화재가열을 받은 고강도 콘크리트를 충전한 CFT 기둥의 내화성능 평가에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Evaluation of Fire-Resist Performance of High-Strength Concrete Filled steel Tube Column at Fire

이 형 준* 이 태 규* 김 영 선** 한 희 철*** 김 규 용**** 김 무 한*****
Lee, Hyoung-Jun Lee, Tae-Gyu Kim, Young-Sun Han, Hee-Chul Kim, Gyu-Yong Kim, Moo-Han

Abstract

Recently, it increases in use of CFT(Concrete filled steel tube, below CFT) that is an excellent internal force and deformation capacity because material and method are required to be diversification and High-Performance according to increase the super-high structure. And it is proposed to use high-strength Concrete Filled steel Tube Column. But it is difficult quantitative evaluation about fire-resist performance of CFT because steel tube bind concrete. Also, the case of high strength CFT is feared that spalling occur inside.

Therefore, this study made CFT specimen that determine the factor(which is strength of concrete) and then CFT column was exposed to heating controlled as closely as possible the ISO-834 standard fire curve. Also, it tried to analyze internal temperature through nonlinear transient heat flow analysis.

키 워 드 : 충전강관콘크리트, 고강도콘크리트, 내화성능, 표준가열곡선
Keywords : Concrete Ffilled Steel Tube, High Strength Concrete, Fire-Resist Performance, Standard fire curve

1. 서 론

최근 콘크리트 충전강관 구조(Concrete filled steel tube, 이하 CFT)는 강관이 내부의 콘크리트를 구속하고 있어 강성 내력, 변형성능, 내화, 시공 등의 측면에서 우수한 특성을 발휘하고 내화성능이 순수 철골조에 비해서 현격히 우수하다는 장점으로 인해 구조시스템으로써 사용이 늘어나고 있는 추세이다.

하지만 강관이 콘크리트를 구속하고 있기 때문에 화재시 강관내부 충전콘크리트의 내화성능에 대한 평가가 어렵고 내화실험조건에 따라 결과가 상이하여 정량적인 평가방법이 표준화되어 있지 않은 실정이다.

또한 고강도콘크리트의 경우 일반콘크리트에 비해 내부조직이 치밀하여 화재발생시 폭렬현상이 나타나 고강도콘크리트를 사용한 실제구조물은 변형을 유발시키게 되어 구조부재의 균열 및 붕괴를 가져오게 되고, CFT기둥의 내화성능설계를 실시하는데 어려움이 발생한다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 CFT기둥 부재에 대한 내화성능을 평가하여야 하는데, 실제 구조물 수준의 시험체를 사용한 내화실험은 비용 및 설비 등의 제약이 있기 때문에 축소형 부재를 이용한 가열시험에 의해 부재를 구성하는 재료의 역학적 특성 또는 온도측정결과에 근거한 해석적 연구가 병행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 고강도 콘크리트를 충전한 CFT기둥의 내화성능 개선을 위한 연구의 일환으로서 폭-두께비를 일정하게 하고 충전콘크리트의 강도를 요인으로 하여 CFT시험체를 제작 후, ISO-834 표준가열곡선에 준하여 내화실험을 실시하고, 시험체의 실험 결과값과 수학적 해석치를 비교함으로써 화재시 CFT기둥의 내화성능평가 및 해석을 검증하고자 하였다.

* 충남대학교 건축공학과 석사과정
** 충남대학교 건축공학과 박사과정
*** 삼성물산(주) 건설부문, 건축사업본부
**** 충남대학교 공과대학 건축공학과, 조교수 、공학박사
***** 충남대학교 공과대학 건축공학과, 명예교수 、공학박사

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구를 위한 실험계획은 표 1에 나타난 바와 같이 충전콘크리트의 강도에 따른 CFT 기둥의 온도변화 평가에 영향을 줄 수 있는 요인을 고려하여 충전콘크리트의 강도는 40, 60, 80MPa로 결정한 후 이에 따라 물시멘트비45%, 35% 및 25% 3수준으로 설정하였다.

