

토양세척 공정의 환경영향 분석 - 이산화탄소 배출량 및 에너지 사용량을 중심으로

김도형* · 황보람** · 허남국* · 정상조*** · 백기태**†

*육군3사관학교 건설환경학과
770-849 경북 영천시 고경면 호국로 495

**전북대학교 환경공학과
561-756 전북 전주시 덕진구 백제대로 567

***육군사관학교 건설환경학과
139-799 서울시 노원구 공릉동 사서함 77호

(2013년 8월 30일 접수, 2013년 10월 6일 수정본 접수, 2013년 10월 12일 채택)

Environmental Impact of Soil Washing Process Based on the CO₂ Emissions and Energy Consumption

Do-Hyung Kim*, Bo-Ram Hwang**, Namguk Her*, Sangjo Jeong*** and Kitae Baek**†

*Department of Civil and Environmental Sciences, Korea Army Academy at Yeong-Cheon,
495 Hoguk-ro, Yeongcheon-si, Gyeongbuk 770-849, Korea

**Department of Environmental Engineering, Chonbuk National University, 567 Baekje-daero, Duckjin-gu, Jeonju, Jeonbuk 561-756, Korea

***Department of Civil Engineering and Environmental Sciences, Korea Military Academy,
P.O. Box 77, Gongneung-dong, Nowon-gu, Seoul 139-799, Korea

(Received 30 August 2013; Received in revised form 6 October 2013; accepted 12 October 2013)

요 약

총 석유계탄화수소로 오염된 토양을 정화하기 위한 토양세척공정을 부지 내 및 부지 밖 처리로 구분하여 공정 중 발생하는 환경적인 영향을 녹색 및 지속 가능한 정화 평가모델을 사용하여 평가하였다. 각 단계 별 환경부하의 상대적인 기여도를 평가하기 위해 전체 토양세척공정을 부지조성(1단계), 굴착(2단계), 물리적 선별 및 세척(3단계), 폐수처리(4단계)의 주요한 4단계로 구분하였다. 부지 내 처리 시에는 1단계에서 CO₂ 배출량과 에너지사용량의 상대적인 기여도가 각각 87.1%와 80.4%였고, 부지 밖 처리시에는 2단계에서 CO₂ 배출량과 에너지사용량의 상대적인 기여도가 각각 82.7%와 80.5%였다. 결론적으로 토양세척공정에서 부지 내 처리의 경우 1단계에서의 세척장치 제작을 위한 철, 스테인리스스틸 등 소비성 재료의 사용이, 부지 밖 처리의 경우 2단계에서의 굴착된 오염토의 운송을 위한 연료의 소비가 환경부하에 영향을 끼치는 가장 중요한 요소이다. 본 연구의 결과는 토양세척 공정의 적용 시 녹색 및 지속 가능한 정화의 달성을 위한 유용한 정보가 될 것으로 기대된다.

Abstracts – This study evaluated the environmental impacts of a soil washing (SW) process, especially, we compared the on-site and off-site remediation of TPH-contaminated soil using green and sustainable remediation (GSR) tool. To assess relative contribution of each stage on environmental footprints in the entire soil washing process, we classified the process into four major stages: site foundation (stage I), excavation (stage II), separation & washing (stage III), and wastewater treatment (stage IV). In on-site SW process, the relative contribution of CO₂ emissions and energy consumption were 87.1% and 80.4%, respectively in stage I, and in off-site SW process, the relative contribution of CO₂ emissions and energy consumption were 82.7% and 80.5%, respectively in stage II. In conclusion, the major factor contributing environmental impact in the SW process were consumable materials including steel and stainless steel for washing equipment in on-site treatment and fuel consumption for transportation of soil in off-site treatment.

Key words: Environmental Impact, On/off Site Soil Washing, CO₂ Emissions, Energy Consumption, Green and Sustainable Remediation (GSR)

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kbaek@jbnu.ac.kr

‡이 논문은 KAIST 양지원 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

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.

1. 서 론

1995년 토양환경보전법이 제정, 시행된 이후 초기에는 주로 소규모 주유소부지에서 유류오염이 일부 문제가 되었지만 2000년대 이후 미군부대, 폐광산, 산업단지부지 등에서의 다양한 오염이 발견되면서 토양오염에 대한 관심이 고조되었다. 더욱이 최근에는 장항제련소, 용산역 부지 등 대규모 오염부지가 발견되면서 토양오염이 사회적/환경적으로 중요한 문제가 되고 있다[1]. 이러한 오염부지는 크게 유류 오염토양과 중금속 오염토양으로 분리할 수 있는데, 국내에서는 주로 유류오염 토양의 정화를 위해서는 토양증기추출(Soil vapor extraction)과 토양경작(Land farming), 중금속 오염토양 정화를 위해서는 토양세척(Soil washing, SW)이 적용되고 있다[2].

토양정화기술의 적용으로 인해 오염된 토양을 깨끗하게 정화하는 환경적인 편익(Environmental benefit)이 있는 반면에, 정화기술의 적용 시 사용하는 에너지, 자원, 재료의 소비로 인해 CO₂ 및 대기오염물질, 폐수 등이 배출되는 환경부하(Environmental footprints)가 있다[3]. 예를 들어, 토양세척법의 경우 오염된 토양을 굴착하여 산, 염기, 킬레이트제 등의 적절한 세척제를 사용하여 토양으로부터 오염물질의 추출해 내는 기술로서[4], 세척제 및 세척용수의 사용으로 인해 발생하는 세척폐수가 환경에 부정적인 영향을 주는 환경부하가 된다. 따라서, 오염토양의 정화를 위한 기술의 선정 시 기술적, 환경적, 경제적인 요소가 고려되어야 하지만[5], 국내의 경우 정화기술의 적용 시 발생할 수 있는 환경에 미치는 영향에 대한 고려 없이 토양환경보전법에 명시된 법적 기준 충족여부와 정화비용만을 단순하게 고려하여 정화기술을 선정하고 대상부지에 적용하고 있다.

