

# 중심축력하의 콘크리트 충전 각형강관 기둥의 비선형 해석

## Nonlinear Analysis of Concrete Filled Steel Tubular Column under Concentric Axial Load

김 선 응\* 홍 성 곁\*\*  
Kim, Seon Woong Hong, Sung Gul

### ABSTRACT

Steel-concrete composite columns are used extensively in modern buildings. Extensive research on composite columns in which structural steel are in concrete have been carried out. In-filled composite columns, however have received limited attention compared to encased columns. In this paper, interrelationship of parameters is examined into analyzing and comparing with data through ABAQUS program and experiment on concrete filled tubular column under axial load and propriety of model is checked out by FEM analysis. The main variations of this paper are width-thickness ratio of the section( $B/t=33.3, 38.9, 44.4$ ), concrete strength( $f_{ck}=240, 360\text{kgf/cm}^2$ ), and width-length ratio( $L_0/B=8.0, 10.0, 12.0, 15.0, 20.0$ ). The ultimate value obtained through analysis is compared with test value and calculated by design code of other countries and previous studies.

### 1. 서론

CFT(Concrete Filled Steel Tube)구조는 원형 혹은 각형강관 내부에 콘크리트를 충전한 구조로 강관이 내부의 콘크리트를 구속하는 합성구조이다. 이 구조는 외부의 피복없이 강관 자체가 품의 형태를 취하게 되므로 강성, 내력, 변형성능, 내화 성능뿐만 아니라 시공 측면에서도 우수한 특성을 발휘하는 구조시스템이다. 이러한 CFT구조는 경제성이 우수하며 범용성이 높아 저층의 건축물에서부터 초고층 건축물, 주거용 건축물, 업무용 건축물, 대가구 건축물에 이르기까지 작은 기둥단면으로 높은 층고와 장스팬이 가능한 구조시스템이다. 우리나라와 같이 경제성장으로 인한 대도시의 탄생으로 인한 정보와 인구의 집중, 지가 상승 및 용지난 등과 함께 삶의 질적인 향상에 대한 욕구에 의해 고층화, 대형화, 다기능화 되고 있는 추세에 적합한 시스템이라 하겠다.

\* 정희원, 서울대학교 건축학과 석사과정

\*\* 정희원, 서울대학교 건축학과 부교수

## 2. 재료시험

### 2.1 콘크리트

시험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계기준강도가 240, 360kgf/cm<sup>2</sup>로 KS F 2404에 따라 공시체를 제작하였다. 콘크리트 압축강도 시험결과를 표 1에 나타내었다. 시험결과 콘크리트 압축강도 평균치는 230, 450kgf/cm<sup>2</sup>로 다소 높게 나타났다.

표 1 콘크리트 압축강도 시험결과

설계기준강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	Average $\sigma_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$E_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
240	264.5	$2.12 \times 10^5$
360	450.4	$2.38 \times 10^5$

### 2.2 강재

콘크리트 충전강관 시험체에 사용된 강재의 기계적 성질을 파악하기 위해 KS B 0801의 금속재료 인장 시험편 규정에 따라 인장 시험편을 제작하였다. 인장 시험편은 충전강관 기둥부재의 시험체로부터 각 단면 사이즈별로 시험편을 채취하여 제작하였다. 본 실험에 사용된 강재는 SS400강재이다.

시험편은 부재의 사이즈별로 2개씩의 시험편을 제작하였다(표점거리 50mm). 시험은 KS B 0802의 금속재료 인장시험방법에 의거해 실시하였으며, 각형강관부재에 대한 재료시험결과를 표 2에 나타내었다. 시험결과 각형강관 소재의 항복강도는 3.24tf/cm<sup>2</sup>의 결과를 보였다.

표 2 각형단면 부재의 소재시험결과

시험체	A(cm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (tf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (tf/cm <sup>2</sup> )	Yield Ratio	E (kgf/cm <sup>2</sup> )	Elongation(%)
300×9.0t-1	2.25	4.58	3.04	0.66	$2.1 \times 10^6$	43.40
300×9.0t-2	2.25	4.64	3.20	0.69		43.10
350×9.0t-1	2.25	5.08	3.41	0.67		33.60
350×9.0t-2	2.25	4.83	3.27	0.68		41.80
200×4.5t-1	1.13	4.78	3.31	0.69		39.90
200×4.5t-2	1.13	4.68	3.19	0.68		38.60
average		4.765	3.24			

