

신뢰성 이론을 이용한 (300kgf/cm<sup>2</sup>, 500kgf/cm<sup>2</sup>, 700kgf/cm<sup>2</sup>) 콘크리트

구조물의 휨변형 해석과 응력불력의 선택에 관한 연구

A Study of Selection of Stress Block and Analysis of the Flexural Deformation for Concrete Structures(300kgf/cm<sup>2</sup>, 500kgf/cm<sup>2</sup>,700kgf/cm<sup>2</sup>)using Reliability Theory

최광진\* 장일영\*\*, 송재호\*\*\*, 홍원기\*\*\*\*

## 요 지

본 연구의 목적은 불확실성이 내포되어 있는 콘크리트 구조물을 신뢰성 이론에 근거한 보통강도, 고강도 콘크리트에서의 휨모멘트-곡률관계와 하중변위관계를 해석하는데 그 목적을 두고 있다. 또한 기존의 해석방법과 본 연구에서의 해석방법을 비교하고 각 강도별로 기존에 제안된 응력불력을 가정, 강도별에 알맞은 응력불력을 검증하고 본 연구의 해석방법에 대한 타당성을 증명하는데 있다. 그래서 기존의 문헌을 통하여 공시체 데이터( $\phi 10 \times 20$ )에 대한 회귀분석을 이용하여 각 강도별로 곡선식을 모델화하여 제안하였고 이 식을 이용하여 불확실성을 내포하고 있는 몬테카를로 시뮬레이션을 사용하여 내력을 평가하여 기존연구 해석치와 각 응력불력을 이용한 본 연구에서의 해석치를 비교검토하여 이 해석방법의 타당성을 증명하는데 있다.

## 1. 서 론

현재 사용되고 있는 건설재료로서 가장 널리 사용되고 있는 것은 콘크리트이며 지구상의 거의 모든 구조물에 이용되고 있을 정도로 현대 인간사회에 기여하는 바가 크다. 이러한 콘크리트가 최근에는 신소재 개발 및 시공기술 등의 향상에 힘입어 고강도화되고 있다. 또한 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트를 구성하고 있는 재료특성이나 구조물의 공학적인 재료강도는 확률변수로 작용하고 있어, 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트 응력-변형을 곡선과 응력불력에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 기존의 보통강도, 고강도 콘크리트의 응력-변형을 곡선(50개)을 바탕으로 선형회귀분석과 다중회귀분석을 이용하여 각각 강도에 대한 응력-변형곡선을 도출하였다. 또한 이것을 바탕으로 정규밀도 함수와 불확실성의 확실적인 개념이 포함되어 있는 몬테카를로 시뮬레이션 해석방법을 이용하여 실제구조물에 대한 휨모멘트-곡률 관계를 산정하여 하중-변위 관계를 모델화하여 실험치와 해석치를 비교검토하여 응력불력과 이 해석방법의 타당성을 증명하였다.

## 2. 재료의 모델화

### 2.1 철근의 응력-변형을 곡선모델

철근의 응력-변형을 곡선모델은 그림 1과 같은 변형율경화 범위를 고려한 철근거동을 가장 근사하게 표현할 수 있는 복합곡선모델을 이용하였다.

\* 정회원 (주) 건영 엔지니어링 사업부, 공학석사

\*\* 정회원 국립금오공과대학교 토목공학과 조교수, 공학박사

\*\*\* 국립금오공과대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\*\*\* 정회원 (주) 건영 엔지니어링 사업부장, 공학박사

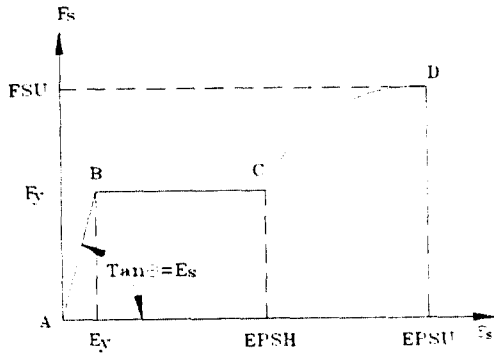


그림 1. 철근의 응력-변형률 곡선

## 2.2 콘크리트의 모델화

보통강도 콘크리트의 응력-변형률곡선모델은 300kgf/cm<sup>2</sup> 중심으로 하였고, 고강도 콘크리트의 응력-변형률 곡선 모델은 500kgf/cm<sup>2</sup>, 700kgf/cm<sup>2</sup>을 중심으로한 기존실험데이터에 근거로 상호간에 선형회귀분석과 다중회귀분석하여 곡선을 모델화하였다(그림 2, 3, 4참조). 그리고 구속조건에서의 하강곡선은 기존의 Kent-Park수정곡선의 구속하강역을 이용하여 영역별로 구분하여 응력-변형률 곡선을 다음과 같이 설명하였다. (단, 구속하강곡선은 철근량에 따라 달라지므로 보통강도, 고강도콘크리트에서 동일하게 취하였다.)

