

## 녹색정화: 저탄소 토양·지하수오염 정화를 위한 선택

최현미·이진용\*  
강원대학교 지질학과

### Green Remediation: Choice for Low CO<sub>2</sub> Emission in Soil and Groundwater Remediation

Hyun-Mi Choi · Jin-Yong Lee\*  
Department of Geology, Kangwon National University

#### 1. 서 론

국내외적으로 치솟는 유가, 에너지 자원의 수급불안정 및 지구온난화에 대한 심각한 우려로 신재생에너지 개발 및 이용에 큰 관심을 보이고 있다(이진용 등, 2008; Omer, 2008). 또 최근에 정부에서는 이런 기후변화 및 에너지 위기 극복을 위해 저탄소 녹색성장(Low Carbon, Green Growth)이라는 구호아래 국가발전의 새로운 패러다임을 제시하였다(박철곤, 2008). 이에 따라 우리나라 총 에너지 중 신재생에너지 사용비율을 2030년까지 11%로 상향하는 의욕적인 목표를 제시하기도 하였다(Lee, 2008). 그러나 핵심은 구호나 목표만으로 달성되는 것이 아니라 기본적으로 모든 사회부문(환경, 경제, 일반사회)에서 에너지 소비를 줄이고 에너지 효율을 향상시키는 것이다.

한편 국내에서는 반환된 미군기지의 정화사업이 활발히 추진 중에 있다. 이들 기지의 대부분은 경기도 및 서울권역에 분포하며 강원도에 한 곳(캠프페이지)이 분포한다. 관련 당국 및 정화 대행기관(한국농촌공사 및 환경관리공단)이 발표한 이들 기지에 대한 오염 토양 및 지하수 정화공법은 대체로 토양경작(land-farming), 열탈착(thermal desorption), 토양세척(soil washing) 및 굴착처리(collection and treatment)로 알려진다. 이들 정화공법들은 해당부지의 수리지질학적 특성에 따라 다르기는 하지만 국내외적으로 검증받은 기술이며 적용성이 높다고 할 수 있다. 그런데 이런 기존 기술(conventional technologies)과 이에 수반되

는 부대시설 등은 모두 기존의 화석연료 기반의 전기 및 유류(특히 열적공법)에 의존하고 있어 순환경이득(net environmental benefit) 측면에서 상대적으로 효율성이 높지 않다(U.S.EPA, 2008). 여기서 순환경이득이란 총합적 개념으로 전순환과정(life cycle)에서 오염정화를 통해 얻는 환경적 이득과 환경정화에 사용된 경제·환경자원(전기, 연료, 사용한 물 등)을 총체적으로 고려한 이득을 말한다.

그러므로 오염토양·지하수 정화사업의 전과정(오염조사, 정화설계, 부대설비, 정화공법을 포함)에 있어 에너지 소비를 줄이고 효율을 극대화하는 전략이 필요하며, 기존의 화석연료 등의 고비용·고에너지를 사용하는 오염 토양·지하수 정화사업을 유비쿼터스 자원인 재생에너지(풍력, 태양, 지열 등) 등을 이용한 친환경 저탄소배출 오염정화사업(Green Remediation)으로 탈바꿈시킬 필요가 있다. 미국환경청(U.S.EPA)은 2006년 통합적 환경관리계획에 따라 토양·지하수 오염정화사업에 있어 정화시스템 및 부대시설의 최적화를 통해 에너지효율 극대화하고 또 정화시스템에 풍력, 매립지가스, 태양광, 지열에너지를 이용하는 이른바 그린정화사업을 중점적으로 추진하고 있다(U.S.EPA, 2006). 우리의 경우에도 향후에는 통합적 관점에서 오염조사과정, 정화공법, 부대시설의 에너지 효율을 극대화하고 지역기반의 재생에너지(지열 등)와 정화활동으로 산출되는 미활용에너지(매가스, 배출 지하수열 등)를 활용한 그린 유비쿼터스 정화전략의 수립이 필요하다.

