



내화성능 개선을 위한 강섬유 보강 내부 앵커형 각형강관 합성기둥의 실험연구

김선희¹ · 염경수² · 김용환³ · 최성모^{4*}

¹공학박사, 서울시립대학교, 건축공학부, ²소장, (주)하모니구조엔지니어링,
³교수, 경동대학교, 건축디자인학부, ⁴교수, 서울시립대학교, 건축학부

An Experimental Study of Improving Fire Performance with Steel-fibers for Internally Anchored Square Composite Columns

Kim, Sun Hee¹, Yom, Kong Soo², Kim, Yong Hwan³, Choi, Sung Mo^{4*}

¹Ph.D, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

²Project Manager, Harmony Structural Engineering, Seoul, Korea

³Professor, Department of Architectural Design, Kyun-dong University, Yang-Ju Metropal Campus, 482-010, Korea

⁴Professor, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

Abstract - This study focuses on mixing steel fiber in the concrete to improve the ductility and toughness of the columns. The purpose of the study is to evaluate the load capacity and deformation capacity associated with the amount of steel fiber and loading condition and to analyze the interplay between the steel fiber reinforced concrete and the welding built-up square tube in terms of structure and fire resistance performance. Reinforcement of concrete with steel fiber($V_f=0.375\%$), when cross-section shape and boundary condition (load ratio) remained unchanged, improved fire resistance performance by 1.1~1.3 times. It is deemed that the area resisting thermal load increased and fire resistance performance was improved since the concrete reinforced with steel fiber restrained cracking. In addition, the fact that the cross-sections of the concrete were barely damaged indicates that load share capacity was greatly improved.

Keywords - Steel-fiber, Fire-Performance, Internally anchored square column, Mixing ratio, Thermal stress

1. 서론

내부 앵커형 용접조립각형 강관 기둥은 내부의 충전된 콘크리트와 조립과정에서 자연스럽게 생성되는 리브가 일체함에 합성효과를 극대화한 충전형 합성기둥 중 하나이다. Table 1과 같이 기둥형상 개발이후로 꾸준한 연구가 소개되고 있다. 일련과정의 연구로 구조적 안정성을 검토하기 위해

기둥, 접합부 부재로서 다양한 변수로 실험과 해석이 수행되었다^{[1],[2],[3]}. 또한 시공성, 제작성에 대한 용접성능을 확인하고자 수압실험을 통해 용접 목 두께의 안전성을 평가 한바 있다^[4]. 즉 단면의 효율성과 구조적 거동에 관해서는 충분한 연구와 분석이 진행되어 왔으며, 고층 및 장스팬 구조물에 적용할시 입증되어야 하는 내화성능 확보를 위해서 고온에 노출된 강관과 콘크리트의 거동은 파악되어야 한다. 콘크리트는 단열 효과가 뛰어나 내화 피복재로도 사용된다. 이와 같이 많은 연구자는 콘크리트 충전형 합성기둥은 피복 되지 않아도 일정수준의 내화성능을 발휘하는 것을 증명해 왔다^{[5],[6],[7]}. 하지만, 초고층 구조물에 적용된 CFT기둥의 경우, 피복 없이 요구 내화성능을 확보하는 것은 매우 어렵다. 이를 해결하기 위한 방법으로 충전용 콘크리트에 강섬유 또는 철근을 보강하는 방법이 소개되었다. 구조적 측면에서 내부

Note.-Discussion open until June 30, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 10, 2014; revised July 30, 2014; approved on August 2, 2014.

Copyright © 2014 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-6490-2759 Fax. +82-2-6490-2749

E-mail. smc@uos.ac.kr

Table 1. Previous Studies of Internally Anchored Composite column

No	Title	Main Parameter(note)
1	An Experimental Study on Structural Performance of Welded Built-up Square stub Columns	Column Shape, b/t, fck → Compressive Load (Specimens : 15)
2	Structural Characteristics of Welded Built-up Square CFT Column to Beam Connections with External	Concrete Filled condition and Welded Capacity → Simple Tensile test (Specimen : 9)
3	Water pressure Test and analysis for Welding Thickness Decision for New Cold-formed Type Concrete Filled Tubular Square Column	Steel tube Thick. and Weld throat thickness → Water Press Test (Specimen : 6)
4	A Study on the Load Carrying Capacity and Deformation capacity of the Internal Anchors Welded Cold Formed Concrete Filled Columns	Column cross shape, b/t, Load condition → Compressive Load (Specimen : 10)

앵커형 용접조립각형기둥의 리브는 콘크리트 내에서의 앵커 역할로 인해 일반 각형강관(general Square steel tube)기둥에 비해 경제적인 단면설계가 가능하다는 장점을 갖고 있다. 한편, 용접조립각형 강관기둥의 강점인 리브는 고온에 노출될 때 오히려 내화성능을 악화시키는데 영향을 미치는 것으로 평가되었다. 즉 콘크리트에 매입된 리브는 열 변형 발생 시 콘크리트 균열을 촉진시킨다는 것을 실험을 통해 평가 되었다.

내화성능 평가를 위한 예비실험으로 콘크리트 보강 여부에 재하가열 실험을 수행 하였다. 강관 직경은 612mm, 강관 두께는 10mm 이며 유효 가열길이는 4550mm이다. 동일한 경계조건에 철근 보강된 용접조립각형 강관기둥의 경우 180분의 목표치에 도달한 반면, 무 보강(일반 콘크리트) 기둥의 내화성능은 약 50분 수준으로 목표치에 도달하지 못했다. 실험 결과의 원인 분석을 위해 강관표피를 일부 절단하였고 내부 콘크리트 상태를 확인하였다. Fig. 1과 같이 철근 보강된 기둥에 비해 무 보강 기둥의 내부 콘크리트는 전 단면의 약 40~50% 이상 손상된 것을 확인 할 수 있었다.

고온에 직접적으로 노출되는 강관은 콘크리트에 비해 열 전도성이 높기 때문에 가열 초기부터 열 변형이 발생된다. 이때 내부 리브는 급속도로 열 변형을 일으키게 되며, 맞물려 있던 콘크리트 균열을 유도하게 되는 것으로 추정되었다.

