Journal of Environmental Science International
35(10); 903~911; October 2026
pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2026.35.10.903

ORIGINAL ARTICLE

기존 병합 전처리시설의 노후 매립장 침출수 전용처리 전환을 위한 처리특성 및 공정 적용성 검토

노민수 · 김재현*
계명문화대학교 소방환경안전과

Assessment of Treatment Characteristics and Process Applicability for Converting an Existing Co-Treatment Pretreatment Facility into a Dedicated Treatment System for Mature Landfill Leachate

Min-Soo Noh, Jae-Hyun Kim*
Department of Fire and Environmental Safety, Keimyung College University, Daegu 42601, Korea

Abstract

This study examined the process configurations for converting an existing co-treatment pretreatment facility into a dedicated treatment system for mature landfill leachate following the discontinuation of food waste leachate inflow. The target leachate exhibited low biodegradability, with a biochemical oxygen demand/chemical oxygen demand (BOD/COD) ratio of 0.18 and a high total nitrogen concentration of 640.7 mg/L. Aeration tests showed limited organic removal efficiencies after 7 days (BOD 30.3% and COD 27.2%), indicating the limitations of biological treatment alone. In jar-tests comparing inorganic coagulants, polyaluminum chloride (PAC) exhibited relatively favorable COD removal characteristics, whereas both PAC and $FeCl_3$ showed high total phosphorus (T-P) removal performance under the tested conditions. Powdered activated carbon adsorption tests showed reductions in BOD and COD with increasing dose, and 2,000 mg/L was selected for the pilot plant considering both treatment efficiency and dose. Based on these preliminary results, two non-biological pilot process configurations were evaluated. Plan 2, which incorporated powdered activated carbon pretreatment (2,000 mg/L) in the pilot-scale equalization tank prior to chemical treatment, sedimentation, filtration, and adsorption, achieved higher overall removal efficiencies than Plan 1, with removal efficiencies of 82.3% for BOD, 95.8% for COD, 96.7% for T-P, and 88.5% for color. These findings suggest that the incorporation of powdered activated carbon pretreatment into physicochemical processes can be considered a practical alternative for converting an existing co-treatment facility into a dedicated treatment system for mature landfill leachate.

key words : Mature landfill leachate, Physicochemical treatment, Powdered activated carbon, Coagulation, Process conversion

1. 서 론

매립장 침출수는 폐기물 매립 과정에서 강우 침투 및 폐기물 자체 수분에 의해 발생하며, 유기물, 암모니아성 질소, 무기염류 및 난분해성 물질 등을 포함한다(Al Raisi, 2022). 침출수의 수질은 매립폐기물의 조성,

Received 21 August, 2026; **Revised** 23 September, 2026;
Accepted 30 September, 2026
***Corresponding author** : Jae-Hyun Kim, Department of Fire and Environmental Safety, Keimyung College University, Daegu 42601, Korea
Phone : +82-53-589-7947
E-mail : kjh419@kmcu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
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.

강수량 및 매립지 운영상태 등에 따라 크게 달라지며 (Park et al., 2007; Al Raisi, 2022), 특히 매립 연한이 경과한 노후 매립장 침출수는 일반적으로 높은 암모니아성 질소 농도와 낮은 biochemical oxygen demand/chemical oxygen demand (BOD/COD) 비를 나타내고, 휴믹 및 펄빅 계열의 난분해성 유기물 비율이 높은 특성을 보인다(Kjeldsen and Christophersen, 2001; Renou et al., 2008). 이러한 수질특성은 생물학적 처리효율을 제한하는 요인으로 작용할 수 있으며, 특히 낮은 생분해성과 높은 질소부하를 갖는 노후 침출수의 경우 단일 생물학적 처리만으로 안정적인 처리효율을 확보하기 어려울 수 있다(Kurniawan et al., 2010). 이에 따라 침출수의 수질특성과 처리목표에 맞추어 생물학적 처리와 고도산화, 막분리 및 물리·화학적 처리공정 등을 연계·조합하는 처리전략이 검토되어 왔으며, 특히 난분해성 유기물 제거를 위한 물리·화학적 처리공정의 병행이 필수로 요구된다(Renou et al., 2008; Torretta et al., 2017; Kamal et al., 2022).

국내에서는 음식물류폐기물 처리과정에서 발생하는 고농도 유기성 폐수를 침출수와 연계 처리하여, 노후 침출수의 부족한 유기탄소원을 보완하고 생물학적 처리효율을 향상시키는 방안이 검토되어 왔다(Choi et al., 2012). 그러나 음식물류폐기물 처리체계의 변화 등에 따라 음식물류폐기물 탈리액(이하 음폐수) 유입이 중단될 경우 기존 병합 처리시설은 침출수 단독 처리체계로의 전환이 필요하며, 변화된 원수 특성을 고려한 처리공정의 재검토가 요구된다. 특히 노후 침출수의 난분해성 유기물과 색도 제거와 같은 잔류 오염물질의 제거를 위해서는 화학적 응집과 활성탄 흡착 등 물리·화학적 처리공정의 적용성을 함께 검토할 필요가 있다(Renou et al., 2008; Li et al., 2010; Torretta et al., 2017).

