

정화토의 순환골재 재활용 가능성 평가

한수호 · 김정욱 · 전순원 · 박승호 · 박형민 · 민선기 · 정명채*

세종대학교 지구자원시스템공학과

Evaluation of Potential Utility of Reclaimed Soil from Remediation Sites

Su Ho Han · Jeong Wook Kim · Soon Won Jeon · Seung Ho Park · Hyeong Min Park
Seon Ki Min · Myung Chae Jung*

Department of Energy Resources and Geosystem Engineering, Sejong University, Seoul 05006, Korea

ABSTRACT

This study examined the possibility of reutilization of soil reclaimed from contaminated sites after completing remediation. The current status of soil remediation methods in Korea was reviewed and physicochemical properties of soil before and after remediation processes were examined to access the recycling possibility of reclaimed soils based on Recycling Aggregate Quality Standard. The most commonly practiced soil remediation techniques are soil washing, land farming, and thermal desorption. These techniques tend to deteriorate various soil properties including electrical conductivity(EC), organic matter content(OM), available P_2O_5 , and cation exchange capacity(CEC). Evaluation of the properties of soil retrieved after each remediation process indicated soil washing may yield the most suitable soil for use as a filling, covering, back-filling, road pavement, and blocking materials. In addition, the soils reclaimed from land farming and thermal desorption have potential utility as a filling, covering and road pavement materials.

Key words : Remediated soil, Recycle aggregate, Soil washing, Land farming, Thermal desorption

1. 서 론

토양은 인간 생활의 터전이자 식량자원의 생성장소이며, 각종 오염물질을 분해 또는 완충시켜 생태계의 순환 체계를 유지시키는 역할을 하고 있다. 하지만 근대 및 현대사회로 들어오면서 도시화와 산업화로 인한 무분별한 자원 개발, 화학물질, 유류 및 농약의 사용과 폐기물 발생이 늘어남에 따라 토양 및 지하수 오염이 증가되고 있다(Oh and Chon, 1996; Kim, 2001; Jung, 2003; Jeong et al., 2015; Oh et al., 2016). 이에 따라 국가에서는 토양오염으로 인한 국민건강 및 환경상의 위해를 예방하기 위하여 1996년 1월 「토양환경보전법」이 제정되었으며, 이 법에

기초하여 토양 측정망 운영, 토양오염실태조사 및 오염토양에 대한 정화사업 등이 수행되어왔다. 최근 환경부에서 발표한 「제2차 토양보전기본계획(2020~2029)」에서는 폐기물 발생량이 지속적으로 증가하고 있으며, 토양오염도 조사 결과 산업단지는 6,201개 업체 중 347개 업체, 노후주유소는 405개소 중 83개소, 철도부지 16개소 중 13개소에서 토양오염이 확인된 것으로 보고하였다(MOE, 2020). 특히, 오염토 정화사업의 정화물량을 확인한 결과, 환경부의 자료에 의하면 2007년에서 2011년까지 약 28,483 천톤(평균 약 5,697 천톤/년)이 발생하였고(MOE, 2013), 한국환경산업기술원의 자료에 의하면 2016년 5,737 천톤 및 2017년 4,703 천톤(평균 약 5,220 천톤/년)의 오염토양 정화사업이 수행된 것으로 보고되었다(KEITI, 2019).

오염토양 정화사업의 경우, 부지 내 정화(On-site)와 부지 외(Off-site)로 크게 구분할 수 있으며, Hwang et al.(2014)에 따르면 2006년 ~ 2008년 1,046건의 정화실적 중 부지 내 처리가 약 55%로 가장 많았고 부지 외 처리가 약 41%, 부지 내·외 병행처리가 2.5% 및 기타 1.4%

주저자: 한수호, 석사

공저자: 김정욱, 박사; 전순원, 박사; 박승호, 석사과정; 민선기, 석사과정; 박형민, 석사과정

*교신저자: 정명채, 교수

Email: jmc65@sejong.ac.kr

Received : 2021.10.15 Reviewed : 2021.11.04

Accepted : 2021.11.18 Discussion until : 2022.02.28

로 보고되었다. 정화토의 재활용 측면에서 살펴보면, 부지 내 정화의 경우 「토양환경보전법」 제 15조의3에 의해 정화된 토양은 다시 부지 내에서 되메움재로 재이용되지만, 부지 내 협소 등의 이유로 정화가 불가능한 경우 부지 외에서 오염토양을 처리할 수 있다. 그러나 부지 외에서 정화된 토양은 토양오염기준이 만족함에도 불구하고 오염토라는 선입견과 정화 후 물리·화학·생물학적으로 열화된 토양 특성으로 인해 주로 성토 및 복토재 등 제한된 용도로 재이용될 뿐 토양 자원으로서 적절하게 재활용되지 못하고 있는 실정이다(Hwang et al., 2014; MOE, 2020; Han et al., 2020; Lee et al., 2020). 다만 「오염토양 반출·정화 등에 따른 서류 제출 시기 및 방법에 관한 규정」에서는 정화토양을 성토재, 복토재, 노반재 또는 토양개량제 등으로 활용할 수 있는 것으로 제시하고 있다(MOE, 2010). 특히, 정화토 재활용과 관련된 국내 연구는 주로 정화 전·후 토양 특성 변화(Yi et al., 2012; 2013; Lee et al., 2020), 정화토 개량(MOE, 2014; Kim et al., 2017), 현황평가(KEITI, 2019), 반출 정화토양의 관리방안 및 제도개선(Hwang et al., 2014; MOE, 2009; 2013) 등과 같은 정화토 특성과 기반 구축의 필요성에 관한 연구가 주로 수행되어 정화토양의 현실적인 재활용 용도를 모색한 연구는 매우 미진한 상황이다.

