

## 오염토양 부지의 복원 및 재사용

이재영\*, 문철환\*\*

### 1. 서론

토양오염에 따른 지하수 오염 문제는 1950~60년대에 미국이 가장 적극적이고 먼저 대처하였으며 70년대에 Love Canal 사건을 겪으면서 오염된 토양과 지하수를 복원하기 위한 본격적인 대처방안을 모색하였다. 1980년, 흔히 Superfund법으로 불리는 CERCLA(Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act)가 제정되어 1986년 SARA(Superfund Amendments

and Reauthorization Act)에서 더욱 더 정확을 위한 기술개발, 현장적용, 법규제정 등이 구체화되었으며, 이후 Superfund로 지정된 대규모 오염지역을 포함한 수천 개의 오염지역에 대해 다양한 정화기술이 적용되었으며, 많은 시행착오를 통해 기술 개선과 복원전략의 발전을 이루어 왔다.

특히, USEPA(United State Environmental Protection Agency)는 과거 20년 이상 Superfund 프로그램하에서 오염지역 및 매립지를 관리하며 복원하는 일을 추진해 오고 있다. 여러 오염 부지를 평가하고 복원하면서 얻어진 다년간의 많은 정보들을 바탕으로 EPA는 CERCLA 매립지에 대한 복원계획을 발달시켰으며, 이러한 복원계획에는 오염 부지

\* 서울시립대학교 환경공학부 부교수(leejy@uos.ac.kr)

\*\* 서울시립대학교 환경공학부 박사과정



## 오염토양 부지의 복원 및 재사용

내의 오염물질 확산방지를 비롯한 발생가스와 침출수의 포집 및 처리 등이 포함되어 있다. 오염부지의 효과적인 복원과 활용을 위해서는 확산방지 시스템이 적절히 운용되어야 하며, 또한 이러한 시스템을 잘 유지하기 위한 제도적인 장치가 확립되어야 한다. 현장에서 사용되어지고 있는 확산방지 시스템은 인간의 건강과 현재와 미래의 사용자의 환경을 보호하도록 계획되고 운용되어야 한다.

Superfund 부지들은 여러 다양한 형태로 재활용되고 있는데, 부지들의 재개발(redevelopment: 예를 들어, 새로운 시설물 등의 건설), 현장에 있는 자원의 재사용(reuse; 예를 들면, 기존에 유지되던 건물의 재사용) 또는 부지 주변에서의 생태환경 조성 등이 있다. EPA는 복원 부지들에 대한 획일적인 재사용 방안을 지양하면서, 지역의 행적적인 협력을 통해 복원 목적을 결정하도록 제안하고 있다.

토양오염지역 및 오염 지하수 복원사례를 살펴봄에 있어, 이들의 복원에 사용될 수 있는 기술과 오염 형태에 대해서 간략히 정리를 하였으며, 토양오염지역의 복원에 있어 가장 범용적으로 적용된 기술에 대한 사례 및 폐기물 매립지 오염의 적용에 따른 재사용 사례에 대하여 서술하였다.

## 2. 토양 및 지하수 오염부지의 복원 방법

오염 토양 및 지하수의 복원 방법은 표 1에 나타난 바와 같이 처리 매체, 처리 위치, 처리 방법에 따라서 분류할 수 있다. 처리 위치는 다시 In-Situ(지중 내 처리)와 Ex-Situ(지중 밖 처리)로 구분하며, 이들은 각각 생물학적(biological), 물리화학적(physical/chemical), 열적(thermal)처리로 분류한

다. 표 1에서 나열한 처리기술의 종류 중 가장 많이 적용되어온 대표적인 기술로는 Bioventing, Soil Vapor Extraction, Solidification/Stabilization, Natural Attenuation, Composting, Landfarming, Soil Washing, Air Sparging, Permeable Reactive Barrier(PRB), Slurry Wall 등을 들 수 있다. 이들 복원 방법은 또한 오염물질의 종류에 따라 적용되는 기술의 종류가 달라질 수 있으나, 대부분의 오염부지가 여러 종류의 오염물질에 의해 복합적으로 오염되어 있으므로, 어느 하나의 복원공법만으로는 복합적으로 존재하는 모든 오염물질을 처리하는 것은 매우 어렵다고 할 수 있으며, 또한 처리 효율의 저하를 발생시키는 문제점이 발생하기도 한다. 따라서 오염토양 및 지하수 복원을 위해서는 이들 기술의 단독 사용 보다는 복합적인 사용이 추천되며, 반드시 오염물질의 성질과 부지의 특성을 고려하여 복원 기법의 선정이 이루어져야 할 것이다.

### 2.1 Bioventing

Bioventing기술은 기체상으로 존재하는 휘발성 유기물질을 추출해내는 동시에 기존의 토착 미생물에 산소 및 영양분을 공급하고, 토양 내 증기흐름속도를 공학적으로 조절함으로써 미생물의 지중 생분해능을 극대화하는데 중점을 둔 기술로서 물리적 정화기술 중의 대표적인 기술인 토양증기추출법(soil vapor extraction, SVE)과 지중생물학적처리(in-situ bioremediation) 기술을 결합한 형태라고 볼 수 있다. 본 기술은 석유화합물류의 유기화합물질에 의해 오염된 토양의 정화에 성공적으로 적용되어 왔으며, 처리효율, 경제성, 현장적용성 측면에서 매우 우수한 기술로 평가받고 있다.

본 기술은 진공압에 의한 휘발성 오염물질의 추출

# 특집

표 1. 오염토양 및 지하수의 복원을 위한 기술의 분류

처리매체	처리위치	처리방법	처리기술 종류	
토양	In-situ	생물학적	1. Biodegradation	
			2. Bioventing	
			3. White Rot Fungus	
			4. Phytoremediation	
		물리화학적	5. Pneumatic Fracturing	
			6. Soil Flushing	
			7. Soil Vapor Extraction	
			8. Solidification/Stabilization	
			9. Electrokinetics	
		열적	10. Thermally Enhanced SVE	
			11. Vitrification	
		기타	12. Natural Attenuation	
	Ex-situ	생물학적	13. Composting	
			14. Controlled Solid Phase Biological Treatment	
			15. Landfarming	
			16. Slurry Phase Biological Treatment	
			물리화학적	17. Chemical Reduction/Oxidation
				18. Dehalogenation(BCD)
		19. Dehalogenation(Glycolate)		
		20. Soil Washing		
		21. Soil Vapor Extraction		
		22. Solidification/Stabilization		
		열적	23. Solvent Extraction(Chemical Extraction)	
			24. High Temperature Thermal Desorption	
			25. Hot Gas Decontamination	
			26. Incineration	
			27. Low Temperature Thermal Desorption	
			28. Open Burn/Open Detonation	
		기타	29. Pyrolysis	
			30. Vitrification	
31. Excavation, Retrieval and off-site Disposal				
지하수		In-situ	생물학적	32. Co-metal Process
				33. Nitrate Enhancement
	34. Oxygen Enhancement with Air Sparging			
	35. Oxygen Enhancement with Hydrogen Peroxide			
	물리화학적		36. Air Sparging	
		37. Directional Wells		
		38. Dual Phase Extraction		

오염토양 부지의 복원 및 재사용

표 1. 오염토양 및 지하수의 복원을 위한 기술의 분류(계속)

처리매체	처리위치	처리방법	처리기술 종류
지 하 수	In-situ	물리화학적	39. Free Product Recovery
			40. Hot Water or Steam Flushing/Stripping
			41. Hydrofracturing
			42. Passive Treatment Walls(Permeable Reactive Barrier; PRB)
			43. Slurry Wall
			44. Vacuum Vapor Extraction
	Ex-situ	기타	45. Natural Attenuation
		생물학적	46. Bioreactors
	배 출 가 스	물리화학적	47. Air Stripping
			48. Filtration
			49. Ion Exchange
			50. Liquid Phase Carbon Adsorption
			51. Precipitation
52. Ultraviolet(UV) Oxidation			
53. Biofiltration			
54. High Energy Corona			
55. Membrane Separation			
56. Oxidation			
57. Vapor-Phase Carbon Adsorption			

