

# 고강도 콘크리트 기둥단면의 축력-모멘트 강도에 관한 연구

## A Study on Axial Force - Moment Capacity of High-Strength Concrete Tied Column Sections

박 해 규\*      박 동 규\*      박 영 식\*\*      손 영 현\*\*\*      이 재 훈\*\*\*\*  
 H. G. PARK    D. G. PARK    Y. S. PARK    Y. H. SON      J. H. LEE

### ABSTRACT

Reinforced concrete column is an effective structural element to take advantage of high strength concrete. This paper presents an experimental and analytical strength of high strength concrete rectangular tied column sections under eccentric loading. The test variables are concrete strength, steel ratios, slenderness and eccentricity. The analytical results of the ACI's rectangular stress block, Zia's modified rectangular stress block, and a trapezoid block are compared with experimentally obtained data. It may be concluded that the trapezoid stress block provided the most reasonable column section capacities for high strength concrete columns.

## 1. 서론

### 1.1 연구배경

지금까지 철근 콘크리트 기둥에 대한 실험연구는 상당히 많이 수행되었으나 대부분 보통강도 콘크리트 기둥에 한정되었다. 근래에 들어 고강도 콘크리트 기둥에 대한 실험이 수행되고 있으나 주로 1축압축에 대한 기둥의 강도와 횡구속효과를 대상으로 하고 있으며, 최근에 편심하중에 의하여 휨모멘트와 축력이 작용하는 기둥, 반복 축하중 및 반복 횡하중의 영향 등에 대한 실험적 연구가 시도되고 있는 상태이다. 한편, 기둥부재에 대한 고강도 콘크리트의 장점을 살펴보기 위하여 콘크리트의 압축강도만을 변수로 하여 보통강도 콘크리트(280

kg/cm<sup>2</sup>) 기둥과 고강도 콘크리트(700 kg/cm<sup>2</sup>) 기둥의 축력-휨강도를 시방서의 해석개념에 따라 해석한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 축력이 모멘트에 비하여 상대적으로 낮은 경우에는 고강도의 효과가 크지 않지만, 축력이 모멘트에 비하여 상대적으로 높은 경우에는 효과가 크다고 할 수 있다. 따라서 고강도 콘크리트는 보에 적용하는 것보다 기둥에 적용하는 것이 역학적으로 더 유리하여 초기의 고강도 콘크리트는 고층 건물의 기둥에 주로 적용되었다. 한편, 기둥강도 해석에 사용되는 콘크리트의 압축응력 - 변형도 곡선의 형태 및 등가응력 분포는 Garcia - Nilson<sup>(1)</sup>의 실험 결과에서 보여주는 것처럼 강도 계산시 매우 중요한 변수로 작용을 한다. Garcia와 Nilson은 콘크리트 강도가 830kg/cm<sup>2</sup> 이며 편심하중을 가진 사각형 단면 기둥의 파괴를 예측하기 위해 콘크리트 압축응력분포를 실제 응력-변형도 곡선에 기본을 둔 연속함수와 직사각형 응력분포, 사다리꼴 응력분포를 채택하여 기둥단면에 대한

\* 영남대학교 토목공학과 석사과정  
 \*\* 안동공업전문대학 전임강사  
 \*\*\* 현대건설 기술연구소 연구원  
 \*\*\*\* 영남대학교 토목공학과 조교수

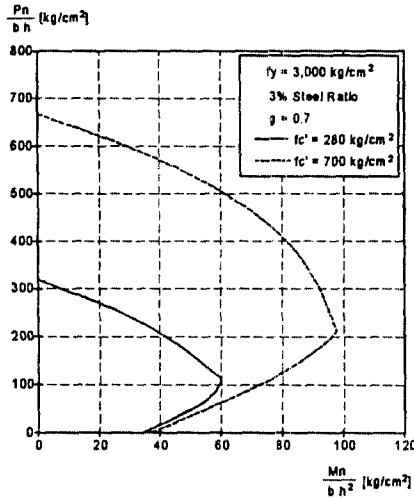


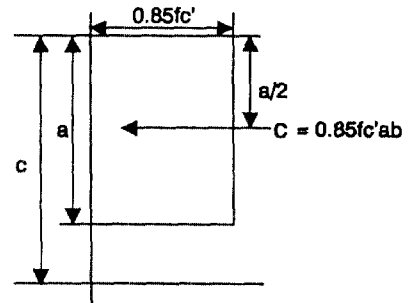
Fig.1 P-M curves for High-Strength and Normal-Strength Concrete Column

