전과정평가(LCA)에 의한 토양오염 정화공정의 환경영향분석 및 CO_2 배출량 산정 - SVE 및 Biopile 시스템 중심으로 -

Assessment of Environmental Impacts and CO_2 Emissions from Soil Remediation Technologies using Life Cycle Assessment - Case Studies on SVE and Biopile Systems -

정승우† · 서상원*
Seung-Woo Jeong† · Sangwon Suh*

군산대학교 환경공학과 · *캘리포니아주립대학교-Santa Barbara
Department of Environmental Engineering, Kunsan National University
**Bren School of Environmental Science and Management, University of California-Santa Barbara*

(2011년 4월 13일 접수, 2011년 4월 27일 채택)

Abstract : The environmental impacts of 95% remediation of a total petroleum hydrocarbon-contaminated soil were evaluated using life cycle assessment (LCA). LCA of two remediation systems, soil vapor extraction (SVE) and biopile, were conducted by using imput materials and energy listed in a remedial system standardization report. Life cycle impact assessment (LCIA) results showed that the environmental impacts of SVE were all higher than those of biopile. Prominent four environmental impacts, human toxicity via soil, aquatic ecotoxicity, human toxicity via surface water and human toxicity via air, were apparently found from the LCIA results of the both remedial systems. Human toxicity via soil was the prominent impact of SVE, while aquatic ecotoxicity was the prominent impact of biopile. This study also showed that the operation stage and the activated carbon replacement stage contributed 60% and 36% of the environmental impacts of SVE system, respectively. The major input affecting the environmental impact of SVE was electricity. The operation stage of biopile resulted in the highest contribution to the entire environmental impact. The key input affecting the environmental impact of biopile was also electricity. This study suggested that electricity reduction strategies would be tried in the contaminated-soil remediation sites for archieving less environmental impacts. Remediation of contaminated soil normally takes long time and thus requires a great deal of material and energy. More extensive life cycle researches on remedial systems are required to meet recent national challenges toward carbon dioxide reduction and green growth. Furthermore, systematic information on electricity use of remedial systems should be collected for the reliable assessment of environmental impacts and carbon dioxide emissions during soil remediation.
Key Words : *LCA, Carbon Dioxide, Environmental Impact, Remediation, Soil Contamination*

요약 : '오염토양 복원작업 품셈자료 산출근거 마련을 위한 연구'에 제시된 토양증기추출법(soil vapor extraction: SVE)과 바이오파일(biopile) 시스템 구성을 바탕으로 두 오염토양 정화공정이 토양 1,000 m^3내 총탄화수소를 95% 제거하는 전과정을 전과정평가기법을 통해 평가하였다. 전과정영향평가 결과 SVE가 9개 환경영향범주에서 모두 바이오파일에 비해 높은 환경영향수치를 나타내었다. SVE와 바이오파일, 두 정화방법 공히 토양경로 인체독성(Human toxicity-soil), 수생태독성(Ecotoxicity-water), 지표수경로 인체독성(Human toxicity-surface water), 대기경로 인체독성(Human toxicity-air) 등 4가지 범주에서 상대적으로 높은 환경영향값을 보였다. SVE방법이 가장 큰 영향을 미치는 환경범주는 인체독성(토양)이었으며 바이오파일이 가장 큰 영향을 미치는 환경범주는 수생태독성이었다. SVE방법의 세부 공정별 환경영향을 분석한 결과 운영단계에서 전체 환경영향의 60%를 초래하였고 활성탄교체단계가 36%를 초래하는 등 두 개 단계가 전체 환경영향의 96%를 차지하였다. 가장 큰 영향을 미치는 투입물은 운영 중 사용된 전기였다. 바이오파일 세부 공정별 환경영향 분석결과에서도 운영단계가 전체영향의 55.7%를 차지하였고 활성탄교체단계가 12.4%를 차지하였다. 바이오파일에서도 역시 전기사용에 따른 환경영향이 가장 크게 나타났다. SVE 와 바이오파일, 두 공정 모두 운영단계에서 소비되는 전기에 의한 환경영향이 가장 크므로 오염토양 정화시스템 운영 중 전기소비를 최소화 할 수 있는 운영방안이 필요하다. 오염토양 정화는 비교적 장기간 많은 에너지와 물질이 투입된다. 최근 이산화탄소발생량 감축과 녹색성장에 대한 사회적 요구에 따라 오염토양정화공정에 대한 체계적인 분석과 연구가 필요한 것으로 예상된다. 특히 운영 중 전기소비량은 전과정영향평가 및 탄소배출량 결과에 큰 영향을 미치므로 앞으로 보다 신뢰성 높은 전과정평가를 위해서 전기사용량에 대한 데이터 수집 및 확보가 가장 필요한 것으로 판단된다.
주제어 : 전과정평가, 이산화탄소, 환경영향, 토양정화, 토양오염

1. 서 론

토양환경보전법에는 토양오염의 가능성이 높은 일정 규모이상의 시설을 특정토양오염시설로 규정하고 있다. 2008년까지 우리나라의 특정토양오염관리시설은 22,451개소에 이른다.[1)] 이중 석유류가 22,172개소로 대부분을 차지하고 있으며 기타 유독물은 279개소이다. 특정토양오염관리시설에 대한 정기 토양오염도 조사결과 매년 200개 이상의 사업장

† Corresponding author E-mail: swjeong@kunsan.ac.kr Tel: 063-469-4767 Fax: 063-469-4964

이 토양오염기준을 초과하는 것으로 나타났으며 초과항목의 대부분은 Total petroleum hydrocarbons (TPH) 및 Benzene, Toluene, Ethybenzenes, Xylenes (BTEX)이다.[1] 2000~2006년간 국내 토양오염 정화를 위해 적용된 기술을 살펴보면 토양증기추출법(soil vapor extraction: SVE)이 29.6%로 가장 많았으며 다음은 생물학적통풍법(Bioventing)이었다.[2]

