

내화피복 종류에 따른 각형 CFT기둥의 온도분포에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Temperature Distribution of Square CFT Columns According to the Types of Fire Protection

김 해 수¹⁾ · 이 치 형^{2)†}
Kim, Hae Soo · Lee, Chy Hyoung

요 약 : 콘크리트가 충전된 각형강관기둥(이하, 각형 CFT기둥)은 높은 내화성과 하중저항능력을 보유하고 있지만, CFT기둥의 외부에 내화피복을 함으로써 기둥의 내화성을 향상시킬 필요가 있다. 본 연구는 내화 피복된 각형 CFT기둥의 온도분포에 대한 실험결과이다. 실험을 위하여 특수 제작된 전기로를 이용하여 축소모형 시험체의 재하가열실험을 수행하였다. 축하중을 받는 내화 피복된 각형 CFT기둥의 온도분포 특성을 파악하기 위하여 내화피복의 종류와 두께, 강관의 두께 및 가열시간 등을 변수로 설정하였다. 실험결과 전기로의 온도에 따른 시험체별 온도분포와 콘크리트와 강재의 온도분포 특성을 파악하였다. 또한 시험체의 온도변화에 따른 축변위와 국부좌굴 등의 거동을 파악하였다.

ABSTRACT : Concrete-filled square steel tube (CFT) columns have inherently high fire resistance and load-bearing capacity. Nevertheless, it is sometimes necessary to improve their fire resistance using external fire protection. This paper presents the experimental results of the temperature distribution of CFT columns with fire protection. A fire load test was carried out by exposing small-scale specimens to heat in an electric furnace that was especially built for testing loaded columns. The temperature distribution of CFT columns under constant axial loads was determined, as were its significant parameters, such as the types of fire protection and thickness, the thickness of the square CFT, and the fire duration times. The results of this study showed the temperature distribution of each specimen of the electric furnace and the temperature distribution properties of concrete and steel. In addition, the axial displacement and local buckling behavior of CFT columns based on temperature changes was observed.

핵심용어 : 콘크리트충전 각형강관기둥, 내화피복, 온도분포, 재하가열실험

KEYWORDS : concrete filled square steel tube column, fire protection, temperature distribution, fire load test

1. 서론

건축물의 고층화, 대형화에 따라 구조체로서 강구조의 사용이 증가하고 있을 뿐만 아니라 최근에 들어서는 강재와 콘크리트 합성구조의 형태로서 콘크리트를 충전한 강관(CFT, concrete filled steel tube)구조의 채택이 점차 증가하고 있다. 강구조나 CFT구조는 뛰어난 재료성능으로 작은 단면으로 큰 내력을 부담할 수 있는 장점이 있지만 화재와 같은 고열을 받을 경우 재료의 강도와 부재의 강성이 급격히 저하됨에 따

라 건축물의 안전에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

실제 건축물에서 화재가 발생하면 기둥은 하중이 작용하고 있는 상태에서 화재로 인한 고열에 노출 된다. 강관 내부에 콘크리트가 충전된 충전형 합성기둥인 CFT기둥은 콘크리트 속에 강재가 매입된 H형강 합성기둥과는 달리 강관의 표면에 고열에 직접 노출되기 때문에 축하중을 받는 내화피복 CFT기둥(2010, 윤성기 외)은 내화피복의 종류와 두께에 따라 온도분포와 내화성능에서 많은 차이가 예상된다. 또한 내부콘크리트와 강관의 온도분포와 내화성능을 평가하기가 용이하지 않고,

1) 부산대학교 건축공학과, 박사과정수료(khs3108@dit.ac.kr)
2) 교신저자, 부산대학교 생산기술연구소 특별연구원, 공학박사
(Tel: 051-510-1326, Fax: 051-515-1326, E-mail: chylee@pusan.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2011년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

내화실험조건에 따라 결과가 상이하어 정량적인 평가방법이 표준화되어 있지 않은 실정이다(2008, 김규용 외).

최근까지 CFT기둥에 대한 연구는 무내화 CFT기둥을 대상으로 실험이나 수치해석을 통한 온도분포나 내화성능에 관한 연구(2007, 류재용 외, 2007, 박수희 외, 2000, Kodur et. al)가 주로 이루어져 왔다. 반면 내화피복된 CFT기둥의 온도분포와 특성에 대한 연구는 외국의 일부 연구를 제외하면 현재까지 보고된 연구결과가 거의 없기 때문에 내화피복에 따른 CFT기둥의 내화성능을 파악할 수 있는 온도분포에 관한 연구의 필요성이 제기된다.

본 연구는 화재에 노출된 각형 CFT기둥에서 화재의 진행에 따른 온도분포의 변화와 상태파악을 목적으로, 기존의 연구결과와 실험을 수행하여 기둥 단면의 각 위치별 온도분포 자료를 제시하고자 한다. 실험은 하중이 재하된 상태에서 내화피복에 따른 CFT기둥 단면의 온도분포와 변화 상태를 알아보기 위하여 내화피복의 종류와 두께, 강관의 두께 및 가열시간 등을 변수로 하여 시험체를 제작하고 재하가열실험을 실시한다. 실험을 통하여 가열시간 및 가열로의 온도변화에 따른 콘크리트중양부, 강관 내부 및 외부 표면 위치의 온도분포와 내화피복의 종류와 두께에 따라 변화되는 온도분포를 제시하고자 한다. 아울러 시험체의 열팽창과 수축에 따른 축변위를 측정함으로써 강관의 두께에 따른 부재의 내력을 평가하고자 한다.

