



## 배합 및 양생조건이 3성분계 포졸란재를 이용한 RPC의 강도발현 특성에 미치는 영향

장침도르지<sup>1)</sup> · 최승훈<sup>2)</sup> · 소형석<sup>3)</sup> · 서기석<sup>4)</sup> · 소승영<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> 전북대학교 건축공학과 <sup>2)</sup> 서남대학교 환경화학공학과 <sup>3)</sup> 서남대학교 건축공학과 <sup>4)</sup> 한국원자력연구원 핵주기시스템공학부

## Influence of Mixtures and Curing Conditions on Strength and Microstructure of Reactive Powder Concrete Using Ternary Pozzolanic Materials

Khulgadai Janchivdorj,<sup>1)</sup> Seung-Hoon Choi,<sup>2)</sup> Hyoung-Seok So,<sup>3)</sup> Ki-Seog Seo,<sup>4)</sup> and Seung-Young So<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Environmental Chemical Engineering, Seonam University, Namwoni 590-711, Korea

<sup>3)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Seonam University, Namwon 590-711, Korea

<sup>4)</sup>Nuclear Fuel Cycle Waste Treatment Division, KAERI, Daejeon 305-353, Korea

**ABSTRACT** This study discussed the influence of mixtures and curing conditions on the development of strength and microstructure of RPC using ternary pozzolanic materials. Through pilot experiment, various RPC was manufactured by adding single or mixed ternary pozzolanic materials such as silica fume, blast furnace slag and fly ash by mass of cement, up to 0~65%, and cured by using 4 types of method which are water and air-dried curing at 20°C, steam and hot-water curing at 90°C. The results show that the use of ternary pozzolanic materials and a suitable curing method are an effective method for improving development of strength and microstructure of RPC. The unit volume of cement was greatly reduced in RPC with ternary pozzolanic materials and unlike hydration reaction in cement, the pozzolanic reaction noticeably contributes to a reduction in hydration heat and dry shrinkage. A considerable improvement was found in the flexural strength of RPC using ternary pozzolanic materials, and then the utilization of a structural member subjected to bending was expected. The X-ray diffractometer (XRD) analysis and Scanning Electronic Microscope (SEM) revealed that the microstructure of RPC was denser by using the ternary pozzolanic materials than the original RPC containing silica fume only.

**Keywords** : reactive powder concrete, ternary pozzolanic material, strength, microstructure, curing condition

### 1. 서 론

1990년대 초 Richard 등은 초고강도 콘크리트에 금속 섬유를 혼입하여 고인성(high ductility)을 부여한 압축강도 800 MPa급의 초고강도·고인성 재료에 대해 보고하였으며, 이것은 포졸란 반응성 분체를 이용한 점으로부터 Reactive Powder Concrete(반응성 분체 콘크리트, 이하 RPC라 함)라 명명되었다.<sup>1)</sup> RPC는 종래의 보통콘크리트와는 달리 굵은 골재 대신 미세석영(0.5 mm이하)을 사용함으로써 골재와 시멘트 페이스트의 계면영역을 크게 축

소시키고 시멘트와 초미립자인 실리카폼의 적절한 혼합, 그리고 극히 낮은 물-시멘트비(w/c=0.2 이하)를 통해 시멘트 경화체내 공극을 감소시켜 매트릭스(matrix)의 압축강도를 크게 향상시켰을 뿐 아니라 고성능감수제와 섬유의 혼입을 통해 고유동성 및 고인성까지 확보한 복합재료이다.<sup>2)</sup> RPC는 고온양생(250~400°C) 및 프레스 성형(가압력: 50 MPa)으로 제조된 RPC 800(압축강도 650~810 MPa)과 실용성을 고려하여 상온(20°C) 혹은 증기양생(90°C)으로 제조된 RPC 200(압축강도 170~230 MPa)으로 개발되었으며, 월등히 뛰어난 기계적 성능으로부터 일반 건설구조물의 구조재료로서 뿐 아니라 저수조나 케이싱, 농업용 폐기물 혹은 핵폐기물 저장시설 등 각종 특수구조물에 이르기까지 광범위하게 활용될 수 있을 것으로 기대되고 있다. 그러나 RPC는 굵은 골재 대신 0.5 mm이하의 미세석영을 사용함에 따라 단위시멘트량이 약 850~1000 kg/m<sup>3</sup>로 기존

\*Corresponding author E-mail : archiso@moak.chonbuk.ac.kr

Received February 25, 2013, Revised April 6, 2013,

Accepted April 25, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

고강도 및 고성능 콘크리트와 비교하여 매우 높으며, 다른 혼화재료에 비해 상대적으로 고가인 실리카푼(silica fume)을 시멘트 중량비(SF/C)로 약 25%정도 사용하고 있고, 밀도도 2.5~3.0 t/m<sup>3</sup>로 보통콘크리트에 비해 매우 중량이라는 문제점이 있다.<sup>3)</sup> 이에 RPC에 대한 최근의 연구들은 초기 RPC의 기본개념에 기초하여 물성 및 기계적 성능의 향상뿐 아니라 경제성, 실용성 등 다양한 측면에서 RPC를 개량하고자 많은 시도가 이루어지고 있다. Colleparidi et al.<sup>4)</sup>는 10 mm이하의 조골재를 사용하여 개량한 실용적인 RPC의 강도특성에 대해 보고하였으며, Abouzar<sup>5)</sup>는 실리카푼의 혼입률 증가(SF/C=35~80%)와 고온고압양생 방법에 의한 RPC의 저밀도 방안에 대해 연구하였다. 특히 2005년 이후 고로슬래그나 플라이애쉬와 같은 다양한 광물질 혼화재들을 혼입시킨 RPC에 대한 연구들이 다수 이루어지고 있으며, 이들 혼화재와 실리카푼의 혼합사용이 RPC의 미세구조 및 강도개선에 효과적이라는 보고들이 있다.<sup>6)</sup> Langan 등<sup>7)</sup>은 플라이애쉬나 고로슬래그 미분말을 실리카푼과 함께 사용하는 경우 포졸란 반응이 더욱 활성화 되면서 큰 공극이 감소되고 내부구조가 더욱 치밀해져 강도 및 내구성이 크게 향상된다고 보고하였다. 그러나 포졸란재를 혼합사용하는 경우 실리카푼만을 단독으로 사용한 경우보다 양생온도와 조건에 더욱 민감하다고 지적하고 있다.<sup>8-10)</sup>

