

# PP 섬유를 함유한 고강도 철근콘크리트 기둥의 폭열 특성에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study of Spalling Characteristics of High-Strength Reinforced Concrete Columns with PP Fibers

신 성 우\*

유 석 형\*\*

Shin, Sung-Woo

Yoo, Suk-Hyeong

### Abstract

A spalling is defined as the damages of concrete exposed to high temperature during the fire by causing cracks and localized bursting of small pieces of concrete. It is reported that spalling is caused by the vapor pressure and polypropylene(PP) fiber has an important role in protecting from spalling. The characteristics of fire resistance of high-strength reinforced concrete columns with various concrete strength and various contents of PP fiber were investigated in this study. In results, the ratio of unstressed residual strength of columns increases as the concrete strength increases and the ratio of unstressed residual strength of columns exposed to fire decreases as the content of PP fiber increases from 0% to 0.2%.

### 요 지

고강도 콘크리트는 구조적인 장점에도 불구하고 화재 시 폭열과 함께 취성적인 파괴를 나타내는 단점으로 인하여 내화설계 시 주의하여 사용하여야 한다. 고강도 콘크리트의 폭열제어를 위하여 폴리프로필렌 섬유(PP 섬유)의 혼입이 가장 효율적인 것으로 여러 연구결과를 통하여 보고 되었으나, 이들은 대부분 콘크리트 공시체를 대상으로 한 내화실험의 결과로서 최적의 PP섬유 혼입량에 대한 부재수준의 연구는 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서는 고강도 콘크리트 기둥의 내화설계를 위한 최적의 PP섬유 혼입량을 제시하기 위하여 콘크리트 강도와 PP섬유의 혼입량을 변수로 하는 기둥부재의 내화실험 및 잔존강도 실험을 수행하였으며, 실험 결과 콘크리트 강도가 증가 할수록 기둥 실험체의 잔존 축강도비는 증가하였으며, PP섬유 혼입량을 0%에서 0.2%까지 증가 시킬수록 기둥의 잔존 축강도비가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 최적의 PP섬유 혼입량으로서 0.2%가 적절할 것으로 판단된다.

**Keywords :** Spalling, Fire Resistance, High-Strength Concrete, Polypropylene Fiber

**핵심 용어 :** 폭열, 내화성능, 고강도 콘크리트, 폴리프로필렌 섬유

\* 한양대학교 건축학부 교수

\*\* 한양대학교 친환경건축 기술혁신 연구센터 연구교수

E-mail : piter31@ihanyang.ac.kr 031-400-5132

• 본 논문에 대한 토의를 2006년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2006년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 연구배경 및 목적

고강도 콘크리트(HSC)는 구조적 장점 뿐 만 아니라 내구성 및 사용성이 우수하여 건축·토목 구조물에서의 활용이 점차적으로 증대되고 있다. 그러나 화재 시 폭발현상과 함께 부재가 취성적인 거동을 하게 되는 단점을 지니고 있다. 폭발현상은 수증기압과 열응력의 복합작용에 의한 결과로 나타난다. 열응력은 화재 시 부재내부의 온도차이로 인하여 발생하며, 수증기압은 100°C 이상에서 부재내부의 수분 증발로 인하여 발생한 수증기가 수밀한 콘크리트에 갇혀 발생한다. 폭발성 폭발이 발견되는 가열초기에는 수증기압에 의한 영향이 지배적인 것으로 보고<sup>(11),(12)</sup> 되었으며, HSC와 같이 투기성이 낮을수록 폭발현상이 심하게 나타난다. 따라서 HSC의 폭발발생 메커니즘을 관찰하여 이에 영향을 미치는 요인을 규명하고 재료적, 구조적 대안을 강구하기 위한 연구와 기술개발<sup>(13)</sup>이 진행되어 왔다.

콘크리트의 폭발을 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 있으며, 이중 폴리프로필렌 섬유(PP섬유)를 혼입하는 방법이 가장 효율적인 것으로 보고 되었다.<sup>(5)-(9),(14)</sup> 일반적으로 폭발은 190°C~250°C 사이에서 발생하는데 비하여 PP섬유는 170°C에서 녹는다. PP섬유가 녹음으로써 시멘트 매트릭스에 수증기가 통할 수 있는 미세한 통로를 형성하게 되고 이로써 수증기압이 낮아지게 된다.

