

# 고강도 콘크리트 부재의 응력블록에 관한 검토

## The Investigation of Stress Blocks on High Strength Concrete

신 성 우\*  
Shin, Sung - Woo

### 요 약

본 연구는 극한강도 이론에 입각한 고강도 콘크리트 부재의 설계를 위한 방법 중 가장 중요한 요소의 하나인 응력-변형도 곡선의 이상화에 관한 연구이다.

이를 위하여 보통강도(280kg/cm<sup>2</sup>)에서 초고강도(1050kg/cm<sup>2</sup>)까지의 콘크리트를 사용하여 부재를 제작, 시험하였으며, 기존의 여러가지 이론과 비교검토를 하였다. 주요 변수는 콘크리트 강도이외에 주근의 양과 전단 보강근의 간격으로 하였다. 실험결과 현재의 ACI Building Code에 규정된 직사각형 응력블록은 고강도 콘크리트에도 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

### ABSTRACT

The object of this study was to investigate the flexural stress blocks of High Strength Concrete Members under monotonic loading. Such a stress block should be clearly idealized before High Strength Concrete can be used with confidence in Structural Members.

The principal test variables were the Compressive Strength of Concrete, the percentage of longitudinal reinforcement and the spacing of confinement reinforcement.

The rectangular stress block of the present ACI Building Code was found to give acceptably conservative flexural strength predictions over the entire range of concrete strength from 280kg/cm<sup>2</sup> (4Ksi) to 1050kg/cm<sup>2</sup> (15Ksi)

론식들이 제안되어 있다.

따라서 본 연구에서는 압축강도가 280kg/cm<sup>2</sup> (4ksi)에서 1050kg/cm<sup>2</sup> (15ksi)까지인 콘크리트를 대상으로 부재를 제작, 실험을 하여 현재 제안된 각종 이론식이 적합한지를 검토하였다. 이를 위한 주요변수로서 콘크리트의 압축강도는 280, 840 그리고 1050kg/cm<sup>2</sup>, 주근비는 0.

### 1. 서 론

근래에 콘크리트의 압축강도가 일부 선진 외국에서 1,000kg/cm<sup>2</sup> 이상까지 사용되고 있어 이를 사용하여 휨부재 설계식을 위하여 응력-변형도 곡선의 이상화를 위한 여러가지 이

\* 정희원, 한양대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

● 1990. 3. 30접수, 본 논문에 대한 토론을 1990. 9. 30까지 본 학회에 보내주시면 1990. 12월호에 그 결과를 게재해 드리겠습니다.

066 $\rho_w$ , 그리고 전단보강근의 간격은  $d/2$ 와  $d/4$ 로 하였다.

## 2. 실험 계획

### 2. 1 사용 재료

시멘트-보통강도(280kg/cm<sup>2</sup> = 4000psi)와 고강도(840kg/cm<sup>2</sup> = 12,000psi) 시험체에 대해서는 1종 포틀랜드 시멘트를, 초고강도(1050kg/cm<sup>2</sup> = 15000psi) 시험체에 대해서는 1종보다 분말도가 높은 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

골재-모래는 강에서 채취한 천연사였고, 자갈은 쇠석 석회석을 사용하였다.

보철근-세가지 크기의 이형철근 즉 No. 3, No. 5, 그리고 No.9이 주근으로 사용되었다. 사용된 모든 철근은 ASTM규정(ASTM, A615-Grade 60)에 규정된 이형 및 원형철근이었다.

혼화제-TypeC 플라이 애쉬와 Melment-Superplasticizer가 사용되었다.

배합 설계-소요로하는 강도 범위와 소성성질(Workability, Finishability등)을 갖도록 배합 설계를 하였으며 Superplasticizer를 첨가하기 전의 슬럼프 값이 Zero인 콘크리트로 고강도 시험체를 설계하였다.

