



섬유혼입공법을 적용한 고강도콘크리트 기둥의 비재하 내화시험

염광수^{1)*} · 전현규¹⁾ · 김흥열²⁾

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

Fire Test of Fiber Cocktail Reinforced High Strength Concrete Columns without Loading

Kwang-Soo Youm,^{1)*} Hun-Kyu Jeon,¹⁾ and Heung-Youl Kim²⁾

¹⁾Research Development Team, 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 To prevent the explosive spalling of the high strength concrete and control the rise of temperature in the steel rebar during fire, a fiber cocktail method has been proposed simultaneously with the use of polypropylene and steel fiber. After applying the fiber cocktail (polypropylene and steel fibers) into the mixture of high strength concrete with a compressive strength of between 40 and 100 MPa and evaluating the thermal properties at elevated temperatures, the fire test was carried out on structural members in order to evaluate the fire resistance performance. Two column specimens were exposed to the fire without loading for 180 minutes based on the standard curve of ISO-834. No explosive spalling has been observed and the original color of specimen surface was changed to light pinkish grey. The inner temperature of concrete dropped rapidly starting from 60mm deep. After 60 minutes of exposure to the fire, the temperature gradient of fiber cocktail reinforced high strength concrete was measured as 2.2°C/mm, which is approximately 5 times less than that of normal concrete. The final temperatures of steel rebar after 180 minutes of fire test resulted in 488.0°C for corner rebar, 350.9°C for center rebar, and 419.5°C for total mean of steel rebar. The difference of mean temperature between corner and center rebar was 137.1°C. The tendency of temperature rise in concrete and steel rebar changed between 100°C and 150°C. 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 without loading, temperature gradient, explosive spalling

1. 서 론

고강도콘크리트는 고온환경에서의 거동이 일반강도의 콘크리트와 다르며, 특히 화재시 일어나는 폭발(exploding spalling)은 고강도콘크리트의 가장 심각한 문제점으로 대두되었다. 폭발은 화재시 콘크리트 피복의 빠른 손실을 일으켜 내부콘크리트와 철근으로의 열전달률(rate of heat transmission)을 높여서 철근과 콘크리트의 온도를 상승시킨다. 이는 사용하중상태에 있는 구조물 부재의 하중 저항능력을 감소시켜 구조물의 붕괴 또는 심각한 손상을 초래하게 된다.¹⁾ 50 MPa 이상의 고강도콘크리트 사용이 빈번한 국내의 경우도 이에 대한 대책이 필요하게 되어 고강도콘크리트의 내부 종방향철근에 대하여 온도로 내화성능을 평가하는 관리기준을 신설하게 되었다.²⁾ 이 기

준을 만족하기 위해서는 고강도콘크리트의 폭발억제 뿐만 아니라 내부철근 온도의 상승을 억제해야 한다. 이러한 고강도콘크리트의 화재시 폭발을 막기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있으며, 폴리프로필렌(polypropylene)섬유^{3,4)} 또는 강섬유⁵⁻⁷⁾를 사용한 많은 연구가 수행되어 폭발억제성능을 입증하였다.

선행연구에서 폭발억제와 철근의 온도상승을 막기 위하여 폴리프로필렌섬유와 강섬유를 동시에 사용하는 섬유혼입공법을 제안하였고, 이 공법을 구조부재에 적용하기 위한 사전단계로써, 40~100 MPa의 다양한 고강도콘크리트 배합에 적용한 시험체를 제작하여 가열재하방법으로 압축강도, 탄성계수, 비열 등의 열적특성을 평가·분석하였다.⁸⁻¹¹⁾

이에 대한 후속연구인 본 연구에서는 섬유혼입공법을 적용한 고강도콘크리트 기둥에 대한 비재하 내화시험을 실시하여 콘크리트내의 온도구배(temperature gradient)와 온도분포, 종방향철근 중심부의 온도분포, 그리고 폭발발생여부 등의 내화성능을 평가하고자 한다.

*Corresponding author E-mail : ksyoun@gconst.co.kr

Received February 9, 2009, Revised March 31, 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 비재하 내화실험을 실시하여 내화성능을 평가하기 위한 것으로, 콘크리트내의 온도구배(temperature gradient)와 온도분포, 종방향철근 중심부의 온도분포 등을 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 실리카퓌름과 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 플로우 는 590 mm, 공기량은 1.7%로 측정되었다.