하지만, 최근에는 이러한 상황을 극복하기 위하여 「제2차 토양보전기본계획(2020-2029)」에서는 반출정화토양을 자원으로 인식하고 재활용할 수 있는 기반 구축의 필요성을 논의하였으며 이를 위하여 ① 정화토양 품질인증제 ② 정화토양 목표관리제 ③ 반출정화토양의 정화기준 1지역으로 상향 및 ④ 관급공사 및 오염토양 발생지역 성·복토 시 정화토양 재활용하는 방안 등을 추진 중에 있다(MOE, 2020). 이에 이 연구에서는 국내의 오염토양의 정화에 적용되는 대표적인 정화방법에 대해 조사하고, 오염토양의 정화에 적용되는 대표적인 정화공법에 대한 정화기술 적용 전·후 토양의 물리·화학적 특성변화를 고찰하였다. 또한 이들 정화토를 성토재 및 복토재 등의 순환골재로의 재활용 가능성 평가를 수행하였다.

2. 연구방법

정화토양의 순환골재 활용 가능성 평가를 위해 먼저 국내에서 주로 적용되고 있는 토양정화공법에 대한 검토를 수행하였고, 각 공법별 정화 전·후 토양 특성 변화를 평가하였으며, 국토교통부공고 제2017-1711호 「순환골재 품질기준」에 준하여 재활용 가능 용도에 대해 검토하였다.

「순환골재 품질기준」은 건설폐기물 중 폐콘크리트 및 폐아스팔트 등의 파쇄처리에 의하여 생산되는 순환골재를 재활용할 수 있도록 용도별 품질기준을 규정한 것으로 성토재, 복토재 및 혼합재 등으로 총 13가지의 활용방안(도로 기층용, 하수관로 설치용 모래대체 잔골재, 동상방지층 및 차단층용, 노체용, 매립시설의 복토용 등)을 제시하고 있다. 또한, 순환골재를 놓여준 도로, 산업단지, 공공폐수 시설 및 노상 주차장 등과 같은 건설공사 시 의무 사용하도록 규정하고 있어 자원순환사회 구축을 위해 기여하고 있다.

2.1. 주요 정화공법 선정 및 시료채취

정화토양의 순환골재로의 재활용 가능성을 평가하기 위하여 국내에서 주로 적용되는 정화공법을 확인하는 것은 매우 중요하다. 이에, 국내 주요 적용 정화공법을 적용한 연구사례와 보고서 등을 검토하였으며, 그 결과 토양세척법(Soil washing), 토양경작법(Land farming), 열탈착법(Thermal desorption) 및 화학적산화법(Chemical oxidation) 등이 가장 많이 적용되는 것으로 확인되었다(Han et al., 2020; KEITI, 2019; MOE, 2013). 이는 중금속오염 토양 정화 시 토양세척법은 가장 많이 활용되고 있으며(Wang et al., 2020; Hazrati et al., 2020; Cheng et al., 2020), 유류오염 토양 정화 시 토양경작법, 열탈착법 및 화학적산화법 등이 가장 효율이 높기 때문에 분석되었다(Jho et al., 2013; Cho et al., 2014).

이러한 결과를 활용하여 본 연구에서는 토양경작설비, 열탈착설비 및 토양세척설비를 보유한 토양정화업체 반입처리장(Off-site)을 방문하여 정화가 완료된 토양을 각각 100kg을 채취하였다. 화학적산화법의 경우 부지 내(On-site)에서 수행하는 지중처리방식(In-situ)으로 알려져 있어 시료 채취에서 제외하였다. 채취된 시료의 이력을 확인한 결과, 토양세척공법이 적용된 토양은 2지역(대지)에서 불소로 오염된 토양으로 확인되었고, 토양경작공법이 적용된 토양은 1지역(대지)에서 TPH로 오염된 토양으로 반입처리장에서 자체적으로 배양 중인 미생물을 활용하여 정화를 수행하였다. 열탈착공법이 적용된 토양은 3지역(공장용지)에서 TPH로 오염된 토양으로 650°C에서 30분간 열을 가해 토양 정화를 수행한 것으로 확인되었다(Table 1).

2.2. 정화공법별 토양 특성 변화

토양세척법, 토양경작법 및 열탈착법에 대하여 정화 전·후 토양의 물리·화학적 특성을 평가하였으며 평가항목은 토성(Soil texture), pH, 전기전도도(Electrical conductivity),

Table 1. Information on soil samples by remediation methods

Remediation method	Pollution type	Pollution element or material	Land use (classified area)	Detailed remediation methods
Soil washing	-	F	Residence (2)	Oxalic acid 20%, alum, Polymer flocculant
Land farming	Petroleum	TPH	Residence (1)	Cultivated microorganisms
Thermal desorption	Petroleum	TPH	Factory (3)	650°C, 30 min

Classified area based on the Soil Conservation Act in Korea

유기물함량(Organic material), 유효인산(Available P_2O_5) 및 치환성양이온(Cation exchange capacity) 등에 대하여 수행하였다. 분석은 토성의 경우, 표준체를 활용한 습식 분석을 수행하였으며 실트 및 점토 입자의 경우 레이저 입도분석기(LS 13 320)를 활용하였다. pH와 EC는 1:5 H_2O 방법을 적용하였고, 유기물 함량은 Tyurin방법, 유효 인산은 Lancaster 방법으로 추출하여 $SnCl_2$ 에 의한 몰리브덴(Mo) 청법으로 정량하였다. 치환성 양이온은 1 M NH_4OAc (pH 7.0)로 침출하여 ICP로 분석하였으며 각 시험법은 국립농업과학원에서 발간한 토양화학분석법을 참고하였다(NAOAS, 2010).