최근 미국은 전국에 산재된 슈퍼펀드(superfund) 오염부지 정화에 소비되는 에너지 및 자원을 효율적으로 운영하여 이산화탄소 가스 배출을 감소시키고자 하는 Green Remediation 개념이 이미 현장에 적용되고 있으며, 미국환경청(USEPA)도 최근 현장의 성공적인 노력에 기인하여 기존 Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act (CERCLA)와 National Oil and Hazardous Substances Pollution Contingency Plan (NCP) 환경법 및 정책에 Green Remediation 개념을 반영하고자 적극적으로 추진하고 있다.[3]

전과정평가(Life cycle assessment : LCA)는 국제표준화기구(International Standard Organization: ISO)에서 표준화되었으며 제품 및 서비스의 환경영향을 평가하기 위한 도구로 널리 사용되고 있다. 외국에서 최근 토양 및 지하수 오염 정화작업에 대한 전과정평가 연구가 활발하게 진행되고 있으며 평가결과는 친환경적 정화기술의 선정, 시스템 개선 및 정책결정 등 매우 다양한 분야에 활용되고 있다.[4] 우리나라에서는 아직 토양 및 지하수 오염 정화작업에 대한 전과정평가 연구가 공식적으로 발표된 사례가 없다. 본 연구는 국내 토양정화기술 중 표준화작업이 일부 진행되었던 SVE와 바이오파일(Biopile)기술에 대해 LCA기법을 적용하여 각 정화기술의 환경영향 및 이산화탄소발생량을 분석하고 향후 과제에 대해 연구하였다.

본 연구의 구체적 목적은 2003년 환경부의 '오염토양 복원작업 품셈자료 산출근거 마련을 위한 연구(이하 "오염품셈")'[5]에 제시된 SVE시스템 및 바이오파일시스템이 총탄화수소(Total Petroleum Hydrocarbons: TPH) 10,000 mg/kg로 오염된 1,000 m^3의 유류오염부지를 토양환경보전법상 1지역 기준인 500 mg/kg까지 정화하는 전과정을 평가하고 예상되는 환경영향을 분석하였다.

2. 전과정평가 방법

2.1. LCA 목표 및 범위

LCA의 목표는 대표적 오염토양 정화기술인 SVE와 바이오파일을 적용할 경우 환경영향을 산정하여 비교하는 것이며 각 정화과정을 단계별로 세분화하여 환경에 크게 영향을 미치는 세부공정을 도출하는 것이다. LCA 기능(function)은 오염부지내 오염토양을 정화하는 것이며, 기능단위(functional unit)는 토양 1,000 m^3 내 TPH를 95% 제거하는 것이다. 기준흐름(reference flow)는 오염부지로 설정하였다.

Fig. 1과 2는 SVE와 바이오파일의 LCA범위를 구체적으로 도시한 것이다. SVE 세부공정은 재료의 부지내 이동(transportation), 부지기반 조성(site foundation), 관정설치(well installation), SVE정화시스템 조립(system assembly), 운영(operation), 입자상활성탄(granular activated carbon: GAC) 교체(GAC replacement) 단계 등 6개로 구분하였다. 바이오파일 세부공정은 재료의 부지내 이동(transportation), 오염토 굴착(excavation), 부지준비(site preparation), 운영(operation), GAC교체(GAC replacement), 복토(backfill) 단계 등 역시 6개로 구분하였다. 정화과정 중 진행상황을 파악하기 위한 토양조사는 두개 공정이 동일하며 타 세부공정에 비해 일시적인 작업이므로 고려하지 않았다. 오염품셈에는 SVE정화시스템 및 바이오파일정화시스템 해체 및 정리과정에 대한 구체적인 정보가 없어 생략하였다. 평가시간은 각 정화기술로 오염토양을 목표농도까지 정화하는 데 소요되는 시간으로 설정하였다.

본 연구 대상 오염부지는 TPH가 10,000 mg/kg로 균질하게 오염된 1,000 m^3(면적 200 m^2 × 깊이 5 m) 토양으로 설정하였다. 본 연구에서 지하수오염은 고려하지 않았다. 토

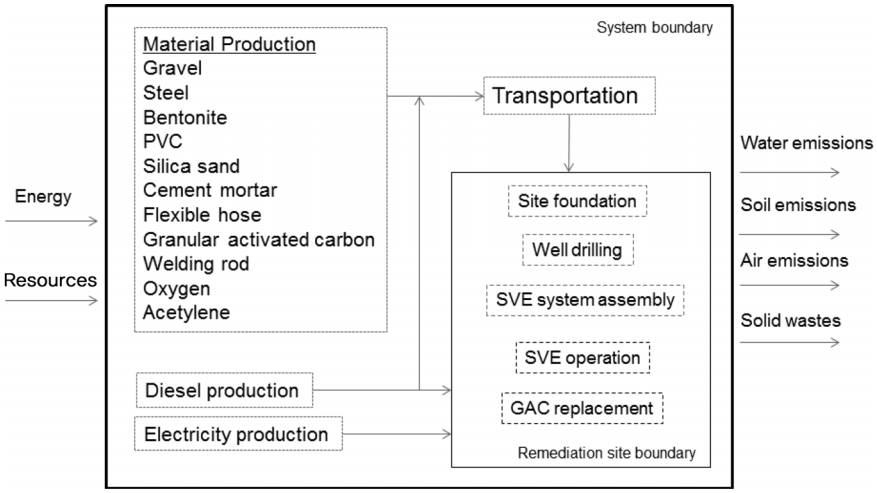

Fig. 1. Life cycle assessment schematic of soil vapor extraction (SVE) remediation technology activities.

