

《原著》

토양 정화 방법에 따른 토양의 물리화학적 특성 변화

이용민¹ · 오참뚝² · 김국진² · 이철호² · 성기준^{1*}

¹부경대학교 생태공학과

²(주)오이코스

Changes in the Physicochemical Properties of Soil According to Soil Remediation Methods

Yong min Yi¹ · Chamteut Oh² · Gukjin Kim² · Chulhyo Lee² · Kijune Sung^{1*}

¹Department of Ecological Engineering, Pukyong National University

²OIKOS Co. Ltd.

ABSTRACT

Various methods are used to remediate soil contaminated with heavy metals or petroleum. In recent years, harsh physical and chemical remediation methods are being used to increase remediation efficiency, however, such processes could affect soil properties and degrade the ecological functions of the soil. Effects of soil washing, thermal desorption, and land farming, which are the most frequently used remediation methods, on the physicochemical properties of remediated soil were investigated in this study. For soils smaller than 2 mm, the soil texture were changed from sandy clay loam to sandy loam because of the decrease in the clay content after soil washing, and from loamy sand to sandy loam because of the decrease in the sand content and increase in silt content during thermal desorption, however, the soil texture remained unchanged after land farming process. The water-holding capacity, organic matter content, and total nitrogen concentration of the tested soil decreased after soil washing. A change in soil color and an increase in the available phosphate concentration were observed after thermal desorption. Exchangeable cations, total nitrogen, and available phosphate concentration were found to decrease after land farming; these components were probably used by microorganisms during as well as after the land farming process because microbial processes remain active even after land farming. A study of these changes can provide information useful for the reuse of remediated soil. However, it is insufficient to assess only soil physicochemical properties from the viewpoint of the reuse of remediated soil. Potential risks and ecological functions of remediated soil should also be considered to realize sustainable soil use.

Key words : Remediated soil, Soil washing, Thermal desorption, Land farming, Sustainable soil use

1. 서 론

우리나라에 산재해 있는 유류 및 유해물 관련시설, 군부대시설, 휴·폐광산 지역, 폐기물매립지 및 소각장 등에서 발생한 침출수 등 점오염원 뿐만 아니라 골프장, 농경지 등 기타 비점오염원 등 다양한 오염원이 존재하고 있으며, 유류와 중금속이 주요 토양오염물질로 알려져 있다(정병길 외, 2009). 이 중 주유소와 같은 지하 유류저장시설 누출과 군부대에서의 부적절한 유류 관리로 인한

토양 및 지하수 오염 피해 범위가 계속적으로 확산되어 나가고 있다(홍선화 외, 2011). 중금속은 유기오염물질과는 달리 토양에서 분해되지 않고 언제든지 토양에서 다시 용출되며 식물에 흡수되고 먹이사슬을 통하여 직·간접적으로 사람에게 피해를 줄 수 있다. 특히 대상지역의 특성에 따라 지표수나 지하수로 이동되면서 주변 생태계에 광역적이고 치명적인 환경문제를 일으킬 수 있다(문덕현 외, 2010; 이근영 외, 2011). 오염토양 복원 기술은 처리 위치에 따라 원위치(in-situ)와 비원위치(ex-situ) 기술로 분

*Corresponding author : ksung@pknu.ac.kr

원고접수일 : 2012. 5. 18 심사일 : 2012. 8. 26 게재승인일 : 2012. 8. 26
질의 및 토의 : 2012. 10. 31 까지

류되거나 또는 오염원의 제거 방법에 따라 물리화학적, 생물학적, 열적 기술 등으로 분류된다. 대체로 오염물질의 농도가 높고 오염지역 규모가 작을 경우에는 열적 처리, 오염물질의 농도가 낮고 오염지역 규모가 클 경우는 생물학적 처리가 유리한 것으로 알려져 있으며, 토양세척이나 토양증기추출과 같은 물리화학적 처리방법은 다양한 규모의 정화사업에 적용되고 있다(양지원 · 이유진, 2007). 현재 우리나라의 토양복원 기술의 개발 수준은 선진 외국에 비해서 초기단계 수준으로서(하상안 · 염혜경, 2007), 정화 효율 향상 및 정화시간 단축을 위한 노력들이 계속될 전망이다. 하지만 토양정화 과정 중에 오염물질을 제거하기 위하여 도입되는 물리화학적, 열적 또는 생물학적 기작들은 토양 내 오염물질이 제거에 도움이 될 수 있지만 이와 더불어 토양이 갖고 있는 고유한 특성에도 영향을 줄 수 있다. 이러한 토양 특성의 변화는 토양의 생태적 기능 저하를 야기할 수 있다. 정화 과정 중에 기능이 약화 또는 기능이 상실된 토양은 처리 후 정화토양의 재이용과 재활용 범위가 제한적일 수밖에 없으며, 사용된다 할지라도 토양의 가장 기본적인 기능 중 하나인 지속가능한 생산이 어렵고 최근 이슈가 되고 있는 기후변화와 같은 외적 스트레스 변화에 적응능력이 매우 낮을 가능성이 있다. 정화토양 또한 토양자원으로서의 가치를 인식하고 이를 적극적으로 재이용하기 위해서는 오염토 정화를 통하여 토양 오염도를 감소시키는 것 외에도 정화과정 중에 발생할 수 있는 토양의 주요 특성변화를 충분히 고려하여야 한다. 유사한 정화효과를 갖는다면 토양의 특성 변화나 기능 감소가 적은 기술, 더 나아가 토양의 기능까지 개선할 수 있는 기술들이 선호될 수 있으며 기술개발 또한 이러한 방향으로 추진되어야 할 것이다. 하지만 지금까지 국내·외에서 토양정화기술과 관련되어 수행된 대부분의 연구들은 정화기술이 대상오염물질의 제거효율을 평가한 연구나 효율 증진을 위한 처리공정개선에 관한 연구가 대부분이며 정화과정에 따른 토양 특성 변화나 기능열화 등에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 기존의 토양 정화기술이 토양의 특성 중 주요 물리화학적 특성에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 국내에

