

오염토양 복원기술

한국의국어대학교 환경학과 강 구 영

산업의 생산활동에 수반하여 배출되는 각종 유해성 오염물질은 처리과정을 거치든 안거치든 그 최종 기착지를 토양으로 하고 있다. 특히 우리나라 경우는 오염물질 처리기술의 미숙, 법적규제의 미비, 환경비용의 증가 기피등의 이유에서 비롯한 토양오염의 경향이 매우 심한 실정이다. 토양오염은 필연적으로 지하 식수원의 오염을 초래하며 오염 유해물질이 직·간접 경로를 통하여 인체에 유입될 때 공공대중에 암유발 등 심각한 건강상의 문제를 야기시킬 수 있다.

불안정하게 토양에 매립되거나 처분되고있는 유해성 오염물질로부터 우리의 자연및 생활환경, 국민보건을 보전하기 위해 유해성 오염물질의 토양 및 지하수 확산 및 이동을 예측하고 그 오염물질을 효과적, 경제적으로 처리 제어할수 있는 기술의 개발이 필요할 것이다.

우리 나라에서는 토양오염의 현황조사가 일부 행해지고 있을 뿐 오염토양 복원기술에 대한 연구는 매우 미진하다. 환경부가 1995년 9월 토양환경 보전시행령·시행규칙 제정안에 중금속 카드늄의 11종을 토양오염물질로 하여, 석유류와 유독물의 제조 및 저장시설, 폐금속광산등 3종의 시설을 토양오염유발시설로 지정 관리 하고자 하나 이 시행령제안은 오염토양의 복원복구 법률로는 미비한 것으로 생각된다.

오염토양의 복원처리 기술은 Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act (CERCLA)와 Superfund Amendments and Reauthorization Act (SARA)의 시행으로 활성화 되었다. 1980년에 제정된 CERCLA는 오염지역의 정화를 위한 Superfund를 조성하였으나 1) 오염토양 복원기술과 2)특정오염 지역에 대한 복원기술의 선정에 대한 문제점이 표출 되었다. 이에 따라 1986년 개정된 SARA는 오염지역의 정화처리에 대한 연구를 본격화하고, 토양오염의 처리기술이 개발을 진행할 수 있게 하였다.

우리는 선진국들이 개발한 오염토양 및 지하수의 오염물질 복원 또는 방지에 대한 선진기술의 이론과 실제를 이해하고 우리나라의 특유의 오염지역 환경 복원기술을 성공적으로 개발하여 21세기에 국제적으로 경쟁력을 지닌 오염토양의

방지 및 복원처리 기술을 확립하여야 할 것이다.

다양한 유해오염물, 토양, 및 오염지역의 특성하에 적용될 수 있는 복원기술을 확립 하기 위하여 아래 항목들의 이해가 요구된다.

- 1) 오염토양 복원 계획을 위한 기본적 개념 접근방법
- 2) 복원 기술상에서 토양의 영향
- 3) 복원기술의 선정에 위한 토양특성의 인자
- 4) 복원처리를 위한 기술적 접근방법
- 5) 복원기술 설정
- 6) 잠재 문제점 파악 및 연구 과제 도출

본 논고에서는 복원 기술의 개관을 위해 오염토양의 복원 시스템, 오염토양의 복원처리 기술의 선정에 위한 처리능 연구를 간략히 기술 하였다.

오염토양 복원 시스템 (Soil Remediation System)

복원기술 (Remediation)은 오염원 관리·처리 체제를 통하여 오염토양 및 지하수 환경계를 자연상태로 환원하는 기술로 미국을 위시한 선진국가에서 그연구 및 현장처리가 활발하게 진행중에 있다. 복원기술은 폐기물 저장 및 폐기지역, 지하 유류저장고의 유류 유출지역, 지하수 오염지역, 미관리된 유해물질 방출지역 등에 매우 광범위 하게 적용되고 있다. 오염지역 복원기술은 오염원 제거, 자원화, 잔류오염원 및 오염물질 제거를 목표로 접근된다.

