

배합요인 및 건조상태 변화에 따른 PP섬유 혼입 고강도 콘크리트의 폭발특성

Spalling Properties of the High Strength Concrete Containing PP Fiber Subjected to Fire Mixture Factors and Drying Condition

한 천 구*

Han, Cheon-Goo

한 민 철**

Han, Min-Cheol

송 용 원***

Song, Yong-Won

Abstract

This paper is to investigate the affecting factors on spalling of the high strength concrete including W/B, air content and moisture condition as well as PP fiber contents subjected to fire. An increase with 0.05% of PP fiber resulted in a reduction of slump flow by as much as 11%. Ten percent of air contents due to excessive amounts of AE agent does not lead to variance of slump flow, regardless of PP fiber content. For the effect of the compressive strength, high strength concrete with 15, 25 and 35% of W/B gained 60 MPa~100 MPa of the compressive strength. High strength concrete with H-air had half of compressive strength of that with L-air due to large amount of air. Fire test was conducted in accordance with KS F 2257-1 for 1 hour. Spalling did not occur with all specimens containing more than 0.10% of PP fiber except those with 15% of W/B. Moreover, it is interesting to note that the specimens with more than 10% of air content and with oven dried condition, respectively, had no spalling even if the content of PP fiber is 0.05 vol.%.

요 지

본 연구는 화재시 고강도 콘크리트의 폭발발생에 대한 영향요인을 검토한 것으로써, 폭발에 직접적인 상관관계에 있는 물-결합재비, 공기량 및 함수율 등을 PP섬유의 혼입률과 함께 변화시켜 실험을 실시하였다. 실험결과 유동특성은 섬유 혼입률이 0.05 vol.% 증가함에 따라 약 11%정도 감소하는 것으로 나타났고, 공기량이 10%인 경우는 다량의 AE제 사용에 기인하여 섬유 혼입률과 상관없이 거의 유사한 유동성을 나타냈다. 강도특성으로는 W/B 15, 25 및 35%일 경우 100, 80 및 60 MPa이상으로써 고강도 범위로 나타났다. 공기량 변수의 경우는 H-air가 L-air에 비해 약 1/2배 정도로 낮게 나타났다. 폭발특성으로는 KS F 2257-1에 규정되어 있는 표준가열곡선에 의해 1시간 내화시험을 실시한 결과, W/B는 고강도로 W/B가 낮을수록 심하게 발생하는데, 15%를 제외한 모든 경우에서 전반적으로 PP섬유의 혼입률 0.10 vol.%에서 폭발이 방지되는 것으로 나타났고, 공기량을 10%로 많이 함유하는 시험체와 완전건조 시킨 시험체는 0.05 vol.% 혼입시에도 폭발현상이 발생하지 않는 것으로 나타났다.

Keywords : Air content, Drying states, High performance concrete, Spalling, Water-binder ratio

핵심 용어 : 공기량, 건조상태, 고강도 콘크리트, 폭발, 물-결합재비

* 정희원, 청주대학교 건축공학부 교수

** 정희원, 청주대학교 건축공학부 전임강사

*** 정희원, (주)삼표 기술연구소 연구원

E-mail : cghan@cju.ac.kr 011-469-8379

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 2008년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

건축물은 화재시 인명안전, 재산보호의 관점에서 일정시간 내화성능의 확보와 함께 구조적인 안전대책이 마련되어야 한다. 하지만 현행 건축법이 제정될 당시 콘크리트 구조물의 대부분은 일반강도의 보통 콘크리트로서, 화재 발생시에도 콘크리트 구조체에는 심각한 피해가 발생하지 않아 이에 대한 검토가 거의 이루어지지 않았다.

