초고강도 콘크리트 기둥의 폭렬저감방안에 관한 실험적 연구

Spalling Reduction Methods of Ultra High-Strength Reinforced Concrete Columns

신 성 우* 유 석 형** 김 인 기***

Shin, Sung-Woo Yoo, Suk-Hyeong Kim, In-Ki

Abstract

It was presented that the spalling of high strength concrete exposed to high temperature could be reduced by using polypropylene fiber. However, as the concrete strength increase, the demanded quantity of PP fiber increase and this results in the loss of workability of ultra high strength concrete. The silica fume which is essentially mixed in ultra high strength concrete decrease the permeability of concrete, and this will increase the degree of spalling. In this study the effect of silica fume on the spalling of ultra high strength concrete and the fire resisting efficiency of PP fiber and poly vinyl alchol, instead of PP fiber, for the security of workability were experimentally examined.

요 지

고온에 노출된 고강도 콘크리트의 폭렬저감대책으로서 폴리프로필렌 섬유를 콘크리트에 혼입함으로써 취성적 파괴를 방지할 수 있는 것으로 보고 되었다. 그러나 초고강도 콘크리트 배합시 다량으로 혼입되는 PP섬유는 시공성을 저하시키는 원인이 된다. 또한 초고강도 콘크리트의 강도발현을 위하여 필수적으로 사용되는 실리카흄은 콘크리트의 수밀성을 높여 폭렬현상이 더욱 심하게 발생할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 고강도 콘크리트에서 실리카흄이 폭렬에 미치는 영향과 초고강도 콘크리트의 시공성을 확보하기 위하여 PP섬유를 대신하여 PP분말 및 PVA의 내화성능을 실험을 통하여 관찰함으로써 초고강도 콘크리트의 내화성능확보를 위한 기초 자료를 제시하였다.

Keywords : Spalling, Fire damage, Fire endurance material, Residual strength, Polypropylene fiber

핵심 용어 : 폭렬, 화해, 내화재, 잔존강도, PP섬유

* 한양대학교 건축학부 교수

** 한양대학교 친환경건축 연구센터 연구교수

*** 한양대학교 건축공학과 박사과정수료

E-mail : swshin@hanyang.ac.kr 031-400-5132

• 본 논문에 대한 토의를 2006년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2007년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 연구배경 및 목적

최근의 건축물은 초고층화, 초대형화의 추세로 인하여 고강도 콘크리트 사용이 점차 증가하고 있으며, 국내에서는 최근 60층 정도 규모의 고급주거시설을 비롯한 초고층건축물이 활발히 건설되고 있다. 또한 고강도 콘크리트(이하 HSC)는 구조적 장점뿐 만 아니라 내구성 및 사용성이 우수하여 건축·토목 구조물에서의 활용이 점차적으로 증대되고 있다. 그러나 화재시 폭렬현상과 함께 부재가 취성적인 거동을 하게 되는 단점을 지니고 있다. 폭렬현상은 수증기압과 열응력의 복합작용에 의한 결과로 나타난다. 열응력은 화재 시 부재내부의 온도차이로 인하여 발생하며, 수증기압은 100℃이상에서 부재내부의 수분 증발로 인하여 발생한 수증기가 수밀한 콘크리트에 갇혀 발생한다. 폭발성 폭렬이 발견되는 가열초기에는 수증기압에 의한 영향이 지배적인 것으로 보고되었으며, HSC와 같이 투기성이 낮을수록 폭렬현상이 심하게 나타난다. 이와 같은 현상은 콘크리트 강도가 증가할수록 더욱 뚜렷하게 발생할 것으로 사료된다. 따라서 HSC의 폭렬발생 메커니즘을 관찰하여 이에 영향을 미치는 요인을 규명하고 재료적, 구조적 대안을 강구하기 위한 연구와 기술개발이 필요하다.

일반적으로 콘크리트의 폭렬을 제어할 수 있는 방안으로는 콘크리트 표면에 내화피복 및 내화도료 등을 사용하여 화재 시 부재의 온도상승을 억제하는 방법과 강판, 섬유시트 및 메탈라스 등을 부재표면에 시공하여 콘크리트의 비산을 억제하는 방법 그리고 섬유를 콘크리트 타설시 혼합하여 화재 시 수증기압을 낮추는 방법 등이 있다. 한편 60MPa 이상의 고강도 콘크리트에서는 실리카흄의 사용이 필연적이며 100MPa 이상의 초고강도 콘크리트 타설시에는 낮은 물결합재비(W/B)로 인하여 작업성의 확보가 매우 중요한 관건이므로 초고강도 콘크리트의 폭렬제어방안을 강구할 때 이와 같은 조건을 함께 고려하여야 할 것으로 판단된다.

