Rizkalla 등<sup>9)</sup>이 미국의 교량 설계기준인 AASHTO-LRFD에서 ACI 318과 동일하게 규정하고 있는 압축응력 분포에 대해 수정안을 제시하였다. 캐나다의 콘크리트구조설계기준(CSA)<sup>10)</sup>은 과거에 ACI 318과 동일한 압축응력 분포를 규정하였으나, Ibrahim 등<sup>6)</sup>의 연구 결과를 반영하여 현재는 수정된 등가 직사각형 압축응력 분포를 제시하고 있다. 유럽<sup>11)</sup>과 일본<sup>12)</sup>의 설계기준도 고강도 콘크리트의 특성을 반영한 콘크리트 압축응력 분포를 제시하고 있다. 국내에서는 이성태 등<sup>13)</sup>이 휨-압축 강도에 영향을 주는 부재의 크기 효과에 대한 연구로서 압축응력 분포 연구에 적용하는 실험 방법으로 실험을 수행한 것

\*Corresponding author E-mail: likeability@paran.com

Received February 14, 2011, Revised April 28, 2011,

Accepted April 28, 2011

©2011 by Korea Concrete Institute

외에는 압축응력 분포에 대한 실험적 연구가 보고된 바 없다.

한편 최근에는 기존의 사양 중심 설계기준을 대신할 성능 중심 설계기준에 관한 관심이 커지고 있다. 성능 중심 설계는 다양한 한계 상태에 대해 일관된 검증 모델을 이용하여 구조물의 성능을 검증하는 개념을 기본으로 한다.

이 연구에서는 국내 재료로 제작한 실험체로, 보통 강도 및 고강도 콘크리트에 대하여 압축응력 분포 자료를 얻기 위한 실험을 수행하였으며, 국외의 실험 결과를 포함하여 압축응력 분포의 특성을 분석하였다. 분석 결과를 바탕으로, 성능 중심 설계에 적용할 수 있도록 극한 한계 상태 해석뿐만 아니라 사용 한계 상태나 그 외의 한계 상태에 대한 해석에도 적용할 수 있는 포물선-직선 압축응력 분포 모델을 제안하였다. 또 극한 한계 상태 해석에 간편히 사용하기 위해 포물선-직선 압축응력 분포 모델과 유사한 결과를 제공하는 직사각형 압축응력 분포 모델을 제안하였다.

## 2. 콘크리트 압축응력 분포

### 2.1 콘크리트 압축응력 분포 특성 계수

휨 부재의 콘크리트 압축응력 분포 연구를 위하여 1955년 Hognestad 등<sup>3)</sup>의 연구자들이 실험 방법을 개발하였고, 극한 상태에서의 압축응력 분포에 대한 특성 계수를 정의하였다. Fig. 1은 극한 상태에서의 휨 부재 변형률 분포와 압축응력의 형태 및 압축응력 분포 특성 계수를 나타낸다. 특성 계수  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ 는 압축응력 분포의 특성을 나타내는 계수로서,  $k_1$ 은 전체 압축 영역에 걸친 평균 압축응력과 최대 압축응력의 비이고,  $k_2$ 는 압축 연단에서 압축력 작용점까지의 거리와 중립축 깊이( $c$ )의 비이며,  $k_3$ 는 최대 압축응력과 실린더 공시체로 측정된 압축강도의 비이다. 이 계수 값들은 콘크리트 기둥의 편심 재하 실험을 통해 도출할 수 있다. Fig. 1의 등가 압축응력 분포는 두 가지 조건을 만족하여야 하는데, 압축응력 분포의 합력이 동일해야 한다는 것과 합력의 작용점이 같아야 한다는 것이다.

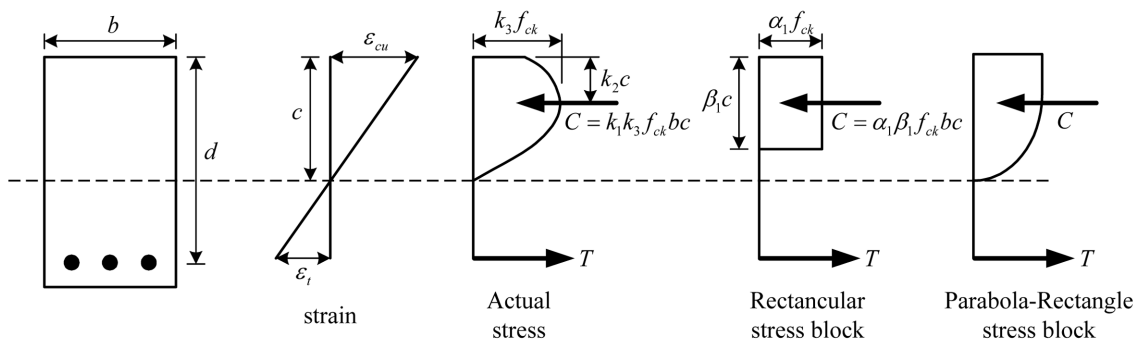


Fig. 1 Strain and stress distribution at ultimate state under bending moment

## 2.2 설계법에 따른 압축응력 분포 모델

미국에서 개발된 강도설계법은 구조물의 극한 상태보다는 부재 단면의 극한 상태에 기초를 둔 설계법으로, 단면에 대한 강도 해석의 정확성을 중요한 요소로 생각하여, 실제와 동일한 강도 해석 결과를 나타내는 분포이면 충분하다는 개념에 기초를 두었다. 따라서 실제에 가까운 응력-변형률 곡선을 사용하기 보다는 변형률을 직접적으로 고려하지 않는 등가 직사각형 압축응력 분포를 사용한다. 반면에 유럽에서 개발된 전통적 개념의 한계 상태 설계법은 구조물의 극한 상태에 기초를 둔 설계법이다. 따라서 정정 구조물에서는 단면의 극한 상태가 구조물의 극한 상태가 되어 강도 설계법과 차이가 없지만, 연속보 등 부정정 구조물에서는 한 단면이 극한 상태에 도달하더라도 구조물 전체가 극한 상태에 도달하지 않고 모멘트 재분배를 통하여 추가 하중을 저항한다는 개념을 기본으로 한다. 모멘트 재분배에 따른 구조물의 극한 상태 저항 성능은 단면의 소성 회전 능력, 즉 연성 능력에 따라 달라지므로, 유럽의 한계 상태 설계법에서는 강도 성능뿐만 아니라 변형 성능도 중요한 요소로 고려한다. 따라서 휨 부재의 콘크리트 압축응력 분포에 있어서도 변형률을 반영하는 응력-변형률 곡선의 형태를 기본으로 하고 있는데, 다만 강도 해석의 간편성을 위하여 등가직 사각형 압축응력 분포를 참고로 규정하고 있는 것이다. 물론 미국의 설계 기준에서도 모멘트 재분배를 허용하고는 있지만, 강도 설계법은 기본적으로 극한 상태의 변형 능력을 기본으로 다루는 설계법은 아닌 것이다.

한 가지 예로, 강도 설계법을 근간으로 하고 있는 콘크리트구조설계기준이나 ACI 318 설계기준에서는 축력의 유무와 관계없이 휨모멘트가 작용할 때의 콘크리트 극한 변형률을 0.003으로 규정하고 있으나, 순수 축력이 작용할 때의 콘크리트 극한 변형률은 명시적으로 규정하지 않고 있다. 따라서 일반 설계자들은 순수 축강도를 계산할 때 콘크리트의 극한 변형률을 고려할 필요 없이, 단순히  $0.85f_{ck}$ 의 응력을 기준으로 계산한다. 그러나 Eurocode 2에서는 휨과 축력이 작용하는 부재의 한계 변형률을 Fig. 2와 같이 제시하고 있다. 즉, 휨을 받는 부재는 압축 연단 콘크리트의 변형률이 휨압축 한계 변형률( $\epsilon_{cu2}$ )

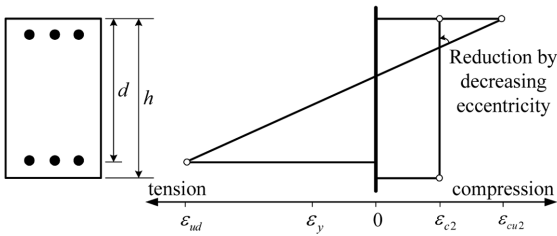


Fig. 2 Limit strain under flexure and axial force

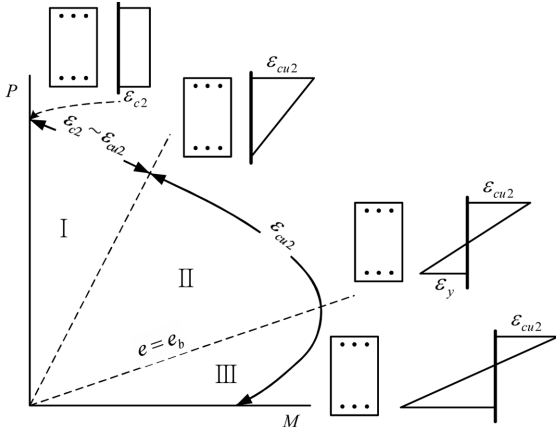


Fig. 3 Limit strain in P-M interaction diagram

에 도달하면 파괴되는 것으로 해석한다. 그러나 순수 축력이 작용하는 부재는 콘크리트가 최대 응력에 도달함과 동시에 파괴에 이르기 때문에, 이 경우에는 콘크리트의 변형률이 순수 압축 한계 변형률( $\epsilon_{c2}$ )에 도달하면 파괴되는 것으로 해석한다. 이러한 한계 변형률을 적용한 예로서, 축력과 휨모멘트를 받는 기둥의 강도 해석에서의 변형률 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 휨모멘트의 작용이 커서 중립축이 단면 내부에 존재하는 경우(구간 II, III)에는 콘크리트의 한계 변형률로  $\epsilon_{cu2}$ 를 사용하며, 작은 편심으로 축력이 지배적이어서 중립축이 단면 외부에 존재하는 경우(구간 I)의 콘크리트 한계 변형률로는  $\epsilon_{c2}$ 를 사용한다.