표 1. 실험계획

시험체 기호	fc (MPa)	W/C (%)	폭두께비 (t: mm)	가열방법	시험항목
40N_12t[1)]	40	45	33.3 (12t)	수평가열 시험장치	• 온도이력 (℃)
60N_12t	60	35			• 충전 콘크리트 표면관찰
80N_12t	80	25		ISO 834 가열곡선	

1) 40N_12t : 설계기준강도 40MPa, 강관두께 12t

표 2. 사용재료의 물리적 성질

사 용 재 료	물리적 성질
시 멘 트	1종 포틀랜드시멘트 (밀도 3.15g/cm³, 분말도 3,630cm²/g)
잔 골 재	세척사(밀도 2.61g/cm³, 흡수율 0.97%)
굵 은 골 재	부순 자갈(최대치수 20mm, 밀도 2.67g/cm³)
혼 화 제	고성능AE감수제(폴리카르본산계)
CFT 강관	SPSR 490 (□ 400 × 400mm 압출성형)

표 3. 충전콘크리트 배합

fc (MPa)	W/C (%)	Slump flow (mm)	Air (%)	S/a (%)	Unit W (ℓ/m³)	Unit weight (kg/m³)		
						C	S	G
40	45	500±50	4	45	165	367	775	989
60	35	600±50	2	45	165	471	760	969
80	25	600±50		45	165	660	691	881

2.2 사용재료

본 연구에서 사용한 재료는 표 2에서 나타낸 바와 같이 시멘트는 밀도 3.15g/cm³ 및 분말도 3,630cm²/g 의 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 천연잔골재로서 밀도 2.61g/cm³, 흡수율 0.97%의 세척사, 굵은 골재는 최대치수 20mm, 밀도 2.67g/cm³, 흡수율 0.9%의 부순 자갈을 사용하였다. 또한 혼화제는 폴리카르본산계 고성능 감수제를 사용하였다.

2.3 콘크리트 배합 및 비빔방법

충전콘크리트 배합은 목표 설계기준강도를 기준으로 표 3에 나타낸 바와 같이 설정 목표강도 40, 60, 80MPa를 만족하기 위하여 물시멘트비를 45, 35, 25%로 설정하였으며, 혼화재의 사용은 기존 문헌1)을 참고하여 내화실험의 결과데이터에 영향을 줄 수 있어 본 연구에서는 사용하지 않는 것으로 하였다. 충전콘크리트의 비빔은 100L용량의 강제식 팬타입믹서를 사용하였으며, 콘크리트 비빔방법은 시멘트와 잔골재를 투입하고 30초간 건비빔한 후 물과 혼화제를 투입하여 60초간 비빔을 실시하였고, 굵은 골재를 투입하고 60초간 비빔을 실시하여 총 150초가 소요되었다.

2.4 시험체 제작 및 양생 방법

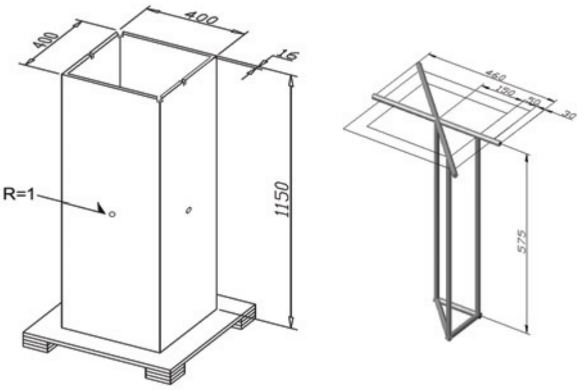


그림 1. 축소형 CFT강관 및 열전대 형상

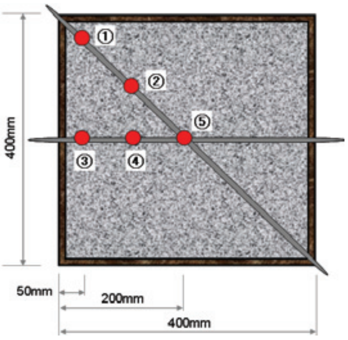


그림 2. 열전대 배치도

그림 1에 나타낸 바와 같이 CFT기둥 시험체는 400 × 400 × 1150 mm의 SPSR 490 각형강관을 사용하여 제작하였으며, 각형 강관의 두께는 실험계획의 폭-두께비 요인에 준하여 12mm로 제작하였다.

가열 시험시 CFT기둥의 내부 충전콘크리트 온도이력을 측정하기 위하여 K타입 열전대를 사용하였고, 열전대의 설치를 위해 그림 1에서 나타낸 바와 같은 열전대 거치대를 제작하였다. 열전대는 그림 2에 나타낸 바와 같이 총 5개소에 열전대를 설치하였으며 대각선으로 위치한 ①, ②는 두면으로 전달되는 열을 측정, ③, ④는 한면으로 흡수되는 열에너지를 측정하기 위한 목적으로 배치 구성하였다. 제작한 시험체는 내화실험전 양생 및 건조를 위하여 콘크리트 타설후 약 150일간 기건양생을 실시하였다.

