



# 엔지니어드스톤 슬러지를 잔골재로 활용한 모르타르의 기초연구

## A preliminary study on the utilization of engineered stone sludge as fine aggregate in mortar



**최재석 Jaesuk Choi**  
충북대학교 토목공학부  
E-mail : 2017024189@gmail.com



**한주성 Ju-Seong Han**  
충북대학교 토목공학부  
E-mail : 2017024189@gmail.com



**최준혁 Jun-Hyeok Choi**  
충북대학교 토목공학부  
E-mail : chlwnsgur4512@naver.com



**양범주 Beomjoo Yang**  
충북대학교 토목공학부  
부교수  
E-mail : byang@cbnu.ac.kr

### 1. 서론

최근 전 세계적으로 고급 내외장재에 대한 수요가 급속도로 증가하고 있는 추세를 보이고 있으며, 국내에서도 유사한 경향을 보여주고 있다. 이에 관련 제품의 생산량 또한 빠른 속도로 늘어나고 있으며, 관련한 다양한 문제와 시사점들이 동시에 도출되고 있다. 이중에서도 눈에 띄는 것은 고급 인테리어 자재로 인식되는 인조대리석의 생산 및 활용에 관한 이슈이다. 인조대리석은 일반적으로 Artificial stone, Cultured marble, Marbelite 등의 다양한 명칭으로 불리우며, 특히 천연 석영의 구성비율이 크게 높은 제품은 엔지니어드스톤(Engineered stone)으로 명명되어 다양한 제품군으로 판매되고 있다 (<그림 1>).



그림 1. 엔지니어드스톤 제품 예시

엔지니어드스톤은 천연 석영을 주성분으로 함유하고 있는 제품으로, 아크릴계 제품에 비해 상대적으로 질감이 뛰어나며, 화학적 안정성과 스크래치에 대한 저항성이 뛰어난 것으로 알려져 있다. 이러한 장점으로 인해 엔지니어드스톤은 건물의 조리대, 실내 벽, 바닥 등 다양한 부분에서 활용되고 있다. 엔지니어드스톤의 제조는 업체별로 설계된 일련의 공정과정을 거쳐 마감 단계에 적절한 크기와 마무리를 위한 절삭 및 광택 공정을 거친다(〈그림 2(a)〉). 이 과정에서 석영을 주 성분으로 하는 제품 슬러지가 필연적으로 발생하게 되나(〈그림 2(b)〉), 현재까지 이를 적절하게 처리하는 방안에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 엔지니어드스톤 시장이 미래에 점점 성장함에 따라, 슬러지의 발생량은 향후 더욱 증가할 것으로 예상된다. 이와 더불어, 전 세계적으로는 폐기물의 재활용을 극대화하고, 자원 소비를 최소화하는 것을 목표로 하는 기후 변화 및 탄소 중립과 관련된 다양한 노력들이 나타나고 있다. 이러한 맥락에서 본 연구는 엔지니어드스톤 슬러지를 재활용한 건자재료의 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

본 연구는 엔지니어드스톤 슬러지를 활용하여 모르타르 잔 골재를 부분적으로 대체하는 것을 목표로 수행되었다. 먼저 엔지니어드스톤 제조 과정에서 발생하는 슬러지의 구성성분, 입도 및 중금속 용출 가능성을 분석하였으며, 슬러지의 첨가가 모르타르의 물리역학적 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 검증을 수행하였다. 이를 위해 모르타르 시편의 압축강도, 시간에 따른 유동성 및 관입저항 값의 변화를 측정하였으며, 수은압입법(Mercury Intrusion Porosimetry, MIP)을 통한 시편의 내부공극 양상을 분석하였다. 또한 밀도범함수이론(Density Functional Theory, DFT) 및 분자동역학(Molecular Dynamics, MD)에 기반한 시뮬레이션을 수행하여 시편의 강도 향상 메커니즘에 대하여 이해하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 원소재 및 시편

