

양생요인 및 PP 섬유 혼입을 변화에 따른 고강도 콘크리트의 폭렬특성

An Experimental Study on the Curing Method and PP Fiber Mixing Ratio on Spalling Resistance of High Strength Concrete

한 천 구*

Han, Cheon-Goo

김 원 기**

Kim, Won-Ki

Abstract

This study is to investigate the fundamental and fireproof qualities of high strength concrete corresponding to changes in the curing factors and the PP fiber ratio. The results were as follows. For the fundamental characteristics of concrete, the fluidity was reduced in proportion to the increase in the PP fiber ratio. The compressive strength was somewhat reduced according to an increase in the PP fiber ratio. However, it had the high strength scope of more than 60 MPa at 7 days and of more than 90 MPa at 28 days. On the spalling mechanism followed by changes of the water content ratio, spalling was prevented in all combinations, except the specimen without PP fiber and subjected to 3.0% of moisture contents. When spalling was prevented at that time, the residual compressive strength ratio was 22%~41% and the mass reduction ratio was 5%~7%, which was relatively favorable. As the spalling mechanism corresponds to changes in the curing method, spalling was prevented in concrete with a PP fiber mixing ratio of more than 0.05% in the event of standard curing, and in concrete with a PP fiber mixing ratio of more than 0.10% in the case of steam curing and autoclave curing. In these cases, when spalling was prevented, the residual compressive strength ratio was 23~42% and the mass reduction ratio was 7~11%. In these results, the ease of spalling prevention in high strength concrete was inversely proportional to the water content ratio. Depending on the curing method, spalling was prevented in concrete with over 0.05% PP fiber with standard curing and in concrete with over 0.1% PP fiber with steam curing and autoclave curing.

Keywords : High Strength Concrete, Spalling Resistance, Curing Method, Polypropylene Fiber

1. 서 론

최근 도심지에서는 건축물이 경쟁하듯 고층화 함에 따라 고강도 콘크리트의 사용도 증가하고 있다.

이러한 고강도 콘크리트를 제조하기 위해서는 낮은 물결합재비(W/B), 양질의 골재 사용, 실리카 폼 등의 고분말 혼화재 사용, 고성능감수제 사용 및 양생방법 변화 등 여러 가지 요인을 필요로 하고 있다. 특히 이중 양생요인으로 증기양생 및 오토클레이브(autoclave)양생의 경우는 초기 수화반응을 증가 시켜 콘크리트의 미세공극을 채움으로써 강도를 증가시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.¹⁾

그러나, 이렇게 제조된 고강도 콘크리트의 경우는 역학적 성질, 내구성 등에서는 유리한면이 있을지라도 내부 조직이 치밀하

여 화재 시 급격한 온도상승에는 콘크리트의 내부에 큰 수증기압이 생성됨으로서 심한 폭음과 함께 바리 또는 탈락하는 폭렬현상이 발생하여, 경우에 따라서는 건축물이 붕괴되는 원인이 되기도 한다.^{2),3)}

따라서, 본 연구에서는 다양한 양생요인에 의해 제작된 고강도 콘크리트의 폭렬 특성을 분석하기 위하여 폭렬방지에 효과적인 것으로 알려진 PP 섬유의 혼입을 변화와 함께 표준양생 후 강제 건조에 따르는 함수율 변화, 증기양생 및 오토클레이브 등 양생요인에 따른 고강도 콘크리트의 기초적 특성과 내화특성에 대하여 검토하고자 한다.

* 청주대학교 건축공학과 교수, 공학박사, 정회원

** 청주대학교 건축공학과 대학원, 박사과정, 정회원

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1과 같고, 배합사항은 표 2와 같다. 즉, 실험요인은 W/B 25 % 1 수준에 대하여, 시멘트에 대한 질량 비로 플라이애시(이하 FA) 20 %와 실리카 폼(이하 SF) 10 %를 치환한 것을 플레인 배합으로 하고, 목표 슬럼프플로우 700±100 mm, 목표 공기량 3.0±1.0 %를 만족하도록 배합설계 하였다. 실험변수로서 먼저, 시리즈 I에서는 함수율을 0, 1.0, 2.0, 3.0 %의 4수준에 대하여 PP 섬유 혼입율 0, 0.05, 0.10, 0.15 Vol.% 4수준으로 하여 합계 16수준을 실험계획 하였다.