2. 재하가열 실험

2.1 시험체

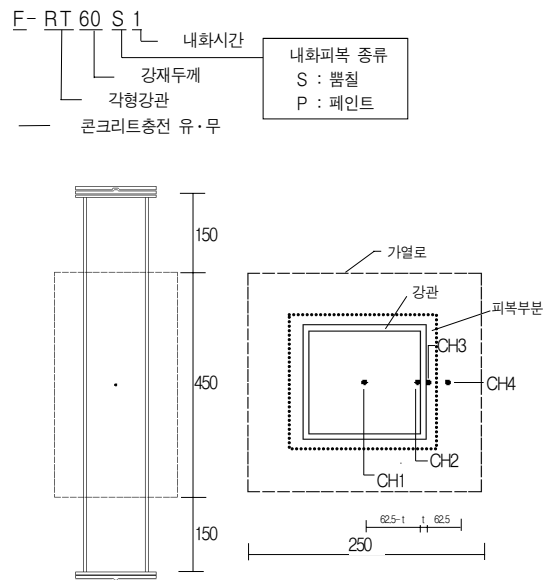
제작된 시험체는 화재로 고열을 받는 경우로 가정하고, 가력장치의 최대높이와 폭 및 가열로의 크기를 감안하여 단면적을 기준으로 실물크기 CFT기둥의 1/4축척의 각형강관으로 선정하였다. 시험체의 단면은 강관의 두께에 따라 □-125×125×3.2, 6.0, 9.0의 3종류이다. 콘크리트의 설계기준강도(f_{ck})는 24 MPa로 하였으며, 강재는 SPSR400재질이다. 시험체의 길이는 축소모형 시험체의 축척과 좌굴에 대한 영향을 감안하여 세장비(KL/r)를 15로 고정하여 750mm로 하고, 직접 가열되는 유효가열길이는 시험체 양단에서 150mm를 제외한 450mm로 하였다. 그림 1은 콘크리트가 충전된 각형강관 시험체의 제작모습을 보여준다. 시험체는 내화피복의 종류와 피복두께, 강관 두께 및 가열시간을 변수로 하여 내화뿔칠피복 시험체 9개와 내화페인트피복 시험체 6개를 제작하였으며, 시험체 일람표는 표 1과 같다.



그림 1. 콘크리트가 충전된 시험체 제작모습

표 1. 시험체 일람표

시험체명	단면형상 (mm)	피복 종류	피복두께 (mm)	목표내화 시간(hr)	재하하중 (kN)
F-RT32S1	□-125×3.2	뿔칠	20	1	485.46
F-RT32S2			30	2	
F-RT32S3			40	3	
F-RT60S1	□-125×6.0	뿔칠	20	1	682.36
F-RT60S2			30	2	
F-RT60S3			40	3	
F-RT90S1	□-125×9.0	뿔칠	20	1	874.37
F-RT90S2			30	2	
F-RT90S3			40	3	
F-RT32P1	□-125×3.2	페인트	0.85	1	485.46
F-RT32P2			3.35	2	
F-RT60P1	□-125×6.0	페인트	0.85	1	682.36
F-RT60P2			3.35	2	
F-RT90P1	□-125×9.0	페인트	0.85	1	874.37
F-RT90P2			3.35	2	



(a) 시험체의 형상 (b) 열전대 부착위치
그림 2. 시험체 크기 및 열전대 부착위치 (단위:mm)

내화피복재는 내화구조의 성능기준(2008)에서 내화성능을 인정받은 K사, S사의 제품으로 선정하였다. 내화뿔칠 타입은 목표내화시간인 1~3시간 내화성능을 만족할 수 있도록 피복 두께를 20mm, 30mm, 40mm의 3종류를 선정하였다. 내화 페인트 타입은 목표내화시간인 1~2시간 내화성능을 만족할 수 있도록 피복두께 0.85mm, 3.35mm의 2종류를 선정하였다.

시험체 단면의 각 부분에서 온도측정을 위하여 콘크리트 중앙부(CH1), 강관 내부표면(CH2), 강관 외부표면(CH3) 및 전기로 내부(CH4)에 열전대(thermocouple)를 부착하였다. 사용된 열전대는 측정 온도범위 $-250^{\circ}\text{C} \sim 1,260^{\circ}\text{C}$ 인 K형이고, 길이는 절연재 300mm를 포함하여 3.5m이다. 그림 2(a)는 시험체의 길이와 단면형상을 나타낸 것이고, 그림 2(b)는 열전대의 부착위치를 나타낸 것이다.

2.2 재하하중 및 축력비

표 1에 나타낸 각 시험체별 재하하중은 건축구조기준(2009, KBC 2009)에서 제시하고 있는 충전형 합성기둥의 설계압축강도 값으로 다음 식으로 산정하였다.

$$P_0 = A_s \cdot F_y + A_{sr} \cdot F_{yr} + 0.85 f_{ck} \cdot A_c \quad (1)$$

$$\phi_c P_0 = 0.75 P_0 \quad (2)$$

여기서, P_0 는 충전형 합성기둥의 압축강도, ϕ_c 는 강도감소계수, $A_s \cdot F_y$ 는 강관의 부담축력, $A_{sr} \cdot F_{yr}$ 는 축방향 철근의 부담축력, 그리고 $A_c \cdot f_{ck}$ 는 충전콘크리트의 부담축력이다.

식(2)의 설계압축강도에 대한 충전콘크리트의 부담축력을 나타내는 축력비($A_c \cdot f_{ck} / 0.75 P_0$)는 표 1에서의 각형강관 □-125×125×3.2, 6.0, 9.0 단면의 두께에 따라 각각 0.70, 0.45, 0.31로 계산된다.

2.3 실험 방법

2.3.1 가력방법

재하가열실험은 축하중이 재하된 상태에서 시험체가 화재로 인한 고열에 노출된 조건을 가정하여 최대 가력능력 2,000kN의 만능시험기(UTM)로 실험을 수행하였다. 시험체에 대한 가력은 식(2)에 따라 산정된 각 시험체별 재하하중을 가열 15분 전에 재하를 완료하고, 재하속도는 UTM내부의 로드셀에 의한 하중제어 방식으로 하였다. 그림 3은 시험체의 가력방법에

대한 개념도를 나타낸 것이다. 시험체의 열팽창 및 수축에 의한 변위량은 외부에 설치된 변위계(LVDT, 50mm)로 시험체의 수직변위를 측정하였다. 건축부재의 내화시험 방법(2005, 2006, KS F 2257-1, 7)에 따라 시험체의 축방향 수축량 $C = h/100\text{mm}$ 이상 도달하거나, 변형률 $dC/dt = 30C/\text{min}$ 에 도달한 경우 시험체의 내력이 상실된 것으로 하여 실험을 종료하였다.

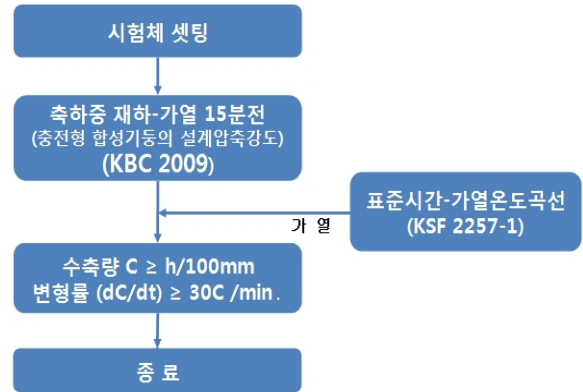


그림 3. 시험체의 가력방법

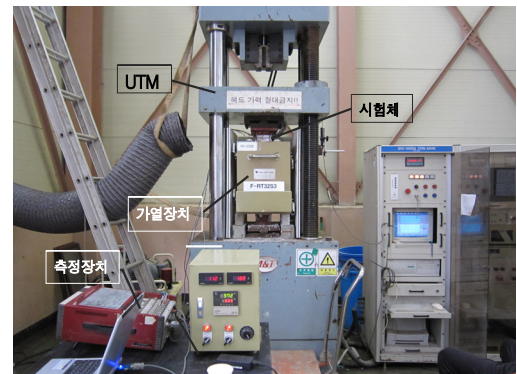


그림 4. 가력장치 및 가열장치



그림 5. 시험체의 설치전경

그림 4는 가력장치와 가열장치 및 온도 측정장치를 나타낸 것이고, 시험체의 설치는 그림 5와 같이 시험체의 상·하 단부에 힌지를 설치하여 가력 시 편심하중이 발생하지 않도록 하였다. 또한 재하하중의 지속적인 유지와 열전달을 차단하기 위해 가열로와 UTM 사이에 세라믹보드로 제작된 단열판을 설치하였다.

