

폐유리발포비드를 혼입한 시멘트 복합체의 수화특성

Hydration characteristics of cement composites using waste glass beads



지성준 Sung-Jun Ji
충남대학교 건축공학과 석사과정
E-mail : dtp05016@naver.com



편수정 Su-Jeong Pyeon
충남대학교 건축공학과 박사과정
E-mail : pyeonsj@naver.com



김규용 Gyu-Yong Kim
충남대학교 건축공학과 교수
E-mail : gyuyongkim@cnu.ac.kr



남정수 Jeong-Soo Nam
충남대학교 건축공학과 교수
E-mail : j.nam@cnu.ac.kr

1. 머리말

전세계적으로 기후변화를 필두로 하여 환경에 대한 오염과 보존에 대한 관심과 요구가 지속되고 있다. 최근에는 탄소중립(Net zero)이 시행됨에 따라 국제적으로 탄소배출, 특히 이산화탄소의 배출을 저감하기 위한 노력이 집중되고 있다. GABC(Global Alliance for Building and Construction)보고서에 따르면, 2020년 기준 건축물 시공에서 사용된 에너지는 전체 에너지 사용량의 12%를 차지하며 이를 이산화탄소 배출량으로 치환하면 20%에 달한다고 보고하였다. 또한, 국제에너지기구는 전 세계적으로 2019년 기준 4.1 Gton이 생산되었다고 보고하였으며, 이는 향후 10년동안 완만히 증가할 것이라고 예상하였다. 시멘트를 생산하는 과정에서 클링커를 소성시키는 단계에서 대부분의 이산화탄소가 발생하게 되며, kg 당 약 1kg의 이산화탄소를 배출하는 것으로 보고되고 있다^[1].

이에 연간 발생하는 막대한 양의 이산화탄소를 줄이기 위해 시멘트를 일부 대체하거나 더 나아가 지오폴리머와 같이 시멘트를 사용하지 않는 콘크리트에 대한 연구가 계속되고 있다. 시멘트 대체 재료(SCM, Supplementary Cementitious Materials)로는 주로 산업 부산물(고로슬래그 미분말, 플라이애쉬, 실리카 흙 등)을 사용하였고 현재까지 다양한 연구 개발을 통해 건설 분야의 환경 문제에 대응할 수 있는 기술로 발전해 왔다.

한편, 산업화와 도시의 확장은 생활폐기물의 배출로 인해 환경 문제를 발생시키고 있다. 폐기물의 일부는 분리배출을 통해 재활용하지만 현재에는 매립지가 부족하여 큰 문제가 되고 있다. 많은 연구자들은 바텀애시, 폐플라스틱, 페타이어, 폐유리 등의 폐자원을 가공하여 콘크리트의 골재를 대체하기 위해 시도하고 있다.

그중 폐유리는 주로 유리병을 파쇄하여 잔골재로 사용하거나 미분말 형태로

만들어 시멘트를 대체하기 위한 소재로 연구가 진행되고 있다. 최근에는 폐유리 미분말을 발포시켜 생산하는 폐유리발포비드(Waste glass bead; WGB)가 등장하였다. 방음재, 단열재 등의 건축 자재와 인공모래를 제조하여 생활용품 제작 또는 복토용으로도 활용할 수 있다. WGB는 발포하여 제조하는 생산과정에 의해 다공성을 갖게 된다. 이전의 연구는 프리 웨팅(pre-wetting)한 다공성 물질을 콘크리트에 혼입하여 건조수축을 완화하고 내부 수화도를 향상시키는 연구가 다방면으로 진행되었다. 다공질의 경량골재를 사용한 콘크리트의 내부 양생 기법이 수축을 저감하는 효과와 더불어 경계성 등 다양한 장점을 갖는다고 보고하였다^[2]. 따라서, 본 고에서는 WGB가 폐자원을 재활용한 순환자원으로서 활용할 수 있는 가능성에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

2. 폐유리발포비드

WGB는 폐기된 유리를 수집하여 미세한 크기로 파쇄한 뒤 900℃ 이상의 특수한 열처리 과정을 거치게 된다. 이때, 폐유리의 Si 성분 구조가 팽창하여 경량골재와 유사한 내부에 무수한 공극이 발생한다. 제조과정에서 발생한 공극으로 인해 13.04%의 흡수율로 높은 흡수 특성을 가지게 된다. WGB의 물리·화학적 특성은 [표 1]에 나타내었다.