기존 노후 침출수 관련 연구들은 주로 침출수의 일반적인 수질 특성 분석이나 개별 단위 공정(응집, 흡착, 단순 생물학적 처리 등)의 처리 효율 평가에 집중되어 왔다. 또한 침출수를 기존 하수처리시설에 유입하여 처리하는 병합처리(co-treatment)에 관한 연구에서는 침출수의 유입에 따른 처리효율과 기존 처리공정에 미치는 영향 등이 주요하게 검토되어 왔다. 반면, 병합 대상 폐수의 유입이 중단된 이후 기존 병합 전처리시설의 설비를 활용하여 노후 매립장 침출수 전용 처리체계로 기능을 전환하는 상황을 대상으로, 단위공정의 처리특성을 단계적으로 검토하고 이를 연계한 공정을 pilot plant 규모에서 비교한 연구는 상대적으로 제한적이다.

이에 본 연구에서는 제주시 소재 B매립장의 노후 침출수를 대상으로, 음폐수 유입 중단에 따른 기존 병합 전처리시설의 침출수 전용 처리체계로의 전환 가능성을 검토하였다. 이를 위해 대상 침출수의 수질특성을 분석하고, 단순 포기 및 미생물 접종 실험을 통해 생물학적 처리의 적용성을 평가하였으며, 무기응집제별 jar-test와 분말활성탄 주입실험을 통해 응집 및 흡착 공정의 처리특성을 검토하였다. 또한 이를 바탕으로 구성한 두 가지 처리공정을 pilot plant 규모에서 비교하여 처리효율과 현장 적용성을 검토하고, 이를 토대로 기존 병합 전처리시설을 노후 매립장 침출수 전용 처리시설로 전환하기 위한 적정 공정구성안을 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상 침출수 및 시설 개요

본 연구의 대상 시설은 제주시 소재 B매립장의 침출수 전처리시설이다. B매립장은 매립이 종료된 노후 매립장으로, 대상 시설에서는 기존에 매립장 침출수와 음폐수를 병합 처리하였다. 이후 음폐수 유입 중단에 따라 침출수 전용 전처리체계로의 전환이 검토되었으며, 본 연구에서는 이 과정에서 수행된 기초실험과 pilot plant 실험 결과를 바탕으로 대상 침출수의 처리특성과 적용 공정의 적정성을 검토하였다.

실험에는 B 노후 매립장에서 발생한 침출수를 사용하였으며, 대상 침출수의 수질 특성을 파악하기 위하여 pH, BOD, COD, SS, 총질소(T-N), 총인(T-P) 및 색도 등을 분석하였다. 또한 각 단위공정 실험에는 시설 운영 및 조사 일정에 따라 서로 다른 시기에 채취된 침출수가 사용되었으며, 이에 따라 실험별 원수 수질에는 차이가 있었다.

2.2. 생물학적 처리 적용성 검토

대상 침출수에 대한 기존 포기조 설비의 활용 및 단독 생물학적 처리의 적용 가능성을 평가하기 위하여 실험실 규모의 회분식 포기실험을 수행하였다. 실험은 공기만을 공급하는 단순 포기 조건과 활성슬러지를 접종한 미생물 접종 포기 조건으로 구분하여 비교 진행하였다. 각 실험용기에는 침출수 3 L를 주입하였으며, 미생물

접종 조건은 인근 처리시설 포기조에서 채취한 활성슬러지를 접종한 후 기존 포기조의 체류시간을 고려하여 7일간 연속 포기하였다. 실험기간 동안 수온은 20~23℃, pH는 7.0~7.5 범위였으며, 호기성 반응 조건이 유지될 수 있도록 포기기를 통해 공기를 지속적으로 공급하였다.

실험 개시일부터 7일까지 1일 간격으로 시료를 채취하여 BOD와 COD를 분석하고 두 조건의 농도 변화를 비교하였다. 시료 분석 시에는 부유물질(SS) 및 투입된 미생물 슬러지 자체의 유기물에 의한 측정 오차를 방지하기 위해 일정 시간 침전 후 상등액을 취하여 측정하였다. 본 실험은 MLSS 및 F/M 비 등 세부 운전인자를 제어하여 최적 성능을 도출하기보다는, 단순 포기 대비 미생물 접종에 따른 유기물 저감 특성을 확인하고 기존 포기조를 활용한 생물학적 처리의 적용 가능성을 판단하기 위한 기초자료로 활용하였다.

2.3. 무기응집제별 jar-test

대상 침출수에 대한 응집제 종류와 주입량에 따른 처리특성을 비교하기 위하여 jar-test를 수행하였다. 실험에는 침출수 500 mL를 사용하였으며, 무기응집제로 PAC (polyaluminum chloride), Alum 및 $FeCl_3$를 사용하였다. 응집제 투입 후 NaOH를 사용하여 시료의 pH를 약 7로 조정하였고 응집보조제로는 현장에서 사용 중인 상용 약품(NALCO 6960)을 사용하였다. 본 실험은 현장 적용성을 고려하여 동일한 운전조건에서 응집제 종류와 주입량에 따른 처리특성을 비교하는 방식으로 수행하였다.

Jar-test는 120 rpm에서 1분간 급속교반한 후 55 rpm에서 5분, 10 rpm에서 10분간 순차적으로 교반하고 20분간 정치하였다. 이후 상등액을 취하여 COD와 T-P를 분석하였다. 원수 수질이 서로 다른 조건에서 2회의 jar-test를 수행하였으며, 응집제 종류와 주입량에 따른 처리 후 농도 변화를 비교하여 대상 침출수에 대한 응집처리의 적용성을 검토하였다.