이에 이 연구에서는 시멘트의 일부를 플라이애쉬와 고로슬래그미분말로 치환하여 기존 RPC의 단위시멘트량을 크게 감소시키는 한편 실리카푼과의 혼합사용으로 포졸란반응을 더욱 활성화시켜 RPC의 미세구조 및 각종 성능을 개선하고자 하였고, 동시에 양생온도 및 조건이 3성분계 포졸란재 혼입 RPC의 강도발현 및 미세구조에 미치는 영향을 검토하고자 하였다. 특히 한국에서는 생산되지 않고 전량 수입에 의존하고 있으며, 다른 포졸란 재료에 비해 상대적으로 고가인 실리카푼의 대체재로서 플라이애쉬 및 고로슬래그미분말의 사용성도 검토하여 국내 실정에 맞는 경제적이고 실용성 및 활용성이 높은 RPC 개발에 관한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험개요

이 연구는 국내 실정에 맞는 실용적인 RPC의 개발에 관한 기초적 연구로서 기존 RPC의 기본배합에 기초하여 예비실험을 통해 3성분계 포졸란재를 혼합사용한 RPC를 제작하고 양생방법에 따른 이들의 강도발현 특성을 수화생성물 및 공극구조 특성과 함께 고찰하였다. 이 연구의 실험인자 및 수준은 Table 1과 같다.

## 2.2 사용재료

### 2.2.1 결합재(binder)

시멘트는 KS L 5201에 규정된 H사의 보통포틀랜드시멘트(OPC)를 사용하였으며, 3성분계 포졸란재로는 네덜란드산 실리카푼(SF)과 광양제철소산 고로슬래그 미분말 3중(BFS), 충남 보령산 플라이애쉬(FA)를 각각 사용하였다. 그 물리적·화학적 특성은 Table 2와 같다.

### 2.2.2 골재(aggregate)

골재는 입경 0.3~0.5 mm와 0.15~0.3 mm인 국내산 규사(quartz sand)를 혼합 사용하였다. 규사의 밀도는 2.65 g/cm<sup>3</sup>, SiO<sub>2</sub>함량은 82%이상이었다.

### 2.2.3 충전재(filler)

충전재는 평균입경이 약 45 μm이고 밀도가 2.65 g/cm<sup>3</sup>, SiO<sub>2</sub>함량이 92%이상인 국내산 규사미분(quartz powder)을 사용하였다.

Table 1 Experimental factors and levels in this study

Experimental factors		Levels		
Mixing conditions	W/B*(%)	14-19		
	Table flow (mm)	130±5		
	SF : BFS : FA** (wt.%by cement)	SF	BFS	FA
		25	0	0
		65	0	0
		25	40	0
25		30	10	
25	10	30		
Curing methods	Water	20±2°C		
	Dry	20±2°C, RH60±5%		
	Steam	90°C	24hr, 72hr, 120hr	
	Hot-water	90°C	24hr, 72hr, 120hr	

\*W/B water/binder ratio

\*\*SF: silica fume, BFS: blast furnace slag, FA: fly ash

Table 2 Chemical and physical properties of binders

Oxide (%)	Cement	SF	BFS	FA
SiO <sub>2</sub>	20.57	94	33.1	53.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.48	0.5	13.76	25.25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.18	2.0	0.85	12.84
CaO	63.03	0.8	40.59	2.61
MgO	3.41	0.9	7.22	1.37
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	0.52	1.0	-	0.06
SO <sub>2</sub>	2.23	0.2	1.65	2.1
Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)	3267	200000	8000	3678
Density (g/cm <sup>3</sup> )	3.15	2.2	2.88	2.21

### 2.2.4 고성능감수제(superplasticizer)

고성능감수제는 초고강도용으로 개발된 일본 M사의 폴리카르본산계로서 밀도 1.05 g/cm<sup>3</sup>, 고형분 28%의 연갈색 액상상태로 사용하였다.

### 2.2.5 강섬유(steel fiber)

강섬유는 국내 S사의 직경 0.5 mm, 길이 30 mm, 밀도 7.8 g/cm<sup>3</sup>, 인장강도 1195 MPa 수준인 고탄성용 강섬유를 사용하였다.

## 2.3 공시체의 제작 및 양생

### 2.3.1 공시체의 제작

이 연구에서 3성분계 포졸란재를 이용한 RPC는 기존 RPC의 기본배합에 기초하여 예비실험을 통해 제작되었으며, 그 배합 결과는 Table 3과 같다. Table 3에서 SF25 type은 기존 RPC의 기본배합으로 실리카퍽을 시멘트의 질량비로 25%(SF/C=25%) 혼입한 배합이며, 3성분계 포졸란재를 이용한 RPC들의 강도 및 미세구조 특성과 비교·분석하기 위해 제작되었다. 그리고 3성분계 포졸란재를 이용한 RPC의 배합은 실리카퍽과 고로슬래그분말, 플라이애쉬를 2성분 혹은 3성분으로 혼합사용하고 그 혼입율을 시멘트에 대한 질량비로 0~65%까지 변화시킴으로써 각 구성재료들의 최밀 충전 및 매트릭스의 치밀성을 더욱 향상시키고자 하였다. Table 3에서 보는 바와 같이

3성분계 포졸란재 혼입 RPC의 단위시멘트량과 실리카퍽 혼입량은 기존 RPC 배합(SF25)에 비해 상대적으로 크게 감소되었다.

모든 공시체는 강제식 혼합믹서(10 L)를 이용하여 혼합하였고 결합재(시멘트, 실리카퍽, 고로슬래그분말, 플라이애쉬)와 규사미분(입경 45 μm)을 5분간 건비빔한 후 잔골재(규사)를 넣고 다시 5분간 건비빔, 그리고 건비빔 모르타르에 배합수, 강섬유, 고성능감수제를 첨가한 후 5분간 혼합하여 총 15분간 제작되었다. 각 공시체의 목표 테이블 플로우 값은 130±5 mm였으며, 이를 위해 고성능감수제를 결합재에 대한 질량비로 각각 3.0~3.6%까지 첨가하였다.

