



시공단계를 고려한 피복충전형 콘크리트충전 각형기둥의 구조적 거동 분석

김선희¹ · 염경수² · 최성모^{3*}

¹공학박사, 서울시립대학교, 건축공학부, ²소장, (주)하모니구조엔지니어링, ³교수, 서울시립대학교, 건축학부

Structural Behavior Analysis of Concrete Encased and Filled tube Square Column with Construction Sequence

Kim, Sun Hee¹, Yom, Kong Soo², Choi, Sung Mo^{3*}

¹Ph.D., Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

²Project Manager, Harmony Structural Engineering, Seoul, Korea

³Professor, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

Abstract - Constructions of buildings downtown are increasing as much as ever with a strong demand. Top-Down Method is suitable for its advantage in minimizing its disturbance to the neighborhood. Pre-founded when applied to CFT Column on-site welded is required for splicing. To complement the welded built-up square composite Column was developed. Top-down process will be pouring concrete in accordance with a step-by-step process. Thus, Pre-founded Column and cover concrete to determine the stress condition. Therefore, Concrete filled steel square tubular columns encased with precast concrete were studied. Five Centrally loaded Columns were tested to investigate the axial load carrying capacity. we analyzed the strength and behavior of CET Column by Loading conditions and concrete strength, thickness of cover concrete through structure experiments.

Keywords - Concrete-Encased and filled type, Welded built-up square column, Loading condition, Stress, Pre-load

1. 연구배경 및 목적

기초기둥의 부재로서 기존에는 H형강 기둥이 보편적으로 사용되고 있지만 근래에는 시공적, 구조적, 경제적인 측면에서 H형강 기둥보다 축 방향성이 없고 단면의 효율이 높은 CFT(Concrete Filled steel Tube)기둥의 사용이 주목받고 있다. 그 중 각형 CFT기둥은 바닥구조와의 접합이 원형 CFT기둥보다 용이하며, 가설기초를 위한 PRD(Percussion Rotary

Drill)의 천공도가 소구경으로 시공이 가능하다. 이렇듯 기초 기둥 단면을 경제적으로 설계함에 있어 콘크리트 피복 충전강관(CET: Concrete Encased and Filled tube)기둥은 시공의 편의와 합리적인 설계가 가능하다^{[1],[2]}. 전 층을 콘크리트 충전강관(CFT: Concrete filled tube)기둥이 선(先)기둥으로 시공되고 이어서 소요하중이 많이 부담하는 하부층 기둥에는 추가적인 콘크리트 피복을 할 경우, 필요에 따라 부분시공이 가능해 진다. 고층부의 기둥은 선 기둥인 CFT기둥으로만 시공이 완료되고 저층부의 경우 CFT기둥 외부에 콘크리트를 피복하여 적절한 구조적 역할을 하도록 설계된다^{[3],[4],[5]}. Fig. 1과 같이 시공단계에 따라 콘크리트가 타설되므로 기둥 단면상태에 변화가 생긴다. 즉, 선기둥에 타설된 콘크리트와 시공 도중에 피복되는 콘크리트의 응력상태에 대해 검토할 필요가 있다. 선기둥에 타설된 콘크리트는 외부강관과 같이 시공하중을 저항하다가, 후 피복되는

Note.-Discussion open until August 31, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 15, 2014; revised October 7, 2014; approved on November 17, 2014.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-6490-2759 Fax. +82-2-6490-2749

E-mail. smc@uos.ac.kr

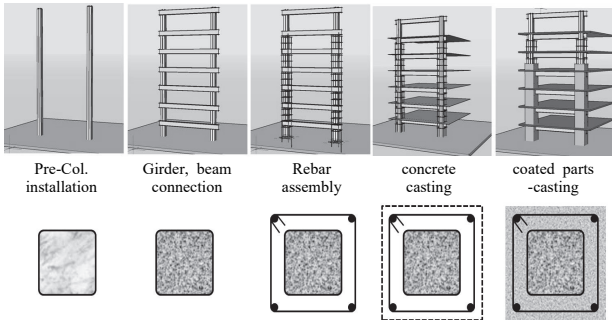


Fig. 1. Column cross section according to construction sequence

콘크리트에 의해 일부 하중이 분담된다. 이때 하중에 의해 응력분담에 제대로 이뤄졌는지, 후 피복된 콘크리트와 선기둥은 하나의 매개체로 다뤄져도 무관한지에 대해서 설계 시공지침서가 없다. 국내·외에 피복층전형 기둥의 구조적 성능에 따른 연구는 다양한 시각에서 고찰될 필요가 있으며 특히, 콘크리트 응력상태에 대해서는 명확한 근거를 파악하기에는 부족한 상황이다. 따라서 최근 사용이 활발한 각형 용접조립각형 강관 기둥 단면을 역타용 선 기초기둥으로 사용할 경우 사용성 및 안정성을 평가하기 위해 구조적 실험을 진행 하였다. 가력방법, 내외 콘크리트 강도, 피복두께 변수를 갖는 실험체를 제작하여 내력과 파괴거동을 분석하고자 한다.

2. 피복층전형(CET) 기둥 선행연구

Tsuda and Matsui(1987)^[6]는 압축력을 받는 일반강관, CFT 그리고 CET기둥 실험연구를 통해 각각의 파괴거동과 내력을 비교하였다. 주요변수는 형상(각형, 원형)과 폭두께비(25~138)이다. CFT와 CET기둥에 충전된 콘크리트의 응력변형률 선도는 확연히 다른 양상을 보이는데 이런 이유는 콘크리트의 구속력에 의한 결과로 분석하고 있다.

