

## 혼화제 종류 및 섬유 혼입률 변화에 따른 고강도 콘크리트의 내화특성

### Fire Resistance Properties of High Strength Concrete Made with Various Admixture Types and Fiber Content

**장 기 현\***      **배 장 춘\*\***      **김 호 립\*\*\***      **지 석 원\*\*\*\***      **양 성 환\*\*\*\*\***      **한 천 구\*\*\*\*\***  
 Jang, Ki-Hyun      Pei, Chang-Chun      Jin, Hu-Lin      Jee, Suk-Won      Yang, Seong-Hwan      Han, Cheon-Goo

#### Abstract

This study investigates the fire resistance properties of high strength concrete, around 60MPa class, designed with various admixture types and fiber content. Test showed that the increase of fiber content decreased the fluidity and slightly inclined the air content of fresh concrete. However, the fiber content in concrete did not affect the compressive strength. For the addition of admixture, specimens adding the shrinkage-reducing-agent (SR) indicated the strength value at 70MPa, which is followed by incorporating silica fume (SF) at 66MPa, the combination of expansive admixture (EA) and SR at 63MPa, only EA at 59MPa, blast furnace slag (BS) at 58MPa and fly ash (FA) at 50MPa in an order. After completing the fire test, all specimens adding 0.05vol.% of polypropylene fiber exhibited protection of spalling, except for the specimens incorporating 30% of SF and incorporating 20% of SF with only SR and the combination of EP and SRA, respectively. Therefore the most effective result of this study was shown in the specimens incorporating 30% of FA and 30% of BS and incorporating 20% of SF with 5 % of EA. It is expected that this test results will be crucial references in near future to develop the spalling resistance method of high strength concrete.

키 워 드 : 고성능 콘크리트, 폭발방지, 폭발등급, 혼화제

Keywords : High Performance Concrete, Spalling Resistance, Spalling degree, Mineral Admixture

## 1. 서 론

현대사회는 도시집중화에 따른 인구 과밀화로 인하여 건축 구조물이 초고층화, 대형화되어 짐에 따라 고강도, 고유동, 고내구성의 특성을 갖는 고성능 콘크리트의 사용이 증가하고 있다.

이러한 고성능 콘크리트는 경화체의 내부조직이 치밀하여 화재 발생 시에는 고열에 의한 내부 수증기압의 상승으로 인해 심한 폭음과 함께 콘크리트의 표면이 박리, 탈락하는 폭발현상이 발생하고, 이에 따른 철근 노출로 인해 구조체의 내력 저하를 초래하게 되어 궁극적으로 건축 구조물의 붕괴까지도 이르게 된다.<sup>1)~3)</sup>

이러한 콘크리트의 폭발 발생요인으로는 주로 함수율, 가열 조건, 외력하중, 구조부재의 철근, 골재 등 많은 요인이 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나 폭발 메카니즘을 정성적으로 분석하기 위해서는 이외에도 폭발을 야기하는 여러 영향인자에

대한 검토가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 60MPa전후인 고강도 콘크리트를 대상으로 다양한 영향요인 변수에 따라 내화시험을 실시하였는데, 본 고에서는 혼화제의 종류 및 섬유 혼입률 변화에 따른 콘크리트의 기초적 특성을 분석하고, 1시간 비가력 내화시험을 실시한 후 폭발특성을 검토하므로써, 폭발발생의 영향인자에 대하여 분석하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1과 같고, 배합사항은 표 2와 같다. 즉, 실험요인으로 W/B는 25% 1수준에 대해, 보통포틀랜드 시멘트(이하 OPC) 100% 사용한 것을 플레인 배합으로 하고, 혼화제 종류로써 시멘트에 대한 질량비로 플라이애시(이하 FA), 실리카 폼(이하 SF) 및 고로슬래그(이하 BS)를 각각 30%씩 치환한 것과 팽창재(이하 EA) 5%, 수축저감제(이하 SR) 1% 및 팽창재 5%와 수축저감제 1%를 동시에 치환한 7수준에 대하여, PP섬유의 혼입률을 0.05, 0.10, 0.15%의 3수준으로 변화시켜 총 21배치를 실험계획 하였다.