### 2.3.2 양생방법

이 연구에서 계획한 양생방법은 Table 1에 나타난 바와 같이 모두 4가지였다.

양생방법 I은 상온(20°C) 수중양생으로 공시체를 성형하여 항온항습실(20±2°C, RH 60±5%)에서 1일(24hr)간 존치한 후 탈형하고 양생수조(20±2°C)에서 각종 시험 전까지 수중양생하였다. 양생방법 II는 상온(20°C) 기건양생 방법으로 공시체를 성형하여 항온항습실(20±2°C, RH 60±5%)에서 1일(24hr)간 존치한 후 탈형하고 항온항습실 내에서 각종 시험 전까지 기건양생하였다. 양생방법 III은 고온(90°C) 증기양생 방법이며, 공시체를 성형 후 항온항습실(20±2°C, RH 60±5%)에서 1일(24hr)간 존치한 후 탈형하여 증기 양생기에 넣고 90°C로 24시간(1일), 72시간(3일), 120시간(5일) 동안 증기양생(승온속도 10°C/hr)한 후 항온항습실내로 옮겨 각종 시험 전까지 기건양생하였다. 양생조건 IV는 고온(90°C) 열수양생 방법이며, 공시체를 성형 후 항온항습실(20±2°C, RH 60±5%)에서 1일(24hr)간 존치한 후 탈형하여 양생수조에 넣고 90°C로 24시간(1일), 72시간(3일), 120시간(5일) 동안 고온양생(승온속도 49°C/hr)한 후 항온항습실 내에서 각종 시험 전까지 기건양생하였다.

Table 3 Mix proportion

Mix.	SF25	SF65	B40	B30F10	B10F30
Cement (kg/m <sup>3</sup> )	868	731	773	766	752
Silica fume (kg/m <sup>3</sup> )	217	475	193	192	188
Blast furnace slag (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	309	230	75
Fly ash (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	77	226
0.3~0.5 mm quartz (kg/m <sup>3</sup> )	608	512	541	536	526
0.15~0.3 mm quartz (kg/m <sup>3</sup> )	174	146	155	153	150
0~45 μm quartz powder (kg/m <sup>3</sup> )	174	146	155	153	150
Steel fiber (kg/m <sup>3</sup> )	243	205	217	215	211
Super-plasticizer (kg/m <sup>3</sup> )	52	44	46	46	45
Water (kg/m <sup>3</sup> )	165	161	147	146	146
Water/binder ratio	0.19	0.16	0.14	0.14	0.14
Table flow* (mm)	140	127	137	138	143

\* Table flow is measured in accordance with KS L 5105.

## 2.4 시험항목 및 방법

### 2.4.1 압축 및 휨강도시험

압축 및 휨강도는 KS F2405와 KS F2566(KS F2408)에 준하여 40×40×160 mm 공시체의 재령에 따른 강도발현 특성을 측정하였으며, 이때 휨강도는 중앙점재하방법으로 측정하였다.

### 2.4.2 쪼갬 인장강도시험

쪼갬 인장강도(splitting tensile strength)는 KS F2423에 준하여 ϕ 100, h=200 mm의 원주공시체를 제작하고 재령에 따른 인장강도발현 특성을 측정하였다.

### 2.4.3 미세구조 분석

실험변수에 따른 각 공시체들의 미세구조 특성을 살펴 보기 위해 수은압입포로시메타(MIP)에 의한 공극구조의 특성과 X선 회절분석기(XRD)에 의한 수화생성물의 분석 및 전자주사현미경(SEM, S-7400) 관찰을 실시하였다. 각 공시체의 공극구조 및 XRD, SEM 분석용 시료는 양생방법 및 재령별 강도 측정용 공시체(40×40×160 mm)로부터 채취하여 파쇄 혹은 미분쇄하고 시료를 아세톤에 침적하여 D-dry처리한 후 측정하였다. 공극구조는 수은압입포로시메타(MIP)를 이용하여 세공반경 0.003~10 μm의 범위 내에서 측정하였으며, 제공된 최대압력은 46793 psi (3290 kgf/cm<sup>2</sup>), 접촉각은 130°, 수은의 표면 인장력은 6.95×10<sup>-5</sup>psi (0.489×10<sup>-5</sup> kgf/cm<sup>2</sup>)였다. 또한 XRD의 Scan speed는 4°/min이었고 회절각의 범위는 15~70°였다.

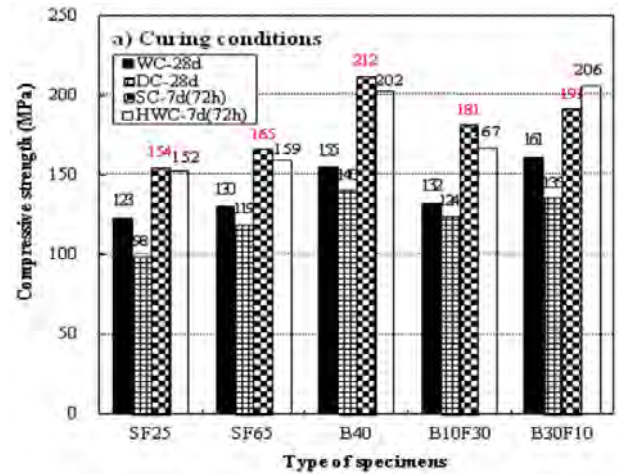
## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 3성분계 포졸란재 혼입 RPC의 강도발현 특성

