

TECHNICAL EXCELLENCE

May 2021 Vol. 9

하수처리공정에서 발생하는 하수슬러지 처리잔재물의 가치상향형 순환자원 활용 방안

- 01 하수슬러지 처리잔재물 활용의
다변화 필요
- 02 하수슬러지 소각재 모니터링으로 성분의
안정성 확인
- 03 하수슬러지 소각재를 3차원 인쇄기술
재료로 활용 방안 제시
- 04 하수슬러지 소각재를 활용한 세라믹 점토
및 안료 재료로 재활용

기동원
강신영

Seoul
Institute of
Technology

하수처리공정에서 발생하는 하수슬러지 처리잔재물의 가치상향형 순환자원 활용 방안

- 01 하수슬러지 처리잔재물 활용의 다변화 필요
- 02 하수슬러지 소각재 모니터링으로 성분의 안정성 확인
- 03 하수슬러지 소각재를 3차원 인쇄기술 재료로 활용 방안 제시
- 04 하수슬러지 소각재를 활용한 세라믹 점토 및 안료 재료로 재활용



Seoul
Institute of
Technology

하수처리공정에서 발생하는 하수슬러지 처리잔재물의 가치상향형 순환자원 활용 방안

서울시 물재생센터에서는 건조, 소각의 자체처리시설이 있으나, 상당 부분 수도권매립지 또는 민간위탁으로 처리하고 있다. 시간이 지남에 따라 환경여건이 변화하기 때문에 다양하고 가치상향형 순환자원으로 활용될 수 있는 재활용 방안이 제시되어야 한다. 자원으로 활용하기 위한 소각재 성분의 안정성과 3차원 인쇄기술·세라믹 재료로의 활용방안을 제시하였다.

II 하수슬러지 처리잔재물 활용의 다변화 필요

서울시 물재생센터에서 건조, 소각으로 처리하고 나오는 잔재물 중 건조재는 화력발전 보조 연료로 판매하여 수익을 창출하지만, 소각재는 비용을 지불하여 처리하고 있어 가치상향형 자원으로 활용할 수 있는 다양한 방안이 필요하다.

II 하수슬러지 소각재 모니터링으로 성분의 안정성 확인

소각재를 유용자원으로 활용하기 위해서는 물리·화학적 특성의 안정성과 유해성 여부가 가장 중요하다. 6개월 간 소각재 특성 분석 결과로 물재생센터별 성분의 차이는 있지만, 각 센터에서 발생하는 소각재의 특성 변화는 크게 없었으며, 중금속 항목도 지정폐기물 분류 기준치 이하임을 확인하였다.

II 하수슬러지 소각재를 3차원 인쇄기술 재료로 활용 방안 제시

4차산업혁명 기술 중 하나인 3차원 인쇄기술의 재료로 하수슬러지 소각재 활용 방안을 제시하였다. 수분과의 반응성, 플라스틱 소재와 물리적 결합 가능성, 용융성 등을 고려하여 재료압출, 용융수지압출적층, 접착제분사방식의 3차원 인쇄 적용기술 후보군 선정 후, 접착제분사방식으로 비정형 건축물 적용 가능성을 살펴보았다.

II 하수슬러지 소각재를 활용한 세라믹 점토 및 안료 재료로 재활용

소각재의 화학적 성분은 점토와 유사하여 실생활에 밀접한 세라믹 제품 및 공예품 제작에 활용이 가능하다. 철성분이 많이 함유된 서남물재생센터 소각재를 활용하여 점토 및 안료로의 활용 가능성을 제시하였다.

※ 이 기술리포트는 연구보고서 「하수슬러지 처리잔재물 재활용 방안」과 과제 「하수슬러지 소각재를 활용한 3차원 인쇄용 복합소재 개발」을 근거로 작성되었습니다.

※ 이 기술리포트의 내용은 서울특별시 정책과 다를 수 있습니다.

