

콘크리트 충전 각형강관 주각부의 내력 및 변형에 관한 연구

A Study on the Behaviors of Column-to-Footing Connections for Concrete Filled Tube(CFT) System

김 철 환¹⁾† 김 성 은²⁾
Kim, Cheol Hwan *Kim, Seong Eun*

요 약 : 콘크리트충전 강관구조는 구조성능이 우수하고 내화성능 등이 우수하여 점진적으로 현장 적용이 확대되고 있다. 그러나 지금까지 이러한 구조형식에 있어서는 구조부재의 저항능력에 대해 연구가 활발하게 진행되어 왔으나, 기둥의 주각부에 대한 연구가 활발하지 못하여 아직까지 주각부에 대한 응력의 흐름이나 이력 특성에 대해 명확히 규명되어 있지 못하며, 따라서 주각부에 대한 구조설계 시에는 순수 철골구조에서 적용하는 설계방법을 원용하여 설계되고 있다. 본 연구에서는 충전강관 기둥의 주각부에 있어서는 구조적 거동을 규명하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험의 주된 변수로는 강관의 주각부 형식과 매립깊이를 변수로 하였으며, 비교를 위하여 순수강관 기둥에 대한 주각부의 실험도 병행하였다. 실험결과 순수강관과 충전강관의 주각부에 있어 구조적 거동의 차이점은 크게 나타나지 않고 있으나, 주각부의 형식에 따른 거동의 차이는 크게 나타나고 있다.

ABSTRACT : The purpose of this paper is to investigate the behavior of concrete-filled tube columns for footing connections. Eight specimens were tested to investigate such structural behavior according to the column base type. The specimens consisted of concrete-filled steel tube columns (or bare steel tube columns), reinforced concrete footings, and base plates (or stud connectors). The specimens were subjected to lateral cyclic load. The cyclic load was applied according to a predetermined strength sequence. The results of the experiment indicated that the flexural strength of the stud-connector-type column base is higher than that of the base-plate-type column base. The structural behavior of the concrete-filled tube column base was similar to that of the bare steel column base.

핵심용어 : 주각, 콘크리트충전 강관기둥, 변형성능, 내력

KEYWORDS : column base, concrete filled steel tube column, CFT, deformation capacity, strength.

1. 서론

강구조물은 콘크리트 기초 위에 철골기둥을 세워 건축하는 형태로 이루어진다. 따라서 이들 기둥은 기초에 고정하기 위하여 여러 가지 방법으로 이루어지고 있으며 그 대표적인 방법이 주각부를 기초부 위에 노출하여 고정하는 노출형 방법과 기초에 매립하는 방법으로 나누어진다. 하지만, 노출형인 경우에는 주각에 베이스 플레이트를 설치하여 앵커 볼트로 고정하는 방식이 일반적으로 사용하고 있으나, 매립형인 경우에는 베이스 플레이트를 설치하여 기초에 매립하거나 기둥에 스티드커넥터 등과 같은 전단연결 장치를 설치하여 고정할 수 있다. 지금까지 주각부에 대한 연구에서는 노출형 H형강 주각부의 축력에 대한 지압강도를 실험적으로 해석적으로 규명(최문식 등, 1996; 이승준 등, 2008)하였으며, 매립형 주각부에 대해서는 H형강 기둥에 스티드 커넥터를 부착한

주각부의 연구(김규석 등, 2000)를 통하여 연직하중에 대한 내력을 정량적으로 평가하는 방법을 제시하고 있다.

한편, 강관 구조물은 일반적인 강구조물에서 사용하는 H형강 대신에 구조체로서 각형강관이나 원형강관을 사용하는 구조 형식이다. 이러한 강관 구조물의 주각부에 있어서는 일반적인 H형강을 이용한 강구조물과 동일한 방법으로 설계와 건설이 이루어지고 있으며, 특히 강관의 내부에 콘크리트를 충전한 충전강관구조인 경우에는 강관에 의한 콘크리트의 구속 효과로 인해 부재의 강도 및 강성이 크게 증대하게 되어 일반적인 강구조물과는 상이한 거동을 나타내기도 하고, 또한, 주각의 구성형식에 따라서도 서로 다른 거동을 나타내기도 한다. 이러한 강관 및 콘크리트 충전강관 기둥의 노출형 주각부의 거동에 대한 연구(최성모 등, 2003; Roeder 등, 2005)가 진행되어 부재의 휨내력 및 회전강성을 실험적으로 규명하고 있다.

1) 교신저자. 경북대학교 이공대학 건축도시환경공학부 교수, 공학박사
(Tel. 054-530-1374, Fax. 054-530-1379, E-mail : chk@knu.ac.kr)
2) 계명대학교 건축학대학 건축공학과 교수, 공학박사(sek354@kmu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

본 연구에서는 콘크리트 충전강관 기둥의 주각부에 대한 거동을 규명하기 위하여 콘크리트 충전 강관기둥의 주각부와 순수 강관기둥 주각부에 대한 실험을 수행하여 콘크리트 충전강관기둥의 주각부에 대한 거동 및 주각부의 구성형식에 따른 차이를 실험적으로 규명하여 설계시의 기초자료를 제공하는 것을 목표로 하고 있다.

