

알파형 반수석고를 활용한 PHC 파일 콘크리트의 역학적 특성

Mechanical Properties of PHC Pile Concrete using Alpha-type Hemihydrate Gypsum

김홍섭¹ · 신경수^{2*} · 김도겸³

Hong-Seop Kim¹ · Kyoung-Su Shin^{2*} · Do-Gyeum Kim³

(Received December 15, 2023 / Revised January 10, 2024 / Accepted January 10, 2024)

In this study, the mechanical properties of PHC pile concrete using alpha-type hemihydrate gypsum were evaluated. As the replacement ratio of alpha-type hemihydrate gypsum increased, the setting time rapidly accelerated. In particular, when replacement ratio exceeded 20 %, the setting time was shortened due to rapid hydration reaction, making it impossible to secure working time. As the replacement ratio of alpha-type hemihydrate gypsum increased, the ettringite and gypsum peaks tended to increase, and it is believed that the shrinkage of concrete decreased due to the increase in the ettringite peak. At a As the replacement ratio of 5 to 15 % for alpha-type hemihydrate gypsum, the compressive strength increased or was found to be equivalent to that of OPC. But at 20 % substitution, workability deteriorated due to rapid setting, so use of the 5 to 15 % range is considered appropriate.

키워드 : 알파형 반수석고, 응결시간, 수축, 압축강도

Keywords : Alpha-type hemihydrate gypsum, Setting time, Shrinkage, Compressive strength

1. 서론

고강도 콘크리트 말뚝은 1990년대 이후 건축물의 대형화, 고층화와 함께 지반 강화의 목적으로 사용되었으며, 신도시 개발사업 등으로 사용량이 연간 450만톤 이상으로 증가되고 있다(Jeon 2013; Yi et al. 2012). 고강도 콘크리트 말뚝은 원심다짐법을 이용하여 콘크리트를 고속으로 회전시켜 얻는 강한 원심력으로 콘크리트 중의 기포와 잉여 수분을 배출시켜 수밀성과 내구성이 향상되고, 압축·휨강도와 충격 저항성, 본당 장기허용지지력 및 시공성이 우수하여 깊은 심도의 말뚝 공사에 이용된다(Lee et al. 2016). 국내의 PHC(Pretensioned spun High strength Concrete) 파일 대부분은 증기양생방법으로 생산되고 있으며, 증기양생최고온도는 약 85 °C이고 양생시간은 보통 10시간 정도 소요되고 있다. 증기양생은 콘크리트 조기 강도 발현 및 수축 저감 효과는 있으나,

장기 강도의 저하, 양생 온도 등에 대한 문제가 있어 양생 시 온도 이력 관리가 중요하다.

한편, 고강도 콘크리트 말뚝의 제조에는 다량의 시멘트가 사용되고 있어 이산화탄소 발생 등 환경오염의 문제가 있어 콘크리트 배합, 사용재료 선정, 물성관리 등에 대한 고려가 필요하다(Jeon 2013).

고로슬래그 미분말은 시멘트 대체재로 사용되는 대표적인 산업 부산물로 자체 경화성은 약하지만 시멘트 수화물 중의 알칼리 자극에 반응하는 잠재 수경성을 가지고 있어 콘크리트의 혼화재료로 많이 사용되고 있다(Chang and Lim 2000). 고로슬래그 미분말의 사용은 콘크리트의 수화열 저감, 장기강도 향상, 수밀성 증대 및 내구성 향상의 효과가 있으며(Roy 1999; Bellmann and Stark 2009; Kim et al. 2012; Lee et al. 2015), 시멘트의 대체재로 활용되어 시멘트 원료인 석회석의 사용량이 감소하기 때문에 이산화탄소 배출을 저감시키는 효과를 기대할 수 있다(Lee et al. 2016; Song

* Corresponding author E-mail: shinks82@naver.com

¹한국건설기술연구원 건축연구본부 수석연구원 (Department of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea)

²(주)자연구조엔지니어링 기업부설연구소 연구소장 (Jayeon Structure Engineering Company, Daejeon-si, 34512, Korea)

³한국건설기술연구원 구조연구본부 선임연구원 (Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do, 10223, Korea)

Copyright © 2024 by Korean Recycled Construction Resources Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

2017). 그러나 고로슬래그 미분말 활용에 관한 기존 연구의 대부분은 표준양생 조건에서 수행되고 있으며, 고강도 콘크리트 말뚝과 같은 증기양생 조건에 대한 연구결과는 상당히 부족한 실정이다.

