

# 3성분계 포졸란재를 이용한 반응성 분체 콘크리트(RPC)의 고온특성

## The mechanical properties of Reactive Powder Concrete using Ternary Pozzolan Materials exposed to high Temperature

<b>장칩도르지*</b>	<b>소형석**</b>	<b>이제방***</b>	<b>소승영****</b>
Janchivdorj Khulgadai	So, Hyoung-Seok	Yi, Je-Bang	So, Seung-Young

### Abstract

Reactive Powder Concrete (RPC) is an ultra high strength and high ductility cement-based composite material and has shown some promise as a new generation concrete in construction field. It is characterized by a silica fume-cement mixture with very low water-binder (w/b) ratio and very dense microstructure, which is formed using various powders such as cement, silica fume and very fine quartz sand (0.15~0.4mm) instead of ordinary coarse aggregate. However, the unit weight of cement in RPC is as high as 900~1,000 kg/m<sup>3</sup> due to the use of very fine sand instead of coarse aggregate, and a large volume of relatively expensive silica fume as a high reactivity pozzolan is also used, which is not produced in Korea and thus must be imported. Since the density of RPC has a heavy weight at 2.5~3.0 g/cm<sup>3</sup>. In this study, the modified RPC was made by the combination of ternary pozzolan materials such as blast furnace slag and fly ash, silica fume in order to economically and practically feasible for Korea's situation. The fire resistance and structural behavior of the modified RPC exposed to high temperature were investigated.

키워드 : 반응성 분체 콘크리트, 3성분계 포졸란재, 잔존강도, 미세구조, 고온  
 Keywords : reactive powder concrete, ternary pozzolan materials, residual strength, microstructure, high temperature

## 1. 서론

초고강도 및 고인성 콘크리트인 반응성 분체 콘크리트(RPC: Reactive Powder Concrete)는 굵은 골재 대신 미세석영(0.5mm 이하)을 사용함에 따라 단위시멘트량이 900~1000kg/m<sup>3</sup>으로 매우 높고 포졸란 반응성 분체로서 국내에서는 전량 수입에 의존하고 있는 상대적으로 고가인 실리카흄(silica fume)을 다량 사용할 뿐 아니라 밀도도 2.5~3.0g/cm<sup>3</sup>로 매우 중량이기 때문에 이들에 대한 개선이 요구되며, 특히 국내 실정에 적절한 보다 실용적이고 경제적인 RPC의 개발에 관한 다양한 연구가 필요하지만, 아직까지 매우 미진한 실정이다. 이에 본 연구에서는 기존 RPC의 성능 범위 내에서 단위시멘트량과 밀도의 감소 그리고 실리카흄의 대체재로서 고로슬래그분말이나 플라이애쉬의 사용 가능성 등을 검토하기 위하여 3성분계 포졸란재(고로슬래그, 플라이애쉬, 실리카흄)를 혼합사용한 RPC를 제작하고 이들의 내화성능 및 고온에서의 역학적 특성, 미세구조의 변화 등을 살펴보았다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 사용재료

시멘트는 KS L 5201에 규정된 H사의 보통포틀랜드시멘트(OPC)를 사용하였으며, 3성분계 포졸란재로는 네덜란드산 실리카흄(SF)과 광양제철소산 고로슬래그분말(BS), 충남 보령산 플라이애쉬(FA)가 각각 사용되었다. 골재는 입경 0.3~0.5mm 및 입경 0.15~0.3mm인 국내산 규사(quartz sand)를 혼합 사용하였고, 충전제로서 평균입경 약 45 $\mu$ m이고, SiO<sub>2</sub> 함량이 92%이상인 국내산 규사미분(quartz powder)을 사용하였다. 고성능감수제는 일본 M사의 폴리카르보산계로서 밀도 1.05g/cm<sup>3</sup>, 고형분 28%의 연갈색 액상상태로 사용하였다. 강섬유는 국내 S사의 직경 0.5mm, 길이 30mm, 밀도 7.8, 인장강도 1,195MPa 수준인 고탄성용 강섬유를 사용하였고, 폭열제어 및 내화성 향상을 위해 직경 0.04mm, 길이 19mm, 밀도 0.91g/cm<sup>3</sup>, 융해점160 $^{\circ}$ C, 인장강도 560MPa인 폴리프로필렌(PP)섬유를 사용하였다.