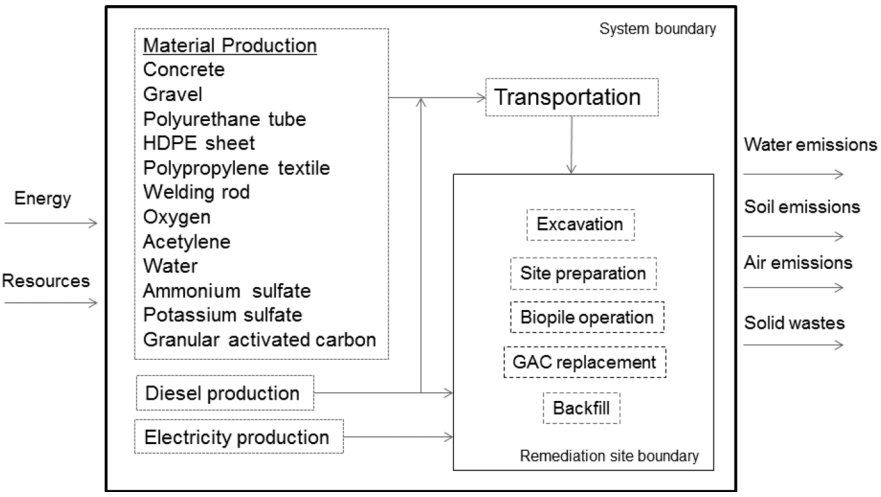

Fig. 2. Life cycle assessment schematic of biopile remediation technology activities.

양은 SVE와 바이오파일이 적용되기 적합한 실트질 모래로서 토양 공극률과 토양총체단위밀도는 환경부 토양오염위해성평가지침에 제시된 대표값인, 0.4, 1.6 kg/L를 각각 적용하였다.[6] Table 1에 연구 대상 오염토양 조건과 SVE 및 바이오파일의 대표적 설계인자를 정리하였고, 각 토양정화기술을 적용할 경우 정화목표까지 소요되는 시간을 산정하였다.

SVE 설계를 위해 유류오염부지로 부터 휘발하는 기체상 탄화수소 농도는 Johnson 등의 Weathered gasoline 조건에 따라 220 mg/L로[7] 결정하였으며 기체상 추출속도(extraction rate)는 현장데이터를 참고한 34 m^3/hr로 결정하였다.[8] 그러나 SVE 운영시 추출정(extraction well)의 추출 가스오염물질의 농도는 토양의 우선흐름경로(preferential flow) 현상으로 예상된 탄화수소 농도보다 작아진다. 따라서 본 연구는 SVE의 탄화수소 추출효율을 현장 데이터를 참고하여 11%로[7] 설계한 결과 SVE시스템으로 연구 대상 유류오염부지를 정화하는데 750일, 약 2.05년이 소요되었다. 그리고 오염부지의 면적은 200 m^2으로, 반경 7.98 m에 해당한다. 오염부지의 오염반경은 일반적인 SVE 1개 추출관정의 영향반경 범위 6-45 m에[9] 속하므로 1개의 추출정이 설치되는 것으로 시스템을 설계하였다. 또한 추출압력 측정 및 공기의 유입을 위해 2개의 관측정(monitoring well)을 설치하는 것으로 계획하였다.

Table 1. Characteristics of soil contamination and soil vapor extraction (SVE) & biopile remediation technologies

Items	Description
Soil contamination	- TPH Contaminated soil volume 1,000 m^3 (area 200 m^2 x depth 5 m) - Contamination 10,000 mg TPH/kg - Remediation goal 500 mg TPH/kg - Porosity 0.4, Soil bulk density 1.6 kg/L[6]
Soil vapor extraction	- Weathered gasoline vapor concentration 220 g/m^3 [7] - Extraction flow rate 34 m^3/hr[8] - TPH Extraction efficiency 11%[7] - Estimated remediation time 750 days (2.05 years) - 1 extraction well and 2 monitoring wells - Already manufactured SVE commercial system (extraction+oil and water separator+off gas treatment) applied on the site - Off-gas treatment system using activated carbon adsorption
Biopile	- Biopile TPH degradation rate 37 mg/kg/day[10] - Estimated remediation time 514 days (1.41 days) (Treatment volume 500 m^3 x 2) - Water, ammonium sulfate and potassium sulfate provided - Already manufactured biopile system (air supplier+water and nutrient supplier+leachate collector+off-gas treatment system) - Off-gas treatment system using activated carbon adsorption

바이오파일의 TPH 생분해속도는 본 연구 대상 현장조건과 유사한 현장에서 산출된 평균 37 mg/kg/day를 적용하여 정화기간을 예측하였다.[10] 1,000 m^3 오염토양을 바이오파일로 정화하기 위해 514 일(1.41 yr)이 소요되는 것으로 산정되었다.

본 연구에서 'SVE시스템', '바이오파일시스템'이라함은 부지내 모든 세부공정을 포함하는 것으로 정의하겠고 'SVE정화시스템'은 진공추출장치와 배출가스처리장치만을 지칭하며 '바이오파일정화시스템'은 공기공급장치 및 배출가스처리장치만을 지칭하도록 한다.

2.2. 전과정목록(Life cycle inventory: LCI) 작성

SVE와 바이오파일을 이용한 토양정화과정 중 소요되는 주요 물질 및 에너지를 Table 2와 3에 각각 정리하였다. 각 공정에 소요되는 세부 물질 및 에너지는 오염품셈[5]에 제시된 SVE와 바이오파일의 각 시스템 구성을 참조하여 작성하였다. 전과정 목록작성을 위해 부지 내에서 소비되는 물질 및 에너지에 대해서만 작성하였다. SVE정화시스템 및 바이오파일정화시스템은 정화완료 후 부지 외로 반출되므로 반영하지 않았고 부지 내 시스템 조립과정만 고려하였다. 전과정목록 작성은 ecoinvent LCI data v.2.1 데이터베이스[11]와 CMLCA software[12]를 사용하였다.