한편, 탈황석고는 침상형으로 탈수능력이 뛰어나 소성이 용이하며 단순히 열을 가하면 일부 또는 전체가 결정수를 잃어 소석고가 되는 탈수과정이 진행되며, 소석고에 물을 가하면 고정 경화를 거쳐 일부는 결정수 두 개를 가진 이수석고가 되고 일부는 결정수가 1/2개 있는 반수석고가 되는 재수화과정이 이루어진다. 이렇게 생성된 알파형 반수석고는 적은 양의 물로도 경화되기 때문에 수축에 의한 균열을 억제할 수 있어 시멘트의 대체재로 사용이 가능하다. 또한, 안정된 무수축성은 밀착성을 향상시켜 안정적인 장기 강도 발현에 기여할 수 있고, W/B 제어에 의한 응결시간 조절 및 높은 초기유동성을 확보할 수 있다. 또한, 높지 않은 일정수준의 알칼리도가 내수 공극 확보하여 건습 반복 작용 및 동결융해에 대한 내구성을 향상시키는 것으로 보고되고 있다(Lee et al. 2015; Jiang et al. 2016; Guan et al. 2011; Kim and Hahm 2012; Lee et al. 2016).

본 연구에서는 고로슬래그 미분말을 일정량 치환한 기본 배합에 알파형 반수석고를 0, 5, 10, 15, 20 % 치환하여 알파형 반수석고를 활용한 PHC 파일 콘크리트의 증기양생 조건에서의 역학적 특성에 대하여 평가하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료

Table 1과 2에 사용재료의 물리적 특성과 화학조성을 나타내었다. 시멘트는 KS L 5201 「포틀랜드 시멘트」의 1종 보통 포틀랜드 시멘트로 밀도 3.15 g/cm³, 분말도 3,500 cm²/g이며, 고로슬래그는 KS F 2563 「콘크리트용 고로슬래그 미분말」에 준하는 밀도 2.90 g/cm³, 분말도 4,196 cm²/g, 알파형 반수석고는 밀도 2.72 g/cm³, 분말도 1,400 cm²/g인 것으로 사용하였다. 잔골재는 부순골재로 밀도 2.56 g/cm³, 흡수율 1.51 %이고, 굵은골재는 부순골재로 밀도 2.67 g/cm³, 흡수율 1.39 %이다. 콘크리트의 유동성 확보를 위하여 폴리카르본산계 고성능 감수제를 혼화제로 사용하였다.

2.2 실험계획

Table 3은 실험계획을 나타낸 것으로 알파형 반수석고를 사용한 PHC 파일 콘크리트의 역학적 특성을 평가하기 위하여 OPC에 고로슬래그 미분말을 20 % 치환한 기본 배합에 알파형 반수석고를 0, 5, 10, 15, 20 %로 치환하였다. 슬럼프 및 응결시간, 압축강

Table 1. Physical properties of used materials

Materials	Physical properties
OPC	Density : 3.15 g/cm ³ , Blaine : 3,500 cm ² /g
BFS	Density : 2.90 g/cm ³ , Blaine : 4,196 cm ² /g
A	Density : 2.72 g/cm ³ , Blaine : 1,400 cm ² /g
S	Density : 2.56 g/cm ³ , Absorption ratio : 1.51 %
G	Density : 2.67 g/cm ³ , Absorption ratio : 1.39 %
SP	Polycarboxylate Superplasticizer

- 1) OPC : Ordinary portland cement,
- 2) BFS : Ground granulated blast-furnace slag
- 3) A : Alpha-calcium sulfate hemihydrate,
- 4) S : Fine aggregate, 5) G : Coarse aggregate

Table 2. Chemical compositions of used materials

Materials	Chemical composition (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
OPC	20.70	6.20	3.10	62.20	2.80	0.10	0.84	2.10	1.96
BFS	32.8	15.6	0.5	43.5	4.4	0.3	0.5	0.1	2.3
A	2.57	0.88	0.41	39.99	0.32	-	-	55.79	0.04

Table 3. Experimental plan

Experimental variables	Experimental level	Evaluation items
Cement type	OPC	- Setting time
Replacement ratio of BFS (wt.%)	20	- Drying shrinkage - Compressive strength
Replacement ratio of A (wt.%)	0, 5, 10, 15, 20	- SEM&EDS - XRD - DSC

도, 건조수축, 열중량분석(Thermogravimetric analysis, TGA), 시차주사열량분석(Differential Scanning Calorimetry, DSC)을 수행하였으며, 미세구조 분석은 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM), 결정구조는 X-ray 회절분석(X-ray diffraction, XRD)으로 수행하였다.

콘크리트 배합은 Table 4에 나타낸 바와 같이 기존 PHC 콘크리트 말뚝에 주로 사용되는 압축강도 80MPa 배합으로 물결합재비(W/B)는 25 %, 잔골재율(S/a)은 36 %, 단위수량은 130 kg/m³로 설정하였다.

