

순환유리골재 지오폴리머 모르타르의 재료역학특성

Material and mechanical properties of geopolymer mortar using recycled glass aggregate



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



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



사수이 Sasui Sasui
충남대학교
건축공학과 박사 후 연구원
E-mail : sasui@cnu.ac.kr



유하민 Ha-Min Eu
충남대학교
건축공학과 박사과정
E-mail : wp05125@naver.com

1. 머리말

기후위기는 인간이 직면한 매우 중요한 문제 중 하나이며, 주로 산업화로 인한 온실가스 배출이 주된 원인이다^[1]. 대기 중 CO₂ 배출의 주요 원인으로는 건설을 위한 콘크리트 및 모르타르의 생산이 있다. 국제에너지기구는 전 세계적으로 2019년동안 4.1 Gton이 생산되었다고 보고하였으며, 이는 향후 10년동안 완만하게 증가할 것으로 예상하였다^[2]. 시멘트를 생산하기 위한 원료인 클링커는 kg 당 약 1kg의 CO₂(화석 연료 연소를 포함)를 배출하는 것으로 보고되고 있다^[3]. 시멘트 생산에서 발생하는 CO₂ 배출을 줄이기 위한 상당한 노력이 이루어지고 있다^[2, 4]. 연간 생산되는 막대한 양의 시멘트를 줄이기 위해서는 시멘트를 대체할 수 있는 광물성 혼화재와 같은 결합재를 사용하는 알칼리 활성 모르타르 혹은 지오폴리머가 대안이 될 수 있다. 실제로, 광범위한 CO₂ 배출과 과도한 에너지 소비를 줄이기 위해 포틀랜드 시멘트 기반 재료에 비해 환경 친화적이며 산업 폐기물 및 도시 폐기물을 전구체로 사용할 수 있어 알칼리 활성 재료(AAM)에 대한 연구가 증가하고 있다. 또한, 기존 콘크리트/모르타르에 사용되던 잔골재는 천연 모래로 사용하고 있는데, 이는 건설 부문의 높은 수요로 인해 급속히 고갈되고 있다^[5]. 또한, 천연 모래 공급을 위해 강과 산 모래를 채취하여 자연 환경을 파괴하였다. 이러한 자연 파괴로 인해 바다모래, 부순모래로 공급처를 변경하였지만, 이마저도 환경파괴와 지자체 및 주민 반대 등으로 한계가 있는 실정이며, 근본적인 해결책이 될 수 없다. 이러한 천연 모래의 채취와 자연환경 파괴는 산림지의 면적을 감소시키고, 이는 곧 지구온난화를 가속화하는 것이다. 따라서, 현재 전통적으로 이어져오던 건설산업에서의 콘크리트와 모르타르 생산은 점차 재활용, 순환, 친환경적인 방향으로의 전환이 반드시 필요하다.

한편, 산업화와 도시의 무분별한 확장은 생활폐기물 배출로 인해 환경 문제를 발생시킨다. 특히, 홍콩, 미국, 일본, 유럽과 같은 선진국의 경우, 소다라임유리(SLG)로 이루어진 유리병의 무분별한 배출과 매립으로 인해 환경 문제를 일으키고 있다. 더욱이 현재에는 매립지가 부족하여 더 큰 문제가 되고 있다. 현재, 전 세계적으로 약 4600만 kg의 SLG가 매립지에 퇴적되고 있으며, 2025년 말까지 약 67 % 증가할 것으로 예상된다. 유리병의 경우, 색이 구분되지 않거나 깨지면 재활용이 어려워 현재에도 약 60~70 %만이