Park(2011)^[7]은 강·합성 원형기둥의 구속효과를 고려한 거동특성 및 강도평가연구를 수행하였다. 원형단면을 갖는 CFT 압축부재와 CET 압축부재의 경우, 각각의 설계기준은 콘크리트의 구속효과를 충분히 반영하지 못하여 구속효과에 의한 강도 상승효과를 과소평가하고 있음을 실험과 해석을 통하여 확인할 수 있었다. 또한 CET 압축부재의 경우, 콘크리트 피복 증가로 인해 강도와 모멘트는 완만한 증가가 나타나며, 피복 콘크리트의 탈락이후 소성변형이 시작되는 유효 압축하중은 내부 CFT 단면의 하중-변위 관계와 동일한 거동을 확인할 수 있었다.

Sun(2010)^[8]은 CFT와 CET기둥의 정적 재하실험을 통해 하중-변위 및 파괴거동을 분석하였다. 주 철근과 띠철근을 대체한 CET는 초기탄성구간에는 RC와 마찬가지로 선형으로 증가하지만 항복이후의 거동은 연성적으로 평가되었다. 또한 강도 상승효과에 합리적인 폭두께비는 25~50인 것으로 분석되었다.

앞서 요약한 CET기둥의 연구 외에도 실험, 이론에 의거한 연구가 소개되고 있다. 하지만, 연구의 초점은 피복되는 콘크리트의 박리를 방지하는 목적으로 국한되어 있었다. 또는 CET기둥의 비교 대상으로 CFT기둥과의 축 내력 거동을 분석한 연구가 주로 다루지고 있다. 즉, CET기둥은 CFT기둥과 비교되어 효율적인 단면구성에 대한 연구와 충전된 콘크리트의 구속력에 의한 실험적 연구는 충분히 다루어져 왔다. 하지만, CET기둥의 시공단계에 따른 콘크리트 응력상태에 관한 연구는 전무한 상태이다. 실제 현장에서는 피복 층전형 기둥을 시공할 때 단계별로 내력을 평가하여 설계되고 있지 않다. 현장에 발생하는 사고의 절반 이상은 시공 도중에 일어나며^[9], 시공 단계별 기둥의 응력상태 확인은 필수적인 과제로 판단된다.

3. 구조실험 계획

3.1 실험개요

실험체는 총 5개를 제작하였으며 Table 1에 부재 일람을 정리하였다. 주요변수는 재하조건 방법, 내·외부 콘크리트 압축강도, 피복두께이다. 선 기둥 형상은 Fig. 2와 같이 용접조립형 콘크리트 충전강관 기둥을 사용하였다. 선 기둥은 4개의 강관을 ㄱ형으로 절곡하는 방식으로 제작성을 높이고 모서리의 응력집중을 피하기 위해 기둥 중앙부에 용접부를 위치한 형상이다. 선 기둥의 폭은 160mm 강재두께는 3.2mm이다. 강관의 폭두께비(b/t)는 48이며 SS400강종을 사용했으므로 폭두께비 한계치($2.26 \sqrt{E_s/F_y}$)인 56.7보다 작으므로

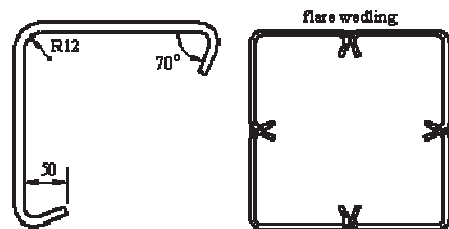


Fig. 2. Base column shape(Welded built-up section)

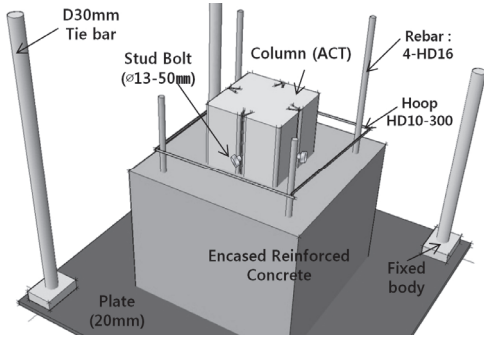


Fig. 3. Specimen concept

로 컴팩트 단면영역에 포함된다. 피복된 부분까지 포함한 전체 폭은 340mm이며 피복부만 해당하는 면적은 89,558mm²이다. 선 기둥단면의 재료에 따른 면적을 보면 강재단면적(As)은 2,346mm², 콘크리트 단면적(Ac)은 23,165mm²이다. KBC2009-0709^[10] 충전형 합성기둥의 경우 강관의 단면적은 합성 전 단면적의 1% 이상으로 설정하라고 제한되어 있다. 본 실험체의 경우 강재비는 2.03%수준으로 규준에 만족된다. 실험체 형상 개념도는 Fig. 3에 도식화 하였다.

실제 선 기둥은 일정하중을 받는 상태에서 시공이 이뤄지므로 현장여건과 동일한 구조실험을 진행하고자 직경 30mm의 긴장재를 각 단부 네 모서리에 설치하여 선 기둥이 받을 수 있는 단면강도(Po)의 50%만큼 선 가력(pre-load)했다. 길이를 고려하지 않은 단면강도 산정은 식 (1)과 같다. 이때 적용된 재료강도는 설계 강도이다. 예를 들어 2-30-90실험체의 경우 단면강도는 1,142kN이므로 선 가력량은 약 571kN이 된다.

$$P_o = A_s F_y + A_{sr} F_{ry} + 0.85 A_o f_{ck} \quad (\text{단, 각형}) \quad (1)$$

긴장재 하나에서 받는 인장력을 감안하여 상부 플레이트

에 직경 50mm의 나선선이 있는 헤드를 용접하였다. 또한 유압에 의해 인장력이 가해진 긴장재 하부에는 슬립을 최소화 하고자 쇄기형태의 정착장치를 설치하였다. 선 기둥(CFT)과 콘크리트의 일체성을 위해 스테드 볼트(ø13-50mm)를 각 기둥 한 면당 1열로 3개씩 배치하였다.