그러나 최근 건축 구조물은 고층화 및 초고층화와 함께 고강도 콘크리트 및 고성능 콘크리트의 사용량이 증대되면서, 여러 학자들은 압축강도 40 MPa 이상 고강도 콘크리트의 화재시 폭렬발생에 대한 검토를 신중히 제기하고, 건축시공에 앞서 이에 대한 내화성능을 반드시 확보해야만 하는 것을 문제점으로 지적하고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾

폭렬이란, 콘크리트 구조물에 화재가 발생하였을 때 화재시 갑작스런 고온에 의해 콘크리트의 표면이 심한 폭음과 함께 박리·탈락하는 현상을 말하는데, 이러한 폭렬현상은 피복 콘크리트의 겉층으로 구조체 내부까지 고온이 전달되고, 또한 상대적으로 열에 약한 철근이 고온에 노출되어 결국 치명적인 구조내력 저하를

초래하는 원인이 되기도 한다.

이러한 폭렬의 발생요인으로는 급격한 고온, 비대칭의 온도수열, 열응력, 콘크리트 속의 수분, 작은 투수성 및 닫힌 공극 등으로 보고되고 있다.⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾

그러므로, 본 연구에서는 고강도 콘크리트를 대상으로 폭렬에 직접적인 영향을 미치는 물-결합재비, 공기량 등 배합요인 및 함수율 등 건조상태의 변화와 동시에 PP섬유 혼입률을 변화시켜 내화시험을 계획함으로써 각 영향요인에 따른 폭렬특성에 대하여 검토하고자 한다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 배합사항은 Table 2와 같다. 먼저, 시멘트에 대한 질량비로 플라이애시(이하 FA) 20%와 실리카퓌름(이하 SF) 10%를 동시에 치환한 각 W/B 및 공기량별에서 PP섬유 혼입률 0.05 vol.%인 경우를 플레인 배합으로 하고, 목표 슬럼프플로우 650±100 mm를 만족하도록 배합설계 하였다. 실험변수로서 물-결합재비는 15, 25 및

Table 1 실험 계획

Factors	Mixture					Experimental	
	W/B (%)	Air content(%)	Water content (Curing method)	Mineral admixture addition(%)	PP ²⁾ Fiber content (%)	Fresh concrete	Hardened concrete
W/B	15 25 35	3.0±1.0	Standard	FA 20% +SF 10% ¹⁾	0.05 0.10 0.15	<ul style="list-style-type: none"> Slump flow Slump flow 500mm passing time Air content 	<ul style="list-style-type: none"> Compressive strength (7days, 28days) Tensile strength (28day) Spalling existence and nonexistence Spalling grade Weight loss ratio Residual compressive strength ratio
Air content	25	1.0±1.0(L) 3.0±1.0(M) 10.0±1.0(H)	Standard	FA 20% +SF 10%	0.05 0.10 0.15		
Drying states	25	3.0±1.0	Dry Standard Moisture	FA 20% +SF 10%	0.05 0.10 0.15		

1) FA : Fly ash, SF : Silica fume

2) PP : Polypropylene

35%의 3수준, 공기량은 1.0±1.0, 3.0±1.0 및 10.0 ±1.0%의 3수준 그리고 함수율 변화는 양생방법을 달리하여 재령 7일까지 수중양생한 후 재령 28일까지 온도 20±2℃, 습도 60%의 실험실에서 기중양생한 시

Table 2 배합사항

Factors	Water content (kg/m ³)	S/a (%)	AE Agent (%)	SP Agent (%)	Weight(kg/m ³)					
					C	FA	SF	S	G	
W/B (%)	15	160	31	0.03	2.50	747	213	107	328	740
	25	160	45	0.04	1.30	448	128	64	660	810
	35	160	47	0.03	0.93	320	91	46	770	872
Air cont-ent	L	160	45	0.00	1.30	448	128	64	660	810
	M	160	45	0.04	1.30	448	128	64	660	810
	H	160	45	0.12	1.30	448	128	64	660	810

Table 3 시멘트의 물리적 성질

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Setting time(min)		Compressive strength(MPa)		
		Ini.	Fin.	3days	7days	28days
3.15	3,302	208	351	20.4	29.4	38.7

Table 4 골재의 물리적 성질

Aggregates		Density (g/cm ³)	Fineness modulus	Absorption ratio(%)	Unit Weight(kg/m ³)
Fine agg.	Natural sand	2.6	2.21	0.46	1518
	Crushed sand	2.6	3.26	0.46	1684
Coarse agg.		2.61	6.55	0.58	1564

