기술정보

오염된 지반 및 지하수 복원방법의 최근 동향 및 처리방법들의 비교 분석

윤 춘 경
(건국대학교 농과대학 조교수)

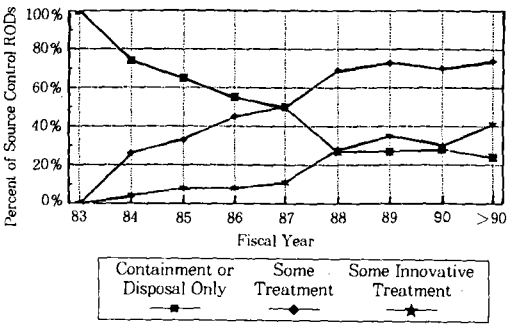
1. 서 론

토양환경보전법이 1996년부터 국내에 적용되면서 토양과 지하수의 오염문제, 그리고 오염된 지역의 복원에 사용되는 처리기술의 개발 및 적용에 관심이 높아지고 있다. 그런데 이 분야의 기술은 다른 오래된 산업기술처럼 신뢰할 만한 표준적인 방법이 자기 개발되어 있지 못하고, 약 20년전부터 환경복원사업이 시작되었으나 아직도 경험이 부족하고 자료가 충분하지 않아 오염현장의 처리방법 결정 등에 어려움을 겪고 있다. 이러한 상태에서는 이미 끝난 환경복원사업의 자료분석이 향후 이와 유사한 복원사업을 계획하고 처리기술을 결정하는데 도움이 될 것이다. 이 글에서는 환경복원기술의 최근 추세의 설명과 오염복원에 사용하는 처리방법들의 비교분석, 그리고 위험폐기물의 구분방법에 대한 새로운 제안을 소개하여 오염된 지반이나 지하수 복원사업의 계획 및 처리기술적용에 도움을 주고자 한다.

2. 환경복원에 사용되는 기술의 최근 동향

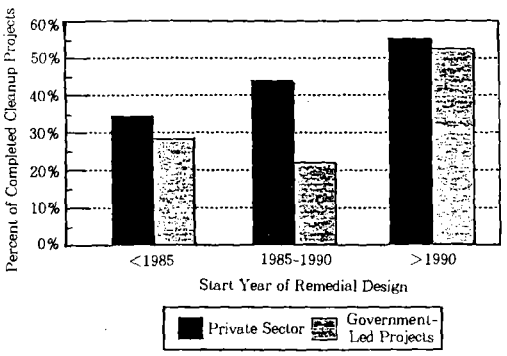
오염된 지반과 지하수의 복원방법에는 크게 봉쇄방법(containment-only)과 처리방법(treatment)으로 두 가지로 구분할 수 있다. 봉쇄방법이란 slurry wall 또는 capping으로 차폐시켜 외부로의 오염확산을 방지하거나 오염물질을 굴착(excavation)하여 매립장 등에 투기하는 방법을 말하며, 처리방법이란 소각(incineration), 안정화(stabilization), 토양증기추출(soil vapor extraction), 토양세척(soil washing) 그리고 생물학적처리(bioremediation) 등과 같이 오염물질의 성분을 전환시키는 방법을 가리킨다. 미국에서는 1986년 SARA(Superfund Amendment and Reauthorization Act)가 통과된 후에 감독기관에서는 오염물질을 굴착하거나 봉쇄하는 기존의 방법에서 처리방법의 적용을 유도하고 있다. 이와 같은 추세는 USEPA(U.S. Environmental Protection Agency)의 1993년 자료에 의하면 그림. 1에 있듯이 Superfund 현장에서 뚜렷하다.[1] 1983년에는 100% 봉쇄방법을 사용하였으나 점차로 처리방법의 적용이 증가하여, 1990년대에는 봉쇄방법이 전체의 약 20%정도에 그치고 상대적으로 처리방법의 적용이 상대적으로 증가하였다.[1] 이러한 추세는 HAZRISK database[2] 자료에도 나타나 있는데, 그림. 2에 보면 1990년대의 처리기술방법 적용이 1985년 이전보다 증가하였고, 이러한 추세는 정부사업보다 민간사업에서 1985-1990 사이에 먼저 시작하였음을 알 수 있다.[1]

