

Corrugate-rib를 활용한 무내화피복 CFT공법의 구조 및 내화성능 확보

이동운
동서대학교 건축토목공학부

Procuring the Fire Resistance Performance and Structure of Non-Refractory Coating CFT with Using the Corrugate-rib

Dong-Oun Lee

Division of Architecture & Civil Engineering, Dongseo University

요약 본 논문은 강관과 콘크리트가 함께 축력에 저항하는 합리적인 콘크리트 강관구조형식에 대해 무피복상태에서 내화성능을 높이는 연구이다. 콘크리트 강관구조는 내부 콘크리트로 인한 열저항 성능이 매우 우수하지만, 국내에서는 일정시간 동안 내화성능을 확보하도록 규정하고 있는 내화구조시스템으로 피복처리가 되지 않는 상태에서는 활발하게 적용되지 못하고 있다. 따라서 콘크리트충전 강관구조 기둥의 구조성능을 향상시키기 위하여 강관 내측면에 부착하는 리브요소를 개발하고 그것의 효과적인 형상을 개발하는 연구로서 콘크리트 강관기둥 내측면에 Corrugated Rib를 부착하여 구조적 압축 및 좌굴 저항능력을 향상시키는 CFT 시스템을 개발하고자 한다. 이에 대한 연구 결과, 강관 내면 부착 리브의 적용으로 내화시 CFT 기둥의 내력상승에 의한 좌굴방지를 확인하였고, 내화성능기준 또한 만족하였다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 강재리브(Corrugate rib)구조 보강재를 활용한 CFT의 공법은 내화피복 없이 구조 및 내화성능을 만족시키는 것으로 판단된다. 향후 rib의 다양한 형태를 변수로 하는 연구와 공장생산에서 공정을 효율화 시키고, 경제성 있는 시스템으로 활용할 수 있도록 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Abstract The Concrete-Filled Tube (CFT) system was developed for its excellent structural performance, such as its good stiffness, stress and ductility, which is derived from the mechanical advantages of its composite structure. However, it is known that the flat type of reinforcing plates need stiffeners placed at a certain distance from each other to avoid buckling failure, which increases the cost accordingly. This paper investigates the contribution of the rib elements placed inside the steel tube for the purpose of increasing the bond strength between the steel and concrete and fire performance with no additional protection. The test results also demonstrate the effectiveness of the corrugated rib's shape against fire. The results of this study showed that the buckling prevention and fire resistance performance criteria were satisfied by the application of the inner surface attachment rib, due to the resulting increase in the strength of the CFT column. Therefore, it is considered that the CFT method using the corrugated rib structure reinforcement developed through this study satisfies the structural and fire resistance performance criteria without the need for a refractory coating. Future studies will be needed to make the process efficient and economical for factory production.

Keywords : Concrete-Filled in tube, Corrugate rib, Fire resistance performance, No protections, Structural performance

*Corresponding Author : Dong-Oun Lee(Dongseo Univ.)

Tel: +82-51-999-5724 email: ldu21@hanmail.net

Received June 29, 2017

Accepted November 3, 2017

Revised (1st September 28, 2017, 2nd October 25, 2017)

Published November 30, 2017

1. 서론

최근 대규모 공장 및 고층 건축물의 수요가 증가함에 따라 내부 공간 극대화 및 구조물의 내구성 향상이 부각되고 있다. 이에 축력 및 횡력과 내화저항에 강한 콘크리트 강관구조(Concrete-Fille in Tube, 이하 CFT)기둥설계가 증가하고 있다[1]. CFT 기둥은 강성을 지닌 강관에 콘크리트를 충전함에 따라 강관의 구속효과에 의해 충전된 콘크리트의 내력상승과 국부좌굴보강효과에 의한 부재내력의 증가 및 시공성 측면에서 뛰어난 성능을 발휘하는 구조시스템이다. 국토교통부에서는 ‘내화구조의 인정 및 관리기준’내의 내화성능구조 기준으로 모든 건물용도의 12층을 초과하는 고층건물의 기둥의 경우 3시간의 요구내화성능을 확보되어야 한다고 규정하고 있다[2]. 즉, 높은 축력비가 적용된 CFT 기둥은 중·저층 건물에서 2시간 이하의 내화성능을 확보하는 구조체에는 적용이 가능하나 고층에서 요구되는 3시간 내화성능을 만족시키기에는 어렵다. 또한, 기존 CFT공법의 내화성능을 만족하기 위한 방법으로 기둥 외부면에 내화뿔칠 피복과, 내화도료 및 보드피복 등을 시공을 하고 있어 공정을 단순화시키는 방안이 필요하다.

