

화재시 고성능 콘크리트의 폭렬방지 및 내화성능 향상

한 천 구 청주대학교 건축공학부 교수, 공학박사

1. 서론

건축물은 화재시 인명안전, 재산보호의 관점에서 일정시간 내화성능의 확보와 함께 구조적인 안전대책이 중요한 문제점으로 지적되고 있다.

그러나 현재 재정되어 있는 건축법의 피난 및 방화구조 기준 등에 관한 규칙에 따르면 콘크리트의 경우 내화재료로서 기둥의 경우 그 작은 지름이 25cm 이상이면 내화구조로 인정하여 별도의 내화성능실험을 실시하지 않고 현장시공이 가능한 것으로 규정되어 있다. 건축법이 제정될 당시 콘크리트구조물 대부분은 일반강도의 보통 콘크리트로서, 최근에 배합 및 양생조건에 따라 사용량이 크게 늘고 있는 고강도 및 초고강도를 발휘하는 콘크리트는 화재시 일반강도의 보통 콘크리트와 달리 폭렬이 발생하는 것으로 보고되고 있다.

고성능 콘크리트의 폭렬 발생은 화재시 구조부재의 피복두께 결손과 함께 철근의 온도

상승으로 철근콘크리트(이하 RC라 함) 구조체의 내력저하를 초래하게 되어 결국 구조물의 붕괴를 일으킬 수도 있게 된다. 이러한 폭렬현상은 낮은 물시멘트비, 높은 함수율, 급격한 고온에서 발생이 용이한데, 이를 방지하기 위한 방안으로 폴리프로필렌(PP) 섬유 등의 내열성이 작은 유기질 섬유를 혼입하는 방법이 연구된 바 있다. 이러한 PP섬유의 혼입은 분산성이 좋아 부재 내부에 전체적으로 분포하게 되고, 녹는점(약 160~180°C)이 낮음으로써 생긴 미세공극은 내부에 존재하던 고압의 수증기를 외부로 이동시키는 통로의 역할을 수행하게 되는데, 이때 폭렬발생의 중요한 원인 중에 하나인 고압의 수증기 압력이 낮아지게 되어 폭렬을 방지할 수 있게 되는 것이다.

그러므로, 본 고에서는 고성능 콘크리트의 폭렬방지에 효과가 있는 것으로 알려진 PP섬유의 혼입과 아울러 메탈라스, 유리섬유 및 탄소섬유를 함유한 고성능 콘크리트의 화재시 내화성능을 검토하므로써, 고성능 콘크

리트의 안전대책에 한 참고자료로 제시하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2-1 실험 계획

본 연구의 실험계획은 [표 1]과 같다.
먼저, 시리즈 I에서는 Ø100×200mm 사

이즈의 원주형 공시체를 대상으로 W/B는 플라이애쉬를 20% 치환한 30, 40%의 2수준에 대하여 PP섬유 혼입률을 0, 0.05, 0.10%의 3수준으로 하였다. 황구속재로 메탈라스의 경우는 사용 철 판의 두께에 따라 0.6mm(이하 M₁), 1.6mm(이하 M₂)를 계획하였고, 그 밖에 황구속재로는 유리섬유 및 탄소섬유를 이용하였으며, 내화시험은 비가력 조건에서 실시하는 것으로 계획하였다.

[표 1] 실험계획

구분	실험요인						실험사항	
	W/B (%)	부재 사이즈(mm)	FA ¹⁾ (%)	PP섬유 (%)	황구속재	재하조건	굳지않은 콘크리트	경화 콘크리트
시리즈 I	· 30 · 40	Ø100×200mm	20	· 0 · 0.05 · 0.1	· 플레인 · 메탈라스 ²⁾ -M ₁ -M ₂ · 유리섬유 · 탄소섬유	· 비가력	· 슬럼프 · 슬럼프플로우 · 공기량 · 단위용적질량	· 압축강도 · 내화시험(1시간) · 잔존압축강도 · 질량감소율
시리즈 II	· 34	300×300×3000mm	15	· 0 · 0.1	-	· 가력	-	· 내화시험(3시간)