2. 실험계획 및 실험

2.1 실험체 계획

콘크리트 충전 각형강관 기둥 주각부의 거동을 실험적으로 규명하기 위하여 그림 1에 나타내는 것과 같은 실험체를 제작하였다. 사용한 각형강관은 □-175×175×6을 사용하였으며 실험체의 높이는 주각에서부터 1,150mm의 높이로서 실험시 가력점이 주각에서 1,000mm가 되도록 제작하였다. 실험체의 변수는 노출형과 매립형 2종류로 이루어져 있으며, 노출형인 경우에는 베이스 플레이트를 설치하여 앵커 볼트로 고정하였으며, 매립형인 경우에는 2가지 형태로서 베이스 플레이트 부착형 매립형과 스티드 커넥터 설치형 매립형으로 구성되어 있으며, 특히 스티드 커넥터 설치형인 경우에는 2가지의 매립깊이를 변수로 하고 있다.

스티드 커넥터의 설치 방법은 가력방향에 대해 설치하였으며, 스티드 커넥터의 소요개수는 아래와 같이 작용하는 휨모멘트에 의해 발생하는 강관연단의 전단력을 스티드 커넥터의 전단내력으로 나누어 산정할 수 있다.

따라서 스티드 커넥터의 소요개수는 아래와 같이 된다.

$$n_s = Q/Q_{sc} \tag{1}$$

여기서 강관의 연단에 발생하는 전단력:

$$Q = M_y/h = ZF_y/h \tag{2}$$

스티드의 전단내력:

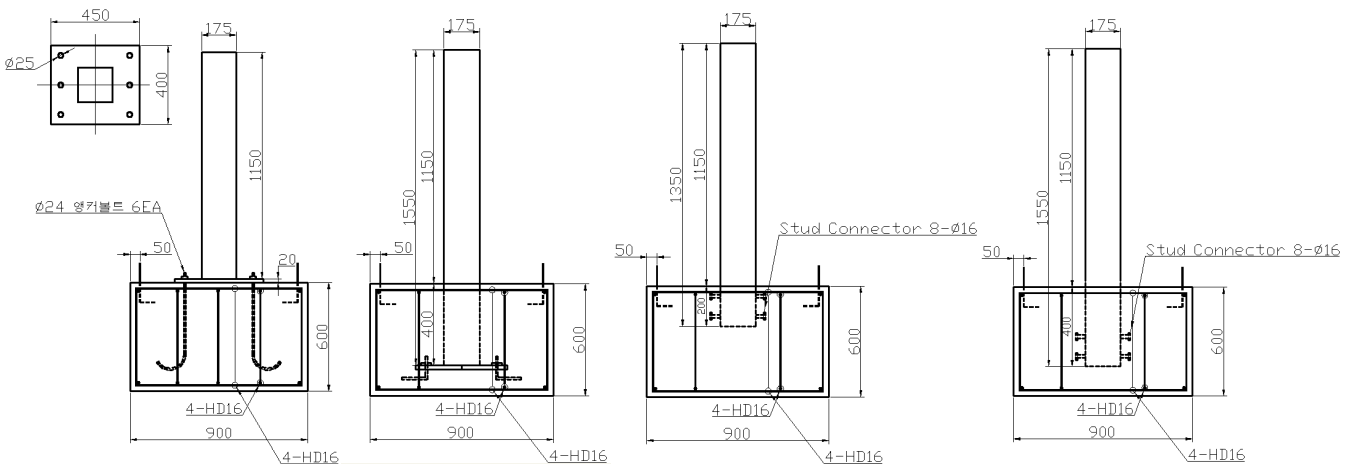
$$Q_{sc} = 0.5 A_{sc} \sqrt{f_{ck} E_c} \leq A_{sc} F_u \tag{3}$$

단, A_{sc} : 스티드 단면적, f_{ck} : 콘크리트 압축강도, E_c : 콘크리트 탄성계수, F_u : 인장강도, M_y : 항복휨모멘트, Z : 단면계수, F_y : 항복강도, h : 강관의 폭

표 1. 실험체 계획

실험체 명	콘크리트 충전유무	주 각 형 식		매립깊이 (mm)
SP-0	비충전형	노출형	base plate	0
SP-400				400
SS-200		매립형	stud connector	200
SS-400				400
CP-0	충전형	노출형	base plate	0
CP-400				400
CS-200		매립형	stud connector	200
CS-400				400
CP-0 :		C: 충전강관 기둥, S: 순수강관 기둥 P: base plate형식, S: stud connector형식 0: 노출형, 200, 400 : 매립깊이		

실험체 계획은 표 1에 나타난다. 표 1에서와 같이 충전강관 주각 실험체와의 비교를 위하여 순수강관기둥의 주각부 실험체도 준비하여 실험을 수행하였다.



(a) Base Plate 형식(노출형) (b) Base Plate 형식(매립형) (c) Stud Connector 형식(200mm) (d) Stud Connector 형식(400mm)

그림 1. 실험체 형상

2.2 실험방법

실험체의 설치상태는 그림 2에 나타낸다. 그림 2에는 LVDT 및 스트레인 게이지 설치 및 스트레인 게이지의 설치 상황도 나타내고 있다. 주각부의 고정은 스트롱 프레임에 전산볼트를 이용하여 고정하였으며, 프레임 측면에 설치된 오일

