

비재하 가열시험 및 Stub 시험체를 활용한 CFT기둥의 역학적 특성평가에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Evaluation of Mechanical Properties of CFT Column by Unstressed Test and Stub Specimen

이 대 희* 이 태 규* 이 의 배** 김 영 선** 김 규 용*** 김 무 한****
Lee, Dae-Hee Lee, Tae-Gyu Lee, Eui-Bae Kim, Young-Sun Kim, Gyu-Yong Kim, Moo-Han

Abstract

Recently, it increases in use of CFT(Concrete filled steel tube, below CFT) because material and method are required to be diversification and High-Performance according to increase the super-high structure. But, CFT column lose bearing capacity under fire because steel tube is exposed to outside. As a result, structure is collapsed and then it cause much damage.

In case of the Europe, Japan and America, they have studied the fire-resistance performance of CFT under fire for a long time. However, it would have hardly studied it in domestic because it is much difficulty about experiment machine and cost. So it is needed base on fire-resist performance of CFT under fire.

Therefore, this study dynamic specificity of stub column which made tester of stub column based on facts of strength and mixing fiber evaluated used heating and load testing machine. As a result, it is willing to propose fundamental data for quick and accurate diagnosis of deteriorated concrete structure by fire damage with experiment according to the design high strength concrete.

키 워 드 : 충전 강관 콘크리트, 역학적 특성, 고온 가열, 가열·재하장치
Keywords : Concrete filled steel tube, Mechanical properties, High heating, Heating and load test machine

1. 서 론

최근 건축구조물이 초고층화 됨에 따라 재료 및 공법 등의 다양화 및 고성능화가 요구되어 내력·변형성능이 우수한 충전 강관 콘크리트(Concrete filled steel tube, 이하 CFT)기둥의 사용이 증가 되고 있다. CFT기둥은 충전콘크리트의 열용량이 크기 때문에 화재에 따른 강재의 온도 상승을 억제할 수 있어 콘크리트가 하중지지능력을 잃지 않는 범위에서는 내화성능을 기대할 수 있다.

현재 CFT기둥의 내화성능에 대한 평가는 일부재 실험과 더불어 수치적 해석에 의해서 실시되고 있으나 CFT기둥의 일부재 시험의 경우 실험 장비 및 비용 면에서 어려움이 있기 때문에 축소 시험체를 이용하여 재료의 열적 특성을 파악하고 수치적인 방법을 통해 내화성능 데이터를 확보하고 있다. 이러한 방법은 내화성능을 평가함에 있어서 시간과 경비를 줄일

수 있지만 정밀한 계산을 위해서는 고온에서의 정확한 재료특성이 필요하게 된다. 이러한 재료 특성을 평가하기 위한 시험 방법으로는 설계하중 사전재하시험(stressed test), 비재하시험(unstressed test), 설계하중 사전재하 잔존강도 시험(stressed residual strength test)의 3가지 방법이 사용되고 있으며 비재하시험방법의 경우 다른 시험방법에 비해 고온을 받은 CFT기둥의 재료특성 및 열팽창에 대한 변형의 거동을 예측하기에 유리한 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트를 충전한 CFT기둥의 내화성능 개선을 위한 연구의 일환으로서 강도 및 섬유 혼입의 요인에 따라 CFT Stub Column 시험체를 제작한 후 재하가열 시험장치를 사용하여 20(상온), 100, 200, ..., 700℃의 각 가열 온도하에서 비재하 시험방법에 의해 압축강도 및 탄성계수시험을 실시함으로써 고온을 받은 콘크리트의 역학적 특성을 평가하여 화재시 CFT기둥의 거동해석 및 CFT기둥을 사용한 구조물의 내화성능설계를 위한 기초적 데이터를 축적하고자 한다.

* 충남대학교 대학원 건축공학과, 석사과정
** 충남대학교 대학원 건축공학과, 박사과정
*** 충남대학교 건축공학과, 조교수·공박
**** 충남대학교 건축공학과, 명예교수·공박

표 1. 실험계획

구분	W/C (%)	강관종류	섬유종류	가열온도	시험항목
f _c 40N ¹⁾	45	SPSR 490 □75×75×200 (t : 2.3mm)	-	상온(20℃), 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700℃	<ul style="list-style-type: none"> • 압축강도 (상온, 고온) • 정탄성계수 • 육안관찰
f _c 60N	35				
f _c 80N	25				
f _c 80_PP ²⁾					
f _c 80_PP+SF ³⁾					