이와 같은 변형률 한계를 적용하기 위해서 Eurocode 2에서는 변형률이 0에서  $\epsilon_{c2}$ 까지는 포물선이고  $\epsilon_{c2}$ 에서  $\epsilon_{cu2}$ 까지는 직선인 포물선-직선 응력 분포를 규정하고 있다.

### 2.3 주요 설계 기준의 압축응력 분포 모델

단면의 극한 상태에 대한 강도설계법을 근간으로 하는 우리나라와 미국 등의 설계기준에서는 계산의 편의성에 장점이 있는 등가 직사각형 압축응력 분포를 제시하고 있다. 구조물의 극한 상태에 대한 한계 상태 설계법을 근간으로 하는 유럽과 일본 등의 설계기준에서는 포물선-직선 형태의 압축응력 분포를 기본으로 제시하고 있으며, 계산의 간편성을 위한 등가 직사각형 압축응력 분포와 등가 사다리꼴 압축응력 분포를 제시하고 있다. 각국의 콘크리트구조설계기준에서 제시하고 있는 압축응력 분포 모델을 직사각형 응력 분포와 포물선-직선 응력 분포

포를 중심으로 정리한 결과는 다음과 같다. 이 절에서는 각 모델을 비교하기 위하여, 단면의 설계강도 해석을 위한 응력 분포가 아닌 공칭강도 해석을 위한 응력 분포를 대상으로 하였다.

#### 2.3.1 콘크리트구조설계기준과 ACI 318의 응력 분포

콘크리트구조설계기준<sup>1)</sup>과 미국의 ACI 318 Code<sup>2)</sup>는 등가 직사각형 압축응력 분포를 제시하고 있다. Fig. 1에 표현된 직사각형 응력 분포의 계수  $\alpha_1$ 과  $\beta_1$ 의 값은 식 (1)과 (2)와 같다.

$$\alpha_1 = 0.85 \quad (1)$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.007(f'_c - 28) \quad 0.65 \leq \beta_1 \leq 0.85 \quad (2)$$

#### 2.3.2 CSA A23.3-04의 응력 분포

캐나다의 콘크리트구조설계기준 CSA A23.3-04<sup>10)</sup>도 등가 직사각형 압축응력 분포를 제시하고 있으나, 계수  $\alpha_1$ 과  $\beta_1$ 의 값은 ACI 318 Code와 다른 값을 사용한다. 특히 고강도 콘크리트에서  $\beta_1$ 뿐만 아니라  $\alpha_1$ 도 압축강도가 증가함에 따라 점차 감소하는 형태를 취하고 있다. 각 계수 값은 식 (3)과 (4)와 같다.

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015 f'_c \geq 0.67 \quad (3)$$

$$\beta_1 = 0.97 - 0.0025 f'_c \geq 0.67 \quad (4)$$

#### 2.3.3 Eurocode 2의 응력 분포

유럽의 Eurocode 2(이하 EC 2)는 세 가지 형태의 콘크리트 압축응력 분포(포물선-직선, 직사각형, 사다리꼴)를 제시하고 있으며, 설계자가 세 가지 응력 분포 중 하나를 선택하여 설계할 수 있도록 제시하고 있다. 이 연구에서 사다리꼴 분포는 비교 대상이 아니므로 제외하고, 포물선-직선 응력 분포와 직사각형 응력 분포를 다룬다.

##### 1) 포물선-직선 압축응력 분포

EC 2에서 제시하고 있는 포물선-직선 압축응력 분포는 식 (5)~(13)과 같으며, 응력 분포의 형태는 Fig. 4(a)와 같다. 여기서  $\alpha_{cc}$ 는 장기 거동 효과와 강도 성능에 불리한 하중 작용을 고려한 계수로서, EC 2 Part 1에서는 0.8~1.0 사이의 값을 제시하고 1.0을 추천하고 있으며, 교

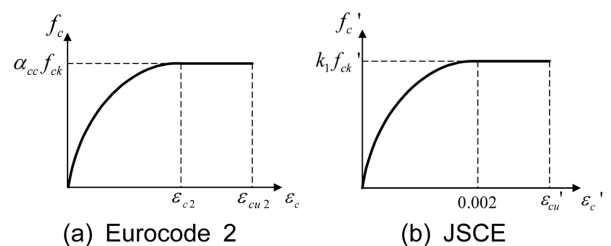


Fig. 4 Parabola-rectangle stress distribution

량에 대한 EC 2 Part 2에서는 0.85를 적용하도록 규정하고 있다.

$$f_c = \alpha_{cc} f_{ck} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad (5)$$

$$f_c = \alpha_{cc} f_{ck} \quad \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \quad (6)$$

여기서,

$$\alpha_{cc} = 1.0 \text{ (general)} \quad 0.85 \text{ (bridges)} \quad (7)$$

$$n = 2.0 \quad f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (8)$$

$$n = 1.4 + 23.4 \left( \frac{90 - f_{ck}}{100} \right)^4 \quad 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{c2} = 0.002 \quad f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{c2} = \frac{2.0 + 0.085(f_{ck} - 50)^{0.53}}{1000} \quad 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{cu2} = 0.0035 \quad f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{cu2} = \left[ 2.6 + 35 \left( \frac{90 - f_{ck}}{100} \right)^4 \right] \times 10^{-3} \quad 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad (13)$$

## 2) 직사각형 압축응력 분포

EC 2의 직사각형 압축응력 분포는 미국이나 캐나다의  $\alpha_1$  및  $\beta_1$ 과 동일한 의미를 갖는 계수로서  $\eta$ 와  $\lambda$ 를 각각 적용하고 있다. 콘크리트 압축강도가 50 MPa 이상인 경우에, 이 계수 값들은 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 감소한다. 각 계수 값은 아래 식과 같다.

$$\eta = 1.0 \quad f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (14)$$

$$\eta = 1.0 - (f_{ck} - 50) / 200 \quad 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad (15)$$

$$\lambda = 0.8 \quad f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (16)$$

$$\lambda = 0.8 - (f_{ck} - 50) / 400 \quad 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad (17)$$

## 2.3.4 JSCE의 응력 분포

일본 토목학회의 JSCE 설계기준에서는 다음과 같이 두 가지 형태의 압축응력 분포를 제시하고 있다.

### 1) 포물선-직선 압축응력 분포

JSCE에서 제시하고 있는 포물선-직선 압축응력 분포의 형태는 Fig. 4(b)와 같다. 압축응력 분포를 나타내는 식과 그에 따른 변수는 식 (18)~(21)과 같다. 식 (18)과 (19)에 사용되는  $k_1$ 은 최대 응력과 공시체 강도 사이의 비율

을 나타내는 계수로서 식 (20)으로 결정되는데, 콘크리트 압축강도가 50 MPa 이상인 경우에는 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 감소한다.

$$f_c' = k_1 f_{ck}' \left( \frac{\varepsilon_c'}{0.002} \right) \left( 2 - \frac{\varepsilon_c'}{0.002} \right) \quad 0 \leq \varepsilon_c' \leq 0.002 \quad (18)$$

$$f_c' = k_1 f_{ck}' \quad 0.002 \leq \varepsilon_c' \leq \varepsilon_{cu}' \quad (19)$$

$$k_1 = 1 - 0.003 f_{ck}' \leq 0.85 \quad f_{ck}' \leq 80 \text{ MPa} \quad (20)$$

$$\varepsilon_{cu}' = \frac{155 - f_{ck}'}{30000} \quad 0.0025 \leq \varepsilon_{cu}' \leq 0.0035 \quad (21)$$

## 2) 직사각형 압축응력 분포

JSCE의 직사각형 압축응력 분포는 미국이나 캐나다의  $\alpha_1$  및  $\beta_1$ 과 동일한 의미를 갖는 계수로서  $k_1$ 과  $\beta$ 를 각각 사용하고 있다. 여기서  $k_1$ 은 포물선-직선 압축응력 분포와 동일하게 적용되는데, 계수 값들은 식 (22)와 (23)과 같다.

$$k_1 = 1 - 0.003 f_{ck}' \leq 0.85 \quad (22)$$

$$\beta = 0.52 + 80 \varepsilon_{cu}' \quad (23)$$

각 나라의 설계기준에서 제시하고 있는 압축응력의 높이( $\alpha_1$ ,  $\eta$ ,  $k_1$ )와 압축력이 작용하는 깊이( $\beta_1$ ,  $\lambda$ ,  $\beta$ )에 관한 계수 값들은 설계기준마다 조금씩 차이를 보이고 있으며, 단순히 계수 값들의 차이로는 콘크리트 압축응력 분포가 부재의 휨 강도에 미치는 영향을 확인할 수 없다. 각 계수 값들은 실험 결과에 의해 결정되는 응력 분포의 특성과 불확실성 및 경험적 지식을 바탕으로 설계기준마다 다른 수치로 규정하고 있다.

