



고온에서 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 성능

원종필^{1)*} · 박경훈¹⁾ · 박찬기²⁾

¹⁾건국대학교 사회환경시스템공학과 ²⁾공주대학교 지역건설공학전공

Performance of Hybrid Fiber Reinforced Concrete at Elevated High Temperature

Jong-Pil Won,^{1)*} Kyung-Hoon Park,¹⁾ and Chan-Gi Park²⁾

¹⁾Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

²⁾Dept. of Rural Construction Engineering, Kongju National University, Yesan 340-702, Korea

ABSTRACT This study evaluated the mechanical performance, shrinkage crack and fire resistance of hybrid fiber (blended steel and polypropylene fiber with different diameter and length) reinforced concrete at elevated temperature. The compressive, splitting tensile, flexural, plastic shrinkage test were conducted to the evaluate the mechanical properties and the resistance of shrinkage crack. Also, the surface investigation, reduction rate of mass and residual compressive test were performed to evaluate the physical and mechanical properties after 400°C, 600°C, 800°C and 1,200°C exposure. Test results showed that the hybrid fiber reinforced concrete improved the mechanical performance, shrinkage crack and fire resistance. The reduction of performance with a temperature change were high at the temperature of 600°C~800°C.

Keywords : mechanical properties, fire resistance, hybrid fiber reinforced concrete, polypropylene fiber, steel fiber

1. 서 론

콘크리트의 성능을 극대화하고자 매트릭스에 섬유의 종류나 길이 및 형상이 다른 2종 이상의 섬유를 함께 혼입한 하이브리드 섬유보강 콘크리트에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하이브리드 섬유보강 콘크리트는 섬유의 종류나 길이 및 형상을 달리하여 조합한 후 콘크리트 매트릭스에 혼입시킴으로서 각기 다른 섬유가 역할을 분담하여 단일 섬유보강 콘크리트에서는 얻을 수 없는 여러 가지 복합적인 효과를 발휘한다. 하이브리드 섬유보강의 경우 섬유수 증가에 따른 섬유 분산 및 섬유 배열 간격이 조밀하게 됨으로서 섬유와 매트릭스간의 부착면적이 증가하여 단일섬유보강보다 휨인성지수 값이 혼입률의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이며 단일섬유보강보다 하이브리드 섬유보강 콘크리트가 상대적으로 더 많은 에너지를 흡수하게 된다. 일반적으로 하이브리드 섬유보강 콘크리트는 도출하고자 하는 보강 목적에 따라 섬유의 하이브리드 조합을 결정하게 된다. 하이브리드 섬유보강 콘크리트에 대한 기존 연구는 6 mm의 마이크로 강섬유에 30 mm의 매크로 강섬유를 혼입시켰을 경우 균열제어능력 향상 효과를 얻는 것으로 나타났다.¹⁾ Qian 등은 12 mm의 길이와 18 μm의 직경인 모노필라멘트 형태의 폴리프로필

렌 섬유와 길이가 각각 30 mm, 40 mm이고 직경이 0.3 mm인 후크형 강섬유 그리고 길이가 6 mm이며 직경은 0.1 mm인 직선형 강섬유에 대해 하이브리드 조합을 연구하였다. 연구에서는 마이크로 섬유는 압축강도에 큰 영향을 미치고 매크로 섬유는 할렬 인장강도에 영향을 미치며 마이크로 섬유는 미세균열의 증진을 제어하는 가교 역할을 하고 매크로 섬유는 미세균열의 성장을 억제하는 역할을 하였다.²⁾ 또한 Yao 등은 적은 섬유의 혼입률 (총 섬유의 혼입률 0.5%)에 대한 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 역학적인 특성에 대해 연구하였다. 시험 결과 탄소섬유와 강섬유를 하이브리드한 섬유보강 콘크리트가 강도와 휨인성의 측면에서 가장 효과적이었다.³⁾ 상기와 같이 2종의 섬유를 사용한 하이브리드 섬유보강 콘크리트에 대한 연구는 휨성능 및 균열제어 성능을 향상시킬 목적으로 지속적으로 진행되고 있다.

최근 들어 화재발생시 온도변화에 따른 콘크리트의 저항성에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 콘크리트구조물의 경우 화재에 노출되었을 때 콘크리트 내부에서 공극압 등에 의하여 콘크리트가 폭발하는 폭발현상으로 인해 구조물의 안전성에 심각한 영향을 받을 수 있다.^{4,5)} 따라서 콘크리트구조물이 화재와 같은 고온에 노출되었을 경우에 구조적 안전성을 확보할 필요성이 증가하고 있다. 특히 고강도콘크리트에서 그 필요성이 더욱 크다.

본 연구에서는 강섬유와 서로 다른 길이 및 직경을 가진 폴리프로필렌섬유를 혼입한 하이브리드 섬유보강 콘

*Corresponding author E-mail : jpwon@konkuk.ac.kr

Received October 29, 2007, Revised February 26, 2008, Accepted February 29, 2008

©2008 by Korea Concrete Institute

크리트의 역학적 특성과 균열제어 성능 및 온도에 따른 영향을 평가하였다. 이를 위하여 이전 연구에서는 폴리프로필렌섬유의 길이 및 직경을 변화시켜 화재에 대한 저항성을 최적으로 확보할 수 있는 길이 및 직경의 조합을 결정하였다⁵⁾. 통계학의 최적화 기법인 심플렉스 격자배열법을 이용하여 평가한 결과 폴리프로필렌섬유의 길이 및 직경이 다르게 혼합하여 1.5 kg/m³를 사용하였을 때 가장 우수한 성능을 발휘하였으며 최적의 성능을 나타낸 섬유의 조합은 3데니어 (denier) × 20 mm (직경 × 길이) = 0.75 kg/m³와 10데니어 × 40 mm = 0.75 kg/m³를 사용하였을 때임을 알 수 있었다⁴⁾. 본 연구에서는 상기와 같은 연구 결과를 이용하여 결정된 폴리프로필렌섬유의 최적 조합비를 적용하고 강섬유를 추가적으로 포함시킨 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 온도변화에 따른 성능 변화를 평가하였다. 특히 터널내와 같은 지하공간에서 화재가 발생할 경우 급속한 온도의 상승으로 인하여 성능 저하는 매우 크다⁶⁾. 따라서 본 연구에서는 터널 및 지하공간의 화재 발생을 모사한 RABT 시간-온도가열 곡선을 이용하여 내화 시험을 실시하여 온도의 변화 즉 400°C, 600°C, 800°C 및 1,200°C로 변화할 때 이에 따른 콘크리트의 성능 변화를 평가하여 화재 발생 후 콘크리트의 성능 저하에 미치는 온도와 시간과의 관계를 평가하였다. 또한 터널 및 지하공간 구조물에서 콘크리트가 요구하는 휨성능 등을 포함한 역학적 특성을 평가하였고, 터널 콘크리트 라이닝과 같은 표면적인 넓은 구조물에서 발생가능성이 높은 소성수축균열에 대한 하이브리드 섬유의 저항성을 평가하였다.