하수슬러지 처리잔재물 활용의 다변화 필요

**‘순환경제’ 정책 추진에
따른 자원순환 실적
향상을 위한 모든
폐기물의 유용 가능한
자원 재활용 우선시
되어야**

공공하수처리시설로 유입되는 하수(wastewater)는 적절히 처리되어 자연 수계로 되돌아간다. 최근에는 하수처리시설이 오염되어 들어오는 하수를 처리하는 시설의 개념보다는 하수에 포함되어 있는 유용한 자원을 회수하는 시설로서 그 역할이 재정의되고 있다. 본 간행물에서는 하수처리 가장 마지막 단계인 하수슬러지(여기서의 정의는 탈수케이크 또는 하수 찌꺼기)의 중간처리 후 발생하는 처리잔재물의 유용 자원화에 대해 다루고자 한다. 하수슬러지는 건조, 소각, 용융, 탄화, 고화, 퇴비화 등의 방법으로 중간처리한 후, 각각의 처리 방법별로 발생하는 처리잔재물은 매립과 재활용으로 최종처리된다. 현재 우리나라 대부분 지역에 매립지 부족 문제는 앞으로도 더욱 가속화될 것으로 전망한다. 따라서 매립량을 가능한 최소화하여야 하며, 전 세계적으로 ‘순환경제’ 정책 추진에 따라 모든 폐기물의 유용 가능한 자원에 대해 재활용이 우선시 되어야 한다¹⁾.

**사업장배출시설계
폐기물인 하수슬러지
처리잔재물을 다양한
가치상향형 순환자원
으로 재활용할 수 있는
방안 제시 필요**

사업장배출시설계폐기물인 하수슬러지 처리잔재물의 재활용은 크게 연료화, 토양 이용, 건설자재화, 기타 방법으로 구분할 수 있으며, 연료화는 화력발전 연료로, 토양 이용은 비료화·토양개량제로, 건설자재화는 요업제품·자재·골재로, 기타 방법은 복토재·활성탄 등으로 세분화된다(그림 1 참조)²⁾. 각각의 재활용 방법의 장단점, 경제성, 환경성, 지역적 특성 등을 고려하여 최적의 방법으로 결정되어야 한다. 하지만, 시간이 지남에 따라 환경 여건은 변화하기 마련이기 때문에 한 가지 제한적 방법으로 활용하기보다는 가치상향형 순환자원으로 재활용될 수 있는 다양한 방안이 제시되어야 한다.

[1] 환경부 외 관계부처협동, 2018. 제 1차 자원순환기본계획 (2018-2027)

[2] 환경부, 2019. 하수찌꺼기 감량화 사업의 성과평가 및 개선방안 연구

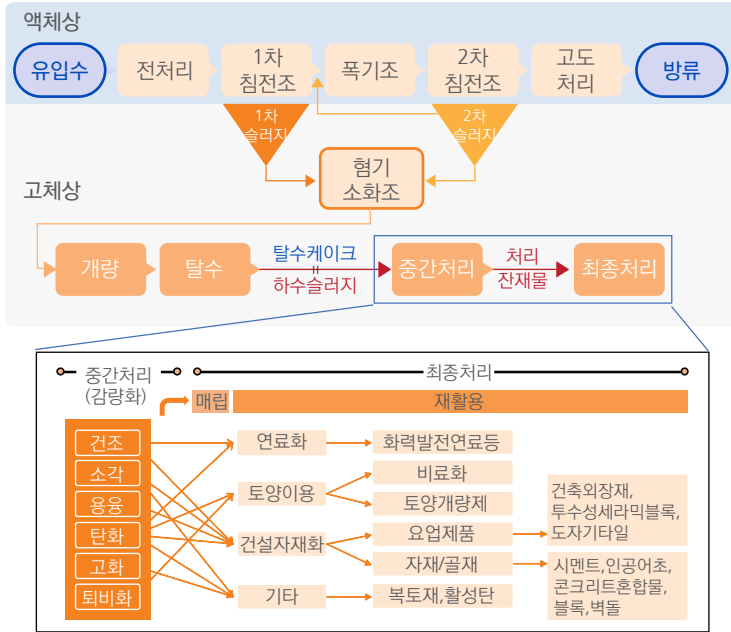


그림 1 | 하수처리공정 (위) 및 하수슬러지 중간처리에 따른 처리잔재물의 최종처리 방법 (아래)

