내화뿔칠된 콘크리트 충전 각형강관기둥의 내화성능

Fire Resistance Performance of Concrete Filled Square Steel Tube Columns with Fire Spray Protection

김해수* · 강 종**
Kim, Hae Soo · Kang, Jong

Abstract

This study was carried out to compare with existing experimental results and to verify reliability on heat transfer analysis using parameters such as steel thickness and heating time in ABAQUS for evaluation of temperature distribution and fire protection performance according to cross-section location of concrete filled square steel tube column with fire spray protection when fire occurred. As a result, we noticed that the difference of temperature distribution for cross-section location was not so great and the change of steel thickness did not affect temperature distribution.

Key words : Concrete Filled Square Steel Tube Column, Fire Spray Protection, Temperature Distribution, Transient Heat Transfer Analysis

요 지

본 연구는 화재 발생시 내화뿔칠된 콘크리트 충전 각형강관기둥의 단면위치별 온도분포와 내화성능을 평가하기 위하여 강관 두께 및 가열시간을 변수로 하여 ABAQUS를 이용한 열전달해석을 수행하여 신뢰성을 검증하고 기존의 실험결과와 비교분석하였다. 그 결과 단면위치별로 온도분포의 차이가 크지 않음을 알 수 있었으며, 강관두께의 변화는 온도분포에는 별다른 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 각형강관기둥, 내화뿔칠, 온도분포, 열전달해석

1. 서 론

최근에 건축물의 고층화, 대형화에 따라 강재와 콘크리트 합성구조의 형태로 단면의 증가를 최소화하면서 높은 내화성능과 하중 저항능력 및 시공성을 보유한 콘크리트를 충전한 강관(CFT, concrete filled steel tube)구조가 많이 증가하고 있다. 화재발생시 CFT기둥은 콘크리트가 강재를 피복하고 있는 일반적인 SRC기둥과는 달리 강재의 표면이 고열에 직접 노출되기 때문에 화재에 노출된 무내화 CFT기둥의 내화성능을 향상시키고, 건축물의 안전성을 확보하기 위한 방안으로 CFT기둥에 대해 내화피복을 한다. 특히 하중이 작용하고 있는 기둥에 화재가 발생했을 때 내화피복의 유무에 따라 단면 내의 온도분포, 내화성능 및 부재의 거동은 분명한 차이가 있다. 그럼에도 불구하고 기존의 많은 연구는 내화피복의 영향을 고려하지 않고 무내화 CFT기둥의 내화구조 인정에만 주목하여 왔다. 하지만 현재도 계속해서 많은 CFT구조 건축물에서 기둥부재의 내화피복은 일반적으로 행하고 있어 앞으

로도 CFT기둥의 내화피복에 따른 온도분포 특성과 내화성능의 평가가 필요하다.

본 연구는 내화뿔칠 30 mm된 콘크리트 충전 각형강관기둥을 대상으로 기존의 내화실험결과(김해수, 2010)와 ABAQUS 프로그램을 이용한 열전달 해석을통하여 강관두께에 따른 단면위치별 온도분포를 비교분석함으로써 CFT각형강관기둥의 내화성능을 평가하는 것을 목적으로 한다.

2. 내화뿔칠 CFT기둥의 열적특성

2.1 강재 및 콘크리트의 열적특성

본 연구에서는 국내 CFT구조의 내화성능을 평가하기 위하여 재료의 열적특성은 이전의 국내외 연구에서 실험 및 해석 연구를 통하여 국내 CFT구조의 내화성능 및 화재시 구조거동과 비교적 정확하게 예측된 Eurocode 4(EC4, 1994)를 적용하였다. 온도변화에 따른 강재 및 콘크리트의 열적특성치는 표 1, 표 2와 같다.