Table 4. Mix proportion of concrete

Specimens ID	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					
			W	C	BFC	A	S	G
OPC	25.0	36.0	130	520	0	0	629	1153
RA5				390	104	26	625	1147
RA10				364	104	52	625	1146
RA15				338	104	78	624	1144
RA20				312	104	104	624	1143

2.3 시험체 제작 및 실험 방법

2축 강제식 믹서를 사용하여 콘크리트 비빔을 하였으며, 시험체는 「KS F 2454 원심력으로 다져진 콘크리트의 압축강도 시험방법」에 준하여 제작하였다. 콘크리트 비빔 직후 15.3 kg을 계량하여 원심몰드에 투입하여 $\varnothing 200 \times 300$ mm 크기의 시험체를 원심성형으로 제작하였다. 원심성형 조건은 Table 5와 같이 저속(130 RPM) 3분, 중속(290 RPM) 2분, 중고속(420 RPM) 1분, 고속(690 RPM) 5분의 4단계로 설정하였으며, 원심성형이 종료된 시험체 내부의 슬러지를 제거한 후 증기양생을 실시하였다. 증기양생 조건은 Fig. 1과 같이 전치 1시간, 승온 3시간, 유지 5시간, 강온 2시간의 조건으로 총 10시간으로 설정하였다. 증기양생 종료 후에는 온도 20 ± 3 °C, 상대습도 60 ± 5 %의 항온·항습실에서 재령 7일간 양생을 실시하였다. 시험체의 제작 및 양생과정은 Fig. 2에 나타내었다.

슬럼프는 KS F 2402 「콘크리트의 슬럼프 시험 방법」, 응결시간은 KS F 2436 「관입 저항침에 의한 콘크리트의 응결 시간 시험방법」, 압축강도는 KS F 2405 「콘크리트의 압축강도 시험방법」에 준하여 진행하였다. 건조수축 시험체는 KS F 2424 「모르타르 및 콘크리트의 길이 변화 시험방법」에 준하여 $100 \times 100 \times 400$ mm의 크기로 제작하여 항온·항습실에서 측정하였다. 미세구조 분석은 주사전자현미경으로 백금으로 코팅한 샘플에 대하여 가속전압 15 kV에서 관찰하였다. 결정구조는 X-선 회절 분석(X-ray diffraction, XRD)으로 회절 패턴은 $5 \sim 65^\circ 2\theta$ 구간, 0.01° 스텝, 스텝 당 1초의 조건으로 분말형태의 샘플에 대하여 전처리 과정을 거쳐 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 응결시간

Table 6은 알파형 반수석고의 치환율에 따른 페이스트의 응결 시간 시험결과를 나타낸 것이다. OPC 시험체 경우 초결은 3:30에

Table 5. Centrifugal casting conditions

Contents	Low speed	Middle speed	Upper-middle speed	High speed
RPM	130	290	420	690
Time (min.)	3	2	1	5

Table 6. Setting time

Specimens ID	Setting time (hour:minute)		
	Initial	Final	Final-initial
OPC	3:30	6:30	3:00
RA5	2:30	4:00	1:30
RA10	1:00	2:00	1:00
RA15	0:50	1:40	0:50
RA20	0:40	1:00	0:20

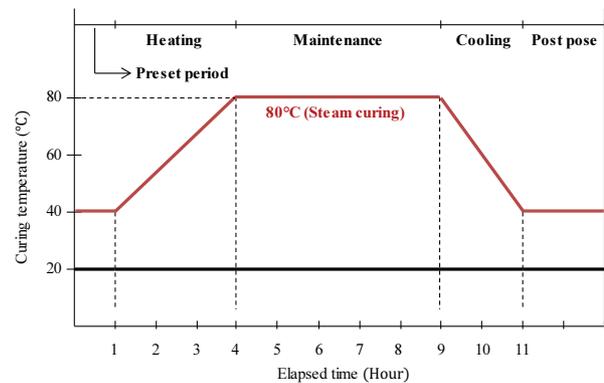


Fig. 1. Curing conditions



Fig. 2. Centrifugal compaction

서 종결은 6:30으로 초결에서 종결까지 3:00이 소요되었다. RA5 시험체는 초결 2:30에서 종결 3:30으로 1:30이 소요되었다. RA10 시험체는 초결 1:00에서 종결 2:00으로 1:00이 소요되었다. RA15

시험체는 초결 0:50에서 종결 1:40으로 0:50이 소요되었다. RA20 시험체는 초결 0:40에서 종결 1:00으로 0:20이 소요되었다.

알파형 반수석고의 치환율이 증가할수록 응결시간이 급격히 감소하는 경향을 보였으며, 15 % 이상 치환 시 초결에서 종결까지 1시간이 걸리지 않기 때문에 현장 적용 시 원심성형 단계까지의 작업시간 확보를 위한 조절이 필요할 것으로 판단된다. 또한 20 % 이상 치환 시 초결부터 종결까지의 시간이 너무 짧아 원심성형을 위한 시간이 부족할 것으로 예상되어 현장적용은 어려울 것으로 판단된다.