PP섬유를 활용하여 HSC의 폭발을 제어하기 위한 재료적인 연구는 국내외적으로 상당히 진행되어왔다. Sarvaranta<sup>(14)</sup> 및 Sarvaranta와 Mikkola<sup>(5),(6)</sup>은 여러 가지 종류의 섬유 중 PP섬유가 가장 폭발방지에 효율적임을 보여주었고, Kalifa<sup>(7)</sup> 등은 실험 및 해석을 통하여 최적의 PP섬유 함유량(1.75kg/m<sup>3</sup>)을 제시하였다. Bentz<sup>(10)</sup>는 동일한 PP섬유 함유량에서는 PP섬유의 길이가 길수록 폭발제어에 유리함을 해석을 통하

여 입증하였다. 국내에서도 한천구 등<sup>(1)-(3)</sup>에 의하여 PP섬유 함유량 0.1%이내에서 PP섬유 함유량에 따른 폭발현상을 고찰하였으나 최적의 PP섬유함유량은 제시되지 않았으며, 김무한<sup>(4)</sup> 등은 0.1%이내에서 최적의 PP섬유 함유량을 도출할 수 있을 것으로 판단하였다. 이와 같이 PP섬유 활용을 위한 재료적 연구는 주로 최적의 PP섬유 함유량 및 PP섬유의 길이를 구하는데 초점이 맞추어져 비교적 상세한 연구가 수행되었다. 그러나 부재수준에서의 연구는 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트 강도와 PP섬유 함유량을 변수로 하는 기둥 실험체에 대한 잔존강도실험을 수행하여 폭발현상을 관찰하고 잔존강도를 측정함으로써 PP섬유 함유량에 따른 HSC기둥의 폭발 특성을 고찰하고 나아가 HSC부재의 내화설계를 위한 최적의 PP섬유 함유량을 결정하기 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험체 계획 및 배합

총 10개의 기둥 실험체(260X260X800mm)를 제작하였으며, 실험체의 배근상세는 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다.

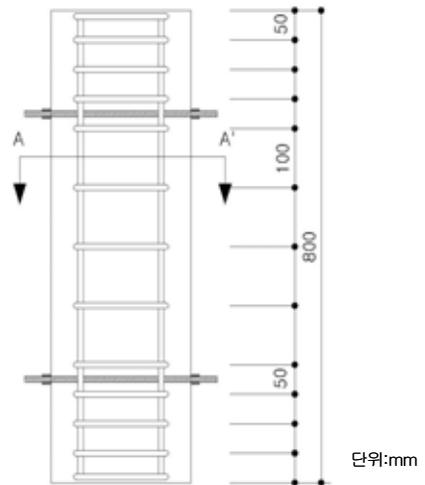


Fig. 1 실험체 입면상세도

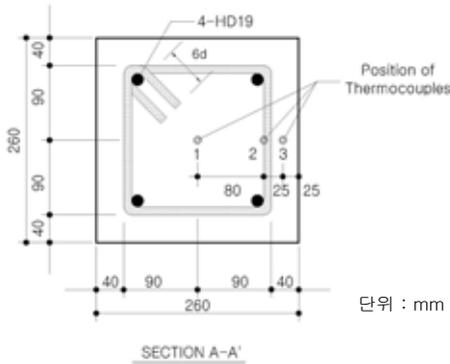


Fig. 2 단면상세 및 열전대 위치

모든 실험체는 피복두께 4cm, 주근비( $\rho$ ) 1.69%와 가열시 단면 내 온도 분포를 파악하기 위하여 표면으로부터 25, 25, 80mm 간격으로 K type의 열전대를 설치하였으며, 가력 시 상하 단부의 파괴를 방지하기 위하여 이 구간의 띠철근의 간격을 중앙부 띠철근 간격(100mm)의 1/2로 줄여서 배근하였다. 또한, 가력 시 축방향 변형 측정을 위한 LVDT의 설치를 위하여  $\phi$  5mm 강봉을 매립하였다.