1) FA : 플라이애시

2) 메탈라스 종류에 따른 M₁, M₂의 규격은 [표 8~9] 참조

[표 2] 콘크리트의 배합사항

구분	W/B (%)	단위 수량 (kg/m ³)	S/a (%)	SP/C (%)	절대용적배합 (ℓ / m ³)				질량배합 (kg/m ³)			
					C	FA	S	G	C	FA	S	G
시리즈 I	30	175	48	1.5	148	53	278	211	467	117	715	555
	40		51	1.05	111	39	321	216	350	88	825	568
시리즈 II	34	168	46	1.0	157	34	274	322	420	74	708	840

또한, 시리즈 II에서는 300×300×3000mm 사이즈의 Mock-up 부재를 대상으로 W/B는 호칭강도 40MPa의 실무 시공조건을 고려하여 플라이애쉬를 15% 치환한 34%의 1 수준으로 계획하였고, 플레인과 PP 섬유를 0.1% 혼입한 경우에 대하여 가력 내화시험을 각각 실시하는 것으로 하였다.

이때, 플레인의 목표 슬럼프플로우는 고유동 콘크리트 범위인 600±100 mm로 하였고, 목표 공기량은 4.5±1.5 %를 만족하도록 배합설계 하였으며, PP섬유 혼입에 경우도 동일하게 적용하였다. 이때, 굳지않은 콘크리트 및 경화 콘크리트의 실험사항은 표 1과 같고, 배합사항은 [표 2]와 같다.

2-2 사용재료

본 실험에 사용한 시멘트는 국내산 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였고, 골재로서 잔골재는 경남 창녕군 현창산 강모래, 굵은골재는 경남 진해시 용원산 25mm 부순 굵은골재를 사용하였다. 또한, 혼화재료로 고성능감수제는 국내산 B사의 폴리칼본산계, 플라이애쉬는 보령 화력산을 사용하였으며, PP섬유는 S사의 단섬유 제품을 사용하였는데, 각 재료의 물리적 성질은 [표 3~7]과 같다. 또한, 황구속재로는 국내산 메탈라스, 유리섬유 및 탄소섬유를 사용하였고, 메탈라스의 종류별 규격은 [표 8]과 같으며 그 물리적 성질은 [표 9]와 같다.

2-3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 콘크리트의 혼합은 강제식 팬타입 믹서를 사용하여 혼합하였다. 굳지않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프는 KS F 2402, 슬럼프플로우는 KS F 2594, 공

[표 3] 시멘트의 물리적 성질

밀도 (g/cm³)	분말도 (cm²/g)	안정도 (%)	응결시간(분)		압축강도 (MPa)		
			초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3,522	0.16	209	353	21.4	30.5	39.2

[표 4] 골재의 물리적 성질

구 분	밀도 (g/cm³)	조립률	흡수율 (%)	단위용적 질량 (kg/m³)	0.08mm체 통과량 (%)
잔골재	2.57	2.7	1.83	1,470	1.8
굵은골재	2.63	6.9	0.62	1,577	0.3

[표 5] 혼화제의 물리적 성질

구 분	주 성분	형태	색 상	밀도 (g/cm³)
고성능감수제	폴리칼본산계	액 상	연황색	1.05

[표 6] 플라이애시의 물리적 성질

밀도 (g/cm³)	분말도 (cm²/g)	강열감량(%)	압축 강도비(%)	SiO₂ (%)	습분 (%)	단위 수량비(%)
2.22	3,850	4.2	92	67.5	0.2	100

[표 7] PP섬유의 물리적 성질

재 질	밀도 (g/cm³)	길이 (mm)	직경 (mm)	융해점 (°C)	인장강도 (MPa)
Homopolymer Polypropylene	0.9	19	0.07	162°C	560

[표 8] 메탈라스의 종류별 규격

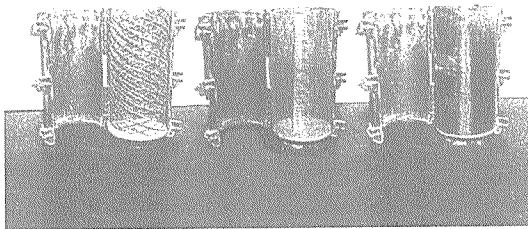
메탈라스 규격				
종 류	SW (mm)	LW (mm)	T (mm)	
M1	6.6	13.3	0.6	
M2	24	48	1.6	

