

열수가압탄화공법을 적용한 유기성 슬러지의 응용 블록 제조에 관한 연구

박혜원¹, 오민아², 오승진², 조우리², 장진만², 이재영^{1*}

¹서울시립대학교 환경공학부
서울특별시 동대문구 서울시립대로 163
²서울시립대학교 환경공학부
서울특별시 동대문구 서울시립대로 163

(2023년 5월 8일 접수; 2023년 5월 24일 수정본 접수; 2023년 5월 26일 채택)

Recycling Organic Sludge into Modification Block by Hydrothermal Carbonization (HTC)

Hyewon Park¹, Minah Oh², Seungjin Oh², Woori Cho², Jinman Chang², and Jai-young Lee^{1*}

¹School of Environmental Engineering, University of Seoul
163 Seoulsiripdae-Ro, Dongdaemun-Gu, Seoul, Korea, 130-743
²School of Environmental Engineering, University of Seoul
163 Seoulsiripdae-Ro, Dongdaemun-Gu, Seoul, Korea, 130-743

(Received for review May 8, 2023; Revision received May 24, 2023; Accepted May 26, 2023)

요 약

본 연구는 열수가압탄화공법(HTC)을 적용하여 하수슬러지를 탄화시켜 폐기물관리법에 따른 재활용 제품 기준을 만족하고, 응용 블록으로서의 재활용 가능성을 판단하였다. HTC 최적 반응온도와 시간을 통해 생성된 탄화 슬러지에 시멘트를 배합비 별로 배합하여 응용 블록의 공시체를 제작하였고, 중금속 용출 가능성과 성능분석을 진행하였다. 실험 결과 모든 응용 블록에서 중금속이 검출되지 않았으며, 성능분석의 비중과 흡수율의 경우 1.7 미만, 10% 이하의 해당 기준치를 만족하였다. 압축강도의 경우 28일 재령 기준으로 시멘트 5%, 7%의 배합비 경우 A, B, C종 블록 기준치에 만족하였으나, 시멘트 3%의 배합비 경우 A type 블록 기준에 미치지 못하였다. 이후 추가적인 재령을 진행한 결과 42일 차 재령 강도에서 A종 블록 기준을 만족하였다. 따라서 본 연구의 탄화 슬러지와 시멘트의 최적 배합비는 3% 이상 5% 이내로 판단하였으며 향후 응용 블록을 골재로서의 재활용 가능성을 확인하였다.

주제어 : 열분해, 하수슬러지, 열수가압탄화공법, 재활용, 응용 블록

Abstract : This study applied a hydrothermal carbonization (HTC) method to carbonize sewage sludge in order to satisfy the criteria of the Waste Management Act for recycled products and to explore the possibility of recycling sludge into modification blocks. Cement was mixed with carbonized sludge generated at the optimal temperature and reaction time during HTC. After that, the compressive strengths of the modification blocks were measured by conducting both a performance and leaching test. The results of the leaching test showed that heavy metals were not detected, and the specific gravity and absorption rates were less than 1.7 and 10%, respectively, indicating that all species satisfied the criteria. The results of the compressive strength test showed that a mixing ratio of 5% and 7% with cement cured for 28 days satisfied the criteria of A, B, and C type blocks but a mixing ratio of 3% with cement did not satisfy the criteria of A type blocks after 28 days. However, after additional curing for 42 days, the mixing ratio of 3% also satisfied the A type block criteria. Therefore, the optimal mixing ratio of carbonized sludge and cement was considered to be between 3% and 5% and confirmed that the modified blocks could be utilized as aggregates.

Keywords : Pyrolysis, Sewage sludge, Hydrothermal carbonization, Recycling, Modification block

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: leejy@uos.ac.kr; Tel: +82-2-6490-2864; Fax: +82-2-6490-5459

doi: 10.7464/ksct.2023.29.2.102 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

