

# 고강도 콘크리트의 등가응력 매개변수 추정에 관한 연구

## Prediction of Equivalent Stress Block Parameters for High Strength Concrete

이도형\* · 전정문\*\* · 정민철\*\*\* · 공정식\*\*\*\*  
Lee, Do Hyung · Jeon, Jeongmoon · Jeong, Minchul · Kong, Jungsik

### Abstract

Recently, a high strength concrete of more than 40 MPa has been increasingly used in practice. However, use of the high strength concrete may influence on design parameters, particularly stress distribution. This is very true since the current everyday practice employs equivalent rectangular stress distribution that is derived from normal strength concrete. Subsequently, the stress distribution seems to be reevaluated and then a new distribution with new parameters needs to be suggested for the high strength concrete. For this purpose, linear and multiple regression analyses have been carried out in term of using experimental data for the high strength concrete of 40 to 80 MPa available in literatures. Accordingly, new parameters associated with the stress distribution have been proposed and employed for the design of flexural and compressive members. Comparative design examples indicate that designs with new parameters reduce section dimensions compared to those with the current code parameters for concrete strengths of 40 to 70 MPa. In particular, for compressive members, design with new parameters exhibit conservative compressive force compared to those with the current code parameters.

**Keywords :** *high strength concrete, stress distribution, multiple regression analyses, flexural and compressive members*

### 요 지

최근 들어 고강도 콘크리트의 사용이 꾸준히 증가하고 있지만 현행 국내 콘크리트구조설계기준은 보통강도 콘크리트에 기초한 등가직사각형 응력매개변수를 사용하고 있어 응력분포가 일반 강도 콘크리트와 상이한 고강도 콘크리트의 설계 시 문제점을 야기할 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 고강도 콘크리트에 대한 새로운 등가응력 매개변수 값이 제시되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 새로운 등가응력 매개변수를 제안하기 위해 기존 연구자들의 실험데이터를 토대로 선형 및 다중회귀분석을 수행하여 40~80 MPa 까지의 고강도 콘크리트에 대한 등가응력 매개변수를 이론적으로 추정하고 제안된 등가응력모델을 휨과 압축 부재설계에 적용시켜 기존의 국내 콘크리트구조설계기준과 비교검토 하였다. 제안된 등가응력모델로 구조설계를 수행한 결과, 콘크리트 강도 40~70 MPa 까지는 기존 모델에 비해 콘크리트 단면 감소 효과가 있었으며 또한 압축부재의 경우, 제안된 모델이 기존 모델 보다 콘크리트의 압축력을 더 보수적으로 평가하는 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** 고강도 콘크리트, 응력분포, 다중회귀분석, 휨과 압축부재

### 1. 서 론

세계적으로 경제, 사회, 문화 전반에 걸친 급속한 발전은 교량, 터널, 항만, 공항, 발전소, 댐 등의 사회기반시설물에 대한 수요를 대량 창출하였으며 이로 인해 인구 과밀화와 시설 집중화와 더불어 구조물의 초고층화, 대형화, 특수화의 경향이 뚜렷이 나타나고 있다. 이에 상응하여 철근콘크리트 구조물에 사용되는 콘크리트의 강도와 내구성은 생산기술의 발전과 더불어 증가하여 왔고 고강도 콘크리트의 재료적 특성 및 응력-변형률 관계 그리고 압축응력분포에 관한 이론적

실험적 연구가 많이 이루어져 왔다. 특히 콘크리트의 압축응력분포는 기하학적인 형상이 매우 다양하고, 하중속도, 하중 지속시간 및 공시체 강도 같은 다양한 요소에 의해 영향을 받기 때문에 설계자가 이러한 모든 요소를 고려하여 설계를 수행하기에는 어려움을 갖게 되므로 실무에서의 편리성을 위해 등가의 직사각형 압축응력분포로 간단하게 철근콘크리트의 강도해석을 공식화하여 사용하고 있다. 미국의 ACI 318 설계기준(2002)의 콘크리트 압축응력분포는 압축응력의 작용 깊이를 나타내는  $\alpha$ 와 압축연단에서 압축력이 작용하는 위치까지의 거리를 나타내는  $\beta$ 에 대한 매개변수로 이루어져

\*정희원 · 배재대학교 건설환경철도공학과 부교수 (E-mail : dohlee@pcu.ac.kr)

\*\*정희원 · 배재대학교 토목환경공학과 박사과정 (E-mail : jmj@pcu.ac.kr)

\*\*\* 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (E-mail : hoyo21@korea.ac.kr)

\*\*\*\*정희원 · 교신저자 · 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수 (E-mail : jskong@korea.ac.kr)

있다. ACI 318의 등가응력분포의 응력매개변수  $\alpha_1$ 은 0.85로 일정한 값을 가지며  $\beta_1$ 은 고강도 콘크리트에 대한 Nedderman (1973)과 Kaar(1978) 등의 실험 결과를 반영하기 위하여  $\beta_1$ 의 하한값을 0.65로 변경하였지만 고강도 콘크리트의 특성을 표현하는데 있어서 다른 주요 설계기준의 모델에 비하여 비안전측이라는 지적을 받고 있다(Ibrahim(1997) 등). 따라서 ACI의 설계기준을 따르는 현행 국내 콘크리트구조설계기준 또한 응력분포가 일반 강도 콘크리트와 상이한 고강도 콘크리트의 설계 시 문제점을 야기할 수 있다. 이에 본 연구에서는 기존 연구자의 실험데이터를 토대로 회귀분석을 수행하여 40~80 MPa까지의 고강도 콘크리트에 대한 등가응력 매개변수를 이론적으로 추정하고 제안된 등가응력 매개변수를 부재설계에 적용시켜 기존의 국내 설계기준과 비교·검토 하였다.