2.3 실험체 제작

비재하 내화시험을 실시하기 위하여 제작한 시험체의 길이는 3,000 mm, 한면의 길이가 350 mm인 정사각형 단면으로 2기의 동일한 기둥시험체를 콘크리트구조설계기준(2003)에 따라 제작하였다.¹²⁾ 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 시

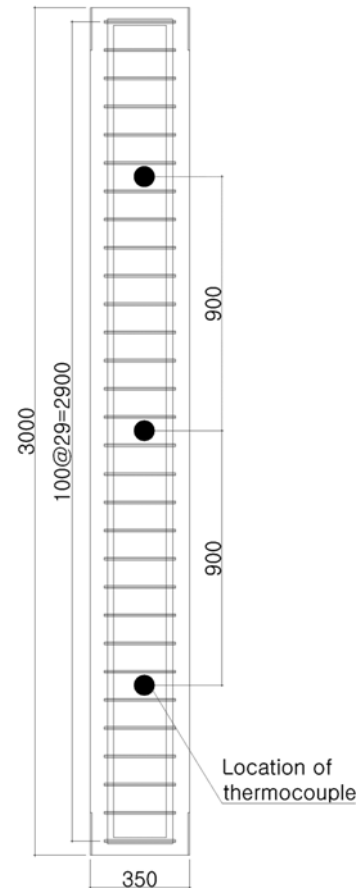
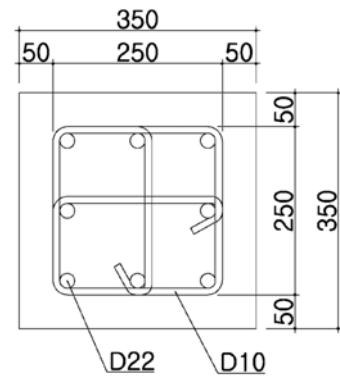


Fig. 1 Elevation of RC columns (mm)



unit : mm

Fig. 2 Cross-section of RC columns

Table 1 Properties of fibers

Items	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/m³)

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

험체 표면으로부터 30 mm(C1), 50 mm(C2), 60 mm(C3) 그리고 중심부(C4)에 열전대를 설치하였다. Fig. 4는 종방향철근의 온도를 측정하기 위해 설치한 4기의 열전대의 위치이다.

종방향철근에 설치한 열전대는 Fig. 5와 같이 종방향

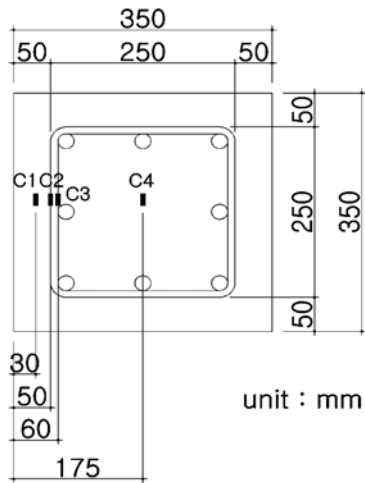


Fig. 3 Position of thermocouples to measure concrete temperature

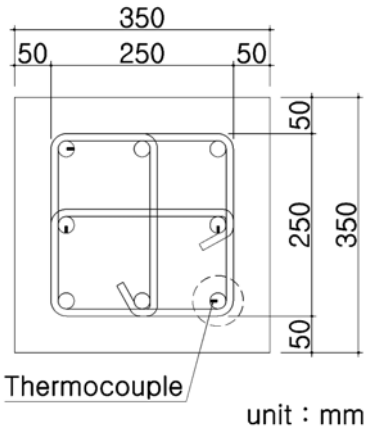


Fig. 4 Position of thermocouples to measure steel rebar temperature

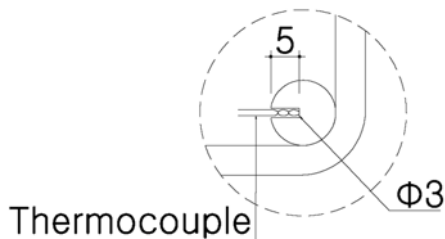


Fig. 5 Details of thermocouples installation for steel rebar (mm)

철근의 내부온도를 측정하기 위하여 직경 3 mm, 깊이 5 mm의 구멍을 뚫어 철근내부에 열전대를 삽입하였다.