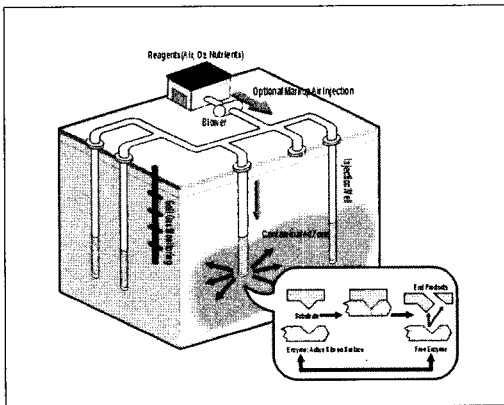


그림 1. Bioventing 공정도

에 중점을 둔 SVE 공정과 비교해 볼 때 미생물 활성을 유지하는 정도의 산소만 제공되므로 산소호흡 속도가 낮아도 된다는 장점이 있으며, 필요할 경우 토착미생물의 생분해능을 증진시키기 위하여 영양

물질을 첨가할 수도 있다. 산소는 그림 1과 같이 토양 내 잔류오염물질에 대해 직접 주입되며, 토양에 흡착된 잔류물의 생분해와 함께 증기가 생물학적으로 활성화된 토양을 통하여 느린 속도로 이동함에 따라 휘발성 화합물이 생분해된다. 최근에는 불포화 지대에만 적용되는 본 기술을 포화지하수대까지 동시에 적용할 수 있도록 하기 위하여 air sparging 기술과 결합된 형태의 bioventing 기술이 개발·적용되고 있다.

## 2.2 SVE (Soil Vapor Extraction; 토양증기추출법)

토양증기추출법은 불포화 대수층위에 추출정을 설치하여 토양을 진공상태로 만들어 줌으로써 토양으

표 2. Bioventing과 SVE의 장·단점 비교

구분	bioventing	토양증기추출
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 장치가 간단하고 설치가 용이함</li> <li>· 적용부지의 범위가 넓음</li> <li>· 처리시간이 짧음(최적조건 하에서 6개월에서 2년)</li> <li>· 비용이 적게 들</li> <li>· 다른 처리장치(Air Sparging, SVE)와의 결합이 용이함</li> <li>· 배출가스 처리의 추가비용이 없음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 필요한 기계장치가 단순함</li> <li>· 유지 및 관리비가 적게 들</li> <li>· 일반적으로 널리 사용되는 장치 및 재료로 충분함</li> <li>· 짧은 기간내에 설치할 수 있음</li> <li>· 결과를 즉시 알 수 있음</li> <li>· 다른 시약이 필요 없음</li> <li>· 영구적인 재생이 가능함</li> <li>· 굴착이 필요 없음</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 높은 초기오염농도에 의하여 미생물의 활동에 독성을 나타낼 수 있음</li> <li>· 특정 현장조건에 적용하기 어려움</li> <li>· 항상 높은 제거율을 얻기가 어려움</li> <li>· 추가적인 영양염류의 공급 필요</li> <li>· 불포화층에만 적용이 가능함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 증기압이 낮은 오염물은 제거효율이 낮음</li> <li>· 토양의 침투성이 좋고 균일해야 하며, 토양층이 치밀해 기체흐름이 어려운 곳에서는 이용 곤란</li> <li>· 오염물질의 독성 잔존</li> <li>· 지반구조의 복잡성으로 총처리시간을 예측하기 어려움</li> </ul>

로부터 휘발성, 준 휘발성 오염물질을 제거하는 In-situ(지중 내 처리)기술이다. 오염지역 외부에서 공기가 주입되어, 내부에서 추출되는 방법으로서 토양으로부터 제거되는 가스는 지상에서 처리해야 한다.

토양증기추출법의 개념은 매우 간단하다. 추출정, 주입정 등을 오염지역에 설치하고 정을 이용하여 지중 토양에서 공기를 유동시킨다. 공기가 흡입될 때 저항이 가장 적은 지역을 따라 흐르기 때문에 통기성이 가장 좋은 지역을 통해 공기가 흐르게 된다. 추출정은 오염지역까지 굴착되고, 블로워(blower)는 정을 통해서 오염된 지역으로부터 공기를 빨아들인다. 과도한 수분을 제거한 후 휘발성유기오염물질을 제거하고, 가스는 통풍장치를 통해서 대기 중으로 배출된다. 부지가 넓은 경우에는 여러 개의 정이 설치되어야 하며 활성탄소, 블로워 등이 필요하다.

이 기술을 이용하는데 있어서 부작용은 거의 없고, 토양의 특성상 발생하는 제한요인은 다른 기술에 비해 적은 편이며, 소요비용이 저렴하고, 광범위하게 오염된 토양의 복원에 적합한 기법이다. 토양

증기추출법은 상대적으로 설치가 용이하며, 다른 미생물 공정에 비해 소요 시간이 짧고 독성물질은 분리되어 토양으로부터 완전히 제거되어 분해 된다. 이 기법은 지하수 펌핑처리 조작과 마찬가지로 다른 기술과 복합적으로 사용될 수 있다. 이러한 이점 때문에 SVE를 이용한 토양세정방법은 많은 현장에서 적용되고 있다. 표 2에는 bioventing과 SVE 공정의 장·단점을 비교하였으며, 그림 2에는 SVE 공법의 공정도를 나타내었다.

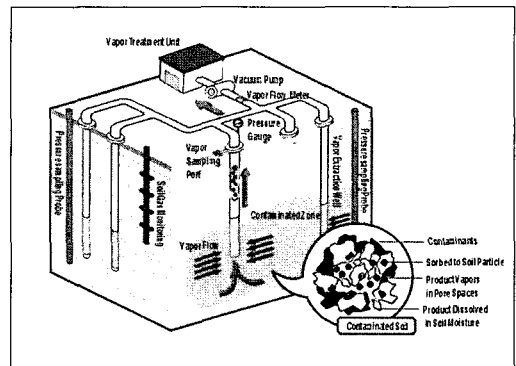


그림 2. SVE 공정도



### 2.3 Soil Washing (토양세척법)

토양세척기술은 1970년대 후반 미국 EPA에서 기름누출사고로 오염된 해변을 정화하기 위해 처음으로 개발되었으나, 현재는 미국보다 유럽에서 더욱 발전시켜 사용되고 있다. 토양세척의 기본 원리는 다음의 2가지 가정에 근거를 두고 있다. 첫째는 오염물질이 입자가 작은 토양에 많이 분포되어 있어 이것만을 분리하여 부피를 감소시킨 후 처리할 수 있는 것이다. 둘째는 토양입자와 화학적으로 결합되지 않은 오염물질이 물리적인 방법으로 쉽게 토양과 분리할 수 있다는 것이다. 따라서 토양세척의 주된 목적은 완전한 토양재생이 아니고 오염된 토양의 부피를 감소시키는 것이라고 하겠다. 또한, 물에 첨가제를 사용하여 토양에 수착되어 있는 오염물질의 제거 효율을 높이기도 한다. 이때 사용되는 첨가제로는 Triethylene Amine(TEA)과 같이 28℃이하에서는 물과 혼합되지만, 이 온도 이상에서는 두 층으로 분리되는 역혼화성 물질이 유리하다.

### 2.4 Solidification/Stabilization (고형화/안정화)

고형화 및 안정화법은 물리화학적인 방법을 통해 독성물질과 오염물질의 유동성을 감소시키는 방법으로 중금속 등 무기물질을 고정시키는데 효과가 높다. 시멘트에 의한 고형화 및 안정화 처리기술은 고형물질을 형성함으로써 오염물질의 이동을 방지하기 위한 기술로 Portland cement, 석회 및 Petrifix 등이 있고, 이중 Portland cement가 널리 사용되고 있다.

안정화란 물질을 불용해성으로 만드는 것이고, 고형화란 액상이나 슬러지와 같은 폐기물에 접합제를

첨가하여 고상의 형태로 만드는 것을 의미한다. 고형화 및 안정화 처리기술은 과거에 많이 연구되어왔으며 이 처리기술에 이용되는 접합제는 크게 두 가지로 구분된다.