## 2. 콘크리트 압축응력분포

콘크리트에 작용하는 압축응력의 응력 분포를 산정하기 위해서 필요한 콘크리트 압축응력분포 관련 계수로 형상계수 ( $k_1$ ), 도심계수( $k_2$ )와 품질계수( $k_3$ )가 있으며 각 계수의 의미는 다음과 같다.  $k_1$ 은 전체 압축영역에 걸친 평균압축응력( $f_{avg}$ )과 최대압축응력( $f_{max}$ )의 비이고,  $k_2$ 는 압축연단에서 압축력 작용점까지의 거리와 중립축 깊이의 비이며,  $k_3$ 는 콘크리트 압축영역에서 최대압축응력( $f_{max}$ )과 콘크리트 압축강도( $f_{ck}$ )의 비이다. 이러한 계수 값들은 콘크리트의 재하 실험 등을 통해 각 계수의 값을 도출할 수 있다. 일반적으로 콘크리트의 압축응력분포를 포물선으로 가정할 경우에 복잡한 계산을 피하기 위해 등가 직사각형 응력분포로 환산하는데, 기본적으로 등가의 의미는 분포 응력의 총합과 분포응력의 작용점이 동일하다는 두 조건을 만족시키는 것을 의미한다. Fig. 1에서는 휨 부재의 압축영역에 대한 극한상태에 발생하는 변형률과 실제 압축응력의 형태 및 압축응력분포와 관계된 계수를 나타내었으며, 이를 통해 응력매개변수  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ 과 계수  $k_1$ ,  $k_2$  및  $k_3$ 의 관계를 파악할 수 있다.

### 2.1 콘크리트 압축응력분포 실험

국내외에서 사용되는 일반강도 및 고강도 콘크리트의 재료적 특성과 압축응력분포에 따른 계수 등을 결정하기 위해 상당한 연구가 진행되어 왔다. 그 중에서 가장 유명한 실험은 1955년 PCA(Portland Cement Association)의 Hognestad (1955) 등이 단기하중을 작용하여 수행한 실험이다. PCA의 실험에서는 Fig. 2와 같은 모형의 C형 공시체(Dogbone Test)를 이용하여 실험을 수행하였다.

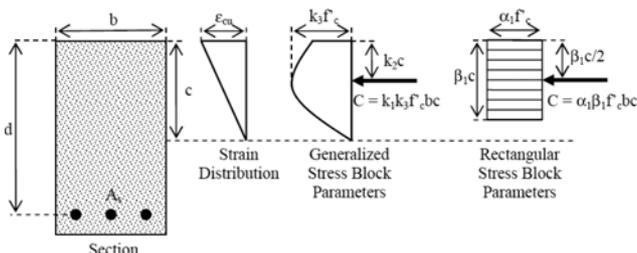


Fig. 1 Stress block parameters for rectangular sections

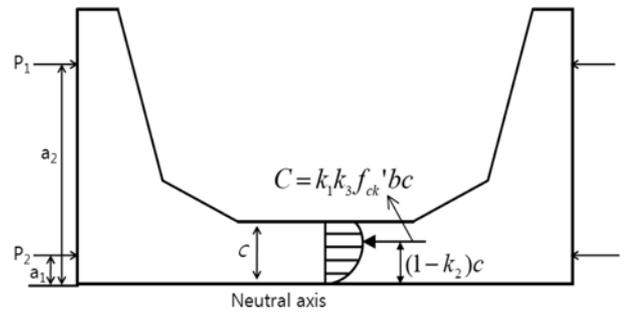


Fig. 2 C-shape specimen

실험 방법은 실험체에 주하중(P2)을 재하하면서 실험체 중립축면에 압축변형률이 발생하지 않도록 보조하중(P1)을 추가적으로 재하한다. 보조하중(P1)이 재하되는 동안 압축면의 압축 변형률은 지속적으로 증가하게 된다. 이처럼 시험체 바닥이 중립면을 유지하도록 하여 시험체 중심에서의 응력 분포가 마치 휨에서 보의 압축 영역과 같도록 묘사하며, 이러한 형태의 재하를 중앙부의 콘크리트가 파괴될 때까지 반복적으로 수행한다. 이를 통해 내력과 외력의 힘과 모멘트가 균형이 되도록 함으로서 계수  $k_1k_3$  및  $k_2$ 를 직접적으로 구할 수 있다. 실험체에 작용하는 외력은  $P_1$ 과  $P_2$ 이며, 내력은  $k_1k_3f_{ck}bc$ 로 작용한다. 평형방정식을 적용하여 외력과 내력의 총합은 같으므로, 이를 통하여 식 (1)과 같이 계수의 곱  $k_1k_3$ 를 구할 수 있다. 또한 실험체의 모멘트가 균형이 되게 함으로서 식 (2)와 같이  $k_2$ 를 구할 수 있다.

$$P_1 + P_2 = k_1k_3f_{ck}bc \rightarrow k_1k_3 = \frac{P_1 + P_2}{bcf_{ck}} \quad (1)$$

$$(1-k_2)c \times (P_1 + P_2) = P_1a_1 + P_2a_2 \rightarrow k_2 = 1 - \frac{P_1a_1 + P_2a_2}{(P_1 + P_2)c} \quad (2)$$

실험에서 결정된 계수  $k_1k_3$  및  $k_2$ 를 이용하여 콘크리트의 응력분포를 등가 직사각형으로 환산하는 경우, 콘크리트의 압축응력 매개변수  $\alpha_1$ 과  $\beta_1$ 을 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$\alpha_1 = \frac{k_1k_3}{2k_2}, \beta_1 = 2k_2 \quad (3)$$

$k_1$ ,  $k_2$  및  $k_3$ 의 정의와  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ 과의 관계를 고려할 때 실제 응력분포를 등가 직사각형으로 변환하는 경우 분포 응력의 총합과 분포응력의 작용점 위치에는 변화가 없기 때문에 응력 분포 모형을 등분포 사각형 모형 이외에 사다리꼴이나 삼각형 모형의 응력분포 모형으로 고려하는 것의 의미가 없는 것으로 사료되었으며 또한  $k_1$ ,  $k_2$ 는  $f_{ck}$ 와 관계있는 변수이고,  $k_1$ ,  $k_2$  및  $k_3$ 에 의해 결정되는 응력매개변수  $\alpha_1$ 과  $\beta_1$  또한  $f_{ck}$ 와 관계가 있음을 확인할 수 있었다. 도그본 테스트를 통한 응력매개변수 산정 과정을 고려할 때,  $\alpha_1$ 은  $f_{ck}$  뿐만 아니라  $\beta_1$  값에 영향을 받고,  $\alpha_1$ 과  $\beta_1$ 이 서로 반비례 관계에 있음을 확인할 수 있었다. 이는 기존의 콘크리트 설계기준이 응력매개변수  $\alpha_1$  결정시 콘크리트 설계기준 압축강도  $f_{ck}$ 만을 고려하는 것과는 분명한 차이가 있다.

