

HSA800 강재를 적용한 합성기둥의 축방향 내력 평가

이명재¹ · 김철환² · 김희동^{3*}

¹교수, 중앙대학교 건축학부, ²교수, 경북대학교 건축토목공학부, ³조교수, 인하공업전문대학 건축과

The Evaluation of the Axial Strength of Composite Column with HSA800 Grade Steel

Lee, Myung Jae¹, Kim, Cheol Hwan², Kim, Hee Dong^{3*}

¹Professor, School of architecture and building science, Chungang University, Seoul, 156-756, Korea

²Professor, School of architecture and civil engineering, Kyungpook National University, Daegu, 702-701, Korea

³Assistant Professor, Department of Architecture, Inha Technical College, Inchoen, 402-752, Korea

Abstract - According to the Korean Building Code (KBC), the validity of the application of 800MPa grade steel(HSA800) to composite column should be verified by experimental or analytical method. Thus, stub column tests for encased and filled composite members with HSA800 steel were conducted, and axial strength and the validity of design compressive strength equations in KBC were evaluated. The test results show that the equation of the compressive strength of encased composite column member in KBC should be modified in order to use HSA800 steel without any reduction of specified minimum yield strength. For this purpose, it is suggested that the interval of hoop should be narrowed and the effective concrete area should be used. The equation of the compressive strength of filled composite column member in KBC is applicable to filled composite column with HSA800 steel without any modification.

Keywords - HSA800 steel, Design compressive strength, Specified minimum yield strength, Encased composite member, Filled composite member

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건축구조기준^[1]의 강구조편에서는 합성구조에 사용되는 구조용강재의 설계기준항복강도와 관련하여 다음과 같은 제한사항을 두고 있다.

0709.1.2 재료강도 제한

합성구조에 사용되는 구조용 강재, 철근, 콘크리트는 다음과 같은 제한조건들을 만족해야 한다.

(2) 합성기둥의 강도를 계산하는데 사용되는 구조용 강재 및 철근의 설계기준항복강도는 440MPa를 초과할 수 없다. 단, 실험과 해석을 통하여 정당성이 증명될 경우, 440MPa를 초과하는 고강도강을 사용할 수 있다.

상기와 같은 제한 조항으로 인하여 KS D 5994^[2]에 근거한 설계기준항복강도가 650MPa인 HSA800강을 합성기둥에 적용하고자 할 경우에는 실험 및 해석을 통하여 그 사용의 정당성을 별도로 증명해야 한다. 하지만 건축구조설계 실무의 현실을 감안한다면 매우 특수한 조건이 아닐 경우 매 프로젝트 별로 상기의 타당성을 확보하기는 현실적으로 거의 불가능하다고 볼 수 있으며 결과적으로 HSA800 강재의 합성기둥 사용은 사실상 어렵게 된다.

Note.-Discussion open until April 30, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 9, 2014; revised July 23, 2014; approved on August 30, 2014.

Copyright © 2014 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-32-870-2251 Fax. +82-32-870-2512

E-mail. drkimhd@inhac.ac.kr

하지만 최근 초고층 건축물과 같이 기둥재에 가해지는 높은 축방향력으로 인하여 고강도 강재인 HSA800 적용을 위한 다양한 연구^{[3],[4],[5]}들이 진행되었으며 이를 사용한 합성기둥의 설계에 대한 요구가 증가하는 현실을 감안할 때 HSA800 강을 합성기둥에 사용할 경우 설계기준항복강도의 저감없이, 강과 콘크리트의 합성효과를 충분히 발휘하는지를 실험적으로 평가하여 그 사용의 타당성을 증명하고 실무에 적용할 수 있는 방안을 공식적으로 제안할 필요가 있다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 매입형 및 충전형 합성기둥에 대한 단주압축실험을 통해 HSA800 강재의 합성기둥 적용의 타당성을 평가하고, 개정 예정인 건축구조기준(이하 KBC2014(안))^[6]에서 HSA800 강을 적용한 합성기둥의 설계압축강도 산정식의 보완 필요성을 검토해보고자 한다.

1.2 합성기둥 관련 설계기준

축방향력을 받는 합성기둥의 설계기준은 1979년 미국의 Structural Stability Research Council에서 연구한 내용^[7]이 토대가 되어 강재단면을 철근과 동일하게 취급하여 철근콘크리트 부재에 적용하는 철근콘크리트 중심의 설계법과 철근 콘크리트 피복부분에 압축강도를 일부 인정하여 큰 강성을 갖게 하는 강재 중심의 설계법, 그리고 강재에 대한 콘크리트의 보강효과를 고려하여 철근콘크리트부분과 강재부분의 내력을 각각 계산하여 합산하는 강재와 철근콘크리트를 동시에 고려한 설계법 등으로 발전되어 왔다.

합성기둥에 압축력이 증가하면 일반적으로 콘크리트의 극한변형도보다 항복변형도가 낮은 철근 및 강재가 먼저 항복하며 강재와 철근은 항복 이후에도 저항력이 저하하지 않으므로 단면저항력은 증가되고 이후 콘크리트의 극한변형도에 도달하여 최대내력이 결정되고 내력이 저하한다. 이러한 압축력을 받는 합성기둥의 예상 거동은 최대 내력 도달시 콘크리트의 변형률이 0.0015~0.002이므로 강재의 항복변형도가 그 값 이하이면 타당하다 할 수 있다.

하지만 항복강도가 650MPa인 HSA800 강재를 사용할 경우, 강재의 항복변형률이 약 0.00317로 콘크리트보다 강재가 늦게 항복함으로 상기의 예상 거동은 타당하지 않게 된다. 따라서 최대내력 및 최대내력 도달 이후의 거동은 콘크리트와 강재의 압축 내력비, 보강철근비, 강재 폭두께비 등이 영향을 주어 복잡하게 변화한다. 상기와 같은 연유로 각국의 합성구조 설계기준에서는 합성기둥의 설계시 사용 재료에 대한 설계기준항복강도의 제한을 두고 있다.

각국의 설계기준에서 제시하고 있는 강재의 설계기준 항복강도 제한값은 다음과 같다.

