

폴리프로필렌 섬유 혼입률 및 부재크기 변화에 따른 콘크리트의 내화 특성

Properties of Fire Resistance of Concrete with Contents of Polypropylene Fiber and Specimens Size

전 선 천^{*} 황 인 성^{**} 이 병 열^{**} 양 성 환^{***} 한 천 구^{****}
Jeon, Seon Cheon Hwang, Yin Seong Lee, Byung Yul Yang, Seong Hwan Han, Cheon Goo

ABSTRACT

A lot of considerations on the spalling by fire of high performance concrete should be taken into for fire resistance of the concrete structures. In this paper, fire resistance of high performance concrete is described using polypropylene fiber, which is known to be contributed to fire resistance. Strength level and member size are varied with. According to test results, spalling by fire takes place more easily, as W/C increases and member size decreases. It shows that concrete containing polypropylene fiber has good effects on preventing spalling by fire. In case high performance concrete does not contain polypropylene fiber, residual strength shows to be decreased remarkably compared to that of normal concrete. Whereas, in case 0.1% of polypropylene fiber contents, high performance concrete shows higher residual strength than that of normal concrete. As member size is smaller, residual strength shows to be decreased.

1. 서론

최근 건축물은 고층화, 대형화와 함께 콘크리트의 고강도화 및 고성능화도 꾸준히 진행되어져 왔다. 그러나, 고강도·고성능 콘크리트인 경우는 일반강도의 보통 콘크리트와 달리 내외부 조직이 치밀하기 때문에 화재시 갑작스런 고열을 받게 되면 부재표면이 심한 폭음과 함께 박리 및 탈락하는 폭열현상이 발생할 수 있고, 균열과 함께 강도저하 등도 문제점으로 제기되고 있다. 특히, 이러한 폭열현상은 피복두께의 결손과 함께 철근의 온도상승으로 철근콘크리트(이하 RC라 함) 구조체의 내력저하를 초래하게 된다. 따라서, 현대개념의 고품질, 고성능 콘크리트에 있어서 화재시 발생하는 폭열현상 및 강도저하는 RC 구조체의 내화구조상 반드시 해결해야할 문제점으로 지적되고 있다.¹⁾²⁾

그러므로, 본 연구에서는 콘크리트의 폭열방지에 효과적인 것으로 알려진 폴리프로필렌(이하 PP라 함) 섬유³⁾⁴⁾를 혼입한 고강도 및 일반강도 콘크리트에 대하여 부재크기 변화에 따른 가열 전후의 강도 및 폭열 특성 등을 검토하므로써, RC 구조물의 내화성능 향상에 한 참고자료로 제시하고자 한다.

* 정회원, 청주대학교 산업대학원 석사과정
** 정회원, 청주대학교 대학원 박사과정
*** 정회원, 인천전문대학 교수, 공학박사
**** 정회원, 청주대학교 교수, 공학박사

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1과 같다. 즉, 실험요인으로 W/C는 고강도와 일반강도로 구분한 35%와 55%의 2개 수준에 대하여 PP섬유 혼입률을 0%와 0.1%의 2개 수준, 부재크기 변화를 $\phi 10 \times 20\text{cm}$, $\phi 15 \times 30\text{cm}$, $20 \times 20 \times 20\text{cm}$ 및 RC 기둥부재로 상정한 $50 \times 50 \times 150\text{cm}$ 의 4개 수준으로 하였다.

이때, 목표 유동성은 W/C 35%인 경우 슬럼프플로우 값을 고유동 콘크리트 범위인 $60 \pm 5\text{cm}$ 로 하였고, W/C 55%인 경우는 슬럼프 값을 $15 \pm 1.5\text{cm}$ 로 하였으며, 균지않은 콘크리트와 경화 콘크리트의 실험사항은 표 1과 같고, 배합사항은 표 2와 같다.

