

# 복합섬유(PP, NY)를 혼입한 60, 80MPa 3성분계 고강도콘크리트의 내화특성

## Spalling Properties of 60, 80MPa High Strength Concrete with Fiber

김 성 덕                      김 상 연                      배 기 선                      박 수 희                      이 범 식\*

Kim, Seong-Deok   Kim, Sang-Yun   Bae, Ki-Sun   Park, Su-Hee   Lee, Bum-Sik\*

Construction Technology Reserch Dept., Land & Housing Institute, Yuseong, Daejeon City, 305-731, Korea

### Abstract

Fire resistance and material properties of high-strength concrete (W/B 21.5%, 28.5%) with OPC, BS and FA were tested in this study. Main factors of the test consisted of fiber mixing ratio and W/B. Two types of fiber (NY, PP mixed with the same weight) were used for the test. The fiber mixing ratios were 0%, 0.05%, 0.1%, and 0.2% of the concrete weight. After performing the test, Under the W/B level of 21.5% and 28.5%, the spalling was effectively resisted by using the high strength concrete with fiber mixing ratios of 0.05%~0.1%. Compressive strength, flowability and air content are similar those of the fiberless high-strength concrete with the same W/B.

Keywords : High Strength Concrete, Spalling Properties, Fiber volume fraction, Polypropylene Fiber, Nylon Fiber

## 1. 서 론

일반적으로 콘크리트는 다른 구조재료에 비해 열전도율과 열확산계수가 매우 낮아 대표적인 내화구조재료로써 널리 사용되어지고 있으나, 내부온도가 600°C 이상 되면 급격한 재료물성의 저하가 발생하는 것으로 알려져 있다.[1] 특히 조직이 치밀한 고강도콘크리트는 화재 시 콘크리트 내부의 급격한 온도상승으로 콘크리트의 인장강도보다 큰 수증기압이 생성되어 폭발현상이 발생한다. 이러한 폭발현상은 구조부재 피복의 박락과 함께 철근이 고온에 노출되어 심각한 구조내력의 저하를 초래하고 경우에 따라서는 건축물이 붕괴에까지 이를 수 있는 원인이 되기도 한다.[2,3,4]

최근 개정된 고강도콘크리트 기둥·보의 내화성능 관리기준에 부합하고 경화전후 고강도콘크리트의 요구재료물성을 만족하는 고강도콘크리트를 개발하기 위한 노력이 활발히 이루어지고 있으며, 일반적으로 폴리프로필렌섬유(이하

PP섬유), 나일론섬유(이하 NY섬유)등과 같은 유기섬유를 콘크리트에 일정비율로 혼입하는 방법이 경제적이면서도 내화성능을 향상시킬 수 있는 효과적인 방법으로 알려져 있다.[5,6,7,8,9,10]

따라서, 본 연구에서는 고강도콘크리트의 내화성능 증진에 효과적인 것으로 알려진 유기섬유를 혼입한 설계기준강도 60 MPa(W/B 28.5%), 80 MPa(W/B 21.5%) 3성분계 고강도콘크리트(이하 고강도콘크리트)를 대상으로 내화성능 평가를 수행하여, 섬유 혼입율이 고강도콘크리트의 내화성능과 경화전·후 콘크리트 재료물성에 미치는 영향을 평가하고, 섬유를 혼입하지 않은 고강도콘크리트와 비교하여 유사한 재료물성을 가지며, 내화성능을 향상시킬 수 있는 적정 섬유 혼입율을 제시하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구에 사용된 설계강도 60 MPa, 설계강도 80 MPa급 고강도콘크리트의 물-결합재비(이하 W/B)는 각각 28.5%와 21.5%로 계획하였다.