2.4. 분말활성탄 흡착 실험

대상 침출수의 난분해성 유기물 제거에 대한 흡착처리의 적용성을 검토하기 위하여 분말활성탄(powdered activated carbon)을 이용한 흡착실험을 수행하였다. 실험에는 SAMCHUN의 분말활성탄(charcoal activated, powder)을 사용하였으며, 침출수 원수에 분말활성탄을 각각 100, 500, 1,000, 2,000 및 3,000 mg/L의 농도로 투입하였다. 접촉시간은 사전실험에서 0~24시간 동안 시간에 따른 처리특성을 검토한 결과를 바탕으로 2시간으로 설정하였으며, 각 시료를 90 rpm에서 교반하였다. 처리 후 BOD와 COD를 분석하였으며, 분말활성탄 주입농도에 따른 유기물 농도 변화와 제거효율을 비교하여 적정 주입조건 및 후속 처리공정 적용 가능성을 검토하였다.

2.5. 현장 pilot plant 공정 구성 및 운전

기초실험을 통해 검토한 단위공정의 현장 적용성을 평가하기 위하여 기존 전처리시설 현장에서 pilot-scale 실험장치를 구성하여 pilot test를 수행하였다. pilot test에서는 생물학적 포기공정을 적용하지 않고, 분말활성탄 전처리 적용 여부에 따라 2가지 공정으로 구성하였다. 주요 실험장치의 구성과 규격은 Fig. 1에 제시하였다.

1안(Plan 1)은 유량조정 → 화학처리 → 침전 → 여과 → 흡착공정으로 구성하였으며, 2안(Plan 2)은 유량조정조에 분말활성탄을 투입한 후 분말활성탄 처리 → 화학처리 → 침전 → 여과 → 흡착공정으로 구성하였다. 2안에서 분말활성탄은 2,000 mg/L로 주입하였으며, 2일간 접촉·교반한 후 화학처리, 침전, 여과 및 흡착공정을 순차적으로 적용하였다. 화학처리에는 PAC, NaOH 및 응집보조제(Nalco 6960)를 사용하였으며, 후단 여과 및 흡착공정에는 각각 bio-ball과 활성탄을 적용하였다.

Pilot-scale 실험장치의 유입수와 각 공정안의 최종 처리수에 대한 수질분석을 실시하였으며, 유입수 농도를 기준으로 BOD, COD, T-N, T-P 및 색도의 제거효율을 산정하여 Plan 1과 Plan 2의 처리특성과 현장 적용성을 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 대상 침출수의 수질 특성

B매립장 침출수의 수질분석 결과는 Table 1에 제시하였다. 대상 침출수의 pH는 7.7로 약알칼리성을 나타냈으며, BOD와 COD는 각각 36.2 및 198.2 mg/L로 분석되었다. 이에 따른 BOD/COD 비는 약 0.18로 낮게 나타나, 생분해성 유기물의 비율이 상대적으로 낮은

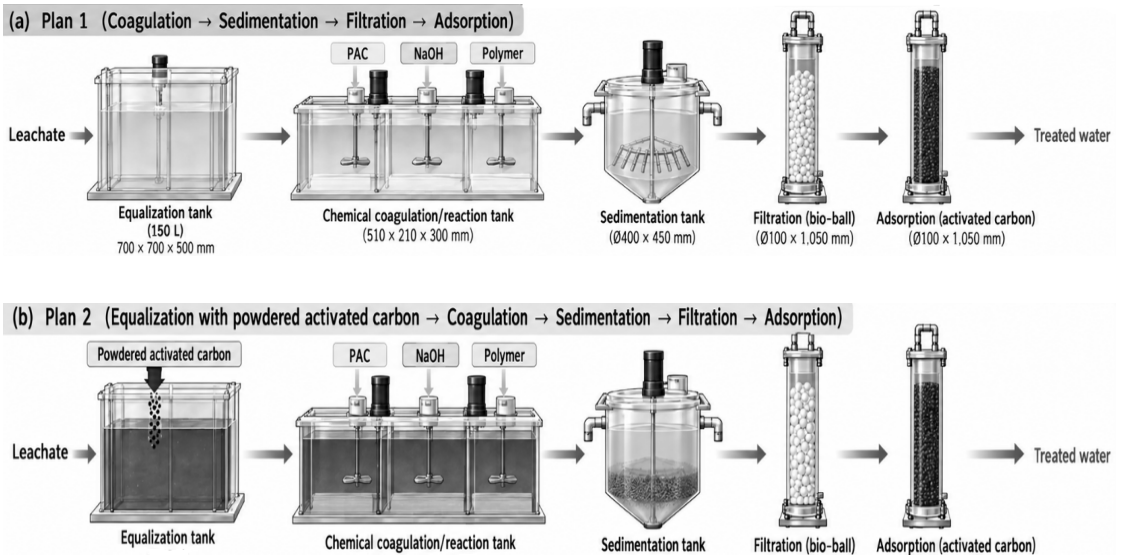


Fig. 1. Schematic diagram of the pilot-scale treatment system (a) Plan 1 and (b) Plan 2.

Table 1. Water quality analysis results of the raw leachate

Parameter	pH[a]	BOD	COD	SS	T-N	T-P	Color[b]	BOD/COD[a]	BOD/T-N[a]	T-N/T-P[a]
Leachate	7.7	36.2	198.2	22.0	640.7	1.2	365.8	0.18	0.06	534

Values are expressed in mg/L unless otherwise indicated. [a] Dimensionless. [b] Unit: degree (or TCU)

것으로 판단된다. 선행연구에서도 매립지 안정화가 진행됨에 따라 BOD와 COD가 감소하고 BOD/COD 비가 낮아지며, 안정화된 침출수에서는 휴믹 및 펄빅 계열의 난분해성 유기물이 주요 잔류 유기물로 존재하는 것으로 보고되었다(Kjeldsen et al., 2002; Abdel-Shafy et al., 2024).