강도 해석 결과를 비교하였다. 이들의 연구 결과에 의하면 연속함수에서 계산된 강도를 가장 정확한 값이라고 가정했을 때 사다리꼴 압축응력분포는 편심하중의 작용으로 철근이 항복하기 전에 콘크리트의 압축연단이 파괴되는 기둥에 대하여 비안전측(연속함수에 의한 강도보다 크게 계산될 경우)으로 3%오차를 보였지만, 직사각형 응력분포는 비안전측으로 12%의 오차가 발생한다고 결론지었다. 또한 CEB-FIP Report<sup>(2)</sup>는 저보강보에서는 휨강도가 주로 인장철근량에 좌우되므로 압축응력분포가 큰영향을 미치지 않으나, 파보강보나 기둥에서는 압축응력분포가 휨강도에 대한 주요 변수라고 언급하여 콘크리트 압축응력분포의 중요성을 지적하였다. 따라서, 현 콘크리트 표준 시방서와 ACI에서 채택하고 있는 직사각형 응력분포의 고강도 콘크리트 기둥부재에 대한 적용성을 확인하고, 어떤 응력분포를 사용하는 것이 실제 기둥단면의 강도실험치와 가까운지 검증해야 할 필요성이 요구된다.

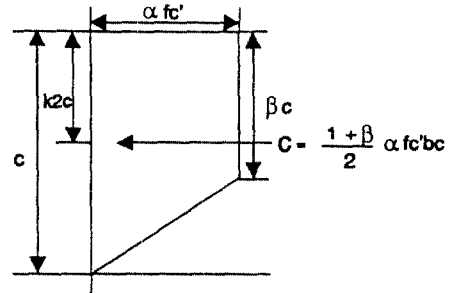
## 12 연구 목적

본 연구는 보통강도와 고강도 콘크리트 기둥

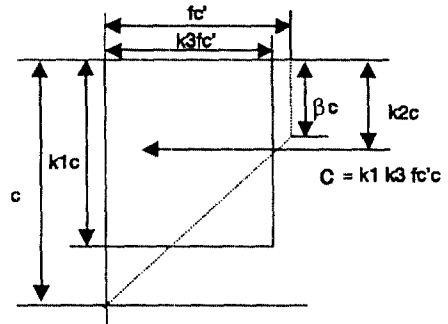
의 거동차이를 규명하기 위한 연구의 일환으로서 보통 강도 콘크리트 실험결과에 근거한 ACI 318 Code의 직사각형 응력블럭(Fig. 2-a)과 ACI 363(고강도 콘크리트)의 사다리꼴 응력블럭<sup>(3)</sup>(Fig. 2-b), Cornell 가정에 의한 Paul Zia<sup>(4)</sup>의 수정된 직사각형 응력블럭(Fig. 2-c)에 대하여 그 안전성 여부를 확인하고, 고강도 콘크리트 기둥해석에 사용해야 할 응력블럭의 도출을 연구목적으로 한다.



(a) ACI Rectangular Block



(b) Trapezoid Block



(c) Zia's Block

Fig. 2 Concrete Compressive Stress Block

## 2. 실험시편 제작 및 재하실험<sup>(5)</sup>

### 2.1 실험변수

실험의 주요 변수로는 Table 1에 나타난 바와 같이 콘크리트 압축강도, 세장비, 철근량, 편심 등이며, 정사각형과 직사각형 단면을 가진 총 24개의 시편을 제작하였다.