1) 300kgf/cm<sup>2</sup>의 보통강도 콘크리트의 경우

영역 AB ( $E_m < EPUPK$ )

$$F_m = 45.08E_m^{0.65}$$

$$F_m = 8.03(2.00 \times 10^{-4} FCP + 3.21 \times 10^{-10} + 0.8 \times 10^{-4} EPUPK^{0.21})^{0.65} \quad (1)$$

영역 BC ( $EPUPK \leq EP2C$ ) (비구속일 경우)

$$F_m = 1.53 \times 10^4 E_m^{-2.01} \quad (2)$$

영역 BC ( $EPUPK \leq E_m \leq EP2C$ ) (구속일 경우)

$$F_m = FCP [1 - Z(E_m - EPUPK)] \quad (3)$$

여기서,

EP2C, FCP5U : 최대변형률의 20%, 50% 변형률

EP5UC : 최대응력의 50% 응력

$$Z = (FCP / (FCP - FCI5U)) / (EF5UC + EF50H - EPUPK)$$

$$EF50H = [((EP2C - EPUPK)(FCP - FCI5U) - (EF5UC - EPUPK)) / (FCP - FCP2C)]$$

비구속된 콘크리트에 대해서는

$$EF5UC - EP2C \text{ and } FCI5U = FCP2C$$

영역 CD ( $EP2C \leq E_c \leq EPUT$ )

$$F_m = FCP2C \quad (4)$$

여기서, EPUT : 콘크리트의 극한 변형률

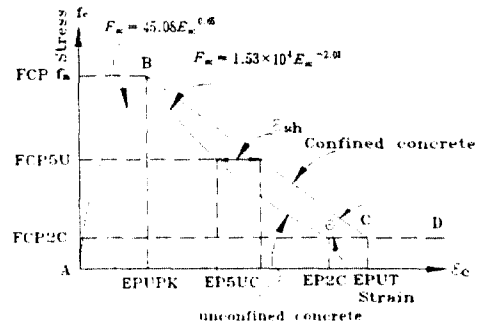


그림 2. 보통강도 콘크리트(300kgf/cm<sup>2</sup>)의 응력-변형률 곡선

2) 500kgf/cm<sup>2</sup>의 고강도 콘크리트의 경우

영역 AB ( $E_m < EPUPK$ )

$$F_m = 60.51E_m^{0.75}$$

$$F_m = 11.24(2.00 \times 10^{-6} FCP + 6.31 \times 10^{-10} + 0.8 \times 10^{-8} EPUPK^{0.64})^{0.75} \quad (5)$$

영역 BC ( $EPUPK \leq EP2C$ ) (비구속일 경우)

$$F_m = 2.68 \times 10^4 E_m^{-1.50} \quad (6)$$

영역 BC ( $EPUPK \leq E_m \leq EP2C$ ) (구속일 경우)

$$F_m = FCP [1 - Z(E_m - EPUPK)] \quad (7)$$

비구속된 콘크리트에 대해서는

$$EF5UC - EP2C \text{ and } FCI5U = FCP2C$$

영역 CD ( $EP2C \leq E_c \leq EPUT$ )

$$F_m = FCP2C \quad (8)$$

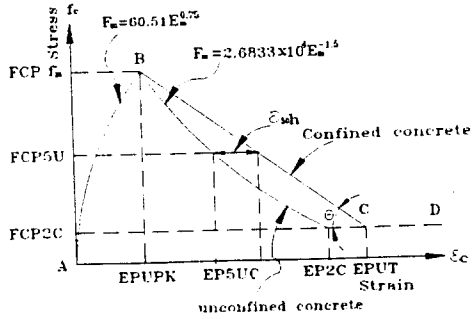


그림 3. 고강도 콘크리트(500kgf/cm<sup>2</sup>)의 응력-변형을 곡선

### 3) 700kgf/cm<sup>2</sup>의 고강도 콘크리트의 경우

영역 AB ( $E_m < EPUPK$ )

$$F_m = 74.04 E_m^{0.81}$$

$$F_m = 3.18 \times 10^4 (3.30 \times 10^{-6} FCP + 2.61 \times 10^{-3} - 4.91 \times 10^{-6} EPUPK^{0.44})^{0.71} \quad (9)$$

