

## 환경적 footprint 분석을 통한 토양경작법과 화학적산화법의 비교

김윤수 · 임형석 · 박재우\*

한양대학교 건설환경공학과

## Comparison of Land Farming and Chemical Oxidation based on Environmental Footprint Analysis

Yun-Soo Kim · Hyung-Suk Lim · Jae-Woo Park\*

Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

### ABSTRACT

In this study, land farming and chemical oxidation of a diesel-contaminated site is compared to evaluate the environmental impact during soil remediation using the Spreadsheet for Environmental Footprint Analysis by U.S. EPA. Each remediation process is divided into four phases, consisting of soil excavation, backfill and transportation (Phase 0), construction of remediation facility (Phase 1), remediation operation (Phase 2), and restoration of site and waste disposal (Phase 3). Environmental footprints, such as material use, energy consumption, air emission, water use and waste generation, are analyzed to find the way to minimize the environmental impact. In material use and waste generation, land farming has more environmental effect than chemical oxidation due to the concrete and backfill material used to construct land farming facility in Phase 1. Also, in energy use, land farming use about six times more energy than chemical oxidation because of cement production and fuel use of heavy machinery, such as backhoe and truck. However, carbon dioxide, commonly considered as important factor of environmental impact due to global warming effect, is emitted more in chemical oxidation because of hydrogen peroxide production. Water use of chemical oxidation is also 2.1 times higher than land farming.

**Key words :** Green remediation, Footprint analysis, Life cycle assessment, Land farming, Chemical oxidation

### 1. 서 론

석유 비축시설, 산업단지, 군부대 등 유류를 저장하는 시설에서 노후화된 유류 관과 저장탱크로 인하여 빈번히 유류가 누출되고 주변토양을 오염시키는 것으로 보고 되고 있다(Cha et al., 2010). 유류로 오염된 토양은 자연적으로 정화가 가능하지만 높은 농도에서는 자연적인 정화가 제한되고(Mulligan and Yong, 2004) 지속적으로 지하수를 오염시키고 오염을 확산시키기 때문에 2차 피해를 막기 위한 정화활동이 필요하다. 토양 내 오염물질을 처리하기 위하여 다양한 정화 공법들이 개발되어 적용하고 있지만 정화과정에서 에너지, 자원, 물을 소비하고 대기가 스, 폐수, 폐기물을 배출시키며 생태계를 교란시키는 것

로 보고되고 있다(Petruzzi, 2011). 특히, 국내에서 시행되었던 대표적인 정화공법 중 하나인 열탈착공법의 경우 1톤의 토양을 정화하는데 전기 20 kW와 LNG 40.3 m<sup>3</sup>가 필요하여 많은 양의 에너지가 사용되는 것으로 조사되었다(Hwang, 2009). 이러한 정화과정 중 자원을 사용하고 오염물질을 배출하는 문제점에 대처하고 정화과정 중 환경영향을 최소화하기 위하여 환경적 부하를 줄일 수 있는 요소를 통합하고 고려하는 Green Remediation(US EPA, 2008)과 정화과정 중 사회적, 경제적, 환경적 편익을 극대화하여 정화과정에 지속가능성을 고려하는 Sustainable Remediation(Surf-UK, 2010)의 추진 움직임이 활발히 진행되고 있다. 또한, 이 두 가지 개념을 통합하여 정화과정에 지속가능성과 환경영향을 고려하는 Green and

\*Corresponding author : jaewoopark@hanyang.ac.kr

Received : 2014. 8. 1 Reviewed : 2014. 12. 5 Accepted : 2014. 12. 6

Discussion until : 2015. 8. 31

Sustainable Remediation 전략도 활발히 전개 되고 있다 (ITRC, 2011).

지구온난화 지수, 부영양화 지수, 산성화 지수, 광화학 스모그 지수, 오존층파괴 지수와 같은 전과정평가를 통한 환경영향지수로 정화기술을 선택하는 것이 Green Remediation을 위한 한 가지 방안으로도 평가되고 있다 (Morais and Delerue-Matos, 2010). Jeong and Suh(2011)은 전과정평가를 통하여 유류로 오염된 토양에 적용된 SVE 공법과 biopile 공법에 대한 환경영향평가를 수행하였다. Cadotte et al.(2007)은 디젤로 오염된 지하수와 토양을 정화하기 위한 시나리오를 구축하고 전과정평가를 토대로 각 시나리오에 대한 환경영향을 평가하여 환경영향이 적은 시나리오를 선택하는 연구를 진행하였다. 그러나 전과정평가를 수행에는 전문적인 지식이 필요하고 정화공정과 관련된 많은 양의 데이터를 필요로 하기 때문에 사용에 어려움이 있다. 또, 전과정평가는 녹색정화를 위한 정보 제공 면에서는 수자원 관리, 폐기물, 자원의 재사용, 재이용 평가 등에 대한 정보를 제공할 수 없어 녹색정화를 추진하기 위한 평가로는 한계가 있다. 이런 측면에서 전과정평가를 기반으로 녹색정화 추진을 위한 환경영향을 평가하기 위한 틀이 개발되고 있다. 미 환경청의 Spreadsheet for Environmental Footprint Analysis(SEFA)는 정화공정의 자원과 폐기물, 수자원, 에너지와 대기배출의 footprint 분석과 생태계 영향을 고려할 수 있는 틀을 구축하였고(US EPA, 2012) Battelle에서는 정화공정에 사용되는 자원 분석을 통하여 간편하게 대기배출과 에너지 사용량, 안전 등을 고려할 수 있는 SiteWise™를 개발하였다(Battelle, 2011). 이러한 지속 가능한 녹색정화 평가 틀을 적용하여 Kim et al.(2013)은 납으로 오염된 사격장 부지에 적용된 토양 세척공법의 환경적 footprint를 SiteWise™를 사용하여 분석하였고, Cappuyns(2013)는 유류로 오염된 부지에 대하여 시나리오를 설정하고 시나리오 별 지중 처리와 지중 외 처리 공법에 대한 CO<sub>2</sub> footprint를 CO<sub>2</sub> calculator를 사용하여 비교하였다. 하지만 정화공법의 다양성을 살펴볼 때 이런 평가 틀을 사용하여 정화공정을 분석한 사례는 부족한 상황이며, 미 환경청에서 개발된 SEFA를 사용하여 환경영향평가를 실시한 사례는 국내와 국외에 보고된 적 없다.

