

기둥의 철근비와 축변형량이 보 해석에 미치는 영향 연구

Effect of Longitudinal Reinforcement Ratios and Axial Deformation on Frame Analysis in RC Columns

장 원 석*

민 창 식**

Jang, Won Seok

Min, Chang Shik

ABSTRACT

This paper is to study the effect of longitudinal reinforcement ratios and axial deformation on the frame analysis in reinforced concrete(RC) columns and to investigate the effect of confined concrete core, the length-width ratio and longitudinal steel ratios on frame analysis in Concrete-Filled steel Tubular(CFT) columns. An equation is derived to evaluate the modulus of elasticity for core concrete. The 34 reference data have been collected for the purpose and are processed by the mean of a multiple regression analysis technique. The equation and longitudinal reinforcement ratios was applied to RC columns for structural analysis. Then, the difference of beam moment was identified. In general, the results of analysis was indicated reasonable differences in beam moment, in case of longitudinal reinforcement ratios applied to RC columns when compared with the plain concrete columns. In CFT columns the equation was also applied in order to the effect of confined concrete core on structural analysis. Beam moment was increased as volumetric ratio of lateral steel was decreased. The effect of longitudinal steel ratios was investigated in CFT columns and was confirmed beam moment variety. The result was appeared reasonable difference in beam moment as longitudinal steel was increased.

1. 서 론

철근콘크리트 기둥에 대한 구조해석시 현재 실무에서는 기둥의 단면강성을 임의대로 크게 하여 탄성축소량이 생기지 않게 구조해석을 수행하거나 혹은 탄성축소량을 고려하더라도 철근의 강성을 무시한 채로 콘크리트 단면의 강성만을 고려하여 해석을 수행하고 있다. 철근의 강성을 고려하지 않는 이유는 철근에 의한 강성의 차이가 미소할 뿐만 아니라 부재력에 따라 변화되는 철근량을 정확히 반영하기가 어렵기 때문이다. 그러나, 실제로 철근콘크리트 구조물에서 기둥은 가로 보강재(Transverse reinforcement)에 의한 구속력과 수직 철근비의 영향으로 축소량과 강성이 변할 것이다. 그러므로, 이 점을 고려하여 구조해석을 수행한다면 실무에서의 해석결과로부터 발생하는 문제를 최소화시킬 수 있을 것으로 판단된다. CFT(Concrete-filled steel tubular) 기둥의 탄성계수는 철근콘크리트기둥과 마찬가지로

* 정회원, 동국대학교 토목환경공학과 공학석사

** 정회원, 동국대학교 토목환경공학과 교수

가지로 강관의 체적률에 의한 구속효과 때문에 코아콘크리트 탄성계수 E_{cc} 가 증가하므로 기둥의 탄성계수가 증가하고, 강관의 철골비의 영향으로 CFT 기둥의 탄성계수가 변할 것이다 (Okamoto & Maeno, 1988).

본 연구에서 철근콘크리트 기둥에 대해서는 문헌자료를 이용하여 가로 보강재의 구속력과 수직 철근비에 의한 축소량 및 강성의 효과를 고려한 구조해석의 필요성을 제시하고, CFT 기둥에 대해서는 실험과 문헌자료를 기초로 강관의 구속 효과와 철골비를 고려한 구조해석을 통하여 설계에 필요한 기초자료를 제시하고자 한다.

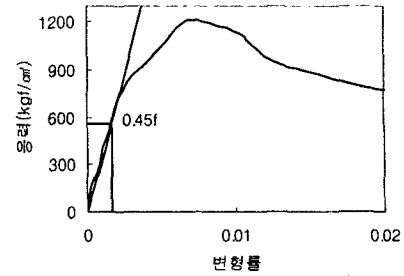


그림 1 응력-변형률 곡선(Li Bing, 시편2C)

2. 문헌자료 및 실험연구

2.1 철근콘크리트 기둥의 참고문헌 연구

본 연구에 이용된 자료는 본 연구에서 수행한 표준공시체 실험 3개를 포함하여 총 34개의 data를 이용하였다(표1참고). 체적률 ρ_s 는 가로보강재로 구속되어 있는 코아콘크리트의 체적에 대한 가로보강재의 체적비이다.