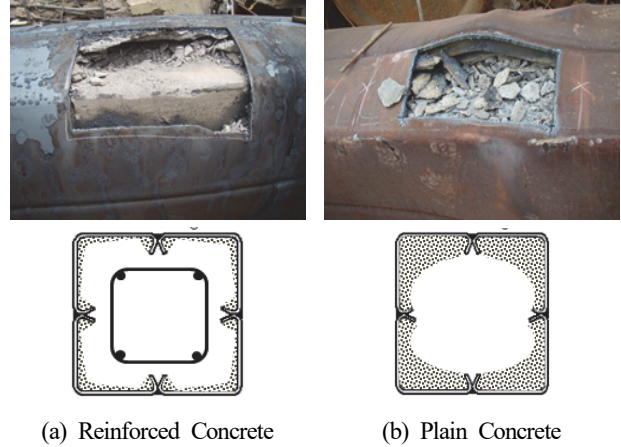


Fig. 1. Concrete damage by high temperatures

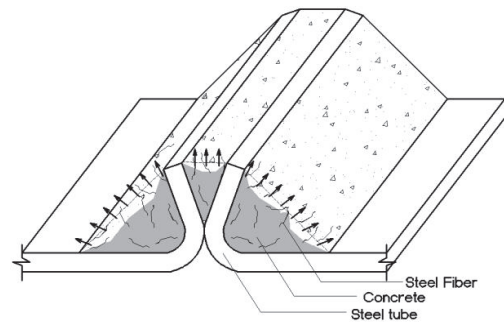


Fig. 2. The interaction between SFRC and steel rib

그로 인해 내부 콘크리트의 상태는 가열 초기부터 열 변형이 심화된 것으로 판단된다. 즉 축열효과(Storage effect)가 있음에도 열 하중에 대한 저항력을 잃게 되는 것으로 원인이 규명되었다.

내부 앵커형 용접조립 각형강관 기둥의 내화성능을 증가시키기 위해서는 Fig. 2와 같이 리브의 열 변형에 저항할 수 있도록 콘크리트의 인성을 확대 시킬 대안이 모색되어야 한다. 그 대안은 강섬유로 해결하고자 하며, 본 연구에서는 무 피복 상태의 용접조립 각형강관 기둥의 내화성능을 향상시키는 방안으로 콘크리트를 강섬유와 혼입하여 기둥자체의 인성을 증대시키는 데에 초점을 맞추고 있다.

2. 선행연구

강섬유 콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete, 이하 SFRC)충전형 기둥의 내화성능 선행연구는 매우 미흡했다. 강섬유 콘크리트의 대한 내화성능 연구는 90년대 들어

소개되고 있다. 연구의 주된 목적은 고온에 노출된 콘크리트의 폭열방지를 방지하기 위한 노력으로 강섬유 또는 이질 섬유재(PP섬유)와 혼입한 연구가 주로 이뤄지고 있다. 한편 V.K.R Kodur^{[8],[9],[10],[11],[12],[13]} 연구자는 강섬유 콘크리트 충전형 기둥의 내화성능 연구에 대해 독보적으로 소개되고 있다. 1996년부터 2004년에 걸쳐 총 7의 논문을 분석하여 실험체 형상과 주요변수를 Table 2.에 요약하였다. 사용된 강섬유 형태는 양단 후크형(lf:50mm, df:0.9mm)타입으로, 혼입율은 1.77%이다. 기둥형상은 각형, 원형 모두 적용 대상으로 하고 있으며, 실험결과를 바탕으로 수치해석모형을 완성하였다. 최종적으로 실험과 해석 검증모형을 통해 내화성능 설계식을 제시하였다. 설계식은 AISC Steel Design Guide-19^[14]에 게재되었으며 충전형 기둥의 내화성능 설계에 시작점이 되고 있다. 하지만 실험결과를 바탕으로 한 수치해석 결과물이므로 적용범위가 한계성을 갖고 있다. 첫 번째

째로 강섬유 혼입율에 따른 내화성능 평가는 제시되지 않고 있다. 두번째로 분석에 사용된 기둥부재 실험체 형상은 모두 축소형으로 제작되어 실험이 진행되었다. 이런 경우 강섬유의 방향성을 배제한 결과로 보여진다. 따라서 실제 기둥에 적용하기에는 과대평가 될 우려가 크다. 따라서 필자는 V.K.R Kodur (1996~2004)의 연구결과를 분석하여 SFRC가 충전된 ACT기둥의 내화성능을 고찰해 보고자 한다.

2.1 SFRC를 충전한 강관기둥의 내화성능 평가

총 58개의 원형 및 각형 콘크리트충전 강관기둥(Concrete Filled steel tube: 이하 CFT)에 대하여 내화성능평가 실험이 수행되었다. 다음의 세 가지 종류의 콘크리트 즉, 무보강 콘크리트(PC), 철근 콘크리트(RC) 그리고 강섬유 콘크리트(FC)가 강관내 충전되어 각각 비교되었다. 실험 시 기둥은 ASTM E119-88^[15] 또는 ULC S101-89의 시간-온도 곡선에 따르도록 가열로의 평균 온도를 조정하여 재하가열실험을 수행하였다. 실험결과, 비 충전 강관기둥에 대한 내화성능이 15~20분 확보되는 것에 비해 콘크리트충전 강관기둥은 약 60~120분 내화성능이 확보 가능한 것으로 평가되었다. 철근 보강된 CFT기둥(RC)과 강섬유 보강된 CFT기둥(FC)은 3시간 정도로 높은 내화성능을 확보할 수 있었다. 일반적으로 무보강 CFT기둥의 파괴는 갑작스런 수축에 의한 것으로 평가되었지만, 철근보강 CFT기둥(RC)과 강섬유 보강 CFT기둥(FC)의 파괴는 점차적으로 압축에 의해 진행된 것으로 보고되었다.

2.2 내화성능 평가식

NRCC(National Research Council of Canada)의 연구에서는 축 하중 하에서 표준 화재저항실험이 진행되었으며, 편심이 발생하는 복합하중 작용 시에 대한 연구가 진행되었다. 모든 충전형 기둥은 내화 피복되지 않았으며, 양 단부 지점은 강접합(Fixed)으로 설정하였다. NRCC의 연구결과에 따르면 철근 보강 기둥의 경우 내화성능은 향상되었지만, 그에 따른 철근 보강은 비용 상승과 함께 기둥의 사이즈를 한정 시키게 되는 결과를 보여 주었다. Kodur와 T.T. Lie(2005)는 상승하는 온도하에서 강섬유 보강 콘크리트의 열-역학적 특성을 제시하였으며, 내화성능을 예측하기 위한 수치적 접근 방법을 소개하고 있다. 내화성능 예측식은 실험과 해석에 기초하여 확립된 CFT 기둥의 축력에 대하여 적용 가능한 내화성능 설계식이다. 식 (1)의 작용하중 'C'에 대한 최대 한계

