

# 직사각형 단면 콘크리트 기둥의 응력-변형 거동에 관한 실험연구

## An Experimental Study on Stress-Strain Behavior of Confined Concrete Columns with Rectangular Sections

오병환\* · 김기완\*\* · 최승원\*\*\* · 박영호\*\*

Oh, Byung Hwan · Kim, Ki Wan · Choi, Seung Won · Park, Young Ho

---

### ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze the stress-strain behavior of confined concrete columns with rectangular section. Uniaxial concentric loading tests of nineteen concrete columns with rectangular section (150×100, 250×100, 350×100 mm) were conducted. The main variables are transverse reinforcement volumetric ratio and spacing, cross tie arrangement, cross-section aspect ratio, and concrete strength. From the present experiments, it was found that the increase of transverse reinforcement ratio increases the maximum stress and ductility ratio and the reduction of the spacing of transverse reinforcement also increases the ductility and effective confinement. The increase of the aspect ratio of the cross-section does not influence much the stress-strain behavior of rectangular columns within the aspect ratio range of 3.5. The effect of concrete strength on ductility is also discussed.

---

### 1. 서론

콘크리트 기둥과 같은 구조부재는 횡방향 철근에 의해 구속되어 그 구속정도에 따라 하중저항 능력과 연성이 크게 향상된다. 이러한 횡방향 구속 효과는 일반적으로 콘크리트 압축강도, 횡방향 철근 간격, 횡방향 철근 체적비, 횡방향 철근의 배근형태 및 항복강도에 의해 영향을 받는다. 이러한 횡방향 구속에 의한 콘크리트 기둥의 거동예측은 내진설계 등에 매우 중요하다.

현재 국내 고속도로에는 교각이 수없이 많이 놓여있고 고교각의 대부분은 중공단면을 사용하고 있다. 대부분의 고교각이 중공단면이고 그 벽체가 정사각형이 아닌 직사각형 단면임에도 불구하고 많은 실험과 해석 모델은 정사각형 또는 원형 단면의 것으로 적용되고 있다. 또한 벽체형 직사각형 단면의 구속된 콘크리트 기둥에 대한 연구가 부족한 현실이다.

따라서 본 연구에서는 횡방향 철근에 의하여 구속된 직사각형 단면을 가진 교각요소부재 시험체를 제작하여 기본적인 구조거동실험을 수행함으로써 직사각형 단면을 가진 구속된 콘크리트 기둥의 응력-변형률거동을 분석하는 것이 목적이다. 이에 본 연구에서는 횡방향 철근 체적비, 간격,

---

\*정회원·서울대학교 토목공학과 교수(bhohcon@snu.ac.kr)

\*\*서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정

\*\*\*서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

크로스 타이 개수, 단면 형상비, 콘크리트 강도 등을 변수로 하여, 이들 변수들이 압축력을 받는 직사각형 콘크리트 기둥부재의 내력 및 연성에 미치는 영향을 검토·분석하여 향후 직사각형 기둥부재의 내진 기준 설정에 기초 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 시험체 제원 및 변수

### 2.1 시험체 제작

그림 1과 같이 단면 150×100mm, 250×100mm, 350×100 mm, 높이 500mm인 시험체 19개를 제작하였다. 각 시험체는 단면의 형상비를 1.5, 2.5, 3.5로 나타내었다. 시험체의 변수는 다음의 표 1과 같다.

표 1. 시험체의 상세 및 변수

Test Series ID	콘크리트 강도 [MPa]	단면 [mm]	형상비	높이 [mm]	횡방향 철근	
					간격 [mm]	체적비 [%]
L1.5-60-2.4	18	150×100	1.5	500	60	2.4
L1.5-40-3.6		150×100			40	3.6
L1.5-30-4.9		150×100			30	4.9
L2.5-60-2.2		250×100	2.5		60	2.2
L2.5-40-3.4		250×100			40	3.4
L2.5-30-4.5		250×100			30	4.5
M1.5-40-3.6	24	150×100	1.5		40	3.6
M1.5-50-3.4		150×100			50	3.4
M2.5-80-1.7		250×100	2.5		80	1.7
M2.5-40-3.1		250×100			40	3.4
M2.5-50-3.2		250×100			50	3.2
M3.5-40-3.3		350×100			3.5	40
M3.5-50-3.2	350×100	50	3.2			
H2.5-66-1.8	40	250×100	2.5		66	1.8
H2.5-50-2.4		250×100			50	2.4
H2.5-80-1.7		250×100			80	1.7
H2.5-60-2.2		250×100			60	2.2
H2.5-40-3.4		250×100			40	3.4
H2.5-50-3.2		250×100		50	3.2	

H 2.5 - 40 - 3.4

- 횡방향 철근 체적비 [%]
- 횡방향 철근 간격 [mm]
- 단면 형상비 (b/h: 1.5, 2.5, 3.5)
- 콘크리트강도 (L:18, M:24, H:40 MPa)