Table 2. Material and energy required for soil vapor extraction technology

Stages	Processes and data used
Transportation	- All materials 99.8 ton, 30km round
Site foundation	- Office, storage, and SVE system foundation - Gravel 9.6 m^3, Concrete 19 m^3, wire mesh 96 m^2 [5] - Bakhoe diesel 21 L[13]
Well installation	- 3 wells - PVC 45 kg[14] - Sand 0.3 m^3, Bentonite 211 kg[5] - Mortar 2,291 kg[5] - drilling equipment diesel 11 L[13]
SVE system assembly	- Flexible polyurethane hose 340 m[5] - Sand 4 m^3, Concrete 5 m^3 [5] - Welding, gas 100 m[13]
SVE operation	- Electricity 148,748 kwh[a,5]
GAC replacement[c]	- 18,000 kg[b,16]

[a] Estimated for one SVE system operation for 2.05 years, based on electricity data of three SVE system operation for 2.0 years
[b] Estimated from Freundlich isothermal data of gaseous benzene
[c] LCI of the GAC production unit process was modeled by the Bayer et al., method

Table 3. Material and energy required for biopile remediation technology

Stages	Processes and data used
Transportation	- All materials 117 ton, 30 km round
Excavation	- Excavator (0.7 m^3, 27.4 hr) diesel 288 L[13] - Dump truck (10.5 ton, 27.4 hr) diesel 515 L[13]
Site preparation	- Tire roller (15 ton, 2 hr) diesel 16 L[13] - Gravel 7.8 m^3, sand 60 m^3, THP tube 58 m, HDPE sheet (t=2 mm) 600 m^2, polypropylene textile 600 m^2 [5] - Welding, gas 100 m[13]
Operation	- Water 67.4 ton[5] - Ammonium sulphate 2,708 kg[5] - Potassium sulphate 558 kg[5] - Micro-organism 4,777 L[5] - Electricity 63,700 kwh[a]
GAC replacement	- Activated carbon 1,368 kg[b,13]
Backfilling	- Excavator (0.7 m^3, 27.4 hr) diesel 288 L[13] - Dump truck (10.5 ton, 27.4 hr) diesel 515 L[13]

[a] Estimated for biopile system operation for 1,000 m^3, based on electricity data of biopile system operation for 875 m^3
[b] Estimated from Freundlich isothermal data of gaseous benzene

이동(transportation)단계는 SVE와 바이오파일 적용에 필요한 물질을 부지내로 운반하기 위한 공정으로 물질의 전체 무게를 파악하였고 거리는 30 km로 가정하여 tkm 단위로 구축된 ecoinvent의 transport LCI 데이터를 이용하였다.

SVE의 기반조성(site foundation)단계에서 부지 내 오피스, 창고 및 SVE정화시스템 기반 등 3개소를 조성하는 것으로 계획하였고 자갈, 콘크리트, 와이어 메시 규격은 오염품셈에 따랐다. 기반조성을 위해 백호 2시간 운전 시 소요되는 연료는 '건설공사표준품셈(이하 "건설품셈")'[13]을 참고하여 산정하였다.

관정설치(well installation)단계에서 1개 추출정 및 2개 관측정, 총 3개의 관정을 설치하는 데 필요한 PVC량은 관정 깊이 × 관정수 × 3.021 kg/m[14]로 산정하였고 모래, 벤토나이트, 모르타르는 오염품셈 규격에 따라 결정하였다. 천공장치(drilling equipment) 사용에 따라 소요되는 연료는 건설품셈에 따랐다.

SVE정화시스템 조립(system assembly)단계에서 SVE정화시스템을 현장에 조립, 연결하는 과정에 소요되는 후렉서블호스, 모래, 콘크리트는 오염품셈에 따랐다. 용접의 경우 건설품셈을 참고하여 기본단위인 100 m로 하였고 ecoinvent 데이터베이스의 welding, gas 데이터베이스를 적용하였다.

SVE시스템 운영(operation) 중 필요한 전기소비량은 오염품셈에 제시된 바가 없어 정화사례에 제시된 전력비를 바탕으로 한국전력 산업용전기요금표[15]의 평균인 kwh당 63원을 적용하여 전기소비량을 예측하였다. 배출가스처리를 위해 필요한 활성탄량은 오염품셈에 제시되지 않아 유류내 대표 휘발성분인 벤젠의 Freudlich 흡착율인 0.152 g/g을 적용하여 예측하였다.[16] ecoinvent데이터베이스에 활성탄 LCI데이터가 없으므로 Bayer 등[17]이 제시한 활성탄제조 단위공정에 따라 추가적으로 LCI를 구축하여 이용하였다.

바이오파일의 각 공정도 SVE와 마찬가지로 '오염품셈' 및 '건설품셈'에 제시된 재료 및 연료를 바탕으로 전과정목록은 작성하였다. 굴착기, 덤프트럭, 타이어롤러 등 운영에 필요한 연료정보와 자갈, 모래, 콘크리트는 건설품셈에 제시된 재료의 단위중량을 참고하여 부피를 무게로 환산하였다. 단지, 부지준비(site preparation)에 필요한 부직포의 경우 폴리프로필렌으로 간주하였고 상용화된 폴리프로필렌재질의 부직포 특성데이타를 이용하여 필요 무게를 산정하였다.[18]

바이오파일의 배출가스 처리에 대해서는 오염품셈에 언급되어 있지 않아 활성탄 흡착공정으로 계획하였다. 바이오파일내 존재하는 TPH중 약 18%가 대표적 휘발성 유기물질이며 이중 50%정도가 휘발에 의해 기상으로 유출된다는 현장데이터를 참고하여 활성탄 필요양을 산정하였다.[19]

2.4. 전과정영향평가(Life cycle impact assessment : LCIA) 방법

전과정목록작성 결과는 Environmental Design of Industrial Products (EDIP) 2003 방법을 적용하여 9개 범주의 환경영향을 평가하였다.[20] 평가범주는 산성화, 생태독성(물), 생태독성(토양), 지구온난화(100년), 인체독성(대기), 인체독성(지표수), 인체독성(토양), 오존생성(인체), 부영양화 등이다. LCI 결과는 EDIP2003방법에 의해 분류화(classification), 특성화(characterization) 및 정규화(normalization)시켜 각 환경영향을 비교 평가하였다.[21]

