

유류/중금속 복합오염 퇴적토의 정화를 위한 산세척/펜톤/열탈착 복합 공정

채희훈¹ · 박재우^{2*}

¹현대건설

²한양대학교 건설환경공학과

Combined Acid Washing/Fenton/Thermal Desorption Process for the Remediation of Oil/Heavy Metal Contaminated Sediments

Chae HeeHun^{1,2} and Park Jae-Woo^{2*}

¹Hyundai Engineering & Construction, Seoul 03058, Korea

²Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 08826, Korea

ABSTRACT

The remediation of sediments contaminated with both total petroleum hydrocarbons (TPH) and heavy metals poses significant environmental and health risks. This study explores a multi-step combined remediation approach using Fenton oxidation, thermal desorption, and acid washing to address such contamination. Each process was optimized individually. Acid washing efficiently removed heavy metals, meeting Dutch standards, but showed limited TPH removal. Fenton oxidation reduced TPH by 77%, though heavy metal removal was insufficient. Thermal desorption, however, successfully eliminated TPH at temperatures above 300°C. Combining acid washing and thermal desorption achieved remediation targets for both TPH and heavy metals, regardless of process order, meeting industrial standards. The treated sediment can be safely reused as a resource, offering a sustainable solution for managing contaminated sediments. This integrated approach demonstrates an effective method for remediating sediments contaminated by both TPH and heavy metals, addressing both environmental and economic challenges.

Key words : Sediments remediation, Fenton oxidation, Thermal desorption, Acid washing

1. 서 론

하천 및 해양 생태계의 중요한 구성 요소인 퇴적토는 산업 공정, 농업, 도시화 등 인간 활동에 의해 쉽게 오염될 수 있다. 석유계 총탄화수소(Total Petroleum Hydrocarbons, TPH)와 중금속은 장기적으로 퇴적토 생태계에 악영향을 미칠 수 있는 주요 오염물질이다(Chen et al., 2013; Wei et al., 2022; Rahimi Moazampour et al., 2023). TPH는 입자성 물질에 쉽게 흡착되어 하저나 해저에 침전되어 소수성 오염물질을 저장하는 역할을 한다(Zhang et al., 2021). 또한 퇴적토는 수문 순환 과정에서 중금속의 주요 운반체

이자 흡수원으로 작용한다(Celo et al., 1999). 따라서 수계에 누출된 TPH와 중금속은 쉽게 퇴적토를 오염시키며 먹이사슬을 통해 생물체에 축적되어 생태계에 장기적으로 심각한 악영향을 초래할 수 있다(Yang et al., 2012; Vane et al., 2017).

연안 지역의 개발로 인해 준설된 퇴적토 양이 급격히 증가함에 따라 퇴적토의 오염이 추가적인 문제를 발생시키고 있으며(Zhang et al., 2021), 그동안 준설된 퇴적토는 주로 해양 투기나 매립을 통해 처리되었으나, 오염된 퇴적토는 적절한 정화 없이는 투기와 매립으로 처리하기 어렵다. 특히 정화된 퇴적토는 산업 자원으로 재활용이 가능하므로 준설 퇴적토의 정화는 환경적, 경제적 문제를 동시에 해결할 수 있는 방안으로 주목받고 있다(Kim et al., 2020).

준설 퇴적토의 정화 방법은 물리적, 화학적, 생물학적, 열적 처리로 크게 분류될 수 있으며, 이는 오염 물질의 독성을 줄이고 오염원이 되는 물질의 확산을 방지하는 것을

주저자: 채희훈, 책임연구원

*교신저자: 박재우, 교수

E-mail: jaewoopark@hanyang.ac.kr

Received : 2024. 10. 11 Reviewed : 2024. 11. 02

Accepted : 2024. 11. 20 Discussion until : 2025. 04. 30

Table 1. Classification of Ex-situ remediation methods for dredged sediments

Main processes		Remediation Methods
Biological		Bioslurry, Landfarming, Composting
Physical/Chemical		Chelation, Oxidation, Dechlorination, Basic Extractive Sludge, Solidification/Stabilization, Solvent Extraction, Carver-Greenfield, Soil Washing, Containment Barriers, Electrochemical Oxidation, Ultrasonic Treatment
Thermal	Thermal Destruction	Incineration, Pyrolysis, High-Pressure Oxidation, Vitrification, Gasification
	Thermal Desorption	Desorption & Vaporization, Thermal System, Anaerobic Thermal Process, Plasma Desorption

목적으로 한다. 이러한 방법들은 일반적인 오염된 토양 정화 기술과 유사하지만 퇴적토는 높은 수분 함량과 높은 비율의 미세 입자를 포함하고 있어 기존 토양과는 다른 정화 특성을 가진다. 최적의 정화 기술 선택은 현장 조건과 준설 퇴적토의 상태를 고려하여 결정되며 준설 후 정화로서 현장 내(in-situ) 정화 방법보다 현장 외(ex-situ) 정화 방법이 주로 사용된다. Table 1은 기술 유형별로 분류된 퇴적토 현장 외 정화 방법을 나타낸다(Reis et al., 2007).

