

# 초고강도 콘크리트의 섬유혼입률에 따른 폭렬특성에 관한 실험적 연구

이 태 규

우송대학교 철도건설시스템학과  
(2011. 3. 11. 접수 / 2011. 7. 6. 채택)

## An Experimental Study on the Spalling Properties of Ultra High Strength Concrete with PP Fiber

Tae-Gyu Lee

Department of Railroad Civil System, Woosong University  
(Received March 11, 2011 / Accepted July 6, 2011)

**Abstract :** High strength concrete(HSC) has been mainly used in large SOC structures. HSC have superior property as well as improvement in durability compared with normal strength concrete. In spite of durability of HSC, explosive spalling in concrete front surface near the source of fire occurs serious problem in structural safety. It is reported that spalling is caused by the vapor pressure under fire and polypropylene(PP) fiber has an important role in protecting from spalling. The spalling properties of ultra high strength concrete specimens with various contents of PP fiber were investigated in this study. In results, the content of PP fiber for spalling protection increases over 0.2 vol.% as the concrete strength increases to 120 MPa.

**Key Words :** spalling, ultra high strength concrete, fire resistance, polypropylene(PP) fiber

### 1. 서 론

콘크리트는 일반 토목 구조물뿐만 건축 구조물 등 모든 사회기반 구조물에 폭넓게 사용되고 있다. 특히 최근 들어 각종 구조물의 대형화 추세에 따라 장대교량, 특수교량, 고층 건축물 등이 다양하게 건설되고 있으며 이에 따라 고강도 및 고성능 콘크리트의 사용이 필수적으로 증가되고 있는 추세에 있다.

고강도 콘크리트의 경우 단위수량의 감소로 인하여 추가적인 혼화재료를 첨가하여 소요의 작업성(workability)을 확보시키고 있다. 그러나 이러한 낮은 물-시멘트비의 사용으로 인하여 공극률(porosity)이 작게 되고, 투수성(permeability)이 낮아지며, 치밀성(density)이 증가하게 된다. 이 경우 화재와 같은 고온이 발생되면 내부 수분의 증발로 증기압이 형성되며 되며, 이 증기압으로 인하여 콘크리트의 저항력이 감소하게 되어 결국에는 폭렬(explosive spalling)을 유발시킨다. 폭렬은 급작스러운 온도 상승으로 인하여 콘크리트 부재 표면이 심한 폭음

과 함께 폭발적으로 파열(박리 및 탈락)되는 현상으로, 구조물에 치명적인 내력저하를 초래하여 결국에는 구조물의 붕괴로까지 이어지는 대형사고의 원인이 되기도 한다<sup>1,2)</sup>.

고강도콘크리트에서 폭렬을 억제하기 위한 방법으로 폴리프로필렌(PP; polypropylene)섬유를 함유하는 연구가 상당히 진행되어 왔다. 폭렬은 약 200℃ 이상이 되면 발생하는 것으로 알려져 있는데 PP섬유는 약 170℃ 안팎에서 녹기 때문에 PP섬유가 녹음으로서 시멘트 매트릭스에 미세수증기가 통과할 수 있는 통로가 형성되어 폭렬을 저감시켜주는 메카니즘으로 알려져 있다<sup>3)</sup>. 하지만 대부분의 연구가 압축강도 60 MPa 전후의 콘크리트에 대한 연구<sup>4,5)</sup> 위주로 진행되어 초고강도콘크리트에서의 PP섬유 혼입률에 따른 폭렬특성에 관한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 초고강도콘크리트의 수준인 70, 90 및 120 MPa 콘크리트에 대하여 PP섬유 혼입률에 따른 폭렬특성을 실험적으로 평가하여 초고강도콘크리트 내화설계를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

Table 1. Mixture condition of specimen

Design Strength (MPa)	W/B (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )						SP (%)	PP Fiber (vol.%)	Specimen
			W	C	SF	FA	S	G			
70	30.0	40.0	168	476	-	84	645	975	0.8	0.05	70-05
										0.1	70-10
										0.2	70-20
90	24.9	41.5	162	500	52	98	624	890	1.1	0.05	90-05
										0.1	90-10
										0.2	90-20
120	16.0	32.0	155	630	145	194	389	859	2.0	0.1	120-10
										0.2	120-20
										0.3	120-30

## 2. 실험

### 2.1. 실험계획

실험체는 콘크리트 압축강도 70, 90, 120 MPa의 3가지 종류를 선정하고, PP섬유 혼입률도 3가지 조건으로 선정하여 총 9개의 실험체를 제작하였다. 압축강도 70 및 90 MPa에 대해서는 PP섬유 혼입률을 0.05, 0.1, 0.2 vol.%(콘크리트에 대한 체적비)로 선정하였고, 압축강도 120 MPa에 대해서는 PP섬유 혼입률을 0.1, 0.2, 0.3 vol.%(콘크리트에 대한 체적비)로 변수를 선정하였다. 압축강도 120 MPa에 대하여 PP섬유 혼입률을 다르게 산정한 것은 초고강도콘크리트에서는 낮은 섬유 혼입률로서는 폭렬에 대한 저항성능이 발휘되지 않을 것으로 판단되어 0.05 vol.% 대신에 0.3 vol.%를 택하였다.