[표 1] 지오폐리머 모르타르의 배합표

Batch:		G-0						
Sample ID		F100S0-G-0	F85S15-G-0	F70S30-G-0	F50S50-G-0	F30S70-G-0	F15S85-G-0	F0S100-G-0
Binders	FA	100	85	70	50	30	15	0
	GGBS	0	15	30	50	70	85	100
Aggregate	NS	100						
	GS	0						
Batch:		G-20						
Sample ID		F100S0-G-20	F85S15-G-20	F70S30-G-20	F50S50-G-20	F30S70-G-20	F15S85-G-20	F0S100-G-20
Binders	FA	100	85	70	50	30	15	0
	GGBS	0	15	30	50	70	85	100
Aggregate	NS	80						
	GS	20						
Batch:		G-40						
Sample ID		F100S0-G-40	F85S15-G-40	F70S30-G-40	F50S50-G-40	F30S70-G-40	F15S85-G-40	F0S100-G-40
Binders	FA	100	85	70	50	30	15	0
	GGBS	0	15	30	50	70	85	100
Aggregate	NS	60						
	GS	40						
Batch:		G-50						
Sample ID		F100S0-G-50	F85S15-G-50	F70S30-G-50	F50S50-G-50	F30S70-G-50	F15S85-G-50	F0S100-G-50
Binders	FA	100	85	70	50	30	15	0
	GGBS	0	15	30	50	70	85	100
Aggregate	NS	50						
	GS	50						
Batch:		G-75						
Sample ID		F100S0-G-75	F85S15-G-75	F70S30-G-75	F50S50-G-75	F30S70-G-75	F15S85-G-75	F0S100-G-75
Binders	FA	100	85	70	50	30	15	0
	GGBS	0	15	30	50	70	85	100
Aggregate	NS	25						
	GS	75						
Batch:		G-100						
Sample ID		F100S0-G-100	F85S15-G-100	F70S30-G-100	F50S50-G-100	F30S70-G-100	F15S85-G-100	F0S100-G-100
Binders	FA	100	85	70	50	30	15	0
	GGBS	0	15	30	50	70	85	100
Aggregate	NS	0						
	GS	100						

이는 시간이 지남에 따라 진행 중인 결합재의 반응이 강도 발현으로 이어진다는 것을 나타내었다. 또한, 모든 시험체 타입에서 GGBS의 양이 증가함에 따라 강도 증가가 관찰되었다.

이는 GGBS가 반응성 Ca를 매트릭스에 공급하여 매트릭스를 보다 균질하고 콤팩트하게 만드는 C-S-H형 겔을 형성시켰기 때문이다. 이는 FA보다 GGBS의 반응성이 더욱 높기

