

유기섬유의 열적 특성이 고강도 콘크리트 폭열에 미치는 영향

The Effect of Thermal Characteristic of Organic Fibres on the Spalling of High Strength Concrete

박찬규* 이승훈** 김규동*** 손유신***
Park, Chan Kyu Lee, Seung Hoon Kim, Cyu Dong Sohn, Yu Shin

ABSTRACT

Recently, in order to reduce the spalling of high strength concrete under fire, the addition of organic fibres to high strength concrete has been investigated. In this study, the effect of thermal characteristic of organic fibres on the spalling of high strength concrete was experimentally investigated. Two types of fibre, polypropylene(PP) and polyvinyl alcohol(PVA) fibres, were selected, and the strength level of concrete was corresponding to the design strength of 80MPa.

As a result, it appears that when the remaining ratios(by weight) of fibre at 300°C and 350°C are less than 80% and 50%, respectively, the spalling of high strength concrete is prevented.

1. 서 론

화재 시 고강도 콘크리트에서 표면 특히 피복 부분의 콘크리트가 떨어져 나가는 현상이 심하게 나타난다. 이와 같은 폭열 현상은 화재가 발생한 이후 초기에 발생하며, ISO-KS 가열 곡선에 따라 열을 가할 경우 30분 이전에 발생한다. 이러한 폭열 현상은 콘크리트 부재의 단면 손실에 따른 내력 감소와 함께 주철근의 온도를 급상승시켜 철근의 내력을 감소시킨다. 주철근의 내력과 단면 감소는 결국 부재의 붕괴로 이어지기 때문에 고강도 콘크리트 부재에서 폭열 방지 설계는 매우 중요한 요소 중의 하나이다.

높은 온도에 콘크리트가 노출되었을 때 발생하는 폭열 현상은 콘크리트 단면 내 온도차와 콘크리트 공극 내에 존재하는 공기, 수증기, 물 등이 높은 온도에서 발생시키는 높은 공극압(pore pressure)이 원인인 것으로 알려져 있다[1]. 즉 폭열 현상과 공극압은 밀접한 관계가 있기 때문에 유기 섬유 중 폴리프로필렌 섬유를 이용하여 폭열을 저감하는 방법이 많이 연구되어 왔다[2,3].

그러나 유기 섬유 중 폴리비닐알콜(PVA) 섬유가 폭열 저감에 미치는 효과에 대하여 일부[4] 수행되기는 하였지만, 아직까지 미진한 상태이다. 이에 본 연구에서는 PVA 섬유 중심으로 섬유의 열적 특성이 콘크리트 폭열 저감에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 규명하고자 하였다.

*정회원, 삼성물산(주) 건설부문 기술본부 기술연구소 선임연구원
**정회원, 삼성물산(주) 건설부문 기술본부 기술연구소 수석연구원
***정회원, 삼성물산(주) 건설부문 기술본부 기술연구소 선임연구원
****정회원, 삼성물산(주) 건설부문 기술본부 기술연구소 전임연구원

2. 유기섬유 혼입 콘크리트에 대한 가열 실험 및 결과 분석

2.1 개요

유기섬유의 종류와 형상이 콘크리트의 폭열 방지에 미치는 영향을 파악하기 위하여 표 1에 나타난 바와 같은 실험계획을 세웠다. 표 2에 나타난 바와 같이 콘크리트의 압축강도 수준은 1 종류로서 W/B 24.9%를 선택하였다. 그리고 유기섬유로는 폴리프로필렌(PP) 섬유와 폴리비닐알콜(PVA) 섬유 2종류를 선택하였다. 섬유 혼입량은 5개의 수준으로 선택하였으며, 비가력 가열 시험을 위한 시험체의 크기는 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 이며, 28일 수중 양생 후 가열 시험을 실시하는 것으로 하였다.

2.2 유기 섬유에 대한 상세

표 3은 유기섬유에 대한 상세를 나타낸 것이다. 표 3에서 용점은 DTA(differential thermal analysis) 기기를 이용하여 측정된 결과를 나타낸 것이다. 사용된 PP 섬유와 북한산 PVA는 국내 S사에서 취급하는 제품을 사용하였고, 일본산 PVA는 일본 K사 제품을 사용하였다. 표에서 나타난 바와 같이 섬유의 직경은 업체에서 제시한 값과 SEM으로 측정된 값이 약간씩 틀린 것으로 나타났다. 이는 섬유가 완전하게 원형이 아니고 부정형이기 때문인 것으로 판단된다.

2.3 가열 실험

섬유혼입 콘크리트 재령 28일 이후에 방재 시험연구원의 비가력 내화시험 가열로를 이용하여 가열실험을 실시하였다. 그리고 가열실험 전후에 공시체의 중량을 측정하여 폭열에 따른 콘크리트 중량 감소를 파악하였다. 가열실험은 총 2번에 걸쳐 행하여졌으며, 그림 1은 ISO-KS 곡선과 실제 가열 곡선과의 비교를 나타낸 것이며, 가열은 35분간 행하여졌다.