*정회원 · 동의과학대학교 건축과 교수(E-mail: khs3108@dit.ac.kr)
**정회원 · 동명대학교 건축대학 건축공학과 교수(교신저자)

표 1. 온도변화에 따른 강재의 열적 특성

특성	산정 방법	범 위(°C)
밀도 (kg/m ³)	7850	.
비열 (J/kgK)	$C_s = 425 + 0.773T - 1.69 \times 10^{-3}T^2 + 2.22 \times 10^{-6}T^3$	$20 \leq T \leq 600$
	$C_s = 666 - \left(\frac{13002}{T-738} \right)$	$100 < T \leq 900$
	$C_s = 545 + \left(\frac{17820}{T-731} \right)$	$735 < T \leq 900$
	$C_s = 650$	$900 < T \leq 1200$
열전도율 (W/mK)	$k_s = 54 - 3.33 \times 10^{-2}T$	$20 \leq T \leq 800$
	$k_s = 27.3$	$800 < T \leq 1200$

표 2. 온도변화에 따른 콘크리트의 열적 특성

특성	산정 방법	범 위(°C)
밀도 (kg/m ³)	$\rho_0 = \rho(20^\circ\text{C}) = 2,300$	$20 \leq T \leq 115$
	$\rho = \rho_0 \cdot 1 - 0.02 \left(\frac{T-115}{85} \right)$	$115 < T \leq 200$
	$\rho = \rho_0 \cdot 0.98 - 0.03 \left(\frac{T-200}{200} \right)$	$200 < T \leq 400$
	$\rho = \rho_0 \cdot 0.95 - 0.07 \left(\frac{T-400}{800} \right)$	$400 < T \leq 1200$
비열 (J/kgK)	$C_c = 900$	$20 \leq T \leq 100$
	$C_c = 900 + (T-100)$	$100 < T \leq 200$
	$C_c = 100 + \left(\frac{T-200}{2} \right)$	$200 < T \leq 400$
	$C_c = 1,100$	$400 < T \leq 1200$
열전도율 (W/mK)	$k_c = 2 - 0.2451 \left(\frac{T}{100} \right) + 0.0107 \left(\frac{T}{100} \right)^2$	$20 \leq T \leq 1200$

2.2 내화피복재의 열적 특성

내화피복재의 열전도율, 비열, 밀도 등 열적 특성치는 실제 내화기준에 필요한 사항이 아니므로 제조회사에서도 관련 자료가 없다. 따라서 본 연구에서는 관련문헌(한미피슨스, 2002; 한국건설기술연구원, 2005; 신태송, 2009)을 참조하여 내화피복재의 열전도율, 밀도, 비열 및 부착강도를 추정한다.

특히 내화뿔칠 피복재의 열전도율, 밀도 및 부착강도는 주원료인 질석, 석고, 석고플라스터, 펄라이트 및 시멘트의 혼합비율에 따라 달라진다. 무기질 재료를 사용한 내화뿔칠 피복재의 열적특성치는 표 3과 같으며, 보드피복재(L사, 인케이스먼트)의 열전도율은 0.14 k/m·h·°C, 밀도는 800, 비열은 1,088J/K이다.

표 3. 내화뿔칠 피복재의 열적 특성치

비열 (J/kg·K)	열전도율 (kcal/m·h·°C)	밀도 (kg/m ³)
1,130~1,200	0.032~0.056	260~340

3. CFT 각형기둥의 열전달해석

3.1 유한요소모델링

내화뿔칠된 CFT기둥의 열전달 해석(heat transfer analysis)은 기둥의 4면이 화재에 동일하게 노출되어 있다는 가정하에 해석요소를 선정하여 범용 유한요소프로그램인 ABAQUS/CAE(2005)를 이용하여 모델링을 한 후 해석을 수행하였다. 온도분포는 그림 1의 표준 시간-가열온도 곡선(KS F 2257-1)(한국표준협회, 2005)을 적용하고, 초기온도는 20로 하였다.

또한, 열전달 표면에서의 열전달계수는 내연적 시간 적분법(implicit time integration)(이영환, 2005)을 이용한 비정상상태를 고려하여 수행하였다.

그림 2와 같이 해석요소는 8절점 열전달 해석요소(DC3D8)로서 강재, 콘크리트 및 내화 뿔칠재 등의 재료를 구성하는 요소이며, 각 재료들의 연결은 병합(merge)기능을 이용하여 모델링하였다.