콘크리트 실험체는 150×150×300 mm로 제작하였으며, 각 실험체에 대한 배합계획은 Table 1과 같다. 실험체 기호는 “00-00”과 같은 형식으로 명칭하였으며, 앞의 숫자는 콘크리트 설계압축강도를 의미하고 뒤의 숫자는 PP섬유 혼입률의 소숫점 이하 숫자를 의미한다. 실험에 사용된 섬유의 물리적 특징은 Table 2와 같다.

### 2.2. 가열실험

실험변수로 선정한 3가지 콘크리트 압축강도별로 7일 및 28일에서의 실제 압축강도 측정결과는 Table 3과 같다.

Table 2. Material properties of polypropylene

Material	Specific gravity	Length (mm)	Diameter (μm)	Melting point (°C)	Tensile Strength (MPa)
PP Fiber	0.9	6	46	168	400~550

Table 3. Compressive strength at age

Design Strength (MPa)	W/B (%)	PP Fiber (vol.%)	Slump flow (mm)	Air content (%)	Strength (MPa)	
					7 day	28 day
70	30.0	0.05	46	2.3	58.1	74.0
		0.1	55	2.7	59.5	72.0
		0.2	38	2.6	58.2	73.2
90	24.9	0.05	44	1.8	73.4	90.7
		0.1	52	2.1	72.9	91.7
		0.2	55	2.3	73.5	96.0
120	16.0	0.1	68	2.0	102.9	117.7
		0.2	58	2.0	100.1	120.2
		0.3	58	1.7	102.2	118.9

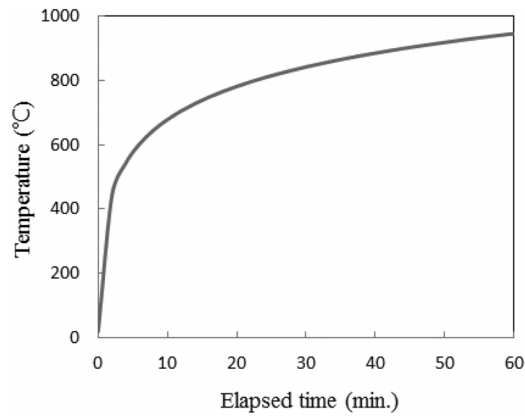


Fig. 1. KS F 2257 heat condition.

모든 실험체는 제작후 밀봉재료로 밀봉하여 보관하였으며, 28일 경과 시점에서 밀봉재료를 제거하고 가열실험을 실시하였다. 가열실험은 KS F 2257 (건축구조부재의 내화시험방법)<sup>6)</sup>에 의거하여 Fig. 1의 가열곡선에 따라 비재하 조건으로 1시간 동안 가열을 실시한 후 실험을 종료하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1. 폭렬양상

각 콘크리트 강도에 대하여 PP섬유 혼입률에 따른 실험결과는 Fig 2와 같다. 그림에서 보면 압축강도 70 MPa에서 PP섬유 혼입률에 따른 실험결과를 보면 0.05 vol.%를 혼입한 경우에는 모서리만 부분적으로 탈락된 것으로 확인되었으며, 0.1 및 0.2 vol.%를 혼입한 경우에는 폭렬이 발생되지 않은 것으로 확인되었다.

압축강도 90 MPa에서는 PP섬유 혼입률이 0.05 및 0.1 vol.%를 혼입한 경우 모두 모서리 부분 및

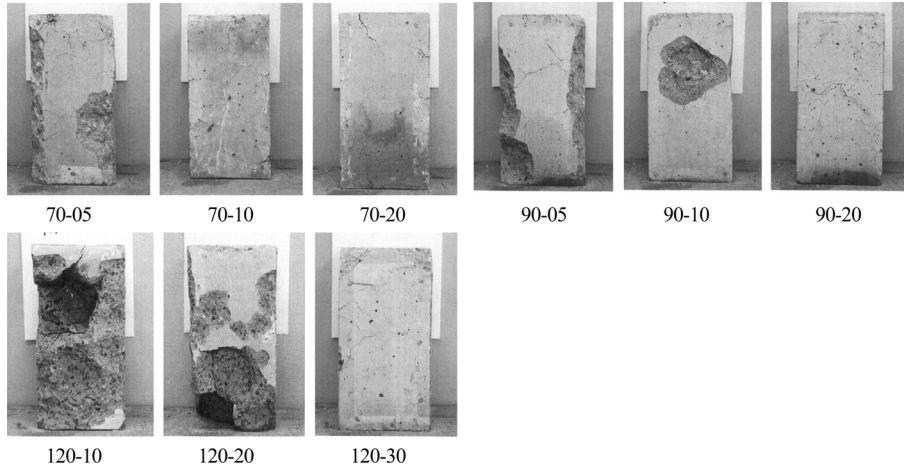


Fig. 2. Shape of specimens after test.