Sullivan[3] 등은 실리카 흄이 폭렬에 미치는 영향에 대하여 연구하여 실리카 흄을 10%이하 사용할 경우 폭렬에 미치는 영향이 거의 없음을 확인하였으나 그 이상의 사용에 대한 연구는 거의 진행되지 않고 있다. 그러나 일반적으로 콘크리트 강도가 100MPa이상의 초고강도 콘크리트(이하 UHSC)를 확보하기 위하여 실리카 흄이 최소 10%이상 첨가되어야함을 고려할 때 10%이상 혼합된 실리카 흄이 폭렬에 미치는 영향에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

또한, 최근 PP섬유를 활용하여 HSC의 폭렬을 제어하기 위한 연구는 국내외적으로 활발히 진행되고 있다[1),(4)]. 그러나 100MPa 이상의 UHSC에서 다량의 PP섬유를 혼입 할 경우 작업성이 저하된다. 따라서 최근 일본에서는 PP섬유 대신 PVA이나 ethylene vinyl alchol(EVA) 및 PP섬유 분말 등을 사용하여 작업성과 내화성능을 동시에 만족할 수 있는 내화재에 대한 연구[2]를 활발히 진행하고 있으나, 아직 국내에서는 이에 대한 연구가 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 내화섬유의 종류 및 실리카 흄 치환율을 변수로 하는 고강도 및 초고강도 콘크리트 기둥 실험체에 대한 내화실험과 잔존강도실험을 수행하여 폭렬에 영향을 미치는 각 인자들의 효과를 분석하고 화재시 폭렬거동을 관찰함으로써 HSC 및 UHSC 부재의 내화설계를 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2 실험

2.1 실험개요

본 연구의 기둥 실험체는 총 11개로서 260X260X800mm로 제작하였으며, 실험체의 형상 및 배근상세도는 Fig. 1과 같다.

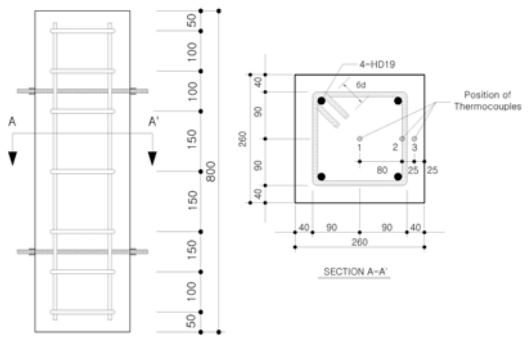

Fig. 1 실험체형상 및 배근상세도

모든 기둥 실험체는 피복두께 4cm, 주근비(ρ) 1.91%와 가열시 단면 내 온도분포를 파악하기 위하여 표면으로부터 25, 50, 130mm 위치에 K type의 열전대를 설치하였으며, 가력 시 상하 단부의 파괴를 방지하기 위하여 상하 단부구간의 띠철근의 간격을 100mm 간격으로 배근하였다. 또한, 가력 시 축방향 변형 측정을 위한 LVDT의 설치를 위하여 ϕ8mm 강봉을 상하부에 매립하였다.

실험체의 변수는 실리카흄 치환율과 내화섬유종류로서 Table 1과 같이 60Mpa의 경우 PP섬유 함유율(콘크리트에 대한 체적비) 0.2%로 일정하게 유지하고 실리카흄의 치환율 0, 7, 14, 21%로 달리하였다. 실리카 흄의 치환율에 따른 폭렬 특성을 관찰하기 위하여 실리카흄의 치환율을 변화시키면서 달라지는 콘크리트강도를 일정하게 유지하기 위하여 W/B를 달리할 경우 함수량이 폭렬에 미치는 영향을 배제할 수 없기 때문에 W/B를 일정하게 유지한 상태에서 실리카흄의 치환율만 달리하였다. 120Mpa의 경우는 PP섬유, PP분말 및 PVA에 대하여 함유량 변수를 0.1%, 0.2%로 일정하게 혼입하였다. 각 실험체별 배합계획은 Table 1과 같다.