2.4 실험 방법

섬유혼입공법을 적용한 80 MPa의 고강도콘크리트의 비재하 내화시험을 표준화재조건에 노출시킨 내화시험방법 (KS F 2257-1)에 따라 한국건설기술연구원 방내화실험실에서 실시하였다. ISO-834 표준화재 가열곡선을 적용하

였으며, 180분간 비재하 내화시험을 실시하였다. 28일 압축강도는 55 MPa이며, 91일 강도는 84 MPa이다. 내화시험은 재령 45일에서 실시하였으며, 이 때 콘크리트의 압축강도는 60 MPa, 압축강도용 공시체로 측정된 함수율 (moisture content)은 4.5%이다. Fig. 6은 내화시험 실시 전 내화로에 설치된 시험체의 모습이다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 내화성능

180분의 내화시험 후 외관조사를 통해 시험체에 폭렬이 발생하지 않았음을 확인하였다. 따라서, 고강도콘크리트의 폭렬 억제는 폴리프로필렌섬유의 혼입여부가 중요한 요인으로 기존 연구 결과^{3,4)}와 일치하였다. Fig. 7과 같이 1,100°C까지 가열된 콘크리트 표면부의 색은 연한 분홍색을 띤 회색으로 변화하였으며, 시험체를 코어링하여 내부상태를 검사하였다. 400°C이상까지 가열된 표면에서 50 mm의 피복부분은 점점 연한 분홍색이 사라지고 회색이 짙어지는 경향을 보였다. 50~60 mm 부근을 경계로 170°C이하로 가열된 내부 콘크리트는 본래의 회갈색에서 변하지 않았다.

3.2 내부 콘크리트의 온도분포

기둥시험체의 상단, 중단 그리고 하단에 설치한 열전대의 깊이별 콘크리트 온도를 측정하였다. Fig. 8은 열전대 설치위치에서 깊이별 콘크리트의 평균온도이다. 180분간 진행된 내화시험에서 콘크리트 표면에서 30 mm 깊이의 평균온도는 484.9°C이며, 깊이 50 mm에서는 421.3°C

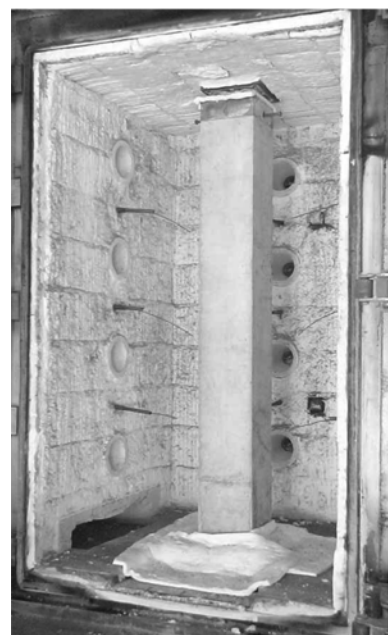
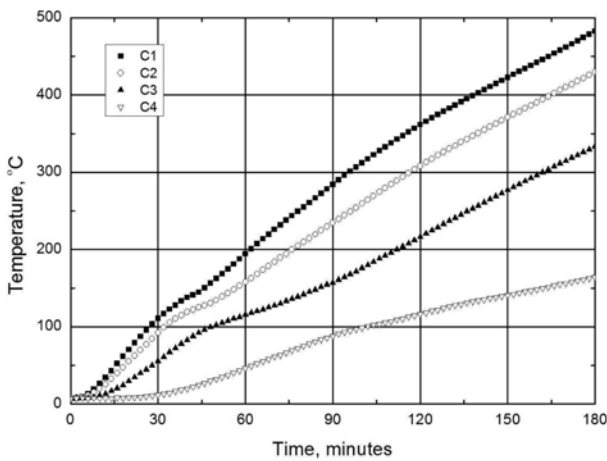