## 2.3.5 극한 변형률 설계기준

Table 1은 각 설계기준에서 규정하고 있는 극한 변형률을 나타낸다. 미국과 캐나다의 설계기준에서는 극한 변형률을 하나의 일정한 값으로 규정하고 있으며, 유럽과 일본의 설계기준에서는 콘크리트 압축강도가 증가할수록 극한 변형률이 감소하는 형태로 값을 규정하고 있다.

**Table 1** Concrete ultimate strain

Code	Concrete ultimate strain ( $\varepsilon_{cu}$ )
ACI 318	$\varepsilon_{cu} = 0.003$
CSA	$\varepsilon_{cu} = 0.0035$
Eurocode	$\varepsilon_{cu2} = 0.0035$ where, $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$
	$\varepsilon_{cu2} = \left[ 2.6 + 35 \left( \frac{90 - f_{ck}}{100} \right)^4 \right] \times 10^{-3}$ where, $50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$
JSCE	$\varepsilon_{cu}' = \frac{155 - f_{ck}'}{30000}$ $0.0025 \leq \varepsilon_{cu}' \leq 0.0035$

### 3. 콘크리트 압축응력 분포 실험

#### 3.1 실험체

국내에서 사용되고 있는 일반강도와 고강도 콘크리트의 재료적 특성과 압축응력 분포 특성 계수( $k_1k_3$ 와  $k_2$ )를 얻기 위해 콘크리트 압축응력 분포 실험(기둥 편심재하 실험)을 수행하였다. 실험에 사용된 실험체의 크기, 형상 및 실험 방법은 Hognestad 등<sup>3)</sup>에 의해 개발되었고, Swartz 등<sup>14)</sup>의 실험에도 적용된 것을 사용하였다. 이 실험 전 3개 실험체에 대한 예비 실험을 통해 실험 방법과 장비를 검증하였다. 이 실험을 위해 28개의 일반강도 실험체(0~50 MPa)와 8개의 고강도 실험체(50~90 MPa)를 계획 및 제작하였으며, 제작한 실험체의 콘크리트 설계 배합강도는 20 MPa(8개), 30 MPa(8개), 40 MPa(8개), 45 MPa(4개), 60 MPa(4개) 그리고 80 MPa(4개)로 하였다. 실험체의 명칭은 C-L#, C-M#, C-H#으로써 L, M, H는 원주형 공시체 시험을 통한 압축강도를 기준으로 L은 0~30 MPa, M은 30~50 MPa, H는 50~90 MPa로 구분하였으며, #은 실험체의 번호를 의미한다. Fig. 5는 실험체의 단면도를 나타내며, 실험체의 두께는 125 mm이다. 실험체 중앙부(125 × 200 × 400 mm)는 순수 콘크리트로만 구성하였다. 좌·우 측 양단부는 중앙부의 콘크리트가 압축 파괴될 때까지  $P_2$  하중에 의해 파손되지 않도록 휨 철근과 전단 철근(SD400-D10)으로 보강하였다. 실험체를 정확하게 제작하기 위해 강판으로 절곡한 거푸집을 사용하였으며, 콘크리트는 수평으로 타설하였고, 진동 다짐기를 이용하여 충분히 다짐하였다. 양생은 증기 양생을 실시하였고, 탈형은 콘크리트 타설 3일 후에 실시하였다.

콘크리트의 압축강도 시험은  $\phi 100 \times 200$  mm 크기의 원주형 공시체를 제작하여 KS F 2403 및 2405의 규정에 따라 수행하였다.

#### 3.2 실험 방법

실험은 실험체에 주 하중( $P_1$ )을 가한 후 실험체 중립축면(Fig. 5의 neutral axis)에 압축 변형률이 발생하지 않도록 보조 하중( $P_2$ )을 추가로 가하는 방법으로 수행하였다. 보조 하중에 의하여 중립축면의 변형률이 0이 되면 다시 주 하중의 크기를 증가시킨 후 다시 보조 하중을 가하였

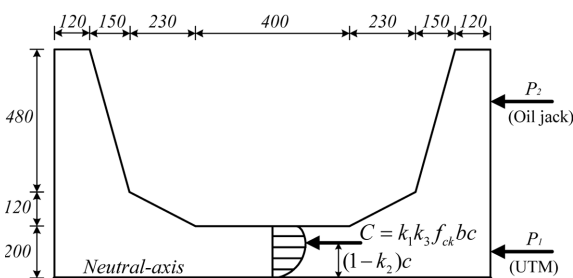


Fig. 5 Dimension of specimen (unit: mm)

다. 이러한 형태의 하중 재하를 중앙부의 콘크리트가 파괴될 때까지 반복적으로 수행하였으며, 정확한 실험 결과를 얻기 위하여 파괴에 임박했을 때는 매우 작은 하중을 증가시켰다. 실험을 수행하는 동안 변형률을 측정하기 위해 각 연단 면에 2개씩의 변형률 게이지를 부착하였다. 축력을 유발시키는 주하중은 유압으로 조절되는 1,000 kN 및 5,000 kN 용량의 만능 재료 시험기를 사용하였고, 축력 및 휨모멘트를 유발시키는 보조 하중은 200 kN 용량의 수동식 유압잭을 사용하였다. 보조 하중의 측정은 200 kN 용량의 하중계(load cell)를 이용하였다. 실험이 진행되는 동안에 주 하중, 보조 하중, 변형률은 1초에 5번씩 값을 측정하였다. Fig. 6은 실험 장면을 보여준다.

### 4. 실험 결과

예비 실험체를 포함한 총 39개의 실험체에 대하여 콘크리트 압축응력 분포 실험을 수행하였으며, 26개의 실험체가 성공적으로 실험되었다. 성공한 실험체의 파괴는 보강되지 않은 실험체 중앙부에서 일어났고, 쪼개짐이 일어난 후에 압쇄가 일어나는 압축 파괴 형상을 보였다. 실험에 실패한 실험체들은 실험체 중앙부가 파괴되기 전에 가력부가 먼저 파괴되어 실험 결과를 얻지 못하였거나, 운반 도중 실험체 중앙부가 손상되어 실험을 실시하지 못한 것들이다. 또한 실험 중 실험 장비 제어의 어려움으로 정확한 실험 결과를 얻지 못한 것도 분석에서 제외하였다.

#### 4.1 응력 분포 계수 실험 결과

콘크리트 압축응력 분포 실험에서 얻는 주 하중( $P_1$ )과 보조 하중( $P_2$ )을 통해 콘크리트 압축응력 분포 계수  $k_1k_3$ 와  $k_2$ 를 얻을 수 있다. 외력과 내력의 평형을 이용하여 압축력의 크기와 관련된  $k_1k_3$ 값을 식 (24)로 결정하였으며, 외력과 내력의 모멘트 평형을 이용하여 압축력의 작용 위치와 관련된  $k_2$ 값을 식 (25)로 결정하였다. 여기서 편심  $a_1$ 은 중립축에서 주 하중까지의 거리이고,  $a_2$ 는 중립축에서 보조 하중까지의 거리이다. Table 2는 계산된  $k_1k_3$