[표 9] 황구속재의 물리적 성질

황구속재	인장강도 (MPa)	인장탄성계수 ($\times 10^6$ MPa)	밀도(g/cm ³)
메탈라스	439	-	7.85
유리섬유	3,480	8.6	2.53
탄소섬유	3,800	24.5	1.8

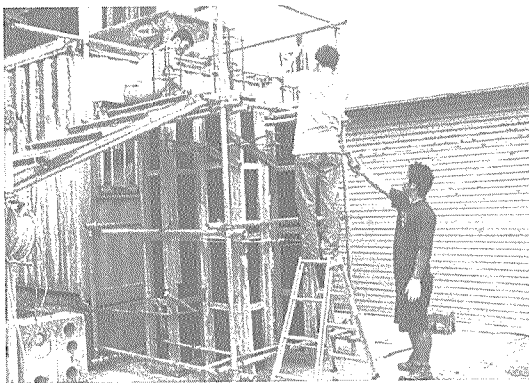
기량은 KS F 2421 및 단위용적질량은 KS F 2409의 규정에 의거 실시하였다.

시험체 제작은 먼저 시리즈 I의 경우 [사진 1]과와 같이 $\phi 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체 안에 황구속재를 미리 설치하고, KS F 2403 규정에 의거 제작한 후 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 실내에서 24시간 동안 봉합양생 후 캡핑을 실시하였

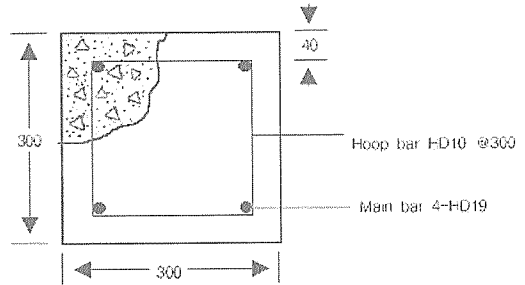


메탈라스 유리섬유 탄소섬유

[사진 1] 황구속재 종류별 공시체



[사진 2] Mock-up 부재의 거푸집 제작



[그림 1] Mock-up 부재의 배근도

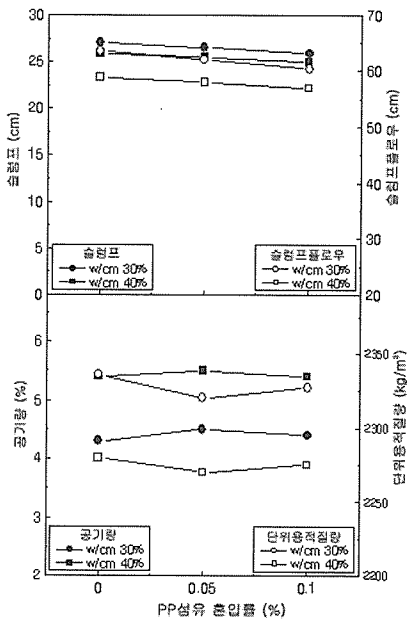
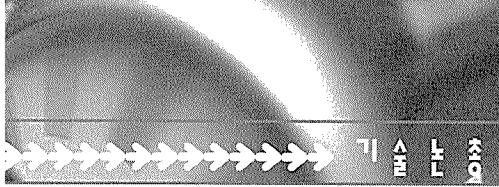
으며, 24시간이 경과한 후 탈형하여 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 수중에서 내화시험 전까지 양생하였다. 시리즈 II는 [그림 1] 및 [사진 2]와같이 철근을 조립한 후 거푸집을 제작한 다음 콘크리트를 부어넣고, 내화시험 전까지 현장 조건으로 기중양생을 실시하였다.

경화 콘크리트의 실험으로 재령경과에 따른 압축강도는 KS F 2405에 의거 실시하였고, 내화시험은 KS F 2257-1에서 규정한 표준가열곡선에 의거하여 한국건설 기술연구원의 내화 실험실에서 시리즈 I 시험체는 바닥가열로에서 비가력 내화시험을 실시하였고, 시리즈 II 시험체는 수직기둥가열로에 설치한 후 가력 내화시험을 실시하였다. 이때 내화시험 후 폭발여부는 육안으로 관찰하여 조사하였고, 질량감소율은 내화시험 전후의 각 시험체 질량을 측정하여 백분율로 나타내었다.

