

# 콘크리트충전 강관기둥의 응력-변형도 관계에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Stress-Strain Relation of Concrete-Filled Steel Tubes

○ 한 병 찬\*  
Han, Byung-Chan

임 경 택\*\*  
Lim, Kyung-Teak

엄 철 환\*\*\*  
Eom, Chul-Hwan

연 길 환\*\*\*\*  
Yeon, Gil-Hwan

윤 석 찬\*\*\*\*  
Yun, Suk-Chun

정 수 영\*\*\*\*  
Chung, Soo-Young

### ABSTRACT

Research on concrete-filled steel columns has been conducted. It is also well known that the load and deformation capacity of concrete-filled steel columns are considerable larger than those of widely used reinforced concrete columns and steel encased concrete columns because the concrete core in the steel is confined laterally by the steel. But, most of these works focused on columns with strength enhancement by the confinement effect, so that no local buckling prevented by the concrete.

This paper, therefore, presents on the stress-strain relation of a concrete filled rectangular steel tube under axial compression.

As the results, the axial load verse average axial strain relationship of concrete-filled rectangular steel columns were very stable. The small B/t ratios in concrete-filled rectangular steel columns aren't affected prevention of local buckling but strength enhancement by confinement effect.

### 1. 서 론

최근 고층건물의 기둥부재로서 많은 장점을 가지고 있는 것으로 보고되고 있는 콘크리트충전 각형강관 기둥(이하 충전각형강관 기둥)의 중심압축성상에 관한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있는데, 이러한 기존연구는 주로 강관의 구속효과에 의한 콘크리트의 내력상승과 연성증진에 주목하여 연구되어지고 있다. 그러나, 콘크리트에 의한 강관의 국부좌굴 제어나 콘크리트의 횡팽창에 의한 3축응력 상태가 강관의 거동에 미치는 영향에 관해서는 연구가 미진한 실정이다.

실제, 충전강관기둥 부재의 골조해석에 있어서 응력-변형도 관계에 대한 고려에서는 지금까지 콘크리트의 실린더 압축실험과 강관의 단주 압축실험 등의 단순한 재료실험결과를 합성하여 사용하기 때문에 강관과 콘크리트의 합성작용에 관한 불명확한 부분이 많으며, 강관의 구속효과에 의한 콘크리트의 3축응력상태를 고려한다 하더라도 여러가지의 변수(콘크리트와 강관의 재료특성, 강관의 폭두께비)들의 영향에 대한 연구가 미진한 것이 사실이다.

그러므로, 본 연구는 중심축력을 받는 충전각형강관의 응력-변형도 관계를 분석함으로써 콘크리트에 의한 강관의 국부좌굴 제어효과와 특성, 콘크리트의 횡팽창에 의한 3축응력 상태가 강관의 거동에 미치는 영향 등을 고찰하는 것을 목적으로 한다.

본 실험연구에 사용된 실험변수는 강관의 폭

\* 충남대학교 건축공학과 대학원, 석사과정  
\*\* 충남대학교 건축공학과 대학원, 박사과정  
\*\*\* 삼성건설기술연구소 수석연구원, 공박  
\*\*\*\* 충남대학교 건축공학과, 공박, 교수

Table 1. Properties of Specimens and Materials

Specimen*	Nominal B/t	Size in Rectangular Tube				L/B	Concrete Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Steel Strength (kg/cm <sup>2</sup> )
		t (mm)	Width(B) (mm)	B/t	L (mm)			
SR45-00	45	2.33	100.0	42.9	300.0	3.0		3950.0
CR45-30		2.25	100.0	44.4	300.0	3.0	357	3950.0
TR45-30		2.25	100.0	44.4	300.0	3.0	357	3950.0
CR45-60		2.22	100.0	45.1	300.0	3.0	623	3950.0
TR45-60		2.25	100.0	44.4	300.0	3.0	623	3950.0
SR33-00	33	3.00	100.0	33.3	300.0	3.0		3620.0
CR33-30		3.05	100.0	32.8	300.0	3.0	357	3620.0
TR33-30		3.05	100.0	32.8	300.0	3.0	357	3620.0
CR33-60		3.05	100.0	32.8	300.0	3.0	623	3620.0
TR33-60		2.97	100.0	33.7	300.0	3.0	623	3620.0
SR17-00	17	5.95	100.0	16.8	300.0	3.0		4098.0
CR17-30		5.90	100.0	17.0	299.0	3.0	357	4098.0
TR17-30		5.97	100.0	16.8	299.0	3.0	357	4098.0
CR17-60		5.92	100.0	16.9	299.0	3.0	623	4098.0
TR17-60		5.90	100.0	17.0	299.0	3.0	623	4098.0

