

경량 폐유리 골재를 혼입한 고강도 모르타르의 특성

Properties of High-Strength Mortars Mixed with Lightweight Waste Glass Aggregates

○남 정 수* 김 규 용* 편 수정** 최 병 철*** 김 문 규**** 지 성 준****
Nam, Jeong-Soo Kim, Gyu-Yong Pyeon, Su-Jeong Choi, Byung-Cheol Kim, Moon-Kyu Ji, Sung-Jun

Abstract

In this study, the properties of high-strength mortars mixed with lightweight waste glass aggregate. As Waste glass bead(WGB) incorporation increased, the strength of high-strength mortar decreased, but the effect varied depending on the surface roughness. WGB with rougher surface exhibited higher matrix strength efficiency. The improvement in elastic modulus (E^*) and microhardness (HIT) was observed at WGB incorporation rates of 30% and 50%. The results suggest that the hydration changes in the Interfacial Transition Zone (ITZ) between WGB and paste contributed to the enhanced properties. Further research should explore optimal incorporation ratio in different curing conditions to expand WGB applicability.

키워드 : 폐유리 발포비드, 내부양생, 계면전이영역, 압축강도, 나노인덴테이션

Keywords : Waste glass beads, Internal curing, Interfacial transition zone, Compressive strength, Nanoindentation

1. 서론

자원은 사용 후 폐기가 필수적이며 매립과 소각이 가장 일반적인 폐기 방법이다. 그러나, 매립은 매립지가 필요하고 소각은 탄소가 배출되기 때문에 환경오염에 대한 우려가 있다. 그 중에서, 폐유리는 사용 후 주로 매립되고 있기에 이를 재활용할 수 있는 방안이 필요하다. 건설 분야에서는 폐유리를 내부 양생 재료로써 페이스트의 수화도를 향상시켜 경량골재(Lightweight Aggregate, 이하 LWA)로 활용하기 위한 연구가 수행되었다.

콘크리트에서 적절한 양생은 콘크리트의 기계적 특성 및 내구성을 확보하기 위해 중요하다. 높은 수준의 내구성을 가진 콘크리트는 고강도 콘크리트(High Strength Concrete, 이하 HSC), 고성능 콘크리트(High Performance Concrete, 이하 HPC), 초고성능 콘크리트(Ultra High Performance Concrete, 이하 UHPC) 등이 있다. 그러나, 낮은 W/C 비율의 사용으로 인해 고내구성 콘크리트는 양생 중 시멘트의 수화와 그에 따른 건조 수축으로 인해 부피 변화가 발생할 수 있다(Askar et al. 2017). 수축을 저감하기 위해 콘크리트의 표면에서 수분이

손실되지 않도록 외부 양생 방법을 사용하는 경우가 많다(Audenaert & De Schutter 2002). 그러나 외부 양생은 수분이 콘크리트의 표층에서만 작용하고 내부로 전달되지 않기 때문에 W/C 비율, 투수성, 공극이 적은 HSC에는 적용하기 어렵다(Jensen. 2006., Xu et al. 2021.). 반면, 내부 양생은 콘크리트 내부의 상대습도(RH)를 유지하기 위해 사용한다. 이 과정에서 콘크리트 내부에 수분을 저장할 수 있는 재료를 사용하는데, 일반적으로 골재를 사용한다(Jensen, Lura. 2006., Xu. et al. 2021.). 내부 양생 재료의 수분은 시멘트 수화반응 동안 골재와 페이스트 사이의 습도 차이로 인한 모세관 압력에 의해 지속적으로 방출된다(Bentz, Snyder. 1999.).

Suzuki, Meddah & Sato(2009)는 재활용 페다공성 세라믹 굽은 골재를 콘크리트에 사용하여 내부 양생의 효과를 검토하였다. Cuevas & Lopez(2021)는 폐유리를 기반으로 한 발포유리 경량 골재를 혼입하여 콘크리트 내부 양생 재료의 개발에 대해 검토하였다. Yang et al.(2022)은 제지 슬러지를 공극 형성제로 사용하여 보크사이트 잔여물에서 미세 경량골재를 생산하고 고강도 모르타르에서 내부 양생 효과를 검토하였다. 위 연구 결과에 따르면, 초미립자 시멘트계 재료를 기반으로 한 건축 자재에 포수시킨 다공성 골재를 첨가하면 자기 수축 및 건조 수축을 크게 저감하고 장기 강도 발달에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다.