\* 청주대학교 건축공학과 석사과정, 정회원

\*\* 청주대학교 건축공학과 박사과정, 정회원

\*\*\* (주)한성종합기술단건축사사무소 기술연구소 연구원, 정회원

\*\*\*\* 두산건설(주) 기술연구소 부장, 정회원

\*\*\*\*\* 인천전문대학 건축과 교수, 공학박사, 정회원

\*\*\*\*\* 청주대학교 건축공학부 교수, 공학박사, 정회원

표 1. 실험계획

실험요인		실험수준	
배합사항	W/B(%)	1	25
	목표플로우(mm)	1	700±100
	목표공기량(%)	1	3.0±0.5
	혼화재 종류 및 치환율(%)	7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• OPC(100%)<sup>1)</sup></li> <li>• FA(30%)<sup>2)</sup></li> <li>• SF(30%)<sup>3)</sup></li> <li>• BS(30%)<sup>4)</sup></li> <li>• EA(5%)<sup>5)</sup></li> <li>• SR(1%)<sup>6)</sup></li> <li>• EA(5%)+SR(1%)</li> </ul>
	PP섬유 혼입율(%)	3	0.05, 0.10, 0.15
실험사항	굳지 않은 콘크리트	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 슬럼프플로우</li> <li>• 공기량</li> </ul>	
	경화 콘크리트	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 압축강도(7, 28일)</li> <li>• 인장강도(28일)</li> </ul>	
	내화시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 폭발성상</li> <li>• 폭발등급</li> <li>• 질량변화</li> <li>• 잔존압축강도</li> </ul>	

- 1) OPC : 보통포틀랜드 시멘트      2) FA : 플라이애시  
 3) SF : 실리카 폼                      4) BS : 고로슬래그 미분말  
 5) EA : 팽창재                          6) SR : 수축저감제

이때, 플레인콘크리트로는 목표 슬럼프플로우 700±100mm, 목표공기량은 3.0±0.5%를 만족하도록 배합설계 한 후 실험 변수별 동일한 배합조건을 적용하였다.

실험사항으로는 굳지않은 콘크리트에서 슬럼프플로우 및 공기량을 측정하고, 경화 콘크리트에서는 계획된 재령에서 압축강도, 인장강도, 폭발성상, 폭발등급, 질량변화율 및 잔존압축강도를 측정하는 것으로 하였다.

2.2 사용재료

본 실험에 사용한 시멘트는 국내산 보통포틀랜드 시멘트(밀도: 3.15g/cm<sup>3</sup>, 분말도: 3,302cm<sup>2</sup>/g)를 사용하였고, 골재는 충남 조치원산의 부순 굵은골재(밀도: 2.61g/cm<sup>3</sup>, 조립률: 6.56) 및 부순 모래와 강모래를 1:1의 비율로 혼합한 혼합모래(밀도: 2.61g/cm<sup>3</sup>, 조립률 2.81)를 사용하였다. 혼화제로써 플라이애시(밀도: 2.21g/cm<sup>3</sup>, 분말도: 4,061cm<sup>2</sup>/g)는 국내산, 실리카 폼(밀도: 2.20g/cm<sup>3</sup>, 분말도: 200,000cm<sup>2</sup>/g)은 노르웨이산, 고로슬래그 미분말(밀도: 2.90g/cm<sup>3</sup>, 분말도: 4,580cm<sup>2</sup>/g)은 광양제철소 산을 사용하였다. 또한, 팽창재(밀도: 2.98g/cm<sup>3</sup>, 분말도: 3,117cm<sup>2</sup>/g)는 일본산 CSA계, 수축저감제(밀도: 1.02g/cm<sup>3</sup>, 고형분: 31%)는 독일산 글루콜계를 사용하였다. 혼화제로써 고성능감수제는 E사의 폴리칼본산계와 음이온계 AE제를 사용하였으며, 폭발 방지용 섬유로써 PP섬유(직경:0.04mm, 길이:19mm, 밀도:0.9kg/m<sup>3</sup>)는 국내 S사 제품을 사용하였다.