영역 BC ( $EPUPK \leq EP2C$ ) (비구속일 경우)

$$F_m = 2.58 \times 10^4 E_m^{-1.33} \quad (10)$$

영역 BC ( $EPUPK \leq E_m \leq EP2C$ ) (구속일 경우)

$$F_m = FCP [1 - Z(E_m - EPUPK)] \quad (11)$$

비구속된 콘크리트에 대해서는

$$EP5UC - EP2C \text{ and } FCP5U = FCP2C$$

영역 CD ( $EP2C \leq E_c \leq EPUT$ )

$$F_m = FCP2C \quad (12)$$

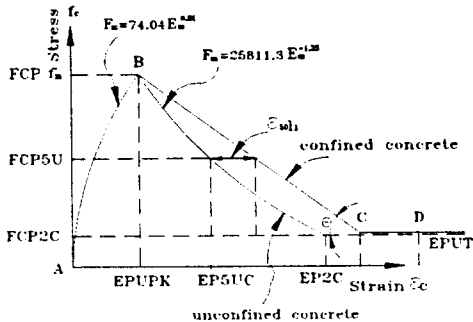


그림 4. 고강도 콘크리트(700kgf/cm<sup>2</sup>)의 응력-변형을 곡선

### 3. 보통강도, 고강도콘크리트의 응력블럭

보통강도, 고강도콘크리트구조물의 응력블럭에서 기준

에 제안된 응력블럭을 확률적인 개념을 포함한 몬테카를로 해석방법으로 해석할 때 등가응력블럭, 사다리꼴 응력블럭을 각각 가정하여 보통강도, 고강도콘크리트에 실제적인 응력분포곡선에 근사적인 응력블럭을 제시한다.

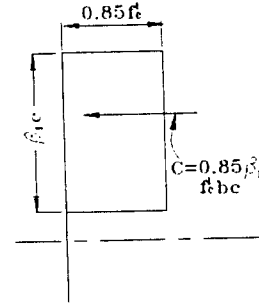


그림 5. 등가 직사각형 응력블럭

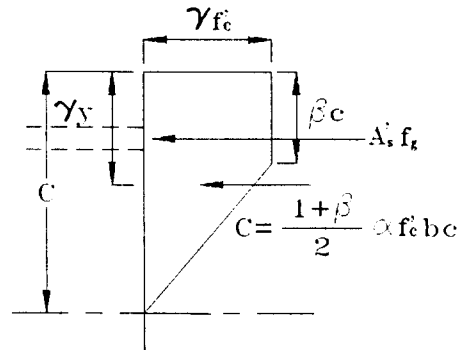


그림 6. 사다리꼴 응력블럭

보통강도, 고강도콘크리트의 응력블럭을 선택하기 위해서는 기존에 제안된 그림 5.에서의 등가직사각형 응력블럭, 그림 6.에서의 사다리꼴 응력블럭등을 보통강도, 고강도콘크리트의 평형 방정식을 유도하기 위하여 응력블럭으로 가정하여 각각의 응력블럭에 대한 평형방정식을 산출하였다. 또한 각각의 평형 방정식을 식 (13),(14)와 같다.

$$P = a f'_c b k d + \sum f_s (A_{S1} + A_{S1}')$$

$$M = a f'_c b k d \left( \frac{L_R}{2} - \gamma k d \right) + \sum f_s A_{S1} \left( \frac{L_R}{2} - d_i \right)$$

(13)

$$P = \frac{(1+\beta)}{2} a f'_{c} b c + \sum f_s (A_{S_i} + A_{S_i}')$$

$$M = \frac{(1+\beta)}{2} a f'_{c} b c \left( \frac{L_x}{2} - \gamma y \right) + \sum f_s A_{S_i} \left( \frac{L_x}{2} - d_i \right)$$

(14)