그림 1. 폐유리발포비드

[표 1] 폐유리발포비드의 물리·화학적 특성

FM	Stability (%)	Density of surface dry saturation (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

3. 폐유리발포비드를 혼입한 시멘트 복합체의 특성

3.1 폐유리발포비드를 사용한 시멘트 복합체 배합

WGB가 매트릭스의 내부 수화에 미치는 영향을 조사하기 위해 낮은 물시멘트비의 시멘트 복합체를 배합하여 분석을 진행하였다. [표 2]는 시험체 제작을 위한 배합표이다. 사용한 재료로 보통포틀랜드 시멘트와 실리카 흙을 바인더로 사용하였으며, 실리카 파우더는 충전재로 사용하였다. 감수제는 콘크리트의 효과적인 비빔을 위해 UHPC용 고성능 감수제를 사용하였다. WGB는 매트릭스 내부의 미반응 수화물을 저감시키기 위한 내부 수분 매개체로서 사용하기 위하여 프리 웨팅한 입도 0.05~6.00 mm를 사용하였다. 또한, 시험체의 수화 생성물 형성을 효과적으로 관찰하기 위하여 변수로 작용할 수 있는 보강 섬유와 규사를 제외하였다. 제작된 시멘트 복합체는 XRD, TGA, NMR 분석을 통해 WGB의 활용 가능성을 조사하였다.

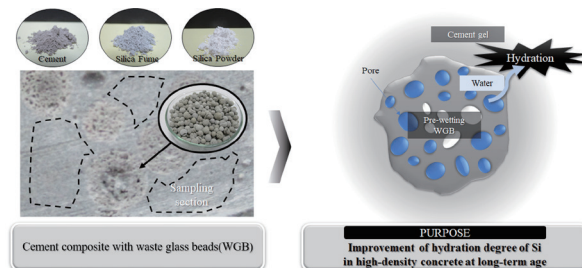


그림 2. WGB를 혼입한 시멘트 복합체 실험 요약

[표 2] 시멘트 복합체의 배합표(wt%)

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

3.2 XRD 분석

재령 3일과 56일에 WGB를 사용한 시멘트 복합체의 XRD 분석 결과를 <그림 3, 4>에 나타내었다. 그림에 표시한 수화물은 P:Portlandite, C:Calcite, A:Alite, R:Rutile, Q:Quartz와 같다. 대부분의 시험체에서 일반적으로 Portlandite, Calcite, Alite의 주요 수화반응물을 확인하였다. Quartz와 함께 Rutile도 다수 나타났다. 또한, 시험체에서는 재령일에 상관없이 16.2°에서 에트링가이트가 발견되었으며 WGB의 혼입량과 상관없이 피크가 나타났다. 3일 재령에서는 WGB의 혼입량이 증가함에 따라 32.5°, 51.6°, 38.0°에서 Alite의 형성수준이 증가하는 경향을 확인하였다. R10 시험체는 3일차와 56일차 재령일에서 피크 강도가 다른 시험체에 비해 피크의 강도가 높게 나타났다. 이는 WGB의 혼입률 10%가 페이스트 내부의 수화물 형성 비율을 향상시키는데 다소 영향을 미치는 것으로 판단된다. 내부표준방법을 활용하여 분석한 시료의 경우 무수물의 정규화를 통해 나타나는 Ca(OH)₂의 정량화 결과는 다음과 같다. P, R5, R10, R20의 3일 재령은 각각 2.9%, 1.9%, 4.2%, 4.5%로 나타났으며, 56일 재령은 각각 1.5%, 1.0%, 1.2%, 1.2%로 측정되었다. 시료의 성분변화를 <그림 5>에 간략히 나타내었다. R5의 경우 혼입량이 적어 P시험체와 비교하였을 때 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다고 사료된다. R10과 R20 시험체는 각각 3.0%p, 3.3%p 수화물이 증가하여 WGB의 혼입에 의해 수화물이 추가생성된 것을 확인하였다.