2.3.2 가열방법

가열장치는 실험여건과 시험체 조건 등을 고려하여 그림 4에 나타낸 바와 같이 자체 제작한 전기 가열로(최대 가열온도 1,100℃)를 사용하였다. 가열은 각 시험체 별로 정해진 재하하중에 도달하면 하중을 고정시키고 가열을 시작하였다. 목표 내화시간 1시간 시험체는 90분, 2시간 시험체는 150분, 3시간 시험체는 210분을 가열하고, 목표로 하는 기준시간보다 30분을 더 가열하여 시험체의 상태를 관찰하였다. 시험체의 가열 조건은 소요 재하하중이 가력된 상태에서 표준시간-가열온도 곡선(KSF 2257-1)에 준하여 가열하였다. 가열 중 시험체의 온도 및 변위데이터는 단면의 각 위치에 설치된 열전대와 변위계를 통하여 30초 간격으로 데이터로거(TDS-302)로 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 재료실험

내화실험에 사용된 강재는 SPSR400계질로 시험편은 KS B 0801에 준하여 제작하였고, 강관내부에 충전한 콘크리트는 설계기준강도 24MPa로 배합설계를 하였다. 강재의 인장강도시험은 KS B 0802, 콘크리트의 압축강도시험은 KS F 2405에 준하여 수행하였고, 각 재료의 재료특성에 관한 시험결과는 3개의 평균값으로 하여 표 2와 표 3에 나타내었다.

3.2 온도분포

3.2.1 내화뿔칠 시험체

내화뿔칠된 9개 시험체의 피복두께 변화에 따른 단면의 위치별 온도분포 결과는 표 4~표 6과 같다. 이것은 동일한 피복두께를 가진 시험체에서 강관의 두께변화에 따라 콘크리트 중앙부, 콘크리트와 강관의 경계면인 강관 내부표면 및 강관 외부표면에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 또한 표에서의 전기로 내부온도는 그림 2(b)의 CH4부분에서 측정된 값으로, 가열시간에 따른 각 시험체의 측정된 값이 약 1%이내의 차이를 보여

9개 시험체의 평균값이다. 표 4에서 내화뿔칠 두께 20mm 시험체의 전반적인 온도분포는 콘크리트 중앙부가 가장 낮게 나타났고 다음은 강관 내부표면, 마지막으로 강관 외부표면이 가장 높게 나타났다.

가열시간 60분인 전기로 온도 635.8℃까지 3개의 시험체 모두 강관 내부와 외부표면에서 온도차이가 거의 없으나, 전기로 온도가 803.8℃에 도달한 90분 이후부터 가열 종료시까지 강관 내부와 외부표면의 온도차가 크게 나타났다. 이것은 내화피복재의 함유량과 콘크리트 내부의 자유수와 수화반응에 의해 발생한 수분의 영향으로 강재온도의 상승이 지연되는 효과에 의한 것으로 보인다. 마찬가지로 내화뿔칠 두께 30mm, 40mm 시험체의 온도분포도 두께 20mm 시험체와 유사한 경향을 보이고 있다. 다만 내화뿔칠 두께 40mm 시험체는 가열시간 90분까지 강관 내부와 외부표면의 온도차가 크지 않음을 알 수 있다.

표 2. 강재의 재료특성

항복강도(MPa)	인장강도(MPa)	연신률(%)
350.5	404.7	24.7

표 3. 콘크리트의 재료특성

슬럼프치(mm)	물시멘트비	잔골재율(%)	압축강도(MPa)
150	0.5	49.7	25.4

표 4. 내화뿔칠 20mm 시험체의 온도분포 (단위:℃)

시간 (분)	전기로 내부	F-RT32S1			F-RT60S1			F-RT90S1		
		중앙	내부 표면	외부 표면	중앙	내부 표면	외부 표면	중앙	내부 표면	외부 표면
0	22.1	17.2	17.6	18.2	15.9	16.5	17.2	24.0	23.9	22.2
30	337.0	19.3	34.3	47.7	23.4	40.8	47.0	29.7	40.4	38.4
60	635.8	50.2	79.5	88.0	65.5	90.2	90.5	64.8	87.4	88.0
90	803.8	87.8	102.8	151.8	87.4	148.0	169.4	105.9	127.1	133.3
120	917.3	122.4	163.8	250.9	142.5	230.6	269.0	141.6	190.4	223.0
150	976.4	136.1	236.4	323.1	175.8	313.5	355.4	176.0	266.5	314.6

표 5. 내화뿔칠 30mm 시험체의 온도분포 (단위:℃)

시간 (분)	전기로 내부	F-RT32S2			F-RT60S2			F-RT90S2		
		중앙	내부 표면	외부 표면	중앙	내부 표면	외부 표면	중앙	내부 표면	외부 표면
0	22.1	17.2	17.8	17.6	19.7	18.5	19.1	22.7	22.9	22.2
30	337.0	22.1	28.3	47.1	24.2	26.0	35.6	26.4	31.2	42.3
60	635.8	57.6	75.4	94.6	57.5	68.9	83.9	47.6	70.6	78.8
90	803.8	96.0	106.4	123.6	81.2	93.0	98.6	82.9	102.6	98.6
120	917.3	130.7	154.1	238.2	109.6	131.9	185.2	101.0	147.5	179.3
150	976.4	165.1	226.7	331.7	145.5	203.3	273.1	127.1	209.3	267.8

표 6. 내화뿔칠 40mm 시험체의 온도분포 (단위:℃)