2.3. 정화토의 순환골재 재활용 가능성 평가 방안 검토

순환골재는 「순환골재 품질기준」에서 제시하는 다양한 용도별 시험 항목과 구체적인 기준에 부합될 경우 재활용이 가능하다. 예를 들면, 순환골재가 성토용(Filing)으로 재활용될 경우 토양의 최대지수(Maximum index), 수정 CBR(Modified CBR), 5 mm 체통과율(5 mm Sieve pass rate), 0.08 mm 체통과율(0.08 mm Sieve pass rate), 소성 지수(Plasticity index), 다짐 후 건조밀도(Dry density after compaction) 및 이물질함유량(Foreign matter) 등의 결과가 제시된 기준 이내일 경우 해당 용도로 사용이 가능하다.

고, 복토용(Covering)은 이물질함유량 결과(Foreign matter)가 기준 이내로 부합되어야 해당 용도로 재활용할 수 있다(Table 2).

하지만, 정화토양을 순환골재로 재활용하기 위하여 우선적으로 정화토양과 순환골재의 토성 차이를 확인할 필요가 있다. 즉, 정화토양은 폐콘크리트 및 폐아스팔트 등 파쇄처리에 의해 발생하는 순환골재에 비해 상대적으로 작은 입자 특성을 가지고 있어 토성 차이로 인한 순환골재 시험 불가 항목에 대해 사전 검토를 수행해야 한다. 특히, 정화토양은 적용된 정화공법과 오염토양의 특성에 따라 토성이 달라진다. 즉, 토양 세척 공법은 잡석과 이물질을 제거 후 0.075 mm 이상의 토양을 정화공법에 적용시키고 그 이하의 토양은 정화효율이 현저히 낮아 폐기물 처리를 수행함으로써 0.075 mm 이상의 입자 특성을 가지고 있다. 이와 달리 토양경작법과 열탈착공법이 적용된 정화토양은 잡석과 이물질 제거 후 바로 정화공법이 적용되고 있어 오염토양과 유사한 토성을 보이고 있다(Fig. 1).

이러한 정화공법별 정화토양의 토성 특성을 고려하여 순환골재 시험 불가 항목을 선정하였으며, 그 결과 토양 세척법 정화토는 마모감량 및 연한선편 시험이 불가능하였고, 토양경작법 및 열탈착법 정화토는 모래당량, 마모감량 및 점토 덩어리 등 10가지 항목이 시험 불가 항목으

Table 2. Standards on filing and covering materials as recycle aggregate

Recycle type	Testing methods	Standard	
		A	B
Filing	Maximum index (mm)	≤ 100	
	Modified CBR (%)	≥ 10	≥ 2.5
	5 mm Sieve pass rate (%)	25~100 %	-
	0.08 mm Sieve pass rate (%)	0~25	-
	Plasticity index	≤ 10	-
	Dry density after compaction (t/m^3)	-	≥ 1.5
	Foreign matter (organic, %)	≤ 1.0 (volume standard)	
Covering	Foreign matter (organic, %)	≤ 1.0 (volume standard)	

A: The bottom within 100 cm from the upper layer, B: The bottom above 100 cm from the upper layer

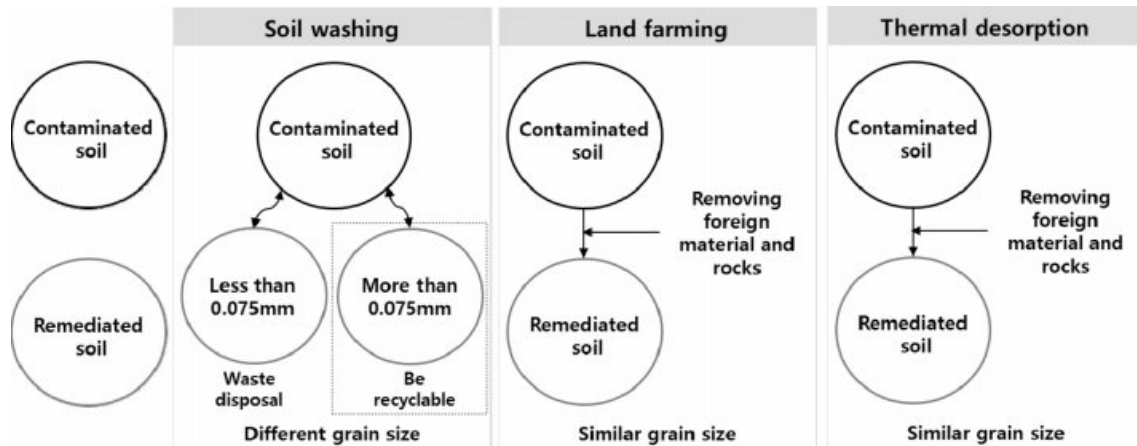


Fig. 1. Comparison on soil texture characteristics as remediation methods.