실험체의 변수는 콘크리트 압축강도 27, 60 및 100MPa와 PP섬유 함유율 0, 0.1, 0.2%(콘크리트에 대한 체적비)로서 각 실험체별 배합계획은 Table 1과 같다. 실제 측정된 콘크리트의 28일 압축강도는 32, 60 및 85MPa로 각각 측정되었다. 혼화제는 배합강도 27MPa와 60MPa의 경우 플라이애쉬를 각각 15%씩,

100MPa는 실리카흙 10%이하의 사용은 폭발현상에 거의 영향을 미치지 않는다는 Sullivan<sup>(15)</sup> 등의 연구결과에 따라 실리카흙 10%를 사용하였다.

최적의 PP섬유 함유량에 대한 구체적인 값이 국내에서는 아직 제시되어 있지 않으나, Kalifa<sup>(7)</sup> 등은 공시체를 대상으로 수행한 내화실험에서 가열시 공시체 내부의 최대압력( $P_{max}$ ), 최대압력시 온도( $T_{p_{max}}$ ) 및 최대압력구배( $\Delta P_{max}$ ) 등과 같이 폭발현상에 직접적으로 관련되는 인자들을 관찰하여 PP섬유함유량이 1.75kg/m<sup>3</sup>(체적비 0.19%)까지 증가 할수록 폭발제어에 효과가 있으나 그 이상에서는 효과가 없음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 이러한 재료실험결과를 바탕으로 실 규모 기둥부재에서 최적의 PP섬유 함유량을 확인하기 위하여 PP섬유 함유량을 0, 0.1, 0.2%로 계획하였으며, 사용된 PP섬유의 물리적 특성은 Table 2와 같다. PP섬유 0.2%의 고강도 콘크리트인 100-F-2 실험체의 경우 유동성이 매우 낮아 졌으나 고유동화제의 추가투여로 슬럼프 플로우 60cm를 유지하였다.

Table 2 폴리 프로필렌 섬유의 물리적 성질

재질	비중	길이 (mm)	직경 (mm)	용융점 (°C)	인장강도 (MPa)
homopolymer polypropylene fibrillated fibre	0.9	19	0.07	162	400~550

Table 1 실험체별 배합계획

콘크리트 배합강도 (MPa)	28일 압축강도 (MPa)	Binder (kg)	W/C (%)	S/A (%)	단 위 재 료 량 (kg/m <sup>3</sup> )							PP섬유 혼입율 (Vol. %)	가열여부	실험체명
					W	C	F.A	S.F	S	G	PP섬유			
27	32	364	48.4	47.6	176	309	55	0	817	906	0	0	×	27-S
											0	0	○	27-F-0
60	60	593	27.5	43.4	163	504	89		705	925	0	0	×	60-S
											0	0	○	60-F-0
											0.93	0.1	○	60-F-1
											1.86	0.2	○	60-F-2
100	85	748	19.1	36.6	142.5	635		113	557	974	0	0	×	100-S
											0	0	○	100-F-0
											0.93	0.1	○	100-F-1
											1.86	0.2	○	100-F-2
비 중					1	3.15	2.18	2.15	2.60	2.67	0.93			

## 2.2 가열실험

기존의 내화실험에 사용된 방법은 일반적으로 가열과 가력을 동시에 진행하는 가력실험방법(Stressed Test Method), 가열시 가력을 하지 않고 일정온도를 유지한 상태에서 가력 하는 비가력실험방법(Unstressed Test Method) 그리고 가열 후 실험체를 냉각시킨 후 가력 하는 잔존강도실험방법(Unstressed Residual Strength Test Method)등을 사용하여 왔으며, 가력 실험 및 비가력실험은 화재 시 부재의 거동을 규명하기에 적합한 반면, 잔존강도실험은 화해를 입은 부재의 잔존강도를 측정하기에 적합한 방법으로서 본 연구에서는 PP섬유가 화해를 입은 HSC 기둥의 구조적 성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 잔존강도실험을 수행하였다. 가열은 국제기준인 ISO 834-1을 기초로 하고 있는 KS F 2257-1(건축구조 부재의 내화시험방법)에 따라서 Fig. 3과 같은 표준 가열곡선에 따라 1시간 동안 가열하였으며, 최대가열온도는 929℃이다.