국내에서는 매년 하수처리시설의 신·증설로 인해 처리공정에서 발생하는 부산물인 하수슬러지의 발생 또한 증가하고 있다. 우리나라는 하수슬러지의 경우 2003년 직·매립의 금지되었고 '96 의정서 가입에 따라 2012년 하수슬러지 해양투기 금지, 2016년 육상폐기물 해양배출 전면금지 정책이 단계적으로 시행됨에 따라 하수슬러지의 효율적인 처리 방안의 개발이 대두되었다[1,2]. 국내에서 정의하고 있는 하수슬러지는 대표적인 유기성 폐기물로, 활성슬러지, 잉여슬러지, 혼합슬러지, 농축슬러지, 소화슬러지 및 탈수슬러지로 분류한다[3]. 하수슬러지의 특징으로는 높은 점도로 인해 저장이나 이송 시 취급이 곤란하며, 높은 수분 함량과 큰 부피로 인해 운송비용이 대량 발생하는 문제점이 있다. 또한 건조과정에서도 슬러지 간의 뭉침 현상으로 쉽게 분리되지 않아 열기와의 접촉이 어려워 건조공정을 어렵게 한다. 탈수 공정에서 수분을 감소시켰다 하더라도 하수슬러지의 상용화를 위해서는 추가적인 건조공정이 필수적으로 요구되고 있다. 2020년 기준 68%가 재활용방안으로 가용화되고 있으나 소각이 30.9%, 매립이 0.3%로 여전히 많은 양을 차지하고 있는 상황으로 이에 대한 적절한 처분방안이 요구되고 있으나 지원 정책은 여전히 미흡한 실정이다[4].

최근 하수슬러지 내 수분 감량화의 목적으로 탄화를 적용한 재활용방안이 주목받고 있다. 본 연구에서 적용된 열수가압탄화공법(Hydrothermal carbonization, HTC)은 수분을 함유한 물질을 탈수 및 건조 등의 전처리 과정 없이 무산소 상태에서 180~250 °C의 저온 조건을 적용하여 탄화시키는 방법이다[5]. 원시료 자체의 수분을 이용함으로써 수증기의 압력을 생성하기 때문에 건조 등 별도의 전처리 과정이 필요하지 않으므로 비교적 경제적인 장점을 지닌다. 또한 하수슬러지를 HTC에 적용할 시 수분 함량을 약 5% 이하까지 감소시키며 하수슬러지 내 점성도가 끊어져 고화됨에 따라 견고해지는 특징으로 강도를 확보할 수 있는 장점으로 골재로의 재활용방안 또한 주목받고 있다[6]. HTC 공법을 하수슬러지에 적용하였을 때, 입자크기가 10~25% 감소율을 보이며 CaO 함량이 증가하였고 골재로 활용할 경우 100 °C, 24시간 조건의 건조공정을 거친 후 가용화되고 있으며, 수분 함량이 높을수록 압축강도는 감소하였음을 확인하였다[7]. 기존 건설 현장에서 적용되는 콘크리트 골재는 장기적으로 사용시 CO₂ 등 온실가스 배출의 주요 원인이 되고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 소량의 시멘트와 탄화 슬러지를 적용해 강도 보완, CO₂ 배출, 중금속 용출 등 환경문제를 최소화하고자 한다.

본 연구는 HTC를 통해 생성된 하수슬러지 탄화물에 대한 폐기물관리법에 따른 재활용 제품 기준을 만족하고, 시멘트를 배합하여 응용 블록으로써의 재활용 가능성 연구를 목적으로 하였다.

2. 실험방법

2.1 실험재료

2.1.1 하수슬러지

본 연구에서 사용한 하수슬러지는 80% 내외의 수분을 함유

한 탈수슬러지로, S 시 J 하수처리장에서 채취하여 사용하였다.

2.1.2 포틀랜드 시멘트

응용 블록 제조를 위해 사용된 포틀랜드 시멘트는 석회, 이산화규소로 구성된 국내 S사 시멘트(1종)를 사용하였다.

2.2 HTC 반응장치 및 조건

HTC는 높은 수분을 함유한 폐기물을 열화학적으로 전환하여 처리하는 방식으로 아임계수 조건을 적용한다. 아임계수의 조건은 180 °C 이상의 온도 및 100 bar 이상의 높은 압력 조건을 기반으로 무산소 상태에서 진행되는 과정을 의미한다. 반응장치는 Figure 1과 같이 스테인리스 재질로 구성된 4520 Bench Top Reactors(Parr industry company, US)를 사용하였고 하수슬러지는 반응기 60% 내로 투입하여 과부하를 방지하고, Temperature Controller를 통해 온도를 조절하여 실험하였다[8].

