

유류오염 토양-지하수 복원기술: 문제외 개선방향

이석영 · 윤준기 · 이채영 · 김길홍 · 신언빈 · 조정숙

삼성물산 건설부문 기술연구소 (sukyoung@samsung.com)

Abstract

Soil and groundwater contamination by petroleum hydrocarbon products is only one of many environmental problems in Korea. However, many environmental consulting companies have been targeted their business on this subject because the petroleum-oil-lubricant (POL) products have been widely used product and accidental releases of the products from storages resulted numerous small and large contaminated sites throughout Korea. Therefore, many small and large companies are actively participating in environmental assessment and remediation projects for the POL contaminated sites.

Remedial technologies for the POL contaminated sites have been developed for many years by government and private institutions throughout the world. Development of a new decontamination technology for the POL contaminated sites is no longer attractive issue in research community because scientific bases of most cost-effective remedial technologies are well understood and have been used in the field by commercial sector. Numerous sites contaminated by underground tanks at gas stations have been remediated by relatively small companies in this country. We should appreciate their noticeable contributions as a frontier under very difficult market environment in Korea. We heard many successful stories as well as a few failure stories. Soil-groundwater remediation of POL contaminated site is not a simple task as shown in the text books or protocols. Therefore, failure risk is always with us, which requires continuous efforts for improvement of the technologies by the users and developers. In this presentation, author will discuss technical problems encountered and improvement made during implementation of several remedial technologies applied by Samsung Environmental Team*. This is not a presentation about research or case study. We want to share our thought and experience with environmental engineers actively engaged in soil and groundwater remediation projects in Korea.

Key word: remediation technology, contaminated soil and groundwater

1. 서 론

외국에서의 토양지하수 복원 기술들의 사용 빈도는 많이 소개되었으나 정확한 국내 통계는 나와 있지 않

*Samsung Engineering and Construction, AMEC, MHN Assoc., Wil Chee, EnviroNet, Beautiful Environment Co., Oikos.

다. 그러나 유류오염 복원업체들의 실적으로 볼 때 그 빈도가 높은 순서대로 정리한다면: soil excavation and offsite disposal, soil vapor extraction, bioventing/sparging, bioslurping, landfarm, biopile, soil washing, thermal treatment 순서로 볼 수 있다. 한편 대학교와 연구소들의 연구과제 경향을 본다면 현재 사용되고 있는 공법들의 현장 적용보다는 실험실적인 기초자료 수집에 관심을 보이고 있다. Figure 1은 1996년부터 2002년 토양-지하수 학회지들에 발표된 유류 정화 논문들을 기법 별로 정리한 것을 보여준다. 연구 대상 기술들이 현장에서 일어나고 있는 현실과는 많은 차이가 있다는 것을 단적으로 보여주고 있다.

근래에 정부에서도 과거 미국에서와 마찬가지로 주로 신기술의 연구와 개발에 투자를 하고 있다. 신기술도 중요 하지만 적용가능 오염지역이 얼마나 있으며, 가능 시장에 대한 객관적인 분석에 기초를 두었는지에 대한 아쉬움이 있다. 인정받을 만한 신기술 개발은 성공 여부에 관계없이 추진되어야 한다. 그러나 적용될 수 있는 시장이 없고 경제성이 없는 신기술은 투자의 가치가 없다는 가장 기초적인 평가방법이 결여된 것으로 보인다. 토양지하수 복원분야의 특성으로 보아 현장 검증이 안 된 신기술의 현장 이용에는 많은 어려움이 있으며 현장 제공에 대해서도 기피하고 있다. 더욱이 대기업은 필요하면 중소기업과 사업을 수행하면 된다고 생각하기 때문에 기술 개발에 투자를 하지 않고 있다. 결국은 토양지하수 사업은 현재의 국내 시장 규모가 너무 작아 현장의 문제점을 고려하지 못한 실험실 규모의 연구 밖에는 할 수 없다는 문제를 안고 있는 것이다. 중소기업의 복원기업들은 우선 현재 사용되는 기술들을 재검토하여 그들의 효율을 높이거나 자동제어 체계를 만들어 경쟁력을 강화할 시점이지, 관이나 학계에 보이기 위해 인적, 경제적 자원을 소모하는 것은 무리한 시도라고 생각한다. 환경사업은 이윤을 창출하는 목적 외에도 우리 모두의 환경정화에 일익을 담당한다는 자부심을 갖고 수행되어야 한다.