이에, 내화피복 없이 내화성능을 만족할 수 있고, 효율적으로 내력을 확보 할 수 있는 CFT 시스템이 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 축력에 강한 곡선형 강재 리브(Corrugate rib)보강재를 적용하여 구조적 압축 및 좌굴저항능력을 향상시킨 무내화피복 CFT공법을 개발하고자 한다.

2. CFT 개발 및 방법

2.1 강관 내면부착 보강재에 개발

2.1.1 기존 보강재의 고찰

현재 Table 1과 같이, 좌굴방지 및 내력증가 효과를 증진시키기 위해 평판, 절판 및 이중구조 등 여러 형태의 CFT 내측 보강재가 개발되었으며, 이러한 구조형태는 충분한 내력을 발휘하고, 콘크리트 매입에 따른 내화성능을 향상시킨다고 보고되고 있다[3,4].

본 연구의 Corrugate rib를 활용한 CFT공법은 곡선형 강재 리브를 제작하고 부착하기 위해 조립공법으로 공장 제작 해야 하며, 용접에 의한 접착도 추가공정에 포함되어 제작비 상승 및 경제성 부분에 단점도 발생한다. 이를

극복하기 위해서는 Fig. 1과 같이 건설로봇을 통한 자동화 생산 및 용접에 대한 추가 연구와 내화성능향상 연구를 지속적으로 발전시켜 단점이 되는 경제성 부분을 극복해야 한다.

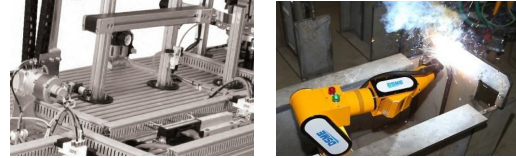

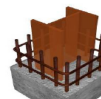


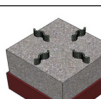


Fig. 1. Automatic production of corrugate rib and robot welding system

Table 1. Comparison of the column structural system specificity

Division	Figuration	Refractory coating	Factory production	Site process	Field construction
RC		construction	-	○	○
SRC		construction	□	△	△
S		construction	□	◎	○
CFT		onstruction	○	◎	◎
CFT with Using the Corrugate-rib		No construction	△	◎	○

◎ : Very good, ○ : Great, □ : usually, △ : deficiency

2.1.2 리브 형상의 적용

CFT강관 내부에 부착되는 Corrugated rib는 휨응력과 전단 및 좌굴저항 높은 구조이다. EN 1993-1-5와 DIN 18800 T1-3의 유럽 기준에 의한 설계로 Corrugated rib의 전단좌굴은 주름에 의한 높은 강성의 역할로 얇은 두께에도 상부구조의 무게를 견딜 수 있다. 유럽코드에 따라 주름의 형태는 리브형 설계를 통해 큰 전단력을 가지는 구조로 설계할 수 있다[5].

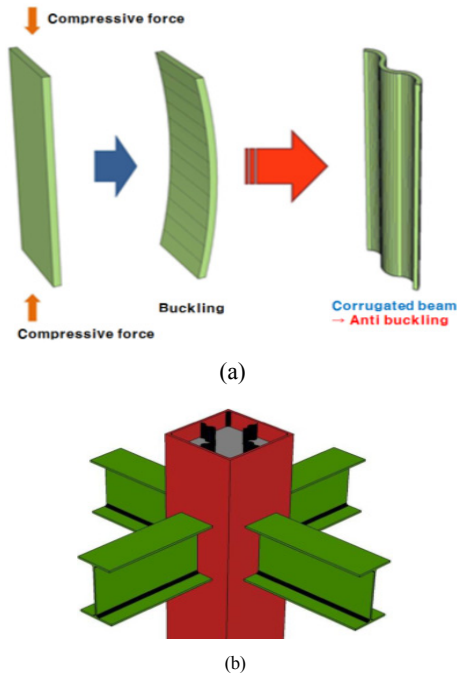


Fig. 2. Corrugated-rib figuration principle and application
(a) Figuration development of reinforcement rib
(b) CFT application of corrugated-rib