오염토양의 복원기술은 1)In-situ, 2) Prepared Bed, 그리고 3)In-tank으로 분류되어진다. In-situ 복원처리 시스템은 오염물질이 오염 또는 축적된 토양을 굴착 이동 하지않고 오염물질을 제거, 분해하는 기술이다. 이 기술은 경제적으로 유리하여 미국의 경우 복원기술의 중점 지원 및 연구과제로 되어있다. In-situ 복원기술은 휘발성 유해오염 물질을 제거하는데 효과적인 Vapor Extraction 복원 기술과 함께 현재 오염 현장에서 오염토양 복원처리를 효과적으로 처리할 수 있는 기술로 확인 되고 있다. 특히, in-situ 생물학적 복원기술에 대한 연구와 적용이 매우 활발하게 진행 되고있다.

Prepared Bed 시스템은 오염물질이 오염된 토양을 파서 차단시설 및 처리시설이 설치된 새로운 Bed 지역에 오염토양을 옮겨 처리한 후 원래 굴착지로 환원하는 시스템이다. 이 기술에는 물리, 화학 및 생물학적인 처리방법이 사용될 수 있다. 이 처리 시스템은 오염물질의 확산을 방지하고 오염물질의 분해능을 증진

시킬수 있으나 bed 지역 설치등에 많은 경비가 드는 문제점이 있다.

In Tank 시스템은 굴착된 오염토양을 slurry또는 고형상으로 반응기에 옮겨 최적 분해능 상태로 오염물질을 처리 하는 시스템이다. 반응기는 회분식, 연속식 또는 plug 흐름식 처리 반응조를 사용 한다.

오염토양 복원처리를 위한 기본적인 진행방법은 Fig. 1 과 같다. 오염토양 복원 시스템의 기본 단계는 오염토양지역의 지질학적 특성, 토양의 성상 및 오염물질 성향을 조사후 오염지역의 문제점을 평가, 복원 관리체계 범위를 수립한다. 복원 처리 범위가 수립되면 최적 처리방법을 도출하여 오염물질의 분해능을 증가할 수 있는 기술의 확립 및 오염물질과 토양 성상과의 상호관계를 정확히 파악하여 오염토양 복원기술에 필요한 설계인자 및 제한인자등을 조사한다. 최종적으로는 오염지역의 복원기술을 확립하고 복원기술의 상업화를 유도 하여 국민건강과 복지에 기여할 수있게 한다.