Table 2. Studies on SFRC columns

No	Year	Specimen list (Diameter×Thick.×high (mm))	Parameter and note
1	1996a	·Cylinder:150×300 ·Brick:200×100×50 ·Prisms :100×100×400	Aggregate: Carbonate, siliceous Proposal :Thermal properties
2	1996b	·FC1 Ø322.9×6.35×3810 ·FC2 Ø355.6×6.35×3810 Steel Grade 350/ fck:53MPa	Loaded heating test à Verification by Finite difference Method à Evaluated of Temperature distribution
3	1997	·SQ1 □152.4×6.35×3810 ·SQ2 □177.8×6.35×3810 ·Sq3 □177.8×6.35×3810 Steel Grade 350/ fck:49,39	Concrete Compressive Strength and Fire performance relation
4	1998	·Ø324, 356×6.4×3000 ·□152×6.4×3000 ·□203×12.7×3000 ·□150×5×2520 ·□200×5×2520	
5	1999	·Ø355×6.4×3810 ·Ø324×6.4×3810 ·□203×6.4×3810	Filled Concrete type : Plain, reinforced concrete, Steel-fibers reinforced concrete
6	2000	Same the No.5	Proposal the Fire Design Guide
7	2004	·Cylinder 1:100×200 ·Cylinder 2:150×300	Wave steel-fiber

를 정리하면 다음 식 (2)와 같이 표현된다. 즉 내화성능 확보 시간에 맞춰 하중비를 산정할 수 있다. 함수 내에 'a'는 콘크리트 골재 및 보강여부에 결정된다. 고온에서의 합성 기둥은 콘크리트가 하중을 견디므로 작용하중(C)은 식 (2)와 같이 내부 콘크리트 축 내력(C_r)에 따라 제한된다.

$$C \leq C_{\max}, \quad C_{\max} = \left(\frac{a(f_c + 20)D^{2.5}}{R(KL - 1000)} \right)^2 \quad (1)$$

$$C_r = 0.85\phi_c f'_c A_c \lambda_c^{-2} \left[\sqrt{1 + 0.25\lambda_c^{-4}} - 0.5\lambda_c^{-2} \right] \quad (2)$$

3. 내화성능 평가 실험

3.1 실험개요 및 방법

모든 실험체는 내화피복을 하지 않았으며, 동일한 형상을 갖고 있다. 실험체는 총 8개로 주요 변수는 Table 3과 같이 강섬유 혼입량과 하중비이다. 강섬유 혼입량은 총 3가지 경우로 0, 0.25, 0.375%로 설정하였다. 하중비는 총 4가지의 경우로 0.30, 0.35, 0.45, 0.50이다. 하중비에 대한 정의는 식 (3)과 같다. 앞서 2.2절에서 언급된 CFT기둥의 내화성능 설계식을 인용하여 각 실험체의 내력과 상태를 정리하였다. C는 재하 하중량을 말하며 C_r은 길이를 고려한 콘크리트의 축 강도이다. C_{rc}(C_{rc}=C_r+A_sF_y)는 전 단면강도를 말한다.

Table 3. Specimen list

No.	Spec.	V _r (%)	f _{ck} (MPa)	C _r (kN)	C _{rc} (kN)	Test Load C (kN)	C/C _r	C/C _{rc}
1	F3500	0	40	3,395	6,198	1,188	0.35	0.18
2	F5000	0	40	3,395	6,198	1,697	0.50	0.26
3	F3520	0.25	41	3,395	6,198	1,188	0.35	0.18
4	F5020	0.25	41	3,395	6,198	1,697	0.50	0.26
5	F3030	0.375	50	5,934	7,007	1,018	0.30	0.17
6	F3530	0.375	46	3,393	6,198	1,187	0.35	0.18
7	F4530	0.375	50	5,934	7,007	1,527	0.45	0.26
8	F5030	0.375	46	3,387	6,198	1,693	0.50	0.26

F 00 00
 : 강섬유보강지수 RI=(L_f/d_f)VF REF^[18]
 : 하중비 (예: 30;P_c×0.3) 단, P_c = A_c×f_{ck}
 : F (Fire resistance test)

$$\text{하중비} = \frac{\text{화재시 작용하중}(C)}{\text{상온}(20^\circ\text{C})\text{상태의 강도}(C'_r)} \quad (3)$$

실험체의 단면형상(□-300×6)과 부재길이(3,450mm)는 동일하며, 단면 내 온도 측정 위치 및 재하 가열 경계조건은 동일하다. 실험에 사용된 강재는 Table 4.와 같이 SM490으로 동일하며, 내부 충전된 콘크리트의 공칭 압축강도는 40MPa로 Table 5.와 같이 소재시험결과를 정리하였다. 사용된 강섬유의 형상과 치수^{[16],[17]}를 Table 6에 나타냈다.

실험체 형상은 Fig. 3과 같고 내부 수증기를 배출하기 위한 증기 구멍은 기둥 하부면에서부터 700, 1,400, 2,100mm의 위치에 뚫었다. 증기구멍 직경은 20mm으로 총 6개소에 내부 리브와 간섭이 없도록 제작하였다. 변형량 측정장치로, 수직변형량은 자동변위계(Linear Type)의 데이터 값을 컴퓨터에 의해 자동 기록되었으며, 가열로 온도는 길이방향으로 3개씩 총 4면에 12개의 열전대를 설치하였다. 온도 측정


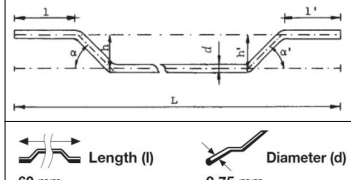
Table 4. Results of material(Steel) test

Thick.(mm)	Gread	Fy(MPa)	Fu(MPa)	Fu / Fy(%)
6	SM 490	414	477	0.86

Table 5. Strength and composition of SFRC

Design Strength	Mixing ratio (%)	0	0.25	0.375		
		Compressive (MPa)	41	42	46	
40 MPa	Tensile (MPa)	4.1	4.9	6.7		
W/C (%)	S/A (%)	Slump (cm)	Unit Weight (kg/m ³)			
			C	W	S	G
27.9	40.1	15	585	178	563	847