퇴적토 내 오염물질은 단일 물질이 아니라 복합적 특성을 보이며, 특히 TPH와 중금속 간에는 복잡한 상호작용이 존재한다(Zhang et al., 2024). 예를 들어, 카드뮴과 같은 중금속은 퇴적토 내 TPH 분해 미생물의 활성을 억제하여 정화 효율을 감소시키고, TPH는 미생물 생물막을 통한 중금속의 이동성과 생이용성에 영향을 미친다(Chen et al., 2018; Wang et al., 2023). 그러나 기존의 정화 기술은 주로 TPH 또는 중금속을 개별적으로 처리하는 방식에 초점을 맞추었으며, TPH와 중금속의 복합 오염에 대한 정화 효율에 관한 연구는 부족한 실정이다. 예를 들어, 열탈착과 펜톤 산화 공정은 주로 TPH 제거에, 산세척은 중금속 제거에 사용되었으나, 이러한 공법을 복합 오염된 퇴적토에 동시에 적용했을 때의 효율성에 대한 연구는 미비하다.

본 연구에서는 TPH와 중금속으로 복합 오염된 준설 퇴적토를 대상으로 산세척, 펜톤 산화, 열탈착 공정을 단독 또는 다양한 순서로 결합하여 적용하였다. 이를 통해 복합

오염된 퇴적토를 효과적으로 정화하기 위한 최적의 정화 공정 및 설계 요인을 확인하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 재료 및 방법

2.1.1. 퇴적토

실험에 사용된 해양 퇴적토는 동남아지역 A 산업단지와 국내 동해안 인근의 B 산업 단지 인근에서 준설되었다. 채취된 시료는 상온에서 건조된 후 입도에 따라 분류된 후 정화 실험에 사용되었다. 상세한 입도분석 결과는 Table 2와 같다. 국내 B 지역은 실트질토로 구성되었으며, 실트와 점토가 전체 준설 퇴적토의 60% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. A 지역 시료도 실트질토로 구성되었으며, 실트와 점토가 전체 준설 퇴적물의 75% 이상을 차지하였다. 이러한 결과는 대상 퇴적토에 대한 정화 기술이 일반적인 오염 토양보다 더 효율적으로 변화해야 함을 시사한다. 준설 퇴적토의 TPH, 중금속 농도 분석 결과는 Table 3과 같다. 두 시료 모두 구리, 아연, TPH의 농도가 높게 나타

Table 2. Particle size distribution of dredged sediments

Sample	Sand	Silt	Clay	Soil Type
Domestic	38.3%	59.7%	2.0%	Silt loam
International	23.8%	65.1%	11.1%	Silt loam

Table 3. Contamination of dredged sediments

Contaminants	Dutch Standard (Intervention Value)	International	International (Average)	Domestic	Domestic (Average)
As	85	51.1~59.8	54.7	16.0~19.8	17.3
Cd	14	3.6~4.0	3.8	1.9~3.8	2.8
Cr	380	172.8~180.0	175.9	70.8~103.0	86.7
Cu	190	1,757.1~1,925.3	1,849.6	200.3~331.6	267.0
Pb	580	161.0~182.5	169.8	78.6~102.0	86.4
Zn	2,000	2,370.5~2,648.9	2,517.9	1,673.7~1,813.4	2,211.3
TPH	5,000	8,064~10,983	9,508	3,933~6,236	5,127

났으며 TPH와 중금속의 복합 오염 퇴적토임을 확인하였다.

2.2. 퇴적토 정화 실험

2.2.1. 예비 세척 실험

산세척, 펜톤, 열탈착 실험에 앞서 퇴적토의 탈착 특성을 파악하기 위한 예비 세척 실험을 수행하였다. 대조 실험에는 상온의 물로 1시간 동안 세척, 상온의 물로 1시간씩 두 번 세척, 60°C의 물로 1시간씩 두 번 세척하는 조건이 포함되었다. 고액비는 질량비 1:3으로 설정되었으며, 자 테스트기를 사용하여 교반 강도는 200 rpm으로 유지하였다. 설정된 시간 동안 교반한 후, 혼합물을 자연적으로 침전시키고, 상등액을 채취하여 중금속과 TPH를 측정하였다. 동일한 조건에서 산 추출 실험은 0.5 M 황산, 인산, 질산을 사용하여 수행하였다. 추가로, 강산, 염기에 대한 대안으로서 계면활성제를 이용한 세척 실험을 수행했으며, 오염토양 정화에 효과가 있으면서도 환경에 영향을 덜 미치는 것으로 알려진 계면활성제 중 비이온성 계면활성제인 Triton X-100 (3 mM), 이온성 계면활성제인 SDS (60,000 mg/L, sodium dodecyl sulfate), 생물계면활성제인 BioSolve (60,000 mg/L, The BioSolve Company)의 세 가지 계면활성제를 사용하여 정화 성능을 평가하였다.