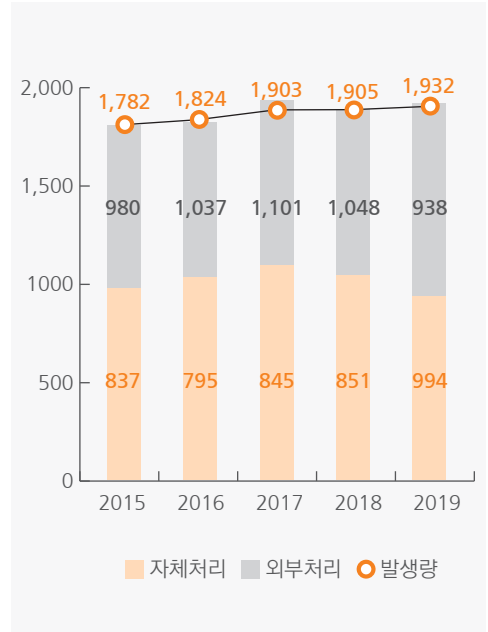
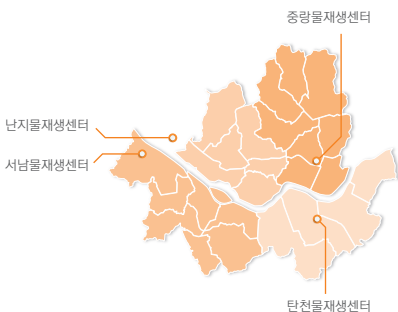


그림 2 | 서울시 물재생센터 하수슬러지 발생량 및 처리량

발생량이 꾸준히 증가하는 하수슬러지의 외부처리(수도권매립지, 민간위탁) 비율을 점차 줄여 서울시 물재생센터 내 자체처리 100% 달성하기 위한 계획

최근 5년간 하수슬러지 발생량은 꾸준히 증가하여 처리할 양이 일평균 약 2,000 t이다(2015년 1,782 t/일 → 2019년 1,932 t/일). 서울시 4개 물재생센터(중랑, 난지, 탄천, 서남)에서 자체처리(건조, 소각)로 일평균 994 t, 외부처리(수도권매립지[고형화, 건조], 민간위탁[고화시멘트, 퇴비화])로 938 t을 처리한다. 물재생센터 내 건조처리 시설은 중랑, 탄천, 난지, 서남센터 4곳 모두, 소각처리 시설은 난지와 서남센터에 설치되어 있다. 2019년 기준 하수슬러지 처리 잔재물인 건조재와 소각재의 발생량은 각각 일평균 183 t, 24 t으로, 이는 건조처리량(총 730 t/일), 소각처리량(총 260 t/일)의 25%, 9%이다. 처리 후 발생하는 건조재는 화력발전소 보조연료로 t당 약 1만 2,000원의 판매수익을 창출하고 있으며, 소각재는 고화시멘트 업체에 민간 위탁하여 t당 약 4만 9,000원의 비용을 지출하며 처리 중이다.



건조재는 보조연료 판매로 비용창출, 하지만 매년 증가하는 소각재 처리 비용으로 가치상향형 재활용방안 마련 필요

서울시는 하수슬러지 처리를 위해 자체처리 용량을 지속적으로 확대하여 2022년 이후에는 일평균 2,120 t을 처리할 수 있도록 처리시설을 증설할 계획이 있어, 최종처리해야 할 처리잔재물의 양이 증가할 것으로 예상된다. 또한 민간 위탁으로 처리하고 있는 소각재 처리비용은 매년 증가하고 있어서, 자원순환 실적 향상을 위한 가치 상향형 재활용 방안에 대한 지속적 연구가 필요하고, 이를 위한 소각재 성분의 안정성 확인이 필수적이다.

02

하수슬러지 소각재 모니터링으로 성분의 안정성 확인

소각재를 가치상향
 재활용 재료로 활용하기
 위해 물리·화학적 특성
 모니터링이 필요

6개월 간 소각재 특성
 분석을 통해 물재생센터
 별 물리·화학적 특성과
 성상 안정성 확인

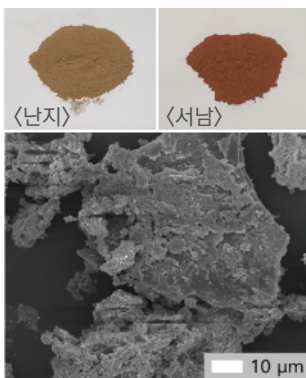


그림 3 | 난지 소각재,
 서남센터 소각재
 FE-SEM 이미지(×1,000)