2. 사용 재료 및 배합설계

2.1 강섬유/폴리프로필렌섬유

본 연구에서 사용된 강섬유는 현재 강섬유보강 콘크리트에서 가장 널리 사용되고 있는 길이 30 mm, 지름 0.5 mm, 형상비가 60인 번들형태의 국내 S사에서 생산하는 hooked type이며 콘크리트 배합에 40 kg/m³를 혼입하여 사용하였다. 또한 본 연구에서는 기존 연구에서 결정한 직경 3데니어, 길이 20 mm 및 직경 10데니어, 길이 40 mm의 국내 S사에서 제조한 폴리프로필렌 섬유를 각각 0.75 kg/m³를 사용하였다.^{4,5)} 강섬유 및 폴리프로필렌섬유의 물성은 Table 1과 같다.

2.2 시멘트 및 골재

본 연구에서는 H사의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 비중 2.6, 조립율 2.86 및 흡수율 0.67의 강모래를 사용하였다. 굵은골재는 최대치수 25 mm, 비중 2.65의 부순골재를 적용하였다.

2.3 배합설계

본 연구에서는 목표 압축강도 24 MPa 및 슬럼프 값

Table 1 Properties of steel and polypropylene fiber

Property	Steel fiber	Polypropylene fiber
Elastic modulus (GPa)	200	4
Specific gravity	7.85	0.91
Fiber diameter	0.5 mm	3, 10denier
Fiber length (mm)	30	20, 40
Tensile strength (MPa)	1,100	600
Acid/alkali resistance	Low	High
Electrical conductivity	High	Low
Melting point (°C)	-	165

Table 2 Mix proportion

Type of mix	W/C (%)	Unit weight (kg/m ³)						
		W	C	S	G	Steel fiber	Polypropylene fiber	
							P1*	P2**
F1	50	167	334	728.33	1025.13	-	-	-
F2						40	0.75	0.75

*: 3 denier × 20 mm (diameter × length)

** : 10 denier × 40 mm (diameter × length)

150 ± 15 mm와 공기량 5 ± 1%를 만족하는 Table 2와 같은 콘크리트 배합을 선정하였다.

3. 시험 방법

3.1 압축강도

하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축강도 특성을 알아보기 위해 KS F 2405에 준하여 재령 28일에 시험을 실시하였다. 공시체는 22 ± 3°C, 상대습도 50%의 양생실에서 1일 초기양생 후 22 ± 3°C의 항온조건으로 수중양생을 실시하였다. 압축강도시험은 3개의 공시체를 2회 반복 제작하여 총 6개의 공시체에 대하여 실시하였다.

3.2 휨성능

섬유보강 콘크리트를 적용하는 주요 목적 중에 하나는 콘크리트의 첫 번째 균열 후 거동을 향상시키기 위하여 널리 사용되고 있다. 콘크리트의 균열 후 거동은 에너지 흡수능력이인 휨인성으로 정의할 수 있다. 본 연구에서는 강섬유와 폴리프로필렌섬유를 혼합한 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 휨성능을 평가하였다. 시험은 JCI-SF4 (method of tests for flexural strength and flexural toughness of fiber reinforced concrete)⁷⁾에 의하여 150 × 150 × 550 mm의 각주형 공시체를 제작하였으며 재령 7일 및 28일에 측정하였다. Fig. 1은 휨성능 시험 모습을 나타낸다. 휨시험은 2개의 공시체를 2번 반복 제작하여 총 4개의 공시체에 대하여 실시하였다.

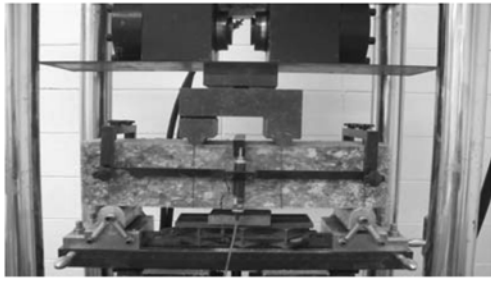


Fig. 1 Photo of flexural test set-up

3.3 쪼갬인장강도

콘크리트의 쪼갬인장강도는 KSF 2423 (콘크리트의 인장강도 시험 방법)에 준하여 실시하였다. 쪼갬인장강도는 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi dl} \quad (1)$$

식 (1)에서 P 는 가해진 하중의 크기, d 는 공시체의 지름, l 은 공시체의 길이이다. 쪼갬 인장강도시험은 3개의 공시체를 2회 반복 제작하여 총 6개의 공시체에서 실시하였다.

3.4 균열제어 성능

시멘트페이스트는 경화할 때 절대체적의 1% 정도가 감소하게 된다. 이에 따라 소성상태에 있는 콘크리트의 체적이 감소하게 되는데, 이를 소성수축이라고 하며 콘크리트에 부분적으로 인장력을 유발시키는 원인이 된다. 콘크리트가 타설된 후 경화하기 전 소성상태에 있을 때 급격한 수분의 증발에 의해서 발생하는 소성수축 균열은 온도, 상대습도, 풍속과 같은 환경조건과 콘크리트 내부의 온도, 블리딩 등에 의해 영향을 받는다. 콘크리트 타설 시 기초 또는 거푸집 재료에 의한 수분의 손실과 수화기간 동안 블리딩 수의 표면증발에 의한 내부적 손실은 콘크리트 표면에 어느 정도의 초기 구속을 제공하여 소성수축균열을 발생하게 된다.⁸⁾ 콘크리트 내에 균열이 발생하게 되면 투수성 등이 증가하여 콘크리트의 내구성 등의 저하로 인한 안정성에 심각한 영향을 끼칠 수 있다. 본 연구에서는 Kraai에 의해서 제시된 방법을 사용하여 소성수축균열실험을 실시하였다.⁹⁾ 실험은 시멘트와 표준사비를 1:2.45로 하였고 물-시멘트 비는 48.5%로 하였다. 시험에 사용된 몰드는 Fig. 2와 같으며 900×600×15 mm의 얇은 판 모양으로 둘레에 인장응력을 발생시킬 수 있는 구속 조건을 100 mm 간격으로 주어 시험을 실시하였다. 실험환경은 소성수축균열이 쉽게 발생하는 조건을 주기 위하여 온도 28±2°C, 습도 20±5%가 되도록 유지하고 풍속 6 m/sec로 일정하게 유지하였다. 풍속이 6 m/sec로 일정하게 유지되도록 풍속계를 설치하여 지속적으로 관찰하였다. 이러한 조건으로 24시간 동안 유지시켜 실험을