국내에서 유류오염을 처리하기 위하여 사용되는 정화공법인 토양경작법은 다른 공법과 비교하여 경제적으로 우수하여 선호하는 공법으로 알려져 있다. 토양경작법은 토양굴착과정과 운송과정에서 많은 에너지를 필요로 하는 것으로 알려져 있지만 오염물질의 처리방식을 살펴볼 때

미생물에 의한 유류의 생분해를 이용하여 오염물질을 산화시키기 때문에 지중 외 정화공법 중에서는 비교적 환경영향이 적은 것으로 알려져 있다. 이와 다르게 화학적산화법은 지중처리 방식으로 토양굴착과 운송을 필요로 하지 않고 정화시설의 설치 과정보도 간단하여 국내에 자주 사용되고 있다. 하지만 다량의 산화제를 사용한다는 점에서 다른 지중 처리정화 공법과 비교할 때 환경영향이 큰 것으로 보고되고 있다. 하지만 유류오염토양에 대한 토양경작법과 화학적산화법에 대한 정량적 환경영향평가는 현재까지 분석된 사례가 없다. 또한, 오염 농도, 깊이, 양상과 토양 함수율, pH, 유기물질의 농도 등에 따라 사용되는 자재와 에너지가 결정되기 때문에 각 공법에 대한 환경적 영향이 파악된 결과가 존재하여도 어느 공법이 환경적으로 우수한 공법인지 일반적인 비교가 어려운 실정이다. 기존의 실시 되었던 환경영향평가는 대기배출과 에너지 사용에 치중하여 폐기물과 물 사용, 자원 사용에 대한 평가가 부족하고 자원의 재이용과 폐기물 재활용, 수자원 관리 등 Green Remediation을 추진을 위한 정보가 부족하다.

이 연구에서는 미 환경청에서 개발된 SEFA를 기반으로 국내 유류오염 부지를 정화한 토양경작법과 화학적산화법 사례에 대한 footprint 분석을 실시하여 자원, 폐기물, 에너지, 대기배출, 물에 대한 환경영향을 파악하였다. 또, footprint 분석을 통하여 두 공정의 환경영향을 비교하였고 환경영향이 큰 재료와 요소공정을 분석하여 Green Remediation을 이끌기 위한 방안을 모색하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 부지 정보

대상 부지는 경기도 고양시에 위치한 유류 저장시설로 시설의 노후화에 의한 유류의 누출로 토양 오염이 보고되었다. 부지는 서, 남, 북쪽이 높은 분지 지형을 이루고 있고 주변에 동쪽으로 주거지가 밀집하여 있고, 남, 북, 서쪽으로 농경지 및 임야가 위치하고 남동쪽으로 한강이 흘러 오염의 확산이 우려되는 상황이었다. 토양오염정밀 조사 결과 전체 138개의 토양 시료 중 12개의 시료가 TPH 3지역 우려기준치(2,000 mg/kg)를 초과하였고 3지역 대책기준치(6,000 mg/kg)를 초과하는 시료는 3개로 나타났다. 이 논문에서는 오염된 총 4개의 지점 중 유류저장 시설에 의하여 오염되었다고 파악되는 한 지점에 대하여 평가를 시행하였다. 대상 지점의 오염 토양의 양은 1,925 m<sup>3</sup>, 오염심도는 2~5 m로 넓게 분포되어 있었고 평균 오염농도는 3,146 mg/kg으로 조사되었다.