#### 4. 휨모멘트-곡률관계의 해석방법

##### 4.1 기존의 휨모멘트-곡률관계의 해석방법

기존의 휨모멘트-곡률관계의 해석방법은 단면의 곡률로부터 힘과 휨모멘트를 구하는 식을 도입하였다. 그리고 콘크리트단면과 철근층으로 분할하여 재료의 각 층에서의 응력과 변형율은 층의 중앙에서 평가하고 층 전체에서도 동일하게 가정하였다. 또한 단면의 곡률은 변형율의 구배이며 단면의 압축연으로 각 층마디의 변형율을 계산하고 힘과 모멘트 평형방정식에서의 곡률과 압축연의 변형율이 설정되면 변형율분포를 발생시키는 힘과 모멘트를 구할 수 있다. 그래서 위의 과정을 초기치와 비교하여 반복수행하므로써 휨모멘트-곡률관계를 산정할 수 있고 이 관계를 기본으로하여 변위를 구하여 변위관계를 모델화 하였다.

##### 4.2 몬테카를로 해석방법

몬테카를로 해석방법은 그림 7. 의 순서도와 같다.

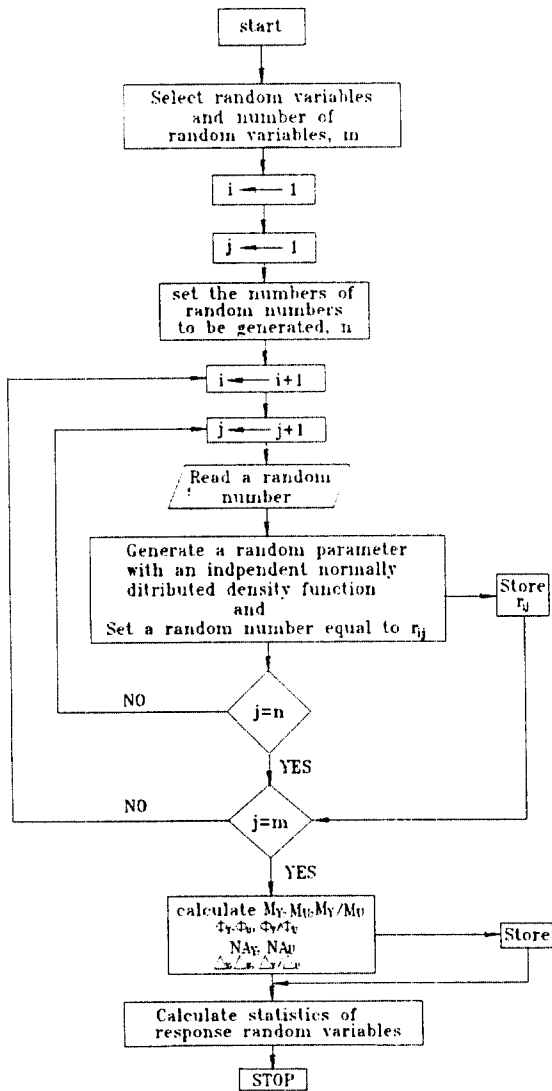


그림 7. 몬테카를로 해석방법 순서도

#### 5. 해석 결과

300kgf/cm<sup>2</sup>보통강도 콘크리트의 경우의 해석결과는 그림 8, 그림 9에서와 같이 나타나고 있고, 500kgf/cm<sup>2</sup>고강도 콘크리트의 경우의 해석결과는 그림 10, 그림 11에서와 같이 나타나고 있다. 또한 700kgf/cm<sup>2</sup>고강도 콘크리트의 경우는 그림 12, 그림 13에 잘 나타나 있다.