표 3 각형단면의 시험체 일람

시험체	B (mm)	t (mm)	$A_c$ (cm <sup>2</sup> )	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	B/t	L (cm)	$L_0/B$	concrete 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )
CC-SF1	300.0	9.0	102.7	795.2	33.3	208.4	8.0	360
CC-SF2	300.0	9.0	102.7	795.2	33.3	267.9	10.0	
CC-SF3	300.0	9.0	102.7	795.2	33.3	327.6	12.0	
CC-SF4	300.0	9.0	102.7	795.2	33.3	417.3	15.0	
CC-SF5	350.0	9.0	120.7	1102.2	38.9	248.1	8.0	
CC-SF6	350.0	9.0	120.7	1102.2	38.9	387.4	12.0	
CC-SF1A	300.0	9.0	102.7	795.2	33.3	208.4	8.0	240
CC-SF5A	350.0	9.0	120.7	1102.2	38.9	248.1	8.0	
CC-SF7	350.0	9.0	120.7	1102.2	38.9	457.2	14.0	360
CC-SF8	200.0	4.5	34.7	365.3	44.4	267.9	15.0	
CC-SF9	200.0	4.5	34.7	365.3	44.4	367.4	20.0	

### 3. 해석

#### 3.1 Element 모델링

CFT구조는 하나의 탄성계수를 가지는 철골구조와 달리 2개의 요소가 들어감으로 이를 모두 고려하기는 어렵다. 특히 비선형 해석에서의 Descending부분 정의는 더욱더 어렵다. 이를 정의하기 위해서 콘크리트 압축시험 데이터와 각형강관시편시험 데이터를 사용하였다. 콘크리트와 강관 Element는 Brick Element(20-Node), Shell Element(8-node)를 사용하였다.

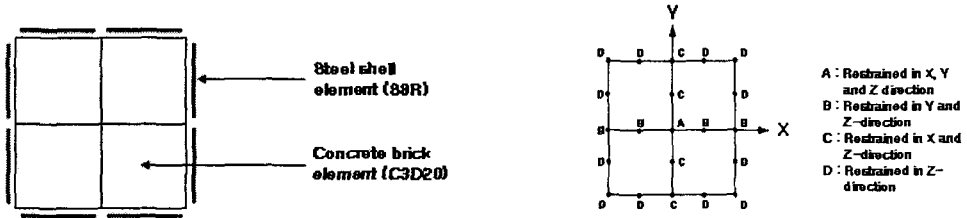


그림 1 Element

그림 2 node-direction at mid-height

#### 3.2 재료 Modelling

CFT 기둥이 축력을 받는 경우, 강관에 의해 구속된 내부 콘크리트는 초기하중에서는 포아송비가 강관에 비해 작기 때문에 횡방향으로 팽창하는 경향을 보인다. 하중의 계속된 증가로 인한 내부콘크리트의 부피팽창으로 인해 강관에 의해 구속을 받게 되고, 그로 인해 강관은 인장을 받는다. 이러한 상태가 되면 내부 콘크리트는 3축 응력상태에 놓여지며 강관은 2축 응력상태가 된다. 따라서, 실린더 실험에 의해 얻어진 uniaxial stress만 가지고 있기 때문에 이를 3축응력 값으로 변환하기 위해서 암석, 토양과 같은 재료의 3축 응력을 표현하는데 유용한 Extended Drucker-Prager model (Hyperbolic)을 사용하였다. 구조체에서는 단순히 인장응력이 허용인장응력을 초과하여 균열이 발생하는 것이 아니라 응력의 조합에 의해서 손상을 입게 된다. 따라서, 콘크리트의 파괴개념을 도입한 Smeared cracking model이나 Crack tip band model 아닌 Extended Drucker-Prager model을 채택하였다.

#### 3.2 해석제어

콘크리트의 비선형 해석을 위해 하중을 변위제어로 하였을 경우 수렴성이 우수하며, 한계 변위를 설정하는 Riks method에 비해 더 우수한 수렴성을 가진다. 따라서, 실험상황과 동일한 조건하의 변위제어(0.01mm/sec)를 통해 해석을 하였다. 또한 콘크리트 비선형 해석시에는 강성매트릭스가 대칭이 아니기 때문에 반드시 unsymm으로 하여야 한다.

하중을 가하는 표면의 국부적인 파괴를 막기 위해 실험체 표면의 node를 Rigid MPC(Multi-Point Constraint)를 사용하여 시험체 단부 각각의 절점들과 변위제어 지점의 절점을 연결시켰다.