### 2. 2 시험체의 설치

압축강도가 280(4ksi), 1050(15ksi), 그리고 840kg/cm<sup>2</sup>(12ksi)인 콘크리트를 사용 A, B, C 3개조로 하였으며, 각 조당 12개의 시험체를 제작하였으며, 각 조에서 2개의 동일한 시험체로서 6개의 Group을 만들었다. 이 가운데 2개의 Group은 No.3 철근 4개를, 또다른 2개의 Group은 No.5철근 4개를, 그리고 마지막 2개의 Group은 No.9철근 4개를 각 코너마다 배근하였다. 동일한 콘크리트 강도와 주근을 지닌 2개 Group의 시험체 사이에서의 차이는 전단철근(No.3 Ties)의 간격을  $d/4$ (3 inches) 또는  $d/2$ (6 inches)로 한데에 있으며, ACI

Building Code 7. 10. 5절의 규정을 만족하였다.

한편 모든 실험은 INSTRON Closed Loop Servo Controlled Testing Machine(Model 1324)으로 실행하여졌다. 하중은 그림1에서 보는 바와 같이 시험체의 전 스패를 통하여 Actuator에 부착된 2개의 롤러로써 대칭으로 가하였다. 하중 또는 처짐(deflection)을 매번 증가시킬 때마다 각종 측정치를 얻는 데는 약 5~10분이 필요하였으며 하나의 시험체를 끝낼때까지 대략 4시간에서 6시간이 필요하였다.

또한 보를 실험한 당일에, 콘크리트 강도와 할열인장강도를 결정하기 위해서 그에 상응하는 보조실험을 하였다.

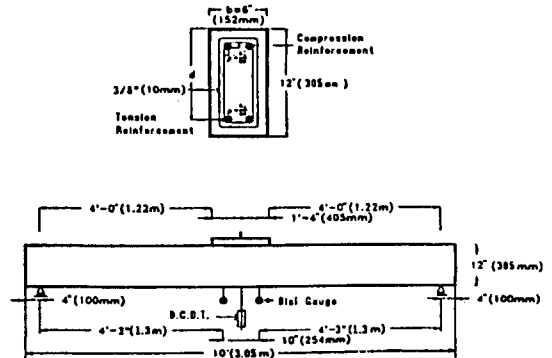


그림 1. 보 시험체 설치

## 3. 이론 전개

### 3. 1 극한 휨강도에 대한 일반 방정식

인장축과 압축축이 철근으로 보강되어, 힘을 받는 콘크리트 단면의 극한 하중에서의 조건이 그림 2에 나타나 있는 바, 이것은 압축축 최연단 콘크리트변형이 극한변형( $\epsilon_u$ )값에 도달한 것으로 되고 있다. 압축부분을 장방형으로 가정할 때 그림 3에서 처럼 일반적인 형태로 압축콘크리트의 응력분포를 이상화할 수 있으며 3개의 매개 변수  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ 에 의하여 특징지어진다. 그림2에서 가정된 응력블록을 사용

할 경우 단면에 대한 힘과 모멘트 평형 방정식은 아래와 같이 쓸수 있다.

$$K_1 \cdot K_3 \cdot f'_c \cdot b \cdot c + A'sf's = Asfs \quad (1)$$

혹은,

$$c = \frac{Asfs - A'sf's}{K_1 K_3 f'_c b} \quad (2)$$

그리고

$$Mn = K_1 K_3 f'_c b c (d - K_2 c) + A'sf's (d - d') \quad (3)$$

방정식(2)의 c값을 방정식(3)에 대입하면, Mn은 아래와 같이 표현된다.

$$Mn = bd^2 \left[ \rho fs - \rho' f's \right] \left[ 1 - \frac{k_2}{k_1 k_3} \cdot \frac{\rho fs - \rho' f's}{f_c} \right] + f's \rho' bd^2 \left( 1 - \frac{d'}{d} \right) \quad (4)$$