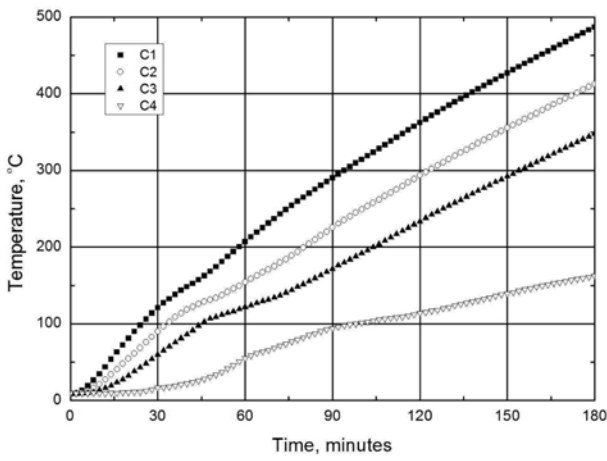
Fig. 6 Fire test set-up of specimen



Fig. 7 Appearance of specimen after fire test



(a) Average temperature distribution of column-1



(b) Average temperature distribution of column-2

Fig. 8 Concrete temperature distribution

로 큰 차이가 없지만, 깊이 60 mm에서는 340.8°C로 80°C 정도 급감하였으며, 콘크리트 단면중심부(175 mm)의 온도는 163.4°C로 측정되었다. 따라서, 깊이 50~60 mm 부

근까지 변색이 진행되고 내부 콘크리트는 본래의 회갈색을 띄었으며, 콘크리트의 온도가 200°C 이하까지 상승하였기 때문에 콘크리트의 역학적 강도를 발현하는 CSH 겔의 탈수가 일어나지 않았다.¹³⁾ 따라서, 깊이 60 mm 이내의 내부 콘크리트는 화재시험 후 강도손실이 미비할 것으로 추정되며, 심각한 손상을 입은 깊이 50 mm의 피복부분만 보수가 필요하다고 판단된다. 또한 100~150°C 부근에서 온도상승이 완만해지는 경향을 보이는데 이는 콘크리트 내부 수분이 증발하면서 발생하는 기화열에 의해 온도상승을 낮추었다. 내화시험 시간대별 콘크리트 표면의 온도와 깊이별(30 mm, 50 mm, 60 mm, 175 mm) 평균온도를 Table 3에 정리하였다.

섬유혼입 콘크리트의 온도구배(temperature gradient)를 보통강도의 콘크리트 온도구배와 비교하였다. 보통강도 콘크리트 부재를 ISO 834 표준화재곡선으로 내화시험 실시 후 1시간이 경과했을 때 표면에서 깊이 16 mm와 42 mm 간의 온도구배는 11.5°C/mm이다.¹⁴⁾ 이 연구에서 예측한 1시간 가열 후 깊이 30 mm와 50 mm 간의 온도구배는 2.2°C/mm로, 5.2배가량 온도전달이 낮게 됨을 확인하였다. 2시간 가열 후에는 3.1°C/mm로 증가하였으며, 3시간 가열 후에는 3.2°C/mm로 일정하게 유지되었다. 60분 간격으로 추정한 온도구배를 Table 4에 정리하였고, 열전대 위치별 가열시간에 따른 온도변화를 Fig. 9에 나타냈다.

3.3 종방향철근의 온도분포

각 기둥시험체의 상단, 중앙, 하단에 설치한 중앙철근 2개와 모서리철근 2개의 평균온도 분포를 Figs. 10, 11에 나타내고 시간별 온도값을 Table 5에 정리하였다. 180분 내화시험 후의 최종온도는 모서리철근이 488.0°C, 중앙철근이 350.9°C이며, 철근의 총 평균온도는 419.5°C이다. Fig. 12의 평균온도분포를 비교해 보면, 모서리철근과 중앙철근의 평균온도차가 137.1°C로 상당히 크다는 점을 확인할 수 있다. 모서리철근과 중앙철근은 가열 후 60분

Table 3 Inner average temperate of concrete (°C)

Position	Time (min)		
	60	120	180
Surface	946.4	1,049.4	1,108.9
C1 (30 mm)	200.8	361.9	484.9
C2 (50 mm)	156.2	300.8	421.3
C3 (60 mm)	118.6	225.2	340.8
C4 (175 mm)	50.9	115.1	163.4

Table 4 Temperate gradient* (°C/mm)

Time (min)	Temperature gradient	Normal concrete
60	2.2	11.5**
120	3.1	-
180	3.2	-