- 1) f_c40N : 충전콘크리트 설계기준강도 40MPa
- 2) PP : 폴리프로필렌 섬유 첨가
- 3) SF : 강섬유(steel fiber) 첨가

표 2. 사용재료의 물리적 성질

사용재료	물리적 성질
시멘트	1종 포틀랜드시멘트 (비중 3.15, 분말도 3,630cm ² /g)
혼화제	고성능 AE감수제(폴리카르본산계)
굵은골재	부순자갈 (최대치수 20mm, 밀도 2.67g/cm ³ , 흡수율 0.90%)
잔골재	세척사(밀도 2.61g/cm ³ , 흡수율 0.97%)

표 3. 콘크리트 배합

구분	W/B (%)	Slump flow (cm)	Air (%)	S/a (%)	Unit W (l/m ³)	Unit weight (kg/m ³)					
						C	S	G	PP	SF	
f _c 40N	45	50±5	4±2	45	165	367	775	989	-	-	
f _c 60N	35	60±5		45	165	471	760	969			
f _c 80N	25	50±5		45	165	660	691	881			
f _c 80_PP				60	160	640	909	632			2.7
f _c 80_PP+SF				60	160	640	909	632			2.7

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구를 위한 실험계획은 표 1에 나타난 바와 같이 내화 시험용 시험체는 □75×75×200mm 크기의 SPSR490 강관을 제조하였다. 충전콘크리트는 설계기준강도 40, 60, 80MPa를 위해 물시멘트비 45%, 35%, 25%로 설정하였으며, 80MPa급 충전콘크리트의 경우 화재시 폭발특성 등을 평가하기 위해 PP 섬유 및 강섬유를 혼입하였다.

시험체는 상온(20℃), 100, 200, 300, 400, 500, 600 및 700℃의 온도에서 압축강도 및 정탄성계수를 측정하였다.

2.2 사용재료

본 연구에서 사용한 재료는 표 2에 나타난 바와 같이 시멘트는 분말도 3,630cm²/g 및 비중 3.15의 1종 보통포틀랜드시멘트, 혼화제는 폴리카르본산계 고성능 감수제를 사용하였다.

또한 본 연구에서 사용한 골재로서 굵은 골재는 비중 2.67, 흡수율 0.9% 및 최대치수 20mm의 화강암류 부순자갈을 사

용하였으며, 잔골재는 천연잔골재로서 비중 2.61, 흡수율 0.97%의 세척사를 사용하였다.

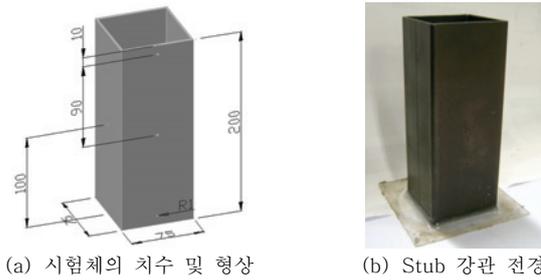


그림 1. CFT Stub Column 시험체

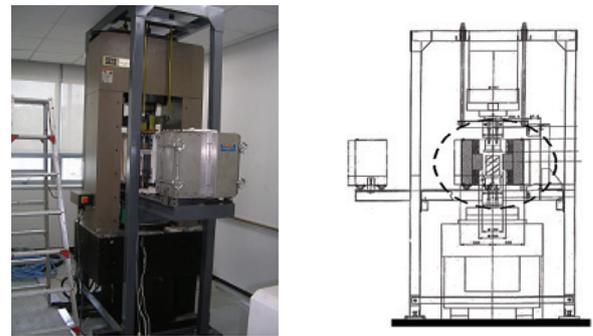


사진 1. 재하 및 가열로 시험장치

2.3 콘크리트 배합 및 비빔방법

본 실험에 사용된 콘크리트의 배합은 충전 콘크리트강도 40, 60, 80MPa에 대하여 물시멘트비를 45, 35, 25%로 각각 설정하였으며 표 3에 나타난 바와 같다.

충전콘크리트의 비빔방법은 시멘트와 잔골재를 투입하여 30초간 건비빔한 후 물과 고성능 감수제를 투입하여 각각 60초간씩 비빔을 실시하였고, 굵은 골재를 투입하고 60초간 비빔을 실시하였다. 최종적으로 섬유를 투입한 후 120초간 비빔을 실시하여 총 270초가 소요되었다.