2.3 Rib보강 CFT기둥 시험체 내화성능시험

2.3.1 내화성능 실험계획

CFT 기둥 시험체의 제작을 위한 실험계획으로 Table 2와 같이 40 MPa급 콘크리트를 배합 설계하여 타설하였다. 실험측정사항으로는 굳지 않은 콘크리트에서는 슬럼프, 공기량 및 콘크리트 온도를 측정하는 것으로 계획하였고, 경화 콘크리트에서는 재하 내화시험에 대한 기둥부재의 온도이력을 측정하는 것으로 계획하였다. Fig. 3~4은 내화시험을 위한 시험체와 실제 강관 내부에 부착된 리브 및 조립상태를 나타낸 것이다.

Table 2. Concrete mix and fire resistance test

Items		levels
Mixture	Ready mixed concrete	· 20-40-500
	Application of paper-drain	· Apply · Not apply
Experiment	Fresh concrete	· Slump, air contents, temperature
	Hardened concrete	· A fire-resistance test (KS F 2257-1)

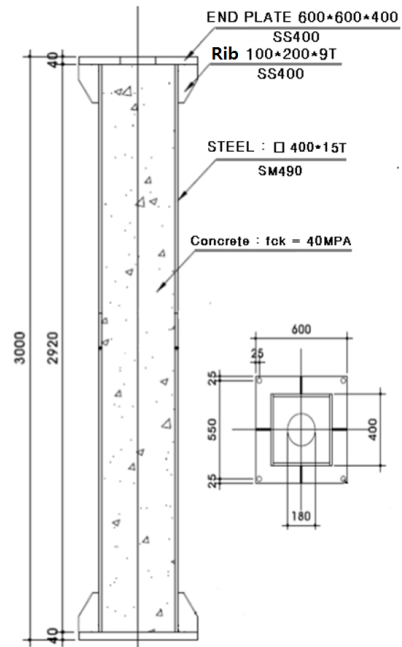


Fig. 3. CFT structure for fire resistance performance test

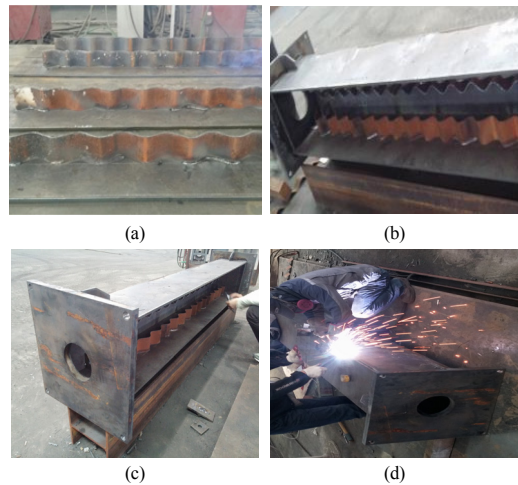


Fig. 4. CFT Column structure construction process
(a) Welding of Corrugated rib (b) 3-sided plate assembly
(c) Top surface mounting (d) 4-sided plate assembly

2.2.2 실험방법

Fig. 5는 제작된 CFT강관 내·외부 및 내화시험 기둥부재의 온도를 측정하기 위한 열전대 매설 및 계측기 연결모습을 나타낸 것이며, Fig. 6은 내화시험 모습을 나타낸 것이다. 기둥 시험체의 내화시험은 표준화조건에

노출시킨 내화시험방법(KS F 2257)에 따라 한국건설기술연구원 내화 실험실에서 실시하였으며, 고성능 콘크리트의 내화성을 만족하기 위한 설계로써, 0.1 %/Vol의 NY 섬유를 적용하였다. 내화로의 가열기(Actuator)의 최대 재하하중은 2 940 kN이지만, 장비의 안전관리를 위해 2 500 kN이하로 재하하중을 제한하였고, 고정압축하중을 재하한 상태에서 ISO-834 표준화재 가열곡선에 따라 180분간 내화시험을 진행하였다. 가열시간에 따른 시험체의 온도는 CFT강관외부(Ch1, 7, 15), 보강리브면(ch8~12)과 표면부 콘크리트(ch2~6, ch16~19) 코어부 콘크리트(ch13, 14)에 각각 K-Type 1 mm 열전대(이하 Thermocouple)를 설치하였고, 열전대는 기둥 중앙부로 길이방향으로 하부 끝단에서 1.5 m 지점의 단면에 설치하였다. 또한, 강관 외부와 깊이 방향으로 20 mm 간격으로 설치하여 콘크리트와 보강 리브의 깊이에 따른 온도변화를 확인하였다.

