

가열온도곡선 변화에 따른 고강도 콘크리트의 폭렬방지특성

Spalling Prevention of High Strength concrete Corresponding to the Various Heating Curves

한 천 구* 배 장 춘**

Han, Cheon-Goo Pei, Chang-Chun

Abstract

This study investigated their properties of spalling resistance and residual compressive strength after fire test corresponding to various ISO, RABT heating curves, and contents of hybrid organic fiber of high strength concrete. The results were summarized as following. As fundamental characters of concrete with hybrid organic fiber, the flowability was directly declined as the increase of fiber contents, and air contents were decreased or increased a little bit, but there was not big difference. The compressive strength was gradually declined sluggishly at 28 days. As properties of fire resistance, in case of RABT heating curves, compare with ISO heating curves a spalling aspect showed till range that has much contents of hybrid organic fiber, but they are mostly peeling spalling, which means spalling aspect didn't happen to inside. In conclusion, in case of W/B 25% high strength concrete, the spalling was prevented over 0.04% of contents of fiber at ISO heating curve and over 0.10% of contents of fiber at the RABT heating curve. In case of spalling was prevented, mass reduction rate according to the change of heating temperature curves showed around 7% at ISO heating curves and around 9% at RABT heating curves. The residual compressive strength rate corresponding to the change of heating temperature curves showed 50%~60% at ISO heating temperature curves and 30%~35% at RABT heating temperature curves in case of spalling was prevented.

요 지

본 연구는 고강도 콘크리트의 복합유기섬유 혼입률 변화 및 ISO와 RABT의 가열온도곡선 변화에 따른 내화시험을 실시한 후 폭렬방지성상 및 잔존압축강도 특성 등을 분석한 것으로, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 복합유기섬유 혼입 콘크리트의 기초적 특성으로 유동성은 섬유혼입률이 증가할수록 직선적으로 저하하는 경향이었고, 공기량은 약간의 증가 또는 감소의 경향은 있었으나 큰 차이 없었으며, 28 일 압축강도는 완만한 감소경향을 나타내었다. 내화특성으로, RABT 가열온도곡선의 경우는 ISO 가열온도곡선에 비해 복합유기섬유 혼입률이 많은 범위까지 폭렬양상을 나타내었으나, 주로 박리폭렬일뿐 내부까지 극심한 폭렬양상은 발생하지 않았다. 결국 W/B 25%인 고강도 콘크리트의 경우 ISO 가열온도곡선은 섬유의 혼입률 0.04%이상에서, RABT 가열온도곡선의 경우는 섬유의 혼입률 0.10%이상에서 폭렬이 방지되는 것으로 나타났다. 가열온도곡선 변화에 따른 질량감소율은 폭렬이 방지된 경우 ISO 가열온도곡선은 7%전후, RABT 가열온도곡선은 9%전후로 나타났다. 가열온도곡선변화에 따른 잔존압축강도율은 폭렬이 방지된 경우 ISO 가열온도곡선은 50%~60%, RABT 가열온도곡선은 30%~35%를 나타내었다.

Keywords : Fiber content, Fire resistance, High strength concrete, ISO heating curve, RABT heating curve

핵심 용어 : 섬유의 혼입률, 내화특성, 고강도 콘크리트, ISO 가열온도곡선, RABT 가열온도곡선

* 정희원, 청주대학교 건축공학과 교수, 공학박사

** 정희원, 청주대학교 건축공학과 박사과정

E-mail : cghan@cju.ac.kr 043-229-8480

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2009년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 도심부의 건축물은 지가 상승문제 등과 관련하여 초고층화가 진행되면서 콘크리트의 경우도 고강도화가 꾸준히 진행되어져 왔다. 그런데, 이와같은 고강도 콘크리트인 경우 그 조적이 치밀하여, 화재 시에는 폭렬에 취약하므로 경우에 따라서는 건축물이 붕괴에 까지 이룰 수 있는 것으로 보고되고 있다.⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾

특히, 최근에는 가스, 석유류 등 급가열성 위험물이 에너지원화 됨에 따라 이와 같은 위험물이 만에 하나 발생할수 있는 화재 시에는 일반적인 건축물 화재보다 더욱 극심한 피해를 초래할 수 있게 된다. 즉, 화재시 이러한 급가열성 위험물이 연소될 경우는 약 5분만에 1,000℃이상으로 급격히 상승하며, 그 지속시간은 30분이상으로 건축구조물에 치명적인 폭렬을 발생시킬수 있다.