Table 6. Shape and size of steel fiber

RC-65/60-BN	Shape	
		
h, h' (mm)	a, a' (degree)	l, l' (mm)
≥ 0.75	≥ 20°	1.5~5.0mm

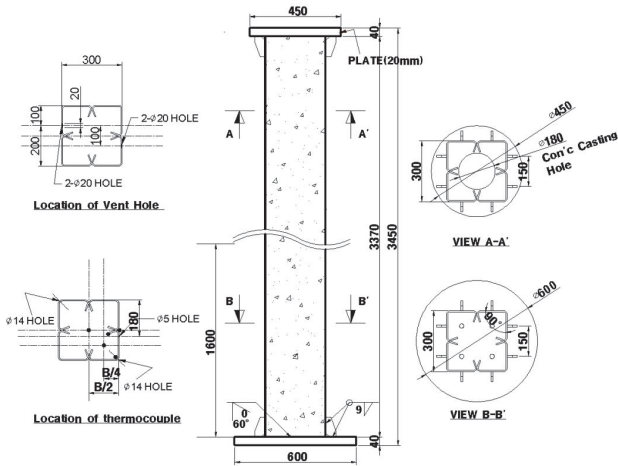
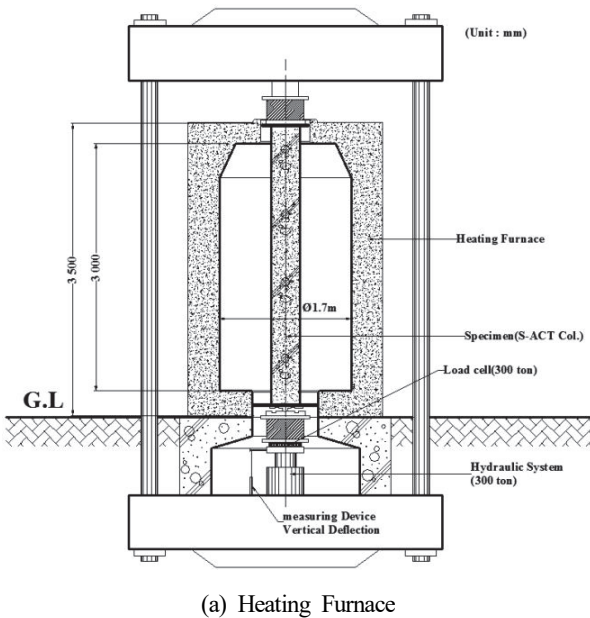


Fig. 3. Detail of Specimens, Vent holes and Thermocouples



(a) Heating Furnace



(b) Displacement Measurement



(c) Inside

Fig. 4. Heating and measuring devices

위치는 콘크리트 단면의 B/2, B/4, 모서리 끝단, 리브와 콘크리트 접촉면 그리고 강재 표면에 총 5곳에 열전대를 설치하였다. 열전대는 k-type으로 콘크리트내에 삽입의 경우 3.2mm, 강관에 부착되는 열전대는 1.6mm를 사용하였다.

실험은 3000kN급 기둥 재하가열로를 사용하였다. 기둥 재하 가열로의 전경과 상세는 Fig. 4(a)와 같으며 가열로의 온도, 실험체의 내부온도, 실험체의 수직변위 등을 측정할 수 있다. 하중은 Fig. 4(b)와 같이 가열로 바닥에 위치하고 있는 재하능력이 3000kN인 유압잭에 의해 가력되어지며, 내부 가열장치는 Fig. 4(c)와 같이 각각 위치한 가스버너로부터 나오는 화력의 의해서 작동된다. 재하가열실험은 아래의 순서에 따라 진행되었다. ① 가열로에 기둥을 바닥 유압잭의 중심에 맞춰 수직으로 세운다. ② 하중은 가열시 열에 의해 영향을 받지 않은 기둥 하부에서 재하한다. ③ 재하 후 약 30분 이상 재하상태를 유지 한 후 하중 재하 상태에서 표준가열 곡선대로 가열한다. ④ 실험체의 열팽창 및 수축에 의한 연신량을 유압 실린더에 부착된 LVDT로 측정한다. ⑤ 축방향 재하 부재의 경우 시험체의 초기 길이(h)를 함수로 한 수축량($C=h/100$, 여기서 h는 기둥유효좌굴 길이)과 변형률($dC/dt=3h/1000$)이 제한범위에 초과됐을 때 종국상태로 판단하고 실험을 종료한다.

3.2 축 변형 - 화재시간 관계

일반적으로 상온조건에서는 충전형 기둥의 강관과 내부 콘크리트는 함께 거동하므로 강관과 콘크리트 변형률이 같아지고 따라서 각 재료의 응력은 두 재료의 탄성계수 비에 각각 비례한다. 하지만, 화재 시 콘크리트 충전 강관기둥은 4단계의 거동 특성을 나타낸다. ① 강관이 축 방향으로 열팽창 단계 ② 강관에서 내부 콘크리트로 하중이 전이되는 구간 ③ 콘크리트만으로 하중을 저항하며 천천히 수축기를 갖는다. ④ 급격한 축 방향 수축단계로 파괴에 이른다.

재하가열 실험결과 각 실험체별 축 변형- 화재시간을 Fig. 5에 나열하였다. 일반 콘크리트로 충전된(F3500, F5000) 실험을 먼저 살펴보면, 하중비가 0.35일 때 약 14mm 강관 팽창 이후 하중 전이 구간이 비교적 짧고 급격한 수축현상이 발생되었다. 하중비가 0.5 인 경우 강관팽창 없이 약 40분을 저항하다 급격하게 변형됨을 알 수 있다. 강섬유 혼입 0.25% (F3520, F5020) 실험결과를 보면, 일반 콘크리트 충전 실험체와 유사한 축 변형 거동을 보이고 있는데, 상이한 점은 하중비 0.5일 때 약 5mm의 강관팽창이 발생된 것으로

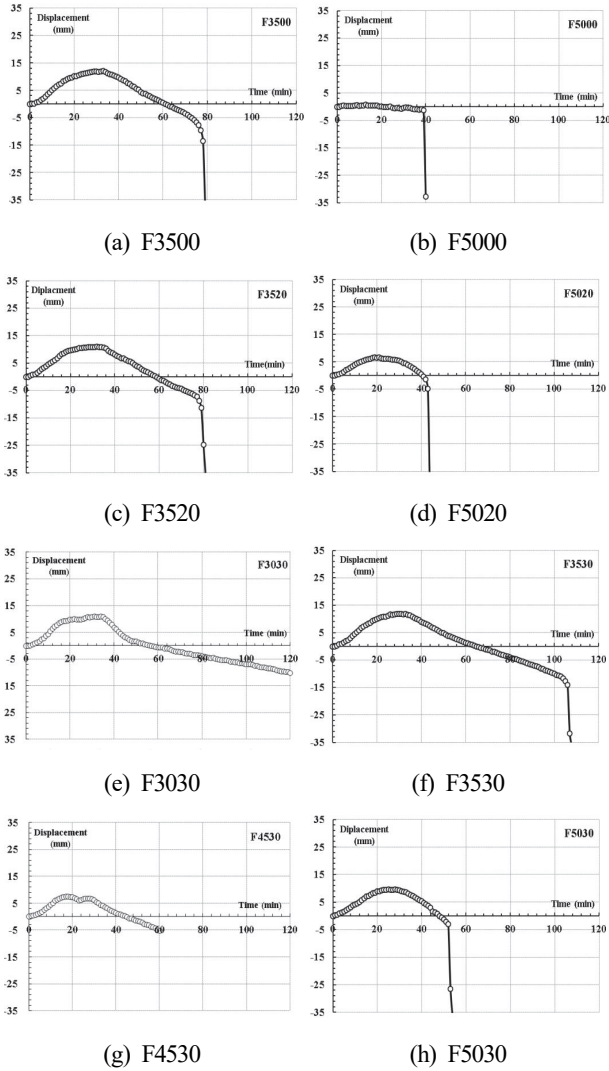


Fig. 5. Axial Strain-time relationship each specimens

나타났다.