\* SR45-00  
 — Compressive Concrete Strength(24:240kg/cm<sup>2</sup>, 50:500kg/cm<sup>2</sup>)  
 — B/t : 45, 33, 17  
 — Specimens' Type (SR:Rectangular Steel Tube, CR:Concrete Filled Rectangular Steel, TR:Transversely Super Reinforcing Rectangular Steel Column)

두께비, 콘크리트 압축강도, 콘크리트 충전의 유무 및 가력방법이며, 충전각형강관 기둥의 중심 압축실험을 수행하여 이 실험결과를 기본으로 동시 압축시의 강관부분의 축방향 하중-압축변형 관계를 고찰하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 시험체

시험체는 각형강관 SS41급의 □-100×100을 이용하였다. 실험변수는 폭두께비(45, 33, 17의 3종류), 콘크리트 충전의 유무, 가력방법(강관과 콘크리트의 동시가력 및 콘크리트만을 가력하는 부분가력), 콘크리트강도(240, 500kg/cm<sup>2</sup>)로 시험체 총 수를 15개로 계획하였다. 중공강관의 경우에는 실험중 단부효과를 제거하기 위하여 상하에 재하판을 용접하여 부착하였다. 표 1은 시험체의 일람표를 나타내고 있다. 시험체에 충전시킨 콘크리트는 충남대학교 재료실험실의 강제믹서를 이용하여 각각의 강도별로 생산 후 타설하였다(표 2). 콘크리트의 슬럼프는 재료분리현상과 타설의 용이를 고려하여 혼화제를 이용하여 15cm정도를 유지하였다. 또한, 콘크리트의 강도를 평가하기 위하여 각 배합별로 9개의 공시체를 제작하였으며, 시험체와 동일한 조건에서 기건양생을 실시하였다.

Table 2. Mix Proportion of Concrete

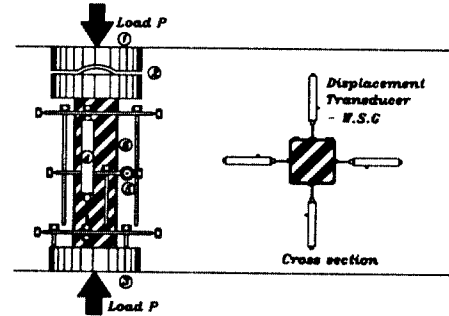
Fc	W/C	Slump	SP	S/A	Water Constant	Unit Weight		
						C	S	G
kg/cm <sup>2</sup>		cm			kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
300	0.53	15		0.48	180	340	876	949
600	0.35	15		0.45	158	450	807	986

## 2.2 실험방법

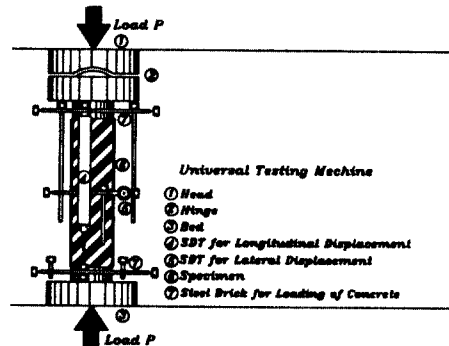
그림 1은 시험체 및 실험장치를 나타내고 있다. 동시 가력 시험체는 강관과 콘크리트를 재하판을 이용하여 동시에 압축하며, 부분가력 시험체는 강관보다 약간 작은 크기의 강블럭을 지압판으로 사용하여 콘크리트에만 가력하였다.

