

일정축력하에 고온을 받는 고강도 콘크리트 충전강관 기둥의 구조적 거동에 관한 연구

정 경 수^{1)*} · 최 인 략¹⁾ · 김 도 환¹⁾ · 김 진 호²⁾

¹⁾ 책임연구원, RIST, 강구조연구소 ²⁾ 수석연구원, RIST, 강구조연구소

Experimental Evaluation of Fire Behavior of High-Strength CFT Column with Constant Axial Load

Chung, Kyung Soo^{1)*} Kim, Ki Myon¹⁾ Kim, Do Hwan¹⁾ Kim, Jin Ho²⁾

¹⁾ Sr. Researcher, Steel Structure Research Division, RIST, Incheon, 406-840, Korea

²⁾ Sr. Principal Researcher, Steel Structure Research Division, RIST, Incheon, 406-840, Korea

ABSTRACT : Fire-resistant (FR) test data for a square concrete-filled steel tube (CFT) columns consisting of high-strength steel ($f_y > 650\text{MPa}$) and high strength concrete ($f_{ck} > 100\text{MPa}$) under axial loads are insufficient. The FR behavior of square high-strength CFT members was investigated experimentally for two specimens having $400 \times 400 \times 15 \times 3,000\text{mm}$ with two axial load cases (5,000kN and 2,500kN). The results show that the FR performance of the high-strength CFT was rapidly decreased at earlier time (much earlier at high axial load) than expected due to high strength concrete spalling and cracks. In addition, a fiber element analysis (FEA) model was proposed and used to simulate the fiber behaviour of the columns. For steel and concrete, the mechanical and thermal properties recommended in EN 1994-1-2 are adopted. Test results were compared to those of numerical analyses considering a combination of temperature and axial compression. The numerical model can reasonably predict the time-axial deformation relationship.

KEYWORDS : concrete filled steel tube, high-strength material, fire resistance, column

1. 서 론

초고층 구조물에서 고축력과 힘을 동시에 받는 기둥부재는 일반강도 소재를 적용할 경우 대형 단면이 필요하게 된다. 따라서 초고층 구조물의 대형기둥에 있어서 부재단면 축소는 부재 제작 및 운반/양중 등의 측면에서 시공성을 향상시킬 수 있다. 또한, 부재 단면축소는 구조물의 사용성 측면에서도 중요한 이슈가 된다. 즉, 부재 단면축소에 따른 임대면적 증가와 평면 효율성의 극대화를 위하여 일반적으로 사용되는

건축재료인 강재와 콘크리트의 고강도화를 고려하게 된다.

최근 국내에서는 건축구조용 800MPa급 강재(HSA800)가 개발되었으며, 고층건물을 중심으로 80MPa 이상의 고강도 콘크리트가 사용되고 있다. 그러나 콘크리트의 극한압축변형률은 강도와 크게 관계없이 최대 0.003정도로서, 600MPa 이상의 강재를 사용하는 경우에는 강재의 항복이전에 콘크리트가 압괴되어 강재의 강도를 충분히 활용할 수 없게 된다(김창수 등, 2010)⁽¹⁾. 그렇지만 콘크리트 충전강관(이하 CFT) 구조는 외부 강관에 의한 구속효과로 콘크리트의 극한압축변형률을 증가시키고, 또한 충전 콘크리트로 인해 강관의 좌굴 강도가 증가하기 때문에 고강도 재료를 사용하는 경우에도 우수한 구조성능을 발휘한다 (Varma *et al.*, 2004; Fujimoto *et al.*, 2004; and Inai *et al.*, 2004)^{(2),(3),(4)}.

일반적으로 CFT 구조는 충전된 콘크리트의 축열효과로 강재 기둥에 비해 우수한 내화성능을 나타낸다. 하지만 고강도 콘크리트를 사용하는 경우에는 콘크리트 내부 조직이 치밀하기 때문에 고온에 장시간 노출될 경우 폭발현상이 발생

Note.-Discussion open until August 31, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 18, 2012; revised November 16, 2012; approved on February 5, 2013.
© KSSC 2013

* Corresponding author

Tel. +82-32-200-2427 Fax. +82-32-200-2449
E-mail: kschung@rist.re.kr

한다. 따라서 고강도 콘크리트를 사용한 CFT 구조의 내화성능에 대한 실험적 검증이 필요하다.

고강도 CFT기둥의 내화관련 연구결과를 보면, Lu *et al.* (2009)는 압축강도 90MPa 이상의 고강도 콘크리트를 사용한 단주에 대한 내화실험과 해석을 수행하였다^[5]. Kodur (2006, 2007)는 80~91MPa급 고강도 콘크리트의 내화실험을 통한 일반강도 콘크리트(36~43MPa)와 동일 축력비에서 내화 성능저하 및 강섬유/철근보강 효과에 대해서 논하였다^{[6], [7]}. Shaumann *et al.* (2009)는 압축강도 80~100MPa급 고강도 콘크리트에 대해서 폭발저감을 위한 강섬유 보강방법이나 강관내부에 철근삽입에 따른 해석을 수행하였다^[8]. 한편, 국내에서는 고강도 콘크리트 폭발관련 연구결과(한천구 2007, 김형준 2011 등)는 다수 있으며^{[9], [10]}, 김규용(2008)는 40~80MPa급 고강도 콘크리트를 충전한 CFT기둥의 내화성능 실험 및 온도해석을 수행하였다^[11].

본 연구에서는 인장강도 800MPa급 강재와 100MPa급 콘크리트로 구성된 고강도 CFT기둥의 화재시 구조적 거동을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 1) 고강도 CFT기둥의 내화 성능평가 실험을 수행하였고, 2) 유한차분법으로 비정상 온도해석과 평면유지를 가정한 변형률 적합조건으로 열응력해석을 수행하였다. 마지막으로 3) 해석결과와 실험결과의 비교를 통한 해석방법 검증 및 고강도 CFT기둥의 화재시 구조적 거동을 조사하였다.