최근 국내외적으로 CO₂ 배출에 의한 기후변화 및 에너지 사용량의 급증으로 인한 에너지 문제에 대한 관심이 고조되고 있다. 오염토양의 정화에서도 에너지 및 자원의 효율적인 사용을 통하여 환경오염을 감소시키는 녹색 및 지속 가능한 정화(Green and Sustainable Remediation, GSR)개념이 적용되고 있다[6-8]. 주로 환경 선진국인 미국을 중심으로 토양정화분야에서 환경오염을 최소화하는 동시에 정화목표를 달성하고자 하는 녹색 및 지속 가능한 정화를 시도하고 있다[9].

전 세계적으로 GSR 개념을 고려한 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA) 기법을 사용하여 토양정화기술의 환경영향을 평가하는 연구가 활발하게 진행되고 있으며[10-16], 국내에서는 전과정평가기법을 사용하여 토양증기추출, 바이오파일, 양수처리공법의 환경영향을 분석한 연구가 발표되었으나[17,18], 그 외 관련 연구는 거의 없는 실정이다. 최근 납 오염 사격장 부지의 정화를 위한 토양세척공정의 환경성 평가에 관한 연구가 발표되었으나[19], 이는 사례연구로서 토양세척공법의 표준화 공정에 대한 환경영향을 평가하고 일반화하기 위한 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 국내 토양정화기술 중 2010년 환경부에서 발간한 ‘토양정화산업 활성화를 위한 표준화 및 경쟁력 확보방안’에서 표준화 확보방안이 제시되었던[20], 총 석유계 탄화수소(Total Petroleum Hydrocarbon, TPH)로 오염된 토양의 정화를 위한 토양세척공정을 부지 내(on-site)와 부지 밖(off-site)에서 처리하는 것으로 구분하여 두 공정의 적용에 대한 환경평가를 통해 CO₂ 발생량, 에너지사용량을 녹색 및 지속 가능한 정화 평가모델을 사용하여 산정하였다. 이를 바탕으로 토양세척기술의 단위공정에서의 환경부하의 상대적인 기여도를 분석하고 녹색 및 지속 가능한 정화를 달성하기 위한 정화전략을 제시하였다.

Table 1. The site and system description in this study

Contents	Description
I. Site status	Volume of contaminated soil: 5,000 m ³
	Volume of excavated soil: 5,000 m ³ ×1.25=6,250 m ³
	Cleanup periods: 3 months
	Remediation goal: TPH < 500 mg/kg
	Soil texture: silty sand Porosity: 0.4; soil bulk density: 1.6 kg/L
II. Speciation of soil washing equipment	Treatment capacity: 15 m ³ /hr Actual treatment capacity: 12 m ³ /hr Operation time: 7 hr/day
	Treatment volume of soil/day = 12 m ³ /hr × 7 hr/day = 84 m ³ /day
	Treatment volume of soil/month = 84 m ³ /day × 6 day/week × 4 weeks/month = 2,016 m ³ /month
	Operation duration = 6,250 m ³ ÷ 2,016 m ³ ≒ 3 months

2. 실험재료 및 방법

2-1. 부지 및 시스템개요

본 연구에서 사용한 설계조건, 오염현황 및 정화관련 정보는 환경부에서 발간한 ‘토양정화산업 활성화를 위한 표준화 및 경쟁력 확보방안’[20]에서 제시한 토양세척 표준화 공정의 시스템 구성 및 정보를 따랐고 세부내용은 Table 1에 정리하였다.

오염토의 양은 원 지반 물량을 기준으로 5,000 m³이고, 토양의 흐트러짐 계수를 고려한 굴착 후 오염토의 양은 약 6,250 m³으로 하였다. 전체 정화기간은 오염토양을 목표농도까지 정화하는 데 소요되는 시간으로 3개월로 하였고, 오염부지는 TPH가 10,000 mg/kg로 균질하게 오염되었고 오염토의 토성은 토양세척공정이 적용되기 적합한 실트질 모래인 것으로 가정하였다. 토양세척장치의 실제처리용량은 설계용량의 80% 수준으로 12 m³/hr이고, 일 기준 84 m³/day의 오염토를 처리하는 것으로 설정하였다. 본 연구에서는 토양세척기술의 표준화 확보방안에 오염토양의 처리위치에 대한 특별한 언급이 없어 오염토양의 처리를 부지 내 처리, 부지 밖 처리의 두 가지 방식으로 구분하여 수행하였다.

Fig. 1은 토양세척의 전체공정을 각 단계별로 상세히 도시한 것이다. 토양세척공정은 1단계 세척장치 설치를 포함한 부지 조성, 2단계 오염토양 굴착 및 이송, 3단계 물리적 선별 및 세척과 4단계 세척폐수처리의 4단계로 구분하였다. 그 외 일반적인 토양세척공정 전반에서 수행되는 오염토양 조사, 세척장치의 설치 및 해체 등 토양세척 공정 표준화 방안에 언급되어 있지 않는 과정은 각 공정에서의 환경적인 영향이 동일하므로 고려하지 않았다.