2.2.2. 산 세척 실험

염산과 황산을 사용하여 세척 실험을 수행하였다. 이 두 가지 산은 제거 효율, 비용 효율성, 공급의 용이성으로 인해 퇴적토 정화에서 가장 자주 사용되는 화학 물질이다 (Moon et al., 2012). 체를 이용하여 퇴적토에서 2 mm 이상의 이물질과 큰 입자를 제거하였다. 탈이온수를 사용하여 산 추출 용액을 준비하였다. 세척제로 0.5 M, 1.0 M, 1.5 M 농도의 황산과 염산 용액을 사용하였다. 퇴적토와 세척액의 고액비는 1:3 (퇴적물 300 g, 세척 용액 900 mL)으로 설정하였다. 각 시료를 자 테스트기를 사용하여 실온(23 ± 1°C) 또는 60°C에서 1시간, 3시간 동안 200 rpm 속도로 교반하였다. 교반 후 중력침전을 이용하여 고액분리를 수행하였다. 침전이 완료된 후 상등액을 제거하고 퇴적토 시료를 분석하여 중금속 및 TPH 농도를 측정하였다.

2.2.3. 펜톤 산화 실험

화학적 산화의 효과를 확인하기 위한 대표적인 방법으로 펜톤 산화실험을 수행하였다(Pazos et al., 2013). 200 g의 준설 퇴적토에 대해 50 mL – 300 mL의 과산화수소(H₂O₂)와 10 g – 90 g의 황산철(FeSO₄)을 사용하여 펜톤 산화를 수행하였다. 2시간, 4시간, 6시간 반응 후 TPH와 중금속

Table 4. Sequential remediation condition for dredged sediments

Condition	
1	Acid washing → Fenton oxidation
2	Fenton oxidation → Acid washing
3	Acid washing → Thermal Desorption
4	Thermal Desorption → Acid washing
5	Thermal Desorption → Acid washing → Fenton oxidation

농도의 변화를 측정하였다.

2.2.4. 열탈착 실험

퇴적토 내 TPH 정화를 위해 저온 열탈착(low temperature thermal desorption, LTTD) 실험을 수행하였다(Falciglia et al., 2011). 별도의 탈수 과정없이 60%의 함수율의 퇴적토 시료를 사용하였으며 200°C, 300°C, 400°C 온도에서 0.5 시간, 1시간 동안 처리한 후 TPH와 중금속의 농도를 측정하였다.

2.2.5. 복합 정화 실험

복합적으로 중금속과 유류에 오염된 퇴적토에 적합한 정화 방법을 찾기 위해 두 가지 이상의 정화 공법의 적용된 복합 공정을 다양한 순서로 적용하여 퇴적토 정화 실험을 수행하였다. 복합 처리 공정은 아래 Table 4와 같은 조건으로 수행되었으며 복합 처리 정화 후에 중금속과 TPH 농도를 측정하였다.

2.3. 오염물질 분석

퇴적토 내 중금속 함량을 측정하기 위해 US EPA 3015에 따른 분석법을 사용하였다. 구체적인 절차는 다음과 같다. 0.5 g의 건조된 퇴적물을 10 mL의 농축 질산과 함께 마이크로파 용기에 혼합하였다. 용기를 밀폐한 후 마이크로파 장치에서 첫 5.5 ± 0.25분 동안 온도를 175 ± 5°C로 상승시키고, 10분간 175 ± 5°C로 유지하며 가열하였다. 이후 실온(25°C)으로 냉각한 후, 시료를 원심분리하고, 0.45 µm 필터가 장착된 주사기를 사용하여 여과한 뒤 추출액을 수집하였다. 수집된 추출액을 분석에 필요한 부피로 희석하여, 중금속 농도가 0.1 ppm 이상일 경우 ICP-OES(Perkin Elmer Optima 8300), 0.1 ppm 미만일 경우 ICP-MS를 사용하여 분석하였다.

TPH 오염을 분석하기 위해 US EPA 3550의 초음파 추출법과 US EPA 8015에 근거한 가스 크로마토그래피-화염 이온화 검출기(GC-FID, Perkin Elmer CLARUS 680 GC)를 사용하였다. TPH 오염 수준에 따라, 10 g에서 25 g의

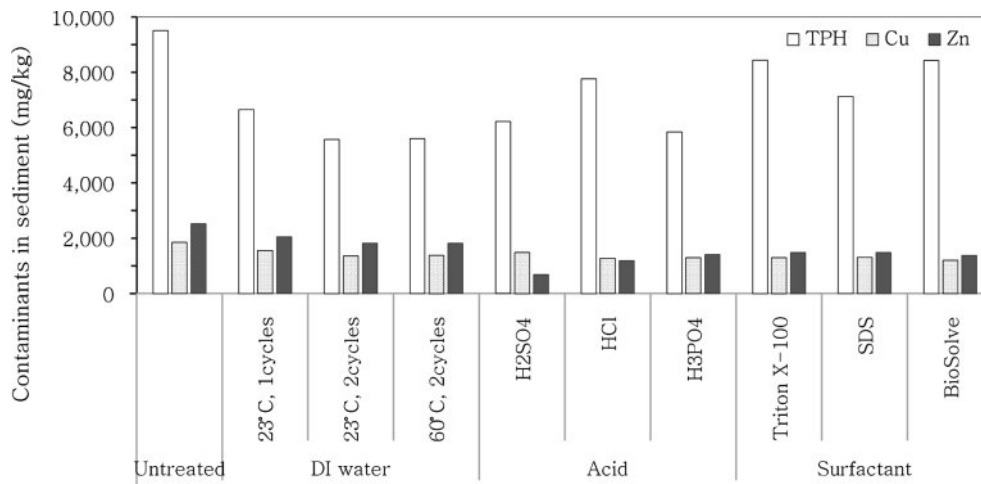


Fig. 1. Remediation efficiency of washing with DI water, acid and surfactant on TPH, Cu, and Zn.