2. 고강도 CFT기둥의 내화성능평가 실험

2.1 실험체

실험체 형상 및 단면은 Fig. 1과 같다. 강관 단면은 □-400×400×15mm이며, 기둥의 유효가열길이는 3.0m이다. 강재는 HSA800 2차 시제품으로 강재 두께는 15mm이다. 강관은 인장강도 830MPa급 K120TG 용접봉을 사용하여 4면을 용접하여 제작하였다. 실험체 셋팅을 위하여 강관의 상·하단에 두께 40mm의 엔드플레이트를 용접하였다. 강관의 상부 엔드플레이트로부터 각각 500mm, 1,500mm, 2,500mm 떨어진 부위에 지름 20mm의 구멍을 한쌍씩 두어 충전된 콘크리트의 증기가 빠져나가도록 하였다.

강재의 인장시험 결과는 Table 1과 같다. 소재 인장시험은 KS B 0801에 준하여 1호 인장시험편으로 제작하였다. 강재의 항복강도와 인장강도는 KS D 5994 (건축구조용 고성능 압연강재)의 규격치를 만족하였으나, 항복비(0.85이하)와 연신율(15%이상)에는 미달하였다.

충전된 콘크리트의 배합표는 Table 2와 같다. 콘크리트는

레미콘 배척플랜트에서 생산하였으며 배합설계강도는 100MPa이다. Table 2에 나타낸 것과 같이 실리카흙은 시멘트 볼륨의 6% 이내로 제한하였다. 콘크리트의 압축시험은 KS F 2405에 준하여 수행하였으며, 실험결과는 Table 3과 같다. CFT 내화성능 실험시의 콘크리트 재령은 30~60일 이었다. 강관내의 콘크리트 충전은 상부 타설공법을 적용하였으며, 타설 후 강관의 윗부분을 비닐로 봉하여 양생하였고 강관에 내화피복은 하지 않았다.

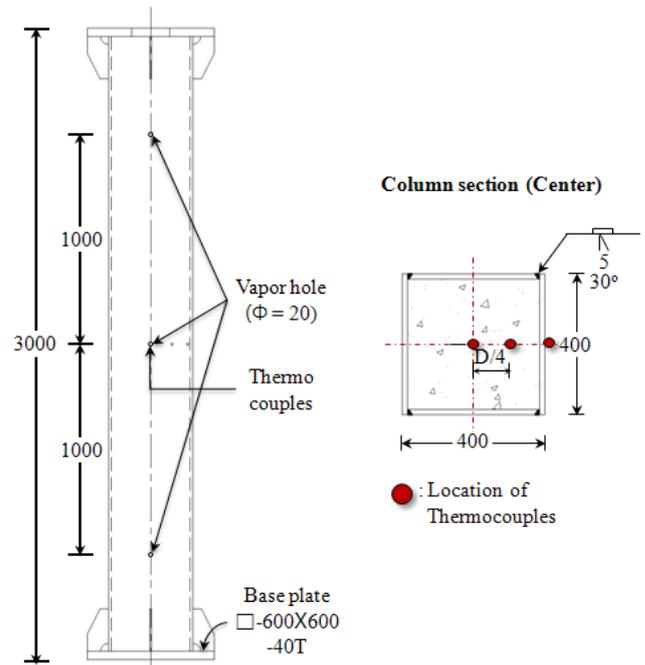


Fig. 1 Specimen dimensions and thermocouple locations (Unit: mm)

Table 1. Mechanical properties of steel

Material	Thick. (mm)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Yield ratio	Elongation (%)
HSA800	15	760.1	855.7	0.89	10.5

Table 2. Concrete mix

Mix strength (MPa)	W/B (%)	S/a (%)	W (l/m ³)	Unit weight (kg/m ³)					Air (%)	
				C	S/P	S/F	S1	S2		G
100	17.6	38.0	150	589	213	51	264	264	888	2.0%

Table 3. Material properties of Concrete

Mix strength (MPa)	Slump Flow (mm)	Compressive strength (MPa)		
		3 days	7 days	28 days
100	590	82.1	89.7	105.6

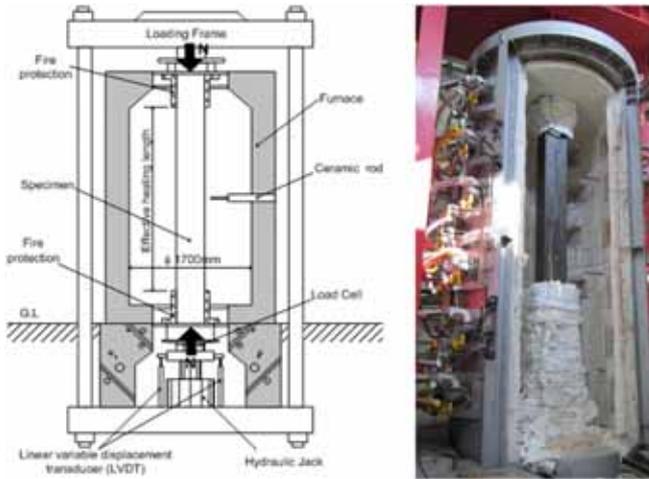


Fig. 2 Specimen set up

2.2 실험방법

실험장치는 Fig. 2와 같이 실험체를 기둥용 가열로에 설치한 후 가열로 하단에서 축력을 가하였다. 축력은 5,000kN과 2,500kN으로 콘크리트 축력비($n = N_0 / (A_c \times f_{ck})$)는 각각 0.35과 0.17이다. 기둥 재하를 위해 재하능력이 10MN인 압축실험기를 사용하였다. 가열하기 15분 전에 기둥중심에 일정축력을 가하였다. 기둥에 하중을 재하한 상태에서 표준화재곡선 (KS F 2257)으로 가열하였다.

실험체의 열팽창과 수축에 의한 축변형은 유압실린더에 부착된 선형 자동변위계(LVDT)로 측정하였다. 실험체의 축방향 수축량이 유효가열길이의 1/100이상일 경우나 분당 변형량이 유효가열길이의 3/1000mm/min에 도달하는 경우, 각형 CFT기둥의 내력이 상실되었다고 판단하여 실험을 종료하였다.