Received : February 8, 2010

Revision received : March 21, 2010

Accepted : May 5, 2010

\* Corresponding author:

[Tel: 82-42-866-8415, E-mail: bslee417@lh.or.kr]

©2010 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

섬유 혼입율이 고강도콘크리트의 내화특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 폴리프로필렌(이하 PP), 나일론(이하 NY)섬유를 동일 중량비로 혼합한 섬유를 콘크리트 중량의 W/B 21.5%는 0.05%, 0.1%, 0.2%와 W/B 28.5%는 0.05%, 0.1%로 혼입한 시험체를 제작하였으며, 비교대상으로 섬유를 혼입하지 않은 시험체를 계획하였다.

재령 28일의 공시체를 대상으로 유기섬유가 혼입된 고강도콘크리트의 3시간 내화성능 평가를 수행하여, 공시체의 폭발발생 유·무, 잔존압축강도율의 평가를 계획하였다. 고강도콘크리트의 재료물성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 슬럼프 플로와 공기량 및 강도시험을 계획하였다. 세부 실험계획과 배합은 Table 1, 2와 같다.

Table 1. Experimental condition

W/B (%)	PP, NY fiber contents(%)	Items of Experimentation		
		Fresh Concrete	Hardened Concrete	Fire resistance test
21.5 28.5	0	Slump Flow Air content	Compressive strength (3, 7, 28, 56days),	Spalling properties, Residual compressive strength
	0.1		Tensile strength (28days)	
	0.2			
2	4	2	2	2

2.2 사용재료

본 연구에 사용한 고강도콘크리트의 제작에 사용된 시멘트는 국내산 보통 포틀랜드 시멘트(이하 C)를 사용하였으며 물리·화학적 성질은 Table 3과 같다. 잔골재(이하 S/a)각각 40, 46%로, 잔골재(이하 S)는 세척사를 사용하였으며, 최대치수 19 mm인 굵은 골재(이하 G)를 사용하였다. 시험에 사용된 골재의 물리적 성질은 Table 4와 같다. 혼화재는 경남 하동산 플라이애시(이하 FA)와 고로슬래그미분말(이하 BS)을 사용하였으며, 물리적 성질은 Table 5과 같다. 고강도콘크리트의 폭발방지 목적으로 국내 S사 제품의

섬유를 사용하였으며, 고성능감수제(이하 SP)는 폴리카르본산계로 물리적 특성은 Table 6, 7과 같다.

Table 3. Physical properties of cement

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Soundness (%)	Setting(Min)		Compressive strength(MPa)		
			Ini.	Fin.	3days	7days	28days
3.16	3,482	0.150	4:45	7:45	21.9	29.8	39.4

Table 4. Physical properties of aggregates

Kind	Density (g/m <sup>3</sup> )	Finess modulus	Absorption ratio (%)	0.08mm pass modulus (%)
Fine agg.	2.61	3.1	0.74	3.59
Coarse agg.	2.61	7	0.76	0.89

Table 5. Physical properties of BS, FA

Kind	Density (g/m <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	lg.loss (%)	Activity index (%)		
				7days	28days	91days
Granulated Blast furnace slag	2.90	4,463	1.4	67.0	72.6	102.6
Fly ash	2.27	3,362	3.8	72.3	74.4	89.6

Table 6. Physical properties of chemical admixture

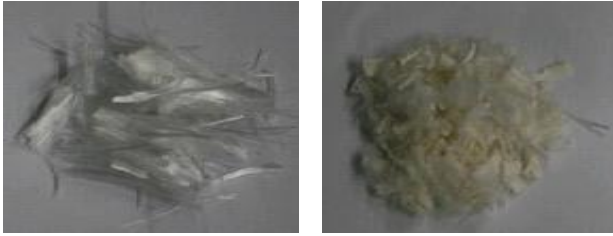
Kind	Color	Ingredient	Density	pH
Superplasticizer	Dark brown	Polycarbonic acid	1.05	7±2

Table 7. Physical properties of PP, NY Fiber

Kind	Melting point (°C)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Diameter (μm)	Length (mm)
Polypropylene Fiber	160~170	0.91	25~40	19
Nylon Fiber	215~230	1.15	15~30	12