AISC-LRFD(1986)^[8] : 55ksi[380MPa]

AISC-LRFD(1999)^[9] : 60ksi[415MPa]

AISC Specification for Structural Steel

Buildings (2010)^[10] : 75ksi[525MPa]

건축구조기준(KBC2009) : 440MPa

일본의 경우는 설계기준항복강도 800MPa급 강재를 생산하고 있으나 JIS규격이 아닌 일본건축센터의 인증을 받아 사용할 수 있도록 하고 있어 국내 및 미국과는 조금 다른 방식을 취하고 있다. 하지만 제진구조 등에 탄성적으로 사용하고 있을 뿐으로 합성구조에의 적용은 미미한 실정이다.

1.3 연구 추진 방법

HSA800 강재의 합성기둥 적용 및 KBC2014(안) 합성기둥 설계압축강도 산정식 보완의 필요성을 평가하기 위해 본 연구에서는 실험적 평가 방법을 적용하였다.

실험적 평가를 위해 부재의 기하학적 불안정성의 영향을 배제하고 단면내력 및 강재의 잔류응력 분포의 영향만을 평가할 수 있는 단주압축실험^[11]을 주요 연구 방법으로 선정하였으며, 이를 위해 HSA800 강재를 사용한 매입형 및 충전형 합성단주 실험체를 제작하여 정적가력실험을 실시하였다.

또한, 합성 실험체의 경우 선행된 연구^{[12],[13],[14]}를 통하여 현행 건축구조기준에서 합성기둥에 적용이 허용된 고강도 강재인 SM570TMC ($F_y = 440$ MPa) 강재로 동일한 조건의 실험체를 제작하여 강재의 설계기준항복강도 상승에 따른 영향을 비교, 평가할 수 있도록 하였다.

실험체 제작에 사용된 소재 및 단면의 특성을 파악하기 위해 강재의 인장강도시험과 콘크리트 압축강도시험을 실시하였으며, 합성효과를 평가하기 위해 HSA800 강을 적용한 비합성형 단주(H형강 및 각형, 원형강관 단주)도 제작하여 정적가력실험을 수행하였다.

2. 단주압축실험

2.1 실험 계획

2.1.1 실험체 계획

본 연구에서는 실험적 연구의 대상으로 합성 기둥재로 주로 사용되는 H형강 매입형 합성기둥(SRC)과 콘크리트 충전

Table 1. List of specimens

Specimen	Section	Length	Steel Grade	Steel ratio	width-thickness ratio	remark
HS	H-120x120x12x12	360mm	HSA800	-	Flange: 5.0 Web: 8.0	Non-composite
E-16 (hoop 160mm)	320x320 (H-120x120x12x12)	960mm		0.04		B/t: 13.0
E-8 (hoop 80mm)				-	Non-composite	
SS	□-180x12	540mm		0.25	D/t: 35.7	CFT
FS-1, FS-2				-		Non-composite
CS	Φ-250x7	750mm		0.11	Flange: 5.0 Web: 8.0	CFT
FC-1, FC-2				-		Encased composite (hoop 160mm)
E-16_5				0.04		CFT
FS_5	□-180x12	540mm	SM570TMC	0.25	B/t: 13.0	CFT
FC_5	Φ-250x7	750mm		0.11		D/t: 35.7

* Note 1. Main rebar of encased composite type : 8-D16

각형 및 원형 강관 기둥(CFT)을 선정하여 실험체를 제작하였다.

실험체의 단면 치수는 자재의 확보가 가능한 HSA800 강재 두께와 가력 시험 기기의 최대 가력 용량(10,000kN)을 고려하여 선정하였으며, 실험체 길이는 부재 좌굴의 영향이 없고 단면에서 발생하는 잔류응력 분포의 영향을 고려할 수 있는 단면 최대 치수의 3배로 하였다. 단, 원형강관의 경우 실험용 가력기기의 성능과 확보 가능한 강관 두께 문제로 12mm 원판을 절삭가공을 통해 두께 7mm로 가공 후 실험체 제작에 사용하였다.

매입형 합성기둥의 경우 띠철근의 심부 콘크리트 구속효과를 파악하기 위해 배근 간격을 건축구조기준에서 규정하는 최대 간격인 160mm (단면 최소 폭의 1/2)을 적용한 실험체와 띠철근 배근 간격을 건축구조기준의 50% (단면 최소 폭의 1/4)를 적용한 실험체(띠철근 간격 80mm)를 각각 제작하였다. 띠철근 간격이 80mm 인 경우는 철근콘크리트 구조물의 내진 설계시 우수한 비탄성 거동이 요구되는 특수 모멘트 골조 상에서 요구되는 띠철근 배근 간격과 동일한 것이다. 이외에 강재비, 주근 간격, 피복두께 등은 건축구조기준에 준하여 제작되었다.

실험체 명과 재원은 Table 1에 요약하여 정리하였으며, 실험체 제작에 사용된 소재를 요약하면 다음과 같다.

- 강재 : HSA800, SM570TMC
- 12mm (H형강, 각형강관),
- 7mm (원형강관)

- 철근 : SD500 D16 (주근), SD500 D10(띠철근)
- 콘크리트 : 압축강도 27MPa

2.1.2 계측 및 가력 계획

(1) 변형률 측정

a) 비합성 실험체

비합성형 실험체의 경우 수직방향 변형률을 측정하기 위해 부재 중앙부 4면에 와이어스트레인지이지(W.S.G.)를 부착하였다. 단, 각형 및 원형강관 실험체의 경우 충전형에서 발생하는 구속효과와의 비교, 검토를 위하여 수평방향의 변형률을 측정할 수 있도록 부재 중앙부와 하부에서 1/4 지점에 수평방향으로 W.S.G.를 부착하였다.

b) 합성 실험체

① 매입형 실험체

매입형 실험체는 내부 강재 코어와 주근 및 띠철근의 변형률을 파악하기 위해 각각 W.S.G.를 부착하였고, 콘크리트 심부 변형률 변화를 파악하기 위해 콘크리트 심부 중앙지점에 매입형 콘크리트 게이지를 설치하였다. 또한 외부 콘크리트 표면 중앙부에 콘크리트 게이지를 부착하여 콘크리트의 변형률을 파악할 수 있도록 하였다.

② 충전형 실험체

충전형 실험체의 경우 수직방향 변형률을 측정하기 위해 부재 중앙부 4면에 W.S.G.를 부착하였다. 또한, 구속효과

의 평가를 위해 수평방향의 변형률을 측정할 수 있도록 부재 중앙부와 하부에서 1/4 지점에 수평방향으로 W.S.G.를 부착하였다. 그리고 강관 내부에 충전된 콘크리트 심부에 콘크리트 매입형 게이지를 설치하여 심부 콘크리트의 변형률을 측정할 수 있도록 하였다.