3.2 건조수축

Fig. 3은 알파형 반수석고의 치환율에 따른 콘크리트의 건조수축 시험결과를 나타낸 것이다. OPC의 경우 측정일로부터 5일까지 급격한 수축이 발생하였으며, 재령 25일까지 -955×10^{-6} 으로 수축이 상당히 큰 것으로 확인되었다. 한편, 알파형 반수석고를 치환한 경우 OPC 보다 건조수축이 감소하는 경향을 보였으며, 재령이 경과할수록 수축량의 차이가 증가하는 것으로 나타났다. RA5는 재령 5일에서 -429×10^{-6} , 재령 25일에서 -818×10^{-6} 로 OPC 보다 약 14 % 감소하였다. RA10은 재령 5일에서 -360×10^{-6} , 재령 25일에서 -647×10^{-6} 로 OPC보다 약 32 %, RA15는 재령 5일에서 -313×10^{-6} , 재령 25일에서 -596×10^{-6} 로 OPC보다 약 36 %, RA20은 재령 5일에서 -304×10^{-6} , 재령 25일에서 -551×10^{-6} 로 OPC보다 약 42 % 감소하였다.

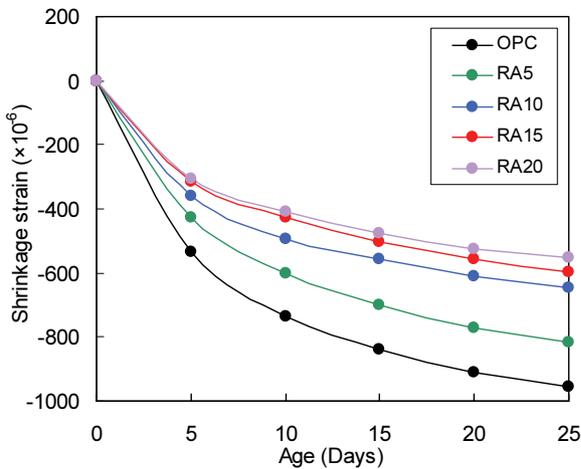


Fig. 3. Drying shrinkage

기존 연구결과와 같이 알파형 반수석고의 치환율이 증가할수록 콘크리트의 수축량이 감소하는 경향을 보였으며, 반수석고의 치환량 조절을 통해 콘크리트 건조 수축 제어에 효과가 있을 것으로 판단된다.

3.3 압축강도

Fig. 4는 알파형 반수석고의 치환율에 따른 콘크리트의 압축강도 시험결과를 나타낸 것이다. OPC 시험체는 재령 1일에서 72.1 MPa, 재령 7일에서 81.6 MPa로 측정되었다.

RA5 시험체는 재령 1일 72.5 MPa에서 재령 7일 82.3 MPa로 OPC와 유사한 수준이며, RA10은 재령 1일 83.4 MPa, 재령 7일 90.0 MPa으로 OPC 보다 약 10 % 증가하였다. RA15는 재령 1일 71.5 MPa, 재령 7일 80.4 MPa로 OPC에 비해 약 1.5 % 감소하는 경향을 보였으며, RA20 시험체는 응결시간 시험에서와 같이 원심성형 전에 초결이 진행되어 원심성형이 완전하게 되지 않아 압축강도의 측정이 불가능하였다.

알파형 반수석고는 5~10 % 사용 시 압축강도가 증가하는 경향을 보였으며, 15 %까지는 용도를 고려하여 사용 가능성이 있는 것으로 판단된다. 그러나 20 % 이상의 치환의 경우 빠른 응결로 인해 수화반응이 촉진되어 원심성형이 불가능하여 PHC 파일용 혼화재료로서 사용이 어렵다고 판단된다.