가열에 따른 강관과 콘크리트의 온도분포는 기둥 중앙부에서 측정하였다 (Fig. 1 참조). 즉, 강관은 단면 중앙부에서 온도를 측정하였으며, 콘크리트는 단면 중앙 및 강관폭의 1/4 지점에서 온도를 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 실험체 종국상황

실험종료시 실험체의 종국상황은 Fig. 3에 나타내었다. 실험체 마다 동서(EW)와 남북(SN)방향에 걸쳐서 촬영한 사진을 보여주고 있다. 강관의 국부좌굴이 상부에서 1/3인 위치에서 발생하였으며, 강관 용접부에서 용접파단은 발생하지 않았다. 축하중이 5,000kN인 실험체는 한쪽 방향으로 치우치는 휨변형이 발생하였다.



(a) Axial load: 5,000kN (b) Axial load: 2,500kN

Fig. 3 Deformed shape after tests

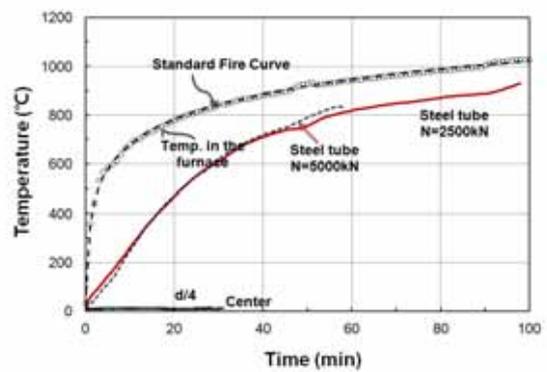


Fig. 4 Time-Temperature graph

3.2 온도분포

가열시간별 온도변화는 Fig. 4와 같다. 강관 표면온도는 가열 초기 60분 이전에는 표준가열곡선 온도 상승량과 차이를 보이지만, 60분 이후에는 표준가열곡선 온도상승량과 유사하게 상승하는 것을 확인하였다. 한편, 콘크리트 단면은 가열 후 40분 이전까지 단면 중앙 및 강관폭의 1/4 지점에서의 온도 상승은 발생하지 않았다. 가열 후 40분 이후부터 열전대 손상으로 더 이상 온도를 측정할 수 없었다.

3.3 축변형

가열시간별 기둥의 축변형은 Fig. 5와 같다. 축하중이 2,500kN인 경우, 가열 초기 30분까지는 강관의 열팽창에 의해 기둥의 축변형이 증가하였으며, 그 이후에는 강관의 온도상승에 따른 내력상실과 국부좌굴에 의해서 기둥의 축변형이 감소하였다. 강관의 내력상실에 따른 외부 축하중은 충전된 콘크리트로 전이되며, 콘크리트의 폭발과 고온시 내력상실에 의해 축하중이 증가할수록 내화지속시간은 감소하였다. 이러한 화재시 거동은 일반강도 CFT기둥과 유사한 경향을 보였다.

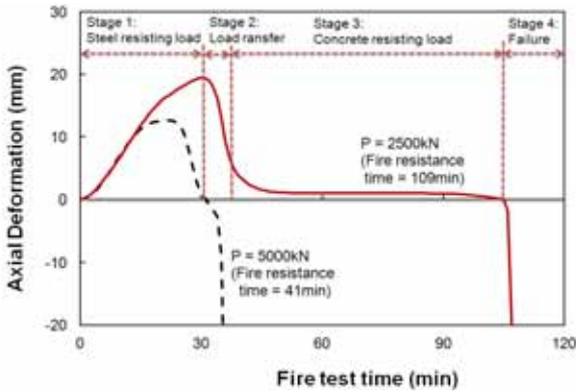


Fig. 5 Axial deformation during the fire test time

축하중이 5,000kN인 실험체는 화재 후 41분 경과 시점에서 기둥 축변형이 허용기준 30mm(1/100이하)를 초과하였으며, 축하중이 2,500kN인 경우는 화재 후 109분 경과 시점에서 기둥 축변형이 허용기준을 초과하였다. 콘크리트 압축강도를 55MPa이하에서 Kodur (2007)가 제안한 CFT기둥의 내화설계식으로 산정한 값과 비교하면, 각각 170분과 241분으로 콘크리트의 적용범위를 넘은 실험값에 비하여 4.15배와 2.21배 과대평가하고 있었다. 이는 고강도 콘크리트를 충전한 CFT기둥의 내화설계식 구축이 필요하다고 사료된다.

4. 수치해석

4.1 해석방법

Chung *et al.*(2008, 2009)^{[12],[13]}가 제안한 해석방법 및 일반강도의 CFT기둥 실험결과와의 비교를 통한 검증을 자세하게 다루고 있다. 본 논문에서는 간략히 해석방법과 고강도 재료에 대한 열적특성에 대해서 기술하고자 한다.

4.1.1 비정상 온도해석

유한차분법으로 수행한 비정상 온도해석은 2차원에 대한 요소의 온도를 예측하기 위한, 미소요소의 온도변화와 유입열량의 관계는 아래식과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{Q}{c \cdot \rho} \quad , \quad \left(a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \right) \quad (1)$$

여기서, a : 열확산율 c : 비열
 p : 밀도 λ : 열전도율

경계조건으로써 외부에서 유입하는 열유량은 다음과 같다.

$$Q = l \times q(T_s, T_f) \quad (2)$$

여기서, l : 요소 i 와 j 사이의 거리
 q : 단위면적당 열유량을
 T_s : 강관의 표면온도
 T_f : 로의 온도

열유량률은 열대류와 열복사로 가정하여 다음 식으로 하여 산정할 수 있다.

$$q = A(T_f - T_s) + V\sigma\varepsilon(\theta_f^4 - \theta_s^4) \quad (3)$$

여기서, A : 열대류 (=25 W/m²K)
 V : 복사각에 대한 계수
 σ : Stefan-Boltzman상수
 ε : 복사율(0.7)
 θ_f : 로의 절대온도
 θ_s : 강관표면 절대온도

4.1.2 응력해석

화재시 단면에 대한 온도를 바탕으로 편심압축하중을 받는 CFT기둥의 구조적 거동을 평가하고자 응력해석방법은 다음과 같다 (Chung *et al.*, 2009)^[13].