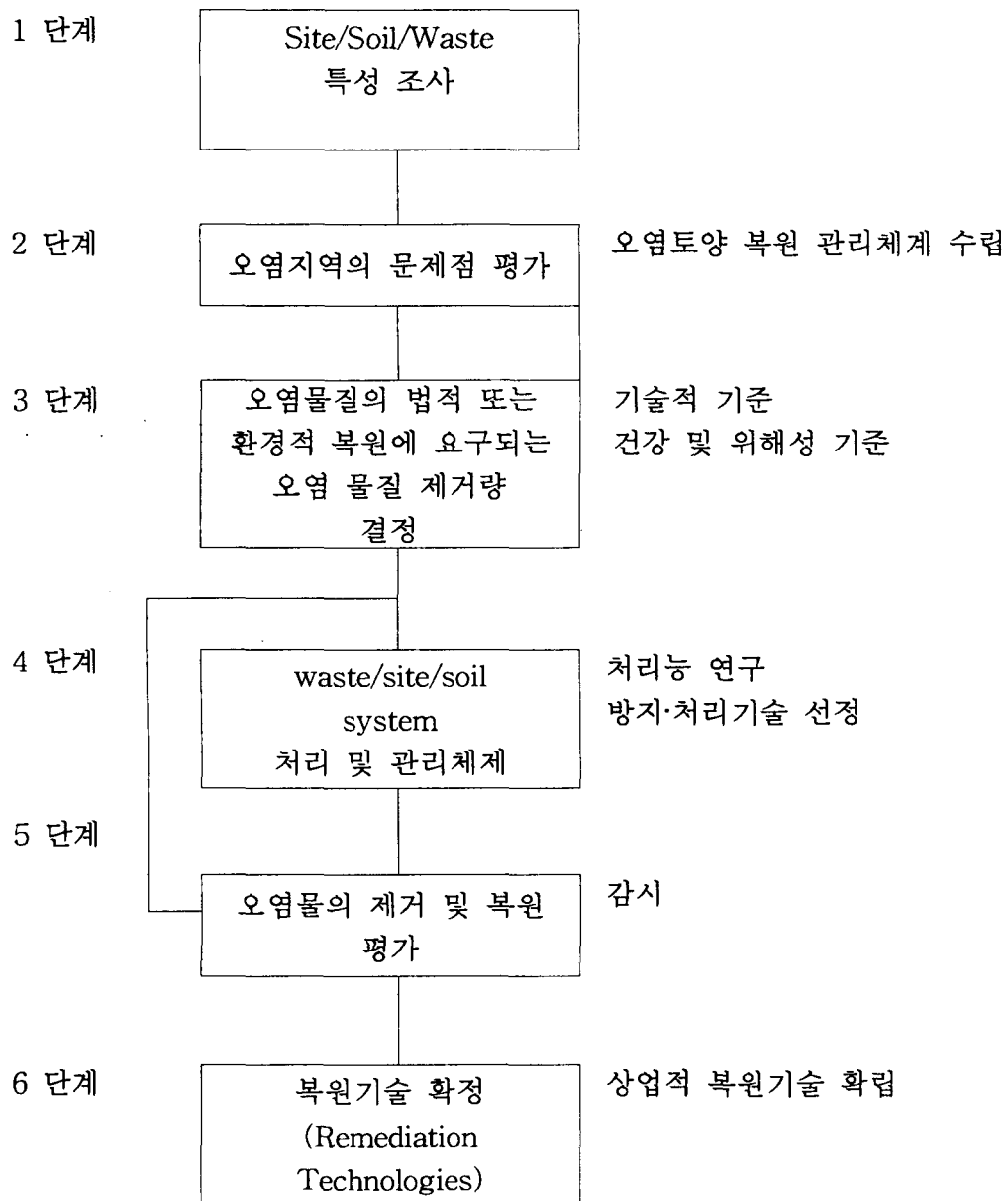


그림 1. 유해오염물질이 오염된 오염토양의 기본적 복원·정화처리 단계

위의 오염토양 복원기술을 확립하기 위하여 4단계인 처리능의 연구가 기본적인 항목으로 CERCLA에서 제시되고 있다. CERCLA의 복원기술의 확립을 위하여 1)Treatability Study 2)Laboratory Screening to Validate Technology 3)Bench Scale Testing to Develop Performance 4)Pilot Scale Testing to Develop Performance, Cost, and Design Data등의 순서가 요구되어진다.

Treatability Study

오염토양 복원을 위한 연구에 6단계 복원처리단계에서 4단계인 오염토양의 처리능에 관한 연구이다. 처리능의 연구는 오염지역내 존재하고 있는 잠재성 오염물질의 분해 또는 탈독성을 평가하는 방법으로 실험실규모 또는 현장실험을 통하여 실시 할수 있다. Treatability study의 필요성은 자연계에 존재하고 있는 토양은 매우 복잡한 유기물과 광물질로 구성되어있고, 혼합된 오염물질로 구성되어 있다. 그러므로 오염토양 복원기술은 토양, 오염지역 및 오염물질의 특성에 따라 매우 민감한 결과를 야기 시키고 있다.

위의 처리능을 효과적으로 평가 하기위하여 아래와 같은 평가가 연구전에 반듯이 시행되어야 한다.

- Soil/Sit/Waste 특성
- 복원기준
- 오염지역의 감시 및 제한 인자 파악
- 실행가능한 공학적기술 및 관리
 - Soil/Site/Waste 제한
- 처리효율

오염토양의 처리능에 관한 평가를 위하여 주요 평가항목은 다음과 같다.

- Degradation
- Transformation
- Immobilization/Mobilization
- Monitoring for treatment performance

이상과 같이 효과적인 오염복원기술을 확보하기 위하여 처리능의 연구는 CERCLA에서 강력히 추진되고 있다. CERCLA의 처리능 연구를 위하여 복원조사 및 가능성연구 (Remedial Investigation/Feasibility Study:RI/FS)조사는 기본적인

연구로 오염지역 특성과 복원기술을 다방면으로 조사하는 단계로 오염토양의 복원실시전에 실험실 규모의 연구의 결과를 권장하고 있다. 이 결과 미국의 오염지역에 대한 복원처리 효과가 상승되고, 많은 복원기술을 축적하는 결과를 가져왔다. 실험실 규모의 오염토양 정화를 위한 연구결과를 토대로 오염지역의 복원작업도 성공적으로 시행되고 있다. 한 예로서 미국 전역에 걸쳐있는 공군기지내 켄트유류 오염지역에서 성공적으로 오염토양이 복원된 Soil Vapor Extraction (SVE) 기술로 인하여 SVE기술은 현재 상업화가 되어있다. 이러한 상업화된 복원기술은 충분한 실험실규모의 연구를 통하여 많은 기술적 특허가 출현되어 있기 때문에 현재 기술의 발전에 장애요소가 되는 단점도 지니고 있다.