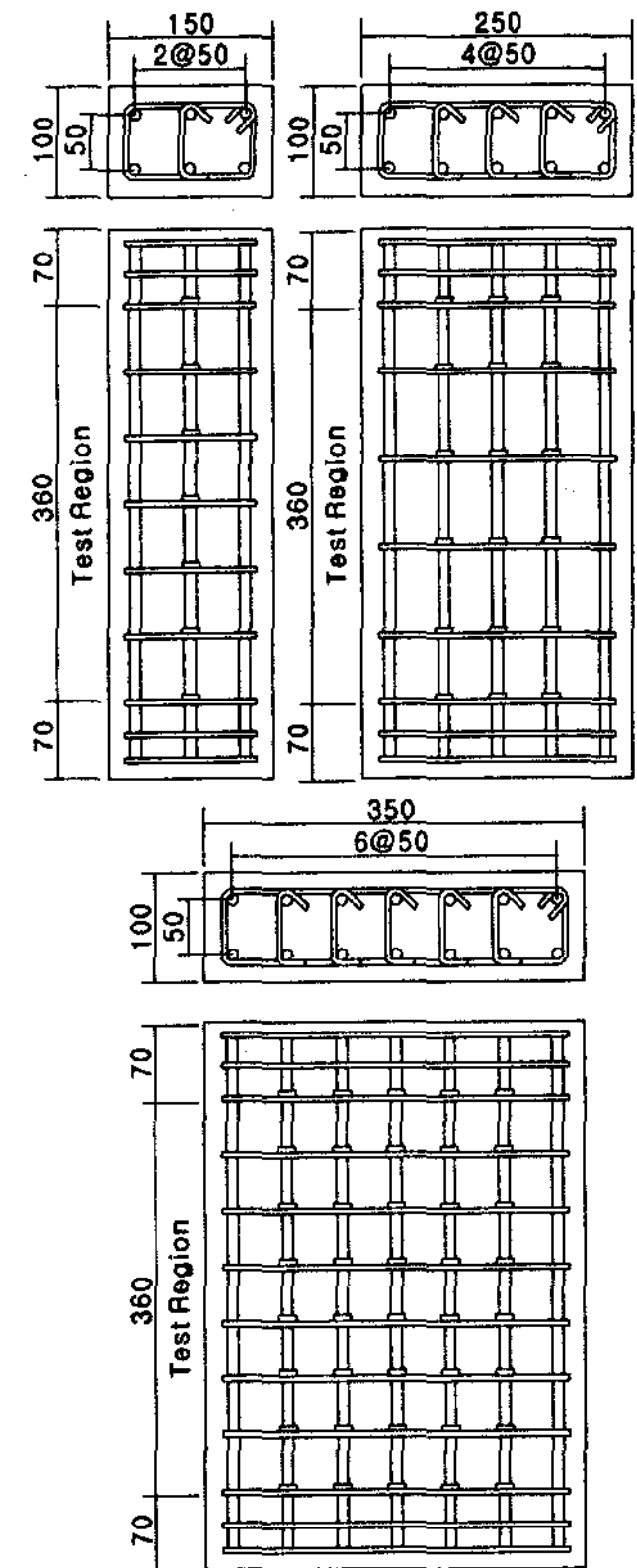


그림 1. 시험체 상세

각 시험체 높이의 중앙부 360mm를 실험구간으로 하였다. 시험체 양끝단 70mm부분은 실험시 먼저 파괴되는 것을 방지하고 실험구간에서 파괴를 유도하기 위하여 횡방향 철근을 실험구간보다 조밀하게 배근하였다. 콘크리트 피복두께는 횡방향 철근 중심으로부터 18mm로 전단면적에 대한 코어 면적의 비를 각각 0.51, 0.57, 0.59로 하였다. 모든 횡방향 철근은 135°의 구부림각도를 가지고 6d<sub>b</sub>의 연장길이를 코어에 정착시켰다. 주철근의 철근비 ρ<sub>l</sub>는 모든 시험체에 대해서 2.8%로 하였다.

## 2.2 재료특성

시험체의 콘크리트의 설계압축강도는 18MPa, 24MPa, 40MPa로 세 가지이며, 굵은 골재의 최대 치수는 피복두께 등을 고려하여 11mm로 하였다. 28일 양생후의 공시체( $\phi 100 \times 200$ mm)의 압축강도  $f'_c$ 는 11.8MPa, 22.3MPa, 32.2 MPa이 나왔다. 주철근은 D10의 SD300, 횡방향 철근은 D6 SD300을 사용하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 강도증가계수와 연성비

횡방향 철근에 의하여 구속된 콘크리트 기둥은 비구속 콘크리트에 비하여 내력 및 연성이 증가 하게 되는데 이때 내력의 증가 비를 강도증가계수( $K_s$ )라 하고 연성의 증가 비를 연성비( $\mu$ )라 한다. 본 연구에서는 요소부재의 연성평가를 위해 연성비를 Saatcioglu가 제안한  $\epsilon_{85}$ 과  $\epsilon_0$ 의비로 정의하였다. 여기서  $\epsilon_{85}$ 는 최대응력 이후에 최대응력의 85%에 해당하는 변형률,  $\epsilon_0$ 는 비구속 콘크리트 시험체의 최대응력에서의 변형률이다. 비구속 콘크리트의 실험적인 데이터가 없는 경우  $\epsilon_0$ 는 0.002,  $f_{co}$ 는 공시체 강도의 85%인  $0.85f'_{ck}$ 로 가정할 수 있다.