(2) 변위량 측정

부재의 축방향 변위를 측정하기 위해 실험체의 4 면에 100mm의 변위계를 설치하여 축방향 변위를 측정하였다.

(3) 가력 계획

실험체의 가력은 10,000kN 성능의 만능재료시험기를 이용하여 단조 압축가력을 수행하였다. 가력은 변위제어 방식을 사용하였으며, 가력속도는 0.02mm/sec를 적용하였다.

2.2 재료 실험

2.2.1 강재 인장강도시험

실험체 제작에 사용된 HSA800강 및 SM570TMC 강의 기계적 특성을 평가하기 위해 KS B 0802의 금속재료 인장시험편 규정에 따라 인장시험편을 제작하였고 KS B 0801의 금속재료 인장시험 방법에 따라 인장강도시험을 실시하였다. 실험은 실험체 제작에 사용된 12mm 및 7mm 강재의 절삭 가공 전 원 소재인 12mm 강재를 기준으로 수행되었다.

실험 결과 두 강재 모두 응력-변형도 곡선에서 명확한 항복점을 보이지 않는 고강도 강재의 전형적인 continuous yielding 현상을 나타내어 강재의 항복점은 0.2% offset 방법을 사용하여 산정하였다. 인장강도시험의 결과는 Table 2

Table 2. Tensile strength test results

Specimen	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_y / σ_u	Elongation (%)
800T12-1	745	897	0.83	15
800T12-2	716	878	0.82	15
800T12-3	717	886	0.81	16
800T12-4	735	889	0.83	15
Average	728	888	0.82	15
KS	650~770	800~950	under 0.85	over 15
570T12-1	479	673	0.71	19
570T12-2	467	659	0.71	19
570T12-3	466	662	0.70	20
Average	471	664	0.71	19
KS	over 460	570~720	-	over 19

에 나타내었으며, 시험 결과 모든 항목에서 KS의 규정값을 만족하는 결과를 나타내었다.

또한, 매입형 실험체 제작에 사용된 철근(SD500)의 인장강도시험 결과를 Table 3에 나타내었다. 철근 역시 모든 기계적 물성치가 KS의 규정값을 만족하는 것으로 나타났다.

2.2.2 콘크리트 압축강도시험

매입 및 충전을 위해 사용된 콘크리트의 28일 압축강도(f_{ck}) 시험 결과를 Table 4에 나타내었다. 초기 실험체 계획 당시에는 콘크리트 압축강도 40MPa를 목표로 하여 실험체를 설계하였으나 실제 28일 압축강도 시험결과는 이에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 따라서, 이후 설계압축강도 산정시 콘크리트 압축강도(f_{ck})는 압축강도시험을 통한 평균값을 적용하여 27MPa를 기준으로 하였다.

3. 단주압축 실험결과

3.1 비합성형 단주

HSA800강을 사용한 합성형 단주 실험체 제작에 적용된 H형강과 각형 및 원형강관 단면에 대해서 비합성형 단주 압

Table 3. Tensile strength test results of rebar

Specimen	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)
D10-1	552	628
D10-2	548	625
D10-3	550	620
Average	550	624
D16-1	524	738
D16-2	523	747
D16-3	520	732
Average	522	739
KS	Over 500	Over 620

Table 4. Compressive strength test results of concrete

Specimen	f_{ck} (N/mm ²)	E (N/mm ²)
C-1	27.4	27,910
C-2	27.1	27,831
C-3	27.7	27,988
Average	27.4	27,910

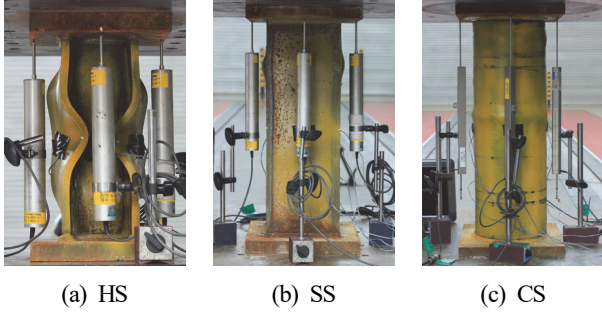


Fig. 1. Stub column tests for non-composite specimens (HSA800)

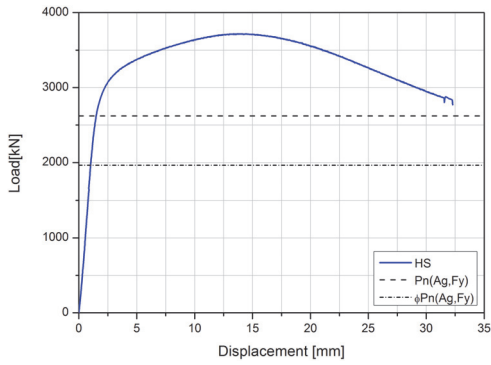


Fig. 2. Axial load and displacement relationships (HS)

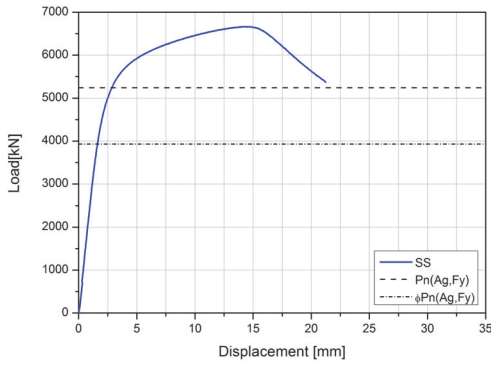


Fig. 3. Axial load and displacement relationships (SS)