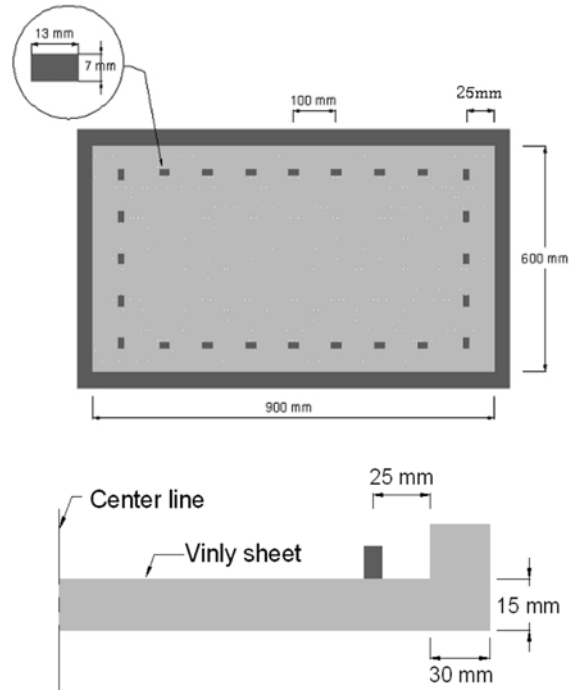


Fig. 2 Plastic shrinkage test set-up

실시한 후 균열을 관찰하였다. 그 후 소성수축균열 실험 결과 측정은 0.01 mm의 정밀도를 가진 균열계이저를 이용하여 실시하였다. 소성수축균열 폭은 발생한 균열의 길이에서 최소 3개의 측정점 선정 평균값으로 하였다. 이와 같은 방법으로 균열의 길이와 폭을 측정한 후 총 균열면적(균열길이 × 균열폭)을 결정하였다. 시험은 3번 반복하여 3개의 공시체의 평균으로 나타내었다.

3.5 온도 변화에 따른 콘크리트의 성능평가

하이브리드 섬유보강 콘크리트의 고온에서 온도 변화에 따른 성능을 평가하기 위해서 Fig. 3과 같은 내화로에서 Fig. 4의 온도-가열곡선을 이용하여 실험을 실시하였다. 본 연구에서는 독일에서 개발된 RABT 시간-온도 가열곡선을 이용하여 화재시험을 실시하였다.^{6,10,11)} RABT 곡선은 5분내 1,200°C에 도달하여 60분간 지속된 후 120분 동안 냉각시키는 방법을 적용하였으며 본 연구에서는 온도변화에 따른 영향을 평가하기 위하여 초당 4°C씩 온도

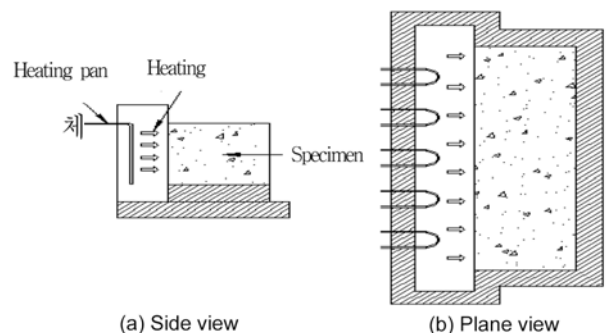


Fig. 3 Sectional view of fire furnace

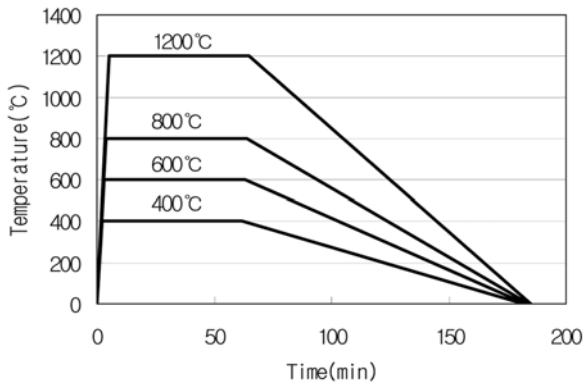


Fig. 4 Time-temperature curve

를 증가시켰다. 400°C까지의 온도는 약 1분 40초가 걸리게 하였으며 400°C의 온도를 60분간 지속시킨 후 120분에 걸쳐서 서서히 냉각시키는 방법을 사용하였다. 600°C, 800°C 및 1,200°C의 경우도 각각 2분 30초, 3분 20초 및 5분이 걸리게 가열하고 60분간 유지시켜 120분간 서서히 냉각시키는 방법을 사용하였다. 시험 결과는 각 온도에서 각각 3개씩의 시험 공시체에 대해 실시하여 평균으로 나타내었다.

4. 실험 결과

4.1 압축강도

하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축강도시험 결과는 Fig. 5와 같다. 시험 결과 섬유를 사용하지 않은 F1 배합과 비교하여 F2 배합은 압축강도가 약간 증가하는 경향을 보여주었다. 이는 강섬유가 압축강도를 상대적으로 증가시키는 효과를 발휘한 결과이다. 즉 강섬유를 혼입한 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축강도가 30 MPa 이상을 나타내었으며 섬유를 사용하지 않은 F1 배합은 약 27 MPa를 보여주었다.