축력-모멘트-곡률 상관관계

상온에 대한 경우와 같이 축력-모멘트-곡률관계는 평면유지를 가정하여 산정하였다. 강재 및 콘크리트의 변형률은 식 (4)와 같이 가정하였다. 내화실험은 짧은 시간에 이루어지며, 재료의 응력-변형률관계 산정시에 크리프영향을 포함하고 있어 본 해석에서는 크리프 변형률은 무시하였다(Wang, 2002)^[14].

$$\varepsilon = \varepsilon_{th}(T) + \varepsilon_{\sigma}(\sigma, T) + \phi \cdot x \quad (4)$$

여기서, ε : 총변형률
 ϕ : 곡률
 σ : 응력
 T : 온도
 ε_{th} : 온도에 의한 열팽창 변형률
 ε_{σ} : 온도에 따른 응력에 대응하는 변형률
 x : 단면의 중심에서 각 요소의 중심까지의 거리

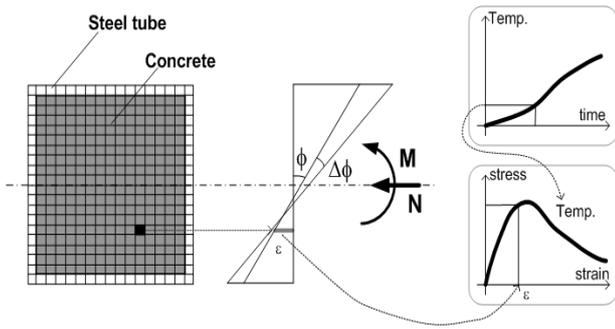


Fig. 6 F.E. Analysis model and method

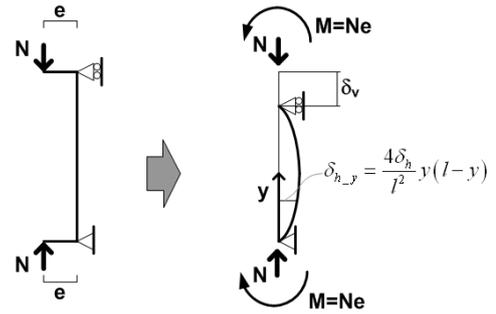


Fig. 7 Load and boundary condition for the analysis

해석순서는 다음과 같다(Fig. 6 참조).

- 1) 축력과 편심율을 입력한다.
- 2) 시간에 따른 단면의 온도를 갱신한다.
- 3) 강관과 콘크리트의 열팽창 변형률을 계산한다.
- 4) 평면유지하에서 단면의 힘 평형조건, 변형률 적합조건 및 온도에 따른 응력-변형률관계를 바탕으로 축력과 모멘트에 만족할 때까지 도심의 축변형률과 곡률을 조정한다.
- 5) 곡률을 포함한 부재의 축변형을 식(6)으로 산정한다.
- 6) 2)~5) 단계를 반복하여 외력(축력, 모멘트)에 저항할 수 없는 시간까지 행한다.

축변형

편심압축하중에 따른 모멘트가 기둥에 대해서 일정하기에 Fig. 7에서 보는 바와 같이, 경계조건을 고려하여 휨변형을 포물선으로 가정하여 아래식으로 구하였다.

$$\delta_{v,h} = \frac{8\delta_h^2}{3l}, \quad \delta_h = \frac{\phi \cdot l^2}{8} \quad (5)$$

여기서, l : 기둥길이

축력에 의한 기둥의 도심 축변형률을 고려하여 축변형과 휨변형을 아래와 같이 구하였다.

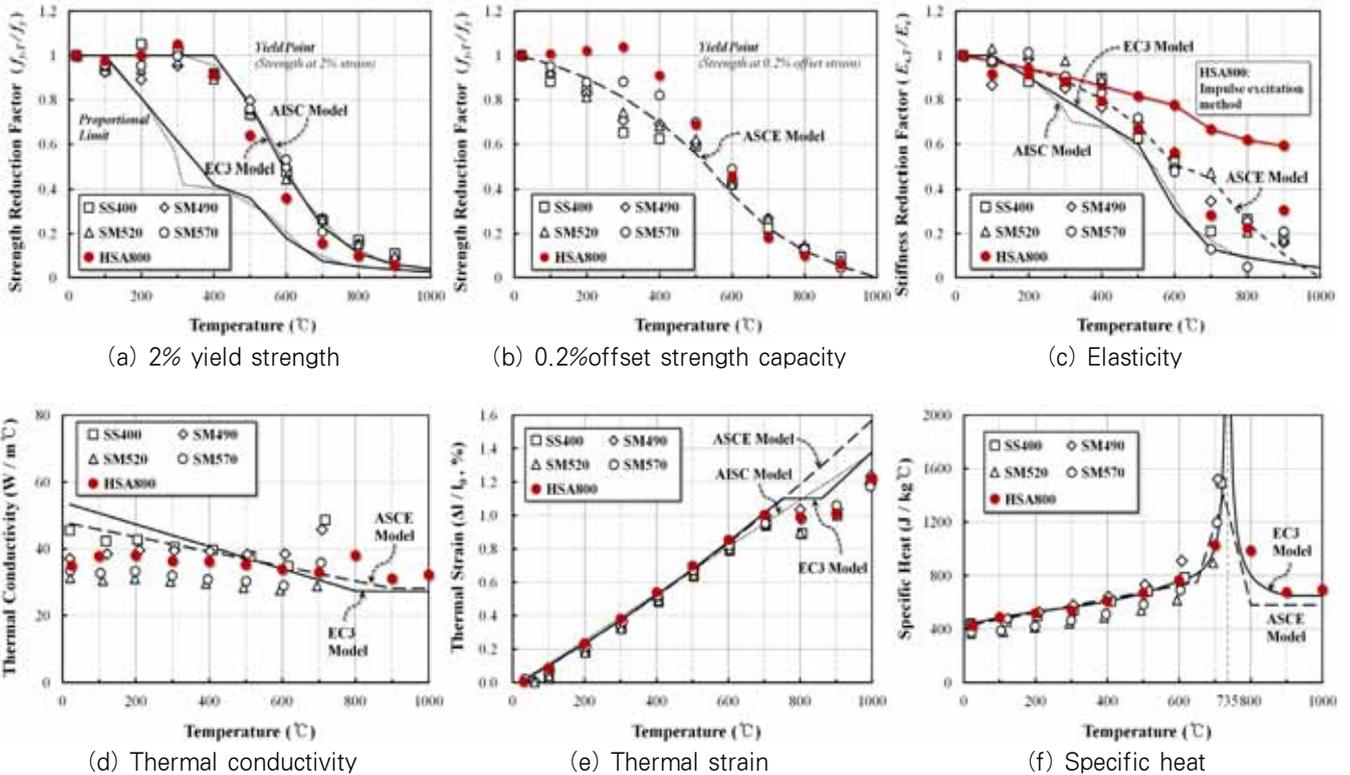


Fig. 8 Mechanical and heat characteristics of HSA800 under the elevated temperature