3. 결과 및 토의

3.1. SVE와 바이오파일 전과정영향평가

Table 4는 SVE와 바이오파일 환경영향범주별 전과정영향평가 결과를 정리한 것이다. 전과정영향평가는 특성화와 정규화 결과를 같이 제시하였다. Fig. 3은 SVE의 전과정영향평가 특성화결과에 대비해 바이오파일 특성화 결과를 %로 도시한 것이다. SVE가 9개 환경영향범주에서 모두 바이오파일에 비해 높은 수치를 나타내었다. Table 4에 제시한 바와 같이 9개 환경영향범주 정규화결과, SVE는 토양매체에 의한 인체독성(Human toxicity-soil) 값이 324 PE (person equivalent)에 이르는 가장 큰 영향을 보였고 바이오파일은 수생태독성(Ecotoxicity-water) 범주에서 가장 큰 59 PE 값을 나타내었다. SVE와 바이오파일, 두 정화방법 공히 토양경로 인체독성(Human toxicity-soil), 수생태독성(Ecotoxicity-water), 지표수경로 인체독성(Human toxicity-surface water), 대기경로 인체독성(Human toxicity-air) 등 4가지 환경영향범주에서 상대적으로 높은 값을 보였다(Fig. 4(a)와 5(a)).

Table 4. Characterized and normalized environmental impacts of SVE and biopile (EDIP2003 method applied)

Environmental impact category	Characterized impact			Normalized impact (PE)[a]	
	SVE	Biopile	Unit	SVE	Biopile
Acidification	3.39E+04	4.86E+03	m^2	15.41	2.21
Ecotoxicity (water)	6.09E+07	2.06E+07	m^3 water	173.01	58.52
Ecotoxicity (soil)	2.80E+05	8.97E+04	m^3 soil	0.29	0.09
GWP100a	5.75E+03	4.32E+03	kg CO_2-eq	0.66	0.50
Human toxicity (air)	1.14E+11	1.55E+10	m^3 air	37.25	5.07
Human toxicity (surface water)	3.24E+06	1.01E+06	m^3 water	62.07	19.35
Human toxicity (soil)	4.11E+04	6.73E+03	m^3 soil	323.62	52.99
Ozone formation (human)	92.5	15.9	person. ppm.h	9.25	1.59
Eutrophication	1.09E+03	183	kg NO_3^--eq	18.79	3.16

[a] Person equivalent

3.2. 각 세부공정별 전과정영향평가

Fig. 4(a)는 각 환경영향범주별 정규화 값을 나타낸 것이다. 앞서 이미 언급한 데로 SVE방법이 가장 큰 영향을 미치는 환경범주는 인체독성(토양)이었다. 인체독성(토양) 값의 구성요소를 살펴보면 운영단계(operation)의 값이 174 PE로 전체 값의 54%를 차지하며, GAC교체 단계(GAC replacement) 값은 143 PE로서 전체 44%를 차지해, 두개 단계가 거의 99%를 차지하였다. 다른 환경영향범주에서도 운영단계와 GAC교체단계가 초래하는 환경영향이 대부분을 차지하고 있다.

Fig. 4(b)는 SVE의 6개 세부공정인 부지내 이동(transport), 시스템기반조성(site foundation), 관정설치(well installation), SVE정화시스템조립(system assembly), 운영(operation), GAC교체(GAC replacement) 단계 별 환경영향 결과를 도시하였다. 운영단계의 정규화 영향 값은 모두 386 PE이며 GAC교체단계의 값은 233 PE로서 두 개 세부공정이 타 공정에 비해 절대적인 우의를 차지하고 있다.

Fig. 5(a)는 바이오파일 전과정영향범주별 정규화 결과 값을 도시하였다. 바이오파일이 가장 큰 영향을 미치는 환경범주는 수생태독성이었다. 수생태독성 값을 구성하는 세부공정을 살펴보면 운영단계가 27 PE (46% 해당), 굴착단계와 복토단계가 동일하게 12 PE로서 각 각 19%씩 차지하며 이동단계도 6 PE로서 9%를 차지하였다.

Fig. 5(b)는 바이오파일 세부공정인 부지 내 이동(transport), 오염토 굴착(excavation), 부지조성(site preparation), 운영(operation), GAC교체(GAC replacement), 복토(backfill)단계 별 정규화 환경영향결과를 구분하여 도시하였다. 운영단계의 정규화영향 값은 80 PE이며 GAC교체단계의 값이 다음으로 18 PE이었다. 굴착과 복토단계가 각 각 17 PE를 보였다. 운영과 GAC교체단계가 환경영향의 대부분을 차지했던 SVE와는 달리 바이오파일은 운영과 GAC교체단계 이외 굴착, 복토 및 이동단계에 고르게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

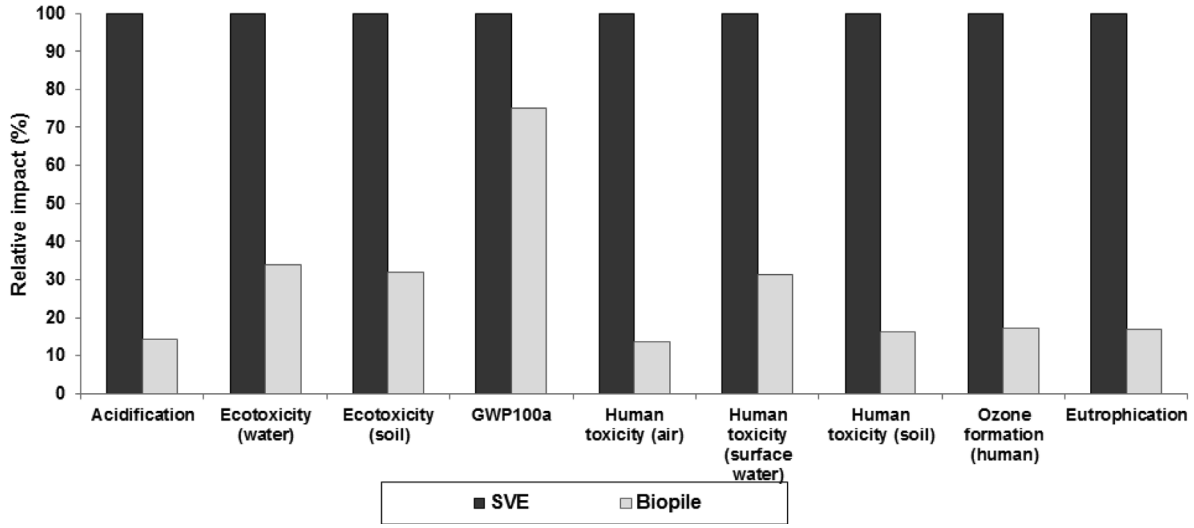

Fig. 3. Relative impacts of biopile compared with SVE. Impact results were normalized by the value of SVE in each environmental category.