토양 샘플을 무수 황산나트륨 및 디클로로메탄 100 mL와 혼합하였다. 초음파 추출기를 사용하여 3분 동안 두 번 이상 추출한 후, 추출액과 세척액을 결합하여 크로마토그래피용 무수 황산나트륨 10 g이 채워진 분리관을 통해 탈수시켰다. 전처리를 거친 후, 유출액을 2 mL로 농축하였다. 이후 시료를 가스 크로마토그래프에 주입하여 주입구 온도 275°C, 검출 온도 320°C 조건으로 분석하였다.

2.4. 실험 결과

2.4.1. 예비 세척 실험 결과

Fig. 1은 예비 세척 실험의 결과를 나타낸다. 화학적 세척제 없이 상온의 물로 1시간 동안 세척한 결과, 구리(Cu)의 오염물질 제거 효율은 16.0%, 아연(Zn)은 18.8%, 총석유계탄화수소(TPH)는 30.1%였다. 동일한 조건에서 세척을 1시간씩 두 번 반복했을 때, 제거 효율은 Cu가 26.6%, Zn이 27.7%, TPH는 41.4%로 증가하였다. 오염물질 제거 효율에 미치는 온도의 영향을 조사하기 위해 세척 온도를 60°C로 높였으나, 제거 효율에는 유의미한 차이가 없었다. 이는 제거된 오염물질이 주로 물리적 교반에 의해 탈착된 것으로, 물의 용출에 의한 것이 아니라 토양 표면에 약하게 결합된 상태이거나 공극수에 존재하는 오염 물질이었을 가능성을 시사한다.

대조 실험에서 주로 물의 탈착 효과가 확인된 후, 화학적 용출 효과를 평가하기 위해 산성 용액을 사용한 추가 세척 실험을 수행하였다. 산세척 실험에서는 황산을 사용한 경우 Cu의 제거 효율이 19.5%, 염산에서는 31.3%, 인산에서는 30.1%로 나타났다. Zn의 경우 황산을 사용했을 때 제거 효율이 72.6%, 염산에서는 52.9%, 인산에서는 44.1%로 나타났으며, 특히 황산을 사용한 세척에서 Zn의 제거

효율이 가장 높았다.

대부분의 계면활성제가 석유계 탄화수소 제거에 효과적임에도 불구하고, 이번 실험에서는 산세척에 비해 TPH 제거율이 낮은 것으로 나타났다. 계면활성제를 사용한 Cu의 제거 효율은 산세척과 유사한 수준을 보였으나, Zn은 황산 세척에서 보였던 높은 제거율을 달성하지 못했다. 계면활성제를 사용한 TPH 제거 효율이 낮았던 이유는 준설했던 퇴적물 내 미세 입자(실트/점토 $\leq 75 \mu\text{m}$)가 약 70%를 차지하는 높은 비율로 인해 세척 효율이 저해되었기 때문으로 판단된다. 또한, 생물계면활성제와 이온성/비이온성 계면활성제를 비교했을 때, 계면활성제 종류 간 세척 효율에 유의미한 차이가 없었다. 예비 실험 결과와 기존 연구의 유사한 조건을 바탕으로 다양한 세척제를 사용한 오염물질 제거 효율의 차이가 확인되었다.

2.4.2. 산 세척 실험 결과

Fig. 2는 산세척 실험의 결과를 나타낸다. TPH 오염 처리에는 세척 공정이 일반적으로 사용되지만, TPH 오염 농도가 높을 경우 그 효과는 대체로 제한적이다. 본 연구의 실험에서도 황산과 염산을 사용한 산 세척 공정이 TPH 제거에는 효과적이지 않았으며, 이는 높은 TPH 오염 수준과 함께 미세 입자가 다량 포함된 퇴적토의 특성 때문인 것으로 판단된다. 따라서 TPH 정화 효율을 개선하기 위해서는 대체 화학물질 사용이나 공정의 수정이 필요하며, 유사한 오염된 지역에서 정화 공정을 설계할 때 이러한 요소를 고려해야 한다.

반면, 중금속 제거 효율은 상대적으로 높게 나타났으며, 산 추출 공정을 최적화하기 위해 다양한 실험 조건이 탐색되었다. 본격적인 실험에 앞서 산 종류에 따른 정화