### 2.2 등가응력 매개변수의 범위 산정

실험데이터를 이용한 응력매개변수의 회귀분석을 수행하기에 앞서, 제안하려는 응력매개변수의 상한값과 하한값을 결정하기 위하여 이론적인 분석을 통한 계수의 최대값과 최소값의 이상적인 값을 확인해보고자 하였다. 계수의 최대값과

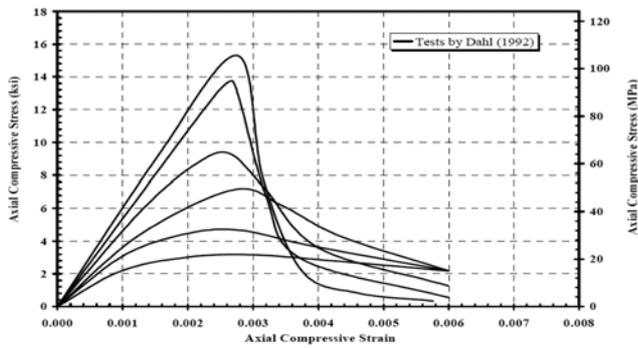


Fig. 3 Axial compressive stress-strain curves for different strengths of concrete

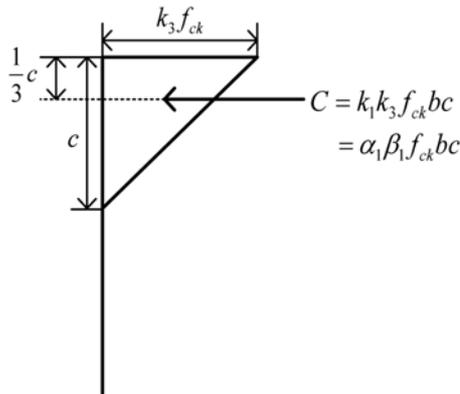


Fig. 4 Stress distribution for high-strength of concrete

최소값은 콘크리트 압축부 응력분포가 충분히 고강도인 경우와 충분히 저강도인 경우인 두 이상적인 경우를 가정하여 결정할 수 있다.

먼저 콘크리트 압축부가 충분히 고강도인 경우를 가정할 경우 Fig. 3과 같이 콘크리트의 강도가 고강도화 할수록 압축부의 응력 분포는 포물선 형태에서 삼각형의 형태에 가까워진다.

따라서 콘크리트 강도가 충분히 고강도인 경우 압축부의 응력분포를 Fig. 4와 같이 삼각형으로 가정할 수 있으며 콘크리트의 응력분포가 완전한 삼각형이므로 콘크리트의 형상계수  $k_1$ 은  $\frac{1}{2}$ 이 되며, 압축연단으로부터 압축력  $C$ 가 작용하는 깊이와 중립축 깊이의 비율인 도심계수  $k_2$ 는  $\frac{1}{3}$ 의 값을 가진다. 이 경우  $\alpha_1$ 과  $\beta_1$ 은 식 (4), (5)와 같이  $k_1$ ,  $k_2$  및  $k_3$ 로 정의할 수 있다. 이처럼 콘크리트 압축부의 응력분포를 삼각형으로 가정하여, 콘크리트의 강도 변화에 따른 응력배개변수  $\alpha_1$ 과  $\beta_1$ 의 최소값을 구할 수 있다.

$$\alpha_1 = \frac{k_1 k_3}{2k_2} = \frac{0.5k_3}{0.67} = 0.746k_3 \quad (4)$$

$$\beta_1 = 2k_3 = \frac{2}{3} \quad (5)$$

마찬가지로 콘크리트의 압축부가 충분히 저강도인 경우를 가정할 경우, 일반 강도의 콘크리트에서 압축부의 응력 분포는 포물선 형태를 가지며, 콘크리트의 강도가 작아질수록 형상계수  $k_1$ 은 증가한다. 압축부 응력분포인 포물선 모형의 면적과 이를 둘러싼 직사각형 면적의 비율인 형상계수  $k_1$ 은 실제적으로 1이 될 수는 없지만, 콘크리트의 강도가 작아질수록 1에 가까워진다. 이상적으로, 콘크리트의 강도가 충분히 저강도인 경우 압축부의 응력분포가 완전한 직사각형으