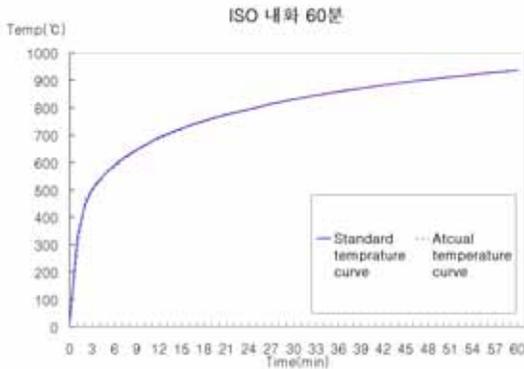


Fig. 3 가열곡선

## 2.3 잔존강도실험

화해를 입은 기둥 실험체의 잔존강도 측정을 위하여 Fig. 4와 같이 1000t 용량의 UTM에 실험체를 설치하여 축 하중강도를 측정하였다. 상하단부 부분은 가열 전에 세라믹 롤로 감싸 폭렬을 방지하였고, 가열 후 그리고 가력 전에 탄소섬유를 상하단부에 부착하여 주두부분의 파괴를 방지하였다. 중심축하중 가력에도 불



Fig. 4 실험체 설치상황

구하고 임의적으로 발생한 폭렬에 의하여 단면이 불규칙하여 가력 시 편심이 미소하게 발생하였으나, 전체적인 파괴양상은 중심축하중파괴와 비슷한 양상을 나타내었으며 이는 기둥 양 측면에서 계측된 처짐의 차이를 비교함으로써 확인하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 폭렬 특성

폭렬의 정도를 평가하기 위하여 육안조사와 질량감소량을 측정하였다. 육안조사는 폭렬발생 면적과 폭렬 깊이를 관찰하여 다음과 같이 3단계의 등급으로 나누어 평가하였다.

- Minor : 폭렬이 철근까지 도달하지 않고 콘크리트 표면에 일어난 경우
  - Major : 폭렬이 철근까지 도달하고 철근이 노출된 경우
  - Severe : 폭렬이 띠철근의 안쪽까지 일어난 경우
- 또한, 폭렬정도에 대한 정량적인 평가를 위하여 식 (1)과 같이 폭렬 전·후 콘크리트 질량감소량을 측정하여 폭렬을 평가하였다.

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

Table 3 폭열 타입과 폭열 정도

Column	Spalling Type	Spalling Degree (%)
27-F-0	minor	6
60-F-0	severe	25
60-F-1	major	11
60-F-2	minor	7
100-F-0	minor	25
100-F-1	minor	12
100-F-2	minor	6

여기서,  $W_L$ 은 폭열에 의하여 발생하는 콘크리트의 중량감소량이고,  $W_C$ 는 가열 전 기둥 실험체의 중량이다. 각 실험체에 대한 육안조사 및 질량감소를 측정용 이용한 폭열상태 평가결과는 Table 3과 같다.

콘크리트 강도에 따른 폭열정도를 나타내고 있는 Fig. 5와 Fig. 7을 보면 전체적으로 보통강도보다 HSC를 사용한 기둥에서 폭열이 더 심하게 나타나고 있음을 알 수 있는데 이는 32MPa에 비하여 60MPa 및 85MPa 콘크리트의 수밀성이 높기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 7의 폭열성상을 보면 배합강도 100MPa 실험체는 철근이 노출되지 않고 비교적 균등하게 피복이 탈락하였으나, 60MPa는 철근이 부분적으로 노출되면서 피복이 다소 불규칙하게 탈락하였다. Fig. 5에서 질량감소량을 비교하면 60MPa와 85MPa사이에서는 큰 차이가 나지 않고 있는데 이는 실리카흙 10%이하의 사용은 폭열의 정도에 거의 영향을 미치지 않는다는 기존연구<sup>(15)</sup>와 달리 85MPa 실험체의 혼화재로 사용된 실리카흙이 폭열에 영향을 미쳐 실리카흙을 사용하지 않은 60MPa에 비하여 강도가 증진하였음에도 불구하고 폭열의 정도는 변함없이 일정한 것으로 판단된다.