ABAQUS를 이용한 내화피복 CFT기둥의 모델링 절차는 재료의 열적 특성치(thermal properties), 대류 열전달계수(film coefficient), 사전정의 영역(predefined field)의 세 단계로 분류할 수 있다.

내화피복 CFT기둥을 구성하는 강재와 콘크리트의 열적 특성치는 특성치는 비열, 열전도율, 밀도 등의 정의로, EC4에서 제시한 표 1~표 2의 값을 적용하였고, 내화뿔칠재의 열적 특성치는 온도변화에 따른 특성치가 없어 표 3의 값을 적용하여 단위는 ABAQUS프로그램에 맞게 변환하여 입력하였다.

대류 열전달계수는 레이놀드 정수를 이용한 수식으로 도출

그림 1. 표준 시간-가열온도 곡선

그림 2. 열전달 해석요소(DC3D8 요소)

그림 3. 해석모델의 형상과 요소분할도

된 값으로, 본 해석에서는 강제 대류현상과 기체의 경우를 적용하여 2.5×10^{-6} 을 적용하였다.

사전정의 영역은 ABAQUS에서 선행 해석결과를 이용하여 다른 해석을 수행할 경우에 사용하는 도구(tool)로, 본 해석에서는 초기온도를 상온인 20°C를 절대온도로 변환하여 입력하였다.

이상과 같은 ABAQUS 프로그램을 이용하여 열전달 해석을 위한 해석요소의 정의와 자료의 입력과정을 통하여 모델링된 내화피복 CFT기둥의 해석모델의 형상과 요소분할도는 그림 3과 같다.

3.2 내화뿔철H형강모델의 열전달해석 및 검증

내화피복이 적용된 H형강 모델은 내화뿔철 두께 12 mm와 27 mm 두 종류를 대상으로 기존의 연구결과[5]와 ABAQUS를 이용한 해석결과를 비교함으로써 열전달 해석의 신뢰성을 검증하였다.

적용된 내화뿔철재의 열적 특성치(신태송, 2009)는 표 4와

표 4. 내화뿔철재의 열적 특성치

열전도율 (W/mK)	밀도 (kg/m ³)	비열 (J/kgK)
0.040	330	1,200

(a) 뿔철 두께 12mm인 경우

(b) 뿔철 두께 27mm인 경우

그림 4. 내화뿔철 모델 단면의 온도 스펙트럼

그림 5. 내화뿔철 모델의 시간-온도분포

같고, 온도분포는 그림 1의 표준 시간-가열온도 곡선을 적용하였다. 내화뿔철 두께 12 mm, 27 mm인 H형강 단면의 위치별 온도 스펙트럼 결과는 그림 4와 같이 나타나 기존의 연구결과와 일치하는 것으로 나타났으며, 여기서 단위는 절대온도(K)를 의미한다.

내화뿔철 모델의 시간에 따른 온도분포의 기존연구결과와 해석결과는 그림 5와 같다.

내화뿔철 두께를 변수로 하여 두 모델의 온도를 비교해 보면, 기존연구에서는 뿔철두께 12 mm의 경우 가열 1시간에 281°C에 도달하였고, 뿔철두께 27 mm의 경우 가열 2시간에 263°C에 도달하였다. 한편 해석결과는 뿔철두께 12 mm의 경우는 가열 1시간에 289.9°C, 27 mm는 가열 2시간에 244.7°C에 도달하는 것으로 나타났다.

기존연구와 해석결과의 비교결과, 두께 12 mm의 경우 3.09%, 두께 27 mm의 경우 7.47%의 오차를 보여 내화뿔철 모델의 열전달 해석에 대한 신뢰성이 확보되었다고 볼 수 있다.