표 1. 실험계획

시리즈	배합사항					수준	실험사항
	W/B (%)	목표 슬럼프플로우 (mm)	목표 공기량 (%)	함수율 (%)	양생방법		
시리즈 I	25	700 ± 100	3.0 ± 1.0	0 1.0 2.0 3.0	표준양생	0 0.05 0.10 0.15	<ul style="list-style-type: none"> ■ 굳지않은 콘크리트 - 슬럼프플로우 - 슬럼프플로우 500 mm 도달시간 - 공기량
시리즈 II				-			

표 2 콘크리트 배합표

W/B	단위수량 (kg/m³)	S/a (%)	AE제 (%)	SP제 (%)	단위질량 (kg/m³)				
					C	FA	SF	S	G
25	160	45	0.04	1.8	448	128	64	673	855

시리즈 II에서는 양생방법 변화로써 표준양생, 증기 양생, 오토클레이브양생의 3수준으로 하고, PP 섬유 혼입율을 0, 0.05, 0.10, 0.15 %으로 4수준으로 하여 합계 12수준을 실험

계획 하였다. 실험사항으로, 굳지않은 콘크리트에서는 슬럼프플로우, 슬럼프플로우 500 mm 도달시간, 공기량 및 단위용적질량을 측정하였고, 경화 콘크리트에서는 계획된 재령에서 압축강도 및 내화시험 후 폭발유무, 질량감소율, 폭발등급 및 잔존압축강도를 측정 하였다.

2.2 사용재료

본 실험에 사용한 사용재료로서 시멘트는 국내산 A사의 보통 포트랜드 시멘트를 사용하였고, 그 물리적 성질 표 3과 같다. 골재로서 굵은 골재는 충북 음성산을 사용하였고, 잔골재는 국내 D 사산 혼합모래(부순모래:강모래 = 6:4)를 사용하였는데, 그 물리적 성질은 표 4와 같다.

혼화제로서 FA는 국내 H사산, SF는 노르웨이산을 사용하였고, 혼화제로서 고성능감수제(SP제)는 국내 E사산 폴리칼본산계, AE제는 국내 E사산 음이온계를 사용하였는데, 그 물리·화학적 성질은 표 5~7과 같다.

또한, 폭발방지용 유기섬유로서 PP 섬유는 국내 W사산으로서 그 물리적 성질은 표 8과 같다.

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 콘크리트의 혼합은 강제식 팬타입 믹서를 사용 하였다. 굳지않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프플로우는 KS F 2594, 슬럼프플로우 500 mm 도달시간은 스톱워치를 이용하여 4방면 평균시간으로 구하였다. 공기량은 KS F 2421, 단위용적질량은 KS F 2409의 규정에 의거측정 하였다. 콘크리트의 양생 방법으로 증기양생의 경우는 4 시간 동안 최고온도 60℃까지 가열 한 후, 최고 온도 60℃에서 6 시간 지속시킨 후 실온냉각 하는 것으로 하였다. 오토클레이브 양생의 경우는 오토클레이브 양생 시험기를 이용하여 6시간 동안 180℃ 온도를 상승시킨 후 18 시간 동안 180℃로 유지 한 후 실온냉각 하는 것으로 하였다.

표 3. 시멘트의 물리적 성질

밀도 (g/cm³)	분말도 (g/cm³)	안정도 (%)	응결시간(분)		압축강도(MPa)		
			초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3156	0.50	235	320	20.9	28.4	38.9

표 4. 골재의 물리적 성질

구분	밀도 (g/cm³)	조립률 (FM)	흡수율 (%)	단위용적 질량 (kg/m³)	0.08 mm체 통과량 (%)	
						잔골재
	부순모래	2.60	3.26	0.46	1684	0.32
굵은골재	2.65	6.48	0.58	1564	0.40	

표 5. 플라이애시의 물리·화학적 성질

밀도 (g/cm³)	분말도 (cm²/g)	강열감량 (%)	습분 (%)	SiO₂ (%)
2.21	3 520	3.7	0.1	46.8

표 6. 실리카폼의 물리·화학적 성질

분말도 (cm ² /g)	밀도 (g/cm ³)	강열감량 (%)	화학적 구성(%)				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
200 000	2.21	1.50	96.4	0.25	0.1	0.38	46.8

