

폐유리발포비드를 혼입한 고강도 시멘트 복합체의 수화 특성

Hydration Properties of High-strength Cementitious Composites Incorporating Waste Glass Beads

편수정¹ · 김규용² · 이상수³ · 남정수^{2*}

Su-Jeong Pyeon¹ · Gyu-Yong Kim² · Sang-Soo Lee³ · Jeong-Soo Nam^{2*}

(Received February 23, 2022 / Revised March 16, 2022 / Accepted March 17, 2022)

In this study, the effect of a sudden decrease in internal humidity and a decrease in hydration level due to the tight internal structure of high-strength concrete and cement composites was investigated. To verify the change in the internal Si hydration, waste glass foam beads were used as a lightweight aggregate, and the internal unreacted hydrate reduction and hydrate formation tendency were identified over the mid- to long-term. Waste glass foam beads were mixed with 5, 10, and 20 %, and were used by pre-wetting. As the mixing rate of the waste glass foamed beads increased, the strength showed a tendency to decrease. In addition, when the mixing amount of pre-wetted waste glass foam beads increases inside through XRD analysis, TGA analysis, and Si NMR analysis, it is judged that the hydration degree of internal Si is different because moisture is supplied to the paste.

키워드 : 고강도 시멘트 복합체, 경량골재, 폐유리발포비드, 수화

Keywords : High-strength cementitious composites, Light weight aggregate, Waste glass bead, Hydration

1. 서론

고강도 콘크리트(High-strength cementitious composites; HSC)는 건설산업 분야에서 높은 작업성과 강도, 내구성을 가지는 재료로 사용되어 왔다(Pedro et al, 2017). 이러한 특성은 보충 시멘트 재료로 실리카흄과 같은 포졸란 물질을 사용하므로 나타나게 된다(Neville and Aitcin 1998). 실리카흄은 극도로 미세한 입자와 낮은 밀도로 인해 콘크리트 내부의 밀실도를 치밀하게 할 수 있다(Neville 1995). 하지만, 고밀도의 HSC 및 초고강도콘크리트(Ultra high performance concrete;UHPC)는 치밀한 내부 구조로 인해 내부 습도가 급격히 저하되어 자기 수축이 발생할 수 있다(Ozawa et al, 2019). 자기수축과 초기 재령 균열을 제어하기 위해 수중양생 또는 살수양생을 통해 외부의 수분을 내부로 확산시키는 방법이 사용되고 있지만, 수분을 공급하는데 원활하지 않다(Bentz et al, 2005).

치밀한 내부 구조를 가진 HSC와 UHPC의 수축 저감과 내부 수화 향상을 위해 다양한 연구가 시도되어 왔다. 기존 연구에서는 다공질의 경량골재(Light weight aggregate;LWA)를 이용한 콘크리트의 내부 양생 기법이 수축 저감 효과와 더불어 경계성 보완 등 다양한 장점이 있다고 보고하였다(Bentz et al, 2005). 또한, Super Absorbent polymers(SAP)를 활용해 시멘트 수화과정에서 재령일에 따라 매트릭스 내 W/C 비율을 증가시키는 것과 유사한 방식으로 수화도를 증가시키고 내부 경화에 대한 연구를 수행하였다(Justs et al, 2015). UHPC의 수축 감소 및 미세구조 최적화에 대한 다공성 골재의 수분 운반 효과를 조사하여 매트릭스 내부 고밀도 입자 패킹 모델(Andreasen & Andersen 모델)을 활용하여 UHPC 매트릭스를 설계하는 방안을 보고하였다(Sun et al, 2019). 위와 같은 내부 수화 향상을 위한 연구를 바탕으로 다공성 물질을 일부 활용하여 내부 수화도를 향상시키는 연구가 다방면으로 진행되었다.