Table 5 FA 및 SF의 물리·화학적 성질

Admixture	Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Ignition loss (%)	SiO ₂ (%)
FA	2.21	4061	3.5	51.2
SF	2.20	200000	1.50	96.40

Table 6 혼화제의 물리적 성질

Admixture	Basis	Type	Color	Density (g/cm ³)
Superplasticizer	Polycarboxylic acid	Fluid	Dark-brown	1.05
Air entraining agent	Negative ion acid	Fluid	Light dark-brown	1.04

Table 7 섬유유리의 물리적 성질

Aspect ratio	Length (mm)	Diameter (mm)	Density (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)	Melting point (°C)
475	19	0.04	0.91	560	160

험체(S-cur)를 표준으로하고, 표준으로 양생한 시험체를 건조로에서 100℃로 가열시켜 24시간동안 건조시킨 시험체를 완전건조(D-cur), 그리고 재령 28일까지 수중에서 양생한 시험체를 습윤(M-cur)으로 구분하여 3수준으로 계획하였다. 각 영향요인의 변화에 따라 PP섬유의 혼입률을 0.05, 0.10 및 0.15 vol.%로 변화시켜 총 27배치를 실험계획 하였다.

실험사항으로, 굳지않은 콘크리트에서는 슬럼프플로우, 슬럼프플로우 500 mm도달시간, 공기량을 측정하고, 경화 콘크리트에서는 계획된 재령에서 압축강도 및 인장강도를 측정하며, 내화시험후 폭발유무, 폭발등급, 질량감소율을 측정하는 것으로 하였다.

2.2 사용재료

본 실험에 사용한 시멘트는 국내산 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였고, 골재는 충남 조치원산의 부순 굵은골재와 조치원산 부순모래 및 천연모래를 6:4의 비율로 혼합한 혼합잔골재를 사용하였다. 혼화제로써 플라이애시는 국내 H사, 실리카폼은 국내 G사 보급품을 사용하였고, 고성능 감수제는 국내산 B사의 폴리칼본산계, AE제는 국내 N사의 음이온계를 사용하였으며, 폭발방지용 유기섬유로는 국내 S사의 PP섬유를 사용하였다. 각 재료의 물리적 성질은 Table 3~7과 같다.

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 콘크리트의 혼합은 강제식 팬타입 믹서를 사용하여 혼합하였고, 굳지 않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프 플로우는 KS F 2594, 슬럼프플로우 500 mm도달 시간은 JSCE의 SCC 성능평가 기준을 참고하여 측정하였으며, 공기량은 KS F 2421의 규정에 의거 실시하였다.

경화 콘크리트의 실험으로 압축강도 및 인장강도는 Ø100×200 mm 공시체를 제작하여, 계획된 재령에서 KS F 2403 및 KS F 2423에 의거 실시하였다.

내화시험은 한국건설기술연구원의 보바닥 가열로 내에 공시체를 일정간격으로 배치하고, Fig. 1과 같이

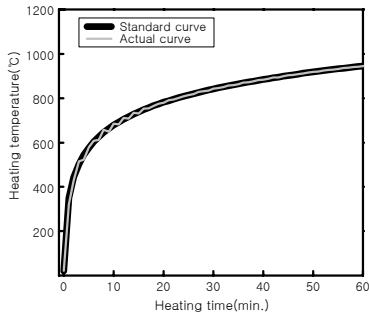


Fig. 1 Heating curve

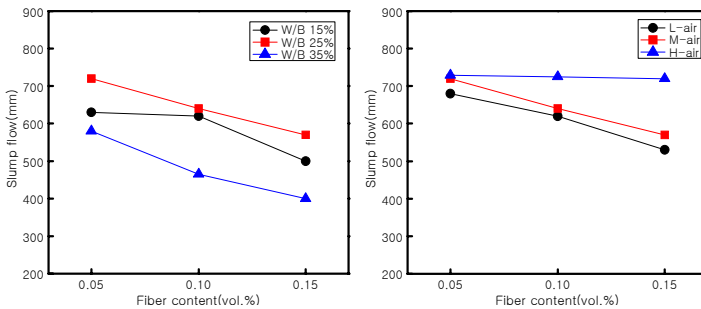


Fig. 2 섬유혼입률 변화에 따른 슬럼프플로우(W/B, 공기량)