본 연구에서는 오염부지 내에서 처리하는 부지 내(on-site) 처리의 경우 정화공정의 흐름은 Stage I, Stage II, Stage III, Stage IV 순으로 차례대로 진행되는데, 먼저 세척장치의 설치 및 부대시설을 설치하기 위한 정화시설을 조성하고, 오염토양을 굴착한 다음 굴착된 오염토양을 세척장치에 투입하여 물리적 선별 및 세척을 거치고 공정에서 발생한 세척폐수는 폐수처리하고 정화토양은 복토하는 과정으로 진행된다. 부지 내 처리의 경우 모든 정화공정이 오염부지 반경 5 km 이내에서 수행되는 것으로 가정하였다. 반면에 부지 외(off-site) 처리의 경우 정화공정의 흐름은 이미 반입정화장이 설치되어 있는 시설을 활용하기 때문에 Stage II, 오염토 운반, Stage III, Stage IV 순으로 진행되는데, 먼저 오염토양을 굴착하고 오염부지 내 시설을 계

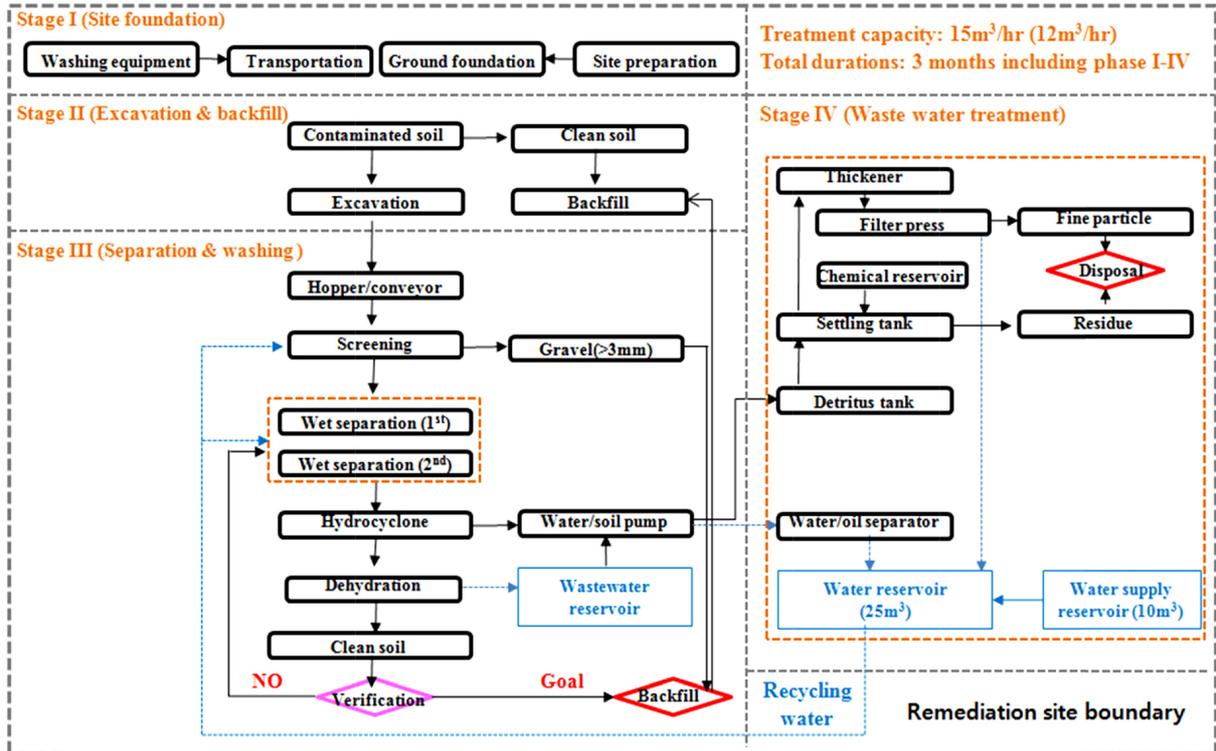


Fig. 1. Schematic diagram of entire soil washing process.

속 이용할 수 있도록 굴착부지를 청토로 복토하고 굴착된 토양을 처리장으로 운반하기 위해 트럭에 선적하고 기존에 설치되어 있는 반입정화처리장으로 이송한 후 세척장치에 투입하여 물리적 선별 및 세척을 거치고 공정에서 발생한 세척폐수는 폐수처리하고 정화된 토양을 처리하는 과정으로 진행된다. 부지 밖 처리의 경우 오염부지의 오염토양을 굴착한 후, 굴착된 오염토는 기본적으로 부지 내 처리와 동일한 조건인 반경 5 km 이내에 있는 반입처리장으로 운송하여 처리하는 가정하였고, 추가로 반입처리장의 거리에 따른 환경부하 발생량의 변화를 산정하여 부지 내 처리의 환경부하 발생량과 비교하였다. 부지 내 처리의 경우 세척장치의 제작과 부지기반을 조성하기 위한 공정이 필요하고 부지 외 처리의 경우 이 과정이 필요가 없는 반면에 부지 외 처리의 경우 굴착된 오염토양을 반입처리장으로 운반하기 위한 오염토 운반과정이 필요하고 부지 내 처리의 경우는 이 과정이 필요가 없게 된다. 그 외 전체공정의 흐름은 부지 내 처리와 부지 밖 처리가 동일한 과정으로 진행된다.

2-2. 환경부하 산정

본 연구에서는 토양세척공정에서 발생하는 환경부하를 산정하기 위해 녹색 및 지속가능한 정화 평가모델을 사용하였다. 평가모델은 오염부지정화 분야에 적합하게 개발된 모델로서 본 연구에서는 토양 세척공정의 전체 공정을 Stage I-IV의 4단계로 구분하고 부지 내 처리와 부지 밖 처리공정에서 각각의 정화행위에서 소요되는 자원, 물질, 에너지량의 입력에 의해 발생하는 환경부하의 정확한 산정을 위해 토양세척 공정의 환경성을 평가하는 선행연구에서 사용되었던 SiteWise™ ver.2 모델을 사용하였다[19]. 이 모델은 Microsoft Excel 2007기반으로서 단일정화공정 및 6가지 정화공정의 비교를 통해 CO₂ 발생량, 에너지사용량, 대기오염물질(NO_x, SO_x, PM₁₀) 등의 환

경부하의 산정이 가능하지만, 본 연구에서는 CO₂ 발생량 및 에너지 사용량만을 평가하였다.