슬러지는 공정과정을 통해 약 25~30%의 함수율을 보이는 특성이 있으며, 이러한 함수율은 세부 제작과정, 보관기간, 주변 환경 등 다양한 요소에 의해 영향을 받아 그 값이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 가변적인 함수율의 영향을 제거하고 고유한 슬러지의 특성을 정확히 파악하고자 하였으며, 이를 위해 약 110℃의 오븐에서 슬러지를 24시간 이상 건조하여 수분을 제거한 뒤 이를 실험에 활용하였다. 바인더 재료로는 일반 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement, OPC)를 사용하였으며, 주문진 표준사를 잔골재로 사용하였다. X선 형광분석을 통해 슬러지는 97.5% 이상의 SiO<sub>2</sub>로 구성되어 있으며, 이외에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>가 각각 0.7, 0.6%가량 함유되어 있음을 확인하였다. 〈그림 3〉은 시멘트, 잔골재 및 엔지니어드스톤 슬러지의 누적입자크기 분포곡선을 나타내며, 이를 통해 엔지니어드스톤 슬러지의 입자크기가 가장 작음을 알 수 있다. 추가적으로 슬러지의 중금속 용출 시험을 진행하였으며, 이를 통해 납(Pb), 크롬(Cr), 구리(Cu), 카드뮴(Cd)에 대해 모두 불검출되었음을 확인하였다.

[표 1]은 엔지니어드스톤 슬러지를 포함한 모르타르의 배합 비율을 나타내고 있다. 물시멘트 비율은 0.41로 설정하였으



그림 2. (a) 엔지니어드스톤 제조과정 및 절삭공정에 따른 슬러지 발생 예시, (b) 발생된 폐기슬러지

엔지니어드스톤 슬러지를 잔골재로 활용한 모르타르의 기초연구

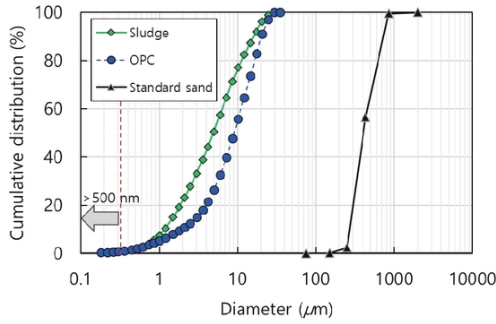


그림 3. 엔지니어드스톤 슬러지, 시멘트 (OPC), 잔골재의 누적입자크기 분포곡선

[표 1] 모르타르 시편 배합비

No.	시멘트	물	고유동화제	잔골재	슬러지
Con.				200	0
S05	100	41	0.5	190	10
S10				180	20
S15				170	30
S20				160	40

며, 고유동화제의 함량은 시멘트 대비 0.5wt %로 고정하였다. 잔골재의 총 함량은 시멘트 무게의 2배로 고정하였으며, 슬러지는 잔골재의 총량의 5~20wt %까지 다양하게 대체하였다. 시편명의 Con.은 슬러지를 전혀 포함하지 않은 시편을 의미하며(Control), 잔골재 대비 슬러지의 대체비율에 따라 시편명을 명명하였다. 예를 들어 S15 시편은 모르타르 시편내 혼입되는 총 잔골재의 15wt %를 슬러지로 대체하였음을 의미한다. 고유동화제는 폴리카르복실계 혼화제가 사용되었다.

슬러지를 포함한 모르타르 시편의 제조과정은 다음과 같다. 슬러지 입자의 분산을 향상시키기 위해 물, 고유동화제, 잔골재(표준사 및 슬러지)를 1분 동안 혼합하였다. 이어서 시멘트 분말을 3분 동안 추가하여 혼합하고, 이 혼합물을 50×50×50 mm<sup>3</sup> 크기의 입방형 몰드에 주조하였다. 마지막으로 샘플을 25 ± 3 °C에서 지정된 기간 동안 경화시키는 과정을 거쳤다.