시간 (분)	전기로 내부	F-RT32S3			F-RT60S3			F-RT90S3		
		중앙	내부 표면	외부 표면	중앙	내부 표면	외부 표면	중앙	내부 표면	외부 표면
0	22.1	15.0	16.4	17.0	19.5	20.9	21.5	23.1	22.9	22.3
30	337.0	15.1	25.0	33.3	22.1	26.9	37.9	26.3	25.5	27.1
60	635.8	21.1	70.5	82.8	43.3	59.4	76.1	36.9	47.7	58.2
90	803.8	29.2	93.0	96.3	76.1	87.6	94.2	56.9	81.8	88.4
120	917.3	45.9	108.0	126.6	94.2	95.3	126.1	84.2	106.6	102.4
150	976.4	72.8	162.9	204.7	120.3	144.0	222.2	94.8	140.4	169.9
180	988.8	88.9	234.6	292.7	151.0	204.8	286.2	107.5	163.0	223.6
210	988.8	92.4	294.6	351.3	172.9	264.9	340.1	119.5	187.9	271.3

3.2.2 내화페인트 시험체

내화페인트로 피복된 6개 시험체의 피복두께에 따른 단면의 위치별 온도분포 결과는 표 7~표 8과 같다. 표 7에서 내화페인트 두께 0.85mm, 3.35mm인 두 시험체의 콘크리트 중앙부, 강관 내부 및 외부 표면의 전반적인 온도분포는 내화뿔칠 시

표 7. 내화페인트 0.85mm 시험체의 온도분포 (단위:℃)

시간 (분)	전기로 내부	F-RT32P1			F-RT60P1			F-RT90P1		
		중앙	내부 표면	외부 표면	중앙	내부 표면	외부 표면	중앙	내부 표면	외부 표면
0	21.3	20.8	21.0	20.9	20.5	20.5	20.8	20.5	20.6	20.0
30	320.5	49.1	100.2	292.7	51.5	100.0	189.7	51.0	103.7	142.2
60	608.4	137.0	212.3	384.2	132.9	216.3	394.5	135.5	231.3	395.6
90	774.5	148.8	234.2	399.9	164.3	384.7	559.1	182.3	388.2	573.1

(* : 66분일 때의 온도)

표 8. 내화페인트 3.35mm 시험체의 온도분포 (단위:℃)

시간 (분)	전기로 내부	F-RT32P2			F-RT60P2			F-RT90P2		
		중앙	내부 표면	외부 표면	중앙	내부 표면	외부 표면	중앙	내부 표면	외부 표면
0	21.3	21.7	21.2	21.7	19.2	17.9	18.9	19.1	20.0	20.4
30	320.5	46.4	85.7	162.4	22.7	89.7	160.6	43.0	77.0	131.7
60	608.4	83.7	169.8	351.6	53.1	178.6	314.4	118.4	154.9	269.0
90	774.5	109.5	265.0	539.8	82.5	267.9	443.9	146.5	228.6	379.0
120	845.6	216.8	465.2	696.5	92.5	399.7	687.5	230.5	346.5	535.7

험체와 비슷한 경향을 보이고 있다. 그러나 내화페인트 시험체는 내화뿔칠 시험체와는 달리 전기로 온도 320.5℃에 도달한 가열 30분 이후부터 가열종료 시까지 강관의 내부표면과 외부 표면의 온도가 100.2℃와 292.7℃로 측정되어 온도차가 크게 나타났다.

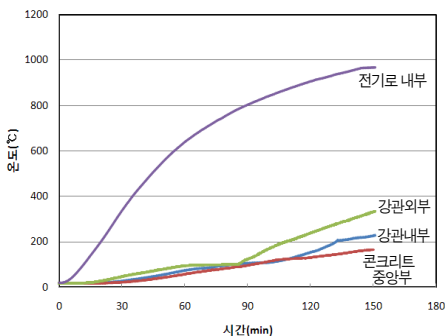
3.3 축변위

본 연구에 적용된 시험체의 축변위 결과는 표 1에 제시된 재하하중을 가력한 다음, 가열을 시작하여 가열시간에 따른 시험체 별 가열 전과 가열 후 기둥의 축변위를 표 9~표 12에 나타내었다. 가열 전, 축하중 재하로 인한 기둥의 축변위는 내화뿔칠 시험체의 경우 2.900mm~5.055mm범위의 값으로 측정되었고, 내화페인트 시험체의 경우 2.345mm~4.540mm범위의 값으로 나타났다. 또한 가열시작 이후 가열로로 인한 축변위는 내화뿔칠 시험체의 경우 -3.420mm~1.190mm범위의 값으로 측정되었고, 내화페인트 시험체의 경우 -4.425mm~0.225mm범위의 값으로 나타났다.

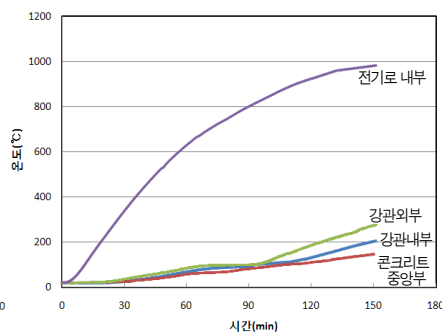
가열로 인한 부재의 축변위의 변화는 내화뿔칠 시험체의 경우 가열 후 부재가 서서히 팽창하기 시작하여 가열 후 40분까지는 팽창이 발생하고 그 이후는 다시 수축하는 경향을 보였으며, 내화페인트 시험체인 경우도 유사한 경향을 보였다.

표 9. 내화뿔칠 20mm 시험체의 축변위 (단위: mm)

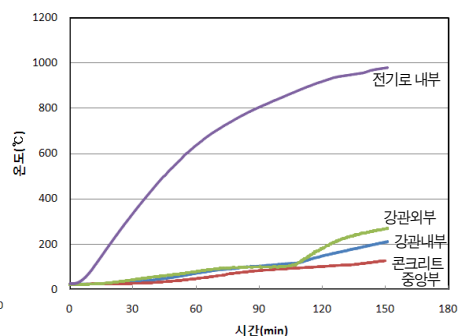
가열	시간(분)	F-RT32S1	F-RT60S1	F-RT90S1
가열전	-	3.425	5.055	3.860
가열후	0	0.000	0.000	0.000
	30	0.310	0.065	0.015
	60	0.190	-0.085	-0.175
	90	0.120	-0.305	-0.470
	120	-0.035	-0.680	-0.930
	150	-0.090	-1.075	-1.145



(a) 두께 3.2mm인 경우



(b) 두께 6.0mm인 경우



(c) 두께 9.0mm인 경우

그림 6. 내화뿔칠 30mm인 시험체의 위치별 온도분포

표 10. 내화뿔칠 30mm 시험체의 축변위 (단위: mm)