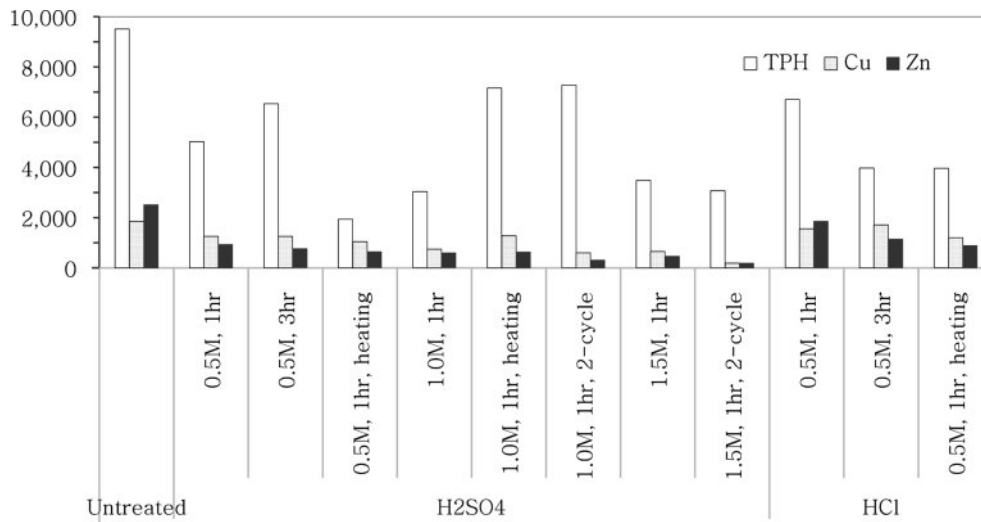


Fig. 2. Remediation efficiency of acid washing with H_2SO_4 and HCl on TPH, Cu, and Zn under varying conditions (concentration, reaction time, and treatment cycles).

성능을 비교한 기초 실험에서는 황산이 염산보다 중금속 제거 성능이 우수하다는 결과가 도출되었다. 특히 황산은 아연(Zn) 제거에 매우 효과적이었으며, 이로 인해 추출 조건 최적화 및 효율 검증을 위한 후속 실험에 황산이 선정되었다.

산 농도가 증가할수록 중금속 제거 효율이 약간 향상되는 것으로 나타났다. 그러나 더 높은 산 농도는 안전성 문제를 야기하고 경제성이 떨어지기 때문에 현장 적용에는 비현실적일 수 있다는 점이 시사되었다. 산 농도를 단순히 높이는 것보다는 세척 횟수를 늘리는 것이 정화 효율을 높이는 보다 경쟁력 있는 전략으로 나타났다. 또한, 반응 시간을 1시간에서 3시간으로 연장한 실험에서도 제거 효율에 유의미한 개선이 없었다. 실험 결과는 안전하고 경제적인 정화 공정을 위해서는 산 농도와 반응 시간의 최적화가 필요한 것을 나타낸다.

TPH 정화 효율을 높이기 위해, 반응 중 오염된 기름의 유동성을 증가시켜 제거를 촉진할 목적으로 반응 온도를 $60^\circ C$ 까지 높이는 방안이 고려되었다. 실험 결과, 반응 온도가 높아질수록 TPH 제거 효율이 증가하는 경향을 보였으나, 결과는 네덜란드의 산업용 기준을 충족하지 못했다. 농도와 반응 횟수가 증가함에 따라 중금속, 특히 Zn의 제거 효율이 크게 향상되었다. Zn의 경우, 1.0 M 황산만으로도 산업용 기준을 충족할 수 있었으며, Cu는 1.5 M 황산을 사용하여 2회 반응한 후에 통해 산업용 기준을 달성하였다. 그러나 1.5 M 황산을 사용한 2회 반응 조건에서 Zn은 주거용 기준까지 달성한 반면 TPH는 산업용 기준을 달성하지 못했다. 또한, TPH 제거의 경우, 산

농도를 증가시켜도 현저한 개선 효과는 나타나지 않았다. 또한, 1.5 M 이상의 고농도 산은 실제 현장 규모의 적용에 부적합할 수 있으므로 TPH 제거를 위해서는 세척 외의 추가적인 다른 처리 방법이 필요하다.

2.4.2. 펜톤 산화 실험 결과

산세척이 중금속에 비해 TPH 정화에 낮은 효율을 나타내는 것을 고려하여, 유기 화합물 분해에 효과적인 펜톤 산화법이 TPH 정화를 위한 추가적인 공정으로 수행되었다. 시약 투입량, 반응 시간, 반응 횟수를 조정하여 반응 조건이 최적토 정화에 끼치는 영향을 파악하였다. Fig. 3은 펜톤 산화 실험의 결과를 나타낸다.

반응 시간이 2시간에서 4시간으로 증가하자 중금속 제거 효율이 약간 개선되었다. 그러나 6시간 반응에서는 2시간 및 4시간 반응에 비해 효율이 감소하였다. 펜톤 시약인 과산화수소와 황산철의 투입량은 제거 효율에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 200 g의 최적토 시료에 과산화수소 100 mL 이상을 투입했을 때 높은 정화 효율을 보였다. 또한, 과산화수소의 지속적인 추가와 함께 황산철의 양을 늘릴수록 정화 효율이 더욱 향상되는 것을 확인하였다. 여러 실험 조건 중, 과산화수소 200 mL와 황산철 60 g을 이용한 2회 반응에서 중금속 제거 효율이 가장 높았다. 그러나 가장 효율이 높은 조건에서도 Cu와 TPH의 정화 목표치(네덜란드의 산업용 기준)는 달성하지 못했다. 정화 효율과 비용을 함께 고려했을 때, 가장 효과적인 반응 조건은 과산화수소 100 mL와 황산철 60 g으로 확인되었다.