Pyeon et al.(2022.)은 선행 연구에서 열역학 모델링을 사용하여 고강도 시멘트 복합체(High Strength Cementitious Composite, 이하 HSCC)의 내부 수화도를 향상시키고 재령일에 따른 수화 과정을 검토하기 위해 폐유리 발포비드(Waste Glass Bead, 이하 WGB)를 LWA로 사용했을 때의 특성을 평가하였다. 사용된 WGB는 구형의 형태이다. 연구 결과, 동일한 비율의 WGB를 혼입했을 때,

* 충남대 스마트시티건축공학과 교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Smart City Architectural Engineering, Chungnam University, j.nam@cnu.ac.kr)

** 충남대 건축공학과 사회기반시설연구소 박사후연구원

*** 충남대 건축공학과 박사과정

**** 충남대 건축공학과 석사과정

이 연구는 2020년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. 과제번호: 2020R1C1C101403812

다른 양생 조건에서 수화물의 부피에서 차이가 존재하였으며, 이는 사전 포수된 WGB가 수분을 방출하여 양생기간 동안 내부에서 지속적으로 수분을 공급했다는 것을 의미한다. 그러나, WGB의 낮은 기계적 특성으로 인해 시험체의 압축강도를 감소시켰다. 또한, WGB의 매끄러운 표면으로 인해 페이스트와의 접착력이 감소하여 계면 전이 영역(ITZ)의 밀도가 감소하였다. 이에 따라, 강도에 미치는 영향을 완화하기 위한 추가 연구가 필요하다고 강조하였다. 따라서, 본 연구에서는 WGB의 표면 거칠기 및 혼입률에 따른 모르타르의 특성을 검토하였다. 또한, 나노인텐디션 측정을 통해 페이스트-ITZ-WGB 각 영역의 특성을 비교하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용 재료

본 연구에서는 결합재로서 보통 포틀랜드 시멘트(OPC), 실리카흙, 실리카 파우더를 사용하였다. 결합재의 화학적 성분은 표1에 나타났다. 골재는 규사를 사용하였다. 혼화제는 폴리카복실레이트계를 사용하였으며, 수화반응에 영향을 주지 않는 최소 함량을 고려하여 콘크리트의 유동성을 확보하기 위해 사용하였다.

표1. 결합재의 화학적 성분

성분(%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O
OPC	66.79	16.14	4.40	2.47	3.83	3.23	0.08
SF	0.02	99.00	0.30	0.01	0.05	0.05	0.05
SP	0.05	99.00	0.30	0.05	0.05	0.05	0.05

* SF: Silica Fume, SP: Silica Powder

WGB는 규산나트륨을 주성분으로 하는 페유리 분말을 원료로 하여 생산된다. 따라서 WGB는 알칼리-실리카(Alkali-Silica Reaction, 이하 ASR)의 영향을 받지 않는다. WGB는 특수 열처리 과정을 거치면서 Si 구조가 열팽창하여 LWA의 형상을 구성한다. 본 연구에서 사용한 WGB(B)와 WGB(CB)는 동일한 과정으로 제조되며, 제조 과정에서 구형을 형성하는 것은 B, 구형을 파쇄한 CB로 구분된다. WGB(B)는 표면 마찰이 적어 강도 저하, 재료 분리 등이 우려된다고 보고되었다(Pyeon et al. 2022.). 이를 개선하기 위해 WGB(B)를 연마하여 표면 마찰을 증가시켰다. LWA의 표면 형태는 흡수율에 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 WGB(B)와 WGB(CB)를 사용하여 표면 마찰의 개선 정도를 비교하였다.

일정한 온도와 습도에서 각각의 필터망에 습윤상태의 WGB(B, CB) 500g을 사용하여 흡수율과 탈착률을 조사하였다. 시간에 따라 방출된 물의 질량을 초기의 질량에서 나누어 탈착률을 계산하였다. 흡수율은 총 비율에서 탈착률을 차감하여 계산하였다.

그림1과 같이 입도가 0.05~5.00 mm인 WGB(B)와 입도가 0.05~3.00 mm인 WGB(CB)를 사용하였다. 그림2는 각각

WGB(B)와 WGB(CB)의 SEM 이미지이다. WGB의 표면 건조 포화 밀도는 1.00 g/cm³이고 절대 건조 상태의 밀도는 0.89 g/cm³이다. WGB(B)의 흡수율은 13.04%, WGB(CB) : 15.56%이다. WGB(CB)의 높은 흡수율은 내부양생 및 밀도를 향상시킬 수 있다. 이러한 특성을 고려하여 WGB를 48시간 동안 침지시키는 과정을 실시하였다. 이 과정은 일정한 환경(온도 25℃, 습도 55%)에서 무게가 변하지 않을 때까지 진행하였다.