\*Corresponding author : hydrolee@kangwon.ac.kr

원고접수일 : 2008. 10. 7 심사일 : 2008. 10. 17 게재승인일 : 2009. 1. 31  
질의 및 토의 : 2009. 4. 30 까지

본 기술자료에서는 최근의 미국환경청의 동향과 사례를 중심으로 토양·지하수 정화사업에 있어 녹색정화(Green Remediation)가 무엇이고 구체적으로 어떤 노력들이 있는지 살펴보고 향후 국내의 오염토양·지하수 정화사업에 대한 시사점을 찾으려 하였다. 본 기술자료 내용(본론)의 대부분은 미국환경청의 최신자료(Dellens, 2007; Gill, 2007; Pachon, 2007, 2008; U.S.EPA, 2008)에서 온 것이다.

## 2. 본 론

### 2.1. 녹색정화(Green Remediation)의 개념

대부분 기존의 토양·지하수 오염정화사업의 경우 우선적으로 가용한 정화비용, 기간 및 정화목표를 주요하게 고려한다. 또 전통적인 정화사업의 경우 수자원보호 혹은 복원, 오염물질 위해의 제거 및 개발가능한 상태로의 복원 등 부지내부의 환경적 관점의 최종적 결과에 초점이 맞추어져 있다(Scandura, 2008). 이때 정화과정에서 부지내·외부의 자연자원(용수, 정화설비의 배관, 기계, 건물 등이 모두 자연자원으로 만든 것임)을 추출·이용하며 사용한 재료를 항상 재활용하는 것은 아니며 또 부지내의 작업과정에서 에너지 사용을 크게 고려하지 않는다. 이런

이유로 정화작업(갖은 차량출입, 현장설비설치, 장기간의 정화운영)에서 온실가스(greenhouse gas)와 다른 유해물질 등이 배출되기도 한다.

그러나 녹색정화에서는 상기한 최종결과에 목표를 맞춘다는 측면에서는 동일하나 부지 외부에 대한 환경적 영향도 평가하며 기존의 정화사업(예를 들어 미국의 RCRA나 CERCLA에 규정한 정화)에서 고려치 않은 에너지 및 원재료(raw materials)의 소비, 온실가스와 유해물질의 배출 및 정화 전체기간에 걸친 영향 등을 총체적으로 고려한다(Scandura, 2008). 즉 녹색정화는 정화사업의 순환경이득을 극대화하기 위한 정화과정의 모든 단계에 대하여 환경영향을 종합적으로 고려하는 행위(practice)를 말한다(Dellens, 2007; Gill, 2007; U.S.EPA, 2008).

실제로 정화작업은 환경과 자연자원에 대해 부정적인 영향이 있을 수도 있다(Dellens, 2007; Scandura, 2007; Table 1). 예를 들어 정화공법에 따라 사용되는 연료연소로부터 온실가스가 배출되며 정화작업에 의해 부지의 수질이 영향을 받기도 한다. 현재 운영 중인 수많은 양수처리(Pump and Treat)시스템들은 에너지 가격이 높지 않을 때 설계되고 설치된 것이며 설계자들은 이와 같은 비재생(non-renewable) 에너지를 사용함으로써 생기는 환경적인

**Table 1.** Potential impacts of remediation process (Scandura, 2008)

Stressor	Affected media	Mechanism/effect
<i>Substance release and production</i>		
Airborne NOx and SOx	Air	Acid rain/photochemical smog
Chloro-fluorocarbon vapors	Air	Ozone depletion
Greenhouse gas emissions	Air	Atmosphere warming
Airborne particulates/toxic vapors/gases/water vapor	Air	General air pollution/toxic air/ humidity increase
Liquid waste production	Water	Water toxicity/sediment toxicity /sediment
Solid waste production	Land	Land use/toxicity
<i>Thermal releases</i>		
Warm water	Water	Habitat warming
Warm vapor	Air	Atmospheric humidity
<i>Physical disturbances and disruptions</i>		
Soil structure disruption	Land	Habitat destruction/soil infertility
Noise/odor/vibration	General environment	Nuisance and safety
Traffic	Land	Nuisance and safety
Land stagnation	Land	Remediation time, cleanup efficiency, re-development
<i>Resource depletion and gain (recycling)</i>		
Petroleum (energy)	Subsurface	Consumption
Mineral	Subsurface	Consumption
Construction material	Land	Consumption
Land and space	Land	Impoundment
Surface and groundwater	Water	Impoundment
Biology resources	Land	Species disappearance

영향을 고려하지 않았다. 이런 이유로 현재에는 대체에너지(alternative energy)를 이용하여 양수처리(P&T) 및 토양증기추출(SVE) 시스템에 전력을 공급하고 온실가스 배출을 줄이며, 정화작업에 사용되는 증기계에 바이오연료 등을 이용하는 전략을 세우고 있다(Dellens, 2007). 또 유류오염 정화에서 발생하는 배가스(off gas)를 연소하여 단순배출하지 않고 에너지를 회수하기도 하고, 오염부지의 지열과 처리된 지하수의 열을 이용하여 부대시설의 냉난방을 할 수도 있다.