* Corresponding author E-mail: j.nam@cnu.ac.kr

¹충남대학교 건축공학과 박사과정 (Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea)

²충남대학교 건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea)

³한밭대학교 건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea)

Copyright © 2022 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

현재 HSC에 사용되는 대부분의 내부양생 물질은 다공성이란 특징을 가지고 있으며, 고흡수성 수지와 LWA가 주로 활용된다. 이는 UHPC와 같은 내부가 밀실한 복합체의 자가 수축 증가를 상당 수준 억제할 수 있으며, 콘크리트의 초기 수축을 완전히 보상할 수 있다는 결과가 밝혀졌다(Justs et al, 2015). 따라서 프리웨팅한 LWA는 고밀실한 복합체의 자체 건조와 수축을 최소화하는 효과적인 재료로 사용될 수 있다.

본 연구에서는 밀실도가 높은 콘크리트의 내부 수화 메커니즘을 기반으로 폐유리발포비드(Waste glass bead:WGB)의 포수 특성을 활용하여 HSCC의 건조수축 억제 평가에 관한 연구의 일부로, WGB가 기존 내부 수화 관련 연구에 고려된 다양한 LWA와 같이 내부의 미수화 Si 및 반응물을 저장시킬 수 있는지 검토하였다. 또한, WGB를 프리웨팅하여 포수 골재가 내부 수화를 향상시키는 효과를 확인하고 열역학 모델링을 통해 재령에 따른 수화 경향을 파악하였다.

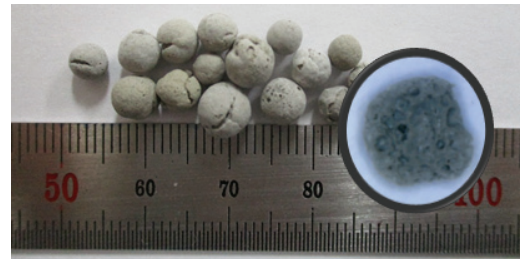


Fig. 1. Waste glass bead

2. 실험 계획

2.1 사용 재료

시험체 제작을 위해 사용한 재료로 보통포틀랜드 시멘트 (SsangYong C&E)와 실리카흄(Elkem Silicones)은 바인더로 사용되었다. 실리카 파우더(SAC Materials)는 충전재로 사용하였으며 효과적인 비빔을 위해 UHPC용 폴리카보산계 고성능 감수제(FLOWMIX 3000S)을 사용하였다. 매트릭스 내부의 미반응 수화물 저감을 위해 내부 수분 공급 매개체로 사용된 폐유리발포비드(Waste glass bead:WGB)는 Fig. 1과 같이 입경 0.05–6.00 mm이며 절건밀도 0.89 g/cm³이다. 폐유리발포비드는 폐기된 유리를 수집하여 미세한 크기로 파쇄한 뒤 900 °C 이상의 특수한 열처리 과정을 거치게 된다. 이때, 폐유리의 Si 성분 구조가 내부 팽창을 일으킨 것으로, 내부에 무수한 공극이 발생하게 된다. 또한, 자원 재활용을 목적을 가지고 있으며 제조과정에서 발생한 공극으로 인해 흡수율은 13.04 %로 높은 함수 특성을 가진다. WGB의 물리 화학적 특성은 Table 1에 나타냈다.

본 연구에서는 재령 기간에 따라 시험체의 수화 생성물 형성을 효과적으로 관찰하기 위해 변수로 작용할 수 있는 보강 섬유와 규사를 제외하였다. 시험체 제작에 사용된 바인더 재료의 화학 조성은 Table 2에 나타내었으며, 물리 특성은 Table 3에 나타내었다. Table 4는 시험체 제작을 위한 배합표이며, 양생조건과 WGB의 혼합 비율에 따른 각 시험체에 기명하였다. WGB는 단위부피당 대비 첨가되어 페이스트량 감소에 따른 강도 저감을 보완하였다. 바인더는 5 분간 건비빔을 실시한 뒤 물과 혼화제를 첨가하여 각 재료들이 혼합

Table 1. Physical and chemical properties of Waste glass bead (WGB)