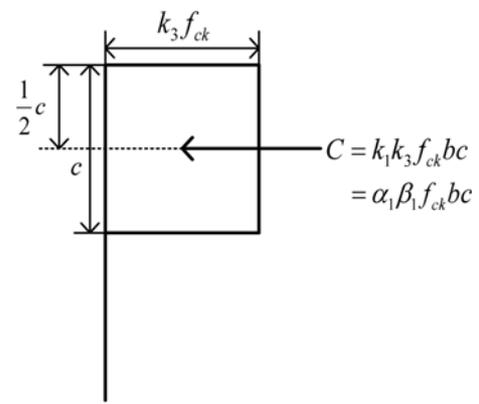


Fig. 5 Stress distribution for low-strength of concrete

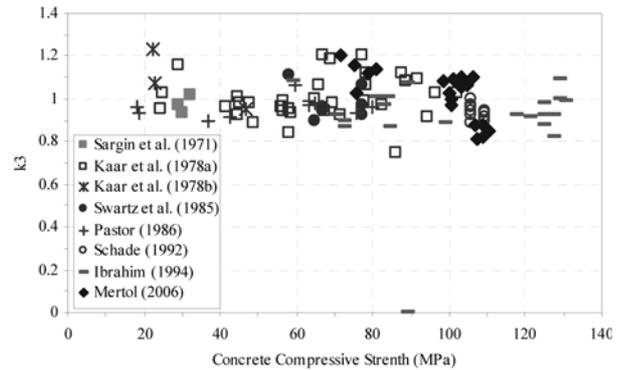


Fig. 6  $k_3$  parameter from c-shape tests

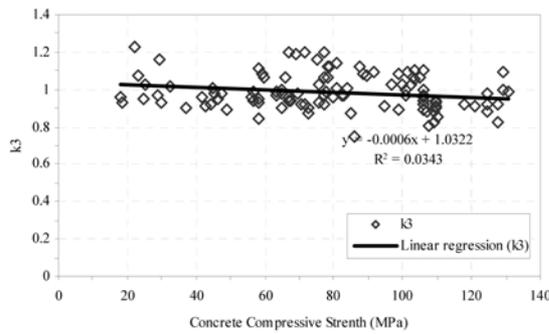
로 작용함을 가정하는 경우, 압축부의 응력분포는 Fig. 5와 같다. 콘크리트의 응력분포가 완전한 사각형이므로 콘크리트의 형상계수  $k_1$ 은 1이 되며, 압축연단으로부터 압축력  $C$ 가 작용하는 깊이와 중립축 깊이의 비율인 도심계수  $k_2$ 는  $\frac{1}{2}$ 의 값을 가진다. 이 경우  $\alpha_1$ 과  $\beta_1$ 은 식 (6), (7)과 같이  $k_1$ ,  $k_2$  및  $k_3$ 로 정의할 수 있다. 이처럼 콘크리트 압축부의 응력분포를 사각형으로 가정하여, 콘크리트의 강도 변화에 따른 응력배개변수  $\alpha_1$ 과  $\beta_1$ 의 최대값을 구할 수 있다.

$$\alpha_1 = \frac{k_1 k_3}{2k_2} = \frac{1.0k_3}{1.0} = k_3 \quad (6)$$

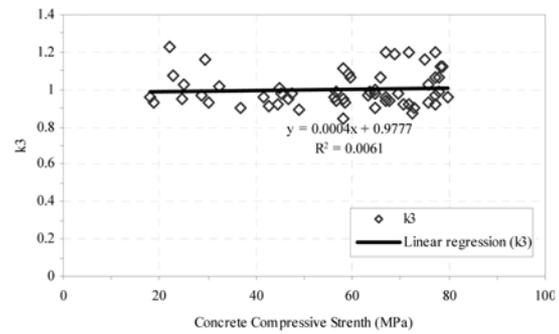
$$\beta_1 = 2k_2 = 1.0 \quad (7)$$

여기서  $\alpha_1$ 의 범위를 결정하는 품질계수  $k_3$ 는 PCA 실험 등을 통해 Hognestad(1955) 등의 연구지들에 의해 연구되어 왔으며, 본 연구에서는 기존 연구자들의  $k_3$  실험데이터를 이용하여 콘크리트 강도변화와  $k_3$ 값의 상관관계 산정을 위하여 회귀분석을 수행하였다.

Fig. 7에 (a)는 기존 연구자들의 모든 실험데이터에 대한 선형회귀분석이며, Fig. 7에 (b)는 본 연구에서 제안하기로한 80 MPa 까지의 실험데이터만을 가지고 콘크리트 강도에 대하여  $k_3$ 값의 회귀분석을 수행한 결과이다. 기존 실험 데이터의 분석 결과  $k_3$ 값은 0.96에서 1.12사이에 분포하며 대부분의 실험 데이터가 1에 근접한 결과를 보여준다. 따라서  $k_3$ 는 콘크리트 강도 변화에 관계없이 1로 가정하여 사용하여도 무방할 것으로 사료되며, 이를 바탕으로  $k_3$ 값을 1로 가정하는 경우 이론상으로 고강도 콘크리트의 경우  $\alpha_1$ 은 0.746에서 1.0 사이의 범위에 분포하며,  $\beta_1$ 은 0.67에서 1.0사이의 범위에 분포한다. 이 경우  $\alpha_1\beta_1$ 은 0.4998에서 1.0사이의 범



(a) 18~131 MPa



(b) 18~80 MPa

Fig. 7 Regression analysis of  $k_3$  parameter for different strengths rate of concrete

위를 가진다. 참고로 기존 PCA 실험결과 최대 압축 강도는 콘크리트 강도가 21 MPa(3000psi)인 경우  $0.8f_{ckbh}$ 에서 103 MPa(15000 psi) 인 경우  $0.58f_{ckbh}$  사이의 범위에 분포함을 제안하였다. 이는 본 연구에서 제안한  $\alpha_1$ 과  $\beta_1$ 의 범위에 포함된다. 이와 더불어 본 연구에서 제시한 이론적인 내용을 바탕으로 추후 콘크리트 강도 변화에 따른  $k_1$ ,  $k_3$  관계에 대한 추후 연구 수행을 바탕으로, 보다 정확한 등가응력 매개변수  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ 의 범위 산정이 가능할 것으로 사료된다.

### 3. 등가응력 매개변수의 제안

#### 3.1 주요 국가설계기준의 압축응력분포 모델

미국(ACI), 유럽(Eurocode 2), 캐나다(CSA) 등과 같은 세계 주요 국가 설계기준에서는 일반적으로 등가 직사각형 압축응력분포를 제안하고 있다. 유럽과 일본의 설계기준에서는 직사각형 압축응력분포 이외에 포물선-직선 형태의 압축응력분포를 제시하고 있기도 하지만, 전반적으로 직사각형 형태의 압축응력분포가 일반적이다. 이는 콘크리트 구조물을 설계하는 일련의 과정에 있어 등가 직사각형 압축응력분포를 적용함이 계산상 편리하기 때문이다. 다음 표 1은 각국의 설계기준에서 제안하고 있는 압축응력분포 계수에 대한 비교이다.