Table 2. Mix proportions of high strength concrete

W/B (%)	(PP+NY) fiber contents (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					AE (%)	SP (%)	
			W	C	BS	FA	S			G
21.5	0	40	150	384	174	140	600	907	0.012	1.40
	0.05	40	150	384	174	140	600	907	0.012	1.40
	0.1	40	150	384	174	140	600	907	0.012	1.40
	0.2	40	150	384	174	140	600	907	0.012	1.40
28.5	0	45	160	365	112	84	725	893	0.005	1.25
	0.05	45	160	365	112	84	725	893	0.005	1.25
	0.1	45	160	365	112	84	725	893	0.005	1.25



(a) PP Fiber (19 mm) (b) NY Fiber (12 mm)

Figure 1. Shape of PP and NY fiber

### 2.3 실험계획

#### 1) 굳지 않은 콘크리트

본 시험에 사용된 고강도콘크리트는 강제식 펜타입 믹서를 사용하여 1분 동안 결합재와 섬유를 건비빔한 후 골재를 혼입하여 다시 1분간 건비빔하여 혼화제를 용해한 배합수를 사용하여 3분 동안 배합하여 제조하였다. 굳지 않은 콘크리트의 재료물성은 KS F 2594, KS F 2421에 의거 각각 슬럼프 플로시험과 공기량 시험을 수행하고 시험변수별 물성을 평가하였다.

#### 2) 굳은 콘크리트

굳은 콘크리트의 압축강도와 인장강도 측정용 공시체는 KS F 2403에 의거  $\varnothing 100 \times 200$  mm 몰드를 사용하여 제작하였으며, 목표 재령에 도달한 시험체를 대상으로 KS F 2405에 의해 압축강도와 KS F 2423에 의해 할렬인장강도 시험을 수행하였고, 실험변수별 강도값을 평가하였다

#### 3) 내화시험

고강도콘크리트의 내화특성을 규명하기 위한 시험은 한국건설기술연구원에서 KS F 2257-1에서 규정에 의거 3시간 비가력 내화시험을 실행하였다. 내화시험은 W/B에 따라 W/B 21.5%는 섬유 혼입율 0~0.2%, W/B 28.5%는 섬유 혼입율 0%~0.1%로 재령 28일에 3시간 내화시험을 하였으며, 내화시험 후 공시체의 폭렬여부는 육안으로 관찰·조사하였다. 잔존압축강도율은 계획된 소정의 재령에 가열시험 전과 후의 강도를 측정하여 백분율로 나타내었다.

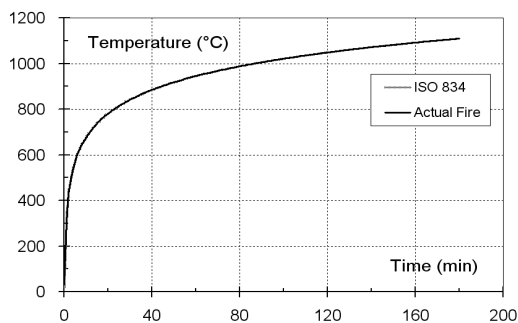


Figure 2. Criterion curve of fire temperature



(a) Before fire test (b) After fire test

Figure 3. Fire resistance test results

표준시간-가열온도곡선 그림과 내화시험 전경을 Figure 2, 3에 나타내었다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 굳지 않은 콘크리트 특성

#### 1) 유동특성

W/B가 21.5%인 경우, 섬유 혼입율이 0%와 0.05%에서 슬럼프 플로가 735 mm와 740 mm로 유사한 것으로 나타났으며, 섬유 혼입율이 0.2%인 경우 슬럼프 플로가 690 mm로 가장 낮게 나타났으나 재료분리 없이 목표 슬럼프 플로를 초과하는 것으로 나타났다.

W/B가 28.5%인 경우, 섬유 혼입율 0%, 0.05%에서 슬럼프 플로가 630 mm전후로 유사하게 나타났으며, 섬유 혼입율이 0.1%인 경우 슬럼프 플로가 600 mm로 가장 낮으나 목표 슬럼프 플로를 만족하는 것으로 나타났다.