FM	Stability (%)	Density of surface dry aturation (g/cm ³)	Density in absolute dry state (g/cm ³)
5.82	4.50	1.00	0.89
Absorption rate (%)	Clay lump (%)	Loss on ignition (%)	Chloride (%)
13.04	0.13	0.10	0.00

Table 2. Chemical composition of binder

(wt.%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	K ₂ O
C	66.79	16.14	4.40	2.47	0.08	3.83	1.18
SF	0.02	99.00	0.30	0.01	0.05	0.05	0.02
SP	0.05	99.00	0.30	0.05	0.05	0.05	0.05

C:Cement, SF:Silica Fume, SP:Silica Powder

Table 3. Physical composition of binder

	Specific gravity	Fineness (cm ² /g)	Loss ignition (%)
C	3.15	3,200	0.97
SF	2.50	200,000	-
SP	2.65	200,000	0.01

C:Cement, SF:Silica Fume, SP:Silica Powder

Table 4. Mix proportions of mortar

ID	C	SF	SP	W	SPA	WGB
P	1	0.23	0.33	0.3	0.02	0
R5						0.05
R10						0.10
R20						0.20

C:Cement, SF:Silica Fume, SP:Silica powder, W:Water, SPA:SP Admixture, WGB:Waste glass bead

될 수 있게 2 분간 추가 비빔을 진행하였다. 이후 WGB를 첨가하고 난 뒤 약 2 분간 혼합 시간을 추가하였다. 비빔 과정이 끝난 굳지 않은 페이스트는 Ø 100*200 mm 몰드에 타설되었으며, 상온 기건 양생(20 °C, 55 %)을 수행하였다.

2.2 실험 방법

시험체는 재령 1, 3, 28, 56일에 압축강도를 측정하였으며, 재령 3일과 56일에 XRD, TGA, Si NMR을 측정하였다. 해당 분석은 본 연구에서 초기 재령(3일차)과 장기재령(56일차)를 설정하여 각 재령일의 수화 생성물과 Si 수화도를 비교 분석하고자 하였다. 수화물 조성 분석에 요구되는 시험체는 각 재령일별 압축강도를 측정할 시험체에서 수집하였다. WGB가 혼입된 경우, 시험체 정중앙에서 50 × 100 mm 범위로 샘플링 구간을 선정하여 페이스트의 분말 시료를 채취하였다. 각 재령일에 채취된 시료는 용매교환법에 따라 분석 표준상태를 유도하였으며 시험 분석 이전까지 실리카겔에 의해 건조상태를 유지하였다.

XRD는 PANalytical X'Pert PRO-MPD(KBSI 대구센터)로 측정하였으며, TGA는 TA Instruments Q600(KBSI 부산센터)으로 측정하였다. 29Si MAS NMR은 INOVA 600 spectrometer(KBSI 서울 서부센터)로 측정하였다. 내부 양생의 Si 수화도를 측정하기 위해 열역학 모델링을 수행하였으며, Gibbs energy minimization software GEM-Selektor를 활용하여 실험적으로 얻은 클링커의 반응도를 기반으로 계산하였다(Lothenbach et al. 2019). WGB를 혼입한 HSCC의 반응도는 XRD Lietveld refinement method로 설계되었으며 Parrot Killoh's hydration model을 참고하여 수화 모델링을 수행하였다(Swaddiwudhipong et al. 2002).