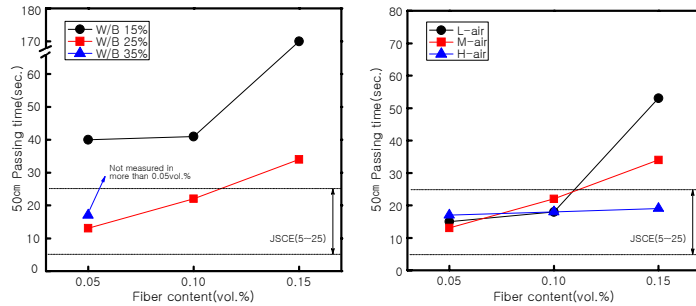


Fig. 3 섬유혼입률 변화에 따른 슬럼프플로우 50cm도달시간(W/B, 공기량)

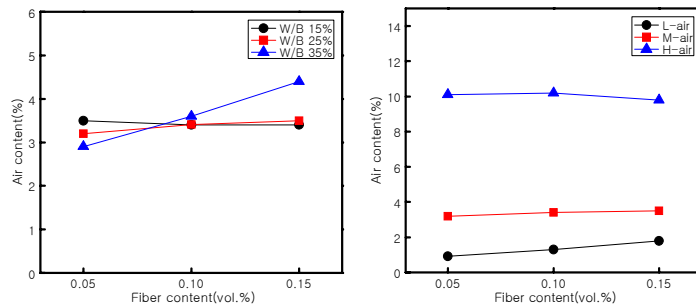


Fig. 4 섬유혼입률 변화에 따른 공기량(W/B, 공기량)

KS F 2257-1에서 규정하는 표준가열곡선에 의거하여 1시간 가열을 실시하였다. 또한 내화시험 후 공시체의 폭렬여부는 육안으로 관찰 하였고, 질량감소율은 내화시험 전후 각 시험체의 질량을 측정하여 백분율로 환산하여 구하였으며, 폭렬등급은 질량감소율을 기준으로 비폭렬~1/4은 폭렬-1등급, 1/4~2/4는 폭렬-2등급, 2/4~3/4는 폭렬-3등급, 3/4~4/4는 폭렬-4등급 등 총 4개의 등급으로 분류하여 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 굳지않은 콘크리트의 특성

Fig. 2, 3은 W/B, 공기량 변수별 섬유혼입률 변화에 따른 슬럼프플로우 및 슬럼프플로우 500 mm 도달시간을 나타낸 것이다.

먼저, W/B 변화에 따른 슬럼프플로우는 섬유 혼입률이 증가할수록 크게 감소하는 경향을 보였는데, W/B 15, 25 및 35%에서 PP섬유 0.15 vol.% 까지 혼입한 경우 약 21~31% 저하하였다. 이러한 실험결과는 섬유의 혼입률이 0.05 vol.% 증가함에 따라 유동성이 약 11~17%정도 저감된 것으로 섬유혼입률에 따른 급격한 유동성 저하현상을 확인할 수 있었다.

공기량 변화에 따른 유동특성으로는 전반적으로 섬유의 혼입률이 증가할수록 유동성은 감소하는 경향을 나타내었는데, 공기량 10%에서는 다량의 AE제 사용에 기인하여 플로우 저하가 거의 없는 것으로 나타났다.

또한, 슬럼프플로우 500 mm도달시간 측정결과 W/B 15%의 경우에는 모두 JSCE의 규정범위에 미치지 못하는 것으로 나타났고, W/B 25%의 경우에는 섬유 혼입률이 0.1 vol.% 이하에서 JSCE의 성능평가 기준안의

1등급 범위로 규정한 5~25초의 범위를 만족하게 나타났으며, W/B 35%의 경우 PP섬유 0.05 vol.% 혼입시에는 JSCE의 규정을 만족하지만 PP섬유 혼입률 0.1 vol.% 이상에서는 슬럼프플로우 500 mm미만으로 JSCE 규정에 미치지 못하는 것으로 나타났다.