3.2 가력방법에 따른 응력흐름

선 기둥의 하중 경계조건을 재연하고자 선 기둥에 일정 하중을 가력 한 뒤 강관 외부에 콘크리트를 피복하였다. 최종

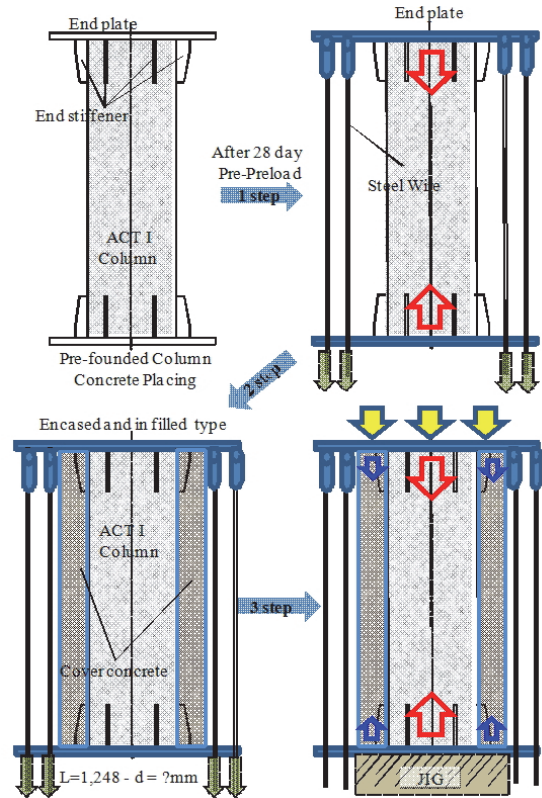


Fig. 4. Stress flow

Table 1. Specimens list

No.	Name	B_inner	t_inner	L	B_outer	As_tube	As_bar(Ar)	Ac_act	Ac_protect	Preload
	Unit	mm	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	kN
1	1_30_90	160	3.2	560	340	2,346	163	23,165	89,558	-
2	1_50_90	160	3.2	560	340	2,346	163	23,165	89,558	-
3	2_30_90	160	3.2	560	340	2,346	163	23,165	89,558	571.01
4	2_50_90	160	3.2	560	340	2,346	163	23,165	89,558	767.91
5	2_50_110	160	3.2	560	360	2,346	163	23,165	118,358	767.91

2-50-90
 → Covering depth(mm)
 → Concrete Strength of Pre-founded column(MPa)
 → 1: Uniform Load, 2: Preload + Uniform load



① Base column ② Installation of stud and anchorage ③ Concrete casting at base column ④ Pre-loading ⑤ Assembly of form ⑥ Encased concrete

Fig. 5. Production sequence

단계에서는 CET기둥 전체에 등분포하중을 가하여 내력과 거동을 분석하고자한다. 이런 단계별 진행은 크게 4단계로 도식화하여 Fig. 4에 정리하였다.

실제 실험체의 제작순서는 Fig. 5에 정렬하였다. step 1) 선 기둥(CFT)에 콘크리트 타설, 양생한다. step 2) 직경 30mm 긴장재를 활용하여 4면에서 Pre-load를 가한다. 이때 선 기둥은 내력을 받고 있는 상태이므로 인장력이 손실되지 않도록 고정하였다. step 3) 거푸집 설치 이후 계획된 피복두께 만큼 콘크리트를 타설하고 양생한다. step 4) 980kN UTM에서정적 등분포 재하하여 부재의 최종파괴거동을 확인한다. 선 기둥에 Pre-load를 가하지 않는 1, 2번 실험체의 경우 step 2를 거치지 않고 동일하게 적용하였다.

3.3 측정위치 및 경계조건

부재의 변형과 거동을 분석하고자 일축게이지를 다음 Fig. 6과 같이 선 기둥 강관면, 피복 콘크리트면에 부착하였다. 선 기둥 강관에 부착된 스티드 볼트(Ø13-50mm)를 피해 축 방향과 횡 방향으로 총 4곳을 측정하였으며 Pre-load를 가한 긴장재 중앙에 길이방향으로 변형률 게이지를 부착하였다. 정착구 및 돌출된 강봉의 간섭 없이 실험체에 하중을

가력하기 위해 활차위에 별도의 지그(Jig)를 설치하였다.

3.4 재료시험 및 결과

실험체 제작에 사용된 모든 강재는 SS400이며, 재료시험은 KS D 0801 5호 시험편을 이용하여 수행하였다. Table 2와 같이 3.2mm 강재에 대해 평균 항복강도(Fy)는 350MPa, 인장강도(Fu)는 410MPa로 평가 되었다.

사용된 콘크리트는 두 가지 타입으로 설계 압축강도는 30, 50MPa 이다. 콘크리트 압축강도(fck) 평가는 공시체 직경100mm 높이 200mm로 제작되었으며 Table 3과 보정 계수(0.97)를 고려한 평균 압축강도는 41, 50MPa로 측정되었다.

Table 2. Results of coupon test

No.	Area (mm ²)	Elastic modulus (GPa)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Yield ratio	Elong. (%)
1	74.88	190	341	426	0.80	31%
2	74.46	198	353	447	0.79	33%
3	74.80	200	357	452	0.79	30%
AVE	74.71	196	350	441.67	0.79	31.3%

Table 3. Compressive concrete strength

No.	Compressive Design Strength -30MPa		Compressive Design Strength - 50MPa	
	Test Result (MPa)	Correction value(MPa)	Test Result (MPa)	Correction value(MPa)
1	42.14	40.87	54.18	52.55
2	46.55	45.15	52.36	50.79
3	37.70	36.57	51.87	50.31
4	43.16	41.86	50.14	48.64
5	41.10	39.87	50.08	48.58
AVE	42.13	40.87	51.73	50.17