서 토양정화방법으로 가장 많이 사용되고 있는 토양세척, 토양경작, 열탈착 등 주요 정화 공정 전·후 토양의 물리화학적 특성 변화를 분석하였으며 기존의 농업 및 조경기준과 비교하여 농업과 조경 등 잠재적 이용도에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 연구대상토양 및 정화방법

본 연구에서 사용된 토양은 00기지 정화 현장 내 오염토양으로, 유류 또는 납으로 오염된 토양이다. 유류오염토양의 경우 석유계총탄화수소의 농도가 1000~3000 mg/kg 인 지역은 토양경작법, 석유계총탄화수소의 농도가 5000 mg/kg 이상인 지역은 열탈착 공정으로 처리한 토양이며, 납 오염토양의 경우 650 mg/kg의 오염농도를 가진 토양을 토양세척법으로 처리한 토양이다(Table 1).

토양경작법의 경우, 굴토된 오염토양 중 50 mm 이상의 전석은 제거하고 오염토양을 약 0.9~1.2 m 두께로 적지한 후 미생물 및 영양분을 살포하고 뒤집기를 주기적으로 실시하였다. 정화기간은 3개월을 기준으로 운영하였다. 열탈착은 축열식연소장치 내에서 생성된 약 700°C의 열풍을 로터리킬른 내로 주입하여 토양 내 존재하는 오염물질을 휘발시켜 제거하는 방법으로 토양의 온도는 약 200°C로 나타났으며 약 15분간 운전하였다. 토양세척의 경우에 자갈선별장치를 이용해 분급된 3 mm 이하의 토사를 입경 분리장치에서 특별한 세정액이 포함되지 않은 물로서 오염토양과 세척수의 마찰을 이용하여 오염물질을 제거하였다.

2.2. 토양의 물리·화학적 특성분석

정화 전·후 토양의 물리화학적 특성 변화를 살펴보기 위해서 오염 및 정화토양의 입도, 수분보유력, 토색 등의 물리적 특성과 토양산도, 전기전도도, 치환성 나트륨·칼륨·칼슘·마그네슘·알루미늄, 양이온교환능력, 유기물함량, 총질소, 유효인산 등의 화학적 특성을 분석하였다. 입도와 유기물함량을 제외한 전 항목에 대해서는 2 mm 체를 통과한 풍건토양을 이용해 실험을 실시하였는데, 토

Table 1. Remediation methods, contaminant, and concentration of soils used in the study

Remediation methods	Contaminant	Concentration (mg/kg)	
		Before	After
Soil Washing	Heavy metal (Pb)	650	62
Land Farming	TPHs	1000~3000	ND~50
Thermal Desorption	TPHs	> 5000	< 400

양의 수분보유능은 여과지를 정착한 원통형 기구에 토양 시료 20 g을 담고 증류수를 충분히 공급하여 포화 시킨 다음, 10시간 방치한 후 토양에 남아있는 수분량으로 측정하였다. 토색은 Munsell 토색장을 이용하여 명도, 채도, 색상의 변화를 구분하였으며, 토양산도와 전기전도도는 초자전극법으로, 치환성 나트륨, 칼륨, 칼슘, 마그네슘, 알루미늄 등의 양이온은 1M HN₄OAc로 추출하여 ICP (Perkin elmer, USA)로 분석하였다. 양이온교환능력은 IN Acetic acid 법을 이용하였으며, 총질소는 Micro Kjeldahl 법(농업기술연구소, 2000), 유효태인산은 Bray P2 법을 사용하여 분석하였다(Jones, 2001). 입도는 체분석과 피펫팅법을 병행하여 분석하였으며(Shepard, 1954), 국제토양학회법 기준에 따라 토성을 구분하였다(한국지하수토양환경학회, 2001). 유기물 함량은 강열감량법을 이용하였다(박용안, 1983).

2.3. 자료 분석

정화공정이 토양의 물리화학적 특성 변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 처리공정별로 정화 전·후 토양에 대하여 t-test를 실시하였다. 통계 분석은 SAS 프로그램을 이용하여 0.05% 유의수준으로 분석하였다. 또한 정화 토양의 활용도를 검토하기 위하여 농업용 토양기준과 조경용 식재기반의 토양기준을 참고하여 비교·분석하였다 (Table 2).