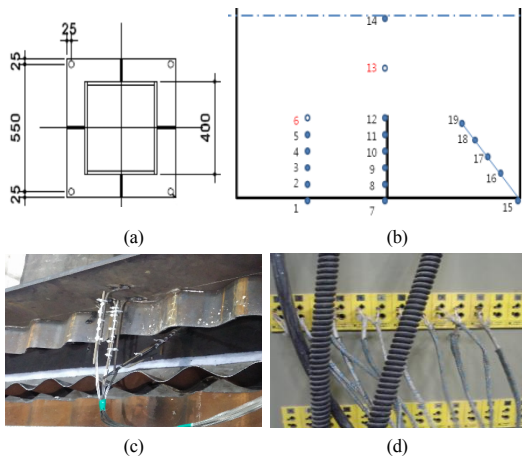


Fig. 5. Device installation process of CFT fire resistance test

(a) Sectional of CFT (b) Position of thermocouple
(c) Contract of sensor (d) Connect of data logger

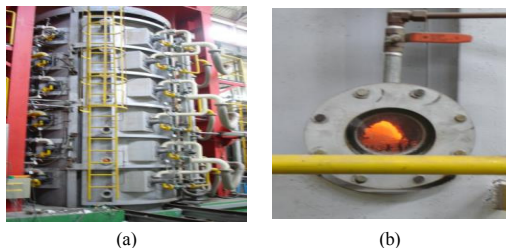


Fig. 6. Fire-resistance test
(a) Setting the test piece (b) A fire-resistance test view

3. 실험결과 및 분석

3.1 고성능 콘크리트의 기초적 제반물성

Table 3은 CFT 콘크리트의 시험결과를 나타낸 것이다. 먼저, 본 배합의 경우 560 mm의 슬럼프플로 결과치와 4.5 %의 공기량 측정치를 나타내어, 모두 목표 범위를 만족하는 것으로 나타났다. 재령별 압축강도의 경우는 전반적으로 재령이 증가할수록 강도값이 증가하는 경향을 나타내었고, 재령 28일에서 목표 설계기준강도 범위를 상회하는 결과치를 나타내었다.

Table 3. Test result of fresh concrete

Division	Experiment					
	Slump flow (mm)	Air contents (%)	temp (°C)	Compressive strength(MPa)		
				3 D	7 D	28 D
20-40-500	560	4.5	19.7	19.5	32.3	48.6

3.2 내화시험에 의한 시험체 온도이력검토

3.2.1 CFT 및 내부 콘크리트의 온도분포

Fig. 7은 개발 CFT기둥 시험체의 열전대의 위치별 온도를 나타낸 것이다. 콘크리트 중심부의 온도는 최대 120 °C 이하의 양호한 온도분포를 나타내었고, CFT기둥 외부(ch 1, 7, 15)의 경우 대부분 900 °C 이하로 가열온도 곡선과 유사한 경향을 나타내었다. CFT기둥 내부 콘크리트의 내화 1시간경과의 전반적인 온도는 최대 450 °C 의 온도범위를 나타내었고, 내화 3시간까지의 온도는 최대 630 °C 이하의 온도분포를 나타내었다. 표면부(CH1)에서는 모서리부(CH15)에 비해 낮은 온도이력을 나타낸 반면, rib 설치면(CH7)에서는 표면부에 비해 높은 온도분포를 나타내었는데, 이는 열전도율이 높은 강재의 rib가 콘크리트를 넓은 면적에서 접촉하고 있으므로 국부적인 온도상승이 있기 때문으로 판단된다. 화재 성능실험은 시험체를 무피복 상태로 KS F 2257-1(건축부재의 내화시험방법 일반요구사항)에서 제시하는 표준 시간-가열온도곡선과 재하를 동시에 실시하여 변형량 및 변형률을 측정하여 내화성을 검토하였다. 실험방법은 재하가열시험(초기 재하하중을 종료 시까지 유지하면서 가열함)으로 하였으며 재하하중은 CFT 기둥 시험체 공칭강도의 15%인 1,800 kN으로 하였다. 기둥 시험체의 가열은 KS F 2257-1에서 규정하고 있는 가열곡선에 따라 가열하였으며, 가열로는 KS F 2257-1에서 규정한 기둥가열로를 사용하였다. Fig. 8은 내화시험 시 재하에 대