본 발표의 목적은 공법들의 자세한 내용과 참고 문헌들을 인용하는 연구과제의 발표가 아닌 서로가 의견을 나누는 토론의 장을 만들기 위함이다. 따라서 본 발표에서는 현재 많이 사용되고 있는 복원 방법들을 중심으로 현장 적용시의 문제점들을 고찰하고, 현장경험을 중심으로 한 해결 방안을 논의하고자 한다.

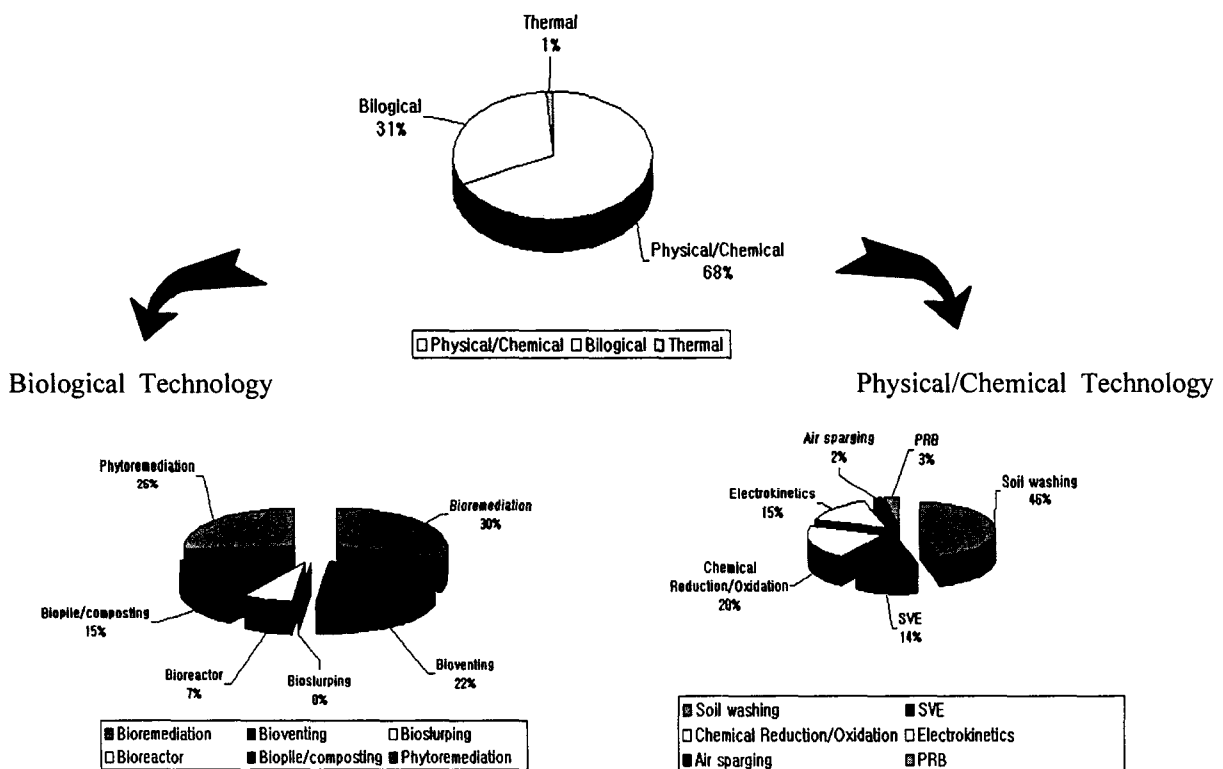


Figure 1. Overview of paper in Korea society of Soil and Groundwater Environment by technology (1999~2002)