3. 결과 및 고찰

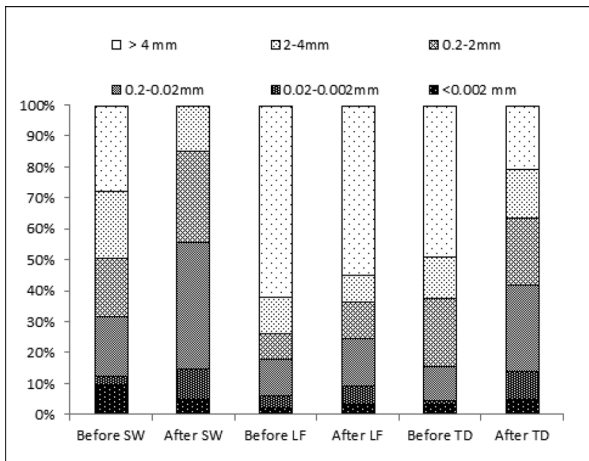
3.1. 토양의 물리적 특성 변화

토성은 토양의 물리적 특성 중에서 가장 기본이 되는 성질로서 투수성, 보수성, 통기성, 양분보유능 등에 영향을 끼치는 주요한 지표가 된다(김계훈 외, 2008). 농업이나 조경용의 경우 토성 분류에 2 mm 이하의 토양 입자만을 이용하므로 본 연구에서도 2 mm 이하의 토양을 분류하여 토성을 구분하였으며(NRCS, 1993), 2 mm 이상의 토양을 포함한 전체 토양의 입경 분포 또한 분석하여 정화공정이 전체 토양의 입경변화에 미치는 영향을 살펴보았다(Fig. 1). 전체토양의 입경분포의 변화는 토양세척의 경우 4 mm 이상의 대부분의 자갈과 0.002 mm 미만의 점토가 일부 제거된 것으로 나타났는데 이는 3.0 mm 이상의 자갈선별 공정과 0.075 mm 이하의 점토제거 공정에 의한 것으로 판단된다. 열탈착 처리 후 4 mm 이상의 자갈이 일부 제거되었는데 이는 파쇄나 균질화 등 전처리 공정 때문으로 판단되며, 0.02-0.002 mm 크기인 미사질 함량과 0.002 mm 이하의 점토함량은 각각 1.6%에서 9.0%로, 3.3%에서 4.9%로 공정 이후 다소 증가함을 볼 수 있었다. 토양경작에 있어서 전체적인 입경분포의 변화가 크게 나타나지 않았다. 2 mm 이하 토양의 토성의 경우 토양세척에서는 점토함량 감소로 인하여 정화 전 사질 식양토에서 사양토로, 열탈착에서는 모래함량 감소와 미

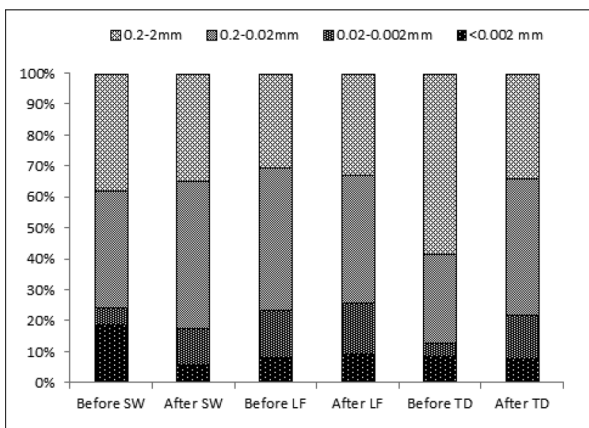
Table 2. Proper ranges of physicochemical properties of soil for agricultural and landscape uses

Group	Properties	Unit	Agriculture ¹⁾					Landscape ²⁾			
			Rice	paddy	Green house	Field	Orchard	High	Medium	Low	Poor
Physical	Field capacity	m ³ /m ³	-	-	-	-	> 0.12	0.12-0.08	0.08-0.04	< 0.04	
	Porosity	m ³ /m ³	-	-	-	-	> 0.6	0.6-0.5	0.5-0.4	< 0.4	
	water permeability	cm/s	-	-	-	-	> 10 ⁻³	10 ⁻³ -10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁵	< 10 ⁻⁵	
	Soil hardness	mm	-	-	-	-	< 21	21-24	24-27	> 27	
Chemical	pH		5.5-6.5	6.0-7.0	6.0-6.5	6.0-6.5	6.0-6.5	5.5-6.0 or 6.5-7.0	4.5-5.5 or 7.0-8.0	< 4.5 or > 8.0	
	EC	dS/m	-	-	-	-	< 0.2	0.2-1.0	1.0-1.5	> 1.5	
	CEC	cmol/kg	-	-	-	-	> 20	20-6	< 6	-	
	Ex. K	cmol/kg	0.25-0.30	0.70-0.80	0.50-0.60	0.30-0.60	> 3.0	3.0-0.6	< 0.6	-	
	Ex. Ca	cmol/kg	5.0-6.0	5.0-7.0	5.0-6.0	5.0-6.0	> 5.0	5.0-2.5	< 2.5	-	
	Ex. Mg	cmol/kg	1.5-2.0	1.5-2.0	1.5-2.0	1.2-2.0	> 3.0	3.0-0.6	< 0.6	-	
	OM	g/kg	25-30	20-30	20-30	25-30	> 50	30-50	< 30	-	
	TN	mg/kg	-	-	-	-	> 1200	600-1200	< 600	-	
	Avail.P ₂ O ₅	mg/kg	80-120	350-500	300-500	200-300	> 200	200-100	< 100	-	
	Avail.SiO ₂	mg/kg	157-180	> 2.0	-	-	-	-	-	-	