2.5 실험방법

2.5.1 CFT기둥의 온도이력 평가 및 표면관찰

CFT 기둥은 경기도 여주에 위치한 방재시험연구원의 수평가열시험 장치를 사용하였으며 총 3개의 시험체를 사용하여 내화실험을 실시하였다. 가열방법은 ISO-834 표준가열곡선에 따라 3시간 가열시험을 실시하였으며, 가열로의 온도는 가열로 내부에 설치되어 있는 8개의 열전대에 의해 제어 되었다. 시험체에 설치된 모든 열전대의 온도는 데이터로거를 사용하

여 1분단위로 기록하였다.

또한 강관 내부의 충전콘크리트의 폭렬 및 표면균열 등을 알아보기 위해 가열시험 후 강관을 벗겨내 표면을 관찰하였다.

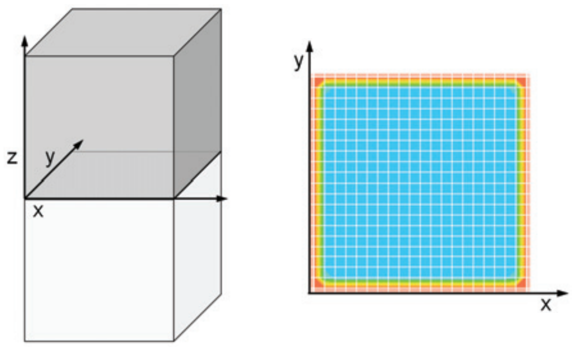


그림 3. CFT단주의 유한요소 모델링 개요

2.5.2 CFT기둥의 온도이력 해석

해석 방법으로는 외부열원의 영향에 의한 비정상 온도분포 해석(Nonlinear transient heat flow analysis)을 실시하였으며 시험체에 대한 온도·시간의존 열적특성을 온도함수로 치환하여 이를 고려하였으며, 해석방법에 대한 신뢰성 확보를 위하여 수행된 내화시험 결과를 이용하여 이를 검증하였다. 사용된 프로그램은 범용 유한요소해석 프로그램인 DIANA를 이용하였으며, 열전달 해석에 도입되는 열 q(t)는 식 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$q(t) = c(T,r)\frac{\partial T}{\partial t} \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서 c(T,r)는 열용량으로 다음과 같은 수치근사해석으로 나타낼 수 있다.

$$r_m = \frac{Q_m}{Q_n},\ Q_m \approx \sum_{i=1}^{m} c(T_i^*, r_i^*)\triangle_{T_i},\ m = 1, 2, \ldots\ldots, n \cdots (2)$$

$$\triangle_{T_i} = T_i - T_{i-1},\ r_i^* = \frac{r_{i-1}+r_i}{2},\ T_i^* = \frac{T_{i-1}+T_i}{2} \cdots\cdots (3)$$

그림 3은 시험체에 대한 유한요소(FE)모델링 개요를 나타낸 것이다. 해석 대상은 400×400mm의 CFT단주시험체로 대칭성을 고려하여 상·하부를 분할하였다. 3D Solid 요소(CHX60)를 적용하였으며, 온도 하중을 고려하기 위하여 경계면은 가상의 요소(BQ4HT)로 모델링하였다. 해석에 이용된 온도이력은 가열·재하실험과 동일하게 설정하였으며, 초기 온도조건은 실험조건인 20℃로 설정하였다. 또한, 대류계수는 가열로 내 조건을 고려하여 $h_c = 1.34\,W/m^2$℃ 으로 가정하였다.

3. 시험결과 및 검토

3.1 압축강도에 따른 온도이력

그림 4, 그림 5 및 그림 6은 내화시험 후 온도센서 위치에 따른 온도 측정 실험값과 충전콘크리트의 압축강도에 따른 온도 이력을 나타낸 것으로서 충전콘크리트의 강도가 증가할수록 온도상승이 10%정도 낮은 현상을 보였으며, 가열시간 90분을 전후로 온도 상승속도가 증가되는 경향을 나타냈다.