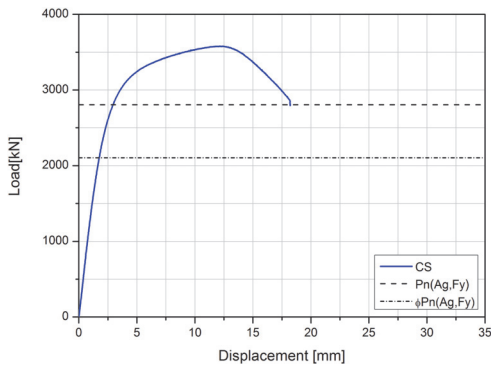


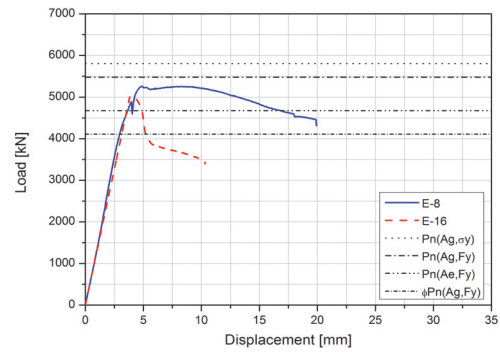
Fig. 4. Axial load and displacement relationships (CS)

축시험을 실시하였다. 실험 결과 모든 비합성형 단주의 경우 단면의 국부좌굴의 진행으로 인해 최대 내력에 도달하였다. 모든 경우에 있어 최대내력은 단면의 공칭강도($F_y \cdot A_g$) 이상을 나타내었다.

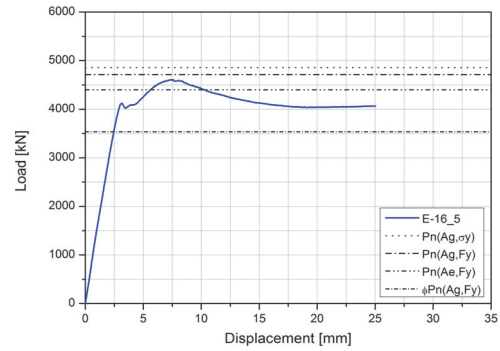
각 단면별 최종 가력종료 상황을 Fig. 1에 나타내었으며 축하중-축방향 변위 그래프를 Fig. 2에서 4까지 나타내었다.

3.2 매입형 단주

매입형 합성 단주인 E-16, E-8 및 E-16_5 실험체의 축



(a) E-16 and E-8 specimens



(b) E-16_5 specimen

Fig. 5. Axial load and displacement relationships (Encased composite type specimens)

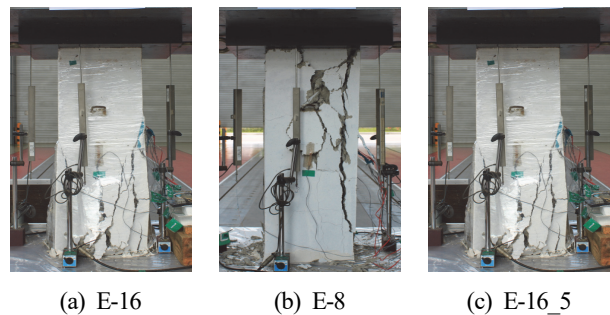


Fig. 6. Specimen condition after the tests (E)

하중-축방향변위 관계를 Fig. 5에 나타내었으며, 실험체의 최종 파괴 성상은 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 5에는 건축구조기준의 매입형 합성기둥 압축강도 산정식에서 강도저감계수(ϕ)를 제외한 공칭압축강도(P_n)와 강도저감계수를 적용한 설계압축강도(ϕP_n)를 함께 표기하였다.

또한, P_n 산정시 콘크리트 전체 단면적(A_g)을 적용한 경우와 띠철근으로 구속이 된 심부 유효콘크리트 단면적(A_e)만 적용한 경우, 그리고 강재의 설계기준항복강도(F_y)를 적용한 경우와 재료시험에 따른 항복강도(σ_y)를 적용한 경우의 P_n 를 각각 산정하여 표시하였다.

매입형 실험체의 경우 모두 최대하중에 도달하기 이전에 피복 콘크리트의 균열 및 박리가 발생하였고, 이후 추가적인 내력상승이 나타났으며, 내부 강재 코어 및 주근의 항복 및 좌굴 발생 등으로 인해 최대내력이 결정되었다.

3.3 충전형 단주

3.3.1 충전각형강관

충전각형강관 단주인 FS-1, FS-2 및 FS_5 실험체의 축

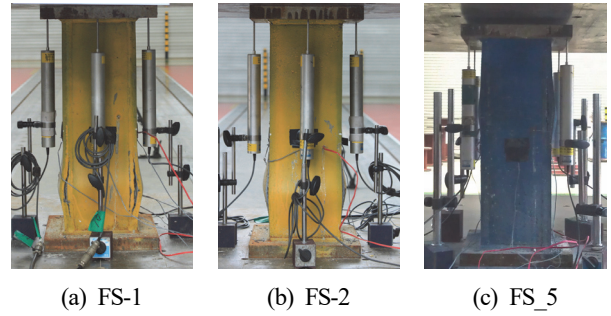
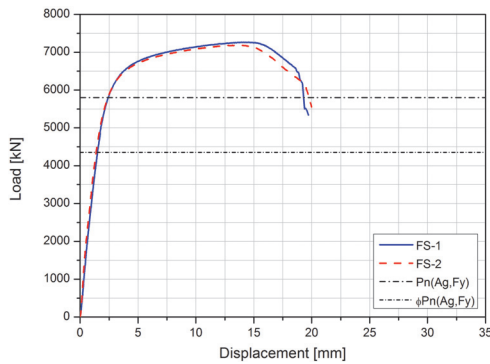


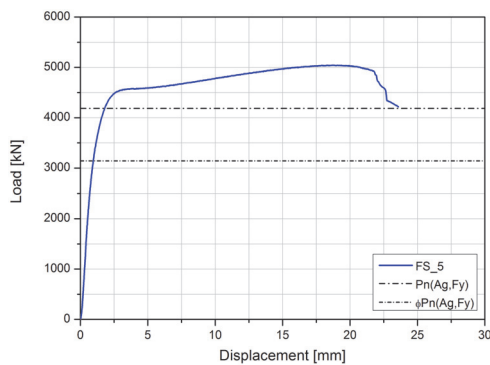
Fig. 8. Specimen condition after the tests (FS)

하중-축방향 변위 관계를 Fig. 7에 나타내었으며 실험체의 최종 가력 상황을 Fig. 8에 나타내었다. 건축구조기준의 충전형 합성기둥 설계압축강도 산정식에서 강도저감계수를 제외한 공칭압축강도(P_n)와 설계압축강도(ϕP_n)를 그림에 같이 표기하였다.

충전각형강관 단주 실험체는 모두 강관의 국부좌굴로 최대내력이 결정되었으며 이후 과도한 국부좌굴로 인한 용접부 파단으로 가력이 중단 되었다.