강섬유 혼입율이 0.375%인 실험결과를 보면 하중비 0.3인 경우(F3030) 120분까지 내화성능이 확보되어 매우 안정적으로 거동하는 것으로 평가되었다. 하중비 0.35인 (F3530) 경우 하중 전이 구간까지 완전한 축 변형을 갖다가 100분 이후 수축량 한계에 도달되었다. 하중비가 0.45인 경우 (F4530) 계획한 60분까지 내화성능이 안정적으로 확보되었다. 최종 종국상태에 도달하기 전에 실험이 종료되었으므로 (인증실험 이므로 시간을 정해 놓음) 실험이 종료된 시점보다 실제 더 큰 내화성능이 확보 될 것으로 판단된다. 하중비 0.5인(F5030)인 경우, 약 13mm의 강관팽창 구간이 발생되어 콘크리트 하중전이구간까지는 안정적으로 나타났지만, 40분 이후 급격한 변형률을 나타내고 있다. 축변형-시간에

Table 7. Fire resistance time and thermal expansion

Spec.	Vf(%)	Fire resistance time each part (min)				Expansion (mm)
		①	②	③	SUM	
F3500	0	28	22	22	79	12.0
F5000	0	-	-	-	41	0.7
F3520	0.25	29	21	30	80	11.0
F5020	0.25	18	13	12	43	7.0
F3030	0.375	30	35	55	120	10.5
F3530	0.375	28	20	59	107	12.0
F4530	0.375	21	20	19	60	7.2
F5030	0.375	24	14	15	53	10.0

서 얻을 수 있는 각 실험체의 수치적 내용을 Table 7에 정리하였다.

3.3 화재 전후 거동 비교

실험 전과 후 상태파악을 위해 모든 실험체의 중량과 길이, 둘레 변화에 대해 측정하였다. 상온시(R), 화재 이후 (F)로 나누어 표현했으며, 재하가열 전과 후의 차이(R-F)를 Table 8과 같이 나타냈다.

상온상태를 기준으로 각 변형량($\epsilon_w, \epsilon_l, \epsilon_d$)을 하중비 관계로 Fig. 6에 도식화하였다. 하중비가 커질수록 중량 변화량(ϵ_w)은 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 하중비가 작을수록 가열된 내화시간이 길어지므로 그로 인해 강관표피 박리와 콘크리트의 증기방출로 인한 영향으로 보인다. 한편 길이 변화량(ϵ_l)은 하중비와 비례하는 것으로 평가되었다.

Table 8. Changes in weight and length after heating

Spec.	Weight (kg)			Length (mm)			Circumference (mm)		
	R	F	R-F	R	F	R-F	R	F	R-F
F3500	1036	984	52	3449	3388	52	300	312	12
F5000	1036	1008	28	3449	3390	60	300	319	0.7
F3520	1032	968	64	3449	3380	70	302	315	11
F5020	1030	984	46	3449	3380	70	301	320	7
F3030	1034	945	89	3450	3414	36	301	328	27
F3530	1042	1000	42	3448	3378	70	300	317	12
F4530	1034	1000	34	3453	3390	63	300	307	7
F5030	1042	1000	42	3445	3382	63	301	318	10

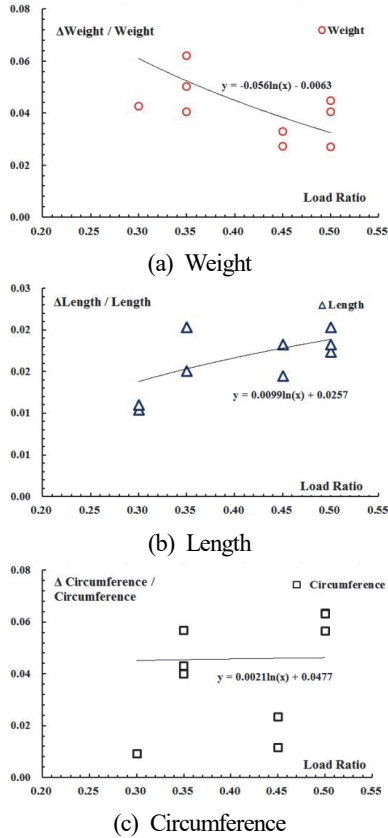


Fig. 6. Strain-load ratio relationship after heating

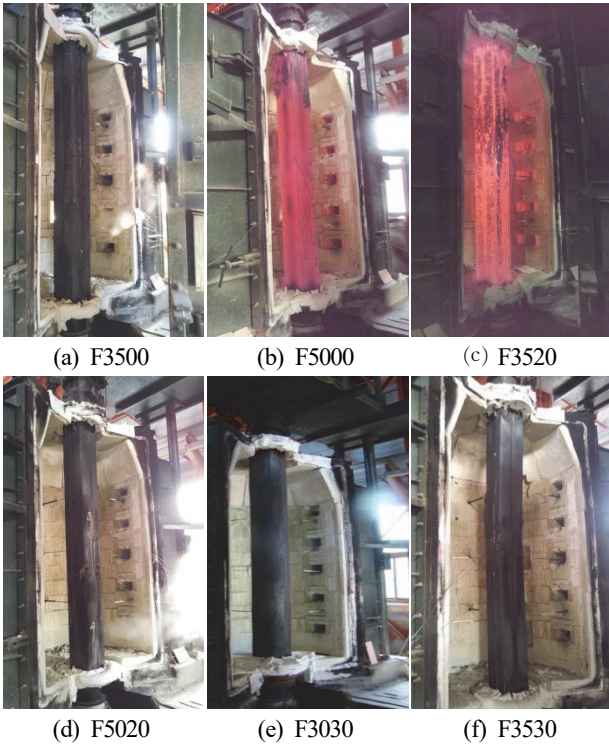


Fig. 7. Condition of Columns after loaded heating test

4. 분석 및 고찰

4.1 단면 내 온도분포 평가

표준가열 곡선은 Fig. 8과 같이 KS F 2257에서 제시한 표준가열곡선을 적용하였다. 초기온도(T_0)는 20°C 로 설정하였다.