한 변위량을 나타낸 것이다. 기존 문헌에 따르면 내화기 등의 허용최대변위는 40 mm이하로 규정하고 있다[4]. 이에, 본 개발 CFT기둥의 경우 초기에는 팽창에 의해 최대 15 mm이하의 수축이 발생되었으나, 50분 이후부터는 약간의 팽창과 3시간까지 파괴에 이르는 변형 또는 변형속도를 보이지 않아, 양호한 허용 변위값을 나타냈다. 이는 전술한 바와 같이 개발 CFT의 경우 기존 CFT 공법과 달리 내부 Corrugate-rib형의 보강재를 설치함에 따라 강관의 내력상승에 의해 내화시 재하하중에도 변형 없이 강관 내 리브의 성능이 확보된 것에 기인한 것으로 사료된다.

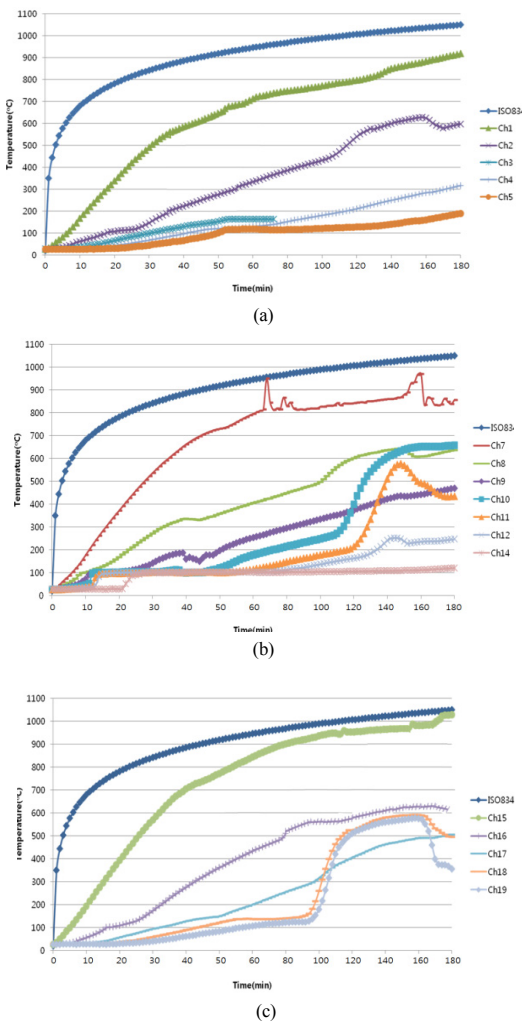


Fig. 7. Temperature of test piece for KS F 2257-1
 (a) Temperature of test piece(ch1~ch6)
 (b) Temperature of test piece(ch7~ch14)
 (c) Temperature of test piece(ch15~ch19)

Table 4. Fire resistance experiment temperature data (Unit : °C)

Time (minutes)	ISO 834	In-Furnace temperature	Sensor number in steel pipe				
			Ch2	Ch7	Ch9	Ch12	Ch17
5	576	570	36	87	37	29	26
10	678	670	62	177	71	33	31
15	739	730	85	281	98	94	41
20	781	777	107	372	103	100	57
25	815	815	115	460	115	101	76
30	842	843	146	537	142	102	94
35	865	867	188	603	175	103	109
40	885	886	220	662	160	101	128
45	902	904	253	705	166	103	140
50	918	919	281	729	197	103	149
55	932	935	308	759	230	103	176
60	945	948	333	796	254	103	200
65	957	960	361	845	274	103	229
70	968	966	386	829	295	113	256
75	979	976	409	813	315	123	281
80	988	992	431	826	334	137	316
85	997	999	471	842	353	151	372
90	1006	1008	540	842	374	163	406
95	1014	1016	574	850	398	184	438
100	1022	1024	600	860	422	242	464
120	1029	1032	618	880	435	238	478
140	1036	1040	624	970	442	236	490
160	1043	1049	579	833	456	238	493
180	1049	1054	597	857	470	247	505