휨 시험체에 사용된 콘크리트의 응력-변형 곡선으로부터  $K_1, K_3$  그리고  $K_2$ 에 의해  $K_2/(K_1 \cdot K_3)$ 의 값을 결정할 수 있으며,  $K_2/(K_1 K_3)$ 의 값은 보 시험 결과치로부터 바로 얻을 수 있다. 고강도 콘크리트에 대한  $K_2/(K_1 K_3)$ 의 값은, OKada<sup>(2)</sup>에 따르면 0.52에서 부터 0.58까지, Carrasguillo<sup>(3)</sup>에 따르면 0.48부터 0.69까지 변화를 하는 것으로 되어 있다. 콘크리트 강도가 증가할 때,  $K_2/(K_1 K_3)$ 의 값도 또한 증가하므로 방정식(4)를 참조하여 보면, 콘크리트가 부담할 수 있는 휨강도는 감소한다.

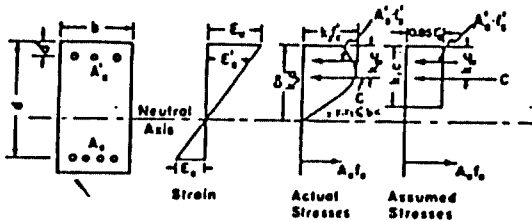


그림 2 Conditions at ultimate load, beam reinforced in tension and compression.

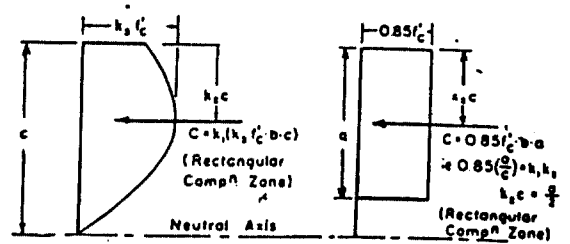


그림 3 (a) Actual concrete stress distribution  
(b) Equivalent rectangular stress distribution

### 3. 2 ACI방정식(장방형 응력블록을 이용)

휨강도 계산과 관련된 ACI Building Code (318-89)의 제 가정은 아래와 같다.

- ① 철근과 콘크리트의 변형은 중립축에서의 거리에 비례한다.
- ② 극한상태에서 콘크리트의 변형은 0.003이다.
- ③  $\epsilon_s < \epsilon_y$  일 때는  $f_s = E_s \epsilon_s$ , 반면에  $\epsilon_s \geq \epsilon_y$  일 때에는  $f_s = f_y$ .
- ④ 철근콘크리트의 휨강도 계산에서 콘크리트의 인장강도는 무시한다.
- ⑤ 실질적으로 실험결과와 일치하는 강도를 예상할 수 있는 어떠한 모양의 콘크리트 응력 분포를 가정할 수 있다.
- ⑥ 평형 장방형 콘크리트 응력분포는 위 5번째 항목의 요구조건을 만족한다.

ACI Building Code의 장방형 응력블록은 그림3에 잘 설명되어 있다. 강도를 계산하기 위하여 압축측 연단에서 부터 깊이 a까지 일정하게 분포된 응력을  $0.85f'_c$ 가 4000psi에 이를 때까지 0.85로 하고, 그로부터 강도가 4000psi를 초과하면 매 1000psi마다 0.05씩 감소하며, 8000psi보다 더 큰 강도에 대하여서는 0.65로 일정하게 한다.

장방형 콘크리트 압축 영역에서 콘크리트의 평균 압축 응력  $K_1 K_3 f'_c$ 는  $0.85(a/c)f'_c$ 와 같으며,  $K_1 K_3 = 0.85(a/c)$ ,  $K_2 = 1/2(a/c)$ 이다.  $K_3 f'_c$ 는  $0.85f'_c$ 와 같기 때문에  $a/c (= \beta) = K_1$ 이고  $a(\beta/c) = K_1 c$ 이다.