2.2 분석항목

모르타르 시편의 재령 3일, 28일 압축강도시험은 만능시험



그림 4. 본 연구에서 수행된 모르타르 시편의 압축강도, 관입저항시험, 플로우 측정 예시

기(Universal Testing Machine, UTM)를 사용하여 ASTM C109 규정에 따라 수행되었으며, 슬러지를 포함한 모르타르의 플로우 측정은 ASTM C1437 규정에 따라 60분 동안 10분 간격으로 이루어졌다. 또한 경화특성은 ASTM C403에 따른 관입저항시험을 통해 측정되었다(〈그림 4〉). 이후 추가적으로 3일 및 28일 경화된 모르타르의 기공 특성을 MIP 분석을 통해 측정되었다.

메커니즘의 이론적 분석을 위하여 상용 소프트웨어인 Material Studio 2022이 활용되었다. DFT 해석은 본 소프트웨어의 내부 모듈인 DMol3을 통하여, 그리고 MD 해석은 Forcite 모듈을 통해 수행되었다. DMol3을 통하여 단일의 물분자와 이산화규소 결정의 정전기 전위(Electrostatic Potential, ESP)를 해석하였으며, Forcite를 통하여 1 fs단위의 정준 앙상블(Canonical ensemble) 해석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

〈그림 5〉는 슬러지를 포함한 모르타르의 재령 3일 및 28일 압축강도에 대한 결과를 나타내고 있다. 슬러지의 대체비율이 잔골재의 10wt%를 초과할 때, 시편의 압축강도가 향상되는 경향이 관찰되었다. 특히, 3일차의 S20은 Con. 시편에 비해 최대 약 59%의 압축강도 증가를 보였다. 28일 압축강도 기준으로는, S15 및 S20의 압축강도는 S10과 유사한 수준이었다. 〈그림 6〉은 슬러지를 첨가한 모르타르의 플로우 특성을 그래프로 나타내고 있다. 〈그림 6(a)〉을 통해 슬러지의 대체비율이 15wt % 이하일 때, 10분이 지난 시점의 모르타르의 플로우는 유사

기술기사 1 \_ Technical Articles

하지만, S20의 유동성은 눈에 띄게 감소하는 경향을 보였다. 모든 시편에서 시간의 흐름에 따라 플로우는 감소하였으나, 20분이 되는 시점에서 슬러지가 첨가된 모르타르의 플로우 감소는 Con. 시편에 비해 상당히 두드러지는 것으로 관찰되었다.

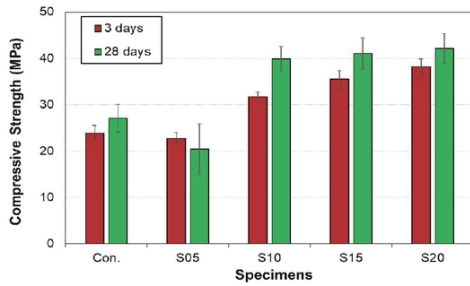
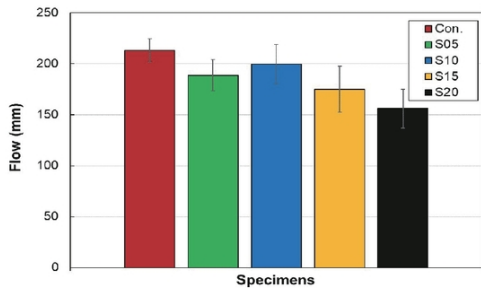
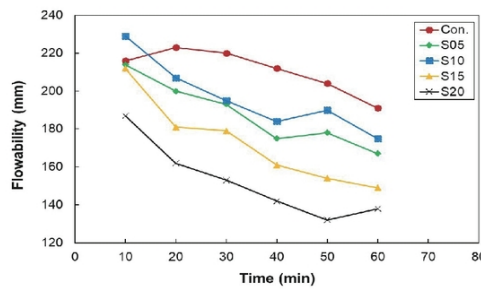


그림 5. 슬러지 대체율에 따른 모르타르 시편의 3일 및 28일 압축강도 결과



(a)



(b)