- 1) 무기접합제 : 시멘트, 석회, Kiln dust, fly ash, 규산, 점토, 지올라이트
- 2) 유기접합제 : 아스팔트, 폴리에틸렌, 레자, 에폭시, 우레아 포름알데하이드, 폴리에스테르

### 2.5 Composting (퇴비화)

퇴비화 기법은 생물학적 공정인데, 이 공정에서는 미생물에 의해 생물학적으로 분해 가능한 독성물질이 50-55℃(120-130°F)의 온도에서 무해하고, 안정한 부산물로 변한다. 오염토양의 유기물질이 분해될 때 발생하는 열을 이용하면 온도를 증가시킬 수 있다. 일반적으로, 토양에 존재하는 미생물을 사용함으로써 온도를 증가시킬 수 있다. 혼합물질의 공극률을 높이기 위해 팽화제(bulking agent) 혹은 나무조각, 죽은 동물, 채소 쓰레기와 같은 유기물질과 혼합한다. 최대 분해 효율은 수분함량, pH, 산소, 온도, 그리고 탄소/질소비가 적정할 경우 얻을 수 있다.

퇴비화에 사용되는 방법에는 세 가지가 있다. 첫째, pile 내부에서 퇴비화가 일어나고 통풍기나 진공 펌프에 의해 폭기가 일어난다. 둘째, 반응기 안에서 퇴비화가 일어나고 혼합·폭기 된다. 셋째, 퇴비화는 긴 pile(windrows)에서 일어나고 주기적으로 움직이는 장치로 혼합된다. Windrows 퇴비화는 가장 효율적인 퇴비화 방법으로 간주되고 있다.

### 2.6 Landfarming (경작법)

염소계를 제외한 휘발성유기화합물, 탄화수소류

를 대상 오염물질로 하며 오염토양을 굴착시켜 토착 미생물과 산소의 접촉을 증가시켜 미생물에 의한 오염물질의 분해를 증진시키는 생분해 방법 중의 하나이다. 경작법은 오염토양을 굴착하여 지표면에 깔아 놓고 정기적으로 뒤집어줌으로써 공기를 공급해 주는 호기성 생분해 공정을 말한다. 오염물질의 분해율을 최적화하기 위해 수분 함유량, 산소함유량, 양분, 일반적으로 질소, 황, pH, 토양 부피와 같은 토양의 특성을 조절한다. 토양의 생분해는 유류계 탄화수소의 처리에 효과적인 것으로 판명되었고, 가솔린과 같은 휘발성이 강한 물질은 그들의 휘발성을 이용하여 처리할 수 있기 때문에 생분해는 고분자의 탄화수소에 적용된다. 분자가 무거울수록 분해율은 더 낮아진다. 또한 토양이 염소화 혹은 질산화 되면 분해가 더욱 어렵다.

이 기법으로 처리 가능한 주된 오염물질은 디젤 연료, No. 2와 No. 6 연료기름, JP-5, 기름슬러지, 석탄 오염토양, 그리고 살충제 등이다. 매우 단순하고, 비용이 적게 들며 정화과정의 관리가 손쉬우나 일반적으로 넓은 공간이 필요하며, 오염물질의 분해를 위한 적절한 상태가 조성되지 않으므로 분해가 어려운 물질을 완전하게 제거하기 위해서는 많은 시간이 소요된다. 휘발성 유기물질의 농도는 생분해보다 휘발에 의해 감소가 된다. 무기물질은 생물학적으로 분해되지 않는다. 유기용매가 대기 중으로 방출되어 공기를 오염시키기 때문에 방출되기 전에 처리해야 한다. 입자상 물질은 먼지가 될 수 있으므로 지속적으로 측정해야 한다. 중금속 이온은 미생물에 독성으로 작용할 수 있으며 오염되지 않은 오염토양으로 흘러들어 갈 수 있으므로 침출수에 대한 차단벽이나 2차 처리시설이 필요하다.

## 2.7 Phytoremediation (식물정화법)

식물정화공법은 식물을 이용하여 오염토양 및 지하수를 포함한 수질을 정화시키는 새로운 자연친화적인 환경복원기술이다. 식물정화는 뿌리가 접촉하는 면에 한정되어 일어나기 때문에 오염원의 깊이가 중요한 고려요소이며, 식물종, 식물의 성장속도, 오염물질의 농도, 주변 생태계 및 환경과의 관계 등도 기본적으로 고려해야 할 사항들이다. 그러나 기타 물리화학적 공법에 비해 확실히 경제적인 방법이고, 2차 부산물 발생이 적다는 이점이 있다. 식물정화공법은 아직 개척 분야에 속하지만 식물정화공법 개발에 관한 많은 연구가 진행되어지고 있다.

식물정화공정 기술의 활용분야는 크게 하천, 토양 및 지하수의 오염정화이며 토양 오염정화에는 phyto-extraction, phytostabilization, phytostimulation, phytovolatilization, phytotransformation 등이 있고, 하천 및 지하수 오염정화에는 rhizofiltration, hydraulic barriers, vegetative caps, constructed wetlands 등이 활용되고 있다.

식물정화공정에 활용되고 있는 식물들은 해바라기를 비롯한 일부 1년생 초본류와 계피나무와 포플러, 미루나무, 버드나무 및 넓은 잎을 가지는 다양한 식물과 대상 지역의 고유한 토착 식물 등 매우 다양하고, 효과적으로 처리될 수 있는 대상오염 물질은 소수성을 가진 benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, chlorinated solvents, PAHs, nitrotoluene, ammunition waste와 ammonium, phosphate와 같은 과잉의 영양염류 그리고 중금속들을 제거하는데 효과적으로 이용된다.

식물추출(phytoextraction) : 식물추출은 오염물질을 식물체내로 흡수, 농축시킨 후 식물체를 제거하는 방법이며, 주로 토양, 퇴적층 및 폐기물을 대상으로 중금속, 비금속원소, 방사성 동위원소의 제거에 적용될 수 있다. 수확된 식물체는 경우에 따라

유용한 자원이 될 수도 있다. 어려운 점으로는 중금속을 고농도로 축적할 수 있는 식물은 대부분 생장이 느리며, 수확된 식물체는 고농도의 오염물을 함유하므로 이를 적절히 처리해야 하고, 중금속은 식물독성이 있으며, 실험실 규모에서의 자료를 실제 부지에 그대로 적용할 수 없는 경우가 많다는 점이다. 식물추출 방법은 일차적으로 식물체의 뿌리를 통하여 오염물질이 흡수되어야 하므로 뿌리의 깊이 에 따라 제거의 정도가 결정된다고 할 수 있다.

**근권여과(rhizofiltration) :** 이는 수용성 오염물질이 생물 또는 비생물적인 과정에 의하여 뿌리 주변에 축적되거나 식물체로 흡수되어지는 과정을 말하며, 일반 토양보다는 수 환경을 대상으로 한다. 방법의 특성상 처리시설은 다른 장소에 설치해도 무방하며, 육상식물이나 수생식물이 모두 이용될 수 있으나, 육상식물을 이용하는 경우에는 이의 성장을 뒷받침할 수 있는 구조가 필요하다. 적용대상 오염물질로는 납, 카드뮴 등의 중금속과 우라늄, 세슘 등의 방사성원소등이 포함된다. 이용가능식물은 여러 종이 있으나 대개 수생식물보다는 육상식물이 더 효과적인 것으로 나타나고 있으며 부유식물 및 습지식물도 이용될 수 있다.

**식물안정화(phytostabilization) :** 식물안정화는 오염물질이 뿌리 주변에 비활성의 상태로 축적되거나 식물체에 의하여 이동이 차단되는 원리를 이용한 처리법이며, 뿌리주변에서의 미생물학적, 화학적 과정을 동반한다. 즉, 뿌리 주변 토양의 pH 변화 등에 의하여 중금속의 산화도가 바뀌어져서 불용성의 상태로 되는 원리에 기초하는 것이다. 이 방법은 토양, 퇴적층 및 폐기물 등을 대상으로 하며, 토양 및 식물체를 제거할 필요가 없고 저렴한 비용으로 처리가 가능하며 생태계 복원이 비교적 쉬운 장점이 있으나, 오염물질이 대상지역에 그대로 남아 있어 장기

간 관리가 필요하고 식생을 돕기 위해 토양을 처리해야 할 필요가 있으며 오염물질이 식물체로 흡수되거나 지상으로 운반, 확산되는 것에 대한 방지책을 마련해야 한다.