2.2 사용재료

본 실험에 사용한 시멘트는 국내산 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였고, 잔골재는 충북 청원군 부강산 강모래를 사용하였으며, 굵은골재는 충북 옥산산 25mm 부순 굵은골재를 사용하였다. 또한, 혼화제로 고성능감수제는 국내산 K사의 폴리칼본산계를 사용하였고, PP섬유는 국내산 S사의 단섬유를 사용하였는데, 각 재료의 물리적 성질은 표 3~6과 같다.

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 콘크리트의 혼합은 강제식 팬믹서를 사용하였는데, PP섬유의 혼입은 섬유를 분산이 잘 되도록 건비법시 손으로 풀고 루 뿌려준 후 혼합을 실시하는 것으로 하였다.

균지않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프는 KS F 2402 규정에 의거 실시하였고, 슬럼프플로우는 슬럼프 측정이 끝난 후 최대직경과 이에 직교하는 직경의 평균치로 하였으며, 공기량 및 단위용적중량은 KS F 2421 및 2409의 규정에 따라 실시하였고, 응결시간은 KS F 2436에 의거 실시하였다.

부재크기 변화에 따른 각 공시체는 KS F 2403에 의거 제작하였고, RC 기둥부재로 상정한 $50 \times$

표 1. 실험계획

W/C (%)	PP섬유 혼입률 (vol.%)	부재크기 (cm)	목표 유동성 (cm)	실험사항	
				균지않은 콘크리트	경화 콘크리트
35	0	<ul style="list-style-type: none"> $\phi 10 \times 20$ $\phi 15 \times 30$ $20 \times 20 \times 20$ $50 \times 50 \times 150$ 	슬럼프 플로우 60 ± 5	<ul style="list-style-type: none"> 슬럼프 슬럼프플로우 공기량 	<ul style="list-style-type: none"> 수화열 압축강도
55	0.1		슬럼프 15 ± 1.5	<ul style="list-style-type: none"> 단위용적중량 응결시간 	<ul style="list-style-type: none"> 내화시험 온도이력

표 2. 배합사항

W/C (%)	W (kg/m^3)	S/a (%)	SP/C (%)	AE/C (%)	절대용적배합 (l/m^3)			
					시멘트	잔골재	굵은골재	PP섬유
35	175	48	1.35	0.018	159	298	323	0 1.0
55	185	44	-	0.150	107	292	371	0 1.0

표 3. 시멘트의 물리적 성질

비중	분말도 (cm^2/g)	안정도 (%)	응결시간 (분)		압축강도 (kgf/m^2)		
			초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3,414	0.06	238	339	241	304	386

표 4. 골재의 물리적 성질

구분	비중	조립률	흡수율 (%)	단위용적중량 (kg/m^3)	입형판정 실적률 (%)
잔골재	2.56	2.54	1.47	1,597	61.0
굵은골재	2.60	6.68	0.93	1,503	56.5

표 5. 혼화제의 물리적 성질

구분	주 성분	형태	색상	비중 (20°C)
고성능감수제	폴리칼본산계	액체	담갈색	1.05

표 6. PP섬유의 물리적 성질

재질	비중	길이 (mm)	직경 (mm)	용해점 ($^\circ\text{C}$)	인장강도 (kgf/cm^2)
Homopolymer Polypropylene	0.9	19	0.07	162°C	5,600

50×150cm는 그림 1의 배근도에 의해 철근조립 후 거푸집을 제작한 다음 콘크리트를 부어넣어 제작하는 것으로 하였으며, 경화 콘크리트의 실험으로 내화시험 전후의 압축강도는 KS F 2405 규정에 의거 실시하였다. 내화시험은 각 부재를 크기별로 나누어 사진 1과 같이 바닥용 내화시험 가열로 내에 수직으로 배치한 후 KS F 2257에서 규정한 표준가열곡선으로 1시간 가열을 실시하는 것으로 하였다. 이때, 가열로 내부 및 공시체의 각부 온도는 K타입 열전대(NiCr-Ni, 온도측정 범위 -200~1370℃)를 사용하여 측정하였고, 내화시험 후 부재크기별 폭열 여부는 육안으로 조사하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

그림 2는 W/C별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 슬럼프, 슬럼프플로우, 공기량 및 단위용적중량을 나타낸 것이다.