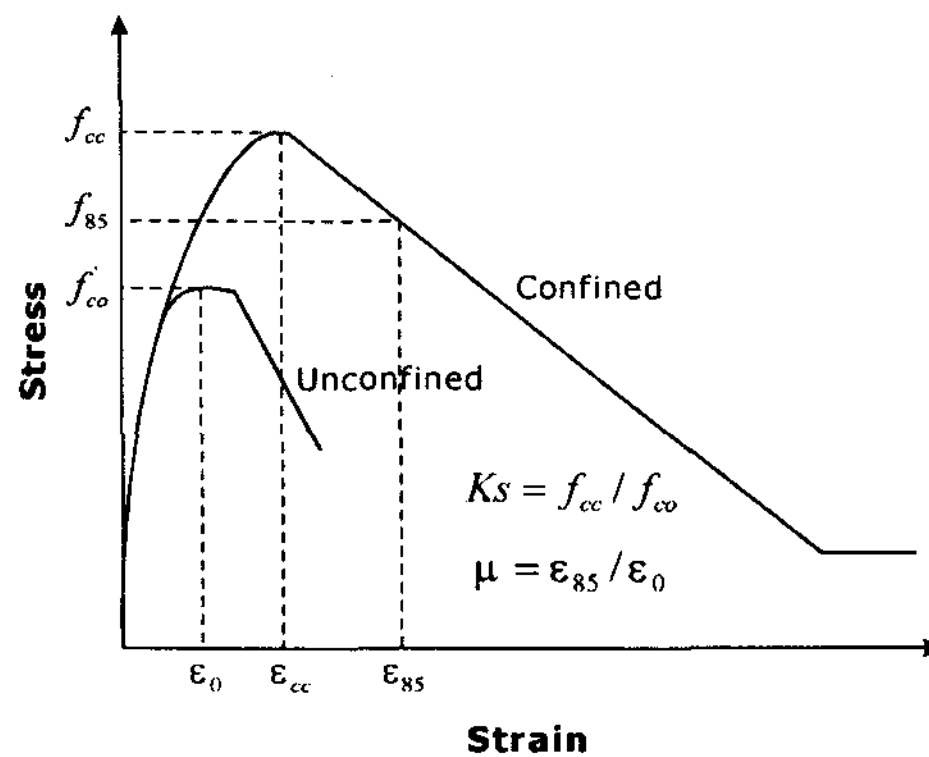


그림 2. 강도증가계수와 연성비의 정의

### 3.2 횡방향 철근 체적비의 영향

다음 그림 3은 구속된 콘크리트의 횡방향 철근 체적비에 따른 응력-변형률 거동을 나타내고 있다. 그림 3에서 횡방향 철근의 체적비가 증가할수록 최대응력  $f_{cc}$ 가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 낮은 콘크리트 강도 시험체에서는 횡방향 철근 체적비가 증가할수록 최대응력일때의 변형률  $\epsilon_{cc}$ 가 증가하지만 높은 콘크리트 강도 시험체는  $\epsilon_{cc}$ 가 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 이는 낮은 콘크리트 강도 시험체에서는 피복이 모두 박리한 후 코어가 하중을 부담하여 발생하는 2차 최대응력이 1차 최대응력보다 높아지기 때문이다.

비구속 콘크리트 시험체에 대해 횡방향 철근 체적비가 1.7%인 경우 약 27~46% 정도 강도가 증진되었고, 체적비가 2.4%인 경우는 약 19~40%, 체적비가 3.4%인 경우 약 25~62%, 체적비가

4.8%인 경우는 약 51~57%정도 강도가 증진되었다.

즉, 횡방향 철근 체적비의 증가는 구속된 직사각형 단면의 콘크리트 기둥에 직접적으로 강도를 향상시킬 수 있으며 횡방향 구속에 의해 최대 50%이상의 강도증진 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