2-3. 재료 및 에너지 사용량

일반적으로 녹색 및 지속가능한 정화 평가모델을 사용한 환경부하의 산정은 국가 Life cycle inventory(LCI) 데이터베이스를 기반으로 수행되는데, 전체정화공정에 사용되는 자원, 물질 및 에너지의 사용량을 평가모델에 입력하면 이를 기반으로 발생하는 환경부하를 산정할 수 있다. 예를 들면 국내에서 1 Kwh의 전력을 생산하기 위해서는 주로 수력, 원자력, 화력발전이 사용되는데 이때 국가 LCI 데이터베이스에 기반한 투입되는 에너지원은 석탄 175.6 g, 원유 21.75 g, 물 20.75 g 등 이고, 발생하는 주요 환경부하는 CO₂ 423.87 g 이다[22].

토양세척 공정의 환경부하를 산정하기 위해 전체정화공정에 소요되는 주요 자원, 물질 및 에너지를 Table 2에 정리하였다. 각 공정에 소요되는 주요 자원, 물질 및 에너지는 환경부 선행연구에 제시된 토양세척 표준화 공정의 시스템 구성을 참조하여 작성하였다. 작성된 물질 및 에너지 데이터를 기반으로 SiteWise™ ver.2 모델을 사용하여 CO₂ 배출량과 에너지사용량을 산정하였다. 부지 내 및 부지 밖 처리의 전체공정은 동일하게 부지기반을 조성하는 단계, 오염토 굴착단계, 선별 및 세척단계와 폐수처리의 4단계로 구분하였다. 부지 내 처리의 경우 1단계 부지기반조성에서 부지 내 세척장치의 설치를 위한 부지조성 및 토양세척장치를 설치하는 것으로 계획하였다. 토양세척장치의 상세 스펙 및 제원은 표준화 방안이 언급이 없어 세척장치 제작에 사용되는 물질은 실제 토양세척장치를 기반으로 작성하였다. 부지 밖 처리의 경우 오염토 굴착 후 기존에 세척장치가 설치된 반입정화처리장으로 이송하여 처리하므로 1단계 부지기반조성 단계에서의 사용되는 물질 및 에너지의 양은 세척장치의 수명을 고

Table 2. The materials and energy used in this study

	On-site SW	Off-site SW
Stages	Materials and energy used	
I. Site foundation	Site preparation (diesel): excavator (120 m ³ , 30 m×20 m×0.2 m), paver (300 m ³ , 30 m×20 m×0.5 m) Manufacture for washing equipment: SS400:135.3ton, SUS304:1.8ton Natural rubber: 0.5ton Site foundation for washing equipment: concrete: (300 m ³) Transportation for washing equipment (diesel): heavy duty (5 km, 140ton) Transportation for personnel(diesel): vehicle (5 km, 2times)	Manufacture for washing equipment in off-site treatment plant: Used time(3months)/Lifetime(60months) = 0.05 SS400: 135.3×0.05=6.765ton, SUS304: 1.8×0.05 = 0.09ton Natural rubber: 0.5×0.05=0.025ton
II. Excavation	Transportation for personnel(diesel): vehicle (5 km, 14times) Transportation for equipment (diesel): heavy duty (5 km, 20ton) Excavation and backfill (diesel): excavator & dozer (5,000 m ³)	Transportation for personnel(diesel): vehicle (5 km, 14times) Transportation for equipment (diesel): heavy duty (5 km, 20ton) Transportation for excavated soil and clean soil (diesel): heavy duty (5 km, 10,000ton) Clean soil for backfill: 6,250 m ³ Excavation and backfill (diesel): excavator (5,000 m ³) Loads for transportation (diesel): backhoe (6,250 m ³)
III. Separation & washing	Transportation for personnel(diesel): vehicle (5 km, 72times) Soil input to hopper (diesel): backhoe (6,250 m ³) Operation for washing equipment: electricity: 39,664 kwh	Transportation for personnel(diesel): vehicle (5 km, 72times) Soil input to hopper (diesel): backhoe (6,250 m ³) Operation for washing equipment: electricity: 39,664 kwh
IV. Wastewater treatment	Operation for washing equipment: electricity: 61,236 kwh, recycled water: 35 m ³ , PAC: 200 kg	Operation for washing equipment: electricity: 61,236 kwh, recycled water: 35m ³ , PAC: 200 kg

려하여 실제 운영기간 동안만 감가되어 사용되는 것으로 적용하였다. 2단계 오염토 굴착단계에서는 오염토의 굴착, 청토 복토, 굴착된 오염토의 선별 및 운반, 정화토의 처리 등으로 구분하여 부지 내 및 부지 밖 처리에 각각 달리 적용하였고, 부지 내 처리에서는 오염토의 굴착 후 바로 운반하지 않고 세척장치에 투입하는 것으로 하였고, 부지 밖 처리의 경우 굴착 후 반입처리장으로 이송하여 세척장치에 투입하는 것으로 가정하였다. 3단계 선별 및 세척단계는 부지 내 및 부지 외 처리에서 동일하다고 가정하였고 토양세척시스템 운영(operation)에 필요한 전기소비량 및 화학약품의 사용량은 표준화 방안이 제시된 바가 없어 실제 현장에서 사용하고 있는 세척장치를 기반으로 적용하였다. 4단계 폐수처리 공정에서는 부지 내 및 부지 밖 처리 시 동일하게 35 m³의 물을 세척수로 사용하고 발생하는 세척폐수는 처리 후 공정운영 중에는 재활용하고 최종적으로 폐수처리장에 방류하는 것으로 가정하였다. 그 외 콘크리트, 철, 전기 등의 정화공정에 사용된 주요한 물질, 자원 및 에너지는 국가 LCI 데이터베이스의 정보를 기본적으로 사용하여 실제 사용량을 입력하였고, 디젤 사용량은 실제 사용한 디젤사용량에 대한 정보가 표준화 방안이 언급이 없어 SiteWise™ver.2 모델에 있는 굴착기 등의 장비의 연비(hr/L), 덤프트럭의 운행에 필요한 연비(km/L)정보를 기반으로 운행거리 및 오염토양의 처리물량을 입력하면 모델 내에서 자동으로 CO₂ 배출량 및 에너지사용량으로 변환되어 산정되도록 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 환경부하 산정