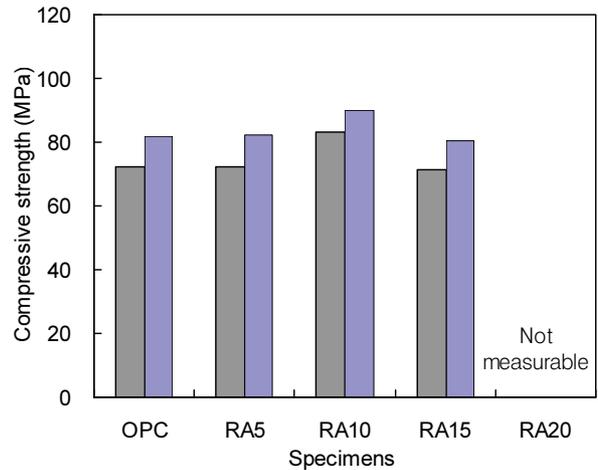


Fig. 4. Compressive strength

3.4 TGA, DSC

Fig. 5는 알파형 반수석고의 치환율에 따른 콘크리트의 TGA 분석결과를 나타낸 것이다. 알파형 반수석고의 치환율 5, 10 %에

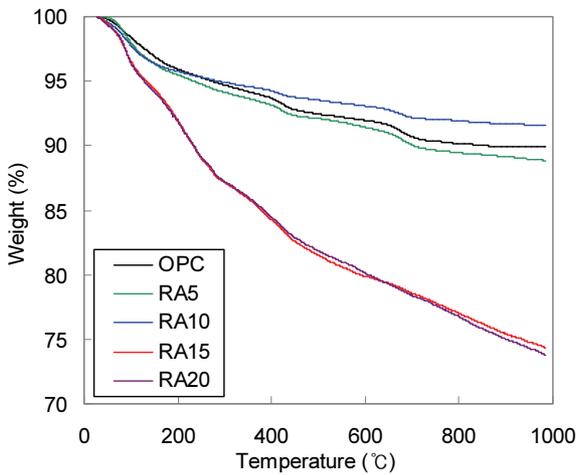


Fig. 5. TGA

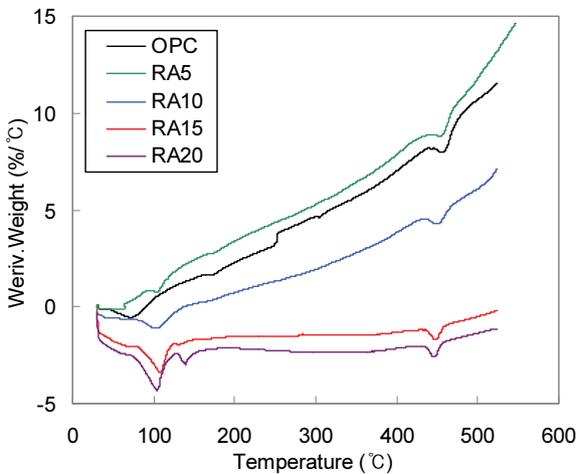


Fig. 6. DSC

서는 1000 °C 구간까지 기울기가 완만한 형태를 보였으나, 15, 20 %에서는 초기부터 기울기가 급격하게 떨어지는 경향을 보였다. 0~200 °C 구간의 기울기가 급격한 것은 시료의 질량이 급격히 감소한 것을 의미하며 기존 연구 결과와 같이 C-S-H의 H₂O 손실에 의한 것으로 판단된다.

OPC의 경우 0 °C~200 °C 구간에서 질량 감소가 발생하기 시작하여 1000 °C구간에서는 90 %를 나타내었다. RA5 시험체도 OPC와 유사하게 온도가 낮은 영역에서 완만한 형태를 보이다 1000 °C구간에서는 88.8 %를 나타내었다. RA10 시험체는 0~200 °C 구간에서 제일 감소량이 적은 형태를 보였으며, 1000 °C구간에서는 91.6 %를 나타내어 질량 감소율이 가장 적은 특징을 보였다. 그러나, RA15 및 RA20 시험체는 0~200 °C 구간에서부터 약 90 %로

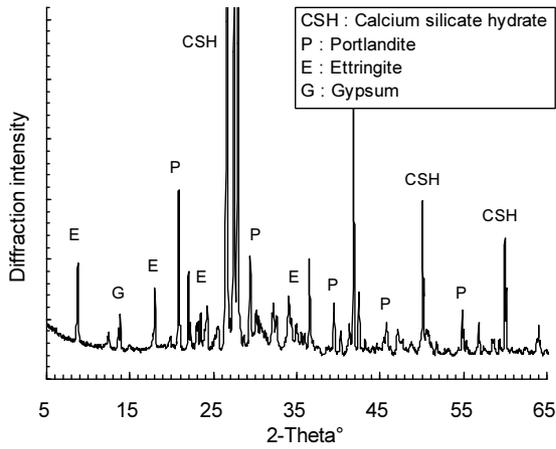
급격한 질량감소가 발생하였으며 1000 °C구간에서는 각각 74.3, 73.8 %로 감소하는 경향을 보였다. 따라서, 알파형 반수석고를 사용할 경우 C₃A와 알파형 반수석고의 급격한 반응에 의한 약 100 °C 부근에서 자유수가 탈착된 것으로 판단된다.

Fig. 6은 알파형 반수석고의 치환율에 따른 콘크리트의 DSC 분석결과를 나타낸 것이다. OPC, RA5, RA10은 발열반응 패턴을 보이고 있으며, RA15, RA20은 흡열반응 패턴을 나타내었다. OPC의 경우 발열반응 시점은 75.15 °C에서 최고 정점 458.93 °C에서 일어나고 있다. RA5는 발열반응이 가장 크게 일어나고 있으며 시점은 105.70 °C에서 최고 정점 456.33 °C에서 일어나고 있다. RA10의 시점은 104.29 °C에서 최고 정점 451.80 °C에서 일어나고 있다. 그러나, RA15 및 RA20은 흡열반응을 보이고 있으며, RA15는 시점 108.54 °C에서 최고 정점 448.04 °C이며, RA20은 시점 138.87 °C에서 최고 정점 446.31 °C를 나타내고 있다. 따라서, 알파형 반수석고를 적용한 시험체는 100 °C 부근에서 생성된 ettringite가 사용됨에 따라 흡열량이 감소하는 경향을 보이며 알파형 반수석고의 치환율에 따라 발열, 흡열반응 패턴에 차이가 있어, 10 % 초과 사용 시에는 이에 대한 검토가 필요하다고 판단된다.