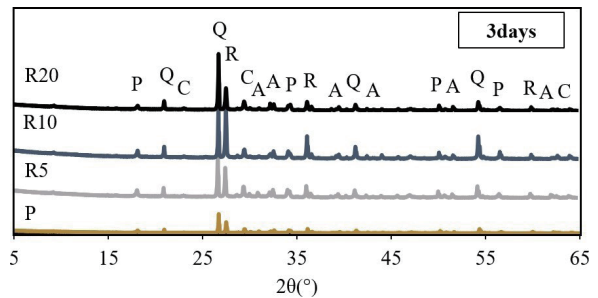


그림 3. 재령 3일 XRD 분석 결과

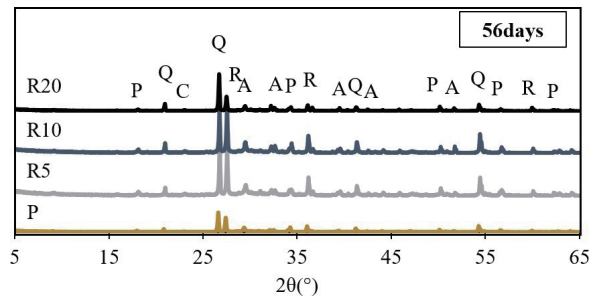


그림 4. 재령 56일 XRD 분석 결과

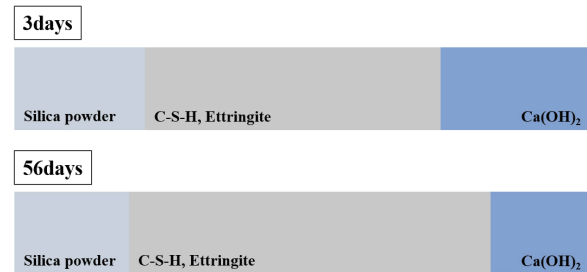


그림 5. XRD시료의 성분 비율 변화 (실제 비율과 다름)

3.3 TGA 분석

〈그림 6, 7〉은 시험체의 TGA 결과를 나타낸 것이다. R10 시험체는 재령 3일에서 R20과 유사한 중량 감소를 보였지만, 재령 56일에서 중량 감소가 가장 크게 측정되었다. 이는 XRD 피크 강도와 유사하게 가장 많은 양의 수화물이 형성된 것으로 예상할 수 있으며, WGB를 10% 혼입한 시험체의 수화도가 더욱 높을 것으로 추정된다.

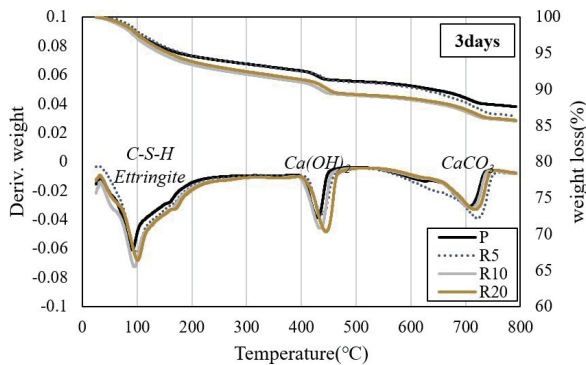


그림 6. 재령 3일 TGA 분석 결과

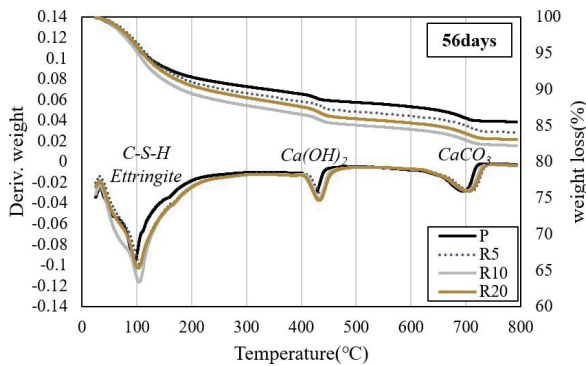


그림 7. 재령 56일 TGA 분석 결과

3.4 Si NMR

WGB를 20% 혼입한 시험체를 사용하여 ^{29}Si MAS NMR 분석을 수행하였으며, 그 결과를 〈그림 8, 9〉에 나타냈다. 기존 문헌을 참고하여 시험체의 각 피크를 에몰레이션하여 추정된 카이제곱이 10에 도달할 때까지 시물레이션을 반복하였다^[3].

시험체 제작에 사용된 원재료에서 시멘트의 비정질 성분은 Q0(-71.3 ppm)에서 공명을 보였고 이는 belite(C_2S)와 관련된 피크이다. C-S-H 내의 Si 사슬을 확인할 수 있는 공명은 Q1(-79 ppm) 및 Q2(-85 ppm)에서 나타났다. R20 시험체는 Q0의 면적은 초기 재령에서 크게 나타났지만 재령일이 증가함에 따라 감소하는 현상을 보였다. 반면, Q1과 Q2는 재령일이 증가하면서 면적이 증가하는 것을 확인하였다. 이는 장기재령에서 포졸란 반응도가 점차 증가하는 것으로 판단된다^[4,5]. 실리카 흡은 Q4(-109.1 ppm)에서 피크가 나타났으며, 실리카 파우더는 micro silica를 나타내는 -112.5 ppm에서 피크를 확인하였다^[3,5]. 실리카 파우더의 낮은 포졸란 활성 반응으로 인해 잔여 되어 있는 상당한 양의 마이크로 실리카는 재령일이 증가함에 따라 미반응량이 감소하는 것으로 나타났다.