3. 실험결과 및 분석

3-1 굳지않은 콘크리트의 특성

[그림 2]는 W/B별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 슬럼프, 슬럼프플로우, 공기량 및 단위용적질량을 나타낸 것이다.



[그림 2] W/B별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 슬럼프, 슬럼프플로우, 공기량 및 단위용적질량

먼저, W/B별 유동특성 및 공기량은 W/B 30%의 경우 슬럼프플로우가 약간 높은 값을 나타냈고, 공기량은 다소 감소하는 경향으로 나타났으나, 목표치는 모두 만족하는 것을 확인할 수 있었다.

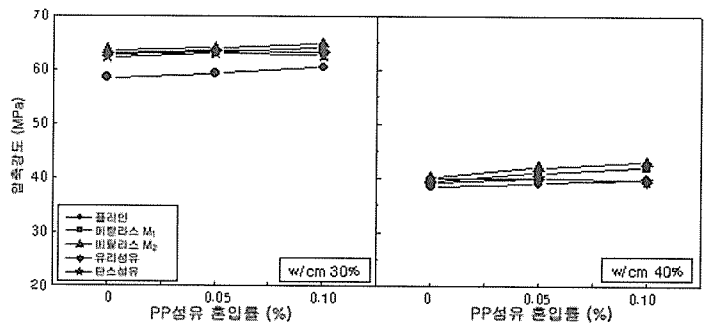
또한, PP섬유 혼입률 변화에 따른 유동성은 PP섬유 혼입률 증가에 따라 약간 저하하는 것으로 나타났으나 큰 차이는 아닌 것으로 분석되며, 공기량 및 단위용적질량은 PP섬유 혼입에 관계없이 비슷한 값을 나타냈다.

3-2 경화콘크리트의 특성

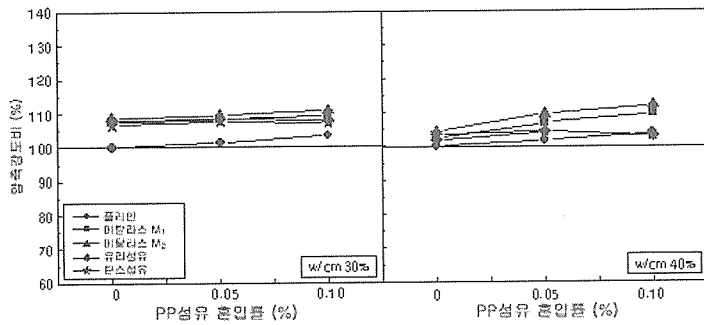
(1) 강도 특성

[그림 3]은 W/B 및 횡구속재별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 재령 28일 압축강도를 나타낸 것이다.

먼저, W/B 및 횡구속재별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 압축강도는 PP섬유 혼입률이 증가할수록 일부 시험체는 감소하고, 일부는 약간 증가하는 것으로 나타났으나, PP섬유 혼입에 따른 강도의 증가 및 저하는 크지 않은 것으로 나타났다. 한편, 횡구속재 변화에 따라서는 전반적으로 플레인과 비교하여 횡구속력의 증가에 따라 강도 증진 효과가 큰 것으로 나타났는데, 횡구속재별로는 메탈라스를 횡구속한 경우 가장 큰 것으로 나타났으며, 특히 메탈라스 M₂가 철판 두께의 증대에 기인하여 M₁보다 압축강도가 더욱 증진되는 것으로 나타났다.



[그림 3] W/B별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 슬럼프, 슬럼프플로우, 공기량 및 단위용적질량



[그림 4] W/B별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 슬럼프, 슬럼프플로우, 공기량 및 단위용적질량

[그림 4]는 PP섬유 무혼입에 황구속하지 않은 플레인과 비교하여 W/B 및 황구속재별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 압축강도비를 나타낸 것이다.

먼저, W/B별 PP섬유 혼입률 증가에 따라서는 큰 차이를 나타내지 않았고, 황구속재별로는 유리섬유 및 탄소섬유의 경우 W/B 30%에서 7~8%, 40%에서 3~4%로 W/B 30%에서 황구속에 의한 압축강도 증가효과가 크게 나타났으며, 메탈라스로 황구속한 경우는

W/B 30 및 40%에서 모두 10% 전후의 강도 증진효과를 나타내어, 유리섬유 및 탄소섬유보다 우수한 황구속력에 의한 강도향상 성능을 확인할 수 있었다.