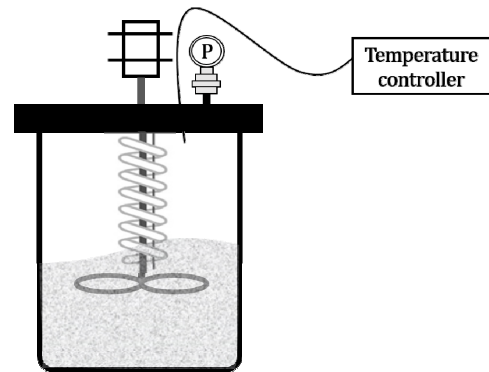


Figure 1. HTC reactor diagram in this study.

본 연구는 탄화 슬러지의 최적 조건을 도출하기 위해 폐기물관리법 시행규칙 별표5의 3에 따라 실험을 진행하였다. Han et al.[6] 연구에 따르면 탄화공법을 적용한 하수슬러지 가용화의 경우 200 °C에서 가장 높은 효율이 제시된 바 있어 본 연구에서는 180 °C, 190 °C, 200 °C, 220 °C의 저온 범위를 선정하였고 반응시간은 1시간으로 고정하여 실험을 진행하였다.

2.3 시멘트 배합비 설계 및 실험용 공시체 제작

최적 조건에서 탄화된 슬러지와 시멘트의 최적 배합 비율을 도출하기 위해 탄화 슬러지의 양 대비 시멘트를 1, 3, 5, 7% 혼합 후 실험용 공시체를 제작해 압축강도를 측정하였다. 압축강도 실험은 KS F 2392에 따라 수행하였으며, 실험방법에 따라 공시체를 제작 후, 1, 7, 14, 28일 주기로 양생한 공시체를 이용하여 강도를 분석하였다. 공시체는 규격 5×10 cm로 실험을 진행하였으며 2.5 kg의 래머를 사용하여 25회씩 다짐하여 공시체를 제작하였다. 양생의 경우 공시체 내에 분포한 수분이 시멘트와 배합하여 균형을 이룰 수 있게 하도록 밀봉하였고, 습도와 온도 조건의 경우 항온항습조(MAU-225-ME, US)를 이용해 각각 90±5%, 20±5 °C로 설정하여 양생하였다[9].

2.4 분석 방법

2.4.1 원시료 분석

시료의 물리·화학적 특성을 분석하고자 pH, 수분 함량, 유기물 함량, 회분 함량을 측정하였으며 폐기물공정시험 ES 06303.1, 06131.b을 준용하여 무게 비율로 계산하였다[9].

$$Moisture\ content\ (\%) = \frac{W_{wet} - W_{dried}}{W_{wet} - W_{dish}} \times 100 \quad (1)$$

W_{wet} : 습윤 시료 질량(g)
 W_{dried} : 건조 시료 질량(g)
 W_{dish} : 도가니 질량(g)

$$Ash\ Content\ (\%) = \frac{W_1}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

W_0 : 강열 전 i 시료의 중량(g)
 W_1 : 강열 후 i 시료의 중량(g)

$$Volatile\ solids\ (\%) = \frac{W_{sample} - W_{residue}}{W_{sample} - W_{dish}} \times 100 \quad (3)$$

W_{sample} : 강열 전 시료 + 도가니 질량(g)
 $W_{residue}$: 강열 후 시료 + 도가니 질량(g)
 W_{dish} : 도가니 질량(g)

2.4.2 HTC 반응을 이용한 최적 탄화조건 도출

본 연구는 HTC를 이용한 하수슬러지의 최적 탄화조건을 도출하기 위하여 HTC 반응 전후 pH, 수분 함량, 투수계수, 압축강도 및 중금속 함량 분석을 수행하였다. 본 실험은 유기성 폐기물 재활용 기준에 따라 폐기물관리법 시행규칙 별표5의 3에 의거하였으며 분석기준은 Table 1과 같다[9,10].

2.4.3 응용 블록의 성능분석 및 중금속 함량

탄화 슬러지를 시멘트 배합비에 따라 제조된 응용 블록의 성능분석은 KS F 4002에 따라 진행하였으며 실험 항목은 Table 2와 같다. 분석기준은 A, B, C종, 총 세 종류의 블록 기준에 따라 제시되어 있으며 A와 B종 블록은 중량블록, 압축강도 기준이 높은 C종 블록은 경량블록으로 분류된다[10].