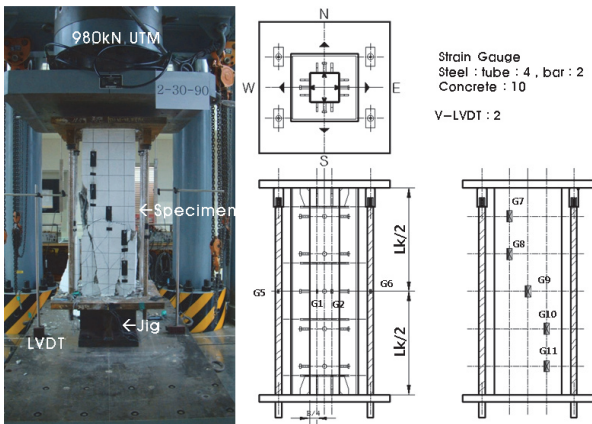


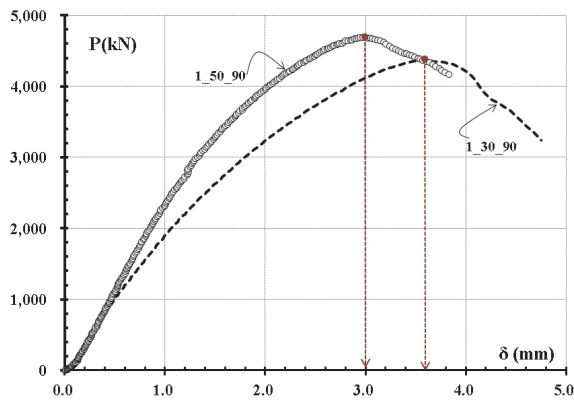
Fig. 6. Boundary condition and measurement location

4. 구조실험 결과

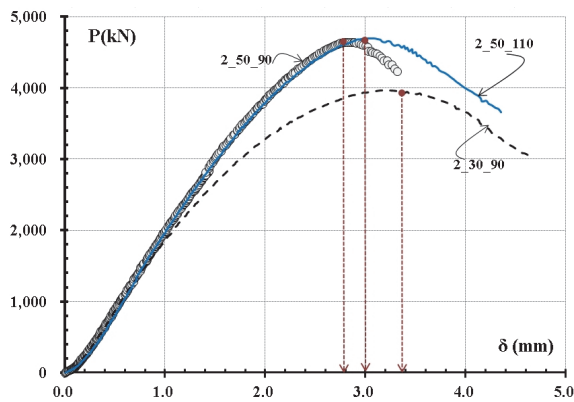
4.1 하중-축 변위 관계

실험결과 Fig. 7과 같이 전반적으로 유사한 경향성을 갖는 하중-변위관계를 볼 수 있다. 실험은 최대내력 이후 80% 내력이 떨어지는 시점까지 단조가력 하였다. 변위는 양 단부에 설치한 변위계의 평균값으로 산정하였다.

Pre-load를 재하한 실험체 보다 동시에 가력한 실험체의 내력이 상회하는 결과를 보이고 있지만 그 차이는 미소하며



(a) '1' series



(b) '2' series

Fig. 7. Axial force-displacement curve

Table 4. Initial stiffness and ultimate force

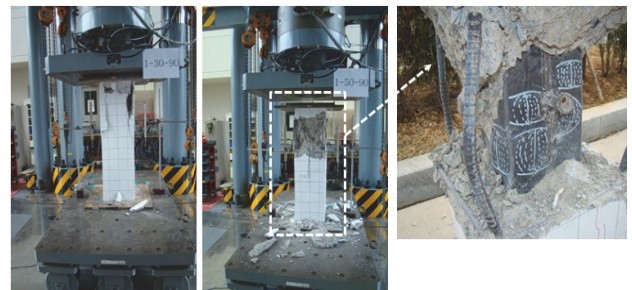
Name	Pu (kN)	Pu_disp (mm)	Ki (kN/mm)
1_30_90	4360.8	3.6	1816
1_50_90	4698.6	3.0	1853
2_30_90	3968.1	3.2	1832
2_50_90	4643.1	2.8	1832
2_50_110	4696.2	3.0	1827

전반적으로 내력과 강성은 유사한 결과를 나타냈다. Table 4에서는 각 실험체의 최대내력(Pu)과 파괴시점의 변위(Pu_disp), 초기강성(ki)을 정리하였다. 여기서 Pu_disp는 Fig. 7에서 표시된 바와 같이 최대내력 시점에 발생된 부재 전체 축 변위를 말한다.

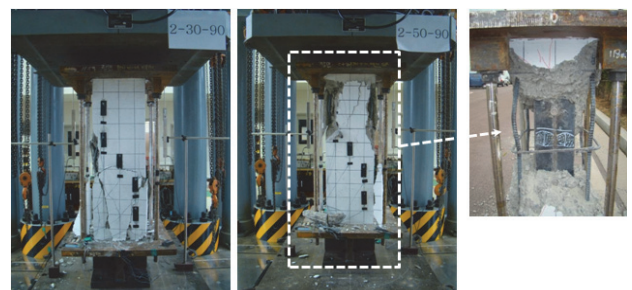
4.2 파괴형상

실험체의 초기변형은 콘크리트 박리를 시작으로 항복시점부터 철근변형이 발생하였다. Fig. 8(a)는 선 기둥과 피복 콘크리트가 동시 가력된 실험체의 최종파괴 형상이다. 콘크리트 박리가 시작된 범위는 상부측에서 심각하게 발생했으며, 최대내력 이후에는 콘크리트 균열이 하부측까지 심화되었다. 실험종료 이후 선 기둥 강관에 발생한 좌굴을 확인하기 위해 피복된 콘크리트 일부를 탈형하였다. 예상대로 콘크리트 균열이 심화된 상부측 강관면 일부에서 국부좌굴형상을 확인할 수 있었다.