ACI Building Code 규정에 의하면

$$\rho < \rho_{max} = 0.75 \rho_b + \rho' \frac{f'_c}{f_y} \quad (5)$$

내력의 평형 조건(그림 2, 3)으로부터, 방정식(1)은 다음과 같이 된다.

$$0.85f'_c b K_1 c + A' s f'_s = A s f_s \quad (6)$$

그리고 내부 및 외부 모멘트의 평형 조건으로부터,

$$\rho > 0.85 K_1 \frac{f'_c}{f_y} \cdot \frac{d'}{d} \cdot \frac{87000}{87000 - f_y} + \rho' \text{일때} \quad (6)$$

$$M_n = 0.85f'_c b K_1 c (d - K_2 c) + A' s f'_s (d - d') \quad (7)$$

이때 극한하중 상태이며  $f'_s = f_y$ 이며

$$K_u = \frac{c}{d} = \frac{f_y(\rho - \rho')}{0.85 K_1 f'_c}$$

### 3. 3 Cornell 가정에 입각한 Paul Zia 방정식

Zia<sup>(4)</sup>는 압축 콘크리트에 대하여 그림 4(b)에서 보여진 것처럼 이상화된 사다리꼴 응력-변형 곡선을 입증하려고 하였다. 이 곡선은 본래 Jensen과 Cornell researchers가 제안한 소성비(plasticity ratio)  $\beta$ 의 개념(그림 4(a))을 포함하고 있다. 이러한 응력-변형 관계에 대한 Equivalent Rectangular Stress Block은 다음과 같은 관계에 의하여 주어지는 매개변수  $K_1$ 과  $K_3$ 에 의하여 정의될 수 있다.

$$\beta = 1 - \frac{f'_c}{E_c \epsilon_c} \quad (8)$$

$$K = \frac{3(1+\beta)^2}{4(1+\beta+\beta^2)} \quad (9)$$

$$K_1 = \frac{1+\beta}{2K_3} \cdot \frac{2(1+\beta+\beta^2)}{3(1+\beta)} \quad (10)$$

여기에서

$$\epsilon_u = 0.003$$

$$E_c = 40,000 \sqrt{f'_c} + 1,000,000 \text{ psi} \quad (11)$$

(3,000psi <  $f'_c$  < 12,000psi)

이때 극한 모멘트에 대한 방정식(3)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M_n = K_1 K_3 f'_c b c \left( d - \frac{K_1 c}{2} \right) + A' s f'_s (d - d') \quad (12)$$

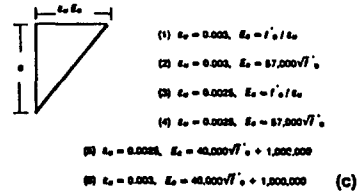
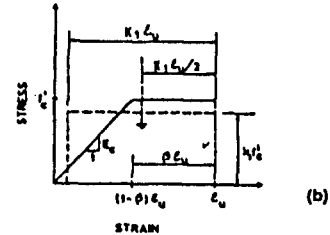
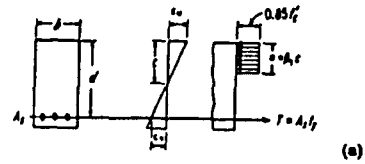


그림 4 이상화된 응력-변형도 곡선

### 3. 4 현재의 조사내용

고강도콘크리트 단면의 휨강도를 예측하기 위하여 제안된 이론은 다양하다.

여기서는 이미 발표되어 있는 2가지 접근방법(ACI, Cornell)에 추가하여 또다른 6가지의 가능한 접근 방법이 시도되었다.

휨강도 계산 과정에서 가장 중요한 부분중의 하나는 압축 콘크리트응력블록을 가정하는 일인바,  $f'_c = \epsilon_c E_c$ 에서 압축축 최연단 응력이고 중립축에서 응력이 0인, Leslie와 Rajagopalan<sup>(5)</sup>에 의하여 제안된 것과 비슷한 삼각형의 stress block (그림 4(C))을 채택키로 한다.