3-1-1. CO₂ 발생량

본 연구에서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 정화과정 중 CO₂의 배출은 5가지 형태로 구분되는데 각각 소비성 재료의 사용으로 인한 consumables, 인력 및 장비의 운송에 의한 transportation of personnel and equipment, 장비의 사용에 의한 equipment use, 잔류물질 처리에 의한 residual handling이다. Fig. 2에 토양세척과정 각 단계에서의

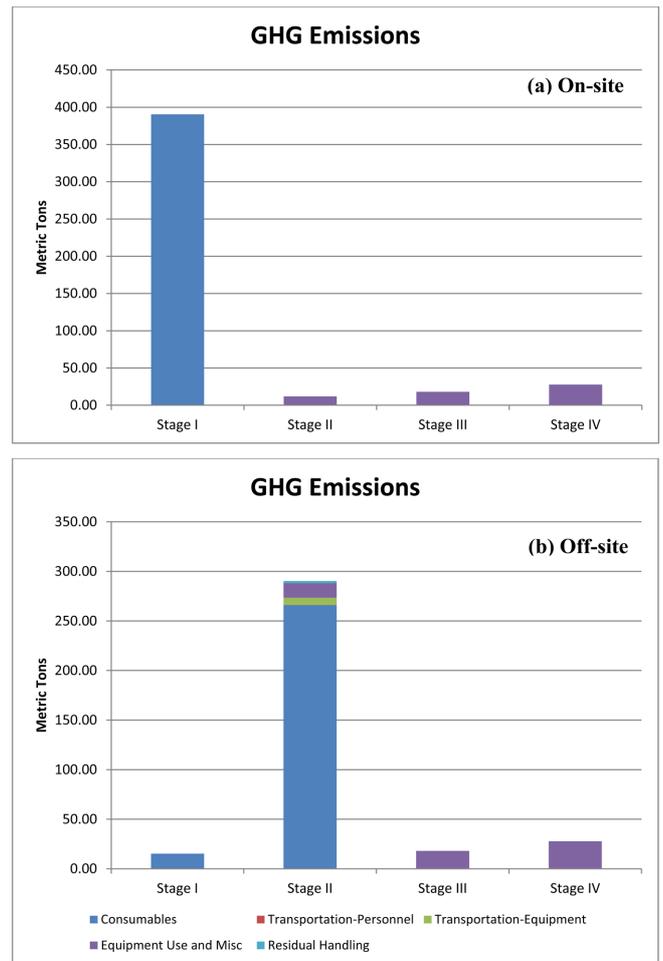


Fig. 2. The results of GHGs emissions in SW process: (a) on-site, (b) off-site.

CO₂ 배출량을 나타내었다. 연구결과 부지 내 처리 방식이 부지 밖 처리방식에 비해 발생하는 전체 CO₂ 배출량이 많은 것으로 나타났

다. 부지 내 처리에서의 CO₂ 배출량은 전체 448.1톤 이었고, 1~4단계에서 각각 390.44톤, 12톤, 18.03톤, 27.63톤 이었다. 연구결과에 따르면 부지 내 처리시에는 세척장치를 제작하고 설치하는 단계인 1단계에서 공정 중 사용되는 소비성 재료인 철, 스테인리스스틸, 콘크리트 등의 제조과정에서 발생하는 CO₂에 의한 배출량이 390.44톤으로 가장 높게 나타났다. 국가 LCI DB에 의하면 원재료의 생산공정에서 CO₂가 발생하게 되는데, 철과 스테인리스스틸 1kg을 생산하기 위해 각각 2.165 kg, 2.8 kg의 CO₂가 배출된다[22]. 2단계 오염토 굴착 단계에서는 굴착을 위한 장비의 사용, 3단계 선별 및 세척단계에서는 세척장치를 운영하기 위한 전기의 사용, 4단계 폐수처리 단계에서는 전기의 사용과 화학응집제의 사용이 CO₂의 배출에 크게 기여하였다.

부지 밖 처리에서의 총 CO₂ 배출량은 351.1톤 이었고, 1~4단계에서 각각 15.2톤, 290.24톤, 18.03톤, 27.63톤 이었다. 부지 밖 처리시에는 오염토를 굴착하고 운반하는 단계인 2단계에서 오염토 운반에 사용되는 덤프트럭의 운행에 의한 연료의 사용으로 인해 CO₂ 배출량이 가장 높게 나타났다. 1단계 부지기반조성 단계에서는 기존 반입정화처리장을 이용하여 부지 내 처리와 비교하여 CO₂의 배출량이 매우 적었고, 3단계 및 4단계에서는 동일하게 전기의 사용이 CO₂의 배출에 크게 기여하였다. 2010년을 기준으로 국내 1인당 연간 CO₂ 배출량은 13.5톤이고, 자동차 1대당 CO₂의 배출량은 국산중형차 연

간 20,000 km 운행을 기준으로 약 3.6톤이다[23]. 토양세척 공정 중 발생하는 CO₂ 총 배출량은 1인당 연간 CO₂ 배출량의 약 25~30배 수준으로 높고 자동차 약 80~100대의 CO₂ 배출량과 같은 정도로 높으므로 향후 토양정화분야에서 기후변화에 대응하기 위한 방안으로 CO₂ 배출량의 관리가 필요하다고 판단된다.