앞에서 언급한대로 하수슬러지 소각재는 다양한 방법으로 재활용 가능한 재료로서, 성분의 안정성과 유해성 여부 확인이 가장 중요하다. 기존 연구에 따르면 대부분 일회성의 소각재 성분조사가 대부분임을 알 수 있고, 배출장소별(도시, 산업지역 등)로 성분비가 다를 수 있다(표 1 참조)³⁻⁶. 본 연구에서는 난지, 서남 물재생센터에서 발생하는 소각재(비산재) - 유동상식 소각로를 사용하여 대부분(99%) 비산재로 발생 - 를 6개월 동안 매달 1회 샘플링하여 물리적(입도, 함수율, 유기물함량, 미세구조), 화학적(산화물) 특성 분석을 수행하였다.

소각재의 평균입경은 38~51 μ m, 함수율은 0.2~0.4%, 유기물함량은 0.5~1.2% 였다. 미세구조 분석을 통해 소각재 표면이 거칠고 모양이 일정하지 않은 형태이며 마이크로미터 수준에서 다소 불균일함을 관찰하였다(그림 3 참조). 산화물은 SiO₂, Al₂O₃, P₂O₅, Fe₂O₃, CaO가 대부분을 차지하였다. 각 물재생센터 간 물리적 특성, 화학적 성분 조성 비율의 차이는 있었지만, 각 센터 내에서 6개월 동안 큰 차이 없이 안정적이었다. 소각재의 낮은 유기물함량과 안정적인 화학적 성분 결과로부터 가치상향형 재료로 활용되기에 적합할 것으로 판단된다.

구분	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃
1 ³⁾	32.4	-	15.6	1.6	2.1	15.7	3	8.5	13.4
2 ⁴⁾	48.8	0.9	18.6	2.7	1	7	2.2	5.3	9.4
3 ⁵⁾	16	-	12	1.9	2	14	1.7	15.4	21.2
4 ⁶⁾	53.3	0.9	17.4	3.1	2.9	0.5	3	4	8
난지	29.6 (±3.5)	0.6 (±0.0)	24.7 (±2.6)	2.2 (±0.1)	1.1 (±0.1)	21.0 (±3.1)	2.5 (±0.4)	7.3 (±1.8)	8.8 (±0.6)
서남	29.6 (±2.1)	0.8 (±0.0)	15.0 (±0.5)	2.3 (±0.0)	1.1 (±0.1)	17.2 (±1.3)	2.6 (±0.1)	6.1 (±0.2)	23.2 (±0.8)

[표 1] 하수슬러지 소각재의 화학적 성분(산화물)

[3] 서울시, 2019, 2030, 하수도정비 기본계획

[4] 인광환경, 2010, 등록특허 10-0948658, 하수슬러지 소각재를 재활용한 하수슬러지 고화방법 및 이 방법에 의해 생산된 하수슬러지 고화체

[5] 이현주, 2015, 하수슬러지 소각재와 무기바인더를 이용한 응용 블록 개발 II

[6] 신대용, 한상목, 김경남, 이현종, 2004, 폐기물을 이용한 투수블록의 투수성 및 동결융해저항 특성,

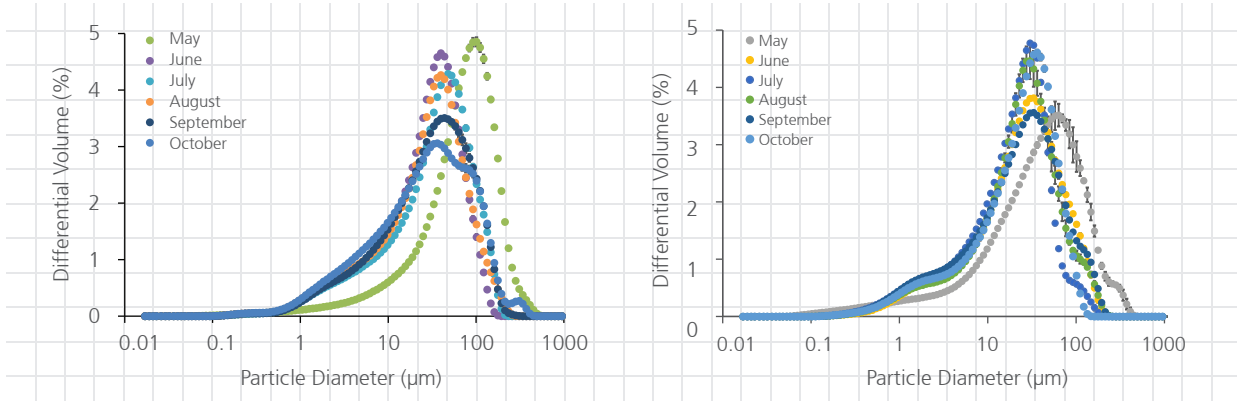


그림 4 | (좌) 난지 (우) 서남센터 소각재의 입도분포(5~10월)