1) 흙토람(soil.rda.go.kr), 2) 조경설계기준, 2002



(a)



(b)

Fig. 1. Soil texture change after various remediation processes (a) total soil, (b) smaller than 2 mm. SW: Soil washing, LF: Land farming, TD: Thermal desorption.

사질함량 증가로 인하여 양질사토에서 사양토로 변화되었고 토양경작의 경우 사양토로 유지되어 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

토색은 제일 먼저 관찰할 수 있는 토양의 물리적 특성으로 정화토양의 경우 토색의 변화는 토양의 알베도를 변화시켜 토양온도에 영향을 미칠 수 있으며 토색의 변화가 심한 경우에는 미관상의 문제도 생길 수 있다. 토양의 색에 영향을 주는 요인들은 토양구성 암석, 광물 및 유기물 함량 및 배수성 등이며, 광물로서는 특히 Fe와 Mn 광물에 의한 착색이 뚜렷한 경우가 많다. 조암광물의 대부분에는 Fe가 들어 있는데, 산화철은 황갈색을, 이산화철은 청회색을 띤다. 또한 유기물의 분해물이 많으면 어두운 색을 나타낸다(한국지하수토양환경학회, 2001). 토양세척 과정에서 토색은 yellowish red에서 strong brown으로 색상

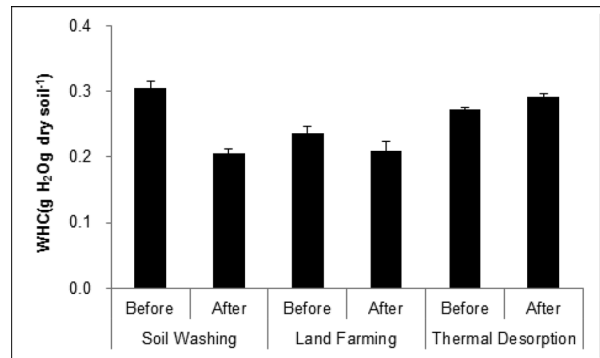


Fig. 2. Change of water holding capacity (WHC) of soil after various remediation processes.

은 5YR에서 7.5YR로 붉어졌으며 명도(5 → 5)와 채도(8 → 8)는 변화가 없었다. 토양경작 과정에서 토양은 light alive brown에서 alive brown으로 명도가 감소한 반면(5 → 4), 색상(2.5Y → 2.5Y)과 채도(3 → 3)는 변화가 없는 것으로 나타났다. 열탈착 과정에서는 다른 공정보다 전체적인 토색의 변화가 다소 큰 것으로 나타났는데 light alive brown에서 yellow brown로 변화하였으며 색상(2.5Y → 10YR)은 붉은색이 증가하였으며 채도(3 → 4)의 변화가 관찰되었으나 명도의 변화는 없었다(5 → 5). Terefe et al.(2008)의 연구에서도 토양에 200-500°C의 열을 가했을 경우 채도와 붉은색의 증가가 관찰되었으며 이는 가해진 열로 인해 철수산화물이 자철석을 거쳐 적철석으로 전환되기 때문이라 보고하였다.

토양의 수분보유능(Water holding capacity)은 식물이 이용할 수 있는 유효수분에 영향을 주게 되며 식물의 생산성에 영향을 줄 수 있다(Karhu et al, 2011). 토양세척 공정에서 수분보유능이 32.7% 감소한 것으로 나타난 반면 열탈착의 경우에는 7.2% 증가하였고(p < 0.05), 토양경작에서는 변화가 없었다(p > 0.05)(Fig. 2). 이와 같은 결과는 정화공정에 따른 토성 변화 때문인 것으로 상대적으로 수분을 많이 보유할 수 있는 미세토양의 함량 변화에 의한 것으로 판단된다.