#### 3.2 계수 $\beta_1$ 의 제안

본 연구에서는 Hognestad(1955), Nedderman(1973), Kaar

(1978), Pastor(1986), Ibrahim(1997), Tan and Nguyen (2005) 등 기존 연구자들에 의해 실험된 등가응력블록 실험데이터를 이용하였으며, 앞에서 언급한 압축응력분포 계수들의 역학적 의미를 바탕으로 응력매개변수  $\beta_1$ 의 회귀분석을 수행하였다. 현행 ACI 318 설계기준에 응력매개변수  $\beta_1$ 은 콘크리트 강도가 28 MPa 이하인 경우는 0.85로 하며, 콘크리트 강도가 28 MPa를 초과할 경우, 28 MPa를 초과하는 매 1 MPa의 강도에 대하여  $\beta_1$ 의 값을 0.007씩 감소시킨다. 그러나 그 값은 0.65보다 작지 않도록 규정하고 있다. 본 연구에서는 일반 강도 콘크리트 설계 시 현행 콘크리트구조기준으로 설계 시 무리 없이 설계가 가능하며 그 안정성이 충분히 입증되었기 때문에, 실무에서 일반 강도 콘크리트로 판단되는 30 MPa 이하의 콘크리트 강도에 대해서는 기존의 응력매개변수 값인 0.85를 사용하였고, 30~80 MPa의 고강도 구간에 대해서는 기존 실험데이터의 선형회귀분석을 통하여 구해진 회귀분석식을 0.85값부터 시작하도록 y축 방향에 대하여 평행 이동하여 제안하였다. 콘크리트의 강도가 고강도화 될수록 콘크리트의 응력분포는 삼각형에 가까워지고, 기존의 콘크리트 응력 관련 실험을 통하여 80~90 MPa 이상의 강도에서는 콘크리트의 응력분포를 삼각형으로 간주하여도 무방한 것으로 사료되므로, 이 경우  $\beta_1$ 의 값은 0.67이며, 이 값은 콘크리트 강도 증가 정도와 상관없이  $\beta_1$ 의 하한값으로 제안하였다. 결과적으로 계수  $\beta_1$ 에 대하여 다음의 식 (8), (9)를 제안하였으며 Fig. 8에 기존 연구자들의 실험데이터

표 1. Summary of the rectangular stress block parameters in design codes

Reference	$\alpha_1$	$\beta_1$
ACI 318 (2005), KCI (2007)	0.85 ( $f_{ck}$ in MPa)	$0.85 - 0.008(f_{ck} - 30)$ ( $0.85 \geq \beta_1 \geq 0.65$ )
Eurocode 2 (1999)	1.0, for $f_{ck} \leq 50$ MPa $1.0 - (f_{ck} - 50)/200$ ( $50 < f_{ck} \leq 90$ MPa) $*f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$ $- \alpha_{cc}$ : The recommended value is 1 $- \gamma_c$ (partial factor) : Persistent & Transient : 1.5 Accidental : 1.2	0.8, for $f_{ck} \leq 50$ MPa $0.8 - (f_{ck} - 50)/400$ ( $50 < f_{ck} \leq 90$ MPa)
Canadian Standards Association (1994)	$0.85 - 0.0015f_{ck} \geq 0.67$ ( $f_{ck}$ in MPa)	$0.97 - 0.0025f_{ck} \geq 0.67$
Standards New Zealand (1995)	$1.07 - 0.004f_{ck}$ in which $0.75 \leq \alpha_1 \leq 0.85$ ( $f_{ck}$ in MPa)	(ACI 318)
ACI 318 TG-5 (2004)	$0.85 - 0.004(f_{ck} - 55)$ in which $0.70 \leq \alpha_1 \leq 0.85$ ( $f_{ck}$ in MPa)	(ACI 318)

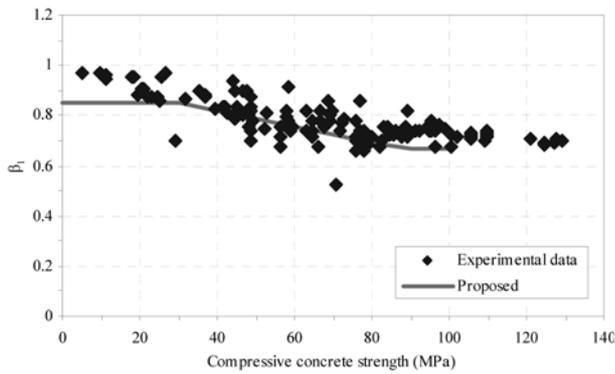


Fig. 8 Proposed relationship for the rectangular stress block parameters  $\beta_1$

값들과 비교하여 나타내었다.

$$\beta_1 = 0.85 \quad (f_{ck} \leq 30) \quad (8)$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.0032 \times (f_{ck} - 30) \quad (f_{ck} > 30, \beta_1 \geq 0.67) \quad (9)$$

### 3.3 계수 $\alpha_1$ 의 제안

$\beta_1$ 과 마찬가지로 Hognestad(1955), Nedderman(1973), Kaar(1977), Pastor(1986), Ibrahim(1997), Tan and Nguyen (2005) 등 기존 연구자들에 의해 실험된 등가응력블록 실험 데이터를 이용하였으며, 앞에서 언급한 압축응력분포 계수들의 역학적 의미를 바탕으로 등가응력 매개변수  $\alpha_1$ 의 회귀분석을 수행하였다. 현행 ACI 318 설계기준에서 응력매개변수  $\alpha_1$ 은 콘크리트 강도와 관계없이 0.85로 규정하고 있다. 이는 콘크리트 강도 변화에 따른 계수 특성의 평가를 고려하지 않은 제안식으로, 고강도 콘크리트의 특성을 표현하는데 있어 다른 설계기준에 비해 비안전적인 것으로 판단된다. 반면 일반 강도 콘크리트 설계 시 현행 콘크리트구조설계기준으로 무리 없이 설계가 가능하며 그 안정성이 충분히 입증되

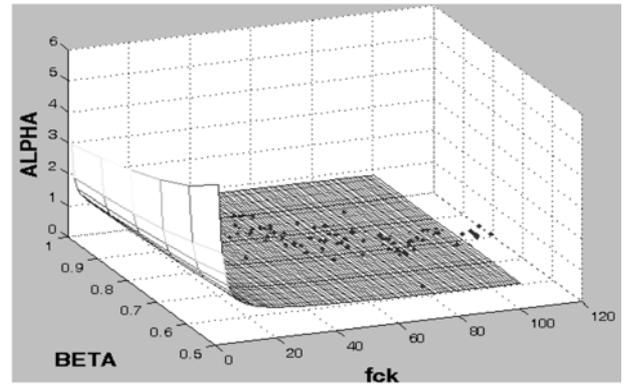


Fig. 9 Multiple regression analysis

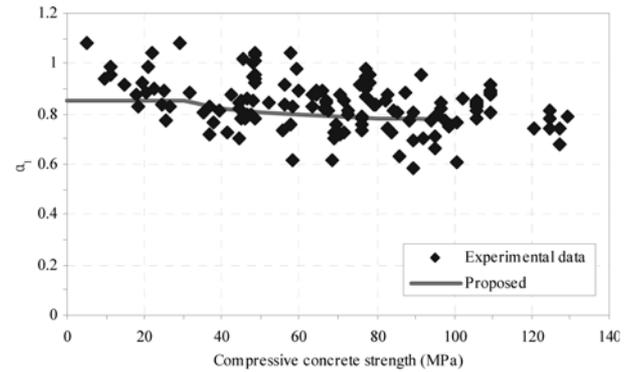


Fig. 10 Proposed relationship for the rectangular stress block parameters  $\alpha_1$