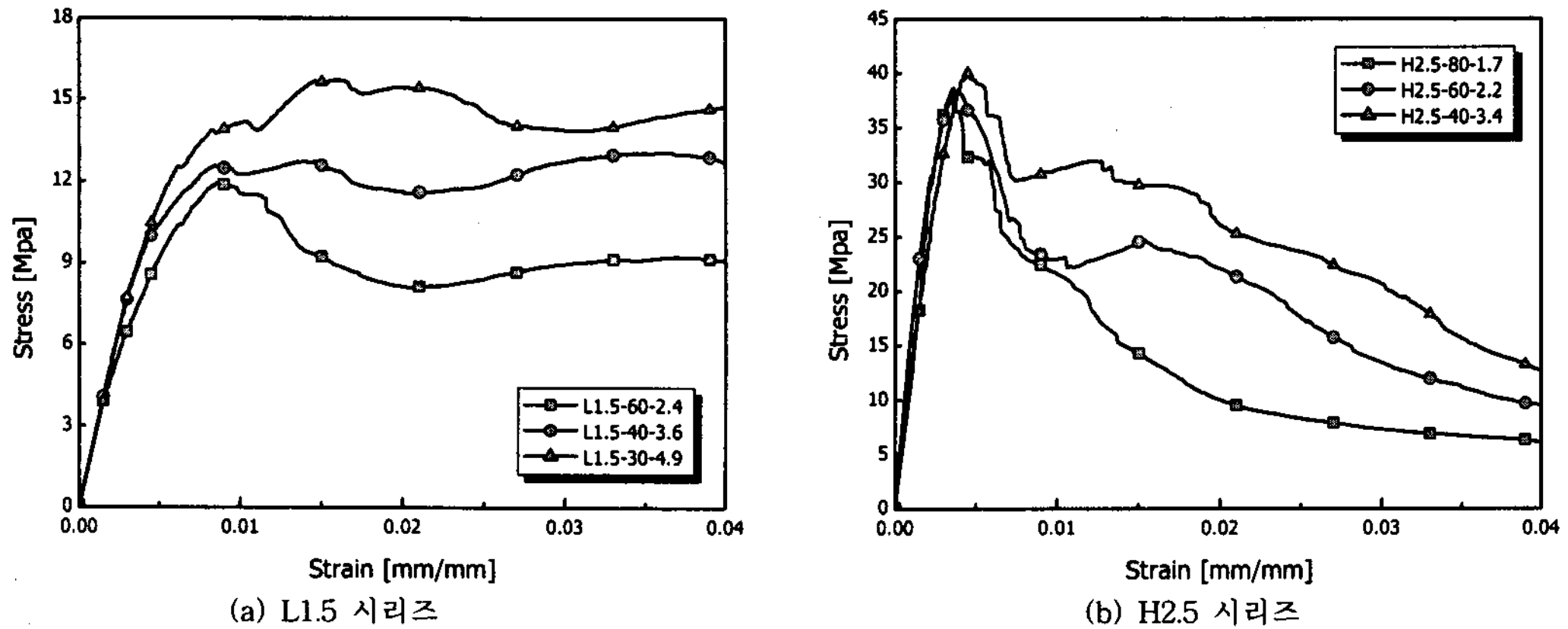


그림 3. 횡방향 철근 체적비의 영향

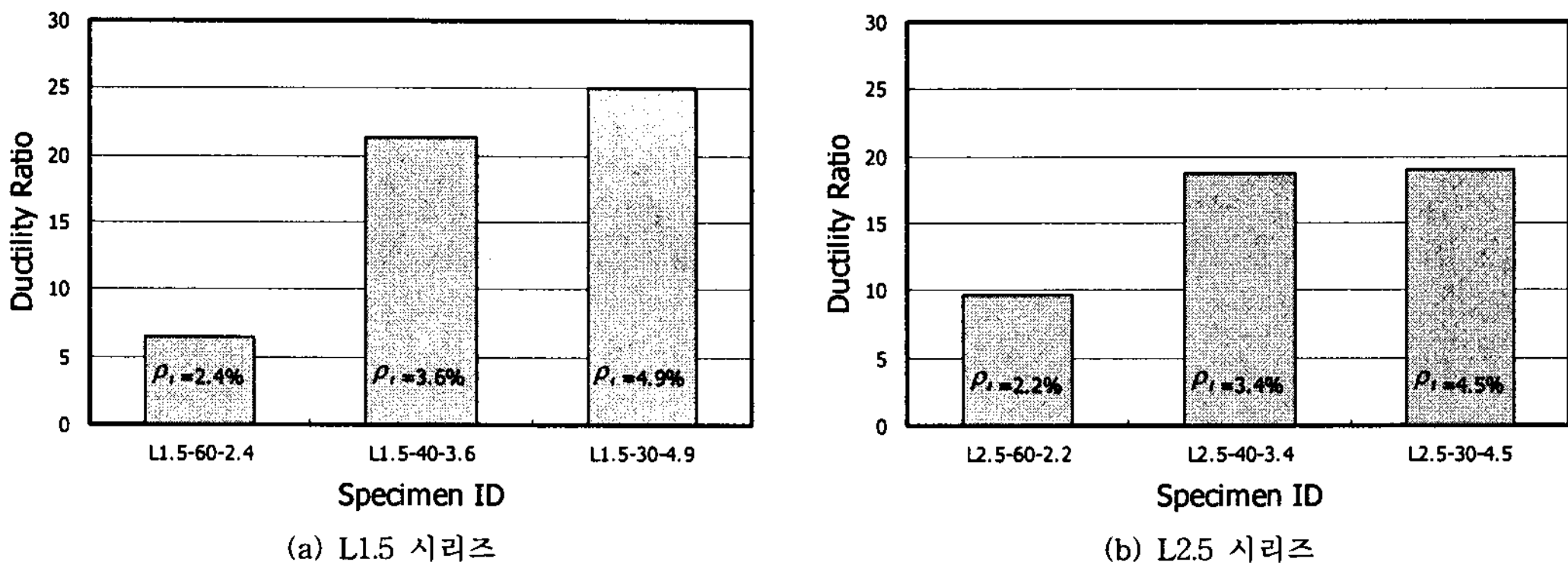
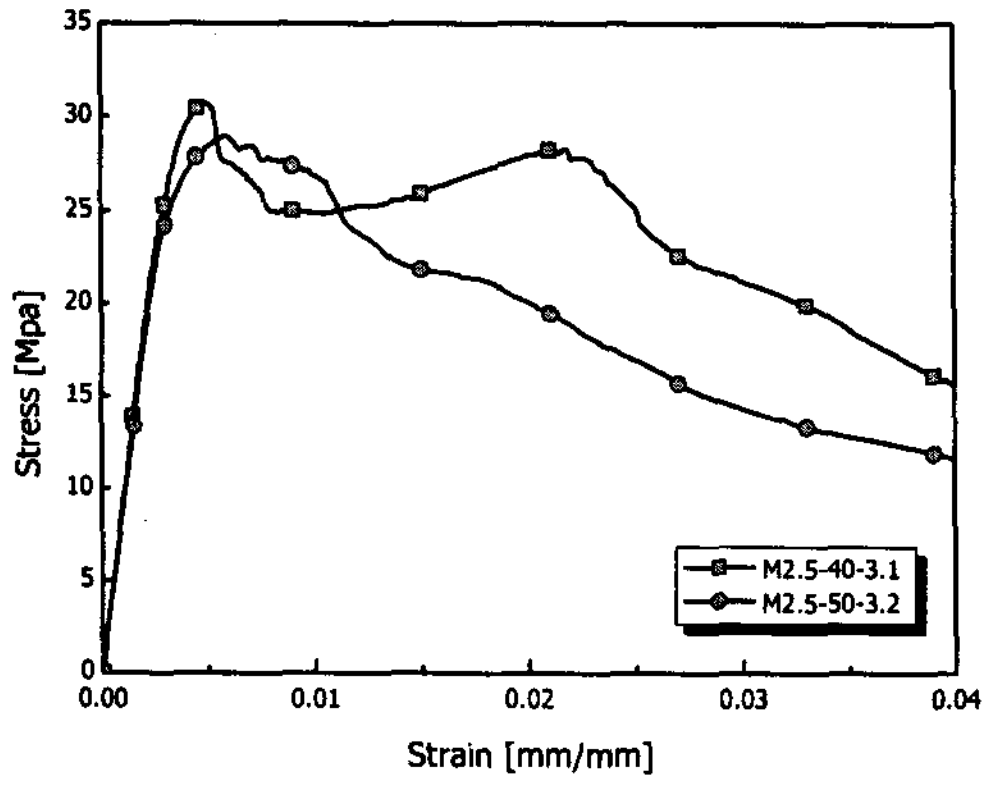