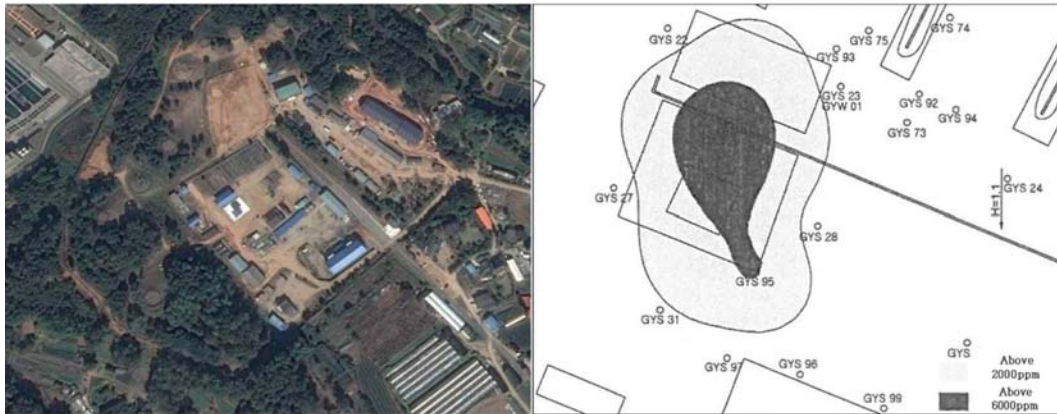


Fig. 1. Satellite photo of the target site and contamination map.

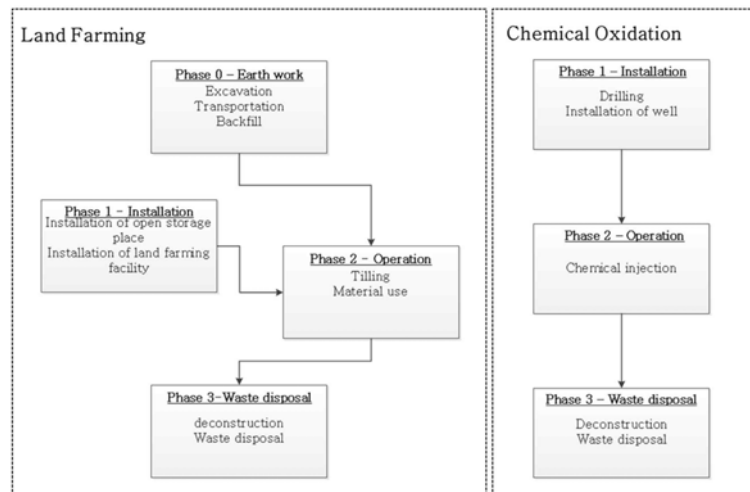


Fig. 2. Schematic diagram of land farming process and chemical oxidation process.

## 2.2. 정화공법

오염된 지점은 구조물이 존재하여 일부분은 굴착이 불가능하였다. 오염 지점 1,925 m<sup>2</sup>의 토양 중 굴착이 불가능한 951 m<sup>2</sup>에 대하여 지중 화학적산화법이 선택되었고, 974 m<sup>3</sup>에 대해서는 지중 외 토양경작법이 선택되었다(Fig. 1). 설계 정화 목표치는 3지역 기준치인 2,000 mg/kg 이하를 만족하는 1,900 mg/kg으로 설정되었고 정화기간은 화학적산화법의 경우 5.3 개월이 소요되고 토양경작법의 경우 3개월이 소요되는 것으로 설계되었다. 토양경작법은 오염토양을 굴착하여 오염부지에서 야적지, 토양경작장으로 운송과 정화 후 토양을 원위치 시키는 Phase 0, 야적지와 토양경작장을 설치하는 Phase 1, 정화공법의 운용으로 오염물질을 처리하는 Phase 2, 폐기물을 운송하여 처리하는 Phase 3로 구분하였다. 화학적산화법은 천공작업 후 주입관정을 설치하는 Phase 1, 관정을 통하여 화학약액을 주입하는 Phase 2, 폐기물을 처리하는 Phase 3으로 분류하였다(Fig. 2).

## 2.3. Footprint 분석

미 환경청의 SEFA를 통하여 정화공정의 환경적 footprint 분석을 수행하였다. 환경적 footprint 분석은 미 환경청에서 선정한 녹색정화의 핵심요소인 자원, 폐기물, 에너지, 물, 대기배출이 고려되었다. 자원 부분은 에너지와 물을 제외한 정화공정에 사용되는 자원을 의미하며 건설자재와 정화자재로 구분할 수 있고 또, 각 자원은 가공 여부에 의해서 가공된 자원과 가공되지 않은 자원으로 구분하였다. 폐기물 부분은 지정 폐기물과 일반 폐기물 두 그룹으로 구분하고 재활용이 가능한 폐기물과 가능하지 않은 폐기물을 구분하였다. 에너지 사용과 대기배출은 부지 내에서 공정에 의하여 사용되고 발생한 양과 자원의 생산 단계에 의한 양을 합산하여 산출되었다. 대기배출은 지구온난화의 영향물질인 CO<sub>2</sub>, 산성화의 영향물질인 SO<sub>x</sub>, 광화학 스모그의 요인인 NO<sub>x</sub>를 파악하였다. 평가에 사용된 자재의 양은 정화사업 실시설계서를 바탕으로 파악되