3.2. 정화 토양의 화학적 특성 변화

토양산도는 토양의 물리적, 화학적, 생물학적인 모든 특성에 영향을 미친다. 특히 미생물을 이용하는 토양경작의 경우에는 미생물 활동에도 영향을 주며 pH가 높을 경우 미생물 군집의 탄화수소 이용성에 부정적인 영향을 줄 수 있다(Marin et al., 2005). 토양세척과 토양경작 이후 토양산도의 변화는 거의 없었으나 열탈착 후 토양 산도가

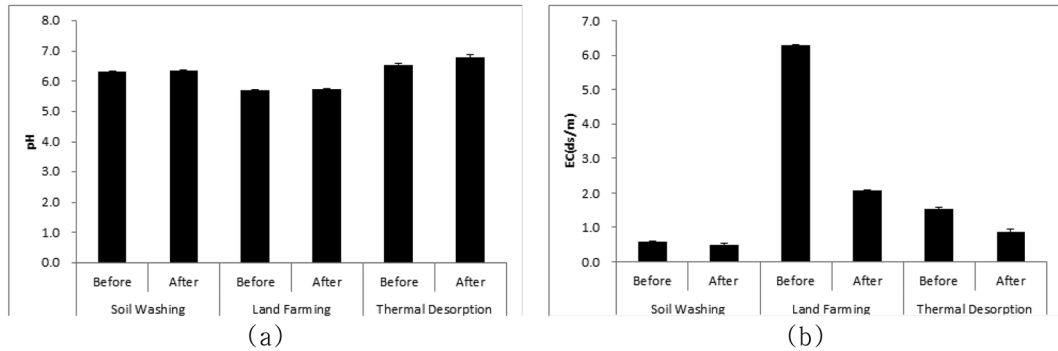


Fig. 3. Change of pH and electronic conductivity (EC) of soil after various remediation processes.

Table 3. Change of exchangeable cation concentration of soils after various remediation processes (unit : %) (unit : %)

Treatment		Exchangeable cation (cmol/kg)				
		Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺
Soil washing	Before	0.111	0.168	4.887	1.009	0.015
	After	0.111	0.115	4.407	0.804	0.019
Land farming	Before	0.115	0.245	5.175	0.606	0.015
	After	0.064	0.074	1.766	0.220	0.016
Thermal desorption	Before	0.084	0.087	4.075	0.483	0.018
	After	0.077	0.085	2.553	0.448	0.016

다소 증가한 것으로 나타났다($p < 0.05$)(Fig. 3a). 열탈착 후 토양산도의 변화는 열탈착 공정 후 토양산도의 증가를 관찰한 Huang et al.(2011)의 연구와 유사한 결과이다. 이는 열에 의해 산화된 유기물질이 염기성 이온을 방출하거나(Terefe et al.), 유기산의 손실에 의한 것으로 판단된다(Certini, 2005). 본 연구에서 열탈착 후 토양산도는 6.5에서 6.8로 큰 증가폭을 보이지는 않았지만 토양이용도를 결정하는데 영향을 미칠 수 있다. 왜냐하면 Table 2에서 보는 바와 같이 대부분 농업토양의 토양산도 기준과 조경식재 기준 중 상의 상한치가 6.5이기 때문이다. 이러한 토양이용도에 미치는 토양산도의 변화는 특히 토양산도가 6.5나 6.0 등과 같이 토양이용등급을 결정하는 경계값을 가질 경우 특히 중요할 수 있다. 본 연구결과는 열탈착 공정이 토양산도를 높여 토양이용도를 낮춘다는 것이 아니다. 이는 열탈착 공정의 경우 토양산도의 변화특성을 잘 이해하여야 한다는 것이다. 토양산도가 낮은 토양의 경우 오히려 열탈착 처리 후 토양산도가 적합한 수준으로 회복될 수도 있기 때문이다.

토양의 전기전도도는 토양수 중 전해질 이온의 세기를 나타내는 척도로써, 일반적으로 0~2 dS/m에서는 작물 생육에 염류 영향이 낮은 것으로 알려져 있다(최상일 외,

2009). 토양세척 후의 전기전도도는 0.596 dS/m에서 0.491 dS/m으로 변화가 크지 않았지만($p > 0.05$), 열탈착 처리 후 1.550 dS/m에서 0.871 dS/m로 감소한 것으로 나타났다($p < 0.05$). 특히 토양경작의 경우에는 6.281 dS/m에서 2.062 dS/m 감소하여 다른 공정에 비해 변화가 큰 것으로 나타났다($p < 0.05$)(Fig. 3b).

치환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘은 식물영양소의 주된 공급원으로 식물의 생장에 영향을 미친다. 토양세척 후 토양은 치환성 칼륨, 치환성 칼슘, 치환성 마그네슘 함량이 각각 처리 전에 비해서 31.8%, 9.8%, 20.4% 감소하는 경향을 보여, 토양세척으로 인해서 토양의 치환성양이온의 일부가 제거되는 것으로 나타났다. 토양경작이 경우 2.9% 증가한 치환성 알루미늄을 제외하고는 모두 큰 폭의 감소를 보였다. 치환성 칼륨, 칼슘, 마그네슘이 각각 처리 전에 비해서 70.0%, 65.9%, 63.7% 감소하였으며 치환성 나트륨은 이보다 작은 44.2 % 감소한 것으로 나타나 다른 공정에 비해 가장 큰 변화를 나타내었다(Table 3). 치환성 칼슘의 경우 식재기반 토양평가등급 기준 상(5 cmol/kg 이상)에서 하(2.5 cmol/kg 이하)로 등급이 낮아졌다. 이는 정화 후 미생물에 의하여 지속적으로 이용되었기 때문으로 판단된다. 열탈착의 경우에도 처리 후 치환