가열에 따른 단면 내 온도 분포는 Fig.9에 각각 나타냈다. 가열 초기 온도(20~40분) 분포를 보면 온도 증폭이 급격하

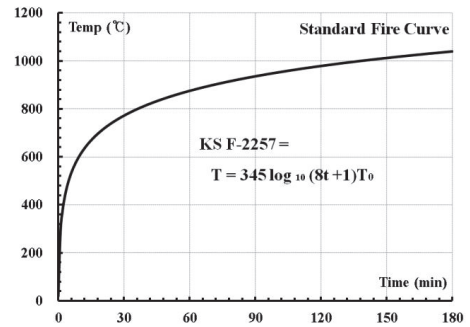


Fig. 8. Standard fire curve

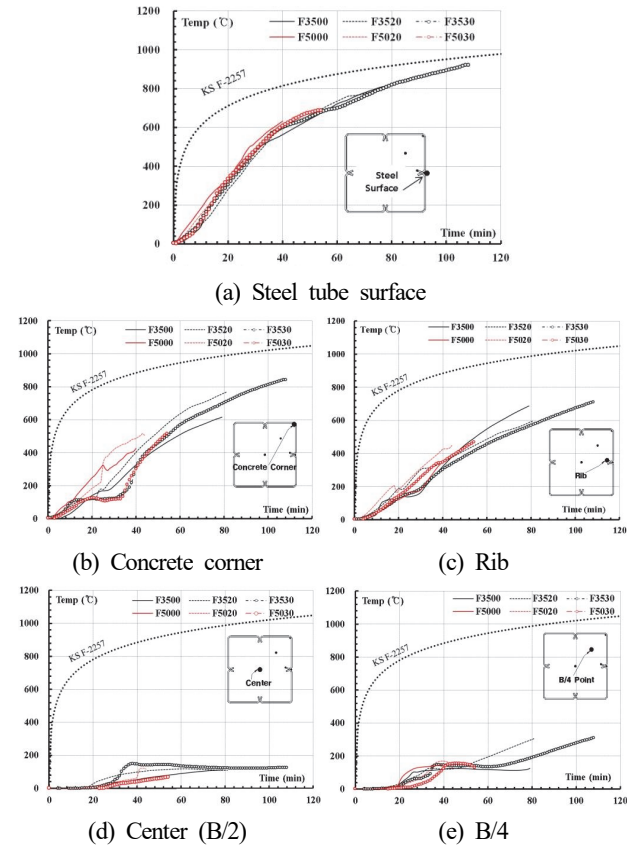


Fig. 9. Temperature distribution

며 불안정한 흐름을 보이고 있다. 이러한 원인으로는 콘크리트 내 수분이 증기로 빠져가는 과정에 발생된 현상으로 40분 이후부터 안정화되는 것을 알 수 있다.

리브에 측정된 열전대는 콘크리트 표면에서 약 50mm 깊이에 있으며 모서리에 측정된 온도와 비교해 보면 약 100°C의 온도 차이를 보인다. 분포 추세가 상당히 유사한 것을 알 수 있다. 한편, 콘크리트 단면 내 중앙과 1/4지점에 측정된 온도를 비교해 보면, 약 20분 이후부터 온도가 상승되어 실험 종료시점까지 200°C 내에 존재하는 것으로 확인된다. 전반적으로 온도분포를 살펴보면 강섬유 혼입율과 하중비에 상관없이 유사한 온도분포 관계를 나타내고 있었다.

4.2 하중비에 따른 영향

최종 종국 상태 이전에 실험이 종료된 실험체는 잠재적인 내화성능이 있다고 판단되어 해당되는 실험결과에는 오른쪽 화살표로 표기 하였다. Fig.10과 같이 하중비가 커질수록 내화성능은 반비례 관계에 있음을 알 수 있다. 0.45이하의 하중비가 작용할 경우 1시간 남짓의 내화시간을 갖고 있다. 즉 하중비 0.45 이상부터는 콘크리트의 저항성을 확대 시킬 필요가 있다. 한편 하중비가 0.45이하인 실험체의 경우 약 80분 이상 내화성능이 발휘 가능했다. 그 중 강섬유 혼입율에 비례적으로 내화성능이 증가하기보다는 0.375% 혼입된 경우에서 약 100분 이상 월등히 내화성능이 향상되었다.

정리된 Table 9를 보면 일반 콘크리트가 충전된 부재의 경우 하중비를 0.5에서 0.35로 변화했을 때 내화성능이 41분에서 79분으로 약 1.9배 향상되었다. SFRC가 0.25% 혼입된 경우 하중비 0.5에서 0.35로 변화 했을 때 내화성능이 43분에서 80분으로 약 1.8배 증감율을 갖고 있다. 마지막으로 SFRC 0.375% 혼입된 경우 하중비 변화에 의해 내화성능이

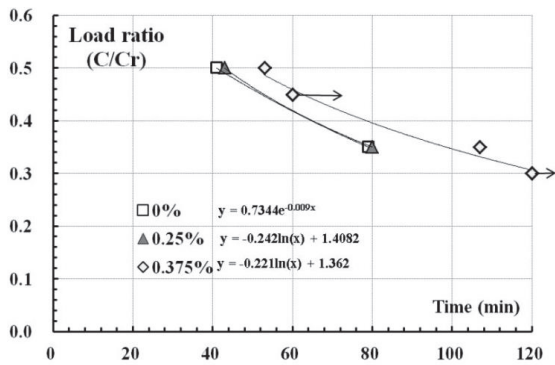


Fig. 10. Load ratio-fire resistance time

Table 9. Load ratio and Fire resistance performance

Vf (%)	Load ratio				FR0.35 /FR0.5
	0.30	0.35	0.45	0.50	
0	-	79 min	-	41 min	1.93
0.25	-	80 min	-	43 min	1.86
0.375	120 min	107 min	60 min	53 min	2.02

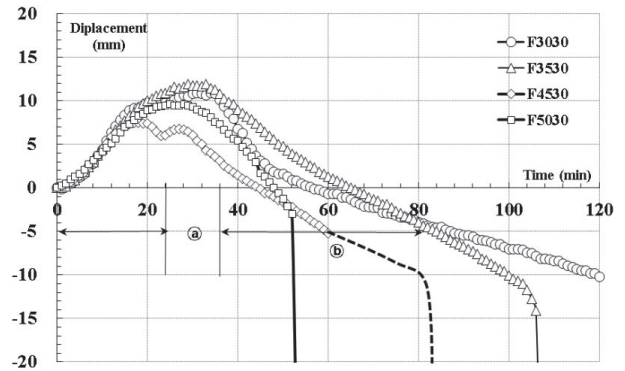
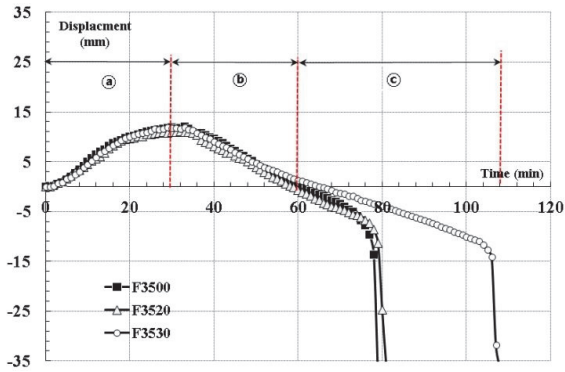