USEPA의 통계에 나타난 Superfund 사업은 전체 복원사업의 20-30%인 점을 고려하면 HAZRISK 자료가 보다 대표성이 있다고



Sourece : USEPA Office of Emergency and Remedial Response

그림. 1. Superfund remedial actions : treatment and disposal decisions for source control(painter, 1996)



Source : HAZRISK® database

그림. 2. Utilization of treatment technologies (painter 1996)

할 수 있다. 그림. 2에서 처리방법 적용의 증가율이 비교적 완만하게 나타나 있으나, 그림. 3에서는 특정한 처리방법의 적용이 뚜렷이 증가하였음을 발견할 수 있다. 예를 들어 소각과 안정화방법의 적용은 과도한 비용 문제로 감소하였고, 생물학적처리, 토양세척 그리고 토양증기추출 방법들은 1980년대에는 비교적 새로웠으나 최근에 여러 군데의 성공적인 적용사례를 힘입어 적용이 급격히 증가하고 있다.[1] 흥미있는 것은 이들 세 가지 방법의 적용사례가 SARA가 통과된 후에 급격히 증가하고 있다는 점인데, 예를 들면 이들의 적용이 1987년에 전체 ROD(Records of Decision)가 겨우 10%였는데 1991년에는 30%를 넘었다.

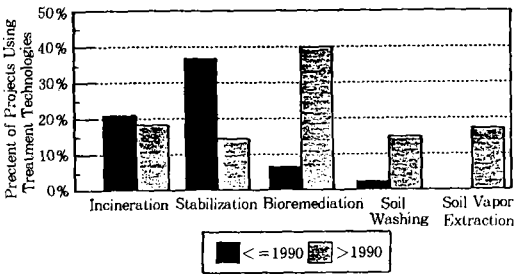


그림. 3. Technology use over time(painter 1996)

3. USEPA의 HWIR(Hazardous Waste Identification Rule)규정 제안

미국 의회에서는 1978년 처음으로 위험폐기물(hazardous waste)의 관리를 위하여 RCRA(Resource Conservation and Recovery Act)를 제정하였는데 이 법에 의해서는 새로이 발생하는 위험폐기물만 관리될 뿐 기존의 오염지역의 복원이 어려웠다. 따라서 1980년 CERCLA(Comprehensive Environmental Response, Comopensation and Reliability Act)을 제정하고 16억$의 재원을 확보하여 그후 5년간 오염지역의 복원에 착수하였다. 이 기간이 지난 후 약 2년간의 논의 거친 후에 CERCLA를 다시 수정 보완하여 길이가 4배나 긴 SARA(Superfund Amendment and Reauthorization Act)를 제정하였으며 85억$의 추가재정을 확보하여 본격적인 환경오염복원사업을 추진하고 있다.[3]

그런데 CERCLA가 발표될 때부터 RCRA에 명시되어 있는 악명높은 "mixed"와 "derived-from"이라는 규정이 문제가 되어 왔다. 기존의 RCRA에 하면 USEPA에서 정해 높은 위험물질항목에 속하거나 또는 그 물질이 위험한 특성을 나타내면 위험폐기물로 분류하

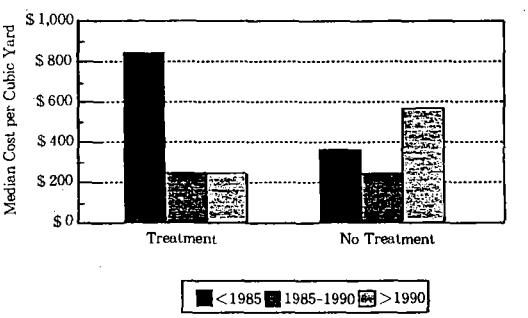
고 있다. "Mixed" 규정이란 어떤 고형폐기물이라도 농도에 관계없이 위험물질항목에 속한 물질과 섞여 있으면 전체를 위험물질이라고 구분한다는 것이다. 따라서 미량이라도 위험물질항목의 물질이 섞여 있으면 토양 전체가 위험폐기물로 분류되고 이와 같은 해석은 환경오염의 복원사업분야에 커다란 영향을 미치고 논란의 대상이 되었다. 이와 유사하게 "derived-from" 규정도 미량의 위험물질이 포함되어 있으면 물질전체를 위험물질로 구분하며 위험물질의 최급과정에서 발생하는 폐기물도 위험물로 구분한다. 이 규정에 의하면 위험폐기물을 처리하여 처리가 끝난 후에 위험물질이 전혀 잔류하지 않아도 위험폐기물로 분류하게 된다.[4)]