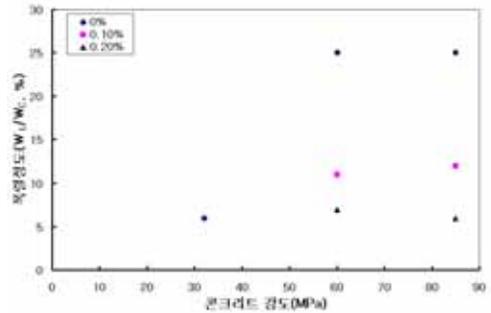


Fig. 5 콘크리트 강도에 따른 폭열정도

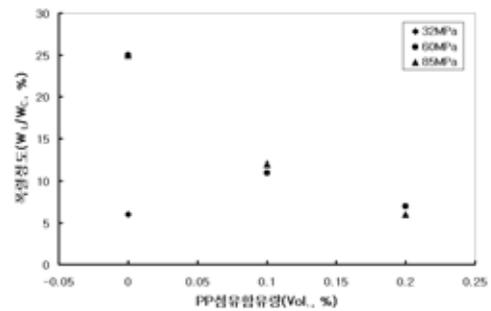


Fig. 6 PP섬유 함유량에 따른 폭열정도

PP섬유함유량에 따른 폭열정도를 나타내는 Fig. 6, Fig. 8 및 Fig. 9를 보면 PP섬유량을 증가시킬수록 폭열정도가 감소함을 확실하게 확인할 수 있으며, 특히 Fig. 6을 보면 PP섬유 함유량이 0.1%를 초과하여 0.2%까지 증가함에 따라 폭열제어에 효과적임을 알 수 있다. 또한 이러한 결과는 콘크리트 압축강도 60MPa 뿐 만 아니라 85MPa에서도 거의 유사한 경향을 보여 PP섬유가 폭열에 미치는 영향이 콘크리트 강도에 따라 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

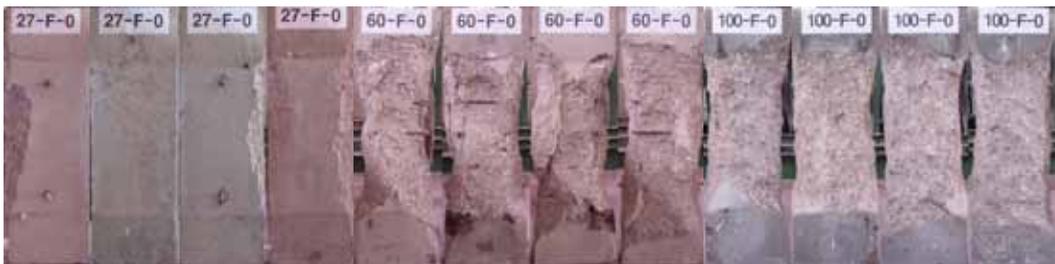


Fig. 7 콘크리트 강도별 폭열성상(무혼입)

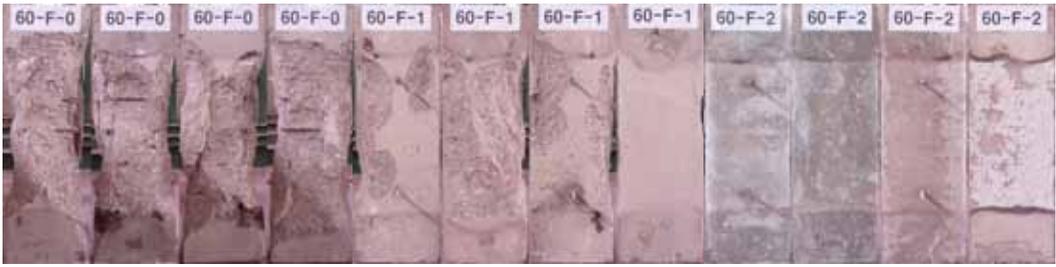


Fig. 8 PP섬유 함유량에 따른 폭열성상(배합강도 60MPa)