그러나 지금까지 국내의 연구에서는 고강도 콘크리트의 폭렬방지를 위하여 ISO 가열온도곡선에 따른 내화성 연구가 주를 이루어 진행되었을 뿐 이보다 더 격심한 조건에서의 내화대책에 관한 연구는 미흡한 실정이었다.⁽⁸⁾⁻⁽¹¹⁾

따라서, 본 연구에서는 기존연구⁽¹²⁾에서 시공성, 경제성면으로 가장 효율적인 것으로 밝혀진 복합유기섬유 혼입방법을 대상으로 그 혼입률 변화와 화재시 ISO 834와 RABT(Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln) 등 가열온도곡선변화에 따른 내화시험을 실시한 후 폭렬성상 및 잔존압축강도특성 등을 검토함으로써, 화재시 고강도 콘크리트 건축물의 내화안정성에 기여하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 배합사항은 Table 2와 같다. 즉, 고강도 콘크리트의 내화성능 실험계획으로 W/B는 25%의 1수준에 대해, 시멘트에 대한 질량비로 플라이애시(이하 FA) 20% 및 실리카퓌(이하 SF) 10%를 동시에 혼입하고 섬유를 무혼입

Table 1 실험계획

실험요인		실험수준	
배합사항	W/B(%)	1	25
	목표 슬럼프 플로우(mm)	1	600±100
	목표 공기량(%)	1	3.0±1.0
	복합유기섬유 혼입률(%)	7	0(플레인), 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.10, 0.15
실험요인	가열온도곡선	2	ISO(가열 1시간, 자연냉각) RABT(가열 30분, 110분 냉각)
측정항목	굳지 않은 콘크리트		<ul style="list-style-type: none"> • 슬럼프플로우 • 공기량 • 단위용적질량
	경화 콘크리트	강도 내화시험	<ul style="list-style-type: none"> • 압축강도(7, 28일) • 인장강도(28일) • 폭렬유무 • 폭렬등급 • 질량감소율 • 잔존압축강도

Table 2 콘크리트의 배합표

W/B (%)	W (kg/m ³)	S/a (%)	AE제 (%)	SP제 (%)	단위질량(kg/m ³)				
					C	FA	SF	S	G
25	160	45	0.03	1.25	448	128	64	660	810

한 것을 플레인 배합으로 하였다. 배합변수로는 여기에 폭렬방지용 유기섬유로서 폴리프로필렌섬유(이하 PP섬유)와 나일론섬유(이하 NY 섬유)를 1:1비로 혼입한 복합유기섬유의 혼입률을 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.10, 0.15%의 7 수준으로 변화시켜 실험계획 하였다. 실험요인으로, 가열온도곡선변화는 ISO가열온도곡선과 RABT 가열온도곡선의 2 수준으로 총 14 종류의 공시체를 제작하는 것으로 계획하였다.

이때 배합사항으로, 플레인 콘크리트는 목표 슬럼프 플로우 600±100 mm, 목표 공기량은 3.0±1.0%가 만족되도록 배합설계한 다음 실험변수별 동일한 배합 조건을 적용하였다.

실험사항으로, 굳지않은 콘크리트에서는 슬럼프플로우, 공기량, 단위용적질량을 측정하였고, 경화 콘크리

트에서는 계획된 재령에서 압축강도, 인장강도, 내화 시험후의 폭렬유무, 폭렬등급, 질량감소를 및 잔존 압축강도를 측정하는 것으로 하였다.