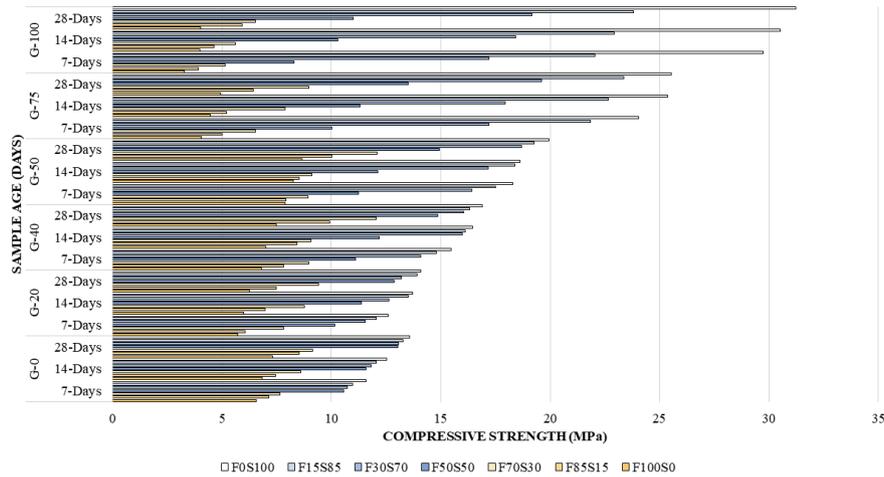


그림 2. 지오폐리머 모르타르의 압축강도

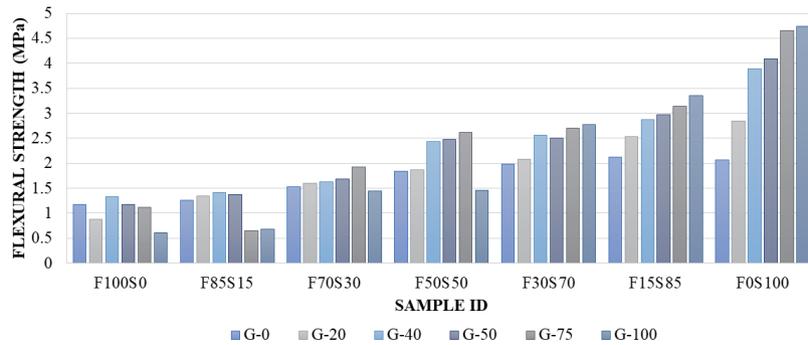


그림 3. 지오폐리머 모르타르의 휨강도

때문이다. 한편, GS가 20 wt.% 이상으로 증가함에 따라 점차 강도가 증가하였으며 FA가 많이 함유된 시험체에서 가장 높은 강도를 달성한 시험체는 GS가 50 wt.% 포함된 시험체였다. 반면 GGBS가 풍부한 샘플에서는 GS가 최대 100 wt.% 까지 증가함에 따라 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 모든 시험체 중 GGBS가 풍부한 시험체에서 가장 높은 강도를 나타내었다. 휨 강도의 경우, <그림 3>에 나타난 것처럼 0~100 wt.% GS를 포함하는 다양한 FA/GGBS로 구성된 지오폐리머 모르타르의 28일 압축 강도와 유사한 경향이 확인되었다.

3.2 내구성능

GS를 사용한 지오폐리머 모르타르의 내구성을 평가하기 위하여 시험체를 5% 농도의 Na_2SO_4 용액과 2% H_2SO_4 용액에 각각 침지하였다. 5% 농도의 Na_2SO_4 용액에 침지한 후, 표면에 백색층이 형성되는 것으로 확인하였다. 시료 표면의 백색 형성물을 채취하여 80°C에서 24시간 동안 진공 건조하였다. 건조된 형성물의 화학적 조성을 분석하기 위해 Pt 코팅을 한 후, 주사전자현미경(SEM)을 이용한 EDS 분석을 수행

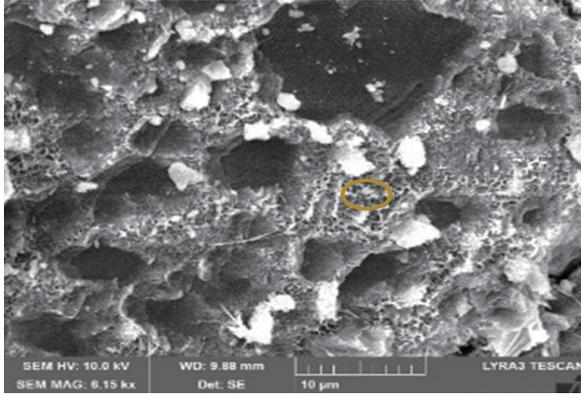


그림 4. 지오폐리머 모르타르의 황산염에 의한 백화현상

하였다. 시료 표면의 백색 형성물은 <그림 4>에서 볼 수 있듯이, 결정화된 Na_2SO_4 염의 형성을 나타내는 나트륨과 황으로 구성된 매끄러운 입자를 보여주었다. 표면 백화 현상은 고농도 황산나트륨이 함유된 시료의 건조 과정에서 발생하는 것으로 보고되었다. 본 연구에서는 다공성이 큰 콘크리트와 모르타르에서 알칼리 황산염의 최대 침투로 인해 형성되는 백화 현상인 것으로 확인되었다.

지오폐리머 모르타르 시험체를 Na_2SO_4 용액에 0, 14, 28 및 90일 동안 침지한 후, 잔류 압축 강도를 평가하였다. 평균 강도의 증가와 손실은 각 침지 기간에서 각 시험체의 3개 샘플(표준편차 범위는 0.4~0.6)에 대해 측정하였다. 백분율로 계

산된 강도 변화율은 <그림 5>에 나타내었다. 황산나트륨에 대한 GS 지오폐리머 모르타르의 저항성은 샘플 공극률에 크게 의존하는 것으로 나타났다. FA가 풍부한 시험체에 최대 50 wt.%의 GS를 혼입하면 다공성을 감소시켜 황산나트륨 용액에 대한 반응을 제한하였다. FA가 풍부한 시험체에서 GS 혼입량이 50 wt.% 이상으로 증가하면서 다공성이 증가함에 따라 황산염 공격에 대한 모르타르의 내구성이 감소하였다. FA 혼입량이 증가하고 GS가 감소한 시험체에 비해 GGBS와 GS가 증가한 시험체는 황산염 공격에 가장 큰 내구성을 보이는 것으로 나타났다.

