Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 21, No. 4, pp. 473~480, August, 2009

섬유혼입공법을 적용한 고강도콘크리트 기둥의 재하 내화시험

염광수[1)*] · 전현규[1)] · 김흥열[2)]

[1)]GS건설(주) 기술연구소 연구개발팀 [2)]한국건설기술연구원 화재및설비연구센터

Fire Test of Fiber Cocktail Reinforced High Strength Concrete Columns with Loading

Kwang-Soo Youm,[1)*] Hun-Kyu Jeon,[1)] and Heung-Youl Kim[2)]

[1)]GS E&C Research Institute, GS E&C, Youngin 449-831, Korea

[2)]Fire & Engineering Services Research Center, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 445-861, Korea

ABSTRACT The 180 minutes fire test based on the standard curve of ISO-834 were conducted on three RC column specimens with different constant axial loading ratios to evaluate the fire performance of fiber cocktail (polypropylene+steel fiber) reinforced high strength concrete column. The columns were tested under three loading levels as 40%, 50%, and 61% of the design load. No explosive spalling has been observed and the original color of specimen surface has been changed to light pinkish grey. The maximum axial displacements of three specimens were 1.5~2.2 mm. There was no reduction in load bearing capacity of each specimen exposed to fire and no effect were observed on the fire performance within 61% of the design load. The tendencies of the results with loading, such as the temperature distribution of in concrete and the changes in temperature rise due to the water vaporization in concrete, are very similar to those without loading. The final temperatures of steel rebar after 180 minutes of fire test resulted in 491.4°C for corner rebar, 329.0°C for center rebar, and 409.8°C for total mean of steel rebar. The difference of mean temperature between corner and center rebar was 153.7°C. The tendency of temperature rise in concrete and steel rebar changed after 30~50 minutes from the starting time of the fire test because the heat energy influx into corner rebar is larger than that into center rebar. The cause of decrease in temperature rise was due to the water vaporization in concrete, the lower temperature gradient of the concrete with steel and polypropylene fiber cocktails, the moisture movement toward steel rebars and the moisture clogging.

Keywords : fiber cocktail method, fire test with loading, temperature gradient, explosive spalling

1. 서 론

화재발생시 고강도콘크리트를 사용한 구조물은 폭렬이 발생하여 사용하중상태에 있는 구조물 부재의 하중저항능력을 감소시켜 구조물의 붕괴 또는 심각한 손상을 초래하게 된다.[1)] 이러한 고강도콘크리트의 화재시 폭렬을 막기 위하여 폴리프로필렌(polypropylene) 섬유,[2,3)] 강섬유[4,5)] 또는 2종 이상의 혼합섬유[6-9)]등을 사용한 많은 연구가 수행되어 성능을 입증하였다. 이러한 연구를 통해 콘크리트 재료변수와 보강방법의 성능이 검증되었으나, 재하하중을 고려한 구조적 내화성능에 대한 연구는 많이 진행되지 못하였다.[10,11)] 내화시험시 적용되는 재하하중은 국가별로 상이할 뿐만 아니라 연구자들마다 다르게 적용되고 있어 연구 결과의 비교가 쉽지 않은 실정이다.[12-16)]

이 연구에서는 국내 고강도콘크리트의 내화성능 관리기준[17)]의 온도규정을 만족하기 위해서 제안한 폴리프로필렌섬유와 강섬유를 혼입한 고강도콘크리트 기둥시험체를 제작하여 재하하중 변화에 따른 내화성능을 검증하고 비재하 내화시험 결과[9)]와 비교하였다.

*Corresponding author E-mail : ksyoum@gsconst.co.kr
Received February 9, 2009, Revised March 12, 2009
Accepted April 17, 2009
ⓒ2009 by Korea Concrete Institute

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험 개요

이 연구는 섬유혼입공법을 사용한 설계강도 80 MPa의 고강도콘크리트로 제작한 기둥에 대한 재하하중별 내화실험을 실시하여 내화성능을 평가하기 위한 것으로, 폭렬발생유무, 콘크리트내의 온도구배(temperature gradient)와 온도분포, 종방향철근 중심부의 온도분포, 그리고 시간에 따른 구조물의 연직방향 처짐변화를 측정하였다.

2.2 사용 재료

고강도콘크리트의 폭렬을 방지하기 위해 폴리프로필렌

섬유와 강섬유를 배합강도, 시공성 그리고 경제성을 고려하여 최적의 양을 혼입하였다. 사용된 각각의 섬유 특성을 Table 1에 정리하였다.

섬유혼입 후 목표강도를 80 MPa로 설정하여 Table 2와 같이 배합하였다. 결합재료는 D사의 1종 보통포틀랜드 시멘트 및 실리카퓸과 플라이애쉬를 사용하였다. 잔골재는 비중 2.59, 조립률 2.8의 세척사를 사용하였으며, 최대치수는 20 mm, 비중은 2.65의 굵은골재를 사용하였다.