그림 4. 횡방향 철근의 체적비에 따른 연성비

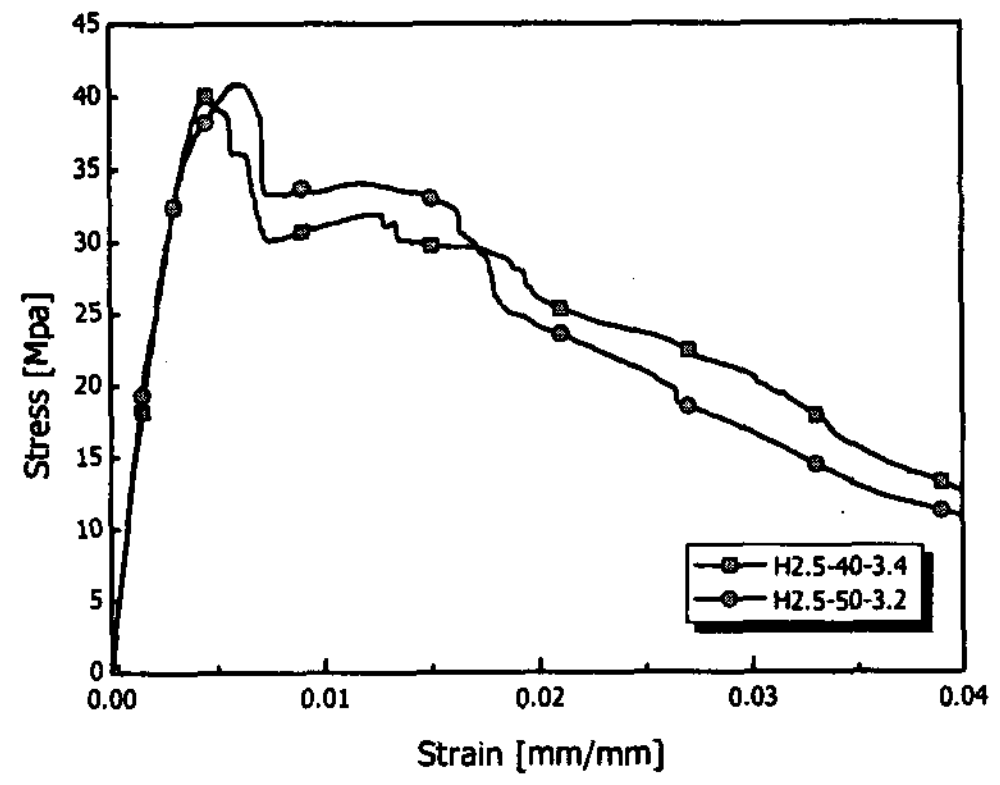
### 3.3 횡방향 철근 간격의 영향

다음 그림 5는 동일한 횡방향 철근 체적비에서 횡방향 철근 간격에 따른 응력-변형률 거동을 나타내고 있다. 그림에서 동일한 횡방향 철근 체적비라도 횡방향 철근 간격이 증가할수록 최대응력은 비슷하지만 최대응력일때의 변형률  $\epsilon_{cc}$ 은 증가하고 피크 이후에 최대응력의 85%에서의 변형률  $\epsilon_{85}$ 은 감소하는 것으로 나타났다. 즉 최대응력은 늦게 나타나고 최대응력의 85% 지점은 빨리 나타남으로써 상대적으로 연성에 불리해지는 것을 알 수 있다.

그림 6은 횡방향 철근 간격이 증가할수록 연성비는 감소하는 것을 보여주고 있다. 그러므로 동일한 횡방향 철근 체적비를 가진 직사각형 기둥에서 횡방향 철근 간격을 줄이는 것이 연성확보에 유리하고 더 효율적인 구속효과를 발휘할 수 있는 것으로 사료된다.



(a) M2.5 시리즈 ( $\rho_f=3.2\%$ )



(b) H2.5 시리즈 ( $\rho_f=3.2\%$ )