그림1. 구형 WGB(B)와 파쇄형 WGB(CB)

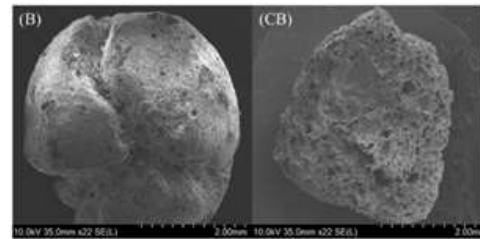


그림2. WGB(B, CB)의 SEM 이미지

2.2 시험체 제작

표2는 WGB(B) 및 WGB(CB)를 혼입한 시험체의 배합설계를 나타냈다. 배합비율은 선행 연구를 기반으로, 경량골재로서 오일팜 껍질의 유용성을 검토하기 위해 제안된 10%, 30%, 50%의 규사 대체 비율을 참고하여 본 연구에 적용하였다(Aslam et al. 2016.).

표2. 배합설계(wt.%)

ID	C	SF	SP	W	admixture	S	WGB(B)	WGB(CB)
P						1.0		
B10						0.9	0.1	
B30						0.7	0.3	
B50	1	0.26	0.30	0.30	0.03	0.5	0.5	
CB10						0.9		0.1
CB30						0.7		0.3
CB50						0.5		0.5

* C: Cement, SF: Silica Fume, SP: Silica Powder, S: Silica Sand

시험체 제작은 결합재와 규사를 건비빔 후, 물과 혼화제를 첨가하고 약 1분 30초 동안 혼합하였다. 이후 WGB(B) 또는 WGB(CB)를 혼입하고 약 1분 30초 동안 추가로 혼합하였다. 마지막으로, 몰드에 타설하고 항온항습 환경(20±2 ℃, 55±5%)에서 24시간 경화시킨다. 이후, 72

시간 동안 증기양생($80 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $90 \pm 5\%$)을 진행하였고 시험체를 알루미늄 테이프로 밀봉하고 180일까지 실온에서 경화하였다.

2.3 시험 방법

시험체의 압축강도는 KS L ISO 679에 의거하여 재령 1, 3, 7, 28, 180일에 측정하였다. 나노인텐테이션은 시멘트 페이스트-ITZ-WGB의 각 영역의 탄성계수 및 소성 경도를 측정하였다. 압자의 균일한 침투성을 위해 $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}$ 의 시험체를 제작하고 표면을 1,000, 1,500, 3,000 mesh로 연마하였다. 표면의 연마 정도는 중요한 요소이다. 압입은 $100\mu\text{N} \sim 5000\mu\text{N}$ 의 하중으로 최대 하중에서 10초 동안 유지하였다. 하중은 최대에 도달할 때까지 10 mN/min 의 일정한 속도로 증가하였다. 최대 하중에서 10초 후, 동일한 속도로 시험체에서 하중을 제거하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 압축강도

그림3은 각 WGB 타입별 시험체의 압축강도를 나타냈다. WGB(B)에서는 페이스트보다 WGB의 파괴가 먼저 발생하여 압축강도가 저하되었다. 이는 WGB 혼입률이 증가함에 따라 명확하게 나타났다. WGB(B) 대비 WGB(CB)의 강도가 높은 것은 골재의 거친 표면 및 작은 입도에 의한 것으로 사료된다.

한편, WGB를 혼입한 시험체는 장기적인 강도가 향상되었다. 이는 WGB의 높은 흡수율로 인해 시멘트 페이스트와 ITZ 결합력이 향상되었을 뿐만 아니라 WGB(CB)는 거친 표면으로 ITZ를 개선시켜 압축강도가 향상되었다고 사료된다. 장기적인 압축강도 관점에서, WGB(B)는 재령 28일에서 180일 사이에 40%의 강도 향상을 보였다. WGB(B)와 WGB(CB)의 압축강도 향상을 비교했을 때, WGB(CB)는 초기 강도 발현이 우수했지만, 장기 강도 발현은 WGB(B)가 더 높게 나타났다. 따라서, WGB의 형상과 시멘트 페이스트의 결합력이 유의미한 관계가 있음을 알 수 있다.