측정방법은 그림과 같이 변위계(Displacement Transducer)에 의하여 시험체 전장에 대한 축방향 변위와 강관 중앙부의 평균변형을 측정

하며, 강관표면의 중앙부에 2축계이지를, 단부에 1축계이지를 부착하여 축방향 및 횡방향(강관 둘레방향)의 변형을 측정하였다. 하중의 제거는 재하속도 400kg/sec로 하였으며, 하중의 제거는 변형 10% 이상이거나 최대내력의 40%로 내력이 저하되었을때 하중을 제거하였다.



(a) Concrete Filled Rectangular Steel Column



(b) Transversely Super Reinforcing Rectangular Steel Column

Fig. 1. Test Set-up and Measuring System

## 2.2 재료실험

충전각형강관 기둥에 사용된 강재와 콘크리트에 대한 재료실험을 실시하였다.

강관은 강재인장시험(Tensile-Coupon Test)을 실시하여 인장강도를 평가하였으며, 상세한 재료 실험 결과는 표 3에 나타나 있다.

Table 3. Material Properties of Steel(Tensile-Coupon Test)

Series	$\sigma_y$ kg/cm <sup>2</sup>	$\epsilon_y$ ( $\times 10^{-3}$ )	E 10 <sup>6</sup> kg/cm <sup>2</sup>	$\nu$
plate 2.33mm	3950.0	1.65	2.15	0.271
plate 3.00mm	3620.0	1.68	2.12	0.261
plate 5.95 mm	4098.0	1.53	2.18	0.269

Note : E=Elastic Modulus,  $\sigma_y$ =Yield Stress,  $\epsilon_y$ =Yield Strain,  
 $\nu$ =Poisson's Ratio

콘크리트는 제작된 원형몰드 공시체 중, 3분을 실험당일 측정하여 그 평균값을 콘크리트의 압축강도로 채택하였다. 실험결과를 표 4에 나타내었다.

Table 4. Material Properties of Concrete

Series	Days	$f_c$ ( $\times 10^4$ )	E 10 <sup>5</sup> kg/cm <sup>2</sup>	$\epsilon_y$
S300	35	357	2.71	0.251
S600	40	623	3.52	0.269

Note :  $f_c$ -Uniaxial Compressive Cylinder Strength of Concrete,  
S300 - Concrete Strength(300kg/cm<sup>2</sup>)  
S600 - Concrete Strength(600kg/cm<sup>2</sup>)

### 3. 실험결과

실험결과를 표 5에 나타내었다. 충전콘크리트에 의한 강관의 국부좌굴 제어효과와 특성, 콘크리트의 횡팽창에 의한 3축응력 상태가 강관의 거동에 미치는 영향 등을 고찰하기 위하여 시험체의 파괴상황, 하중- 축변형관계를 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

Table 5. Test Results in Specimens

Specimen	Concrete Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Steel Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Po (ton)	Pmax (ton)	Po/Pmax	Remark
SR45-00	—	3950.0	32.56	26.20	0.80	Po : Superimposed Strength SR Series : Po= $\sigma_y \cdot A_s$ CR Series : Po= $f_c A_c + \sigma_y A_s$ TR Series : Po= $f_c \cdot A_c$ As - Cross Sectional Area of Steel Ac - Cross Sectional Area of Concrete
CR45-30	357	3950.0	62.16	62.20	1.00	
TR45-30	357	3950.0	29.60	50.20	1.70	
CR45-60	623	3950.0	86.38	85.41	0.99	
TR45-60	623	3950.0	53.82	71.71	1.33	
SR33-00	—	3620.0	40.05	42.31	1.06	
CR33-30	357	3620.0	69.43	74.21	1.07	* Maximum Strength in Average Strain 5%
TR33-30	357	3620.0	29.38	60.01	1.91	
CR33-60	623	3620.0	93.70	94.60	1.04	
TR33-60	623	3620.0	51.03	73.20	1.43	
SR17-00	—	4098.0	89.92	116.71	1.30	
CR17-30	357	4098.0	117.61	145.75	1.24	
TR17-30	357	4098.0	27.69	111.20	4.02*	
CR17-60	623	4098.0	132.09	157.50	1.19	
TR17-60	623	4098.0	42.27	117.61	2.34*	

### 3.1 파괴상황

실험종료 후 시험체의 형상을 표시하여 각 시험체의 변수별로 파괴상황을 분석하면 다음과 같다.