**Table 1.** Material, water and energy use of land farming and chemical oxidation

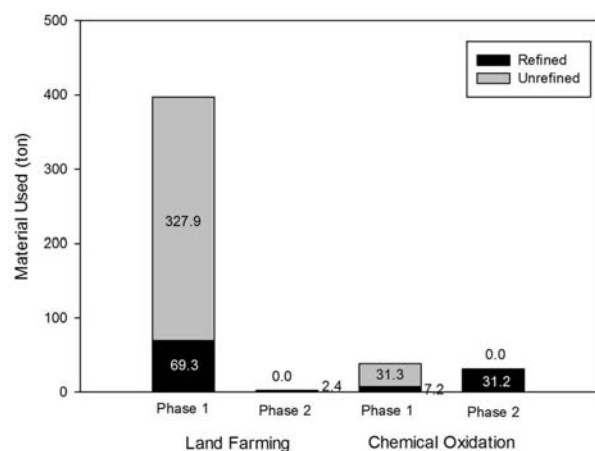
Land Farming	Work	Resource	Amount	Unit
Phase 0 Earth work	Excavation	Diesel	938.0	L
	Soil upload and transportation	Diesel	3321.2	L
	Backfill after remediation	Diesel	573.4	L
	Soil compaction after remediation	Diesel	587.2	L
Phase 1 Installation	Temporary soil storage yard	Diesel	45.4	L
		HDPE Liner	738	M <sup>2</sup>
	Land farming facility installation	Diesel	176.2	L
		Gravel	43	M <sup>3</sup>
		Concrete	132	M <sup>3</sup>
		Steel bar	14.7	Ton
		HDPE Liner	1364	M <sup>2</sup>
Phase 2 Operation	Remediation operation	Diesel	1544.8	L
		Fertilizer	361.8	Kg
		Organic compound	1.63	Kg
		Water	7.36	M <sup>3</sup>
		Electricity	168.2	Kw
		Activated carbon	440	Kg
Phase 3 Waste disposal	Demolition	Diesel	123.6	L
	Waste disposal	Waste	306.5	Ton
		Hazardous waste	440	kg
Chemical oxidation	Work	Resource	Amount	Unit
Phase 1 Installation	Drilling	Diesel	47.3	L
	Well installation	Concrete	18	M <sup>3</sup>
		PE pipe	1	M
		PVC pipe	56	M
		Gravel	0.23316	M <sup>3</sup>
		Bentonite	60	Kg
		Cement	48	Kg
		Steel pipe	3.6	M
Phase 2 Operation	Chemical injection	Electricity	5040	Kw
		Hydrogen peroxide	30.8	Ton
		Water	57.2	Ton
Phase 3 Waste disposal	Waste disposal	Waste	41.8	ton

었으며(Table 1) 전기공사 관련 자재와 부대시설 관련 자재는 평가에서 제외하였다. 평가에 사용되는 변환 계수는 국가 LCI database와 SEFA에서 제공되는 계수를 혼용하여 사용하였다. 국가 LCI database를 사용하여 CO<sub>2</sub> 산출시 Methane과 NO<sub>2</sub>는 각각 21, 310의 변환계수를 곱하여 CO<sub>2</sub> equivalent로 환산하여 적용되었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 자원에 대한 Footprint 분석

토양경작법과 화학적산화법에 대한 자원사용량이 분석되었다(Fig. 3). 토양경작법의 자원 사용량은 399.6 ton으로 화학적산화법의 자원 사용량인 69.7 ton 보다 약 5.73



**Fig. 3.** Material footprint analysis of land farming and chemical oxidation.

배 많은 자원을 필요로 하는 것으로 나타났다. 토양경작법은 경작장 설치를 위하여 전체 자원 사용량의 99%인 397.2 ton의 자원이 사용되어 초기에 많은 양의 건설 자재가 사용되고 공정운영 단계에는 적은 양의 정화 재료를 필요로 하는 것으로 분석되었다. 반면에 화학적산화법의 경우 주입관정 설치에 위한 자원 사용량은 전체의 55%인 38.5 ton이 사용되어 관정 설치와 공정 운영에 비슷한 양의 자원이 사용되는 것을 알 수 있었다. 다량의 자원 사용은 관련자재의 2차적인 수송, 폐기물 발생을 수반한다는 점에서 표면적인 자원의 사용보다 더 많은 간접적인 환경영향을 끼친다는 것을 의미한다.

가공된 자원의 사용은 자원 사용단계 이전에 가공을 위한 관련 물질과 에너지 사용을 수반하기 때문에 이 비율을 줄이고자 하는 노력을 통하여 2차적인 에너지, 자원 사용 그리고 폐기물 발생을 줄일 수 있다. 전체 자원 사용에서 가공된 자원의 사용을 살펴볼 때, 토양경작법의 경우 71.7 ton의 가공된 자원을 사용하여 전체 사용량에서 가공된 자원의 사용비율은 17.9%이고 화학적산화법의 경우 38.4 ton으로 전체 사용량의 55.1%로 분석되었다. 토양경작법의 가공된 자원 사용은 화학적산화법보다 1.87배 높아 가공된 자원 사용 측면에서도 토양경작법이 더 큰 환경영향을 갖고 있는 것으로 확인되었다.