연차 가력된 실험체의 파괴거동은 콘크리트 초기균열 시점이 전 단면에 걸쳐 발생되면서 항복이후 철근변형이 심화되어 최대내력까지 도달하는 양상을 보였다. 연차 가력실험체 역시 실험종료 이후 피복 콘크리트 일부를 탈형하여 선 기둥 강관면의 좌굴모드를 확인할 수 있었다.



(a) '1' series specimens



(b) '2' series specimens

Fig. 8. Failure mode

5. 분석 및 고찰

5.1 선 기둥 내력과 변형을 관계

실험체에 부착된 변형률 게이지 결과를 각 실험체 별로 그림 정리하였다. 선 기둥에는 총 4개의 변형률 게이지가 기둥 길이방향 중앙에 부착되었다(G1, G2 : 축 방향, G3, G4: 축 직각방향).

각 실험에 의해 측득된 하중-변형률 관계를 보면 선 기둥 강관면에 부착된 변형률의 기울기가 급격히 변화되는 것을 알 수 있다. 즉, 일정 하중에 도달되었을 때, 선기둥의 강관에서 변형(좌굴)이 발생되었음을 짐작할 수 있다. 선 기둥 강관 변형이 발생된 시점의 내력(P_c)과 선 기둥 단면강도(P_o , Eq(1)) 그리고 부재강도(P_n , Eq(3 또는 4))를 각각 비교하여 Table 5에 정리하였다. 변형이 발생된 시점의 내력(P_c)은 확연하게 선별할 수 있으며, 비교에 사용된 값은 최초 발생 시점을 기준으로 하였다. 각각 설계 강도는 재료시험에 의한 결과를 반영하여 비교되었으며 사용된 기준식^{[10], [11]}은 (2)~(4)에 정리하고 있다.

선 기둥에 변형이 발생된 시점의 내력을 비교한 결과 좌굴 시점의 내력은 단면강도와 길이를 고려한 부재강도 사이에 위치하고 있다. 동일한 형상단면을 갖는 실험체에 한하여 (2_50_110제외) 내력을 비교해본 결과, 부재 강도에 비해 약 1.21배 상회한 좌굴강도를 갖고 있지만, 단면강도에 비해 약 0.6배 하한치를 갖는 것으로 평가 되었다. 즉 Pre-load 선 정에 있어 선 기둥 단면강도와 부재강도 사이에 있을 경우 강관의 변형(좌굴)으로 인한 구조 안정성에 대해 재검이 필요할 것으로 판단된다. 한편 피복부 두께가 110mm로 확대된 실험결과를 보면 강관에 변형이 발생된 시점의 내력은 단면, 부재강도 보다 상회한 결과를 보이고 있다.

Table 5. of the strength characteristics (Unit: kN)

Specimen	P_c	P_o	P_c/P_o	P_n	P_c/P_n
1_30_90	956	1535	0.62	840	1.14
1_50_90	906	1712	0.53	888	1.02
2_30_90	1371	1535	0.89	840	1.63
2_50_90	920	1712	0.54	888	1.04
2_50_110	2336	1712	1.36	888	2.63
Average (Excluding 2_50_110)			0.79		1.49

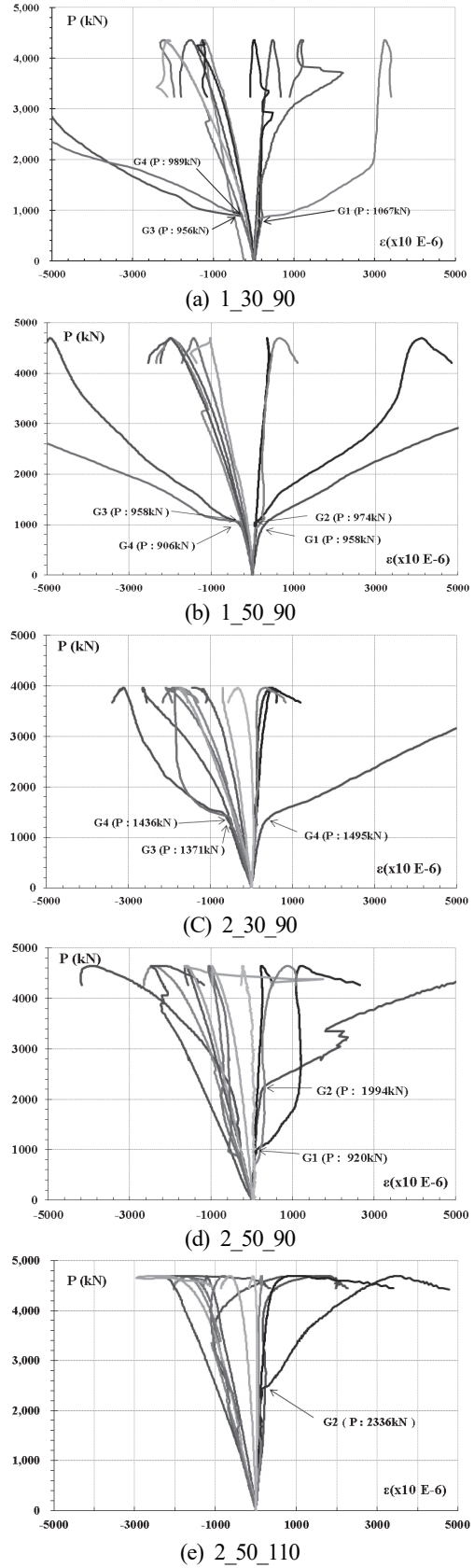


Fig. 9. Axial force-strain relation

$$P_e = \pi^2(EI_{eff})/KI^2 \tag{2}$$

$$P_e \geq 0.44P_o \text{ 인 경우}$$

$$P_n = P_o[0.658^{P_o/P_e}] \tag{3}$$

$$P_e < 0.44P_o \text{ 인 경우}$$

$$P_n = 0.877P_e \tag{4}$$

여기서, EI_{eff} : 합성단면의 유효강성(kN·mm²)

$$= E_s I_s + 0.5E_s I_{sr} + C_1 E_c I_c$$

$$C_1 = 0.6 + 2(A_s / (A_c + A_s)) \leq 0.9$$

KI : 유효좌굴길이(mm)