가열	시간(분)	F-RT32S2	F-RT60S2	F-RT90S2
가열전	-	3.300	3.270	3.615
가열후	0	0.000	0.000	0.000
	30	0.070	0.040	0.000
	60	-0.075	-0.175	-0.220
	90	-0.110	-0.285	-0.425
	120	-0.280	-0.535	-0.800
	150	-3.420	-0.875	-1.245

표 11. 내화뿔칠 40mm 시험체의 축변위 (단위: mm)

가열	시간(분)	F-RT32S3	F-RT60S3	F-RT90S3
가열전	-	2.927	3.065	2.900
가열후	0	0.000	0.000	0.000
	30	0.020	0.040	0.030
	60	-0.125	-0.135	-0.170
	90	-0.185	-0.270	-0.345
	120	-0.265	-0.455	-0.670
	150	-0.335	-0.825	-1.035
	180	0.095	-1.205	-1.360
	210	1.190	-1.565	-1.655

표 12. 내화페인트 시험체의 축변위 (단위:mm)

가열	시간(분)	F-RT32	F-RT32	F-RT60	F-RT60	F-RT90	F-RT90
		P1	P2	P1	P2	P1	P2
가열전	-	4.210	2.345	3.540	2.790	3.045	4.540
가열후	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	30	-0.160	-0.055	-0.300	-0.075	-0.305	1.190
	60	-0.150	-0.110	-1.150	-0.575	-1.135	0.685
	90	0.225	-0.175	-1.035	-1.105	-1.900	0.310
	120	-	-4.425	-	-1.470	-	-0.325

4. 결과 분석

4.1 위치에 따른 온도분포

가열시간 및 전기로 내부 온도변화에 따른 내화뿔칠 피복두께 30mm, 내화페인트 피복두께 3.35mm 시험체를 대상으로

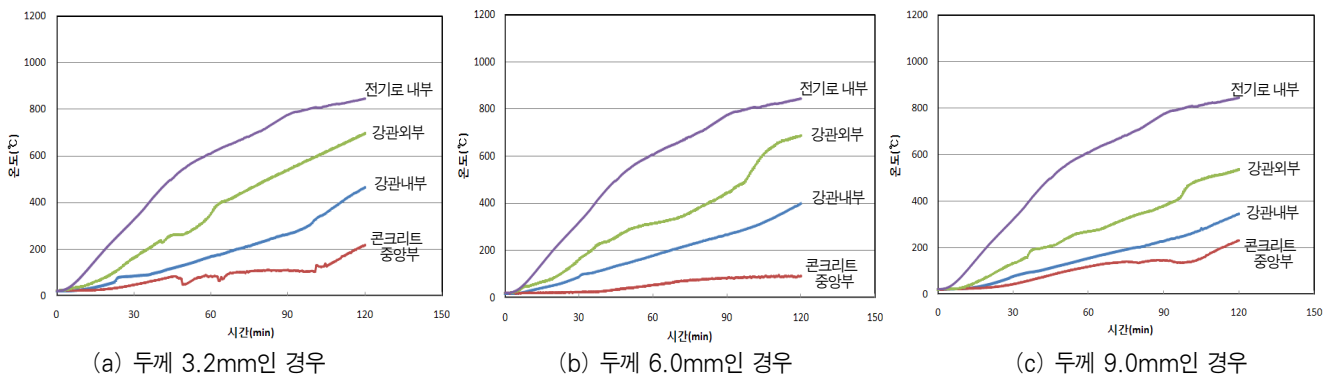


그림 7. 내화페인트 3.35mm인 시험체의 위치별 온도분포

콘크리트 중앙부, 강재 내부 및 외부표면에 대한 위치별 온도 분포는 각각 그림 6과 그림 7과 같다. 시험체의 전반적인 온도 분포는 콘크리트 중앙부, 강관 내부표면, 강관 외부표면의 순으로 온도가 높게 나타났다.

그림 6에서 내화뿔칠 시험체는 강관두께 3.2mm, 6.0mm인 경우 전기로 온도가 803.8°C에 도달한 가열 후 90분까지, 9.0mm의 경우 885.0°C에 도달한 110분까지 콘크리트 중앙부, 강관의 내부표면 및 외부표면의 온도차는 거의 없음을 알 수 있고, 이 후 종료까지는 뚜렷한 온도차이를 보였다. 따라서 내화뿔칠은 가열 초기에 내화피복의 효과를 보이고 연소가 된 후에는 내화능력이 감소됨을 알 수 있었다.

그림 7에서 내화페인트 시험체는 강관두께에 관계없이 모든 시험체가 전기로 온도가 약 100°C에 도달한 10분~15분 이후부터 가열종료 시까지 강관의 내부표면과 외부표면의 온도차가 크게 나타남을 알 수 있다. 내화도료의 발포시점이 가열 후 35~43분경에 발생하였으며, 이때의 전기로의 온도가 380~456°C범위에서 발포가 시작된 것으로 볼 수 있다. 따라서 내화페인트 시험체의 경우 초기에는 얇은 피복으로 인하여 온도 상승이 급한 반면 내화도료의 발포로 팽창이 일어난 시점부터는 내화성능을 발휘하는 것으로 나타났다.

표 13. 가열시간에 따른 위치별 온도차 (단위: °C)

피복종류	시험체명	가열시간 60분		가열시간 120분	
		CH1-CH2	CH2-CH3	CH1-CH2	CH2-CH3
뿔칠 피복	F-RT32S2	17.8	19.2	24.0	84.1
	F-RT60S2	11.4	15.0	23.0	53.3
	F-RT90S2	23.0	8.2	46.5	31.8
페인트 피복	F-RT32P2	86.1	181.8	248.4	231.3
	F-RT60P2	125.5	135.8	307.2	287.8
	F-RT90P2	36.5	114.1	116.0	189.2

주) CH1-CH2 : 콘크리트 중앙부와 강관 내부표면의 온도차
CH2-CH3 : 강관 내부표면과 강관 외부표면의 온도차

표 13은 가열시간을 기준으로 내화피복 종류에 따른 시험체의 위치별 상대적인 온도차를 나타낸 것이다. 내화뿔칠 시험체

의 경우 콘크리트 중앙부와 강관 내부표면의 온도차는 평균 1.87배로 나타났고, 강관내부 표면과 외부표면의 온도차는 평균 3.96배로 나타나 강관의 내부표면과 외부표면의 온도차가 약 2.1배 큰 것으로 나타났다. 내화페인트 시험체의 경우 2.81배와 1.69배로 나타나 오히려 콘크리트 중앙부와 강관 내부표면의 온도차가 약 1.7배 큰 것으로 나타났다. 이것은 내화피복재의 종류에 따른 특성차이로 사료된다. 한편 강관의 두께변화가 온도분포에 영향을 미치는 뚜렷한 경향은 발견할 수 없었다.

