

# 낮은 체적비의 고강도 띠철근으로 구속된 철근콘크리트 원형기둥의 일축압축거동

## Uniaxial Compression Behavior of Reinforced Concrete Circular Columns Confined by Low-Volumetric Ratio High-Strength Lateral Ties

홍 기 남<sup>\*</sup> 이 성 태<sup>\*\*</sup> 최 흥 식<sup>\*\*\*</sup> 이 시 우<sup>\*\*\*\*</sup> 곽 흥 신<sup>\*\*\*\*\*</sup> 한 상 훈<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
Hong, Ki Nam Yi, Seong Tae Choi, Hong Shik Lee, Si Woo Kwak, Hong Shin Han, Sang Hoon

### ABSTRACT

Experimental research was conducted to investigate the behavior of RC circular columns confined by high-strength ties. Large scale columns with concrete strength 34.1 and 65.3 MPa were tested under monotonically increasing concentric compression. The test parameters included the volumetric ratio, tie arrangement, tie yield strength, and concrete compressive strength. The results indicate that high-strength concrete columns can be confined to achieve inelastic deformations usually predicted for normal-strength concrete columns. This can be done by providing increasing volumetric ratio and tie yield strength.

### 1. 서 론

최근 들어 콘크리트 제조 기술의 발전으로 시공현장에서 사용되고 있는 콘크리트의 강도가 점진적으로 증가하고 있으며, 일본을 비롯한 몇몇 나라에서는 항복강도가 100 MPa 이상인 철근도 내진보강을 위한 철근콘크리트(RC) 기둥의 띠철근으로 사용되고 있다. 그러나 국내에서는 이러한 고강도 재료를 이용한 RC기둥의 성능평가에 관한 연구가 아직까지도 부족한 실정이다. 이 연구에서는 고강도 콘크리트와 원형의 고강도 띠철근을 이용하여 제작된 철근콘크리트 원형기둥(이하, 고강도 RC기둥)에 대한 일축압축 실험을 실시하여, 거동특성을 실험변수 별로 분석함으로써 이 분야에 관심이 있는 연구자 혹은 현장의 실무자들에게 고강도 재료의 실용화를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

### 2. 실험개요

이 연구에서 사용된 모든 실험체는 지름 300mm의 원형단면과 높이 900mm를 갖는다. 실험변수로는 콘크리트 압축강도  $f_c$ (34.1, 65.3 MPa), 띠철근 항복강도  $f_{ty}$ (404, 975, 및 1413 MPa), 띠철근 체적비  $\rho_s$ (0.56~1.96%), 그리고 구속형상(Type-G, Type-GH)을 고려하였다. 표 1에 나타낸 콘크리트의 압축강도는 3개의 원주공시체( $\phi 100 \times 200$  mm)에서 얻어진 값들의 평균치이다. 또한, 본 연구에서는 실험체와 동일한 크기의 띠철근이 없는 실험체도 압축강도마다 2개씩 제작하여 일축압축 실험을 실시하였다. 이들 2개의 비구속 실험체로부터 얻어진 평균강도는 원주공시체의 압축강도 34.1과 65.3 MPa에 대해 각각 26.3과 44.7 MPa로 나타났다. 재하는 10 MN 용량의 대형 가압기를 사용하여 실시하였다. 이 실험