P_e : 탄성 좌굴강도(kN)

P_o : 합성기둥의 압축강도(kN)

P_n : 길이고려한 합성기둥의 부재강도(kN)

5.2 현행 설계식과 내력 검토

앞서(4.1 축 하중-변위관계) 실험결과 관계를 통해 연차 가력된 실험체(2-30-90, 2-50-90)와 동시 가력된 실험체(1-30-90, 1-50-90)내력은 약 5% 미만으로 매우 유사한 경향을 볼 수 있었다. 또한 5.1절에서는 선 기둥 만을 대상으로 하여 현행 설계식과 비교 하였다. 본 절에서는 피복층전 형 기둥의 설계 시 현행규준식 적용에 부합한지 검토하고자 전 단면의 대한 설계식(KBC-2009, 0709장)과 실험결과를 비교검토 하고자 한다. 선기둥은 콘크리트 충전형이며, 후 피복 되므로 5.1에서 정의된 좌굴강도 식 (2) 내에 유효강성을 산정할때 필요한 콘크리트 계수가 0.9에서 0.3으로 식 (5)와 같이 변경된다. 또한 산정된 설계강도는 모두 콘크리트 압축강도 감소계수를 적용하였다. 설계 압축강도는 앞서 식 (3), (4) 판별식에 의해 산정되는데 실험체의 경우 모두 비탄성 영역에 존재 하고 있어 식 (3)에 의해 산정되었다.

$$EI_{eff} = E_s I_s + 0.5E_s I_{sr} + C_1 E_c I_c$$

$$C_1 = 0.1 + 2(A_s / (A_c + A_s)) \leq 0.3 \tag{5}$$

Table 6은 실험결과와 내력식 각 실험체 별로 정리하였다. 내력 편차가 다소 크진 않지만, 연차 가력된 경우 설계치 보다 하한치로 나타나고 있으며, 반면에 동시 가력된 경우 설계 값 보다 상한치로 평가 되고 있다. 위와 같은 특징을 발견할 수는 있었지만, 그 편차는 평균 약 ±7% 이내 수준이다.

Table 6. Comparison of design value

Name	fck inner	Preload (kN)	P_KBC2009 (kN)	Pu_test (kN)	P_test / P_KBC2009
1_30_90	30	0	4095.3	4360.8	1.06 (-0.06)
1_50_90	50	0	4272.5	4698.6	1.10 (-0.10)
2_30_90	30	571.01	4095.3	3968.1	0.96 (+0.04)
2_50_90	50	767.91	4272.5	4643.1	1.08 (-0.08)
2_50_110	50	767.91	5055.9	4696.2	0.93 (+0.07)

5.3 내·외부 콘크리트 압축강도에 따른 변화

실제현장에서는 선 기둥에 타설되는 콘크리트는 피복 콘크리트 보다 높은 강도의 재료를 선택하여, 최소한의 피복량을 줄이고자 노력할 것이다. 즉, 콘크리트 강도가 상이할 경우에 대한 안정성 역시 검토해 볼 필요가 있다. 선 충전되는 콘크리트와 후 피복되는 콘크리트의 압축강도를 변화에 따른 내력을 비교하여 Table 7에 정리 하였다. 가력방법에 관계없이 강성에는 큰 영향을 미치지 않고 있다. 동시가력 상태의 경우 내력은 약 7%정도 차이를 보였으며, 연차가력된 경우 약 16% 차이를 갖는다. 설계 값에 의하면 약 4% 정도 증가될 것으로 예상했지만 보다 상위한 결과를 얻을 수 있었다. 피복된 콘크리트와 선 기둥의 하중 분담율을 면적비를 통해 유추해 보면 선 기둥의 콘크리트는 전체 면적에 약 20% 미만이며 하중 분담율로 보면 전체내력에 약 5%미만 수준이다. 그럼에도 선 기둥에 충전된 압축강도의 상대적인 변화는 전체 내력에 기대 이상 영향을 준 것으로 보인다. Pre-load 크기는 선 기둥에 분담하는 내력에 의해 결정되므로 경우에 따라 재료 강도변화로 인해 내력 확보가 고려될 필요가 있다.

Table 7. Comparison of test result from compressive strength

Specimen	Pu_test (kN)	Initial Stiffness (kN/mm)	P_KBC2009 (kN)
1_30_90	4360.8	1.07	4095.3
1_50_90	4698.6	1.04	4272.5
2_30_90	3968.1	1.16	4095.3
2_50_90	4643.1	1.01	4272.5

5.4 피복 콘크리트 두께에 따른 내력변화

후 피복되는 콘크리트 두께를 90mm에서 110mm로 증가 했을때의 내력을 비교하고자 Table 8과 같이 해당되는 두 실험체를 정리하였다. 피복부 면적이 증가함에 따라 약 18% 내력 차이가 발생 되는 것으로 규준식을 통해 예측되었다. 하

Table 8. Comparison of test result from concrete covering depth

Specimen	Pu_test (kN)		Pu_disp (mm)	P_KBC2009 (kN)	
2_50_90	4643.1	1.011	2.8	4272.5	1.183
2_50_110	4696.2		3.0	5055.9	

지만, 실제 실험치의 의하면 비교적 큰 차이 없이 유사한 내력과 변위를 갖는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 파괴거동을 통해 추정해 보면, 피복부 콘크리트의 초기 균열로 인해 내력을 충분히 발휘하지 못한 결과로 보인다. 피복 두께와 내력증가율 관계를 두 실험체만으로 분석하기에는 매우 무리가 있지만, 본 연구를 토대로 피복충전형 합성기둥의 데이터가 누적된다면 보다 정량적인 분석이 가능할 것으로 기대된다. 실험을 통해 얻은 교훈은 후 피복되는 콘크리트 두께 선정에 있어 무한대로 증가시키기 보단, 콘크리트와 철근의 일체성 그리고 부착력을 확대시키는 방안이 보다 합리적인 거동을 유도할 것으로 판단된다.