그림 6. 모르타르 시편의 (a) 플로우 시험 결과 및 (b) 10분 간격 측정치에 따른 변화양상

<그림 7>은 모르타르의 관입저항 시험결과를 나타내고 있다. 슬러지가 10 wt% 이상 대체된 모르타르에서 초결시간이 Con. 시편에 비해 줄어드는 현상이 관찰되었다. 특히 S05는 Con. 시

편에 비해 초결시간이 늘어졌으나, 슬러지를 혼입한 모든 샘플에서는 종결시간이 Con.에 비해 뚜렷하게 단축되는 것이 관찰되었다. 그러나 슬러지 함유량이 높은 S20은 S10 및 S15에 비해 종결에 더 많은 시간이 소요되었는데, 이는 슬러지의 과다 첨가가 모르타르 경화를 방해하거나, 슬러지가 응집하여 결합을 생성했을 가능성을 시사한다.

<그림 8>은 경화 후 3일 및 28일 시점에서의 모르타르의 내부공극 특성을 보여주고 있다. 시멘트 모재내의 수화물 형성과 함께 밀실해지는 현상으로 인해 시간이 지남에 따라 모르타르의 공극률은 대체로 감소하였다. 특히, 28일 시점에서 슬러지를 혼입한 모르타르의 총 공극률은 슬러지 첨가에 따라 대체로 감소하는 경향을 보였다.

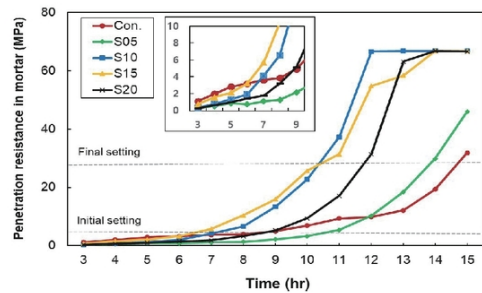
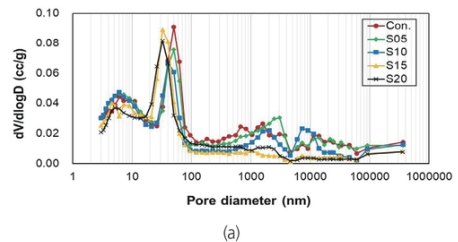
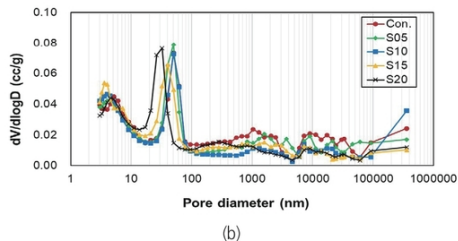


그림 7. 슬러지 대체율에 따른 모르타르 시편의 관입저항시험 결과



(a)



(b)