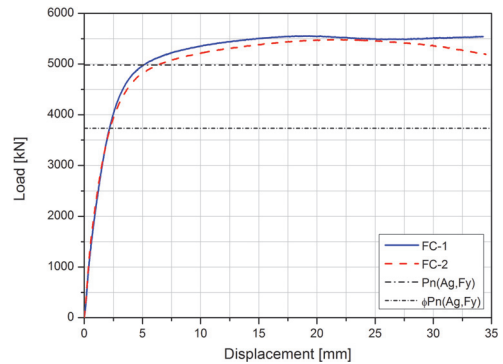


(a) FS-1 and FS-2 specimens

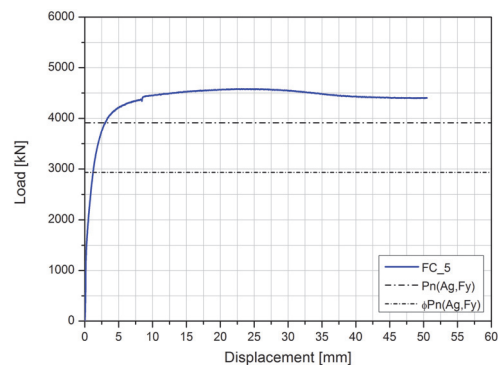


(b) FS_5 specimen

Fig. 7. Axial load and axial strain relationships (FS)



(a) FC-1 and FC-2 specimens



(b) FC_5 specimen

Fig. 9. Axial load and axial strain relationships (FC)

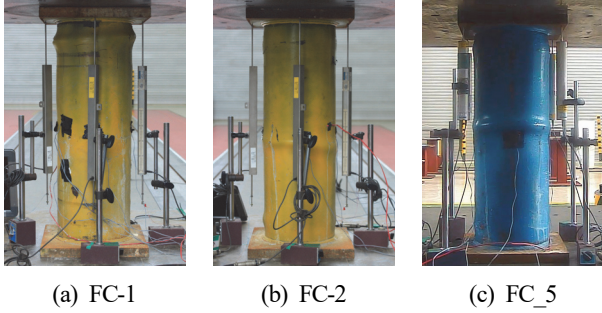


Fig. 10. Specimen condition after the tests (FC)

3.3.2 충전원형강관

충전원형강관 단주인 FC-1, FC-2 및 FC_5 실험체의 하중-변위 관계를 Fig. 9에 나타내었으며 실험체의 최종 가력 상황을 Fig. 10에 나타내었다.

충전각형강관의 경우와 동일하게 공칭압축강도(P_n)와 설계압축강도(ϕP_n)를 그림에 같이 표기하였다.

충전원형강관 단주 실험체 역시 모두 강재의 국부좌굴로 인해 최대내력이 결정되었다.

4. 축방향 내력 평가

4.1 매입형 합성단주

4.1.1 HSA800 강재 적용 경우

(1) 최대 내력

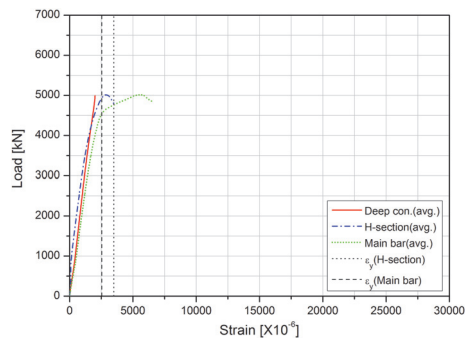
HSA800 강재를 적용한 매입형 실험체의 최대 내력은 띠철근의 간격을 160mm로 설치한 E-16 실험체는 5,014.9 kN으로 나타났으며, 띠철근의 간격을 80mm로 설치한 E-8 실험체의 경우 5,260.2kN으로 나타났다. 따라서 띠철근 간격의 감소는 띠철근의 내부 콘크리트 구속력을 증대시켜 콘크리트의 조기 파괴를 차단하여 부재의 최대내력 향상에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

(2) 설계압축강도와의 비교

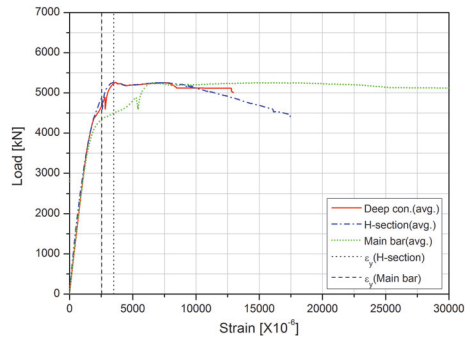
Fig. 5(a)에서 보면 띠철근 간격이 건축구조기준에 따라 160mm로 설치된 E-16 실험체와 띠철근 간격을 철근콘크리트 특수모멘트골조의 규정인 80mm를 적용한 E-8 실험체 모두 건축구조기준의 설계압축강도(ϕP_n) 이상의 강도는 발현이 되나 공칭압축강도($P_n(A_g, F_y)$)에는 도달하지 못하는 것으로 나타났다. 하지만 띠철근의 간격을 좁힌 E-8 실험

체의 경우가 E-16 실험체에 비해 높은 압축강도를 나타내고 있으며, 최대내력 이후의 거동도 급격한 하중의 감소 없이 우수한 변형성능을 나타내고 있다.

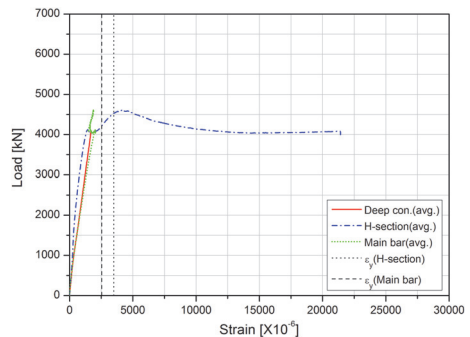
실험체의 압축강도 변화 요인을 분석하기 위해 Fig. 11 (a), (b)의 E-8, E-16 실험체 콘크리트 변형률을 비교해보면 띠철근 간격이 기존의 건축구조기준에 준해 설치된 E-16 실험체의 경우 피복 콘크리트 박리 부근에서 심부 콘크리트의 변형률도 정지하였으나, 띠철근의 간격이 좁은 E-8 실험체의 경우 피복 콘크리트의 박리 이후에도 심부의 콘크리트 변형율은 지속적으로 증가하고 있어 콘크리트가 일정 수분의 내력을 유지하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) E-16 specimens



(b) E-8 specimen



(c) E-16_5 specimen

Fig. 11. Average axial strain of concrete and steel (E)

또한, 락철근의 간격은 매입된 H형강의 거동에도 영향을 미치는 것으로 나타났다. Fig. 11(a), (b)를 보면 락철근의 구속력이 증가할수록 내부 다축응력으로 구속된 콘크리트에 의한 심부 강재 구속력이 증가하여 국부좌굴 발생 등 강재의 내력 저하 요인을 효과적으로 억제하는 것으로 판단된다. 그리고 매입된 주철근 역시 락철근 간격이 좁아 구속력이 강할수록 좌굴 방지 등의 효과로 인하여 내력 증진에 기여도가 증가하는 것으로 나타났다.