**근권분해(rhizodegradation) :** 뿌리부근에서 미생물 군집이 식물체의 도움으로 유기 오염물질을 분해하는 과정이다. 뿌리 분비물에는 다양한 영양분이 함유되어 있고 뿌리 자체가 서식처를 제공하고 있어 이 부근의 미생물의 활성은 크게 증가되며 이에 따라 유기 오염물의 분해가 촉진되는 것이다. 이 방법은 오염물이 현장에서 분해되므로 따로 처리할 필요가 없으며 다른 방법에 비하여 적은 경비가 소요되는 장점이 있으나, 근권이 발달하기 위해 상당한 시간이 소요되고 비료의 투여가 필요하며 미생물간의 상호작용, 즉 오염물질의 분해에 관여하는 미생물군과 기타 군집과의 경쟁 등에 대해 고려할 필요가 있다. 오염물 농도가 높은 지역에서는 우선 토양의 제거, 또는 매립 등의 방법에 이어서 효과적으로 쓰일 수 있는 방법이며, 다른 정화 방법 이후에 최종 처리법으로 이용될 수도 있다.

**식물분해(phytodegradation) :** 식물분해는 오염물질이 식물체에 흡수되어 그 안에서 대사에 의해 분해되거나 식물체 밖으로 분비되는 효소 등에 의하여 분해되는 과정을 말한다. 식물체가 직접 분해에 관여한다는 점에서 위의 근권분해와 구별이 된다. 오염물의 용해도 및 극성에 따라 흡수정도가 달라지는데, 예를 들어 적당한 소수성을 가진 물질은 비교적 흡수가 잘 되고 식물체내에서의 이동이 용이하지만, 수용성인 물질은 확산되기 쉬우므로 오히려 뿌리로부터 흡수되기 쉽지 않다. 이 방법은 토양, 퇴적층, 폐기물, 지하수 등의 처리에 이용 가능하다. 일반적으로 오염의 깊이가 얇은 광범위한 지역에 적당하다



# 특집

식물휘발화(phytovolatilization) : 식물휘발화는 오염물질이 식물체에 의하여 흡수, 대사되고 휘발성 산물로 변형되어 대기로 방출되는 과정이며, 특성상 식물분해와 같이 일어나는 경우가 많다. 대부분 지하수에 적용되고 있으나, 토양, 퇴적층, 폐기물 등에도 이용될 수 있다. 생성된 휘발성 산물은 대개 독성이 약화되거나 없는 형태이지만 경우에 따라 유독한 산물이 생성되기도 하고, 식물체에 축적되기도 한다.

수리적 조절(hydraulic control) : 이 방법은 식물에 의하여 환경의 물을 제거함으로써 수용성 오염물질의 이동 및 확산을 차단하는 원리에 기초한다. 따라서 지하수, 지표수 및 수분이 많은 토양을 대상으로 한다. 수분의 제거를 전적으로 식물체에 의존하므로 펌프 등 다른 장비를 필요로 하지 않으나, 제거량 및 속도는 기후조건에 영향을 많이 받게 된다.

완충수로(riparian corridors/buffer strips) : 이 방법은 일반적으로 하천으로 유입되는 지표 및 지하수의 처리에 이용되며 수리적 조절, 식물분해, 근권분해, 식물증발 및 식물추출 등 여러 기작이 포함된다. 유기질, 농약 등 수용성 오염물질의 제거에 이용되며 포플러를 이용한 질산염 제거 사례가 많이 연구되고 있다. 충분한 넓이의 지면을 필요로 하며, 오염물의 농도 및 깊이 등이 고려되어야 한다.

## 2.8 Natural Attenuation (자연정화법)

자연정화법(Monitored natural attenuation)이란 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency; USEPA)에 의하면 "인위적인 노력 없이 토양과 지하수내 오염물질의 농도, 독성, 이동, 부피가 자연적으로 감소되는 과정으로, 그 감소메커니즘에는 생분해, 확산, 희석, 휘발, 화학적·생물학적

안정화가 포함된다"고 정의하고 있다. 대상 오염물질로는 유류 이외에 유기염소계 화합물과 방사성 물질을 포함한 중금속 등이 해당된다.

자연정화법은 오염물질의 정화를 위해서 아무런 조치를 취하지 않는다는 것이 아니라 처리대상 부지의 환경조건 하에서는 자연정화법의 적용만으로도 법적 요구조건을 만족시키고 있는 경우를 말한다. 이 때 자연정화법을 채택하는 경우에 있어서 자연정화법은 다른 채택 가능한 방법과 비교 평가하여 채택되어야 한다. 자연정화법이 채택되면 종합적인 부지특성 조사, 위해성평가, 오염원을 제어할 조치 등이 마련되어야 한다.

자연정화법이 적용 가능한 지역은 다른 처리방법으로 처리하는 것과 비교하여 유사한 효과를 얻을 수 있는 지역에 한하여 적용 가능하다. 통상적으로 자연정화법은 오염부지에 대하여 초기에 적극적인 정화방법을 적용하여 오염물질의 농도가 상당히 저감되어 더 이상 적극적인 정화방법의 적용은 곤란하지만 인간이나 다른 동식물에 어느 정도 유해성을 갖는 경우에 적용할 수 있는 방법이다. 다시 말하면, 자연정화법은 현저한 오염물의 확산이 이루어지거나, 인간 및 동식물에 악영향을 줄 것으로 예측된다면 이용해서는 안 되는 방법이다.

자연정화법에 의해 오염이 더 이상 확산되지 않고 감소하고 있음을 증명하기 위해서는 주기적인 오염도 측정 및 분석이 이루어져야 한다. 이 때 오염도 측정은 정화기준을 만족시킬 때까지 계속 이루어져야 한다. 어떤 경우에는 정화기준을 만족시킬 때까지 소요되는 시간이 장기화됨에 따라 자연정화법에 따른 오염도 측정비용이 과도하게 많아져 도리어 비경제적인 정화방법이 될 수도 있다.

자연정화법에서 조사되는 항목으로는 시간에 따른 오염물질의 농도 감소, 용존산소의 농도 등과 같



## 오염도양 부지의 복원 및 재사용

은 전자수용체의 농도 감소, 분해 대사과정에서 생성되는 이산화탄소, 메탄, 2가 철이온 등의 분해산물의 농도 등을 들 수 있다.

### 2.9 차단벽 시스템과 투과성 반응벽

차단벽(containment barrier)은 매립지나 슬러리월(slurry wall), 그라우팅(grouting), 투과성반응벽(permeable reactive barrier) 및 복토층 설계에서 가장 중요한 요소 중 하나이다. 차단벽 시스템에서 차단층은 다음의 한 가지 또는 그 이상의 기능을 수행한다: ① 오염물질의 차단, 특히 침출수 등과 같은 수분의 침투를 최소화 하고; ② 오염물질을 환경으로 재용출될 가능성이 적은 물리적인 형태로의 전환; ③ 수리학적 흐름을 최소화하거나 또는 오염물질의 지체/처리를 도모할 수 있도록 용해된 오염물질 또는 반응물의 현재의 흐름에 수직으로 차단층을 형성한다. 차단벽 시스템은 경제적인 정화기술의 적용이 불가피하거나 잔류하고 있는 물질이 우리가 생활하고 있는 환경으로의 이동의 가능성이 높고, 일부 오염된 부지 중 특히 토지가 부족하거나 비싼

지역인 도시지역의 부지를 주거와 레크리에이션의 목적(Brownfield Redevelopment)으로 개발하기 위해 주로 사용된다.

차단벽 시스템은 오염물질이 지하수의 흐름에 의하여 주변으로 이동되지 않도록 상류 또는 하류에 설치하거나 완전차단하며, 차단층에 쓰이는 재료와 공법에 따라 슬러리월, 그라우트 커튼(grout curtain), 강널말뚝(steel sheet piling), 진동빔 차단벽(vibrating beam), HDPE sheet 차단벽 등으로 구분될 수 있다(그림 3). 또한 매립지의 바닥 및 최종복토층도 차단벽 시스템의 구성과 개념적으로 일치한다고 할 수 있다. 그러나 이들 차단벽은 오염물질을 완전히 처리하지 못한다는 단점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 지하수의 흐름을 유지하면서 오염물질을 처리할 수 있는 투과성 반응벽(PRB, 그림 4)의 연구가 활발한 상태이다.