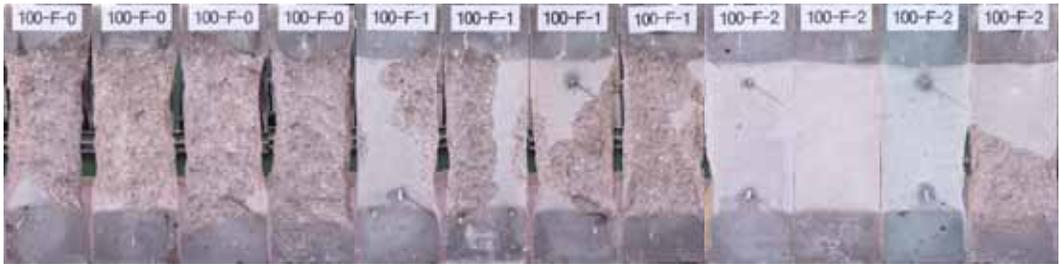


Fig. 9 PP섬유 함유량에 따른 폭열성상(배합강도 100MPa)

이러한 결과는 Kalifa<sup>(7)</sup>가 공시체를 대상으로 수행한 실험결과와 유사한 결과로서 향후 HSC부재의 내화설계를 위한 최적의 PP섬유 함유량 결정을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.2 온도곡선

실험체 내부에 설치된 열전대를 통하여 계측된 온도-시간 곡선을 이용하여 가열 시 단면 내 온도분포를 파악하였다. PP섬유 무혼입 실험체의 콘크리트 강도별 온도분포 특성을 나타내고 있는 Fig. 10에서 보면, 배합강도 27MPa는 내부온도가 급격하게 변하는 부분

이 없으나, 배합강도 60MPa 및 100MP의 경우 표면에 가장 가까운 25mm위치의 온도가 100℃이상이 되는 20~30분 사이에서 급격하게 상승하였다. 이는 이들 HSC 실험체에서 폭열로 인하여 콘크리트 피복이 떨어져 나가 열전달 경로가 짧아졌기 때문이다. 또한, 60MPa보다는 100MPa에서 온도상승이 5분정도 더 빨리 진행되었는데 이는 100MPa 콘크리트가 다소 수밀성이 높아 폭열이 초기에 발생했기 때문인 것으로 판단된다. PP섬유가 고온에서 콘크리트 내부온도에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 동일한 콘크리트 강도 60MPa 실험체의 25mm와 50mm위치에서 계측한 온도-시간 곡선을 Fig. 11 및 Fig. 12에 비교하였다.

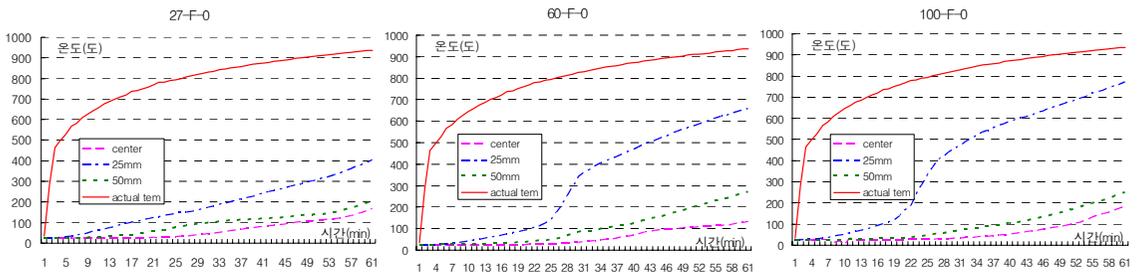


Fig. 10 무혼입 실험체 온도-시간변화

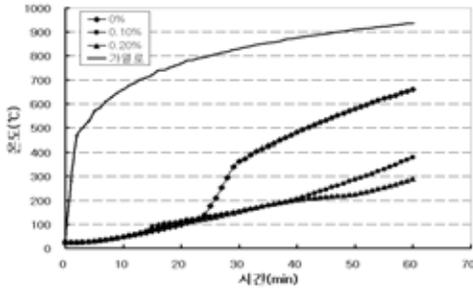


Fig. 11 PP섬유량별 온도-시간곡선(60MPa, 25mm)

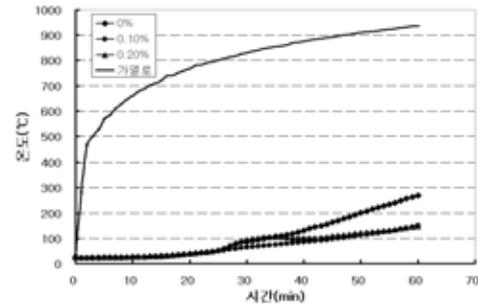


Fig. 12 PP섬유량별 온도-시간곡선(60MPa, 50mm)