펜톤 반응은 단독으로 대규모 최적토 처리에 충분하지

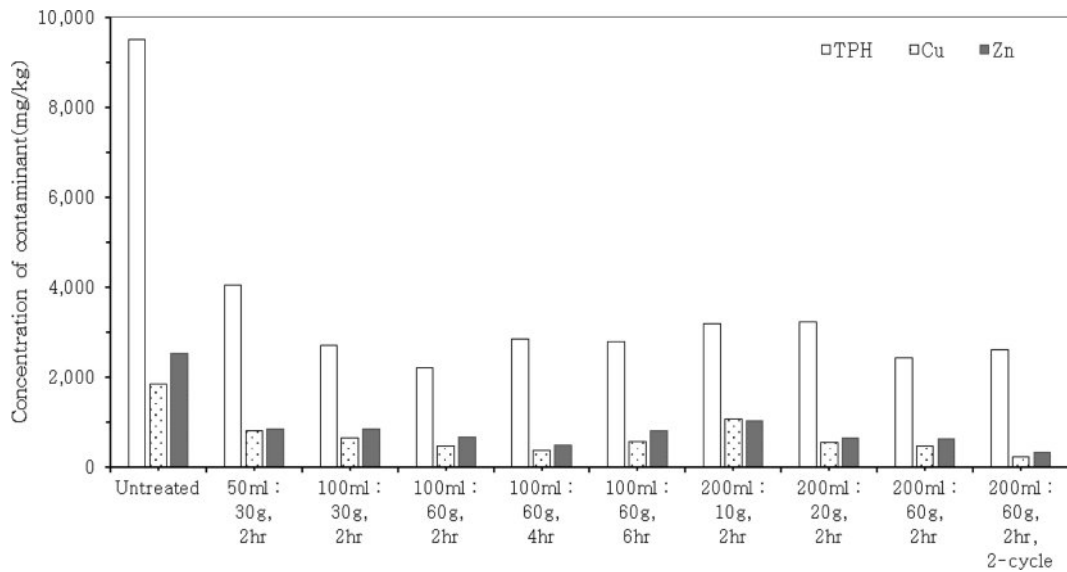


Fig. 4. Remediation efficiency of Fenton oxidation on TPH, Cu, and Zn under varying conditions (reagent dosage, reaction time, and treatment cycles).

않으며 비용이 높으므로 경제성이 있는 특정 정화 공정에서 보조적인 방법으로 적용되는 것이 현실적인 적용방안으로 판단된다.

2.4.3. 열탈착 실험 결과

복합오염 퇴적토에서 높은 TPH를 제거하기 위한 공정으로 열탈착 공정 실험을 수행하였다. 일반적으로 샘플의 수분 함량은 반응 시간과 가열 조건을 결정하는 요소가 된다. 실험에 사용된 원래 퇴적토 시료의 수분 함량이 중량 기준으로 약 60%이고, 병커 C유는 휘발성이 낮은 것으로 알려져 있기 때문에 시료를 1시간 이상 가열하였다. 열탈착 실험 결과는 Table 5에 제시되어 있다. 300°C와 400°C에서 처리한 후, TPH 농도는 모두 ND(검출되지 않음) 수준으로 완전히 감소하였다. 즉, 300°C 이상의 처리 온도에서 TPH가 휘발 및 탈착되어 퇴적물로부터 제거되는

Table 5. Remediation efficiency of thermal desorption on TPH by temperature

Reaction condition		TPH (mg/kg) (Removal ratio)
Dutch Standard	Intervention value	5,000
	Industrial maximum value	500
	Residential maximum value	190
Untreated		9,508
Thermal desorption	200°C	2,618 (72%)
	300°C	ND (-)
	400°C	ND (-)

것을 확인하였다.

2.4.4. 복합정화 실험 결과

앞선 실험에서 단일 공정으로는 복합오염 퇴적토에서 중금속과 TPH의 정화 기준 모두를 달성하는데 한계가 있는 것을 확인하였다. 중금속 정화에 효율적인 산세척과 유기물 정화에 효율적인 펜톤 및 열 탈착을 다양한 조합으로 복합 적용하여 두 오염물질에 대한 정화효율을 평가하였다. 복합 처리 공정에 대한 실험 결과는 Fig. 4와 같다.

산 세척과 펜톤 산화를 조합한 경우 공정에 순서에 관계없이 TPH를 정화 목표 수준으로 낮출 수 없었으며, Cu 제거에도 효과적이지 않았다. 반면 산 세척과 열탈착을 조합한 공정은 TPH의 주거용 기준 및 Zn 및 Cu의 산업용 기준을 달성하였으며 Zn 농도는 주거용 기준에 거의 근접하였다. Cu의 경우, 실험에 사용한 퇴적토의 Cu 초기 농도가 매우 높았기 때문에 주거용 기준으로 낮추는 데 한계가 있었다. 추가적으로 펜톤 산화를 포함하여 3가지 공정을 모두 적용하는 방안을 고려했지만, Cu 제거 효율에는 큰 개선이 없었다.

복합 공정 조합 중에서 산 추출과 열 탈착의 조합이 최적의 공정으로 확인되었다. 산 추출과 열 탈착의 순서는 제거 효율에 큰 영향을 미치지 않았으므로, 작업의 편의성을 고려하여 결정할 수 있다.