공기량 변화에 따른 슬럼프플로우 500 mm도달 시간의 측정 결과에서는 섬유 혼입률 0.1 vol.% 이하에서 모두 JSCE의 규정을 만족하는 것으로 나타났고, 그 이상에서는 H-air를 제외하고 모두 상회하였다.

Fig. 4는 W/B 및 공기량 변수별 섬유 혼입률 변화

에 따른 공기량을 나타낸 것이다.

물-결합재비 변화의 경우, W/B 35%에서는 PP섬유를 0.15 vol.%까지 혼입한 경우를 제외하고는 모두 $3.0 \pm 1.0\%$ 범위내의 공기량을 나타냈고, 공기량 변화에서는 $1.0 \pm 1.0\%$, $3.0 \pm 1.0\%$ 및 $10.0 \pm 1.0\%$ 의 목표 범위를 모두 만족하는 것으로 나타났다.

섬유 혼입함에 따라 공기량은 다소 증가하는 경향을 나타냈는데, 이는 고유동 범위에서 섬유의 혼입률이 증가함에 따라 섬유의 엉킴현상에 의해 플로우 값이 저하함으로써 점성증가로 공극을 형성하는데 기인한 결과로 분석된다.

3.2 경화 콘크리트의 특성

Fig. 5~7은 W/B 및 공기량 변수별 섬유혼입률 변화에 따른 각 재령에서의 압축 및 인장 강도를 나타낸 그래프이다.

전반적으로 PP섬유의 혼입률이 증가할수록 압축강도가 다소 작아지거나 혹은 약간 큰 경향을 나타내었는데, 이는 고강도 영역에서 PP섬유와 콘크리트와의 부착력은 압축강도에 거의 영향을 미치지 못하는 것의 원인으로 판단된다. 특히, 공기량 증가의 영향 까지도 고려해 보면 큰 차이는 아닌 것으로 분석된다.

W/B 15%, 25% 및 35%에서 압축강도는 재령 28일에서 약 100, 80 및 60 MPa이상의 고강도를 나타내었고, 인장강도의 경우는 W/B 변화에 따라 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한, 실험결과 인장강도의 압축강도에 대한 비율은 W/B 15%일때 약 6%, W/B 25%일때 약 8% 및 W/B 35%일때 약 9%로써, W/B가 작을수록 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

공기량 변수별 섬유혼입률 증가에 따른 강도 특성에서는 공기량이 증가할수록 압축강도는 크게 저하하였는데, PP섬유를 0.05 vol.% 혼입하였을 경우 L-air는 85 MPa, H-air는 41 MPa로 2배 이상

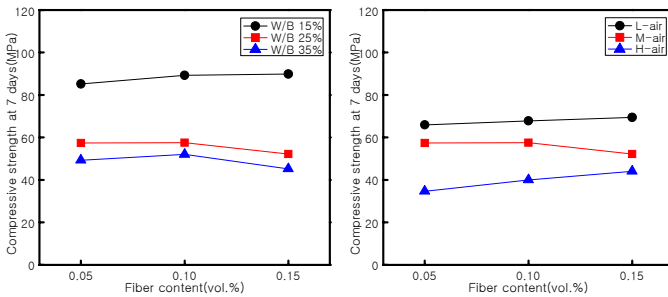


Fig. 5 섬유혼입률 변화에 따른 7일 압축강도(W/B, 공기량)

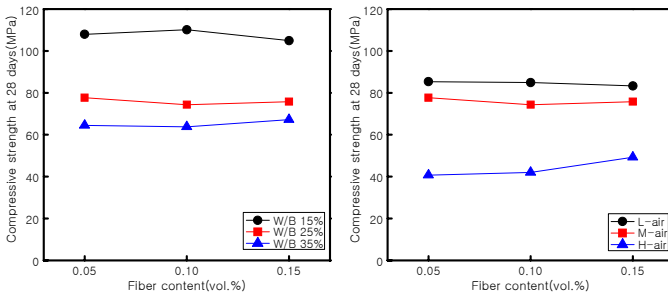


Fig. 6 섬유혼입률 변화에 따른 28일 압축강도(W/B, 공기량)