그리고 강도를 예측하는 과정에서 2번째 중요한 점은 콘크리트의 극한압축변형  $\epsilon_u$ 의 값을 결정하는 일이다. 본 실험에서 이  $\epsilon_u$ 는 0.0021부터 0.0059까지의 범위에 있었으며, 이러한 측정값을 콘크리트 강도에 대하여 도면화한 것이 그림 5에 나타나 있다. 따라서  $\epsilon_u$ 의 검토를 위하여 더 낮은 한계값인 0.0025와, 일반적

으로 사용되고 있는 0.003이 본 연구에서 고려되었다.

압축축 최연단 응력이  $\epsilon_u E_c$ 와 같다고 하였을 때,  $E_c$ 의 값을 결정할 필요가 있다. 그림 6에서와 같이, 직접 시험에서 측정된  $E_c$ 의 값은 4, 250, 12,200psi에 대하여 각각  $3.4 \times 10^4$ psi  $5.6 \times 10^4$ psi이었으며, 이 밖에  $E_c$ 의 값을 결정하기 위하여 3가지 다른 방법도 시도되었다. 즉  $E_c = f'_c / \epsilon_u$ , 콘크리트의 단위중량이 145pcf일때 ACI Building Code에 의해서 주어진  $E_c = 57,000 \sqrt{f'_c}$ , 그리고 방정식(11)에 의하여 주어진  $E_c$ 의 값 등이다.

가정된 삼각형의 응력-변형은  $\epsilon_u$ 에 이를 때까지  $E_c$ 의 기울기를 가진 선형 응력-변형 관계를 적용한다는 것에 주의를 기울여야 한다. 이는 고강도 콘크리트의 응력-변형 곡선의 모양을 관찰하여 볼 때, 상승부분은 거의 선형

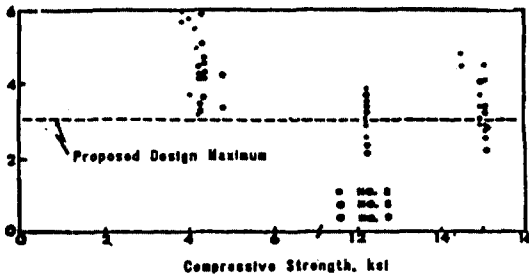


그림 5. 극한변형도-압축강도의 관계

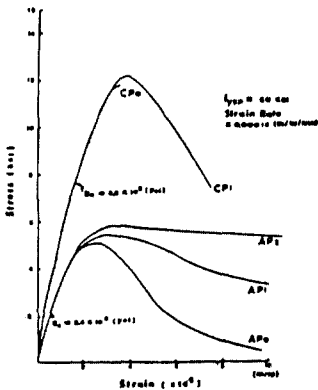


그림 6. 일방향 아래서의 응력-변형도 곡선

이며 하강부분은 거의 존재하지 않으므로 이 가정은 비현실적이 아니다. 또한  $E_c = f'_c \epsilon_u$ 라는 가정은 변형이 정확하게  $\epsilon_u$ 와 같을 때에 최대 콘크리트응력이  $f'_c$ 와 같게 된다는 개념을 적용하고 있다는 점에 유의해야 한다.

따라서 본 연구에서 강도계산에 이용된 6가지 접근 방법은 아래와 같이 요약할 수 있다.

Method 1:

$$\epsilon_u = 0.003, \epsilon_c = f'_c \epsilon_u$$

Method 2:

$\epsilon_u = 0.003$ , 콘크리트의 단위중량을 145pcf로 가정할 때, ACI 318-89의 8. 5. 1 장에서 주어진  $E_c = 57,000 \sqrt{f'_c}$ (이 연구에서 사용된 실제의 콘크리트 단위중량은 146과 152.2pcf사이의 값임.)

Method 3:

$\epsilon_u = 0.0025$ ,  $E_c = f'_c \epsilon_u$ ,  $\epsilon_u = 0.0025$ 라는 더 낮은 한계값은 다른 연구자에 의해서도 제안되어 왔다.