2.2 재료의 성질

2.2.1 콘크리트

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 배합강도 60MPa와 120MPa의 2가지로 계획하였다. 굵은 골재의 크기는 13mm를 사용하였다. 기준시험체(60-N, 120-N)에 대한 배합비를 기준으로 60 MPa에서는 실리카 흄의 영향을 관찰하기위하여 시멘트량, fly ash량 및 물의 양을 일정하게 하였으며 플라이애쉬와 실리카 흄 7, 14, 21%을 사용하였다. 120MPa에서는 실리카 흄과 더불어 고로슬래그를 첨가하였고, 다른 조건은 Table 2와 같이 일정한 조건에서 섬유의 종류와 혼입량만을 변화시켰다. 혼화제는 폴리카르본산계의 고성능 AE감수제를 사용하였으며 유동성을 향상시키기 위해 분산 투여하였다.

공시체는 실험체와 같은 조건으로 기건 양생하였고, 실험체의 압축강도는 ϕ100×200mm 크기의 원통형 공시체를 각각의 실험체에 대해 3개 이상 제작하여 재령시기에 따라 7일, 28일 및 화재실험 후를 각각 측정하였고 결과는 Table 3과 같다.

Table 1 실험체별 배합계획

실험체명	콘크리트 배합강도 (MPa)	W/B (%)	S.F. 치환율 (%)	섬유혼입율 (Vol. %)		구분
60-N	60	27.5	0		-	기준
60-S-1			7	PP 섬유	0.2	가열
60-S-2			14			
60-S-3			21			
120-N	120	19	7		-	기준
120-PF-1				PP 섬유	0.1	가열
120-PF-2					0.2	
120-PP-1				PP 분말	0.1	
120-PP-2					0.2	
120-PA-1				PVA	0.1	
120-PA-2					0.2	

Table 2 콘크리트 배합표

강도 (MPa)	W/C (%)	S/A (%)	단 위 재 료 량 (kg/m^3)							
			W	C	F.A	S.F	G.S	S	G	SP
60	27.5	47.6	176	309	55	0	0	817	906	8.9
120	19	35	155	574	64	69	274	468	873	24.62
비 중			1	3.15	2.18	2.15	2.91	2.62	2.63	1.2

Table 3 콘크리트 압축 강도

실험체명	압축강도(MPa)		실험체명	압축강도(MPa)	
	7일	28일		7일	28일
60-N	71.4	74	120-PF-1	85.5	108.2
60-S-1	74	80.4	120-PF-2	75.8	104.9
60-S-2	68.4	74.4	120-PP-1	78.8	99.9
60-S-3	62.2	66.7	120-PP-2	72.3	93.4
120-N	73.3	99.1	120-PVA-1	72.9	94.9
			120-PVA-2	84.6	99.7

2.2.2 철근

본 실험에서 사용된 철근은 주근에 SD40의 이형철근 D19을 사용하였으며, 횡 보강근에 SD40의 이형철선 D10을 사용하였다. 철근의 인장강도 시험은 KS B 0801(금속재료 인장시험편 규정)의 2호, KS B 0802의 금속재료 인장시험 방법에 따라 각각의 시험편에 대해 3번 이상의 시험을 실시하였다. 이와 같은 인장강도 시험 결과에 따른 재료역학적 특성을 Table 4에 나타내었다.

Table 4 철근의 재료역학적 특성

종류 \ 역학적특성		항복 변형율 ε_y(X10^{-6})	항복강도 f_y(MPa)	탄성계수 E_s(MPa)
주근	D19	2683	409	1.52×10^5
횡보강근	D10	2848	462	1.63×10^5

2.2.3 내화섬유

본 연구에 사용된 내화섬유로는 Fig. 2와 같이 PP 섬유, PP분말 및 PVA섬유 등이고 이들은 모두 국내에서 일반적으로 양산되고 사용 범위는 콘크리트의 수축균열 억제, 충격·파손에 대한 저항력 증대, 피로·반복하중에 대한 저항력 증대, 투수성 감소, 쇼크리트 리바운스 감소, 마모·침식에 대한 저항력 증대 등의 용도로 사용되며, 콘크리트와 혼입시 배합비의 변동사항 없이 사용될 수 있다.