표 7. 혼화제의 물리적 특성

구분	주성분	형태	색상	밀도 (g/cm ³)
고성능감수제	폴리칼본산계	액상	암갈색	1.05
AE제	음이온계	액상	미백색	1.04

표 8. 섬유 물리적 특성

구분	형상비	길이 (mm)	직경 (mm)	밀도 (g/cm ³)	인장강도 (MPa)	융해점 (°C)
PP 섬유	475	19	0.04	0.91	560	160

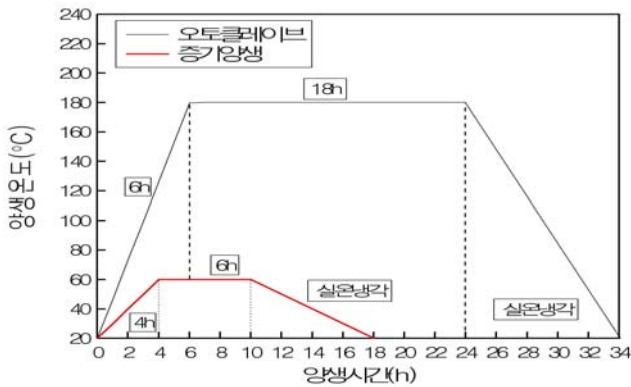


그림 1. 오토클레이브 및 증기양생 온도상승곡선



(a) 증기양생 전 모습 (b) 오토클레이브 양생 모습

사진 1. 증기 및 오토클레이브 양생 모습

경화 콘크리트의 실험으로 재령 경과에 따른 압축강도 및 잔존 압축강도는 $\varnothing 100 \times 200$ mm 공시체를 제작하여, 계획된 재령에서 KS F 2405의 규정에 의거 실시하였고, 내화시험은 한국건설기술연구원의 내화 실험동에서 보·바닥가열로 내에 $\varnothing 100 \times 200$ mm 공시체를 일정한 간격으로 배치한 후 KS F 2257-1에서 규정한 표준가열곡선에 의거하여 1시간동안 가열 하는 것으로 하였

다. 내화시험 후 폭렬유무는 육안으로 관찰하여 조사하였고, 질량 감소율은 내화시험 전후의 각 질량을 측정하여 백분율로 구하였다. 또한 폭렬등급은 질량감소율을 기준으로 0~25 %는 1등급, 25~50 %는 2등급, 50~75 %는 3등급, 75~100 %는 4등급으로 4개의 등급으로 분류하여 측정하였다.

3 실험 결과 및 분석

3.1 굳지않은 콘크리트의 특성

그림 2는 PP 섬유 혼입을 변화에 따른 슬럼프플로우 및 슬럼프플로우 500 mm 도달시간을 나타낸 것이다. 먼저, PP 섬유를 혼입하지 않은 플레인 콘크리트는 목표범위인 700 ± 100 mm를 만족하는 것으로 나타났고, 섬유 혼입율이 증가 할수록 약 6~22 % 비례적으로 감소하여 PP 섬유 혼입율 0.15 %에서는 목표 범위를 만족하지 못하는 것으로 나타났는데, 이는 PP 섬유의 뭉침 현상에 의한 분산력 저하에 기인한 것으로 분석된다.⁴⁾

또한, PP 섬유 혼입을 변화에 따른 슬럼프플로우 500 mm 도달시간 측정 결과는 PP 섬유 혼입율 0.05~0.1 %의 경우는 JSCE의 성능평가 기준안의 1등급 범위로 규정한 5~25 초의 범위를 만족하는 것으로 나타났고, PP 섬유 혼입율 0.15 %의 경우는 JSCE의 규정 범위에 미치지 못하는 것으로 나타났다.

그림 3은 PP 섬유 혼입을 변화에 따른 공기량 및 단위용적질량을 나타낸 것이다. PP 섬유 혼입율이 증가함에 따라 공기량은 약간 증가하는 경향을 나타내었는데, 단, 본 실험범위 내에서는 모두 목표범위인 3.0 ± 1.0 %를 만족하는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트 내 섬유 상호간에 미세 공극이 증가함에 기인한 것으로 분석된다.

한편, PP 섬유 혼입을 변화에 따른 단위용적질량은 PP 섬유 혼입율이 증가 할수록 공기량 증가에 기인하여 감소하는 경향을 나타내었다.