전반적으로 PP섬유 0.1%를 혼입함에 따라 슬럼프 및 슬럼프플로우는 저하하는 것으로 나타났는데, 이는 PP섬유의 혼입에 따른 섬유영킴현상으로 유동성이 저하한 것으로 사료된다. 또한, 공기량은 PP섬유 혼입에 따라 다소 증가하는 경향을 나타내고 있으나 무혼입과 비교하여 큰 차이는 없는 것으로 분석되며, 단위용적중량은 공기량과 반대경향으로 나타났다.

그림 3은 PP섬유 혼입률 변화에 따른 응결시간을 나타낸 것이다. 전반적으로 응결시간은 W/C 55%인 경우 초결 9시간, 종결 13시간, W/C 35%인 경우는 초결 11시간, 종결 14시간 전후로 W/C 35%가 SP제 혼입률 증가에 기인하여 응결이 다소 지연되는 것으로 나타났으며, PP섬유 혼입에 의한 응결시간은 무혼입과 비교하여 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

3.2 경화 콘크리트의 특성

그림 4는 RC기둥부재의 상부, 중앙, 하부의 중심부 수화열을 측정하여 나타낸 것이다.

수화열 온도는 초기 1일(24시간)을 전후로하여 피크를 이루었다가 3일 이후부터 상온과 유사하게 나타나고 있으며, 기둥부재의 중앙 중심부의 온도가 상·하부 중심부보다 높게 나타났다. 또한, W/C별로는 W/C 35%가 시멘트 수화반응에 의한 발열량의 증가로 W/C 55% 보다 수화열 온도의 피크점이 높게 나타남을 알 수 있었다.