2.4 폭열 특성

콘크리트의 폭열은 가열을 시작한지 곧바로 나타나기 시작했으며, 20분이 경과하면서 거의 발생하지 않은 것으로 나타났다. 그리고 30분이 경과하면서 공

표 1 실험 계획

구분	내용
W/B	24.9%(설계강도 80MPa)
섬유 종류	폴리프로필렌(PP) 섬유 폴리비닐알콜(PVA) 섬유(북한산) 폴리비닐알콜(PVA) 섬유(일본산)
섬유 혼입량	0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4vol.%
시험체 크기	$\phi 100 \times 200\text{mm}$
실험 형태	비가력 가열 실험
실험 재령	콘크리트 제조 후 28일 경과 시점

표 2 콘크리트 배합비

W/B (%)	S/a (%)	unit weight(kg/m^3)						SP (%)
		W	C	SF	FA	S	G	
24.9	41.5	162	566	52	33	634	903	1.1~2

표 3 유기섬유에 대한 상세

구분	비중	용점	직경(μm)		길이(mm)
			업체제시	측정(SEM)	
■ PP 섬유					
K1	0.9	168.2	28	46	6
K2					
■ PVA 섬유(일본산)					
J1	1.3	234.0	14	18	8
J2		241.6	26	23	6
J3		242.8	40	51	6, 15
J4		241.8	100	100	12
J5		243.1	200	214	6, 12
J6		244.4	660	771	15
■ PVA 섬유(북한산)					
N	1.3	233.9	14	22	8, 12

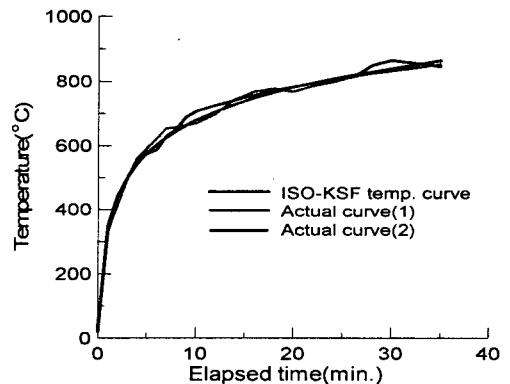


그림 1 표준가열곡선과 실제 가열곡선

시체 표면에 균열이 나타나기 시작했다.

가열 후 공시체 표면 폭열 상태를 점검한 결과 섬유 혼입량에 관계없이 PP섬유와 PVA 섬유 중 J2 섬유만 폭열이 발생하지 않은 것으로 나타났다. 콘크리트 폭열 상태가 섬유 혼입량의 변수로 나타나지 않은 이유는 시험체의 크기가 작기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 가열 후의 중량을 측정된 결과, 섬유를 혼입하지 않은 콘크리트의 경우 63.3%, 폭열이 나타난 섬유 혼입 콘크리트의 경우 80~91%, 폭열이 방지된 콘크리트의 경우에는 92% 이상의 잔존율을 나타내었다. 사진 1은 섬유 혼입 0.1vol.%의 경우에 폭열 모습을 나타낸 것이다.

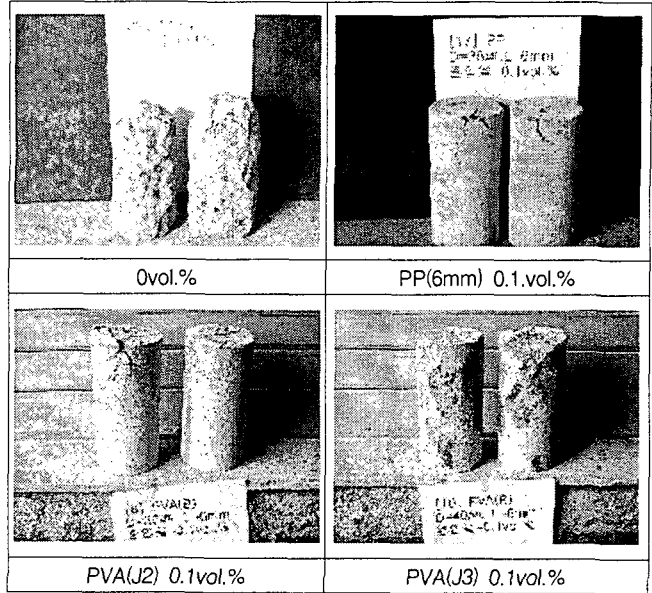


사진 1 공시체 폭열 모습

2.5 폭열방지 효과가 있는 섬유 분석

그림 2는 TGA(thermogravimetric analysis) 기기를 사용하여 각 섬유별 온도 증가에 중량 잔존율의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 폭열 방지 성능이 있는 섬유의 특징은 온도 250~400°C 급격한 중량 손실이 발생한다는 것이다. 폭열 방지 성능이 없는 섬유의 경우에 대체적으로 350°C 이상에서도 높은 중량 잔존율이 나타나는 특징이 있다.