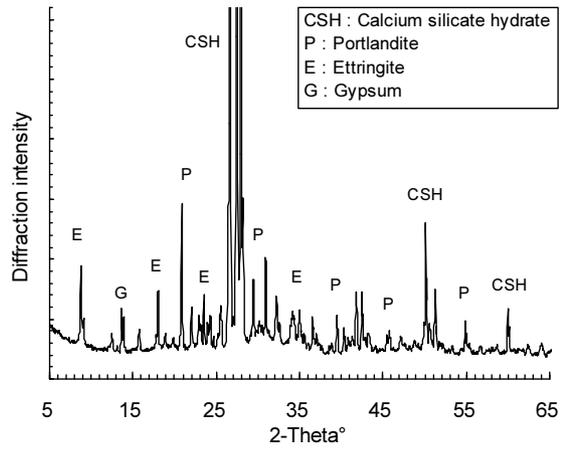
3.5 X-선 회절 분석(XRD) 결과

Fig. 7은 알파형 반수석고의 치환율에 따른 콘크리트의 XRD 분석결과를 나타낸 것이다. 재령 1일에서는 OPC는 대부분 C-S-H, Portlandite 피크가 관찰되었으며 일부 ettringite 피크가 관찰되었다. 알파형 반수석고를 치환한 RA5, RA10, RA15, RA20은 주로 ettringite 피크가 크게 관찰되었으며 알파형 반수석고의 치환율이 증가할수록 ettringite 피크가 크게 증가하는 경향을 보였으며 수화 생성물의 양이 많아지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 알파형 반수석고의 영향으로 Gypsum 피크가 일부 관찰되었다. Gypsum 피크는 기존 연구결과와 같이 1/2 H₂O를 결정수로 갖는 알파형 반수석고가 수화작용에 의해 결정체로 전환되어 화합수의 생성에 따른 것으로 판단된다.

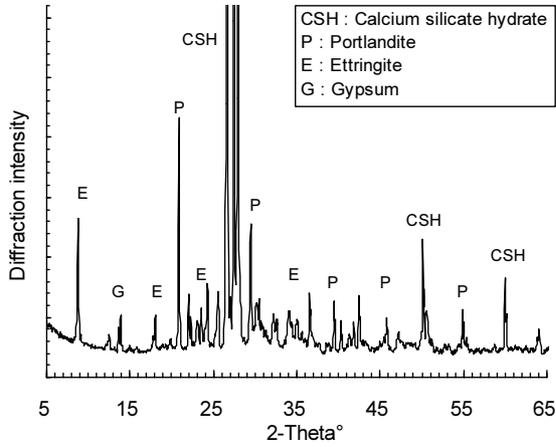
재령 7일에서도 OPC의 수화생성물은 대부분 C-S-H, Portlandite 피크와 ettringite 피크가 관찰되었다. 반면, 알파형 반수석고를 치환한 RA5, RA10, RA15, RA20은 주로 ettringite 피크가 크게 관찰되었다. 특히, 알파형 반수석고의 치환율이 증가할수록 ettringite 피크가 크게 증가하는 경향을 보였다. 알파형 반수석고의 사용으로 인해 재령초기의 수화반응을 촉진시켜 수화생성물의 생성량이 증가하여 압축강도에 영향을 준 것으로 판단된다.