4.2 휨성능

강섬유와 폴리프로필렌섬유를 혼입한 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 휨하중과 처짐과의 관계는 Fig. 6과 같다. 일반적으로 폴리프로필렌섬유만을 혼입한 콘크리트의

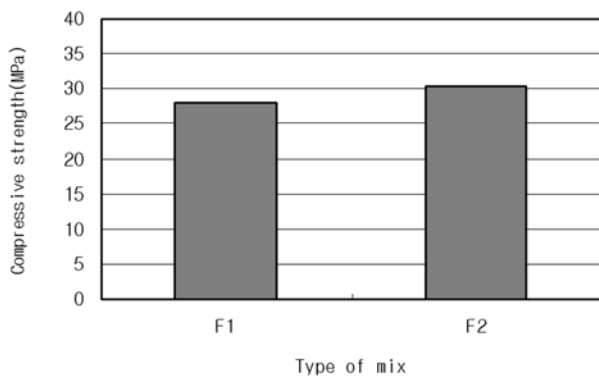
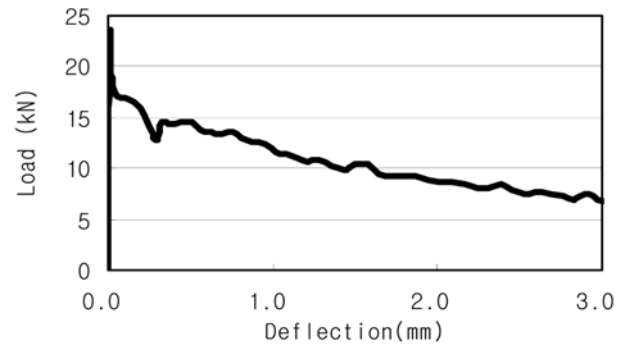
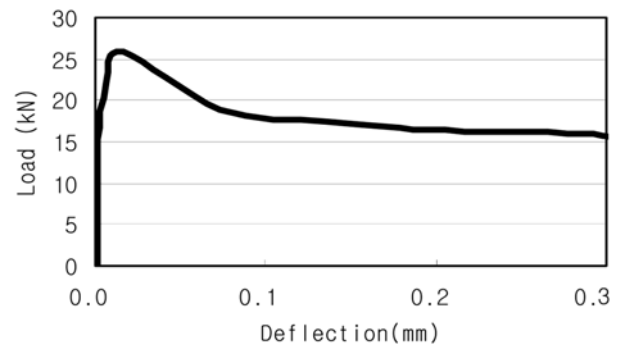


Fig. 5 Compressive strength



(a) Flexural behavior within a deflection of 3 mm



(b) Flexural behavior within a deflection of 0.3 mm

Fig. 6 Flexural behavior of hybrid fiber reinforced concrete

경우 첫 번째 균열발생 후 취성적 거동을 하는 것으로 기존의 연구결과에서 잘 나타나 있다.^{4,5)} 또한 섬유를 혼입하지 않은 배합은 최고 휨하중에서 균열이 발생 한 후 급격한 하중의 감소로 인하여 취성파괴를 발생시킨다. 그러나 폴리프로필렌섬유와 강섬유를 혼합한 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 경우 강섬유가 구조용 섬유이기 때문에 하중의 감소가 크지 않고 연성적으로 감소하는 현상을 보여주고 있다. 즉 취성파괴가 아닌 연성파괴 거동을 보여주었다.

휨강도 및 휨인성 시험 결과는 Table 3과 같다. 휨인성은 하중-처짐곡선의 아래면적으로 계산하였으며 본 연구에서는 3 mm 처짐이 발생할 때 까지 처짐으로 계산하였다. 섬유를 혼입하지 않은 F1 배합과 하이브리드 섬유보강 콘크리트 배합인 F2를 비교해 보면 하이브리드섬유를 혼합한 F2 배합이 휨강도가 증가하는 결과를 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 크기가 서로 다른 폴리프로필렌섬유가 콘크리트에 첨가되면 콘크리트 내에서 발생하는 균열을 더 효과적으로 저항하여 휨강도의 향상을 도모할 수 있음을 보여준다. 특히, 콘크리트 내에서는 서로 다른 크기의 균열이 발생하기 때문에 초기에는 길이가 짧은 섬

Table 3 Flexural performance of hybrid fiber reinforced concrete

	Type of mix	No. of test		Mean
		1	2	
Flexural strength (MPa)	F1	3.68	3.64	3.66
	F2	4.19	4.24	4.22
Flexural toughness (kN-mm)	F1	-	-	-
	F2	60.12	66.09	63.88

유가 균열의 발생 및 성장을 억제하는 거동을 하며 균열이 성장하면 길이가 긴 섬유가 균열의 성장에 저항하기 때문에 더 큰 휨강도 증가 효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한 휨인성 시험 결과 섬유를 사용하지 않은 F1 배합의 경우 첫 번째 균열이 발생한 후 휨강도를 손실하기 때문에 휨인성의 개념이 불필요한 취성 파괴를 보여 주었으며 하이브리드 섬유보강 콘크리트는 강섬유 및 서로 다른 길이의 폴리프로필렌섬유가 콘크리트의 휨강도를 증가시키는 한편 첫 번째 균열발생 후 거동에서 균열의 성장을 효과적으로 억제하여 휨인성을 증가시키는 것으로 나타났다.

4.3 쪼갬인장강도

하이브리드 섬유보강 콘크리트의 쪼갬인장강도 시험 결과는 Fig. 7과 같다. 시험결과 쪼갬인장강도는 휨강도 결과와 거의 유사한 경향을 나타내었다. 즉 하이브리드 섬유보강 콘크리트가 섬유를 사용하지 않은 F1 공시체보다 큰 값을 보여주었다. 이와 같은 결과는 서로 다른 크기의 섬유가 콘크리트에 첨가되면 콘크리트 내에서 발생하는 균열을 더 효과적으로 저항하여 쪼갬인장강도의 향상을 도모할 수 있음을 보여준다.

4.4 소성수축균열

하이브리드 섬유를 적용한 콘크리트의 소성수축균열 제어 특성 실험 결과는 Table 4 및 Fig. 8과 같다. 실험 결과 섬유를 사용하지 않은 배합에서는 서로 다른 크기의 균열이 발생하였으나 하이브리드섬유를 사용한 배합에서는 균열이 발생하지 않았다. 이는 섬유가 콘크리트에서 발생하는 균열의 제어에 효과가 있다는 것을 보여준다. 이와 같은 결과는 기존 연구에서 볼 수 있듯이 폴리프로필렌섬유는 콘크리트에 0.9 kg/m^3 이 첨가되면 균열제어 효과가 우수한 것으로 알려져 있는데¹²⁾ 섬유의 혼입률이 1.5 kg/m^3 으로 상대적으로 높고 강섬유가 추가적으로 40 kg/m^3 이 혼입되어 있기 때문에 나타난 결과이다.