그림 5는 W/C 및 부재크기별 PP섬유 혼입률 변

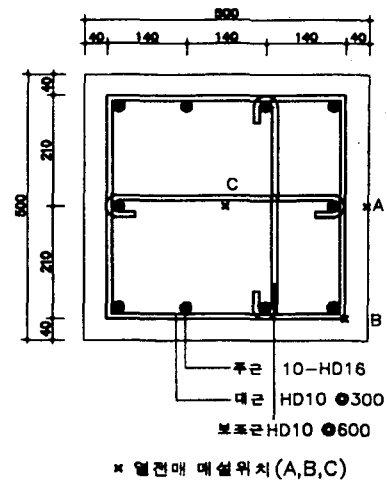


그림 1. RC기둥부재 배근도



사진 1. 가열로 내 공시체 배치

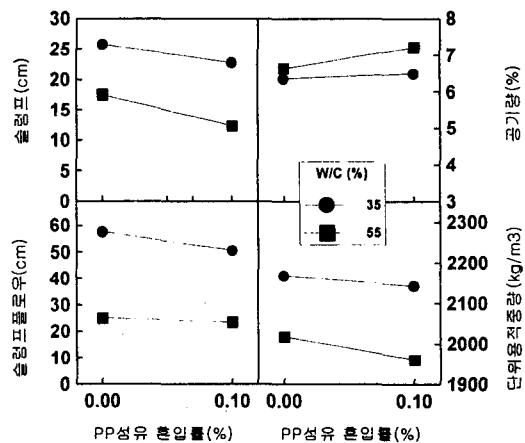


그림 2. PP섬유 혼입률 변화에 따른 슬럼프, 슬럼프플로우, 공기량 및 단위용적중량

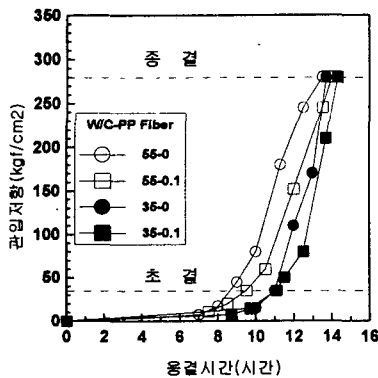


그림 3. PP섬유 혼입률 변화에 따른 응결시간

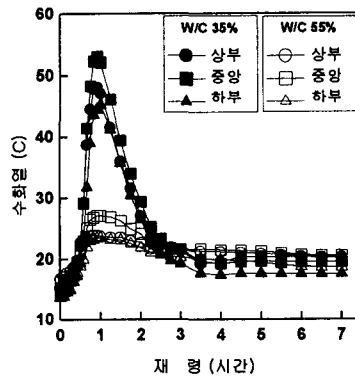


그림 4. RC기둥부재의 수화열

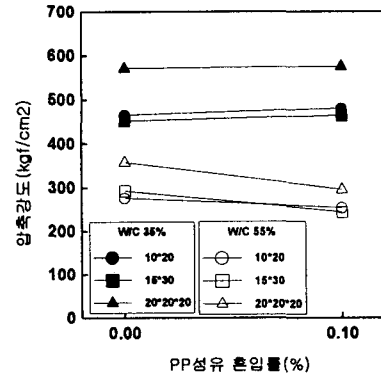


그림 5. 부재크기에 따른 재령 28일의 압축강도

화에 따른 재령 28일의 압축강도를 나타낸 것이다.

먼저, PP섬유 혼입률별 압축강도는 PP섬유를 0.1%로 혼입한 경우 W/C 35%에서 약간 증가하는 것으로 나타났고, 55%의 경우는 다소 저하하는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트와 PP섬유와의 부착강도 차이로 고강도인 35%보다 일반강도인 55%가 PP섬유와의 부착강도 저하로 인해 압축강도가 다소 저하한 것으로 사료된다. 부재크기별 압축강도는 20×20×20cm의 입방체 공시체가 세장비 등의 영향으로 원주형 공시체 보다 크게 나타났으며, 원주형 공시체에서는 부재크기가 작은 $\phi 10 \times 20$ cm 공시체보다 $\phi 15 \times 30$ cm 공시체 보다 크게 나타났다.

3.3 내화 특성

표 7은 PP섬유 혼입률 및 부재크기 변화에 따라 1시간 내화시험을 실시하고 난 후의 폭열여부를 나타낸 것이고, 사진 2 및 3은 내화시험후 각 공시체 및 RC 기둥부재의 폭열 모습을 나타낸 것이다.

먼저, PP섬유 혼입률 변화에 따른 내화특성으로, W/C 35%에서 PP섬유 무혼입인 경우는 부재크기에 관계없이 대부분 심한 파괴 및 박리폭열을 일으켰으나, PP섬유를 0.1% 혼입한 경우는 폭열을 일으키지 않았다. 또한, W/C 55%에서 PP섬유 무혼입인 경우는 작은 공시체에서 일부 파괴 또는 박리폭열을 보였을 뿐 나머지는 폭열을 일으키지 않았고, PP섬유를 0.1% 혼입한 경우는 모두 폭열을 일으키지 않았다.

부재크기 변화에 따른 내화특성으로, W/C 35%에서 PP섬유 무혼입인 경우 $\phi 10 \times 20$ cm는 공시체의 형상을 알 수 없을 정도로 심한 파괴폭열을 일으켰고, $\phi 15 \times 30$ cm는 파괴폭열을 일으켰으나 공시체의 형상은 어느 정도 유지하였으며, 20×20×20cm는 공시체의 형상을 유지하며 일부 박리폭열을 일으켜 공시체가 갈수록 폭열에 유리함을 알 수 있었다. 또한, RC 기둥부재는 PP섬유 무혼입인 경우 특히 모서리 부분에 있어서 심한 파괴폭열을 일으켰고, 0.1%를 혼입한 경우는 전혀 폭열을 일으키지 않았다. 또한, W/C 55%에서 PP섬유를 혼입하지 않은 경우는 $\phi 10 \times 20$ cm에서 2개의 박리폭열, $\phi 15 \times 30$ cm에