또한 T-N은 640.7 mg/L로 높은 반면 T-P는 1.2 mg/L로 낮게 나타났으며, BOD/T-N 및 T-N/T-P 비는 각각 약 0.06과 534로 산정되었다. 이러한 결과는 대상 침출수가 생물학적 처리에 필요한 탄소원 및 영양염 균형 측면에서 불리함을 나타낸다. 다만 대상 시설의 처리수는 후단 하수처리장으로 연계처리되는 운영체계이므로, 질소의 처리방안은 전처리시설의 제거효율뿐만 아니라 연계처리시설의 수용가능 부하와 연계수질 조건을 함께 고려하여 검토할 필요가 있다.

색도는 365.8도로 높게 나타났으며, 이는 휴믹물질 등 난분해성 유기물의 영향을 받을 가능성을 시사한다. 안정화된 침출수에서 휴믹산은 주요 난분해성 유기물로 존재하며 COD 및 색도 형성에 상당한 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있다(Ahmed et al., 2023). SS는 22.0 mg/L로 비교적 낮게 나타났으며, 이는 입자성 물질에 비해 용존상 또는 콜로이드 성분의 영향이 상대적으로 클 가능성을 시사한다. 침출수 중 일부 유기오염물질은 용존성 또는 콜로이드 결합상으로 존재할 수 있는 것으로 보고되고 있다(Kalmykova et al., 2013). 따라서 대상 침출수의 안정적인 처리를 위해서는 생물학적 처리의 적용성을 검토하는 동시에, 난분해성 유기물의 제거를 위한 응집 및 흡착 등 물리·화학적 처리공정의 적용 가능성을 함께 검토할 필요가 있다.

3.2. 생물학적 처리 적용성

대상 침출수에 대한 생물학적 처리 적용성을 평가하기 위하여 단순 포기와 미생물 접종 포기실험을 수행하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 단순 포기실험에서 BOD는 초기 102.6 mg/L에서 7일 후 95.6 mg/L로 감소하였고, COD는 172.3 mg/L에서 143.4 mg/L

Table 2. Analysis results of plain and seeded aeration experiments for leachate

Day	Aeration alone		Microbial seeding + Aeration	
	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)
0	102.6	172.3	102.6	172.3
1	115.6	165.3	91.6	165.3
2	125.6	142.6	85.6	153.6
3	110.8	140.3	76.5	143.5
4	101.6	138.6	74.5	143.2
5	99.5	141.6	72.6	132.6
6	98.7	135.6	70.6	128.5
7	95.6	143.4	71.5	125.4
Removal efficiency (%)	6.8%	16.8%	30.3%	27.2%

로 감소하여 각각 약 6.8%와 16.8%의 제거율을 나타냈다. 반면, 미생물 접종 포기실험에서는 7일 후 BOD와 COD가 각각 71.5 및 125.4 mg/L까지 감소하였으며, 제거율은 각각 30.3%와 27.2%로 나타났다. 단순 포기와 비교할 때 미생물 접종에 의해 BOD 및 COD 제거효율이 향상되는 경향이 확인되었으나, 7일간의 포기 후에도 유기물 제거효율은 전반적으로 제한적인 수준이었다.

한편, 생물학적 처리실험에 사용된 원수의 BOD/COD 비는 약 0.60으로, 이는 대상 침출수의 수질 특성 분석에서 확인된 BOD/COD 비 0.18보다 높게 나타났다. 정량적으로 비교하면 생물학적 처리실험 원수의 COD는 대상 침출수보다 약 13% 낮은 반면, BOD는 약 2.8배 높았으며, 이에 따라 BOD/COD 비는 약 3.3배 높은 수준이었다. 이러한 차이는 실험 당시 원수에서 생분해성 유기물의 상대적 비율이 높았음을 나타내며, 시료 채취시기 및 시설 운영조건에 따른 침출수 수질변동이 반영된 것으로 판단된다. 따라서 생물학적 처리실험 결과를 BOD/COD 비 0.18의 대상 침출수에 직접 적용하여 처리효율을 정량적으로 예측하는 데에는 한계가 있다. 그러나 상대적으로 생분해성이 높은 원수조건에서도 미생물 접종 후 BOD 및 COD 제거율이 각각 30.3%와 27.2%에 그친 점은, 생분해성이 낮은 노후 매립장 침출수에 생물학적 처리를 단독으로 적용하는 데 한계가 있음을 시사한다. 선행연구에서도 노후·안정화 침출수는 생물학적 처리에 의한 COD 제거가 제한될 수 있으며, 이러한 경우 응집·플록형성 및 활성탄 흡착 등 물리·화학적 처리공정의 적용이 필요할 수 있다고 보고된 바 있다(Tałałaj et al., 2019). 이에 본 연구에서는 난분해성 유기물 제거를 위한 응집 및 흡착공정의 적용성을 추가로 검토하였다.