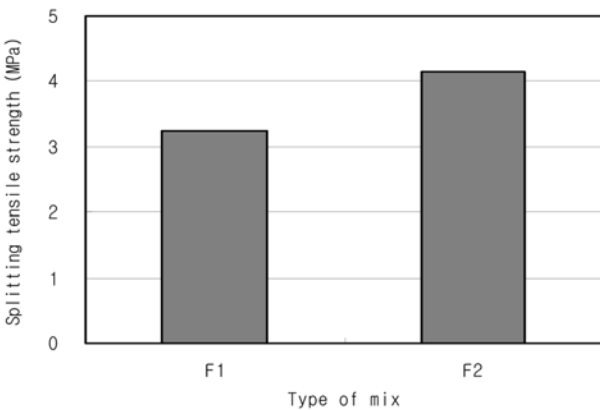
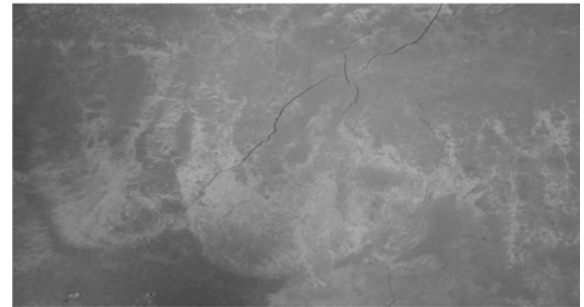


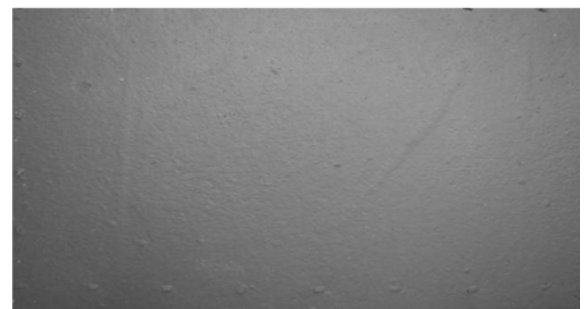
Fig. 7 Splitting tensile strength

Table 4 Plastic shrinkage test results

	Crack width (mm)				Crack area (mm ²)
	3	2	1	0.5	
F1	40.3	87.6	42.1	12	344.2
F2	-	-	-	-	-



(a) F1



(b) F2

Fig. 8 Pattern of plastic shrinkage crack

4.5 내화성능

4.5.1 내화시험 후 폭열 유·무 및 표면관찰

일반적으로 콘크리트의 온도에 따른 피해는 구조적인 피해와 화학적 피해로 구분할 수 있다. 콘크리트의 구조적인 피해로는 철근이 직접적인 고온에 노출되어 유효단면의 결손을 야기시켜 화재시 구조물 붕괴의 원인이 되기도 하는 폭열현상이 있다. 고온에 노출된 콘크리트는 표면이 박리되거나 비산해서 단면결손이 발생하게 되는데 이러한 현상을 폭열현상이라 한다. 이 폭열현상은 콘크리트 내부의 수분이 고열에 의해 수증기가 되어 팽창함에 따라 그에 따른 수증기압이 주원인으로 발생된다. 콘크리트의 폭열은 콘크리트 강도, 수분함유량, 밀도, 불의 가열속도, 비대칭적인 온도분포, 시험체의 치수와 형상, 하중 재하 조건, 골재 종류에 따라 그 경향이 달라진다. Pierre에 의하면 콘크리트의 폭열은 폭열하는 부위의 온도가 $190\sim 250^\circ\text{C}$ 에서 발생한다고 보고하고 있다.¹³⁾ 고온에 노출된 하이브리드 섬유보강 콘크리트 공시체의 표면관찰 결과는 Figs. 9~11과 같다. 온도가 증가할수록 콘크리트 공시체의 표면에는 탈색현상과 균열이 관찰되고 있다. 특히 섬유를 혼입하지 않은 F1배합의 경우 내화시험이 시작된 후 5분에서 10분 사이에 폭열이 발생하였다. 기존 연구 결과 강섬유만을 혼입한 콘크리트 역시 고온

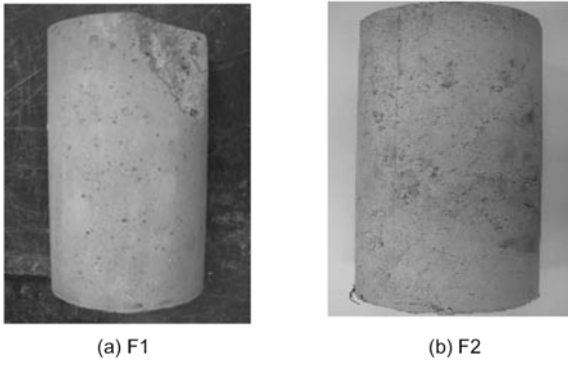


Fig. 9 Surface investigation of specimens after 120°C exposure

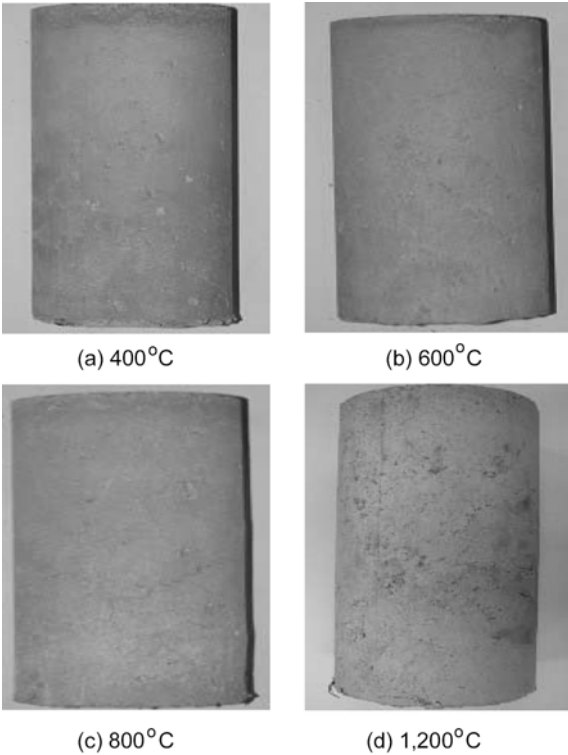


Fig. 10 Surface investigation of specimens after fire test

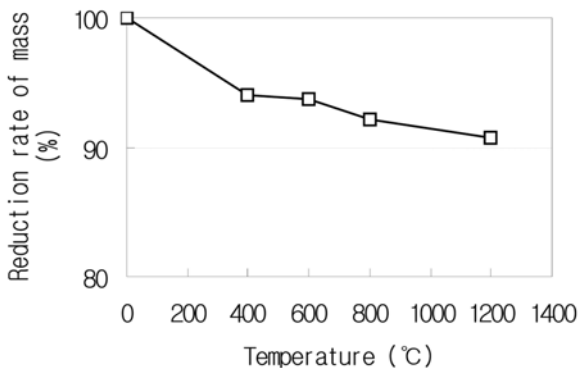


Fig. 11 Reduction rate of mass at RABT time-temperature curve

에 노출되면 폭렬이 발생한다고 알려져 있다.^{4,14)} 폴리프로필렌섬유만을 사용한 배합의 경우 폭렬현상은 발생하지 않지만 콘크리트 표면에 다량의 균열과 부풀어 오름