그림 5. 횡방향 철근 간격의 영향

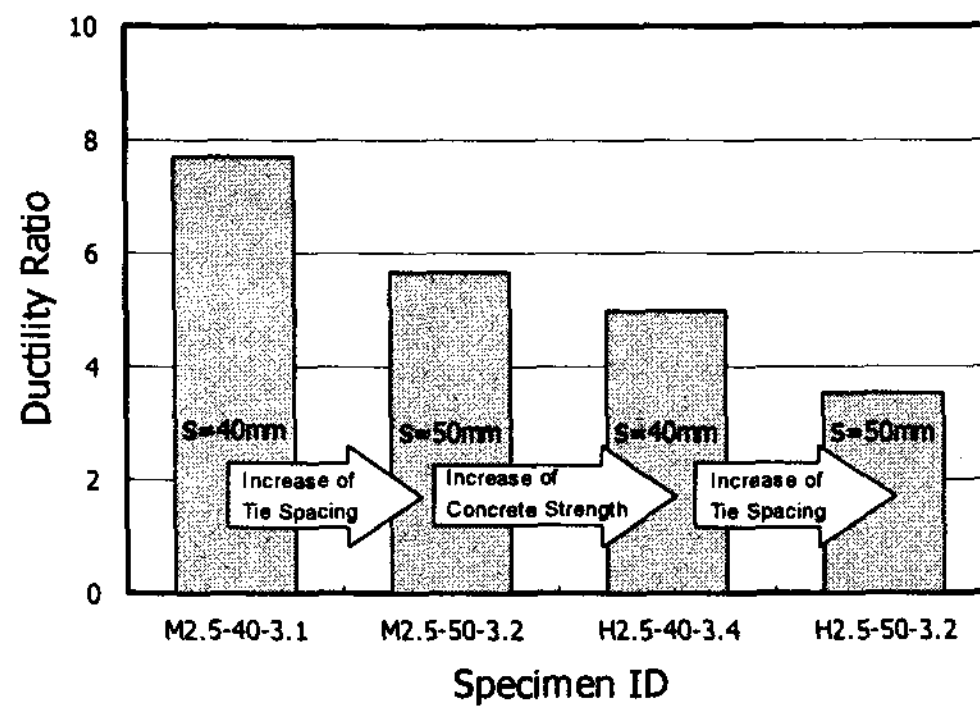
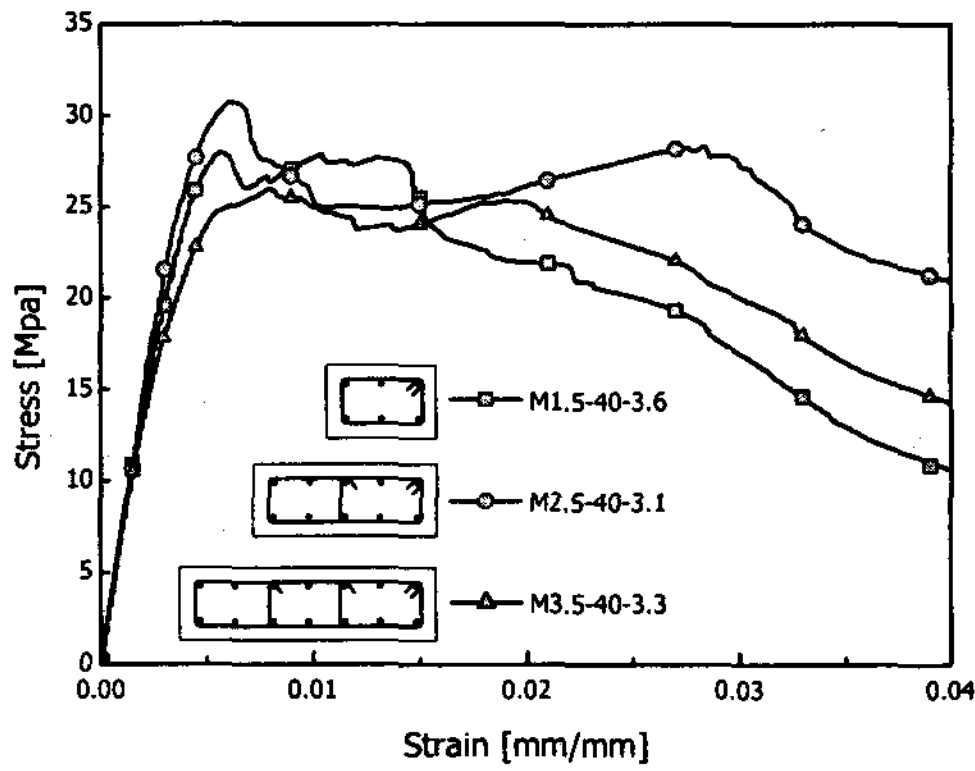


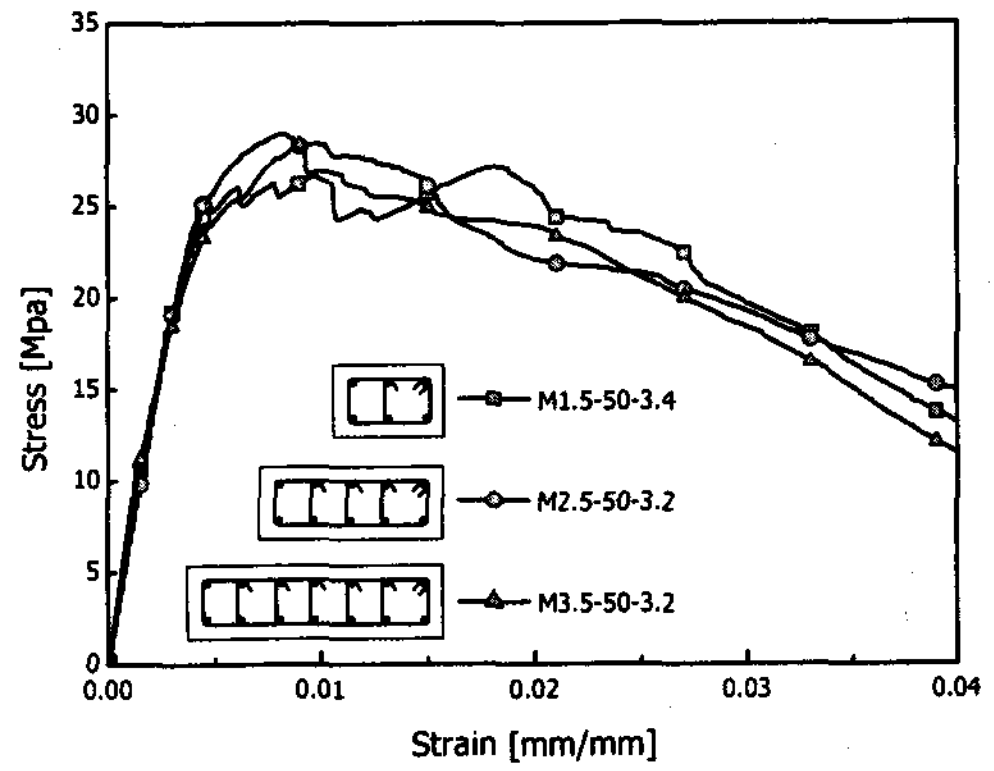
그림 6. 횡방향 철근의 간격에 따른 연성비

### 3.4 단면 형상비의 영향

다음 그림 7은 동일한 횡방향 철근 체적비, 간격에서 단면 형상비에 따른 응력-변형률 거동을 나타내고 있다. 그림 7의 (a)~(b)에서 단면 형상비가 1.5, 2.5, 3.5로 증가할 때 최대응력과 연성비는 거의 비슷한 값을 보이는 것을 알 수 있다. 즉, 단면 형상비에 따른 응력-변형률 거동에는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.