연도	Pb		Cu		As		Hg		Cd		Cr ⁶⁺	
	mg/L		mg/L		mg/L		mg/L		mg/L		mg/L	
지정폐기물 분류기준	3		3		1.5		0.005		0.3		1.5	
물재생센터	난지	서남	난지	서남	난지	서남	난지	서남	난지	서남	난지	서남
15~19 평균 (물재생센터)	불검출	0.016 (±0.007)	불검출	0.341 (±0.296)	0.110 (±0.057)	0.157 (±0.225)	불검출	0.000 (±0.001)	불검출	0.019 (±0.014)	불검출	0.001 (±0.001)
20 (본연구)	불검출	불검출	불검출	불검출	0.061	0.095	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출

[표 2] 폐기물공정시험기준에 따른 난지, 서남센터 소각재의 중금속 용출시험 결과

**중금속 용출시험을
 통해 6개 중금속 모두
 지정폐기물 분류
 기준치 이하임을 확인**

서울시 물재생센터에서 주기적(분기~연)으로 하수슬러지와 건조재, 소각재의 중금속, 유해물질 분석을 하고 있다(표 2 참조). 본 연구에서 소각재를 활용한 가치상향형 재활용 방안 실험 진행을 위해 1회 소각재의 중금속 용출 분석을 수행한 결과, 6개 중금속(Cr⁶⁺, Cu, Cd, Pb, As, Hg) 모두 불검출 또는 지정폐기물 분류 기준치 이하임을 확인하였다(표 2 참조).

**알루미늄 성분이 상대적으로 많은 난지센터
 소각재는 3차원 인쇄
 기술재료로, 철성분이
 많은 서남센터 소각재는
 세라믹 재료로 사용**

본 연구에서는 1년 이상의 장기 모니터링은 아니었지만 6개월간 분석을 통해 소각재 물리·화학적 성분의 변화가 크게 일어나지 않음을 확인하였고, 이는 소각재를 재활용 재료로 사용하기 위한 품질 확보가 가능하다고 판단된다. 가치상향형 재활용에 세라믹 재료와 3차원 인쇄기술 재료로 적용 가능성을 제시하였다. 3차원 인쇄기술 재료로는 알루미늄성분이 상대적으로 많이 구성되어 있는 난지센터의 소각재를, 세라믹 재료로는 철성분이 상대적으로 많이 구성되어 있는 서남센터의 소각재를 사용하였다.

03

하수슬러지 소각재를 3차원 인쇄기술 재료로 활용 방안 제시

4차산업혁명 기술인
 3차원 인쇄기술의
 재료로 하수슬러지
 소각재 활용하여
 친환경 건축물 제작
 가능성 제시

전자, 항공, 의료, 패션 등 다양한 분야에서 사용되는 3차원 인쇄기술은 재료를 자르거나 깎아서 생산하는 절삭가공과 대비되는 개념으로 적층제조 기술이다⁷⁾. 건설 분야에도 3차원 인쇄기술을 적용하려는 연구가 활발히 진행 중이다⁸⁾. 특히 전통적인 건설공법에 사용되는 시멘트, 콘크리트와 다른 기계적 특성을 요구하기 때문에 본 연구에서는 재활용 소재의 고부가 가치화를 위하여 3차원 인쇄기술의 재료로 소각재 활용 가능성을 도출하였다. 이는 특히 앞에서 살펴본 소각재 성분이 주로 무기물질이기 때문에 기존 재료와 혼합한 복합소재의 개발과 활용이 가능하다.