중앙 부분에서 폭렬이 발생되었으며, 0.2 vol.%를 혼입한 경우에는 폭렬이 발생되지 않은 것으로 확인되었다.

압축강도 120 MPa에서는 당초 예측했던 바와 같이 폭렬이 크게 발생하는 경향을 보였다. PP섬유 혼입률이 0.1 vol.%에서는 전체 단면의 절반 정도가 폭렬로 파손되었으며, 0.2 vol.%에서도 하부의 상당 부분이 폭렬로 파손되었다. 하지만 0.3 vol.%를 혼입한 경우에는 폭렬이 발생되지 않은 것으로 확인되었다.

그동안 PP섬유 혼입물에 대한 고강도콘크리트의 폭렬제어효과는 PP섬유 혼입률이 증가할수록 폭렬제어효과가 커지지만, PP섬유 혼입률이 0.2 vol.%를 초과하게 되면 더 이상의 제어효과를 보이지 않는 것으로 알려져 있었다<sup>7,8)</sup>. 따라서 PP섬유 혼입률은 0.2 vol.%가 폭렬제어를 위하여 최대한 사용할 수 있는 값으로 여겨져 왔다. 하지만 지금까지의 이러한 결과들은 모두 콘크리트 강도가 100 MPa 이하인 상태에서 실험한 실험결과에 의하여 도출된 결과들로서, 본 실험과 같이 압축강도 100 MPa를 초과하는 초고강도콘크리트의 경우 PP섬유 혼입률은 0.2 vol.%를 초과하여 사용하여야 한다는 결과가 도출되었다.

### 3.2. PP섬유 필요량 산정

콘크리트의 폭렬방지를 위하여 필요한 PP섬유 혼입률을 콘크리트 압축강도의 측면에서 보면 Fig. 3과 같이 콘크리트 강도 증가에 대하여 거의 직선적으로 PP섬유 혼입률이 증가되어야 함을 알 수 있다.

한편 W/B비의 측면에서 콘크리트 폭렬방지를

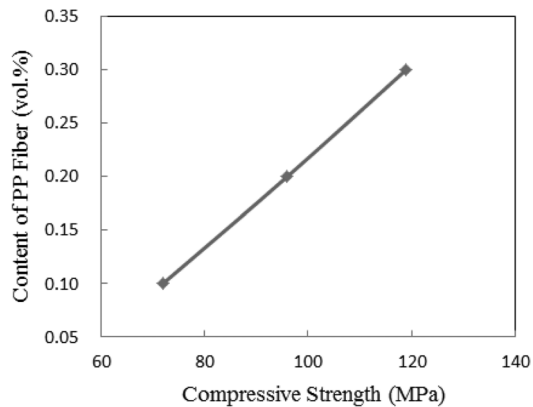


Fig. 3. PP fiber requirements due to compressive strength.

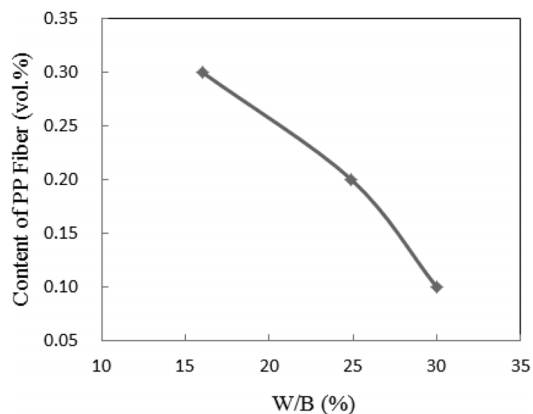


Fig. 4. PP fiber requirements due to W/B ratio.