따라서, HSA800 강재를 적용한 매입형 합성기둥에서 심부의 콘크리트와 매입된 강재, 그리고 주철근의 거동을 일체화하여 합성효과를 기대하기 위해서는 기존에 건축구조기준에서 제안된 락철근의 간격보다 조밀한 간격의 락철근 배근을 통하여 락철근의 구속력을 증가시키는 것이 필요할 것으로 판단되며 이는 선행된 고강도 콘크리트를 적용한 연구^[15] 결과와도 일치하므로 설계압축강도 산정시 이러한 요인들이 적절하게 고려되어야 할 것으로 판단된다.

4.1.2 SM570TMC 강재 적용 경우

(1) 최대 내력

SM570TMC 강재를 적용한 매입형 실험체인 E16_5 실험체의 최대 내력은 4,604.3kN으로 나타났다.

(2) 설계압축강도와와의 비교

Fig. 5(b)를 보면 HSA800 강재를 적용한 경우와 유사하게 SM570TMC를 적용한 경우도 설계압축강도(ϕP_n) 이상의 강도는 발현이 되나 공칭압축강도($P_n(A_g, F_y)$)에는 약 2% 정도 미달하는 것으로 나타났다. 다만, HSA800의 결과와는 달리 SM570TMC의 경우 실제 실험체의 최대강도가 설계압축강도보다 30% 이상 안전측으로 상회하고 있어 건축구조기준에서 제시된 바와 같이 기존의 설계압축강도 산정방식에 따른 설계압축강도를 적절하게 발현하고 있는 것으로 판단된다.

4.2 충전형 합성단주

4.2.1 충전각형강관 경우

(1) 최대내력

충전각형강관 단주 실험체는 HSA800 강종을 적용한 FS-1 실험체는 7,266.8kN, FS-2 실험체는 7,186.6kN의 최대내력을 나타냈으며, SM570TMC 강종을 적용한 FS_5 실험체는 5,042.6kN의 최대내력을 나타내었다.

(2) 설계압축강도와와의 비교

Fig. 7을 보면 충전각형강관 단주압축 실험체의 경우 강중에 관계없이 건축구조기준의 설계식을 적용한 설계압축강도 뿐 아니라 강도저감계수를 제외한 압축강도보다도 높은 내력을 나타내고 있다.

따라서 충전각형강관의 경우 강관과 심부의 콘크리트가 일체거동을 하면서 충분한 합성효과를 발휘하고 있다고 판단되며, 이는 강관과 콘크리트 심부의 변형률 측정 결과를 비교한 Fig. 12에서도 잘 나타나고 있다.

따라서, 충전각형강관 기둥재의 경우 강관 소재로 SM570TMC 뿐 아니라 HSA800 강 사용에도 무리가 없는 것으로 판단되며 건축구조기준에서 제안된 설계압축강도 산정식의 적용이 가능하다고 판단된다.

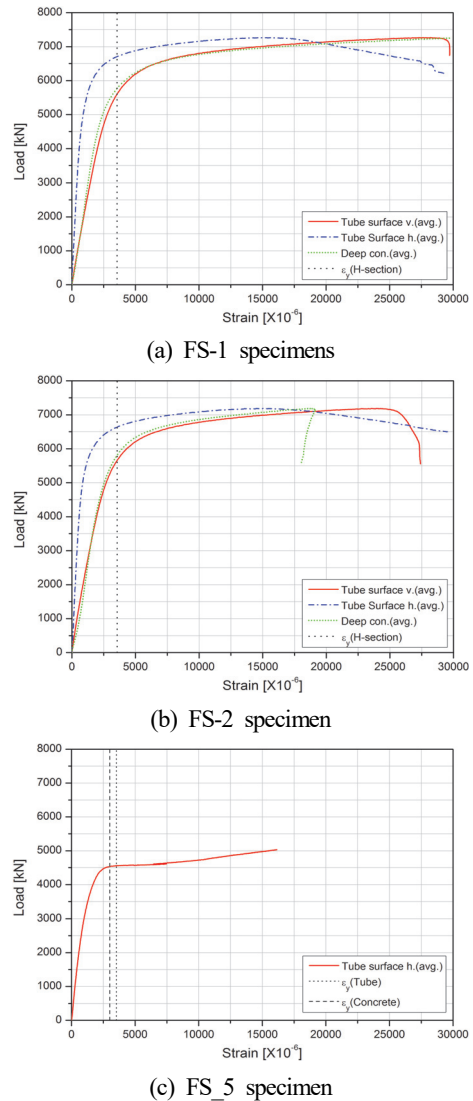


Fig. 12. Average axial strain of concrete and steel (FS)

4.2.2 충전원형강관 경우

(1) 최대내력

충전원형강관 단주 실험체는 HSA800 강종을 적용한 FC-1 실험체는 5,564.1kN, FC-2 실험체는 5,486.5kN의 최대내력을 나타냈으며, SM570TMC 강종을 적용한 FC_5 실험체는 4,584.0kN의 최대내력을 나타내었다.

(2) 설계압축강도와와의 비교

Fig. 9의 실험 결과에서 보면 충전원형강관 단주압축 실험체의 경우 적용 강종에 관계없이 건축구조기준에 근거하여 재료의 설계기준항복강도를 적용하여 산정한 압축강도를 상회하고 있다.