3-1-2. 에너지 사용량

Fig. 3에 토양세척공정 각 단계에서의 에너지 사용량을 나타내었다. 본 연구에서는 에너지 단위로 MMBTU(Million Metric British Thermal Unit)를 사용하는데, 이는 국제적으로 통용되는 열량 단위로서 1 MMBTU는 9.478E+08 MJ 또는 3.412E+09 Kwh로 변환할 수 있다[24]. 연구결과 부지 내 처리 방식이 부지 밖 처리방식에 비해 총 에너지사용량은 적은 것으로 나타났다. 부지 내 처리에서의 총 에너지 사용량은 6.4E+03 MMBTU이었고, 1~4단계에서 각각 5.16E+03, 2.03E+02, 4.21E+02, 6.34E+02 MMBTU였다. 부지 내 처리시에는 세척장치를 제작하고 설치하는 단계인 1단계에서 공정 중 사용되는 소비성재료인 철, 스테인리스스틸, 콘크리트 등의 제조 과정에서 사용되는 에너지에 의해 5.16E+03 MMBTU의 에너지를 사용하는 것으로 나타났다. 2단계 오염토 굴착 단계에서는 굴착을 위한 장비의 연료의 소비, 3단계 선별 및 세척단계에서는 세척장치를 운영하기 위한 전기에너지의 사용, 4단계 폐수처리 단계에서는 전기에너지와 폐수처리를 위한 화학응집제의 제조과정에서 사용되는 에너지가 전체 에너지 사용에 크게 기여하였다.

부지 밖 처리 단계에서의 총 에너지 사용량은 6.6E+03 MMBTU 이었고, 각 단계별 에너지 사용량은 1~4단계에서 각각 2.26E+02, 5.30E+03, 4.21E+02, 6.34E+02 MMBTU이었다. 부지 내 처리시와 비교하여 총 0.2E+03 MMBTU 높았고, 특히 2단계에서 5.30E+03 MMBTU로 가장 높게 나타났다. 이는 부지 밖 처리시에 굴착된 오염토의 운반을 위한 덤프트럭의 운행에 의해 사용되는 연료의 소비에 의한 것으로 판단된다. 본 연구결과 토양세척 정화공정에서는 소비성 재료의 사용과 오염토 운반을 위한 덤프트럭의 운행에 의한 연료의 소비가 에너지 사용량에 가장 크게 기여하기 때문에, 향후 토양정화분야에서 에너지 사용량의 저감을 위한 방안이 필요하다고 판단된다.

3-2. 환경부하의 각 단계별 상대적인 기여도 및 녹색정화전략

전체 토양세척공정에 대한 각 단계 별 CO₂ 발생량 및 에너지 사용량과 그 상대적인 기여도를 Table 3에 나타내었다. 부지 내 처리시에는 세척장치를 제작하고 설치하는 단계인 1단계 부지조성에 사용되는 철, 콘크리트 등의 제조과정에서 발생하는 부분이 CO₂ 배출량 및 에너지 사용량에 가장 크게 기여하였고, 전체공정에 대한 1단계에서의 CO₂ 배출량과 에너지 사용량의 각각의 상대적인 기여도는 87.1%와 80.4%로 매우 높았다. 이는 부지 내 처리방식의 토양세척 정화공정에서 녹색 및 지속 가능한 정화를 달성하기 위해서는 1단계 부지조성 단계에서의 원재료의 사용에 대한 관리가 가장 중요하다는 것을 의미한다.

따라서 부지 내 처리 시의 녹색정화전략은 세척장치의 경량화를 통해 소모성 재료의 사용을 줄이거나 재활용 재료를 사용하여 세척장치를 제작하는 것이라고 판단된다.

부지 밖 처리 시에는 오염토를 굴착하고 운반하는 단계인 2단계에서 오염토 운반에 사용되는 덤프트럭의 운행이 CO₂ 배출량 및 에너지 사용량에 가장 크게 기여하였다. 2단계에서의 총 CO₂ 배출량과 에

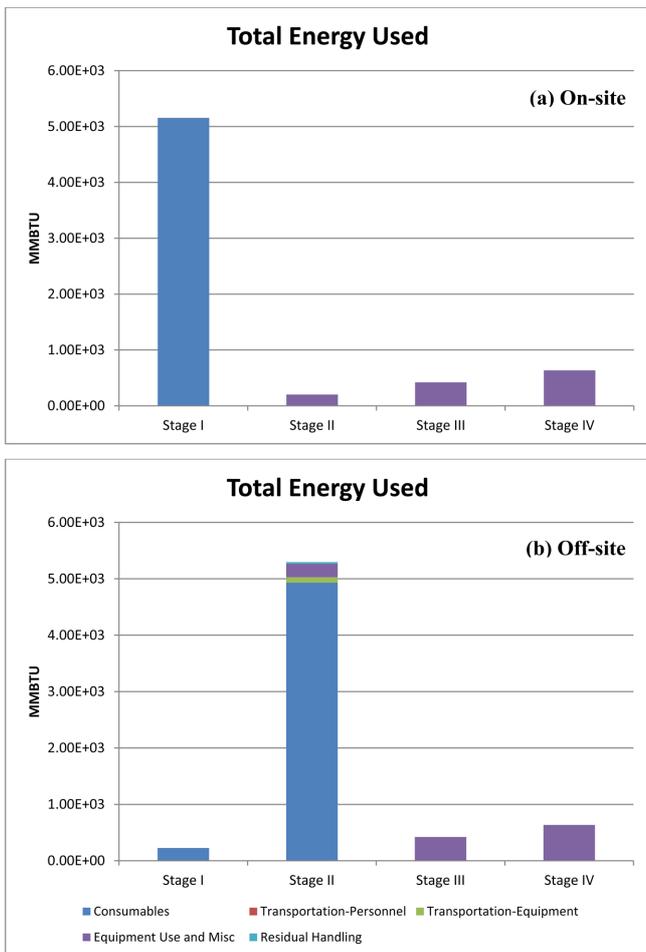


Fig. 3. The results of energy consumption in SW process: (a) on-site, (b) off-site.