Table 3. Types of recycle aggregate from remediated soils by various soil remediation methods examined in this study

Item of recycle aggregate	Soil remediation methods		
	Soil washing	Land farming	Thermal desorption
Filing	○	○	○
Covering	○	○	○
Backfilling for transmission and distribution pipeline	○	○	○
Backfilling with structure	○	×	×
Backfilling	○	○	○
Road pavement (bottom)	○	○	○
Road pavement (upper)	○	○	○
Blocking (frostbite prevention)	○	×	×
Sewer pipeline	×	×	×
Sub base course (aggregate)	×	×	×
Concrete (coarse aggregate)	×	×	×
Concrete (fine aggregate)	○	×	×
Base course of particle size adjustment	×	×	×

로 확인되었다. 이러한 결과를 적용하여 정화공법별 순환골재로서 적용 가능한 시험은 토양세척법 정화토의 경우 성토용, 복토용, 송배전 관로 되메우기용, 되메우기용, 노체용, 노상용 및 반배합 콘크리트 기층용(잔골재) 등의 용도로 시험이 가능하였고, 토양경작법 및 열탈착법 정화토는 성토용, 복토용, 노체용 및 노상용 등의 용도로 적용이 가능하였다(Table 3).

따라서, 본 연구에서는 정화공법별 정화토의 순환골재 재 활용 가능성을 평가하기 위하여 성토용, 복토용, 송배전 관로 되메우기용, 되메우기용 및 노체용 등 총 9가지 항목에 대하여 평가를 수행하였고, 분석은 순환골재 품질기준에서 제시된 KS 시험방법을 준용하였으며, 국제공인 시험기관인 한국화학융합시험연구원(KTR)에 의뢰하여 수행하였다.

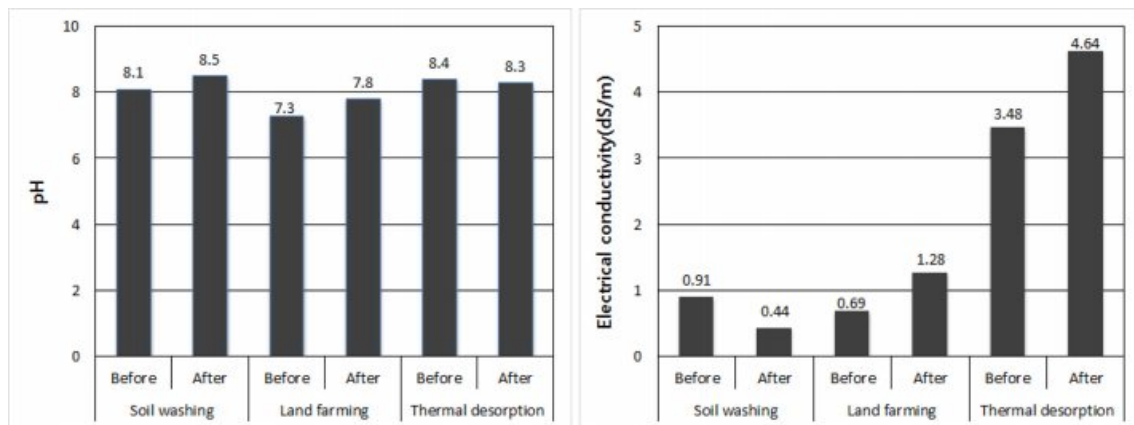
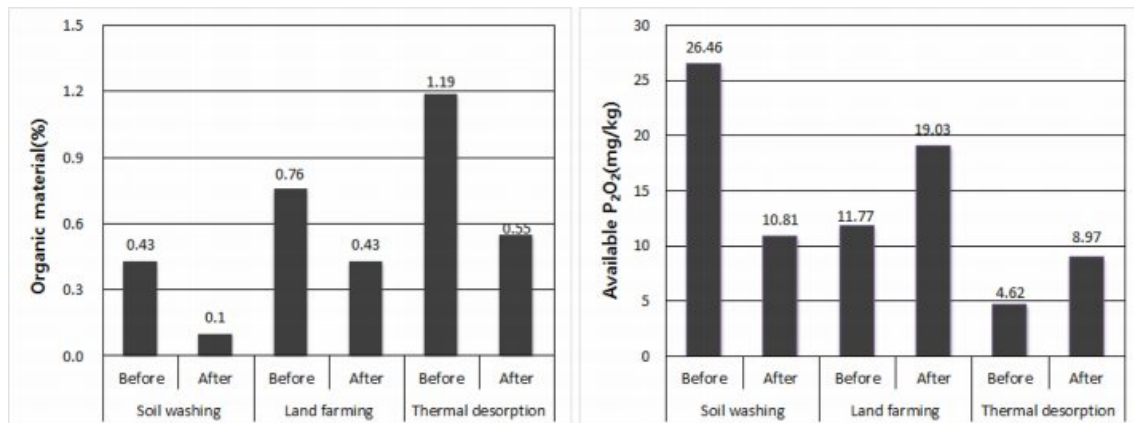
3. 결과 및 토의

3.1. 정화공법별 토양 특성 변화

각각의 정화공법별 토성 분석 결과, 토양세척법이 적용된 정화토는 자갈의 비율이 감소하였고, 모래의 비율이 증가하였으며, 공정 과정 중 2mm 이상의 입자 토양이 분리·제거되어 모래 비율이 증가한 것으로 확인되었다. 또한, 토양경작법 및 열탈착법이 적용된 정화토는 토양세척법의 입도 분리 과정이 없어 오염토 토성과 유사한 경향을 보일 것으로 판단되며, 분석 결과 증감 폭이 매우 작지만, 자갈 비율이 소폭 증가하였고, 모래의 비율이 감소하는 특징을 보였다. 모든 정화공법별 정화 전·후 토양은 모래 함량이 매우 높은 사양토로 평가되었다(Table 4).