3차원 인쇄 기술 적용 7가지 방식⁹⁾ 중(그림 5 참조) 소각재를 활용할 때의 분말소재 적용성, 수분과 반응성, 플라스틱 소재와 물리적 결합 가능성, 용융성 등을 고려하여, 재료압출방식(ME: Material Extrusion), 용융수지압출적층방식(ME-FDM: ME-Fused Deposition Modeling), 접착제분사방식(BJ: Binder Jet)을 적용기술 후보군으로 선정하였다. 본 연구에서는 3가지 후보군 중, 소각재 분말 자체를 원료로 적용하고, 소형 시작품을 목표로 진행하는 점을 고려하여 BJ 방식의 가능성을 실험을 통해 구체화하여, 치장블록, 담장 등 비정형 건축자재 같은 3차원 비정형 건축물 적용 가능성을 살펴보았다.

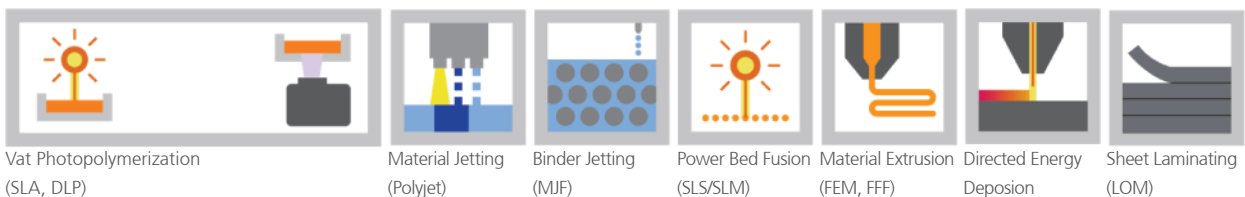


그림 5 | ASTM F2792, ISO TC261의 3D 프린팅 7가지 방식

[7] 중소벤처기업부, 2019, 중소기업 전략기술로드맵 2019-2021 (3D프린팅)

[8] 김동현, 이재홍, 2015, 건축물 신속조형을 위한 3D 프린터 기술 현황 및 개발 방향, Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol. 15, No. 3 (통권 61호), pp. 61~68

[9] 윤법진, 2016, 세라믹 3D 프린팅 기술 개발 동향, Ceramist, Vol. 19, No. 3, pp. 78~88

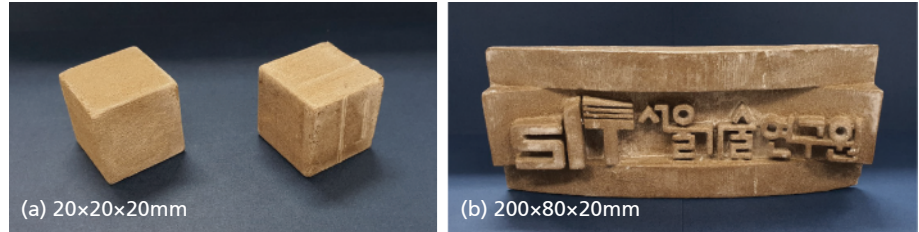


그림 6 | 소각재 25% 혼합 3D 출력물

**접착제분사방식(BJ) 적용
 으로 소각재 혼합비율
 25%, 규산나트륨 계열
 후처리용액 사용 시
 국내 치장콘크리트 블록
 기준 만족하는 성능 확인**

BJ 방식의 3차원 인쇄 출력물은 재료로 사용하는 파우더 사이의 결합을 접착제에만 의존하기 때문에 초기 압축강도는 매우 낮게 나타나는 경향이 있어, 후처리를 통한 강도증진이 반드시 필요하다¹⁰⁾. 본 연구에서 진행한 후처리 조건을 표 3에 정리하였다. 난지센터 하수슬러지 소각재와 상용 재료인 초속경 시멘트를 혼합하여 복합재료의 배합 최적 비율 산정을 위해 시편 테스트를 진행하였다. 전반적으로 소각재 혼합비율이 증가함에 따라 물리적 성능이 저하됨을 보였다. 하수슬러지 소각재를 25% 혼합하고 낮은 농도의 알칼리성분을 유지하는 규산나트륨 계열 (sodium silicate, pH ~11, Na₂SiO₃)의 후처리 용액을 사용하였을 때 시편 양생 중 파괴되지 않고, 치장콘크리트 블록 기준(KS F 4038: 2019)의 압축강도(7.8 MPa)와 흡수율(20% 이내) 기준을 만족하였다. 시편 실험 결과를 기반으로 중량비 25% 소각재를 초속경시멘트와 혼합하여 200x80x20mm 크기의 시작품을 출력하였다(그림 6 참조). 출력물의 유해성 분석을 위해 폐기물 공정시험기준에 따른 중금속 용출을 하수슬러지 소각재 25% 혼합하고 5가지 후처리 조건의 시편으로부터 확인하였으며, 시험 결과 Cr⁶⁺, Cu는 지정 폐기물 분류 기준치 이하로 검출되었으며, 나머지 Cd, Pb, As, Hg 항목은 불검출 되었다. BJ 방식 이외 앞에서 제시한 다른 적용 방식으로 하수슬러지 소각재를 기존 고분자화합물질과 혼합하여 ME-FDM 방식의 3차원 인쇄용 복합소재로 활용 가능한 지에 대한 연구가 진행 중이며, 비정형 거푸집 또는 벤치 등으로의 활용을 기대한다.