(a) Polypropylene fibrer (b) Polypropylene powder (c) Polyvinyl alcohol fiber

Fig. 2 실험에 사용된 내화섬유

Table 5 내화재의 물리적 성질

재질	비중	길이 (mm)	직경 (mm)	용융점 (℃)
polypropylene fibrer	0.9	19	0.07	162
polypropylene powder	0.9	1	0.07	162
polyvinyl alcohol fiber	1.26	19	0.012	220

PP섬유 및 PVA의 물리적 특성 및 재원은 기존연구결과를 참조로 폭렬에 가장 유리한 길이(19mm)와 직경(0.07mm)을 택하였다. 각 내화섬유의 물리적 성질은 Table 5와 같다.

2.3 시공성

콘크리트의 폭렬을 제어하기 위하여 혼입된 PP섬유는 콘크리트 강도가 증가 할수록 더욱 많은 양이 요구되며, 이로 인하여 콘크리트의 시공성이 더욱 낮아지게 된다. 따라서 초고강도 콘크리트에서 사용되는 내화섬유는 내화성능뿐만 아니라 시공성을 동시에 확보하여야 할 것이다. 본 연구에서는 콘크리트강도 120MPa에서 내화재로 사용되는 섬유의 종류를 달리하면서 시공성과 폭렬 발현의 차이를 비교하였다.

Table 6에 나타난바와 같이 60MPa의 경우 PP 섬유의 혼입량이 0.2%에서 적정한 슬럼프가 확보되는 것을 알 수 있다. 그러나 120MPa에서 PP 섬유를 0.1% 및 0.2% 혼입한 경우 슬럼프 및 플로어 값의 측정이 불가능할 정도로 시공성이 안 좋았으며, PP 분말의 슬럼프는 혼입률 0.1%, 0.2%에서 각각 15cm, 22.5cm로 나타났고, 플로어는 21cm, 33cm로 나타났다. PVA 섬유의 슬럼프는 0.1%, 0.2%에서 각각 20.5cm, 24cm로 나타났다. PP 섬유의 경우 혼입량이 증가할수록 플로어 값이 감소하였으나 PP 분말과 PVA 섬유의 경우 오히려 혼입량이 증가할수록 플로어 및 슬럼프 값이 증가하는 것으로 나타났다.

Table 6 시험체별 슬럼프, 플로어, 공기량 측정 결과

실험체	Slump (cm)	Flow(cm)	공기량 (%)	실험체	Slump (cm)	Flow (cm)	공기량 (%)
60-N	18	27	3.6	120-PF-2	×	×	×
60-S-1	18	28	3.8	120-PP-1	15	21	1.7
60-S-2	17	27	6.2	120-PP-2	22.5	33	2.1
60-S-3	23	47	3.3	120-PA-1	20.5	26.5	1.8
120-N	×	×	×	120-PA-2	24	60	2.0
120-PF-1	×	×	×				

3. 실험결과 및 분석

3.1 내화실험

Fig. 3과 같이 가열로 내에는 실험체를 2열로써 400mm간격으로 배치하였다. 실험체의 상·하 양 단부 부분의 폭렬을 방지하지 위하여 세라믹롤을 사용하여 양단부를 190mm폭으로 감쌌다. 가열은 국제기준인 ISO 834-1을 기초로 하고 있는 KS F 2257-1(건축구조부재의 내화시험방법)에 따라서 Fig. 4과 같은 가열곡선에 따라 1시간동안 가열하였다.

가열로 내부의 온도와 실험체 내에 설치된 열전대에서 측정한 온도는 세라믹으로 감싸인 케이블을 통하여 중앙 제어실에서 취합하여 획득하였으며, 가열 종료 후 24시간동안 실험체를 냉각시킨 후 가열로에서 꺼낸 즉시 폭렬에 의한 손실중량 측정을 실시하였다.

Fig. 3 가열로 내 실험체 배치

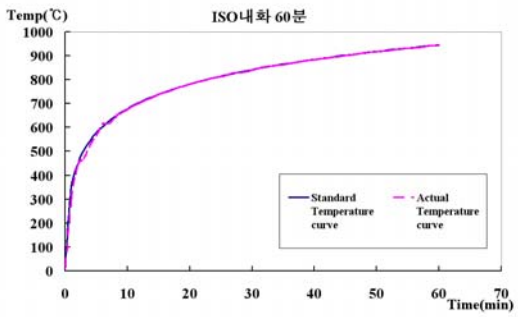

Fig. 4 가열 곡선

폭렬형태와 폭렬정도를 정의한 후 각 실험체의 폭렬 발현 상태를 고찰하여 Table 7과 같이 정리 하였다. Table 7에서 폭렬유형(Spalling Type) 1은 다음과 같이 3단계로 구분하였다.