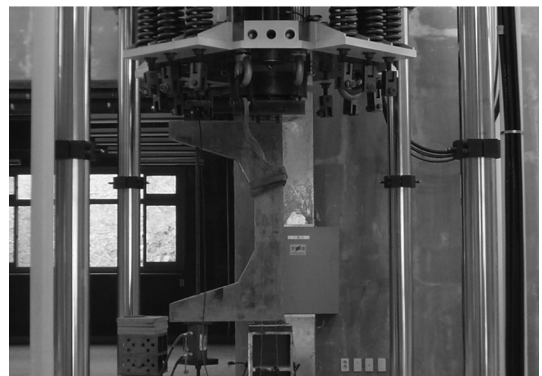


Fig. 6 Experimental test

**Table 2** Test result

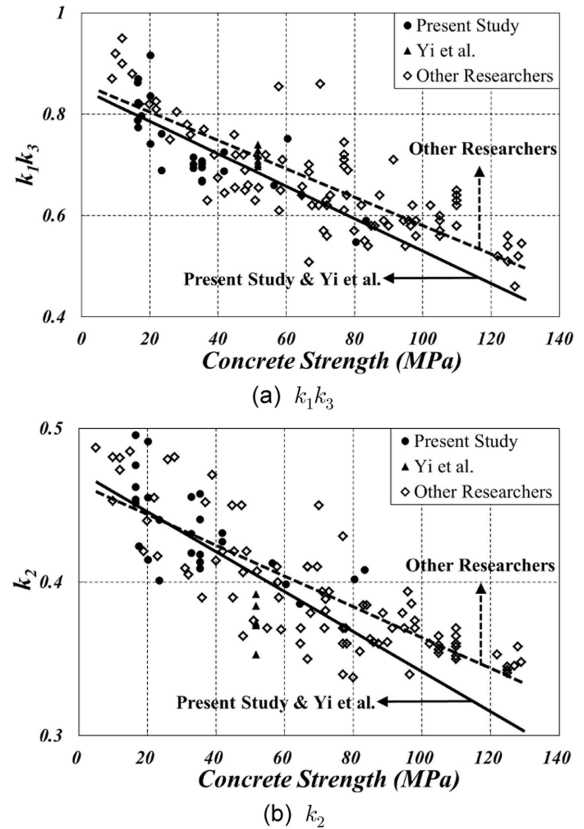
Specimen	$f_{ck}$ (MPa)	$k_1k_3$	$k_2$	$\epsilon_{cu}$
C-L-1	16.6	0.79	0.50	0.00263
C-L-2	16.6	0.86	0.46	0.00330
C-L-3	16.7	0.77	0.45	0.00280
C-L-4	16.7	0.87	0.45	0.00292
C-L-5	16.7	0.82	0.48	0.00352
C-L-6	17.6	0.80	0.42	0.00295
C-L-7	20.3	0.84	0.42	0.00290
C-L-8	20.3	0.92	0.49	0.00290
C-L-9	20.3	0.74	0.46	0.00240
C-L-10	23.6	0.76	0.40	0.00272
C-L-11	23.6	0.69	0.44	0.00316
C-M-1	32.9	0.70	0.46	0.00331
C-M-2	32.9	0.71	0.42	0.00319
C-M-3	32.9	0.69	0.43	0.00307
C-M-4	35.4	0.70	0.42	0.00285
C-M-5	35.4	0.71	0.41	0.00312
C-M-6	35.4	0.67	0.44	0.00254
C-M-7	35.4	0.70	0.46	0.00275
C-M-8	35.4	0.70	0.41	0.00277
C-M-9	41.9	0.69	0.43	0.00355
C-M-10	41.9	0.73	0.43	0.00322
C-H-1	56.6	0.66	0.41	0.00323
C-H-2	60.4	0.75	0.40	0.00343
C-H-3	64.5	0.64	0.39	0.00313
C-H-4	80.5	0.55	0.40	0.00313
C-H-5	83.5	0.59	0.41	0.00365

와  $k_2$ 값과 함께 실험에서 측정된 극한 변형률을 나타낸다.

$$k_1k_3 = \frac{P_1 + P_2}{f_{ck}bc} \quad (24)$$

$$k_2 = 1 - \frac{P_1a_1 + P_2a_2}{(P_1 + P_2)c} \quad (25)$$

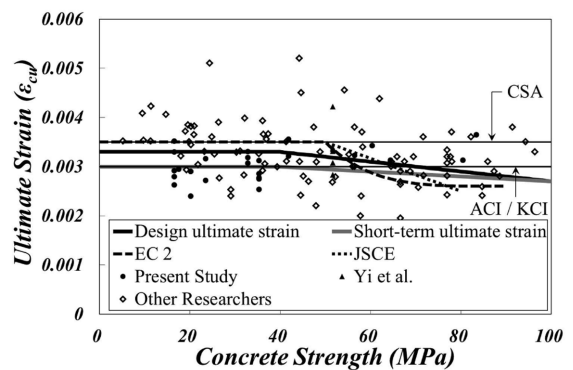
문헌 조사(이성태,<sup>13)</sup> Hognestad,<sup>3)</sup> Nedderman,<sup>4)</sup> Kaar,<sup>5)</sup> Ibrahim,<sup>6)</sup> Swartz,<sup>14)</sup> Rusch,<sup>15)</sup> Schade<sup>16)</sup>)를 통해 얻은 97개 (국내-6개, 국외-91개)의 실험 결과와 이 실험 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 또한 국내 및 이 실험 결과에 의한 회귀 직선과 국외 실험 결과에 의한 회귀 직선을 나타내었다. Fig. 7에서 이 실험 결과를 포함한 모든 실험 결과들이 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 계수 값이 감소함을 확인할 수 있으며, 국내·외 실험 결과가 가지는 경향이 유사함을 확인할 수 있다. 특히, 국내·외 실험 결과에 의한 선형 회귀 직선에서 국외 실험 결과에 의한 선형 회귀 직선을 기준으로  $k_1k_3$ 는 최대 12.6% (130 MPa일 경우), 최소 1.5%(5 MPa일 경우)의 범위임을 확인할 수 있고,  $k_2$ 는 최대 9.3%(130 MPa일 경우), 최소 -1.4%(5 MPa일 경우)의 범위임을 확인할 수 있었다. 결과적으로 국내 콘크리트와 국외 콘크리트를 사용한 실험 결과가 의미 있을 만큼 큰 차이를 보이지는 않는다고 판단된다.



**Fig. 7** Stress block parameter

#### 4.2 극한 변형률 실험 결과

Fig. 8은 이 실험 결과 및 국내·외 실험 결과와 각 설계기준의 콘크리트 극한 변형률을 나타낸다. 이 연구에서 수행한 26개 실험체의 극한 변형률은 평균값 0.00304에 표준편차 0.00032, 해외에서 수행한 91개 실험체의 극한 변형률은 평균값 0.00327에 표준편차 0.00069, 그리고 이성태 등의 실험 결과까지 포함한 123개의 모든 실험 결과는 평균값 0.00323에 표준편차 0.00055이다. 실험 결과를 보면, 콘크리트 압축강도가 증가하면 극한 변형률이 감소하는 경향이 있다고 말할 수 있지만, 주목할 만큼의 영향이 있는지는 다소 주관적인 평가가 가능하다. 따라서 ACI 318은 1940년대와 50년대에 수행된 실험 결과로 0.003의 하한선을 선택했지만, 다른 여러 실험으로



**Fig. 8** Concrete ultimate strain

이 하한선을 벗어나는 실험 결과들이 추가되어 0.003이 하한값이라고는 말할 수 없게 되었다. CSA는 0.0035로 일정한 값을 규정하고 있으며, EC 2와 JSCE는 일반강도에서는 0.0035로 일정한 값을, 고강도에서는 감소하는 값을 규정하고 있다. 강도설계법의 ACI 318과 CSA에서 일정한 값을 규정하는 이유는 콘크리트의 극한 변형률이 부재의 강도 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않기 때문일 것이다. 그러나 한계 상태 설계법의 EC 2와 JSCE는 변형 능력과 취성 파괴 양상을 고려하여 콘크리트 압축 강도를 변수로 극한 변형률을 규정하고 있다.

## 5. 콘크리트 압축응력 분포 제안

### 5.1 모델 구성의 요건

포물선-직선 압축응력 분포는 실제 압축응력 분포와 그 형상이 유사하며, 변형률 증가에 따른 응력의 증가를 표현한 상승부가 존재한다. 따라서 포물선-직선 압축응력 분포의 상승부는 사용 하중 상태의 균열 제어나 처짐 제어를 위한 해석에서 일반적으로 사용하는 선형 탄성 해석을 대신하여 모멘트-곡률 해석 등 비선형 해석에 사용될 수 있다. 결국 포물선-직선 응력 분포 모델은 극한 한계 상태의 해석뿐만 아니라 사용 한계 상태의 해석에도 적용할 수 있으므로, 성능 중심 설계기준에 기본적으로 제시되어야 할 것이다.

### 5.2 설계 극한 변형률

콘크리트의 설계 극한 변형률은 다음 두 가지에 근거하여 기본적으로 0.0033을 사용할 것을 제안한다.

첫째, 4.2에 언급한 바와 같이 이 연구에서 수행한 26개 실험체의 평균 극한 변형률이 0.00304이므로, 여기서 0.003을 단기 변형률로 취하고, 최소한의 장기 변형률을 0.0003으로 취하여 두 값을 더한 값이다. 장기 변형률을 추가하는 이유는, 이 연구에서 수행한 실험이 단기 하중에 의한 것으로 장기 하중의 영향은 고려되지 않았기 때문이다. 일반적인 콘크리트 구조물에서 계수 하중에 대한 고정하중의 비율을 최소한으로 평가하면 0.3에서 0.5 사이의 범위라고 할 수 있는데, 콘크리트 응력이 압축강도의 0.3~0.5배인 범위에서 단기 변형률은 0.0004~0.0006의 값을 보인다. 한편 재령 1개월에서 3개월 사이에 초기 하중이 작용하는 구조물의 크리프 계수는 0.45에서 0.75 사이의 값을 나타낸다. 결과적으로 단기 변형률과 크리프 계수를 곱한 최소 크리프 변형률은 0.00018에서 0.00045의 범위로서 근사적으로 0.0003 내외라고 할 수 있다. 보수적으로 산정한 이 값을 바탕으로 보통 강도 콘크리트의 설계 극한 변형률은 단기 극한 변형률 0.003과 지속 하중에 의한 최소 크리프 변형률 0.0003을 고려하여 0.0033을 사용할 수 있을 것이다.