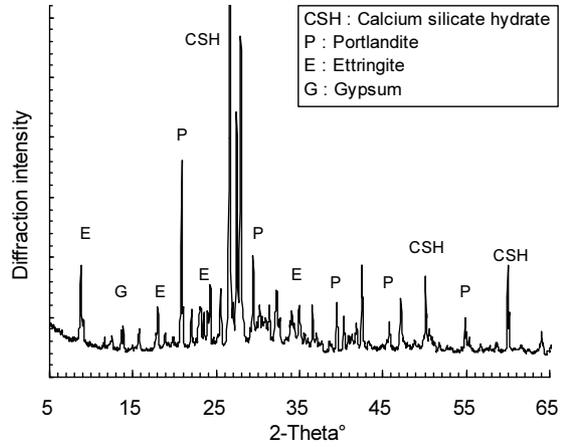
(a) OPC



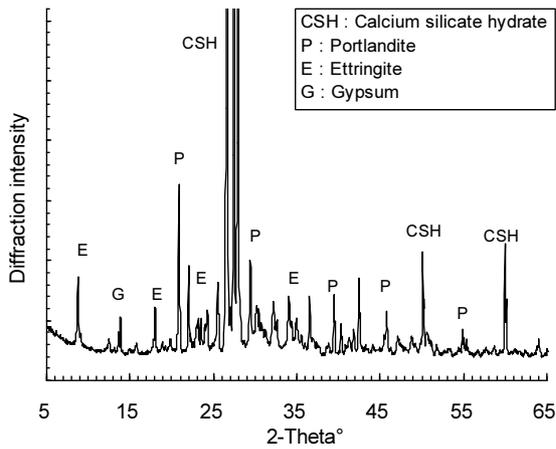
(d) RA15



(b) RA5



(e) RA20



(c) RA10

Fig. 7. XRD

3.6 주사전자현미경 분석(SEM) 결과

Fig. 8은 알파형 반수석고의 치환율에 따른 콘크리트의 미세구조 관찰결과를 나타낸 것이다. OPC의 수화생성물은 대부분 C-S-H가 분포하고 겔 형태의 미세구조를 나타내고 있다. 그러나, 알파형 반수석고를 치환한 RA5, RA10, RA15, RA20에서는 겔 형태의 미세구조는 작게 관찰되었으며, 침상형태의 ettringite가 형성되어 있어 알파형 반수석고의 치환율이 증가할수록 ettringite의 생성량이 증가하고 넓게 분포하는 경향을 보였다. 또한, 굵은 막대 형태의 석고 결정이 관찰되고 있으며, 전체적으로 조직이 치밀하며 다량의 수화생성물들이 증가하여 매트릭스 조직이 치밀해지고 콘크리트 내부의 골재와 결합재 간의 부착력의 증가 압축강도가

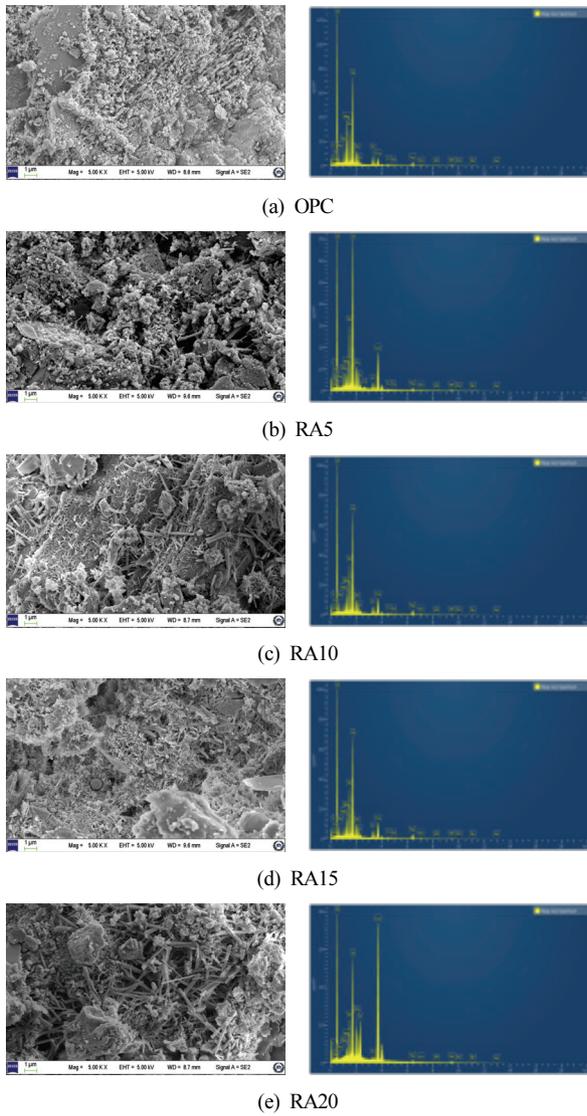


Fig. 8. SEM

증가한 것으로 판단된다.