녹색정화는 상기와 같이 복원공정에 대한 에너지 및 환경적 고려뿐만 아니라 오염조사 등의 과정에 대한 고려도 포함한다. 오염조사에 사용되는 장비, 기계, 차량, 연료 모두 에너지 및 환경의 고려대상이다. 어떤 재질 및 에너지 효율의 조사장비를 사용하느냐에 따라 전순환적(life cycle) 환경이득에 차이가 발생한다. 또 조사 시 발생하는 폐기물(시료 채취 후 남은 토양, 관측정 설치시 사용하는 드릴링 유체, 관정에서 퍼징한 물, 사용한 일회용 장갑, 기기 등)양도 중요한 고려요소이다.

**2.2. 녹색정화의 핵심요소(Core Elements)**

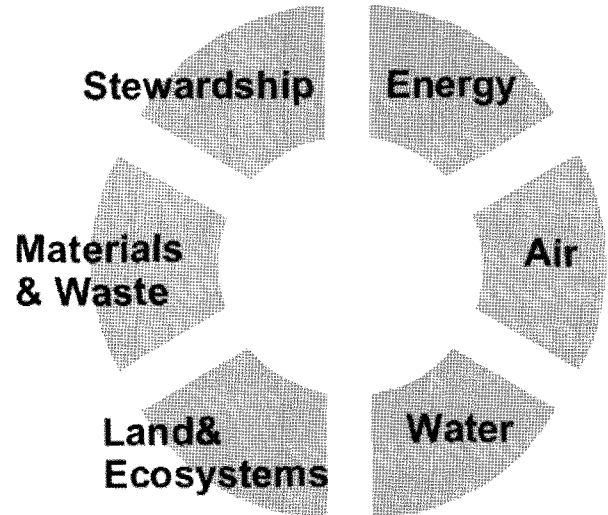
녹색정화는 오염부지를 정화(remediation)하고 재생(revitalization)함에 있어 환경적 그리고 에너지 족적(footprints) 혹은 영향을 최소화하는 효율적인 방법이다(U.S.EPA, 2008). 지속가능한 실천(sustainable practices)을 통해 복원프로젝트의 핵심요소를 평가하고, 녹색정화의 여러 가지 전략을 통해 얻을 수 있는 부지 특성적 환경이득을 비교하며, 또 가능한 전략들의 환경적 득실(trade-offs)을 평가한다. Fig. 1은 녹색정화의 6가지 핵심요소를 보여준다.

**2.2.1. 정화시스템의 에너지 수요**

녹색정화에서는 정화목표를 달성할 수 있으면서도 부지 외부의 에너지 공급을 최소화 혹은 제로화하는 최적화된 소극적 에너지 기술(passive-energy technologies)의 사용을 권장한다. 즉 에너지효율이 뛰어난 설비들을 찾고 또 기기들을 최적의 에너지 효율상태를 유지한다. 설치된 정화시스템 설비에 대해서도 정기적으로 효율을 점검한다. 그리고 가능한 기존의 설비시설의 전기수요를 충족할 수 있는 재생에너지(renewable energy) 시스템을 사용한다(Elmore and Gallagher, 2005).