4. 기존의 실험결과와 해석결과의 비교분석

내화뿔철 30 mm된 CFT각형강관 기둥을 대상으로 기존의 내화실험결과(김해수, 2010)와 ABAQUS 프로그램을 이용한 열전달 해석을 통하여 강관두께별 단면위치별 온도분포를 비교분석하고, 무내화시험체와 비교한 내화뿔철피복부분의 내화성능을 평가한다.

4.1 해석모델

해석모델은 표 5와 같이 실험에서 적용된 강관두께에 따른

표 5. 해석모델표

모델명	단면형상 (mm)	강관 두께 (mm)	피복 종류	피복 두께 (mm)	내화 시간 (hr)
F-RT32S2	□-125×125×3.2	3.2	뿔철	30	2
F-RT60S2	□-125×125×6.0	6.0			
F-RT90S2	□-125×125×9.0	9.0			
F-RT60	□-125×125×6.0	6.0	무내화	0	-

(a) 무내화 시험체 (b) 내화뿔칠 시험체

그림 6. 시험체의 모델형상과 요소분할도

내화뿔칠 두께 30 mm (2시간내화)시험체 3종류와 선행연구 [9]의 무내화 시험체 1종류 등 총 4종류를 대상으로 ABAQUS를 이용하여 열전달해석을 실시하였다. 해석에 적용한 가열곡선은 실험결과와의 비교를 위해 실험에서 사용한 전기로의 내부 온도분포를 적용한다. 그림 6은 무내화 및 내화뿔칠 두께 30 mm CFT기둥 시험체의 모델형상과 요소분할도를 나타낸 것이다.

4.2 단면위치별 온도스펙트럼의 해석결과

단면위치는 기존의 내화실험의 열전대위치와 동일하게 그림 7과 같이 시험체 단면에서 콘크리트 중앙부(CH1), 강관 내부표면(CH2), 강관 외부표면(CH3) 및 가열로 내부(CH4)로 구분하였다.

그림 8은 무내화 모델과 피복두께가 동일한 내화뿔칠 CFT기둥 모델의 가열시간 120분일때의 단면위치별 온도 스펙트럼 분포를 나타낸 것으로, 내화뿔칠 모델은 시간이 경과 된 후에도 무내화 모델에 비해 고온부분의 온도분포가 강관부분

그림 7. CFT각형강관 단면의 열전대위치 (단위:mm)

그림 8. 가열 120분일때의 온도스펙트럼(단위:절대온도(K))

에 주로 분포되어 내화피복의 유무에 따라 온도분포가 큰 차이를 나타낼 수 있다.

4.3 실험결과와 해석결과와의 비교 분석

무내화 시험체인 F-RT60과 내화뿔칠 두께 30 mm 시험체인 F-RT32S2, F-RT60S2 및 F-RT90S2 모델을 대상으로 기존의 내화실험결과(김해수, 2010)와 열전달해석 결과를 단면의 위치별 온도분포를 비교 분석하였다.

4.3.1 무내화 시험체

무내화 시험체 F-RT60에 대한 단면의 위치별 온도분포에 관한 실험(김해수, 윤성기, 2010) 및 열전달해석 결과의 비교 결과는 표 6과 그림 9와 같다.

단면 위치별 온도분포를 비교한 결과, 콘크리트 중앙부에서는 실험결과가 해석결과보다 전반적으로 높은 온도분포를 나타냈으며, 강관표면에서는 온도차는 크지 않지만 오히려 해석결과가 실험결과보다 높은 온도분포를 나타냈다.

가열시간에 따른 콘크리트 중앙부의 온도분포를 살펴보면, 가열시간 60분과 120분을 기준으로 실험결과값이 해석결과보다 각각 183%, 132%로 높게 나타났으며, 가열시간이 경과함에 따라 온도 차이는 점차 줄어들고 있음을 알 수 있었다.

한편 강관표면에서의 온도분포는 가열시간 60분과 120분을 기준으로 실험결과가 해석결과보다 각각 87%, 97%로 낮게 나타났으며, 온도차는 크지 않음을 알 수 있었고, 가열시간의 경과에 따라 두 결과가 거의 같은 값에 도달함을 알 수 있다.