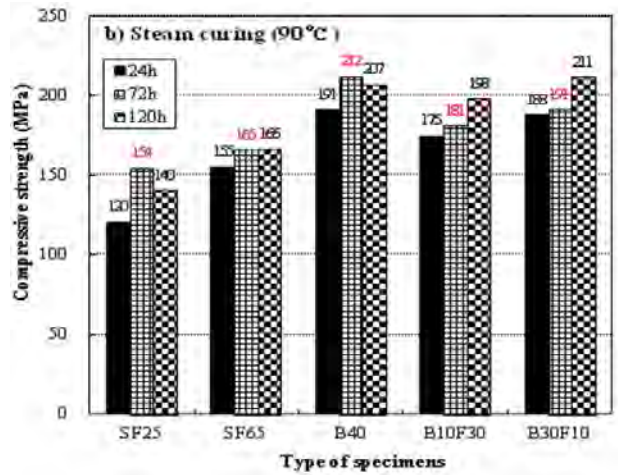
#### 3.1.1 압축강도 특성

Fig. 1은 배합 및 양생방법에 따른 3성분계 포졸란재 혼입 RPC들의 압축강도 특성을 기존 RPC의 기본배합(SF25)과 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 실리카폼(SF)에 고로슬래그분말(BFS)과 플라이애쉬(FA)를 혼합사용한 RPC의 압축강도는 모든 양생방법에서 실리카폼만 단독으로 사용한 SF25 및 SF65에 비해 높게 나타나고 있으며, 특히 고온(90°C)의 증기(steam) 및 열수(hot water)양생 조건에서 압축강도 발현 특성이 월등히 향상됨을 알 수 있었다. 이는 3성분계 포졸란재의 혼합사용에 따른 포졸란반응 활성화효과와 유동성 개선에 따른 SF25, SF65에 비해 낮은 물-결합재비(Table 3 참조) 등에 기인된 결과로 판단된다. 양생방법별로는 증기양생(90°C) > 열수양생(90°C) > 수중양생(20°C) > 기건양생(20°C) 순으로 높은 강도발현 특성을 나타냈으며, 공시체 종류별로는 고로슬래그분말을 다량 혼합사용한 B40 및 B30F10에서 보다 우수한 압축강도 특성을 보였다. 90°C로 72시간 증기양생된 재령 7일 B40과 B30F10의 압축강도는 각각 212 MPa, 191 MPa 수준으로서 실리카폼만 혼입한 SF25 보다 약 1.37배, 1.24배 향상되었으며 이로부터 포졸란재의 혼합사용에 따른 강도개선 효과를 확인 할 수 있었다. 이는 양생온도의 상승에 따른 실리카폼 및 고로슬래그분말, 플라이애쉬내 미수화 실리카(SiO<sub>2</sub>)성분들의 포졸란반응 활성화에 기인된 결과로 판단되며, 각 공시체들의 XRD분석 및 SEM관찰에 의한 수화생성물 분석 그리고 매트릭스(matrix)의 공극구조 변화특성 결과로부터 확인할 수 있었다 (Fig. 4 및 8 참조).

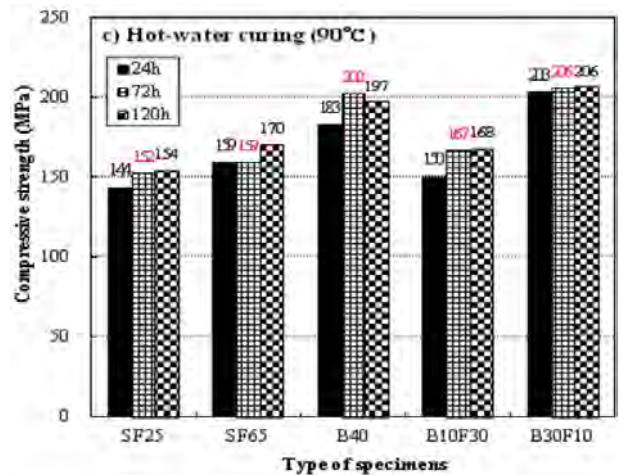
한편, Fig. 1(b)와 (c)는 증기 및 열수양생 시간(24h, 72h, 120h)에 따른 3성분계 포졸란재 혼입 RPC의 재령 7일 압축강도 특성을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와같이 증기 및 열수양생 모두 고로슬래그분말을 다량 혼입한 B40과



(a) Curing conditions



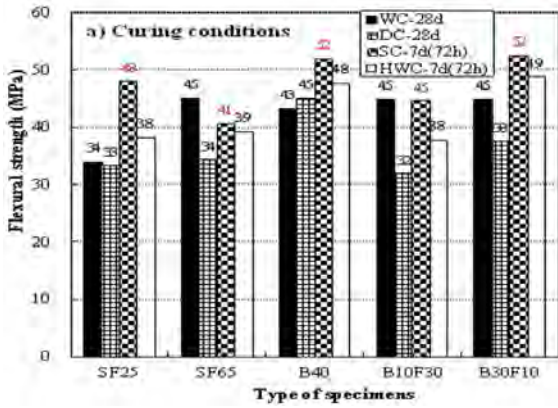
(b) Steam curing



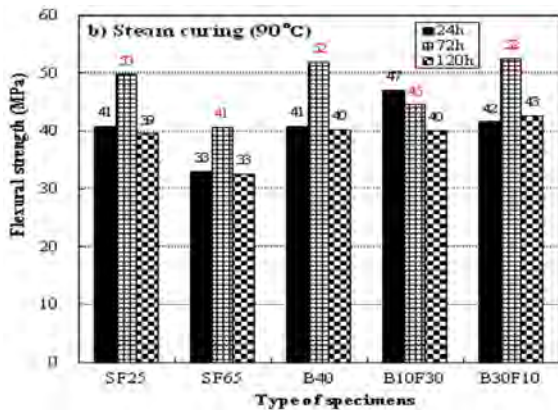
(c) Hot-water curing

Fig. 1 Influence of pozzolanic materials type and content, curing conditions on compressive strength

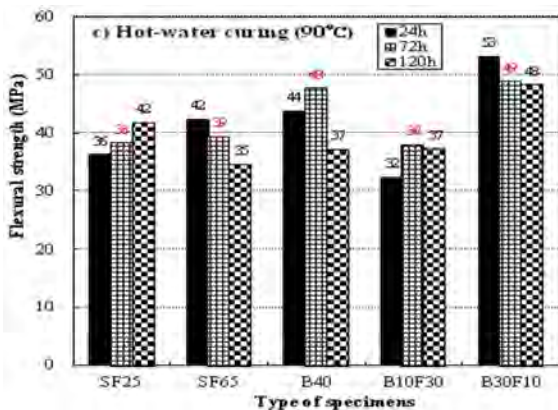
B30F10에서 높은 강도발현 특성을 보여주고 있으며 양생시간이 증가됨에 따라 강도도 증가되었다. 그러나 양생시간의 증가에 따른 강도향상 효과와 경제성 등을 고려해 볼 때, 90°C 증기양생 및 열수양생 시간은 72시간(3일) 이내가 적당한 것으로 판단된다.