구속된 코아콘크리트의 탄성계수는 ACI 318-99에 준하여 응력-변형률 곡선에서 $0.45f'_c$ 와 원점을 잇는 기울기인 할선탄성계수로 하였다(그림1참고).

2.2 코아콘크리트 탄성계수(E_{cc}) 추정식 제안

Microsoft Excel의 회귀분석을 이용하여 E_{cc} 를 추정하는 식을 제안하였다. 수집된 전체 34개의 자료를 기초로 다중회귀분석을 실시한 결과는 다음과 같다. 결정계수와 조정된 결정계수는 0.69와 0.68이고, 다중상관계수는 0.83으로서 0.8보다 크므로 강한 상관계수를 보였다. 유의한 $F=5.64^{-9}$ 는 유의수준 $\alpha=0.05$ 보다 작으므로 회귀식에는 의미가 있다고 할 수 있다. E_{cc} 에 대한 영향력을 판단하는 대소는 t통계량에 의해 판단할 수 있는데, 설계기준강도의 t통계량은 7.98로서 체적률의 t통계량 2.80보다 2.85배 더 크므로 설계기준강도가 체적률보다 큰 영향력을 미치고 있음을 알 수 있다. 회귀분석결과 얻어진 E_{cc} 의 추정식은 식 1과 같다.

$$E_{cc} = 304f_{ck} + 20604 \rho_s + 114821 \quad (1)$$

여기서, ρ_s :체적률(%), E_{cc} :구속된 코아콘크리트의 탄성계수(kgf/cm²)

2.3 코아콘크리트와 콘크리트 탄성계수의 비교

식 1에서 체적률을 일정하게 증가시키면서 설계기준강도와 E_{cc} 의 관계를 그림 2에 나타내었다. 그리

표 1 구속된 코아콘크리트의 실험결과(문헌자료)

실험자	형상	시편	f_{ck} (kgf/cm ²)	ρ_s (%)	E_{cc} (kgf/cm ²)		
지달영 (1989)		CA3-4	210	3.31	259,000		
		CA3-2			261,000		
		CA4-4			258,000		
		CB3-2			262,000		
		CB3-4			262,000		
이장건 (1990)	직사각형	HCD1	420	2.73	313,000		
		HCB1			215,000		
		HCF1			234,000		
		HCC1			239,000		
		HCA3			283,000		
		HCE4	289,000				
		HCD2	225,000				
		HCB2	181,000				
		HCF2	1.36	225,000			
		HCC2	230,000				
주진욱 (1999)		L8S-C	200	2.25	258,000		
		H8S-C	500		340,000		
Li Bing 등 (2000)		2C	765	4.48	499,000		
		1C			2.63	500,000	
		5C			2.56	418,000	
		8C			1.79	395,000	
		4C			1.50	364,000	
		11C			1.38	343,000	
		7C			1.05	360,000	
		10C	0.08	338,000			
		3HB2	530	2.86	311,000		
		1HC2	841	5.00	470,000		
		3HC2		2.86	425,000		
		원형		2HC2	765	2.94	410,000
				4HB2			1.68
6C	1.53			520,000			
12C	0.82			280,000			

고, 가로보강재의 구속효과를 확인하고자 콘크리트구조설계기준(1999)에서 제안하고 있는 콘크리트 탄성계수 E_c 와 f_{ck} 에 따른 양상을 살펴보았다. 체적률의 효과로 인하여 E_{cc} 는 콘크리트구조설계기준에서 제안하고 있는 E_c 보다 클 것으로 예상을 하였지만, 그림 2에서와 같이 E_{cc} 에서 체적률이 2%일 때 기준으로 하여 콘크리트 탄성계수는 f_{ck} 가 200~450kgf/cm²범위에서 높음을 보이다가 이 외의 범위에서 낮음을 보였다. 이것은 표 1에서 이강건(1990)의 자료 중 7개가 고강도 콘크리트이지만, 콘크리트구조설계기준에서 제안하고 있는 E_c 보다 작은 값을 나타내었기 때문으로 판단된다.