2.2 사용재료

본 실험에 사용한 시멘트는 국내산 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였는데, 그 물리적 성질은 Table 3과 같다. 골재로써 잔골재는 국내 P사산 부순 잔골재와 천연 잔골재를 1:1로 혼합한 잔골재를 사용하였으며, 굵은골재는 국내 P사산 20 mm 부순 굵은골재를 사용하였는데, 그 물리적 성질은 Table 4와 같고, 입도 곡선은 Fig. 1과 같다. 혼화제로서 플라이애시 및 실리카폼은 국내에서 일반적으로 유통되는 것을 사용하였는데, 그 물리·화학적 성질은 각각 Table 5, 6과 같다. 혼화제로 고성능 감수제는 국내산 B사의 폴리칼본산계, AE제는 국내 N사산을 사용하였는데, 그 물리적 성질은 Table 7과 같다. 폭렬방지용 유기섬유로

Table 3 시멘트의 물리적 성질

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	안정도 (%)	응결시간(분)		압축강도(MPa)		
			초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3302	0.15	208	351	20.4	29.4	38.7

Table 4 골재의 물리적 성질

구분	밀도 (g/cm ³)	조립률 (FM)	단위용적질량 (kg/m ³)	0.08mm체 통과량(%)
잔골재	2.61	2.70	1645	1.2
굵은골재	2.66	6.56	1532	0.31

Table 5 플라이애시의 물리·화학적 성질

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	강열감량 (%)	압축강도 비(%)	SiO ₂ (%)	습분 (%)	단위수량 비(%)
2.21	4061	3.5	92	67.5	0.2	100

Table 6 실리카 폼의 물리·화학적 성질

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	강열감 량(%)	화학적 성분(%)				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
2.20	200000	1.50	96.40	0.25	0.12	0.38	0.10

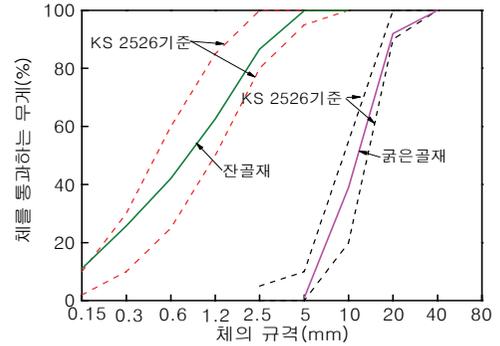


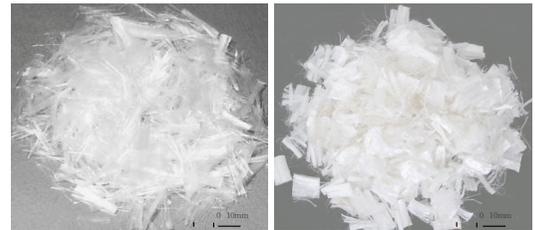
Fig. 1 골재의 입도곡선

Table 7 혼화제의 물리적 성질

구분	주성분	형태	색상	밀도 (g/cm ³)
고성능 감수제	폴리칼본산계	액상	담갈색	1.21
AE제	고급 알칼계	액상	미황색	1.01

Table 8 섬유유리의 물리적 성질

구분	밀도 (g/cm ³)	길이 (mm)	직경 (mm)	인장강도 (MPa)
PP섬유	0.91	19	0.040	560
NY섬유	1.15	9	0.012	918



PP 섬유

NY 섬유

Fig. 2 섬유사진

써 PP섬유, NY섬유는 모두 국내산 S사 제품을 사용하였으며, 그 물리적 성질과 형상은 각각 Table 8 및 Fig. 2와 같다.