3. 실험 결과

3.1 압축강도

WGB를 혼입한 HSCC 시험체의 압축강도 시험결과는 Fig. 2에 나타내었다. 시험체 평균 압축강도는 P, R5, R10, R20이 62.1, 50.3, 39.6, 35.5 MPa로 측정되었다. 본 시험체는 상온 기건양생을 통해 시험체 내부 실리카 성분의 활성 반응이 부족하여 강도발현은 P 시험체 기준 최대 60 MPa 수준으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. WGB가 혼입된 경우 최대 약 43 %정도의 강도 저감이 나타났다. 혼입된 WGB는 시험체의 압축강도를 일정 수준 저하시키는데 영향을 미친 것으로 판단되며, 최대 20 % 혼입시 미혼입 시험체 대비 50 % 수준의 강도가 발현되는 것으로 나타났다. 일반적으로 LWA를 사용한 콘크리트는 밀도를 감소시키는 기여가 있는 반면, 기계적 강도를 감소시키는 경향이 있다(Alsam et al. 2017). 따라서, 압축강도 저하는 페유리발포비드의 LWA로서 기계적 강도가 낮아 발생하는 것으로, WGB의 부피 함량이 높아짐에 따라 발생하는 골재 파괴로 인한 강도 저감으로 보인다(Wu et al. 2017).

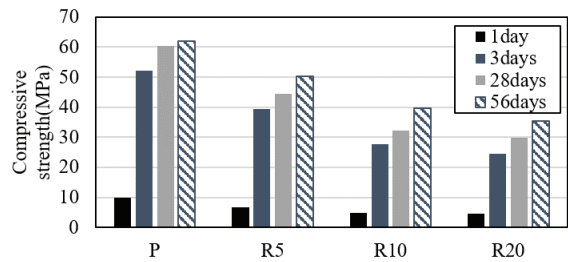


Fig. 2. Strength

3.2 XRD 분석

Fig. 3, 4와 같이 WGB를 사용한 HSCC의 대표적인 XRD를 재령 3일과 재령 56일에서 확인할 수 있다. 대부분의 시험체는 일반적으로 Calcite, Alite, Portlandite의 주요 수화반응물이 나타났다. Quartz와 함께 Rutile이 다수 나타나고 있으며, 이중 Rutile은 결정질 내부 표준 시료로 내부 표준 혼합량의 기준을 보정하기 위한 내부표준방법에 이용된 것이다(Klug and Alexander1974). HSCC는 재령일에 상관없이 에트링가이트가 일부 발견되었다. 이는 16.2°에서 측정되었으며, WGB의 혼입량과 관계없이 피크가 나타났다. 3일 재령에서 확인된 Alite의 비율은 WGB의 혼입량이 증가함에 따라 형성 수준이 증가하는 경향을 보였다. 이는 32.5°, 51.6°, 38.0°에서 확인할 수 있다. R10 시험체는 3일차, 56일차 재령에서 피크 강도가 다른 시험체에 비해 다소 높은 것으로 나타났으며, 이는 WGB의 혼입율 10 %가 페이스트

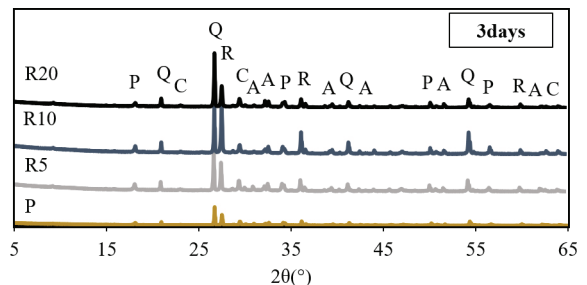


Fig. 3. XRD of 3days

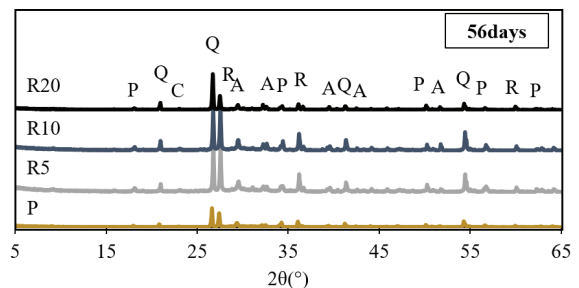


Fig. 4. XRD of 56days

내부 수화물 형성 비율 향상에 영향을 다소 미치는 것으로 판단된다. 내부표준방법을 활용하여 분석한 시료의 경우 무수물의 정규화를 통해 나타나는 수산화칼슘의 정량화 결과는 다음과 같다. 3일 재령의 P, R5, R10, R20은 각각 2.9 %, 1.9 %, 4.2 %, 4.5 %로 나타났으며, 56일 재령의 RP, R5, R10, R20은 각각 1.5 %, 1.0 %, 1.2 %, 1.2 %로 측정되었다. Fig. 4 및 5에 생성된 수화물은 P:Portlandite, C:Calcite, A:Alite, R:Rutile, G:Gypsum, Dipotassium sulfate(VI), Q:Quartz, E:Ettringite와 같다.