오염토양의 처리능 연구에 필요한 기간 및 경비는 아래의 표 1과 같다.

표 1.Characteristics of Laboratory,Bench and Field Scale Treatability Studies

Scale	Type of Data Generated	Study Size	Time Required	Cost
Laboratory	Batch Kinetic	Beaker: -1/100 Full scale	Day/Weeks	\$10,000 to \$50,000
Bench	Mass Transfer Fluid Mobility Limitation	Bench-Top: -1/10 Full scale	Weeks/Months	\$50,000 to \$250,000
Field	Full Scale Design Performance, Cost Data	Full Scale	Months/Years	\$250,000 to \$1,000,000

맺음말

오염토양은 장기적이고 광범위한 지역내에 환경적 악영향을 야기시키는데에 심각성이 있다. 토양의 오염으로 수계, 대기 및 지하수의 오염을 직·간접으로 진행되기 때문에 토양오염의 복원은 필수적으로 개발되어야 하는 기술이고, 21세기에 국제적으로 경쟁력을 지닌 기술로 평가할 수 있다. 이러한 경쟁력있는 기술을 확보하기 위하여 정부, 기업 및 대학의 연구소와 협동체제를 긴밀하게 구축하여 분담하게된 연구를 효율적으로 진행되어야 하겠다. 특히, 많은 연구인원이 요구되어지는 실험실 규모의 연구는 필수적인 과제로 정부와 기업체의 재원 협조를 통해 전국 환경관련 학과 및 연구소와 긴밀한 협조체제를 종합적인 연구계획을 수립하여야 할것이다.

참고문헌

1. R. M. Hall, Jr., N. S. Bryson, "Comprehensive environmental response, compensation, and liability act (Superfund)," in *Environmental Law Handbook*, 18th ed., G. J. Arbuckle, Ed., Government Institutes, Rockville, MD, 1985.
2. Public Law 99-499. "Super fund Amendment and Reauthorization Act of 1986," U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
3. "Handbook on In Situ Treatment of Hazardous Waste-Contaminated Soils," U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, OH, EPA/540/2-90-002, January, 1990.
4. "National oil and Hazardous substance pollution contingency plan; proposed rule," Environmental Protection Agency, 53FR (Federal Register) 51394, December 21, 1988.
5. "Seminar on Site Characterization for Subsurface Remediations," Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, Oklahoma and the Center for Environmental Research Information, Cincinnati, OH, CERI-89-224, September, 1989.
6. M. R. Scalf, D. C. Draper, "RSKERL-Ada Superfund Technology Support Center. The First Two Years," U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK, November, 1989.
7. "Superfund Innovative Technology Evaluation (SITE) gram," U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, EPA/540/8-89/010, November, 1989.
8. D. Scanning, "Assessment of international remedial technologies for application to Superfund sites," in *Proceedings of Second International IGT Symposium on Gas, Oil, Coal, and Environmental Biotechnology*, New Orleans, LA, December 11-13, Institute of Gas Technology and Gas Research Institute, Chicago, IL, 1989, ch. 2.
9. "Demonstration of Remedial Action Technologies for Contaminated Land Groundwater," U.S. Environmental Protection Agency, *Proceedings and Appendices, Third Internatl. Conf., NATO Committee on Challenges of Modern Society (CCMS)*, Montreal, Canada, November 6-9, 1989.
10. "Proceedings: International Conference on New Frontiers for Hazardous Waste Management, Pittsburgh, PA." U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, OH, 1985.
11. "Proceedings: Second International Conference on New Frontiers for Hazardous Waste Management, Pittsburgh, PA." U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, OH, 1987.
12. "Assessment of International Technologies for Superfund Applications: Technology Review and Trip Report Results," U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, EPA/540/2-88/003, 1988.
13. "Assessment of International Technologies for Superfund Applications-Technology Identification and Selection," U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, OH, EPA/600/2-89/017, 1989.
14. T. H. Pfeiffer, D. R. West, "Technology Transfer in the U.S. Environmental Protection Agency's Hazardous Waste Office," *JAPCA* 40: 171 (1990)
15. "Bioremediation of Hazardous Waste Sites Workshop," U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, D.C., and Center for Environmental Research Information, Cincinnati, OH, CERI-89-11, February, 1989.
16. J. L. Sims, R. C. Sims, J. E. Matthews, "Bioremediation of Contaminated Soils," U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK, EPA/600/9-89/073, August, 1989.
17. "Review of In-Place Treatment Techniques for Contaminated Surface Solids," U.S. Environmental Protection Agency, Municipal Environmental Research Laboratory, Cincinnati, OH, EPA-540/2-84-0003a, September, 1984.
18. R. C. Sims, D. L. Sorensen, J. L. Sims, J. E. McLean, R. Mahmood, R. R. Dupont, "Review of In-Place Treatment Technologies for Contaminated Surface Solids-Volume 2: Background Information for In-Situ Treatment," U.S. Environmental protection