시험체 제작에 사용된 섬유혼입 고강도콘크리트는 E 레미콘사 공장에서 생산하였으며, 60분 경과 후 슬럼프 플로우는 590 mm, 공기량은 1.7%로 측정되었다.

2.3 실험체 제작

재하 내화시험을 실시하기 위하여 제작한 시험체의 길이는 3,000 mm, 한면의 길이가 350 mm인 정사각형단면으로 3기의 동일한 기둥시험체를 콘크리트구조설계기준(2003)에 따라 제작하였다.[18] 직경 22 mm인 8개의 종방향 철근(longitudinal reinforcement)과 직경 10 mm인 띠철근(tie bar)을 100 mm 간격으로 배근하였으며, 사용된 철근의 항복강도는 420 MPa이다. Fig. 1은 실험체 단면의 정면도와 열전대(thermocouple)의 설치 위치이다. 열전대는 기둥의 중앙단면과 중앙단면에서 각각 상하로 900 mm 떨어진 부분에 설치하였다. Fig. 2는 실험기둥의 단면도이며, Fig. 3은 콘크리트의 온도측정을 위해서 시험체 표면으로부터 30 mm(C1), 50 mm(C2), 60 mm(C3) 그리고 중심부(C4)에 열전대를 설치하였다. Fig. 4는 종방향 철근의 온도를 측정하기 위해 설치한 4기의 열전대의 위치이다.

종방향철근에 설치한 열전대는 Fig. 5와 같이 종방향철근의 내부온도를 측정하기 위하여 직경 3 mm, 깊이 5 mm의 구멍을 뚫어 철근내부에 열전대를 삽입하였다.

2.4 실험 방법

섬유혼입공법을 적용한 80 MPa 고강도콘크리트의 재하 내화시험을 표준화재조건에 노출시킨 내화시험방법

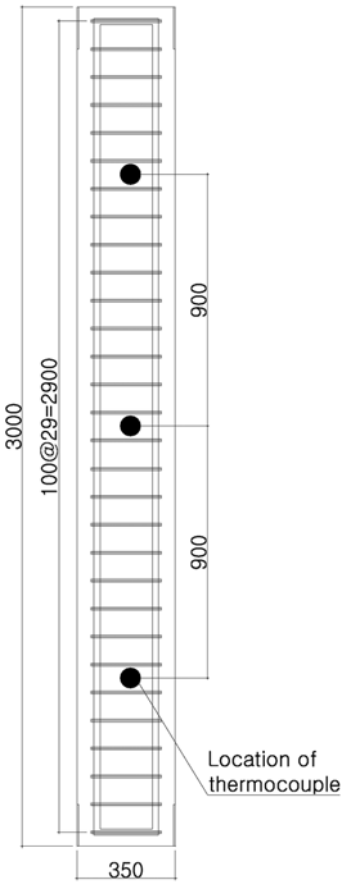


Fig. 1 Elevation of RC columns (mm)

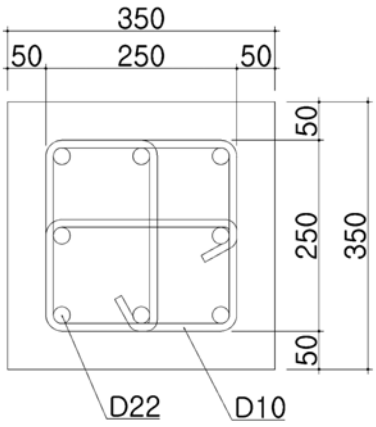


Fig. 2 Cross-section of RC columns (mm)

에 따라 한국건설기술연구원 방내화실험동에서 실시하였다. 가열시 내화로의 가력기(actuator)의 최대 재하하중은 2,940 kN이지만, 장비의 안전관리를 위해 2,500 kN 이하로 재하하중을 제한하였다.

내화재하시험의 재하하중은 국가별로 다르게 규정되어 있다. 국내의 경우 시험의뢰자가 인정된 구조 기준에 규정된 방법에 따라 정하게 되어있다.[12,13] 반면에 해외의

Table 1 Characteristics of fibers

Properties	Polypropylene fiber	Steel fiber
Density (g/cm^3)	0.91	7.8
Diameter	2.0~3.0 μm	0.5 mm
Length (mm)	20	30
Tensile strength (MPa)	640	800
Elastic modulus (GPa)	3.5	200

Table 2 Mix proportions of HPC with fibers (kg/m^3)

W/B (%)	S/a (%)	Water	Cement	Sand	Gravel	Fly ash	Silica fume	Admixture	Polypropylene	Steel fiber
24.9	41.5	169	530	623	899	54	95	14.9	1.2	7