2.4 시험체 제작

재하·가열 실험을 위한 CFT Stub Column 시험체는 그림 1에 나타난 바와 같이 □75×75×200 및 강관두께 2.3mm의 SPSR490 각형강관을 사용하였고, 가열시험시 가열로의 온도조절을 위한 열전대 설치구멍을 CFT Stub Column 상·하부 단면으로부터 10mm가 되는 위치와 중심부에 Ø2.0mm 크기로 천공하였다.

CFT Stub Column의 충전콘크리트의 강도확인을 위한 공시체와 내화실험을 위한 CFT Stub Column 시험체는 온도 23℃, 상대습도 50%의 항온항습 상태에서 약 120~150일간 기건양성을 실시하였다. 또한, 재하가열 시험 전 상면을 콘크리트용 연마기를 사용하여 평활하게 마감한 후 내화실험을 실시하였다.

2.5 실험방법

2.5.1 가열·재하 및 압축강도시험

본 연구의 가열·재하 실험을 위한 장치는 사진 1과 같은 인스트론형 MTS-815 재하장치에 전기 가열로를 설치하여 재하 및 가열을 동시에 실시할 수 있는 재하·가열장치를 사용하였다. CFT Stub Column의 변위는 MTS 장치의 가력판 상·하부에 석영관을 설치하고 석영관 다른 반대쪽 끝에 LVDT 변위계를 설치하여 측정하였다.

상온(20℃) ~ 700℃의 목표온도에 따른 압축강도 실험방법은 그림 2에 나타난 바와 같은 비재하(unstressed)시험 방법을 사용하였다. 가열속도는 1min/℃, 매 50℃ 상승시 마다 30분간 온도를 유지하여 CFT Stub Column 내부의 온도가 균일하게 되도록 가열을 실시하였다. 또한, 각 시험에서 설정한 목표온도에 도달 후 1시간 동안 목표온도를 유지하였으며 최종적으로 KS F 2405 「콘크리트의 압축강도 시험방법」에 준하여 실시하였다.

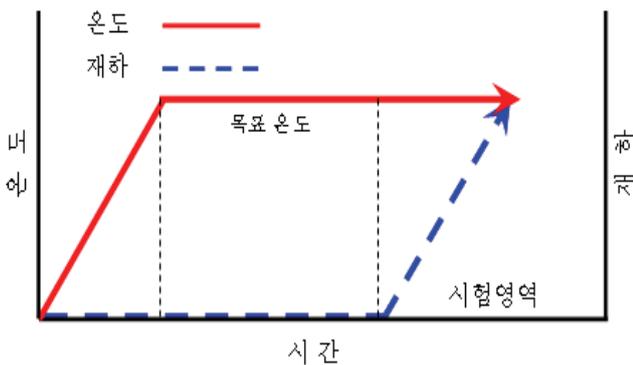


그림 2. 비재하 시험방법 모식도

2.5.2 고온에서의 탄성계수 시험

고온하에서 탄성계수시험은 압축강도 시험과 동일한 방법으로 목표온도까지 가열을 실시한 후 KS F 2438 「콘크리트 원주 공시체의 정탄성계수 및 포아송비 시험방법」에 준하여 탄성계수 실험을 실시하였으며, 계수의 산출은 다음 식 1을 이용하여 산출하였다.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0.000050} \quad (\text{식 1})$$

- 여기에서, E : 탄성 계수 (MPa)
 S₁ : 세로 변형 0.00005cm에 대한 응력
 S₂ : 가해진 최대 하중에 대한 응력
 ε₂ : 응력 S₂로 생긴 세로 변형

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고온에서의 압축강도

그림 3은 CFT Stub Column의 고온압축강도 / 상온압축강도 비를 나타낸 것으로 가열온도 100℃에서는 일반적으로 상온압축강도에 비해 약 10~20% 압축강도가 감소하였으며 강도가 증가함에 따라 저하율이 크게 나타났다. 또한, 섬유를 혼입한 fc80N_PP 및 fc80N_PP+SF 시험체의 경우 섬유를 혼입하지 않은 fc80N에 비해 100℃에서 강도 저하율이 낮은 것으로 나타났다. 가열온도 200℃에서는 모든 수준에서 상온강도 이상으로 압축강도가 재상승하는 경향을 나타냈다. 이때, 섬유를 혼입한 경우에 있어서 압축강도의 상승폭이 섬유를 혼입하지 않은 시험체에 비해 더욱 큰 것으로 나타났다. 또한, 모든 시험수준에 있어서 가열온도 400℃에서는 상온압축강도 이하로 강도가 저하하였으며, 500℃에서는 급격한 강도저하가 발생하여 상온압축강도의 약 40~50%의 압축강도가 잔존하는 것으로 나타났다.