시멘트 대체재로 BS와 FA가 각각 25%와 20%가 사용된 고강도콘크리트 (W/B 21.5%와 28.5%)에서 섬유 혼입율이 증가함에 슬럼프 플로가 작은 것으로 나타났다. 이는 물-결합재비와 무관하게 섬유의 양이 증가되므로 인해 고강도콘크리트의 유동성이 저하하는 것으로 사료된다. W/B별 섬유 혼입율 변화에 따른 슬럼프 플로의 변화에 대한 시험결과는 Figure 4와 같다.

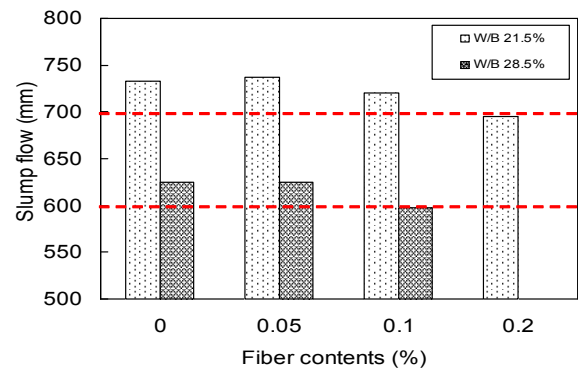


Figure 4. Slump flow with respect to W/B and fiber contents

2) 공기량

W/B 21.5%인 경우, 섬유 혼입율이 0%와 0.2%에서 공기량은 2.2%로 동일한 것으로 나타났으며, 섬유 혼입율이 0.05%인 경우 공기량이 2.0%로 가장 낮으나 목표 공기량을 만족하는 것으로 나타났다. W/B 28.5%인 경우, 섬유 혼입율이 0%에서 공기량 2.8%로 가장 낮게 나타나, 섬유 혼입율 0.05%와 0.1%에서는 3.0%로 같은 것으로 나타났으며, 섬유 혼입율이 증가할수록 공기량이 다소 증가함을 확인할 수 있었다. W/B 21.5%와 28.5%로 설계기준강도가 높을수록 공기량이 낮았으며, 섬유 혼입율이 0~0.2%로 증가함에 따라 미세한 공기량 차이는 있었으나, 목표 공기량을 만족하는 것으로 나타났다. 이는 결합재량이 증가함에 따라 고강도콘크리트가 더 고밀도화 되어 공기량이 낮아진 것으로 판단되며, 섬유 혼입량에 따른 공기량의 변화는 큰 차이가 없는 것으로 사료된다.

W/B 및 섬유 혼입을 변화에 따른 공기량의 변화를 평가한 결과는 Figure 5와 같다.

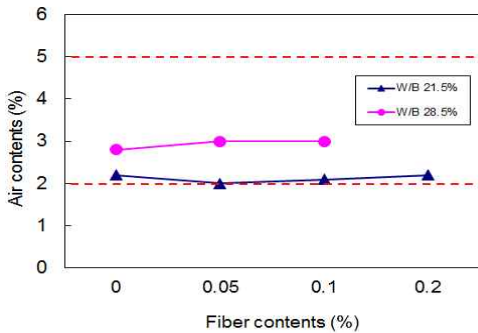


Figure 5. Air contents with respect to W/B and fiber contents

3.2. 굳은 콘크리트 특성

1) 강도특성

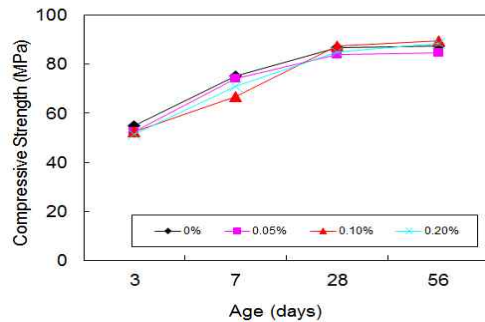
W/B 21.5%인 경우, 재령 3일에 섬유 혼입율 0%에서 54.8 MPa로 가장 높게 나타났으며, 섬유 혼입율이 증가하면서 섬유 혼입율 0.2%에서는 51.5 MPa로 낮아지는 현상을 나타내었다. 재령 28일에는 섬유 혼입율에 상관없이 목표강도를 만족하는 것으로 나타났으며, 섬유 혼입율 0.1%에서는 재령이 증가함에 따라 재령 28일 87.4 MPa, 56일 89.6 MPa로 가장 높은 압축강도 특성을 나타내었다.