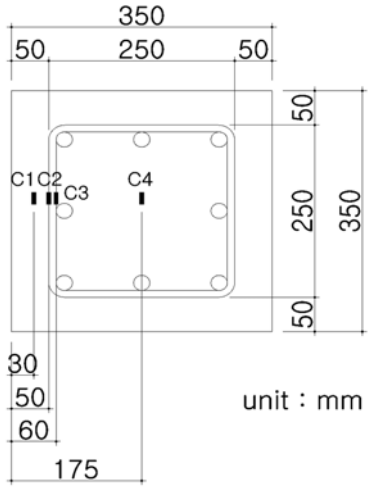


Fig. 3 Position of thermocouples to measure concrete temperature

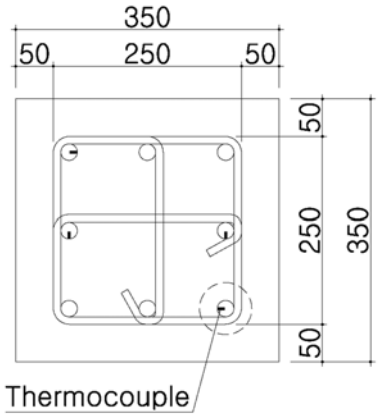


Fig. 4 Position of thermocouples to measure steel (mm)

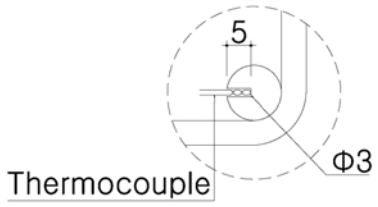


Fig. 5 Details of thermocouples installation for steel rebar (mm)

경우에는 설계하중의 40%를 일정하게 재하[16]하거나, 전단면 유효로 계산한 설계강도의 1/3을 재하한다.[14] 또한 일부 연구에서는 설계하중의 54%를 재하하기도 하였다.[11] 본 연구에서는 재하하중에 따른 내화성능의 검증하기 위하여 하중비(loading ratio)를 변화시키면서 내화시험을 실시하였다. 여기서 하중비란 실험 당일 측정한 콘크리트 강도를 기준으로 계산한 설계축강도를 재하하중으로 나눈 비를 의미한다. 실험체의 설계축강도는 콘크리트 구조설계기준(2003)을 따라서 내화시험 실시재령(48일)에서 측정한 압축강도를 사용하여 계산하였다. 각 시험체에 40%, 50%, 그리고 61%의 설계하중에 해당하는 고정압축하중을 재하한 상태에서 ISO-834 표준화재 가열곡선에 따라 180분간 내화시험을 진행하였다. 각 시험체별로 재하된 고정압축하중(constant axial load)은 Table 3에 정리하였다. 28일 압축강도는 55 MPa이며, 91일 강도는 84 MPa이다. 내화시험은 재령 48일에서 실시하였으며, 이 때 콘크리트 평균압축강도는 60 MPa, 압축강도용 공시체로 측정한 함수율(moisture content)은 4.5%이다. Fig. 6은 내화시험 실시 전 내화로에 설치된 시험체의 모습이다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 하중비변화에 따른 내화성능

180분의 내화시험 후 외관조사를 통해 각 시험체에 폭렬이 발생하지 않았음을 확인하였다. Fig 7(a)와 같이 콘크리트 표면부의 색은 연한 분홍색을 띤 회색으로 변하였으며, 시험체 표면부에는 Fig 7(b)와 같은 균열이 발생하였다. 시험체를 코어링하여 내부상태를 검사한 결과, 피복에서 50 mm까지 변색이 진행되었으며, 50~60 mm 부근을 경계로 내부 콘크리트의 색은 변하지 않았다.

하중비를 40%, 50%, 그리고 61%로 증가시키면 내화시험을 실시한 각 시험체의 최대 연직방향 처짐은 Table 4

Table 3 Different loading levels exposed to ISO-834

Loading levels / Specimen labels	Design axial load (kN)	Applied axial load (kN)	Loading ratio (%)
S40	4026	1610	40
S50		2013	50
S61		2456	61

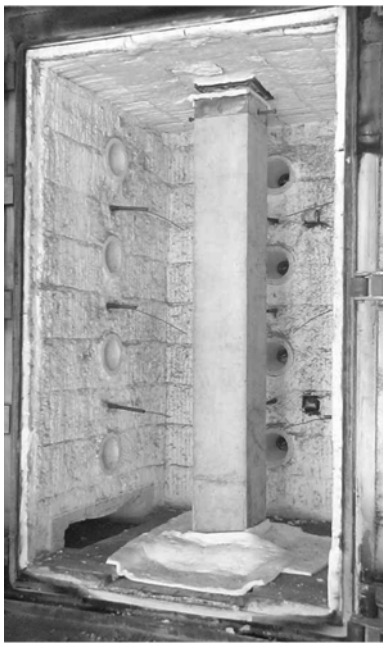
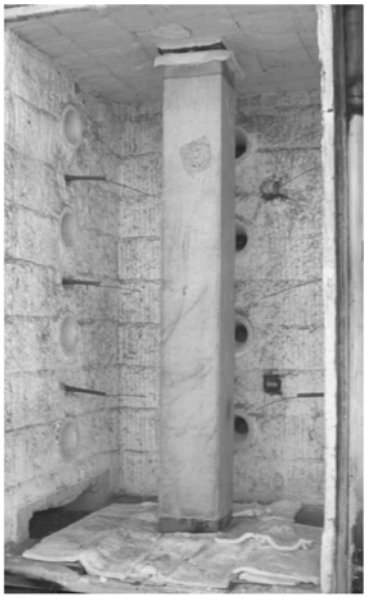