3.3 TGA 분석

Fig. 5, 6은 HSCC 시험체의 DTG/TGA 결과를 나타낸 것으로, 재령 3일과 56일의 시료를 측정하였다. R10 시험체는 초기 재령에서 R20과 유사한 수준의 중량 감소를 보였지만, 56일 재령에서 중량 감소가 가장 큰 것으로 측정되었다. 이는 R10의 XRD 피크 강도 세기와 유사하게 가장 많은 양의 수화물이 형성된 것으로 예상할 수 있으며, WGB 10 % 혼입 시험체의 수화도가 더욱 높을 것으로 추정된다. 초기 재령의 포틀란다이트는 재령일이 증가할수록 일부 수화에 소모되어 포졸란 반응이 진행되고 있는 것으로 사료된다(Bogers et al. 2010; Jeong et al. 2015; Lothenbach et al. 2016; Yoon et al. 2020),

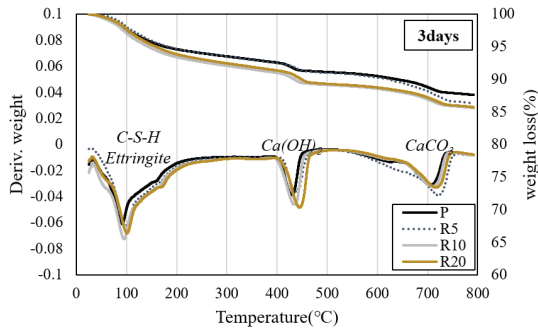


Fig. 5. TGA of 3days

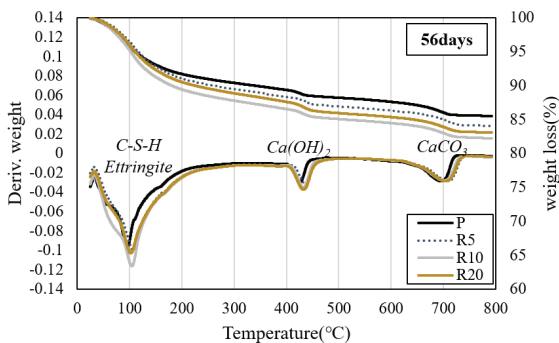


Fig. 6. TGA of 56days

3.4 Si NMR

WGB를 20 % 혼입한 HSCC(R20)의 ²⁹Si MAS NMR 분석 스펙트럼은 Fig. 7과 8에 나타났다. 기존 문헌을 참고하여 특성 구성 피크 수를 선정된 뒤 OriginPro를 사용하여 시험체의 각 피크를 에몰레이션하여 추정된 카이제곱이 10~60에 도달할 때까지 시뮬레이션을 반복하였다(Seo et al. 2021). HSCC 제작에 사용된 원재료 중 시멘트의 비정질 성분은 Q0와 관련된 -71.3 ppm에서 좁은 공명을 보여주었고 이는 belite(C₂S)와 관련된 피크이다. R20 시험체는 초기 재령에서 큰 면적을 나타냈다. C-S-H 내에 Si 사슬의 존재를 확인할 수 있는 Q1 및 Q2의 공명은 -79 ppm 및 -85 ppm에서 나타나며 R20는 재령일이 증가함에 따라 상대적인 면적이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 장기재령에서 포졸란 반응도가 점차 증가하는 것으로 판단된다(Lee et al. 2018; Walkley and Provis. 2019). 실리카