(2) 폭발 특성

[표 10]은 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 사이즈를 대상으로 실시한 시리즈 I 시험체의 내화시험 후 폭발여부를 3등급으로 분류하여 나타낸 것이고, [사진 3]은 폭발 성상을 나타낸 것이다.

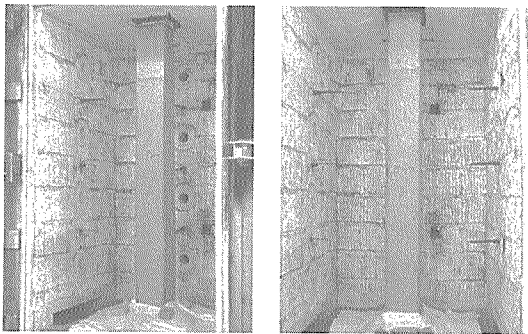
[표 10] 시리즈 I 시험체의 W/B별 황구속재 및 PP섬유 혼입률 변화에 따른 폭발 여부

W/B (%)	PP섬유 혼입률(%)	플레인			황구속재											
					메탈라스 M ₁			메탈라스 M ₂			유리섬유			탄소섬유		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
30	0	×	×	×	△	×	△	△	△	△	△	×	×	×	×	△
	0.05	○	○	○	△	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	0.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
40	0	×	×	×	△	△	△	○	△	△	×	×	×	×	×	×
	0.05	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	0.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

× : 파괴폭렬, △ : 박리폭렬, ○ : 폭발방지

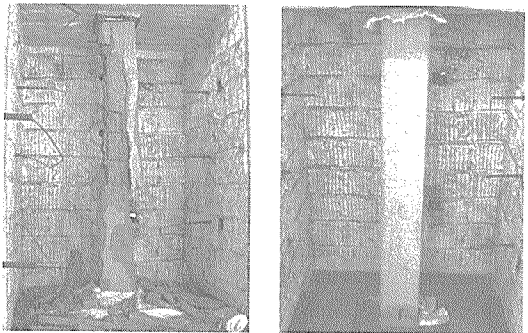
W/B (%)	PP섬유 혼입률 (%)	플레인			횡구속재											
					메탈라스 M ₁			메탈라스 M ₂			유리섬유			탄소섬유		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
30	0															
	0.05															
	0.1															
40	0															
	0.05															
	0.1															