2.4.5. 복합오염 퇴적토 처리 공정 결정

단일 정화 공정만으로는 8가지 중금속 및 TPH에 대한

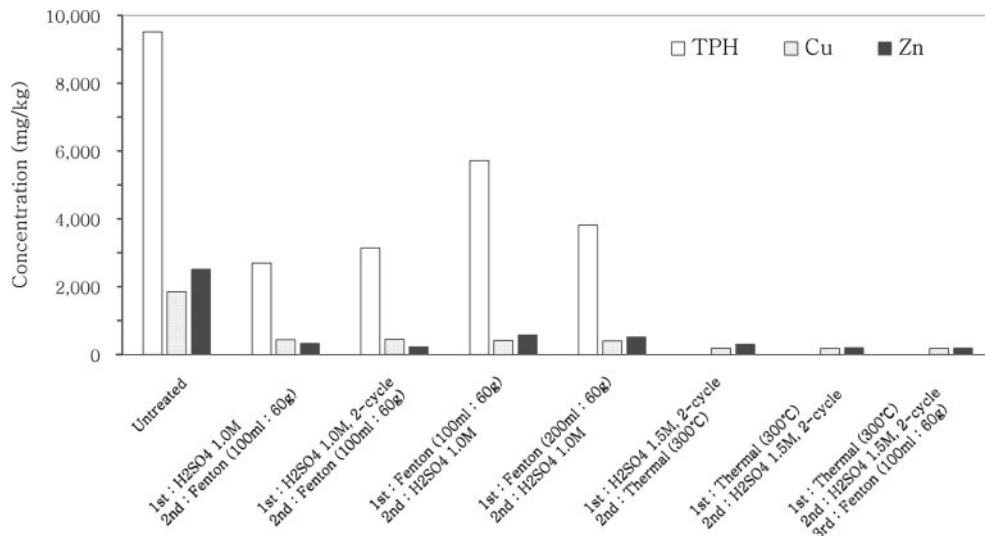


Fig. 4. Remediation efficiency combined processes for TPH, Cu, and Zn in contaminated sediments under sequential treatments.

정화 목표를 충족하는 데 한계가 있었다. 단일 공정 정화 실험 결과 저온 열 탈착은 TPH 제거에 적합하였고, 산 추출은 중금속 제거에 적합하였다. 이들 공정은 각각 네덜란드의 주거용 또는 산업용 기준을 충족하였다. 이에 따라, TPH와 중금속 모두를 제거하기 위해 복합 처리 공정이 필요하였으며 복합 공정 실험 결과 산세척과 저온 열탈착을 포함하는 복합 처리 공정이 최적의 정화 공정 조합으로 선택되었다. 산 추출과 열 탈착의 순서에 따라 오염물질 제거 효율에 큰 차이가 없었으므로, 이들의 순서는 성능보다는 효율적인 운영을 고려하여 결정될 수 있다.

먼저, ‘열 탈착 → 퇴적토 세척’ 순서가 제안될 수 있다. 이 경우 퇴적토 세척 장치에서 오일 정화 문제를 염려할 필요가 없다는 장점이 있다. 그러나 열 탈착 장치 전에 탈수 공정이 필요하다. 이는 퇴적토의 수분 함량이 열 탈착 과정에 크게 영향을 미치기 때문이다.

또 다른 방법으로, ‘퇴적토 세척 → 열 탈착’ 순서도 운영의 편의성 측면에서 적용될 수 있다. 산 추출이 첫 번째 처리 공정이고 열탈착이 두 번째 처리 공정인 경우, 탈수 및 중화 과정에서 이점이 있을 수 있지만, TPH 오염물질과 잔류 산 세척액은 처리 시설 운영에 문제를 일으킬 수 있다. 그러나 세척 후 퇴적토가 압축되어 수분 함량이 감소하기 때문에, 열 탈착에서 주입된 퇴적토의 수분 함량에서 이점이 있다. 따라서 열 탈착의 운영 비용을 절감할 수 있다. 이 순서를 적용할 경우, 퇴적토 세척 장치에서 오일의 영향을 고려해야 한다.

퇴적토는 현장과 오염도에 따라 다양한 이화학적 특성을 가지고 있으며 정화 효율과 공정 운영의 경제성과 복잡성을 함께 고려해야 한다. 특히 여러 공정을 동시에 적용할 경우

각 공정의 상호작용으로 인해 정화 특성이 달라질 수 있으므로 본 연구에서 제시된 산세척, 펜톤, 열탈착 외에도 정화 현장에서 적용 가능한 다양한 공정의 동시 적용 효율에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

3. 결 론

다중 오염물질로 인한 복합 오염은 서로 다른 반응 특성 때문에 단일 공정을 통한 정화가 어렵다. 본 연구에서는 중금속과 총석유계탄화수소(TPH)로 복합 오염된 퇴적물의 정화를 위한 최적의 공정을 탐색하였다. 단일 처리 공정으로는 모든 오염물질을 효과적으로 제거하는 데 한계가 있었으며, 산 세척은 중금속 제거에, 저온 열 탈착은 TPH 제거에 각각 적합한 것으로 나타났다. 그러나 복합 오염을 해결하기 위해서는 복합 처리 공정이 필요했으며, 산 세척과 열 탈착의 조합이 최적의 정화 공정으로 선택되었다. 실험 결과, 공정의 순서는 제거 효율에 큰 영향을 미치지 않았으나, 운영상의 편의성을 고려하여 결정될 수 있다. 열탈착과 산 세척의 복합 공정은 중금속과 TPH 모두 정화 기준을 달성하였으나 비용 증가와 공정 운영의 복잡성을 초래할 수 있다. 퇴적토의 오염 특성에 따라 최적의 공정을 선택하는 것이 중요하며, 본 연구에서 제안된 복합 공정은 중금속과 TPH로 복합 오염된 퇴적토에 대한 효율적인 해결책을 제공할 수 있다.