었기 때문에, 본 연구에서는 실무에서 일반 강도 콘크리트로 판단되는 30 MPa 이하의 콘크리트 강도에 대해서는 기존의 값인 0.85를 사용하였으며, 30 MPa 강도 이상의 고강도 콘크리트에 대해서는  $\alpha_1$ 이  $f_{ck}$ 와  $\beta_1$ 값에 영향을 받기 때문에 Fig. 9와 같이 기존 실험데이터를 통한 다중회귀분석을 수행하여 다음의 식 (10), (11)을 제안하였으며 Fig 10에 기존

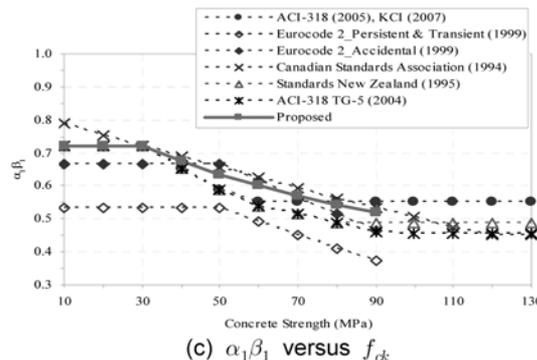
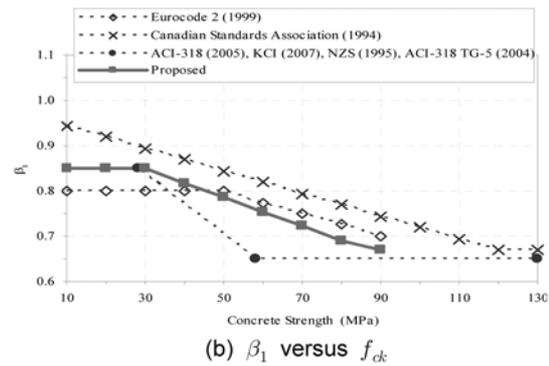
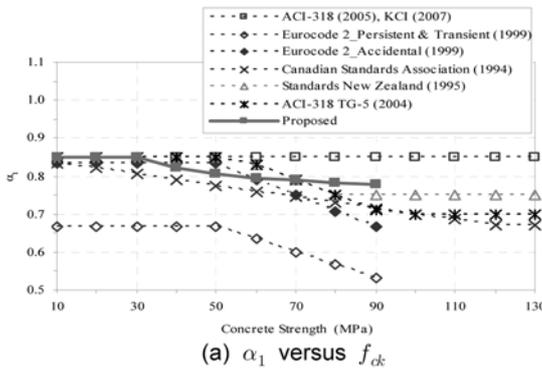


Fig. 11 Concrete rectangular stress block parameters

연구자들의 실험데이터값들과 비교하여 나타내었다.

$$\alpha_1 = 0.85 \quad (f_{ck} \leq 30) \quad (10)$$

$$\alpha_1 = 0.725 + \frac{3.2}{f_{ck}\beta_1} \quad (f_{ck} > 30) \quad (11)$$

### 3.4 기존 주요 설계기준과의 비교

다음 Fig. 11은 KCI, ACI 318, CSA, Eurocode 2 및 New Zealand 설계기준에서 제시하고 있는 등가응력 매개변수와 본 연구에서 제안한 등가응력 매개변수를 나타낸 것이다.

Fig. 11에서 확인할 수 있는 바와 같이 기존 설계 기준과의 비교를 통해 제안된 등가응력 매개변수의 적합성을 판단한 결과  $\alpha_1$  및  $\beta_1$ 의 곱으로 표현되는  $\alpha_1\beta_1$ 의 값이 일반 강도인 30 MPa까지는 현행 KCI 및 ACI 318 설계기준과 유사하며, 콘크리트 강도가 30 MPa를 초과하는 경우에는 제안된 응력매개변수와 Eurocode 2와 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

## 4. 구조설계

### 4.1 휨부재 설계

본 연구에서 제안된 등가응력모델과 현행 설계기준의 등가응력모델과의 비교 검토를 위해 제안식과 기존식의  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ 을 이용하여 구조설계를 수행하였다. 사용된 예제는 경간이 7.6 m 인 단순지지원 직사각형 단면의 보가 16 kN/m의 고정하중과 33 kN/m의 활하중을 받고 있을 때, 필요한 콘크리트 단면과 철근의 면적을 구하는 보 부재를 선택하였으며 선택된 부재가 인장지배단면이 되도록 순인장변형률  $\epsilon_s$ 의 값을 0.005 이상으로 하여 콘크리트 설계기준 압축강도  $f_{ck}$ (27, 40, 50, 60, 70, 80, 90 MPa)를 변화시키며 주요 설계 값을 살펴보았다.

Fig. 12에서 알 수 있는 바와 같이 70 MPa 까지는 제안

된 등가응력모델이 기존의 모델에 비해 콘크리트 단면은 최대 4.6% 줄어들고 철근량은 최대 3.8%까지 더 크게 계산하였지만 90 MPa 강도의 콘크리트에 대해서는 기존모델보다 오히려 제안된 모델이 약 4.3% 더 큰 콘크리트 단면과 3.3% 더 적은 철근량을 요구하는 것으로 나타났다. 이는 70 MPa까지는 기존식의  $\alpha_1$ 이 0.85로 고정된데 반해 제안된 등가응력모델은 콘크리트 강도가 증가할수록 점진적으로 감소하여 등가직사각형 깊이를 증가 시키게 되고,  $\beta_1$  또한 기존식보다 더 크게 계산되어지므로 균형철근비 및 철근량이 증가하기 때문이며, 반면에 80 MPa 이상부터는 기존  $\alpha_1$  및  $\beta_1$ 의 곱으로 표현되는  $\alpha_1\beta_1$ 의 값이 제안된  $\alpha_1\beta_1$  값보다 작아지면서 철근비의 감소를 야기하여 오히려 콘크리트 단면적은 더 크게 철근량은 더 적게 계산되어지기 때문이다. 따라서, 콘크리트 강도 40~70 MPa 강도 사이에서는 기존 등가응력모델이, 80 MPa 이후에는 새로 제안된 등가응력모델이 콘크리트 부재의 인장파괴를 더 보수적으로 평가하였으며 또한, 콘크리트 강도 40~70 MPa 강도 사이에서 제안된 모델이 콘크리트 단면감소에 효과적인 것으로 나타났다.