이러한 모순으로 인하여 오랫동안 논란을 거듭하다가 1995년 12월에 USEPA는 HWIR을 제안하였다.[5)] 이 규정에 의하면 위험물질항목에 있는 물질이 일반폐기물로 분류받을 수 있는 방법이 두 가지 있다. "Delisting process"와 "contained-in policy에서의 exit level"이다. Delisting process는 방대한 분량의 실험과 관련자료에 의하여 위험물질항목에 속한 물질의 삭제를 요구하는 것으로 일반적으로 긴 절차가 필요하다. contained-in policy에는 USEPA에게 오염된 매체(토양 쓰레기 또는 지하수 등)가 exit level 이하 미량의 위험물질항목에 속한 물질을 함유하고 있을 경우 일반폐기물로 분류하면 위험이 있는지 여부를 평가할 수 있도록 하였다. USEPA는 376항목에 대하여 $1/10^6$의 위험확율에 의하여 exit level을 제안하였는데, 이러한 최근의 움직임은 폐기물발생자에게 일반폐기물로 분류받을 수 있는 많은 기회를 제공하고 있다. 어떠한 폐기물이 위험폐기물이냐 일반폐기물이냐의 분류에 따라 처리에 소요되는 비용은 현격한 차이가 있다. 이와 같은 새로운 제안은 대규모 오염복원현장에서와 같이 다량의 폐기물을 발생시키는 곳에서는 유리하게 적용될 것이나, 소량의 폐기물 발생지역에는 까다로운 절차와 많은 실험 등으로 인하여 그 효과를 감소시킬 것 같은데 아마도 USEPA는 여러 분야에서의 의견과 압력을 받아서 소규모현장에도 적용이 용이하도록 수정할 것으로 예상된다.[4)]

4. 복원기술의 비용분석

가. 처리단가(unit cost)

여기에서 처리단가란 단위물량의 처리에 소요되는 비용으로서 운반, 실험, 측정, 청소, 관리비용 등 복원과정에 소요되는 모든 비용을 포함한다. 그림. 4에는 비용을 1995년 기준으로 환산하여 시간에 따른 변화를 보여주고 있다.[1)] 처리에 소요되는 비용은 전반적으로 감소하였는데, 이유는 우선 앞에서도 설명하였듯이 소각과 같은 고비용기술에서 증기추출법과 같은 저비용기술로 전환한 것이고, 다른 이유는 처리기술들의 적용경험에 의해 비용을 감소시켰기 때문인다. 특히 과거 10여년 동안 이러한 처리기술들을 어떻게 최적화하여 적용할 것인가에 대해 꾸준히 연구하여 비용을 많이 절감하였다. 비용절감현상은 봉쇄방법의 분야에서도 기대되었으나 1990년까지는 이러



Total cleanup cost(constant 1995 dollars) divided by volume of contaminated material.

그림. 4. Trends for unit costs(painter 1996)

한 절감추세가 지속되다가 이후에는 오히려 증가하고 있다. 이유는 감독기관의 참여로 인한 규제강화가 1990년 이전에 참여하지 않았을 때보다 비용증가를 유발한 것으로 판단된다.

나. 처리기술에 소요되는 상대적비용(relative cost)

오염된 지역의 복원사업은 수익사업이 아니기 때문에 소유자가 방법을 결정할 때 소요비용이 가장 중요한 역할을 하게 된다. 그러나 오염현장의 특성에 따라 발생하는 비용의 차이가 크기 때문에 처리기술사이의 비용비교가 쉽지 않다. 오염물질의 종류, 사업규모와 부피, 현장특성 그리고 오염된 매체의 종류 등이 복원비용에 영향을 미치는데, 상대적인 비용분석을 위하여 이러한 요소들을 통계적으로 조정하여 각 처리방법의 비용을 산출해서 그림. 5에 나타내었다.[1] 이들은 굴착 및 투기(excavation and disposal)를 1로하여 상대적으로 표현하였는데, 예를 들면 안정화방법은 굴착 및 투기보다 50% 비용이 많이 소요되나 생물학적처리는 50% 적게 소요된다. 소각방법이 가장 비싸서 굴착 및 투기의 300% 비용이 소요된다.