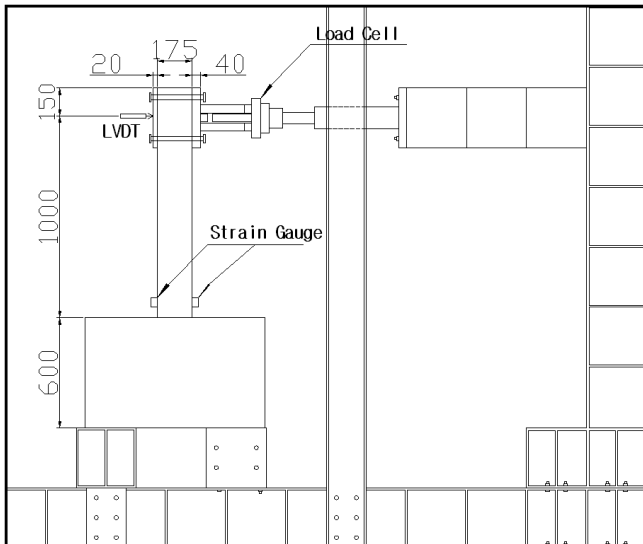


그림 2. 실험체 설치상황

잭으로 수평가력을 실시하였다. 실험시 주각부 변형에 의한 오차를 보정하기 위하여 콘크리트 기초측면에 LVDT를 설치하여 변형을 확인하였다. 가력은 계산에 의한 항복내력의 1/3, 2/3, 3/3의 크기로 반복가력을 실시하였으며, 실험 중의 데이터는 데이터 로거를 통하여 취득하였다.

2.3 사용재료

실험에 사용된 각형강관은 □-175×175×6으로 SPSR 400 강재를 사용하였으며, 콘크리트는 압축강도 21MPa 급의 레미콘을 사용하였다. 콘크리트 충전강관기둥 내부의 콘크리트

표 2. 강재의 기계적 성질

강관등급	항복강도 σ_y (MPa)	인장강도 σ_u (MPa)	σ_y / σ_u	연신율 (%)
SPSR400	375, 369, 371 (371.6)	506, 503, 505 (504.7)	0.74, 0.73, 0.73 (0.73)	30, 30, 31 (30.3)

()는 평균치

와 기초 콘크리트는 동일한 콘크리트를 사용하였다. 강재의 기계적 성질은 표2에 콘크리트의 배합비 및 압축강도는 표3

에 나타낸다.

표 3. 콘크리트 배합표 및 압축강도

설계강도 (MPa)	압축강도 (MPa)	w/c (%)	단위 재료량(kg/m ³)				슬럼프 (mm)
			시멘트	물	모래	골재	
21	23, 27, 25 (25)	45	323	174	850	965	180

()는 평균치

3. 실험결과 및 고찰

3.1 모멘트-부재각관계

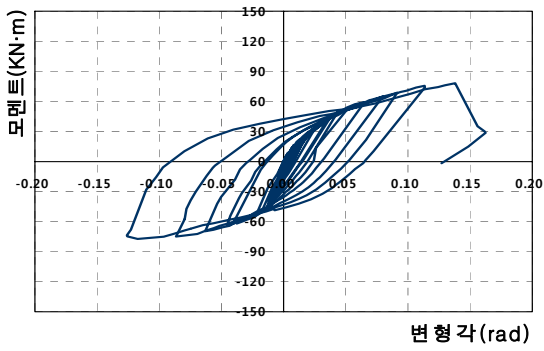
모든 실험체가 탄성영역에 있어서는 내력의 열화가 크게 나타나지 않고 선형적으로 거동하고 있으며, 항복 내력에 도달한 이후에 강성의 저하와 함께 변형이 증가하며 최대 내력에 도달하고 있다. 전반적으로 순수강관기둥 실험체의 경우에는 강관에 발생하는 국부좌굴의 영향으로 최대하중이후에 급격한 내력의 저하를 나타내고 있으나, 콘크리트 충전강관기둥인 경우에는 최대 내력 도달시 강관의 손상은 발생하지 않았으나 기초면의 균열 등의 영향으로 내력의 급격한 저하를 나타내고 있다.

3.1.1 순수강관 실험체

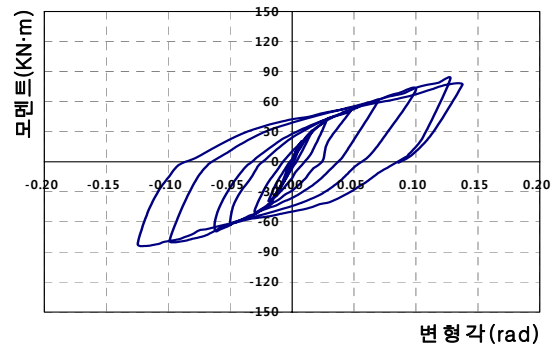
그림 3은 순수강관 실험체의 모멘트-부재각관계를 나타내고 있으며, 베이스 플레이트를 부착한 노출형 실험체인 SP-0의 경우에는 높은 변형능력과 함께 급격한 내력의 열화 없이 안정적인 거동을 나타내고 있다. 이는 변형이 기둥 부재 이외에도 베이스 플레이트에서도 발생하여 변형이 크게 발생하는 것으로 판단된다. 이에 비해 같은 베이스 플레이트를 부착한 경우로서 매립한 실험체인 SP-400인 경우에는 탄성적인 거동을 하다가 급격하게 내력의 열화가 발생하고 있다. 이는 기둥의 기초면에서 국부좌굴이 발생하여 내하력을 상실한 것으로 사료된다. 한편 스티드 커넥터를 설치한 실험체인 경우에는 급격한 내력의 열화를 나타내지 않고 안정적인 거동을 나타내며 최대 내력에 도달하고 있으며, 매립깊이에 다른 내력과 변형능력의 차이는 크게 나타나지 않고 있다.