Fig. 11에서 보면 폭렬에 의한 영향을 받는 25mm 위치에서는 PP섬유 혼입을 0%에서 폭렬에 의하여 온도가 급격히 상승하고 있으나, Fig. 12에서 보면 폭렬현상에 의한 영향을 적게 받는 50mm 위치에서는 PP섬유함유량에 따라 온도의 차이가 거의 나타나지 않고 있다. 따라서 PP섬유가 화재 시 콘크리트의 온도변화에는 아무런 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

### 3.3 잔존강도

가열 실험체의 가열 이후의 잔존 축 하중 강도( $P_f$ )를 각 콘크리트 강도별로 비가열 기준 실험체(27-S, 60-S 및 100-S)의 최대 축 하중( $P_s$ )으로 나누어 잔존 축 강도비( $P_f/P_s$ )를 구한 후 콘크리트 강도 및 PP섬유 함유량에 따라 비교하였다. 기준 실험체 27-S, 60-S 및 100-S의 최대 중심 축하중 강도는 각각 27.7, 54.2 및 75MPa로 나타났다.

Fig. 13을 보면 일반적으로 공시체실험에서 콘크리트 강도가 증가 할수록 잔존압축강도비가 낮아진다는 기존연구결과<sup>(13)</sup>와 달리 본 연구의 기둥부재 실험결과에서는 콘크리트 강도가 증가함에 따라 기둥 실험체의

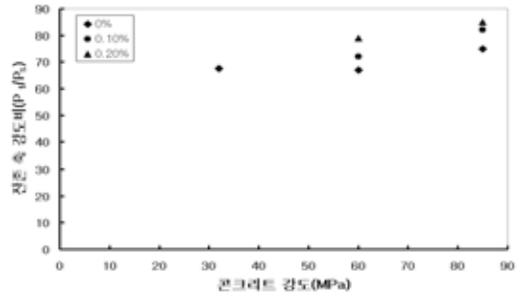


Fig. 13 콘크리트 강도별 잔존 축강도비

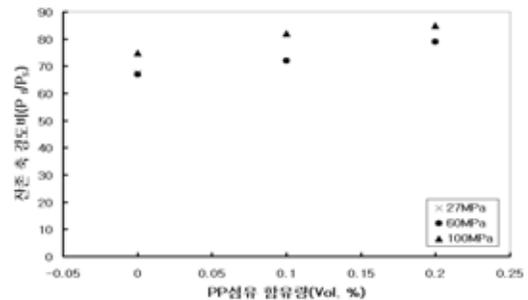


Fig. 14 PP섬유량별 잔존 축강도비

잔존 축강도비가 증가하였다. 이는 화해를 입은 기둥부재의 축하중 강도가 단지 콘크리트 강도만으로 구성되지 않고 폭렬에 의한 주근의 노출여부 및 단면결손 상태 등에 의하여 복합적으로 영향을 받았기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 12와 같이 표면에서 50mm 위치인 띠철근으로 구속된 곳에서 콘크리트 온도가 300°C이하인 경우 콘크리트 강도증가에 따른 잔존압축강도의 감소가 미소한 반면, Fig. 11에서와 같이 표면에서 25mm 위치인 띠철근 외부의 콘크리트 온도가 폭렬에 의하여 400°C이상에 도달하면 콘크리트 강도 증진에 따른 잔존압축강도의 감소가 크게 나타나지만 폭렬에 의하여 탈락하여 기둥의 잔존 축 강도에는 영향을 미치지 않고 있다. 또한 Fig. 5와 같이 60MPa와 85MPa 실험체의 폭렬에 의한 질량 손실량은 비슷하여도 60MPa 실험체의 경우 불규칙한 폭렬성상으로 인하여 고온에 노출된 주근의 항복강도 감소 및 단면결손 부위에서의 응력집중 등으로 인하여 잔존 축 강도비가 낮게 나타난 것으로 판단된다.