Table 1 Specimens property / Test variable

시편 번호	압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	단 면 (mm)	철근량 (cm <sup>2</sup> )	철근비 ( $\rho_g$ )	길이 (mm)	세장비 (L/r)	편심 mm			
LS-1	426	210 × 120	2.85	0.0113	660	19.1	20			
LS-2							45			
LS-3							65			
LM-1					2100	60.8	2100	60.8	20	20
LM-2										45
LM-3										65
LL-1	356	2100	60.8	2100	60.8	20	20			
LL-2							45			
LL-3							65			
HS-1	718	120 × 120	4-D10	0.0198	660	19.1	25			
HS-2							45			
HS-3							65			
HM-1					1380	39.9	1380	39.9	20	20
HM-2										45
HM-3										65
HL-1			2100	60.8	2100	60.8	20	20		
HL-2								45		
HL-3								65		
HS-1A			4-D16	7.94	0.0551	1380	39.9	20	25	
HS-3A									65	
HM-1A									2100	60.8
HM-3A	65									
HL-1A	25									
HL-3A	65									

### 2.2 재료

기둥 시편 제작에 사용한 골재는 조립율이 2.95, 비중 2.56 인 잔골재를 사용하였고, 최대치수가 13mm, 비중이 2.68인 굵은 골재를 사용하였다. 시멘트는 보통포틀랜드시멘트(KS L 5201)를 사용했으며, 혼화재료는 액상 실리카흄, 감수제(Superplasticizer)로는 Might 150 을 사용하였다. 철근은 KS D 3504 에 규정된

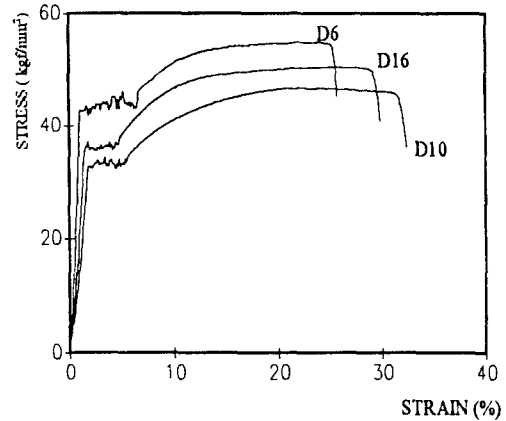


Fig. 3 stress-strain curve of steel

이형철근을 사용하였고, 주철근용으로 D16 D10, 띠철근으로 D6를 사용하였다. 재료실험으로 얻은 철근의 응력-변형도 곡선은 Fig. 3에 나타난 바와 같다.

### 2.3 시험체의 제작

시편은 거푸집 및 철근 cage제작, gage부착, 재료배합/타설 /비빔/ 양생순으로 제작하였다.

Table 2 Concrete mix proportion (1m<sup>3</sup>)

설계강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	시멘트 (kg)	물 (kg)	잔골재 (kg)	굵은골재 (kg)	감수제 (%)	실리카흄 (%)
400	400	160	773.4	1084.6	0	0
700	520	172	634.6	1128.4	2.0	10

비빔순서는 [모래 + 시멘트 + 실리카 흄] → 회전 30초 → [(물+감수제)2/3] → 회전 1분30초 → [(물+감수제)1/3 + 굵은골재] 순으로 하였으며, 18℃ 에서 습윤양생을 하였다.

### 2.4 재하 및 측정

양단 힌지인 재하 장치를 사용하였으며, 각 시편의 예상 파괴 하중을 10단계로 나누어, 각 단계별로 시편의 변화를 관측한 후 다시 재하 하였다. 변형률 측정을 위해 철근과 콘크리트에 Strain Gage를 부착 하였으며, 횡방향 처짐을 측정하기 위해 최대모멘트가 발생될 예상 부분에 L.V.D.T를 설치하였다.