중공강관 시험체의 경우에는 중앙부에 국부좌굴이 발생하여 내력이 감소하였는데 특히 SR17-00시험체의 경우에는 국부좌굴이 강관 전면에 걸쳐 면외좌굴이 발생하는 특징을 보였다.

동시가력시험체의 경우에 있어서는 국부좌굴의 발생이 대칭적이지 않았는데 이는 콘크리트의 파괴특성인 할열파괴와 전단 슬라이딩 파괴 모드 하에서 강관의 취약부에 국부좌굴이 발생하기 때문으로 판단되었다.

부분가력 시험체의 경우에는 중앙부와 단부의 사이에서 심하게 부풀어 오르는 경향이 나타났으며, TR17-30, TR17-60시험체의 경우에는 중앙부를 대칭으로 상부와 하부가 부풀어 오르는 파괴현상을 나타내는 특징이 있었다.

### 3.2 하중-평균변형 관계

그림 2, 3, 4에 각 시험체의 축방향 하중-평균 변형 관계를 각각의 변수별로 나타내었다. 그림에서 종축은 일반화 누가강도(Po)에 대하여 무차원화 한 것이며 횡축은 시험체에 부착된 변위계에 의하여 환산된 평균변형을 나타낸다. 시험체의 평균변형( $\epsilon_s$ )은  $\epsilon_s = (1/4) \sum (\Delta_i / L_i)$ 로 나타냈다. 또한 각 곡선상에 최대내력 및 항복내력을 표시하였다. 각각의 변수별 시험체의 특징은 다음과 같다.

중공시험체(SR 시리즈)의 경우에는 그림 2와 같이 최대내력이 강관의 국부좌굴에 의하여 결정되어졌는데 SR45-00의 경우에는 강도가 Po에

도달하지 않았으며, SR17-00의 경우에는 항복강도를 크게 상회하였는데 이는 강관의 국부좌굴모드가 면외좌굴로 나타났으며, 강관의 변형정화에 의한 것으로 판단되었다.

SR33-00 시험체는 항복강도 부근에서 국부좌굴에 의하여 최대내력이 결정되었다.

콘크리트와 강관을 동시에 가력한 경우(CR

시에 가력한 경우(CR 시리즈)에 있어서는 대부분 강관의 국부좌굴에 의하여 최대내력이 결정되는데, CR17-30시험체의 경우에 있어서는만은 최대내력 이후에 국부좌굴이 발생하였다.

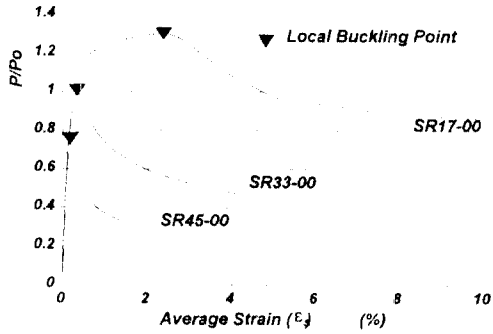
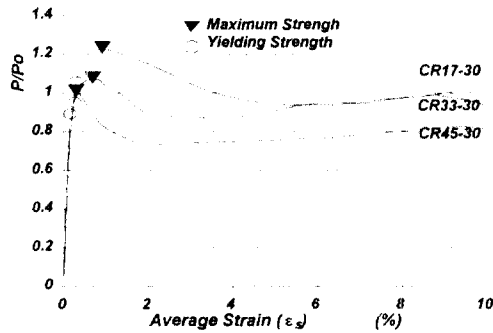


Fig. 2. Load versus Average Strain Curves under Concentric Compression Load in SR series