Table 3. Environmental footprints and relative contribution (%) in SW process

Environmental footprints (On-site)	Stage I	Stage II	Stage III	Stage IV	Total
GHG emissions (metric tons) (%)	390.44	12.00	18.03	27.63	4.5E+02
	87.1	2.7	4.0	6.2	100.0
Total energy used (MMBTU) (%)	5.16E+03	2.03E+02	4.21E+02	6.34E+02	6.4E+03
	80.4	3.2	6.6	9.9	100.0
(Off-site)					
GHG emissions (metric tons) (%)	15.2	290.24	18.03	27.63	3.5E+02
	4.3	82.7	5.1	7.9	100.0
Total energy used (MMBTU) (%)	2.26E+02	5.30E+03	4.21E+02	6.34E+02	6.6E+03
	3.4	80.5	6.4	9.6	100.0

Table 4. Changes of environmental footprints with transportation distance

	On-site	Off-site (~5 km)	Off-site (25 km)	Off-site (50 km)	Off-site (100 km)	Off-site (150 km)	Off-site (200 km)	Off-site (250 km)
GHG emissions (tons)	448.1	351.1	361.4	374.3	400.1	425.9	451.7	477.5
Total energy used (MMBTU)	6413.4	6575.9	6710.6	6879.0	7215.8	7552.6	7889.4	8226.3

너지 사용량의 전체공정에 대한 각각의 기여도는 82.7%와 80.5%로 매우 높았다. 이는 부지 밖 처리방식의 토양세척 정화공정에서 녹색 및 지속 가능한 정화를 달성하기 위해서는 2단계 부지조성 단계에서의 덤프트럭의 운행에 의한 연료 사용의 관리가 가장 중요하다는 것을 의미한다.

따라서 부지 밖 처리 시의 녹색정화전략은 대체연료를 사용하여 디젤연료의 사용량을 줄이거나 덤프트럭, 중장비 등의 이동거리 및 운행시간을 최대한 짧게 조정하여 연료사용량을 줄이는 것이라고 판단된다.

3-3. 운송거리에 따른 환경부하 영향

Table 4에 부지 밖 처리과정에서 운송거리의 변화에 따른 CO₂ 배출량 및 에너지사용량의 변화를 나타내었다. 운송거리에 따른 영향만을 평가하기 위해 오염도의 운송거리를 제외한 다른 모든 변수는 동일한 조건으로 고정하고 운송거리를 5 km에서 250 km까지 변화시켰을 때, CO₂ 배출량은 351.1 톤에서 477.55 톤으로 에너지 사용량은 각각 6.6E+03 MMBTU에서 8.2E+03 MMBTU로 증가하였다. 운송거리가 증가할수록 CO₂ 배출량은 운송거리 1 km당 0.52 톤이 증가하였고 에너지 사용량은 운송거리 1 km당 6.74 MMBTU가 증가하여 상대적으로 에너지 사용량의 증가 폭이 크게 나타났다. 이는 오염도의 운송거리는 CO₂ 배출량 보다 에너지 사용량에 영향이 더 큰 것을 의미하며, 부지 밖 처리 시 녹색 및 지속 가능한 정화를 달성하기 위해 가장 중요한 요소는 덤프트럭의 운행으로 인해 소모되는 에너지의 사용량을 저감시키는 것으로 판단된다. 본 연구결과 운송거리 200 km에서의 부지 밖 처리와 부지 내 처리의 CO₂ 배출량이 각각 451.7 톤과 448.1 톤으로 산출되어 토양세척 정화공정에서 운송거리 200 km가 부지 내 처리와 부지 밖 처리를 결정하는 기준이 될 것으로 판단된다. 따라서 오염부지와 반입정화장간 거리 200 km를 기준으로 그 이하는 부지 밖 처리, 그 이상은 부지 내 처리를 적용하는 것이 공정 중 발생하는 CO₂ 배출량이 적고 녹색 및 지속 가능한 정화의 달성에 적합할 것으로 판단된다. 반면 에너지 사용량은 운송거리에 관계없이 부지 밖 처리가 부지 내 처리에 비해 사용량이 많은 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 '토양정화산업 활성화를 위한 표준화 및 경쟁력 확보방안'에 제시되었던 토양세척 공정의 시스템 구성을 바탕으로 토양정화공정의 전 과정을 부지 내(on-site) 처리와 부지 밖(off-site) 처리로 구분하여 각 공정에서의 CO₂ 배출량, 에너지 사용량을 산정하여 각 공정의 환경적인 영향을 평가하였다. 세부적인 결론은 다음과 같다.

(1) 본 연구결과에 따르면 총 석유계탄화수소(TPH)로 오염된 5,000 m³ 규모 오염부지의 정화 시에 부지 밖 처리 방식이 부지 내 처리 방식에 비해 발생하는 CO₂ 배출량은 적은 반면에 에너지 사용량은 많은 것으로 나타났다.

(2) 부지 내 처리 시에는 세척장치를 제작하고 설치하는 단계인 1단계 부지조성에 사용되는 철, 콘크리트 등의 소비성재료의 사용이 CO₂ 배출량 및 에너지 사용량에 가장 크게 기여하였다. 1단계에서의 CO₂ 배출량과 에너지 사용량은 각각 390.44 톤과 5.16E+03 MMBTU 이었고, 전체공정에 대한 각각의 기여도는 87.1%와 80.4%로 매우 높았다.