3.1.2 콘크리트 충전강관 실험체

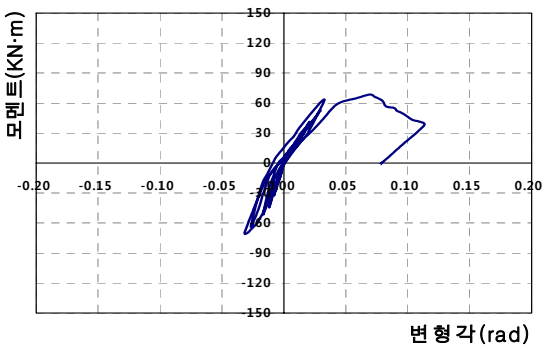
그림 4는 콘크리트 충전강관 실험체의 모멘트-부재각관계를 나타내고 있다. 충전강관 기둥의 경우도 순수강관과 전체적인 거동에는 큰 차이를 나타내지 않고 있다. 베이스 플레



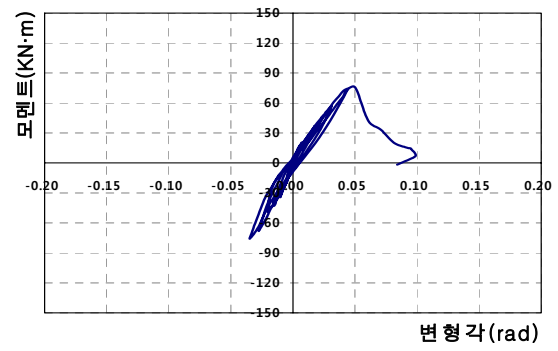
(a) SP-0실험체



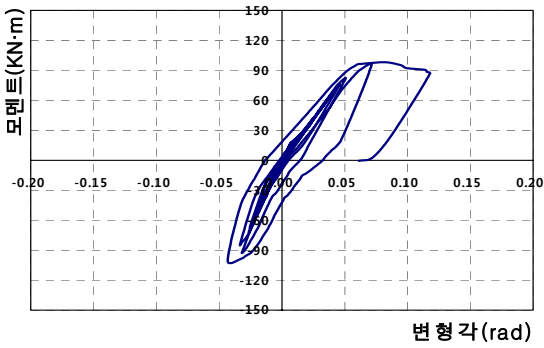
(a) CP-0실험체



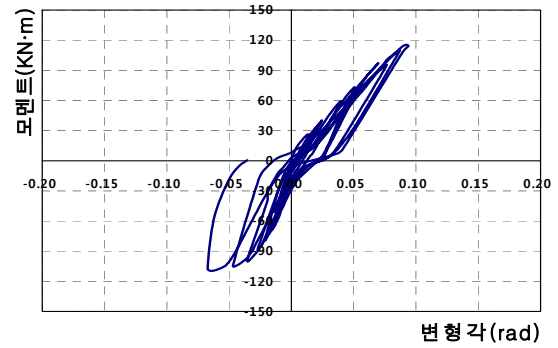
(b) SP-400실험체



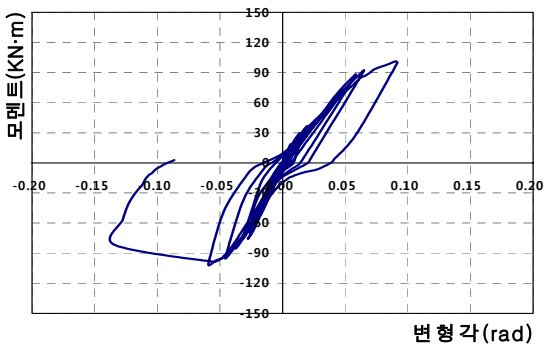
(b) CP-400실험체



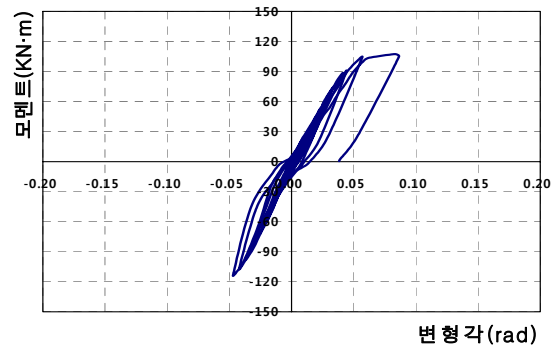
(c) SS-200실험체



(c) CS-200실험체



(d) SS-400실험체



(d) CS-400실험체

그림 3. 모멘트-변형각 관계(순수강관기둥)

그림 4. 모멘트-변형각 관계(콘크리트 충전강관기둥)

트를 설치한 노출형 실험체의 경우에는 하중의 증가와 함께 변형이 증가하고 있으며, 조기에 항복내력에 도달한 이후에는 점진적으로 강성이 저하되어 최대 내력에 도달하고 있으며, 매우 안정적인 거동을 나타내고 있다. 그러나 같은 베이스 플레이트를 설치한 실험체로서 매립한 경우에는 탄성적인 범위를 벗어나면서 내력의 열화가 발생하고 있으며, 특히 최대하중 이후에 급격한 내력의 저하를 나타내고 있다. 이는 순수강관 실험체인 경우에는 강관의 국부좌굴이 주된 이유로 판단되나 콘크리트 충전강관의 경우에는 기둥의 국부좌굴이 발생하지 않고 실험체의 기초부에 균열이 발생하여 내력의 열화가 발생한 것으로 판단된다.