2.3 실험방법

본 연구에서 콘크리트의 혼합은 강제식 팬타입 믹서를 사용하여 혼합하였다. 즉, 먼저 시멘트, 잔골재, 굵

은골재 및 복합유기섬유를 동시에 믹서에 넣고 30초간 건비빔을 실시한 후 물을 넣고 다시 60초간 비빔을 실시한 다음, 혼화제를 넣고 재차 90초간 비빔을 실시한 후에 배출하는 것으로 하였다.

굳지않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프플로우는 KS F 2594, 공기량은 KS F 2421, 단위용적질량은 KS F 2409의 규정에 의거 실시하였다.

경화 콘크리트의 실험으로 압축강도 및 잔존 압축강도는 $\varnothing 100 \times 200$ mm 공시체를 KS F 2403 규정에 의거 제작한 다음 계획된 소정 재령 및 내화시험후 KS F 2405 규정에 의거 측정하였고, 인장강도는 KS F 2423에 의거 실시하였다. 화재를 상정한 내화시험은 Fig. 3과 같이 공시체를 종류별로 바닥용 내화시험 가열로 내에 수직으로 배치하여 놓고, Fig. 4와 같은 ISO 및 RABT 가열온도곡선에서 규정하는 표준가열곡선에 따라 실시하였다. 내화시험후 공시체의 폭렬여

부는 육안으로 관찰하여 조사하였고, 질량감소율은 내화시험전후 각 시험체의 중량을 측정하여 백분율로 구하였으며, 폭렬등급은 질량감소율을 기준으로 비폭렬~1/4 폭렬일 때 1등급, 1/4~2/4 폭렬일 때 2등급, 2/4~3/4 폭렬일 때 3등급, 3/4~4/4 폭렬일 때 4등급 등 총 4개의 등급으로 분류하여 평가하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 유동특성

Fig. 5는 복합유기섬유의 혼입률 변화에 따른 굳지않은 콘크리트의 슬럼프플로우를 나타낸 것이다.

섬유를 무혼입한 플레인 콘크리트는 목표 슬럼프플로우치를 만족하는것으로 나타났고, 섬유의 혼입률 증가에 따라서는 거의 직선적으로 저하하는 경향이였다.



Fig. 3 공시체의 배치모습

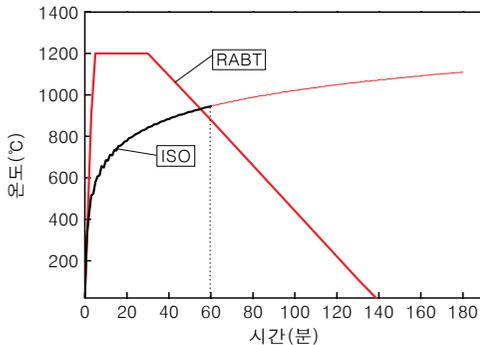


Fig. 4 가열온도곡선

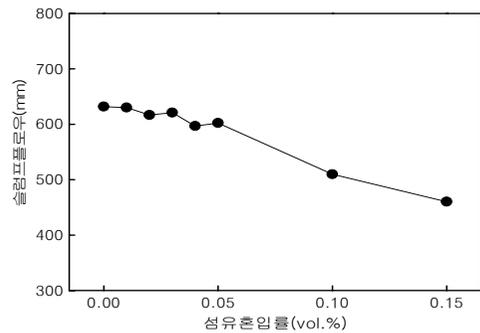


Fig. 5 복합유기섬유의 혼입률 변화에 따른 슬럼프플로우

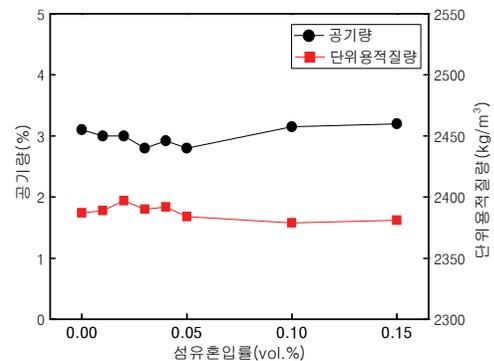


Fig. 6 복합유기섬유의 혼입률 변화에 따른 공기량 및 단위용적질량

3.2 공기량 및 단위용적질량

Fig. 6은 복합유기섬유의 혼입률 변화에 따른 공기량 및 단위용적질량을 나타낸 것이다.