현상이 발생하고 쉽게 부스러지기 쉬운 상태가 되는 현상을 보인다고 기존 연구 결과 나타내고 있다.^{4,14-17)} Fig. 9는 폭렬현상이 발생한 F1배합과 1,200°C에 노출한 F2 배합으로 만들어진 공시체의 표면사진을 보여준다. 폭렬이 발생한 F1배합 공시체는 시편의 모서리 부분에서 발생하였다. 그러나 폴리프로필렌섬유와 강섬유를 하이브리드하여 적용한 콘크리트의 경우 폭렬현상이 발생하지 않고 있다. 특히 폴리프로필렌섬유를 단독으로 사용하였을 때 발생하는 다량의 균열과 표면의 부풀어 오름 현상 등이 거의 없는 결과를 보여주었다. 이는 폴리프로필렌섬유의 경우 콘크리트의 온도가 165°C가 되면 모두 용해되기 시작하고 590°C가 되면 모두 발화되어 콘크리트 내부에 공극 등이 모두 내부균열로 나타나기 때문에 콘크리트는 이와 같은 공극 및 균열로 인하여 쉽게 부스러지거나 탈락을 발생시키기 쉬운 형태가 된다.¹⁴⁻¹⁷⁾ 그러나 강섬유가 첨가되어 콘크리트 내부에서 물리작용 (bridging action)을 함으로써 탈락 및 부스러지기 쉬운 콘크리트 공시체를 잡아 주기 때문에 표면관찰결과 1,200°C의 고온에 노출되었을 경우에도 표면에 균열이 발생하기는 하였지만 많은 균열이 발생하지 않았고 상대적으로 콘크리트 공시체의 형상을 그대로 유지하는 것으로 나타났다.

400°C, 600°C, 800°C 및 1,200°C에 노출 후 서로 다른 직경 및 길이를 가지고 있는 F2 공시체의 표면관찰 결과는 400°C 및 600°C에서는 균열이 전혀 관찰되지 않았다 (Fig. 10). F1 공시체의 경우 약 200°C 정도에서 폭렬이 발생하였기 때문에 시험을 중단하여 그 이상의 온도에는 노출시키지 않았다. 콘크리트 공시체 표면의 균열은 800°C의 온도에 노출되었을 때 관찰되었다 (Fig. 10). 기존의 연구 결과를 살펴보면 폴리프로필렌섬유를 적용한 콘크리트 공시체의 경우 400°C까지 온도가 증가하면 콘크리트 표면에 균열이 심하게 발생하여 강도저하가 크게 나타나는 것으로 알려져 있지만 본 연구에서는 강섬유가 상대적으로 균열의 발생을 억제하고 있기 때문에 균열의 발생량은 현저하지 않았다.¹⁴⁻²⁰⁾ 일반적으로 콘크리트는 고온에 노출되었을 경우 300°C이상에서는 화학적 변화가 발생되며, 450~550°C에서는 콘크리트의 주성분인 수산화칼슘이 열에 의해 분해되는 중성화 현상이 발생된다. 이후 탈수진행이 빨라지며 약 600~700°C 이상에서는 탄산칼슘의 분해가 발생하게 된다. 최종적으로 콘크리트의 온도가 900°C 이상이 되면 시멘트페이스트의 탈수가 완벽하게 되는 것으로 알려져 있다.^{14,18-20)} 따라서 본 연구의 하이브리드 섬유보강 콘크리트 역시 콘크리트의 온도가 600°C 이전에는 폴리프로필렌섬유의 용해로 인하여 공극압을 효과적으로 배출하기 때문에 균열이 발생하지 않고 콘크리트의 중성화 역시 균열 발생에 큰 영향을 미치지 못하기 때문에 균열이 표면에 발생하지 않은 것으로 보인다. 그러나 600°C이상이 되면 콘크리트의 탈수가 빠르게 진행됨으로써 수산화칼슘 이외에 탄산칼슘의 분해가 발생되고 콘크리트 내부의 공극압이 시멘트페이스트 및 시멘트페이스트와 골재사이 계면의 약화된 부분으로 배출됨

로써 균열이 콘크리트 표면에 노출되기 시작하며 콘크리트의 온도가 900°C가 되면 시멘트페이스트는 완전한 탈수가 발생하게 되어 콘크리트 페이스트 및 콘크리트 페이스트와 골재사이에는 많은 균열이 발생하게 된다.^{14,18,20)}

공극수는 콘크리트의 온도가 높아지면 기체 상태로 변화하여 공극압을 발생시키게 되는데 이와 같은 공극압을 폴리프로필렌섬유의 용해로 발생하는 공극으로 흡수하거나 연속적으로 발생하여 표면으로 이어진 공극을 통하여 콘크리트의 외부로 배출하게 된다.^{16,17)} 이때 콘크리트 내부에서 발생하는 공극압이 서로 다른 크기로 발생하기 때문에 이를 억제할 수 있는 폴리프로필렌섬유의 용해로 인한 공극도 동일한 크기 보다는 서로 다른 크기를 가지고 있을 때 공극압의 함유와 배출에 있어서 유리하다. 따라서 본 연구의 결과 역시 서로 다른 직경 및 길이를 가지고 있는 폴리프로필렌섬유를 혼입한 경우가 표면에 발생하는 균열이 적게 발생한 것으로 보인다. 또한 RABT 곡선에 따른 화재시험 시 표면 관찰 결과로 볼 때 고온에 노출된 콘크리트가 화재로 인한 열화가 가장 극심하게 발생하는 온도는 600~800°C 사이인 것으로 판단되며 RABT 곡선을 이용하면 화재 발생 후 약 2분 30초 후에는 콘크리트의 온도가 약 600°C에 도달하기 때문에 급속한 성능 저하가 발생하기 시작하는 것으로 보인다.