환경 중으로 용출 가능할 수 있는 응용 블록 내의 중금속을 측정하기 위해 국내 폐기물 용출 시험법(Korea standard leaching

Table 2. Standard of modification block

Type of block	Compressive strength ^{a)} (N mm ⁻²)	Specific gravity ^{b)}	Water absorption ^{c)} (%)
A Type	≥ 4	< 1.7	-
B Type	≥ 6	< 1.9	-
C Type	≥ 8	-	≤ 10

^{a)}압축 하중 시에 최대 하중을 가압면의 단면적으로 나눈 값
^{b)}응용 블록의 절대 건조 질량을 용적으로 나눈 값
^{c)}표면 건조 포화 상태의 응용 블록에 함유된 전체 수량을 절대 건조 상태의 골재 질량으로 나누어 백분율로 표시한 값

Table 3. Comparison between the KSLT and SPLP

Test method	KSLT (KLT, ES 06150.b)	SPLP (EPA Method 1312)
Solution	HCl	HNO ₃ , H ₂ SO ₄
Eluent pH value	5.8 ~ 6.2	5.00 ± 0.05
Condition	6 h (at 200 rpm)	18 ± 2 h (at 30 rpm)
Sample-to-liquid ratio	1 : 10 (mass)	1 : 20 (mass)

test, KSLT), US EPA 1312 인공강우용출시험법(Synthetic precipitation leaching procedure, SPLP)을 실시하였으며 Table 3과 같이 제시하였다[11,12].

3. 결과 및 고찰

3.1 하수슬러지 특성 분석

3.1.1 공업분석

본 연구에서 사용된 하수슬러지의 성상을 판단하기 위해 pH, 수분 함량, 유기물 및 회분 함량인 기초적인 성상 분석을 시행하였다. 각각의 결괏값은 신뢰성을 높이고자 시료 당 3회를 측정하여 평균값을 산출하였다.

본 연구에서 진행된 공업분석의 결과는 Table 4와 같다. 하수슬러지의 결과 79.0%의 높은 수분 함량의 특징으로 즉시 에너지원으로 사용하기에는 어려움을 확인하였고 완전 건조 단계인 10~15%까지 도달하기 위한 감량화 방안이 필요할 것으로 판단되었다. pH의 경우 약알칼리성을 띠며, 골재로 적용하였을 때, 산성을 띠는 철근을 보호하여 부식을 방지할 것이라

Table 1. Criteria of carbonized sludge for recycling

Case	pH ^{a)}	Moisture content ^{b)} (%)	Coefficient of permeability ^{c)} (cm s ⁻¹)	Compressive strength ^{d)} (MPa)	Heavy metals ^{e)} (mg L ⁻¹)
Criteria	≤ 12.4	≤ 50%	1.0 x 10 ⁻⁷ cm s ⁻¹ ≤ x ≤ 1.0 x 10 ⁻³ cm s ⁻¹	≥ 0.1	Within Standard of Regional 2

^{a)}시료 내 수용액에 용해된 수소이온의 농도를 나타내는 지수
^{b)}폐기물공정시험기준에 준용하여 무게 비율로 측정
^{c)}흡을 통해 물이 투수 되는 것을 수량적으로 표시한 계수
^{d)}압축 하중 시에 최대 하중을 가압면의 단면적으로 나눈 값
^{e)}중금속 용출함량 평가를 위해 Pb, Cu, As, Ni, Cd, Zn, Cr⁶⁺ 농도 측정(ICP-MS)

Table 4. Result of proximate analysis of sewage sludge

Component Material	pH	Moisture content (%)	Organic compound (%)	Ash content (%)
Sewage sludge	8.1	79.0	11.0	10.0

고 사료되었다[13].

3.2 HTC를 이용한 탄화 슬러지의 최적 조건산정

탄화 슬러지를 골재로서의 적용 가능성을 판단하고 HTC 최적 조건을 도출하고자 폐기물관리법 시행규칙 별표5의 3, 폐기물 재활용 기준에 따라 실험을 진행하였다. HTC 적용 후 별도의 건조공정을 적용하지 않아도 수분 함량이 3.0~7.3%로 감소하였고, pH는 5.81~6.65 범위 내로 중화되었음을 확인하였다.