(a) 횡방향 철근 간격 40mm의 경우



(b) 횡방향 철근 간격 50mm의 경우

그림 7. 단면 형상비의 영향

### 3.5 콘크리트 강도의 영향

다음 그림 8은 동일한 횡방향 철근 체적비에서 콘크리트 강도에 따른 응력-변형률 거동을 나타내고 있다. 동일 횡방향 철근 배근 조건하에서, 콘크리트 강도가 증가할수록 최대 내력은 콘크리트 자체 강도의 증가에 의하여 증가하였다. 그러나 높은 콘크리트 강도의 시험체는 낮은 콘크리트 강도의 시험체보다 최대응력 이후의 응력감소가 급격하게 나타났다. 즉, 더 높은 콘크리트 강도를 가진 시험체는 강성과 하중저항능력은 크고 취성적이라는 것을 알 수 있다.

횡방향 철근 체적비가 증가할 경우, 보통강도 콘크리트보다 고강도 콘크리트 시험체가 대체적으로 강도증진과 연성비가 감소하였는데 이러한 현상은 콘크리트 강도가 증가할수록 미세 균열 및 체적의 팽창이 감소하여 횡방향 철근의 구속압력이 감소하기 때문으로 판단된다.

응력-변형률 거동은 콘크리트 강도에 따라 큰 차이를 보였다. 높은 강도의 콘크리트는 최대응력 이후에 응력이 약 10~15% 정도 급격히 감소하다가 콘크리트 피복이 거의 다 떨어져 나갈 때쯤에 응력이 점점 증가하면서 첫 번째 최대응력의 약 80~85%인 두 번째 최대응력이 나타났다. 반면에 중간 강도의 콘크리트는 5~10%정도 최대응력 이후에 감소를 보이다가 첫 번째 최대응력과 동일한 수준의 두 번째 최대응력이 나타났다. 낮은 콘크리트 강도의 경우는 오히려 두 번째 최대응력이 첫 번째 최대응력보다 커지는 거동을 보였다.

그림 9에서 동일한 횡방향 철근 체적비에서 콘크리트 강도가 증가할수록 최대응력일때의 변형률  $\epsilon_{cc}$ 과 피크 이후에 최대응력의 85%에서의 변형률  $\epsilon_{85}$ 이 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 더 낮은 콘크리트 강도 시험체에서 횡방향 철근의 구속이 더 효과적이라는 것을 알 수 있다.

그러므로 콘크리트 강도가 증가할 때 유사한 연성증진효과를 얻으려면 낮은 콘크리트 강도일때보다 더 많은 횡방향 철근량이 필요하다는 것을 알 수 있다.