W/B 28.5%인 경우, 재령 3일에 섬유 혼입율 0%에서 44.4 MPa로 가장 높게 나타났으며, 섬유 혼입율 0.1%에서 가장 낮은 36.5 MPa를 나타내었다. 재령 28일에 섬유 혼입율 0.05%에서 61 MPa로 가장 낮게 나타났으며, 섬유 혼입율에 상관없이 목표압축강도 특성을 만족하는 것으로 나타

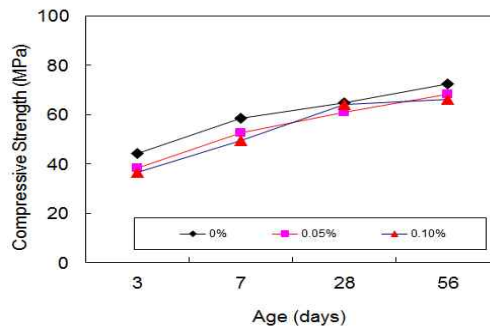
났다. 재령 56일에 섬유 혼입율 0%에서 72.6 MPa로 가장 높은 압축강도 특성을 보였으며, 재령이 증가함에 있어 섬유 혼입율 변화와 무관하게 유사한 강도특성을 나타내었다.

W/B 21.5%와 28.5%에서 재령 56일에 목표 강도를 모두 만족하는 것으로 나타났으며, W/B 21.5%에서는 재령에 따라 섬유 혼입율 0.1%에서 압축강도가 가장 높게 나타났다. W/B 28.5%에서는 섬유 혼입율 0%에서 가장 높게 나타나, 설계기준강도가 높아질수록 단위수량이 작아져 고밀도화됨에 따라 섬유혼입율과 무관하게 압축강도특성에 영향을 주지 못하는 것으로 판단되며, 그림 5에서 재령 28일 인장강도 특성으로 W/B 21.5인 경우는 섬유 혼입율이 0%에서는 5.48 MPa로 가장 높게 나타났으며, 섬유 혼입율 0.05%, 0.1%, 0.2%로 증가할수록 4.87 MPa, 4.8 MPa, 4.68 MPa로 낮아지는 현상을 나타내었다. W/B 28.5%인 경우는 섬유 혼입율 0%, 0.05%, 0.1% 증가할수록 인장강도 4.36 MPa, 4.19 MPa, 3.69 MPa로 낮아지는 현상을 나타내었다. W/B 21.5%, 28.5%로 변화하여도 섬유의 혼입량이 증가함에 따라 강도가 낮아지는 것을 확인하였다. 이는 섬유의 양이 많아지므로 인해 인장강도특성에 많은 영향을 주는 것으로 판단된다.

Figure 6은 W/B별 섬유 혼입을 변화에 따라 각각 재령 일의 압축강도 특성을 나타냈으며, Figure 7은 W/B와 섬유 혼입을 변화에 따른 재령 28일 인장강도를 나타낸 것이다.