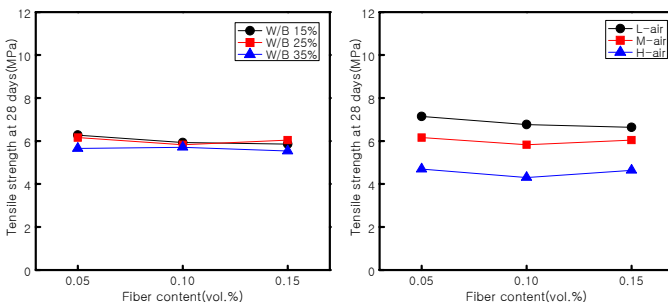


Fig. 7 섬유혼입률 변화에 따른 28일 인장강도(W/B, 공기량)

의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 섬유 혼입을 변화에 따라서는 큰 차이를 나타내지 않았으나 H-air 시험체의 경우는 최대 8 MPa 정도 증가하는 것으로 나타났다. 인장강도의 경우도 압축강도와 유사한 경향을 나타내었는데, 공기량이 작은 경우가 높은 인장강도를 발현하였으며, 압축강도에 대한 인장강도율은 H-air의 경우가 낮은 압축강도의 영향으로

여타의 경우보다 약 2%정도 큰 것으로 나타났다.

3.3 폭렬 특성

Photo 1은 W/B 변수의 영향에 대한 폭렬성상 및 폭렬등급을 나타낸 것이다.

먼저, W/B 15%에서는 PP섬유를 0.05, 0.10 vol.%까지 혼입하여도 시험체의 촬영이 거의 불가능 할 정도로 극심한 폭렬이 발생하였으며, 0.15 vol.%의 경우에도 시험체의 표면이 거의 박리되어 폭렬 2등급 정도를 나타냈다. W/B 25%와 35%의 경우에는 0.05 vol.% 혼입하였을 때 폭렬등급 1~2등급을 기록하여 불안정한 것으로 나타났으나, 0.10 vol.%이상 혼입하였을 경우는 폭렬이 발생하지 않았고 공시체의 형상도 그대로 유지하고 있었는데, 이는 PP섬유가 고온에 녹아 내부 수증기압을 효과적으로 배출한 것에 기인한 것으로 분석된다. 즉, PP섬유의 혼입은 분산성이 좋아 부재 내부에 전체적으로 분포하게 되고, 녹는점이 낮음으로써 고온에 노출된 콘크리트 내부에서 섬유가 녹아 미세공극을 형성하게 되는데, 이러한 공극은 내부에 존재하던 수증기를 외부로 이동시키는 통로의 역할을 하게 된다. 또한 고온에 의한 골재의 팽창과 시멘트의 수축작용에 의한 계면간의 균열은 이러한 통로를 더욱 원활하게 네트워크화 하여 시너지 효과(Synergy effect)를 발생시켜 폭렬이 방지되는 것으로 판단된다.

Photo 2는 공기량의 영향에 대한 폭렬성상 및 폭렬등급을 나타낸 것으로서, 공기량이 많은 공시체의 경우 AE제에 의한 연행 공극

W/B	PP 0.05 vol.%			PP 0.10 vol.%			PP 0.15 vol.%		
W/B 15%									
Spalling degree	4	4	4	4	4	4	2	2	1
W/B 25%									
Spalling degree	1	2	2	1	1	1	1	1	1
W/B 35%									
Spalling degree	1	2	1	1	1	1	1	1	1