3.3. 응집제 종류에 따른 처리 특성

1차 및 2차 jar-test의 원수농도 차이를 고려하여, 각 시험의 원수농도를 기준으로 응집제 종류 및 주입량에 따른 COD 제거율을 산정하고 이를 Fig. 2에 나타내었다. 1차 및 2차 jar-test의 원수 COD는 각각 96.2 및 146.4 mg/L로 차이를 보였으나, 제거율을 기준으로 비교한 결과 두 실험 모두 응집제 주입량 증가에 따라 COD 제거효율이 전반적으로 증가하였다. 응집제별로는 PAC가 가장 높은 제거효율을 나타냈으며, $FeCl_3$와 Alum이 그 뒤를 이었다. PAC의 최대 COD 제거효율은 1차와 2차 실험에서 각각 47.8%와 54.0%로 나타났고, 고주입 조건에서는 제거효율의 증가폭이 둔화되는 경향을 보였다. 응집·플록형성은 안정화된 매립장 침출수에서 콜로이드성 및 비생분해성 유기물 제거를 위한 물리·화학적 처리공정으로 적용되어 왔으며, 처리효율은 응집제 종류, 주입량 및 pH 등의 운전조건에 영향을 받는 것으로 보고되고 있다(Abdel-Shafy et al., 2024). 본 연구에서도 응집제 종류와 주입량에 따라 COD 처리특성에 차이가 나타났으며, 본 실험 조건에서는 PAC의 적용성이 상대적으로 양호한 것으로 나타났다.

T-P의 원수농도 역시 1차와 2차 실험에서 각각 6.256 및 7.216 mg/L로 차이를 보여, 각 시험의 원수농도를 기준으로 산정한 제거율을 비교하였다(Fig. 3). 두 실험에서 유사한 처리경향이 확인되었으며, 모든 응집제에서 주입량 증가에 따라 T-P 제거효율이 증가하

였다. 최대 주입조건에서 PAC의 제거효율은 각각 91.6%와 91.4%, $FeCl_3$는 각각 89.2%와 89.7%로 나타나 두 응집제 모두 높은 T-P 제거특성을 보였다. Alum은 각각 84.7%와 88.2%로 상대적으로 낮은 제거효율을 나타냈다. 특히 2차 실험의 일부 주입조건에서는 $FeCl_3$가 PAC와 유사하거나 다소 높은 제거효율을 나타내어, T-P 제거 측면에서는 PAC와 $FeCl_3$ 모두 높은 처리특성을 나타냈다.

COD와 T-P 처리특성을 종합하면, 응집제 주입량 증가에 따라 COD 및 T-P 제거효율이 전반적으로 향상되는 경향을 나타냈다. T-P 제거에서는 PAC와 $FeCl_3$가 모두 높은 처리특성을 보였으나, COD 제거경향을 함께 고려할 경우 본 실험조건에서는 PAC가 전반적으로 양호한 처리특성을 나타냈다. 이에 따라 PAC를 후속 공정의 주 응집제로 선정하였으며, 이후 여과 및 흡착공정과 연계한 적용성을 검토하였다.

3.4. 분말활성탄 주입에 따른 처리 특성

분말활성탄 주입량에 따른 BOD 및 COD 처리특성을 Fig. 4에 나타내었다. 분말활성탄을 주입하지 않는 조건에서 BOD와 COD는 각각 102.6 및 172.3 mg/L였으며, 주입량이 증가함에 따라 주 항목 모두 전반적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 특히 2,000 mg/L 주입 시 BOD와 COD는 각각 32.3 및 72.1 mg/L로 감소하여 68.5%와 58.2%의 제거율을 나타냈다. 반면, 주입량을 3,000 mg/L까지 증가시킨 경우 BOD와 COD 제거율은 각각 71.2%와 62.2%로 증가하였으나, 2,000 mg/L 주입 조건이 비해 제거율의 증가는 각각 68.5%에서 71.2%, 58.2%에서 62.2%로 제한적이었다.

안정화된 매립장 침출수를 대상으로 한 선행연구에서는 활성탄 흡착을 통해 잔류 유기성분과 COD를 효과적으로 저감할 수 있음이 보고되었다(Li et al., 2010; Deng et al., 2018). 본 연구에서도 분말활성탄 주입량 증가에 따라 BOD와 COD가 감소하여 활성탄 흡착을 통한 침출수 유기물 저감 가능성을 확인하였다.

따라서 처리효율과 분말활성탄 주입량을 종합적으로 고려하여 2,000 mg/L를 후속 pilot plant 공정의 분말활성탄 주입조건으로 선정하였다.

3.5. Pilot plant 공정별 처리 특성 및 적용성 검토

Pilot plant의 공정별 처리특성을 Table 3과 Fig. 5에 나타내었다. 1안과 비교하여 분말활성탄 전처리를 적용한 2안에서는 모든 항목의 처리효율이 증가하였으며, 특히 COD와 색도는 2안에서 각각 95.8%와 88.5%의 제거율을 나타내어, 분말활성탄 전처리를 후속 화학처리 및 흡착공정과 연계할 경우 난분해성 유기물과 색도 유발물질의 제거에 효과적인 것으로 나타났다.

T-N과 T-P 역시 2안에서 각각 84.3 및 96.7%의 제거율을 나타내어 1안(T-N 14.6%, T-P 80.8%)보다 높은 처리효율을 보였다. 특히 생물학적 공정이 배제된 본 pilot plant 운전조건에서 2안의 T-N 농도가 640.7 mg/L에서 100.6 mg/L로 크게 감소하는 경향이 나타났다. 그러나 일반적으로 응집 및 흡착을 중심으로 한 물리·화학적 처리공정에서 용존성 무기질소의 직접적인 제거에는 한계가 있으므로, 본 연구에서 관찰된 T-N 감소를 특정 제거기작에 의한 결과로 단정하기는 어렵다. pilot-scale 유량조정조에서의 2일간 접촉·교반 과정과 분말활성탄 투입, 후단 화학처리 등이 복합적으로 영향을 미쳤을 가능성은 있으나, 본 연구에서는 질소 형태별 세부분획을 분석하지 않아 구체적인 질소 저감 기작을 규명하는 데에는 한계가 있다. 또한 T-N은 높은 제거율에도 불구하고 최종 처리수에서 100.6 mg/L로 잔존하였으므로, 고농도 질소를 함유한 노후 매립장 침출수의 안정적인 처리를 위해서는 연계처리 시설의 수용조건 및 관련 기준을 고려한 추가적인 질소 관리방안에 대한 검토가 필요하다. 향후에는 유입수와 각 단위공정 처리수에 대한 NH_4-N, NO_2-N, NO_3-N 및 Kjeldahl nitrogen의 단계별 분석을 통해 질소 형태의 변화와 저감기작을 구체적으로 검토할 필요가 있다.