Table 4. Results of soil texture for contaminated and remediated soil

Category	Remediation methods	Gravel (%) > 2.0 mm	Sand (%) 2.0~0.02 mm	Silt (%) 0.02~0.002 mm	Clay (%) < 0.002 mm
Contaminated soil	Soil washing	21	79	-	-
	Land farming	7	93	-	-
	Thermal desorption	24	76	-	-
Remediated soil	Soil washing	9	91	-	-
	Land farming	13	87	-	-
	Thermal desorption	33	67	-	-

**Fig. 2.** Results of pH and electric conductivity (EC) for contaminated and remediated soil.**Fig. 3.** Results of Organic matter and available P₂O₅ for contaminated and remediated soil.

pH 분석 결과, 토양세척법 및 토양경작법 정화토에서는 pH가 증가하였고, 열탈착법에서는 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. 이러한 원인은 토양세척법은 세척 과정 중 중화제에 의한 영향으로 판단되며, 토양경작법은 미생물의 활동에 의한 것으로 판단된다(Fig. 2).

전기전도도 분석 결과, 토양세척법 정화토에서는 감소하고 토양경작법 및 열탈착법에서는 증가하는 경향을 보

이고 있다. 이러한 감소와 증가는 교환성양이온(Ca, Mg, K, Na)의 감소와 증가에 기인한 것으로 판단된다(Fig. 2).

유기물 함량은 분석 결과, 모든 정화공법에서 유기물 함량이 감소하는 것으로 확인되었다(Fig. 3). 이는 토양세척법은 세척액에 의해 유기물이 제거되거나 점토질 감소에 의한 결과로 보여지고(Lee et al., 2020), 토양경작법은 정화과정 중 지속적인 산소공급과 햇빛(자외선)에 노출되

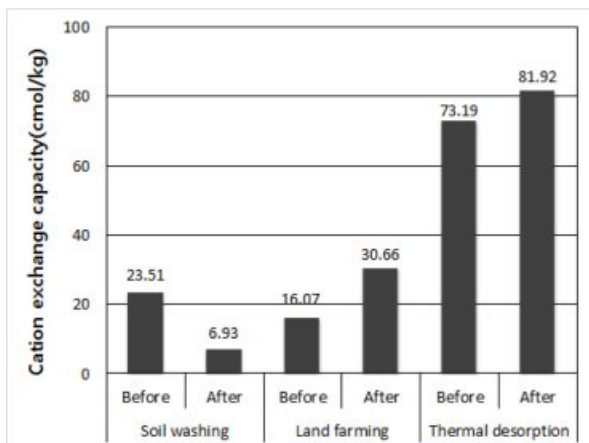


Fig. 4. Results of exchangeable cations for contaminated and remediated soil.

어 유기오염물질이 분해되는 과정 중 유기물 함량이 감소한 것으로 판단된다(Haynes and Tregurtha, 1999; Hussain et al., 1999; Marin et al., 2005; Riffaldi et al., 2006; Besalatpour et al., 2011). 또한 열탈착공법의 경우, 오염물질 제거를 위해 적용된 높은 온도가 오염물질뿐만 아니라 유기물에도 영향을 미쳐 유기물 함량이 감소한 것으로 판단된다(Yi et al., 2016; Cébron et al., 2011; Biache et al., 2008).

유효인산 분석 결과, 토양세척법 정화토는 감소하고, 토양경작법 및 열탈착법에서는 증가하는 경향을 보이고 있다(Fig. 3). 이러한 결과를 Yi et al.(2012)와 비교하면 열탈착 후 유효인산 증가는 본 연구와 유사한 결론을 보여주고 있지만, 토양 세척 후 유효인산의 감소는 상반된 결과를 보여주고 있고 이러한 원인으로는 토양 세척액에 따른 차이에서 기인하는 것으로 판단된다.

교환성양이온 분석 결과 토양세척법 정화토에서 감소하고, 토양경작법 및 열탈착법에서는 증가하는 경향을 보인다(Fig. 4). 이러한 원인은 세척액에 의해 교환성양이온이 제거되거나 상대적으로 교환 능력이 높은 점토질이 입도 분리 과정에서 감소한 것으로 평가된다.

토양세척법, 토양경작법 및 열탈착법에 대한 정화토의 토성은 모두 사양토로 확인되었으며, 화학적 특성 분석 결과, pH는 7.8~8.5의 알칼리성을 나타내는 것으로 확인되었고, 전기전도도는 0.44~4.64 dS/m, 유기물 함량은 0.1~0.55%의 범위로 검출되었다. 또한, 유효인산 분석 결과 8.97~19.03 mg/kg의 범위를 보였고, 교환성양이온은 6.93~81.9 cmol/kg로 검출되었다. 이러한 결과를 원토양(오염 토양)과 비교하면 토양세척법의 경우, pH를 제외한 모든 항

목에서 정화 후 감소하는 것으로 평가되었고, 토양경작법 및 열탈착법에서는 EC, 유효인산 및 교환성양이온이 증가하는 것으로 확인되었다.