* temperature gradient between 30 mm and 50 mm

**temperature gradient between 16 mm and 42 mm

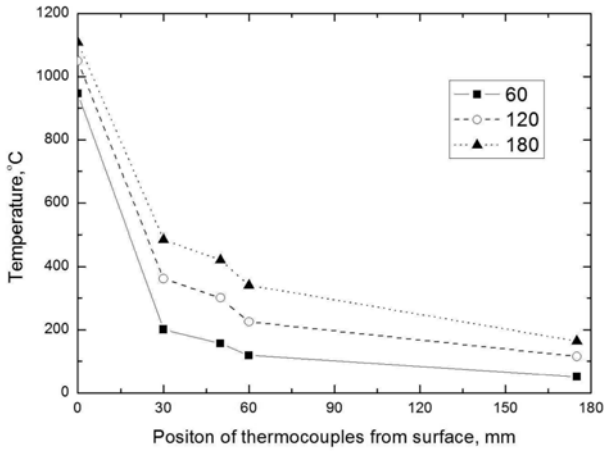


Fig. 9 Concrete temperature at the position of thermocouples from surface

까지는 2.04~2.28 °C/min으로 온도상승률이 비슷하다. 60 분 이후 부터 실험 종료시까지 중앙철근의 온도상승률은 1.81~2.0 °C/min으로 일정하지만, 모서리철근의 온도상승률은 2.75~3.10 °C/min로 중앙철근보다 1.5배 빠른 것으로 판단된다.

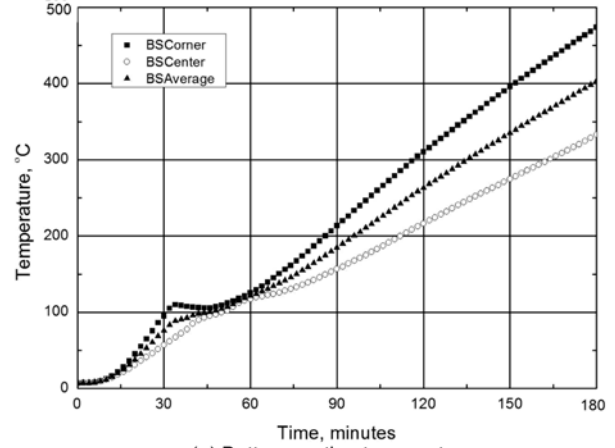
모서리철근의 온도가 높은 이유는 한쪽 면에서 열에너지가 유입되는 중앙철근보다 열에너지가 양쪽면에서 동시에 유입되었기 때문에 중앙철근의 온도상승이 지연되었다고 판단된다. 내화시험 종료 후 철근의 평균온도는 Table 3에서 깊이 60 mm의 콘크리트 평균온도 340.8°C 보다 높은 경향을 보여주고 있다.

특히 Figs. 10, 11의 온도분포에서 특이한 점은 가열 후 30~50분 사이에 온도상승추세가 급격히 낮아지는 경향을 보인다. 이러한 현상은 강섬유와 폴리프로필렌섬유를 혼입한 콘크리트의 온도구배가 낮기 때문이다.¹⁵⁾ 두 번째 이유로는, 열역학(thermodynamic)적 거동으로, 콘크리트에 온도하중이 재하하게 되면 온도가 상대적으로 낮은 철근주변으로 수분이 이동하게 되고, 수분의 막힘현상(moisture clogging)에 의해 폭발을 유발하는 내부공극압(internal pore pressure)이 증가한다. 이러한 수분의 이동과 막힘현상으로 철근의 온도가 일시적으로 상승하지 못하는 현상이 일어나게 된다.¹⁶⁾ 폴리프로필렌섬유가 녹은 통로로 수증기가 빠져나가지 못하게 되면 내부공극압에 의해 폭발이 발생해서 철근의 온도가 수분막힘현상과 기화열에도 불구하고 급격히 상승하게 된다.