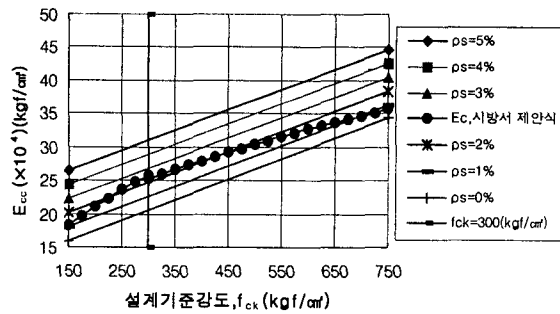


그림 2 코아콘크리트와 콘크리트 탄성계수의 비교

2.4 철근콘크리트 탄성계수 이론식

철근콘크리트 재료의 탄성계수는 철근콘크리트에 하중이 수직으로 작용할 때 이 하중에 대한 콘크리트와 철근에 관한 평형방정식과 적합방정식을 이용하여 이론식으로 나타내었다. 그리고, 철근콘크리트의 탄성계수는 수직 철근비를 고려한 가로 보강재로 구속된 코아콘크리트와 철근의 탄성계수 합으로 표현되는 식 2로 나타낼 수 있다.

$$E_c^* = E_{cc}(1 - \rho) + E_s \rho \quad (2)$$

여기서, E_c^* : 철근콘크리트의 탄성계수(kgf/cm²), E_s : 철근의 탄성계수, ρ : 철근비

2.5 CFT 기둥의 참고문헌 및 실험연구

2.5.1 참고문헌 연구

본 절에서 인용된 자료는 표 2에 나타내었다. 여기에서, 철골비는 철근콘크리트 기둥에서의 철근비와 같은 개념으로, CFT의 철골비는 시편의 전단면적 A_g 에 대한 강관 단면적 A_s 의 비이다. L/D비는 시편의 길이 L에 대한 단면 폭 D의 비이다. 표 2에 인용된 E_{cft} 는 CFT의 탄성계수이다.

강창훈의 실험결과에서 시편 H4가 H8보다 1.11배 크고 N4가 N8보다 1.38배 큰 값을 나타낸 것은 L/D비가 작을수록 탄성계수가 커짐을 알 수 있다.

그리고, H4가 N4보다 1.09배 크고, H8이 N8보다 1.36배 큰 값을 나타낸 것은 f_{ck} 가 클수록 탄성계수가 큰 값을 나타낸 것으로 판단된다. Usami와 Ge의 실험결과에서는 동일한 조건에서 철골비와 f_{ck} 가 커질수록 탄성계수는 증가함을 알 수 있다. 그러므로, CFT에서는 L/D비, f_{ck} , 철골비가 탄성계수에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

표 2 CFT 기둥의 실험결과(참고문헌)

실험자	시편	L/D	f_{ck} (kgf/cm ²)	철골비(%)	E_{cft} (kgf/cm ²)
강창훈	H4	4	500	13.90	541,000
	H8	8			354,000
	N4	4	200		510,000
	N8	8			321,000
Ge &	U12-HC	3	490	6.70	460,000
	U12-C		410		443,000
Usami	U15-C			5.39	419,000

2.5.2 실험연구

CFT 기둥과 표준공시체를 각각 3개씩 제작하여 실험하였고, 실험결과로부터 철골비의 영향으로 인한 탄성계수를 조사하였다.

(1) 시편 및 실험계획

본 실험에서 제작한 CFT 기둥의 강관 두께는 4mm이고, 보강재를 포함한 철골비 8.24%를 고려하였다. 철골비를 고려하지 않은 콘크리트의 탄성계수를 측정하기 위하여 표준공시체를 제작하였다. 시편

의 설치상황은 그림 3과 같으며 CFT 기둥의 단면은 200mm*200mm*400mm이고, 표준공시체의 크기는 150mm(직경)*300mm(높이)이다. 시편의 제작방법은 강판을 절곡한 후 모서리와 밑면을 용접으로 맞댄이