(a) W/B 21.5%



(b) W/B 28.5%

Figure 6. Compressive strength results with respect to W/B and fiber contents

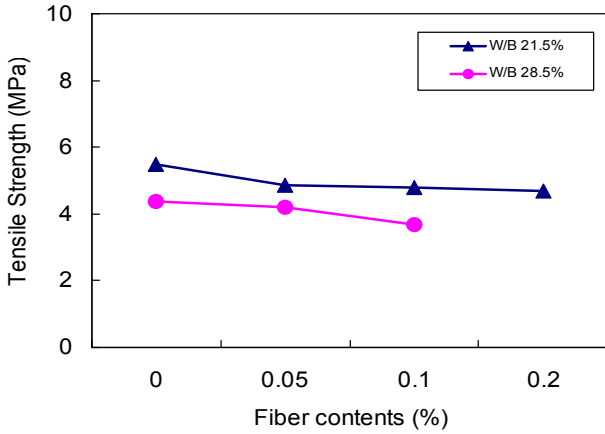


Figure 7. Tensile strength results with respect to W/B and fiber contents

### 3.3. 내화 특성

#### 1) 폭발성상

W/B 21.5%인 경우, 섬유 혼입율 0.05%, 0.1%, 0.2%에서는 폭발이 발생하지 않았고, 공시체의 형상도 그대로 유지하고 있었으나, 섬유 혼입율 0%에서는 급격한 고온에 의한 내부 수증기압의 영향으로 3개 공시체 모두 폭발이 발생한 것으로 나타났다.

W/B 28.5%에서는 섬유 혼입율 0%에서 작은 폭발현상이 부분적으로 보이며, 섬유 혼입율 0.05%, 0.1%에서는 폭발이 발생하지 않았고, 공시체 형상도 그대로 유지하고 있었다.

W/B가 21.5%, 28.5%인 경우, 섬유 혼입율이 0.05%이상에서 폭발현상이 발생하지 않은 것으로 나타났다. 이러한

현상은 기존연구결과와 동일하게 섬유가 고온에 노출되어 콘크리트 내부에서 용융되어 콘크리트 내부에 미세공극을 형성하게 되고 이를 통하여 내부의 높은 수증기압이 외부로 배출되어 폭발현상이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

Figure 8은 W/B 및 섬유 혼입율에 따른 관리용 공시체의 폭발 모습을 나타낸 사진이며, Table 8은 폭발특성을 나타내고 있다.

Table 8. Spalling properties with High Strength Concrete

Kind (W/B-Fiber Content ratio)	Surface crack occurrence	spalling occurrence	Properties
21.5 - 0%	Yes	Yes	Fracture spalling
21.5 - 0.05%	Yes	No	Surface crack
21.5 - 0.1%	Yes	No	Surface crack
21.5 - 0.2%	Yes	No	Surface crack
28.5 - 0%	Yes	Yes	Surface spalling
28.5 - 0.05%	Yes	No	Surface crack
28.5 - 0.1%	Yes	No	Surface crack

#### 2) 내화 전·후 강도특성

W/B 21.5%와 28.5%의 내화 전 압축강도에서는 섬유 혼입율과 무관하게 각각 80 MPa와 60 MPa 이상의 고강도 범위를 나타내었고, W/B 21.5%와 28.5%의 내화 후 잔존압축강도에서는 섬유 혼입율 0%의 경우 3.3MPa, 3.6 MPa로 나타났으나, 섬유 혼입율 0.05%, 0.1%, 0.2%로 혼입한 공시체보다 잔존압축강도가 미세하지만 낮게 나타났다. 이러한 현상은 NY섬유와 PP섬유의 길이비 조건에 의해 PP섬유의 낮은 용융온도에 의한 초기 수증기 배출 등의 복합작용에



Fiber contents 0%



Fiber contents 0.05%  
(a) W/B 28.5%



Fiber contents 0.1%



Fiber contents 0%



Fiber contents 0.05%



Fiber contents 0.1%



Fiber contents 0.2%

(b) W/B 21.5%

Figure 8. Specimens after fire resistance test with respect to fiber contents

기인하여 섬유 혼입율이 증가함에 따라 공극이 많아져서 강도현상이 낮아졌다고 판단된다.

Figure 10에서 W/B 21.5%인 경우, 섬유 혼입율 0%에서는 3.8%로 나왔으며, 0.05%이상에서는 잔존압축강도가 5~6MPa전후로 나타났다. W/B 28.5%인 경우, 섬유 혼입율 0%에서 5.6%, 섬유 혼입율 0.05%이상에서도 5~6%로 나타났다.