스터드 커넥터를 설치한 실험체의 경우에는 선형적인 거동을 나타내고 있으나, 항복점에 도달한 이후에는 급격한 내력 저하로 뚜렷한 항복 내력점을 나타내고 있다.

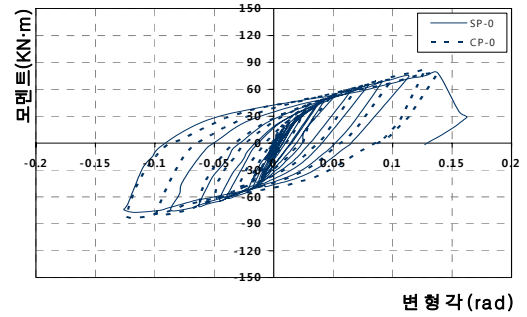
3.1.3 순수강관기둥과 충전강관 기둥의 비교

순수강관기둥 실험체 및 충전강관기둥 실험체 종류별 모멘트-변형각 관계를 비교한 것은 그림 5(a), (b)에 나타난다. 그림에서와 같이 전반적으로 강관의 콘크리트 충전 유무에 불구하고 이력 거동의 차이는 크게 나타나지 않고 거의 유사한 거동을 나타내고 있다. 실험체중 베이스 플레이트를 부착한 실험체의 일례로 순수강관에 대한 비교를 그림 5(c)에 나타낸다. 그림에서와 같이 노출형인 경우에는 매립형에 비해 변형능력이 크게 나타나고 있으며, 이는 베이스 플레이트의 변형에 의한 것으로 판단된다. 또한 스투드 커넥터를 설치한 실험체의 매립 깊이에 비교의 일례를 그림 5(d)에 나타내고 있다. 그림에서와 같이 스투드 커넥터 설치형 실험체에 있어서 매립 깊이에 따른 강성 및 변형 능력에 있어서 큰 차이는 나타나지 않고 유사한 이력 거동을 나타내고 있다.

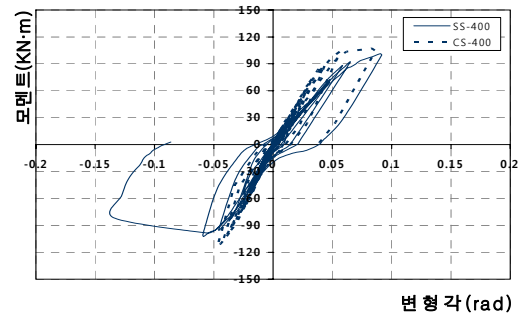
3.2 최대내력

실험결과는 표 4에 나타난다. 표 4에는 강재의 재료실험 결과에 의한 최대 내력의 계산치와 최대 내력점에서의 부재 각을 나타내고 있다.

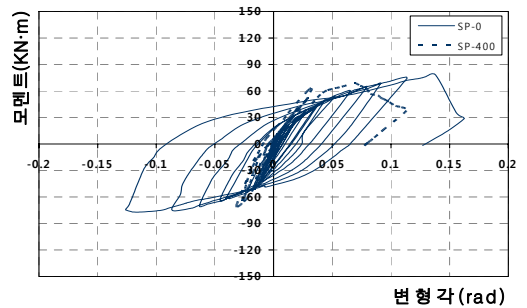
베이스 플레이트를 설치한 실험체는 순수강관인 경우에는 계산치의 0.86-0.99배 전후로서 계산치에 미치지 못하고 있으며, 콘크리트 충전강관 실험체의 경우에는 0.95-1.06배로 계산치와 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 스투드 커넥터를 설치한 실험체의 경우, 순수강관의 경우에는 1.24-1.28, 콘크리트 충전 강관인 경우에는 1.36-1.46배로 계산치를 크게 상회하고 있어, 베이스 플레이트 설치형 실험체에 비해 스투드 커넥터 설치 실험체가 보다 높은 내하 능력을 가지고 있음을 알 수



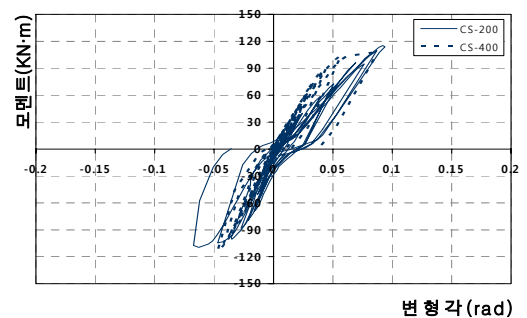
(a) 순수강관, 충전강관 기둥비교(노출형)



(b) 순수강관, 충전강관 기둥비교(스터드형)



(c) 순수강관 기둥 실험체(베이스 플레이트형)



(d) 충전강관 기둥 (매립깊이 비교)