둘째, 4.2에 언급한 바와 같이 123개의 모든 실험 결과

는 평균값이 0.00323이었다. 여기에 장기 변형률의 존재를 감안하여 이 값을 상향 조정한 0.0033을 사용할 수 있을 것이다. 이 값 0.0033은 ACI 318의 0.003보다는 다소 큰 값이지만, CSA, EC 2, JSCE의 0.0035보다는 작은 값이므로 안전성과 합리성에 문제가 될 것으로는 생각되지 않는다.

한편 고강도 콘크리트에 대하여는 보통 강도 콘크리트에 비하여 설계 극한 변형률을 감소시키는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 이러한 판단은 한계 상태 설계법의 주요 항목인 부재의 변형 능력과 파괴 양상을 고려한 것이다. 즉, 고강도 콘크리트의 극한 변형률 값이 보통 강도 콘크리트와 크게 차이가 나지 않는다 하더라도 파괴 양상이 더 취성적임을 반영한 것이다. 이는 이재훈과 손혁수<sup>8)</sup>의 고강도 콘크리트 기둥에 대한 편심 하중 실험 연구로서, 덮개와 심부 콘크리트의 건조 수축량 차이가 고강도 콘크리트 기둥에서 더욱 커서, 이로 인해 콘크리트 덮개 부분에서 기둥 축의 직각 방향으로 발생한 인장응력 때문에 덮개 부분이 기둥 축방향으로의 압축강도가 감소하게 되어 조기에 탈락하는 현상이 더 심해진다는 보고를 반영한 것이다.

이에 근거하여 콘크리트 압축강도 40 MPa까지는 설계 극한 변형률을 0.0033으로 하고, 압축강도가 10 MPa씩 증가할 때마다 0.0001씩 감하여 압축강도가 100 MPa일 때 0.0027을 설계 극한 변형률로 할 것을 제안한다.

Fig. 9는 5.3에서 제안한 압축응력 분포 모델을 적용할 때 극한 변형률의 값을 달리하여 축력-휨강도 해석을 수행한 결과로서, 극한 변형률 선택에 따른 강도 해석 결과가 주목할 만큼의 차이는 나지 않음을 나타낸다. 또한 휨 부재에서도 극한 변형률이 0.0025~0.004의 범위에서는 휨강도가 0.5% 미만의 차이를 나타내므로, 극한 변형률 값이 휨강도 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다.

### 5.3 압축응력 분포 모델 제안

고강도 콘크리트까지 적용 가능한 압축응력 분포로, 실

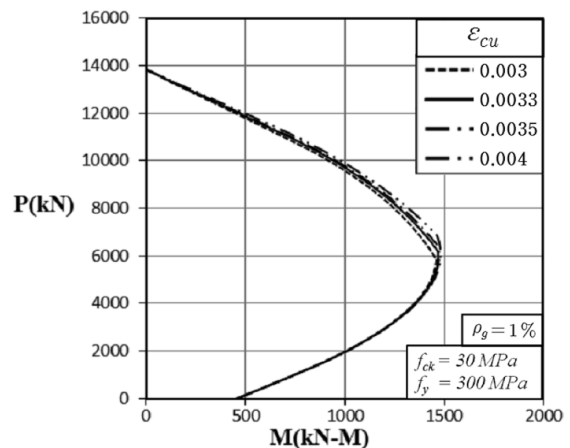


Fig. 9 Sensitivity of concrete ultimate strain in strength analysis

제 분포에 가까운 포물선-직선 분포로서 Fig. 10과 같은 모델을 제안한다. 여기서 각 변수는 40 MPa를 기준으로 값을 달리한다. 이는 콘크리트표준시방서<sup>17)</sup>에서 보통 중량 콘크리트의 경우 40 MPa 이상의 설계기준 압축강도를 갖는 콘크리트를 고강도로 정의하고 있는 것을 반영한 것이다. 제안하는 압축응력 분포는 식 (26)~(30)과 같다.

$$f_c = 0.85f_{ck} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^n \right] \quad 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{co} \quad (26)$$

$$f_c = 0.85f_{ck} \quad \epsilon_{co} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \quad (27)$$

여기서,

$$n = 2.0 - \left( \frac{f_{ck} - 40}{100} \right) \leq 2.0 \quad (28)$$

$$\epsilon_{co} = 0.002 + \left( \frac{f_{ck} - 40}{100,000} \right) \geq 0.002 \quad (29)$$

$$\epsilon_{cu} = 0.0033 - \left( \frac{f_{ck} - 40}{100,000} \right) \leq 0.0033 \quad (30)$$

응력 상승부인 식 (26)은 보통 강도 콘크리트의 경우 Hognestad 등<sup>3)</sup> 많은 연구자들에 의해 제안된 포물선 식을 적용하였고, 강도가 커질수록 직선에 가까운 형상을 갖는다. 따라서 식 (28)에 나타난 바와 같이 압축강도 40 MPa까지는  $n$ 이 2이며, 압축강도가 10 MPa씩 증가할 때마다 0.1씩 감하여 압축강도가 100 MPa일 때 1.4의 값을 갖는다.

식 (26)과 (27)에서 콘크리트 설계기준강도에 0.85를 곱한 것은 실제 콘크리트 구조물의 강도와 공시체 강도 사이의 차이로서 단면의 형상과 크기, 양생, 다짐, 하중 재하 속도 등에 따른 차이를 반영한 것이다. 이 값은 ACI 318과 EC 2 Part 2에 규정된 값과 동일하다. 한편 CSA와 JSCE는 각각  $\alpha_1$ 과  $k_1$ 으로 이 값을 나타내는데, 보통 강도 콘크리트는 0.85를 적용하고 고강도 콘크리트는 0.85보다 작은 값을 적용하도록 하고 있다. 고강도 콘크리트에 대한 이 값의 차이는 실험 결과에 대한 각 설계기준 집행위원들의 다소 주관적인 판단에 따른 것으로 보인다. 왜냐하면  $k_1k_3$ 의 실험값에서  $k_3$ 값(Fig. 1에 따른 정의로,

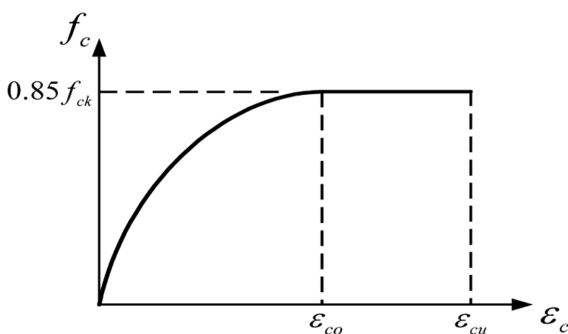


Fig. 10 Proposed concrete stress distribution

JSCE는  $k_1$ 으로 나타냄)을 분리하는 것이 쉽지 않기 때문이다. 여기서는  $k_3$ 의 정확한 값에 대한 논란을 차치하고자 한다. 이 값이 차이를 보이더라도 실제 구조물의 안전에는 큰 영향을 주지 않는다고 판단하기 때문이다. 즉, 기둥의 설계에서 순수 축력만 작용하는 경우에도 시공 오차 등에 의한 최소 편심의 최소 휨모멘트 작용을 고려하여 축력만 작용하는 경우로 설계하지는 않기 때문이다. 즉, 설계기준에서는 최소 편심을 고려하여 0.80이나 0.85 또는 1/1.1 등의 계수를 곱하여 축강도를 감소시키는 형식을 취하거나(콘크리트구조설계기준, ACI 318, CSA, JSCE), 최소 편심과 축력의 곱으로 최소 휨모멘트를 구하고 축력과 함께 항상 작용하는 휨모멘트로 취급하여 강도를 검토하는 형식(EC 2)을 취하고 있다. 따라서 제안 모델에서는 ACI 318과 EC 2 Part 2와 동일하게 콘크리트 압축강도와 관계없이 0.85를 적용하도록 하였다.