PRB는 투과성을 가지고 있어 오염물질이 입자상으로 구성된 벽체를 통과하면서 물리·화학적 및 생물학적 반응을 거쳐 오염물질을 제거하는 지중에 설치된 벽체이다. 이는 오염된 지하수의 흐름을 그대로 유지한 채로 원위치(in-situ)에서 정화할 수 있으

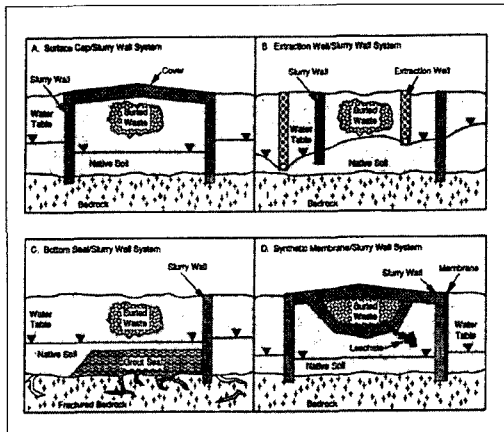


그림 3. 다양한 차단벽 요소들의 복합사용에 의한 오염물질의 차단

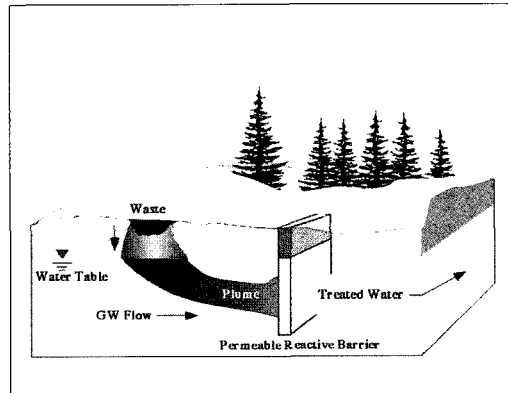


그림 4. 토양 및 지하수 오염 확산 방지를 위한 투과성 반응벽 (PRB)

므로 별도의 후처리 및 정화과정에서의 동력이 필요 없으며, 또한 복원 중에도 지상의 공간을 이용할 수 있는 장점을 가진다. PRB의 반응물질로 사용되는 물질로는 영가철(Zero-valent iron; ZVI), 석회석(limestone), 활성탄, 미생물 등이 사용될 수 있다. 보편적으로 PRB의 반응물질로 영가철을 많이 사용하고 있으나 유해유기물 등의 분해를 위한 생물학적 투과성 반응벽(permeable reactive biobarrier; PRB)도 많이 연구되고 있는 추세이다. 이러한 전체적인 PRB는 염소계 탄화수소(Chlorinated hydrocarbon)와 방향족 탄화수소(Aromatic hydrocarbon) 뿐 아니라 크롬, 니켈, 납, 비소, 우라늄 등의 중금속류와 황산염, 질산염, 인산염 등의 무기물을 포함한 지하수의 처리에 사용될 수 있다. 따라서 PRB는 비위생 매립지나, 폐광산, 반도체, 공업단지 등 오염원이 뚜렷하나 오염원의 이전 및 오염원에 대한 직접처리가 곤란한 경우 인접지반으로의 확산을 방지하는 기술이다.

### 3. 국외 토양오염부지의 복원 및 재사용

#### 3.1 디젤류(No. 2) 오염토양의 복원 (미국 콜로라도)

오염현황 : 1992년 콜로라도에서는 24,000 gallon의 지하저장탱크(Underground Storage Tank; UST)로부터 약 10,500 gallon의 유류가 유출된 것으로 의심되는 사고가 발생하였다. 사고 후 지하저장탱크 지역을 굴착하여 관찰한 결과 탱크아래 콘크리트 고정재부분에서 육안으로 오염을 관찰할 수 있었고, 탱크의 이음새부분의 균열이 유류 유

출의 원인임을 확인하였다. 이에 긴급조치로서 유출 사고를 발생시킨 탱크를 제거하고, 전반적인 오염 정도와 분포를 파악하기 위하여 오염지역평가(Site Assessment; SA)를 실시하였으며, 최적의 오염처리 및 복원을 위한 계획을 수립·시행하였다. 오염지역평가를 위해 오염지역에 감시정(monitored well)을 설치하고 토양시료를 헤드스페이스 현장분석방식으로 분석하였다. 채취한 토양과 지하수를 분석한 결과, 토양내 No. 2 유류의 양은 약 8,220 gallon이고, 약 2,270 gallon 정도가 지하수로 용해된 것으로 추정되었다.

복원계획 : 오염토양의 처리 및 복원은 두 가지 방법을 병행하여 실시하였다. 우선 오염된 토양의 표층처리를 위해서 토지경작법(landfarming)을 적용하였으며, 일정 깊이 이상의 굴착이나 접근이 어려운 오염지역에 대해서는 in-situ bioventing을 적용하였다. 이와 같은 처리 방법의 선택은 다음과 같은 오염지역의 몇 가지 특성에 기초한 것이다. 첫째, 유출사고가 비교적 최근에 일어났기 때문에 심하게 오염된 토양의 대부분이 표층에 가까워 굴착에 의해 손쉽게 분리할 수 있었고, 또 분리된 토양을 생물학적으로 처리할 수 있는 공간의 확보가 가능하였다는 점이다. 둘째, 깊이가 30~40ft 이상으로 굴착이 어려운 지역의 토양은 오염농도가 TPH 14,000mg/kg 이하로 굴착 후 처리(ex-situ treatment)방법을 적용하기가 어려웠으며, 원위치처리(in-situ treatment) 방법에 의해서 적절히 처리될 수 있는 조건이었다. 총 9,000yd<sup>3</sup>의 토양은 저장해 두었다가 굴착된 구멍을 메우는 데 사용하였다. 나머지 5,400yd<sup>3</sup>은 토지경작지역으로 이송되어 처리되었다.

복원 및 처리 결과 : No. 2 유류로 오염된 지역에 대해서는 토지경작법과 bioventing 기술을 병행하는 복합기술을 적용하여 오염지역을 정화하고자 하



## 오염토양 부지의 복원 및 재사용

였다. 주로 표층에 가까워서 굴착이 용이한 토양에 대해 적용되었던 토지경작법의 경우 운전 개시 6주 후 초기토양을 오염시켰던 토양의 약 60% 정도를 제거하는 결과를 얻었다. 한편 bioventing의 경우 초기 생분해제거율이 연간 1,100 mg TPH/kg 정도였으며, 이러한 초기제거율과 시간에 따른 생분해 감소경향을 바탕으로 추산해 볼 때 콜로라도주 복원 기준을 만족시키기 위해서는 약 7년 정도의 운전이 필요한 것으로 판단되었다. Bioventing의 경우, 비록 처리효율이 낮고 소요기간이 긴 문제점이 있으나 운전비가 거의 들지 않으며, 주변 지하수오염으로 인한 긴급한 위해성이 없고, 그리고 경제성 있는 특별한 대안이 없다는 점에서 본 현장지역에 대해서는 가장 적절하고 경제적인 복원방법으로 판단된다.

### 3.2 Dubose Oil Product사의 퇴비화

**오염현황 :** 플로리다의 Cantonment 지역에 있는 Dubose Oil Product사의 superfund 지역은 1979년부터 1981년까지 폐수처리 시설과 재활용 폐기물 처리 시설이었다. 이 지역은 폐오일의 열처리, 원유 정제폐기물, 기름 용매, 원목 처리 폐기물들을 처리하던 곳이었다. 이 지역은 조사기간동안 PAHs(Poly Aromatic Hydrocarbons) 농도는 0.578~367 mg/kg, PCP(Pentachlorophenol)는 0.058~51 mg/kg, VOCs(Volatile Hydrocarbons) 0.022~38.27 mg/kg의 범위로 오염되었다. 이 복원사업의 최종목표로 PAHs와 PCP는 50 mg/kg 이다.

**복원계획 :** PAHs 등 유류로 오염된 부지의 정화는 in-situ 방식의 생물학적 처리 대신 퇴비화를 선택하였다. 이는 퇴비화가 생물학적 처리보다 조절이 쉽고, 신뢰성이 높으며, 퇴비화 형성을 모니터링 하는 것이 더 쉽고, 여기서 얻은 시료는 대표성이 높기

때문이다. 이 지역의 복원 과정은 퇴비화 시스템, 여과물 수집 시스템, 폭기조 시스템, inoculum 성장과 응용시스템 그리고 on-site 폐수처리 시스템 등으로 구성되었다. 오염된 토양은 660~2,310톤 용량의 배치시스템으로 처리되었다. 해당 배치 시스템에서 토양의 깊이는 4.0~4.25ft 였다. 퇴비화 공정은 1993년 5월에서 11월까지 계속되었으며 현장 복원은 1996년 8월에 종료되었다.