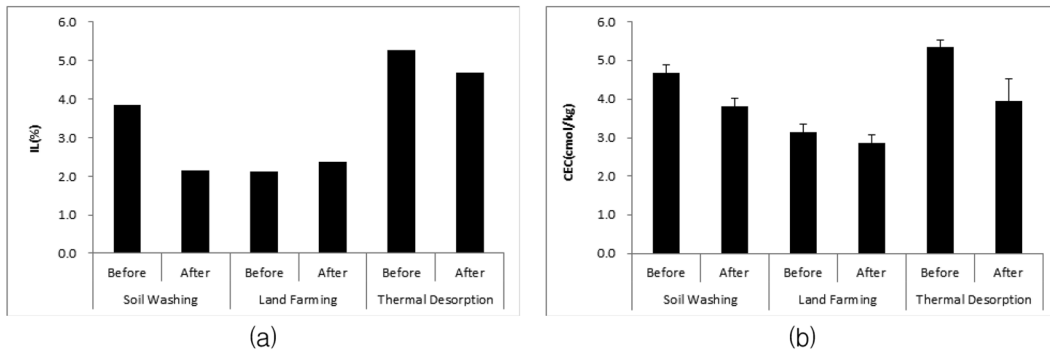


Fig. 4. Change of (a) organic matter content (IL) and (b) cation exchange capacity (CEC) of soil after various remediation processes.

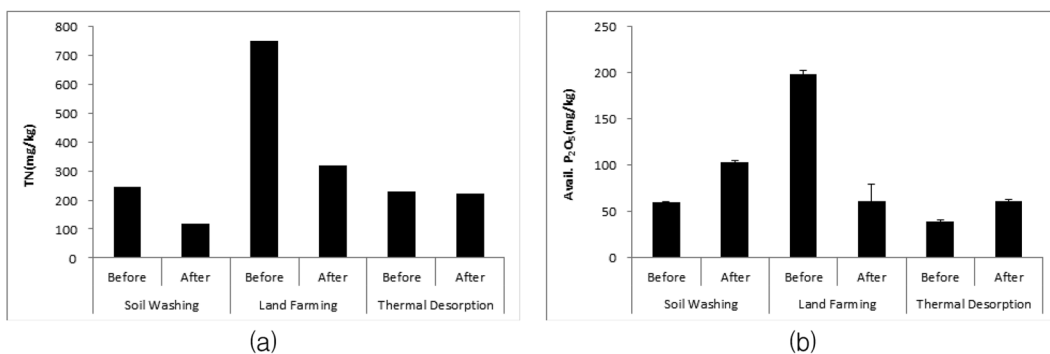


Fig. 5. Change of (a) total nitrogen (TN) and (b) available phosphate (Avail-P₂O₅) concentration of soil after various remediation processes.

성 나트륨, 칼륨, 칼슘, 마그네슘, 알루미늄 모든 항목에 대한 토양농도가 감소하였으며 특히 치환성 칼슘의 경우 37.4%의 다소 크게 감소하였으며 그 외의 항목은 2.9~13.9% 감소한 것으로 나타났다. 하지만 식재기반 토양평가등급 기준과 비교시 등급의 하락은 나타나지 않았다 (Table 2).

토양의 유기물 함량을 나타내는 강열감량은 토양세척 후 3.84%에서 2.15%로 토양세척 전 토양에 비해서 다소 감소한 것으로 나타나($p < 0.05$), 본 연구에서 비교한 정화 공정 중에서 유기물 소실이 가장 큰 것으로 나타났다(Fig. 4a). 이는 세척으로 인한 직접적인 유기물의 제거와 점토질의 감소에 의한 것으로 판단된다. 열탈착 공정을 통해서 유기물 함량이 5.26%에서 4.67% 감소하였으나 토양세척보다는 감소폭이 작은 것으로 나타났다. 반면 토양경작 토양에서는 2.12%에서 2.38%로 변화가 크지 않았으며($p > 0.05$), 농업용 기준으로 시설지배배지토양 또는 밭토양으로 이용할 수 있는 수준의 적정 유기물함량을 보였다.

토양의 양이온은 토양의 물리·화학적 특성을 변화시

키고, 농업활동과 관련되어 작물에 필요한 영양소 공급과 토양 내에 존재하는 미생물의 활성 및 여러 가지 토양반응에도 영향을 미친다(김계훈 외, 2008). 양이온교환능력은 토양세척 공정을 통하여 4.693 cmol/kg에서 세척 후 3.813 cmol/kg으로서 다른 공정에 비해 크게 감소한 것으로 나타났다($p < 0.05$)(Fig. 4b). 이와 같은 감소는 유기물 함량의 감소와 토양입자에서 상대적으로 교환능력이 높은 점토질이 입도분리 과정에서의 감소했기 때문으로 판단된다. 토양경작과 열탈착 토양에서는 각각 3.153 cmol/kg에서 2.860 cmol/kg로, 5.353 cmol/kg에서 3.960 cmol/kg으로 크게 변화가 없었다($p > 0.05$).