매립장 침출수 처리에서 활성탄 흡착은 선행 처리 후 잔류하는 유기물 및 난분해성 유기성분을 추가로 제거하기 위한 후단공정으로 적용된 바 있으며(Shao et al., 2020), Fenton 처리 후 활성탄 흡착을 연계하여 COD 및 색도를 추가로 제거한 사례도 보고되어 있다(San-Pedro et al., 2020). 본 연구에서는 pilot-scale 유량조정조를 분말활성탄 접촉조로 활용하여 전처리 단계의 적용성을 검토하였다는 점에서 기존의 후단 활성탄 흡착공정과 차이가 있다. 이러한 공정구성에서 2안의 처리성능이 1안보다 향상된 점을 고려할 때, 분말활성탄 전처리를 포함한 2안은 기존 병합 전처리시설을 노후 매립장 침출수 전용 처리시설로 전환하기 위한 공정 대안으로 검토할 수 있을 것으로 판단된다.

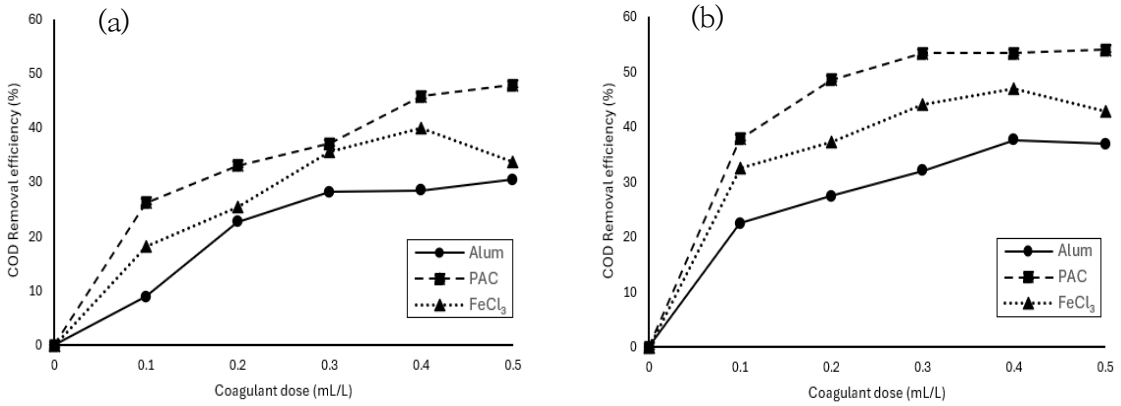


Fig. 2. Effects of coagulant type and dose on COD removal efficiency: (a) first jar test and (b) second jar test. ●, Alum; ■, PAC; ▲, $FeCl_3$

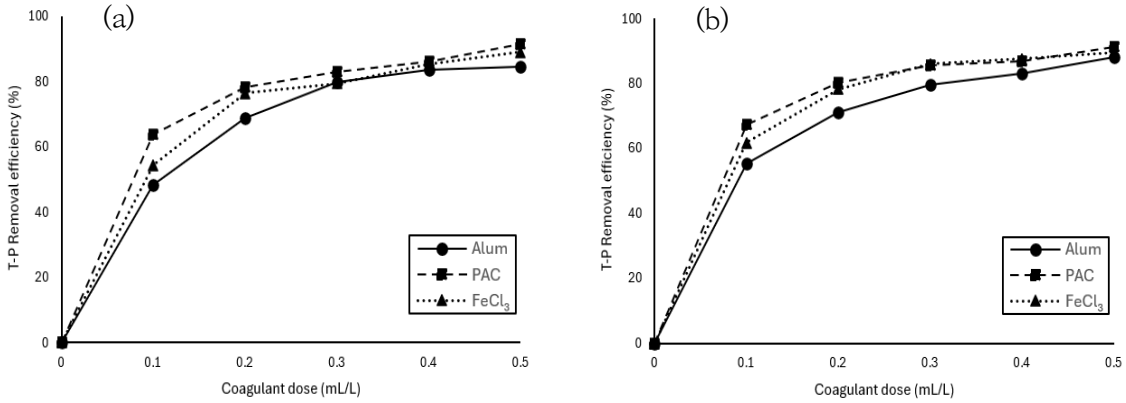


Fig. 3. Effects of coagulant type and dose on T-P removal efficiency: (a) first jar test and (b) second jar test. ●, Alum; ■, PAC; ▲, $FeCl_3$