**복원 및 처리결과 :** 퇴비화 후 359개에 달하는 모든 구역에서 Dubose사의 토양 저감 목표를 달성하였다. 총 PAHs의 경우 처리전의 농도는 50.8~576.2 mg/kg 이었으나 복원 후에는 3.3~49.9mg/kg (평균 19mg/kg)으로 저감되었다. PCP는 처리전 7.67~160mg/kg 에서 처리 후 16.5~36.3mg/kg 으로 낮아졌다. 성분이 밝혀진 VOCs의 주요 제거 방법은 휘발이고 PAH의 경우는 생물학적인 방법에 의해 처리되었다.

### 3.3 홍콩 카이탁 공항 토양 복원 사례

**오염현황 :** 1925년에 개항하여 1998년 6월에 폐쇄된 홍콩의 국제공항이었던 카이탁공항(Kai-Tak Airport)은 지하의 낮은 송유파이프라인과 유류저장시설에서의 누유로 수년동안 제트연료와 항공정비용 솔벤트로 광범위하게 오염(약 100,000m<sup>3</sup>)된 것으로 밝혀졌다. 홍콩 정부는 이 지역을 2003년부터 2006년까지 주거지역 및 휴식공간지역으로 개발하기 위해 오염된 토양을 복원하기 위한 계획을 수립하고 기초 및 정밀조사를 실시하고 처리계획을 수립하였다. 부지 조사결과 오염토양은 약 300,000 m<sup>3</sup>, 오염깊이는 2~5m로 분포되어 있었고 깊이별 오염농도의 변화는 2.4, 3.8m가 가장 오염이 심하였으며 분석결과를 볼 때 카이탁놀라 해협(공항주

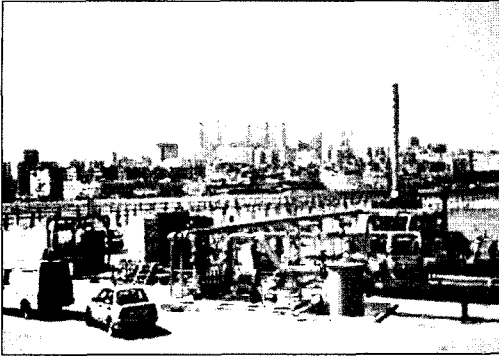


그림 5. 홍콩 카이탁 공항 복원 공사 건설현장

변 해협)으로 확산되고 있는 것으로 판단되었다. 오염토양 내에서의 TPH 농도는 30~21,000mg/kg 이었으며, 지하수 내 benzene은 30 $\mu$ g/L로 가장 높았다.

**복원계획** : 오염토양의 복원가능성을 검토하기 위하여 정밀조사에서의 오염물질의 특성과 성분을 정밀분석하고, 초기산소 및 탄산가스농도와 산소소비속도 및 토양공기 투과율 등을 분석하여 생물학적 정화법이나 토양증기추출법(SVE(Soil Vapor Extraction)/AS(Air Sparging).AI(Air Injection)) 등의 적용가능성을 검토하였다. 또한 현장에서의 Pilot-Test를 통하여 SVE/AS의 적용가능성과 이들의 복원영향반경을 조사하고, 추정완료기간을 검토하였다. 오염도 분포현황 중 가장 넓은 면적(289,250m<sup>3</sup>)을 차지하고 있는 지역에 대해서는 SVE/AS 시스템을 적용하였으며, 그 외 지역은 굴착하여 Bio-pile 시스템을 적용하도록 결정하였다. SVE/AS 시스템이 적용되는 지역은 다시 TPH(Total Petroleum Hydrocarbon) 농도가 2,750 mg/kg 이상인 지역은 SVE/AS 처리 후 굴토하여 Bio-pile 시스템으로 처리하였다.

**복원 및 처리결과** : SVE/AS 시스템과 Bio-pile 시스템을 이용하여 유류 오염토양의 처리 결과 TPH

는 최고 21,000mg/kg 이었던 농도가 600 mg/kg 이하로 나타나 97%의 제거율을 보였으며, 지하수 중의 BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene)는 3 $\mu$ g/L로 90%의 제거효율을 나타내었으며, 이들을 처리하는데 약 83억원 정도가 소요되어 본 시스템이 경제성이 있다고 판단되었다.

## 4. 국내 토양오염부지의 복원 및 재사용

### 4.1 부산 문현지구 토양복원 사례

**오염현황** : 부산시 남구 문현동 소재 구 육군 제 2 정비창은 약 34,383평(113,464m<sup>2</sup>)의 부지로서 1952년 창립하여 1995년 말까지 약 43년간 군수장비정비 등의 과정에서 발생된 폐유, 폐기물의 무단 매립 등의 부적절한 처리로 인해 오랜 기간 동안 잠재된 상태로 토양오염이 진행되었다. 부산시의 종합금융단지조성을 위한 정책사업의 일환으로 부산시 도시개발공사에서 1996년 1월 인수한 이후 토목공사 작업이 진행되던 과정에서 1997년 10월 말경 토양이 폐유 및 폐기물 등이 혼재된 상태로 오염된 사

실이 알려지게 되었다. 이후 건설공사중지 및 국방 부에서 토양오염실태 조사 결과에 의하면 부지 내 오염도 분포현황에서 보느바와 같이 토양환경보전 법상의 기준항목인 유류 중 석유계총탄화수소 (TPH)를 중심으로 볼 때 토양오염 우려기준(2,000 mg/kg) 이상의 분포율이 52.5% 이며 이는 사람의 건강 및 재산과 동·식물 생육에 지장을 초래할 우려가 있는 법적 기준치 이상의 오염토양으로 판정되었다. 오염의 분포는 지표로부터 심도 5m 이내의 토양오염 상태를 나타내었고 주로 2~3m 심도의 토양이 가장 심하게 오염된 것으로 조사되었다. 주요 오염지역은 차량정비공장 부지 및 보일러실 지역을 중심으로 오염농도가 높게 나타났다. 한편 오염 지하수는 총 44,741m<sup>3</sup>의 양으로 분포된 것으로 조사되었고 지하수면 주위에 부유 기름층을 형성하는 등 용존 TPH 등의 유분이 검출되었다. 중금속은 납이 최고 124 ppm으로 지하수 및 폐수배출허용기준을 크게 초과 검출된 것으로 조사되었다.

**복원계획 :** 본 현장의 복원계획은 오염토양/비오염토양으로 구분하여 굴착/야적함으로서 처리오염토양을 극소화하고, 굴착/야적시부터 고농도/저농도별, 토양성상별로 오염토양을 구분하여 처리하고, 야적기간 중 바이오파일법으로 사전 저감 후 처리를 함으로서 작업효율을 극대화하도록 하였다. 본 오염부지의 정화에 적용된 공법은 토양경작법, 열탈착공법, 바이오파일이다. 토양경작법은 저농도의 토양, 점토성분이 적은 토양에 대해 적용하였으며, 열탈착공법은 토양경작법으로는 처리효율이 낮은 토양, 상대적으로 고농도로 오염된 토양에 적용하였다. 바이오파일은 토양경작법 적용전 야적시 적용하여 오염농도의 사전 저감효과를 가질 수 있게 하였다. 선정된 이들 공법은 현장 적용성 시험을 시행하여 최적의 운영조건을 도출함으로써 공사 효율성을 제고하였다.

**복원 및 처리결과 :** 2003년 3월 기준으로 총 6회에 걸쳐 토양복원의 진행과정에 대한 중간검정결과 행정권고기준 대비 TPH 평균 잔류는 33.9%(271/800 mg/kg)이며, 토양환경보전법의 규제대상 우려기준 대비 약 13.5%(271/2,000 mg/kg)로서 행정권고 목표기준을 달성하였으며, 무작위 검정결과에서는 29.7mg/kg으로 오염토양의 복원이 이루어진 성공적 성과를 나타냈었다. 지하수 조사결과는 중금속 및 수질유해물질 15개 항목을 검사한 결과 전체 항목에서 불검출 판전으로 깨끗한 자연수와 같은 수준으로 정화되었음을 확인할 수 있었다.