4.2 내화피복 두께변화에 따른 온도분포특성

내화피복의 두께 변화에 따른 영향을 알기 위해 내화뿔칠과 내화페인트로 피복된 강관 두께 6mm 시험체를 대상으로 피복 두께 변화에 따른 위치별 온도분포를 각각 표 14, 그림 8 및 그림 9에 나타내었다. 표와 그림에서 피복두께 0mm를 가지는 무내화피복 시험체결과는 선행연구(2010, 윤성기 외)의 결과이며, 위치별로 콘크리트 중앙부, 강관 내부, 그리고 강재외부 모두 내화뿔칠 두께가 두꺼울수록 온도에 대한 저항이 높게 나타났다. 그림 8은 내화뿔칠두께 20mm, 30mm, 40mm를 가지는 F-RT60S1, S2, S3 시험체의 위치별로 피복두께에 따른 온도분포의 결과이다. 표 14는 피복두께 변화에 따른 온도분포를 콘크리트 중앙부와 강관 외부표면을 대상으로 무내화피복 시험체와 비교한 표이다.

그림 8(a)와 표 14로부터 무내화피복의 경우에 비해 콘크리트 중앙부에서는 가열시간 120분 뿔칠20mm인 시험체인 경우 최소 2.43배, 가열시간 60분 뿔칠40mm인 시험체가 최대 4.07배의 온도저항능력을 보였다. 마찬가지로 강재외부에서의 온도저항능력은 가열시간 150분 뿔칠20mm인 시험체인 경우 최소 2.63배, 가열시간 90분 뿔칠40mm인 시험체가 최대 7.22배로 나타났다.

표 14. 내화피복 두께변화에 따른 위치별 온도분포 (단위: °C)

위치	가열 시간 (분)	내화뿔칠 두께(mm)				내화페인트 두께(mm)		
		0	20	30	40	0	0.85	3.35
콘크리트 중앙부	30	85.8	23.4	24.2	22.1	85.8	51.5	22.7
	60	176.3	65.5	57.5	43.3	176.3	132.9	53.1
	90	246.5	87.4	81.2	76.1	246.5	164.3	82.5
	120	346.1	142.5	109.6	94.2	346.1	-	92.5
	150	472.0	172.7	178.5	145.5	472.0	-	-
강관 외부 표면 온도	30	231.7	47.0	35.6	37.9	231.7	189.7	160.6
	60	479.7	90.5	83.9	76.1	479.7	394.5	314.4
	90	680.4	169.4	98.6	94.2	680.4	559.1	443.9
	120	832.2	269.0	185.2	126.1	832.2	-	687.5
	150	935.9	355.4	273.1	212.5	935.9	-	-

그림 9는 내화페인트 두께 0.85mm, 3.35mm를 가진 F-RT60P1, P2 시험체를 위치별로 무내화피복 시험체와 비교를 한 것이다. 전기로온도와 가열시간이 동일한 조건에서 콘크리트 중앙부의 온도는 가열시간 60분 기준으로 무내화 176°C, 피복두께 0.85mm인 경우 132.9°C, 3.35mm인 경우 53.1°C로 나타나 내화페인트피복이 무내화피복에 비해 온도저항능력이 피복두께 0.85mm인 경우는 1.33배, 3.35mm인 경우는 3.32배정도 높은 것으로 나타났다. 강관 외부표면은 가열시간 60분 기준으로 무내화 시험체인 경우는 479.7°C, 두께 0.85mm는 395.6°C, 3.35mm는 314.4°C로 나타나 내화페인트의 온도에 대한 저항능력이 무내화피복에 비해 두께 0.85mm의 경우 1.22배, 두께 3.35mm는 1.53배 높은 것으로 나타났다.

4.3 내화피복에 따른 축변위

3.3절의 축변위 실험결과인 표 9~표 11을 이용하여 강관 두께 6mm인 내화뿔칠 시험체의 피복두께와 가열시간에 따른 축변위를 그림 10(a)과 같이 나타냈고, 강관의 두께와 가열시간에 따른 축변위관계 그래프를 그림 10(b)로 나타내었다.