응용 블록으로 적용하기 위해 투수계수와 압축강도 실험을 진행한 결과, $6.8 \times 10^{-4} \sim 7.1 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$ 범위의 낮은 투수성과 0.85~0.91 MPa 압축강도 결과로 골재로 사용하기 위한 모든 기준치를 만족하였다. 유해 물질 용출 결과 또한 용출기준 이하로 검출되거나 검출되지 않아 탄화 슬러지를 본 연구의 재료로 사용하기에 적합함을 확인하였다.

최적 조건의 경우 본 연구의 목적인 응용 블록 재활용 가능성에 부합하고자 Table 5에 명시된 압축강도가 가장 높은 온도 200 °C를 선정하였고, 공정시간은 반응기 가동 시 에너지 소모량을 최소화하기 위해 단시간인 1시간을 선정하였다.

3.3 응용 블록의 성능분석 및 중금속 함량

본 연구에서는 탄화 슬러지에 콘크리트 주재료인 시멘트를 배합하여 응용 블록을 제작하고 이를 건설 현장에 적용하기 위한 성능분석을 시행하였다. 각 시멘트 배합조건에 따라 제작된

응용 블록은 1, 7, 14, 28일을 주기로 양생하였다. 시멘트를 배합한 콘크리트의 강도는 수화반응 속도에 따라 차이가 있지만, 재령에 따라 지속해서 증가하는 특징이 있다. 보통 초기강도는 재령 7~14일까지 급격한 강도 증가세를 보이며 28일까지 점진적으로 강도가 증가하게 된다. 이에 대한 콘크리트의 강도 발현 과정을 참고하여 자연환경으로 인해 습도조절이 변수가 되는 실제 건설 현장에서는 재령 28일 압축강도를 크게 상회할 수 없음을 확인하여 총 28일까지의 양생 기간을 확인하였다 [14].

3.3.1 압축강도

본 연구에서는 콘크리트 주재료인 시멘트에 탄화 슬러지를 응용 블록으로 활용하기 위해서 압축강도 분석을 하였다. 시멘트 배합비와 양생 기간에 따른 압축강도에 관한 결과는 Figure 2에 나타내었다. 배합비 1%와 3%를 제외한 모든 배합비에서 28일 기준 배합비 5%의 경우 7.19 MPa, 7%의 경우 11.04 MPa 결과를 도출하였다. 양생 기간이 경과할수록 압축강도는 계속해서 증가하였으며 시멘트의 특성상 양생 기간이 지날수록 강도가 견고해지는 특징을 적용해 양생 28일 차 기준치에 만족하지 못한 3% 배합비 또한 42일 차 추가 양생을 통해 4.06 MPa 결과를 도출하여 B종 블록 기준치인 4 MPa에 만족하였음을 확인하였다.

실험 결과를 종합적으로 미루어볼 때, 혼합비율 및 양생 기간에 따른 압축강도의 변화는 시멘트의 수화반응에서 일어난 포졸란 반응으로부터 기인한 것으로 판단된다. 시멘트를 배합한 콘크리트의 강도는 수화반응 속도에 따라 차이가 있지만, 재령에 따라 지속해서 증가하는 특징으로 응용 블록 또한 시멘트의 주성분인 CaO에 의한 포졸란 반응이 활성화되어 강도 증진에 기여했음을 판단하였다[15,16].

Table 5. Result of carbonized sewage sludge under various conditions

Case	pH	Moisture content (%)	Coefficient of permeability (cm s ⁻¹)	Compressive strength (MPa)	Heavy metals (mg L ⁻¹)
Criteria	≤ 12.4	≤ 50%	$1.0 \times 10^{-7} \text{ cm s}^{-1} \leq x \leq 1.0 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$	≥ 0.1	Pb, Cu:3.0
					As, Zn, Cr ⁶⁺ :1.5
					Ni:0.005
					Cd:0.3
180 °C, 1 h	6.65	7.3	7.1×10^{-4}	0.85	Pb:0.087, Cu:0.002
					As:0.093
					Zn,Cr ⁶⁺ , Ni, Cd:N.D.
190 °C, 1 h	6.41	5.2	7.0×10^{-4}	0.87	Pb:0.059, Cu:0.012
					As:0.075
					Zn,Cr ⁶⁺ , Ni,Cd:N.D.
200 °C, 1 h	6.12	4.4	6.1×10^{-4}	0.98	Pb:0.061, Cu:0.014
					As:0.055
					Zn,Cr ⁶⁺ , Ni,Cd:N.D.
220 °C, 1 h	5.81	4.0	6.8×10^{-4}	0.91	Pb:0.056, As:0.073
					Cu,Zn,Cr ⁶⁺ , Ni,Cd:N.D.