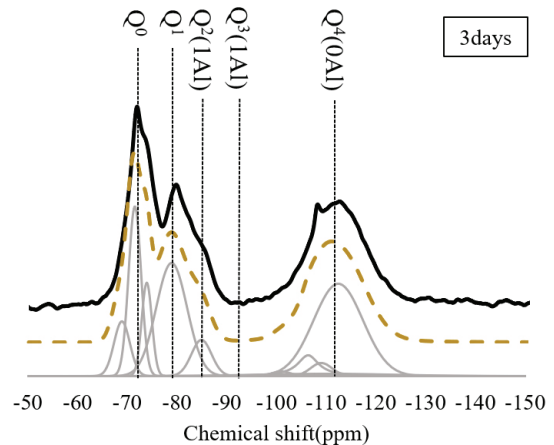


Fig. 7. ²⁹Si NMR of 3days

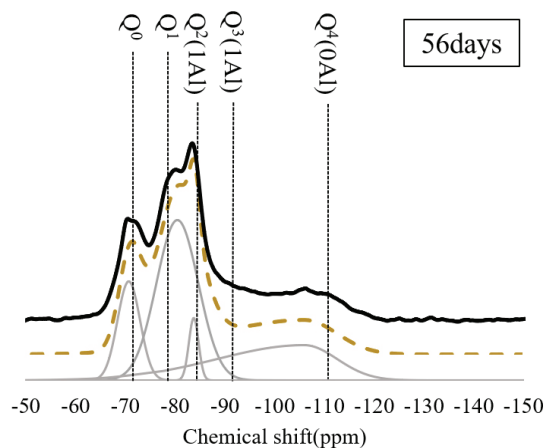


Fig. 8. ²⁹Si NMR of 56days

흡은 Q4와 관련된 -109,1 ppm에서 피크가 나타났으며, 실리카 파우더 또한 micro silica의 존재를 나타내는 -112,5 ppm에서 피크를 확인할 수 있었다(Lee et al, 2018; Lothenbach et al, 2011; Love et al, 2007; Girao et al, 2010). 실리카 파우더 성분의 낮은 포졸란 활성 반응으로 인해 상당한 양의 마이크로 실리카가 잔여되어 있지만, 재령일이 증가함에 따라 미반응 상태가 감소하는 것으로 나타났다.

3.5 열역학 모델링

재령일이 증가함에 따른 R20의 열역학 모델링 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 주요 수화 생성물은 Ettringite, Monosulfate, C-S-H, Portlandite 등으로 예측되며, Rietveld 분석 결과를 바탕으로 분석하였다. Pre-wetting된 WGB를 혼입한 샘플 내부의 수화 반응이 진행됨에 따라 겔 상의 고형물의 부피가 증가하는 결과는 XRD, NMR Si 결과와 일치함을 의미한다. C-S-H의 Ca/Si 비율의 변화는 Portlandite의 존재 및 소비와 밀접한 관련이 있으며, 이는 Portlandite가 완전히 소모됨에 따라 비율이 감소하기 시작함을 보여준다(Kim et al, 2021). 실험적으로 관찰된 결과와 열역학적 계산 사이에 나타나는 일부의 불일치는 AFm 상의 부재 등으로 인한 오차로 고려될 수 있다. Fig. 9는 양생 기간이 증가함에 따라 C-S-H 겔의 생성은 증가되는 결과를 보여주었다. 또한, 내부 수분이 일정량 유지되는 것으로 보아 WGB에 프리웨팅된 수분이 외부로 배출되며 양생 기간 동안 지속적인 내부 수화가 진행됨으로 판단된다.