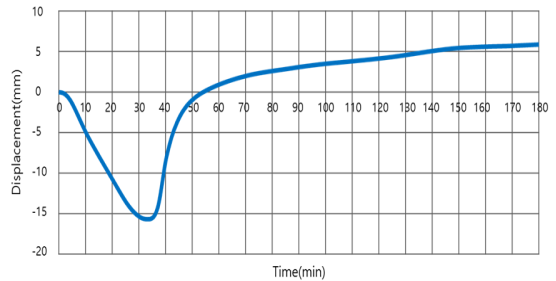


Fig. 8. Displacement to fire testing

3.3 재하하중에 따른 파괴모드

Fig. 9는 일반적인 CFT 기둥 시험체의 파괴모드를 비교한 것으로 강관의 국부좌굴이 관찰되지 않아, 리브 보강효과를 알 수 있다. 이는 개발된 CFT의 경우 내부에 rib형태의 보강으로 구조의 국부좌굴을 방지함에 기인한 것으로 판단된다. Fig. 10은 가열 후의 콘크리트 상태를 보여주는 것으로 사용된 콘크리트에서 폭발이 발생하지 않았음을 보여준다.

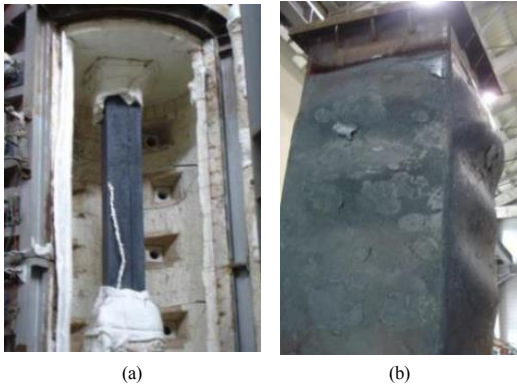


Fig. 9. Appearance of test piece after fire test
 (a) Used corrugated-rib
 (b) Not used corrugated-rib

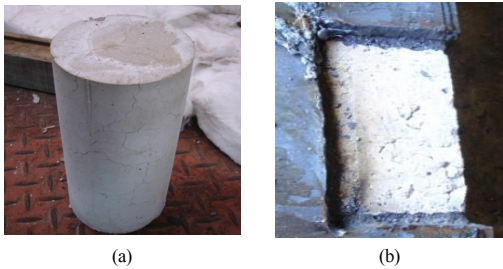


Fig. 10. Appearance of concrete after fire test
 (a) Concrete specimen in fire resistance laboratory
 (b) The concrete inside the steel pipe after 4 weeks of experiment

4. CFT 기둥 시험체의 열분포 해석

4.1 해석 개요

온도분포해석(Nonlinear transient heat flow analysis)을 위해 사용된 프로그램은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. 열전달해석 시 도입되는 열 $q(t)$ 는 식 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

여기서,

$$\Delta T_i = T_{i-1}, r_i^T = \frac{r_{i-1} + r_i}{2}, T_i^* = \frac{T_{i-1} + T_i}{2}$$

4.2 유한요소 모델링

Fig. 11은 시험체에 대한 유한요소(FE)모델링 개요를 나타낸 것이고, Table 5는 해석을 위한 입력데이터를 나타낸 것이다. 해석 대상은 400×400 mm의 CFT 단주 시험체로 대칭성을 고려하여 상, 하부를 분할하였다. 요소는 3D Solid 요소를 적용하였으며, 온도 하중은 *amplitude 명령어로 해석에 이용된 온도이력은 가열, 재하실험과 동일하게 설정하였으며, 초기 온도조건은 실험조건인 20℃로 설정하였다.