위한 PP섬유 혼입률을 보면 Fig. 4와 같이 약간 위로 볼록한 포물선의 형태를 보이고 있다. 이는 초고강도콘크리트에서 콘크리트 강도 증가의 비율과

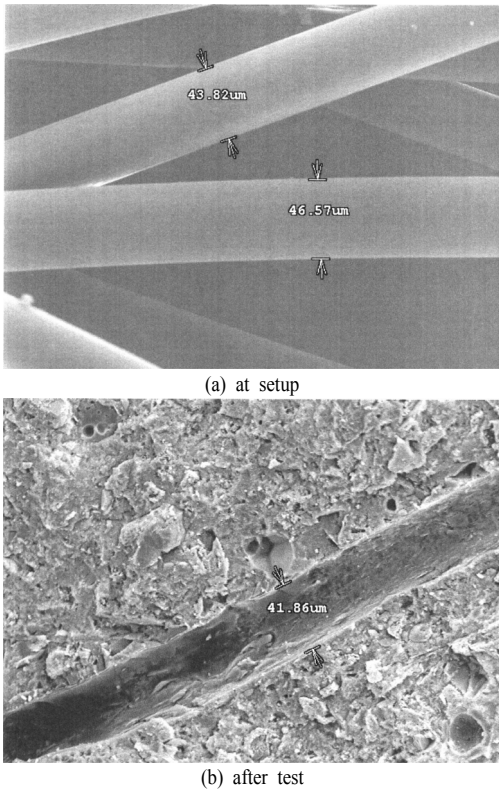


Fig. 5. Transition of PP fiber.

W/B비의 감소 비율이 상호간에 직선적인 반비례 관계에 있지 않음을 보여주고 있다.

### 3.3. PP섬유의 거동

각 조건에 대하여 PP섬유의 주사전자현미경(SEM) 사진을 보면 Fig. 5와 같다. 당초 콘크리트 타설시 (a)에서와 같은 평균 직경 46  $\mu\text{m}$ 의 PP섬유를 혼입하였으며, 가열실험 이후 폭렬이 발생되지 않은 120-30 실험체의 중앙 위치를 보면 (b)와 같이 온도가 섬유질이 완전히 녹아 주위의 매트릭스에 흡수되면서 직경 약 42  $\mu\text{m}$ 의 빈 채널만 남아있는 형상을 볼 수 있다.

따라서 PP섬유 혼입의 목적인 내부수증기의 유출통로 확보가 잘 이루어지고 있음을 실험을 통하여 보여주고 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 초고강도콘크리트의 폭렬방지를 위하여 필요한 PP섬유 혼입률을 평가하기 위하여 총 9가지의 조건에 대한 실험을 수행하였다. 이러한

실험결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 콘크리트 강도가 증가할수록 또는 W/B비가 감소할수록 폭렬방지에 소요되는 PP섬유 혼입률은 지속적으로 증가되는 것으로 나타났다.

2) 기존의 연구결과인 PP섬유의 최대 혼입률은 약 0.2 vol.%라고 여겨지던 것은 콘크리트 강도 100 MPa 이하에서만 성립되며, 콘크리트 강도가 100 MPa를 초과하게 되면 폭렬방지를 위하여 PP섬유의 혼입률은 0.2 vol.%를 초과해야 하는 것으로 나타났다.

3) PP섬유 혼입의 목적인 내부수증기의 유출통로 확보가 이루어지는 것을 전자주사현미경(SEM)으로 관측하였다.

4) 본 실험결과는 소형 실험체에 대한 결과이기 때문에 대단면 철근콘크리트 부재에서 이에 대한 추가적인 검증이 필요하다고 판단된다.

## 참고문헌

- 1) 김형두, “화재시 고강도 콘크리트의 폭렬현상에 관한 고찰”, 한국화재소방학회 논문지, 제20권, 제2호, pp. 80~86, 2006.
- 2) 김형준, 한상훈, 최승관, “화재시 콘크리트 요소 폭렬영향성 고찰”, 한국화재소방학회 논문지, 제21권, 제2호, pp. 54~63, 2007.
- 3) 유석형, “PP섬유 및 실리카흄이 고강도 철근콘크리트 기둥의 폭렬저감에 미치는 영향”, 한국화재소방학회 논문지, 제23권, 제4호, pp. 1~6, 2009.
- 4) 박찬규, 이승훈, “섬유혼입량에 따른 고강도콘크리트 폭렬특성”, 한국콘크리트학회 추계학술발표회, 제17권, 제2호, pp. 387~390, 2006.
- 5) 원종필, 장창일, 김홍열, “폴리프로필렌섬유 혼입률에 따른 고강도콘크리트 기둥부재의 폭렬 및 내부온도 분포특성”, 한국콘크리트학회 논문집, 제20권, 제6호, pp. 821~826, 2008.
- 6) KS F 2257, “건축구조부재의 내화시험방법”, 한국산업규격, 1999.
- 7) Pierre Kalifa, “High Temperature Behavior of HPC with Polypropylene Fibers from Spalling to Microstructures”, Cement and Concrete Research, pp. 1487~1499, 2001.
- 8) 한천구, 양성환, 한민철, 배장춘, “PP섬유 혼입에 의한 60~100 MPa급 고강도콘크리트의 폭렬방지”, 대한건축학회 논문집, 제24권, 제4호, pp. 91~98, 2008.