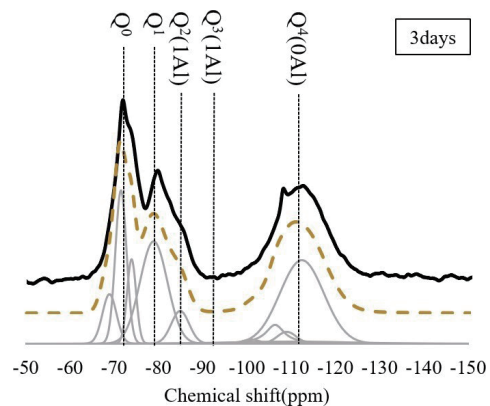


그림 8. 재령 3일 NMR 분석 결과

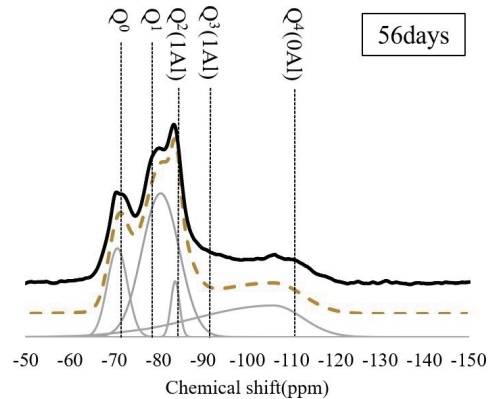


그림 9. 재령 56일 NMR 분석 결과

4. 맺음말

본 고에서는 WGB를 순환자원으로서 콘크리트에 적용할 수 있는 가능성을 내부 수화도 향상의 측면에서 소개하였다. WGB는 경량골재와 유사한 내부 공극이 많은 내부구조를 가지고 있다. 프리 웨딩한 WGB를 사용하면 수분매개물질로 작용하여 모르타르 또는 콘크리트가 경화된 이후에도 WGB의 공극에서 수분이 공급되어 추가적인 수화물이 생성될 수 있

다. 재령일이 증가할수록 시멘트 복합체 내부의 수화도가 향상되는 것을 확인하였으나, 향후 연구로서 모르타르 또는 콘크리트 배합에 WGB를 혼입하여 강도 및 내구성 평가가 필요하다고 사료된다. 이러한 연구를 통해 바텀애쉬, 철강 슬래그와 같은 폐자원의 재활용을 통해 건설용 콘크리트 또는 모르타르와 관련하여 탄소배출을 저감하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. VAN OSS, Hendrik G.; PADOVANI, Amy C. Cement manufacture and the environment part II: environmental challenges and opportunities. *Journal of Industrial ecology*, 2003, 7.1: 93-126.
2. BENTZ, Dale P.; LURA, Pietro; ROBERTS, John W. Mixture proportioning for internal curing. *Concrete international*, 2005, 27.2: 35-40.
3. SEO, Joonho, et al. 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*, 2021, 44: 102907.
4. LEE, Nam Kon, et al. Uncovering the role of micro silica in hydration of ultra-high performance concrete (UHPC). *Cement and Concrete Research*, 2018, 104: 68-79.
5. LOTHENBACH, Barbara, et al. Cemdata18: A chemical thermodynamic database for hydrated Portland cements and alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 2019, 115: 472-506.

담당 편집위원 : 이태규(세명대학교)

●● 학회 특별회원사 동정 안내

Magazine of RCR(한국건설순환자원학회지)은 계간으로 발행되어 회원을 비롯한 관련 업계, 학계, 유관기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다. 특별회원사의 최신 정보 및 기술현황 등의 홍보사항을 학회지에 무료로 게재하여 널리 홍보하고자 하니 관심 있는 특별회원사는 아래 사항을 참조하여 원고를 송부하여 주시기 바랍니다.

1. 특별회원사 홍보내용

특허, 신기술, 신제품, 수상실적, 세미나 및 시연회, 사회공헌 등

2. 원고 분량

A4 2~4매 내외이나 특별한 제한이 없음(그림 또는 사진 포함 가능)

3. 보내실 곳

한국건설순환자원학회 오경숙 국장(E-mail : rcr@rcr.or.kr, Tel. : 02-552-4728)