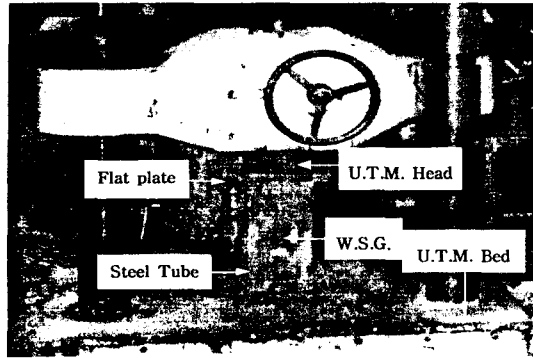
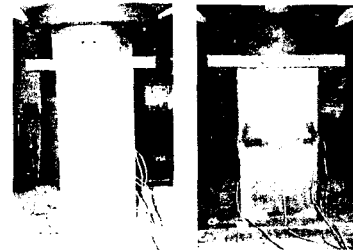


그림 3 시편의 설치상황



(a)실험전 (b)실험후
그림 4 시편(ST#3)의 양상(본실험)

음하였다. 강관의 조기 좌굴과 지지단에서의 좌굴을 방지하기 위하여 도로교설계기준(2000)에 준하여 강관의 4면 내부에 보강재(2mm*30mm)를 부착하였다. 콘크리트는 최대 골재 직경 25mm, 슬럼프 12cm, 공기량 5%, 물-시멘트비 55%, 설계기준강도 240kgf/cm²인 콘크리트를 사용하였고, 실험시까지 증기양생을 7일간 실시하였다. 시편에 사용된 강판은 SS400을 사용하였다.

(2) 실험결과 및 분석

본 연구실험을 통한 할선탄성계수의 측정은 파괴하중의 40%를 최대하중으로 하여 구하였고, 결과는 표 4에 나타내었다. 시편의 실험전과 후의 양상은 그림 4에 나타내었다. 좌굴현상은 최대하중 전에 4면에서 발생하였고, 모든 면에서 외부방향으로 생겼다. 본 실험에서 철골비를 고려한 CFT 기둥의 탄성계수(평균)는 무근콘크리트의 탄성계수(평균)보다 1.69배 크다. CFT 기둥과 무근콘크리트의 탄성계수 차이는 철골비와 강관의 구속력으로 인한 영향으로 판단된다.

표 3 표준공시체와 CFT 기둥의 실험결과(본 연구실험)

시 편	L/D	f _{ck} (kgf/cm ²)	철골비(%)	E _c (kgf/cm ²)	E _{ct} (kgf/cm ²)
CON#1	2	240	-	235,000	-
CON#2				244,000	
CON#3				264,000	
평균				248,000	
ST#1	2	240	8.24	-	377,000
ST#2					393,000
ST#3					487,000
평균					419,000

3. 구조해석 및 결과 분석

식 1의 E_{cc}를 일정하게 한 후 식 2에 대입하여 수직철근비에 따른 철근콘크리트 탄성계수를 구하였고, 이 탄성계수를 철근콘크리트 기둥에 적용하여 구조해석을 하였다. CFT 기둥에 대해서 강관의 체적률에 의한 E_{cc}는 제안한 식 1를 이용하였다. 모델은 20층 구조물을 선정하였고, MIDAS GENw 4.2.2 프로그램을 이용하여 시공단계별하중에 의한 구조해석을 수행하였다.

3.1 철근콘크리트 기둥 구조해석

3.1.1 모델 및 재료특성

모델의 층고는 3.5m, 기둥의 단면과 가로보의 단면은 각각 0.7m*0.7m, 0.4m*0.7m이고, 슬래브와 전단벽의 두께는 각각 0.12m, 0.2m이다. 모델에 대한 평면도와 전체 구조물은 그림 5와 그림 6에 나타내었고, 해석의 편의상 모든 층의 층고와 부재 단면은 일정하게 하였다. 본 연구에서 구조해석시 적용한