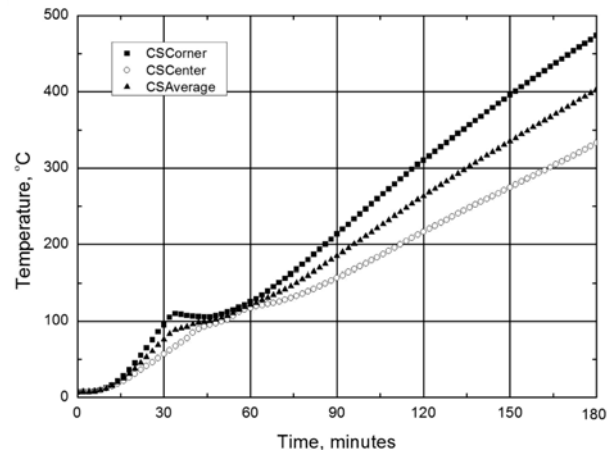
4. 결 론

본 연구에서는 폴리프로필렌섬유와 강섬유를 혼입한 고강도콘크리트 기둥의 내화성능을 검증하기 위하여 2기의 동일한 기둥시험체를 제작하여 ISO 834 표준내화곡선에 따라 180분 비재하 내화시험을 실시하였다.

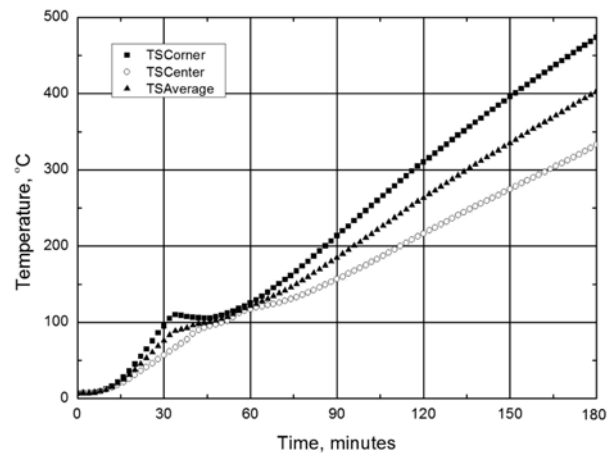
- 1) 내화시험 후 각 시험체에 폭발은 발생하지 않았으며, 1,100°C까지 가열된 콘크리트 표면부의 색은 연한 분홍색을 띤 회색으로 변화하였다. 400°C 이상까



(a) Bottom section temperature



(b) Center section temperature

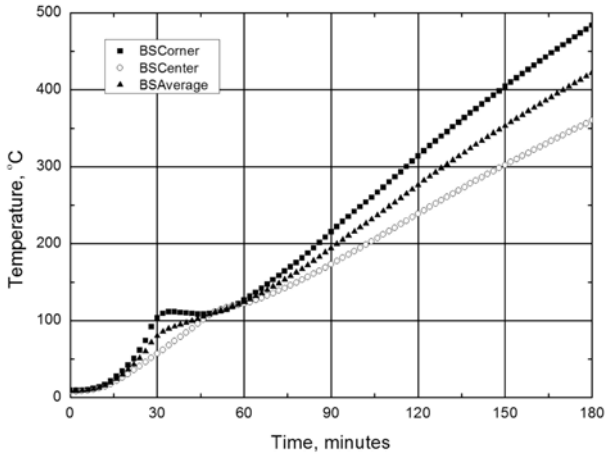


(c) Top section temperature

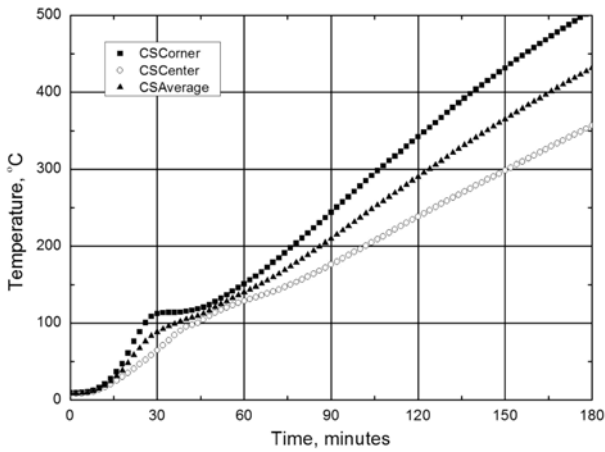
Fig. 10 Steel rebar temperature distribution of column-1

지 가열된 표면에서 50 mm의 피복부분은 점점 연한 분홍색이 사라지고 회색이 짙어졌으며, 50~60 mm 부근을 경계로 170°C 이하로 가열된 내부 콘크리트는 본래의 회갈색에서 변하지 않았다.