a) Minor spalling : 폭렬이 철근까지 도달하지 않고 콘크리트 표면에 일어난 경우
b) Major spalling : 폭렬이 철근까지 도달하고 철근이 노출된 경우
c) Severe spalling : 폭렬이 띠 철근의 안쪽까지 일어난 경우

폭렬로 인한 피복탈락의 균일성을 확인하기위한 폭렬유형(Spalling Type) 2는 다음과 같이 정의하였다.

a) balance : 폭렬이 3면 이상에서 균일하게 일어난 경우
b) imbalance : 폭렬이 2면 이하에서 불균형하게 일어난 경우

또한 폭렬정도를 평가하기 위한 중량감소량은 다음과 같이 정의 하였다.

$$Spalling\ \ Degree = \frac{W_L}{W_C} \times 100 \qquad (1)$$

여기서 W_L은 내화실험 전·후 실험체 감소량 이고, W_C는 폭렬 전 화기에 노출된 구간의 실험체의 중량이다.

Table 7 폭렬 타입과 폭렬 정도

Column	Spalling Type 1	Spalling Type 2	Spalling Degree	Column	Spalling Type 1	Spalling Type 2	Spalling Degree
60-S-1	Minor	balance	14.4	120-PP-1	Severe	balance	62.3
60-S-2	Minor	balance	13.6	120-PP-2	Severe	balance	60.2
60-S-3	Minor	balance	14	120-PVA-1	Minor	balance	56.4
120-PF-1	Major	imbalance	40.6	120-PVA-2	Minor	balance	21.4
120-PF-2	Minor	imbalance	19				

3.1.1 실리카 흄의 함유량에 따른 폭렬현상

Fig. 5에 나타난 바와 같이 실리카 흄 혼입량의 변화에 따른 폭렬 발현상태의 외형적 차이는 거의 나지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 6과 같이 표면에서 25mm 위치에서 온도분포곡선을 보면 실리카흄의 함유량이 많을수록 온도가 높게 나타나 이 부근의 열전도율이 높음을 알 수 있다. 이는 증가된 실리카흄으로 더욱 밀실해진 매트릭스에서 수증기압력이 더 크게 작용하면서 피복의 탈락은 발생하지 않았으나 미세한 균열의 발생으로 매트릭스의 열전도율을 높게 한 것으로 사료된다.

3.1.2 내화섬유 종류에 따른 폭렬 현상

120MPa 실험체의 내화섬유종류 및 내화섬유량 변화에 따른 폭렬사진은 Fig. 7에 나타낸바 와 같다. 섬유함유량 0.1%에서 0.2%로 섬유 혼입량이 증가함에 따라 폭렬현상이 감소됨을 확인할 수 있었다.

PP분말 실험체의 경우 철근이 노출되고 폭렬면적이 유효면적의 88%, 74%에서 폭렬이 일어나는 등 폭렬이 PP섬유 실험체에 비하여 심하게 발생되어 Table 6에서와 같이 PP섬유에 비하여 시공성은 우수하나 폭렬제어에는 효과적이지 않음을 알 수 있다.

PVA 0.1%섬유를 혼입한 실험체의 경우 거의 모든 부위에서 폭렬이 일어났으나 철근의 노출현상까지의 폭렬이 나타나지 않으면서 전반적으로 균일한 폭렬이 일어난 것을 볼 수 있으며, 함유량 0.2%의 경우 모서리부분과 면에서 약간의 폭렬이 일어난 것을 볼 수 있다.

내화섬유의 종류에 따른 폭렬현상은 내부온도분포곡선을 통하여도 확인할 수 있다. Fig. 8과 같이 표면에서50mm 위치에서 시간에 따른 온도분포 곡선을 보면

PP분말 실험체가 가장 급격한 온도상승 곡선을 나타내었는데, 이는 Fig. 7(a)에서와 같이 PP분말 실험체에서 피복의 탈락이 가장 심하게 발생되었기 때문이다. 또한 PP섬유가 가장 온도변화가 작아 피복의 탈락이 적음을 확인할 수 있다.