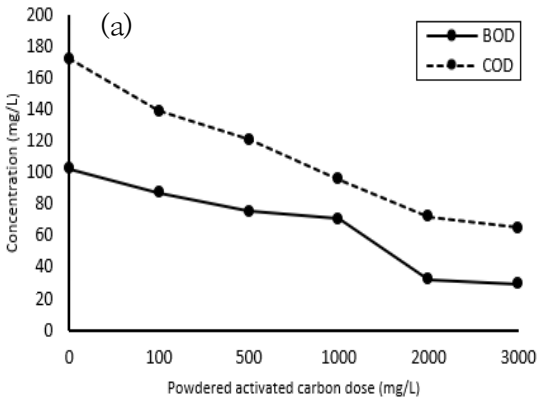


Fig. 4. Changes in BOD and COD concentrations with powdered activated carbon dose. ●, BOD; ■, COD

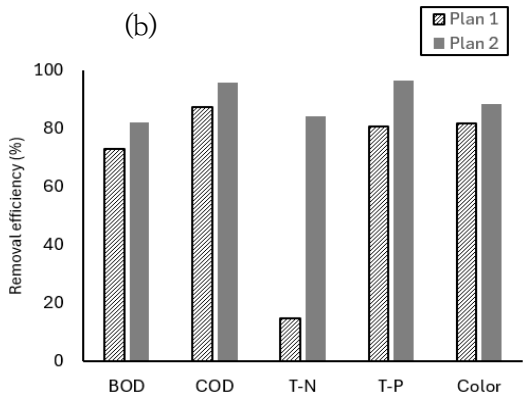


Fig. 5. Comparison of removal efficiencies for BOD, COD, T-N, T-P, and color between pilot plant processes.

Table 3. Comparison of pollutant concentrations and removal efficiencies between pilot plant processes

Parameter	Influent (Leachate)	Plan 1		Plan 2	
		Measured value	Removal (%)	Measured value	Removal (%)
BOD (mg/L)	36.2	9.8	72.9	6.4	82.3
COD (mg/L)	198.2	24.8	87.5	8.4	95.8
T-N (mg/L)	640.7	547.4	14.6	100.6	84.3
T-P (mg/L)	1.2	0.231	80.8	0.040	96.7
Color (degree)	365.8	66.5	81.8	42.1	88.5

4. 결 론

본 연구에서는 음폐수 유입 중단에 따라 기존 병합 전처리시설을 노후 매립장 침출수 전용 처리체계로 전환하기 위한 공정구성을 검토하였다. 대상 침출수는 낮은 BOD/COD 비와 높은 T-N 농도를 나타내어 생물학적 처리에 불리한 수질특성을 보였으며, 미생물 접종 포기실험에서도 유기물 제거효율이 제한적으로 나타나 생물학적 처리만으로 안정적인 처리를 확보하는 데 한계가 있음을 확인하였다.

무기응집제별 jar-test에서는 본 실험조건에서 PAC가 COD 제거 측면에서 상대적으로 양호한 처리특성을 나타냈으며, T-P 제거에서는 PAC와 $FeCl_3$ 모두 높은 처리특성을 보였다. 분말활성탄 흡착실험에서는 주입량 증가에 따라 BOD와 COD가 감소하였고, 처리효율과 주입량을 종합적으로 고려하여 2,000 mg/L를 pilot plant 적용조건으로 선정하였다.

기초실험 결과를 바탕으로 수행한 pilot plant 운전결과, pilot-scale 유량조정조에 분말활성탄 전처리를 적용한 2안은 1안 대비 전반적으로 높은 처리효율을 나타냈으며, 특히 COD와 색도 제거효율은 각각 95.8%와 88.5%로 나타나 분말활성탄 전처리를 포함한 공정구성의 효과를 확인하였다. T-N도 2안에서 유입수 640.7 mg/L에서 최종 처리수 100.6 mg/L로 감소하여 약 84.3%의 제거율을 나타냈다. 다만, 질소 형태별 세부분획 분석이 이루어지지 않아 구체적인 저감기작을 규명하는 데에는 한계가 있으며, 최종 처리수에 잔류하는 질소에 대해서는 후단 연계처리시설의 수용조건을 고려한 추가적인 관리가 필요하다.

결론적으로, 대상 노후 매립장 침출수에 대해서는 생물학적 처리보다 응집 및 흡착을 중심으로 한 물리·화학적 복합처리의 적용성이 높은 것으로 판단된다. 기존의 침출수 처리 연구가 하수와의 병합처리(co-treatment) 또는 응집·흡착 등 개별 단위공정의 처리특성과 운전조건 검토에 주로 초점을 두었다면, 본 연구는 음식물류 폐기물 탈리액의 유입 중단에 따른 실제 운영조건 변화에 대응하여 기존 병합 전처리시설을 노후 매립장 침출수 전용 처리시설로 전환하는 것을 전제로 단위공정의 적용성을 단계적으로 검토하고 이를 pilot-plant 공정으로 연계하였다는 점에서 차이가 있다. 특히 pilot test에서 검토한 분말활성탄 전처리의 처리특성을 바탕으로, 실제 시설 전환 시 기존 유량조정조를 분말활성탄 접촉조로 활용하는 공정구성은 기존 시설을 효율적으로 재활용하면서 기존 병합 전처리시설을 침출수 전용 처리시설로 전환하기 위한 적용 가능성을 갖는 공정구성으로 판단된다.