그러나 알파형 반수석고의 사용량이 증가할수록 ettringite의 생성량이 증가하여 건조수축에는 유리하지만 급격한 응결시간으로 인해 작업성의 확보가 어려워 현장에서 사용하기에는 어려울 것이라 판단되며 현장적용을 위해서는 이에 대한 종합적인 고려를 통해서 알파형 반수석고의 치환율을 조절할 필요가 있다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 알파형 반수석고를 활용한 PHC 파일 콘크리트의 역학적 특성을 검토하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 콘크리트 알파형 반수석고의 치환율이 증가할수록 응결시간이 급격히 빨라졌으며, 특히 20 % 이상 치환 시 급격한 수화 반응으로 응결시간이 단축되어 작업성을 고려하여 5~15 % 이내로 치환하는 것이 적절하다고 판단된다.
2. 알파형 반수석고의 치환율이 증가할수록 건조수축이 감소하는 경향을 보였으며, 10~20 % 치환 시 OPC 대비 약 50 % 수축량이 감소하는 경향을 보였다.
3. 알파형 반수석고의 사용량 5~15 %까지는 OPC 대비 압축강도가 증가하거나 동등 수준으로 나타났으나 20 % 치환 시 급격한 응결시간으로 원심성형에 의한 시험체 제작이 불가능하여 5~15 % 범위의 사용이 적절하다고 판단된다.
4. 알파형 반수석고의 치환율이 증가할수록 ettringite 피크와 Gypsum 피크가 증가하는 경향을 보였으며, ettringite 피크 증가로 인해 콘크리트의 수축 저감이 가능한 것으로 판단된다.
5. 알파형 반수석고를 치환하여 사용함에 따라 콘크리트의 압축강도 증가 및 건조수축 저감 효과를 기대할 수 있으나, 치환율 20 % 이상인 경우 급결에 의한 시공성 저하가 발생하므로 현장적용을 위해서는 종합적인 고려를 통해서 알파형 반수석고 치환율을 조절할 필요가 있다고 판단된다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(적립금사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 20230404-001, 카자흐스탄의 산업폐기물 활용을 위한 국제공동기초연구).

References

- Bellmann, F., Stark, J. (2009). Activation of blast furnace slag by a new method, *Cement and Concrete Research*, **39(8)**, 644–650.
- Chang, P.K., Lim, Y.M. (2000). Effect of chemical composition on the latent hydraulic activity of blast furnace slag, *Journal of the Korean Ceramic Society*, **37(5)**, 453–458.
- Guan, B., Yang, L., Fu, H., Kong, B., Li, T., Yang, L. (2011). α -calcium sulfate hemihydrate preparation from FGD gypsum in recycling mixed salt solutions, *Chemical Engineering Journal*,

- 174(1)**, 296–303.
- Jeon, S.H. (2013). The Characteristics of PHC Pile using Admixture by Waste TFT-LCD Glas Powder, Ph.D Thesis, Chonbuk National University, Department of Architectural Engineering.
- Jiang, G., Wang, H., Chen, Q., Zhang, X., Wu, Z., Guan, B. (2016). Preparation of alpha-calcium sulfate hemihydrate from FGD gypsum in chloride-free $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ solution under mild conditions, *Fuel*, **174**, 235–241.
- Kim, G.Y., Koo, K.M., Nam, J.S., Miyauchi, H., Shin, K.S., Lee, T.G. (2012). Compressive strength development of blast furnace slag binder mortar, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, **28(9)**, 99–106.
- Kim, T.W., Hahm, H.G. (2012). Mechanical properties of the alkali-activated slag mortar with gypsum, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **16(3)**, 109–116.
- Lee, H.G., Gong, M.H., Jung, Y.S. (2016). Field application and manufacturing technology of low carbon ultra high strength green PHC pile using high volume ground granulated blast furnace slag, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, **28(2)**, 35–40.
- Lee, S.H., Lee, G.H., Yoo, D.W., Ha, J.H., Cho, Y.G. (2015). Hydration and insulation characteristics of a ground granulated blast furnace slag based non-sintered cement using circulating fluidized bed combustion ash as a activator, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **27(3)**, 245–252.
- Roy, D.M. (1999). Alkali activated cements opportunities and challenges, *Cement and Concrete Research*, **29(2)**, 249–254.
- Song, S.H. (2017). A Study on the Evaluation of Practical Application of PHC Pile-Filling Material utilizing High Calcium Fly Ash, Master's Thesis, Chonbuk National University, Department of Architectural Engineering.
- Yi, S.T., Noh, J.H., Heo, H.S. (2012). Mixture study for early-age strength improvement of NAC-typed high-strength concrete piles, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **16(2)**, 58–64.

알파형 반수석고를 활용한 PHC 파일 콘크리트의 역학적 특성

본 연구에서는 알파형 반수석고를 활용한 PHC 파일 콘크리트의 역학적 특성을 평가하였다. 알파형 반수석고의 치환율이 증가할수록 응결시간이 급격히 빨라졌으며, 특히 20 % 이상 치환 시 급격한 수화반응으로 응결시간이 단축되어 작업 시간 확보가 불가능하였다. 알파형 반수석고의 치환율이 증가할수록 ettringite와 Gypsum 피크가 증가하는 경향을 보였으며, ettringite 피크 증가로 인해 콘크리트의 수축량이 감소하는 것으로 판단된다. 알파형 반수석고 치환율 5~15 %에서는 OPC 대비 압축강도가 증가하거나 동등 수준으로 나타났으나 20 % 치환 시 급격한 응결로 인한 작업성이 저하되어 5~15 % 범위의 사용이 적절하다고 판단된다.