한편 위에 서술한 계수 0.85의 의미는 압축력만 작용하는 경우의 저항 강도 관점에서 논한 것이고, 축력과 함께 휨모멘트가 같이 작용하는 경우는 의미가 다르다는 것을 유의할 필요가 있다. 포물선-직선 응력 분포에서 최대 응력을 설계기준 압축강도의 0.85배로 한 것은 Fig. 1의  $k_3$ 가 0.85임을 뜻하는 것이고, 직사각형 응력 분포에서 0.85배로 한 것은 Fig. 1의  $\alpha_1$ 이 0.85임을 뜻하는 것이다. 이 두 값이 같으므로, 압축력만 작용할 때에는 포물선-직선 응력 분포를 사용하든 직사각형 응력 분포를 사용하든 단면의 축강도 해석 결과는 동일하다. 그러나 휨모멘트만 작용하거나 압축력과 휨모멘트가 동시에 작용할 때에는 응력 분포의 면적과 압축력의 합력 작용점이 강도 해석의 주요한 변수이다. 따라서 응력 분포의 형상에 따라 압축력의 크기와 작용점이 달라지므로, 이때의  $\alpha_1$ 은  $k_1k_3/2k_2$ 의 의미를 갖는다는 것(Fig. 12 참조)이다. 즉 포물선-직선 응력 분포와 직사각형 응력 분포에 동일하게 0.85를 적용하더라도, 응력 분포 형상의 차이에 따라 휨강도는 다르게 해석된다는 것이다.

응력 분포 식에서  $\epsilon_{co}$ 는 상승부 최대 응력에서의 변형률로서, 콘크리트 압축강도가 증가할수록 상승부 최대 응력에서의 변형률이 증가하는 것을 반영하였다. 따라서 식 (29)와 같이, 압축강도 40 MPa까지는  $\epsilon_{co}$ 가 0.002이며, 압축강도가 10 MPa씩 증가할 때마다 0.0001씩 증가하여 압축강도가 100 MPa일 때 0.0026의 값을 갖는다.  $\epsilon_{cu}$ 는 설계 극한 변형률로서 5.2에서 제안한 바에 따라 식 (30)으로 정의한다.

Fig. 11은 제안된 응력-변형률 분포를 압축강도별로 나타낸 것이며, Table 3은 제안된 응력-변형률 분포와 함께 EC 2와 JSCE에 규정된 응력 분포 변수  $n$ ,  $\epsilon_{co}$ ,  $\epsilon_{cu}$ 의 값을 콘크리트 압축강도에 따라 정리한 것이다. Table 3에서 EC 2와 JSCE의 괄호 안의 값은 해당 설계기준에는 규정되지 않은 값으로, 비교를 위한 참고 값을 얻기 위하여 규정 식을 확장 적용한 것이다. 참고로, EC 2는 설계기준 압축강도를 90 MPa까지로, JSCE는 80 MPa까지로 하고 있다.



### 5.4 응력 분포 모델의 특성

Figs. 12와 13은, ACI 318과 CSA의 직사각형 응력 분포와 EC 2와 JSCE의 포물선-직선 응력 분포와 함께, 제안한 콘크리트 압축응력 분포의 응력 분포 계수를 나타낸다. 여기서  $\alpha_1$ 과  $\beta_1$ 은  $k_1k_3$ 와  $k_2$ 의 조합으로 이루어진 값으로 휨모멘트가 작용할 때의 응력 분포 특성을 나타낸다. Fig. 12에 나타난 바와 같이,  $k_1k_3/2k_2$ 의 의미를 갖는  $\alpha_1$ 의 실험값은 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타낸다.

이에 비하여 ACI 318은  $\alpha_1$ 으로 일정한 값 0.85를 규정하고 있는데, 고강도 콘크리트 부재에는 이 값이 실험값에 비하여 상대적으로 큰 값이라고 할 수 있다. 이것

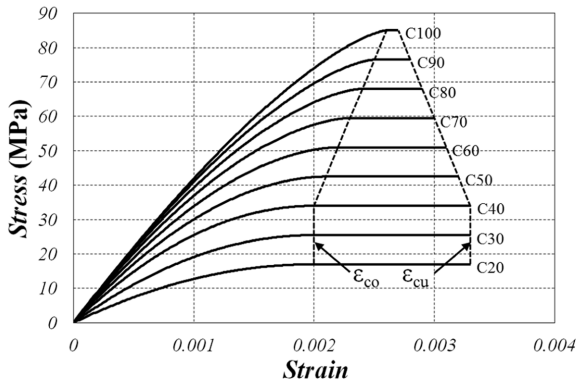


Fig. 11 Proposed design stress-strain curve

Table 3 Parabola-rectangle stress block variables

Parameter	$f_{ck}$ (MPa)	EC 2	JSCE	Proposed model
n	≤ 40	2	2	2
	50	2	2	1.9
	60	1.590	2	1.8
	70	1.437	2	1.7
	80	1.402	2	1.6
	90	1.4	(2)	1.5
	100	(1.402)	(2)	1.4
$\epsilon_{co}$	≤ 40	0.002	0.002	0.002
	50	0.002	0.002	0.0021
	60	0.00229	0.002	0.0022
	70	0.00242	0.002	0.0023
	80	0.00252	0.002	0.0024
	90	0.0026	(0.002)	0.0025
	100	(0.00268)	(0.002)	0.0026
$\epsilon_{cu}$	≤ 40	0.0035	0.0035	0.0033
	50	0.0035	0.0035	0.0032
	60	0.0029	0.00317	0.0031
	70	0.0027	0.00283	0.0030
	80	0.0026	0.0025	0.0029
	90	0.0026	(0.00217)	0.0028
	100	(0.0026)	(0.00183)	0.0027

\*( ) is the value over.

이 고강도 콘크리트 기둥의 축력-휨모멘트 강도 해석값이 실험값에 비하여 과대평가되는 이유라고 할 수 있다. ACI 318의  $\beta_1$ 값은 실험 결과의 하한값을 선택했음을 Fig. 13에서 확인할 수 있는데, 이는 Fig. 1의  $k_2$ 값을 작게 적용한다는 뜻이므로 휨모멘트의 팔 길이를 크게 계산한다는 것을 의미한다. ACI 318의  $\beta_1$ 값은 압축강도 28 MPa까지는 0.85이며 28 MPa를 초과하면 값이 감소한다.

CSA는 Ibrahim 등<sup>9)</sup>의 연구 결과를 반영하여 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 선형으로 감소하는  $\alpha_1$ 과  $\beta_1$ 값을 규정하고 있다. 특히 CSA는 콘크리트 부재의 축압축 강도 해석에 큰 영향을 주는  $\alpha_1$ 은 하한값을 사용하고, 휨모멘트 강도 해석에 영향이 큰  $\beta_1$ 은 평균값 또는 중앙값의 의미를 갖는 값을 사용하며, 두 값을 모두 콘크리트 압축강도의 함수로 나타내는 특징을 보인다.

EC 2, JSCE, 제안 포물선-직선 응력 분포의  $\alpha_1$ 과  $\beta_1$ 은 40 MPa 이하에서 모두 유사한 값을 보이며, 강도가 증가할수록 감소한다. 이때  $\alpha_1$ 값은 ACI 318과 CSA 사이의 값을 나타내며,  $\beta_1$ 값은 압축강도 30 MPa 이하에서는 0.85인 ACI 318보다 다소 작지만 그 이상의 강도에서는 ACI 318과 CSA 사이의 값을 나타낸다.

### 5.5 포물선-직선 응력 분포 비교

Fig. 14는 EC 2와 JSCE, 그리고 이 연구에서 제안한 포물선-직선 응력 분포를 콘크리트 압축강도에 따라 나타낸 것이다. 콘크리트 압축강도가 40 MPa인 경우(Fig.