그림 5. 실험체 종류별 비교

있다. 그러나, 스투드 커넥터 설치형은 강관의 콘크리트 충전 유무에 관계없이 매립 깊이에 따른 내력의 차이는 거의 나타

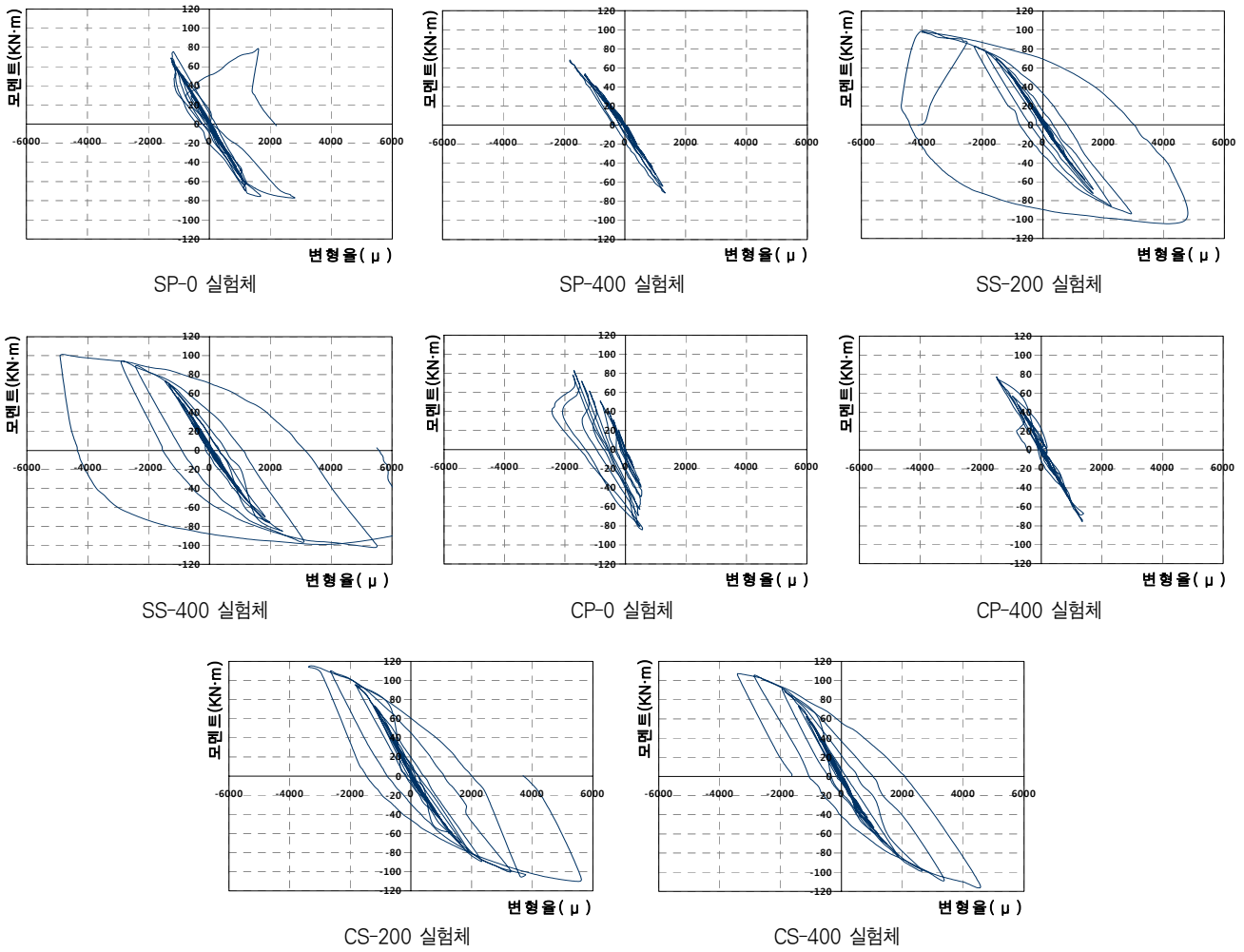


그림 6. 주각부의 강제 변형율

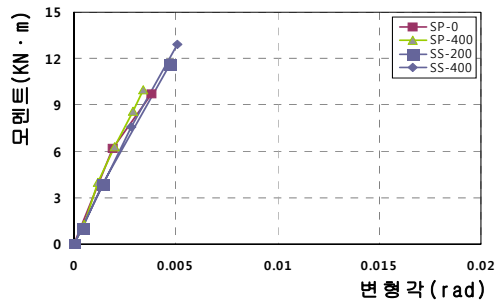
나지 않고 있다. 순수강관과 충전강관의 비교에 있어서는 충전강관 실험체의 경우가 순수강관 실험체에 비해 10%전후의 높은 내력을 가지고 있다. 최대 내력점에서의 부재각은 0.05rad.-0.12rad.의 범위에 머물고 있어 크게 높은 변형능력은 가지고 있다고 판단된다.

특히 매립형 베이스 플레이트 실험체의 경우에는 부재각이 순수강관의 경우 0.069rad., 충전강관의 경우 0.05rad.로서 다른 실험체의 부재각 0.082-0.12rad.보다 크게 낮은 이유는 실험체에 설치된 베이스 플레이트의 지렛대 작용으로 기초부의 크랙이 발생하여 파괴로 이어져 큰 변형능력을 나타내지 못하고 조기에 최대내력점에 도달하게 되었기 때문으로 사료된다.