### 4.2 압축부재 설계

압축부재에서의 기존 등가응력모델과 제안된 등가응력모델의 차이를 검토하기 위해 특정 제원에 대해 축력-모멘트를 공칭강도와 설계강도에 대해 비교하였으며 이를 Fig. 13에 나타내었다.

검토 대상 제원은 400 mm×400 mm 직사각형 단면, 철근 항복강도 400 MPa, 철근비 2%에 콘크리트 설계기준 압축강도  $f_{ck}$ (40, 50, 60, 70, 80 MPa)를 변화시키며 살펴보았다. 철근의 영향이 큰 인장 지배영역에서는 기존식과 제안식이 비슷한 결과를 보이지만, 콘크리트의 영향이 큰 압축지배영역에서는 제안식보다 현행 콘크리트구조설계기준식이 고강도로 갈수록 축력을 2.6%~7.6% 까지 점점 더 크게 평가하고

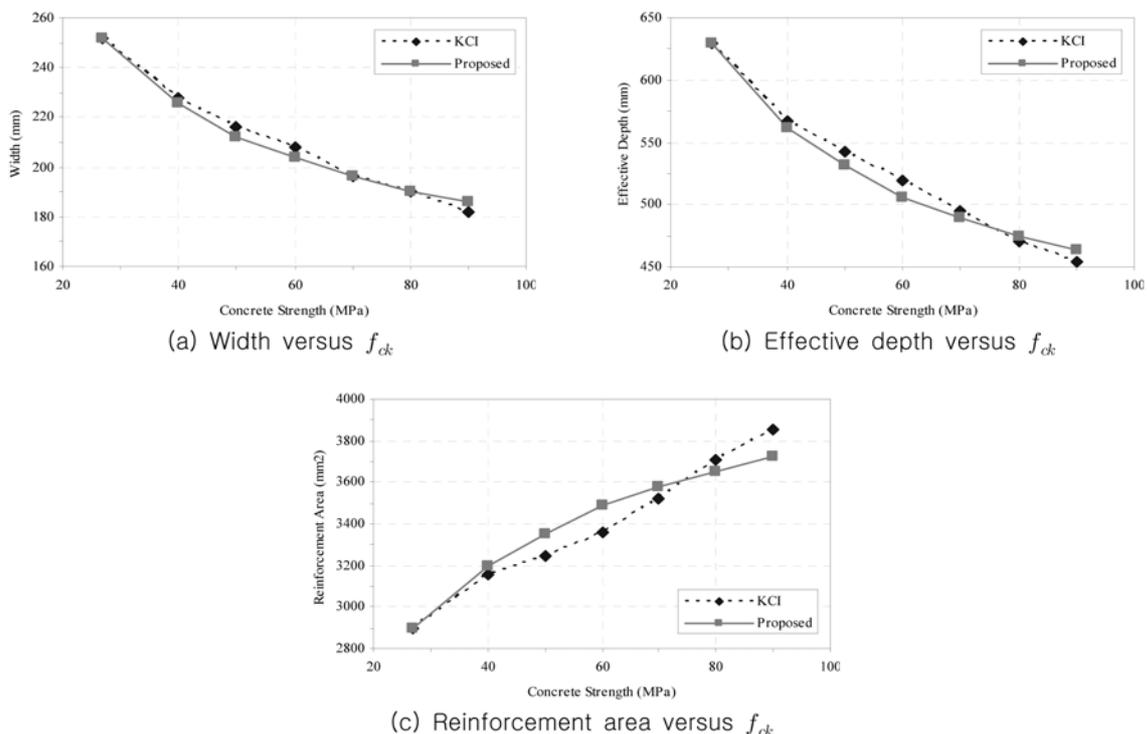


Fig. 12 Flexural member design

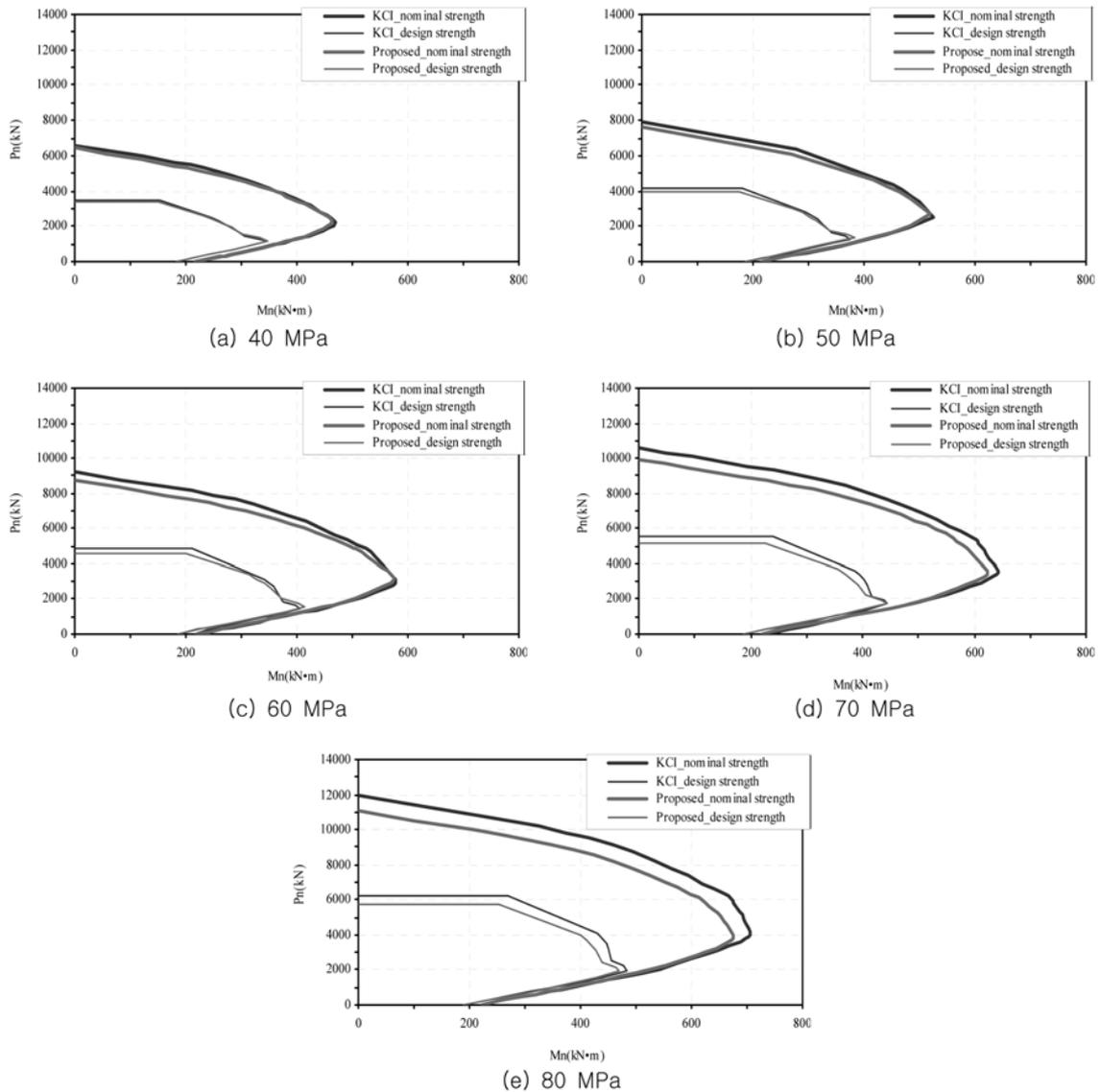


Fig. 13 P-M interaction curves

있음을 알 수 있었으며, 결과적으로 제안식이 기존식에 비해 압축력을 더 보수적으로 평가하는 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 기존 연구자의 실험데이터와 응력대개변수의 이론적 개념을 바탕으로 고강도 콘크리트에 대하여 등가응력 대개변수를 제안하였으며, 특히 기존의 콘크리트구조 설계기준이 응력대개변수  $\alpha_1$  결정시 콘크리트 설계기준 압축강도  $f_{ck}$  만을 고려하는 것과는 다르게  $\alpha_1$ 이  $f_{ck}$  뿐만 아니라  $\beta_1$ 값에 영향을 받고,  $\alpha_1$ 과  $\beta_1$ 이 서로 반비례 관계에 있는 것을 고려하여 새로운 등가응력모델을 제안하였다. 또한, 제안된 등가응력모델과 현행 등가응력모델을 이용하여 휨 및 압축 부재의 구조설계를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 새로 제안된 등가응력모델은 현행 콘크리트구조설계기준의 설계 개념을 만족하는 것으로 나타났다.
2. 콘크리트 강도 40~70 MPa 강도 사이에서는 기존 등가응력모델이, 80 MPa 이후에는 새로 제안된 등가응력모델이 콘크리트 휨 부재의 인장파괴를 더 보수적으로 평가하였

으며 또한, 콘크리트 강도 40~70 MPa 강도 사이에서 제안된 등가응력모델이 기존 등가응력모델에 비해 콘크리트 단면감소에 효과적인 것으로 나타났다.

3. 콘크리트 강도에 따른 압축부재의 P-M 상관도를 분석한 결과, 철근의 영향이 큰 인장 지배영역에서는 기존식과 제안식이 비슷한 결과를 보이지만, 콘크리트의 영향이 큰 압축지배영역에서는 제안식보다 현행 설계기준식이 고강도로 갈수록 점점 더 크게 평가하고 있음을 알 수 있었으며, 결과적으로 제안식이 기존식에 비해 고강도로 갈수록 콘크리트 압축력을 더 보수적으로 평가하는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

이 논문은 건설교통부 건설핵심기술연구개발(05건설핵심 D11)일환인 “고성능다기능 콘크리트개발 및 활용기술” 과제 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 또한 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2009-0087163). 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- 이재훈, 손혁수, 김준범(1999) 고강도 철근 콘크리트 기둥의 실험 및 강도해석, *한국콘크리트학회논문집*, 한국콘크리트학회, 제11권 1호, pp. 146-160.