\* 정회원, 충북대학교 토목공학과 연구원

\*\* 정회원, 충청대학 토목공학과 교수

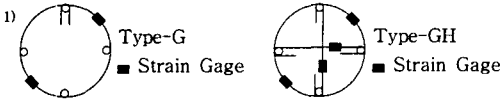
\*\*\* 정회원, 충청대학 건축공학과 교수

\*\*\*\* 정회원, 충청대학 국제공인시험연구원 주임연구원

\*\*\*\*\* 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수

표 1 실험체 일람

공시체 명	$f_{ck}$ (MPa)	축방향 철근	횡방향 철근					$P_{max}/P_0$
			직경 (mm)	간격 (mm)	체적비 (%)	항복강도 (MPa)	구속형상 <sup>*)1)</sup>	
CF1P1Y1	34.1	D6-4 SD295	6.0	25	1.91	404	Type-G	1.12
CF1P1Y2			6.0		1.91	975	Type-G	1.60
CF1P1Y4			6.4		1.81	1413	Type-G	1.70
CF1P2Y2			6.0	85	0.96	975	Type-G	1.03
CF1P2Y4			6.4		0.91	1413	Type-G	1.02
CF1P3Y4			6.4	150	0.57	1413	Type-G	0.94
NF1P1Y4			6.4	35	1.94	1413	Type-GH	1.66
NF1P2Y4			6.4	70	0.97	1413	Type-GH	1.00
NF1P3Y4			6.4	125	0.54	1413	Type-GH	0.83
CF2P1Y1			65.3	D6-4 SD295	6.0	25	1.91	404
CF2P1Y2	6.0	1.91			975		Type-G	1.17
CF2P1Y4	6.4	1.81			1413		Type-G	1.23
CF2P2Y2	6.0	85			0.96	975	Type-G	0.87
CF2P2Y4	6.4				0.91	1413	Type-G	0.89
CF2P3Y4	6.4	150			0.57	1413	Type-G	0.83
NF2P1Y4	6.4	35			1.94	1413	Type-GH	1.20
NF2P2Y4	6.4	70			0.97	1413	Type-GH	0.89
NF2P3Y4	6.4	125			0.54	1413	Type-GH	0.78



험장치는 재하속도 0.01~0.3mm/min의 재하가 가능한 강성이 매우 큰 실험기이다. 하중은 변위제어 방식으로 제어했으며, 재하속도는 예상 최대하중의 80%까지는 0.3mm/min, 그 이후에는 압축연화거동을 측정하기 위해 0.05mm/min로 설정하였다. 실험 중에는 하중, 축방향 변위, 그리고 표 1에 나타난 변형률 게이지 부착위치에서의 띠철근 변형률을 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 최대하중

띠철근으로 횡구속된 실험체에 대한 일축압축 실험결과, 본 연구에서 사용된 실험체 대부분의 경우 기둥의 성능이 발현되기 이전에 콘크리트 덮개와 구속콘크리트 사이에 발생한 할렬균열에 의해 콘크리트 덮개가 탈락하는 현상이 발생하였다. 이로 인해 콘크리트 덮개 탈락이후의 하중은 축방향철근과 구속콘크리트 만으로 지지되어야 한다. 그 결과, 표 1에 나타난 것과 같이 띠철근량이 많은 기둥들은 콘크리트의 압축강도  $f_{ck}$ 와 기둥의 전단면적  $A_g$ 를 기초로 현 설계기준 식(1)에 의해서 계산되는 하중  $P_0$ 보다 더 큰 하중에 저항할 수 있었다. 그러나, 띠철근량이 작은 기둥들은 식(1)에 의해서 산정되는 하중  $P_0$ 보다 작은 성능을 갖는 것으로 나타났다.

$$P_0 = 0.85f_{ck}(A_g - A_s) + A_s f_y \quad (1)$$

여기서,  $A_g$ 와  $f_y$ 는 각각 축방향 철근의 단면적과 항복강도를 나타낸다. 그림 1에서는  $P_0$ 이상의 하중 저항능력을 갖는 기둥과 이에 미치지 못하는 하중저항능력을 갖는 실험체를 구분하기 위해서  $P_{max}/P_0$ 와  $k_p \rho_w f_{sy}/f_{ck}$ 의 관계를 그림 1에 나타내었다. 여기서,  $k_p$ 는 Mander 등<sup>1)</sup>에 의해서 제안된

유효구속계수이며,  $\rho_w$ 는 띠철근의 체적비를 나타낸다. 그림 1로부터  $k\rho_w f_{sv}/f_{ck}$ 가 약 0.12 이상이 되어야 실험체는  $P_0$ 보다 큰 하중저항능력을 발휘함을 알 수 있다. 즉, 현 시방기준인 식(1)을 고강도 RC기둥에 적용하기 위해서는  $k\rho_w f_{sv}/f_{ck}$ 가 최소한 0.12 이상이어야 한다는 사실을 알 수 있다.

### 3.2 콘크리트의 압축강도 및 띠철근 체적비의 영향

본 절에서는 동일한 띠철근 체적비와 항복강도를 가지며 콘크리트의 압축강도  $f_{ck}$ 가 서로 다른 실험체에 대한 압축실험을 실시하였으며 그림 2에는 콘크리트의 압축강도가 구속콘크리트에 미치는 영향을 나타내었다. 그림 2는 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 강도증가율 및 연성이 크게 감소하는 결과를 보이고 있으며 띠철근 체적비  $\rho_s$ 가 1.81%에서 0.91%로 감소하는 경우에도 동일한 결과를 나타내고 있다. 즉, 고강도 콘크리트를 사용하는 경우 보통 콘크리트를 사용한 기둥과 같은 구속효과를 기대하기 위해서 더 많은 띠철근량이 필요하다는 것을 알 수 있다.