Method 4:

$$\epsilon_u = 0.0025, E_c = 57,000 \sqrt{f'_c}$$

Method 5:

$\epsilon_u = 0.0025$ ,  $E_c =$  방정식(11)에 의한, 그리고 Cornell researchers<sup>(4)</sup>에 의하여 제안된 값.

Method 6:

$$\epsilon_u = 0.003, E_c = \text{방정식(11)에 의한 값.}$$

#### 4. 결과 해석

각종 시험체 보에 대한 휨강도는 ACI 그리고 Cornell 접근방법(각각 3. 2절, 3.3절)에 의하여 계산되었을 뿐만 아니라, 위의 Method 1에서 부터 Method 6까지의 방법에 의해서도 계산되었으며, 컴퓨터 프로그램이 계산을 손쉽게 하기 위하여 쓰여졌다. 그 결과 그림7에는 실험결과와 ACI 그리고 Cornell 접근방법이 비교되어 있다. 그리고 그림8에는 Method 1에서 Method 7까지의 비교결과가 각각 나타나 있다. 이들 비율을 비교하여 볼 때 Method 2에

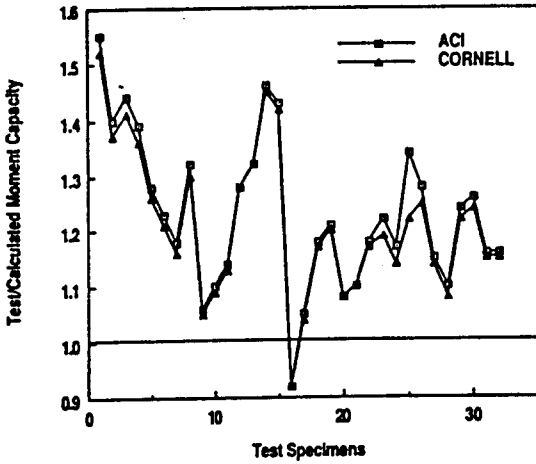


그림 7. 휨강도 실험결과와 ACI, 그리고 Cornell 제안식과의 비교

서 삼각형 응력블록으로, 최연단 응력은  $\epsilon_u E_c$ ,  $\epsilon_u = 0.003$ ,  $E_c = 57,000\sqrt{f'_c}$ 에 의하여 추정된 휨강도가 실험결과와 가장 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그 외에도, ACI, Cornell 그리고 다른 방법들은 추정된 휨강도에 대하여 받아들일 만한 하한치를 제시하고 있다. 또한 휨강도 계산을 위한 현재의 ACI규정에 변화를 일으킬만한 이유가 심각하게 나타나지 않았다. 따라서 만일 15,000psi(1050kg/cm<sup>2</sup>)까지의 콘크리트 강도에 대하여 ACI 장방형 stress block이 유효하다고 사료된다.

## 5. 결론

1) 콘크리트의 압축축 최연단 변형은 그림5에 의하면  $\epsilon_u = 0.003$ 이 비합리적인 한계값이 아닌 것으로 보인다. 그러나 높은 콘크리트 강도에서 몇몇 값들이 0.003아래로 떨어졌는 바,

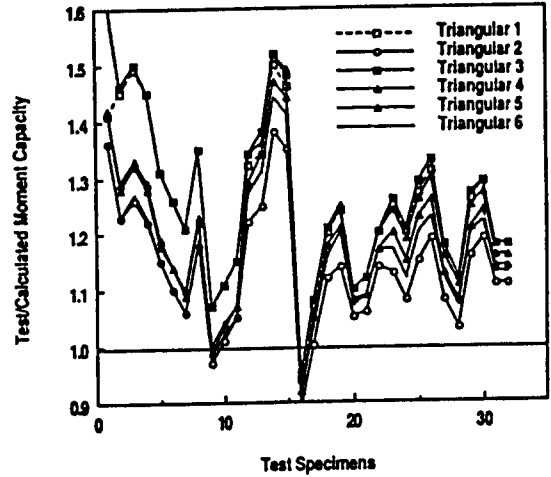


그림 8. 휨강도 실험결과와 Method 10에서 Method 6까지의 비교

$\epsilon_u = 0.0025$ 가 좀 더 신중한 값이 될 수 있다.