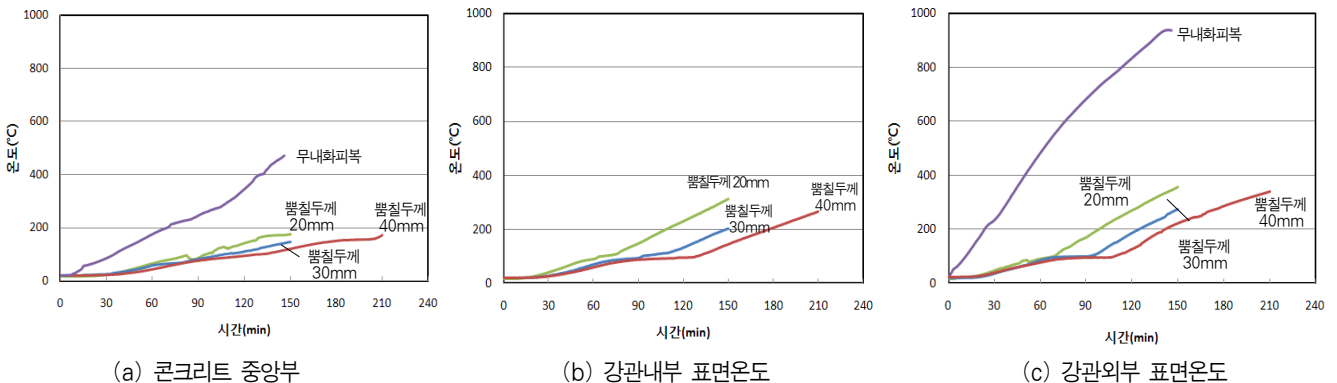


그림 8. 강관두께 6mm인 내화뿔칠 시험체의 온도분포

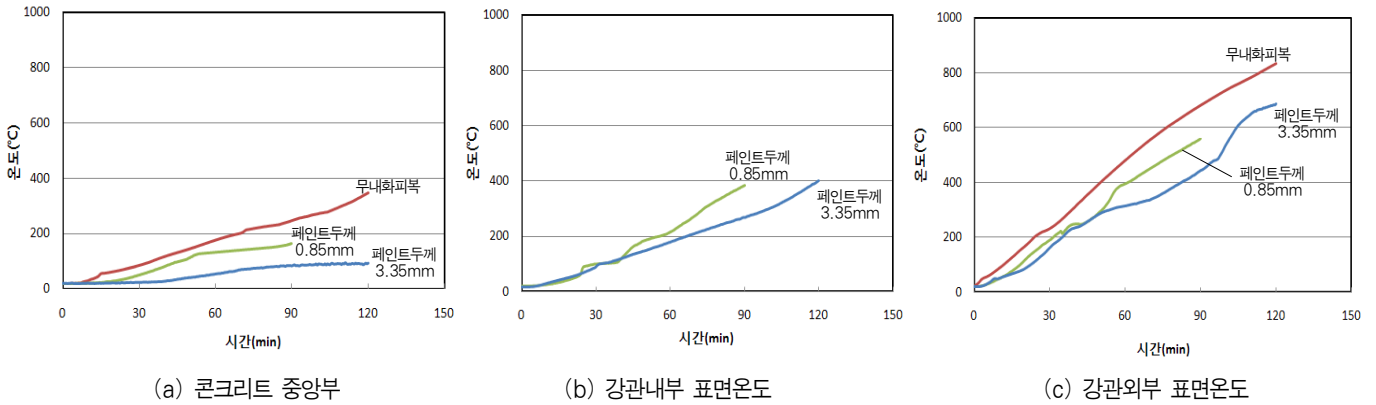
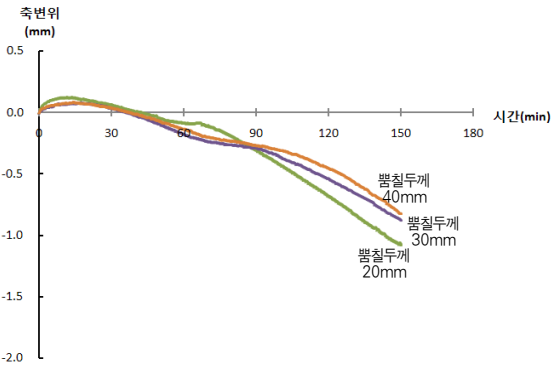


그림 9. 강관두께 6mm인 내화페인트 시험체의 온도분포

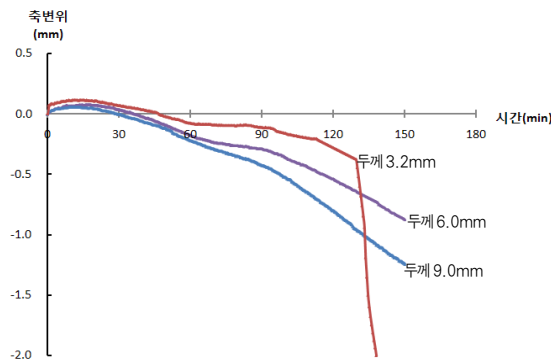
그림 10(a)에서는 강관 두께 6mm인 내화뿔칠 시험체의 피복두께를 변화시킨 결과 시간경과에 따라 일부 차이는 있으나 피복두께가 두꺼울수록 축변위는 작게 나타났다. 또한 F-RT60S1 시험체는 전기로온도 480°C인 가열시간 43분, F-RT60S2는 전기로온도 422.9°C인 37분, F-RT60S3는 전기로온도 433.6°C인 39분에서 부재수축이 발생하는 것으로 나타났다.

그림 10(b)는 강관의 두께를 변화시킨 경우로, 시간경과에 따라 강관두께가 얇을수록 축변위는 작게 나타났다. 또한 가열 시작 후 팽창된 시험체는 F-RT32S2은 전기로온도 527.1°C인 47분에서, F-RT60S2는 전기로온도 422.9°C인 37분에서, F-RT90S2는 전기로온도 347.6°C인 31분에 부재에 수축이 발생하는 것으로 나타났다.

본 실험에서 축변위는 시험체의 길이가 동일하지만 시험체별 재하하중이 다르고, 피복의 종류와 두께가 다르기 때문에 비교 대상에 따라 차이가 있다.



(a) 뿔칠두께변화에 따른 축변위



(b) 강관두께변화에 따른 축변위
그림 10. 내화뿔칠 시험체의 축변위

4.4 내화피복종류의 내화성능

내화피복종류에 따라 내화뿔칠된 시험체별로 뿔칠두께 20mm이상(1시간 내화)은 S1시험체, 30mm이상(2시간 내화)은 S2시험체, 40mm이상(3시간 내화)은 S3시험체로 하고 마찬가지로 내화페인트의 피복도막두께 0.85 mm이상(1시간 내화)은 P1시험체, 도막두께 3.35mm이상(2시간 내화)은 P2시험체로 하였다. 내화성능의 평가방법은 내화피복의 두께와 종류에 따라 목표내화시간인 1시간, 2시간, 3시간일 때 시험체 단면(콘크리트 중앙부, 강재 내부표면 및 외부표면)에서의 온도분포를 비교하여 온도상승이 적게 발생한 시험체의 내화성능이 우수한 것으로 평가한다.

내화뿔칠된 시험체와 내화페인트의 시험체를 대상으로 내화피복된 부분의 내화특성을 알기 위해, 가열시간에 따른 전기로 내부온도분포와 강관외부표면의 온도분포와의 차이값의 평균값관계를 나타내면 각각 그림 11과 표 15와 같다.

그림 11에서 피복부분의 내화성능은 내화페인트보다 내화뿔칠의 경우가 월등히 높게 나타났으며, P1, P2, S1, S2, S3 시험체의 순으로 성능이 우수함을 알 수 있다.

표 15의 내화피복부분의 온도변화 효과는 시험체 모두 내화피복두께가 두꺼울수록 내화피복부분의 내화성능이 우수함을

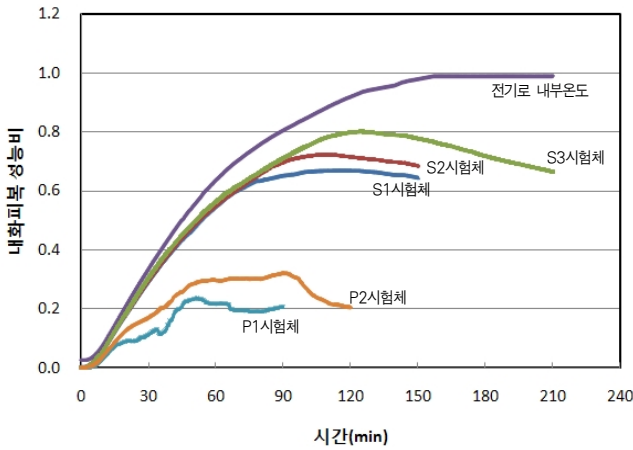


그림 11. 각 시험체 내화피복부분의 내화성능

표 15. 내화피복부분의 온도변화 효과 (단위: °C)