3.2 잔존강도 실험

60MPa와 120MPa의 각 실험체에서 화재실험 후 화해를 입은 실험체의 잔존강도를 건전 실험체와 비교함으로써 변수별 내화성능을 고찰하였다.

(a) 실리카 흄 함유량 7%

(b) 실리카흄 함유량 14%

(c) 실리카흄 함유량 21%

Fig. 5 실리카흄 함유량 변화에 따른 폭렬발생상황

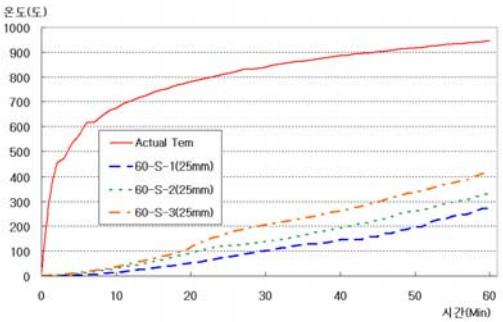

Fig. 6 실리카흄 함유량에 따른 내부온도변화(25mm)

(a) PP분말 0.1%　　PP분말 0.2%

(b) PVA 0.1%　　PVA 0.2%

(c) PP섬유 0.1%　　PP섬유 0.2%

Fig. 7 내화섬유 종류에 따른 폭렬발생 상황

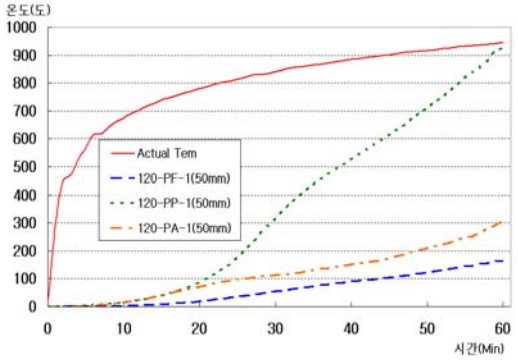

Fig. 8 내화섬유 종류에 따른 내부온도변화(0.1%, 50mm)

3.2.1 실리카흄 함유량별 잔존강도 비교

Fig. 9에 나타난바와 같이 초기균열강성은 차이가 나지 않았으나 잔존강도는 실리카흄의 함유량에 따라 변화하였다. 60-S-1 실험체에서는 잔존강도 5,374 kN, 잔존강도비 88.11%이고, 60-S-2 실험체는 잔존강도 4,991kN 잔존강도비는 81.85%, 마지막 60-S-3 실험체는 잔존강도 4,854kN 잔존강도비는 79.60%로 실리카 흄의 함유량이 많을수록 잔존강도

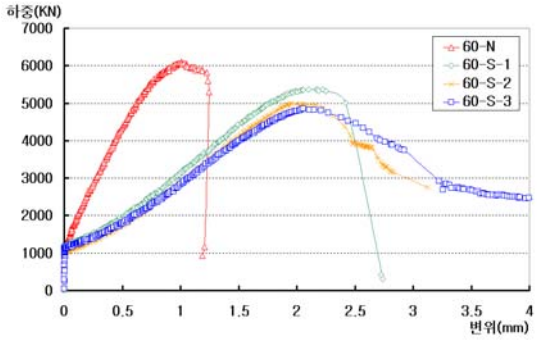

Fig. 9 60MPa 실리카흄 실험체의 하중-축변위곡선

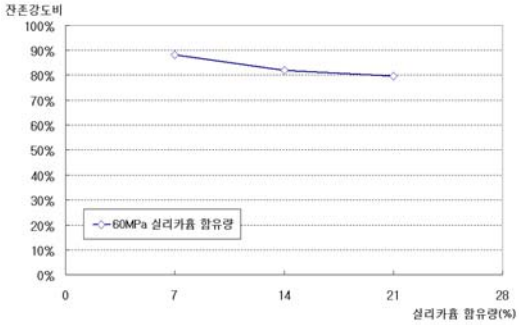

Fig. 10 실리카흄 함유량에 따른 잔존강도비

가 낮게 나타난 것을 알 수 있으나 함유량 14%와 21%사이에서는 큰 차이가 나지 않아 단순히 실리카흄의 양이 많을수록 폭렬에 의한 부재의 내력저하가 증가한다고 단정지을 수 없고, 좀 더 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