**2.2.2. 대기배출**

녹색정화에서는 다량의 연료를 소비하는 중장비의 사용



**Fig. 1.** Core elements of green remediation for a cleanup project (U.S.EPA, 2008).

을 억제한다. 또 대형 설비를 운전할 경우 가능한 보다 청정한 연료를 사용하고 기존의 디젤엔진을 개량한다. 이를 통해 독성 유해물질(오존, 입자물질, 일산화탄소, 이산화질소, 이산화황, 납)의 대기배출을 최소화하며 오염물질 및 분진 발생도 억제한다. 실제로 자유상유류 추출을 위해 다상추출정화시스템(multi-phase extraction system)을 설치하고 5년간 관리한다고 하였을 때 관련차량(디젤)이 사용하는 연료만도 총 30,000 갤런(1갤런 = 3.87 L)이며, 대기로 배출되는 이산화탄소가 약 600,000 파운드(1 파운드 = 0.45 kg)에 이른다(Table 2). 이는 약 62 에이커(1 에이커 = 4,047 m<sup>2</sup>)의 소나무 혹은 전나무 숲이 빨아들이는 탄소량과 맞먹는다(U.S.EPA, 2008). 그러므로 이런 디젤차량을 청정연료 차량으로 대체하거나 혹은 하이브리드(hybrid) 차량으로 바꾼다면 이산화탄소 배출량을 크게 줄일 수 있다.

**2.2.3. 용수 수요 및 수자원에 대한 영향**

녹색정화는 담수(fresh water)의 사용을 최소화하며 일상적인 운영과 정화처리 시 용수의 재활용(reuse)을 극대화한다. 또 관개 등을 하기 위해 처리수를 재활용하며 복원과정에 식생이 필요한 경우 물을 적게 필요로 하는 현 지식물을 이용하여 물 공급을 최소화한다. 또 영양분(nutrient) 공급이 필요한 정화작업 시에도 이를 최소화하여 주변 수체에 영향을 방지한다.

**2.2.4. 토지 및 생태계 영향**

녹색정화에서는 토지를 굴착하는 등의 파괴적(invasive)

**Table 2.** Mobile sources typically employed during a five-year multi-phase extraction treatment project (U.S.EPA, 2008)

Field machinery and vehicles used for a typical multi-phase extraction project	Fuel consumption (gallons)	CO <sub>2</sub> emission (pounds)
<i>Site preparation:</i> one Bobcat with intermittent use of flatbed trailer-truck or dump truck operating for 26 weeks	8,996	199,711
<i>Well construction:</i> truck-mounted auger system installing ten 75-foot extraction wells over 30 days	612	13,586
<i>Routine field work:</i> two pickup trucks for site preparation, construction, treatment system monitoring, sampling, and repair over five-year duration	19,760	383,344
Total for project life	29,368	596,641

현장기술의 적용을 줄이며 미생물학적 공법(bioremediation)과 식물정화(phytoremediation) 등을 초기 혹은 말기의 정화공법으로 우선적으로 고려한다. 또 토양과 동식물 서식처의 교란을 최소화하며 오염원과 오염운(contaminant plume)에 대한 충분한 제어를 통해 오염물질의 생물학적 이용성(bioavailability)을 줄인다. 또 정화작업 중에 소음과 조명(lightning) 교란을 최소화한다.

#### 2.2.5. 물질자원 소비 및 폐기물 발생

녹색정화에서는 폐기물의 발생을 최소화하는 기술을 선택하며 가능한 부지에서 사용한 재료를 재사용토록 한다. 또 부지 내외의 자연자원의 굴착과 제거를 최소화하며 폐기물 발생을 줄이기 위해 적정량의 시료를 채취하는 도구를 사용한다.

#### 2.2.6. 장기적 관리계획

녹색정화에서는 기후변화를 유발시키는 이산화탄소, 일산화질소, 메탄 등의 발생을 억제하며 부지에 적합한 탄력적인 관리방안을 적용한다. 장기간의 정화와 향후 토지 개발사유를 위해 가능한 재생에너지 시스템을 도입한다. 또 장기간 모니터링을 위해 소극적 시료채취 도구를 사용한다. 장기간의 정화활동을 안정적으로 보장하기 위하여 지역사회의 참여와 감시를 허용한다.

### 2.3. 정화공법과 이산화탄소 배출

녹색정화에서 에너지 수요는 핵심요소 중의 하나이다. 정화사업에서 화석연료의 사용을 줄이기 위해서는 처리시스템을 최적화하고 자연 재생에너지원을 이용한 대체에너지를 사용할 필요가 있다. 적극적인 에너지(active energy) 시스템은 정화(정화설비, 기계)를 위해 외부의 전력을 이용한다. 2007년 미국 전기의 경우 약 70%가 화석연료 발전소에서 생산된 것이다. 전력생산은 미국의 이산화탄소 배출의 가장 큰 원인이며 전체의 약 1/3을 차지한다

(U.S.EPA, 2008).