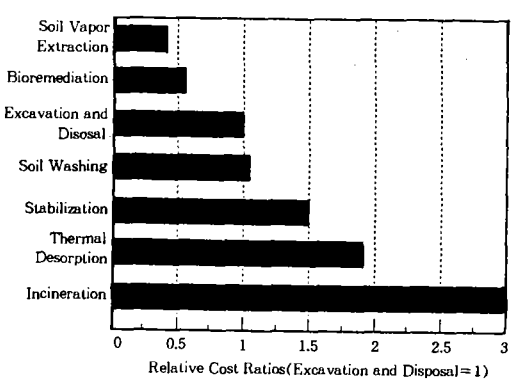


그림. 5. Relative cost differences for different technologies(painter 1996)

다. 처리기술 적용에 따른 상대적 비용위험 (relative cost risks)

전반적으로 환경복원사업은 토목공사나 공장건설과 같은 다른 종류의 사업보다 훨씬 위험부담이 많다. 이러한 위험의 측정에는 비용초과를 방지하기 위한 임시비용(contingency)이 사용되는데 그림. 6에 추정한 결과가 비교되어 있다.[1] 굴착 및 투기를 기준으로 할 때 생물학적처리, 안정화 그리고 소각방법들은 약 2배의 임시비용이 필요하다. 예를 들어 굴착 및 투기방법이 20%정도의 임시비가 필요하면, 위험율이 높은 소각은 40% 그리고 상대적으로 위험도가 낮은 capping은 약 15% 정도의 임시비용이 필요하다는 의미이다. 따라서 앞으로 설명한 바에 의하면 생물학적처리는 상대적으로 소요비용이 낮은 기술이나, 온도나 기타 다른 환경적 요인에 의해 실패할 가능성이 높은 점에 유의해야 하며, 또한 생물학적처리의 소요비용이 너무 낙관적으로 계산되었다는 의견도 있다. 소각방법은 소요비용뿐만 아니라 위험도 높은 방법이다.

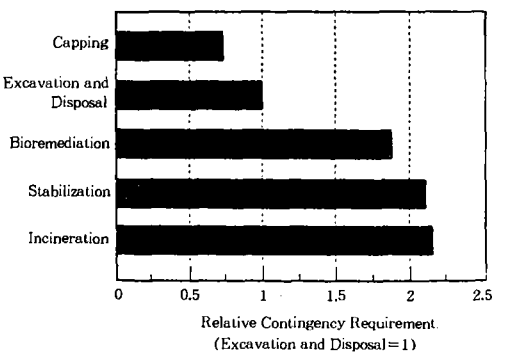
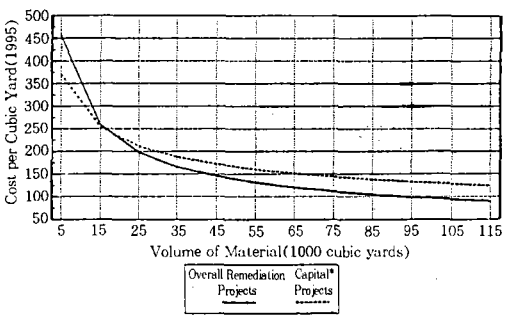


그림. 6. Technology impact on cost risk

5. 사업규모에 따른 비용분석

일반적으로 사업의 규모가 커짐에 따라 처리단가는 감소한다. 완료된 환경복원사업의 소요비용과 처리규모를 분석한 결과에 의하면

그림. 7에서 알 수 있듯이 처리량이 증가할수록 단위처리비용은 감소하였다.[1] 조사 대상인 전체사업에 적용방법의 종류에 관계없이 분석하였으므로 이 자료는 이러한 종류의 사업의 일반적인 흐름을 파악하는데 도움이 될 것이다. 그런데 앞에서 언급하였듯이 처리기술의 선택에 따라 소요비용에 차이가 많으므로 처리기술별로 비교할 수 있도록 그림. 8에 구분하여 나타내었다.[1] 그림. 8에 의하면 생물학적처리를 제외하고는 그림. 7과 유사한 경향을 보이고 있으며, 소각방법은 지속적으로 높은 비용 소요됨을 알 수 있다. 그러나, 생물학적처리는 경사가 훨씬 완만하여 다른 방법에 비해 처리량에 따른 처리단가의 변화가 작게 나타났으며, 달리 표현하면 단위분량당 소요되는 비용이 처리량이 증가하여도 별로 감소