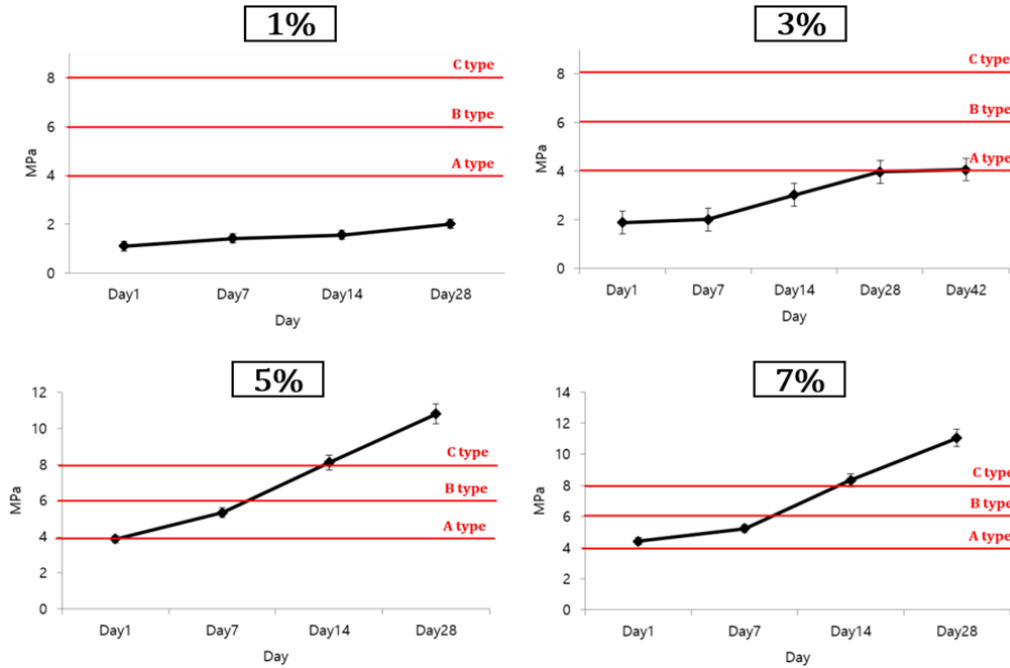


Figure 2. Compressive strength of modification block.

3.3.2 비중

비중 실험은 공시체의 질량/체적으로 측정하였으며, 실제 현장에 적용했을 때의 예측을 위해 양생 기간이 끝난 28일 차 응용 블록의 시멘트 배합비별 비중 결과는 Figure 3에 나타내었으며 시멘트 배합비가 증가할수록 비중 값이 0.26~0.28로 증가하였다. 비중 값이 크게 도출될 때 균질성이 소실되는 재료 분리 현상이 발생하여 강도에 영향을 미칠 가능성은 있으나, 본 연구에서 응용 블록 제작을 위해 혼합한 모든 배합비에서 응용 블록 표준기준인 1.7 미만을 만족하였으므로 실제 현장에서 적용하기에 문제없음을 판단하였다. 이를 건설 현장에 직접 사용하였을 경우 거푸집을 사용해 cement paste 누출을 방지하여 재료 분리 방지대책으로 적용할 수 있다.

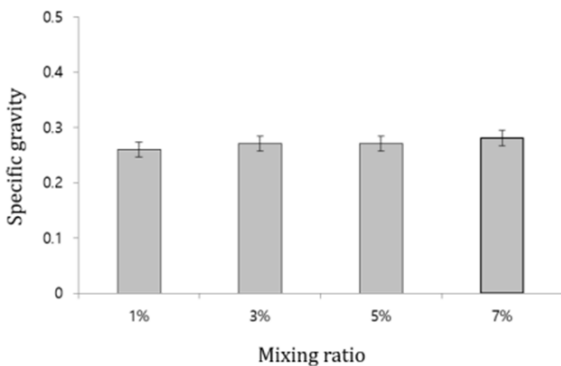


Figure 3. Specific gravity of modification block.