섬유를 무혼입한 플레인 콘크리트는 목표 공기량을 만족하는 것으로 나타났고, 복합유기섬유의 혼입률 변화에 따라서는 섬유의 혼입률 0.05%까지는 공기량이 약간 저하하다가 그 이상에서는 다시 약간 증가하는 경향을 나타내었으나 전반적으로는 큰 차이 없는 것으로 분석된다.

복합유기섬유의 혼입률 변화에 따른 단위용적질량은 공기량의 경향과 유사하게 전반적으로는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

3.3 강도특성

Fig. 7, 8은 복합유기섬유의 혼입률 변화에 따른 압축강도 및 인장강도를 나타낸 것이다.

복합유기섬유의 혼입률 변화에 따른 28일 압축강도는 먼저 플레인의 경우 76.5MPa로 고강도 범위를 나타내었고, 섬유의 혼입률 변화에 따라서는 완만한 감소 경향을 나타내었는데, 이는 섬유와 콘크리트간의 부착강도가 압축강도에 거의 영향을 미치지 못함에 기인한 것으로 판단된다.

복합유기섬유의 혼입률 변화에 따른 인장강도는 압축강도의 8% 전후로, 섬유의 혼입률 0.03%이하에서는 약간의 감소하는 경향을 나타내다가 그 이상 혼입률에서는 압축강도와 달리 큰 차이 없는 것으로 나타났다.

3.4 내화특성

(1) 폭발성상

Fig. 9는 가열온도곡선별 복합유기섬유의 혼입률 변화에 따른 $\varnothing 100 \times 200$ mm 공시체에 대하여 내화시험을 실시하고 난 후의 모습을 나타낸 것이다.

먼저 ISO 가열온도곡선에 따른 내화특성으로, 섬유를 혼입하지 않은 플레인의 경우는 급격한 고온에 심한 폭발이 발생하여 폭발등급이 4 등급으로 낮게 나타

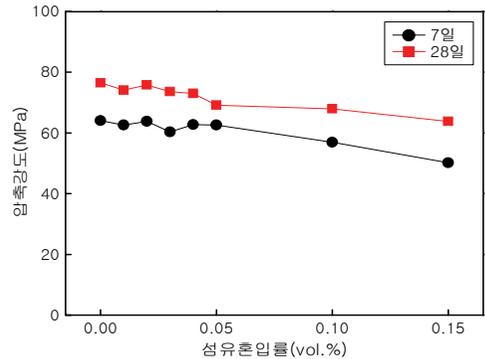


Fig. 7 복합유기섬유의 혼입률 변화에 따른 압축강도

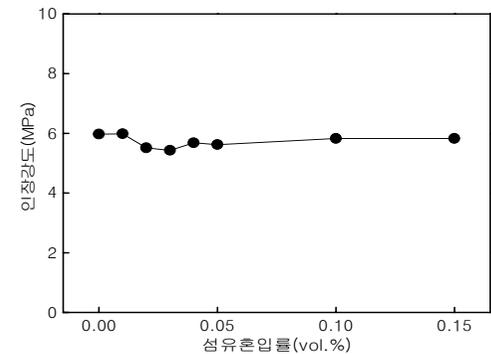


Fig. 8 복합유기섬유의 혼입률 변화에 따른 인장강도

났다. 복합유기섬유의 혼입률 증가에 따라서는 혼입률 0.02%이하에서는 역시 심한 탈과괴폭렬이 발생하였고, 혼입률 0.03%에서는 약간의 박리폭렬이 발생하였으며, 그 이상 혼입률에서는 폭렬이 방지되어 공시체의 원래의 형상을 양호하게 유지하는 것으로 나타났다.