지금까지 밝혀진 유기 섬유의 폭열 방지 효과는 다음과 같다. 유기 섬유는 폭열이 발생하는 온도 이전 용점에 도달하여 액체 상태로 존재를 하다가 대부분 주위의 매트릭스 조직에 흡수되어 빈 공간을 만든다. 이러한 빈 공간을 통하여 물질 이동이 원활하게 되어 콘크리트 내부의 압력이 감소하고 더불어 폭열 방지 효과가 나타나게 된다.

이러한 사실에 근거를 한다면, 콘크리트에서 폭열이 발생하는 온도보다 이전에 섬유가 용융될수록 폭열 방지 효과에 유리하다. 그 만큼 주위의 콘크리트 조직 내로 섬유가 흡수되는 시간이 충분하기 때문이다. 그러나 콘크리트 폭열이 발생하는 온도에 근접하는 용점을 가진 섬유의 경우에는, 그 만큼 주위 콘크리트 조직 내로 흡수되는 시간이 짧아 상대적으로 물질 이동을 원활히 할 수 있는 공간을 만들지 못한다. 이러한 경우에는 대체적으로 폭열이 발생하게 된다.

그러나 J2와 같은 섬유는 용점이 이후에 급격하게 중량 손실이 발생함을 알 수 있는데, 이와 같은 경우는 주위 콘크리트 조직 내 흡수와 함께 자체 중량 손실에 따른 부피 저감이 동시에 발생하여 물질 이동에 유효한 공간을 만든다고 해석할 수 있다.

표 4는 각 섬유별로 온도별 중량 잔존율을 정리한 것이다. 일본 청수건설 특허 자료에 근거하면, 500°C에서 중량 잔존율이 30% 이하이면 폭열 방지 성능이 있다고 했지만, 표 3에서 알 수 있는 바와 같이 모든

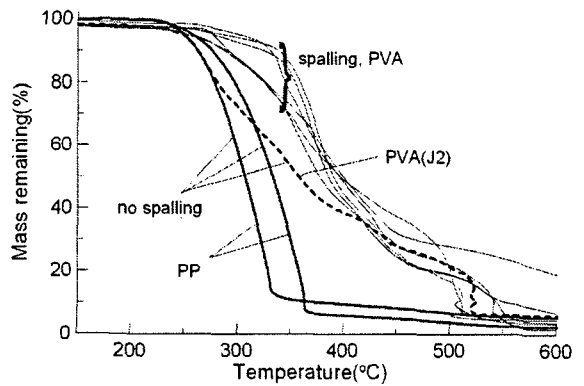


그림 2 각 섬유별 온도 증가에 따른 중량 잔존율의 변화

PVA 섬유가 500℃에서 중량 잔존율 30% 이하를 나타냈지만, 폭열 방지 효과가 있는 섬유는 J2이다. 따라서 폭열 방지 효과가 있는 섬유에 대한 새로운 정의가 필요하다.

이에 본 연구에서는 다음과 같이 폭열 방지 효과가 있는 섬유에 대하여 정의하고자 한다.

- 섬유의 용점은 250℃ 미만
- 300℃에서의 중량 잔존율 : 80% 미만
- 350℃에서의 중량 잔존율 : 55% 미만

표 4 각 섬유별 온도에 따른 중량 잔존율

구분	PP		PVA						
	K1	K2	N	J1	J2	J3	J4	J5	J6
용점(℃)	168.2	170.9	233.9	234.0	241.6	242.8	241.8	243.1	244.4
300℃ 중량잔존율(%)	58.3	78.0	87.0	87.7	72.0	94.3	92.7	87.5	95.3
350℃ 중량잔존율(%)	10.9	30.0	69.2	72.3	53.3	85.6	82.7	67.8	76.4
500℃ 중량잔존율(%)	6.7	3.7	20.2	27.9	21.5	19.0	16.9	18.8	22.0
폭열방지 성능	있음	있음	없음	없음	있음	없음	없음	없음	없음

3. 결 론

본 연구에서는 PVA 섬유를 중심으로 유기 섬유의 열적 특성에 따른 콘크리트 폭열 방지 효과에 대하여 실험적으로 규명하였다. 고강도 콘크리트에서의 폭열 방지에 유효한 섬유의 조건으로서는 300~350℃에서 급격한 중량 손실이 발생하는 하여야 하며, 300℃에서는 80% 미만, 350℃에서는 55% 미만의 중량 잔존율을 가져야 하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Pierre Kalifa, Francois-Dominique Menneteu, and Daniel Quenard, "Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures," Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000, pp.1915-1927.
2. Pierre Kalifa, Gregoire Chene, and Christophe Galle, "Hi호-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure," Cement and Concrete Research, Vol. 31, 2001, pp.1487-1499.
3. 한천구 외 4인, "폴리프로필렌 섬유의 혼입률 및 부재 크기에 따른 고성능 콘크리트의 내화 특성," 콘크리트학회 논문집, Vol. 14, No. 4, 2002, pp.449-456.
4. Hircnori Niwa, Kakuhiko Nagao, and Hideki Uesugi, "Controlling method of spalling of high-strength concrete subjected to fire," Proceedings of the Fourth International Conference on Concrete under Severe Conditions-Environment & Loading, CoONSEC'04, Seoul, Korea, 2004, pp.898-905.