Photo 1 W/B 변수별 섬유혼입을 변화에 따른 폭렬성상

Air Contents	PP 0.05 vol.%			PP 0.10 vol.%			PP 0.15 vol.%		
L-air									
Spalling degree	3	3	2	1	1	1	1	1	1
M-air									
Spalling degree	1	2	2	1	1	1	1	1	1
H-air									
Spalling degree	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Photo 2 공기량 변수별 섬유혼입을 변화에 따른 폭렬성상

Curing	PP 0.05 vol.%			PP 0.10 vol.%			PP 0.15 vol.%		
D-cur									
Spalling degree	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S-cur									
Spalling degree	1	2	2	1	1	1	1	1	1
M-cur									
Spalling degree	3	3	2	1	1	1	1	1	1

Photo 3 건조상태 변수별 섬유혼입률 변화에 따른 폭렬성상

(Entrained air) 형성이 증대되어 공극 연속구조에 따른 수증기 배출 통로 생성에 기인하여 폭렬이 방지되는 것으로 나타났고, PP섬유의 혼입률이 증가함에 따라서는 섬유에 의한 내부 수증기 압력이 저하되어 폭렬현상이 방지되는 것으로 나타났다. 또한 PP섬유를 0.10 vol.% 이상 혼입한 시험체는 공기량 조건에 관계없이 폭렬 1등급의 양호한 폭렬방지 성능을 발휘하였다.

Photo 3은 함수율의 영향에 대한 폭렬특성을 나타낸 것이다. 전반적으로, 함수율이 작을수록 폭렬방지 현상이 뚜렷하게 나타났는데, D-cur의 경우 모든 시험체에서 폭렬이 방지되는 것으로 나타났고, M-cur의

경우는 높은 함수율에 기인하여 PP 섬유를 0.15 vol.% 혼입한 경우에도 일부 표면에서 박리가 일어난 것을 확인할 수 있었다.

3.4 질량감소율

Fig. 8은 W/B, 공기량 및 함수율 변수별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 질량감소율을 나타낸 그래프이다.

폭렬성상에서 언급한 것과 같이 W/B 15%에서 PP섬유 혼입률 0.05, 0.10 vol.%일때 약 91~96%의 질량감소율을 보이고 있어 폭렬 4등급을 기록하였으며, L-air와 M-cur에 PP섬유를 0.05 vol.% 혼입한 경우 약 40~60%의 질량감소

율로 폭렬 2~3등급을 기록하였다. 그리고 W/B 25, 35%에 PP섬유를 0.05 vol.% 혼입한 경우는 약 20~40%의 질량감소율로 폭렬 1~2등급을 기록하였으며, 표면 박리폭렬 및 폭렬이 발생하지 않은 여타의 시험체는 질량감소율 약 8%~10%로 양호한 성능을 나타내었다.

4. 결론

본 연구는 고강도 콘크리트의 기초적 특성 및 폭렬에 미치는 영향요인으로써 W/B, 공기량 및 함수율에

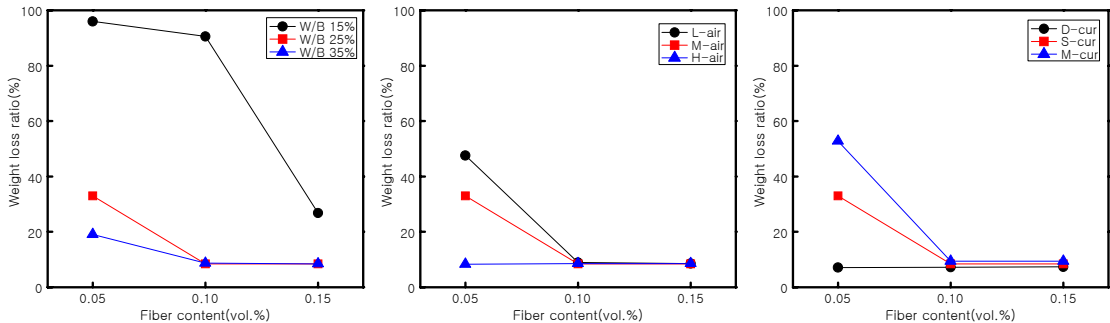


Fig. 8 섬유혼입률 변화에 따른 질량감소율(W/B, 공기량 및 건조상태)