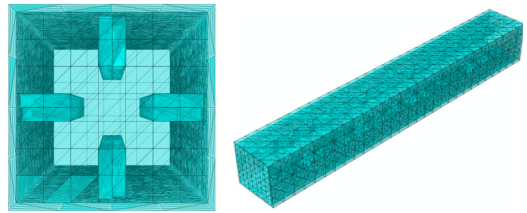


Fig. 11. Finite element modeling of CFT stub columns

Table 5. Concrete input coefficient for temperature analysis

Assortment	Input value
Size of specimen(mm)	400×400
thermal conductivity(J/min,mm,℃)	0.135
Convection property(W/m2℃)	1.34
capacitance(J/mm3℃)	2.3×10 ⁻³

4.3 CFT 기둥의 온도분포해석 결과

Fig. 12~14은 CFT 기둥의 화재에 의한 온도이력분포를 예측한 결과로서, ISO-834 표준화재곡선에 따라 가열 해석하였다. CFT 기둥 시험체에 대한 온도분포 해석을 실시한 결과 콘크리트 중심부 온도는 가열 시작 후 120분 경과시점에서 약 100℃까지 증가하는 것으로 나타났다. 표면부 온도는 약 1000℃까지 증가하는 것으로 나타나 중심부와 표면부 사이 온도차는 약 900℃로 예측되었다.

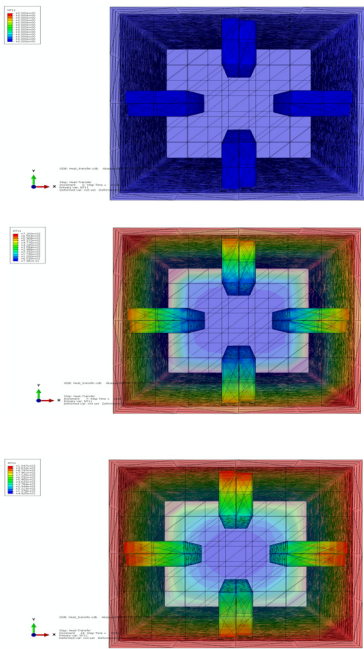


Fig. 12. Analysis of CFT Section inside columns temperature Profile during fire

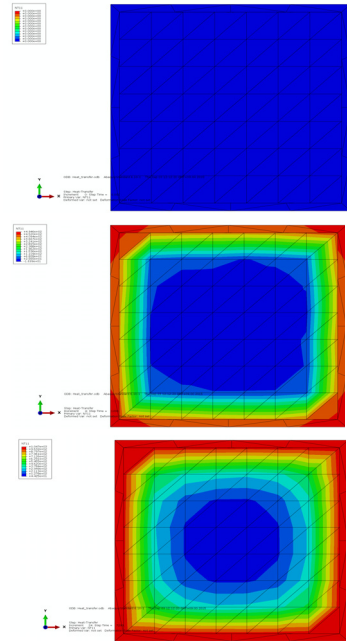


Fig. 14. Analysis of CFT stub columns temperature profile during fire

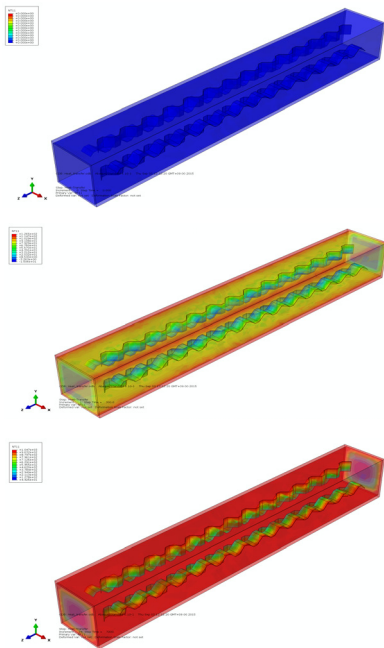


Fig. 13. Analysis of CFT member temperature profile during fire

해석 모델의 단면에 대하여 단면 중심에서 최외단까지 각 절점에서의 History Output을 나타낸 표로서 각각의 단면점에서 중심부는 일정한 비율로 온도가 증가하나, 외단부는 상대적으로 초기 온도가 높은 것으로 나타났다. 즉, 표면부의 강관에 비해 콘크리트 중심부는 낮은 온도를 보이고 있으며, 이는 콘크리트의 내부 단열효과로 인해 중심부에 열전달이 되지 않았음을 나타낸다. 이상과 같이 표준 화재곡선에 노출된 CFT 기둥 시험체를 대상으로 화재실험에서 구한 온도 데이터와 유한요소 해석에서 예측한 단면 온도분포가 매우 근사한 것을 알 수 있었다. 이는 재료의 열적 물성치의 정밀한 값을 적용하면 더욱 근접할 것으로 판단된다. 본 해석 방법을 적용하면 향후 보강 리브의 형상 연구 및 내화성능 설계 연구를 진전 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 축력에 강한 곡선형 강재리브(Corrugate rib)구조형상 개발을 통한 강관 보강재 성능 향상과 이에 대한 검증에 CFT 기둥 재하 내화시험을 통