### 3.기둥단면의 축력-모멘트 강도

실험을 통해 얻은 각 시편의 최대하중과 최대하중 재하시의 최대처짐량은 Table 3과 같으며  $P_{test}$ 는 파괴시 하중을,  $M_{test}$ 는 처짐을 고려한 파괴시 총모멘트를 나타낸다. Fig. 4~Fig. 6은 각 실험 시편의 파괴점을 P-M 곡선상에 표시한 것으로 순수 축력강도  $P_0$ 와 순수 휨강도  $M_0$ 에 대한 상대적인 값을 나타내고 있다. Fig. 4는 압축강도가 각각  $356\text{kg/cm}^2$ ,  $426\text{kg/cm}^2$ 이고, 철근비가 1.09~1.13%인 실험 부재의 파괴점을 나타낸 것으로, 직사각형 응력블럭을 사용한 시방서의 공칭강도 해석결과가 편심이 작은 압축지배영역의 부재의 경우 편심이 큰 인장지배영역의 부재보다 다소 과소 평가된 양상을 보이고 있다. Fig. 5는 압축강도가  $718\text{kg/cm}^2$ 인 고강도콘크리트에 철근비가 1.91~1.98%인 단면의 파괴점을 나타내고 있는데, 편심이 작은 부재의 경우 P-M곡선의 안쪽에서 파괴되어 시방서의 직사각형 응력블럭이 기둥의 축력-모멘트 강도를 과대평가하는 양상을 보이고 있다. Fig. 6은 Fig. 5와 같은 조건에서 철근비를 5.34~5.51%로 한 경우 부재의 파괴점을 나타내고 있는데, 철근비가 작은 Fig. 5 보다는 다소 안전측인 양상을 보이고 있다. Fig.7~Fig. 10는 ACI의 직사각형 응력블럭, 사다리꼴 응력블럭, ZIA의 수정된 직사각형 응력블럭을 사용한 해석치와 실제부재의 실험치를 비교한 것이다. 인장지배 영역에서는 축하중이 작을수록 고강도와 저강도 콘크리트 모두가 어떤 응력블럭을 사용하든지 비슷한 경향을 보인다. 그러나 압축지배 영역의 경우 거의 모든 부재에서 ZIA의 응력블럭을 이용한 해석은 기둥단면의 강도를 과대평가하는 경향을 보이고 있으며, 순수 축력강도에 있어서도 시방서에 의한 강도보다 크게 계산됨을 보여주고 있다. 보통강도 콘크리트 기둥의 경우 ACI의 직사각형 응

Table3 Maximum load capacity and deflection at maximum load

시편 번호	압축강도 ( $\text{kg/cm}^2$ )	철근비 $\rho_s$	$e_s$ mm	$\Delta at P_{max}$ (mm)	$e_s + \Delta$ (mm)	$P_{test}$ (ton)	$M_{test}$ (t-m)
LS-1	426	0.0109	20	1.2	21.2	75.1	1.59
LS-2		0.0111	45	2.3	47.3	37.85	1.79
LS-3		0.0112	65	4.2	69.2	17.6	1.22
LM-1		0.0113	20	7	27	66.55	1.80
LM-2		0.0111	45	12.5	57.5	36.75	2.11
LM-3		0.0110	65	11	76	14.93	1.13
LL-1	356	0.0112	20	17.5	37.5	42.1	1.58
LL-2		0.0110	45	21.7	66.7	17.55	1.17
LL-3		0.0113	65	16	81	11.0	0.89
HS-1	718	0.0195	25	0.9	25.9	53.9	1.39
HS-2		0.0196	45	2.77	47.77	33.95	1.62
HS-3		0.0198	65	3.52	68.52	19.1	1.31
HM-1	718	0.0193	20	8.08	28.08	51.8	1.45
HM-2		0.0193	45	10.8	55.8	31.35	1.75
HM-3		0.0193	65	10.08	75.08	15.9	1.20
HL-1	718	0.0191	20	19.73	39.73	53.3	2.12
HL-2		0.0195	45	18.39	63.39	20.95	1.33
HL-3		0.0198	65	14.91	79.91	12.0	0.96
HS-1A	718	0.0551	25	1.32	26.32	68.2	1.79
HS-3A		0.0533	65	2.85	67.85	34.7	2.35
HM-1A		0.0547	20	6.49	26.49	64.3	1.70
HM-3A	0.0534	65	10.44	75.44	27.85	2.10	
HL-1A	0.0551	25	18.51	43.51	49.8	2.16	
HL-3A	0.0547	65	23.18	88.18	22.0	1.94	

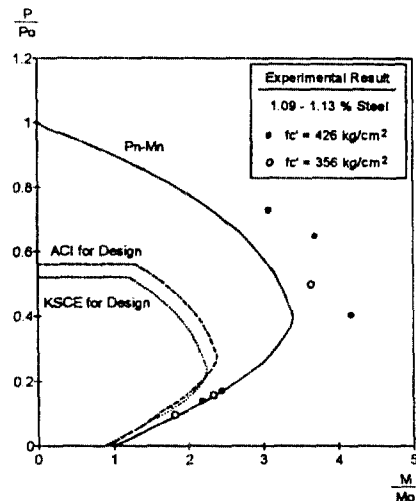


Fig. 4 Axial Force - Moment Capacities of Normal Strength Concrete Column Sections