또한, RABT 가열온도곡선에 따른 내화특성으로, 섬유를 혼입하지 않은 플레인은 초기의 급격한 고온에 기인하여 폭발등급이 평균 3등급으로 심한 파괴폭렬이 발생하였다. 복합유기섬유의 혼입률 변화에 따라서는 혼입률 0.01%에서는 심한 파괴폭렬현상이 발생하였고, 섬유의 혼입률 0.02~0.05% 범위내에서는 폭발등급은 1등급을 기록하였으나, 여전히 일부 박리폭렬이 발생하는 것으로 나타났다. 단, 섬유의 혼입률이 0.10%이상인 경우에서 일부 균열양상은 존재하였을 지라도 전체적으로는 폭렬이 발생하지 않고 공시체의 원래의 형상을 그대로 유지하였다.

섬유 혼입률 (%)	ISO 가열온도곡선			RABT 가열온도곡선		
0						
	4등급	4등급	4등급	2등급	3등급	4등급
0.01						
	3등급	4등급	3등급	1등급	2등급	1등급
0.02						
	4등급	4등급	2등급	1등급	1등급	1등급
0.03						
	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급
0.04						
	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급
0.05						
	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급
0.10						
	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급
0.15						
	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급

Fig. 9 복합유기섬유의 혼입률 변화에 따른 공시체의 폭발 모습

전체적으로, 가열온도곡선 변화에 따른 내화특성으로 ISO 가열온도곡선의 경우는 섬유 혼입률 0.04% 이상에서 폭발이 방지되는 것으로 나타났지만, RABT 가열온도곡선의 경우는 섬유 혼입률 0.05%에서도 폭발이 발생하였다. 이는 ISO 가열온도곡선의 경우 섬유 혼입률 0.03%이하의 적은양에서 온도가 서서히 상승됨에 따라 공시체 내부의 수증기압이 지속적으로 응축되어 콘크리트의 인장강도를 초과할 시에는 순간적으로 폭발하는 파괴폭렬현상이 발생하는 것으로 분석되고, 섬유의 혼입률 0.04% 이상에서는 충분한 양의 섬유가 고온에 녹아 통로를 형성하면서 효과적인 수증기 배출로 폭발이 방지된 것으로 판단된다. 또한, RABT 가열온도곡선의 경우는 초기의 갑작스러운 고온상승에 의해 콘크리트 표면의 수증기압이 급격히 상승됨에 따라 섬유의 혼입률 0.05%에서도 콘크리트의 표면이 부분적으로 박리되는 박리폭렬이 발생되었고, 섬유 혼입률 0.10% 이상에서는 충분한 섬유량에 의한 수증기의 양호한 배출로 박리폭렬도 방지되는 것으로 분석된다. 따라서, RABT와 같이 급격한 고온조건인 경우에는 ISO 가열조건보다 폭발의 심각도는 작을지라도 박리폭렬이 발생하므로서 일반적인 내화대책에 필요한 섬유량보다 더 많은 섬유가 필요한 것을 알 수 있다.

(2) 질량감소율

Fig. 10은 가열온도곡선별 복합유기섬유의 혼입률 변화에 따른 내화시험 직후 질량감소율을 나타낸 것이다. 먼저 ISO 가열온도곡선에 따른 내화시험 직후 질량감소율은 플레인의 경우 74% 전후로 크게 나타났고, 복합유기섬유의 혼입률 변화에 따라서는 감소하는 경향이었는데, 섬유 혼입률 0.03% 이상에서는 공히 7% 전후로 비교적 적게 나타났다. 반면, RABT 가열온도곡선에 따른 내화시험 직후 질량감소율은 플레인의 경우 65% 정도로 크게 발생하긴 하였지만 ISO 가열온도곡선보다는 작게 나타났고, 복합유기섬유의 혼입률 변화에 따라서는 0.02%까지는 ISO 가열온도곡선보다 작게 나타났지만 그 이후에는 크게 나타났다. 즉, 폭발이 발생하지 않은 섬유 혼입률 0.10% 이상의 경우에도 질량감소율은 9% 전후로 ISO 가열곡선에 비해 약 2% 전후로 크게 나타났다.