*Using six-tenths rule.

그림. 7. Economies of scale : Remediation vs. capital projects(painter 1996)

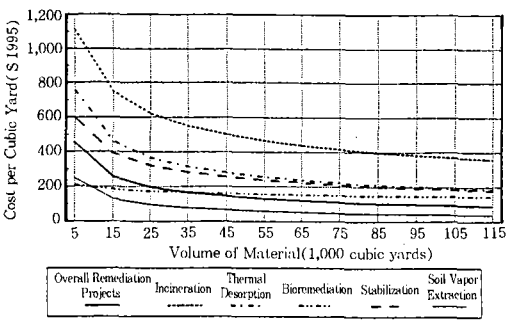


그림. 8. Economies of scale(painter 1996)

하지 않는다는 의미이다. 이유는 생물학적처리는 다른 방법과 달리 장비나 자본이 적게 소요되는데, 이 방법의 처리량이 증가함에 따라 위험이 증가한다. 그림. 8은 각 처리방법들의 비용효율을 설명하는데 도움이 되는데, 이에 따르면 생물학적방법은 대규모 복원사업에는 최선의 방법이 아닐 수 있다는 것이다. 또한 그림. 8은 처리량 증가에 따른 비용증가의 분석에도 도움을 주는데, 예를 들면 처리량의 100% 증가가 처리비용의 100% 증가를 초래하지는 않으며, 예상처리량에 따른 처리단가의 추정에 사용할 수 있다.

6. 결 론

이 글에서는 환경복원사업에 봉쇄방법보다는 처리방법의 적용이 증가하고 있다는 최근의 추세와 이미 완료된 복원사업의 자료를 분석하여 각 처리방법들의 경제성을 비교하였고, USEPA의 위험폐기물의 분류에 관한 최근의 제안에 대하여 설명하였다. 복원사업의 자료분석에는 광범위한 범위의 자료를 포함하고 있는데, Superfund 사업에서는 처리방법의 적용이 보다 뚜렷하였으나 다른 복원현장에서는 변화가 상대적으로 느린 편이다. 그러나 모든 분야에서 생물학적처리나 토양증기추출법과 같이 저비용의 현장처리기술의 적용으로 전환되어 가고 있다. 또한 처리방법들간의 비교를 위하여 소요비용, 비용위험, 처리량의 증가에 따른 처리단가 등을 분석하였다. 최근에 환경복원사업분야에는 감독기관의 정책과 처리기술이 변화하고 있는데 정책결정에 필요한 자료와 경험이 매우 부족한 상태이다. 정책이 안정되고 처리기술이 성숙할 때까지는 복원사업이 끝난 지역의 자료수집 및 분석이 필요하다. 기존의 자료를 이해하고 장단점을 파악하여 미래의 복원사업에 적절히 이용하는 것은 창의적인 기술개발과 함께 성공적인 환경복원

사업을 위하여 필요하므로 이 분야의 기존자료 수집 및 정리와 체계적인 관리가 요구된다.

참 고 문 헌

1. Painter, J. P., 1996, Understanding Technology Trends for Remediation Projects, Remediation, 6(2), pp. 3-13.
2. HAZRISK is a registered trademark of Independent Project Analysis, Inc.
3. LaGrega, M. D., Buckingham, P. L., Evans, J., and Environmental Resources Management Group, 1994, Hazardous Waste Management, McGraw-Hill, Inc., pp. 54-55.
4. Doherty, C. M., and Simon, J. A., 1996, Recent Development in Cleanup Technology, Remediation, 6(2), pp. 110-119.
5. 60 Federal Register 66344, December 21 1995.