$$\delta_v = \delta_{v-h} + \epsilon_c \cdot l \quad (6)$$

여기서, ϵ_c : 기둥의 도심 축변형률

4.2 재료모델

4.2.1 강재

강재의 열적특성 및 고온에 따른 역학적 성질에 대한 실험 결과(권인규, 2007)와 Eurocode 모델(Lennon *et al.*, 2007) 간의 비교를 Fig. 8에 나타내었다^{[15],[16],[17]}. HSA800 강재의 고온물성 시험결과는 기존 설계기준 및 일반강도 강재의 고온물성값과 유사한 값을 나타내었다. 항복강도인 경우, HSA800 강재의 2%변형률에서의 응력값을 기준으로 계산한 항복강도는 500~600°C 구간에서 설계기준 및 일반강도 강재에 비해 저하되는 것으로 나타났으나, 일반적인 항복강도 계산에 사용되는 0.2% offset 방법으로 계산한 항복강도 값에서는 일반강도 강재와 큰 차이가 없었다. 탄성계수의 경우, HSA800 강재의 탄성계수는 강재의 온도가 증가함에 따라 저하되었으며, 500°C이상의 온도에서 고온탄성률 측정시험결

과의 오차가 증가하였다. 열팽창률 및 비열은 설계기준 및 일반강도 강재와 유사한 값을 나타내었다. 열전도율은 일반강도 강재의 열전도율과 유사한 값을 나타냈지만, 600°C이하 구간에서 설계기준에서 제시하고 있는 값보다는 다소 낮은 것으로 나타났다.

ISO 6892-2 시험편을 사전재하없이 목표온도까지 가열 온도 약 10°C/min 가열 후, 강재 내부가 목표온도에서 열적 정상상태에 도달될 수 있게 10분동안 유지시킨 후, KS B 0801에 따라 인장파괴될 때까지 하중을 가하였다. 고온에 따른 HSA800강의 응력-변형률관계는 Fig. 9에 나타내었다.

본 해석에서는 HSA800강의 열적특성, 고온에 따른 응력-변형률관계는 Eurocode 모델(Lennon *et al.*, 2007)에 따랐다.

4.2.2 고강도 콘크리트

100MPa급 고강도 콘크리트의 고온에 따른 응력-변형률 관계에 대한 사전비재하 실험결과와 Eurocode 모델(Lennon *et al.*, 2007)와 비교를 Fig. 10(a)와 (b)에 나타내었다. 사전비재하 실험은 사전재하없이 목표온도까지 1°C/min 매 50°C온도상승시 마다 30분유지하는 것으로 가열하였으며, 콘크리트 내부가 목표온도에서 열적 정상상태에 도달될 수 있게 60분동안 유지시킨 후, KS F 2405에 따라 공시체가 파괴될 때까지 하중을 가하였다.

Fig. 10(b)에서 보는 바와 같이, 고온 영역에서 100MPa급 고강도 콘크리트의 강도저감 경향은 50MPa급 콘크리트(김홍열, 2005)^[18]와 큰 차이를 보이지 않았다. 실험값은 Eurocode 모델에서 제시한 고강도 콘크리트와 일반강도 콘크리트 사이에 위치하고 있으며, 전체적으로 유사한 경향을 보였다. 또한, 고강도 콘크리트의 열적특성(비열, 열전도율 및 열팽창계수 등)에 대해서 김홍열 (2004, 2005, 2006)^{[18],[19],[20]}의 실험결과는 Eurocode 모델과 유사한 경향을 보였다. Fig. 10(c)

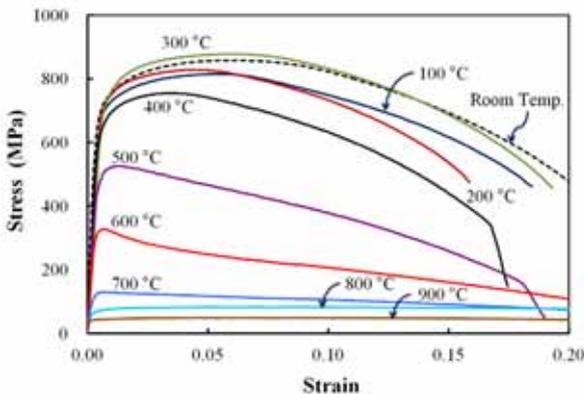


Fig. 9 HSA800 Stress-strain curves at each elevated temp

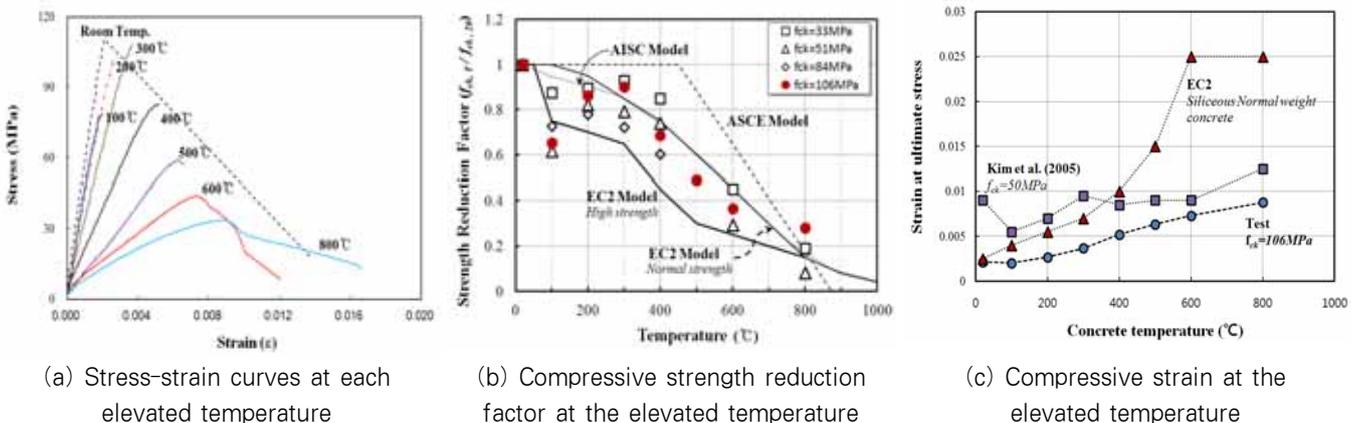


Fig. 10 Mechanical properties of high strength concrete at the elevated temperature