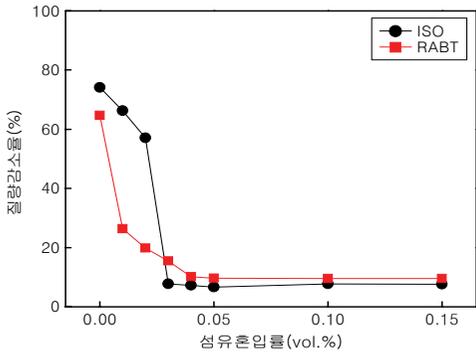


Fig. 10 복합유기섬유의 혼입률 변화에 따른 질량감소율

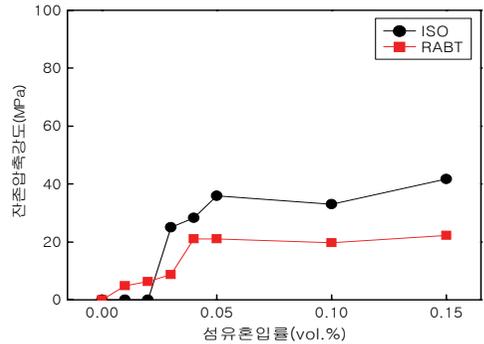


Fig. 11 섬유의 종류 및 혼입률 변화에 따른 잔존압축강도

(3) 잔존압축강도

Fig. 11 및 12는 가열온도곡선별 복합유기섬유의 혼입률 변화에 따른 내화시험 직후 잔존 압축강도 및 잔존압축강도율을 나타낸 것이다.

먼저, ISO 가열온도곡선에 따른 잔존압축강도는 플레인 및 섬유의 혼입률 0.02% 이하에서는 심한 폭렬로 강도측정이 불가였고, 섬유의 혼입률 0.03%~0.15%에서는 잔존압축강도율이 33.9%~59.4% 범위로 섬유의 혼입률이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다.

또한, RABT 가열온도곡선에 따른 잔존압축강도는 플레인 콘크리트의 경우 역시 심한 폭렬현상이 발생하여 강도측정이 불가능하였고, 섬유의 혼입률 변화에 따라서는 잔존압축강도가 증가하는 것으로 나타났는데, 폭렬이 비교적 적게 발생 또는 방지된 섬유의 혼입률 0.04%~0.15%에서 잔존압축강도율은 28.8%~35%로 작게 나타났다.

4. 결론

본 연구는 고강도 콘크리트의 복합유기섬유의 혼입률 변화 및 ISO와 RABT의 가열온도곡선 변화에 따른 내화시험을 실시한 후 폭렬방지성상 및 잔존압축강도 특성 등을 분석한 것으로, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 복합유기섬유 혼입 콘크리트의 기초적 특성으로 유동성은 섬유혼입률이 증가할 수록 직선적으로 저하하는 경향이었고, 공기량은 약간의 증가 또는 감소의 경향은 있었으나 큰 차이 없었으며, 28일 압축

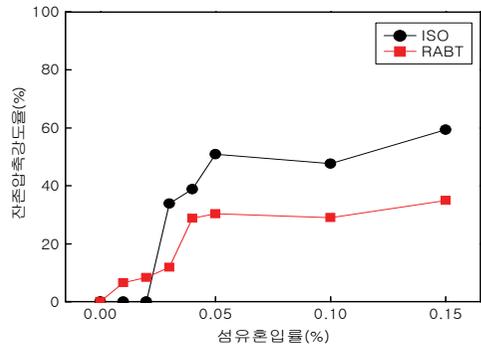


Fig. 12 섬유의 종류 및 혼입률 변화에 따른 잔존압축강도율

강도는 완만한 감소경향을 나타내었다.