### 3.2. 폐기물에 대한 footprint 분석

Fig. 4에 토양경작법과 화학적산화법에 의해 발생하는 폐기물의 양이 분석되었다. 토양경작법의 폐기물의 양은 306.9 ton이고 이중 일반폐기물로 분류되는 폐기물이 306.46 ton으로 대부분을 차지하고 지정폐기물의 양은 0.44 ton으로 파악되었다. 토양경작법의 폐기물 대부분은 폐콘크리트, 철근 등 건설폐기물이 대부분을 차지하여 폐기물량이 많은 것으로 파악되었다. 또, 상대적으로 적은 양의 지정폐기물이 발생하였는데, 오염물질의 이동을 통한 처리가 아니라 미생물에 의한 오염물질의 생물학적 분해를 이용하여 처리하는 공정 특성에서 기인하는 것으로 보인다. 이러한 측면에서 토양경작법은 일반 폐기물보다 보관, 처리, 폐기에 많은 노력을 요구하는 지정폐기물 발생측면에서 다른 정화공법과 비교할 때 상대적으로 유리하다는 사실이 확인 되었다. 동일한 관점에서 화학적산화법도 오염물질을 분해를 통하여 처리하여 지정폐기물의 양이 없고 지중처리를 통하여 처리하기 때문에 일반폐기물의 양도 토양경작법의 13.6% 수준인 것으로 나타났다.

폐기물의 재활용을 고려할 때 두 공법 모두 대부분의 폐기물이 재활용이 가능하였다. 가장 많은 양을 차지하는

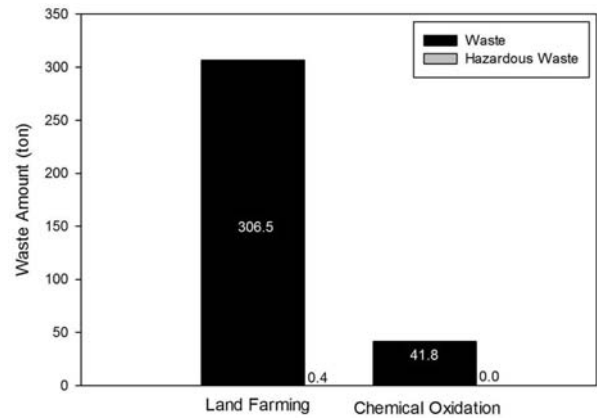


Fig. 4. Waste footprint analysis of land farming and chemical oxidation.

건설폐기물의 경우 현재 국내 97% 이상이 순환골재로 재생되어 사용 중에 있고 순환골재는 법적으로 도로 등에 일정 퍼센트 이상 충전재로 사용되어야 하기 때문에 국내 시장도 잘 형성되어있다. 또, 지정폐기물인 폐활성탄도 재생을 위한 공정이 이미 일반적인 공정으로 정착되어 재생 활성탄으로 재사용이 가능한 것으로 나타났다. 폐기물 측면에서 토양경작법과 화학적산화법을 비교할 때 두 공정 모두 폐기물 재생이 가능하다는 점과 지정폐기물의 발생이 적다는 점에서 환경적으로 우수한 것으로 나타났다.

### 3.3. 에너지에 대한 footprint 분석

토양경작법과 화학적산화법의 정화단계 별 에너지 사용량이 비교되었다(Fig. 5). 에너지 사용량은 정화 부지 내에서 사용되는 직접사용량과 자원의 생산에 필요로 하는 에너지 양을 모두 고려하여 산출되었다. 토양경작법 공정에 287.03 GJ의 에너지가 사용되어 화학적산화법의 에너지 사용량인 46.72 GJ과 비교할 때 6.14배 이상 많은 에너지가 사용되는 것을 알 수 있다.

토양경작법에서 가장 많은 에너지 사용을 필요로 하는 단계는 토양의 굴착과 상차, 운송 및 정화완료 토양의 되메우기 과정인 Phase 0 단계로 전체 토양경작법 에너지 사용량에 73% 이상 차지하는 것으로 나타났다. 이러한 결과가 나온 이유는 토양굴착 단계에서 중장비 운용을 위하여 많은 양의 디젤연료를 사용하기 때문인데 실질적인 토양경작 운용 단계인 Phase 2 단계에서 전체 에너지 사용의 0.0035%의 에너지인 0.01 GJ이 사용되어 초기에 많은 양의 에너지가 사용되고 정화단계에서는 에너지 사용에 의한 환경영향이 적은 것을 확인할 수 있었다. 이러한 점을 살펴볼 때 생물학적 정화공법의 특성과 에너지 intensity가 낮은 정화재료인 비료와 미생물제제가 사용되

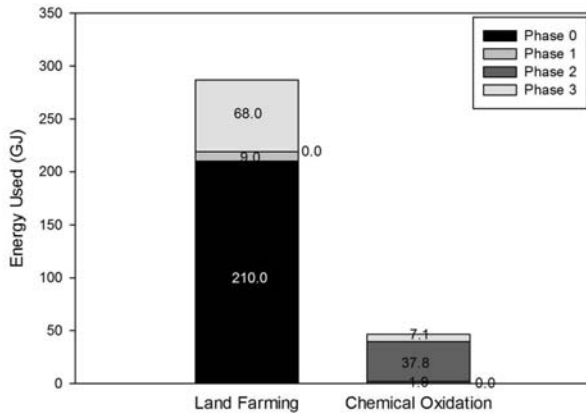


Fig. 5. Energy footprint analysis of land farming and chemical oxidation.