3.2.2 내화섬유 종류별 잔존강도비 비교

Fig. 12에 나타난바와 같이 내화섬유 종류에 따른 잔존 강도비는 내화섬유 함유량이 0.1%일 경우에는 별다른 차이가 없으나 내화섬유 0.2%일 경우에는 PP 섬유(76%) > PVA 섬유(71%) > PP 분말(63%)순으로 잔존강도비를 나타내고 있어 PP섬유를 혼입한 경우 내화성능이 가장 좋은 것으로 나타났다. 그러나 시공성을 함께 고려할 경우 PVA섬유를 혼입한 실험체가 내화성능은 다소 부족하지만 시공성이 확보되므로 초고강도 콘크리트에서는 가장 합리적인 내화섬유로서 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

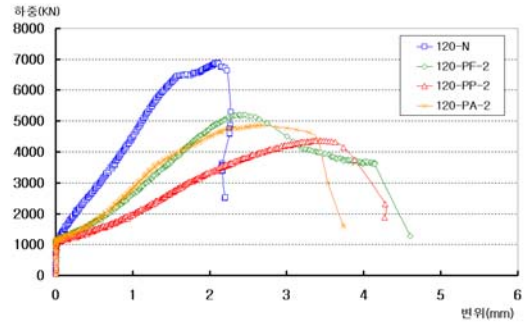

Fig. 11 120MPa 0.2%함유량 실험체의 잔존 강도

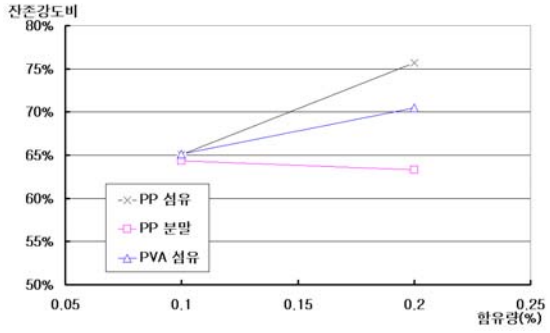

Fig. 12 내화재 종류에 따른 잔존강도비

4. 결 론

고강도 및 초고강도 콘크리트 기둥 실험체의 내화실험과 화해를 입은 실험체의 폭렬상태관찰, 잔존강도실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 배합강도 60MPa에서 PP 섬유를 0.2% 혼입한 경우 적정한 시공성을 확보하였으나, 120MPa의 경우 슬럼프 측정이 불가능했다, 그러나 PP분말과 PVA를 혼입한 콘크리트의 슬럼프와 플로어값은 PP섬유보다 크게 나타났다.
2) 실리카 흄의 함유량에 따른 폭렬발생은 외형적으로 차이가 나지 않았으나, 잔존강도 비교에서는 실리카흄을 7%, 14% 및 21%로 증가시킬수록 잔존강도 비는 낮게 나타났으나, 14%에서 21%로 증가할 경우 잔존강도비의 감소율이 작게 나타났다.
3) 초고강도 콘크리트에서 내화섬유 종류에 따른 잔존강도비는 PP 섬유(76%) > PVA 섬유(71%) > PP 분말(63%)순으로 잔존 강도비를 나타내었다.
4) 내화성능과 시공성을 함께 고려할 경우 초고강도 콘크리트에서는 PVA가 가장 합리적인 내화섬유인 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업 (과제번호: 04 핵심기술C02-02) 및 과학기술부 우수연구센터육성사업(R11-2005-056-01003-0)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한천구, 양성환, 이병열, 황인성, “혼화재 종류 및 폴리프로필렌 섬유의 혼입률 변화에 따른 고성능 콘크리트의 폭렬 특성”, 구조물진단학회지, 통권11호 제 4권 제1호, 2000, pp.85~92.
2. 黒岩秀介, 外2人, “Fc 100N/mm^{2}を超えるコンクリートの爆裂對策 ーエチレソビニルアルコール共重合体繊維の適用”, 大成建設技術セソター報, 第36号, 2003.
3. Sullivan, P.J.E., and Sharshar, R., “Performance of concrete at elevated temperatures(as measured by the reduction in compressive strength”, Fire Technology, V. 28, No. 3, August, 1992, pp.240-250.
4. Pierre Kalifa, “High-Temperature behaviour of HPC with polypropylene fibers from spalling to microstructures”, Cement and Concrete Research, Jun., 2001, pp.1487-1499.

급행 (접수일자 : 2006년 5월 10일)