- Agency, Risk Reduction Research Laboratory, Cincinnati, OH, EPA-540/2-84-003b, 1984.
19. G. Rich, K. Cherry, *Hazardous Waste Treatment Technologies*, Puvan Publishing Co. Northbrook, Illinois, 1987 ch. 7.
 20. "Technology Screening Guide for Treatment of CERCLA Soils and Sludges," U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, D.C., EPA/540/2-88/004, September, 1988.
 21. R. C. Sims, J. L. Sims, "Cleanup of contaminated soil," in *Utilization, Treatment, and Disposal of Waste on Land*, K. W. Brown, B. L. Carlile, R. H. Miller, E. M. Turlledge, E. C. A. Runge, Eds., Soil Science Society of America, Wisconsin, 1986, p. 257.
 22. "Experience in Incineration Applicable to Superfund Site Remediation," U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, and Center for Environmental Research Information, Cincinnati, OH, EPA/625/9-88/008, December, 1988.
 23. R. R. Dupont, R. C. Sims, J. L. Sims, D. L. Sorensen, "In Situ biological treatment of hazardous waste-contaminated soils," in *Biotreatment Systems*, D. L. Wise, Ed, CRC Press, Florida, 1988, ch. 2.
 24. "Hazardous Waste Land Treatment," U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, DC., SW-874, 1983.
 25. R. Willis, W. W-G. Yeh, *Groundwater Systems Planning and Management*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1987.
 26. J. T. Wilson, L. E. Leach, J. Michalowski, S. Vendegrift, R. Callaway, "In Situ Bioremediation of Spills from Underground Storage Tanks: New Approaches for Site Characterization, Project Design, and Evaluation of Performance," U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK, EPA/600/2-89/042, September, 1989.
 27. R. C. Sims, W. J. Doucette, J. E. McLean, W. J. Grenney, R. R. Dupont, "Treatment Potential for 56 EPA Listed Hazardous Chemicals in Soil," U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK, EPA/600/6-88/001, April, 1988.
 28. P. Nkedi-Kizza, P. S. C. Rao, J. W. Johnson, "Adsorption of Diuron and 2,4,5,-T on soil particle separates," *J. Environ. Qual.* 12: 195 (1983)
 29. R. J. Mahmood, R. C. Sims, "Mobility of organics in land treatment systems," *J. Environ. Eng.* 112: 236 (1986)
 30. P. S. C. Rao, A. G. Hornsby, D. P. Kilcrease, P. Nkedi-Kizza, "Sorption and transport of hydrophobic organic chemicals in aqueous and mixed solvent systems: model development and preliminary evaluation," *J. Environ. Qual.* 14: 376 (1985).
 31. A. L. Baehr, "Selective transport of hydrocarbons in the unsaturated zone due to aqueous and vapor phase partitioning," *Water Resour. Res.* 23: 1926 (1987).
 32. D. K. Kreamer, E. P. Weeks, G. M. Thompson, "A field technique to measure the tortuosity and sorption-affected porosity for gaseous diffusion of materials in the unsaturated zone with experimental results from near Barnwell, South Carolina," *Water Resour. Res.* 24, 331 (1988).
 33. R. S. Horvath, "Microbial co-metabolism and the degradation of organic compounds in nature," *Biotechnol. Rev.* 36: 146 (1972).
 34. J. Keck, R. C. Sims, M. Coover, K. Park, B. Symons, "Evidence of cooxidation of polynuclear aromatic hydrocarbons in soil," *Water Res.* 23: 1467 (1989).
 35. M. L. Rochkind, J. W. Blackburn, G. Sayler, "Microbial Decomposition of Chlorinated Aromatic Compounds," U.S. Environmental Protection Agency, Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, OH, EPA/600/2-86/090, 1986.
 36. K. S. Park, R. C. Sims, W. J. Doucette, J. E. Matthews, "Biological transformation and detoxification of 7,12-dimethylbenz(a)anthracene in soil systems," *J. Water Pollut. Control Fed.* 60: 1822 (1988).
 37. R. C. Sims, J. L. Sims, R. R. Dupont, "Human health effects assays," *J. Water Pollut. Control Fed.* 60: 1093 (1988).
 38. T. M. Vogel, C. S. Criddle, P. L. McCarty. "Transformation of halogenated aliphatic compounds," *Environ. Sci. Technol.* 21: 722 (1987).
 39. D. E. Armstrong, J. G. Konrad, "Nonbiological degradation of pesticides," in *Pesticides in Soil and Water*, W. D. Guenzi, Ed., Soil Science Society of America, Madison,