영양물질인 총질소와 유효인산의 변화를 정화공정별로 나타내었다(Fig. 5). 토양세척 후 토양의 총질소 농도는 약 57.6% 감소한 반면에 유효인산 함유량은 59.92 mg/kg에서 103.28 mg/kg으로 오히려 72.4% 증가한 것으로 나타났다. Makino et al.(2007)은 카드뮴으로 오염된 논토양을 염화칼슘을 이용한 토양세척으로 정화한 후 총질소는 13.1% 감소한 반면, 유효인산은 75.6% 증가한 것으로 보고하여 본 연구와 유사한 경향을 보여주었다. 하지만 염

화철을 이용한 토양세척에서는 유효태인산과 유기질소 모두 각각 50.2%와 48.0% 감소한 것으로 나타나(Makino et al., 2008) 이용되는 세정액에 따라 유효태인산의 변화는 다양하게 나타났다. 토양경작의 경우 총질소와 유효인산은 각각 57.6%와 69.2% 감소하여 정화과정 중 변화폭이 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 식재기반 토양평가등급에서도 중에서 하로 낮아진 것으로, 이와 같은 토양경작에서의 질소와 인의 감소는 토양세척이나 열탈착과는 달리 처리 공정 이후에도 생물학적 반응이 종료된 것이 아니기 때문에 지속적인 반응이 일어나면서 미생물에 의한 영양물질의 소모가 계속적으로 일어났기 때문으로 판단된다. 따라서 토양경작의 경우 정화 후에도 토양이용목적에 따라 영양물질의 공급이 반드시 필요할 것으로 판단된다. 열탈착의 경우 총질소는 4.3% 감소하여 큰 변화가 없었으나 유효인산은 56.2% 증가한 것으로 나타났다. 열탈착 공정 후 총질소의 감소와 유효인산의 증가를 관찰한 Biache et al.(2011)의 연구와 유사한 결과이다. 이는 토양내 존재하는 인의 존재형태가 열탈착 공정을 통하여 이용 가능한 형태로 변화되었기 때문으로 판단된다.

본 연구에서는 각 처리공정에 대하여 한 종류의 토양과 오염물질만을 고려하였으므로 토양특성이나 공정의 차이 또는 오염물질의 종류에 따라라도 토양의 물리적 특성변화 또한 다르게 나타날 가능성이 있다. 따라서 향후 다양한 경우에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단된다. 하지만 본 연구 결과만으로도 전체적으로 정화 후 토양의 물리화학적 특성의 변화가 일어나는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 정화토양을 재이용하는데 중요한 정보를 제공할 수 있다. 오염토양의 특성을 알면 적용하는 정화공법에 따라 정화토양의 특성을 어느 정도 예측하는데 도움을 줄 수 있기 때문이다. 하지만 농업용 또는 조경 식재용으로 사용하기 위하여 정화토양을 본 연구에서 살펴본 물리화학적 특성만으로 평가하는 것은 매우 위험할 수 있다. 토양의 물리화학적 특성만으로 토양의 기능을 나타낼 수는 없기 때문이다. 물론 정화 후 오염물질의 감소로 인하여 토양의 위해성은 감소하겠지만 정화공정을 통하여 오염물질이 완전히 제거되지 않아 정화 후에도 오염물질이 법적 기준 이하로는 잔류할 수 있기 때문이다. 특히 유기오염 물질의 경우 오히려 분해가 어려운 난분해성 물질이 존재할 수도 있으며 정화 과정 중에 토양의 생태적 기능의 열화도 발생할 수 있다. 따라서 정화토양을 재이용하기 위해서는 토양의 물리화학적 특성 외에도 이용 목적에 따른 토양의 잠재적 위해성이나 생태적 기능 등에 대한 고려가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 토양세척, 토양경작, 열탈착 공정에 의한 정화 토양의 물리적, 화학적 특성 변화를 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 물리적 특성 중 2 mm 이하 토양의 토성의 경우 토양세척에서는 점토함량 감소로 인하여 정화 전 사질식양토에서 사양토로, 열탈착에서는 모래함량 감소와 미사질함량 증가로 인하여 양질사토에서 사양토로 변화되었고 토양경작의 경우 사양토로 유지되어 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.
2. 토색의 경우는 색상 및 채도의 변화가 관찰된 열탈착 공정에서 가장 변화가 큰 것으로 조사되었다.
3. 토양의 수분보유능은 토양세척에서 가장 감소폭이 큰 것으로 나타났는데 이는 상대적으로 수분을 많이 보유할 수 있는 미세토양의 함량 변화에 의한 것으로 판단된다.
4. 토양세척 후 유기물 함량과 질소 함량이 각각 43.9%와 57.6% 감소하였으며 유효인산은 72.4% 증가한 것으로 나타났다.
5. 토양경작 처리 후 치환성 나트륨, 칼륨, 칼슘, 마그네슘 뿐만 아니라 총질소와 유효인산 등 미생물에 의하여 이용될 수 있는 양이온과 영양물질이 모두 감소하였다. 이는 정화과정 중에 이들 물질이 많이 사용되었으며 처리 공정 이후에도 생물학적 반응이 종료된 것이 아니기 때문에 지속적인 반응이 일어나면서 미생물에 의한 영양물질의 소모가 계속적으로 일어났기 때문으로 판단된다.
6. 열탈착 공정의 경우에는 유효인산에 있어서 처리전에 비해 56.2%의 증가한 것 외에는 화학적 특성의 변화가 크지 않은 것으로 나타났다.
7. 정화 공정별로 토양의 물리화학적 특성 변화가 다양하게 나타났다. 이러한 토양의 변화 특성은 정화토양을 재이용하는데 중요한 정보를 제공할 수 있다. 하지만 정화토양을 재이용하기 위해서는 토양의 물리화학적 특성만으로 평가하는 것은 위험할 수 있으며 토양의 잠재적 위해성이나 생태적 기능 등에 대한 고려가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 “토양 지히수 오염방지기술개발 사업”인 GAIA (Geo-Advanced Innovative Action) Project의 지원을 받은 과제입니다.