(a) Curing conditions



(b) Steam curing



(c) Hot-water curing

Fig. 2 Influence of pozzolanic materials type and content, curing conditions on flexural strength

### 3.1.2 휨강도 특성

Fig. 2는 배합 및 양생방법에 따른 3성분계 포졸란재 혼입 RPC의 휨강도 특성을 나타낸 것이다. Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 3성분계 포졸란재 혼입 RPC의 휨강도는 배합 및 양생방법에 따른 뚜렷한 경향이 없지만, 실리카폼만 단독으로 사용한 SF25나 SF65 보다 높게 나타나고 있으며, 특히 압축강도 특성에서 가장 우수하게 나타난 B40과 B30F10 type이 휨강도에서도 가장 높은 것으로 조사되었다. 그리고 배합 및 양생방법에 따른 RPC들의 휨강도 특성이 매우 불규칙하게 나타나고 있는데, 이는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 매트릭



Fig. 3 Fiber ball in RPC specimens (B40 type)

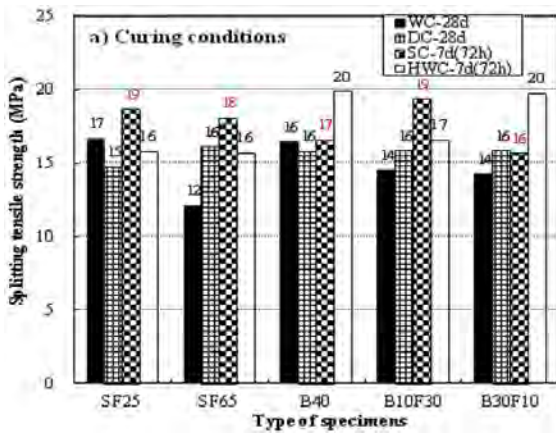
스(matrix)내 강섬유의 분산과 뭉침(fiber ball) 현상에 따른 영향이 다른 인자들(구성재료나 양생방법 등) 보다 훨씬 크기 때문인 것으로 판단되며 이에 따른 주의가 요망된다.

한편, 양생방법별 각 공시체들의 휨강도 특성을 살펴보면, SF65 type을 제외하고 모두 증기양생(90°C) > 열수양생(90°C) > 수중양생(20°C) > 기건양생(20°C) 순으로 높게 나타나고 있지만, 압축강도 특성에서와는 달리 상온(20°C) 수중양생에서도 36~45 MPa 수준으로 높은 휨강도 발현 특성을 보이고 있다. 또한 Fig. 2(b)와 (c)에 나타난 바와 같이 증기 및 열수양생 시간(24h, 72h, 120h)에 따른 3성분계 포졸란재 혼입 RPC의 재령 7일 휨강도 특성은 압축강도 특성에서와 같이 B40과 B30F10에서 52 MPa 수준(72h)으로 높은 강도발현 특성을 보였으며, 양생시간에 따른 강도특성은 불규칙 하지만 강도발현 특성 및 경제성 등을 고려해 볼 때, 72시간(3일) 이내가 적당한 것으로 판단된다.

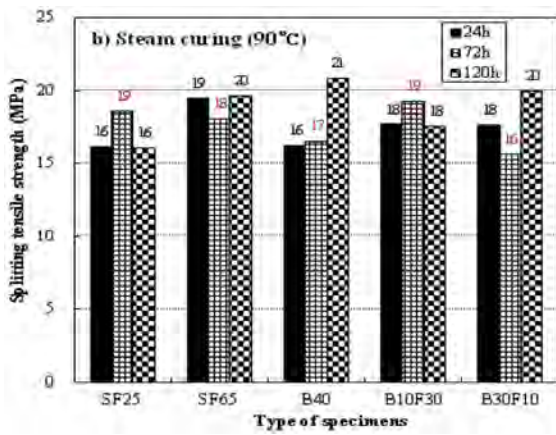
### 3.1.3 쪼갬 인장강도 특성

Fig. 4는 양생방법 및 재령에 따른 3성분계 포졸란재 혼입 RPC의 쪼갬 인장강도 특성을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 3성분계 포졸란재 혼입 RPC의 인장강도는 실리카폼만 단독으로 사용한 SF25나 SF65와 비교하여 동등수준 혹은 약간 높게 나타나고 있으며 고온(90°C) 양생, 특히 열수양생에서 보다 높은 강도발현 특성을 나타내었다. 공시체 종류별로 큰 차이는 없지만, 90°C 열수양생된 B40과 B30F10 type이 20 MPa 수준으로 가장 높았다. 또한 Fig. 4(b)와 (c)에서 보는 바와 같이 3성분계 포졸란재 혼입 RPC의 재령 7일 쪼갬 인장강도 특성은 B40(증기)과 SF65(열수) type을 제외하고 모두 양생시간이 증가됨에 따라 큰 강도발현은 없는 것으로 조사되어 장시간의 양생시간은 필요하지 않지만, 압축 및 휨강도 발현특성 등을 함께 고려할 때, 72시간(3일) 이내가 적당한 것으로 판단된다.

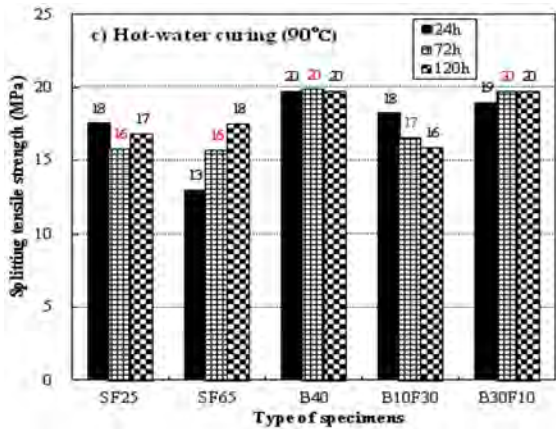
이상의 결과는 3성분계 포졸란재의 적절한 혼합사용과 최적 양생방법의 적용이 RPC의 강도를 크게 향상시킬 수 있는 효과적인 방법임을 잘 보여준다. 특히 3성분 포졸란재 혼입 RPC의 휨강도는 52 MPa 수준(90°C 증기양생)으로 매우