[사진 3] 시리즈 I 시험체의 내화시험 후 폭발 손상

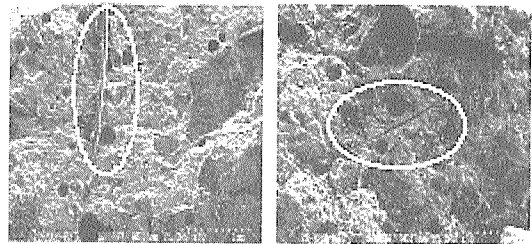


↓

↓



[사진 4] 시리즈 II 시험체의 내화시험 전·후 폭발 손상

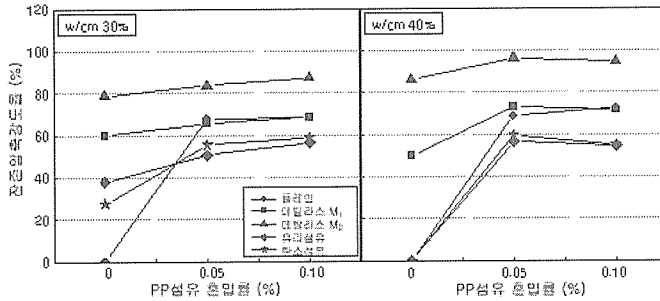


(a) 가열 전 PP섬유 모습 (b) 가열 후 PP 섬유의 녹은 모습

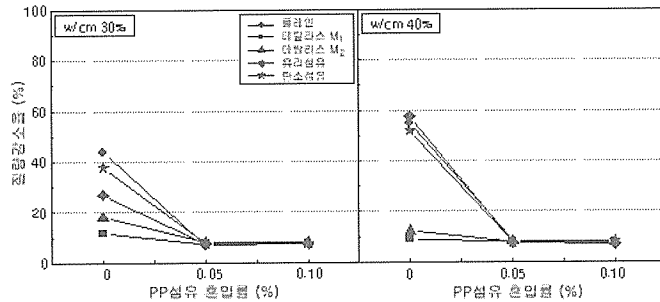
[사진 5] 내화시험 전·후 콘크리트 내부 모습

먼저, W/B별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 폭발 특성으로 플레인의 경우는 W/B가 작을 수록 심한 파괴폭렬을 일으켰고, PP섬유를 0.05%이상 혼입한 경우는 모두 폭발이 방지 되어 PP섬유 혼입에 의한 폭발방지성능의 우수성을 확인할 수 있었다.

또한, 횡구속재 변화에 따른 폭발 특성으로, 메탈라스인 경우는 내부 수증기압에 의한



[그림 5] W/B별 횡구속 조건 변화에 따른 잔존압축강도를



[그림 6] W/B별 횡구속 조건 변화에 따른 질량감소를

폭렬에너지보다 메탈라스의 횡구속력에 의한 콘크리트의 인장응력 증대에 기인하여 양호한 폭발방지 성능을 보였으나, 유리섬유 및 탄소섬유의 경우는 고온에 의한 콘크리트와의 부착력 저하로 콘크리트를 구속하지 못하고 폭렬에 의해 섬유가 찢겨지거나 벗겨지는 등 플레인과 마찬가지로 대부분 파괴폭렬을 일으켜 폭발방지에 큰 효과가 없는 것으로 나타났다.

[사진 4]는 300×300×3000mm Mock-up 부재를 대상으로 실시한 시리즈Ⅱ 시험체의 내화시험 전·후 폭발성상을 나타낸 것이다.

플레인은 예상했던 대로 심한 파괴폭렬로 철근이 노출되었고, 이후 고온을 받은 철근의

구조내력이 저하하여 가열시험 2시간 만에 주근이 좌굴되어 붕괴되었다. 그러나 PP섬유를 0.1% 혼입한 RC기둥의 경우는 사진 5와 같이 내부 생긴 공극이 수증기의 배출통로를 형성하여 효과적으로 폭렬이 방지되었고, 기둥 부재의 형상을 그대로 유지하여, 재하가열시험 3시간을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

[그림 5]는 시리즈Ⅰ 시험체의 내화시험 후 잔존압축강도율을 나타낸 것이다.

먼저, 플레인의 경우는 모두 파괴폭렬을 일으켜 잔존압축강도의 측정이 불가능하였고, 메탈라스만으로 횡구속한 경우는 M₁이 50~60%, M₂가 80~90%로 메탈라스 두께가 두꺼울수록 잔존압축강도율이 크게 향상되는

것으로 나타났다. 한편, 유리섬유 및 탄소섬유로 황구속한 경우는 플레인과 마찬가지로 대부분 파괴폭렬로 잔존압축강도 측정이 불가능하였으나, 일부 측정이 가능한 W/B 30% 경우에는 잔존압축강도율이 30% 이하로 낮은 수치를 나타내었다.

또한, 황구속재별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 잔존압축강도율은 섬유의 혼입률이 증가할수록 다소 증가하는 경향으로 나타났고, PP섬유와 메탈라스 황구속을 병용한 경우는 PP섬유 혼입에 의한 폭렬방지 효과와 메탈라스에 의한 황구속력에 기인하여 잔존압축강도율이 90% 전후로 가장 크게 나타났다. 한편, PP섬유만 혼입한 경우는 70% 전후, PP섬유 혼입과 유리섬유 및 탄소섬유로 황구속한 경우는 50~60%의 범위로 다소 저하하였는데, 이는 전술한 바와 같이 고온에 의한 유리섬유 및 탄소섬유의 부착력 감소에 따른 황구속력 저하 및 단면감소에 기인한 것으로 분석된다.

[그림 6]은 W/B 및 황구속재별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 시리즈 I 시험체의 내화시험 후 질량감소율을 나타낸 것이다.

먼저, PP섬유를 혼입하지 않은 경우와 유리섬유 및 탄소섬유로 황구속한 경우는 폭렬 발생에 기인하여 30~60% 전후로 크게 감소하는 것으로 나타났고, 메탈라스로 황구속한 경우는 플레인과 비교하여 양호한 폭렬방지 성능을 발휘하여 10~20%의 작은 질량감소율을 나타냈다.