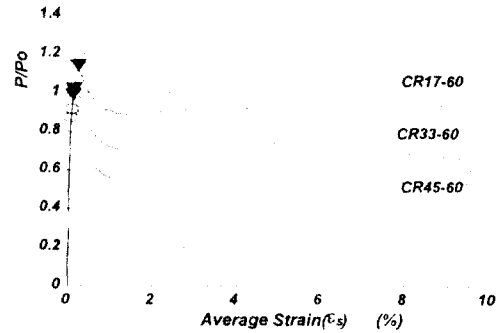
전반적으로 최대내력 이후에 하중의 저하가 발생한 후, 일정한 강도에서 대변형까지 안정적이었다. 동시가력 시험체의 최대내력에 대한 콘크리트 강도별 특성으로는, 콘크리트 강도가 높은 경우가 내력의 증가치가 작고 최대내력 이후의 하중저하 구배가 심한 것을 알 수 있었다. 또한 하중 저하 이후의 대변형 하에서의 안정적인 강도에 대한 최대강도의 비도 300kg/cm<sup>2</sup>급의 콘크리트를 사용한 시험체가 0.75~0.95로서 600kg/cm<sup>2</sup>급의 충전콘크리트를 사용한 시험체 (0.55~0.6)보다 높은 것을 알 수 있었다.

콘크리트에만 부분가력한 경우(TR 시리즈)의 시험체는 내력의 최대치가 Po를 크게 초과하였다.

강관의 폭두께비 측면에서 보면 TR17-30, TR17-60 시험체가 항복이후 대변형까지 내력이 지속적으로 증가하는 특성을 보였다.

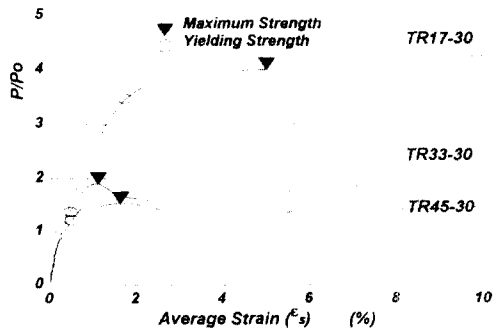


(a) concrete strength (300kg/cm<sup>2</sup>)

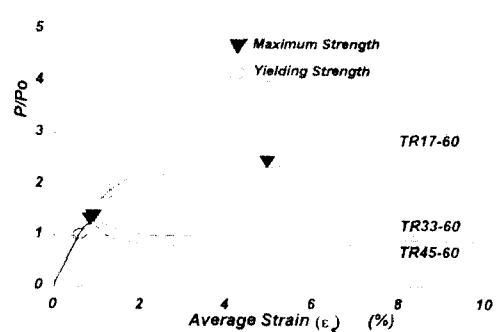


(b) concrete strength (600kg/cm<sup>2</sup>)

Fig. 3. Load versus Average Strain Curves under Concentric Compression Load in CR series

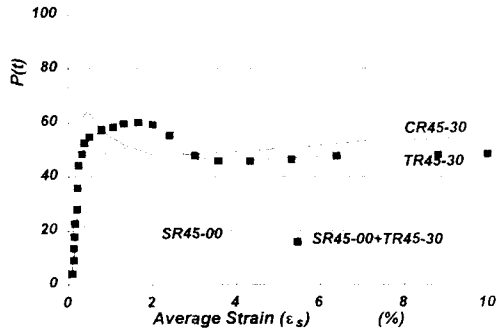


(a) concrete strength (300kg/cm<sup>2</sup>)

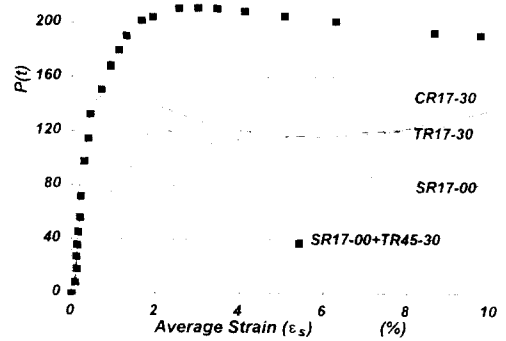


(b) concrete strength (600kg/cm<sup>2</sup>)