해 성능을 확인함으로써 무내화피복 CFT 공법을 개발하고자 하였는데, 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 강재 리브의 형상을 EN 1993-1-5와 DIN 18800 T1-3의 유럽 표준으로 설계하고, 이를 강관 내면에 부착한 CFT 기둥을 개발하였다. 강관 내부에 부착되는 Corrugated-rib는 자동 기계용접을 통해 steel-tube 내부 부착의 일체형 공장제작으로 설계하였다.
- 2) 시험체 제작을 위한 충전 콘크리트의 특성으로 먼저, 본 배합의 경우 560 mm의 슬럼프플로 결과치와 4.5 %의 공기량 측정치를 나타내어, 모두 목표 범위를 만족하는 것으로 나타났다. 재령 별 압축강도의 경우는 전반적으로 재령이 증가할수록 강도 값이 증가하는 경향을 나타내었고, 재령 28일에서 목표 설계기준강도 범위를 상회하는 결과치를 나타내었다.
- 3) CFT 기둥 시험체를 내화피복재를 사용하지 않고 재하-화재실험을 수행하여 변위, 변위속도를 측정 한 결과, 3시간 내화성능을 확인하였다.
- 4) 내화시험 후 시험체의 내화특성으로 파괴에 이르는 변형 또는 변형속도를 보이지 않는 양호한 허용변위값을 나타낸 것을 확인하였다. 이는 CFT강관 내부에 Corrugate-rib형의 보강재를 설치함에 따라 강관의 내력상승에 의해 내화시 재하하중에도 변형 없이 강관내 리브의 성능이 확보됨에 기인한 것으로 사료된다.
- 5) 화재실험에서 획득한 시험체 단면의 온도 데이터 분석 및 범용 구조해석 프로그램으로 열분포 해석을 수행한 결과 CFT 강관 내 콘크리트의 온도가 약 400℃ 이하로 유지되는 동안 리브의 성능이 확보되었음을 추정하였다.

이상을 종합하면, 강관 내면 부착 리브의 적용으로 내화시 CFT 기둥의 내력상승에 의한 좌굴방지를 확인하였고, 내화성능기준 또한 만족하였다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 강재리브(Corrugate rib)구조 보강재를 활용한 CFT의 공법은 내화피복 없이 구조 및 내화성능을 만족시키는 것으로 판단된다. 향후 rib의 다양한 형태를 변수로 하는 연구와 공장생산에서 공정을 효율화 시키고, 경제성 있는 시스템으로 활용할 수 있도록 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] Brown, P. W. and Doerr, A., "Chemical Changes in Concrete Due to the INgress of Chemical Species," Cement and Concrete Research, vol. 30, 2000.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00266-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00266-5)
- [2] O. S. B. Al-Amoudi, M. Maslehuddin. The Effect of Chloride and Sulfate Ion on Reinforcement Corrosion. Cement and Concrete Research, vol. 23, no. 1, Jan. 1993.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90144-X](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90144-X)
- [3] ACI Committee 222. Corrosion of Metal in Concrete. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1. 2012.
- [4] M. D. A Thomas, "Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete", Cement and Concrete Research 29, 1999.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00096-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00096-4)
- [5] Jong-Man Shin, A Study on the Chloride Ion Migration Coefficient of Concrete by Using Rapid Chloride Penetration Test, Dept. of Architectural Engineering, Graduate School, Dong Eui University, 2010.

이 동 운(Dong-Un Lee)

[정회원]



- 1996년 2월 : 부산대학교 일반대학원 건축공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 부산대학교 일반대학원 건축공학과 (공학박사)
- 2001년 1월 ~ 2005년 1월 : (주) 본구조 엔지니어링 이사
- 2006년 3월 ~ 현재 : 동서대학교 건축공학과 교수

<관심분야>

건축재료, 건축시공