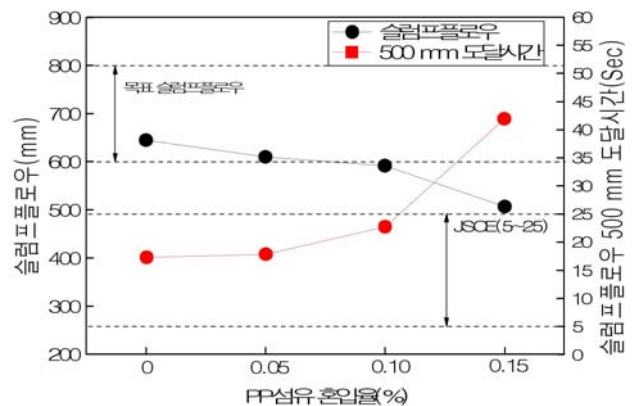


그림 2. PP 섬유 혼입을 변화에 따른 슬럼프플로우 및 500 mm 도달시간

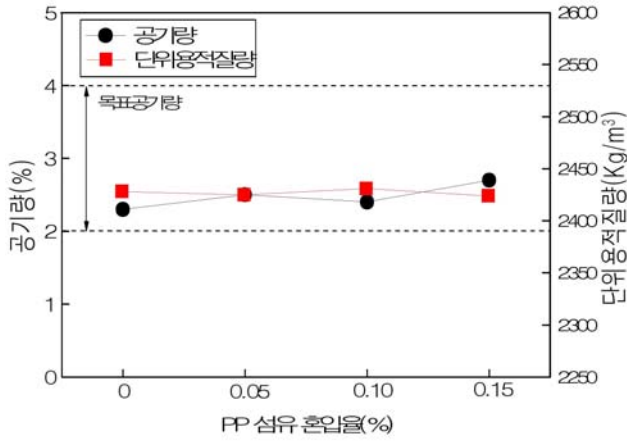


그림 3. PP 함유율을 변화에 따른 공기량 및 단위용적질량

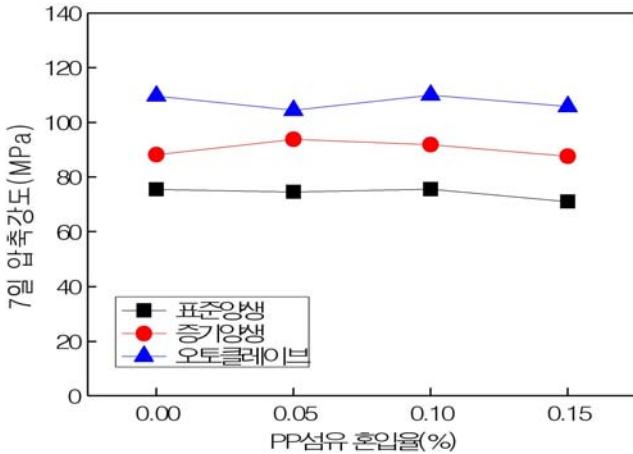


그림 4. 양생방법 별 PP 함유율을 변화에 따른 재령 7일 압축강도

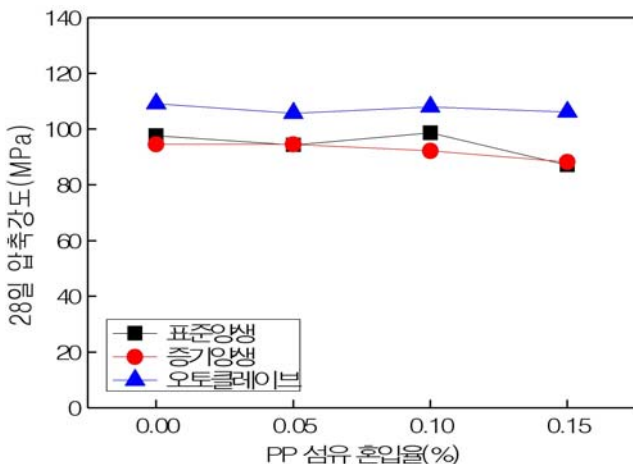


그림 5. 양생방법 별 PP 함유율을 변화에 따른 재령 28일 압축강도

3.2 경화 콘크리트의 특성

3.2.1 강도 특성

그림 4 및 5는 양생방법 별 PP 함유 혼입을 변화에 따른 재령 7일 및 28일의 압축강도를 나타낸 것이다.

전반적으로 재령 7일 압축강도는 70 MPa 이상의 고강도 범위를 나타내었고, PP 함유 혼입율이 증가 할수록 다소 감소하는 경향을 나타내었는데, 이는 콘크리트내의 PP 섬유와 콘크리트간 부착강도가 압축강도에 크게 영향을 미치지 못하는 것과 공기량의 증가에 기인한 강도저하의 복합 영향으로 판단된다.