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로써 콘크리트의 혼합은 강제식 팬타입 믹서를 사용하였다. 굳지않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프플로우는 KS F 2594, 공기량은 KS F 2421의 규정에 의거 실시하였다. 경화 콘크리트의 실험으로 압축강도는 Ø100×200mm

공시체를 제작하여, 계획된 재령에서 KS F 2405 규정에 의거 실시하였고, 내화시험은 제작된 공시체를 한국건설기술연구원의 바닥용가열로 내에 설치한 후 KS F 2257-1에서 규정한 표준가열곡선에 의거하여 1시간 동안 비가력 조건으로 실시하였다. 또한, 내화시험 후 공시체의 폭발여부는 육안으로 관찰하였고, 폭발등급은 폭발발생 정도에 따라 질량감소율을 기준으로 비폭렬~1/4 폭렬-1등급, 1/4~2/4 폭렬-2등급, 2/4~3/4 폭렬-3등급, 3/4~4/4 폭렬-4등급 등 총 4개의 등급으로 분류하여 조사하였으며, 잔존압축강도는 폭발등급이 2급 이하인 시험체에 대하여 가열전의 시험체와 비교하여 평가하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지않은 콘크리트의 특성

3.1.1 유동성

그림 1은 혼화재 종류 별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 슬럼프플로우를 나타낸 것이다.

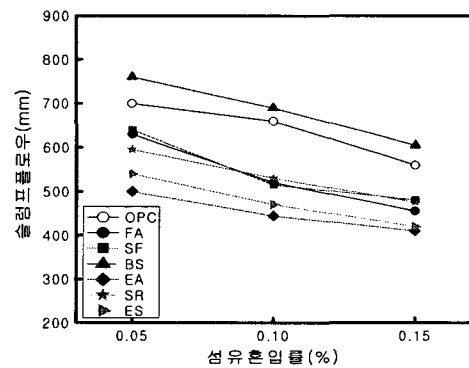


그림 1. PP섬유 혼입률 변화에 따른 슬럼프플로우

표 2. 플레인 콘크리트 배합

W/B (%)	단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )	S/a (%)	AE제 (%)	SP제 (%)	질량배합 (kg/m <sup>3</sup> )				
					C	FA	SF	S	G
25	160	45	0.04	1.3	640	0	0	660	810

전반적으로 섬유혼입률이 증가할수록 슬럼프플로우는 감소하는 경향을 나타내었고, 혼화재 치환에 따라서는 먼저, 고로슬래그 미분말 30%를 치환한 경우 플레인보다 유동성이 약 6% 높은 것으로 나타났고, 실리카 폼 30%, 플라이애시 30%와 수축저감제 1%를 각각 치환한 경우는 모두 유사한 경향으로 OPC 보다는 유동성이 저하하였는데, 이는 실리카 폼의 경우 초미립자로 인한 비표면적의 증가로 점성이 커져 유동성 저하한 것으로 분석되고, 플라이애시는 밀도가 작기 때문에 상대적으로 혼입되는 부피가 증가하여 보다 많은 수분흡착 작용에 기인한 결과로 판단되어지며, 수축저감제를 첨가한 것은 수축저감제의 점성저하 작용에 기인한 것으로 분석된다. 또한, 팽창재 5%로 치환한 경우는 다른 혼화재를 치환한 경우 보다 낮은 유동성을 보였고, 팽창재와 수축저감제를 각각 5%와 1%씩 치환하여 복합 사용한 경우는 각각의 결과의 중간정도인 유동성을 나타내었다.

### 3.1.2 공기량

그림 2는 혼화재 종류별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 공기량을 나타낸 그래프이다.

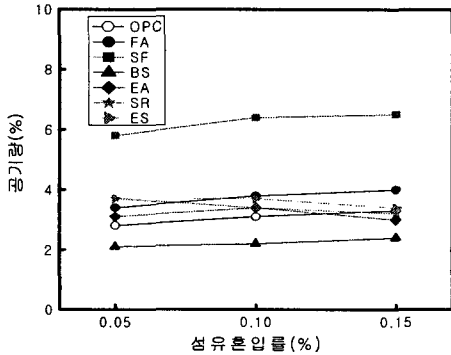


그림 2. PP섬유 혼입률 변화에 따른 공기량

혼화재 종류별 변화에 따른 결과로서, 실리카 폼 30% 치환한 경우 약 6%의 공기량인 것을 제외하고는 모두 2~4%의 범위 내에서 유사한 경향을 나타내었다.