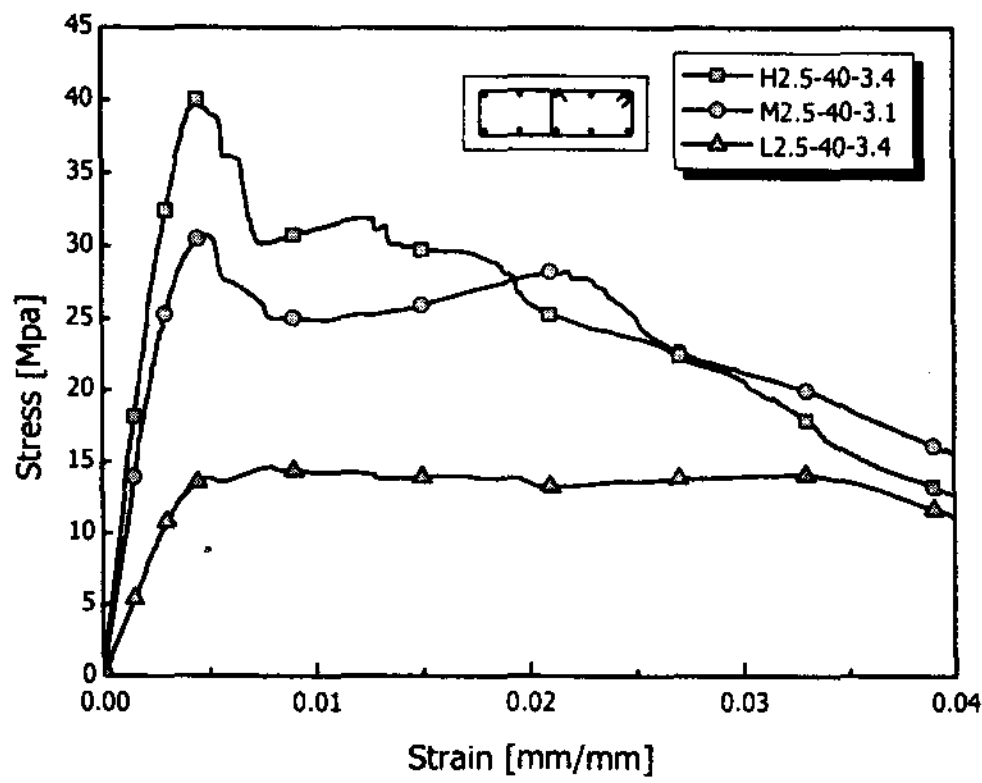


그림 8. 콘크리트 강도의 영향

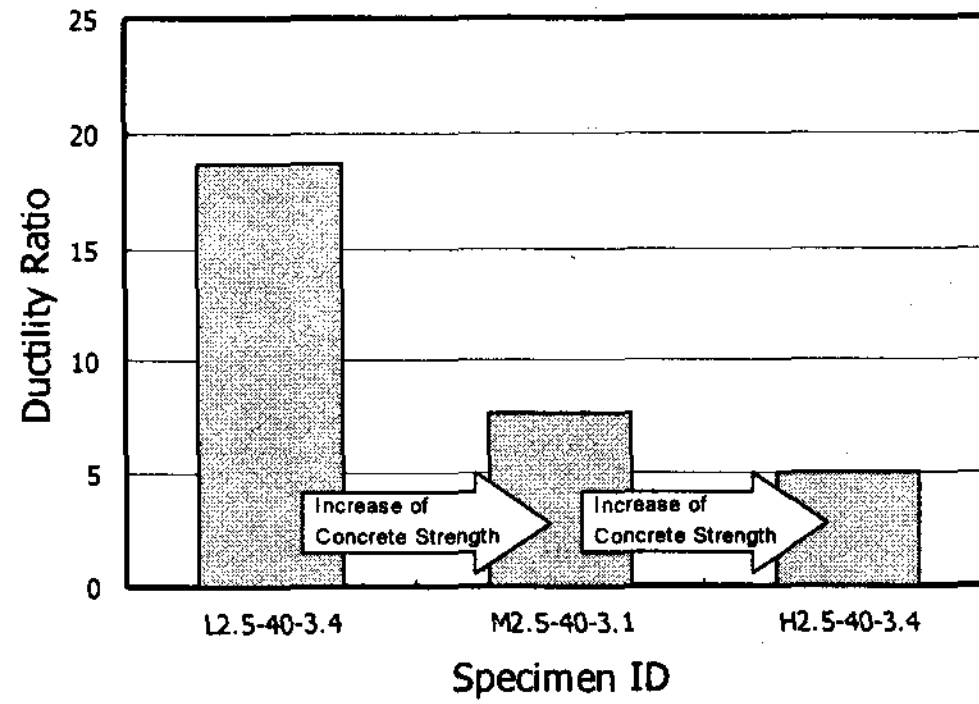


그림 9. 횡방향 철근의 강도에 따른 연성비

#### 4. 결 론

본 연구에서는 직사각형 단면의 횡구속된 콘크리트 기둥의 압축거동을 검토하고자 콘크리트 강도, 횡방향 철근 체적비, 횡방향 철근 간격, 단면 형상비 등을 변수로 하여 포괄적인 실험연구를 수행하였다.

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 일반적인 시험체의 파괴양상은 최대하중에서 콘크리트 피복이 쪼개지기 시작했고 최대하중이 후에 하중은 감소하다가 코어가 하중을 부담하기 시작하면서 하중이 다시 증가하다가 두 번째 최대하중이 나타나기 시작했다. 두 번째 최대하중 이후로는 하중이 감소하기 시작하였으며 콘크리트 강도와 횡방향 철근 체적비, 간격에 따라 감소부분의 기울기는 달라졌다.
- 2) 실험구간에 횡방향 철근 간격이 넓은 경우에는 최대하중에 이르기 전에 약간의 수직균열이 주철근을 따라 발생하였고 시험체의 파괴와 주철근의 좌굴은 3~4개의 층에서 전체적으로 발생하였다. 반면 횡방향 철근이 조밀하게 배근된 시험체에서는 최대하중 직전에 중앙부에서 횡균열이 발생하였고 시험체의 파괴와 주철근의 좌굴은 1~2개의 층에서 국부적으로 발생하였다.
- 3) 동일한 조건에서 횡방향 철근 체적비가 증가할수록 최대응력과 연성비가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 횡방향 철근량이 구속된 콘크리트 기둥의 저항능력과 연성을 직접적으로 향상시킬 수 있으며 최대 50%이상의 강도증진 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.
- 4) 동일한 조건에서 횡방향 철근 간격이 증가할수록 최대응력일때의 변형률  $\epsilon_{cc}$ 은 증가하고 피크 이후에 최대응력의 85%에서의 변형률  $\epsilon_{85}$ 은 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 최대응력은 늦게 나타나고 최대응력의 85% 지점은 빨리 나타남으로써 상대적으로 연성에 불리해지는 것을 알 수 있다. 그러므로 횡방향 철근 간격을 줄이는 것이 연성확보에 유리하고 더 효율적인 구속효과를 발휘할 수 있는 것으로 사료된다.

5) 동일한 조건에서 단면형상비가 3.5이내에서는 단면 형상비의 증가는 응력-변형률 거동에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

1. Daniel Cusson, Patrick Paultre "High-Strength Concrete Columns Confined by Rectangular Ties", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 3, March 1994, pp783~804
2. J. Hoshikuma, K. Kawashima, K. Nagaya, A. W. Taylor "Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Bridge Piers", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 5, May 1997, pp624~633
3. Mander J. B., Priestley M. J. N. and Park R., "Observed Stress- Strain Behavior of Confined Concrete", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 8, August 1988, pp1827~1849.
4. Saatcioglu M and Razvi S. R., "High-Strength Concrete Columns with Square Sections under Concentric Compression," ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 124, No. 12, December 1998, pp1438~1447.
5. Saatcioglu M and Razvi S. R., "Strength and Ductility of Confined Concrete," ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 6, June 1992, pp1590~1607.
6. Salim R. Razvi, Murat Saatcioglu "Strength and Deformability of Confined High-Strength Concrete Columns", ACI Structural journal, V. 91, No. 6, November-December 1994, pp678-687.
7. Y. L. Mo, D. C. Wong, K. Maekawa "Sesmic Performance of Hollow Bridge Columns" ACI Structural journal, V. 100, No. 3, May-June 2003, pp337-348.
8. 조근호 "고강도 콘크리트 및 고강도 철근을 사용한 교각의 내진거동에 관한 실험 및 해석적 연구", 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 2004