2. 본 론

위에서 기술한대로 본 발표는 현재 한국에서 복원사업에 많이 쓰이고 있는 방법들 중 삼성 환경팀이 사용하고 있거나 사용하려는 방법들을 중심으로 문제점과 해결방법을 모색하고자 한다. 예로서 복원 방법들 중 ex-situ에서는 direct disposal과 중간처리로서의 landfarm, biopile, soil washing, thermal treatment 기법들, 그리고 in-situ로는 bioslurping/soil vapor extraction (SVE)/bioventing 기법을 대상으로 하였다.

Soil excavation and Offsite Disposal

소규모 POL 오염 장소의 토양은 굴착한 후 소각장 같은 중간처리장을 거쳐 처분하고 있다(Figure 2). 그러나 환경부에 등록된 중간 처리장은 폐기물 소각장 외에는 다른 것이 없기 때문에 처분 비용이 높아 부지 내에서 처리하거나 시간이 걸리지만 가능하면 in-situ로 하고 있다. 부지내 처리장을 위한 공간이 있는 경우, landfarm과 biopile이 가장 많이 사용되고 있는 ex-situ방법들이며 그들의 문제점들은 뒤에 논의하겠다. 주로 offsite disposal은 emergency/direct response때 필요한 처분 방법이지만 기준들이 모호하여 실행에 문제점들을 안고 있다(Figure 2).

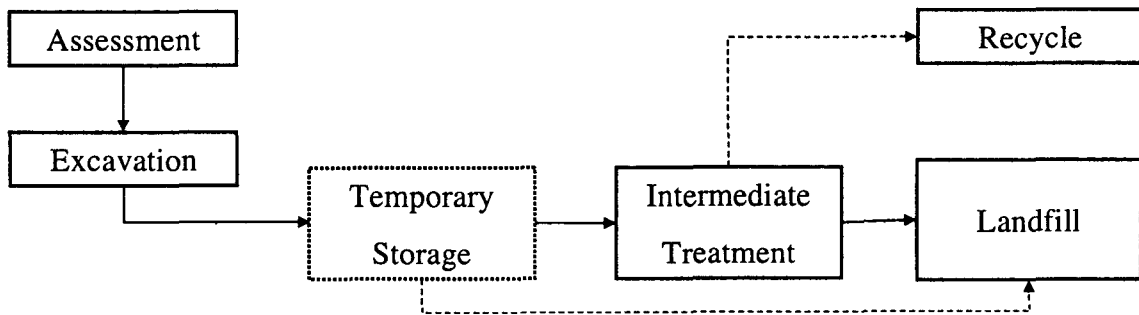


Figure 2. Flow diagram of soil excavation and offsite disposal technologies

Figure 2에 나타낸 개략적인 flow diagram에서의 문제는 중간 처리와 recycle에 관계된 법적 규제이다. 곧 개정이 되겠지만 현재 폐기물관리법에서는 중량으로 유류가 5% 이상 일 때, 그 오염토양은 소각하게 되어 있으나 그 이하는 다른 방법이 제시되어 있지 않아 TPH 기준으로 2,000 mg/L 정도로 오염된 토양도 소각장으로 보내지고 있다. 본인이 맡고 있는 사업에서는 소각 후 재활용 하거나 매립지로 보내는 것을 원칙으로 하고 있으나, 사용자의 입장에서는 재활용에 따른 문제점을 우려하여 매립을 선호하고 있다. 환경부에서도 recycle을 권장 하고 있기 때문에 기준이 구체적이고 현실성을 갖게 될 경우 다양한 중간 처리 방법들이 나올 수 있으며, 그 비용 또한 절감될 수 있다. 모든 ex-situ technology, 예를 들어 landfarm, biopile, soil washing, thermal treatment 등은 주어진 기준까지 복원이 가능하므로 경제성의 비교 분석과 recycle의 적합성 여부를 평가 하는 방법 등에 관심을 가져야 한다.