기둥에 발생하는 수동구속압은 띠철근량의 함수이며, 띠철근의 항복강도가 동일한 경우 띠철근량이 증가함에 따라 구속콘크리트에 가해지는 구속압이 증가하게 된다. 그림 3에는 띠철근량이 구속콘크리트의 응력-변형률관계에 미치는 영향을 나타내었다. 그림 3으로부터 띠철근의 체적비  $\rho_s$ 가 증가함에 따라 구속콘크리트의 강도 및 연성이 증가함을 알 수 있다. 강도에 따라 차이가 있으나  $\rho_s$ 가 1.81%인 실험체들은 최대강도이후 강도의 손실이 거의 없던지 적으며 변형률이 크게 증가하는 연성거동을 보였으나,  $\rho_s$ 가 0.91% 이하인 실험체들은 최대하중이후 급격하게 강도가 감소하는 취성적인 거동을 나타냈다. 특히, 그림 3에는 나타내지 않았으나  $f_{ck}$ 가 65.3 MPa이고  $\rho_s$ 가 약 0.5%인 CF2P3Y4와 NF2P3Y4 실험체들은 콘크리트 덮개의 파괴와 동시에 큰 폭을 내며 하중저항능력의 약 70% 이상을 상실하는 취성파괴를 보였다.

### 3.3 띠철근 항복강도 및 구속형상의 영향

본 절에서는 구속효과에 대한 띠철근 항복강도의 영향을 평가하기 위해  $\rho_s$ 가 같고 항복강도가 서로 다른 실험체들에 대한 실험을 실시하였다. 현재는 고강도 RC기둥에  $f_{sv}$ 가 큰 철근을 사용하여 필요한 띠철근량을 감소시킴으로서 시공성을 확보하려는 많은 연구가 진행 중에 있다<sup>(2),(3)</sup>. 그림 4에는 이들 실험

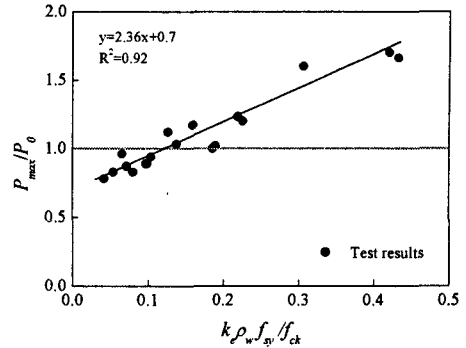


그림 1.  $P_{max}/P_0$ 와  $k\rho_w f_{sv}/f_{ck}$ 의 관계

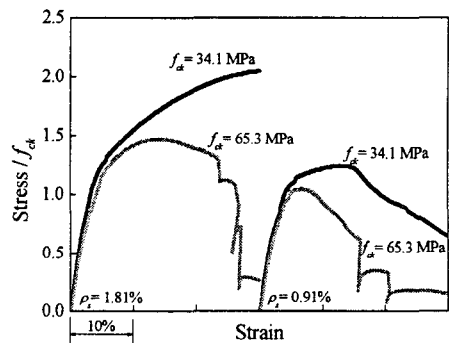


그림 2. 콘크리트 압축강도의 영향

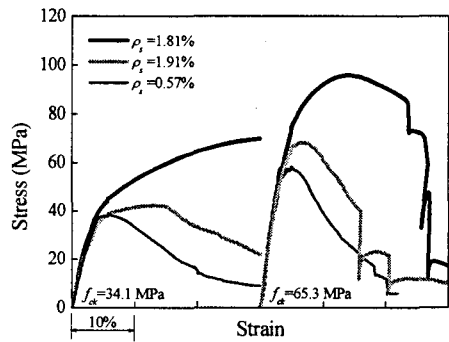


그림 3. 띠철근 체적비의 영향

험결과 중  $\rho_s=1.81\%$ 인 실험체의 실험결과만을 콘크리트의 강도 별로 나타내었다. 그림 4는 띠철근의 항복강도가 증가할수록 강도 및 최대강도 이후의 거동이 크게 개선되는 현상을 보이고 있다. 그러나 콘크리트의 압축강도가 65.3 MPa이며  $\rho_s$ 가 0.91%이하인 실험체에서는 띠철근의 항복강도에 대한 영향이 명확하게 나타나지 않았다. 따라서,  $f_{sy}$ 와  $\rho_s$ 의 조합을 통해 목표수준의 구속효과를 기대하기 위해서는  $\rho_s$ 가 최소한 1.81% 이상이 되어야 할 것으로 사료된다.