Fig. 6 Fire test set-up of specimen



(a) Specimen S50 after fire test

(b) Surface cracks of specimen S61

Fig. 7 Appearance of specimen after fire test

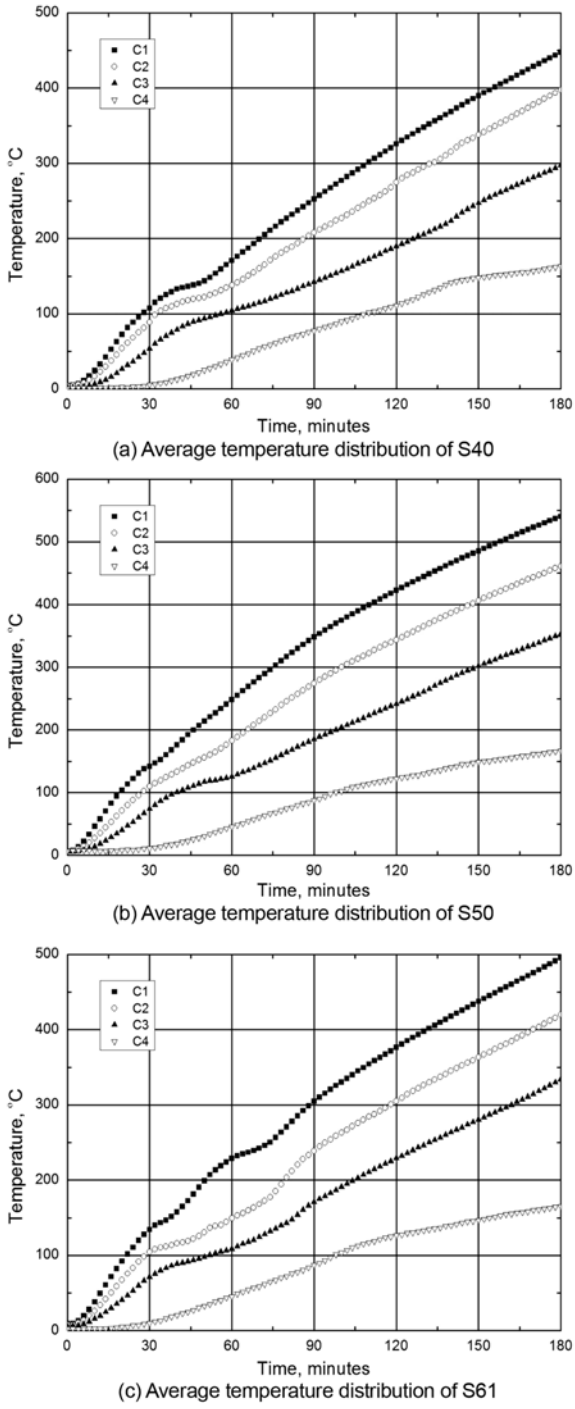
에 정리한 바와 같이 1.5~2.2 mm로, 이는 허용최대변위 30 mm보다 매우 작은 값이다.[13] 즉, 내화시험 중 화재로 인한 시험체의 강도손실이 발생하지 않았다는 점을 의미하며, 61%까지 하중비를 증가시켜도 시험체의 내화성능은 영향을 받지 않았음을 확인하였다. 하중비의 개념을 사용하고 있는 유럽시방서에 따르면 하중비가 60%이하인 경우 내화보강을 하지 않은 보통강도 콘크리트로 제작한 피복 28.6 mm의 기둥시험에서 180분이상의 내화성능을 확보하는 것으로 내화설계하고 있다.[15] 따라서 이 연구에서 실시한 섬유보강 고강도콘크리트의 경우도 하중비가 61% 이하에서 180분 이상의 내화성능을 확보하였으며, 하중비가 더 높아져야 화재시 구조물의 하중저항능력(load bearing capacity)이 영향을 받을 것으로 판단된다.

Table 4 Max. axial displacement in fire

Specimen labels	Maximum axial displacement (mm)
S40	1.5
S50	1.7
S61	2.2

3.2 내부콘크리트의 온도분포

각 기둥시험체의 상단, 중단 그리고 하단에 설치한 열전대의 깊이별 콘크리트 온도를 측정하였다. Fig. 8은 열전대 설치위치에서 깊이별 각 시험체 내부 콘크리트의 평균온도이고, 내화시험 종료후 각 시험체의 내부 콘크리트 온도를 Table 5에 정리하였다. Fig 8(b)에서 S50 시험체는 나머지 시험체에 비하여 내부콘크리트의 온도가 높았고, Fig 8(c)의 S61 시험체의 온도분포가 약간 불규칙하게 측정되었다. 콘크리트 중심부의 온도는 모든 시험체에서 170°C이하로 일정하였다.