3.3.3 흡수율

28일 양생한 응용 블록의 흡수율은 배합비가 Fig. 4에 따르면 1%에서 7%로 증가할수록 흡수율이 7.5%에서 3.0%로 감소하는 경향을 보였다. 응용 블록의 흡수율은 강도와 온도 변화

에 대한 저항성 등을 유추할 수 있는 인지로, 흡수율이 높은 응용 블록은 수분 흡수가 용이한 다공성 구조를 갖는 것으로 유추할 수 있으며 이는 내구성 저하와 연결할 수 있다. 본 연구에서 제조한 응용 블록의 경우 하수슬러지가 함유한 응집제 및 시멘트 함량이 내구성에 영향을 미쳐 시멘트 배합비가 증가할수록 탄화 슬러지와 시멘트 내 기공이 압축되어 흡수율이 감소하는 것으로 판단된다. 본 실험에서 제조한 응용 블록의 경우 기준치를 모두 만족하는 결과를 보여 응용 블록으로써 사용을 가능할 것으로 사료된다.

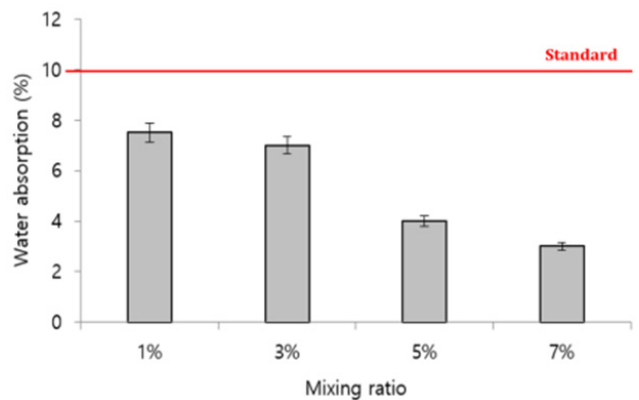


Figure 4. Water absorption of modification block.

3.3.4 응용 블록의 중금속 함량

실제 현장에서 응용 블록을 사용했을 때, 유해 물질이 주변 환경으로 용출될 가능성을 평가하였다. 따라서, 본 연구에서 28일 양생을 거친 배합비별 응용 블록의 대상으로 폐기물관리법과 US-EPA method 1312에 따라 중금속 용출 특성을 평가하였다. 본 연구에서 사용된 배합 비율에 따른 Pb, Cu, As, Ni,

Table 6. Analysis of heavy metal for modification block by KSLT (Unit : mg L⁻¹)

Material Component	Criteria	1%	3%	5%	7%
Pb	3.0	0.021	0.044	0.043	0.021
Cu	3.0	N.D	N.D	N.D	N.D
As	1.5	0.012	0.062	0.083	0.075
Ni	0.005	N.D	N.D	N.D	N.D
Cd	0.3	N.D	N.D	N.D	N.D
Zn	1.5	N.D	N.D	N.D	N.D
Cr ⁶⁺	1.5	N.D	N.D	N.D	N.D

Table 7. Analysis of heavy metal for modification block by SPLP (Unit : mg L⁻¹)

Material Component	Criteria	1%	3%	5%	7%
Pb	5.0	0.012	0.018	0.015	0.020
Cu	-	N.D	N.D	N.D	N.D
As	5.0	N.D	N.D	N.D	N.D
Ni	-	N.D	N.D	N.D	N.D
Cd	1.0	N.D	N.D	N.D	N.D
Zn	-	N.D	N.D	N.D	N.D
Cr ⁶⁺	5.0	N.D	N.D	N.D	N.D

Cd, Zn, Cr⁶⁺ 농도는 Table 6-7에 나타내었다. 용출 실험 결과 유해 물질 허용 기준치 미만으로 검출되었으며 응용 블록을 실제 현장에 적용하는 데 환경적으로 충분히 안전한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 탄화 슬러지를 이용해 응용 블록으로 재활용하고자 최적 시멘트 배합비를 선정하였으며 HTC를 적용해 하수슬러지의 감량화 목적을 두었으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