## 4.2 가학광산 복원사례

**오염현황 :** 광명시 가학동, 노은사동 일대에 위치한 가학광산은 1917년부터 1972년까지 금, 은, 동, 아연 등을 주로 채굴하다가 폐광된 광산으로 총 연장은 약 7.83km, 해발 180m 부터 95.2m까지 총 8레벨의 수평 갱이다. 가학광산이 위치한 지역에서 카드뮴, 아연, 납, 수은 등의 중금속의 오염이 심각하게 조사되었다. 특히 카드뮴은 오염 정도가 심해 가학천 주변 일부 지역은 오염 우려 기준의 17배를 초과하는 것으로 들어났다. 아연의 오염은 우려기준의 최고 8배에 달하는 것으로 조사되었다. 현재 이 지역은 논과 비닐하우스 등 농경지로 주로 이용되고 있어 농산물에도 영향을 미쳤을 것으로 우려하고 있다.

**복원현황 및 계획 :** 1995년부터 경기도 광명시 가학광산에 3,841백만 원을 투입하는 시범사업으로 광미 등 오염원의 유실을 방지하는 시설의 설치, 하천 저질도의 준설, 농경지에 대한 객토, 토양 개량제 사용 등 오염된 토양을 개선하여 폐광 주변지역의 안전한 농산물 생산 및 인체피해를 사전에 예방하는 사업효과를 가져왔으며, 이 사업지역은 해당 지자체



그림 6. 부산 문현지구 오염토양의 복원을 위한 플랜트 설치도

에서 폐기물처리시설(소각시설, 재활용 분리장소 등)을 설치하여 토지이용도를 높이고 있다.

향후 토지이용계획 : 광명시는 2010년까지 가학동 가학산 일대 38만여 평에 폐광 갱도 등을 활용한 생태 테마공원을 조성할 계획이다. 광명시는 2000년 생태공원 연구 용역을 마치고 2001년 4월 경기도에 광역도시계획 대상 사업으로 보고했으며, 2003년 4월과 9월 두 차례 갱도 내부 등에 대한 전문가 탐사를 마친 뒤 최근 건교부에 그린벨트 해제를 공식 요청했다. 시는 해제절차가 마무리되면 부지매입 및 조성비 843억 원, 시설비 1731억 원 등 2574억 원을 들여 총 연장 7.8km 규모의 갱도와 10만 3690여 평의 지상 공간을 활용한 공원을 조성한다는 계획이다. 공원은 6개의 테마마을로 구성되며, 이 중에는 특히 광산기념관과 채광시설 복원지, 광산 체험코스 등으로 구성된 "광산공원마을"이 포함되어 있다. 또한 수변 생태공원과 식물원, 허브공원, 실내 스노보드장과 실내외 워터파크 등 마을별 테마 시설도 들어설 계획이다.

### 4.3 난지도 쓰레기 매립지 안정화

오염현황 : 서울특별시 마포구 상암동에 위치한 난지도 매립지는 1978년부터 1993년까지 과거 15년 동안 약 92,000천 m<sup>2</sup>의 폐기물을 매립 처분함으로써 서울시의 도시환경문제를 해결하는데 크게 기여하였으나 노천투기형태로 비위생 매립되어 주변 환경오염을 유발시켜왔다. 난지도에 15년 동안 각종 폐기물이 비위생적으로 적재된 결과 쓰레기가 썩으면서 침출수, 악취, 유해가스가 발생하여 주변 한강의 수질과 대기가 오염되었고 가까운 지역의 생태계가 파괴되었다. 포화상태로 쌓인 쓰레기를 그대로 둔 상태에서 환경을 복원하지는 커다란 틀 안에서 매립지가 지닌 환경오염인인을 찾고 이를 처리함으로써 난지도 매립지를 되살리고 친환경적 공원으로 새롭게 탈바꿈시키기 위하여 안정화공사가 시작되었다.

복원계획 : 1991년부터 1996년까지 난지도 매립지의 정밀조사를 통해 계획을 세우고 시행된 안정화공사의 내용은 침출수가 새어나가지 않도록 차수벽



## 오염토양 부지의 복원 및 재사용

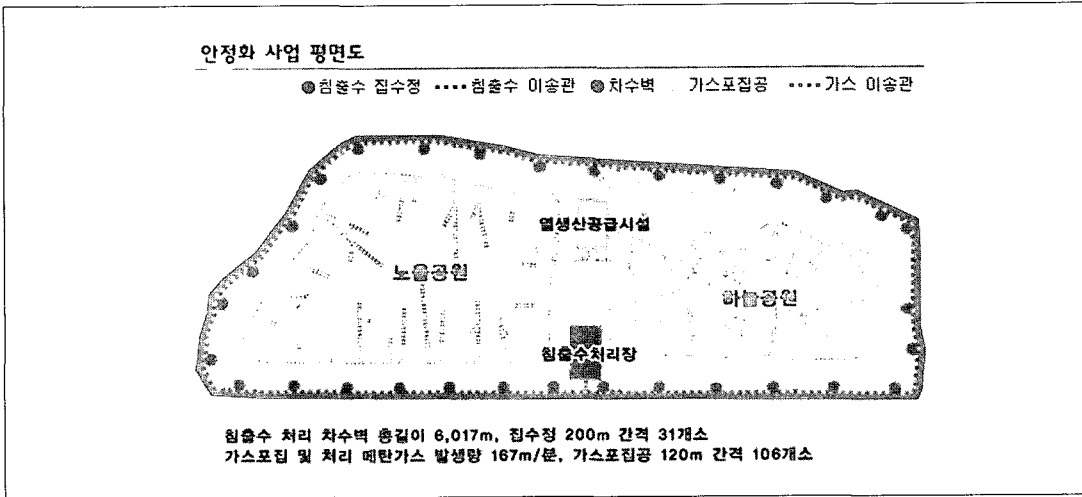


그림 7. 난지도 매립지 안정화 사업 계획 평면도

을 세우고 오염된 물을 정화시키는 침출수 처리, 매립지 상부에 흙을 덮어 초지를 조성하는 상부복토, 유해가스를 모으고 처리하는 가스처리, 매립지 주변 환경을 관리하는 사면안정처리 등 크게 네 가지이다. 이 중 매립가스는 106공의 포집정을 설치하여 포집한 후에 보일러 연료로 사용하여 난방열을 만들어 월드컵경기장과 성산동에 있는 아파트 3000여 세대에 공급하고 있다.

**복원 및 처리결과 :** 상암동 월드컵 주경기장 앞 13만 5천 평은 새천년 환경시대의 개막과 월드컵 경기 개최를 기념하는 평화의 공원이 생태연못, 희망의 숲, 홍보관, 정원, 광장 등으로 구성되어 있고, 장마철이 아니면 거의 말라 있어 하천의 기능을 잃고 있는 8만 9천 평 규모의 난지천은 한강물을 평화의 공원 내 생태연못에 끌어들인 후 다시 난지천으로 흐르게 함으로써 친수환경과 수변생태계를 복원하는 생태하천, 야생초화원, 놀이터, 광장, 운동시설, 야외무대 등으로 난지천공원을 조성하였고, 미개발 상태로 남아있는 난지한강둔치 23만 5천 평은

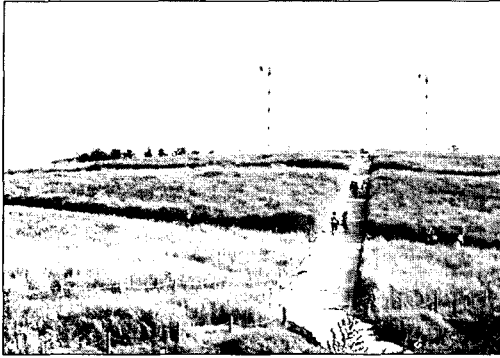
기존의 둔치공원이 갖고 있던 차량 동선과 보행 동선을 이용하여 야외캠핑장, 선착장, 야생초화원, 국공장, 운동시설 등을 설치하여 난지한강공원을 조성하였으며, 평화의 공원과 인접한 상류층 매립지 상부 5만 8천 평은 초지생태공원인 하늘공원은 초지, 전망대, 산책로, 비지터센터, 풍력발전기 5기 등으로 조성되었고, 또 다른 매립지 10만 3천 평인 노을공원은 다목적 초지광장 생태대중골프장, 전망대, 자생초지원 등으로 조성되었다.