표 7. 부재크기별 폭열여부

W/C (%)	PP 섬유 (vol.%)	부재크기 (cm)									RC 기둥부재
		$\phi 10 \times 20$			$\phi 15 \times 30$			20×20×20			
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	
35	0	X	X	X	X	X	X	△	△	△	X
	0.1	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
55	0	△	△	O	X	O	△	O	O	O	O
	0.1	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O

○ : 폭열, △ : 박리폭열, × : 파괴폭열













W/C-PP 섬유 (%)	부재크기 (cm)		
	$\phi 10 \times 20$	$\phi 15 \times 30$	$20 \times 20 \times 20$
35-0			
35-0.1			
55-0			
55-0.1			

사진 2. 내화시험 후 부재크기별 공시체의 모습





W/C(%) - PP섬유 혼입률(vol.%)			
35-0	35-0.10	55-0	55-0.10
			

사진 3. 내화시험 후 RC 기둥부재의 모습

서 1개의 파괴 및 박리폭열을 보였을 뿐 $20 \times 20 \times 20$ cm 공시체 및 RC 기둥부재는 폭열을 일으키지 않아, 역시 부재크기가 클수록 폭열저항성이 우수함을 알 수 있었다.

이는 부재크기가 클수록 부재의 온도상승곡선이 완만하여 수증기 발산이 양호함에 따른 것으로 분석된다. 단, PP섬유를 0.1% 혼입한 경우는 부재크기에 관계없이 모두 폭열을 일으키지 않았다.

그림 6은 RC 기둥부재 및 $\phi 10 \times 20$ cm 공시체의 각부 온도 이력을 나타낸 것이다.

RC 기둥부재는 표면온도(그림 1의 A위치)와 비교하여 중심부 온도(C)의 경우 200°C 전후로 내부까지 고온이 전달되지 않았으나, $\phi 10 \times 20$ cm의 경우는 가열시간이 경과함에 따라 중심부 온도가 600°C 전후로 내부까지 고온이 전달되어짐을 알 수 있다. 또한, RC 기둥부재의 모서리 철근온도(B)는 가열시간 10분 이후로부터 온도상승곡선이 표면부분(A)보다 크게 나타나고 있는데, 이는 초기 모서리의 폭열과 함께 열전대의 노출 및 2면 가열에 의해 온도상승이 크게 나타난 것으로 분석된다.

이상을 종합하면, 부재크기가 작거나, 부재의 모서리인 경우는 화재시 급격한 온도상승곡선으로 고온이 내부까지 쉽게 전달되어, 고온에 의한 열응력과 내부 수증기압에 의한 복합적인 영향으로 폭열이 용이하게 발생하는 것으로 사료된다. 단, PP섬유를 0.1% 혼입한 경우는 화재시 고온(162°C 이상)에 의해 PP섬유가 녹으므로써 공시체 내부의 수증기압을 효과적으로 외부로 방출시키는 통로역할을 하여 폭열이 방지되는 것으로 분석된다.

그림 7은 부재크기별 잔존압축강도율을 나타낸 것이다. 먼저, PP섬유의 혼입률 변화에 따른 잔존압축강도율은 PP섬유 무혼입인 경우 고강도가 일반강도보다 폭열 등의 영향으로 잔존압축강도율이 50% 전후로 작게 나타났고, PP섬유를 0.1% 혼입한 경우 일반강도는 무혼입과 큰 차이가 없거나 다소 저하

하는 것으로 나타난 반면 고강도의 경우는 65~75% 범위로 무혼입과 비교하여 잔존압축강도율이 향상되는 것으로 나타났다. 부재크기 변화에 따른 잔존압축강도율은 고온수열에 따른 내부 균열 등의 영향으로 부재크기가 작을수록 잔존압축강도율이 저하하였다.

4. 결론

고성능 및 일반 콘크리트에 있어 PP섬유 혼입률과 부재크기 변화에 따른 굽지않은 콘크리트, 경화 콘크리트의 특성과 내화 시험 후의 폭열 및 잔존강도 특성에 관한 실험결과를 종합하면 다음과 같다.