그림 8. MIP 분석을 통해 측정된 (a) 3일 및 (b) 28일 모르타르 시편의 내부공극 특성

엔지니어드스톤 슬러지를 잔골재로 활용한 모르타르의 기초연구

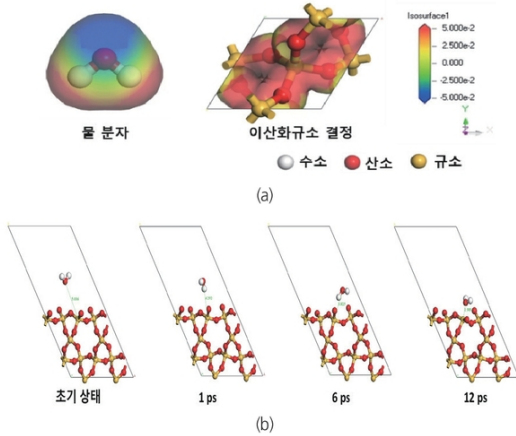


그림 9. (a) DFT 및 (b) MD 시뮬레이션 해석결과

<그림 9>는 H<sub>2</sub>O와 SiO<sub>2</sub> 분자의 DFT 및 MD 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. <그림 9(a)>에서 분자의 음/양의 전하영역을 나타내는 ESP 분포를 보여주는데, 동일한 기준에서 물 분자의 산소 원자는 상대적으로 음전하를 보이며, 수소 원자는 양전하를 보이는 것으로 나타났다. 반면 SiO<sub>2</sub> 구조는 전반적으로 양전하를 나타내고 있어, 이러한 반대되는 전기적 특성이 두 구성요소 사이의 인력을 촉발하는 것으로 예측되었다. <그림 9(b)>는 단일의 H<sub>2</sub>O 분자와 SiO<sub>2</sub> 구조의 MD 해석의 시간에 따른 결과를 나타내고 있다. 시간이 진행됨에 따라 H<sub>2</sub>O가 점차 SiO<sub>2</sub> 표면에 가까워지는 경향이 관찰되었다.

이를 통해 시멘트 보다 작은 친수성의 슬러지가 재료내 혼입되어 공극의 채움과 함께 추가적인 수화를 야기할 수 있는 가능성을 확인하였다. 이의 효과로 초결 및 종결시간이 줄어들며, 수화물과 결합이 발생하는 구간의 공극율이 변화되어 궁극적으로 시편 내부가 더욱 밀실해지는 결과를 가져왔을 것으로 사료된다. 특히 슬러지의 잔골재 대체 비율이 10 wt%를 넘어섰을 때의 이러한 특성들이 보다 두드러지는 것으로 관찰되었다.

4. 결론

본 연구에서는 엔지니어드스톤 슬러지 첨가가 모르타르의 특성에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 실험 변수는 슬러지의 잔골재 대체 비율로, 이를 바탕으로 모르타르의 압축강도, 플로우, 내부공극 특성 등에 대하여 분석하였다. 슬러지의 잔골재 대체 비율이 10 wt% 이상일 경우 모르타르의 압축 강도가 증가하는 것을 확인하였으며, 특히 슬러지의 비율이 20 wt%에 이를 때의 압축강도는 슬러지가 없는 시편에 비해 최대 59%까지 증가하는 것을 확인하였다. 또한 슬러지 첨가는 모르타르의 유동성을 감소시키는데 큰 영향을 미치는 것으로 관찰되었다. 실험 및 이론적 해석을 통하여 슬러지의 입도와 친수성이 재료내 추가적인 수화과 치밀화를 촉진하며, 이를 통해 시편내 공극특성을 변화시켜 압축강도를 향상시키는 것으로 분석되었다. 본 연구결과를 바탕으로 엔지니어드스톤 슬러지 혼입비율에 따른 모르타르의 기초성능 및 관련 메커니즘을 파악할 수 있었으며, 이는 향후 슬러지를 활용한 전자재 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- Chen, Y., Al-Neshawy, F., and Punkki, J. (2021). Investigation on the effect of entrained air on pore structure in hardened concrete using MIP. *Construction and Building Materials*, 292, 123441.
- Han, Q., Yang, Y., Zhang, J., Yu, J., Hou, D., Dong, B., and Ma, H. (2020). Insights into the interfacial strengthening mechanism of waste rubber/cement paste using polyvinyl alcohol: Experimental and molecular dynamics study. *Cement and Concrete Composites*, 114, 103791.
- John, E., Matschei, T., and Stephan, D. (2018). Nucleation seeding with calcium silicate hydrate - A review. *Cement and Concrete Research*, 113, 74-85.
- Mojapelo, K. S., Kupalati, W. K., Ndambuki, J. M., Sadiku, E. R., and Ibrahim, I. D. (2021). Utilization of wastewater sludge for lightweight concrete and the use of wastewater as curing medium. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00667.
- Shin, Y., Jang, J. G., Choi, J., Jun, G., Park, C., Kim, G. M., and Yang, B. (2023). Utilization of artificial interior stone sludge as fine aggregate in controlled low-strength material (CLSM). *Journal of Building Engineering*, 71, 106441.

담당 편집위원 : 장정국(인천대학교)