Experiment	Post-treatment condition
1	Without post-treatment
2	Water
3	Sodium silicate (Na ₂ SiO ₃) solution
4	Sodium silicate (Na ₂ SiO ₃) solution + NaOH, Na ₂ SiO ₃ /NaOH = 0.95
5	Polydimethylsiloxane (PDMS)

[표 3] 후처리 양생을 위한 용액 종류

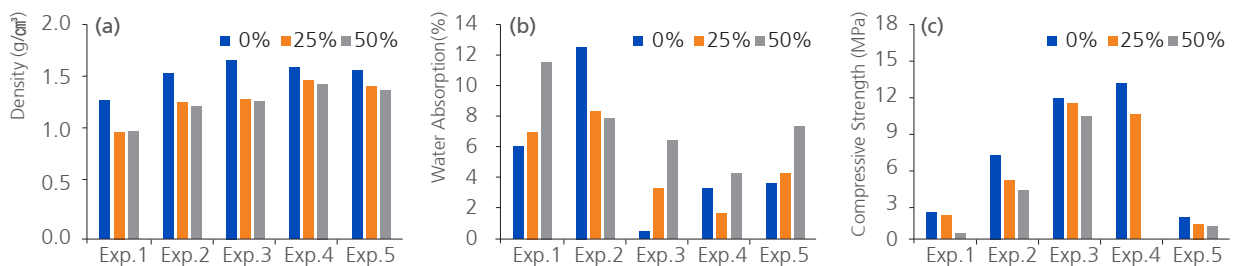


그림 7 | 후처리용액, 소각재 혼합비율에 따른 시편의 (a) 밀도 (b) 흡수율 (c) 압축강도

[10] Nematollahi, B., Xia, M., Sanjayan, J., 2019, Post-processing Methods to Improve Strength of Particle-Bed 3D Printed Geopolymer for Digital Construction Applications. Front. Mater. 6: 160. doi: 10.3389/fmats.

04

하수슬러지 소각재를 활용한 세라믹 점토 및 안료 재료로 재활용

점토와 성분이 유사한
 소각재를 활용하여
 실생활에 밀접한 세라믹
 제품 및 공예품으로 제작

세라믹(Ceramic)은 고온에서 소성한 비금속 무기재료를 뜻하며 전통세라믹스와 파인세라믹스로 구분할 수 있다. 전통세라믹은 인류 기본생활에 밀접한 세라믹으로 도자기, 타일, 생활유리, 내화물 등을 포함한다¹¹⁾. 세라믹의 주요 재료는 점토이며 SiO_2 , Al_2O_3 로 대부분 이루어져 있다. 이러한 성분 특성은 고온으로 소성된 무기성 폐기물(소각재)과 유사하여 점토에 일부분 혼합하여 세라믹 재료로 활용할 수 있다. 하수슬러지 소각재와 점토의 적정 혼합조건은 혼합시편 제작 후 시편의 발색, 수축률, 휘어짐 등을 고려하여 도출하였다. 소각재의 경우 철성분을 다량 함유한(평균 23.2%) 서남센터 소각재를 사용하였으며, 점토는 소각재 특유의 붉은색에 영향을 미치지 않는 상용 백자토를 사용하였다. 소각재는 중량비로 9, 17, 23, 29, 33%씩 혼합하였다. 결과적으로 발색은 소각재 혼합량이 증가 할수록 적갈색~흑갈색을 띠었으며, 수축률은 10%로 상용백자토와 유사하였다. 휘어짐의 경우 1245℃ 소성시 ~23%까지 안정적이었으며, 29% 이상 혼합 시 1145℃ 이하로 소성하는 것이 적절하였다. 시편 실험을 기반으로 소형~대형 시작품을 제작하였으며, 대형화분은 중량 물재생센터 주변 (하수도과학관 앞)에 외부 전시되었다(그림 8, 9 참조).