(a) Average temperature distribution of S40

(b) Average temperature distribution of S50

(c) Average temperature distribution of S61

Fig. 8 Concrete temperature distributions

내화시험 시간대별 콘크리트 표면의 온도와 깊이별(30 mm, 50 mm, 60 mm, 175 mm) 평균온도와 비재하 내화시험 결과를 Table 6에 정리하였다. 180분간 진행된 내화시험에서 콘크리트 표면에서 30 mm 깊이의 평균온도는 494.7°C 도이며, 깊이 50 mm에서는 427.2°C로 큰 차이가 없지만, 깊이 60 mm에서는 326.5°C로 100°C정도 급감하였으며, 콘크리트 단면중심부(175 mm)의 온도는 165.1°C로 측정되었다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 깊이 50~60 mm 부근까지 변색이 진행된 점과 일치하며 심각한 손상을 입은 피복부분만 보수가 필요하다고 판단된다. 비재하 내화시험의 결과와 동일하게 100~150°C 부근에서 콘크리트의 온도상승이 완만해지는 경향을 보이는데 이러한 현상은 강섬유와 폴리프로필렌섬유를 혼입한 콘크리트의 온도구배가 낮기 때문이다.[19] 두 번째는, 열역학(thermodynamic)적 거동으로, 콘크리트에 온도하중이 재하하게 되면 온도가 상대적으로 낮은 철근주변으로 수분이 이동하게 되고, 수분의 막힘현상(moisture clogging)에 의해 폭렬을 유발하는 내부공극압(internal pore pressure)이 증가한다. 이러한 수분의 이동과 막힘현상으로 철근의 온도가 일시적으로 상승하지 못하는 현상이 일어나게 된다.[20] 폴리프로필렌섬유가 녹은 통로로 수증기가 빠져나가지 못하게 되면 내부공극압에 의해 폭렬이 발생해서 철근의 온도가 수분막힘현상과 기화열에도 불구하고 급격히 상승하게 된다.[9]

섬유혼입 고강도콘크리트의 재하 내화시험에서 구한 온도구배(temperature gradient)를 같은 콘크리트의 비재하 내화시험에서 구한 값과 비교하였고, 아울러 보통강도의 콘크리트 온도구배와 비교하였다. 60분 간격으로 추정한 온도구배를 Table 7에 정리하였고, 열전대 위치별 가열시간에 따른 온도변화를 Fig. 9에 나타냈다. 보통강도 콘크리트 부재를 ISO 834 표준화재곡선으로 내화시험 실시 후 60분이 경과했을 때 표면에서 깊이 16 mm와 42 mm간의 온도구배는 11.5°C/mm이다.[21] 본 연구에서 예측한 60분 가열 후 깊이 30 mm와 50 mm간의 온도구배는 3.0°C/mm로, 3.8배가량 온도전달이 낮게 됨을 확인하였다. 하지만 비재하 내화시험에서 계측한 2.2°C/mm보다는 높았다. 2시간 가열 후에는 비재하 내화시험의 온도구배와 유사하게 3.4°C/mm로 일정하게 유지되었다.

Table 5 Temperate of concrete at 180 min (°C)

Position \ Specimen	S40	S50	S61
Surface	1109.1	1110.9	1109.3
C1 (30 mm)	447.8	540.7	495.6
C2 (50 mm)	397.4	461.3	422.8
C3 (60 mm)	297.2	353.0	329.2
C4 (175 mm)	163.3	166.8	165.1

Table 6 Inner average temperate of concrete (°C)

Time (min) / Position	With loading			Without loading
	60	120	180	180
Surface	947.3	1047.3	1109.8	1108.9
C1 (30 mm)	216.0	374.9	494.7	484.9
C2 (50 mm)	155.8	306.5	427.2	421.3
C3 (60 mm)	111.7	215.7	326.5	340.8
C4 (175 mm)	43.5	120.1	165.1	163.4

3.3 종방향철근의 온도분포

각 기둥시험체의 상단, 중앙, 하단에 설치한 중앙철근 2개와 모서리철근 2개의 평균온도 분포를 Fig. 10에 나타냈으며, 각 시험체별 내화시험 종료후 평균철근온도를 Table 8에 정리하였다.

앞 절에서 S50 시험체의 내부콘크리트 온도가 높았지만, S40 시험체의 모서리철근 온도가 가장 높게 측정되었다. 내화시간대별 최종 평균온도값을 Table 9에 정리하였다. 180분 내화시험 후의 최종온도는 모서리철근이 491.4°C, 중앙철근이 329.0°C이며, 철근의 총 평균온도는 409.8°C이다. 전반적인 온도분포의 경향은 비재하 내화시험과 매우 유사하였다. 모서리철근의 열에너지 유입량이 많기 때문에 중앙철근과의 온도차(153.7°C)가 나타났으며, 가열 후 30~50분 사이에 온도상승추세가 변하였다. 이는 콘크리트 내부 수분이 증발하면서 철근의 온도상승을 낮추었기 때문이다. 모서리철근의 온도상승률은 가열

Table 7 Comparison of temperate gradient (°C/mm)