에서 보는 바와 같이, 고온별 압축강도시 변형률은 Eurocode 모델 값이 100MPa급과 50MPa급 콘크리트의 실험값 (김홍열, 2005)^[18] 사이에 존재하였다.

따라서, 본 해석에서는 100MPa급 고강도 콘크리트의 재료모델은 Eurocode 모델(Lennon *et al.*, 2007)^[17]을 적용하였다.

4.3 실험결과와 해석결과와의 비교

4.3.1 단면온도

온도해석방법에 대한 검증으로 Lu *et al.*(2009)^[5] 실험과 김규용 등 (2008)^[11] 실험결과와의 비교를 Fig. 11(a)와 (b)에 나타내었다. Lu *et al.*(2009)^[5] 실험체의 단면크기는 □

-150×150×5와 □-200×200×6이며 760mm길이의 CFT기둥으로 강재는 항복강도 467~486MPa, 콘크리트 압축강도 99MPa이다. 김규용 등 (2008)^[11] 실험체의 단면크기는 □-400×400×12이며 1150mm길이의 CFT기둥으로 콘크리트 압축강도 60~80MPa이다. 온도해석결과는 실험결과에 비하여 약간 과대평가하고 있으나 전체적으로 유사한 경향을 보였다.

Fig. 11(c)에서 보는 바와 같이, 강관표면의 해석결과가 본실험결과에 비하여 가열 후 40분 경과 시점에서 약 12.5% 과대평가를 하고 있으나, 그 이후에는 해석결과는 실험결과보다 10%이내로 거의 일치하고 있는 것으로 나타났으며, 콘크리트 내부에서는 열전대 조기손상으로 인해 해석결과와 실험결과를 비교할 수 없었다.

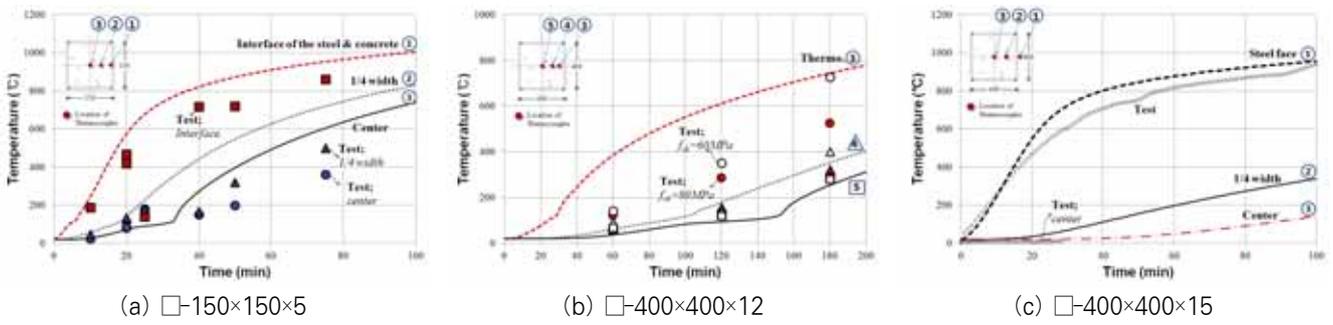


Fig. 11 Comparisons of test and analysis results: teperature at the cross-section

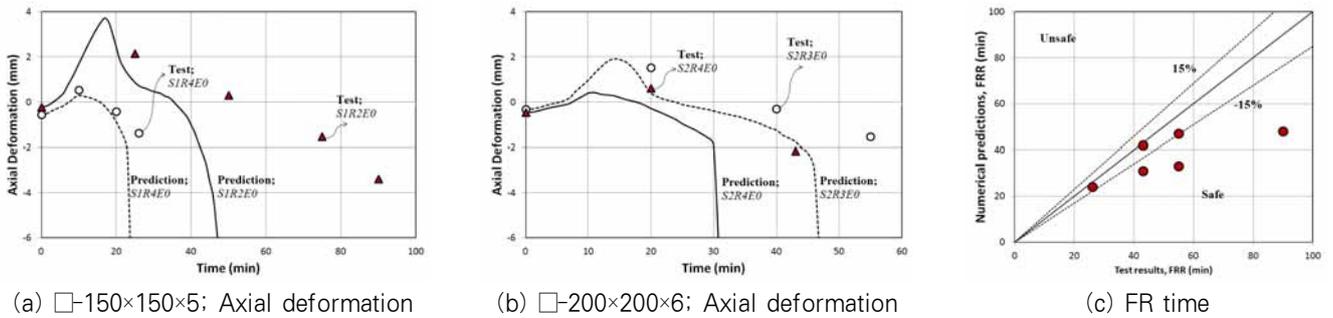
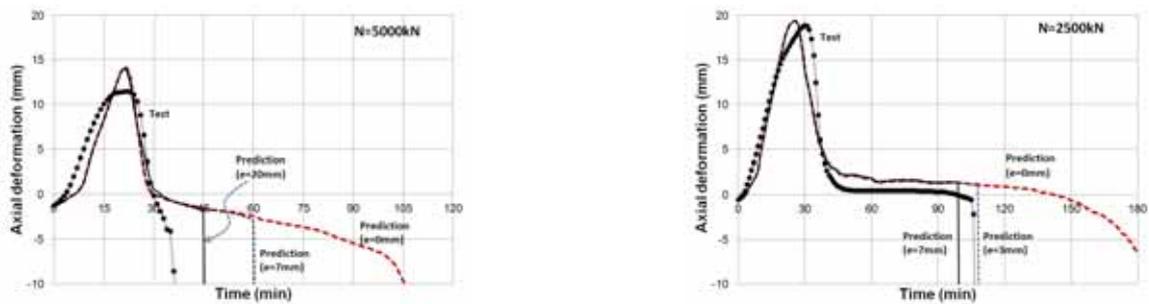