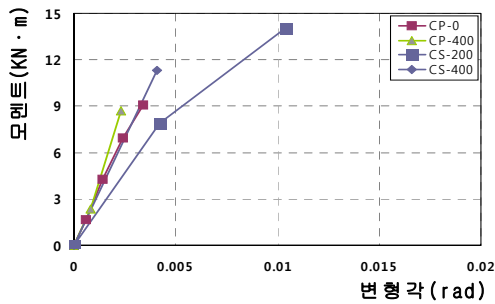
그림 6은 각 실험체의 기둥 주각부에 부착한 스트레인게이

표 4. 실험결과

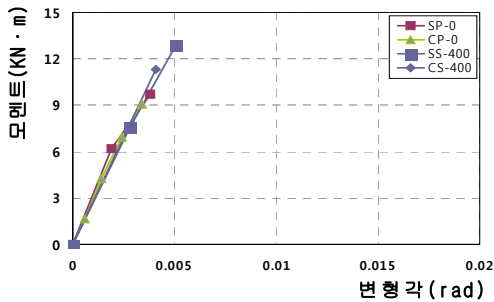
실험체	최대내력 KNm		실험치/계산치	부재각 rad.
	실험치	계산치		
SP-0	78.19	79.15	0.99	0.138
SP-400	68.43		0.86	0.069
SS-200	98.03		1.24	0.082
SS-400	101.34		1.28	0.091
CP-0	84.15		1.06	0.120
CP-400	75.52		0.95	0.050
CS-200	115.30		1.46	0.092
CS-400	107.34		1.36	0.083



(a) 순수강관 기둥 실험체



(b) 충전강관 기둥 실험체



(c) 기둥종류에 따른 비교

그림 7. 초기강성

지에 의한 변형율을 나타낸다. 모든 실험체가 강재의 탄성계수로부터 산정한 항복 변형율($\frac{f_y}{E_s} = \epsilon_y = 1,809\mu$)을 넘어서고 있어 강재가 항복 상태임을 알 수 있다. 특히 스테드를 설치한 실험체인 경우에는 하중의 증가와 함께 큰 변형율을 동반하며 강재가 항복 상태에 도달하였음을 알 수 있지만, 베이스 플레이트를 설치한 실험체인 경우에는 강관 기둥에 변형이 크게 발생하지 않고 있어 강관의 변형보다 베이스 플레이트의 변형으로 부재의 변형이 발생하는 것으로 판단된다.

3.3 초기강성

실험체의 초기 강성은 그림 7에 나타내었다. 그림 7(a)는 순수강관 실험체의 초기 강성을 비교한 그림이고 그림 7(b)

는 충전 강관 기둥의 초기 강성을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 순수강관 기둥 및 충전강관에 있어서 기초의 형태에 따른 초기 강성의 차이는 크게 나타나지 않고 있으나, 베이스 플레이트를 설치한 매립형 실험체의 경우가 다른 실험체에 비해 조금 높은 초기 강성을 나타내고 있다. 그림 7(c)는 순수강관과 충전강관 기둥의 초기 강성을 비교한 그림으로 충전 강관과 순수강관의 차이에 따른 초기 강성도 유의한 차이는 나타나지 않고 있다.

3.4 파괴형상

실험종료 시의 실험체 파괴형상은 그림 8에 나타내었다. 그림에서와 같이 순수강관 기둥 및 충전강관 기둥에 있어서는 기둥의 주각부 형식에 따라 파괴형상의 차이를 나타내고 있다. 노출형 실험체인 SP-0, CP-0 실험체의 경우에는 베이스 플레이트의 변형이 크게 나타나고 있다. 이는 기둥에 발생하는 변형과 더불어 베이스 플레이트에도 변형이 발생함으로 인해 다른 실험체에 비해 큰 변형 능력이 발생했음을 알 수 있다. 그러나 실험체의 기둥에도 국부좌굴이 발생하여 기둥의 중국 내력은 기둥의 국부좌굴에 의해 발생하고 있음을 알 수 있다. 반면에 매립형 실험체 중에서 베이스 플레이트를 설치한 SP_400, CP-400 실험체의 경우에는 강관의 변형과 더불어 기초부 콘크리트의 파괴도 발생하고 있다. 이는 순수강관 기둥 실험체에 비해 충전강관 기둥 실험체인 경우에 더욱 명확하게 나타나고 있으며, 이는 기둥의 강성이 높아 기둥의 변형이 크게 발생하지 않고 기둥에 작용하는 수평하중이 기둥을 통하여 베이스 플레이트로 전달되어 기초부의 파괴로 이어지고 있음을 나타내고 있다. 그러나 스테드 커넥터를 설치한 SS-200, SS-400 실험체의 경우에는 기초부의 손상은 발생하지 않고 기둥의 항복으로 최대내력에 도달하고 있다. 그러나 충전강관 실험체중 스테드 커넥터를 설치한 CS-200, CS-400실험체의 경우에는 기둥의 손상도 거의 나타나지 않고 기초부의 손상도 거의 발생하지 않고 있으며, 기둥의 매립 깊이에 따른 차이도 나타나지 않고 있다.