3.2. 정화토의 순환골재 활용 가능성 평가

정화토를 순환골재로써 활용 가능성을 모색하기 위하여 토양세척법 정화토는 9가지의 활용 용도와 토양경작법 및 열탈착법 정화토는 6가지 활용 용도에 대하여 순환골재 품질기준에 준하여 평가를 수행하였다. 시험 결과, 토양세척, 토양경작 및 열탈착 정화토가 모두 활용이 가능한 용도는 성토용(Filling), 복토용(Covering), 및 노체용(Road pavement(bottom))으로 확인되었으며 그 외 용도는 정화공법에 따라 활용이 제한적이었다.

이를 구체적으로 살펴보면, 송배전 관로 되메우기용(Backfilling for transmission and distribution pipeline)은 토양세척 정화토만 활용 가능하였고, 토양경작 및 열탈착 정화토는 불가능한 것으로 평가되었다. 이는 토양경작의 경우 0.08 mm 체 통과율이 초과된 것으로 평가되었고, 열탈착법은 0.08 mm 체통과율과 최대치수가 기준을 초과하였기 때문이다.

뒤채움용(Backfilling with structure) 분석 결과, 토양세척 정화토는 활용할 수 없었으며, 이는 수정CBR 결과가 기준 미만으로 확인되어 불가능하였다. 되메우기용(Backfilling) 분석 결과 토양 세척 정화토는 활용이 가능하였으며, 토양경작 및 열탈착 정화토는 0.08 mm 체 통과율이 초과하여 활용이 불가능하였다. 노상용(Road pavement(upper)) 분석 결과, 토양세척 정화토는 해당 용도로 재활용할 수 있으며(단, 현장시험 제외), 토양경작 및 열탈착 정화토는 불가능하였다. 이러한 원인은 0.08 mm 체 통과율이 초과한 것으로 확인되었다. 동상방지층 및 차단용(Blocking(frostbite prevention) 분석 결과, 토양세척 정화토는 재활용이 가능하였으며, 반배합 콘크리트 기층용(잔골재)(Concrete(fine aggregate) 0.08 mm 체 통과율이 초과되어 토양세척 정화토는 활용이 제한적이었다.

본 결과를 종합한 결과 토양세척법이 적용된 정화토에 비해 토양경작 및 열탈착법이 적용된 정화토는 활용 용도가 매우 제한적이었다. 이러한 원인은 평가항목 중 0.08 mm 체 통과율이 기준보다 초과되었기 때문이다. 즉 토양세척법이 적용된 정화토양은 입도 분리를 통해 일반적으로 0.075 mm 이상의 토양으로 구성되어 있으나 토양경작법과 열탈착법이 적용된 정화토양은 정화과정에서 입도 분리 과정이 없어 다양한 입자크기를 가질 수 있으므로 0.08 mm 체 통과율이 초과된 것으로 평가하였다.

Table 5. Results of use possibility as recycle aggregate

Item	Testing methods	Standard		Soil Washing	Land farming	Thermal desorption
		A	B			
Filing	Maximum index (mm)	≤ 100		5	10	20
	Modified CBR (%)	≥ 10	≥ 2.5	27.6	19.4	10.7
	5mm Sieve pass rate (%)	25~100%	-	96	89	66
	0.08mm Sieve pass rate (%)	0~25	-	5.4	34.4	29.3
	Plasticity index	≤ 10	-	N.P	N.P	8.5
	Dry density after compaction (t/m^3)	-	≥ 1.5	1.742	1.637	1.659
	Foreign matter (organic, %)	≤ 1.0 (volume standard)		0	0	0
Covering	Foreign matter (organic, %)	≤ 1.0 (volume standard)		0	0	0
Backfilling for transmission and distribution pipeline	Plasticity index	NP		N.P	N.P	8.5
	Modified CBR (%)	≥ 10		27.6	19.4	10.7
	5 mm Sieve pass rate (%)	25~100%		96	89	66
	0.08 mm Sieve pass rate (%)	0~10%		5.4	34.4	29.3
	Maximum index (mm)	≤ 10		5	10	20
	Coefficient of Uniformity (Cu)	≥ 5		7.4	8.3	21.5
	Coefficient of curvature (Cc)	≤ 3		0.8	0.8	0.5
	Foreign matter (organic, %)	≤ 1.0 (Volume standard)		0	0	0
Backfilling with structure	Plasticity index	≤ 6		N.P	not reviewed	
	Liquid limit	≤ 25		N.P		
	Sand equivalent (%)	≥ 25		75		
	Modified CBR (%)	≥ 30		27.6		
	abrasion loss (%)	≤ 50		-		
	Foreign matter (organic, %)	≤ 1.0 (Volume standard)		0		
Backfilling	Plasticity index	≤ 10		N.P	N.P	8.5
	Modified CBR (%)	≥ 10		27.6	19.4	10.7
	5 mm Sieve pass rate (%)	25~100%		96	89	66
	0.08 mm Sieve pass rate (%)	0~25		5.4	34.4	29.3
	Foreign matter (organic, %)	≤ 1.0 (volume standard)		0	0	0
Road pavement (bottom)	Modified CBR (%)	≥ 2.5		27.6	19.4	10.7
	Foreign matter (organic, %)	≤ 1.0 (volume standard)		0	0	0
Road pavement (upper)	Maximum index (mm)	≤ 100 mm		5	10	20
	5 mm Sieve pass rate (%)	25~100%		96	89	66
	0.08 mm Sieve pass rate (%)	0~25%		5.4	34.4	29.3
	Plasticity index	≤ 10		N.P	N.P	8.5
	Modified CBR (%)	≥ 10		27.6	19.4	10.7
	Construction floor thickness	≤ 200 mm			Field test	
	Foreign matter (organic, %)	≤ 1.0 (volume standard)		0	0	0
Blocking (frostbite prevention)	Plasticity index	≤ 10		N.P	not reviewed	
	Modified CBR (%)	≥ 10		27.6		
	Sand equivalent (%)	≥ 20		75		
	Foreign matter (organic, %)	≤ 1.0 (volume standard)		0		
	Foreign matter (inorganic, %)	≤ 5.0 (weight standard)		0		
Concrete (fine aggregate)	Plasticity index	≤ 9		N.P		
	Stability	≤ 10		2.7		
	0.08 mm Sieve pass rate (%)	≤ 3		5.4		
	Clay lumps (%)	≤ 1		0.5		