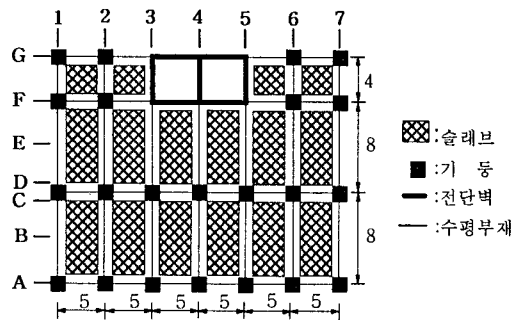


그림 5 구조물 평면도(단위:m)

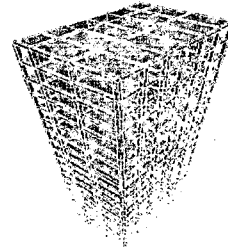


그림 6 전체 구조물

철근비에 따른 철근콘크리트 탄성계수는 표 4와 같고, 탄성계수는 식 1에 체적률 2%와 설계기준강도 240kgf/cm²를 고려하여 식 2에 대입하여 구하였다.

표 4 Case별 철근비에 따른 철근콘크리트 탄성계수

구분	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
철근비(%)	0	2	4	8	∞
탄성계수, E_c^* (kgf/cm ²)	2.29×10^5	2.64×10^5	3.00×10^5	3.71×10^5	∞

3.1.2 결과분석

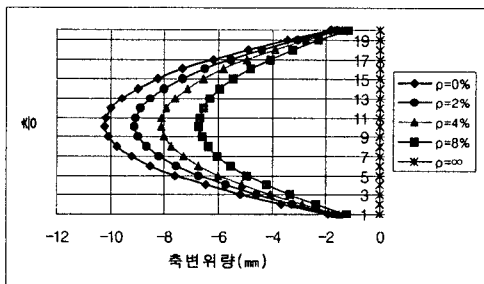


그림 7 철근비에 따른 축변위량(4열C기둥)

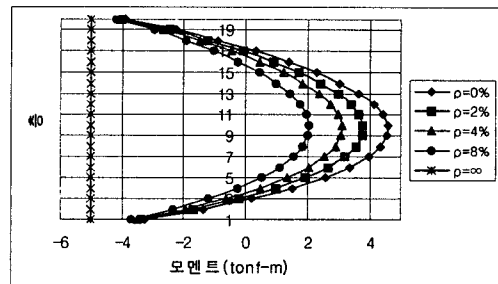


그림 8 철근비에 따른 휨모멘트(4열C)

철근비에 따른 축변위량과 휨모멘트는 그림 7과 8에 나타내었다. 위치별(10층)로 Case3을 기준으로 Case1과의 휨모멘트 차이를 비교한 결과, Case3인 경우에 4열A에서 10%, 4열C에서 50%, 4열F(전단벽)에서 30%, 4열B에서 3%의 작은 값을 나타내었다. 철근비를 고려한 Case2~Case4의 해석결과는 부등처짐에 의한 영향이 부가되어 외부기둥(4열 A)에서는 Case5에 비해 2~2.5배 정도의 모멘트가 추가 발생하고 보 중앙부(4열 B)에서는 약 1.1배 정도의 정 모멘트가 발생하였다. 그리고, 내부기둥(4열 C)에서는 부등처짐에 의해 오히려 정상적인 부모멘트 보다 큰 정모멘트가 발생됨을 알 수 있다.

각 Case별로 비교해 본 결과 기둥의 철근비가 증가함에 따라 기둥의 강성이 커지기 때문에 보의 휨모멘트는 감소하였다. 이와 같이 실무에서 일부 사용하고 있는 방법인 수직부재의 축 강성을 인위적으로 키우거나 수직 변위를 구속하는 방법 또는 철근비를 고려하지 않은 단면을 사용하여 구조해석을 할 경우 부재력 산출결과에 문제가 생길 것으로 판단된다. 그러므로, 구조해석을 할 때 이러한 문제점을 최소화시키기 위해서는 철근비를 고려한 해석이 타당할 것으로 판단된다.