미국의 NPL(국가우선목록) 사이트에서 가장 흔하게 적용된 고에너지의존(energy intensive) 정화공법은 양수처리(pump and treat), 열탈착(thermal desorption), 다중상추출(multi-phase extraction), 공기분사법(air sparging)과 토양증기추출법(SVE)이다. 미국 연방정화기술회의(FRTR) 자료를 바탕으로 환경청(U.S.EPA)의 고형폐기물 긴급대응부(OSWER)가 추정된 결과에 의하면 NPL 사이트에서 2008~2030년까지 이 다섯 가지 정화공법으로 약 140억 KWh의 전력을 소모할 것으로 보고 있다(U.S.EPA, 2008; Table 3). 또 미국에서 1 kWh의 전력을 생산하려면 1.37 파운드의 이산화탄소가 발생하므로, NPL 사이트에서 2008~2030년에 이 다섯 가지 기술을 적용한다는 것은 곧 9.2백만미터톤(1미터톤 = 1,000 kg)의 이산화탄소를 배출하는 것을 의미한다(U.S.EPA, 2008; Table 4).

상기한 바와 같이 정화처리시스템의 자연자원 소비와 에너지 소비를 줄려면 처리시스템의 효율을 정기적으로 점검하고 탄력적으로 수정하여야 한다. 정화전략을 수립할 단계에서부터 정화의 흔적(영향) 즉 온실가스 배출, 탄소제거능, 물 사용 등을 고려해야 한다. 기계설비에 있어서 최적의 크기와 용량을 선정하고 과다설계하지 않도록 해야 한다. 또 기계에 있어서도 장비제원 등을 확인하여 에너지 효율, 연료소모, 물사용량 등을 검토하는 것이 필요하다(고에너지효율 및 친환경 장비 사용).

이미 알려진 바와 같이 양수처리법에 있어서 계속적으로 동일 양수량으로 차집·처리하는 것보다 다단계 혹은 펄스방식으로 하는 것이 일반적으로 오염물질 처리 효율이 뛰어나며 에너지 비용측면에서도 그러하며 자동제어시스템을 통해 보다 에너지를 절감할 수 있다(U.S.EPA, 2008). 흔히 자동제어시스템은 에너지부하의 변동이 심한 경우에도 효과적으로 적용된다(이진용 등, 2008). 특히 양수량과 양수펌프를 과다설계하지 않도록 최적화하는 것이 중요하다(U.S.EPA, 2004, 2005).

**Table 3.** Technologies used for Superfund cleanups often involve energy intensive components (U.S.EPA, 2008)

Technology	Estimated energy annual average (kWh × 10 <sup>3</sup> )	Total estimated energy use in 2008~2030 (kWh × 10 <sup>3</sup> )
Pump & Treat	489,607	11,260,969
Thermal Desorption	92,919	2,137,126
Multi-Phase Extraction	18,679	429,625
Air Sparging	10,156	233,599
Soil Vapor Extraction	6,734	154,890
Technology Total	618,095	14,216,209

**Table 4.** Estimated CO<sub>2</sub> emissions from use of five types of cleanup technologies at NPL sites for 2008~2030 (U.S.EPA, 2008)

Technology	Estimated CO <sub>2</sub> emissions annual average (metric tons)	Total estimated CO <sub>2</sub> emissions in 2008~2030 (metric tons)
Pump & Treat	323,456	7,439,480
Thermal Desorption	57,756	1,328,389
Multi-Phase Extraction	12,000	276,004
Air Sparging	6,499	149,476
Soil Vapor Extraction	4,700	108,094
Technology Total	404,411	9,301,443

**Table 5.** Alternative energy costs (Dellens, 2007)

Energy Source	Applications	Cost (generating capacity)	Cost (use)	U.S. Production
Solar	P&T, SVE, data collection, irrigation, general energy production	\$8-\$10 per watt	\$0.04-0.07 per kWh	120 MW (PV)
				2,339 MW (CSP)
				198 MW (solar heating)
Wind	P&T, SVE, general energy production	\$2-\$4 per watt	\$0.20-0.30 per kWh	11,961 MW
Landfill gas	General energy production	\$2-\$3 per watt	\$0.07-0.09 per kWh	1,195 MW
Biofuels	Equipment/vehicle operation	\$1.04 per gallon	\$3.31 per gallon	1.39 billion gallons per year

한편 앞에서 살펴본 바와 같이 가장 일반적으로 사용되는 정화공법이 가장 에너지 소모적인 것으로 보인다. 그렇다고 이와 같이 오염물질 처리효율이 상당 정도 입증된 공법을 버리고 당장 다른 공법을 찾을 것을 요구하지는 않는다. 다만 현행의 공법 내에서도 최적화와 재생에너지를 이용한 동력공급을 통해 에너지 절감을 유도할 수 있다.