## 3.2 경화 콘크리트의 특성

### 3.2.1 압축 강도

그림 3은 혼화재 종류별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 재령 28일 압축강도를 나타낸 것이다.

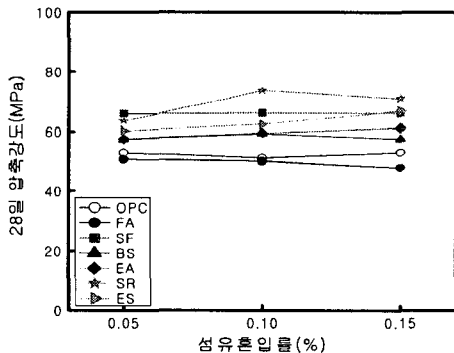


그림 3. PP섬유 혼입률 변화에 따른 28일 압축강도

플레인의 경우 재령 28일 압축강도는 50MPa 이상으로 고강도 범위를 나타내었고, 혼화재 종류에 따라서는 수축저감제 1%를 치환한 경우 약 70MPa로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 실리카 폼이 약 66MPa, 팽창재와 수축저감제를 동시에 치환한 경우 약 62MPa, 팽창재 약 61MPa, 고로슬래그 미분말 약 59MPa 그리고 플라이애시 약 50MPa 순으로 강도가 발현 되었다. 섬유혼입률의 증가에 따라서는 큰 차이를 보이지 않았다.

### 3.2.2 인장 강도

그림 4는 혼화재 종류별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 재령 28일 인장강도를 나타낸 것이다.

인장강도는 섬유혼입률이 증가할수록 약간 증가하는 경향을 나타내었지만 큰 차이를 보이지 않았고, 플레인 및 혼화재 종류별 변화에 따라서는 4~6MPa 범위 안에서 큰 차이를 보이지 않았다.

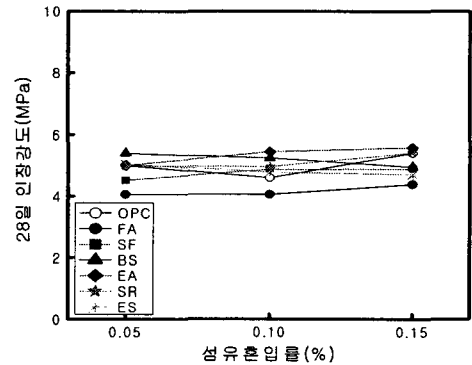


그림 4. PP섬유 혼입률 변화에 따른 28일 인장강도

## 3.3 폭발 특성

사진 1은 1시간 동안 비가력 내화시험 후 혼화재 종류별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 폭발성상 및 폭발등급을 나타낸 것이다.

먼저 플레인과 플라이애시 30%, 고로슬래그 30%, 팽창제 5%를 사용한 경우에는 섬유혼입률 0.05% 이상에서 폭발이 방지되는 것으로 나타났고, 수축저감제 1% 및 팽창제 5%와 수축저감제 1%를 동시에 사용한 경우는 PP섬유 혼입률 0.05%에서 표면부에 박리 현상이 발생하였는데, 이는 수축저감제의 모세관 장력 완화 작용으로 인해 강도가 저하됨에 따라 발생한 것으로 사료된다.4) 하지만 섬유 혼입률이 증가함에 따라 폭발발생이 방지됨을 알 수 있었다. 실리카 폼 30%는 섬유 혼입률 0.05%의 경우 내화시험 후 질량 감소율이 87%로 4등급의 폭발이 발생하였고, 섬유 혼입률 0.10%에서도 실리카 폼 30%는 질량감소율 44%로 3등급의 폭발이 발생하였다. 섬유혼입률 0.15%에서도 실리카 폼 30%는 3등급으로 폭발에 취약한 것을 알 수 있다. 이는 다른 종류의 혼화재료보다 실리카 폼 자체의 고유한 재료적 특성으로 높은 분말도에 기인하여 콘크리트 조직을 매우 밀실하게 형성함에 기인된 것으로 분석된다.