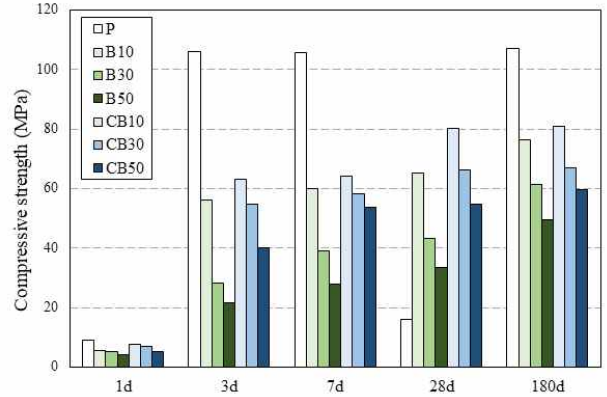


그림3. 재령일별 압축강도

3.2 나노인텐테이션

그림4는 나노인텐테이션 시험 후의 시멘트 페이스트-ITZ-WGB 영역의 탄성계수(E^*)와 소성 경도(HIT)를 재령일에 따라 나타냈다. 시멘트 페이스트, ITZ, WGB의 기계적 물성을 분석하여 각각의 E^* 및 HIT 값을 측정하였다. 또한, 시험체 단면에 대해 평균값으로 계산하였다. 탄성계수와 소성 경도는 각 단면마다 다르게 나타났다. 선행 연구에서는 이러한 차이가 수화 정도와 수화 생성물의 구조 변화에 의한 것으로 보고되었다. 또한, 페이스트와 ITZ에 존재하는 C-S-H의 탄성 특성이 단면의 탄성계수에 영향을 미칠 수 있다고 보고되었다(Constantinides & Ulm, 2004.).

WGB 영역에서는 유사한 탄성계수 및 소성 경도가 측정되었지만, 각 시험체는 WGB의 타입에 따라 ITZ-페이스트 영역에서 서로 다른 압입 정도와 탄성계수 값이 나타났다. B30 및 CB30 시험체의 ITZ 및 페이스트의 E^* 및 HIT는 다른 시험체보다 높았으며, 이는 거시적인 특성인 압축강도 측정결과와 일치하였다.

페이스트 영역에서는 B30보다 CB30에서 더 높게 나타났다. 또한, WGB 타입에 관계없이 혼입률 30%에서 가장 높게 도출되었다. 이는 포수된 WGB가 시험체 내부에 적절히 분포되어 있어 수분 배출에 의한 내부 양생이 효과적임을 알 수 있다.

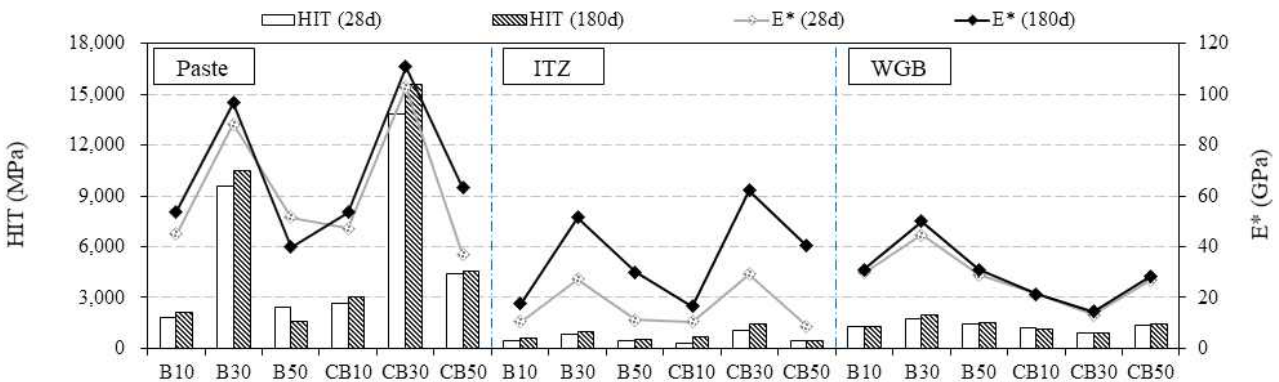


그림4. 페이스트-ITZ-WGB 영역별 소성경도(HIT) 및 탄성계수(E^*)

선행 연구에 따르면 ITZ와 페이스트 사이의 수화도 차이로 인해 LWA 표면으로부터 거리가 멀수록 경도가 감소하고 안정화되는 것으로 보고되었다(Mehta & Monteiro, 2014.). 또한, 포수된 LWA의 경우, 수분이 배출됨에 따라 ITZ 주변의 페이스트의 수화도와 밀도가 모두 크게 향상되었다고 보고되었다(Shen et al. 2017.). 이에 따라, WGB와 같은 다공성 재료는 강도를 저하시키지만, 내부 양생의 측면에서는 유리할 수 있다.