대해 검토하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 굳지않은 콘크리트의 특성으로 먼저, W/B 및 공기량의 영향요인에 따라서는 전반적으로 섬유 혼입률이 증가함에 따라 유동성은 감소하였지만, 공기량의 변수에서 10%의 경우는 섬유의 혼입률과 관계없이 유동성의 저하가 발생하지 않았다. 공기량은 유동성 결과에 따라서 많은 영향을 받았는데, 섬유 혼입률 증가에 따라 공기량이 다소 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 경화 콘크리트 특성으로, 모든 시험체에서 섬유 혼입률이 증가할수록 강도는 약간 증가 혹은 감소하는 경향을 나타냈으나 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 공기량 변수에서 공기량 10%인 경우의 압축강도는 약 50% 감소하였다.
- 3) 폭렬특성으로는 W/B는 고강도로 W/B가 낮을수록 심하게 발생하는데, 15%를 제외한 모든 경우에서 전반적으로 PP섬유의 혼입률 0.10 vol.% 이상에서 폭렬이 방지되는 것으로 나타났고, 공기량 10%와 같이 공기량을 많이 함유하는 시험체와 완전건조 시켜 함수율이 낮은 시험체는 0.05 vol.%에서도 폭렬이 방지되었다.
- 4) 내화시험에 따른 질량감소율은 폭렬이 발생하면 10~95%의 큰 질량 감소율이 나타났고, 폭렬이 방지 되어도 고온에 의한 콘크리트 내부 수분의 증발 및 화학적 변화에 의해 약 8~10%의 질량 감소율이 나타났다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 '콘크리트 코리아 연구단'에서 주관하여 시행한 2006년도 건설핵심기술 연구개발사업 「05-CCT-D11, 고성능·다기능 콘크리트의 개발 및 활용기술」 지원으로 수행되었으며, 이에 감사한다.

참고문헌

1. 한천구, "비폭열성 콘크리트", 콘크리트 학회지, 1998, pp. 5-10.

2. 화재와 콘크리트, 콘크리트학회지 특집기사, Vol. 14, No. 2, 2002.
3. 한천구, 양성환, 이병렬, 황인성; W/C 및 폴리프로필렌 섬유 혼입률 변화에 따른 콘크리트의 고온시 성장, 대한건축학회 논문집(구조계), Vol. 16, No. 10, 2000, pp. 81-88.
4. 한천구, 황인성, "고성능 콘크리트의 폭렬 방지에 관한 연구", 계간 전자제, 99년 봄호, 통권 17호, 1999, pp. 226-235.
5. 황인성, "화재시 고성능 콘크리트의 폭렬에 미치는 재료 및 배합요인의 영향", 청주대학교 석사학위논문, 1999.12.
6. 이병렬, "화재시 고성능 콘크리트의 폭렬방지에 관한 연구", 청주대학교 박사학위논문, 2001.12.
7. 송훈, "화재시 고강도 콘크리트의 내화성능에 관한 연구", 동경대학 박사학위 논문, 2003.
8. Long T. Phan, "High performance concrete at high temperature an overview", NIST report, 2002.
9. 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.
10. Gary R. Consolazio, Michael C. McVay, Jeff W. RishIII, "Measurement and prediction of pore pressures in saturated cement mortar subjected to radiant heating", ACI Materials Journal, Vol. 95, 1998, pp. 525-536.
11. C.G. Han, Y.S. Hwang, S.H. Yang, N. Gowripalan, "Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement", Cement and Concrete Research, 35, 2005, pp. 1747-1753.
12. Rosa Maria Espinosa, Lutz Franke, "Influence of the age and drying process on pore structure and sorption isotherms of hardened cement paste", Cement & Concrete Research 36, 2006, pp. 1969-1984.
13. J.G. Sanjayan, "Design against spalling of concrete in fire", Proceeding of the First Korea-Australia Workshop on Recent Advances in High Performance Concrete, 2005, pp. 155-169.

(접수일자 : 2007년 8월 8일)
(심사완료일자 : 2008년 6월 20일)