한편 양생방법 변화에 따른 재령 별 압축강도는 재령 7일에서 표준양생의 경우 70~75 MPa 전후로 나타난 것에 비해 증기양생의 경우 87~93 MPa, 오토클레이브의 경우 104~109 MPa로 약 20~30 MPa 큰 강도값을 나타내었다. 이는 초기재령에서 증기양생 및 오토클레이브 양생 시 고온 및 고온고압에 의해 콘크리트의 수화작용이 촉진되어짐에 따라 강도 증진 속도가 빠르게 나타난 것으로 사료된다. 또한, 재령 28일에서의 압축강도는 표준양생의 경우 87~97 MPa로 7일 재령보다 약 20 % 정도 증가하는 경향을 나타내었으나, 증기양생 및 오토클레이브 양생의 경우는 약 5 % 미만으로 강도증진에 거의 미미한 것으로 나타났다.

3.2.2 내화특성

1) 함수율 변화에 따른 내화특성

사진 2는 함수율 및 PP 함유 혼입을 변화에 따른 폭발성상 및 폭발등급을 나타낸 것이다.

전반적으로 함수율이 낮아질수록 폭발이 방지 되는 것으로 나타났다. 즉, 함수율 0~2.0 %의 경우는 모두 폭발이 방지되어 폭발등급 1등급을 기록하였고, 함수율 3.0 %의 경우는 PP 함유 무혼입인 경우를 제외하고 모두는 폭발이 방지 되는 것으로 나타났다. 이는 함수율 0~2.0 % 및 함수율 3.0 %시 PP 함유를 0.05 %이상 혼입 시킬 때에는 콘크리트 내부 수증기압이 상대적으로 작게 발생하는 것 및 발생된 수증기를 양호하게 배출시킴으로서 폭발이 방지된 것으로 판단된다.

그림 6 및 7은 함수율 및 PP 함유 혼입을 변화에 따른 잔존압축강도 및 질량감소율을 나타낸 것이다.

먼저, 함수율 및 PP 함유 혼입을 변화에 따른 잔존압축강도는 함수율 3.0 %에서 PP 함유 무혼입의 경우 파괴 폭발이 발생하여 잔존압축강도 측정이 불가 하였고, 함수율 2 %이하의 섬유 혼입 모든 변수 및 함수율 3 %의 경우 PP 함유혼입을 0.05 % 이상에서는 잔존압축강도가 30 MPa 전후로 나타났고 함수율 0~2.0 %의 경우는 25~36 MPa 범위의 잔존압축강도를 확인할 수 있었다.

구분	PP 섬유 혼입율(%)											
	0			0.05			0.1			0.15		
함수율 (%)	0											
		1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급
	1.0											
		1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급
2.0												
	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	
3.0												
	3등급	4등급	4등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	