Fig. 12 Comparison of the previous test and analysis results: axial deformation and fire resistant time



(a) N=5,000kN (Concrete axial force ratio=0.35)

(b) N=2,500kN (Concrete axial force ratio=0.17)

Fig. 13 Comparison of the test and analysis results (this study): axial deformation

4.3.2 축변형

응력해석방법에 대한 검증으로 해석결과와 Lu et al.(2009)^[5] 실험결과와의 비교를 Fig. 12에 나타내었다. 축변형의 거동은 전체적으로 유사한 경향을 보이며, 실험종료시의 내화시간에 대해서 안전적으로 예측함을 알 수 있다. 예측값과 실험값간의 오차는 하중, 열팽창계수, 고강도 콘크리트 폭렬과 크리프에 대한 수치해석적 모사의 오차라고 판단된다.

본 실험결과와 해석결과와의 비교를 Fig. 13에서 보는 바와 같이, 강관의 영향을 주도적으로 받는 가열 초기단계에서 축변형은 해석결과와 실험결과는 거의 일치 하였으나 강관의 국부좌굴발생이후, 강관내의 콘크리트가 온도상승에 따른 강도저하, 콘크리트의 온도상승과 강관의 부담하중 전이에 따른 응력상승과 폭렬발생으로 실험결과는 해석결과에 비하여 축하중이 5,000kN인 경우는 해석값이 106분, 실험값은 41분, 축하중이 2,500kN인 경우는 해석값이 199분, 실험값이 109분으로 50%정도로 해석값이 과대평가를 하는 것으로 나타났다. 하중비가 작은 경우에 예측값과 실험값간의 오차는 작았다.

한편, 실험체 셀팅에서 기둥길이(1)의 1/500 또는 최대 7mm의 하중편심을 허용한다고 KS F 2257-7에 규정하고 있다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 실험종료 후 실험체가 축하중이 5,000kN인 경우가 크게 한쪽 방향으로 기울어져 있으며, 축하중이 2,500kN인 경우는 거의 수직상태에 있었다. 따라서, 고강도 콘크리트에 따른 고온시 랜덤한 폭렬현상(김규용 등 2008)^[11]과 실험체 셀팅을 고려하여 편심거리에 따른 고강도 CFT기둥의 화재시 거동을 예측하였다. 축하중이 5,000kN인 경우는 편심거리를 20mm로 가정한 해석결과가 실험결과를 잘 예측하였다. 한편, 축하중이 2,500kN인 경우는 편심거리를 3mm로 가정한 해석결과가 실험결과를 잘 예측하였다.

5. 결 론

섬유를 첨가하지 않는 100MPa급 고강도 콘크리트와 HSA800 강재를 이용한 고강도 각형 CFT기둥의 내화성능평가 실험과 해석을 하였다.

본 연구에서 얻어진 주요 결과를 요약해 보면 다음과 같다.

- (1) 고강도 CFT의 표준 화재시 거동은 일반강도 CFT와 유사한 경향을 보였다. 즉, 가열초기 강관의 열팽창으로 기둥 축변형 증가 ⇒ 강관 온도상승과 국부좌굴에 의한 기둥 축변형 감소 ⇒ 콘크리트 온도상승에 따른 내력상실로 내화실험종료 하였다.
- (2) Kodur (2007)^[7]가 콘크리트 압축강도 55MPa급 이하에서 제안한 설계값은 적용범위를 넘은 실험값에 비하여

콘크리트 축력비가 0.35과 0.17에 대해서 4.41과 2.21 배 과대평가하였다.

- (3) HSA800강재와 100MPa급 콘크리트에 대한 고온시 열적특성 실험결과를 Eurocode 모델과 비교한 결과, 유사한 경향을 보였다.
- (4) Eurocode 모델을 이용한 비정상 온도해석 및 응력해석결과를 Lu et al.(2009)^[5], 김규용(2008)^[11] 실험과 본 실험결과와 비교한 결론 다음과 같다.
 - 비정상 온도해석결과는 실험결과에 대해서 대체로 유사한 경향을 보였으며, 단면온도를 약간 높게 예측하였다.
 - 응력해석결과는 Lu et al.(2009)^[5] 실험결과에 대해서 안전적으로 내화시간을 예측하였으며, 시간별 축변형은 대체로 유사한 경향을 보였다. 한편, 본 실험결과와의 비교에서는 해석결과가 50%정도 과대평가하였다. 한편, 실험체 셀팅오차와 고강도 콘크리트 랜덤한 폭렬을 고려한 편심하중을 적용한 해석결과는 실험결과를 잘 예측할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2011년도 첨단도시개발사업(초고층빌딩 시공기술 연구단, 09 첨단도시 A01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌(References)

- [1] 김창수, 박홍근, 최인락, 정경수, 김진호 (2010) 800MPa 강재 및 100MPa 콘크리트를 적용한 매입형 합성기둥의 구조성능, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제5호, pp.497-509.
Kim, C.S., 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).
- [2] Varma, A.H., Ricles, J.M., Sause, R., and Lu, L.W. (2004) Seismic behavior and design of high-strength square concrete-filled steel tube beam columns, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, No. 2, pp.169-179.
- [3] Fujimoto, T., Mukai, A., Nishiyama, I., and Sakino, K. (2004) Behavior of eccentrically loaded concrete-filled steel tubular columns, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, No. 2, pp.203-212.
- [4] Inai, E., Mukai, A., Kai, M., Tokinoya, H., Fukumoto,