Fig. 11. Displacement-Time relationship

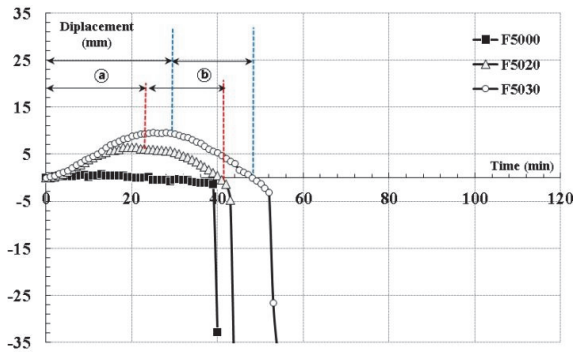
2배 이상 증폭되는 것을 알 수 있다. 0.375% 혼입된 실험체는 4가지 경우의 하중비를 변수로 실험이 진행되었으며 각 축변형-시간관계를 Fig. 11에 비교 하였다. 하중비가 작아질수록 강관 팽창 크기가 증가되며, 콘크리트로 하중이 전이구간의 기울기가 매우 완만하게 거동하는 것을 알 수 있다.

4.3 강섬유 혼입율에 따른 열변형 평가

강섬유 혼입율에 따른 열변형을 비교 하고자 각 하중비 별로 Fig.12에 구분하였다. Fig.12(a)를 보면 하중비 0.35인 경우 강섬유 혼입율에 관계없이 강재 팽창 구간(a)부터 하중 전이 구간(b)까지 비교적 유사한 거동을 나타내고 있다. 하지만 중점은 그 이후부터 발생된 거동이다. 강섬유 0.375% 혼입된 경우 변형 진행속도가 서서히 저하되면서 약 50분 이상 축 내력에 저항하였다. 반면 강섬유 0.25% 혼입된 경우 일반 콘크리트 충전 실험체 보다 소폭 향상은 되었지만 큰 차이 없이 종료되었다. Fig.12(b) 하중비 0.5인 경우 일반 콘크리트 실험에서는 열팽창구간(a)이 발생되지 않았으므로 가열 시작과 동시에 콘크리트와 강재는 동시에 하중에 저항했을 것으로 보여진다. 강섬유 0.375% 혼입된 실험의 경우 팽창구간(a)과 하중 전이구간(b) 모두 향상은 되었지만, 수축량이 심화되어 파괴되는 양상은 유사하게 나타났다.



(a) Load ratio : 0.35



(b) Load ratio : 0.50

Fig. 12. Steel fiber mixing ratio & axial displacement

일반 콘크리트 충전 실험체를 기준으로 혼입율 증가에 따른 내화성능을 무차원 하여 Fig.13에 나타냈다. 혼입율에 따라 내화성능은 약 1.1~1.3배 증가되는 것을 알 수 있는데 강섬유가 0.25% 혼입된 경우 향상비가 미비하며 0.375% 혼입 시 매우 효과적임을 알 수 있다. 즉 동일한 형상과 하중비를 갖을 때 내부 콘크리트에 강섬유 혼입만으로 내화성능이 약 1.3배 향상 가능함을 알 수 있다. 이는 매우 효과적인 합성 상호작용에 의한 결과로 보인다.

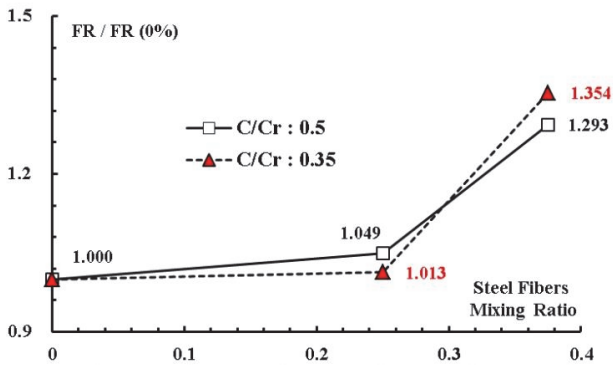


Fig. 13. Steel fiber mixing ratio & fire resistance performance

5. 결론

SFRC를 충전한 합성기둥의 내화성능에 대해 분석하였다. 강섬유 혼입량과 하중비를 변수로 하여 총 8개의 기둥을 제작하여 실대 재하가열실험을 수행하였다. 변수에 따른 내화성능과 거동을 비교 분석하였으나, 실험결과를 토대로 평가되었으므로 정량적인 결과로 보기는 다소 한계가 있다. 추후 추가적인 데이터가 누적되어 보다 합리적인 무 내화 피복 합성기둥의 내화설계가 가능하도록 본 자료가 사용되었으면 한다.

- (1) 강섬유 혼입량에 비례적으로 내화성능이 향상되기 보다는 0.375% 혼입의 경우 매우 효과적인 결과를 보였다. 하중비에 따라 강섬유 혼입율의 관계를 고려하여 내화설계 할 경우 보다 경제적인 결과를 가져올 것으로 예상된다. 즉 열 하중에 대한 저항력이 확대되었으므로 내화 피복량을 최소화 또는 무피복 상태로 내화 성능설계를 유도할 수 있을 거라 판단된다.
- (2) 단면 내 온도 분포를 분석한 결과 내부 리브에 측정된 온도는 콘크리트 모서리에 측정된 온도보다 약 100°C 이하로 나타났으며 이는 곧 리브에 의한 열전도 범위(정도)는 비교적 크지 않음을 알 수 있었다. 또한 각 실험체의 온도분포를 비교해 보면 강섬유 혼입량과 하중비는 큰 영향을 미치지 않으며 분포양상이 유사하게 나타났다.
- (3) 축 변형-시간관계를 볼 때 초기 30분 내외로 최대 강관 팽창구간을 갖고 있으며 평균 축 팽창 길이는 9mm로 평가 되었다. 또한 강섬유 혼입량이 커질수록 콘크리트 하중전이 구간 기울기가 완만하여 강재의 강도 손실 이후 콘크리트 하중 저항력이 향상되었다.
- (4) 화재 전후 거동에 대한 평가로 하중비가 커질수록 중량 변화량은 반비례 특성을 갖고 있다. 하중비가 커질수록 내화성능은 단축되므로 강관표피 박리와 콘크리트 증기 방출에 의한 영향이 미비한 결과로 판단된다. 한편 하중비가 증가할수록 길이 변형량은 비례관계를 갖는 것으로 측정되었다.
- (5) 무보강 콘크리트 대비 강섬유 콘크리트(단, 혼입율 0.375%) 적용 시 내화성능은 약 1.1~1.3배 증가되는 것을 알 수 있다. 이는 콘크리트 내 강섬유는 균열을 억제 하며 그로 인한 열 변형을 완화시킨 결과로 보인다. 즉 동일한 형상과 하중비를 가질 때 내부 콘크리트에 강섬유 혼입은 내화성능 향상의 가능성을 높인다고 판단된다.