Time (min)	Fiber cocktail reinforced high strength concrete*		Normal concrete**
	With loading	Without loading	
60	3.0	2.2	11.5
120	3.4	3.1	-
180	3.4	3.2	-

* temperature gradient between 30 mm and 50 mm
**temperature gradient between 16 mm and 42 mm

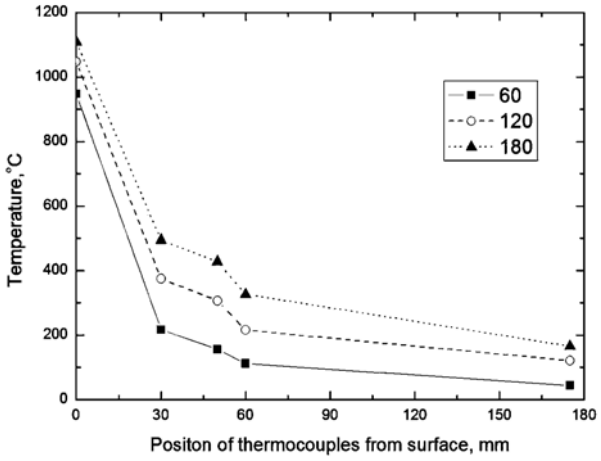
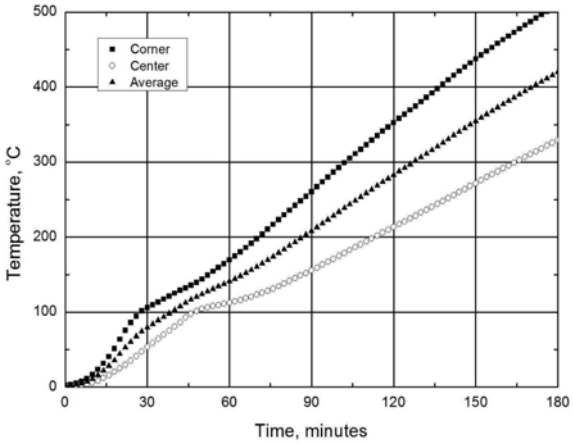
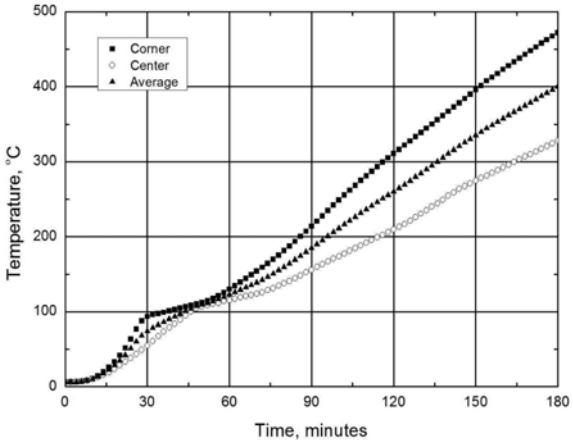


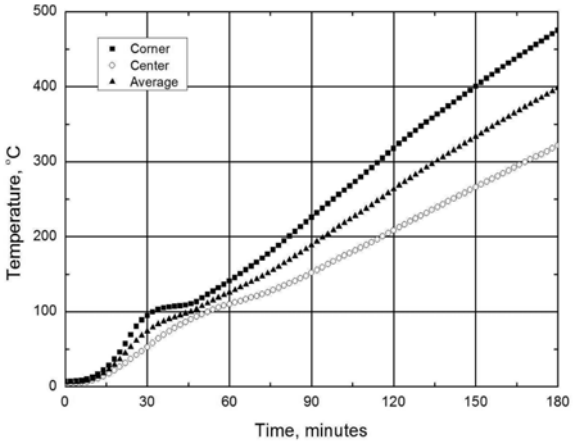
Fig. 9 Concrete temperature at the position of thermocouples from surface



(a) Average temperature distribution of S40



(b) Average temperature distribution of S50



(c) Average temperature distribution of S61

Fig. 10 Steel rebar temperature distributions

Table 8 Average temperate of steel rebar at 180 minutes (°C)

Position \ Specimen	S40	S50	S61
Corner	510.5	472.2	475.2
Center	329.5	328.5	321.5
Mean	420.0	399.6	397.6

후 60분간 2.41°C/min에서 종료시 2.66°C/min까지 상승하였다. 반면에 중앙철근은 1.84~1.96°C/min로 일정하게 온도가 상승하였는데, 비재하 내화시험보다 낮게 측정되었다. 내화시험 종료후 철근의 평균온도는 Table 6에서 깊이 60 mm의 콘크리트 평균온도 326.5°C보다 높은 경향을 보여주고 있다.