따라서, 나노인텐테이션 측정은 WGB의 혼입률이 30%, 50%에서 재령일이 경과할수록 향상되었으며, 이는 WGB 내부의 수분이 주변 시멘트 입자와 지속적인 수화반응을 발생시켜 ITZ를 점진적으로 개선하여 전반적인 강도가 향상되었다고 사료된다(Pyeon et al. 2023).

4. 결론

본 연구에서는 경량 폐유리 골재를 혼입한 고강도 모르타르의 특성을 검토하였으며, 주요 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) WGB 혼입률이 증가함에 따라 압축강도는 감소하였다. 그러나, 이러한 압축강도 변화는 WGB의 표면 거칠기에 따라 시험체마다 다르게 나타났다. WGB(CB)를 혼입하면 거친 표면 거칠기와 작은 입도로 인해 시험체의 압축강도가 더욱 높게 나타났다. 또한, WGB의 흡탈착 시험 결과와 비교하여 탈착점이 높을수록 압축강도가 높게 나타났다.
- (2) WGB(B)와 WGB(CB) 시험체를 비교한 결과, WGB의 혼입률이 30% 및 50%일 때, E*와 HIT가 개선되는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 WGB와 페이스트 사이의 ITZ 수화도 변화에 의한 것이라고 사료된다. 이 과정에서 WGB 내부의 수분이 방출되면서 시멘트 입자와의 수화 작용으로 인해 ITZ와 페이스트의 밀도가 높아졌다고 판단된다.

WGB의 적용 가능성을 확장하기 위해 다양한 양생 환경에서의 적합한 혼입률을 고려한 추가 연구가 필요하며, 이에 따라 WGB의 적용가능성이 높아질 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Askar, L. K., Tayeh, B. A., Bakar, B. A., & Zeyad, A. M. (2017). Properties of ultra-high performance fiber concrete (UHPC) under different curing regimes. *Int. J. Civ. Eng. Technol.(IJCET)*, 8(4), 965-974.
2. Audenaert, K., & De Schutter, G. (2002). Towards a fundamental evaluation of water retention tests for curing compounds. *Materials and Structures*, 35, 408-414.
3. Jensen, O. M., & Lura, P. (2006). Techniques and materials for internal water curing of concrete. *Materials and Structures*, 39, 817-825.

4. Xu, F., Lin, X., & Zhou, A. (2021). Performance of internal curing materials in high-performance concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 311, 125250.
5. Bentz, D. P., & Snyder, K. A. (1999). Protected paste volume in concrete: Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate. *Cement and concrete research*, 29(11), 1863-1867.
6. Suzuki, M., Meddah, M. S., & Sato, R. (2009). Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete. *Cement and concrete research*, 39(5), 373-381.
7. Cuevas, K., & Lopez, M. (2021). The effect of expansive agent and cooling rate in the performance of expanded glass lightweight aggregate as an internal curing agent. *Construction and Building Materials*, 271, 121505.
8. Yang, L., Ma, X., Liu, J., Hu, X., Wu, Z., & Shi, C. (2022). Improving the effectiveness of internal curing through engineering the pore structure of lightweight aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 134, 104773.
9. Pyeon, S., Kim, G., Lee, S., & Nam, J. (2022). Internal Curing Effect of Waste Glass Beads on High-Strength Cement Composites. *Applied Sciences*, 12(16), 8385.
10. Aslam, M., Shafiqh, P., Jumaat, M. Z., & Lachemi, M. (2016). Benefits of using blended waste coarse lightweight aggregates in structural lightweight aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 119, 108-117.
11. Constantinides, G., & Ulm, F. J. (2004). The effect of two types of CSH on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling. *Cement and concrete research*, 34(1), 67-80.
12. Monteiro, P. (2006). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Publishing.
13. Shen, P., Chen, W., Lu, L., Geng, H., & Li, Q. (2017). Effect of aggregate exposing and curing agent on the performance of exposed aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 156, 675-683.
14. Pyeon, S., Kim, G., Choi, B., Kim, M., Kitagaki, R., Choi, H., ... & Nam, J. (2023). Characteristics on compressive strength and microstructure of high-strength cementitious composites with waste glass beads. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02673.