4.5.2 질량손실

온도에 따른 하이브리드 섬유보강 콘크리트 시편들의 질량손실률은 Fig. 11과 같다. 섬유를 사용하지 않은 보통 콘크리트의 경우 약 200°C에서 폭발이 발생하였기 때문에 질량손실률을 측정할 수 없어 폭발이 발생하지 않은 하이브리드 섬유보강 콘크리트 공시체의 경우만을 고려하였다. 콘크리트의 온도에 따른 피해중에 화학적인 피해는 100°C 이상에서 콘크리트 내부의 자유공극수가 방출되며 100~200°C에서는 물리적 흡착수가 방출되어 이들이 분리되고 소실됨에 따라 콘크리트 중의 시멘트수화물이 수축하기 시작하고 300°C 이상에서는 화학적으로 변질되며 450~550°C에서는 콘크리트의 주성분인 수산화칼슘이 열에 의해 분해되어 중성화 현상이 발생하게 된다.^{14,18,20)} 이후 탈수진행이 빨라지며 약 600~700°C 이상에서는 탄산칼슘의 분해와 함께 900°C 이상에서 시멘트페이스트의 완전한 탈수가 일어나는 것으로 알려져 있다.^{14,18,20)} 이 때 콘크리트는 역학적인 성질이 저하하게 되고 콘크리트의 온도가 높을수록 저하되는 정도가 심하게 된다.^{14,18,20)} 본 연구 결과 질량손실률은 400°C에서 600°C로 증가할 때에는 미소한 차이를 보여주었지만 600°C에서 800°C로 상승하면서 질량손실률은 커지는 경향을 보여주었다. 그리고 800~1,200°C로 증가하면서 질량 손실률이 600°C에서 800°C로 상승할 때와 비교하여 손실률이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 현상은 콘크리트의 화학적 피해의 경향을 잘 보여주는 것으로 400°C에서 600°C로 상승하면서 콘크리트는 중성화가 발생하기 시작하여 질량손실률이 크게 증가하지 않았지만 600°C 이후에는 탄산칼슘의

탈수가 진행되어 질량손실률이 커지고 800°C 이상이 되면 시멘트페이스트가 완전히 탈수되어 질량의 손실률이 크게 증가하지 않은 것이다. 또한 400°C 이전에는 폴리프로필렌섬유의 경우 용해점이 약 160°C 정도로 콘크리트의 온도가 200°C 이상으로 상승하게 되면 용해되기 때문에 콘크리트의 온도가 400°C 이상이 되면 모두 용해되어 400°C 이전의 질량 감소는 폴리프로필렌섬유에 의한 것이다.

4.5.3 잔류압축강도

고온에서 온도변화에 따른 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 잔류압축강도 (각 노출온도에서의 압축강도/기준 공시체의 압축강도×100 (%))는 Fig. 12와 같다. 400°C의 가열온도조건에서는 60% 내외의 잔류압축강도 값을 나타내며 600°C의 가열온도조건에서도 45% 내외의 잔류압축강도를 나타내었다. 일반적으로 폴리프로필렌섬유만을 적용한 콘크리트의 경우 콘크리트의 온도가 400°C까지 상승하면 잔류압축강도를 약 40%만 유지한다는 결과가 있다.^{14,16)} 이는 폴리프로필렌섬유가 모두 용해되어 공극으로 존재하기 때문에 강도를 현저하게 감소시키기 때문이다. 그러나 강섬유가 첨가되면 내부 공극의 발생으로 인하여 현저하게 파괴위험성이 높은 콘크리트 공시체를 섬유의 물림 (bridging) 효과로 잡아 줄 수 있기 때문에 강도의 감소가 크지 않게 나타난다. 하지만 가열온도조건이 800°C가 되자 잔류압축강도가 급격히 감소하여 30.36% 강도 값을 나타내었다. 폴리프로필렌섬유를 단독으로 사용할 경우 기존 연구에서는 800°C까지 온도가 상승하게 되면 잔류압축강도는 20% 이하로 감소하는 것으로 알려져 있다. 특히 폴리프로필렌섬유의 경우 폭발은 방지하지만 콘크리트의 역학적 특성의 감소를 억제하는 효과는 없으므로 나타났다.¹⁴⁻¹⁷⁾ 따라서 강섬유를 첨가하면 잔류압축강도 증가에 효과가 있다는 것을 알 수 있다. 800°C와 1,200°C의 온도에서 잔류압축강도의 차이가 거의 발생하지 않았다. 1,200°C의 가열 온도에서 잔류압축강도는 27.31%로 800°C의 가열 온도에서 나타난 30.36%의 강도 값과 유사한 값을 나타내었다. 이와 같은 결과는 질량손실의 결과에서도 볼 수 있듯이 콘크리트는 400°C까지는 폴리프로필렌섬유의 용해에 의해서 발생하는 공극의 증

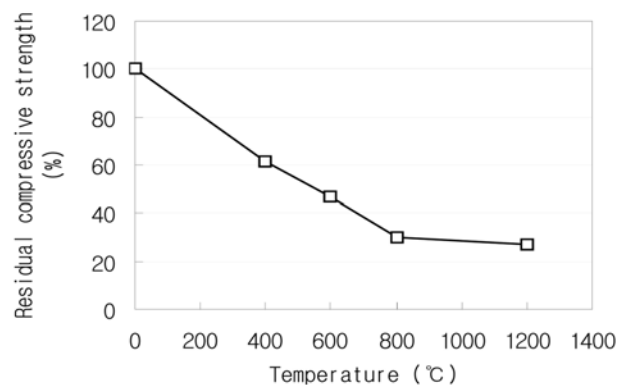


Fig. 12 Residual compressive strength at RABT time-temperature curve

가에 의하여 강도감소가 발생하여 약 40% 정도의 강도가 감소하는 것으로 보인다. 이후 온도가 상승함에 따라 기존 연구결과와 같이^{14,18,20)} 수산화칼슘의 손실로 인하여 강도의 감소가 발생하며 600°C 이후에는 탈수가 진행되는 동시에 탄산칼슘의 탈수가 진행되어 강도손실량이 급격히 커지며 800°C 이상이 되면 콘크리트에서 골재사이의 결합제 역할을 하는 시멘트페이스트가 완전히 탈수가 되는 상태이기 때문에 강도가 일정하게 유지되는 경향을 보여준다고 할 수 있다. 따라서 콘크리트의 화학적인 열화가 극심해지는 온도는 600~800°C인 것을 판단할 수 있으며, 800°C 이후 압축강도는 약 20~30%를 나타내고 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 서로 다른 직경 및 길이를 가진 폴리프로필렌섬유와 강섬유를 혼합한 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 역학적 성능 및 내화성능을 평가하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 서로 다른 길이의 폴리프로필렌섬유와 강섬유를 혼합한 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축강도, 휨 성능 및 쪼갬인장강도 시험 결과 압축강도, 휨강도, 휨인성 및 쪼갬인장강도의 증가를 획득할 수 있었다.
- 2) 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 소성수축균열제어 실험결과 하이브리드 섬유보강 콘크리트는 균열제어에 효과적이었다.
- 3) 폴리프로필렌섬유를 혼입하지 않은 경우 폭렬이 발생하였으며 하이브리드 섬유보강 콘크리트는 폭렬이 발생하지 않았다. 온도에 따른 표면관찰 결과 콘크리트 공시체 표면의 균열은 800°C의 온도에 노출되었을 때 관찰되었다.
- 4) 고온에 노출 후 질량손실량은 400°C에서 600°C로 증가할 때에는 미소한 차이를 보여주었지만 600°C에서 800°C 및 800°C에서 1,200°C로 상승하면서 질량손실량은 커지는 경향을 보여주었다. 특히 600°C 이상에서는 콘크리트의 화학적 성분이 분해되면서 성분의 용출에 의하여 손실량이 증가하였다.
- 5) 고온에서 온도 변화에 따른 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 잔류압축강도는 400°C의 온도조건에서는 60% 내외의 잔류압축강도 값을 나타내며 600°C의 온도조건에서도 45%내외의 잔류압축강도를 나타내었다. 하지만 온도조건이 800°C가 되자 잔류압축강도가 급격히 감소하여 30.36% 강도 값을 나타내었고 1,200°C의 온도에서 잔류압축강도는 27.31%로 800°C의 온도에서와 유사한 값을 나타내었다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술개발사업 (04