(3) 부지 밖 처리 시에는 오염토를 굴착하고 운송하는 단계인 2단계에서 오염토 운반에 사용되는 덤프트럭의 운행이 CO₂ 배출량 및 에너지 사용량에 가장 크게 기여하였다. 2단계에서의 CO₂ 배출량과 에너지 사용량은 각각 290.24 톤과 5.30E+03 MMBTU이었고, 전체공정에 대한 각각의 기여도는 82.7%와 80.5%였다.

(4) 부지 밖 처리 시 녹색 및 지속 가능한 정화를 달성하기 위해 가장 중요한 요소는 덤프트럭의 운행으로 인해 소모되는 에너지의 사용량을 저감시키는 것으로 판단된다. 또한 오염부지의 정화 시 오염부지와 반입정화처리장간 거리가 200 km 이하일 때는 부지 밖 처리 방식, 200 km 이상일 때는 부지 내 처리방식을 적용하는 것이 CO₂ 배출량 측면에서 녹색 및 지속 가능한 정화의 달성에 적합한 녹색정화전략이라고 판단된다.

(5) 본 연구는 대상오염부지의 대한 정보와 데이터가 부족하고 연구결과가 대상부지에 제한적이며 국가 LCI DB의 미완성, 녹색 및 지속 가능한 정화를 위한 국내 평가모델의 부재 등의 한계가 있지만, 연구결과는 토양세척 공정의 적용 시 녹색 및 지속 가능한 정화의 달

성을 위한 유용한 정보가 될 것이고 반입정화장으로 운반하여 오염토를 처리하는 다양한 토양정화기술의 적용 시 참고자료로 활용할 수 있을 것이다. 추후 다양한 정화기술에 대한 추가적인 환경영향 분석에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감 사

이 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 기초연구사업입니다(과제번호: 2012R1A1A2007941).

References

- Chatterjee, S., Chatterjee, T. and Woo, S. H., "Effect of Coagulant Addition on the Sedimentation of a Surfactant-containing Washing Solution Used for Phenanthrene-contaminated Soil", *Korean J. Chem. Eng.*, **28**(12), 2293-2299(2011).
- Ministry of Environment, "Guideline for Contaminated Soil Remediation Methods," (2009).
- ScanRail Consult, "Environmental/economic evaluation and optimising of contaminated sites remediation—method to involve environmental assessment," EU LIFE Project no. 96 ENV/DK/4090016 (2000).
- Yang, J. W. and Lee, Y. J., "Status of Soil Remediation and Technology Development in Korea," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **45**(4), 311-318(2007).
- Lemming, G., "Environmental Assessment of Contaminated Site Remediation in a Life Cycle Perspective," PhD thesis, Technical University of Denmark(2010).
- Forum USSR, "Sustainable Remediation White Paper—integrating Sustainable Principles," *Practices, and Metrics Into Remediation Projects, Rem. J.*, **19**, 5-114(2009).
- USEPA, "Green Remediation: Incorporating Sustainable Environmental Practices into Remediation of Contaminated Site," EPA 542/423R/08/002(2008).
- USEPA, "Incorporating Sustainable Practices into Site Remediation," EPA 542/F/08/002(2008).
- USEPA, "Superfund Green Remediation Strategy, Office of Solid Waste and Emergency Response," (2010).
- Page, C. A., Diamond, M. L., Campbell, M. and McKenna, S., "Life-cycle Framework for Assessment of Site Remediation Options: Case Study," *Environ. Toxicol. Chem.*, **18**, 801-810(1999).
- Volkwein, S., Hurtig, H. W. and Klöpffer, W., "Life Cycle Assessment of Contaminated Sites Remediation," *Int. J. Life Cycle Assess.*, **4**, 263-274(1999).
- Toffoletto, L., Deschênes, L. and Samson, R., "LCA of ex-situ Bioremediation of Diesel-contaminated Soil," *Int. J. Life Cycle Assess.*, **10**, 406-416(2005).
- Cadotte, M., Deschênes, L. and Samson, R. R., "Selection of a Remediation Scenario for a Diesel-contaminated Site Using LCA," *Int. J. Life Cycle Assess.*, **12**, 239-251(2007).
- Harbottle, M. J., Al-Tabbaa, A. and Evans, C. W., "A Comparison of the Technical Sustainability of in situ Stabilisation/solidification with Disposal to Landfill," *J. Hazard. Mater.*, **141**, 430-440(2007).
- Hu, X., Zhu, J. and Ding, Q., "Environmental Life-cycle Comparisons of Two Polychlorinated Biphenyl Remediation Technologies: Incineration and Base Catalyzed Decomposition," *J. Hazard. Mater.*, **191**, 258-268(2011).
- Suer, P. and Andersson, Y., "Biofuel or Excavation?—life Cycle Assessment (LCA) of Soil Remediation Options," *Biomass Bioenerg.*, **35**, 969-981(2011).
- Jeong, S. W. and Suh, S. W., "Assessment of Environmental Impacts and CO₂ Emissions from Soil Remediation Technologies using Life Cycle Assessment - Case Studies on SVE and Biopile Systems," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **33**(4), 267-274(2011).
- Cho, J. S., "Life Cycle Assessment on Pump and Treatment Remediation of Contaminated Groundwater," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **33**(6), 405-412(2011).
- Kim, D. H., Hwang, B. R., Moon, D. H., Kim, Y. S. and Baek, K., "Environmental Assessment on a Soil Washing Process of a Pb-contaminated Shooting Range Site: a Case Study," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, in press (2013) <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-013-1599-8>.
- Ministry of Environment, "Standardization Report for Soil Remedial Industry," (2010).
- Ministry of Environment, "Korea LCI DB"(2013).
- Ministry of Environment, "Environmental Statics Portal"(2010).
- International Energy Agency, "Key world energy statistics," (2012).