사진 2. 함수율 및 PP섬유 혼입을 변화에 따른 폭발성상

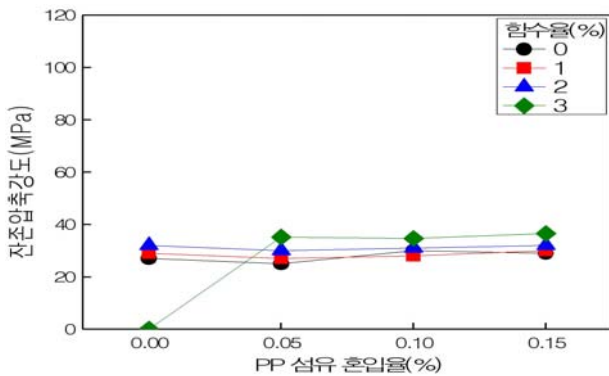


그림 6. 함수율 및 PP 섬유 혼입을 변화에 따른 잔존압축강도

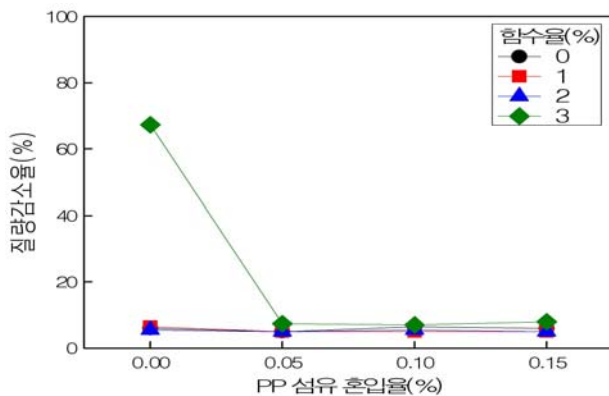


그림 7. 함수율 및 PP 섬유 혼입을 변화에 따른 질량감소율

한편, 함수율 및 PP 섬유 혼입을 변화에 따른 질량감소율은 함수율 3.0 %에서 섬유를 혼입하지 않은 경우는 약 70 % 정도로 비교적 큰 질량감소율을 나타내었고, PP 섬유 혼입율 0.05 % 이상에서는 7 % 전후로 비교적 양호하게 나타났다. 또한, 함수율 0, 1.0, 2.0 %의 경우는 섬유 혼입율에 관계 없이 모두 폭발이 발생하지 않아 약 5~6 %의 낮은 질량감소율을 나타내었다.

2) 양생방법 변화에 따른 내화특성

사진 3은 양생 방법 별 PP 섬유 혼입을 변화에 따른 내화시험 후 폭발성상 및 폭발등급을 나타낸 것이다.

전반적으로 PP 섬유의 혼입율이 증가 할수록 PP 섬유가 고온에 녹아 생긴 공극으로 콘크리트 내부 수증기압이 원활하게 배출되어 폭발이 방지 됨을 알 수 있다.

즉, 표준양생은 PP 섬유를 혼입하지 않은 경우 모두 심한 파괴폭렬이 발생하였으나, PP 섬유 혼입율 0.05 % 이상에서는 폭발 없이 1등급으로 양호한 경향을 나타내었다. 반면, 오토클레이브 및 증기양생의 경우 PP 섬유 혼입율 0.05 %에서는 폭발 등급 1등급을 기록하였으나, 일부 표면 박리현상이 발생하는 것으로 나타났다. 특히, 오토클레이브의 경우는 증기양생에 비해 심하게 박리폭렬을 일으킨 것을 확인할 수 있었는데, 이는 양생 방법에 따른 강도 증진효과에 의해 콘크리트의 내부 조직이 치밀해 짐에 기인한 것으로 사료된다.

그림 8 및 9는 양생방법 별 PP 섬유 혼입을 변화에 따른 잔존압축강도 및 질량감소율을 나타낸 것이다.

구분	PP 섬유 혼입율(%)											
	0			0.05			0.1			0.15		
표준양생												
	3등급	4등급	4등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급
증기양생												
	1등급	2등급	4등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급
오토클레이브												
	3등급	4등급	4등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급

사진 3. 양생 방법 및 PP섬유 혼입율 변화에 따른 폭발성상

먼저 PP 섬유를 혼입하지 않은 경우 모두 심한 파괴 폭발에 의해 잔존압축강도의 측정이 불가 하였고, 양생 방법변화에 따라서는 표준양생의 경우 PP 섬유 혼입율 0.05 % 이상에서 잔존압축강도 34~36 MPa, 증기양생의 경우 24~35 MPa, 오토클레이브의 경우 26~32 MPa로 PP 섬유 혼입율이 증가 할수록 또한 7일 및 28일 압축강도가 작을수록 잔존압축강도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

양생방법 별 PP 섬유 혼입율 변화에 따른 가열 후 질량감소율은 먼저 PP 섬유를 혼입하지 않은 경우 심한 폭발현상에 의해 49~77 %로 비교적 큰 질량감소율로 나타내었고, 양생방법 변화에 따라서는 표준양생의 경우 PP 섬유 혼입율 0.05 이상에서 7 %로 전후로 가장 양호하게 나타났고, 그다음으로 증기양생 및 오토클레이브의 순으로 공히 11 % 미만 이었다.

4. 결 론

본 연구는 양생요인 및 PP 섬유 혼입율 변화에 따른 고강도 콘크리트의 기초적 특성 및 내화특성을 분석하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 콘크리트의 기초적 특성으로 유동성은 PP 섬유 혼입율이 증가 할수록 감소하는 경향을 나타내었고, 압축강도는 PP 섬유 혼입율 증가에 따라 약간 감소하였으나 재령 7일에서 모두 60 MPa 이상, 28일에서 90 MPa 이상으로 고강도 범위를 나타내었다.
- 2) 함수율 변화에 따른 폭발성상으로 함수율 3.0 %에서 PP

섬유를 혼입하지 않은 플레인은 심하게 폭발이 발생한 반면 여타의 모든 배합에서는 폭발이 방지되는 것으로 나타났다. 이때 폭발이 방지된 경우 잔존압축강도율은 22~41%, 질량감소율은 5~7 %이었다.