W/B가 21.5%에서 28.5%로 증가할수록 섬유 혼입율 0%에서 낮게 나타났으며, 섬유 혼입율 0.05%~0.2%에서는 0%에 비해 잔존압축강도율이 높게 나타나, 섬유 혼입율이 증가함에 잔존압축강도율은 큰 변화는 없는 것으로 나타났다. 이는 섬유의 혼입으로 인해 내화시 내부 폭발현상이 방지되어 잔존압축강도에서 섬유 혼입율 0%에 비해 높게 나타난 것으로 사료된다.

Figure 9는 W/B 및 섬유 혼입율에 따른 3시간 내화전·후 압축강도 특성을 나타냈으며, Figure 10은 W/B 및 섬유 혼입율에 따른 내화 후 잔존압축강도율을 나타낸 것이다.

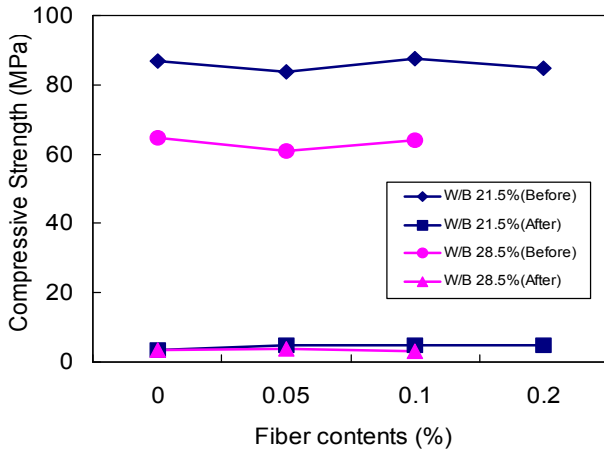


Figure 9. Compressive strength of fire resistance test results

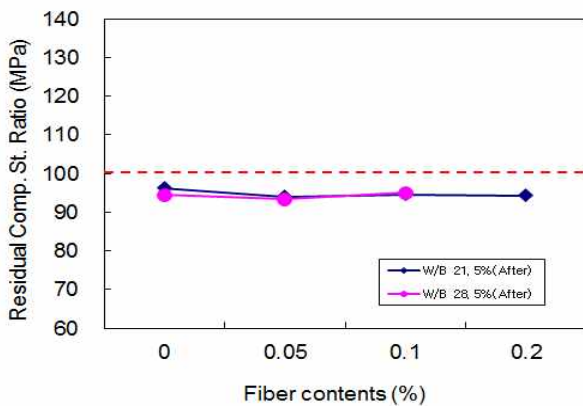


Figure 10. Residual compressive strength ratio of fire resistance test results

## 6. 결 론

물-결합재비(W/B)와 섬유 혼입율의 변화가 고강도콘크리트의 재료물성과 내화특성에 미치는 영향을 규명하기 위한 시험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) W/B 및 섬유 혼입율 변화에 따라서 0.05%에서 0.2%로 증가함에 따라 슬럼프플로는 다소 감소하나, 목표 슬럼프 플로우와 공기량은 만족하는 것으로 나타났다.
- 2) 재령 56일 기준 W/B 21.5%의 압축강도특성에서는 0%대비 96%~102%내외로 나타났으며, W/B 23.5%에서는 0%대비 91%~93%내외로 나타나 섬유 혼입율이 강도에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다
- 3) 본 연구에서 개발한 고강도콘크리트 대상으로 3시간 내화시험을 수행한 결과, W/B 21.5%, 28.5%인 경우, 섬유 혼입율 0%에서 폭발이 발생하였으나, 0.05%~0.2%에서는 폭발이 발생하지 않는 것으로 나타났다.
- 4) 3시간 내화시험 후 잔존압축강도율은 크게 저하하였으나 폭발발생이 되지 않은 공시체의 경우는 W/B에 무관하게 5~6%의 잔존압축강도율을 나타내었다.
- 5) W/B가 21.5%, 28.5%인 고강도콘크리트에서 NY섬유와 PP섬유가 동일한 비율로 0.05%~0.1%까지 혼입된 경우 유동성과 강도 및 폭발저항성능이 우수한 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 05건설핵심기술연구개발사업(과제번호 : 05건설핵심 D11)의 지원 하에 수행된 ‘고강도 콘크리트를 이용한 초고층 공동주택 적용방안’ 연구의 일부로 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 요 약