3.2 CFT 기둥 구조해석

강관의 구속력 때문에 생기는 E_{cc} 의 증가로 인한 가로보의 휨모멘트를 확인하기 위하여 CFT 기둥

의 단면은 동일하게 하였다. 그리고, 체적률에 의해 생기는 E_{cc} 를 적용하기 위하여 식 1에 f_{ck} 는 240kgf/cm²로 하고 체적률 3%, 4%와 8%를 고려하였다. 철골비의 영향을 확인하기 위하여 CFT 기둥의 전체 단면적은 같게 하고 강관의 두께를 변화시켜 구조해석을 수행하였다. 기둥은 SRC(Steel-Reinforced concrete) 단면을 사용하였고 강관의 재질은 SS400이다.

3.2.1 재료특성

표 5 체적률에 따른 CFT 기둥의 코아콘크리트 탄성계수

체적률(%)	3	4	8
f_{ck} (kgf/cm ²)	270	350	700
E_{cc} (kgf/cm ²)	2.46×10^5	2.66×10^5	3.48×10^5

표 6 철골비에 따른 CFT 기둥 강관의 두께

구분	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
철골비(%)	1	2	4	8	10
두께, t(mm)	18	35	71	107	180

3.2.2 결과분석

(1) 체적률을 고려한 해석

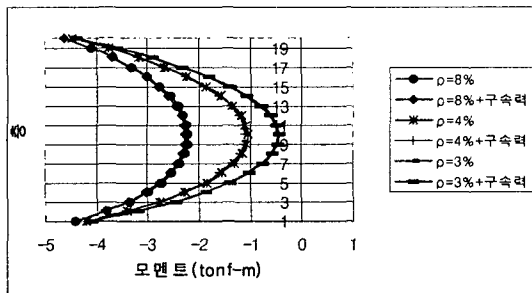


그림 9 체적률의 구속력에 따른 휨모멘트(4열C)

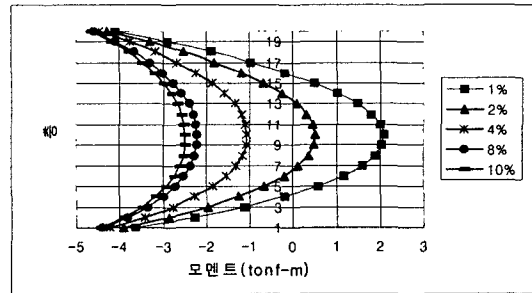


그림 10 철골비에 따른 층별 휨모멘트(4열C)

CFT 기둥에서 강관의 구속력으로 인한 E_{cc} 의 증가는 체적률이 작을수록 효과가 있으며, 체적률이 클수록 강관의 강성이 상대적으로 커지기 때문에 강관의 구속력 효과가 크게 나타나지 않는 것으로 판단된다(그림9참고).

(2) 철골비를 고려한 해석

각 Case별로 비교해 본 결과 CFT 기둥의 철골비가 증가함에 따라 기둥의 강성이 커지기 때문에 보의 휨모멘트는 감소하였다. 그러므로, CFT 기둥에 있어서 철골비에 따라 기둥의 강성이 달라지기 때문에 휨모멘트가 변하는 것으로 보아, 철골비는 기둥 전체의 탄성계수에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다(그림 10 참고).

4. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 다중회귀분석 결과 f_{ck} 와 체적률에 따라 E_{cc} 는 변화함을 알 수 있다.
- (2) 다중회귀분석에서 구한 E_{cc} 는 체적률의 구속효과 때문에 E_c 보다 큼을 알 수 있다.
- (3) 구조해석결과 RC 기둥은 철근비에 따라 가로보의 휨모멘트가 큰 차이를 보였다.
- (4) CFT 기둥은 체적률이 작을수록 구속효과가 있으며, 철골비가 클수록 기둥의 강성이 커진다.

참 고 문 헌

1. Ge, H. and Usami, T., "Strength of Concrete-filled Thin-walled Steel Box Columns: Experiment," ASCE, Journal of Structural Engineering, V.118, No.11, Nov.1992, pp.3036-3054.
2. Li Bing, R. Park, and H. Tanaka, "Constitutive Behavior for Hing-Strength concrete under Dynamic Load," ACI structural Journal, V.97, No.4, 2000, July-August, pp619-629.