\* 전북대학교 건축공학과 박사과정  
 \*\* 서남대학교 건축공학과 교수, 공학박사  
 \*\*\* 전북대학교 건축공학과 교수, 공학박사  
 \*\*\*\* 전북대학교 건축공학과 교수, 공학박사

## 2.2 공시체의 제작 및 양생

본 연구에서는 기존 RPC의 기본배합에 기초하여 실리카흙, 고로슬래그분말, 플라이애쉬 등의 3성분계 포졸란재를 시멘트의 중량비로 0~65%까지 단독 혹은 혼합사용하여 RPC를 제작하고, 내화성 시험을 통해 고온에서의 구조적 거동 및 미세구조 변화특성을 고찰함으로써 3성분계 포졸란재를 이용한 RPC의 개발 가능성을 검토하고자 하였다. RPC제작된 RPC의 배합은 표 1과 같다. 양생방법은 성형 후 항온항습실(20±2℃, RH 60±5%)에서 1일(24hr)간 존치하여 탈형하고, 72시간동안 90℃ 열수양생 (승온속도 49℃/hr) 양생하여 항온항습실에서 시험전까지 기건양생하였다.

표 1. 3성분계 포졸란재를 혼합한 RPC의 배합표

Mix	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )											W/B	Table flow*(mm)
	Cement	Silica fume	Blast furnace slag	Fly ash	0.3~0.5mm Quartz	0.15~0.3mm Quartz	0~45 $\mu$ m Quartz powder	Steel fiber	PP fiber	Superplasticizer	Water		
SF25	868	217	-	-	582	174	174	243	9	52	165	0.19	145
SF25BS40	773	193	309	-	502	155	155	216	8	46	147	0.14	135
SF25BS30FA10	766	192	230	77	504	153	153	215	8	46	146	0.14	136
SF25BS10FA30	752	188	75	226	513	150	150	211	8	45	143	0.14	135

## 2.3 시험방법

내화성 시험은 열수양생(90℃)된 재령 4일 공시체를 대상으로 전기로(electric furnace)를 이용하여 6단계 목표온도(200℃, 400℃, 500℃, 600℃, 800℃, 1000℃)에서 2시간 동안 유지(공시체에 균일한 온도유지)한 후 자연냉각하는 방법으로 수행하였으며, 이때 가열 속도는 6.7℃/분이었다. 내화성 시험 후 각 공시체들의 가열온도에 따른 압축 및 휨강도 특성은 KS F 2477에 준하여 40×40×160mm 시편을 이용하여 측정되었고 내화시험 전 강도특성과 비교·분석되었다. 이때 휨강도는 중앙점재하방법으로 측정하였다. 또한 실험변수 및 가열온도에 따른 각 공시체들의 미세구조 특성을 살펴보기 위해 수은압입포로시메타(MIP)에 의한 공극구조의 특성과 함께 X선 회절 분석기(XRD) 및 전계방출 주사전자현미경(SEM)에 의한 수화물의 분석을 실시하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 고온에 노출된 3성분계 포졸란재 혼입 RPC의 강도 특성

그림 1 및 2는 가열온도에 각 RPC의 압축 및 휨강도 특성을 나타낸 것이다. 그림 1과 같이 고온에 노출된 3성분계 포졸란재 혼입 RPC는 SF25BS40의 경우 내화시험 전 197MPa의 압축강도가 가열온도 200℃에서 214MPa, 400℃에서 270MPa까지 증대되었고 이후 800℃까지 급격히 저하되어 68MPa수준을 유지하였다. 그러나 실리카흙만 단독으로 혼입한 SF25의 압축강도는 가열온도 200℃까지 약간 증가한 이후 가열온도가 높아짐에 따라 크게 감소하고 있으며 800℃이후 40MPa이하 수준으로 감소하였다. 그리고 1000℃에 노출된 3성분계 포졸란재 혼입 RPC의 잔존압축강도는 62~66MPa수준으로 실리카흙만 단독으로 혼입한 SF25의 35MPa수준보다 높게 나타났다. 그림 2에서 보는바와 같이 가열온도에 따른 RPC의 휨강도 특성도 압축강도 결과와 유사하게 나타났으며, 1000℃에 노출된 3성분계 포졸란재 혼입 RPC의 잔존휨강도도 실리카흙만 단독으로 혼입한 SF25 보다 높게 나타났다.