- ACI 318-05 (2002) Building code requirements for structural concrete and commentary, american concrete institute, Farmington Hills, USA.
- ACI 318 TG-5 (2004) In the committee meeting, ACI fall conference, San Francisco, California.
- Canadian Standards Association (1994) Design of concrete structures in buildings, (CAN 3-A23.3-M94), Rexdale, Ontario, Canada.
- CEN, EN 1992 'Eurocode 2 (2004) Design of concrete structures', European Committee for Standardization.
- Hognestad, E., Hanson, N.W., and McHenry, D. (1955) Concrete stress distribution in ultimate strength design, *ACI Journal*. Proceedings, Vol. 52, pp. 455-479.
- Ibrahim, H.H.H. and MacGregor, J.G. (1997) Modification of the ACI Rectangular stress block for high-strength concrete, *ACI Structural Journal*, Vol. 94, pp. 40-48.
- Kaar, P.H., Hanson, N.W., and Capell, H.T. (1978) Stress-strain characteristics of high strength concrete, *American Concrete Institute Special Publication-55*, Douglas McHenry International Symposium on Concrete and Concrete Structures, Michigan, pp. 161-185.
- Lee, J.-H. and Son, H.-S. (2000) Failure and strength of high-strength concrete columns subjected to eccentric loads, *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 1, Jan-Feb. pp. 75-85.
- Nedderman, H. (1973) *Flexural Stress Distribution in Very-High Strength Concrete*, M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Texas at Arlington, Arlington, Texas.
- Pastor, J.A. (1986) *High Strength Concrete Beams*, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Cornell University, Ithaca, New York.
- Standards New Zealand (1995) Design of concrete structure, (NZS 3101-1995), Wellington, New Zealand.
- Tan, T.H. and Nguyen, N. (2005) Flexural behavior of confined high-strength concrete columns, *ACI Structural Journal*, Vol. 102, No. 2, pp. 198-205.

(접수일: 2010.10.29/심사일: 2011.2.23/심사완료일: 2011.3.11)