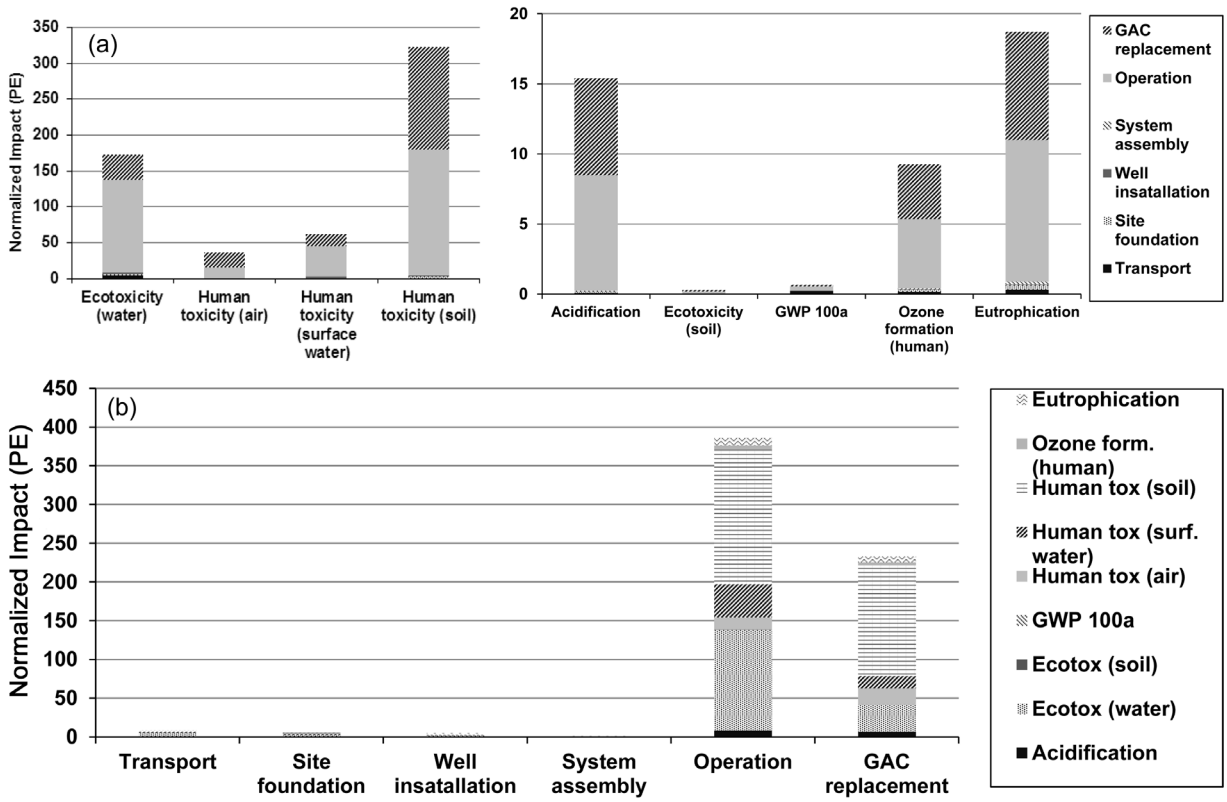

Fig. 4. (a) Normalized impacts in person equivalents (PE) for each stages of SVE remediation technology ; (b) The contribution of different stages of SVE remediation technology to each environmental category.