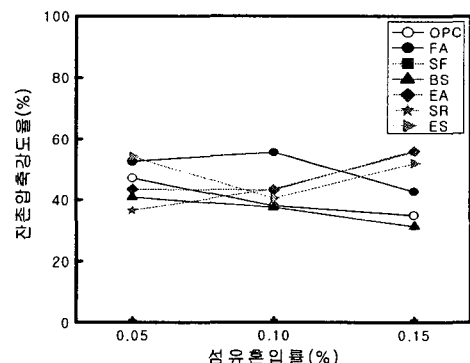


그림 5. PP섬유 혼입률 변화에 따른 잔존압축강도율

그림 5는 내화시험 후의 잔존압축강도율을 나타낸 그래프이다.

먼저, 혼화재 종류 변화에 따른 잔존압축강도율은 팽창제 5%, 수축저감제 1% 및 팽창제 5%와 수축저감제 1%를 동시에 사용한 경우 섬유 혼입률이 증가 할수록 증가하였고, 플라이애시 30%와 고로슬래그 미분말 30%는 섬유 혼입률이 증가 할수

구분	OPC			FA(30%)			SF(30%)			BS(30%)			EA(5%)			SR(1%)			EA(5%)+SR(1%)		
섬유 혼입률 0.05%																					
	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	4등급	4등급	3등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급
섬유 혼입률 0.10%																					
	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	3등급	3등급	3등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급
섬유 혼입률 0.15%																					
	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	3등급	3등급	3등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급	1등급

사진 1. 혼화재 종류별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 폭발 성상

폭 감소하는 경향이 나타났으며, 실리카 폼 30%의 경우는 섬유 혼입률에 상관없이 0으로 제일 작게 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 혼화재 종류 및 섬유혼입률 변화에 따른 고강도 콘크리트의 내화 특성에 대하여 검토하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 굳지않은 콘크리트의 특성으로, 섬유 혼입률이 증가할수록 유동성은 감소하였고, 공기량은 다소 증가하는 경향이였다.
- 2) 경화 콘크리트의 특성으로, 재령 28일 압축강도는 50~70MPa 정도로 고강도가 나타났고, 섬유 혼입률 변화에 따라서 큰 차이를 보이지 않았다. 혼화재 종류에 따라서는 수축저감제(약 70MPa), 실리카 폼(약 66MPa), 팽창재와 수축저감제 복합사용한 경우(약 63MPa), 팽창재(약 59MPa), 고로슬래그 미분말(약 58MPa) 및 플라이애시(약 50MPa)의 순으로 강도가 크게 발현되었다.
- 3) 내화시험 후 폭발특성으로 OPC, FA 30%, BS 30% 및 EA 5%인 경우 PP섬유를 0.05% 이상 혼입하면 모두 폭발이 방지되었고, SR 1% 및 EA 5%와 SR 1%를 동시에 사용한 경우는 PP섬유 0.1%에서 폭발이 방지되었지만, SF 30%의 경우 모든 조건에서 폭발이 발생하였다.

이상을 종합해 보면 FA 30%, BS 30%, EA 5%에서는 폭발방지에 가장 우수한 것으로 나타났고, 이러한 실험 결과는 향후 고강도콘크리트의 폭발방지 공법 개발에 중요한 참고자료가 될 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 '콘크리트 코리아 연구단'에서 주관하여 시행한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업 「05-CCT-D11, 고성능·다기능 콘크리트의 개발 및 활용기술」 지원으로 수행되었으며, 이에 감사한다.

#### 참 고 문 헌

1. 이병열; 화재시 고성능 콘크리트의 폭발방지에 관한 연구, 청주대학교 박사학위논문, 2001. 12
2. 황인성; 화재시 고성능 콘크리트의 폭발에 미치는 재료 및 배합요인의 영향, 청주대학교 석사학위논문, 1999. 12
3. 한천구, 양성환, 이병열, 황인성; 골재종류 및 폴리프로필렌 섬유 혼입률 변화에 따른 고성능 콘크리트의 폭발 특성에 관한 연구, 콘크리트학회 논문집, 제 11권 5호, pp.69-78, 1999. 10
4. 한천구, 송승헌; 수축저감제를 사용한 콘크리트의 물성변화 및 건조수축 저감 특성, 한국건축시공학회지, 제5권 제3호, pp.101-107, 2005. 9