**2.4. 정화부지의 신재생에너지 이용**

기존의 토양·지하수 정화시스템의 경우 대부분 외부의 전력에 의존하고 있다. 미국의 경우 다양한 재생에너지를 정화시스템(지금까지는 전면적 적용보다는 일부 시설에 부분적으로 도입)에 도입하여 에너지 소비절감과 환경친화성을 높이고 있다(Dellens, 2007). 현재까지 적용된 재생(혹은 대체)에너지는 태양, 풍력, 매립지가스, 바이오연료 등이다. Table 5는 이들 에너지원의 비용비교를 보여준다.

태양에너지의 경우 열이나 빛의 형태로 에너지를 포집하여 다른 형태 예를 들어 전기 등으로 전환하여 사용한다. 현재 정화부지에 적용된 대부분의 태양에너지 이용은 소규모 펌프나 모니터링시스템의 전력을 태양광(photovoltaics: PV)으로 공급하는 것이다. 풍력은 바람의 운동 에너지를 기계적 혹은 전기에너지로 전환하여 사용한다. 정화부지의 경우 대형의 풍력단지를 조성하는 것이 아니라 100 kW 이하의 소규모 터빈을 설치한다. 정화부지에 이용되는 풍력터빈의 설치비용은 10 kW급이면 2,400~3,000 달러/kW이며, 약간 규모가 큰 10~100 kW급이면 1,500~2,500 달러/kW 정도이다(Dellens, 2007).

매립지가스의 경우 매립지에서 고체폐기물의 분해로부터 발생하며 많은 정화대상부지에 매립지가 있다. 일반적으로 매립지 가스의 대부분은 메탄(CH<sub>4</sub>)과 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)이며 이들은 주요한 온실가스로 기후변화의 원인물질이다. 채집관정 등을 통해 매립지 가스를 포집하여 정화부지의 에너지원(전기생산, 직접이용, 열에너지 등)으로

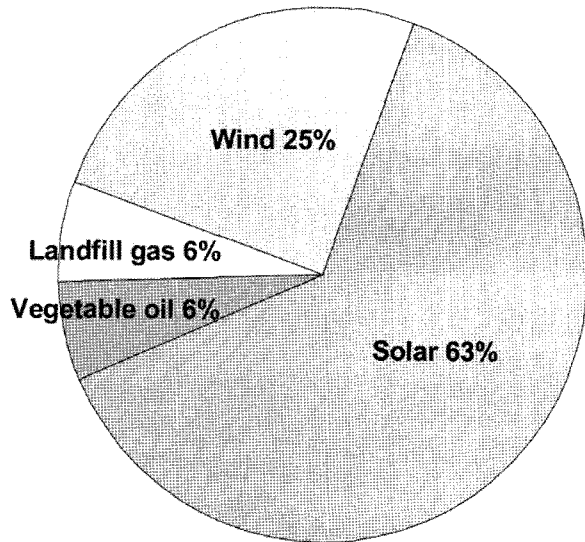


Fig. 2. Alternative energy sources at 15 remediation sites (Dellens, 2007).

활용할 뿐만 아니라 온실가스 배출도 줄일 수 있다. 한편 정화부지에서 중장비나 설비운영을 위해 사용하는 디젤연료 대신 바이오디젤이나 식물오일(vegetable oil)을 사용할 수 있다. 또 바이오디젤과 일반적인 디젤을 혼합하여 사용하는 것도 고려할 수 있다. 그러나 2007년 3월 기준으로 바이오디젤의 단가는 기존의 디젤보다 약 26%가 더 비싸다(Dellens, 2007). 물론 혼합유의 경우 이보다 약간 가격이 하락한다. 지금으로서는 환경적 이득은 있으나 상대적으로 고비용이 문제가 될 수 있으며 이러한 연료가 우리나라에서 법적으로 허용되는지 하는 문제가 남아있다.