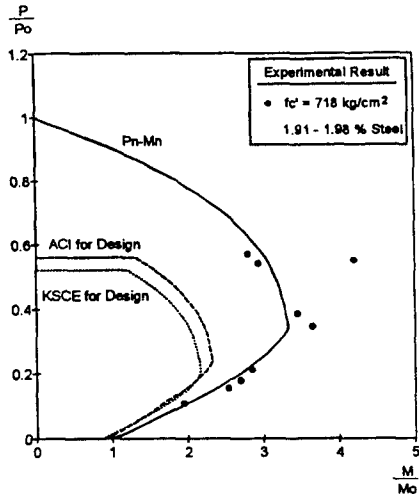


Fig. 5 Axial Force-Moment Capacities of Lightly Reinforced High Strength Concrete Column Sections

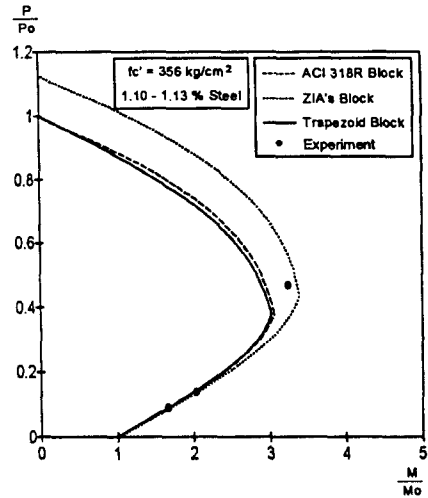


Fig. 7 P-M Curves by Stress Blocks for Low - Strength Concrete Column Sections

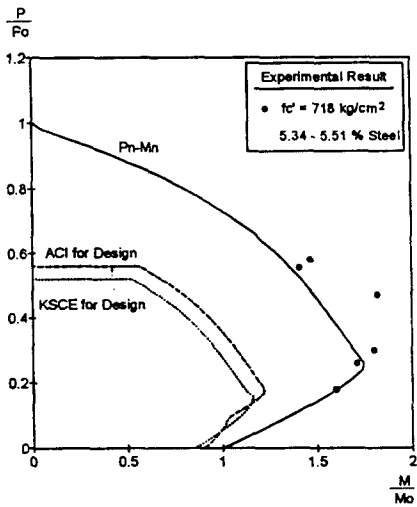


Fig. 6 Axial Force-Moment Capacities of Heavily Reinforced High Strength Concrete Column Sections

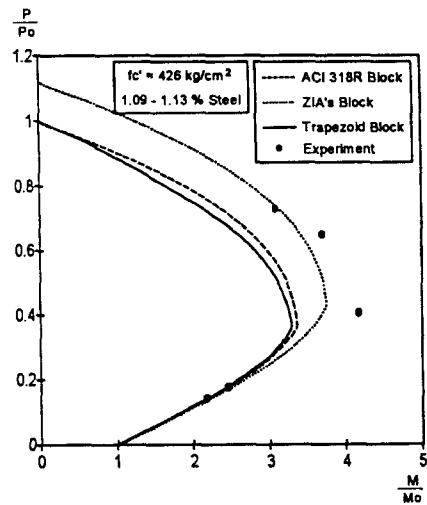


Fig. 8 P-M Curves by Stress Blocks for Medium- Strength Concrete Column Sections

력블럭과 사다리꼴 응력블럭 모두 실험결과에 비하여 안전치인 단면강도를 예측하게 되며 두응력 블록간의 해석 결과의 차이가 크지않음을 알 수 있다. 콘크리트 강도가 커질수록 ACI의 직사각형 응력블럭과 사다리꼴 응력블럭의 해석 결과 차이가 압축지배영역에서 뚜렷해진다. 고강도 콘크리트의 경우 철근비가

2%보다 작은 경우(Fig. 9)에는 압축지배영역에서 ACI의 직사각형 응력블럭의 해석결과가 실험결과에 비하여 과대평가된 경향을 보이지만, 철근비가 5% 이상인 경우(Fig. 10)에는 평형편심 부근에서 과대평가된 경향을 보인다. 사다리꼴 응력블럭을 사용한 경우에는 전체 시편에 대하여 안전치인 단면 강도를 예측하고 있다.