참고문헌(References)

- [1] 이성희, 정현모, 김대중, 김진호, 최성모(2008) 용접조립 각형 CFT기둥-보 외다이하프랩 접합부의 구조특성, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제6호, pp. 711-722.
Lee, S.H., Jung, H.M., Kim, D.J., Kim, J.H., and Choi, S.M. (2008) Structural Characteristics of Welded Built-up Square CFT Column to Beam Connections with External, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.6, pp.711-722 (in Korean).
- [2] 이성희, 최영환, 염경수, 김진호, 최성모(2008) 용접조립 각형 CFT단주의 구조특성에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제5호, pp.645-653.
Lee, S.H., Choi, Y.H., Yom, K.S., Kim, J.H., and Choi, S.M. (2008) An Experimental Study on Structural Performance of Welded Built-up Square stub Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 20, No.5, pp.645-653 (in Korean).
- [3] 김선희, 염경수, 최성모(2013) 내부 앵커형 콘크리트 충전 기둥의 내력 및 변형 능력에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제4호, pp.347-357.
Kim, S.H., Yom, K.S., and Choi, S.M. (2013) A Study on the Load Carrying Capacity and Deformation Capacity of the Internal Anchors Welded Cold Formed Concrete Filled Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.4, pp.347-357 (in Korean).
- [4] 이성희, 김선희, 김영호, 최성모(2009) 조립각형 CFT 기둥의 용접크기 결정을 위한 수압실험 및 해석, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제21권, 제5호, pp.515-526.
Lee, S.H., Kim, S.H., Kim, Y.H., and Choi, S.M. (2009) Water Pressure Test and Analysis for Welding Thickness Decision for New Cold-Formed Type Concrete Filled Tubular Square Column, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.21, No.5, pp.515-526 (in Korean).
- [5] 구철희, 이철호, 안재권(2013) 화재 시 무피복 CFT 기둥의 축강도 평가를 위한 단면온도분포 예측기법의 개발, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제6호, pp. 587-599.
Koo, C.H., Lee, C.H., and Ahn, J.K. (2013) Prediction of Temperature Distribution to Evaluate Axial Strength of Unprotected Concrete-Filled Steel Tubular Columns Under Fire, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.6, pp.587-599 (in Korean).
- [6] 김선희, 원용안, 최성모(2012) 비재하 가열실험을 통한 이중강관 CFT기둥의 잔존강도 평가연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제1호, pp.81-89.
Kim, S.H., Won, Y.A., and Choi, S.M. (2012) A Study on the Evaluation of Residual Strength of Double Concrete Filled Tube Column by Unstressed Test, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.1, pp.81-89 (in Korean).
- [7] 김해수, 이치형(2010) 내화피복종류에 따른 각형 CFT기둥의 온도분포에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제6호, pp.523-532.
Kim, H.S., and Lee, C.H. (2010) An Experimental Study on the Temperature Distribution of Square CFT Columns According to the Types of Fire Protection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No. 6, pp.523-532 (in Korean).
- [8] Kodur, V.K.R., and Lie, T.T. (1996) Fire Resistance of Circular Steel Columns Filled with Fiber-Reinforced Concrete, *Journal of Structural Engineering*, Vol.122, No.7, pp.776-782.
- [9] Kodur, V.K.R., and Lie, T.T. (1997) Evaluation of Fire Resistance of Rectangular Steel Columns Filled with Fiber-Reinforced Concrete, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Canadian Science Publishing (NRC Research Press), Vol.24, No.3, pp.339-349.
- [10] Kodur, V.K.R. (1998) Design Equations for Evaluating Fire Resistance of SFRC-Filled HSS Columns, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.124, No.6, pp.671-677.
- [11] Kodur, V.K.R. (1999) Performance-Based Fire Resistance Design of Concrete-Filled Steel Columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.51, No.1, pp.21-36.
- [12] Kodur, V.K.R., and MacKinnon, D.H. (2000) Design of Concrete-Filled Hollow Structural Steel Column for Fire Endurance, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.37, No.1, pp.13-24.
- [13] Cheng, F.-P., Kodur, V.K.R., and Wang, T.-C. (2004) Stress-Strain Curve for High Strength Concrete at Elevated Temperature, *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.16, No. 1, pp.84-94.
- [14] American Institute of Steel Construction (2005) *Steel Construction Manual* (13th Ed.), AISC, USA.
- [15] American Society for Testing and Materials (1984) *Standard Test Method for Flexural Toughness and First - Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with*

Third-Point Loading) (ASTM C 1018: 1984), USA, pp. 656-661.

- [16] ACI Committee 544 (1988) *Design Consideration for Steel Fiber Reinforced Concrete*, American Concrete Institute.
- [17] Deutsches Institut für Normung (1998) *Structural Use of Concrete - Design and Construction* (DIN 1045: 1988), German.
- [18] JSCE Concrete Committee (1984) Method of Tests for Flexural Strength and Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete (JSCE-SF4), *Concrete Library International, Japan Society of Civil Engineers*, Vol.3, pp.58-61.

색 인(Symbols)

- A_s : 강재의 단면적(mm²)
- A_c : 콘크리트의 단면적 (mm²)
- D : 콘크리트 단면 직경(mm)
- F_y : 강재의 항복강도(MPa)
- F_u : 강재의 인장강도(MPa)
- KL : 기둥 유효좌굴길이(mm)
- f_{ck} : 콘크리트 압축강도(MPa)
- λ_c : $KL/r_c\sqrt{f_{ck}/\pi^2E_c}$
- r_c : 콘크리트 단면의 회전반경
- ϕ_c : 0.6

요 약 : 본 연구에서는 해결방안으로 내부 콘크리트를 강섬유와 혼입하여 기둥자체의 연성과 인성을 증대시키는 것에 중점을 맞추고 있다. 즉, 강섬유 혼입량과 하중조건에 따른 내력 및 변형능력을 종합적으로 파악하여 강섬유 콘크리트와 용접조립각형 강관기둥의 상호작용을 구조, 내화측면에서 분석해 보고자 한다. 동일한 형상과 경계조건(하중비)에서 강섬유 혼입(0.375%)으로 내화성능은 약 1.1~1.3배 향상된 실험결과를 얻을 수 있었다. 강섬유 콘크리트의 균열 억제 특성은 열 하중에 의한 콘크리트의 변형저항 성능을 증가 시키면서 내화성능의 향상을 가져온 것으로 판단된다. 또한, 내부 리브의 열 변형에도 내부 콘크리트 단면은 건전한 상태로 남아있어 하중 분담능력이 증폭된 결과로 분석됐다.

핵심용어 : 강섬유, 내화성능, 내부 앵커형 각형 기둥, 혼입율, 열 응력