- 3) 양생방법 변화에 따른 폭발성상으로 본 연구 범위에 있어서 표준양생의 경우는 PP 섬유 혼입율 0.05 % 이상, 증기양생 및 오토클레이브양생의 경우 PP 섬유 혼입율 0.10 % 이상에서 폭발이 방지되는 것으로 나타났다. 이때 폭발이 방지된 경우 잔존압축강도율은 23~42 %, 질량감소율은 7~11 % 이었다.

이상을 종합하여 볼때 고강도 콘크리트는 함수율이 작을 수록 폭발방지가 용이하고, 양생방법에 따라서는 표준양생, 증기양생, 오토클레이브 양생 순으로 표준양생의 경우는 PP 섬유 혼입율 0.05 % 이상, 증기양생 및 오토클레이브의 경우는 PP 섬유 혼입율 0.1 % 이상 혼입해 주어야 폭발이 방지됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김광련, 안태호, 김용태, 김병기, 섬유보강 콘크리트에서 나일론 섬유의 응용가능성, 한국 콘크리트학회지 제16권 제6호, pp.65~73, 2004.11
2. 두산산업개발(주), 화재시 고성능 콘크리트의 폭발방지 및 내화성능 향상 공법 개발, 2005 산학 공동연구, 청주대학교 산업과학 연구소, 2005
3. 박승범, 섬유보강콘크리트, 콘크리트학회지, 제2권 제1호, pp.5~13, 1990.3

4. 한국콘크리트학회, 최신 콘크리트 공학, 기문당, 2005
5. 한천구, 비폭열성 콘크리트, 한국콘크리트학회지, 제10권, 제6호, pp 5~10, 1998,12
6. 한천구, 양성환, 한민철, 裴長春, PP섬유 혼입에 의한 60~100 MPa 급 고강도 콘크리트의 폭발방지, 대한건축학회 논문집(구조계) 제24 권 제4호, pp.91~98, 2008,4
7. K.D. Hertz, Limits of spalling of fire-exposed concrete, Fire Safety Journal 38, pp. 103~116, 2003
8. Long T. Phan, High performance concrete at high temperature - an overview, NIST report, 2002

(접수 2009. 9. 3, 심사 2009. 9. 28, 게재확정 2009. 10. 5)

요 약

본 연구는 양생요인 및 PP 섬유 혼입을 변화에 따른 고강도 콘크리트의 기초적 특성 및 내화특성을 분석하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 콘크리트의 기초적 특성으로 유동성은 PP 섬유 혼입율이 증가 할수록 감소하는 경향을 나타내었고, 압축강도는 PP 섬유 혼입율 증가에 따라 약간 감소하였으나 재령 7일에서 모두 60 MPa 이상 재령 28일에서 90 MPa 이상으로 고강도 범위를 나타내었다. 함수율 변화에 따른 폭발성상으로 함수율 3.0 %에서 PP 섬유를 혼입하지 않은 플레인을 제외한 모든 배합에서 폭발이 방지되는 것으로 나타났다. 이때 폭발이 방지된 경우 잔존압축강도율은 22~41%, 질량감소율 5~7 %로 비교적 양호한 것으로 분석되었다. 양생방법 변화에 따른 폭발성상으로 표준양생의 경우 PP 섬유 혼입율 0.05 % 이상, 증기양생 및 오토클레이브의 경우 PP 섬유 혼입율 0.10 %에서 폭발이 방지되는 것으로 나타났다. 이때 폭발이 방지된 경우 잔존압축강도율은 23~42 %, 질량감소율은 7~11 % 전후로 나타났다. 이상을 종합하여 볼때 고강도 콘크리트는 함수율이 작을 수록 폭발방지가 용이하고, 양생방법에 따라서는 표준양생이 PP섬유 0.05 % 이상, 증기양생 및 오토클레이브의 경우 PP 섬유 혼입율 0.1 % 이상을 혼입해 주어야 폭발이 방지됨을 알수 있었다.

키워드 : 고강도 콘크리트, 폭발방지, 양생방법, 폴리프로필렌 섬유