시간 (분)	전기로 내부 (A)	내화뿔철						내화페인트			
		S1 시험체 (B)	B/A	S2 시험체 (C)	C/A	S3 시험체 (D)	D/A	P1 시험체 (E)	E/A	P2 시험체 (F)	F/A
0	21.7	2.8	0.13	2.4	0.11	2.6	0.12	0.7	0.03	1.3	0.06
30	328.8	292.7	0.89	295.4	0.90	304.3	0.93	114.3	0.35	170.9	0.52
60	622.1	547.0	0.88	550.0	0.88	563.4	0.91	217.5	0.35	297.3	0.48
90	789.15	652.3	0.83	696.9	0.88	710.9	0.90	208.4	0.26	320.8	0.41
120	881.45	669.5	0.76	716.2	0.81	798.8	0.91	-	-	205.0	0.23
150	976.4	645.4	0.66	685.6	0.70	777.5	0.79	-	-	-	-
180	988.8	-	-	-	-	718.4	0.73	-	-	-	-
210	988.8	-	-	-	-	665.0	0.67	-	-	-	-

보였으며, 최대 온도효과는 내화뿔철인 경우 가열시간 120분 전후일 때, 그리고 내화페인트의 경우 P1, P2시험체는 각각 60분, 90분일 때 나타났다. 특히 가열시간 60분을 기준으로 내화뿔철인 경우 S1시험체는 평균 547.0°C, S2와 S3시험체는 각각 716.2°C, 718.5°C 온도변화 효과를 보였으며, 내화페인트의 경우 가열시간 60분 기준으로 P1시험체는 평균 217.5°C, 가열시간 120분을 기준으로 P2시험체는 205.0°C 정도의 효과가 나타났다.

내화뿔철된 시험체가 내화페인트된 시험체에 비해 가열시간 60분, 120분 기준으로 각각 2.51배, 3.52배 정도의 내화피복 성능이 우수하게 나타났다. 또한, 내화피복부분의 내화성능은 전기로 내부 평균온도기준으로 내화뿔철인 경우 약 66~93%, 내화페인트의 경우 약 23~52%범위의 성능을 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 내화 피복된 CFT기둥 단면 내부의 온도분포 상태를 알아보기 위하여 내화피복의 종류와 피복두께 및 강관의 두께를 변화시키고, 가열시간에 따른 기둥의 온도변화에 대한 재하가열실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 내화뿔철 피복두께 30mm, 내화페인트 피복두께 3.35mm 시험체를 대상으로 가열시간 120분인 경우의 위치별 온도분포는 내화뿔철 시험체의 경우 콘크리트 중앙부와 강관 내부표면의 온도차는 1.0~23.5°C, 강관내부 표면과 외부표면의 온도차는 21.5~52.3°C로 나타나 강관의 내부표면과 외부표면의 온도차가 콘크리트 중앙부와 강관 내부표면의 온도차에 비해 약 2.23배 큰 것으로 나타났다. 내화페인트 시험체의 경우 각각 132.4~191.2°C와 42.1~98.6°C로 나타나 오히려 콘크리트 중앙부와 강관 내부표면의 온도차가 약 1.94배 큰 것으로 나타났으며, 이는 내화피복재의 종류에 따른 특성차이로 사료된다.
- (2) 내화피복 두께변화에 따른 온도분포는 가열시간 60분을 기준으로 하여 내화뿔철 두께가 두꺼울수록 무내화시험체에 비해 콘크리트중앙부에서는 각각 2.69배, 3.07배, 4.07배, 강관외부는 각각 5.30배, 5.72배, 6.30배의 온도저항능력을 보였으며, 내화페인트 두께에 따라 콘크리트중앙부에서는 각각 1.33, 3.32배, 강관외부는 각각 1.22, 1.53배의 온도저항능력이 있는 것으로 나타났다.
- (3) 내화피복에 따른 측면위는 내화뿔철두께와 관계없이 비슷한 거동을 보였으며, 강관의 두께가 얇을수록 측면위는 작게 나타났다. 이는 콘크리트 단면이 작을수록 열전달이 작게 이루어지기 때문이다. 또한 측면위는 가열 후 일정한 시간 팽창이 발생 한 후 시험체별로 차이가 있으나 전기로 평균온도 약 430°C, 평균 가열시간 40분경에 수축이 발생하기 시작하였다.
- (4) 내화피복부분의 내화성능은 전기로 내부 평균온도기준으로 내화뿔철인 경우 약 66~93%, 내화페인트의 경우 약 23~52%범위의 성능을 보였으며, 내화뿔철된 시험체가 내화페인트된 시험체에 비해 가열 1시간, 가열 2시간 기준으로 각각 2.51배, 3.52배 정도의 내화피복 성능이 우수하게 나타났다.

향후 CFT기둥의 내화성능에 영향을 미치는 재료들의 열전도율, 비열 등을 고려한 열응력 해석과정을 통해 내화피복을 고려한 CFT기둥의 온도분포특성과 내화구조성능을 파악하는 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

국토해양부고시(2008) 내화구조의 인정 및 관리기준-내화구조의 성능기준, 제 2008-154호.

김규용, 김영선, 이태규, 강선중, 김무한(2008) 고강도콘크리트를 충전한 CFT기둥의 내화성능평가에 관한 실험적 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 대한건축학회, 제24권, 제8호, pp.147-154.

대한건축학회(2009) 건축구조기준 및 해설, 기문당.

류재용, 박수희, 한희철, 민병렬, 최성모(2007) 무피복 각형 CFT기둥 내화성능에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회 학술발표대회논문집, 한국강구조학회, pp.558-563.

박수희, 류재용, 정경수, 최성모(2007) 일정축력을 받는 콘크리트충전 각형 강관기둥의 내화성능평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제19권, 제6호, pp.703-714.

박영희(2001) 가열발포형 유기계 내화도료의 내화특성, RIST연구논문, 제15권 제2호, pp.206-209.

윤성기, 김해수(2010) 축하중을 받는 내화피복 CFT기둥의 온도 분포 특성, 한국구조물진단학회 논문집, 한국구조물진단학회, 제14권, 제4호, pp.78-85.

한국표준협회(2005) KSF 2257-1, 건축부재의 내화시험방법-일반요구사항.

한국표준협회(2006) KSF 2257-7, 건축부재의 내화시험방법-기둥내화성능.

Kodur, V.K.R. and Mackinnon, D.H. (2010) Design of concrete filled hollow structural steel columns for fire endurance, *Engineering Journal*, first quarter, pp.13-24.

(접수일자 : 2010. 9. 24/ 심사일 2010. 10. 4/
게재확정일 2010. 10. 12)