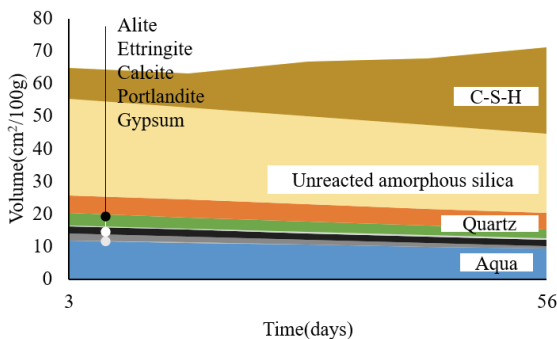


Fig. 9. Thermodynamic modeling

4. 결론

본 연구에서는 초미립자를 활용하는 HSCC의 내부 수화도를 증진시키기 위해 경량골재로 폐유리발포비드(WGB)를 사용하여 재령일에 따른 내부 수화 특성을 조사하였다. 이 연구에서 얻은 결과

는 프리웨팅된 WGB의 내부 수화 증진의 상호작용에 대한 심층적인 관찰을 나타내는 것으로, 주요 연구 결과는 아래에 요약되었다.

1. HSCC 시험체의 압축강도는 양생환경에 관계없이 WGB의 혼입률이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이는 혼입된 WGB의 낮은 기계적 강도로 인해 발생하는 것으로 WGB의 부피 함량이 증가함에 따라 나타나는 강도 저감으로 보인다.
2. XRD 결과, WGB의 혼입률이 증가함에 따라 Alite 등의 생성물 형성 수준이 증가하는 것을 확인하였다.
3. 열중량 분석 결과, R10과 R20 시험체가 재령 56일에서 가장 높은 중량 손실을 나타냈다. 해당 결과를 바탕으로 NMR spectrum 분석을 수행하였으며, Q1/Q2 비율에 따라 포졸란 반응의 활성화가 증진되는 경향을 확인하였다.
4. 열역학 모델링을 통해 매트릭스 내 주요 수화 생성물의 반응에 대한 상호작용을 파악하였다. 재령일이 증가함에 따라 내부 수분 감소 속도는 느린 것으로 나타났으며, 이는 프리웨팅된 WGB에서 수분이 배출되어 지속적인 내부 양생이 가능한 것으로 사료된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 논문은 2020년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1C1C101403812).

References

- Asalm, M., Shafiqh, P., Nomeli, M.A., Jumaat, M.Z. (2017). Manufacturing of high-strength lightweight aggregate concrete using blended coarse lightweight aggregates, *Journals of Building Engineering*, **13**, 53–62.
- Bentz, D.P., Lura, P., Roberts, J.W. (2005). Mixture proportioning for internal curing, *Concrete International*, **27(2)**, 35–40.
- Borges, P.H., Costa, J.O., Milestone, N.B., Lynsdale, C.J., Streatfield, R.E. (2010). Carbonation of CH and C-S-H in composite cement pastes containing high amounts of BFS, *Cement and Concrete Research*, **40(2)**, 284–292.
- Girao, A.V., Richardson, I.G., Taylor, R., Brydson, R.M.D. (2010). Composition, morphology and nanostructure of C-S-H in 70 %