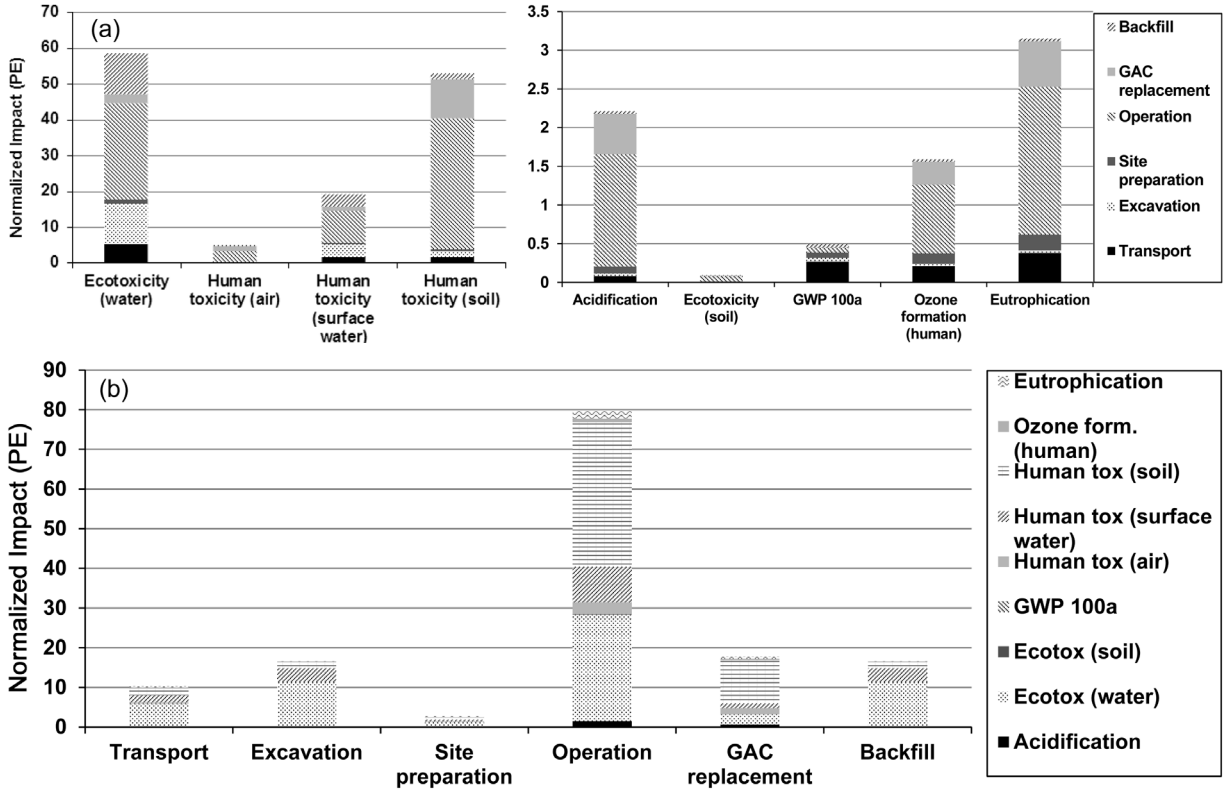

Fig. 5. (a) Normalized impacts in person equivalents (PE) for each stages of biopile remediation technology ; (b) The contribution of different stages of biopile remediation technology to each environmental category.

3.3. 결과해석

SVE와 바이오파일 모두 운영단계에서 초래되는 환경영향이 가장 높은 것으로 나타났다. 운영단계의 세부적 구성요소는 Table 2와 3에 나타낸 바와 같이 전기소비량이다. 대부분의 세부공정은 일시적인 작업이지만 운영에 소요되는 전기는 정화기간 중 지속적으로 공급되어야 하므로 환경영향이 가장 크게 나타날 수 있다. 본 연구에서 입력한 SVE 시스템의 전기소비량은 2.05년 동안 148,748 kwh로서 년간 72,560 kwh/yr이며, 바이오파일은 1.41년 동안 63,700 kwh로서 년간 45,177 kwh/yr이다.

미국의 SVE 시스템 1년 운영에 소요되는 전기는 232,148 kwh/yr[22]에 비하면 본 연구에서 산정한 입력값은 매우 적다. 본 연구에서 사용한 72,560 kwh/yr 전기사용량은 10 hp vacuum blower의 1년 운영시 필요한 전기소비량 71,775 kwh/yr과 유사하다. SVE시스템은 vacuum blower 이외 배기가스처리시스템 등 기타 운영에 추가적인 전기가 소요되는 점을 감안한다면 대부분의 SVE운영시 전기소비량은 본 연구에서 사용한 값보다 높을 것으로 판단된다. 오염품셈의 자료를 바탕으로 예측한 전기소비량에 대한 불확실성이 높은 것으로 보인다. 그리고 SVE방법이 바이오파일방법에 비해 전반적으로 환경영향이 크게 나타날 수 있음을 다시 한번 확인할 수 있다.

Table 5는 LCI에서 산정된 SVE와 바이오파일의 이산화탄소배출량을 비교하였다. SVE의 전과정에서 이산화탄소 발생량은 360 ton이었으며 바이오파일은 52.1 ton으로 산정되었다. SVE의 이산화탄소발생량이 바이오파일에 비해 높게 나타났다. 이산화탄소발생량은 지구온난화(GWP 100a) 환경영향평가 범주에 해당되나 Fig. 4와 5의 정규화 결과에 도시한 바대로 타 환경영향보다 적은 값을 보였다. 미국의 경우 1개 SVE시스템 1년 운영시 전기소비에 의해서만 발생되는 이산화탄소는 년간 144,000 ton 정도로 산정되었다.[22] 이는 본 연구에서 예측하여 사용한 전기소비량이 적었으므로 상대적으로 이산화탄소 발생량도 적어진 것으로 판단된다.

본 연구의 오염토양 정화공정에 대한 전과정평가결과 SVE보다 바이오파일이 훨씬 환경영향이 적은 것으로 나타났다. 두 공정 모두 운영 중 소비되는 전기에 의한 환경영향이 가장 크므로 오염토양 정화시스템 운영 중 전기소비를 최소화 할 수 있는 운영방안이 필요할 것으로 분석되었다.

Table 5. Carbon dioxide production of SVE and biopile remediation technology (unit: kg)

Category and subcategory[a]	SVE	biopile
Carbon dioxide[air_high population density]	177,000	26,600
Carbon dioxide[air_low population density]	174,000	24,500
Carbon dioxide[air_unspecified]	9,370	987
Carbon dioxide[air_lower stratosphere + upper troposphere]	0.00173	0.00522
Total	360,000	52,100

[a] Ecoinvent category

전과정평가를 수행하기 위해서는 가능한 구체적인 시스템 구성재료, 에너지 및 운영자료가 필요하다. 그러나 본 연구의 전과정평가는 '오염토양 복원작업 품셈자료 산출근거 마련을 위한 연구'[5]에서 제시된 SVE와 바이오파일 시스템 구성만을 중심으로 수행되어 많은 구성 재료 및 세부공정이 생략되어 있다. 정화공정 운영에 소비되는 전기소비량 및 이산화탄소발생량 등이 외국의 유사한 규모의 사례에 비해 상당히 적은 점은 이를 뒷받침한다.