그림 5에는  $\rho_s$ 가 거의 동일하고 띠철근의 구속형상이 Type-G와 Type-GH로 서로 다른 실험체의 실험결과를  $\rho_s$ 별로 나타내었다. 그림 5는  $f_{ck}$ 가 34.1 MPa인 실험체에서는 구속형상에 관계없이 거의 유사한 거동을 보이고 있으나,  $f_{ck}$ 가 65.3 MPa인 실험체에서는 cross-ties가 없는 경우가 더 우수한 구속효과를 보이고 있다. 즉, 고강도의 원형 RC기둥에서는 Type-GH보다는 Type-G를 사용하는 것이 더욱 효과적이라는 사실을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구로부터 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1)  $k_p \rho_s f_{sy} / f_{ck}$ 가 약 0.12이상 이 되는 실험체만이 현 시방기준에 의해서 산정되는  $P_0$ 보다 큰 하중저항 능력을 발휘하는 것으로 나타나, 현 시방기준을 고강도 RC기둥에 적용하기 위해서는  $k_p \rho_s f_{sy} / f_{ck}$ 가 최소한 0.12이상 되어야 할 것으로 사료된다.
- (2) 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 구속효과가 감소하는 것으로 나타났다.  $\rho_s$ 가 1.81%인 실험체는 최대강도이후 강도의 손실이 거의 없이 변형률이 크게 증가하는 연성거동을 보였으나,  $\rho_s$ 가 0.91%인 실험체는 최대하중이후 강도가  $\rho_s$ 가 1.81%인 경우보다 빨리 감소하는 취성적인 거동을 나타내었다.
- (3)  $f_{sy}$ 와  $\rho_s$ 의 조합을 통해 목표수준의 구속효과를 기대하기 위해서는  $\rho_s$ 가 최소한 1.81% 이상이 되어야 할 것으로 생각된다. 또한, 고강도의 원형 RC기둥에서는 Type-GH보다는 Type-G를 사용하는 것이 더욱 효과적이라는 사실을 알 수 있었다.

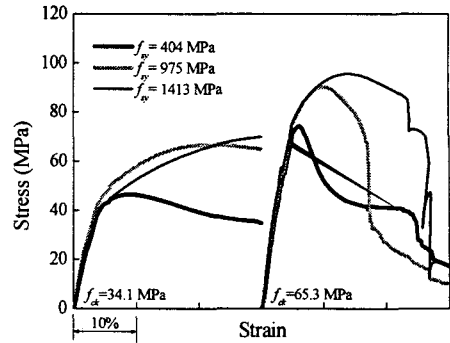


그림 4. 띠철근 항복강도의 영향

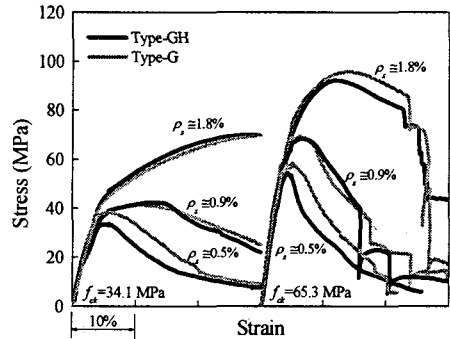


그림 5. 띠철근 구속형상의 영향

#### 참고 문헌

1. Mander J. B., Priestly M. J. N. and Park R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", Journal of structure Engineering, ASCE, 114, No. 8, 1988, pp. 1804-1826.
2. Razvi S. and Saatcioglu M., "Circular High-Strength Concrete Columns under Concentric Compression", ACI structural Journal, 96, No. 5, 1999, pp. 817-825.
3. Cusson D. and Paultre P., "High-Strength Concrete Columns Confined by Rectangular Ties", Journal of Structural Engineering, ASCE, 120, No 3, 1994, pp. 783-804.