4.3.2 내화뿔칠 시험체

강관두께 3.2 mm인 F-RT32S2 시험체모델의 실험 및 해석 결과는 표 7, 그림 10과 같다. 전반적인 온도분포는 가열

표 6. 무내화 시험체의 비교 (단위: °C)

시간 (분)	가열 곡선	실험결과		해석결과	
		중앙	강재 표면	중앙	강재 표면
0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
30	333.1	85.8	231.7	31.3	331.1
60	552.1	176.3	479.7	96.1	553.6
90	718.1	246.5	680.4	176.9	715.8
120	853.3	346.1	832.2	261.5	855.2
146	949.0	472.0	935.9	327.7	942.5

(a) 콘크리트 중앙부

(b) 강관 표면

그림 9. 무내화 시험체 모델의 온도분포

표 7. F-RT32S2 시험체 모델의 비교(단위: °C)

시간 (분)	가열 곡선	실험결과			해석결과		
		중앙	내부 표면	외부 표면	중앙	내부 표면	외부 표면
0	22.1	17.2	17.8	17.6	17.2	17.2	17.2
30	337.0	22.1	28.3	47.1	17.4	28.3	40.8
60	635.8	57.6	75.4	94.6	23.1	72.3	105.5
90	803.8	96.0	106.4	123.6	43.0	126.02	171.5
120	917.3	130.7	154.1	238.2	76.4	183.6	237.4
150	976.4	165.1	226.7	331.7	115.0	237.6	296.4

(a) 콘크리트 중앙부

(b) 강관 내부표면

(c) 강관 외부표면

그림 10. F-RT32S2 내화뿔철모델의 온도분포

60분까지는 두 결과가 비슷한 온도상승을 나타내고 있으나 그 이후는 다른 양상을 보이고 있다.

콘크리트 중앙부의 온도는 가열 30분경과 후부터 실험결과가 해석결과보다 높게, 강관 표면은 60분~100분 사이 온도 정체구간에서는 해석결과보다 낮게 나타났고, 그 이후는 대체로 비슷한 온도분포를 나타내고 있다. 이것은 실험결과는 가열 60~120분 구간에서 피복재의 내화성능으로 인하여 온도 상승이 지연된 결과로 판단된다.

강관두께 6.0 mm인 F-RT60S2 시험체모델의 단면 위치별 온도분포에 대한 실험 및 해석 결과는 표 8, 그림 11과 같다.

시험체의 전반적인 온도분포는 가열 60분까지는 실험결과와 해석결과가 비슷한 온도상승을 나타내고 있으나 그 이후는 온도상승이 다른 양상을 보이고 있다.

가열시간에 따른 콘크리트 중앙부의 온도는 가열 30분경과 후부터 실험 종료까지 실험결과가 해석결과보다 높게 나타났고, 강관 표면은 60분~100분 사이 온도정체 구간 이후에도 실험결과가 해석결과보다 낮은 온도분포를 나타내고 있으며, 특히 강관 외부표면은 120분경과 이후에도 여전히 실험결과가 해석결과보다 낮은 온도분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.

강관두께 9.0 mm인 F-RT90S2 시험체 모델의 단면 위치별

내화뿔철된 콘크리트 충전 각형강관기둥의 내화성능

표 8. F-RT60S2 시험체 모델의 비교(단위: °C)

시간 (분)	가열 곡선	실험결과			해석결과		
		중앙	내부 표면	외부 표면	중앙	내부 표면	외부 표면
0	22.1	19.7	18.5	19.1	20.3	20.3	20.3
30	337.0	24.2	26.0	35.6	20.5	30.0	43.0
60	635.8	57.5	68.9	83.9	26.5	67.9	102.3
90	803.8	81.2	93.0	98.6	47.4	119.3	168.7
120	917.3	109.6	131.9	185.2	80.1	171.8	231.6
150	976.4	145.5	203.3	273.1	116.9	219.4	283.3

(a) 콘크리트 중앙부

(b) 강관 내부표면

(c) 강관 외부표면

그림 11. F-RT60S2 시험체강관두께 6.0 mm 내화뿔철 시험체의 온도분포

온도분포에 관한 실험 및 해석 결과는 표 9와 그림 12와 같다.