본 연구 결과는 향후 유사한 운전 여건 변화에 직면한 매립지 침출수 처리시설의 공정 재구성을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 특히 본 연구에서 검토한 공정은 BOD/COD 비가 낮아 생분해성이 제한되고, 질소 농도 및 색도가 상대적으로 높은 노후 매립장 침출수와 같이 생물학적 처리만으로 충분한 처리효율을 확보하기 어려운 조건에서 적용 가능한 공정 대안으로 검토될 수 있다. 다만, 본 연구는 제주시 B매립장의 특정 침출수와 기존 처리시설을 대상으로 한 사례연구이며, pilot plant 운전 또한 기존 시설의 전환 가능성과 공정별 단기 처리특성을 검토하는 데 초점을 두었으므로, 장기간 연속운전에서의 처리성능 안정성까지 확인한 결과로 해석하는 데에는 한계가 있다. 따라서 실제 시설 전환 및 장기 운전 시에는 매립장별 폐기물 조성, 매립연한 및 강수량 등에 따른 침출수 수질변동을 고려하여 공정조건을 재검토할 필요가 있으며, 장기 운전에 따른 처리효율의 안정성, 약품 및 분말활성탄 소요량의 변화, 슬러지 발생량 증가 가능성 및 이에 따른 운영비용 등을 추가적으로 검토할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 제주시에서 발주하고 계명문화대학교 산학협력단에서 수행한 침출수 처리시설 사후관리 관련 기초조사 용역에서 연구자료 일부를 활용하여 수행되었습니다.

REFERENCES

Abdel-Shafy, H. I., Ibrahim, A. M., Al-Sulaiman, A. M., Okasha, R. A., 2024, Landfill leachate: Sources, nature, organic composition, and treatment: An Environmental overview, Ain Shams Eng. J., 15(1), 102293.

Ahmed, Z., Yusoff, M. S., Mokhtar Kamal, N. H., Abdul Aziz, H., Roulia, M., 2023, Spectroscopic and microscopic analysis of humic acid isolated from stabilized leachate HSs fractionation, Agronomy, 13(4), 1160.

Al Raisi, S. A. H., 2022, The generation, composition and fate of landfill leachate: A Review, Eur. J. Environ. Earth Sci., 3(2), 105-109.

Choi, Y. I., Han, Y. R., Ko, M. S., Yoon, T. K., 2012, A Study on improvements of biological treatment by combined with food wastewater and washing wastewater in leachate treatment plant, J. Korean Soc. Environ. Technol., 13(1), 37-45.

Deng, Y., Jung, C., Zhao, R., Torrens, K., Wu, L., 2018, Adsorption of UV-quenching substances (UVQS) from landfill leachate with activated carbon, Chem. Eng. J., 350, 739-746.

Foo, K. Y., Hameed, B. H., 2009, An Overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process, J. Hazard. Mater., 171(1-3), 54-60.

Kalmykova, Y., Björklund, K., Strömvall, A. M., Blom, L., 2013, Partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons, alkylphenols, bisphenol A and phthalates in landfill leachates and stormwater, Water Res., 47(3), 1317-1328.

Kamal, A., Makhatova, A., Yergali, B., Baidullayeva, A., Satayeva, A., Kim, J., Inglezakis, V. J., Poulopoulos, S. G., Arkhangelsky, E., 2022, Biological treatment, advanced oxidation and membrane separation for landfill leachate treatment: A Review, Sustainability, 14(21), 14427.

Kjeldsen, P., Christophersen, M., 2001, Composition of leachate from old landfills in Denmark, Waste Manage. Res., 19(3), 249-256.

Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., Christensen, T. H., 2002, Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A Review, Crit. Rev. Environ. Sci. Technol., 32(4), 297-336.

Kurniawan, T. A., Lo, W., Chan, G. Y. S., Sillanpää, M. E. T., 2010, Biological processes for treatment of landfill leachate, J. Environ. Monit., 12(11), 2032-2047.

Li, W., Hua, T., Zhou, Q., Zhang, S., Li, F., 2010, Treatment of stabilized landfill leachate by the combined process of coagulation/flocculation and powder activated carbon adsorption, Desalination, 264(1-2), 56-62.

Park, J. K., Kim, H. J., Jeong, S. R., Lee, N. H., Kim, S. C., 2007, Characteristics of leachate quantity and quality with different composition of municipal solid waste in solid waste landfill, J. Korea Org. Resour. Recycl. Assoc., 15(2), 109-117.

Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., Moulin, P., 2008, Landfill leachate treatment: Review and opportunity, J. Hazard. Mater., 150(3), 468-493.

San-Pedro, L., Méndez-Novelo, R., Hernández-Núñez, E., Flota-Bañuelos, M., Medina, J., Giacomán-Vallejos, G., 2020, Selection of the activated carbon type for the treatment of landfill leachate by Fenton-adsorption process, Molecules, 25(13), 3023.

Shao, C., Yang, Y., Liu, Z., Wang, Q., Ji, Z., Wang, S., Demeestere, K., Guo, Y., Van Hulle, S., 2020, Characterization of landfill leachate by spectral-based surrogate measurements during a combination of different biological processes and activated carbon adsorption, Water Sci. Technol., 81(12), 2606-2616.

Ta ł a ł aj, I. A., Biedka, P., Bartkowska, I., 2019, Treatment of landfill leachates with biological pretreatments and reverse osmosis, Environ. Chem. Lett., 17(3), 1177-1193.

Torretta, V., Ferronato, N., Katsoyiannis, I. A., Tolkou, A. K., Airoldi, M., 2017, Novel and conventional technologies for landfill leachates treatment: A Review, Sustainability, 9(1), 9.

• Adjunct Professor. Min-Soo Noh
Department of Fire and Environmental Safety, Keimyung College University
schicksuya@hanmail.net
• Professor. Jae-Hyun Kim
Department of Fire and Environmental Safety, Keimyung College University
kjh419@kmcu.ac.kr