A: The bottom within 100 cm from the upper layer, B: The bottom above 100 cm from the upper layer

shaded within the standard

N.P: Non plastic

5. 결 론

본 연구는 반출정화토양을 자원으로 인식하고 재활용할 수 있는 기반 구축을 위해 정화토양을 순환골재로써 재활용 가능성을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

정화공법별 토양 특성 변화 결과, 정화 전·후 토양(토양 세척, 토양경작 및 열탈착법) 모두 모래의 비율이 높은 것으로 확인되었으며, pH 분석 결과, 증감 폭이 매우 낮은 것으로 확인되었다. 정화공법별 화학적 특성 결과를 구체적으로 확인한 결과, 토양세척법이 적용된 토양은 전기전도도, 유기물 함량, 유효인산, 교환성양이온 모두 감소한 것으로 확인되었으며, 이러한 원인은 정화과정 중 입도 분리 과정을 통해 점토질의 토양이 감소하였기 때문이다. 이와 달리 토양경작 및 열탈착법이 적용된 토양은 유기물 함량을 제외한 전기전도도, 유효인산 및 교환성양이온에서 모두 증가한 것으로 평가되었다.

「순환골재 품질기준」에 준하여 정화토의 재활용 가능성을 평가한 결과, 토양세척법 정화토는 성토용, 복토용, 송배전관로 뒷메우기용, 되메우기용, 노체용, 노상용(현장 시험 제외), 동상방지층 및 차단용 등 7가지의 용도로 재활용이 가능한 것으로 확인되었으며, 토양경작법 및 열탈착법 정화토는 성토용, 복토용 및 노체용 등 3가지 용도로 재활용 가능한 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 토양경작법 및 열탈착법 정화과정 중 입도 분리 과정이 없어 입자크기가 다양함에 따라 순환골재로써 재활용 용도가 제한적인 원인으로 평가되었고 순환골재 재활용 측면에서는 정화토의 입자크기가 중요한 인자임을 확인하였다.

현재, 국내에서는 정화토양이 주로 성토재, 복토재 등으로 주로 재활용되고 있는 것으로 보고되고 있으나(Hwang et al., 2014; Han et al., 2020), 정화토양을 반입정화시설 내부에 방치 또는 매립 등의 사례가 발견되어(Hwang et al., 2014) 적절히 재활용되지 못하는 것이 현실이다. 따라서, 정화토의 재활용 촉진을 위해 순환골재뿐만 아니라 다양한 용도로 재활용할 수 있는 연구와 정화토의 토양 건강성을 유지 및 회복시킬 수 있는 정화기술 및 회복기술에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 “토양건강성 연계 정화토양 재활용 관리 시스템 구축”사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호 : 2020002480004).