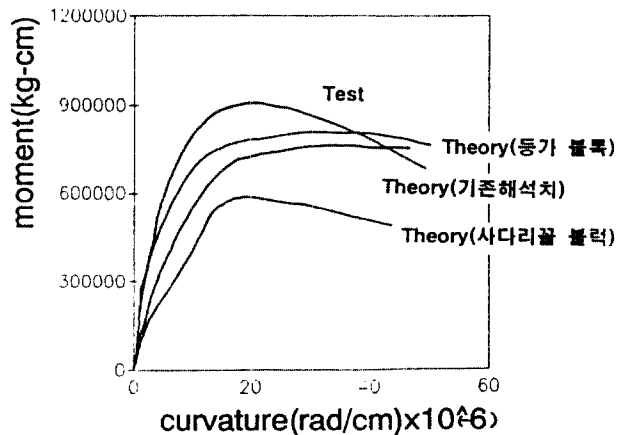


그림 8. 각 블록에 대한 보통 강도콘크리트(300kgf/cm<sup>2</sup>)의 휨모멘트-곡률관계 비교

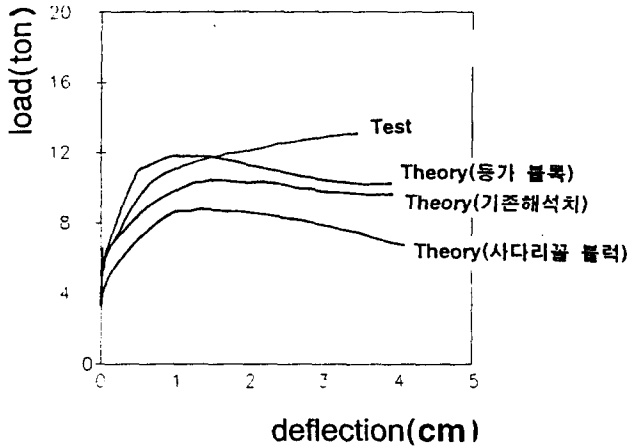


그림 9. 각 블록에 대한 보통강도콘크리트(300kgf/cm<sup>2</sup>)의 하중-변위관계 비교

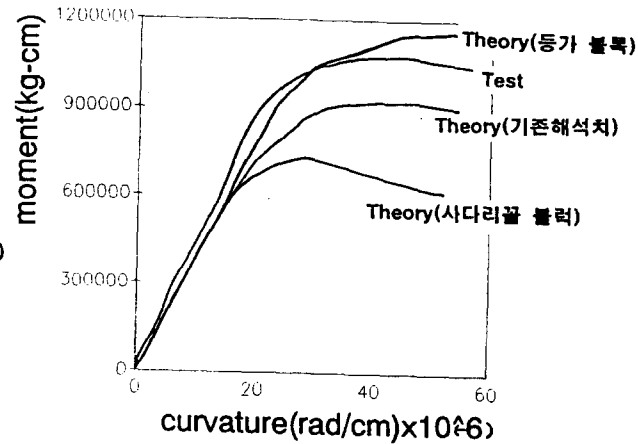


그림 12. 각 블록에 대한 고강도콘크리트(700kgf/cm<sup>2</sup>)의 휨모멘트-곡률관계 비교

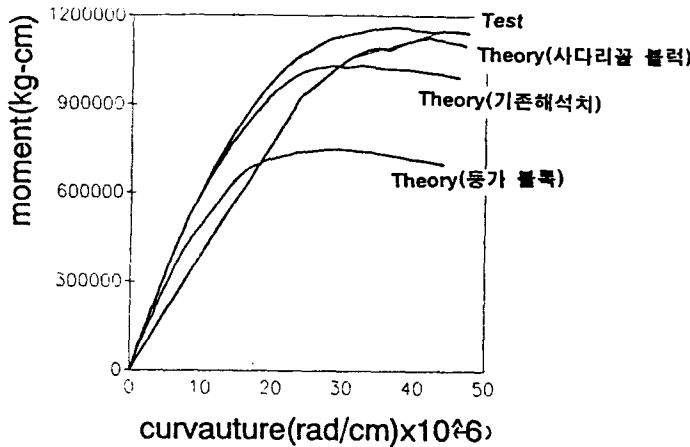


그림 10. 각 블록에 대한 고강도콘크리트(500kgf/cm<sup>2</sup>)의 휨모멘트-곡률관계 비교

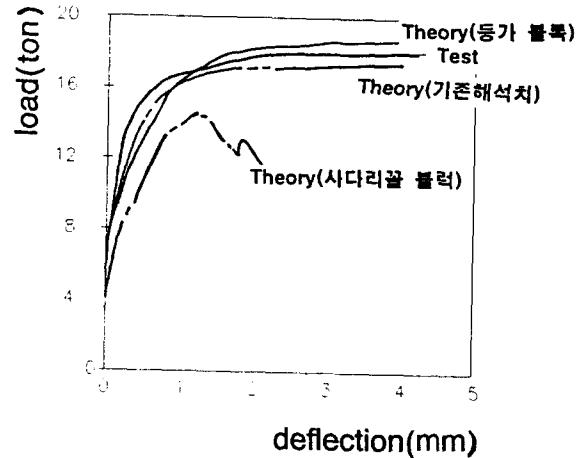


그림 13. 각 블록에 대한 고강도콘크리트(700kgf/cm<sup>2</sup>)의 하중-변위관계 비교

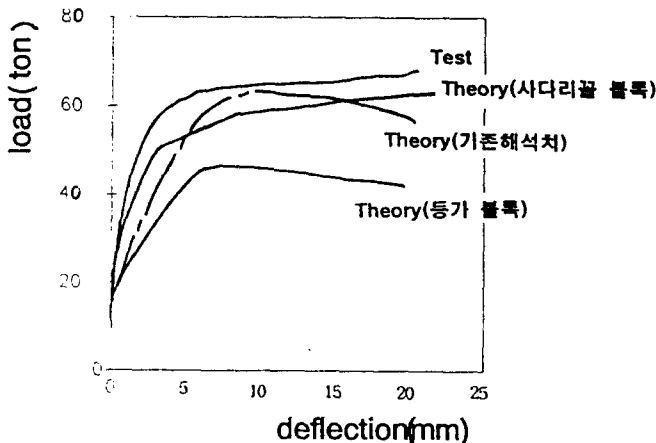


그림 11. 각 블록에 대한 고강도콘크리트(500kgf/cm<sup>2</sup>)의 하중-변위관계 비교

## 6. 결론

본 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 각 블록에 대한 응력블럭을 비교한 결과 보통강도(300kgf/cm<sup>2</sup>), 고강도콘크리트(500, 700kgf/cm<sup>2</sup>)의 응력블럭은 각각 등가블럭, 사다리꼴 응력블럭, 등가블럭이 적합하다고 나타났다.
- (2) 보통 강도콘크리트가 됨에 따라서 중립축의 위치가 상승하나 응력블럭의 면적이 작아지는 속도가 느리고 초기 변형율에서 최대변형율에 이르는 시간이 고강도콘크리트에 비하여 길어진다고 나타난다.
- (3) 고강도콘크리트가 됨에 따라서 중립축의 위치가 상

승하기 때문에 응력불력의 면적이 작아지므로 초기 변형률에서 최대변형률에 이르는 시간이 짧아진다고 나타난다.

(3) 몬테카를로 시뮬레이션 해석방법을 사용하므로써 휨 거동 해석에 대한 데이터 추정한계를 벗어날 수 있을 것으로 사료된다.