지오폐리머 모르타르를 2% 농도의 H_2SO_4 용액에 침지한 후, 시험체의 표면 상태를 확인하기 위하여 육안으로 평가를 진행하였다. [표 2]에서 볼 수 있듯이, GS가 50 wt.% 혼입된 F100S0 시험체는 GS가 혼입되지 않은 G-0와 100% 혼입된 G-100 시험체보다 H_2SO_4 에 대한 내구성이 강한 것으로 나타났다. GS가 100 wt.% 혼입된 G-100 시험체는 침지 후 14일 동안 열화되지 않았지만, 지속적인 노출은 표면의 약화를 초래하여 최종적으로 심하게 열화되었다. G-100 시리즈에서, F0S100은 14일간의 침지 후에도 아무런 변화를 보이지 않았다. 하지만, 28일이 지나면서 시험체의 모서리의 형태에 침식이 발생하였으며, 90일 동안 침지한 후에는 침식이 더욱 증가하였다. 침지 90일 후 시험체 가장자리에서 균열 형성이 관찰

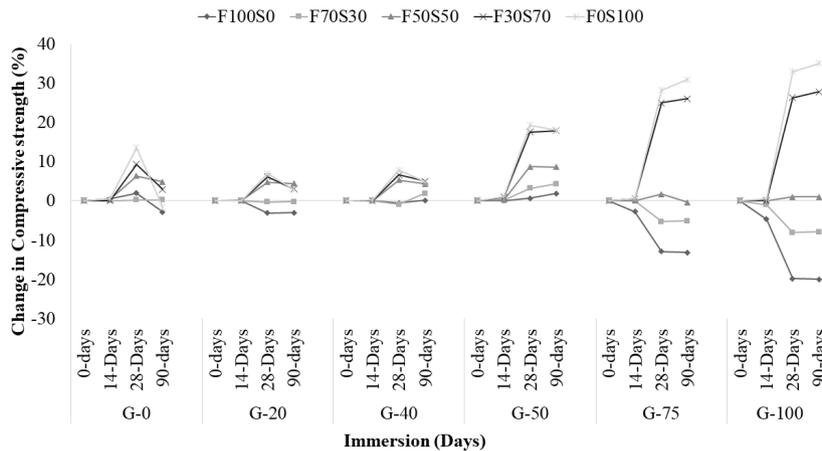


그림 5. 지오폐리머 모르타르의 황산염 침지 후 잔류 압축 강도

[표 2] 황산 침지 후, GS 지오폐리머 모르타르의 시험체 표면 사진

G-0		
	F100S0-0 day a(1)	F100S0-90 day a(5)
		
	F0S100-0 day c(1)	F0S100-90 day c(5)
G-100		
	F100S0-0 day g(1)	F100S0-90 day g(5)
		
	F0S100-0 day i(1)	F0S100-90 day i(5)

되어 시험체의 내구성능이 저하되고 있음을 알 수 있었다. GS가 100 wt. % 혼입된 시험체의 내구성 육안 평가를 통해 몇가지 사항을 추론할 수 있었다. FA는 GGBS가 포함된 시험체보다 내구성이 낮았다. 일반적으로 GS가 증가한 시험체는 산성 환경에 대한 우수한 내구성능을 보였다. 하지만, F100S0의 경우, GS가 100 wt. %로 높은 혼입량이 있기 때문에 지오폐리머 매트릭스의 높은 투과성과 결합제와 잔골재 사이의 결합 약화를 일으켜 내구성의 손실을 발생시키는 것으로 판단된다. GS는 초기 14일 침지 후 시험체의 저항률을 오히려 증가시켰다.

GGBS 함량이 증가하는 바인더의 경우, GS의 100 wt. % 혼입은 침지 28일까지 영향이 있었다. H_2SO_4 용액의 장기간 침지는 지오폐리머 모르타르의 시료의 침식과 균열을 일으키는 데 영향을 미쳤다.

<그림 6>은 GS 지오폐리머 모르타르를 황산에 침지한 후, 잔류 압축 강도를 평가한 결과이다. 황산나트륨보다 황산이 GS 지오폐리머 모르타르에 더 공격적인 것으로 나타났다. 지오폐리머의 압축성은 황산에 대한 모르타르의 내구성을 향상시키는 데 중요한 역할을 했다. FA가 풍부한 지오폐리머 모르