2) ACI Building Code(318-89)가 추천한 장방형의 응력 블록, Cornell researchers<sup>(4)</sup>가 제안한 사다리꼴 응력블록, 그리고 중립축 응력이 0이고 압축축 최연단 응력이  $E_c \epsilon_u$ 와 같은 삼각형의 응력블록에 대한 비교 검토결과, ACI Code의 장방형 응력블록을 280kg/cm<sup>2</sup>(4ksi)에서 부터 1050kg/cm<sup>2</sup>(15ksi)까지의 강도 범위에 대하여 허용할 만한 결과를 나타내어, 휨강도를 예측하는 데 있어 현재의 ACI과정에서의 어떠한 변화의 필요성도 나타나지 않았다.

3) 실험결과와 가장 근접되는 제안식은 Method 2에서 삼각형 응력블록을 사용할 경우인데 최연단 극한변형( $\epsilon_u$ )이 0.003, 최연단 응력  $\epsilon_u E_c$ ( $E_c = 57,000\sqrt{f'_c}$ )일 때 임을 알 수 있다.

## (부 호)

d = 압축연단으로 부터 인장철근의 重心까지의 거리.

$\rho_b$  = 평형철근비

$\epsilon_u$  = 극한변형도

$K_1$  = 최대응력에 대한 평균응력비

$K_2$  = 중립축까지의 거리에 대한 압축력의

- 합까지 거리의 비
- $K_s = 15 \times 30\text{cm}$  공시체강도에 대한 최대응력 비
- $b =$  장방형 보의 폭
- $c =$  압축연단으로 부터 중립축까지의 비
- $A'_s =$  압축철근의 단면적
- $f'_c =$  철근의 허용압축응력도
- $A_s =$  인장철근의 단면적
- $f_s =$  철근의 허용인장응력도
- $M_s =$  부재의 공칭모멘트
- $d' =$  부재의 압축연단으로 부터 압축철근 重心까지의 거리
- $\rho =$  인장철근비  $= A_s/bd$
- $\rho' =$  압축철근비  $= A'_s/bd$
- $\epsilon_s =$  철근의 변형도
- $\epsilon_y =$  철근의 항복 변형도
- $\epsilon_c =$  철근의 탄성계수

<단위 환산>

$$1\text{kg/cm}^2 = 14.2\text{ psi} = 0.098\text{Mpa}(\text{N/mm}^2)$$

$$1\sqrt{f'_c}\text{psi} = 0.265\sqrt{f'_c} = 0.083\sqrt{f'_c}\text{Mpa}$$

<참고 문헌>

1) Koenen, M., "Für die Berechnung der

Starke der Monievschen Cement Plateen," Zentralblatt der Bauverwaltung(Berlin), V. 6., No. 47. Nov. 1996, P462

2) Kiyoshi, Okada and M. Azam Azimi, Strength and Ductility of Reinforced High Strength Concrete Beams, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto Univ. Vol. KLIII, Part 2, April, 1981, Koyoto, Japan.

3) Carrasquillo, R. L., Nielson, A.H., and Slate, F. O., "Microcracking and Behavior of High Strength Concrete." ACI Jr., May - June, 1981.

4) Zia Paul, Review of ACI Code for Design with High Strength Concrete, Concrete International, Aug. 1983, pp16~20.

5) Leslie, K. E., Retajapalam, K, S., and Everard, N. J., "Flexural Behavior of HSC Bearns." ACI Journal Processing, Vol. 1978, pp1761-1773.

6) S. E. Swartz, A. Nikaeen, H. D. Narayan Babu, N. Periyakarruppan and T. M. E. Refai, "Structural Bending Properties of Higher Strength Concrete, ACI SP. 87-9, High Strength Concrete, 1985.