는 공정 특징으로 정화운영 단계만 비교할 때 화학적산화법 보다 우수한 것으로 나타났다. 반면에 화학적산화법은 전체 에너지 사용량의 80.9%가 정화공정 자체에 사용되어 공정에 소모되는 핵심산화제인  $H_2O_2$ 에 의한 영향이 다른 정화단계의 에너지 사용량보다 크게 나타났다.

결과적으로 토양경작법의 에너지 사용량을 줄이기 위해서는 무엇보다 중장비에 사용되는 연료를 줄이기 위한 토양의 운송과 굴착을 줄이는 것이 중요하고 화학적산화법의 에너지 사용량을 줄이기 위해서는 산화제의 선택과 산화제의 효율을 높일 수 있는 방안에 대한 집중적인 노력이 필요하다는 사실을 도출하였다.

### 3.4. 대기배출에 대한 footprint 분석

정화공정 중 사용되는 자원에 의한 간접적인 대기배출을 포함한 대기배출량을 산출하였다(Fig. 6). 에너지에 의한 대기 배출량은 화석연료의 사용으로 발생하는 직접배출과 전기 사용 시 전력발전과 자원생산과정에서 발생하는 대기배출 모두 고려되었다. 토양경작법에 의해 발생하는  $CO_2$ 의 양은 63.6 ton으로 나타났고 화학적산화법에 의해 발생하는  $CO_2$ 의 양은 66.9 ton으로 산출되어 화학적산화법의  $CO_2$  발생량이 토양경작법의  $CO_2$  발생량 보다 5.2% 가량 높은 것으로 파악되었다. 토양경작법이 화학적산화법보다 6.14배의 에너지를 사용하고  $CO_2$ 는 대부분 화석연료의 직접적인 사용과 전기발전을 위한 화석연료에서 기인한다는 사실을 감안할 때 이런 사실은 뜻밖의 결과로 나타났다. 화학적산화법에서 발생하는  $CO_2$ 의 대부분을 차지하는 Phase 2를 살펴볼 때  $H_2O_2$  생산에 의한  $CO_2$  발생량이 전체의 52.3 ton으로 전체 공정에서 발생하는  $CO_2$ 의 78.2%를 차지하여 가장 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다.

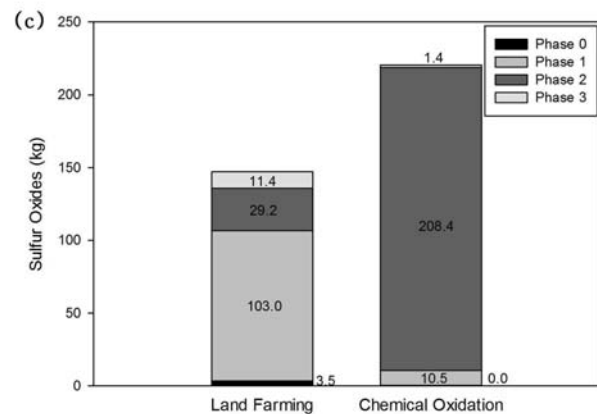
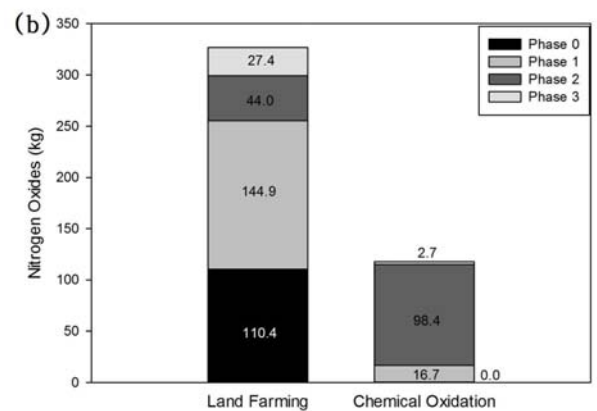
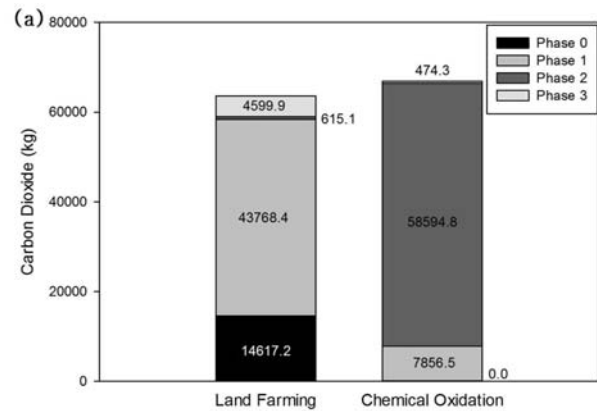


Fig. 6. Air emission footprint analysis of land farming and chemical oxidation, carbon dioxide footprint (a), nitrogen oxides footprint (b), sulfur oxides footprint (c).