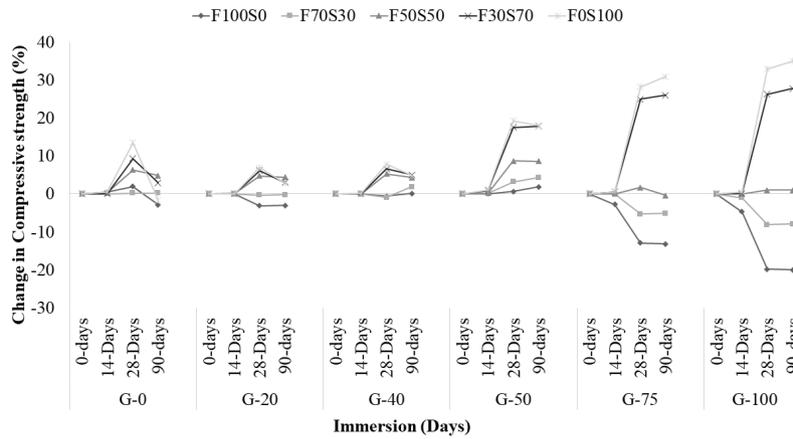


그림 6. 지오폐리머 모르타르의 황산염 침지 후 잔류 압축 강도

타르의 경우, GS 혼입률을 50 wt.%로 증가시켰을 때 시료의 공극률이 증가해 황산에 대한 내구성이 향상되어 시험체의 추가 부식 및 강도 손실을 방지하였다. GS 혼입률이 50 wt.% 이상인 FA가 풍부한 지오폐리머 모르타르는 황산 공격에 더 취약한 것으로 확인되었다. 한편, GGBS가 풍부한 지오폐리머 모르타르는 매트릭스의 풍부한 Ca로 인해 팽창성 겔이 형성된다. 하지만, GS 혼입률이 50 wt.% 미만인 시험체는 팽창성 겔이 팽창할 수 있을 정도로 매트릭스가 충분히 다공성이었기 때문에 산성 환경에 대한 내구성을 향상시킨 것으로 사료된다. 반면, GS 혼입률이 50 wt.% 이상일 경우, 매트릭스가 밀실하여 팽창성 겔의 팽창을 제한하여 균열과 강도 손실의 형성을 초래하는 응력을 유발하였다.

4. 맺음말

천연 잔골재에 비해 순환유리골재는 지오폐리머 모르타르의 내구성 특성을 개선하는 데 더 큰 잠재력을 보여주었다. 그러나, 그것의 잠재력은 바인더로 사용되는 플라이애시나 고로슬래그의 함량과 순환유리골재의 혼입량에 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 특집 기사를 통해 순환유리골재를 50% 혼입한 100% GGBS 지오폐리머 모르타르가 강도 및 내구성 측면에서 최적인 것으로 확인되었다. 이러한 연구를 기반으

로 알칼리 활성 지오폐리머 모르타르 개발을 위한 플라이애시, 고로슬래그, 순환유리골재와 같은 산업 및 도시 폐기물의 재활용을 통해 건설용 콘크리트 또는 모르타르와 관련된 탄소 배출을 줄이는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, FA/GGBS 기반의 지오폐리머 모르타르에서 순환유리를 골재로 사용할 수 있는 가능성이 확인되었다. 하지만, 여전히 순환유리골재를 사용하는 지오폐리머 모르타르의 국내 연구 데이터 및 실제 사용 사례, 관심은 부족할 실정이다. 이에 계속적인 연구와 관심이 필요하며, 사용성을 높일 필요가 있다. 본 고를 통해 순환유리골재와 지오폐리머 콘크리트/모르타르에 대한 업계와 학회의 관심이 이어지길 기대한다.

참고문헌

1. R. Pierrehumbert, There is no Plan B for dealing with the climate crisis, *Bull. At. Sci.*, 5 (2019), pp. 215–221
2. L. Peter, V. Tiffany, M. Hana, G. Alexandre, Cement: more efforts needed, *Int. Energy Agency* (2020)
3. G. Hendrik Van Oss, C. Amy Padovani, Cement manufacture and the environment part II: environmental challenges and opportunities, *J. Ind. Ecol.*, 7 (2003), pp. 93–126
4. S.A. Miller, V.M. John, S.A. Pacca, A. Horvath, Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050, *Cement Concr. Res.*, 114 (2018), pp. 115–124
5. D. Baker, Sand and gravel resources, *Environmental Geology. Encyclopedia of Earth Science*, Springer, Dordrecht (1999), 10.1007/1-4020-4494-1_289

담당 편집위원 : 김규용(충남대학교)