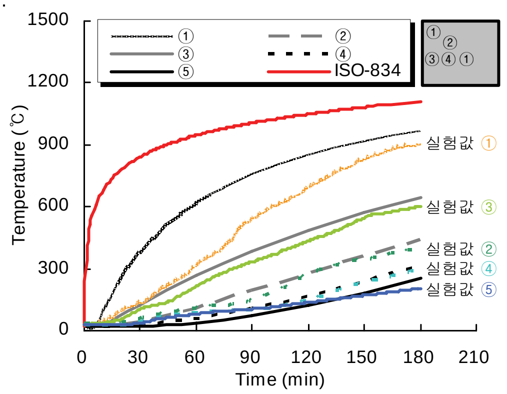


그림 4. 실험값과 해석치의 온도이력 비교
(충전 콘크리트 fc : 40MPa, 피복두께 t : 12mm)

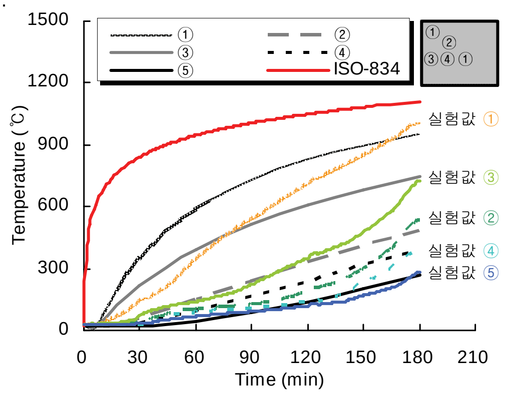


그림 5. 실험값과 해석치의 온도이력 비교
(충전콘크리트 fc : 60MPa, 피복두께 t : 12mm)

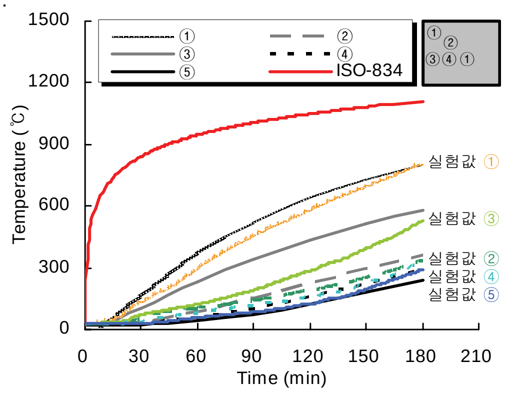
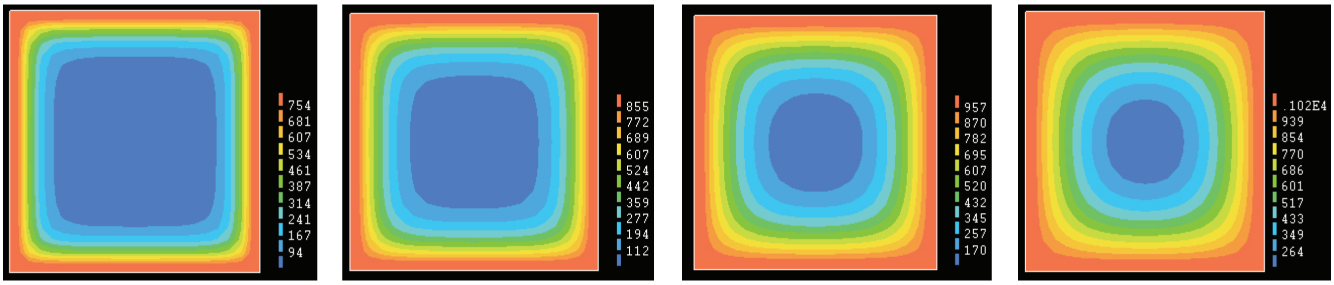


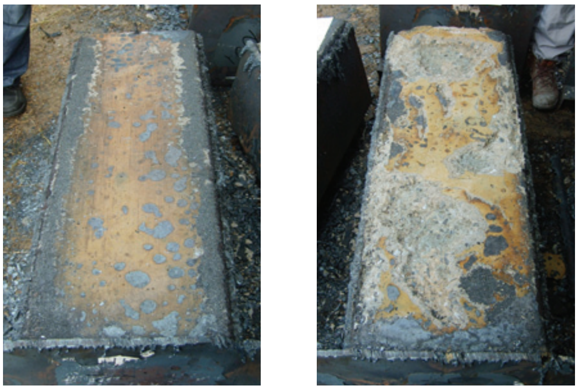
그림 6. 실험값과 해석치의 온도이력 비교
(충전콘크리트 fc : 80MPa, 피복두께 t : 12mm)