따라서 충전원형강관의 경우 강관과 심부의 콘크리트가 일체거동을 하면서 충분한 합성효과를 발휘하고 있다고 판단되며, 이는 Fig. 13에서 나타낸바와 같이 강관과 콘크리트 심부의 변형률 측정 결과를 비교한 결과에서도 잘 나타나고 있다. 따라서, 충전원형강관 기둥재의 경우 강관 소재로 SM570TMC 강종 뿐 아니라 HSA800 강 사용에도 무리가 없는 것으로 판단되며 건축구조기준에서 제안된 설계압축강도 산정식의 적용이 가능하다고 판단된다.

4.3 HSA800 강을 적용한 합성기둥의 설계압축강도 산정식 제안

4.3.1 매입형 합성기둥

4.1절과 실험결과를 공칭압축강도 및 설계압축강도로 무차원화한 결과를 나타낸 Table 5에서 HSA800 강재를 적용한 매입형 합성기둥의 실험결과는 모두 설계압축강도(ϕP_n)를 상회하고 있으나 현행 건축구조기준에서 합성기둥에 적용을 허용하고 있는 SM570TMC 강종과는 달리 충분한 여유를 가지지 못하고 있으며, 공칭압축강도(P_n)에는 도달하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서 수행된 실험적 연구 결과만으로는 현행 건축구조기준의 설계식 및 설계 제한 조건을 그대로 적용하기에는 콘크리트의 조기 파괴에 따른 내력 저하의 영향을 무시할 수 없는 것으로 판단된다.

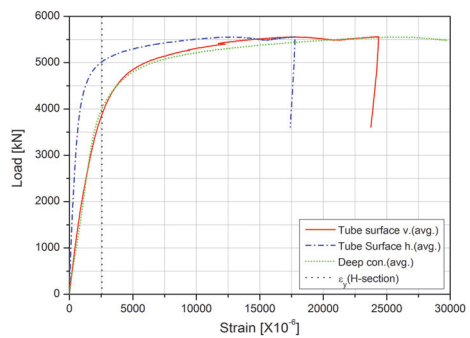
따라서, 4.1절의 실험결과 분석에서도 나타낸바와 같이 HSA800 강종을 매입형 합성기둥에 적용할 경우 띠철근 간격 축소를 통하여 콘크리트의 조기 파괴에 따른 내력 저하 현상을 가능한 억제할 필요가 있을 것으로 생각된다.

또한, 콘크리트 단면 산정시 구속효과를 증진시켜 조기

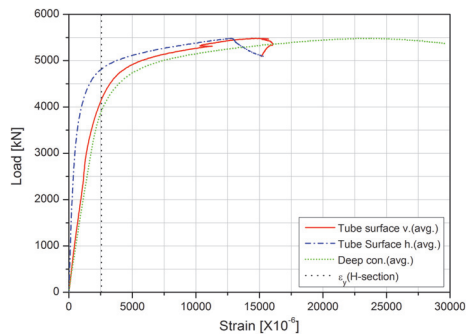
파괴에 대한 적절한 조치를 취하기 어려운 외부의 피복 콘크리트의 기여도를 무시하는 것이 안전측의 결과를 얻기 위해서 필요할 것으로 판단된다.

실제 실험결과와 유효콘크리트 단면적과 재료의 설계기준항복강도를 적용한 압축강도 ($P_n(A_e, F_y)$)를 비교한 Fig. 5에서 보면, 띠철근의 간격을 80mm로 좁힌 E-8 실험체의 경우와 160mm를 사용한 시험체 실험결과가 모두 유효콘크리트 단면적을 사용한 압축강도를 상회하는 것을 볼 수 있다.

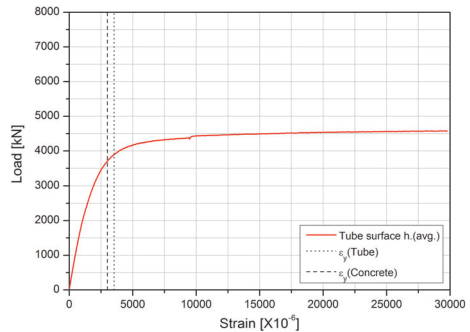
따라서 HSA800 강재를 적용한 매입형 합성 기둥의 설계 압축강도 관련 구조제한 및 압축강도 산정 관련 규정은 상기의 내용을 반영하여 개정함을 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.



(a) FC-1 specimens



(b) FC-2 specimen



(c) FC_5 specimen

Fig. 13. Average axial strain of concrete and steel (FC)

Table 5. Normalized results of tests

Specimen	Steel grade	test / P_n	test / ϕP_n	remark
E-16	HSA800	0.92	1.22	Encased composite
		0.89	1.19	
E-8		0.96	1.28	
FS		1.25	1.67	CFT
		1.24	1.65	
FC		1.21	1.61	CFT
	1.19	1.59		
E-16_5	SM570	0.98	1.30	Encased composite
FS_5	TMC	1.20	1.61	CFT
FC_5		1.10	1.46	CFT

다만, E-16 및 E-8 실험체 모두 기존의 설계압축강도 (ϕP_n)는 상회하는 결과를 나타내고 있으므로 추후 좀 더 다양한 변수에 대한 실험 및 해석적 검토가 이루어진다면 SM570TMC와 같이 건축구조기준에서 제시된 매입형 합성기둥의 설계압축강도식의 직접 적용 가능성도 충분히 검토해볼 수 있을 것으로 판단된다.

4.3.2 충전형 합성기둥

4.2절과 Table 5의 결과에서 나타났듯이 충전형 합성기둥의 경우 각형 및 원형강관 모두 건축구조기준의 설계강도 산정식에 따른 계산값을 상회하는 압축강도를 나타내고 있으며 심부의 콘크리트와 강관이 일체 거동을 하면서 합성효과를 발현하고 있는 것으로 나타났다.

따라서 HSA800 강의 충전형 합성 기둥 적용시에는 SM570TMC와 동일한 조건으로 건축구조기준의 설계식을 적용하여도 무방할 것으로 판단된다.

5. 결론

HSA800 강재를 합성 기둥에 적용한 경우의 축방향 내력을 평가하기 위해 수행한 금번의 실험적 연구를 통해 파악된 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 수행된 HSA800 강재를 적용한 매입형 합성단주 실험결과에서는 띠철근의 배근 간격이 압축강도에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났으며, 적절한 띠철근 구속효과를 기대하기 위해서는 기존 띠철근 배근간격의

0.5배가 적용되는 특수모멘트 저항골조의 띠철근 배근을 적용하는 것이 바람직 한 것으로 나타났다.