한편 미국의 수퍼펀드 사이트 등 15개 정화부지의 신재생 혹은 대체에너지의 활용현황을 살펴보면 태양에너지 이용이 가장 많았고 그 다음으로 풍력에너지의 활용이 많았다(Fig. 2). 15개 정화부지 중 7개 부지(4곳: 태양에너지, 2곳: 풍력, 1곳: 풍력과 태양에너지)에서 양수처리(pump and treat)시스템의 동력공급을 위해 대체에너지를 사용하였다(Fig. 3). 풍력과 태양에너지를 이용해 전력을 생산하여 오일회수용 혹은 지하수양수용 펌프를 가동하거나 혹은 기계적 에너지(풍력)를 직접 이용하였다.

또 한 부지(사바나강 사이트)에서는 토양증기추출시스템(SVE)에 동력을 공급하기 위해 태양에너지를 이용하였다. 토양층(불포화대)에 공기를 추출 혹은 주입하기 위하여 이용되는 진공블로어(vacuum blower)의 전력을 태양광으로 공급하였다. 한편 태양광이 없는 경우에는 수동적 토양증기추출법(passive SVE; U.S.DOD, 2006)을 즉 대기과 지중의 기압차를 이용하여 통풍(venting)을 수행하였다. 정화시스템에 신재생에너지를 적용하는 경우 외에 정

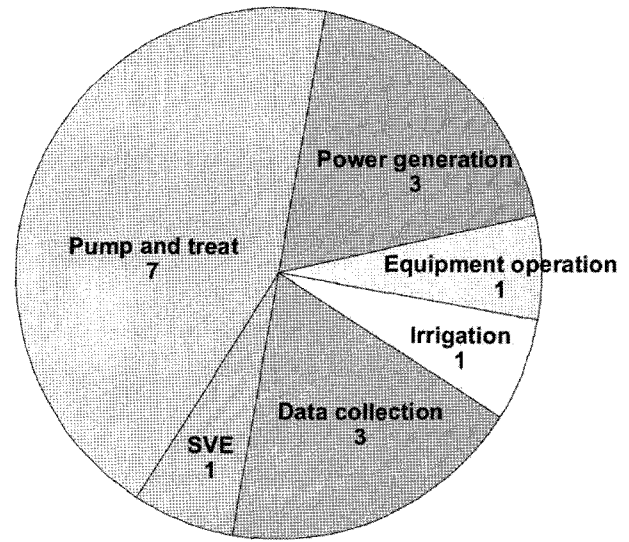


Fig. 3. Usage of alternative energies at 15 remediation sites (Dellens, 2007).

화부지에서 자료수집 시스템(data collection system)에 적용하기도 한다. 이 경우에는 정화시스템에 비해 적은 에너지가 필요하다. 예를 들어 태양광을 이용하여 정화부지의 지하수내 할로젠화합물의 농도를 자동측정하고 이를 무선으로 자동 송신할 수 있다. 이와 같은 태양광 이용 지하수모니터링시스템은 지하수위, 지하수온, 전기전도도 및 오염물질의 농도 등을 효과적으로 관측할 수 있다(Dellens, 2007).

한편 미국환경청의 여러 사례에서는 보고되지 않았지만 국내에서 활용성이 있는 것이 지열에너지이다. 특히 천부 지열에너지(지중열 및 지하수열)는 국내에서도 이미 상당수 건물의 냉난방 및 급탕(온수) 등에 사용하는 등 상업화가 빠르게 진행되고 있다(이진용 등, 2008; Lee, 2008). 정화부지의 부속시설(현장사무실, 실험실과 기계실 등)의 냉난방을 수직 혹은 수평밀폐형 지열히트펌프시스템을 이용하여 할 수 있으며 또 양수처리한 지하수를 바로 방류할 것이 아니라 지하수열을 회수할 수도 있다. 하지만 저온 지열의 경우 전력을 생산하여 직접 정화시설에 공급하는 것은 무리가 있을 것으로 보이나 상기한 냉난방 및 급탕만으로도 상당한 에너지 절감 및 환경개선 효과가 있을 것으로 사료된다. 그러나 아직 오염정화부지에 지열에너지가 적용된 사례는 국내외적으로 보고된 바는 없다. 이를 위한 관심과 연구 및 기술개발(R&D)이 필요하다.