PP섬유 함유량에 따른 기둥 실험체의 잔존 축 강도비를 나타내는 Fig. 14를 보면 PP섬유 함유량이 0%에서

0.2%까지 증가 할수록 잔존 축 강도비가 일정한 정도로 증가하였으며, 이는 Fig. 6과 같이 PP섬유 함유량이 증가 할수록 폭렬형태에 큰 변화 없이 질량손실에 따른 단면감소가 일정하게 나타났기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

- 1) 폭렬에 의한 기둥부재의 질량감소량은 콘크리트 강도가 60MPa에서 85MPa로 증가할 경우 거의 차이가 없으나, 잔존 축강도비는 10%정도 증가하였다. 이는 질량감소에 따른 단면결손 뿐 만 아니라 폭렬 성상에 따라 주근의 노출 및 국부적인 단면결손 등이 잔존 축강도에 영향을 미쳤기 때문인 것으로 판단된다.
- 2) PP섬유 함유량이 증가 할수록 슬럼프가 감소하였으나, W/C 19%, PP섬유 함유량 0.2%인 고강도 콘크리트에서 슬럼프 플로우를 60cm 까지 확보하였으며, PP섬유함유량을 0%에서 0.2%까지 증가시킬수록 기둥부재의 폭렬에 따른 질량감소량은 25%에서 5%까지 일정하게 감소하였다.
- 3) PP섬유 함유량을 0%에서 0.2%까지 증가시킬 경우 기둥부재의 잔존 축강도비는 평균 70%에서 82%까지 증가하였다. 따라서 최적의 PP섬유 함유량으로서 0.2%가 적절할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 연구는 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업 (과제번호: 04핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 한천구, 양성환, 이병열, 황인성, “골재종류 및 폴리프로필렌 섬유 혼입률 변화에 따른 고성능 콘크리트의 폭렬 특성에 관한 연구”, 콘크리트학회논문집, 통권53호 제 11권 5호, 1999, pp.69~78.
2. 한천구, 양성환, 이병열, 황인성, “혼화재 종류 및 폴리프로필렌 섬유의 혼입률 변화에 따른 고성능 콘크리트의 폭렬 특성”, 구조물진단학회지, 통권11호 제 4권 제 1호, 2000, pp.85~92.
3. 한천구, 양성환, 이병열, 황인성, “W/C 및 폴리프로필렌 섬유의 혼입률 변화에 따른 콘크리트 고온시 성상”,

대한건축학회 구조계 논문집, 제16권 10호, 2000. 10, pp. 81-88

4. 권영진, 장재봉, 나철성, 김무한, “고성능 콘크리트의 폭렬현상과 대책에 관한 연구동향”, 콘크리트학회지 특집 기사, 통권86호 제17권 3호, 2005.
5. L. Sarvaranta, E. Mikkola, Fiber mortar composites in fire conditions, Fire Mater 18, 1994, pp. 45-50.
6. L. Sarvaranta, E. Mikkola, Fiber mortar composites under fire conditions: Effects of ageing and moisture content of specimens, Mater Struct. 27, 1994, pp. 532-538.
7. Pierre Kalifa, “High-Temperature behaviour of HPC with polypropylene fibers from spalling to microstructures”, Cement and Concrete Research, Jun., 2001, pp.1487-1499.
8. U. Diederichs, U.M. Jumppanen, U. Schneider, High temperature properties and spalling behaviour of high strength concrete, 4th Int. Workshop on High Performance Concrete Characteristics, Material Properties and Structural Performance, Weimar, Germany, October 5-6, 1995.
9. T. Lennon, N. Clayton, Fire tests on high grade concrete with polypropylene fibres, BRE Report 395, 1995.
10. D. Bentz, “Fibers, percolation and spalling of high performance concrete”, ACI material Journal, March, 2000, pp.351-359.
11. Zdenek P. Bazant, Maurice F. Kaplan, “Concrete at High Temperatures : Material Properties and Mathematical Models”, Prentice Hall, 1996.
12. NIST, “International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete”, Md Gaithersburg, Feb., 1997.
13. NISTIR 5934, “Fire Performance of High-Strength Concrete : A Report of the State-of-the-Art”, NIST, Dec., 1996.
14. L. Sarvaranta, E. Jarvela, E. Mikkola, Fiber mortar composites under thermal exposure, in: Pluralis(Ed.), Proceedings of 2nd International Symposium on Textile Composites in Building Construction, Lyon, France, 23-25 June 1992, pp. 47-56.
15. 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.

(접수일자 : 2005년 8월 11일)