- (2) HSA800 강재를 적용한 매입형 합성단주의 실험결과에 따르면 띠철근으로 구속되지 않은 콘크리트 단면은 내력 발현에 기여도가 낮은 것으로 나타나 설계압축강도 산정시에는 띠철근으로 구속된 유효단면적의 적용이 필요할 것으로 판단된다.
- (3) 실험결과에 따르면 HSA800 강재의 설계기준항복강도 (F_y)의 저감없이 매입형 합성기둥의 설계압축강도를 산정하기 위해서는 띠철근 간격의 감소와 콘크리트의 유효단면적을 적용할 것을 제안하였다.
- (4) HSA800 강재를 적용한 충전형 합성단주의 실험결과에서 각형 및 원형 모두 전체 단면의 공칭압축강도를 상회하였다. 따라서 충전형 합성기둥의 경우 HSA800 강재의 설계기준항복강도(F_y)의 저감없이 건축구조기준에 따른 강도계산식을 사용하여 설계압축강도를 평가할 수 있다고 판단된다.

참고문헌(References)

- [1] 국토해양부(2009) 건축구조기준(국토해양부 고시 제2009-1245호), 국토해양부.
Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009) *Korea Building Codes* (MLTM Notice No. 2009-1245), MLTM, Korea (in Korean).
- [2] 국가기술표준원(2011) 건축구조용 고성능 압연강재(KS D 5994: 2011).
Korean Agency for Technology and Standards (2011) *High-Performance Rolled Steel for Building Structures* (KS D 5994: 2011), Korea (in Korean).
- [3] 김태수, 이명재, 오영석, 이강민, 김도환(2012) 건축구조용 고성능강(HSA800) 용접 H형 단면기둥의 압축강도에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제6호, pp.627-636.
Kim, T.S., Lee, M.J., Oh, Y.S., Lee, K.M., and Kim, D.H. (2012) A Study on Compressive Strength of Built-up H Shaped Columns Fabricated with HSA800 High Performance Steels, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.6, pp.627-636 (in Korean).
- [4] 이강민, 이명재, 오영석, 김태수, 김도환(2013) 중심압축력을 받는 건축구조용 고성능강(HSA800) 용접H형 단주의 국부좌굴거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제3호, pp.289-297.

- Lee, K., Lee, M.J., Oh, Y.S., Kim, T.S., and Kim, D.H. (2013) Local Buckling Behavior of Stub H-Shaped Columns Fabricated with HSA800 High Performance Steels Under Concentric Axial Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.3, pp.289-297 (in Korean).
- [5] 이철호, 김대경, 한규홍, 박창희, 김진호, 이승은, 김도환 (2013) HSA800 후판재의 맞댐용접부 인장강도 실험, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제4호, pp.431-440.
- Lee, C.H., Kim, D.K., Han, K.H., Park, C.H., Kim, J.H., Lee, S.E., and Kim, D.H. (2013) Tensile Testing of Groove Welded Joints Joining Thick-HSA800 Plates, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.4, pp.431-440 (in Korean).
- [6] 대한건축학회(2014) 건축구조기준(안). 대한건축학회. Architectural Institute of Korea (2014) *Korea Building Code (Draft)*, AIK, Korea (in Korean).
- [7] Structural Stability Research Council, Task Group 20 (1979) A Specification for the Design of Steel-Concrete Composite Columns, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.16, No.4, pp.105-115.
- [8] American Institute of Steel Construction (1986) *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*, USA.
- [9] American Institute of Steel Construction (1999) *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*, USA.
- [10] American Institute of Steel Construction (2010) *Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-10)*, USA.
- [11] Galambos, T.V. (Ed.) (1988) *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*, John Wiley & Sons, USA.
- [12] 한국강구조학회(2007) SM570TMC 강역의 합성기둥 적용시 설계기준 항복강도에 관한 연구, 한국강구조학회. KSSC (2007) *Research on the Design Specific Yield Strength of SM570TMC Steel for Composite Column*, KSSC, Korea (in Korean).
- [13] 이명재(2008) SM570TMC강을 이용한 콘크리트충전강관 합성기둥의 설계기준 항복강도, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제1호, pp.205-213.
- Lee, M.J. (2008) The Specified Minimum Yield Stress of SM570TMC in CFT Composite Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.1, pp.205-213 (in Korean).
- [14] 이명재, 오영석, 이은택(2008) SM570TMC강의 매입형 합성기둥 적용시 설계기준 항복강도에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제1호, pp.195-203.
- Lee, M.J., Oh, Y.S., and Lee E.T. (2008) The Specified Minimum Yield Stress of SM570TMC in Composite Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.1, pp.195-203 (in Korean).
- [15] 김창수, 박홍근, 최인락, 정경수, 김진호(2010) 800MPa 강재 및 100MPa 콘크리트를 적용한 매입형 합성기둥의 구조성능, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제5호, pp.497-509.
- Kim, S.C., Park, H.G., Choi, I.R., Chung, K.S., and Kim, J.H. (2010) Structural Performance of Concrete-Encased Steel Columns Using 800MPa Steel and 100MPa Concrete, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.5, pp.497-509 (in Korean).

요 약 : 건축구조기준에 따라 HSA800 강재의 합성기둥 적용시에는 실험 또는 해석적 방법을 통하여 적용의 타당성을 검증해야 한다. 이에 본 연구에서는 합성기둥으로 주로 사용되는 H형강 매입형, 각형강관 및 원형강관 충전형 합성기둥 단면을 대상으로 HSA800 강재를 적용한 단주압축실험을 실시하고, 이를 통하여 축방향 내력 및 건축구조기준의 합성기둥 설계압축강도 설계식 적용의 타당성을 평가하였다. 실험결과 매입형 합성기둥의 경우 HSA800 강재의 설계기준항복강도를 저감없이 사용하기 위해서는 건축구조기준의 설계압축강도 산정식의 조정이 필요한 것으로 나타났으며, 이를 위해 띠철근 간격 조정 및 콘크리트의 유효단면적 사용을 제안하였다. 충전형 합성기둥의 경우에는 각형, 원형충전강관 기둥 모두 별도의 강도 저감이나 설계압축강도 산정식의 조정 없이 사용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심어 : HSA800 강재, 설계압축강도, 설계기준항복강도, 매입형 합성기둥, 충전형 합성기둥