4. 해석결과

표 4 각형단면 부재의 종국내력 결과

(단위 : tf)

시험체	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$	$N_6$	$N_7$	$N_8$	$N_9$	$N_{10}$	$N_{11}$
CC-SF1	714.22	673.79	647.0	671.0	678.58	641.04	643.50	505.0	531.01	624.86	430.37
CC-SF2	703.46	633.75	645.0	664.0	678.58	641.04	641.61	476.0	531.01	624.86	404.37
CC-SF3	722.18	687.79	642.0	651.0	678.58	641.04	638.14	448.0	531.01	624.86	379.87
CC-SF4	711.70	658.98	637.0	623.0	678.58	641.04	629.21	409.0	531.01	624.86	345.81
CC-SF5	1045.47	922.15	872.0	886.0	899.57	851.90	852.58	661.0	701.18	825.10	557.22
CC-SF6	914.82	824.16	865.0	854.0	899.57	851.90	845.59	584.0	701.18	825.10	489.83
CC-SF1A	621.07	580.44	512.0	526.0	530.76	498.84	495.71	403.0	424.23	499.20	358.32
CC-SF5A	874.0	848.54	678.0	684.0	694.67	654.15	647.73	529.0	553.18	650.94	466.72
CC-SF7	943.62	890.21	860.0	826.0	899.57	851.90	838.61	549.0	701.18	825.10	459.20
CC-SF8	271.88	251.74	263.0	261.0	277.31	263.60	259.23	166.0	214.69	252.63	136.87
CC-SF9	264.45	244.86	258.0	237.0	277.31	263.60	251.38	142.0	214.69	252.63	116.44

$N_1$  : 해석결과  
 $N_2$  : 실험결과  
 $N_3$  : Furlong(1967)  
 $N_4$  : Robert B. Knowles & Robert Park(1970)  
 $N_5$  : Ben-Katof(1995)  
 $N_6$  : Hajjar & Gourley(1996)  
 $N_7$  : Shams(1999)  
 $N_8$  : AISC-LRFD  
 $N_9$  : ACI  
 $N_{10}$  : AIJ  
 $N_{11}$  : AIK-LSD

표 5 기존연구 및 각국 설계기준과 해석결과 비

시험체	$N_1/N_3$	$N_1/N_4$	$N_1/N_5$	$N_1/N_6$	$N_1/N_7$	$N_1/N_8$	$N_1/N_9$	$N_1/N_{10}$	$N_1/N_{11}$
CC-SF1	1.10	1.06	1.05	1.11	1.11	1.41	1.35	1.14	1.66
CC-SF2	1.09	1.06	1.04	1.10	1.10	1.48	1.32	1.13	1.74
CC-SF3	1.12	1.11	1.06	1.13	1.13	1.61	1.36	1.16	1.90
CC-SF4	1.18	1.14	1.05	1.11	1.13	1.74	1.34	1.14	2.06
CC-SF5	1.20	1.18	1.16	1.23	1.23	1.58	1.49	1.27	1.88
CC-SF6	1.06	1.07	1.02	1.07	1.08	1.57	1.30	1.11	1.87
CC-SF1A	1.21	1.18	1.17	1.25	1.25	1.54	1.46	1.24	1.73
CC-SF5A	1.29	1.28	1.26	1.34	1.35	1.65	1.58	1.34	1.87
CC-SF7	1.10	1.14	1.05	1.11	1.13	1.72	1.35	1.14	2.05
CC-SF8	1.03	1.04	0.98	1.03	1.05	1.64	1.27	1.08	1.99
CC-SF9	1.03	1.12	0.95	1.00	1.05	1.86	1.23	1.05	2.27

5. 결론

중심축력을 받는 콘크리트 충전 각형강관기둥의 비선형 해석에 관한 FEM해석에 의해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) FEM해석으로 얻어진 CFT기둥의 응력-변형률 곡선은 실험과 유사한 거동을 보였다.
- (2) 해석결과를 기존 연구식들과 비교해보면 유사한 결과치를 보이고 있으나, ACI, AISC는 다소간의 안정치를 두고 있음을 알 수 있고 AIJ는 해석이나 기존 연구식들과 비슷한 결과를 나타내었다. 그러나 AIK-LSD는 과도한 강성의 여유를 두고 있었다.
- (3) 콘크리트 강도가 증가함에 따라 기둥의 강도상승폭이 감소를 나타내었다.

참고문헌

1. Shakir-Khalil H, Al-Rawdan A. In: Buckner D, Shahrooz BM, editors. Experimental Behavior and Numerical Modelling of Concrete Filled Rectangular Hollow Section Tubular Columns, Composite construction in Steel and Concrete 3, Newyork:ASCE(1994).
2. Concrete Filled Steel Tubes, A Comparisio of International Codes and Practices, Published by ASCCS.