- 2) 내화특성으로, RABT 가열온도곡선의 경우는 ISO 가열온도곡선에 비해 복합유기섬유 혼입률이 많은 범위까지 폭렬양상을 나타내었으나, 주로 박리폭렬 일뿐 내부까지 극심한 폭렬양상은 발생하지 않았다. 결국 W/B 25%인 고강도 콘크리트의 경우 ISO 가열온도곡선은 섬유의 혼입률 0.04%이상에서, RABT 가열온도곡선의 경우는 섬유의 혼입률 0.10%이상에서 폭렬이 방지되는 것으로 나타났다.
- 3) 가열온도곡선 변화에 따른 질량감소율은 폭렬이 방지된 경우 ISO 가열온도곡선은 7%전후, RABT 가열온도곡선은 9%전후로 나타났다.
- 4) 가열온도곡선변화에 따른 잔존압축강도율은 폭렬이 방지된 경우 ISO 가열온도곡선은 50%~60%, RABT 가열온도곡선은 30%~35%를 나타내었다. 이상을 종합하면, 섬유의 혼입률 0.02% 이하에서는 ISO 가열온도곡선의 경우 RABT 가열온도곡선

에 비해 더 심한 폭발현상이 발생하였지만, 그 이상 혼입률에서는 RABT 가열온도곡선의 경우에서 박리폭렬이 더 심하게 발생되어 가스, 석유류 등 격심한 온조조건인 화재인 경우 건축구조물의 내화성 확보는 ISO 가열온도곡선에 따른 폭발방지에 필요한 섬유량보다 더 많은 양이 확보되어야만 가능함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 한천구, 비폭열성 콘크리트, 한국콘크리트학회지, Vol. 10, No. 6, 1998, pp. 5-10.
2. 김경민, 고성능 콘크리트를 사용한 RC기둥의 폭발방지 및 내화성 향상, 청주대학교 박사학위논문, 2006. 12.
3. 오창희, 김화중, 고열을 받은 콘크리트의 성상에 관한 실험적인 연구, 대한건축학회지 Vol. 25, No. 98, 1981, pp. 50-54.
4. 김화중, 건축물의 내화성능, 대한건축학회지, Vol. 36, No. 6, 1992, pp. 68-71.
5. 한천구, 채민수, 이병렬, 양성환, 폴리프로필렌 섬유의 혼입률 변화에 따른 고성능 시멘트 모르타의 폭발방지에 관한 연구, 대한건축학회 논문집(구조계), Vol. 15, No. 12, 1999, pp. 89-97.
6. 이병렬: 화재시 고성능 콘크리트의 폭발방지에 관한 연구, 청주대학교 박사학위논문, 2001. 12.
7. 日本コンクリート工學協會, “コンクリート構造物の火災安全性研究委員會 報告書”, 2003.
8. Eurocode 2, “Design of concrete structures, prEN 1992-1-2 part 1.2, General rules, Structural fire design”, European Committee for Standardization, Brussels, 2002.
9. G. Sanjayan, L. J. Stocks, “Spalling of High-Strength Silica Fume Concrete in Fire”, ACI Materials Journal, 1993.3, pp. 170-173.
10. R.W.S. TNO, “Fire Protection in Tunnels”, Document No. GT-98036 98-CVB-R1161, 1998.
11. C.-M. Aldea, J.-M. Franssen, J.-C. Dotreppe, “Fire test on normal and high strength reinforced concrete columns”, International workshop on fire performance of high-strength concrete, National institute of standards and technology special publication 919, 1997, pp. 109-124.
12. 허영선: 초고강도 콘크리트의 내화성에 미치는 영향요인 분석 및 폭발 메커니즘 규명, 청주대학교 석사학위논문, 2006. 3, pp. 195-196, pp. 170-173.

(접수일자 : 2008년 11월 19일)

(심사완료일자 : 2009년 3월 19일)