4. 결론

본 연구에서는 가력 및 비가력 내화시험을 통해 PP섬유 혼입 및 황구속에 의한 고성능 콘크리트의 화재시 폭렬방지 및 내화성능에

대하여 분석하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 원주형 공시체 조건으로 실시한 시리즈 I 시험체의 폭렬특성으로 PP섬유를 혼입하지 않은 플레인의 경우는 심한 파괴폭렬이 발생하였고, PP섬유를 0.05% 혼입 및 두께가 두꺼운 메탈라스를 황구속한 경우 양호한 폭렬방지 성능을 나타냈다. 한편, 유리섬유 및 탄소섬유로 황구속한 시험체의 경우는 고온에 의해 콘크리트와의 부착력 저하로 플레인과 동일한 파괴폭렬을 나타냈다.

2) Mock-up 사이즈로 제작한 시리즈 II 시험체의 경우 플레인은 심한 파괴폭렬과 함께 철근이 노출되었고, 재하가열 2시간만에 붕괴되었고, PP섬유 0.1%를 혼입한 기둥은 효과적인 수증기 배출로 3시간 내화 성능을 만족하는 것으로 나타났다.

3) 시리즈 I 에 대해서 실시한 잔존압축강도율 및 질량감소율은 PP섬유 혼입 및 메탈라스로 황구속을 병용한 경우 잔존압축강도율 90%, 질량감소율 10% 전후로 가장 우수한 성능을 나타냈고, 유리섬유 및 탄소섬유로 황구속한 시험체는 잔존압축강도율 50~60%, 질량감소율 30~60%의 범위로 다소 저하하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 한천구 ; 비폭열성 콘크리트, 콘크리트 학회지 Vol.10, No.6, 1998.12, pp.5~12
2. 한천구, 양성환, 이병열, 황인성 ; 골재종류 및 폴리프로필렌 섬유 혼입률 변화에 따른 고성능 콘크리트의 폭열 특성에 관한 연구, 콘크리트학회논문집, Vol.11, No.5, 1999. 10, pp 69~78

3. K.D. Hertz ; Limits of spalling of fire-exposed concrete, *Fire Safety Journal* 38, 2003, pp.103~116
4. 한천구, 황인성, 이재삼, 김경민 ; 중심 축하중을 받는 고강도 RC기둥의 섬유 혼입량에 따른 폭발 및 내화 성상, *콘크리트학회논문집*, Vol.18, No.1, 2006.2, pp.83~90
5. G. Sanjayan, L. J. Stocks ; Spalling of High-Strength Silica Fume Concrete in Fire, *ACI Material Journal*, 1993.3, pp.170~173
6. Pierre Kalifa, Gregoire Chene, Christophe Galle; High temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres From spalling to microstructure, *Cement and Concrete Research* 31, 2001, pp.1487~1499
7. Long T. Phan ; High performance concrete at high temperature - an overview, 2002, NIST report
8. 송훈, 형원길, 도정운, 소양섭, “고강도 실리카 폼 콘크리트의 압축강도와 함수율에 따른 폭발 특성” 대한건축학회 구조계 논문집, Vol.20, No.9, 2004, pp.111~118.
9. A. Bilodeau, V.K.R. Kodur, G.C. Hoff, Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire, *Cement and Concrete Research* 26, 2004, pp.163~174
10. Gai-Fei Peng, Wen-Wu Yang, Jie Zhao, Ye-Feng Liu, Song-Hua Bian, Li-Hong Zhao, Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures, *Cement and Concrete Research* 36, 2006, pp.723~727
11. Jianzhuang Xiao, H. Falkner, On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures, *Fire Safety Journal* 41, 2006, pp.115~121
12. Jana Selih, Antonio C.M.Sousa, Theodore W.Bremner, Moisture and Heat Flow in Concrete Walls Exposed to Fire, *Journal of Engineering Mechanics* 120, No 10, (Oct. 1994)
13. V. Kohdur, Fire resistance of concrete confined by FRP, in: N. Banthia(Ed.), Whistler workshop, University of British Columbia, Canada (2001) 10-20.