(a) Curing conditions



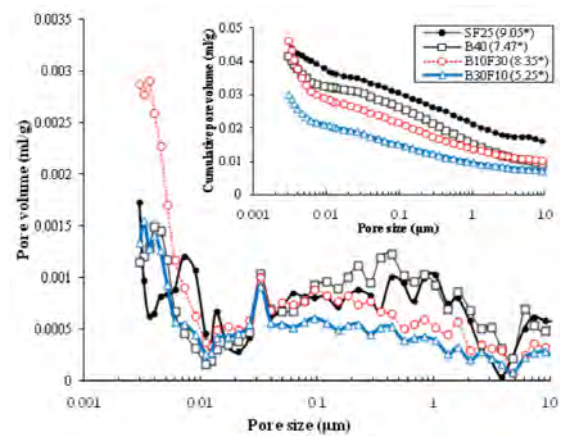
(b) Steam curing



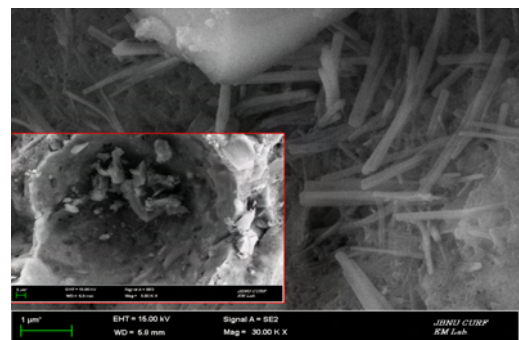
(c) Hot-water curing

**Fig. 4** Influence of pozzolanic materials type and content, curing conditions on splitting tensile strength

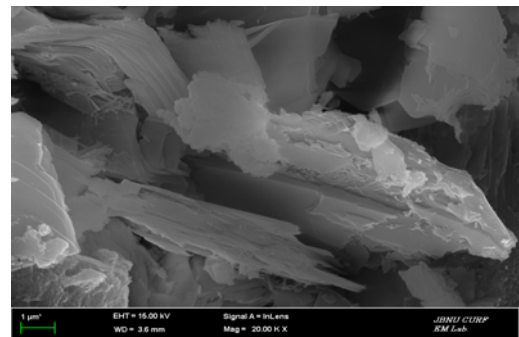
우수하기 때문에 흙부재로서의 활용방안이 적극적으로 모색된다. 또한 기존의 RPC의 경우 단위시멘트량(850~1000 kg/m<sup>3</sup>)은 매우 높고 물/결합재비는 극히 낮기 때문에 급격한 수화반응, 높은 수화열과 건조수축 등의 문제가 우려된다. 그러나 3성분계 포졸란재를 다량 혼합사용한 RPC는 기존 RPC의 단위시멘트량을 크게 감소(결합재 중 포졸란재의 양은 상대적으로 증가됨)시키고 시멘트의 수화반응과는 다른 포졸란반응을 통해 수화열 및 건조수축 감소에 크게 기여하



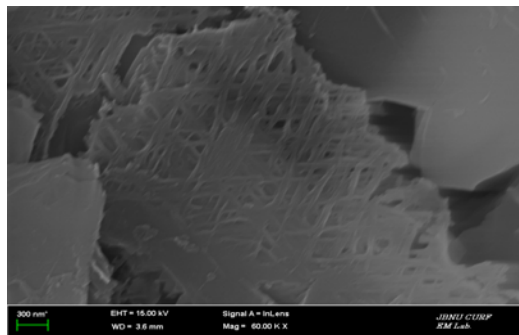
**Fig. 5** Porosity and pore size distribution of RPC ternary pozzolanic materials (90°C steam curing, 7 days), Note; \*total pore volume



(a)



(b)



(c)

**Fig. 6** SEM images for C-S-H gel of 20°C water (a, ×30000K) and 90°C steam (b, ×20000K), 90°C hot-water (c, ×60000K) cured B30F10 mixture

게 된다. 또한 다량 생성된 포졸란반응물질(C-S-H나 C-A-S-H겔)로부터 강도의 개선뿐 아니라 미세구조의 개선(치밀성 향상)으로 내구성 측면에서도 큰 효과가 기대된다(Fig. 5와 6 참조).

### 3.2 3성분계 포졸란재 혼입 RPC의 미세구조 특성

#### 3.2.1 매트릭스(matrix)의 공극구조 특성

Fig. 5는 고온(90°C)에서 증기양생된 재령 7일 3성분계 포졸란재 혼입 RPC의 세공구조 특성을 실리카폼만 혼입시킨 기존 RPC의 기본배합(SF25)과 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 3성분계 포졸란재 함유 RPC들의 전세공용적(total pore volume)은 SF25와 비교하여 전반적으로 작게 나타나고 있으며, 세공경 분포 특성에서도 0.01  $\mu\text{m}$  이상의 큰 공극들의 용적은 감소되면서 작은 공극(0.01  $\mu\text{m}$  이하)들의 용적은 증가되었다. 이는 포졸란재의 혼합사용에 따른 RPC의 공극구조 개선효과를 잘 보여주는 결과이며, 이중에서도 특히 B30F10의 전세공용적이 다른 공시체에 비해 낮게 나타나고 있어 실리카폼과 고로슬래그분말, 플라이애쉬의 적절한 혼합사용이 RPC의 공극구조 개선에 매우 효과적임을 알 수 있었다.

한편, Fig. 7은 양생방법에 따른 B30F10의 공극구조 특성(전세공용적과 공극경 분포)을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 72시간(3일) 동안 90°C 열수 및 증기양생된 재령 7일 RPC의 전세공용적은 상온(20°C) 수중 및 기건양생된 재령 28일 공시체들에 비해 매우 낮게 나타나고 있으며, 세공경분포 특성에서도 큰 차이를 보이고 있다. 즉 상온(20°C)에서 수중 및 기건양생된 공시체의 경우 0.01~0.1  $\mu\text{m}$ 의 공극용적이 매우 높게 나타나고 있지만, 고온(90°C) 증기 및 열수양생은 시멘트의 수화 및 포졸란반응을 초기에 크게 활성화시킴으로써 매트릭스 내 전세공용적의 감소, 특히 0.01  $\mu\text{m}$ 이상의 모세관공극을 크게 감소시켰다. 이러한 특성은 90°C에서 증기 및