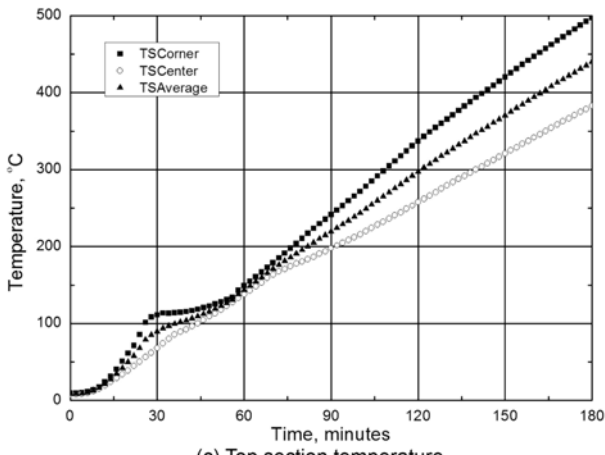
- 2) 콘크리트 내부에 설치한 열전대에서 측정된 온도분포에서, 깊이 60 mm부터 온도가 급감하였다. 또한, 깊이 50~60 mm 부근까지 변색이 진행되고 내부 콘크리트는 본래의 회갈색을 띠고 있으며, 콘크리트의 온도가 200°C 이하까지 상승하였기 때문에 콘크리트의 역학적 강도를 발현하는 CSH 겔의 탈수가



(a) Bottom section temperature



(b) Center section temperature



(c) Top section temperature

Fig. 11 Steel rebar temperature distribution of column-2

Table 5 Temperature of steel rebar (°C)

Specimen	Corner			Center			Section average		
	60	120	180	60	120	180	60	120	180
1	131.7	315.3	480.1	115.7	217.0	335.2	123.7	266.1	407.6
2	142.4	331.1	495.9	129.6	245.0	366.7	135.9	288.1	431.3
Total mean	137.1	323.2	488.0	122.6	231.0	350.9	129.8	277.1	419.5

일어나지 않았다. 따라서 깊이 60 mm 이내의 콘크리트는 강도손실이 미비할 것으로 추정된 반면에

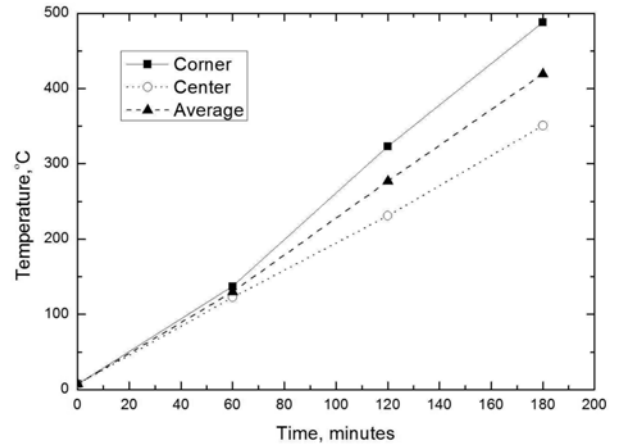


Fig. 12 Total mean temperature of steel bar

50 mm까지의 피복부분은 화재 후 보수가 필요한 것으로 판단된다.

- 60분 가열 후 섬유혼입 콘크리트의 온도구배는 보통강도 콘크리트 온도구배 (11.5°C/mm)보다 5배 적은 2.2°C/mm로 측정되었다. 120분 이후의 온도구배는 3.1°C/mm로 일정하게 유지되었다.
- 180분 내화시험 후의 최종온도는 모서리철근이 488.0°C, 중앙철근이 350.9°C이며, 철근의 총 평균온도는 419.5°C이다. 모서리철근과 중앙철근의 평균온도차는 137.1°C로 상당히 크게 나타났다. 모서리철근과 중앙철근의 분당 온도상승률은 가열 후 60분까지 2.1°C/min으로 비슷하지만, 60분 이후부터 모서리철근은 2.75~3.10°C/min으로 높아진 반면에 중앙철근은 1.81~2.0°C/min으로 유지되었다. 이는 모서리철근의 양쪽 면에서 유입된 열에너지와 혼입된 강섬유에 의한 열에너지 흡수로 이러한 온도차가 발생한 것으로 판단된다.
- 가열 후 100~150°C부근에서 콘크리트와 철근의 온도상승추세가 변하는데 이는 강섬유와 폴리프로필렌섬유를 혼입한 콘크리트의 온도구배가 낮고, 콘크리트 내부수분의 기화열, 그리고 철근으로의 수분이동과 막힘현상으로 철근의 온도가 일시적으로 상승하지 못하는 때문이다. 폴리프로필렌섬유가 녹은 통로로 수증기가 빠져나가지 못하게 되면 내부공극압에 의해 폭발이 발생해서 철근의 온도가 수분막힘현상과 기화열에도 불구하고 급격히 상승하게 된다.