Fig. 4. Load versus Average Strain Curves under Concentric Compression Load in TR series



(a) Case of B/t (45)



(b) Case of B/t(17)

Fig. 5. Interaction of Concrete and Steel in Concrete-filled Rectangular Steel Columns with B/t

콘크리트의 강도 측면에서 부분가력시험체를 살펴보면, 300kg/cm<sup>2</sup> 급의 콘크리트를 사용한 경우에는 최대내력 이후에 약간의 내력저하가 발생한 후, 다시 내력이 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈으나, 600 kg/cm<sup>2</sup> 급의 콘크리트를 사용한 경우에는 최대내력 이후의 내력저하가 300kg/cm<sup>2</sup> 급의 콘크리트를 사용한 시험체 보다 컸으며, 대변형시 평균변형 6~7%정도에서 완만한 내력의 저하가 발생하는 특성을 보였다.

### 3.3 강관과 충전콘크리트의 상호작용

그림 5는 충전각형강관 시험체(CR 시리즈) 및 중공강관(SR 시리즈)과 부분가력 시험체(TR 시리즈)를 단순히 중첩한 결과를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 폭두께비 45의 경우에는 CR45-30 시험체보다 SR45-00과 TR45-30의 시험체를 단순히 중첩시킨 경우의 내력이 큰 것을 알 수 있는데 이는 강관의 국부좌굴을 콘크리트가 적절히 구속하므로써 내력이 증가한 것으로 판단된다. 폭두께비 17의 경우에는 SR17-00과 TR17-30을 단순히 중첩시킨 경우가 CR17-30시험체의 내력보다 큰 것을 알 수 있는데, 여기서는 국부좌굴의 방지에 의한 내력의 증가보다는 강관의 구속효과에 의한 내력의 증가가 큰 영향을 끼치는 것으로 판단된다.

### 4. 결 론

중심축력을 받는 충전각형강관의 응력-변형도 관계 분석하므로써 콘크리트에 의한 강관의 국부좌굴 제어효과와 특성, 콘크리트의 횡팽창에 의한 3축응력 상태가 강관의 거동에 미치는 영

향 등을 고찰하는 것을 목적으로 한 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 충전각형강관 기둥의 중심압축시의 파괴모드는 단면 비대칭의 국부좌굴에 의하여 내력이 결정된다.
- 2) 충전각형강관 기둥의 콘크리트에 대한 구속효과는 폭두께비가 클수록, 콘크리트 강도가 낮을수록 효과적이다.
- 3) 강관에 대한 콘크리트의 국부좌굴효과는 강관의 폭두께비가 클수록 효과적이다.

### 5. 참고문헌

- (1) Gil.W.Yeon et al., "An Analytical Study on the Ultimate Strength of Concrete Filled Circular Steel Considering Confinement Effect", KAI, Taejon Chungnam Chapter. Vol. 2, No. 2, Dec.12, 1994
- (2) Soo. Y, Chung, "Ductility and Strength under Uniaxial Compression", RIIT Chungnam UNV., Vol.8, No.2, Dec,1993
- (3) Harbin Architectural and Civil Engineering Institute. Pro. of the International Speciality Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures, Harbin, 1988.8
- (4) ASCCS : Proceedings of the Third International Conference on Steel-Concrete Composite Struct. Fukuoka, 1991.9
- (5) ASCCS :Proceedings of the Fourth International Conference on Steel-Concrete Composite Struct. Kosice, 1994.7
- (6) M. Tomii, "Experimental Studies on Concrete Filled Steel Tubular Stub Columns under Concentric Loading", SSRC, 1977
- (7) J.B.Mander et al., "Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete",ASCE,Vol.114, No.8, August, 1988
- (8) M. Tomii, "Investigations on Transversely Super Reinforced Concrete Structure & Concrete Filled Tube Structure", Kyushu Univ, 1988
- (9) G. P. Johnson, MA, Mice, Flstructe, "Composite Structure of steel and Concrete", 1978
- (10) R. Narayanan, " Steel Contrete Composite Structure -Stability and Strength-", 1988, E.A. Science