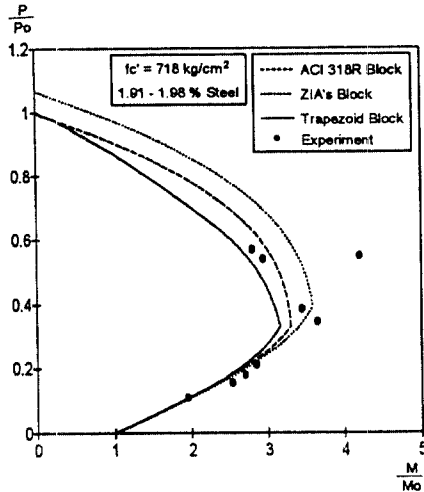


Fig. 9 P-M Curves by Stress Blocks for Lightly Reinforced High - Strength Concrete Column Sections

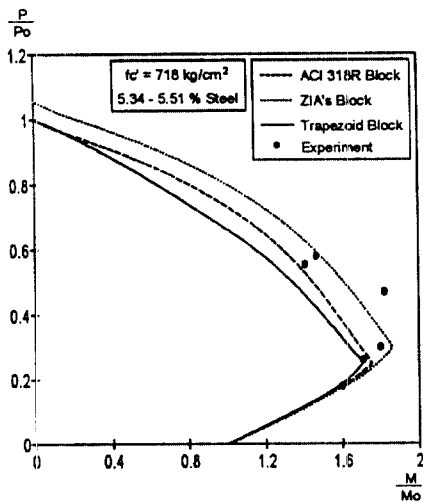


Fig. 10 P-M Curves by Stress Blocks for Heavily Reinforced High-Strength Concrete Column Sections

#### 4. 결 론

- (1) ACI 318의 직사각형 응력블럭을 사용한 경우 보통강도 콘크리트의 압축지배영역에 대하여 충분한 안전치로 기둥단면의 강도가 계산되었으며, 인장지배영역에 대하여는 비교적 정확한 결과를 예측하였다.
- (2) 사다리꼴 응력블럭을 사용한 단면의 축력

-모멘트 강도는 인장지배 영역에서 직사각형 응력블럭을 사용한 강도 해석 결과와 거의 같았으며, 압축지배 영역에서는 직사각형 응력블럭을 사용한 해석 결과보다 작은 강도가 계산된다.

- (3) 직사각형 응력블럭을 사용한 해석 결과와 사다리꼴 응력블럭을 사용한 해석 결과는 보통강도 콘크리트 기둥 단면에 대하여 큰 차이를 보이지 않으나, 고강도 콘크리트 기둥 단면에 대하여는 압축지배영역에서 특히 큰 차이를 보인다.
- (4) 축력이 상대적으로 크게 작용하는 고강도 콘크리트 압축부재의 경우 직사각형 응력블럭을 이용하면 비안전측으로 강도를 계산하게 될 수 있으므로 강도 해석시에는 사다리꼴 응력블럭을 사용하는 것이 합당할 것으로 판단된다.
- (5) Zia에 의해 수정된 직사각형 응력블럭을 사용하여 강도해석을 수행한 결과 콘크리트의 강도와 관계없이 압축지배 영역에서 과대 평가되는 경향을 보이고 있고, 순수 축력강도에 있어서도 시방서에 의한 강도보다 크게 계산되어 설계시 적용하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다.

#### 5. 참고문헌

- (1) Garcia and Nilson, A. H. "A Comparative Study of Eccentrically Loaded High-Strength Concrete Column" Cornell Univ, 1990
- (2) CEB-FIP "High-Strength Concrete State of Art Report" 8. 1990
- (3) ACI Committee 363, "State-of-the Art Report on High-Strength Concrete,"
- (4) Zia, P "Review of ACI Code for Design with High-Strength Concrete" Concrete International, August 1983
- (5) 高強度콘크리트의 實用化를 위한 材料/構造實驗 및 解析技法 研究, 현대건설, 1995