토양경작법은 토양 굴착과 운반 단계인 Phase 0 보다 야적장과 경작장을 건설하는 Phase 1에서 3배 더 많은 양의  $CO_2$ 를 배출하였다. 중장비에 사용되는 화석연료의 직접연소는 동일무게의 시멘트의 생산 보다 3배 많은  $CO_2$ 를 발생시키지만 시멘트 사용량이 디젤 사용량 보다 10배 이상 많은 것을 감안 할 때 이러한 결과는 신뢰성 있는 결과로 보인다. 토양경작 운용 단계인 phase 3에서



는 에너지 사용량과 마찬가지로 가장 적은 CO<sub>2</sub>인 615.1 kg 배출하여 정화과정 자체만 비교 할 때 화학적산화법의 정화과정보다 환경영향이 적다는 사실이 확인되었다.

NO<sub>x</sub>는 토양경작법 과정에서 326.7 kg이 배출되었으며 화학적산화법에서는 117.8 kg이 배출되었다. 두 공법의 NO<sub>x</sub> 배출량을 비교해 볼 때 CO<sub>2</sub> 배출과 비슷한 경향을 보였지만 양적인 부분에서 차이가 있는 것을 확인하였다. 토양경작법의 NO<sub>x</sub> 최대배출단계는 144.9 kg인 야적장과 토양경작장을 건설하는 phase 1으로 전체 배출의 44.4%를 차지하였고, 화학적산화법에서는 화학적산화 운송단계인 Phase 2가 98.4 kg으로 83.5%의 높은 비율을 차지하였다.

SO<sub>x</sub>의 경우 화학적산화법의 배출량이 220.3 kg으로 토양경작법의 배출량인 147.1 kg보다 높은 것으로 나타났다. 토양경작법 NO<sub>x</sub> 배출에 많은 부분을 차지했던 phase 0의 디젤 사용 부분은 SO<sub>x</sub>의 경우 전체 발생량의 1.5%인 3.5 kg으로 낮게 나타났다. 디젤 사용은 많은 양의 NO<sub>x</sub>를 발생시키지만 SO<sub>x</sub> 발생 측면에서 환경에 미치는 영향이 상대적으로 적다는 사실이 확인 되었다. 화학적산화법에서는 전체 공정에 94.6%의 SO<sub>x</sub>가 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>에 생산 중 발생하여 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 3가지의 대기가스에 대한 footprint 분석 결과 화학적산화법에서는 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 사용, 토양경작법에서는 콘크리트의 사용이 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 파악되었다. 따라서, 대기배출을 감소시키기 위하여 토양경작법에서 phase 1의 콘크리트 사용과 화학적산화법에서 phase 2의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 사용을 대체할 수 있는 공정을 설계하거나 대체할 수 있는 자원을 고려하는 것이 필요한 것으로 분석되었다.

### 3.5. 물에 대한 footprint 분석

토양경작법의 물 사용은 Phase 1에 콘크리트 혼합을 위하여 11 ton의 용수가 사용되었고 phase 2에서는 토양 함수율 유지와 미생물 배양액 희석을 위하여 14.7 ton의 용수가 사용되었다(Fig. 7). 화학적산화법의 경우 Phase 1에서 콘크리트와 시멘트 사용을 위하여 3.5 ton과 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 희석을 위하여 49.2 ton의 물이 사용되었다. 화학적산화법에 사용되는 물의 총량은 52.7 ton이고 토양경작법에 사용되는 25.7 ton으로 화학적산화법이 2.1배 더 많은 물을 필요로 하는 것으로 나타났다. 사용되는 물의 취수지는 콘크리트 혼합수의 경우 제조과정에서 상수도와 지하수를 혼용하여 사용하는 것으로 알려져 있다. 토양경작법과 화학적산화법의 공정운용 시 사용되는 용수는 부지 내 지하수가 오염되어있을 개연성이 크기 때문에 상수도를 이용

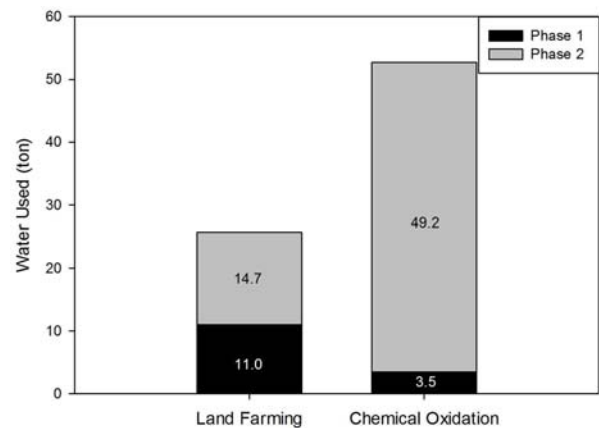


Fig. 7. Water footprint analysis of land farming and chemical oxidation.

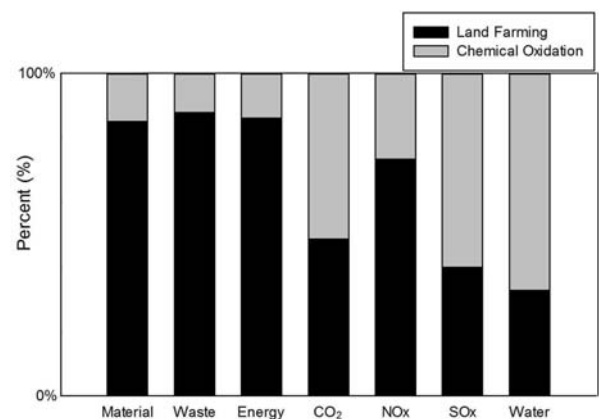


Fig. 8. Comparison environmental footprint of land farming and chemical oxidation.