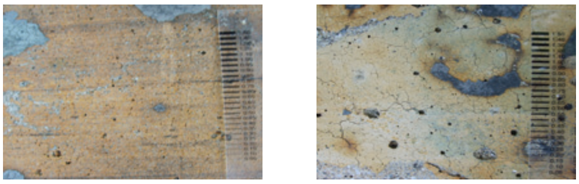
(a) 30분 (b) 60분 (c) 120분 (d) 180분

그림 7. CFT기둥의 비정상 온도분포해석 결과 (40MPa)

또한, fc 60MPa, 80MPa의 경우 표면온도가 매우 높게 상승하는 것으로 나타났다. 이는 충전콘크리트가 고강도화 됨에 따라 발생한 폭렬현상에 의하여 고온인 표면부에서는 비교적 큰 균열이 발생하여 온도가 높게 상승되며 내부로 들어갈수록 미세균열이 발생하여 공기층을 형성하여 열의 전달을 차단에 의해 발생한 현상으로 판단된다.



(a) 40N_12t (b) 80N_12t



(a) 40N_12t의 표면균열 (b) 80N_12t의 표면균열

사진 1. 충전콘크리트 표면 전경

3.2 충전콘크리트 표면관찰

사진 1은 내화실험 후 충전콘크리트의 표면전경을 나타낸 것이다. 충전콘크리트의 강도가 40MPa인 경우에 표면박리는 약간 나타났지만 폭렬현상이 일어나지 않는 것으로 나타났으며 충전콘크리트의 강도가 60MPa, 80MPa인 고강도콘크리트를 충전한 CFT시험체에서는 폭렬이 발생하는 것으로 나타났다. 강관이 충전콘크리트를 구속하고 있지만 기존연구에 의한 폭렬메커니즘에 따라 콘크리트 표면이 크게 박락되는 현상이 나타나 내력저하에 따른 대책이 필요할 것으로 판단된다.

4. 해석결과 및 검증

그림 7은 CFT기둥의 화재에 의한 온도이력분포 예측을 위해 비정상온도 분포해석을 통하여 분석한 결과로서, 가열은 ISO-834 화재곡선에 의해 실시하였으며, 30, 60, 90, 120, 150, 180분에서 분석한 결과를 나타낸 것이다.

비정상온도분포해석에 의해 산출된 해석 결과값을 실험 결과 값과 비교한 결과 깊이 50mm에 위치한 표면부 온도곡선에 있어서 다소 과도한 해석결과를 나타내고 있으나, 전반적으로 해석 값과 실험값이 유사하게 나타났다.

따라서 본 연구에서 도출한 해석결과의 신뢰성을 확인할 수 있었으며 차후에 실부재 가열시험과의 상관관계를 검증할 수 있다면 경제적이고 효과적인 CFT내화성능설계를 할 수 있는 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

고강도콘크리트를 충전한 CFT 기둥의 내화성능 평가에 관한 실험적 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 충전콘크리트의 압축강도에 따른 CFT기둥의 온도이력을측정한 결과 충전콘크리트의 압축강도가 높을수록 온도상승이 10%정도 낮은 것으로 나타났다.
2) 내화실험 후 충전콘크리트의 표면전경을 관찰한 결과 60MPa이상의 고강도콘크리트의 경우 폭렬이 발생하여 내력저하에 따른 대책이 필요할 것으로 사료된다.
3) CFT기둥의 온도분포해석을 통하여 분석한 결과 50mm에 위치한 표면부 온도곡선에 있어서 다소 과도한 해석결과를 나타내고 있으나 내화실험 온도분포해석의 모델링을 제안할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 최성모, 최영환, 정경수(2006). CFT 구조기술 개발 및 적용사례, 건축(대한건축학회지), v.50 n.12
2. 한국표준협회(1993), KS F 2257, 건축구조부분의 내화시험 방법
3. ISO834-7, Fre Resistance Test, Element of Building Construction, Part 7; specific requirement for column, ISO, 2000.
4. Kim, Moo Han, et.al, An Experimental Study on the Engineering Properties of deteriorated Concrete by Fire Damage, Proceeding of the CTBUH 2004 Seoul Conference,pp.588~595. 2004,
5. 斎藤 光, 上杉英樹(昭和 52年 10月), 鋼管コンクリート柱の耐火性, 日本建築學會論文報告準, pp.2107~2108
6. 斎藤 光, 上杉英樹(昭和 52年 10月), 鋼管コンクリート柱の耐火性, 日本建築學會論文報告準, pp.2107~2108