- T., and Mori, K. (2004) Behavior of concrete-filled steel tube beam columns, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, No. 2, pp.189-202.
- [5] Lu, H., Zhao, X.L., and Han, L.H. (2009) Fire Behaviour of High Strength Self-consolidating Concrete Filled Steel Tubular Stub Columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, pp.1995-2010.
- [6] Kodur, V.K.R. (2006) Solutions for enhancing the fire endurance of HSS columns filled with high-strength concrete, *Engineering Journal*, Vol. 43, pp.1-7.
- [7] Kodur, V.K.R. (2007) Guidelines for fire resistant design of concrete-filled steel HSS columns-state-the-art and research needs, *International Journal of Steel Structures*, Vol. 7, pp.173-182.
- [8] Schaumann, P., Kodur, V., and Bahr, O. (2009) Fire behaviour of hollow structural section steel columns filled with high strength concrete, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, pp.1794-1802.
- [9] 한천구, 한민철, 허영선(2007) 고강도 콘크리트의 폭발발생 메커니즘 규명, *대한건축학회논문집 구조계*, 제23권, 제11호, pp.109-117.
Han, C.G., Han, M.C., and Heo, Y.S. (2007) New proposal for spalling mechanism in high strength concrete, *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 23, No. 11, pp.109-117 (in Korean).
- [10] 김형준, 김홍열, 박경훈, 여인환, 권기혁(2011) Fiber-Cocktail 섬유를 혼입한 100MPa 고강도 콘크리트의 단면크기에 따른 폭발 및 내화성능에 관한 실험적 연구, *한국화재소방학회 논문집*, 한국화재소방학회, 제25권, 제5호, pp.85-92.
Kim, H.J., Kim, H.Y., Park, K.H., Yeo, I.H., and Kwon, K.H. (2011) An experimental study on the fire resistance performance and spalling of 100MPa HSC column mixed fiber-cocktail, *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering*, Vol. 25, No. 5, pp.85-92 (in Korean).
- [11] 김규용, 김영선, 이태규, 강선중, 김무한(2008) 고강도콘크리트를 충전한 CFT기둥의 내화성능 평가에 관한 실험적 연구, *대한건축학회논문집 구조계*, 대한건축학회, 제24권, 제8호, pp.147-154.
Kim, G.Y., Kim, Y.S., Lee, T.G., Kang, S.J., and Kim, M.H. (2008) An Experimental study on the evaluation of fire-resist performance of high-strength concrete filled steel tube column, *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 24, No. 8, pp.147-154 (in Korean).
- [12] Chung, K., Park, S., and Choi, S. (2008) Material effect for predicting the fire resistance of concrete-filled square steel tube column under constant axial load, *Journal of Constructional Steel Research*, No. 64, pp.1505-1515.
- [13] Chung, K., Park, S., and Choi, S. (2009) Fire resistance of concrete filled square steel tube columns subjected to eccentric axial load, *International Journal of Steel Structures*, Vol. 9, pp.69-76.
- [14] Wang, Y.C. (2002) Steel and composite structures behavior and design for fire safety, *Spon Press*, pp.106-170.
- [15] 권인규(2007) 고열환경에서의 구조용 강재 특성 데이터베이스 구축, *한국화재소방학회논문집*, 한국화재소방학회, 제21권, 제3호, pp.47-55.
Kwon, I.K. (2007) Derivation of the mechanical properties of structural steels at high temperatures, *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering*, Vol. 21, No. 3, pp.47-55 (in Korean).
- [16] 권인규(2007) 콘크리트 충전강관 내화설계를 위한 구조용 강재 고온물성 데이터베이스 구축, 2007년도 학술발표대회 논문집, 대한건축학회, 제27권, 제1호, pp.483-486.
Kwon, I.K. (2007) Data-bases of high temperature steel properties for fire engineering design of concrete filled steel tube, *Journal of annual conference of the AIK*, Vol. 27, No. 1, pp.483-486 (in Korean).
- [17] Lennon, T., Moore, D.B., Wang, Y.C., and Bailey C.G. (2007) Designers' guide to EN1991-1-2, EN1992-1-2, EN1993-1-2 and EN1994-1-2, Thomas Telford Press.
- [18] 김홍열, 서치호, 신현준(2005) 고온영역에서 강도영역별 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구, *대한건축학회논문집 구조계*, 대한건축학회, 제21권, 제7호, pp.55-66.
Kim, H.Y., Seo, C.H., and Shin, H.J. (2005) An experimental study on the mechanical properties by compressive strength areas at high temperature, *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 21, No. 7, pp.55-66 (in Korean).
- [19] 김홍열, 서치호(2004) 고온 가열시 콘크리트의 강도 영역별 물리적 특성에 관한 실험적 연구, *대한건축학회논문집 구조계*, 대한건축학회, 제20권, 제11호, pp.75-82.
Kim, H.Y. and Seo, C.H. (2004) An experimental study on the physical properties by compressive strength areas of concrete at high temperature, *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 20, No. 11, pp.75-82 (in Korean).
- [20] 김홍열, 전현규(2006) 고온시 40~100MPa 범위의 콘크리트 열적특성에 관한 실험적 연구, 2006년도 학술발표대회, 한국콘크리트학회, pp.425-428.
Kim, H.Y. and Cheon, H.G. (2006) An experimental study on the thermal properties of high strength concrete in the range of 40~100MPa at high temperature, *Journal of annual conference of the KCI*, pp.425-428 (in Korean).

요 약: 구조, 시공 및 내화측면에서 우수한 콘크리트충전강관(CFT)부재에 대해서 구성재료의 강도가 높은 경우 즉, 콘크리트 압축강도가 100MPa 이상이면서 강관의 항복강도가 650MPa 이상인 경우에 대한 내화성능 평가실험 및 해석적 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 이러한 부재에 대해서 내화성능 거동을 파악하고자 □-400x400x15, 부재길이 3,000mm인 실험대 중심재하 내화실험을 행하였다. 실험변수는 중심축력을 5,000kN과 2,500kN로 하였다. 실험결과, 고강도 콘크리트의 폭발 및 콘크리트 내부 균열에 의하여 축하중이 클수록 조기에 내력을 상실하였다. 또한, 유한차분법과 변형률적합조건을 이용한 비정상온도해석 및 응력해석을 수행하였으며, 고강도 재료모델은 Eurocode모델을 이용하였다. 해석모델은 시간-축변위 관계를 합리적으로 예측할 수 있었다.

핵심 용어: 콘크리트충전강관, 고강도 재료, 내화성능, 기둥