Table 9 Total mean temperate of steel rebar (°C)

Time (min) / Position	With loading			Without loading
	60	120	180	180
Corner	149.8	331.7	491.4	488.0
Center	114.1	211.7	329.0	350.9
Total mean	131.9	271.7	409.8	419.5

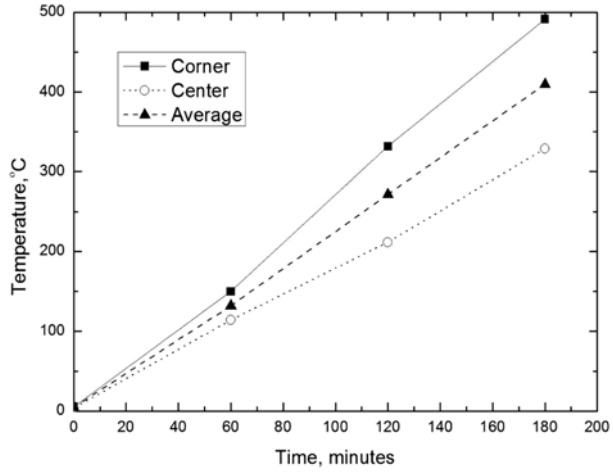


Fig. 11 Total mean temperature of steel bar

4. 결 론

이 연구에서는 폴리프로필렌섬유와 강섬유를 혼입한 고강도콘크리트 기둥의 재하하중비에 따른 내화성능을 검증하기 위하여 3기의 동일한 기둥시험체를 제작하여 각 시험체에 40%, 50%, 그리고 61%의 설계하중에 해당하는 고정압축하중을 재하한 상태에서 ISO-834 표준내화곡선에 따라 180분 내화시험을 실시하였다.

1) 180분의 내화시험 후 외관조사를 통해 각 시험체에 폭렬이 발생하지 않았음을 확인하였다. 콘크리트 표면부의 색은 연한 분홍색을 띤 회색으로 변하였으며, 시험체 표면부에는 균열이 발생하였다. 시험체를 코어링하여 내부상태를 검사한 결과, 피복에서 50 mm까지 변색이 진행되었으며, 50~60 mm 부근을 경계로 내부 콘크리트의 색은 변하지 않았다.
2) 시험체의 최대 연직방향 처짐은 1.5~2.2 mm로, 내화시험 중 화재로 인한 시험체의 강도손실이 발생하지 않았다는 점을 의미하며, 설계하중의 61%이내에서 시험체의 내화성능은 영향을 받지 않았음을 확인하였다.
3) 일부 시험체의 내부 콘크리트의 온도가 높았지만,

깊이별 내부 콘크리트의 온도분포가 비재하 내화시험 결과와 매우 유사하였다. 깊이 50~60 mm 부근까지 변색이 진행된 점과 이 부근에서 온도상승이 완만해진 점 역시 동일하였다. 이러한 원인은 콘크리트 내부 수분 증발로 인한 일시적인 온도억제 현상으로 판단된다.

4) 60분 가열 후 섬유혼입 콘크리트의 온도구배는 보통강도 콘크리트 온도구배보다 3.8배 적은 3.0°C/mm이지만, 비재하 내화시험의 온도구배(2.2°C/mm)보다는 높았다. 하지만, 2시간 가열 후에는 비재하 내화시험의 온도구배와 유사하게 3.4°C/mm로 일정하게 유지되었다.

5) 180분 내화시험 후의 최종온도는 모서리철근이 491.4°C, 중앙철근이 329.0°C이며, 철근의 총 평균온도는 409.8°C이다. 전반적인 온도분포의 경향은 비재하 내화시험과 매우 유사하였다. 모서리철근의 열에너지 유입량이 많기 때문에 중앙철근과의 온도차(153.7°C)가 나타났으며, 가열 후 30~50분 사이에 온도상승추세가 변하였다. 이는 강섬유와 폴리프로필렌섬유를 혼입한 콘크리트의 온도구배가 낮고, 콘크리트 내부수분의 기화열, 그리고 철근으로의 수분이동과 막힘현상으로 철근의 온도가 일시적으로 상승하지 못했기 때문이다. 폴리프로필렌섬유가 녹은 통로로 수증기가 빠져나가지 못하게 되면 내부 공극압에 의해 폭렬이 발생해서 철근의 온도가 수분막힘현상과 기화열에도 불구하고 급격히 상승하게 된다.

6) 모서리철근의 온도상승률은 가열 후 60분간 2.41°C/min에서 종료시 2.66°C/min까지 상승하였다. 반면에 중앙철근은 1.84~1.96°C/min로 일정하게 온도가 상승하였는데, 비재하 내화시험보다 낮게 측정되었다.