콘크리트 중앙부의 온도분포는 가열 120분까지는 강관두께 3.2 mm, 6.0 mm 모델과 유사한 온도분포를 나타내고 있으나, 가열 120분 이후에는 두 결과의 온도차가 줄어들고 있음을 알 수 있다. 강관표면은 80~110분 사이 온도 정체구간이 있고, 그 이후의 온도분포는 실험결과와 해석결과가 대체로 F-RT32S2 모델과 유사하게 나타났다.

F-RT32S2, F-RT60S2 및 F-RT90S2모델을 대상으로 내화 피복 두께를 30 mm로 동일하게 하고 강관두께를 변화시킨 세 종류의 시험체에 대한 실험결과와 해석결과를 비교 분석한 결과, 콘크리트 중앙부는 강관두께가 두꺼울수록 실험결과가 해석결과보다 온도가 높게 나타났으며, 특히 실험결과는 시간 경과에 따라 온도가 낮게, 해석결과는 오히려 온도가 높게 나타났다. 강관표면은 강관의 두께가 두꺼울수록 내부외부가 동일하게 실험결과가 해석결과보다 대체로 온도가 낮게 나타났으며, 가열시간의 경과에 따라 온도가 늦게 상승하는 것으로 나타났다.

또한, 표 7~표 9의 해석결과로부터 뿔철두께 30 mm 시험체에서 강관의 두께변화(3.2, 6.0, 9.0 mm)에 따른 콘크리트 중앙부, 강관 내부표면 및 외부표면에서 열전달해석결과, 강

표 9. F-RT90S2시험체 모델의 비교(단위: °C)

시간 (분)	가열 곡선	실험결과			해석결과		
		중앙	내부 표면	외부 표면	중앙	내부 표면	외부 표면
0	22.1	22.7	22.9	22.2	22.7	22.7	22.7
30	337.0	26.4	31.2	42.3	23.0	31.6	41.9
60	635.8	47.6	70.6	78.8	29.4	65.5	91.8
90	803.8	82.9	102.6	98.6	50.3	112.5	149.2
120	917.3	101.0	147.5	179.3	83.5	161.5	204.3
150	976.4	127.1	209.3	267.8	119.9	210.3	256.9

(a) 콘크리트 중앙부

(b) 강관 내부표면

(c) 강관 외부표면

그림 12. F-RT90S2시험체 시험체의 온도분포

표 10. 강관두께6.0 mm모델의 해석결과(단위: °C)

시간 (분)	콘크리트 중앙부		강재 외부표면	
	F-RT60	F-RT60S2	F-RT60	F-RT60S2
60	96.1	26.5	553.6	102.3
120	261.5	80.1	855.2	231.6

관의 두께변화에 따른 단면위치별 온도차는 크지 않음을 알 수 있었다.

표 10은 강관두께 6.0 mm 모델인 무내화(F-RT60) 모델과 뿔철 30 mm(F-RT60S2) 모델의 해석결과를 비교한 것이다. 가열시간 60분을 기준으로 할 때 콘크리트 중앙부에서는 F-RT60 모델이 F-RT60S2 모델보다 3.63배, 강관외부 표면에서는 5.41배 높은 온도분포를 나타냈다. 또한 가열시간 120분을 기준으로 할 때 F-RT60 모델이 F-RT60S2 모델보다 콘크리트 중앙부에서는 3.26배, 강관외부 표면에서는 3.69배 높은 온도분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.