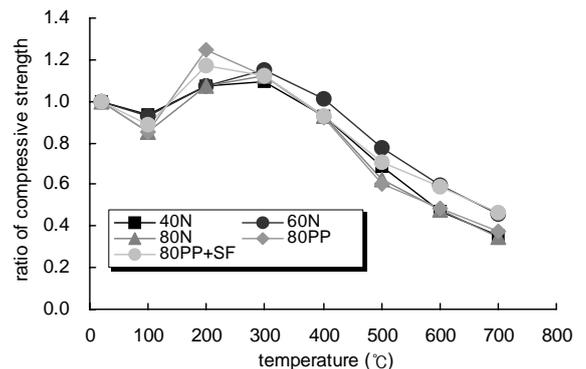


그림 3. 가열온도에 따른 CFT Stub Column의 고온압축강도 / 상온압축강도비

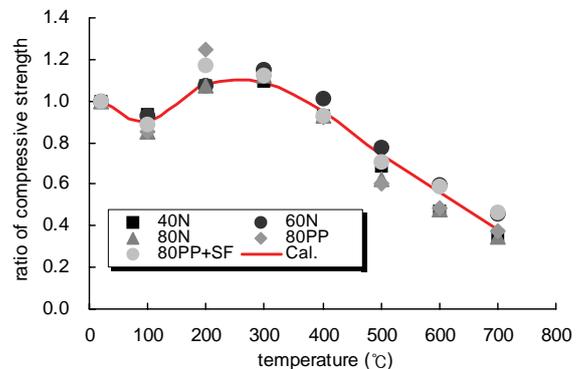


그림 4. 가열온도에 따른 CFT Stub Column의 고온압축강도 / 상온압축강도비

그림 4는 가열 및 재하방법에 따른 압축강도비 (20℃의 압축강도에 대한 각 가열온도에서의 압축강도)의 변화를 나타

낸 것으로 각 온도별 압축강도는 식 2과 같이 나타낼 수 있으며, 상온(20℃) ~ 700℃의 압축강도비 데이터를 추정할 결과 식 3 및 식 4를 산출하였다.

$$\sigma_c(\theta) = \sigma_c(20) \times r\sigma_c(\theta) \dots\dots\dots (식 2)$$

$$r\sigma_c(T) = (a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3 + e \cdot T^4) \times \exp(f \cdot T) \dots\dots (식 3)$$

$$T = \frac{\theta - 20}{100} \dots\dots\dots (식 4)$$

여기에서, $\sigma_c(\theta)$: θ ℃ 가열후의 압축강도 (MPa)
 $\sigma_c(20)$: 20℃에서의 압축강도 (MPa)
 $r\sigma_c(\theta)$: θ ℃의 고온/상온시 압축강도 잔존비
 a, b, c, d, e, f: 온도 및 하중계수

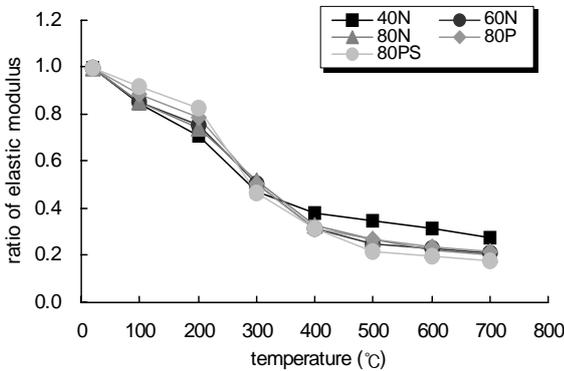


그림 5. 가열온도에 따른 CFT Stub Column의 고온탄성계수 / 상온탄성계수비

3.2 고온에서의 탄성계수 및 변형률 변화

그림 5는 CFT Stub Column의 고온탄성계수 / 상온탄성계수 비를 나타낸 것으로서 가열온도 200℃까지는 일반적으로 상온탄성계수에 비해 약 10~30%의 탄성계수가 감소하였으며 섬유를 혼입한 시험체는 섬유를 혼입하지 않은 시험체에 비해 감소율이 낮았다. 특히 강섬유를 혼입한 시험체의 경우 일반 시험체에 비해 10%정도 탄성계수 저하율이 낮은 것으로 나타났다. 또한 가열온도가 200℃를 초과하면서 fc80N_PP 및 fc80N_PP+SF 시험체의 탄성계수 감소율은 다른 수준의 시험체에 비해 증가하는 경향을 보였으며, 가열온도 300℃에서는 모든 시험체가 상온탄성계수의 50%를 나타내었다. 또한 최종목표 가열온도인 700℃에 있어서는 전반적으로 상온탄성계수의 20~30%범위의 잔존탄성계수를 나타냈다.