본 연구는 고강도콘크리트의 내화성능 증진에 효과적인 것으로 알려진 섬유(PP+NY) 혼입율 변화에 따른 60 MPa, 80 MPa 3성분계 고강도콘크리트의 유동성 및 강도특성을 검토하고 내화시험을 통해 폭발현상을 확인하였다. 섬유(PP+NY) 혼입율을 0%, 0.05%, 0.1%, 0.2%로 산정하여 실험한 결과, 유동성 및 강도가 미세하지만 저하하는 것으로 나타났으나, 전반적으로 목표 범위를 만족하는 것으로 나타났다. 3시간 내화 후 폭발특성으로 0%에서는 폭발현상이 나타났지만, 0.05%이상에서는 표면에 미세한 균열만 발생하고 피복 탈락현상은 나타나지 않는 것으로 나타났다. 또

한 폭렬이 발생되지 않은 공시체의 경우 잔존압축강도율이 5 ~ 6%로 나타났다. 이상 적은 양의 섬유(PP+NY)혼입율인 0.05%이상에서 폭렬현상이 방지되어 가장 양호한 것으로 판단된다.

**키워드** : 고강도 콘크리트, 폭렬특성, 섬유혼입율, 폴리프로필렌섬유, 나이론섬유

of the Architectural Institute of Korea (Structure & Construction), 2008;24(2):61-68.

10. Choi SM, Lee BS, Bae KS, Kim SY, Park SH: Rheological Characteristics of Fiber-Reinforced High-Strength AFR Concrete, Proceedings of the Korea Concrete Institute 2009:543-544.

## References

1. Kim HY, Seo CH, An Experimental Study on the Physical Properties by Compressive Strength Areas of Concrete at High Temperature, Journal of the Architectural Institute of Korea (Structure & Construction), 2004;20(11):75-82.
2. Han CG, Yang SH, Han MC, Pei CC, The Influence of Polymer Contents and Appearance on Spalling Prevention of High Strength Concrete, Journal of the Architectural Institute of Korea (Structure & Construction), 2009;24(5):93-100.
3. Na CS, Shin SB, Cho BS, Kwon YJ, Kim GY, Kim MH, An Experimental Study on the Explosive Spalling Properties of High Performance Concrete by Material Factors, Annual Conference of the Architectural Institute of Korea, 2006:357-360.
4. Song H, Chu YS, Lee JK, Strength and Deformation of High Strength Concrete in High Temperatures, Proceeding of Conference in Architectural Institute of Korea, 2006:505-508.
5. Sin SW, Yu SH, Kim YK, Spalling Reduction Methods of Ultra High-Strength Reinforced Concrete Columns , Journal of the Korea institute for Structural Maintenance Inspection, 2006;10(5):171-178.
6. J.G. Sanjayan, Design against spalling of concrete in fire, Proceeding of the First Korea-Australia Workshop on Recent Advance in high Performance Concrete, 2005:155-169.
7. K.D. Hertz, Limits of spalling of fire-exposed concrete, Fire Safety Journal 2003;38:103-116.
8. Han CG, Yang SH, Lee BY, Hwang YS, A Study on the Spalling Properties of High-Performance Concrete with the Kinds of Aggregate and Polypropylene Fiber Contents, Journal of the Korea Concrete Institute 1999; 11(5):69-77.
9. Han CG, Kim SS, Kim SS, Pei CC, Spalling Prevention of High Strength Concrete Due to Hybrid Organic Fiber and Different Lengths of Polypropylene Fibers, Journal