4. 결론

콘크리트충전 강관기둥과 순수강관기둥의 주각부의 거동에 대한 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 이력거동에 있어 노출형 실험체는 탄성범위에서는 거의 선형거동하고 있으며, 점진적인 강성의 저하와 함께 항복에 이르는 안정적인 거동을 나타내고 있으며

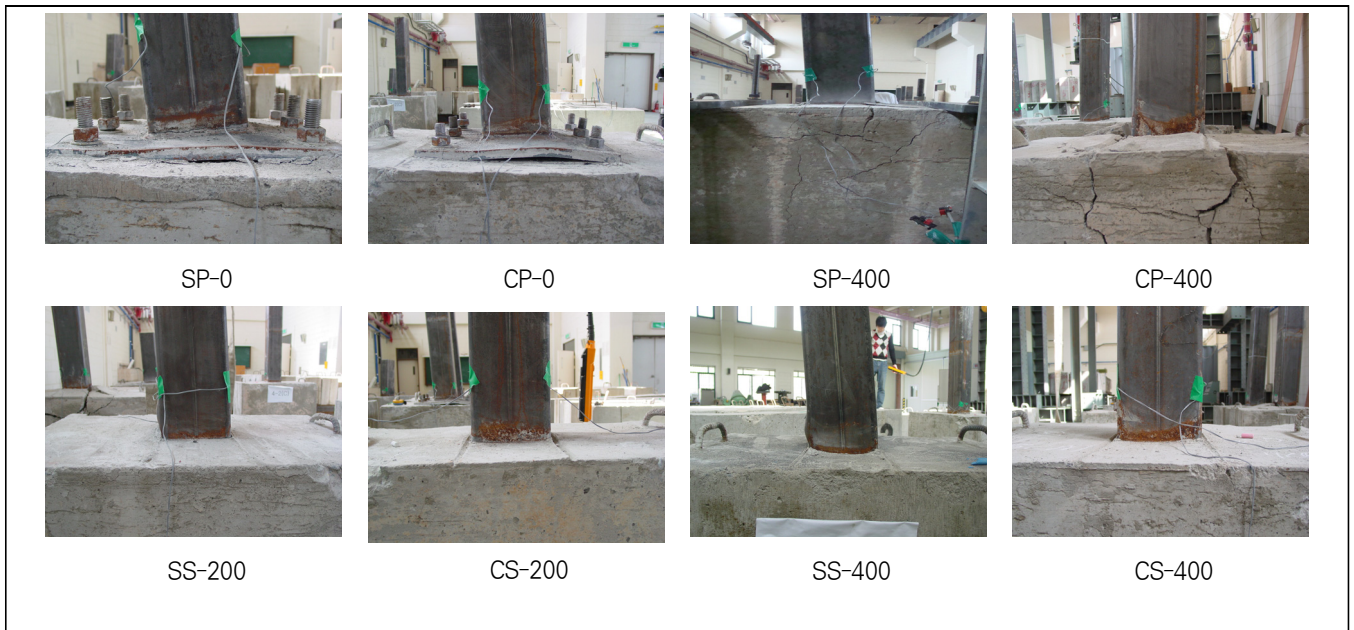


그림 8. 실험체 파괴형상

- 변형능력도 다른 실험체에 비해 높게 나타났다.
- (2) 최대내력에 있어서 스티드 커넥터를 설치한 매립형인 경우 베이스 플레이트 설치형에 기둥에 비해 높은 내력을 나타내고 있으며, 매립 깊이에 따른 내력의 차이는 나타나지 않고 있다.
- (3) 기둥의 초기강성은 주각의 형식과 기둥의 종류에 따른 차이는 크게 나타나지 않으나, 베이스 플레이트 부착형 매립기둥이 다른 형식의 주각에 비해 조금 높게 나타내고 있다.
- (4) 충전강관 기둥과 순수강관 기둥 주각부에 있어서 초기강성, 내력 및 변형능력 등 구조적 거동에 있어 의미있는 차이는 나타나지 않고 있다.
- (5) 파괴형상에 있어 노출형 베이스 플레이트 설치형인 경우에는 베이스 플레이트에 변형이 집중되고 있으며, 매립형인 경우, 순수강관기둥은 강관에 국부좌굴로 파괴에 도달하고 있으며, 충전강관인 경우에는 기초부의 파괴가 발생하고 있다.

참 고 문 헌

이영택, 김철환, 채원탁(2010) 각형강관 주각부의 거동에 관한 연구, 2010년도 학술대회발표집, 한국강구조학회, pp. 185-186

정진안, 양일승, 최성모(2003) 주물형 베이스 플레이트를 사용한 합성강관기둥 노출형 주각의 탄소성휨거동, 대한건축학회 논문집 구조계, 대한건축학회, 제19권, 제2호,

pp.33-40.

김영규, 김영호, 정희용, 김진호, 김상섭, 김규석(2000) 강구조 매립형 주각부의 하중전달 및 내력평가, 대한건축학회 논문집, 대한건축학회, 제16권, 제5호, pp.61-68.

정희용, 김상섭, 김규석(2000) 매립형 주각부의 스티드 코넥터 전단내력에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 대한건축학회, 제16권, 제1호, pp.89-96.

이승준, 송현식(2008) 편심하중을 받는 강구조 주각부의 거동에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제2호, pp.659-664.

김정현, 이승준(2005) 축력과 모멘트를 받는 H형강 주각부의 거동에 관한 해석적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제17권, 제2호, pp.217-225.

이성호, 박형철, 오보환(2005) 주강제 노출형 철골 주각부의 휨성능에 관한 실험연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제17권, 제1호, pp.93-102.

이태규, 이명재(2004) 축압축력을 받는 노출형 원형강관 주각의 거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제16권, 제4호, pp.471-478.

Kingsley, A., Williams, T., Lehman, D., and Roeder, C. (2005) Experimental Investigation of Column-to-Footing Connections for High-Strength Vanadium Steel Concrete Filled Tube Construction, *International Journal of Steel Structures*, Vol. 5, No 4, pp.377-387.

(접수일자 : 2010. 4. 14 / 심사일 2010. 4. 19 / 게재확정일 2010. 6. 10)