참고문헌

1. Ali, F., "Is High Strength Concrete More Susceptible to Explosive Spalling than Normal Strength Concrete in Fire?," *Fire and Materials*, Vol. 26, 2002, pp. 127~130.
2. Nishida, A., Ymazaki, N., Inoue, H., Schneider, U., and Diederichs, U., "Study on the Properties of High-Strength Concrete with Short Polypropylene Fibre for Spalling Resistance," *Proceedings of International Conference on Concrete under Severe Conditions,* CONSEC'95, Vol. 2, Sapporo, Japan, 1995, pp. 1141~50.
3. Atkinson, T., "Polypropylene Fibers Control Explosive Spalling in High-Performance Concrete," *Concrete*, Vol. 38, No. 10, 2004, pp. 69~70.
4. Purkiss, J. A., "Steel Fibre Reinforced Concrete at Elevated Temperatures," *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 6, No. 3, 1984, pp. 179~184.
5. Lie, T. T. and Kodur, V. K. R., "Thermal and Mechanical Properties of Steel-Fibre-Reinforced Concrete at Elevated Temperatures," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 23, 1996, pp. 511~517.
6. Suhaendi, S. L. and Horiguchi, T., "Effect of Short Fibers on Residual Permeability and Mechanical Properties of Hybrid Fibre Reinforced High Strength Concrete after Heat Eposition," *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 2006, pp. 1672~1678.
7. 원종필, 장창일, 이상우, 김홍열, 김완영, "하이브리드 섬유보강 고강도콘크리트 기둥부재의 내화성능," 콘크리트학회 논문집, 20권, 6호, 2008, pp. 827~832.
8. 김홍열, 채한식, 전현규, 염광수, "Fiber Cocktail을 혼입한 고강도콘크리트의 고온시 압축강도 특성 및 모델 제시에 관한 실험적 연구," 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 2007, pp. 605~608.
9. 염광수, 전현규, 김홍열, "섬유혼입공법을 적용한 고강도 콘크리트 기둥의 비재하 내화시험," 콘크리트학회 논문집, 21권, 4호, 2009, pp. 465~471.
10. Ali, F., Nadjai, A., Silcock, G., and Abu-Tair, A., "Outcomes of a Major Research on Fire Resistance of Concrete Columns," *Fire Safety Journal*, Vol. 39, 2004, pp. 433~445
11. Kodur, A. K. R., Wang, T. C., and Cheng, F. P., "Predicting the Fire Resistance Behavior of High Strength Concrete Columns," *Cement & Concrete Composites*, Vol. 26, 2004, pp. 141~153.
12. 한국산업규격, "건축 부재의 내화시험방법-일반요구사항 KS F 2257-1," 한국표준협회, 2005, 9 pp.
13. 한국산업규격, "건축 부재의 내화시험방법-기둥의 성능조건 KS F 2257-7," 한국표준협회, 2006, 8 pp.
14. Personal Communication with 豊田 康二, 日本建築總合試驗所, 2007.
15. BSI, "Eurocode 2 Part 1.2 Design of concrete structures; General Rules-Structural Fire Design," BSI, London, 2002, 102 pp.
16. "BS8110: Structural Concrete; Use of concrete," UK, 1997.
17. 국토해양부 고시, "고강도콘크리트 기둥·보의 내화성능 관리기준," 제2008-334호, 2008, pp. 1~8.
18. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계 기준," 한국콘크리트학회, 2003, pp. 121~122.
19. 원종필, 장창일, 이상우, 김홍열, 김완영, "하이브리드 섬유보강 고강도콘크리트 기둥부재의 내화성능," 콘크리트학회 논문집, 20권, 6호, 2008, pp. 827~832.
20. Chung, J. H. and Consolazio, G. R, "Numerical Modeling of Transport Phenomena in Reinforced Concrete Exposed to Elevated Temperatures," *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 2005, pp. 597~608.
21. Concrete Center, *Concrete and Fire*, The Concrete Center, 2004, 4 pp.

요 약 폴리프로필렌섬유와 강섬유를 혼입한 고강도콘크리트 기둥의 재하하중비에 따른 내화성능을 검증하기 위하여 3기의 동일한 기둥시험체를 제작하여 각 시험체에 40%, 50%, 그리고 61%의 설계하중에 해당하는 고정압축하중을 재하한 후 ISO-834 표준내화곡선에 따라 180분간 내화시험을 실시하였다. 폭렬은 발생하지 않았으며, 표면부의 색은 분홍색을 띤 회색으로 변했다. 시험체의 최대 연직방향 처짐은 1.5~2.2 mm로, 내화시험 중 화재로 인한 시험체의 강도손실이 발생하지 않았으며, 설계하중의 61%이내에서 시험체의 내화성능은 영향을 받지 않았다. 깊이별 내부 콘크리트의 온도분포, 콘크리트 내부 수분 증발로 인한 온도상승이 변한 점 등 전반적으로 비재하 내화시험 결과와 매우 유사하였다. 180분 내화시험 후의 최종온도는 모서리철근이 491.4°C, 중앙철근이 329.0°C이며, 철근의 총 평균온도는 409.8°C이다. 전반적인 온도분포의 경향은 비재하 내화시험과 매우 유사하였다. 모서리철근의 열에너지 유입량이 많기 때문에 중앙철근과의 온도차(153.7°C)가 나타났으며, 가열 후 30~50분 사이에 온도상승추세가 변하였다. 이는 강섬유와 폴리프로필렌섬유를 혼입한 콘크리트의 온도구배가 낮고, 철근으로의 수분이동과 내부 수분의 막힘현상, 그리고 수분의 기화열 때문이다.

핵심용어 : 섬유혼입공법, 재하 내화시험, 온도구배, 폭렬