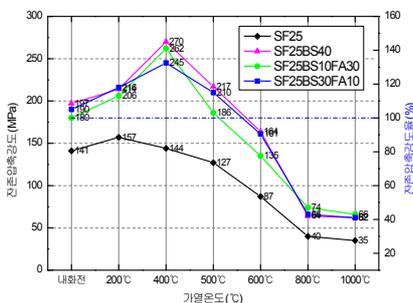


그림 1. 가열온도에 따른 RPC의 압축강도 특성

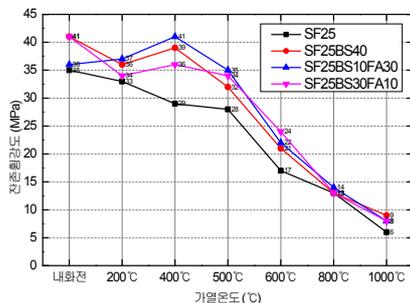


그림 2. 가열온도에 따른 RPC의 휨강도 특성

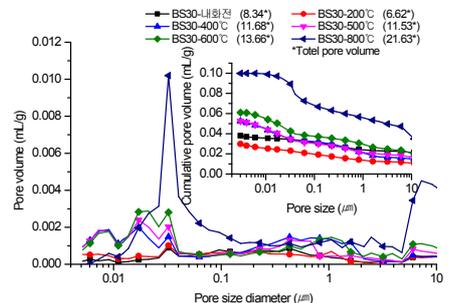


그림 3. SF25BS30FA10 공시체의 가열온도에 따른 공극구조 변화 특성(\*는 전체공용적)

한편, 내화시험에서 RPC의 폭발현상은 모든 공시체에서 나타나지 않았는데, 이는 강섬유와 폴리프로필렌섬유의 혼합사용에 따른 억제 효과에 기인된 결과로 판단되며, 폴리프로필렌섬유 혼입율에 따른 RPC의 내화특성 고찰에 관한 예비실험에 따르면, RPC의 폭발제어를 위한 폴리프로필렌섬유의 혼입율은 8 kg/m<sup>3</sup> 이상이다.<sup>1)</sup>

### 3.2 가열온도에 따른 RPC의 미세구조 특성

그림 3에 나타난 바와 같이 3성분계 포졸란재 혼입 RPC(SF25BS30FA10)의 세공경 분포특성은 가열온도가 높아짐에 따라 0.01~0.05 $\mu$ m 크기의 공극경에서 크게 증가되고 있으며, 800 $^{\circ}$ C 이후 급격히 증가되고 있다. 때문에 전세공용적(total pore volume)도 내화전 8.34%에서 21.63%로 약 2.6배 증가되었다. 이는 800 $^{\circ}$ C 이후의 급격한 강도저하 결과를 잘 설명해주는 결과이다.

그림 4 및 5는 가열온도에 따른 3성분계 포졸란재 혼입 RPC(SF25 BS30FA10)의 수화물 변화특성을 분석 및 관찰한 결과이다. 그림 4에서 보는 바와 같이 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)의 결정피크(CH)는 가열온도가 증가됨에 따라 서서히 감소되고 600 $^{\circ}$ C 이후 탈수하여 CaO로 변화함에 따라 800 $^{\circ}$ C에서는 거의 나타나지 않고 있다. 그리고 그림 4 및 5에 나타난 바와 같이 800 $^{\circ}$ C에서는 생성된 토버모라이트(tobermorite)와  $\alpha$ -C<sub>2</sub>S겔이 붕괴되면서 공극량이 증가되고 Calcium magnesium silicate (Ca<sub>2</sub>MgSi<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)와 Wollastonite(CaSiO<sub>3</sub>)의 생성으로 팽창에 의한 미세균열이 발생되며 이는 RPC 공시체의 잔존강도 저하로 이어진다고 생각된다.