5.5 충전형 기둥의 하중전달

시공순서에 따른 하중 전달경로를 보면, 선 기둥(콘크리트 충전형)에 가해진 축방향 하중은 콘크리트 후 피복되는 부분에 힘이 전달된다. 이러한 하중 전달이 강관 내 충전된 콘크리트에 얼마나 영향을 끼치는지, 최종적으로 종국내력과 파괴거동을 확인하는 것이 본 연구의 주된 실험 목적이라 할 수 있다. 각각 비교대상의 실험결과를 Table 9에 정리하였다.

하중전달을 동시에 가력 했을 때 비교적 높은 내력을 갖고 있는 것을 알 수 있다. 최대내력과 초기강성을 무차원한 결과, 연차 가력되었을 때 약 10% 미만의 편차율을 갖는 것으로 평가되었다. 단, Pre-load가 선 기둥이 받을 수 있는 단면강도의 약 50% 미만인 경우에 해당되는 결과이다. 결과적으로 동시 재하된 경우 초기재하부터 균등한 응력흐름이 전 단면에 진행된 반면, 연차재하 되는 경우 초기재하상태에 받은 응력(Pre-stress)이 후 피복부가 추가됨에 따라 일부 응력재분배가 현상이 나타났다고 판단된다.

Table 9. Comparison of test result from lording method

Specimen	Pu_test (kN)		Initial Stiffness (kN/mm)		P_KBC2009 (kN)	
1_30_90	4360.8	0.91	1816	1.01	4095.3	1.00
2_30_90	3968.1		1832		4095.3	
1_50_90	4698.6	0.99	1653	1.11	4272.5	1.00
2_50_90	4643.1		1845		4272.5	

6. 결론

시공단계에 따른 피복충전형 기둥의 구조적 안정성을 파악하고자 가력방법, 콘크리트 강도, 피복두께를 변수로 한 단조압축가력 실험을 수행하였다. 예측 내력과 실험결과를 비교하면서 피복충전형 기둥 설계 시 고려해야 할 사항을 정리하였다. 각 경계 조건에 따라 전체 내력이 미치는 영향을 정량적으로 분석하기에는 물리적 한계가 있지만, 보다 합리적인 설계를 유도하기 위한 기초자료로 누적시키고자 한다.

- (1) 시공단계에 따라 재하경계조건이 상이한 기둥부재의 구조적 안정성을 평가 하고자 재하상태를 변수로 종국상태의 내력을 실험으로 평가 하였다. Pre-load(선기둥 최대내력의 50%)를 가한 부재와 동시 가력한 부재가 비교적 유사한 내력과 거동을 나타내고 있음을 확인하였다. 현행 건축구조기준에서는 이러한 상황에 근거할 사례 및 내력식은 제시되지 않고 있지만, 본 연구를 통해 소요 하중에 따라 선 기둥 후 피복 타설되는 시공방법은 구조적 안전성에 결여되지 않는 것으로 평가되었다. 추후 합리적인 설계를 유도하기 위해서는 선 기둥 재하량 범위, 배근상세 등 설계 프로세스가 구축되어야 한다.
- (2) 선 기둥 국부변형(좌굴)시점의 내력을 각각 설계식을 통해 비교해 보면 선 기둥의 단면강도와 부재강도 사이에 존재하는 것을 확인하였다. 다시 말해, Pre-load 크기를 설정할 때 선 기둥 단면강도와 부재강도 사이에 있을 경우 강관의 변형(좌굴)으로 인한 구조 안정성에 대해 재검토가 필요하다.
- (3) 후 피복된 콘크리트와 선 기둥에 충전된 콘크리트 강도가 상이 할 경우 약 10%이상 내력 상승을 기대할 수 있다. 선 기둥에 충전된 콘크리트 압축강도의 상대적인 변화는 Pre-load 크기를 확대 할 수 있으며, 후 피복두께에 영향을 주므로 경우에 따라 재료 강도변화로 인해 내력 확보가 고려될 필요가 있다.
- (4) 피복 두께에 따른 내력증가율 관계를 살펴보면, 비교적 큰 차이 없이 유사한 내력과 변위를 갖는 것으로 평가되어 일정 수준 이상의 피복두께는 비효율적인 설계가 될 수 있다. 보다 합리적인 설계를 유도하기 위해서는 콘크리트와 철근의 일체성 그리고 부착력을 확대시키는 노력이 더 효과적이라고 보인다.
- (5) 하중전달을 동시에 가력 했을 때 연차가력 보다 소폭 증가한 내력을 갖고 있었다. 이는 전체 내력의 미소한 편

차로 하중전달의 관계없이 최종 종국내력은 유사한 것으로 분석되었다. 하중 전달이 동시 재하된 경우 초기재하부터 균등한 응력흐름이 전 단면에 진행된 반면, 연차재하 되는 경우 초기재하상태에 받은 응력 일부가 후 피복부가 더해지면서 응력 재분배가 현상으로 위와 같은 결과가 나왔다고 판단된다.

참고문헌(References)

[1] 김병호, 심현주, 최병정, 이은택(2011) 축력과 반복수평력을 받는 콘크리트 충전 내진 각형강관 기둥의 휨거동 특성, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제3호, pp.317-326.
Kim, B.H., Shim, H.J., Choi, B.J., and Lee, E.T. (2011) Flexural Behavior of Concrete Filled Seismic Resistant Steel Tubular Columns Subjected to Axial and Cyclic Lateral Load, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.23, No.3, pp.317-326 (in Korean).