### 3. 결 론

우리는 본 기술자료에서 녹색정화의 개념과 일부 사례

를 살펴보았으며 이를 효과적으로 이용하기 위한 방법을 모색하였다. 녹색정화는 토양·지하수 정화처리과정에서 발생할 수 있는 2차적 환경파괴를 극소화하는 것이며 그 핵심은 소극적 에너지 기술의 사용, 유해물질 대기배출의 극소화, 폐기물의 최소화와 자원 재활용의 활성화, 생태계 비파괴적인 정화공법의 선택에 있다. 또한 신재생에너지를 도입한 정화사업을 사용함으로써 발생하는 녹색정화의 발전도 기대할 수 있으며 이에 대한 국내외적인 관심과 개발이 촉구된다. 혹자는 오해하여 토양·지하수 오염 정화가 마치 환경 및 에너지에 크나큰 부담을 주기 때문에 오염 토양과 지하수를 복원하지 말고 내버려 두거나 혹은 자연저감 공법(MNA) 등에만 의존하자고 할지도 모른다(Scandura, 2008). 그러나 토양·지하수 오염정화는 현재를 살아가는 우리가 쾌적한 환경과 인간다운 삶의 질을 확보하기 위해 반드시 해결해야 할 문제이다. 다만 그러한 목적을 달성하기 위하여 미래에 과도한 부담(환경, 에너지, 자원 측면)을 주거나 희생을 강요할 수 없다는 것이다. 이는 지속가능한 개발(sustainable development)과도 일맥상통하는 개념이다. 녹색정화는 토양·지하수 정화를 함에 있어 자연자원, 환경, 에너지에 대한 부담을 최소화하는 것이다.

## 사 사

본 기술자료에 좋은 수정의견을 주신 고려대학교 윤성택 교수님과 익명의 심사위원님께 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

박철곤, 2008, 저탄소 녹색성장 준비하자(국무총리실 국무차장), 파이낸셜뉴스, 2008년 9월 22일.  
이진용, 이종규, 김정우, 윤진구, 송수현, 김재웅, 김창균, 2008, 지열시스템이 토양·지하수에 미치는 영향에 관한 연구: 연구결과 중간보고서, 한국지하수토양환경학회, p. 205.

Dellens, A.D., 2007, Green Remediation and the Use of Renewable Energy Sources for Remediation Projects, U.S.EPA, Washington, D.C., p. 47.  
Elmore, C. and Gallagher, R., 2005, Groundwater Remediation Powered by a Renewable Energy Source, U.S.EPA and UMR, Kansas City, p. 72.  
Gill, M.D., 2007, Green remediation: an engineering forum initiative, *Tech Support Project Meeting*, U.S.EPA, Las Vegas, p. 1-23.  
Lee, J.Y., 2008, Current status of ground source heat pumps in Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (in press).  
Omer, A.M., 2008, Energy, environment and sustainable development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**(9), 2265-2300.  
Pachon, C., 2007, Green remediation, *EPA R5-IL EPA Greener Cleanups Meeting*, U.S.EPA, Chicago, p. 1-17.  
Pachon, C., 2008, EPA & green remediation, *ASTSWMO Semi-Annual Meeting*, U.S.EPA, Mobile, p. 1-14.  
Scandura, J., 2008, Green remediation initiative, *ASTSWMO Hazardous Waste Managers Conference*, CEPA, San Diego, p. 1-25.  
U.S.DOD (United States Department of Defense), 2006, Design of Document for Passive Bioventing, ESTCP, DOD, Washington, D.C., p. 47.  
U.S.EPA (United States Environmental Protection Agency), 2004, Fact Sheet: Avoiding Overdesign of Groundwater Pump and Treat Systems, U.S.EPA, Washington, D.C., p. 3.  
U.S.EPA (United States Environmental Protection Agency), 2005, Cost-Effective Design of Pump and Treat Systems, U.S.EPA, Washington, D.C., p. 29.  
U.S.EPA (United States Environmental Protection Agency), 2006, 2006-2011 EPA Strategic Plan: Charting Our Course, U.S.EPA, Washington, D.C., p. 180.  
U.S.EPA (United States Environmental Protection Agency), 2008, Green Remediation: Incorporating Sustainable Environmental Practices into Remediation of Contaminated Sites, U.S.EPA, Cincinnati, OH, p. 48.