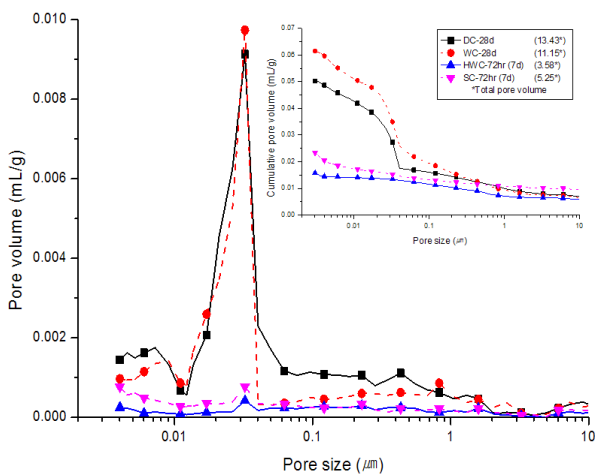


Fig. 7 Influence of curing conditions on pore structure of RPC (B30F10)

열수양생된 B30F10 공시체의 수화생성물(치밀한 조직의 C-S-H겔, Fig. 6) 분석 결과로부터 확인할 수 있다.

Fig. 8은 90°C 증기양생된 B30F10 공시체의 양생시간(24h, 72h, 120h)에 따른 공극구조 변화특성을 나타낸 것으로, 양생시간이 증가됨에 따라 전세공용적은 감소하고 있으며, 0.01  $\mu\text{m}$ 이상의 비교적 큰 공극들의 용적이 감소

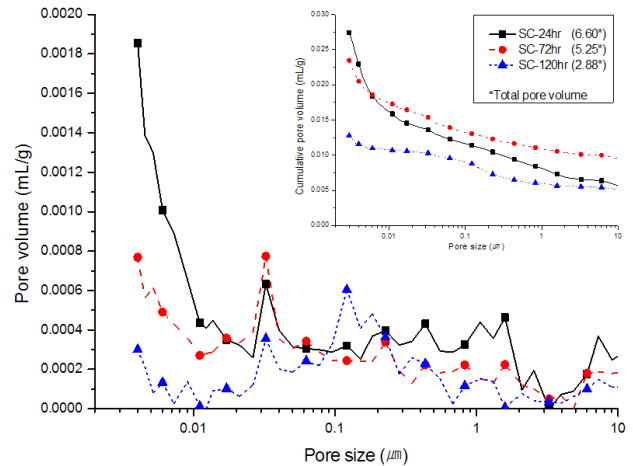


Fig. 8 Porosity and pore size distribution with curing period of RPC (B30F10, 90°C steam curing)

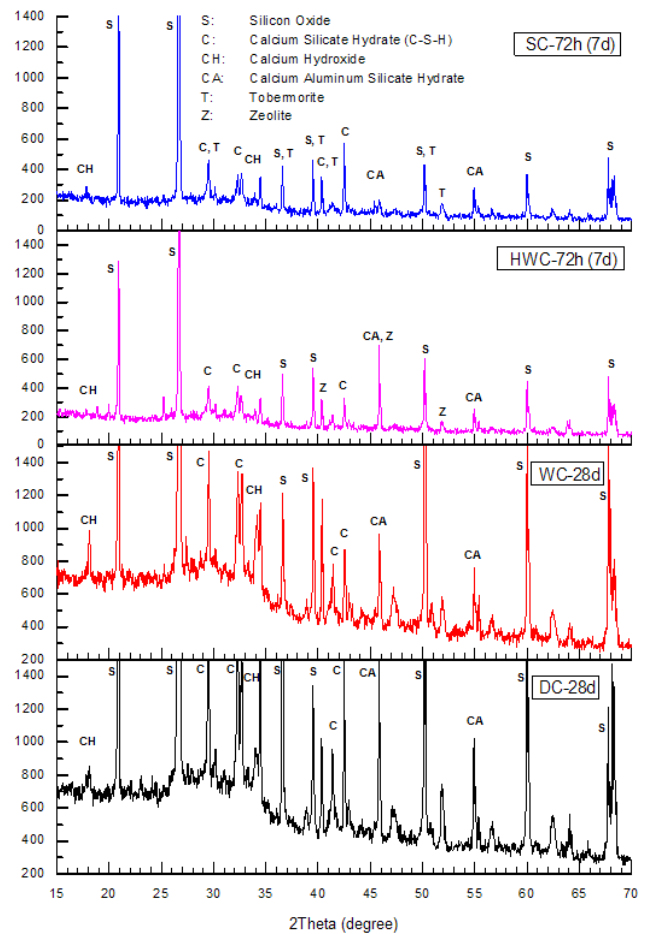


Fig. 9 XRD results of B30F10 mixture according to curing conditions

하고 있다.

이상의 결과로부터 실리카폼의 단독사용보다는 3성분계 포졸란재의 혼합사용이 RPC의 미세구조 개선에 매우 효과적임을 알 수 있었으며, 특히 고온(90°C) 양생방법에 의해 혼합 사용된 포졸란재들의 포졸란반응을 초기에 크게 활성화시켜 보다 치밀한 미세구조를 갖도록 RPC를 개선할 수 있었다.

### 3.2.2 수화생성물 분석

Fig. 9는 양생방법에 따른 B30F10 공시체의 수화생성물 분석(XRD)결과를 나타낸 것이다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 고온(90°C)에서 증기 및 열수양생된 채령 7일 공시체의 경우 상온(20°C) 수중 및 기건양생된 채령 28일 공시체에 비해 수산화칼슘(CH; calcium hydroxide)이 상대적으로 적게 검출되고 있으며, 반면 보다 치밀한 조직 구조를 갖는 Tobermorite(C-S-H 겔)이나 Zeolite(C-A-S-H 겔) 등으로 변화되고 있음을 보여준다. 이러한 결과는 Fig. 6에 나타낸 B30F10 공시체의 양생방법에 따른 수화생성물 전자주사현미경(SEM) 관찰 결과에서 확인할 수 있었다. 즉 Fig. 6에서 보는 바와 같이 고온(90°C) 양생(증기 및 열수)된 공시체의 경우 상온(20°C) 양생(수중)된 공시체의 수화생성물(C-S-H 겔 등)에 비해 매우 치밀한 구조의 C-S-H 상을 형성하며 이들이 다량 관찰되었다. 이는 Fig. 7의 양생방법에 따른 3성분계 포졸란재 혼입 RPC의 공극구조 변화특성과 이로 인한 강도개선효과(Fig. 1과 2)를 잘 설명해 주는 결과이다.