[2] 이철호, 강기용, 김성용, 구철희(2013) 각형 콘크리트충전 강관기둥 부재의 구조설계기준 비교연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제4호, pp.389-398.
Lee, C.H., Kang, K.Y., Kim, S.Y., and Koo, C.H. (2013) Review of Structural Design Provisions of Rectangular Concrete Filled Tubular Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.4, pp.389-398 (in Korean).

[3] 김선희, 염경수, 최성모(2013) 내부앵커형 콘크리트 충전 기둥의 내력 및 변형 능력에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제4호, pp.347-357.
Kim, S.H., Yom, K.S., and Choi, S.M. (2013) A Study on the Load Carrying Capacity and Deformation Capacity of the Internal Anchors Welded Cold Formed Concrete Filled Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.4, pp.347-357 (in Korean).

[4] 박홍근, 이호준, 김성배, 박성순(2013) 콘크리트 피복 충전 강관기둥의 편심압축실험, 한국콘크리트학회 2013년 봄 학술대회논문집, 한국콘크리트학회, pp.739-740.
Park, H.G., Lee, H.J., Kim, S.B., and Park, S.S. (2013) Eccentric Axial Load test for Concrete-Encased and Filled Steel Tubular Columns, *Proceedings of Annual Spring Conference of Korea Concrete Institute*, KCI, pp.739-740 (in Korean).

[5] 심현주, 최병정, 이은택(2012) 중심압축력을 받는 내진 건축구조용 각형강관 CFT 부재의 구조성능평가, 한국강구

조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제4호, pp.443-450.

Shim, H.J., Choi, B.J., and Lee, E.T. (2012) Structural Performance Evaluation to Centrally Compressed CFT Columns Using Seismic Rectangular Steel Tube, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No. 4, pp.443-450 (in Korean).

[6] Tsuda, K., and Matsui, C. (1987) Structural Performance and Limiting Width: Thickness Ratio of Concrete Filled Steel Square Tubular Columns, *Proceedings of the 4th Pacific Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand National Society for Earthquake Engineering, New Zealand, pp.25-36.

[7] 박국동(2011) 강합성 원형기둥의 구속효과를 고려한 거동 특성 및 강도평가, 박사학위논문, 인하대학교.
Park, K.D. (2011) *Strength Evaluations and Behavior Properties Considering Confined Effects for Steel Composite Circular Columns*, Ph.D. Dissertation, Inha University, Korea (in Korean).

[8] 선우현(2010) 콘크리트 피복형 합성기둥의 강도와 변형특성에 관한 실험, 석사학위논문, 인하대학교.
Sun, W.H. (2010) *Experimental Study of Strength and Deformation Behavior for CET Column*, Master's Thesis, Inha University, Korea (in Korean).

[9] 한국시설안전공단(2014) 건설공사 안전관리제도 및 최근 사고사례 (2014년 하반기 건설안전교육 자료집), 한국시설안전공단.
Korea Infrastructure Safety Corporation (1994) *Construction Safety Management System and the Recent Incidents (Construction Safety Teaching Material for the Second Half of 2014)*, KISC, Korea (in Korean).

[10] 대한건축학회(2009) 건축구조기준 (KBC 2009) 및 해설, 기문당.
Architectural Institute of Korea (2009) *Korea Building Code (KBC 2009) and Commentary*, Kimoon dang, Korea (in Korean).

[11] 한국강구조학회(2005) 강구조의 설계, 구미서관.
KSSC (2005) *Design of Steel Structures*, Goomiseogwan, Korea (in Korean).

색 인(Symbols)

- A_s : 강재의 단면적(mm²) (= $A_{s,tube}$)
 A_c : 콘크리트의 단면적(mm²)

$A_{c,act}$: 선 기둥에 충전된 콘크리트 단면적(mm²)

$A_{c,protect}$: 후 피복되는 콘크리트 단면적(mm²)

A_r : 철근의 단면적(mm²)

$B_{\in \neq r}$: 선 기둥 외부 강관너비(mm)

B_{outer} : 콘크리트 피복부 기둥 너비(mm)

EI_{eff} : 합성단면의 유효강성

E_c : 강재의 탄성계수(MPa)

E_s : 콘크리트 탄성계수(MPa)

F_y : 강재의 항복강도(MPa)

F_u : 강재의 인장강도(MPa)

f_{ck} : 콘크리트 압축강도(MPa)

I_c : 콘크리트 단면 2차 모멘트(mm⁴)

I_s : 강재 단면2차모멘트(mm⁴)

L : 기둥 길이(mm)

$t_{\in \neq r}$: 선 기둥 강관 두께(mm)

요 약 : 구조물의 기둥은 층에 따라 받는 내력이 상이함에도 시공의 오차를 줄이고 구조설계의 편의를 위해 상부층부터 하부층의 기둥단면은 동일하게 설계되고 있다. 그럼에도 불가피하게 상하부의 기둥의 단면이 상이하는 경우가 발생된다. 예를들어 초고층 구조물 또는 중축 및 보수에 의해 기둥을 보강할 경우이다. 이렇듯, 선 기둥과 후 피복이 되는 기둥을 피복충전형 콘크리트 충전기둥이라 할 때, 가력조건이 다르므로 재하상태를 나누어 구조적 안정성을 확인할 필요가 있다. 그럼에도 국내외적으로 가력조건에 따른 합성기둥에 대한 내력과 변형연구는 전무한 상태에 있다. 따라서 본 연구에서는 구조실험을 통해 가력조건 및 콘크리트 강도, 피복두께 변화에 의한 피복충전형 콘크리트 각형 기둥의 내력과 거동을 분석하였다.

핵심용어 : 피복충전형, 용접조립 각형 기둥, 가력조건, 콘크리트 응력, 선 가력