사 사

본 연구는 환경부의 ‘수생태계건강성 확보 기술개발사

업(2021003040004)’의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Çelo, V., Babi, D., Baraj, B., and Çullaj, A., 1999, An assessment of heavy metal pollution in the sediments along the albanian coast, *Water, Air, and Soil Pollut.*, **111**(1), 235-250.
- Chen, C.-F., Dong, C.-D., and Chen, C.-W., 2013, Metal speciation and contamination in dredged harbor sediments from Kaohsiung Harbor, Taiwan, *Soil. Sediment. Contam.*, **22**(5), 546-561.
- Chen, F.R., Dariotis, J.K., and Granger, D.A., 2018, Linking testosterone and antisocial behavior in at-risk transitional aged youth: Contextual effects of parentification, *Psychoneuroendocrinology*, **91**, 1-10.
- Falciglia, P.P., Giustra, M.G., and Vagliasindi, F.G.A., 2011, Low-temperature thermal desorption of diesel polluted soil: influence of temperature and soil texture on contaminant removal kinetics, *J. Hazard. Mater.*, **185**(1), 392-400.
- Falciglia, P.P., Lumia, L., Giustra, M.G., Gagliano, E., Roccaro, P., Vagliasindi, F.G.A., and Di Bella, G., 2020, Remediation of petrol hydrocarbon-contaminated marine sediments by thermal desorption, *Chemosphere*, **260**, 127576.
- Kim, K., Yoon, S., Kwon, H., and Choi, Y., 2020, Effects of treatment agents during acid washing and pH neutralization on the fertility of heavy metal-impacted dredged marine sediment as plant-growing soil, *Environ. Pollut.*, **267**, 115466.
- Moon, D.H., Lee, J.-R., Wazne, M., and Park, J.-H., 2012, Assessment of soil washing for Zn contaminated soils using various washing solutions, *J. Ind. Eng. Chem.*, **18**(2), 822-825.
- Pazos, M., Iglesias, O., Gómez, J., Rosales, E., and Sanromán, M.A., 2013, Remediation of contaminated marine sediment using electrokinetic-Fenton technology, *J. Ind. Eng. Chem.*, **19**(3), 932-937.
- Rahimi Moazampour, S., Nabavi, S.M.B., Mohammadi Roozbahani, M., and Khodadadi, M., 2023, Determination of total petroleum hydrocarbons and selected heavy metal (Pb, CO, V, Ni) concentration levels in surficial sediments of the Arvand River Estuary and their impact on benthic macroinvertebrates assemblages, *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, **103**(12), 2841-2857.
- Reis, E., Lodolo, A., & Miertus, S., 2007, Survey of sediment remediation technologies. International Centre for Science and High Technology, 3-5.
- U.S. EPA, 2007, Method 3015A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Aqueous Samples and Extracts, US EPA.
- U.S. EPA, 2007, Method 3550C (SW-846): Ultrasonic extraction, US EPA.
- U.S. EPA. 2003. Method 8015D (SW-846): Nonhalogenated Organics Using GC/FID, US EPA.
- Vane, C.H., Santos, R.A.L. dos, Kim, A.W., Moss-Hayes, V., Fordyce, F.M., and Bearcock, J.M., 2017, Persistent organic pollutants (PAH, PCB, TPH) in freshwater, urban tributary and estuarine surface sediments of the River Clyde, Scotland, UK, *Earth Environ. Sci. Trans. R. Soc. Edinb.*, **108**(2-3), 299-313.
- Wang, J., Lu, X., Jing, Q., Zhang, B., Ye, J., Zhang, H., Xiao, Z., and Zhang, J., 2023, Spatiotemporal characterization of heavy metal and antibiotics in the Pearl River Basin and pollutants removal assessment using invasive species-derived biochars, *J. Hazard. Mater.*, **454**, 131409.
- Wei, Y., Ding, D., Qu, K., Sun, J., and Cui, Z., 2022, Ecological risk assessment of heavy metal pollutants and total petroleum hydrocarbons in sediments of the Bohai Sea, China, *Mar. Pollut. Bull.*, **184**, 114218.
- Yang, Y., Chen, F., Zhang, L., Liu, J., Wu, S., and Kang, M., 2012, Comprehensive assessment of heavy metal contamination in sediment of the Pearl River Estuary and adjacent shelf, *Mar. Pollut. Bull.*, **64**(9), 1947-1955.
- Zhang, Y., Labianca, C., Chen, L., De Gisi, S., Notarnicola, M., Guo, B., Sun, J., Ding, S., and Wang, L., 2021, Sustainable ex-situ remediation of contaminated sediment: A review, *Environ. Pollut.*, **287**, 117333.