4.3.3 내화뿔철부분의 내화성능비

내화뿔철 두께 30 mm(내화 2시간)인 시험체의 실험결과(김해수, 2010)와 해석결과를 내화뿔철 피복부분의 내화성능비로 비교한 결과는 표 11과 같다. 표에서 실험결과와 해석결과

표 11. 내화뿔철부분 온도변화효과 비교(단위: °C)

시간 (분)	전기로 가열곡선 (A)	실험결과		해석결과		실험/ 해석
		S2시험체 (B)	B/A	S2-E모델 (C)	C/A	
30	337.0	295.4	0.90	295.2	0.88	1.023
60	635.8	550.0	0.88	536.0	0.84	1.048
90	803.8	696.9	0.88	640.7	0.80	1.100
120	917.3	716.2	0.81	692.9	0.76	1.066
150	976.4	685.6	0.70	697.6	0.71	0.986

각각 가열시간별 평균온도를 표시한다.

표 11에서 가열 60분일 때 내화피복 부분의 내화성능비는 실험결과값이 0.88, 해석결과가 0.84, 가열 120분일 때 실험결과값이 0.81, 해석결과값이 0.76으로 나타나 실험결과가 해석결과보다 60분일 때 1.048배, 120분일 때 1.066배로 크게 났다. 이것은 내화피복부분의 내화성능비에서 실험과 해석결과의 차이가 4.8~6.6%로 실험결과와 해석결과가 비슷한 결과를 나타내었다.

5. 결 론

본 연구는 화재 발생시 내화뿔철 CFT기둥 단면의 온도분포와 내화성능을 평가하기 위하여 내화뿔철의 유무, 강관두께 및 가열시간을 변수로 하여 열전달해석을 수행하여 기존의 실험결과와 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존연구에 적용된 내화피복 강재모델을 대상으로 ABAQUS를 이용한 열전달해석을 수행한 결과, 단면 위치별 온도분포 결과는 기존의 연구 결과에 비해 3.09~7.47% 정도의 오차를 보여 열전달해석의 신뢰성을 확인하였다.
- 2) 강관두께를 변수로 하여 동일한 내화피복 두께를 가진 열전달해석결과를 시험체결과와 비교한 결과, 단면위치별로 온도분포의 차이가 크지 않음을 알 수 있었다. 따라서 강관의 단면 크기가 동일한 경우 강관두께의 변화는 온도분포에는 별다른 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.
- 3) 전기로 가열곡선을 적용하여 시험체의 열전달해석을 수행한 결과, 내화성능비가 약 3~7% 정도의 오차를 보였다. 또한 기존 시험체를 통한 실험과 해석모델을 비교한 결과, 가열 60분과 120분을 기준으로 내화 피복부분의 내화성능비는 실험과 해석결과의 차이가 4.8~6.6%의 근소한 차이를 나타내었다.

참고문헌

- 김해수 (2010) 내화피복 종류에 따른 각형 CFT기둥의 온도분포에 관한 실험적 연구, **한국강구조학회논문집**, 제22권, 제6호, pp. 523-532.
- 김해수, 윤성기 (2010) 축하중을 받는 내화피복 CFT기둥의 온도분포 특성, **한국구조물진단학회논문집**, 제14권, 제4호, pp. 78-85.

이영환 (2005) 범용 선형 및 비선형 유한요소해석 프로그램 ABAQUS 소개, **전산구조공학지**, 제18권, 제2호, pp. 49-52.
 신태송 (2009) 국내 피복 철골기둥의 내화 성능 분석 및 평가, **한국강구조학회논문집**, 제21권, 제1호, pp. 27-35.
 한국건설기술연구원 (2008) **내화구조의 내구성평가 및 유지관리지침 개발**, 한국건설교통기술평가원.
 한국표준협회 (2005) KS F 2257-1: 건축부재의 내화시험방법-일반요구사항.
 한미파슨스 (2002) **철골내화피복재 검토서**.
 ABAQUS (2005) ABAQUS/CAE User's Manual Version6.5 : Vol-

umes-, Pawtucket, Rhode Island: Hibbit, Karlson & Sorenson, Inc.
 EC4 (1994) Eurocode 4 : Design of Composite Steel and Concrete Structures, ENV 1993-1-2: General Rules-Structural Fire Design, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

◎ 논문접수일 : 11년 10월 20일
 ◎ 심사의뢰일 : 11년 10월 21일
 ◎ 심사완료일 : 11년 10월 26일