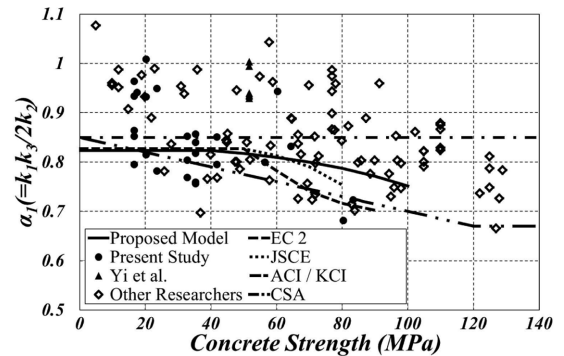


Fig. 12 Stress block parameter  $\alpha_1$

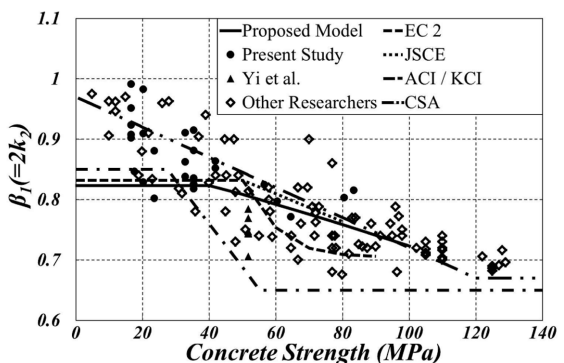


Fig. 13 Stress block parameter  $\beta_1$

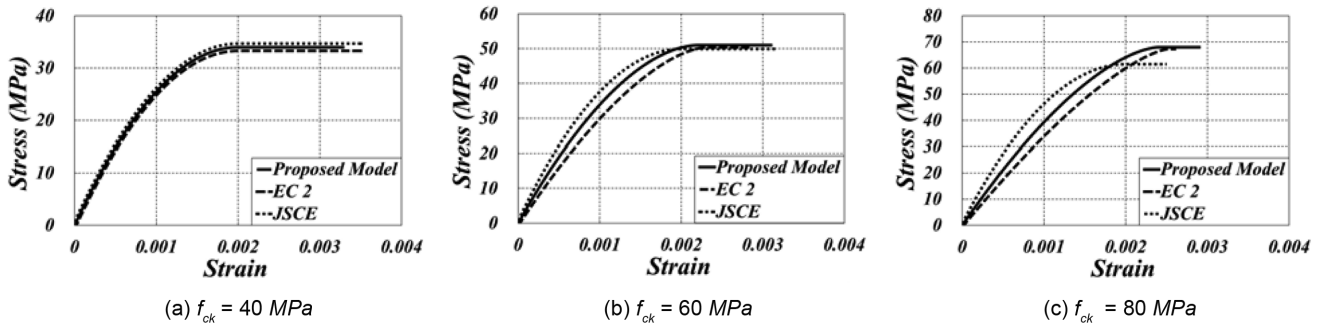


Fig. 14 Parabola-rectangle stress distribution

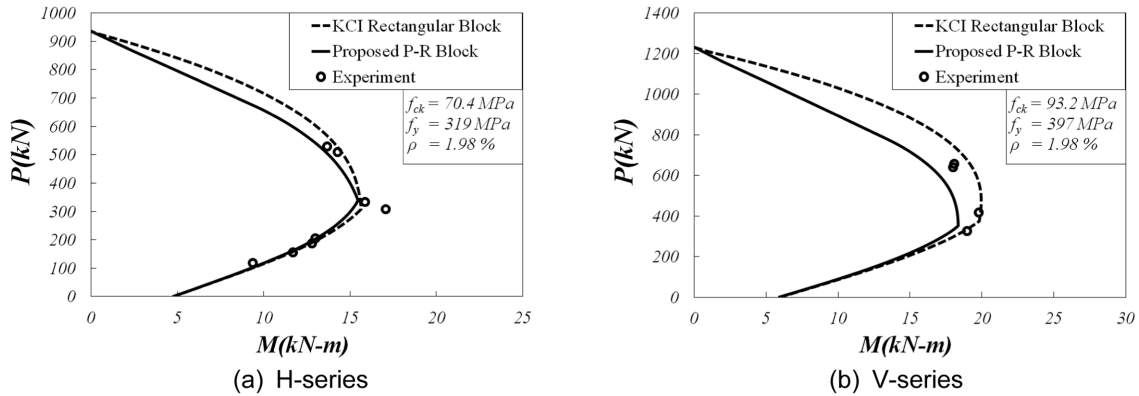


Fig. 15 Strength of high-strength concrete columns

14(a)), 극한 변형률 이외에는 세 곡선이 동일한 형상을 보인다. 압축강도가 60 MPa인 경우(Fig. 14(b))는 세 곡선의 최대 응력이 동일하고 극한 변형률이 유사하지만, 제안한 모델의 상승부 곡선 형상이 EC 2와 JSCE의 중간인 것을 알 수 있다. 콘크리트 압축강도가 80 MPa인 경우(Fig. 14(c))는 이 연구에서 제안한 모델의 최대 응력이 EC 2와 동일하지만, 상승부 곡선 형상이 EC 2와 JSCE의 중간 정도인 것을 알 수 있다. 응력 상승부 곡선 기울기의 차이는 식 (26)과 (28)의  $n$ 값의 차이 때문이다. JSCE는  $n$ 값을 2.0으로 일정한 값을 적용하고 있지만, EC 2와 이 연구에서 제안한 모델은 콘크리트 압축강도가 증가할수록  $n$ 값을 감소시켜 고강도 콘크리트의 특성을 반영하고 있다.

### 5.6 기둥 강도 해석의 적용

이재훈과 손혁수<sup>8)</sup>는 고강도 철근콘크리트 기둥에 대한 편심 재하 실험을 수행하여, 콘크리트구조설계기준과 ACI 318의 등가 직사각형 응력 분포를 적용한 축력-휨강도가 비 안전측임을 지적하였다. 즉, Fig. 15에서 점선으로 표시된 기둥의 공칭 강도가 압축 지배 단면에서 실험 결과보다 과대평가되어 보통 강도 콘크리트에 비하여 상대적으로 비 안전측인 결과를 보인다고 보고하였다. 또 Fig. 15의 (a)와 (b)의 비교로서, 콘크리트 압축강도가 클수록 그 경향이 커진다고 보고하였다. Fig. 15에서 실선으로 표시된 기둥의 공칭 강도는 이 연구에서 제안한 포물선-직선

응력 분포를 사용한 결과로서 압축 지배 단면에서 실험 결과보다 과대평가되는 문제를 해소할 수 있음을 나타낸다.

한편 콘크리트구조설계기준과 ACI 318은 콘크리트 극한 변형률을 0.003으로 규정하지만, 축강도 해석에는 이를 고려하지 않고 식 (31)의  $P_o$ 에 강도 감소 계수와 최소 편심의 영향을 고려한 계수를 적용하도록 하고 있다. 이 식은 철근이 항복하는 것으로 가정하지만, Fig. 16과 같이 고강도 철근의 항복 변형률이 콘크리트 최대 응력점의 변형률( $\epsilon_{co}$ )을 초과하면 철근이 항복 응력( $f_y$ )을 모두 발휘할 수 없다고 보아야 한다.

$$P_o = 0.85f_{ck}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \quad (31)$$

따라서 식 (31)에서 항복 응력  $f_y$  대신에  $E_s \epsilon_{co}$ 를 사용하는 것이 합리적이다. Fig. 17은 항복강도가 600 MPa인 고강도 철근을 사용한 기둥의 공칭 강도를 나타내는데, 직사각형 응력 분포로서 콘크리트 극한 변형률을 고려하지 않고 철근이 항복하는 것으로 계산하는 콘크리트구조설계기준, ACI 318, CSA에 따르면 축강도가 55,000 kN 내외로 계산되지만, EC 2와 제안 포물선-직선 응력 분포를 적용하는 경우에는 철근이 항복하지 않음을 반영하여 휨 모멘트 2,500 kN-m까지 축강도가 50,000 kN 미만으로 계산된다. 즉, 상승부 최대 응력에서의 변형률( $\epsilon_{co}$ )을 규정하는 포물선-직선 응력 분포를 이용하여야 고강도 철근이 배치된 부재의 축강도를 합리적으로 산정할 수 있음을 나타낸다.

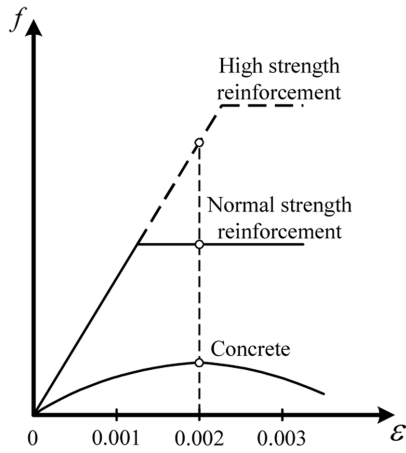


Fig. 16 Stress-strain curve of reinforcement

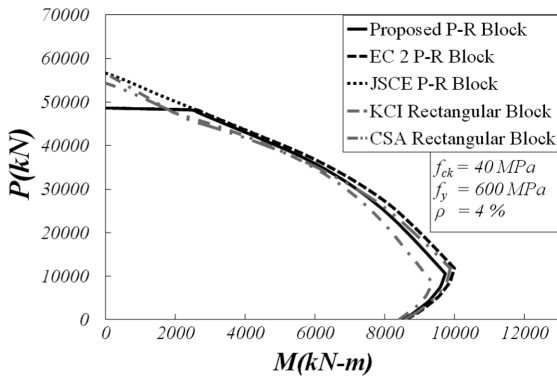


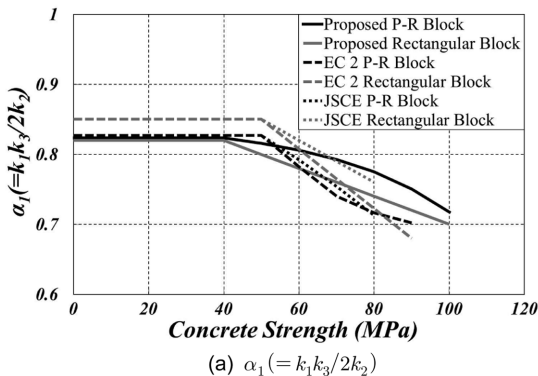
Fig. 17 Strength of high-strength reinforcement column