- Wisconsin, 1974, ch. 7.
40. C. Abbott, R. C. Sims, "Use of bioassays to monitor polycyclic aromatic hydrocarbon contamination in soil," in *Superfund '89, Proc. 10th National Conf.*, Hazardous Materials Control Research Institute, Silver Spring, Maryland, 1989, p. 23.
 41. "Guide for Conducting Treatability Studies under CERCLA," U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid and Emergency Response and Office of Research and Development, Washington, DC, Contract No. 68-03-3413, November, 1989.
 42. M. P. Coover, R. C. Sims, W. J. Doucette, "Extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons from spiked soil," *J. Assoc. Offic. Anal. Chem.* 70: 1018 (1987).
 43. K. S. Park, R. C. Sims, R. R. Dupont, W. J. Doucette, J. E. Matthews, "Fate of PAH compounds in two soil types: influence of volatilization, abiotic loss and biological activity," *Environ. Toxicol. Chem.* 9: 187 (1990).
 44. A. S. Donagian Jr., P. S. C. Rao, "Overview of terrestrial processes and modeling," in *Guidelines for Field Testing Soil Fate and Transport Models*, S. C. Hern, S. M. Melancon, Eds., U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Monitoring Systems, Las Vegas, NV, 1986, p. 1-1.
 45. D. C. Digulio, I. H. Suffet, "Effects of physical, chemical, and biological variability in modeling organic contaminant migration through soil," in *Superfund '88, Proc. 9th National Conf.*, Hazardous Materials Control Research Institute, Silver Spring, MD, 1988, p. 132.
 46. J. Weaver, C. G. Enfield, S. Yates, D. Kremer, D. W. "Predicting Subsurface Contaminant Transport and Transformation: Considerations for Model Selection and Field Validation," U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK, EPA/600/2-89/045, August, 1989.
 47. T. E. Short, "Modeling processes in the unsaturated zone," in *Land Treatment: A Hazardous Waste Management Alternative*, R. C. Loehr, J. F. Malina, Eds., The University of Texas at Austin, TX, 1986, p. 211.]
 48. "Interactive Simulation of the Fate of Hazardous Chemicals during Land Treatment of Oily Wastes: RITZ User's Guide," U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK, EPA/600/8-88-001, 1988.
 49. W. A. Jury, W. F. Spencer, W. J. Farmer, "Behavior assessment model for trace organics in soil: model description," *J. Environ. Qual.* 12: 558 (1983).
 50. J. E. McLean, R. C. Sims, W. J. Doucette, C. L. Caupp, W. J. Grenney, "Evaluation of mobility of pesticides in soil using U.S. EPA methodology," *J. Environ. Eng.* 114: 689 (1988).
 51. D. K. Stevens, W. J. Grenney, Z. Yan, "User's Manual: Vandose Zone Interactive Processes Model," Utah State University, Logan, UT, 1988.
 52. D. K. Stevens, W. J. Grenney, Z. Yan, R. C. Sims, "Sensitive Parameter Evaluation for a Valdose zone Fate and Transport Model," U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK, EPA/600/2-89/039, 1989.
 53. B. D. Symons, R. C. Sims, W. J. Grenney, "Fate and transport of organics in soil: model predictions and experimental results," *J. Water Pollut. Control Fed.* 60: 1684 (1988).
 54. W. J. Gernney, C. L. Caupp, R. C. Sims, T. E. Short, "A mathematical model for the fate of hazardous substances in soil: model description and experimental results," *Hazardous Wastes & Hazard. Materials* 4: 223 (1987).
 55. J. Lynch, B. R. Genes, "Land treatment of hydrocarbon contaminated soils," in *Petroleum Contaminated Soils, Remediation Techniques, Environmental Fate, and Risk Assessment*, P. T. Kosteki, E. J. Calabrese, Eds., Lewis Publishers, Chelsea, MI, 1989, p. 163.
 56. D. Ross, T. P. Marziarz, A. L. Bourquin, "Bioremediation of hazardous waste sites in the USA: case histories," in *Superfund '88, Proc. 9th National Conf.*, Hazardous Materials Control Research Institute, Silver Spring, Maryland, 1988, p. 395.
 57. L. Murdoch, B. Patterson, G. Losonsky, W. Harrar, "Innovative Technologies of Delivery or Recovery: A Review of Current Research and a Strategy for Maximizing Future Investigations," U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, OH, Contract 68-03-3379, 1988.
 58. R. C. Kuhn, K. R. Piontek, "A Site-Specific In Situ Treatment Process Development