References

- Biache, C., Mansuy-Huault, L., Faure, P., Munier-Lamy, C., and Leyval, C., 2008, Effects of thermal desorption on the composition of two coking plant soils: impact on solvent extractable organic compounds and metal bioavailability, *Environ Pollut.*, **156**, 671-677.
- Besalatpour, A., Hajabbasi, M.A., Khoshgoftarmnanes, A.H., and Dorostkar, V., 2011, Landfarming process effects on biochemical properties of petroleum-contaminated soils, *Soil Sediment Contam.*, **20**(2), 234-248.
- Cheng, S.L., Lin, Q.T., Wang, Y.P., Luo, H.Y., Huang, Z.F., Fu, H.G., Chen, H.R., and Xiao, R.B., 2020, The removal of Cu, Ni, and Zn in industrial soil by washing with EDTA-organic acids, *Arab. J. Chem.*, **13**(4), 5160-5170.
- Cho, C.H., Park, J.G., Park, M.G., and Jeong, S.W., 2014, A case study of landfarming design procedures for remediation of oil contaminated site, *J. Kor. Environ. Eng.*, **36**(9), 659-666.
- Cébron, A., Cortet, J., Criquet, S., Biaz, A., Calvert, V., Cautpert, C., Pernin, C., and Leyval, C., 2011, Biological functioning of PAH-polluted and thermal desorption-treated soils assessed by fauna and microbial bioindicators, *Microbiol.*, **162**(9), 896-907.
- Haynes, R.J. and Tregurtha, R., 1999, Effects of increasing periods under intensive arable vegetable production on biological, chemical and physical indices of soil quality, *Biol. Fertil. Soils*, **28**, 259-266.
- Hussain, I., Olson, K.R., and Ebelhar, S.A., 1999, Long-term tillage effects on soil chemical properties and organic matter fractions, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **63**(5), 1335-1341.
- Han, S.H., Jung, M.C., Kim, J.W., Jeon, S.W., Tuan, N.Q., Yoon, K.W., and Min, S.K., 2020, The occurrence and treatment status of off-site contaminated soil in Korea, *J. Soil Groundwater Environ.*, **25**(4), 1-6.
- Hazrati, S.J., Farahbakhsh, M.H., Heydarpoor, G.S., and Besalatpour, A.A., 2020, Mitigation in availability and toxicity of multi-metal contaminated soil by combining soil washing and organic amendments stabilization, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **201**, 110807.
- Hwang S.I., Moon, H.J., Ki, B.M., and Yoon, S.J., 2014, Study on promotion of recycling of cleaned soil and improvement of management system on off-site remediation, *Korea Environment Institute*, **17**(254).
- Jeong, T.U., Cho, E.J., Jeong, J.E., Ji, H.S., Lee, K.S., Yoo, P.J., Kim, G.G., Choi, J.Y., Park, J.H., Kim, S.H., Heo, J.S., and Seo, D.C., 2015, Soil contamination of heavy metals in national industrial complexes, Korea, *Korean J Environ Agric.*, **34**(2), 69-76.

- Jho, E.H., Ryu, H.R., Shin, D.Y., Kim, Y.J., Choi, Y.J., and Nam, K.P., 2013, Field applicability study of landfarming for petroleum hydrocarbons contaminated soils, *J. Soil Groundwater Environ.*, **18**(2), 1-9.
- Jung, M.C., 2003, Soil pollution status and countermeasures, *J. Korean Soc. of Hazard Mitig.*, **3**(1), 31-40.
- KEITI (Korea environmental industry & technology institute), 2019, Trend analysis and DB construction: Statistical of Soil-groundwater-industry-workforce, Seoul, Korea.
- Kim, Y.W., 2001, Environmental remedial investigation and plan for the soil and groundwater contaminated with petroleum, *J. Korean Geotechnical Society*, **2**(3), 10-19.
- Kim, S.B. and Park, J.B., 2017, Microbial amendment of remediated soils for effective recycling, *KSCE 2017 Convention, Ksce J.Ceer*, Pusan, Korea
- Lee, S.W., Lee, W.C., Lee, S.H., and Kim, S.O., 2020, Changes of Soil properties through the remediation processes and techniques for the restoration of remediated soils, *Econ. Environ. Geol.*, **53**(4), 441-477.
- MOE (Korea ministry of environment), 2020, The 2nd soil environment conservation master plan, Publication number 11-1480000-001639-14, Sejong, Korea.
- MOE (Korea ministry of environment), 2014, Development of customer-tailored soil amendment technology and virtuous-cycle system for soil utilization, 174-111-007, Sejong, Korea.
- MOE (Korea ministry of environment), 2013, A study on policy application for activation of the soil remediation market, Sejong, Korea.
- MOE (Korea ministry of environment), 2010, Public notice on time and method to submit the document for removal and remediation of contaminated soil(Notice 2013-63), Sejong, Korea.
- MOE (Korea ministry of environment), 2009, A study on management of removed remediated soils, Sejong, Korea.
- Marin, J.A., Hernandez, T., and Garcia, C., 2005, Bioremediation of oil refinery sludge by landfarming in semiarid conditions: Influence on soil microbial activity, *Environ. Res.*, **98**(2), 185-195.
- National Academy of Agricultural Science, 2010, Methods of Soil Chemical Analysis, 1-113.
- Oh, J.G., Jin, K.N., and Lee, H.J., 2016, Soil pollution and contaminated soil management of the public housing agency in residential land development, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **38**(7), 377-386.
- Oh, S.Y. and Chon, H.T., 1996, Characteristics of groundwater pollution and contaminant attenuation at waste disposal sites, *J. Soil Groundwater Environ.*, **13**(2), 70-75.
- Riffaldi, R., Levi-Minzi, R., Cardelli, R., Palumbo, S., and Saviozzi, A., 2006, Soil biological activity in monitoring the bioremediation of diesel oil-contaminated soil, *Water Air Soil Pollut.*, **170**, 3-15.
- Wang, Z.Z., Wang, H.B., Wang, H.J., Li, Q.C., and Li, Y., 2020, Effect of soil washing on heavy metal removal and soil quality: A two-sided coin, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **203**, 110981.
- Yi, Y.M., Park, S.Y., Munster, C., Kim, G.J., and Sung, K.J., 2016, Changes in ecological of petroleum oil-contaminated soil after low-temperature thermal desorption treatment, *Water Air Soil Pollut.*, **227**, 108.
- Yi, Y.M., Kim, G.J., and Sung, K.J., 2013, Effects of soil remediation methods on the biological properties of soils, *J. Soil Groundwater Environ.*, **18**(3), 73-81.
- Yi, Y.M., Oh, C.T., Kim, G.J., Lee, C.H., and Sung, K.J., 2012, Changes in the physicochemical properties of soil according to soil remediation methods, *J. Soil Groundwater Environ.*, **17**(4), 36-43.