### 5.7 등가 직사각형 응력 분포

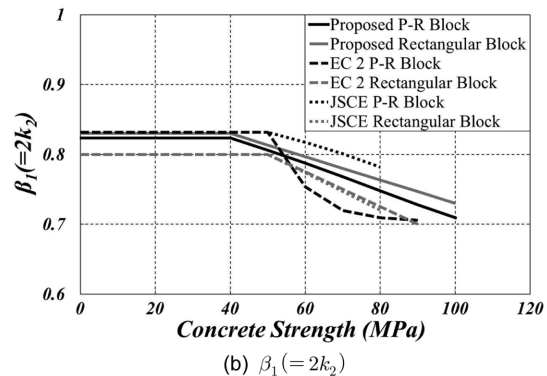
제안된 포물선-직선 응력 분포가 합리적인 응력 분포이지만 단면이 직사각형이 아닌 경우에는 해석 과정이 매우 복잡한 것이 사실이다. 따라서 해석의 간편성을 위하여 포물선-직선 응력 분포와 유사한 해석 결과를 주는 직사각형 압축응력 분포의 변수를 식 (32)~(35)와 같이 제안한다.

$$\alpha_1 = 0.82 \quad f_{ck} \leq 40 \text{ MPa} \quad (32)$$

$$\alpha_1 = 0.82 - (f_{ck} - 40)/500 \quad 40 < f_{ck} \leq 100 \text{ MPa} \quad (33)$$



(a)  $\alpha_1 (= k_1 k_3 / 2k_2)$



(b)  $\beta_1 (= 2k_2)$

Fig. 18 Stress block parameter and  $\alpha_1$  and  $\beta_1$

$$\beta_1 = 0.83 \quad f_{ck} \leq 40 \text{ MPa} \quad (34)$$

$$\beta_1 = 0.83 - (f_{ck} - 40)/600 \quad 40 < f_{ck} \leq 100 \text{ MPa} \quad (35)$$

Fig. 18은 EC 2, JSCE, 제안 포물선-직선 응력 분포와 등가 직사각형 응력 분포의 응력 분포 계수( $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ )를 나타내며, Table 4는 이 연구에서 제안하는 두 응력 분포의 계수를 나타낸다. 그림과 표에 나타난 바와 같이 압축강도가 40 MPa 이하인 경우는 두 응력 분포의 계수 값이 거의 동일하다. 그러나 고강도 콘크리트에서는 두 응력 분포의 계수 값이 차이를 보이는데, 포물선-직선 응력 분포의 특성상 강도와 무관하게 항상 동일한 값을 갖는 직사각형 응력 분포를 나타내기가 어렵기 때문이다. 따라서 제안된 등가 직사각형 응력 분포를 고강도 콘크리트 기둥에 적용하는 경우에는 작은 편심이 작용하는 압축 지배 단면에서 기둥 강도를 과소평가하는 오차가 발생하므로, 과도하게 안전측으로 설계되지 않도록 유의할 필요가 있다.

## 6. 결 론

- 1) 국내에서 생산되는 콘크리트에 대한 압축응력 분포 실험을 통하여 응력 분포 계수를 도출하였고, 해외의 실험 결과와 비교한 결과 그 경향이 유사함을 확인하였다.
- 2) ACI 318, CSA, Eurocode 2 JSCE 설계기준의 압축 응력 분포 특성을 분석하여, 한계 상태 설계 및 성능 중심 설계에 포물선-직선 형상의 압축응력 분포가 적합한 이유를 정리하였다.
- 3) 국내의 실험 결과와 각국 설계기준의 압축응력 분포 특성을 분석하여 포물선-직선 형상의 새로운 압축응력 분포와 등가 직사각형 응력 분포를 제안하였다.
- 4) 기둥 강도 실험 결과와의 비교로서, 제안된 압축응력 분포가 고강도 콘크리트 기둥에 대한 합리적이고 안전측인 축력-휨강도 해석 결과를 제공한다는 것을 확인하였다.

## 감사의 글

이 연구는 국토해양부 산하 한국건설교통기술평가원의 '성능 중심의 건설 기준 표준화 연구단'에 의해 수행되는 2006 건설교통 R&D정책 및 인프라사업(06-기반구축 A01)의 지원에 의하여 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

## 기 호

- $f_{ck}$  : 콘크리트의 설계기준압축강도(KCI, Eurocode 2)  
 $f'_c$  : 콘크리트의 설계기준압축강도(ACI, CSA)  
 $f'_{ck}$  : 콘크리트의 설계기준압축강도(JSCE)  
 $k_1, k_2, k_3$ : 압축응력 분포 특성 계수  
 $\alpha_1, \eta, k_1$ : 등가 직사각형 응력 분포에서 콘크리트 강도에 대한 평균 응력비  
 $\beta, \beta_1, \lambda$ : 등가 직사각형 응력 분포에서 중립축에 대한 깊이비  
 $\varepsilon_{co}, \varepsilon_{c2}$  : 포물선-직선 응력 분포에서 최대 강도에 도달했을 때의 변형률  
 $\varepsilon'_c, \varepsilon_{cu}, \varepsilon_{cu2}, \varepsilon'_{cu}$ : 극한 변형률

## 참고문헌

1. 국토해양부, 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2007, 327 pp.
2. ACI 318-08, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA, 2002, 473 pp.
3. Hognestad, E., Hanson, N. W., and McHenry, D., "Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design," *ACI Journal, Proceeding*, Vol. 27, No. 3, 1955, pp. 455~479.
4. Nedderman, H., "Flexural Stress Distribution in very High Strength Concrete," *Masters Degree Thesis*, Department of Civil Engineering, University of Texas at Arlington, 1973, 182 pp.
5. Kaar, P. H., Hanson, N. W., and Capell, H. T., "Stress-Strain Characteristics of High Strength Concrete," *PCA Research and Development Bulletin*, RD051.01D, 1977, pp. 1~10.
6. Ibrahim, H. H. and MacGregor, J. G., "Modification of the ACI Rectangular Stress Block for High-Strength Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 1, 1997, pp. 40~48.
7. 이재훈, 손혁수, 김준범, "고강도 철근콘크리트 기둥의 실험 및 강도해석," 콘크리트학회 논문집, 11권, 1호, 1999, pp. 149~160.
8. Lee, J. H. and Son, H. S., "Failure and Strength of High-Strength Concrete Columns Subjected to Eccentric Loads," *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 1, 2000, pp. 75~85.
9. Rizkalla, S., Mirmiran, A., Zia, P., Russell, H., and Mast, R., "Application of the LRFD Bridge Design Specifications to High-Strength Structural Concrete: Flexure and Compression Provisions," Report: National Cooperative Highway Research Program, Vol. 595, 2007, 28 pp.
10. CSA, "Design of Concrete Structures (CSA Standard A23.3-04)," Canadian Standard Association, Rexdale, Ontario, Canada, 2004, 24 pp.
11. CEN, EN 1992, "Eurocode 2 : Design of Concrete Structures," European Committee for Standardization, 1992.
12. JSCE, "Standard Specifications for Concrete Structures-2002, Structural Performance Verification," JSCE Guidelines for Concrete No. 3, Japan Society of Civil Engineers, Japan, 2005, 274 pp.
13. 김진근, 이성태, 양은익, "콘크리트의 휨 압축강도의 크기 효과," 콘크리트학회 논문집, 11권, 2호, 1999, pp. 157~165.
14. Swartz, S. E., Nikaeen, A., Narayan Babu, H. D., Periyakaruppan, N., and Refai, T. M. E., "Structural Bending Properties of Higher Strength Concrete," *High-Strength Concrete*, SP-87, H. G. Russell, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1985, pp. 147~178.
15. Rusch, H., "Tests on the Strength fo the Flexural Compression Zone," *Bulletin N9. 120*, Deutscher Ausschuss Fur Stahlbeton, Berlin, 1955, 94 pp.
16. Schade, J. E., "Flexural Concrete Stress in High Strength Concrete Columns," M.A.Sc Thesis, Department of Civil Engineering, University of Calgary, Alberta, 1992, 156 pp.
17. 국토해양부, 콘크리트표준시방서, 한국콘크리트학회, 2009, 762 pp.

**요 약** 현행 콘크리트구조설계기준(2007)은 콘크리트 구조물의 설계에 적용하는 콘크리트의 압축응력 분포로 ACI 318의 등가 직사각형 응력 분포를 규정하고 있다. 단면의 휨강도 해석에는 등가 직사각형 응력 분포가 충분하겠지만, 성능 중심 설계의 한계 상태 검증에는 실제와 가까운 압축응력-변형률 관계가 필요하다. 또 등가 직사각형 응력 분포는 고강도 콘크리트 기둥의 휨강도 해석에 비안전측의 결과를 준다는 것이 알려져 있으므로, 이를 대신하는 새로운 응력 분포 모델이 필요하다. 이 연구에서는 Eurocode와 일본 토목학회의 설계기준에서 채택하고 있는 포물선-직선 형상의 새로운 모델을 제안하였다. 이 응력 분포 모델은 이 연구에서 수행된 압축응력 분포 실험과 타 연구자들의 실험 결과를 분석하여 도출된 것으로서, 보통 강도뿐만 아니라 고강도 콘크리트를 포함한 것이다. 제안 모델의 특성은 미국 ACI 318, 캐나다 CSA, 유럽의 Eurocode, 일본 토목학회 설계기준의 응력 분포 모델과 함께 실험 결과와 비교하여 정리하였다.

**핵심용어** : 콘크리트 압축응력, 응력-변형률 관계, 포물선-직선 분포, 성능 중심 설계