참 고 문 헌

- 김계훈, 김길용, 김정규, 사동민, 서장선, 손보균, 양재의, 엄기철, 이상은, 정광용, 정덕영, 정연태, 정종대, 현해남, 2008, 토양학, 향문사, p. 193.
- 농업기술연구소, 2000, 토양 및 식물체 분석법.
- 문덕현, 정경훈, 김태성, 김지형, 최수빈, 옥용식, 문옥란, 2010, 소성가공 굴껍질을 이용한 군부대 사격장내 고농도 납 오염토양의 안정화, 대한환경공학회지, **32**(2), 185-192.
- 박용안, 1983, 해양 지질학 및 퇴적학 실험, 집문당, p. 38.
- 양지원, 이유진, 2007, 국내 오염토양 복원 현황과 기술 동향, 한국화학공학회지, **45**(4), 311-318.
- 이근영, 문덕현, 김경웅, 정경훈, 김태성, 김지형, 문경란, 최수빈, 2011, 폐지원을 이용한 사격장 토양내 중금속(Pb, Cu) 안정화 처리, 대한환경공학회지, **33**(2), 71-76.
- 정병길, 노기현, 성낙창, 2009, 초음파세척을 이용한 오염토양내 TPHs 및 중금속 제거특성, 한국환경과학회지, **18**(4), 473-478.
- 최상일, 이군택, 양재규, 2009, 토양오염관리 및 복원개론, 동화기술, p. 209.
- 하상안, 염혜경, 2007, 저온 열 탈착에 의한 유류 오염토의 처리 조건의 연구, 대한환경공학회지, **29**(8), 956-960.
- 한국조경학회, 2002, 조경설계기준.
- 한국지하수토양학회, 2001, 토양환경공학, 향문사, 394 p.
- 홍선길, 이상민, 이은영, 2011, 토양미생물 복원제를 이용한 유류로 오염된 토양의 복원, 한국미생물공학학회지, **39**(3), 301-307.
- Biache, C., Mansuy-Hault, L., Faure, P., Munier-Lamy, C., and Leyval, C., 2008, Effects of thermal desorption on the composition of two coking plant soils: Impacts on solvent extractable organic compounds and metal bioavailability, *Environ. Pollut.*, **156**, 671-677.
- Certini, G., 2005, Effects of fire on properties of forest soils: a review, *Oecologia*, **143**, 1-10.
- Haug, Y.T., Hseu, Z.Y., and Hsi, H.C., 2011, Influence of thermal decontamination on mercury removal, soil properties, and repartitioning of coexisting heavy metals, *Chemosphere*, **84**, 1244-1249.
- Jones, J.B., 2001, Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis, CRC press, 68-69.
- Karhu, K., Mattila, T., Bergström, I., and Regina, K., 2011, Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity-Results from a short term pilot field study, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **140**, 309-313.
- Makino, T., Kamiya, T., Takano, H., Itou, T., Sekiya, N., Sasaki, K., Maejima, Y., and Sugahara, 2007, Restoration of cadmium-contaminated paddy soils by washing with calcium chloride: Verification of on-site washing, *Environ. Pollut.*, **147**, 112-119.
- Makino, T., Takano, H., Kamiya, T., Itou, T., Sekiya, N., Inahara, M., and Sakurai, Y., 2008, Restoration of cadmium-contaminated paddy soils by washing with ferric chloride; Cd extraction mechanism and bench-scale verification, *Chemosphere*, **70**, 1035-1043.
- Marin, J.A., Hernandez, T., and Garcia, C., 2005, Bioremediation of oil refinery sludge by landfarming in semiarid conditions: Influence on soil microbial activity, *Environmental Research*, **98**, 185-195.
- Natural Resources Conservation Service (NRCS), 1993, Soil survey manual, 62-63.
- Shepard, F., 1954, Nomenclature based on sand-silt-clay ratios, *J. Sed. Pet.*, **24**, 151-158.
- Terefe, T., Mariscal-Sancho, I., Peregrina, F., and Espejo, R., 2008, Influence of heating on various properties of six Mediterranean soils. A laboratory study, *Geoderma*, **143**, 273-280.