(a) 9% 혼합 사무용품 (b) 17% 혼합 화병 (c) 23% 혼합 세면대 (d) 29% 혼합 화분 (e) 33% 혼합 도판

그림 8 | 하수슬러지 소각재 혼합비율별(중량비 9~33%) 시작품



그림 9 | 하수슬러지 소각재 15% 혼합 대형(600x600x450mm)화분 전시

[11] 지식산업정보원, 2018, 세라믹 소재 용도별 핵심 기술 및 기능성 점접착/코팅소재 산업동향

**철성분이 많은 붉은색
 소각재는 안료로 활용이
 가능하고, 미분쇄,
 첨가제 혼합에 따른
 성능 향상 가능**

안료는 성분에 따라 무기안료와 유기안료로 구분되며, 무기안료의 주요 성분은 금속화합물이다. 산화철(Fe_2O_3)은 대표적인 적색 무기안료로 산화상태에 따라 적색~흑색을 띠며 철화기법으로 오랫동안 사용되었다^[12]. 서남센터 소각재의 철성분은 약 23.2%로 육안 관찰 시 붉은색을 띠고 있으며, 평균입도는 약 $40\mu m$ 이다. 이러한 특성을 고려하여 상용안료 철성분(약 36%), 입도(약 $3\mu m$)와 비교했을 때 미분쇄, 농도 조절, 첨가물 혼합 등으로 안료로 활용 가능성을 평가하였다. 소각재 미분쇄 시 최소 5시간만 분쇄해도 평균 입도크기 약 85%가 감소했으며 20시간 이상 분쇄하면 상용안료 입도크기와 유사해졌다. 소각재 내 철성분 비율 증대를 위해 자석을 사용하여 물리적으로 철분리를 한 후, 성분분석 결과 철성분 비율에 큰 차이는 없었다. 안료 성능개선을 위해 첨가제를 넣은 경우 장식이 용제역할을 하여^[13] 발색이 안정적으로 나타났고, 백자토는 거친 질감 표현에 용이하였다. 투명유 의 경우 채색시 회화표현은 용이했으나 소성 후 발색이 흐려지는 현상을 보였다. 전반적인 안료 발색은 적갈색~흑갈색을 띠었으며 분쇄시간이 길어질수록 회화표현이 용이해졌다(그림 10, 11 참조).



그림 10 | 소각재 사용 안료 실험 결과



그림 11 | 소각재 사용 안료 채색 적용 실험 결과

본 연구를 통해 하수슬러지 소각재의 물리·화학적 성상 안정성을 확인하였고, 가치상향형 활용방안을 제시할 수 있었다. 추후 하수슬러지 소각재가 3D 인쇄와 세라믹 재료의 유효자원으로 사용되기 위해서는 첨가제, 제작 조건 및 공정 다변화, 경제성에 대한 추가연구가 필요하며 폐기물을 수요자에게 원활히 공급하기 위해 유통단계에 대한 개선이 시급하다.

[12] 서태수 외, 2001, 안료화학, 학술정보

[13] 대니얼로즈, 2014, 도예가를 위한 점토와 유약, 한양대학교출판부

제 9호 하수처리공정에서 발생하는 하수슬러지 처리잔재물의
가치상향형 순환자원 활용 방안

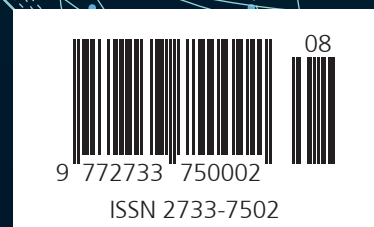
발행인 고인석

편집인 편집위원회

발행처 서울기술연구원
03909 서울특별시 마포구 매봉산로37(상암동)
www.sit.re.kr

발행일 2021년 05월 25일

SIT 서울기술연구원
Seoul Institute of Technology



08

9 772733 750002

ISSN 2733-7502