하거나 외부에서 수송하는 방법을 사용하였고 이로 인한 2차 환경영향을 미칠 것으로 판단된다. phase 2의 화학적산화법 운용과 토양경작법 운용에 사용되는 물은 지하수로 침투될 가능성이 높았다. 토양경작법에 경우 경작장의 밑면을 HDPE Liner를 통하여 침투를 막고 침출수 처리 시설을 두었지만 화학적산화법의 경우 별다른 장치 없이 사용하여 지하수로 침투될 가능성을 띄고 있어 침투에 의한 환경영향에 대한 고려가 필요하다.

## 4. 결 론

국내 한 오염지점에서 실행된 토양경작법과 화학적산화법 두 정화공정에 대한 환경적 footprint 분석이 수행하였다. Fig. 8을 살펴볼 때 토양경작법은 CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> 발생량과 물 사용량 항목에서 환경적으로 우수한 것으로 나타났고 화학적산화법은 자원사용량, 폐기물 발생량, 에너지 사

용량, NOx 발생량 측면에서 우위를 보였다. 토양경작법의 경우 자원, 폐기물, 대기배출 부분에서는 콘크리트의 사용, 에너지 부분에서는 디젤 에너지의 사용, 물 사용 부분에서는 토양 함수율을 유지시키는 공정운용단계에서 가장 큰 환경영향을 보이는 것으로 분석 되었다. 화학적산화법의 자원과 폐기물의 경우 콘크리트의 사용, 에너지 사용, 대기배출, 물 사용 부분에서 산화제인 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 사용에 의한 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.

일반적으로 지중처리방식과 지중 외 처리방식을 비교할 때, 지중처리방식이 환경적인 영향이 적은 것으로 알려져 있다. 또, 처리 방식 면에서는 생물학적 공법이 화학적 공법보다 우수하다는 것으로 알려져 있지만 두 측면 중 환경적으로 우수한 공법을 선택할 때 어떤 측면을 우선시해야 되는 지에 대해서 논의된바 없지만 이번 연구를 통하여 좋은 사례를 제공할 수 있을 것이라 판단된다.

## 사 사

본 연구는 환경부 “토양지하수오염방지기술개발사업 (The GAIA Project, (2012000550001)) 복합오염녹색연구단 과제”로 지원받았습니다.

## References

- Battelle, 2011, SiteWise™ version 2 user guide, Battelle Memorial Institute.
- Cha, M.H., Lee, H.W., and Park, J.W., 2010, A biological complex soil treatment process using selected soil bacteria strains, *J. Korea Geo-Environ. Soc.*, **11**(5), 5-13.
- Cadotte, M., Deschênes, L., and Samson, R., 2007, Selection of a remediation scenario for a diesel-contaminated site using LCA, *Int. J. LCA*, **12**(4), 239-251.
- Cappuyns, V., 2013, Environmental impacts of soil remediation activities: quantitative and qualitative tools applied on three case studies, *J. Clean. Prod.*, **52**(0), 145-154.
- Diamond, M.L., Page, C.A., Campbell, M., McKenna, S., and Lall, R., 1999, Life-cycle framework for assessment of site remediation options: method and generic survey, *Environ. Toxicol. Chem.*, **18**(4), 788-800.
- Hwang, S.I., 2009, Towards more efficient energy use for green remediation. *J. Soil Groundw. Environ.*, **14**(6), 95-100.
- ITRC, 2011, Green and Sustainable Remediation: State of the Science and Practice, The Interstate Technology & Regulatory Council.
- Jeong, S.W. and Suh, S., 2011, Assessment of environmental impacts and CO<sub>2</sub> emissions from soil remediation technologies using Life Cycle Assessment - Case studies on SVE and biopile systems -, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **33**(4), 20-30.
- Kim, D.H., Hwang, B.R., Moon, D.H., Kim, Y.H., and Baek, K., 2013, Environmental assessment on a soil washing process of a pb-contaminated shooting range site: a case study, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **20**(12), 8417-8424.
- Morais, S.A. and Delerue-Matos, C., 2010, A perspective on LCA application in site remediation services: critical review of challenges, *J. Hazard. Mater.*, **175**, 12-22.
- Mulligan, C.N. and Yong, R.N., 2004, Natural attenuation of contaminated soils, *Environ. Int.*, **30**(4), 587-601.
- Petruzzi, N.M., 2011, A case study on the evaluation and implementation of green and sustainable remediation principles and practices during a RCRA corrective action cleanup, *Groundw. Monit. R.*, **31**(2), 63-71.
- SurF-UK, 2010, A Framework for Assessing the Sustainability of Soil and Groundwater Remediation.
- SurF-US, 2009, Sustainable Remediation White Paper-Integrating Sustainable Principles, Practices, and Metrics Into Remediation Projects.
- US EPA, 2008, Green Remediation : Incorporating Sustainable Environmental Practices into Remediation of Contaminated Sites.
- US EPA, 2012, Methodology for Understanding and Reducing a Project's Environmental Footprint.