1) PP섬유 혼입률 변화에 따른 유동성은 다소 저하하는 것으로 나타났고, 공기량 및 단위용적중량은 무혼입과 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

2) 경화 콘크리트의 특성으로 PP섬유 혼입률에 따른 재령 28일의 압축강도에서 W/C 35%는 다소 증가, W/C 55%는 다소 감소하는 것으로 나타났으며, 부재 크기별로는 20×20×20cm, φ10×20cm, φ15×30cm 순으로 압축강도가 크게 나타났다.

3) PP섬유 혼입률 변화에 따른 내화특성으로 W/C 35%는 PP섬유 무혼입인 경우 대부분 파괴폭열을 일으킨 반면, W/C 55%는 1개의 파괴 및 일부 박리폭열을 보였을 뿐 나머지는 폭열이 발생하지 않아, 고성능 콘크리트에서 폭열이 중요하게 문제시됨을 알 수 있었고, PP섬유를 0.1% 혼입한 경우는 대부분 폭열방지효과가 우수한 것으로 나타났다.

4) 부재크기 변화에 따른 내화특성으로는 부재가 작을수록, 또한, 부재의 모서리와 같이 온도상승곡선이 급할 경우 고온에 의한 열응력과 내부 수증기압에 의한 복합적인 영향으로 폭열이 쉽게 발생하는 것으로 나타났다.

5) 내화시험 후 잔존압축강도율은 PP섬유 무혼입인 경우 고강도가 일반강도보다 작게 나타난 반면 PP섬유를 0.1% 혼입한 경우는 무혼입과 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 특히, 이때 고강도의 경우는 65~75% 범위로 무혼입과 비교하여 잔존압축강도율이 향상되는 것으로 나타났다. 부재크기 변화에 따른 잔존압축강도율은 고온수열에 따른 내부균열 등의 영향으로 부재크기가 작을수록 잔존압축강도율이 저하하였다.

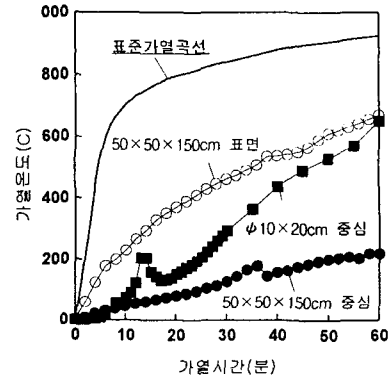


그림 6. 내부온도이력

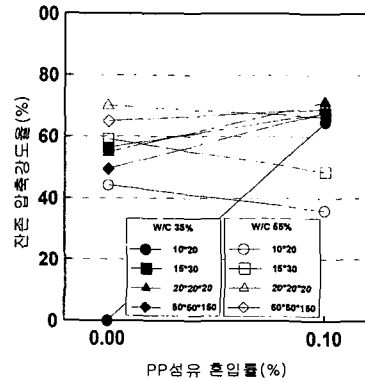


그림 7. 부재크기별 잔존압축강도율

참고문헌

1. 한천구 ; 비폭열성 콘크리트, 콘크리트학회지 제10권, 제6호, pp. 5~10, 1998. 12
2. 池尾陽作 ; 高強度コンクリートの耐火性能(爆裂)に関する研究, 日本コンクリート工學, 第37卷, 第8號, pp. 53~57, 1999. 8
3. 한천구, 양성환, 이병열, 황인성 ; 골재종류 및 폴리프로필렌 섬유 혼입률 변화에 따른 고성능 콘크리트의 폭열 특성에 관한 연구, 콘크리트학회논문집 제 11권 제5호, pp. 69~77. 1999. 10
4. 한천구, 양성환, 이병열, 황인성 ; 혼화재 종류 및 폴리프로필렌 섬유 혼입률 변화에 따른 고성능 콘크리트의 폭열 특성, 한국구조물진단학회 제4권, 제1호, pp. 85~92, 2000. 1