- Program for Wood Preserving Site," *Proceedings of Oily Waste Fate, Transport, Site Characterization, and Remediation*, Technical Assistance Program of U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK, May 17-18, 1989.
59. R. R. Dupont, J. A. Reineman, "Evaluation of Volatilization of Hazardous Constituents at Hazardous Waste Land Treatment Sites," U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK, EPA 600/2-86/071, 1986.
 60. *Pesticides in soil and Water*, W. D. Guenzi, Ed., Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, 1974.
 61. J. J. Johnson, R.J. Sterrett, "Analysis of in situ air stripping data," *Proceedings of the 5th National Conference on Hazardous Waste and Hazardous Materials*, Control Research Institute, Las Vegas, NV, April, 1988, p.451.
 62. R.L. Johnson, "Soil vacuum extraction: laboratory and physical model studies," *Proceedings of the Workshop on Soil vacuum extraction, U.S. Environmental Protection Agency*, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK, April 27-28, 1989.
 63. D.C. Diguilio, J.S. Cho, R.R. Dupont, M.W. Kembrowski, "Conductance of Field Tests for Evaluation of soil vacuum Extraction Applicability and Design," U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK, 1990.
 64. R. Miller, *Evaluation of Enhanced Biodegradation using Soil Venting as an Oxygen Source*, Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Utah State University, Logan, UT, 1990.
 65. R. Hinchee, "Enhanced biodegradation through soil venting," *Proceedings of the Workshop on Soil vacuum Extraction*, U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK, April 27-28, 1990.
 66. R. Hinchee, D. Downey, "In situ enhanced biodegradation of petroleum distillates in the vadose zone," *Proceedings of International Symposium on Hazardous Waste Treatment: Treatment of Contaminated Soils*, Air and Waste Management Association U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, OH, February 5-8, 1990.
 67. "Cleanup of Releases from Petroleum USTs: Selected Technologies," U.S. Environmental Protection Agency, Office of Underground Storage Tanks, Washington, DC, EPA/530/UST-88/001, 1988.
 68. R. L. Huddleston, C. A. Bleckman, J. R. Wolfe, "Land treatment biological degradation processes," in *Land Treatment: A Hazardous Waste Management Alternative*, R. C. Loehr, J. F. Malina, Eds., University of Texas Press, Austin, TX, 1986, p. 41.
 69. M. R. Overcash, D. Pal, *Design of Land Treatment Systems for Industrial Wastes—Theory and Practice*, Ann Arbor Science, Ann Arbor, MI, 1979.
 70. J. M. Sufliata, J. M. Tiedje, "The anaerobic degradation of 2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid by a dehalogenating bacterial consortium," Abstracts of the Annual Meeting, Amer. Soc for Microbiol. Washington, DC, 1983, p. 266.
 71. J. M. Sufliata, A. Horowitz, D. R. Shelton, J. M. Tiedje, "Dehalogenation: a novel pathway for the anaerobic biodegradation of haloaromatic compounds," *Science* 218: 1115 (1982)
 72. H. Kobayashi, B. E. Rittmann, "Microbial removal of hazardous organic compounds," *Environ. Sci. Technol*, 16: 170A (1982).
 73. B. Walton, T. A. Anderson, "Microbial degradation of trichloroethylene in the rhizosphere: Potential application to biological remediation of waste sites," *Appl. Environ. Microbiol.* 56: 1012(1990)
 74. W. Aprill, R. C. Sims, "Evaluation of the use of prairie grasses for stimulation polycyclic aromatic hydrocarbon treatment in soil," *Chemosphere*, 20:253 (1990).
 75. M. J. Cullinane, Jr., L. W. Jones, P. G. Malone, "Handbook for Stabilization/Solidification of Hazardous Wastes," U.S. Environmental Protection Agency, Hazardous Wastes Engineering Research Laboratory, Cincinnati, OH, EPA/50-2-86/001 1986
 76. "Technology Evaluation Report: SITE Program Demonstration Test, International Waste Technologies, In Situ Stabilization/Solidification, Hialeah, Florida, Volume 1, :U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati,