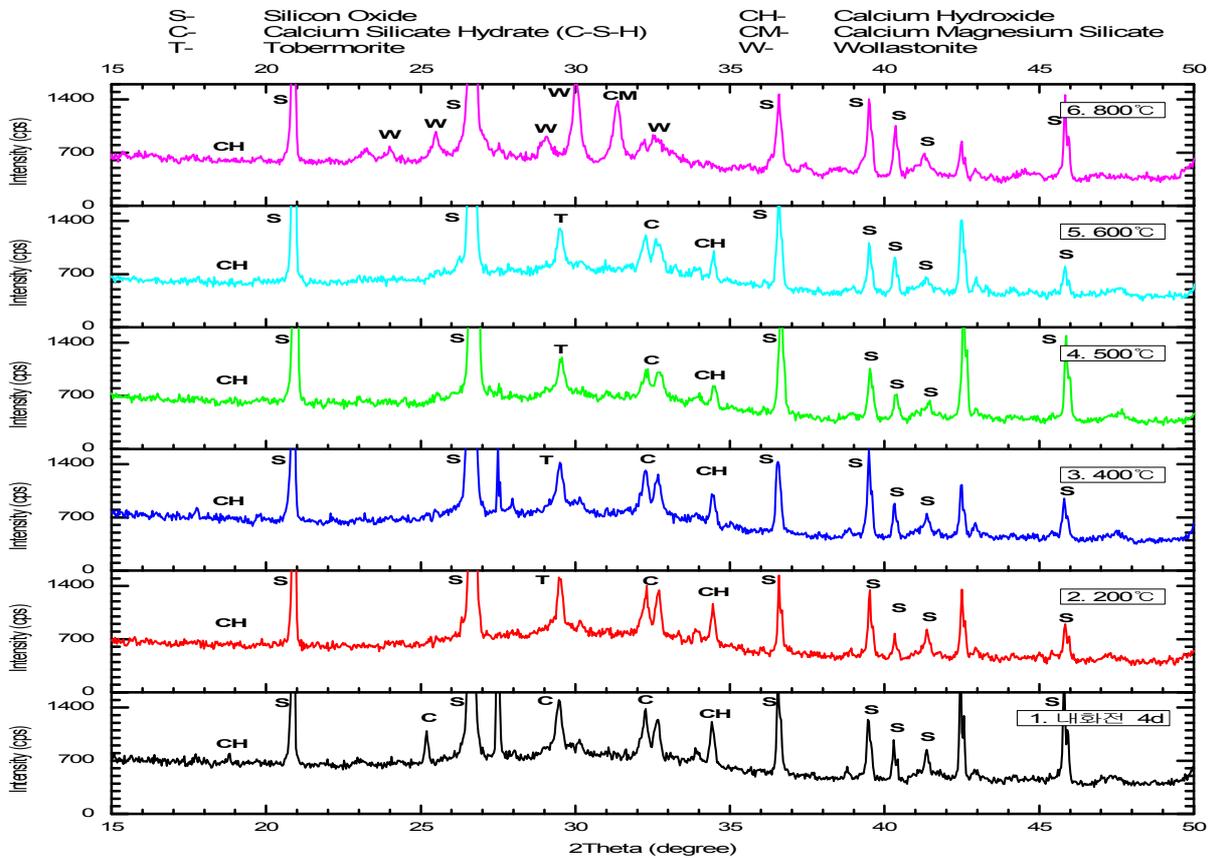


그림 4. SF25BS30FA10 공시체의 가열온도에 따른 XRD 분석 결과

## 4. 결론

- 1) 내화시험 후 조사된 3성분계 포졸란재 혼입 RPC의 잔존강도특성은 실리카흄만 단독으로 사용한 SF25에 비해 높게 나타나 내화성능이 우수한 것으로 조사되었다.
- 2) 가열온도가 증가됨에 따른 RPC의 공극구조는 0.01~0.05 $\mu$ m의 공극경에서 가장 큰 변화를 보였으며, 800 $^{\circ}$ C 이후 급격히 증가되어 전세공용적이 내화전 8.34%에서 21.63%로 약 2.6배 증가되었다. 이는 800 $^{\circ}$ C 이후의 급격한 강도저하 결과를 잘 설명해준다.
- 3) 가열온도의 증가에 따른 RPC의 강도저하 특성은 XRD 분석 및 SEM관찰에 의한 수화생성물(Ca(OH)<sub>2</sub>, 토버모라이트(tobermorite),  $\alpha$ -C<sub>2</sub>S겔의 분해 등) 변화로부터 확인할 수 있었다.

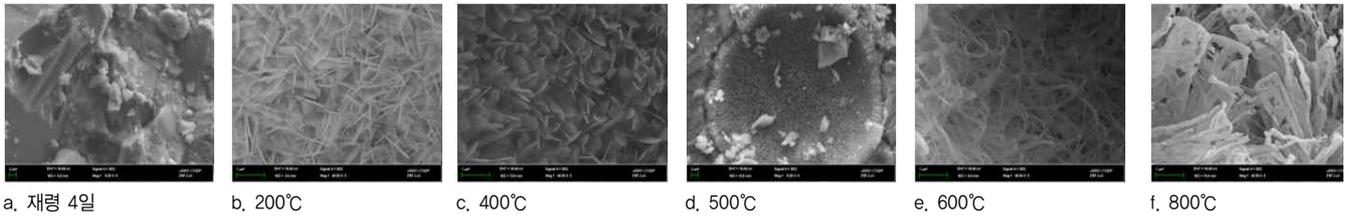


그림 5. SF25BS30FA10 공시체의 가열온도에 따른 SEM 사진

### Acknowledgement

This research was supported by a grant(2012-R1A1A200-8719) from the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MEST)

### 참 고 문 헌

1. 이제방, 메타카올린을 혼입한 반응성 분체 콘크리트(RPC)의 내화특성 전북대학교 박사학위논문, 2012
2. Richard, P. and Cheyrezy, M. H., Reactive powder concrete with high ductility and 200-800 MPa compressive strength, ACI Spring Convention, San Francisco, SP. 144-24, pp.507~517, 1994
3. Wenzhong Zheng, Haiyan Li, Ying Wang "Compressive behaviour of hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete after high temperature" Materials & Design, 41, pp.403~409, 2012,10