그림 6은 CFT Stub Column의 최대압축강도에서의 변형을 나타낸 것으로서 섬유를 혼입한 fc80N_PP 및 fc80N_PP+SF 시험체의 경우 온도가 증가함에 따라 최대압축강도에서의 변형은 점진적으로 증가하였다. 그러나, 섬유를 혼입하지 않은 fc40N, fc60N, fc80N 시험체의 경우 가열온도 100℃에서는 최대변형이 상승한 후 200℃에서 다시 하락

한 후 300℃이후 섬유를 혼입한 시험체와 동일하게 계속적으로 상승하는 경향을 보였다.

4. 결 론

CFT기둥의 내화성능을 개선하기 위하여 CFT Stub Column의 고온특성 평가에 관한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 가열온도에 따른 CFT Stub Column 압축강도 및 고온 압축강도/상온압축강도비의 변화를 분석한 결과, 본 연구의 범위에서 다음과 같은 추정식을 제안할 수 있었다

$$\sigma_c(\theta) = \sigma_c(20) \times r\sigma_c(\theta)$$

$$r\sigma_c(T) = (a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3 + e \cdot T^4) \times \exp(f \cdot T)$$

$$T = \frac{\theta - 20}{100}$$

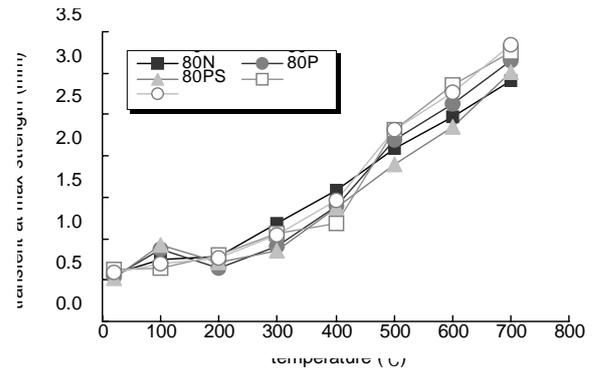


그림 6. 가열온도에 따른 최대압축강도에서의 변형

- 2) CFT Stub Column의 탄성계수는 가열온도가 상승함에 따라 계속적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 또한, 본 연구의 범위에 있어서 PP 및 강섬유를 혼입한 시험체의 경우 200℃까지는 일반시험체에 비해 탄성계수 저하율이 낮게 나타났으나, 이후의 가열온도에서는 탄성계수 감소율이 급격히 증가하여 400℃이후에는 유사한 탄성계수값을 나타냈다.
- 3) CFT Stub Column의 최대압축강도에서의 변형을 평가한 결과, 가열온도가 상승할 경우 최대압축강도에서의 변형은 증가하는 것으로 나타났으며, 300℃이후 변형율은 급격히 상승하는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김무한 외, 섬유종류 및 혼입량에 따른 고성능콘크리트의 폭열저감에 관한 실험적 연구, 한국화재소방학회 추계학술논문 발표회 논문집, pp.81-85, 2005.
2. 박기창, 최성모, 김동규, 콘크리트충전 강관기둥의 내화실험에 대한 고찰, 한국강구조학회논문집 제 12권 6호, pp.759~768, 2000. 12.
3. 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.
4. 岡田忠義, 吉田正友, 田坂茂樹, 岡部 猛, 作本好文, 山口種美, (1992), 建築構造用耐火鋼材を使用したコンクリート充填鋼管柱の耐火性能, GBRC, 第 65号, p.18~23.
5. 作本好文, 山口種美, 岡田忠義, 吉田正友, 齋藤 光(1992), 建築構造用耐火鋼材を耐火性能に関する實驗的研究, 本建築學會大會論文報告集, 第 434号, p.149~158.
6. 최성모, 최영환, 정경수, CFT 구조기술 개발 및 적용사례, 건축(대한건축학회지), v.50 n.12, 2006.
7. 齋藤 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集, pp.2107~2108.