핵심기술 C01)의 지원으로 이루어졌으며 섬유보강재를 지원한 스틸화이버코리아(주)에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김남욱, 이상귀, 한병용, 배주성, “하이브리드 강섬유보강 콘크리트의 휨파괴 특성,” 대한토목학회논문집, 23권, 4-A호, 2003, pp. 619~625.
2. Qian, C. X. and Stroeven, P, “Development of Hybrid Polypropylene-Steel Fibre-Reinforced Concrete,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 2000, pp. 63~60.
3. Yao, U., Li, J., and Wu, K., “Mechanical Properties of Hybrid Fiber-Reinforced Concrete at Low Fiber Volume Fraction,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 1, 2003, pp. 27~30.
4. 원종필, 박경훈, 박찬기, 이상우, “지하공간 콘크리트구조물의 역학적 특성 및 내화성능 향상을 위한 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 성능 평가,” 대한토목학회논문집, 27권, 4A호, 2007, pp. 627~633.
5. 원종필, 박경훈, 박찬기, 이시원, “터널 및 지하 공간 콘크리트 구조물의 폭렬방지를 위한 하이브리드 폴리프로필렌섬유의 효과,” 대한토목학회논문집, 27권, 3C호, 2007, pp. 229~235.
6. Haukur, I. and Anders, L., “Recent Achievements Regarding Measuring of Time-Heat and Time-Temperature Development in Tunnel,” *Safe and Tunnels, First International Symposium*, Prague, 2004, pp. 87~96.
7. Japan Concrete Institute, *Method of Tests for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete*, JCI SF-4, Tokyo, Japan, 1983, pp. 35~36.
8. Mindess, S., Francis, J., and Darwin, D., *Concrete*, 2nd edition, Pentis Hall, NJ, USA, 2003, pp. 417~418.
9. Kraai, P. P., “A Proposed Test to Determine the Cracking Potential due to Drying Shrinkage of Cracking,” *Concrete Construction*, Vol. 30, No. 9, 1985, pp. 775~778.
10. 원종필, 최석원, 박찬기, 박해균, “내화용 고강도 습식 스프레이 폴리머 모르타르의 화재 저항성 평가,” 콘크리트학회 논문집, 18권, 4호, 2006, pp. 559~568.
11. 김낙영, 심재원, 심종성, 원종필, “터널 콘크리트 라이닝 폭렬 방지를 위한 폴리프로필렌 섬유 혼입률 분석 연구,” 터널기술, 7권, 4호, 2005, pp. 323~333.
12. 원종필, 박찬기, 안태송, “폴리프로필렌섬유보강 콘크리트의 수축균열 및 내구 특성,” 대한토목학회논문집, 19권, 1-5호, 1999, pp. 783~790.
13. Pirre, K., Gregoire, C., and Christophe, G., “High-Temperature Behaviour of HPC with Polypropylene Fiber from Spalling to Microstructure,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001, pp. 1487~1499.
14. Chen, B. and Liu, J., “Residual Strength of Hybrid-Fiber-Reinforced High-Strength Concrete after Exposure to High Temperature,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 6, 2004, pp. 1065~1069.
15. Poon, C. S., Shui, Z. H., and Lam, L., “Compressive Behavior of Fiber Reinforced High-Performance Concrete Subjected to Elevated Temperature,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 12, 2004, pp. 2215~2222.
16. Matthias Zeiml, David Leithner, Roman Lackner, and Her-

- bert A. Mang, "How do Polypropylene Fibers Improve the Spalling Behavior of in-Situ Concrete?," *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 5, 2006, pp. 929~945.
17. Jianzhuang Xiaoa, H. "Falknerb On Residual Strength of High-Performance Concrete with and without Polypropylene Fibres at Elevated Temperatures," *Fire Safety Journal*, Vol. 41, No. 2, 2006, pp. 115~121.
18. Serdar Aydin, Halit Yazici, and Bulent Baradan, "High Temperature Resistance of Normal Strength and Autoclaved High Strength Mortars Incorporated Polypropylene and Steel Fibers," *Construction and Building Materials*, 2007, In Press.
19. Kalifa, P. and Menneteau, F. D. and Quenard, D., "Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures," *Cement & Concrete Research*, Vol. 30, 2000, pp. 1~13.
20. Georgali, B. and Tsakiridis, P. E., "Microstructure of Fire-Damaged Concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, 2004, pp. 255~259.

요 약 본 연구에서는 강섬유와 서로 다른 직경 및 길이를 가진 폴리프로필렌섬유를 혼합한 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축강도, 수축균열 및 고온에서 화재저항성을 평가하였다. 압축강도, 쪼갬인장강도, 휨시험 및 수축균열저항성을 평가하기 위하여 실시하였으며 또한 400°C, 600°C, 800°C 및 1,200°C에 노출 후 물리·역학적 특성을 평가하기 위하여 표면관찰, 질량손실 및 잔류압축강도 시험을 실시하였다. 시험 결과 하이브리드 섬유보강 콘크리트는 역학적 성능, 수축균열저항성 및 화재저항성을 향상시켰으며 온도 변화에 따른 콘크리트의 성능 저하는 온도가 600~800°C의 범위일 때 가장 컸다.

핵심용어 : 역학적 성능, 화재저항성, 하이브리드 섬유보강 콘크리트, 폴리프로필렌섬유, 강섬유