## 4. 결 론

이 연구는 기존 RPC의 성능 범위 이상에서 단위시멘트량의 감소와 강도 등 기계적 성능의 개선 그리고 실리카폼의 대체재로서 고로슬래그분말이나 플라이애쉬의 사용 등을 검토하기 위하여 다양한 양생방법에 따른 3성분계 포졸란재(고로슬래그, 플라이애쉬, 실리카폼) 혼입 RPC의 강도발현 및 미세구조 특성을 분석·평가하였다.

- 1) 3성분계 포졸란재 혼입 RPC들의 단위시멘트량은 기존 RPC의 기본배합(단위시멘트량 868 kg/m<sup>3</sup>)에서 3성분계 포졸란재를 65%(사용시멘트 질량비)까지 혼합 사용함으로써 약 750 kg/m<sup>3</sup> 수준까지 크게 감소하였지만, 압축 및 휨강도 발현 특성은 크게 향상되었다.
- 2) 즉 72시간동안 90°C 증기양생된 B40(실리카폼 25%+ 고로슬래그분말 40%)의 채령 7일 압축강도는 212 MPa, 휨강도는 52 MPa로서 실리카폼만 단독으로 사용된 기존 RPC의 기본배합(SF25)과 비교하여 약 1.37배, 1.32배 향상되었다. 이는 시멘트보다 분말도가 큰 고로슬래그분말과 플라이애쉬, 실리카폼의 혼합사용에 따른 매트릭스(matrix) 충전효과(치밀성 향상)와 포졸란반응의 활성화에 기인된 결과로 판단되며 각 공시체의 공극구조 및 수화생성물 분석 결과로부터

확인할 수 있었다.

- 3) 기존 RPC의 경우 단위시멘트량(850~1000 kg/m<sup>3</sup>)은 매우 높고 물/결합재비(w/b)는 극히 낮기 때문에 급격한 수화반응, 높은 수화열과 건조수축 등의 문제가 우려된다. 그러나 3성분계 포졸란재를 다량 혼합사용한 RPC는 기존 RPC의 단위시멘트량을 크게 감소(결합재 중 포졸란재의 양은 상대적으로 증가됨)시키고 시멘트의 수화반응과는 다른 포졸란반응을 통해 수화열 및 건조수축 감소에 크게 기여할 뿐 아니라 다량 생성된 포졸란반응물질(C-S-H나 C-A-S-H 겔)로부터 강도 및 미세구조의 개선(치밀성 향상)으로 내구성 측면에서도 큰 효과가 기대된다.

## 감사의 글

이 연구는 지식경제부 기술혁신사업(방사성폐기물관리 기술개발사업-전략응용기술)의 지원으로 이루어졌으며 이에 깊이 감사드립니다.

## References

1. Richard, P. and Cheyrezy, M. H., "Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength," *ACI Spring Convention*, San Francisco, SP. 144-24, 1994, pp. 507-517.
2. Richard, P. and Cheyrezy, M. H., "Composition of Reactive Powder Concretes," *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No.7, 1995, pp. 1501-1511.
3. Cheyrezy, M., "Structural Applications of RPC," *Concrete*, Vol. 33, No. 1, 1999, pp. 20-23.
4. Collepari, S., Coppola, L., Troli, R., and Collepari, M., "Mechanical Properties of Modified Reactive Powder Concrete," In: V. M. Malhotra Ed. *Proceedings Fifth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, Rome, Italy, Farmington Hills, MI: ACI Publication SP-173, 1997, pp. 1-21.
5. Abouzar, S., "Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete," *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 2, No. 3, 2004, pp. 409-417.
6. Halit, Y., Mert, Y. Y., Serdar, A., and Anıl, Ş. K., "Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete Containing High Volumes of Ground Granulated Blast Furnace Slag," *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 3, 2009, pp. 1223-1231.
7. Langan, B. W., Weng, K., and Ward, M. A., "Effect of Silica Fume and Fly Ash on Heat of Hydration of Portland Cement," *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 7, 2002, pp. 1045-1051.
8. So, S. Y., Lee, J. B., Kanchivdorj, K., and So, H. S., "Strength Development and Microstructure of Reactive Powder Concrete Containing Meta-kaolin," *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 27, No. 12, 2011, pp. 147-154.



9. So, S. Y. and So, H. S., "An Experimental Study on the Strength Development of Ultra-High Strength Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites," *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 25, No. 7, 2009, pp. 63-70.

10. Jo, B. W., Yoon, K. W., Park, J. H., and Kim, H., "An Experimental Study on Mechanical Properties of Ultra-High Strength Powder Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 3, 2010, pp. 287-295. (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2010.22.3.287>)

---

**요 약** 반응성 분체 콘크리트(RPC)는 월등히 뛰어난 기계적 성능을 바탕으로 최근의 건설 환경 변화에 적절히 대응할 수 있는 차세대 건설재료로서 기대를 모으고 있지만, 이에 대한 국내에서의 연구는 매우 부족한 실정이다. 특히 유럽에서 개발된 RPC는 단위시멘트량이 매우 높거나 반응성 분체로서 국내에서는 전량 수입에 의존하고 있는 고가의 실리카폼(silica fume)을 다량 사용하고 있다. 때문에 국내 실정에 맞는 실용적인 RPC의 개발에 관한 다양한 연구가 필요하다. 이 연구에서는 기존 RPC의 성능 범위 내에서 단위시멘트량의 감소와 실리카폼의 대체재로서 고로슬래그분말이나 플라이애쉬의 사용 등을 검토하기 위하여 다양한 양생방법에 따른 3성분계 포졸란재(고로슬래그, 플라이애쉬, 실리카폼) 혼입 RPC의 강도발현 및 미세구조 특성을 분석·평가하였다. 시험 결과는 3성분계 포졸란재의 적절한 혼합사용과 최적 양생방법의 적용이 RPC의 강도발현 및 미세구조 개선에 매우 효과적임을 잘 보여주었다.

**핵심용어** : 반응성 분체 콘크리트, 3성분계 포졸란재, 강도, 미세구조, 양생방법