- white Portland cement-30 % fly ash blends hydrated at 55 °C, *Cement and Concrete Research*, **40(9)**, 1350-1359.
- Jeong, Y., Park, H., Jun, Y., Jeong, J.H., Oh, J.E. (2015). Microstructural verification of the strength performance of ternary blended cement systems with high volumes of fly ash and GGBFS, *Construction and Building Materials*, **95**, 96-107.
- Justs, J., Wyrzykowski, M., Bajare, D., Lura, P. (2015). Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, **76**, 82-90.
- Klug, H.P., Alexander, L.E. (1974). X-ray Diffraction Procedures: for Polycrystalline and Amorphous Materials, 2nd Edition.
- Kim, S., Lee, N., Lee, H. K., & Park, S. (2021). Experimental and theoretical studies of hydration of ultra-high performance concrete cured under various curing conditions, *Construction and Building Materials*, **278**, 122352.
- Love, C.A., Richardson, I.G., Brough, A.R. (2007). Composition and structure of C-S-H in white Portland cement-20 % metakaolin pastes hydrated at 25 °C, *Cement and Concrete Research*, **37(2)**, 109-117.
- Lothenbach, B., Scrivener, K., Hooton, R.D. (2011). Supplementary cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, **41(12)**, 1244-1256.
- Lothenbach, B., Durdzinski, P., De Weerd, K. (2016). Thermogravimetric analysis, *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*, **1**, 177-211.
- Lee, N.K., Koh, K.T., Kim, M.O., Ryu, G.S. (2018). Uncovering the role of micro silica in hydration of ultra-high performance concrete(UHPC), *Cement and Concrete Research*, **104**, 68-79.
- Lothenbach, B., Kulik, D.A., Matschei, T., Balonis, M., Baquerizo, L., Dinesa, B., Miron, G.D., Myers, R.J. (2019). Cemdata18: a chemical thermodynamic database for hydrated Portland cements and alkali-activated materials, *Cement and Concrete Research*, **115**, 472-506.
- Neville, A.M. (1995). *Properties of Concrete*, Longman London.
- Neville, A., Aitcin, P.C. (1998). *High performance concrete—an overview*, *Materials and Structures*, **31(2)**, 111-117.
- Ozawa, M., Parajuli, S.S., Uchida, Y., Zhou, B. (2019). Preventive effects of polypropylene and jute fibers on spalling of UHPC at high temperatures in combination with waste porous ceramic fine aggregate as an internal curing material, *Construction and Building Materials*, **206**, 219-225.
- Pedro, D., De Brito, J., Evangelista, L. (2017). Evaluation of high-performance concrete with recycled aggregates: use of densified silica fume as cement replacement, *Construction and Building Materials*, **147**, 803-814.
- Swaddiwudhipong, S., Chen, D., Zhang, M.H. (2002). Simulation of the exothermic hydration process of Portland cement, *Advances in Cement Research*, **14(2)**, 61-69.
- Sun, Y., Yu, R., Shui, Z., Wang, X., Qian, D., Rao, B., Huang, J., He, Y. (2019). Understanding the porous aggregates carrier effect on reducing autogenous shrinkage of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) based on response surface method, *Construction and Building Materials*, **222**, 130-141.
- Seo, J., Kim, S., Jang, D., Kim, H., Lee, H.K. (2021). Internal carbonation of belite-rich Portland cement: an in-depth observation at the interaction of the belite phase with sodium bicarbonate, *Journal of Building Engineering*, **44**, 102907.
- Wu, Z., Shi, C., He, W. (2017). Comparative study on flexural properties of ultra-high performance concrete with supplementary cementitious materials under different curing regimes, *Construction and Building Materials*, **136**, 307-313.
- Walkley, B., Provis, J.L. (2019). Solid-state nuclear magnetic resonance spectroscopy of cements, *Materials Today Advances*, **1**, 100007.
- Yoon, H.N., Seo, J., Kim, S., Lee, H.K., Park, S. (2020). Characterization of blast furnace slag-blended Portland cement for immobilization of Co, *Cement and Concrete Research*, **134**, 106089.

폐유리발포비드를 혼입한 고강도 시멘트 복합체의 수화 특성

본 연구에서는 고강도 콘크리트 및 시멘트 복합체의 밀실한 내부 구조로 인한 급격한 내부 습도 저하 및 수화도 저하 등의 영향을 파악하고자 하였다. 내부 Si 수화도 변화 검증을 위해 폐유리발포비드를 경량골재로 사용하였으며, 종장기에 걸쳐 내부 미반응 수화물의 저감 및 수화물 형성 경향을 파악하였다. 폐유리발포비드는 5, 10, 20 % 혼입되었으며 프리웨팅하여 사용하였다. 폐유리발포비드의 혼입률이 증가함에 따라 강도는 감소하는 경향을 보였다. 이와 함께 XRD 분석, TGA 분석 및 Si NMR 분석을 통해 프리웨팅된 폐유리발포비드의 혼입률이 내부에 증가할 때, 페이스트에 수분이 공급되는 것으로 내부 Si의 수화 정도는 달라지는 것으로 판단된다.