- OH, EPA/540/5-89/004a, 1989
77. R. Raghavan, E. Coles, D. Dietz, "Cleaning Excavated Soil Using Extraction Agents: A State-of-the-Art Review," U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, OH, EPA/600/2-89/034a, 1990
 78. D. Dworkin, D. J. Messinger, R. M. Shapot, "In Situ Flushing and Bioremediation Technologies at a Creosote-based Wood Treatment Plant," *Proceedings of the 5th National Conference on Hazardous Wastes and Hazardous Materials*, Las Vegas, NV, Hazardous Materials Control Research Institute, Silver Spring, MD, April 19-21, 1988.
 79. D.L. Michaelson, D.A. Wallis, F. Sebba, "In situ biological oxidation of hazardous organics," *Env. Prog.* 3: 103 (1984).
 80. J. Horng, S. Banerjee, "Evaluating Electro-Kinetics as a Remedial Action Technique," in *Proceedings, Second International Conference on New Frontiers for Hazardous Wastes Management*, U.S. Environmental Protection Agency, Hazardous Wastes Engineering Research Laboratory, Cincinnati, OH, EPA/600/9-87/018F, 1987, p. 65
 81. G. H. Brox, D. E. Hanify, "A new solid/liquid contact bioslurry reactor making bio-remediation more cost-effective," presented at the Colorado Hazardous Wastes Conference, Denver, Colorado, November 6-7, 1989.
 82. M. J. McFarland, W. L. Aprill, X. J. Qiu, R. C. Sims, "Biological composting using the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* for remediation of soil contaminated with wood preserving and petroleum waste organic," *Proceedings of the Institute of Gas Technology (IGT) Symposium on Gas, Oil, and Environmental Biotechnology*, New Orleans, LA, December 11-13, 1989.
 83. "Experience in Incineration Applicable to Superfund Site Remediation," U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, EPA/625/9-88/008, 1988
 84. G. Kang and D.K. Stevens. "Degradation of pentachlorophenol in bench scale bioreactors using the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*", *Haz. Waste & Haz. Materials*, Vol. 11, 1994.
 85. G. Kang, J. Jung, K. Park, and D. K. Stevens. "Mineralization of Hazardous Chemicals by Heme Reaction", *Emerging Technologies in Hazardous Waste Management VII*, American Chemical Society. pp 407-412. 1995.
 86. G. Kang and D.K. Stevens. "Organopollutants in a Fluidized Bed Reactor using *P. chrysosporium*." *CSCE-ASCE*, Vol. 2. pp. 2005-2012. 1993.
 87. D.K. Stevens, S. Chen, and G. Kang. "Pentachlorophenol (PCP) Degradation using Heme and Hydrogen Peroxide", *Chemical Oxidation*, 1993.