서론에서 언급한 바와 같이 우리나라에서는 특정토양오염관리시설만 1년에 200여개가 넘는 오염부지가 양상되고 있으며 이에 따른 정화작업이 이루어지고 있다. 오염토양 정화는 비교적 장기간 많은 에너지와 물질이 투입되는 점을 감안한다면 이산화탄소발생량 감축과 녹색성장에 대한 사회적 요구에 발맞추어 오염토양정화공정에 대한 체계적인 분석과 연구가 필요한 것으로 예상된다. 특히 운영중 전기소비량은 전과정영향평가 및 이산화탄소배출량 결과에 큰 영향을 미치므로 앞으로 보다 신뢰성 높은 전과정평가를 위해서 전기사용량에 대한 데이터 수집 및 확보가 가장 필요한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 '오염토양 복원작업 품셈자료 산출근거 마련을 위한 연구'[5]에 제시된 SVE와 바이오파일 시스템 구성을 바탕으로 두 오염토양 정화공정이 토양 1,000 m^3 내 TPH를 95% 제거하는 전과정을 LCA기법을 통해 평가하였다. 평가결과 도출한 결론은 다음과 같았다.

1) 전과정영향평가 결과 SVE가 9개 환경영향범주에서 모두 바이오파일에 비해 높은 환경영향수치를 나타내었다.

2) SVE와 바이오파일, 두 정화방법 공히 토양경로 인체독성(Human toxicity-soil), 수생태독성(Ecotoxicity-water), 지표수경로 인체독성(Human toxicity-surface water), 대기경로 인체독성(Human toxicity-air) 등 4가지 범주에서 상대적으로 높은 환경영향값을 보였다. SVE방법이 가장 큰 영향을 미치는 환경범주는 인체독성(토양)이었으며 바이오파일이 가장 큰 영향을 미치는 환경범주는 수생태독성이었다.

3) SVE방법의 세부 공정별 환경영향을 분석한 결과 운영단계에서 전체 환경영향의 60%를 초래하였고 GAC교체단계가 36%를 초래하는 등 두 개 단계가 전체 환경영향의 96%를 차지하였다. 가장 큰 비중을 차지하는 세부공정은 운영중 사용된 전기에 의해서였다. 바이오파일 세부 공정별 환경영향 분석결과에서도 운영단계가 전체영향의 55.7%를 차지하였고 GAC교체단계가 12.4%를 차지하였다. 바이오파일에서도 역시 전기사용에 따른 환경영향이 가장 크게 나타났다.

4) SVE 와 바이오파일, 두 공정 모두 운영단계에서 소비되는 전기에 의한 환경영향이 가장 크므로 오염토양 정화

시스템 운영 중 전기소비를 최소화 할 수 있는 운영방안이 가장 필요한 것으로 판단된다.

5) 오염토양 정화는 비교적 장기간 많은 에너지와 물질이 투입된다. 최근 이산화탄소발생량 감축과 녹색성장에 대한 사회적 요구에 따라 오염토양정화공정에 대한 체계적인 분석과 연구가 필요한 것으로 예상된다. 특히 운영중 전기소비량은 전과정영향평가 및 탄소배출량 결과에 큰 영향을 미치므로 앞으로 보다 신뢰성 높은 전과정평가를 위해서 전기사용량에 대한 데이터 수집 및 확보가 가장 필요한 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국연구재단 기본연구지원사업(2010-0007799)과 군산대학교 2010 국외연수지원에 의해 수행되었습니다.

KSEE

참고문헌

1. 환경부, 토양보전기본계획(2010~2019), (2009).
2. 환경부, 오염토양 정화방법 가이드라인(2007).
3. USEPA, Superfund Green Remediation Strategy, Office of Solid Waste and Emergency Response(2010).
4. Lemming, G., Hauschid, M. Z. and Bjerg, P. L., "Life cycle assessment of soil and groundwater remediation technologies: literature review," *Int. J. Life Cycle Assess.*, **15**, 115~127(2010).
5. 환경부, 오염토양 복원작업 품셈자료 산출근거 마련을 위한 연구(2003).
6. 환경부, 토양오염위해성평가지침(2006).
7. Johnson, P. C., Stanley, C. C., Kemblowski, M. W., Byers, D. L. and Colthart, J. D., "A practical apporach to the design, operation, and monitoring of in situ soil venting systems," *Ground Water Monitor. Rem.*, **10**, 159~178(1990).
8. Martins, S. and Gregory, S, "Effects of Natural Environmental Changes on Soil-Vapor Extraction Rates," In Proceedings of Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Montery, CA, United States(2006).
9. 정승우, 안윤주, 이병진, 토양복원공학, 동화기술(2009).
10. Chaineau, C. H., Yepremian, C., Vidalie, J. F., Ducreux, J. and Ballerini, D., "Bioremediation of a crude oil-polluted soil: biodegradation, leaching and toxicity assessments," *Water, Air, Soil Pollut.*, **144**, 419~440(2003).
11. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, ecoinvent LCI data v. 2.1(2009).
12. Leiden University, CMLCA software v.5.1(2010).
13. 국토해양부, 한국건설기술연구원, 건설공사표준품셈(2011).
14. U.S. Air Force, Sustainable Remediation Tool(2010).
15. 한국전력, 산업용 전기요금표(2010).
16. U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design: Adsorption Design Guide(2001).
17. Bayer, P., Heuer, E., Karl, U. and Finkel, M., "Economical and ecological comparison of granular activated carbon (GAC) adsorber refill strategies," *Water Res.*, **39**, 1719~1728(2005).
18. 영신산업, 토목섬유 product info, www.토목용부직포.com
19. Gallego, J. L., Sierra, C., Permanyer, A., Pelaez, A.I., Menendez-Vega, D. and Sanchez, J., "Full-scale remediation of a Jet fuel-contaminated soil: assessment of biodegradation, volatilization, and bioavailability," *Water, Air, Soil Pollut.*, DOI: 10.1007/s11270-010-0579-6(2010).
20. Hauschild, M. Z., Potting J., Spatial differentiation in life cycle impact assessment - the EDIP-2003 methodology; Environmental news No. 80 2005; Environmental Protection Agency, Danish Ministry of the Environment(2005).
21. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods Data v2.2(2010).
22. USEPA, Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions at Superfund Cleanups, Office of Superfund Remediation and Technology Innovation(2008).