탄화물과 시멘트를 배합한 공시체 양생 결과 양생 기간이 길어질수록 강도가 꾸준히 증가하는 경향을 도출하였다. 배합비 1%를 제외한 모든 배합비 내에서 강도 기준을 만족하였다. 시멘트 3% 배합비의 경우 28일 차 강도를 측정했을 때, 강도 규정을 만족하지 못하였으나 추가 양생을 진행한 결과 4.06 MPa로 기준치를 만족했다. 이를 통해 최적의 시멘트 배합비 조건은 3% 이상 5% 이내임을 도출하였다. 본 연구의 비중, 흡수 및 강도 실험을 통해 응용 블록의 적용 가능성을 확인하였으며, 또한 중금속 용출 결과 배합비와 관계없이 모두 허용 기준치를 만족시키는 것으로 나타났으나 장기적인 측면으로 보았을 때 시멘트의 강알칼리성 수산화칼슘 생성 가능성에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

하수슬러지를 응용 블록으로의 재활용함에 있어서 사용된

HTC 공법은 효율성을 갖춘 실험방법으로 확인되며, 이를 통해 제작된 응용 블록을 건설 자재로서의 활용 가치가 있는 것으로 판단되었다.

감 사

본 연구는 환경부 “폐자원에너지화 재활용 전문인력 양성사업(YL-WE-22-001)”에서 지원받았으며 이에 감사드립니다.

References

- An, J. W., “Optimization for bio-drying of sewage sludge with food waste and study on microbial communities,” Master’s Dissertation, University of Seoul, Korea (2019).
- Lee, J. I., Cho, Y. M., Jeong, H. Y., and Hong, L. S., “Method for Efficient Treatment of Sewage Sludge,” Policy Report 2018-39, Gyeonggi Research Institute (2018).
- Ministry of Environment, Waste Management Act. www.law.go.kr (accessed date: December 27, 2022).
- Lee, Y. S. and Shin, H. J., Patent KR200110047175A (2001).
- Won, M. H., “A Feasibility Study of Wood Waste to Solid Bio-coal using Hydrothermal Carbonization (HTC),” *J. Korea Society Waste Management*, **38**(6), 561-568 (2021).
- Han, D. B., Yeom, K. I., Cho, O. S., and Baek, Y. S., “A Study on the Manufacture of Bio-SRF from the Food waste by Hydrothermal Carbonization (HTC) Process,” *J. Korean Hydrogen and New Energy Society*, **29**(4), 426-432 (2017).
- Ahmed, L. D., Mounisif, I. S., Omar, W. A., and Ali, L. M., “Valorisation of dredged marine sediments for use as road material,” *J. Case Studies in Construction Materials*, **13**, e00455 (2020).
- Pavkov, I., Radojčin, M., Stamenković, Z., Bikić, S., Tomić, M., Bukurov, M., and Despotović, B., “Hydrothermal Carbonization of Agricultural Biomass: Characterization of Hydrochar for Energy Production,” *J. Solid Fuel Chemistry*, **56**(3), 225-235 (2022).
- Lee, J. J., “A Study on the Stabilization of Heavy Metal(Pb) Contaminated Soils using IGCC Coal Slag and Fuel Gas Desulfurized Gypsum,” Master’s Dissertation, University of Seoul, Korea (2021).
- Park, H. W., “A Study on Modification Block of sewage sludge by Hydrothermal Carbonized,” Master’s Dissertation, University of Seoul, Korea (2023).
- Kim, H. W., “A Study on the Characteristics of Biochar with the Sludge of Sewage by Low temperature Hydrothermal Carbonization,” Master’s Dissertation, University of Seoul, Korea (2013).
- Baek, Y. S., “The characteristics of the Bio-char with the food and wood waste,” Master’s Dissertation, University of Seoul, Korea (2012).
- Jo, Y. K., “A study on the pH Reduction of Cement Concrete

- with Various Mixing Conditions,” *J. Korea Construction Engineering Association*, **8**(4), 79-85 (2008).
14. Kim, J. D., “Manufacturing water permeable block using loess, clay and waste sewage sludge,” *J. Korean Soc. Water Environ.*, **31**(5), 476-481 (2015).
15. Lee, H. J., “Development of inorganic binder using ash from sewage sludge incinerater I,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(12), 843-850 (2014).
16. Yoo, Y. S., “Study on Manufacturing Characteristics of Carbonated Lightweight Aggregate Using Sewage Sludge,” *J. Korean Society of Water and Wastewater*, **27**(6), 743-750 (2013).