(4) 보통강도, 고강도콘크리트에서의 해석결과와 실험결과가 비교적 근사적인 거동을 하고 있다.

## 참 고 문 헌

- (1) Hong Won Kee, " Development of Analytical Models for Reinforced Concrete Masonry Flexural Walls", Ph.D, UCLA, 1989.
- (2) Yoshio Hiramatsu, Kiyoshi Okada, Yukitoshi Oka., Wataru Koyanagi, Yoshiali Mizuta.", Designing and Constructing a Stiff Testing Machine and the Deformation Characteristics of Various Kinds of Concrete", JCI, Vol. 24, No. 260(material), Jan 1975.
- (3) ACI-363, "State of the Art Repor on High-Strength Concrete", Journal of ACI, Vol. 81, No. 4., July-Aug.pp.1009-1056, 1984.
- (4) Building Code Requirements for reinforced Concrete, ACI 318-83, 1983.
- (5) Park, P. and Panlay, T., "Reinforced Concrete Structures", John Wiley and Sons, Inc. New York. 1975.
- (6) Hart,G.C., "Uncertainty Analysis, Loads, and Safety In Structural Engineering" Prantice-hall, Inc. 1982.
- (7) 삼성건설 기술연구소, "고강도콘크리트 현장 프로젝트 및 초고강도콘크리트시공 지침서", 기연-92017, 1992. 12.
- (8) 최광진, "신뢰성 이론을 이용한 고강도콘크리트 구조물의 휨변형 해석에 관한 연구", 금오공과대학교 대학원 토목공학과 석사논문, 1995. 2.
- (9) 최광진, "신뢰성 이론을 이용한 고강도콘크리트 ( $500\text{kg}/\text{cm}^2$ ) 구조물에 대한 휨변형의 해석적 연구", 한국콘크리트학회 춘계학술발표회, 1995. 5.