참고문헌

- 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.
- 국토해양부 고시, 고강도콘크리트 기동·보의 내화성능 관리기준, 제2008-334호, 2008, pp. 1~8.

3. 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.
4. Atkinson, T., "Polypropylene Fibers Control Explosive Spalling in High-Performance Concrete," *Concrete*, Vol. 38, No. 10, 2004, pp. 69~70.
5. 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.
6. 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.
7. 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 Exposure," *Cement and Concrete Research*, Vol 36, 2006, pp. 1672~1678.
8. 김홍열, 채한식, 전현규, 염광수, "Fiber Cocktail을 혼입한 고강도콘크리트의 고온시 압축강도 특성 및 모델 제시에 관한 실험적 연구," 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 19권, 2호, 2007, pp. 605~608.
9. 김홍열, 채한식, 전현규, 염광수, "Fiber Cocktail을 혼입한 고강도콘크리트의 고온시 탄성계수 특성 및 모델 제시에 관한 실험적 연구," 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 19권, 2호, 2007, pp. 609~612.
10. 김홍열, 채한식, 전현규, 염광수, "Fiber Cocktail을 혼입한 고강도콘크리트의 고온시 변형특성 및 모델 제시에 관한 실험적 연구," 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 19권, 2호, 2007, pp. 877~880.
11. Poon, C. S., Shui, Z. H., and Lam, L., "Compressive Behavior of Fiber Reinforced High-Performance Concrete Subjected to Elevated Temperatures," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 12, 2004, pp. 2215~2222.
12. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계 기준," 한국콘크리트학회, 2003, pp. 121~122.
13. Yüzer, N., Aköza, F., and Öztürkb, L., "Compressive Strength-Color Change Relation in Mortars at High Temperature," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 10, 2004, pp. 1803~1807.
14. Concrete Center, *Concrete and Fire*, The Concrete Center, 2004, 4 pp.
15. 원종필, 장창일, 이상우, 김홍열, 김완영, "하이브리드 섬유보강 고강도콘크리트 기둥부재의 내화성능," 콘크리트학회 논문집, 20권, 6호, 2008, pp. 827~832.
16. 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.

요 약 화재시 고강도콘크리트의 폭발현상을 막고 내부철근 온도의 상승을 억제하기 위하여 폴리프로필렌섬유와 강섬유를 동시에 사용하는 섬유혼입공법을 제안하였다. 섬유혼입공법을 40~100 MPa 고강도콘크리트 배합에 적용하여 가열재하방법으로 열적특성을 평가한 후 내화성능을 평가하기 위하여 구조부재에 내화시험을 실시하였다. 2기의 기둥시험체를 제작하여 ISO 834 표준내화곡선에 따라 180분 비재하 내화시험을 실시하였다. 폭발은 발생하지 않았으며, 표면부의 색은 분홍색을 띤 회색으로 변했다. 깊이 60 mm부터 내부 콘크리트의 온도가 급감하였으며, 60분 가열 후 온도구배는 보통콘크리트보다 5배 적은 2.2°C/mm로 측정되었다. 180분 내화시험 후의 최종온도는 모서리철근이 488.0°C, 중앙철근이 350.9°C이며, 철근의 총 평균온도는 419.5°C이다. 모서리철근과 중앙철근의 평균온도차는 137.1°C였다. 가열 후 100~150°C부근에서 콘크리트와 철근의 온도상승추세가 변하는데 이는 강섬유와 폴리프로필렌섬유를 혼입한 콘크리트의 온도구배가 낮고, 철근으로의 수분이동과 내부 수분의 막힘현상, 그리고 수분의 기화열 때문이다.

핵심용어 : 섬유혼입공법, 비재하 내화시험, 온도구배, 폭발