## 5. 폐기물 매립부지의 재활용 방안

### 5.1 생태환경 조성

도심지 외곽에 위치한 매립부지의 재사용에 대한 일례로서 매립지 전체 또는 부분적으로 생태환경 조성 용도로서 활용되어지는 경우가 있다. 야생 생태지역과 습지는 야생동물에게 녹지 공간을 제공함으





(a)하늘공원



(b)난지골프장

그림 8. 난지도 매립지의 안정화사업 이후 조성된 공원과 골프장 전경

로서 거주지역을 형성하기도 하며, 매립지를 유용하게 활용하기 위한 비용 효과적이면서 친환경적인 방법으로 인식되고 있다. 매립지를 생태환경으로 조성하기 위해서는 사전에 토착 생물에 대한 여러 정보를 수집한 다음, 그 생물들을 보호하면서 도움을 줄 수 있는 방법과 매립지 복토 시스템을 보호할 수 있는 방법들을 검토하여 최종 결정을 내려야 한다.

## 5.2 레크리에이션을 위한 재사용

도시 매립지는 여가 활동을 위한 부대시설로서 재사용되어 질 수 있다. 매립지는 넓은 표면을 가지고 있을 뿐만 아니라 복토표면이 야구나 골프를 위한 지형으로 개발되어 질 수 있기 때문에 여가 활동 목적을 위한 재사용에 적합하다. 더욱이, 지역사회도 그들의 삶의 질을 높일 수 있는 새로운 여가활동 장소를 선호하기 때문에 여가활동을 위한 매립지의 재사용은 이에 적합하다고 할 수 있다.

## 5.3 고부가가치 지역으로 재사용

일부 매립지는 주위의 환경으로 인해 생태학적 개

발이나 여가활동을 위한 장소로서 재사용되기 어려울 수도 있는데, 이러한 부지들은 일반적으로 야생 생태계가 거의 보존되어 있지 않는 산업지역에 위치하고 있다. 그러나 이러한 부지들은 주요 교통수단을 비롯하여 공급자와 소비자가 잘 연결되어 질 수 있는 환경을 가지고 있기 때문에 고부가가치지역으로 재사용 될 좋은 조건을 갖추고 있다.

## 6. 결론

오염토양 부지의 복원 및 재사용은 물론 환경공학적 배경을 갖고 계획 시행되어야 할 것이다. 그러나 본 고에서도 알 수 있듯이 모든 복원 기법 및 재사용이 토목공학의 지반공학적인 부분과 밀접한 관계가 있다는 것을 알 수 있다.

본 고에서의 토양오염은 외국의 사례, 국내의 몇몇 사례를 중심으로 얻은 결론에서 알 수 있듯이 한번 오염된 토양은 복원이 불가능하거나 원상회복에 막대한 비용과 시간이 소모되므로 토양환경의 보전을 위해서는 오염의 사전예방이 무엇보다 중요하다. 또한 신도시 및 단지 조성시 발생하는 토양오염지



## 오염토양 부지의 복원 및 재사용

역, 불량매립지 등에 대한 조사 및 복원이 이루어져야 할 것이며, 더 나아가서는 재건축 등 도시지역 오염토양의 브라운필드(Brownfield)에 따른 복원 절차 및 방법이 강구되어야 할 것이다. 특히 미국의 superfund법을 중심으로 복원비용의 부담 체계 및 기금의 설치·운영, 무한책임의 소급법적 특징, 국가적인 차원에서 복원 우선순위목록정화프로그램구성 등 종합적 환경대응체계 사례를 참고·응용하여 국내에서도 사회적 부담원칙 적용에 따른 환경보전 기금확보, 환경세 도입 및 효과적인 규제기준의 합리성과 관리시스템 구축 등 우리 실정에 맞는 정책 수립방안을 적극 마련해야 할 것이다.

---

### 참고문헌

---

1. 부산광역시 (2003) 문현지구 토양환경 복원사업의 성공적 성과 사례: 문현 금융단지 오염부지 정화사업중심 연구보고서, 부산광역시 남구
2. 환경부 (2002) 토양복원 기술 및 사례집
3. Cunningham, S.D., Anderson, T.A., Schwab A.P., and Hsu, F.C. (1996) Phytoremediation of soil contaminated with organic pollutants, *Advances in Agronomy*, Vol. 56, pp. 55~114.
4. FRTR (1995-2003) Abstracts of remediation case studies, Volume 1-7, Member Agencies of the Federal Remediation Technologies Roundtable.
5. LaGrega, M.D., Buckingham, P.L., Evans, J.C., and Environmental Resource Management (2001) *Hazardous Waste Management*, 2nd edition, McGraw-Hill, New York, NY.
6. Leeson, A. and Hinchee, R. (1995) *Manual: Bioventing principles and practice, Volume II: Bioventing design*, EPA/540/R-95/534a, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
7. U.S. Army Corps of Engineers (1995) *Engineering and Design, Soil Vapor Extraction and Bioventing*, Engineer Manual (EM) 1110-1-4001, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.
8. U.S. EPA (1989) *Stabilization/Solidification of CERCLA and RCRA wastes: Physical tests, chemical testing procedures, technology screening, and field activities*, EPA/625/6-89/022, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
9. U.S. EPA (1994) *Natural Attenuation of hexavalent chromium in groundwater and soils*. Ground Water Issue, EPA/540/S-94/505. Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
10. U.S. EPA (1995) *How to evaluation alternative clean up technologies for underground storage tank sites*, EPA/510-B-95-007, Office of Solid Waste and Emergency Response, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
11. U.S. EPA (1995b) Bergman U.S.A. *Soil sediment washing technology*, Application

# 특집

analysis report, EPA/540/AR-92/075, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.

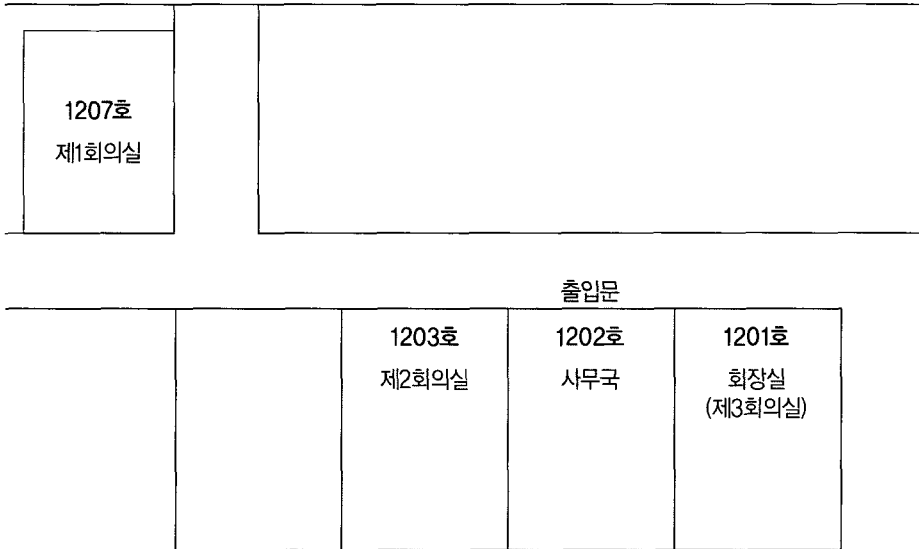
12. U.S. EPA (1996) A citizen's guide to phytoremediation, EPA/542-F-96-014, Office of Solid Waste and Emergency Response,

U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.

13. U.S. EPA (1999) Presumptive remedy for metal-in-soil sites, EPA/F-98/054, Office of Solid Waste and Emergency Response, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.

## 새로 단장한 학회 사무국 및 회의실 안내

우리 학회에서는 새로 구입한 회의실과 사무국을 새단장하고 Open행사를 하였습니다. (화보참조)  
아래와 같이 구조를 안내하오니 많은 이용 있으시기 바랍니다.



서울특별시 서초구 서초동 1355-3 (서초월드 오피스텔 1202호)

전화 : (02)3474-4428, 3474-7865 팩스 : (02)3474-7379 E-mail : kgssmfe@chollian.net