Landfarm and Biopile

Landfarm은 bioremediation의 가장 기초적인 공법이며 토양수분의 관리와 labor cost에 문제가 있으나 처리장소가 가능하다면 가장 cost effective하며 설정된 기준을 확실하게 만족 시킬 수 있는 방법이다 (Figure 3). 농업기반공사에서 설계 시행한 것은 국내 최대규모였을 뿐만 아니라 공법이 안고 있는 문제점 들을 개선한 사업으로 높이 평가되고 있다. 군기지 내에서도 많이 사용되고 있는 방법이지만 자체 부지 확보에 어려움이 있어 공법 이용에 한계가 있다.

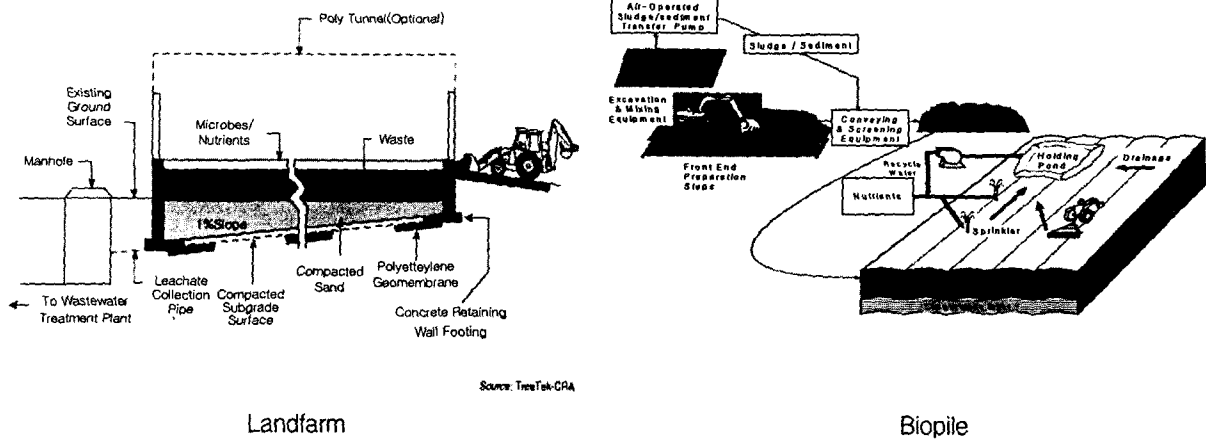


Figure 3. Conceptual diagram of landfarm and biopile

Landfarm 공법은 흔히 일반화된 기술로 인식 될 수 있으나 효율성을 높이고 labor cost를 줄이기 위한 미생물과 영양분의 공급, 그리고 산소 공급을 위한 자동 제어 system의 연구와 개발이 필요하다. 토양 수분 monitoring sensor와 sprinkler controller system의 연결을 통한 효율성 증대가 한 예가 될 것이다. 특히 오염토양 중간처리장의 개념으로 본다면 다른 복원 공법들과의 경쟁력을 갖게 하는 연구가 이루어 져야 한다.

Biopile 공법도 생물학적 처리의 한 기법이지만 labor cost가 landfarm보다 낮다는 장점을 갖고 있다. 야적장에 cover를 하여 토사유출과 기상 유분의 대기 오염을 방지하고 토양 공극 내에 공기를 주입하는 biopile의 기본 개념으로 국내에서도 오염 토양이 처리된 사례가 있다. 최근 삼성 환경팀은 군부대 내에 현장 조건을 고려하여 한 단계 발전시킨 biopile 공법을 설계하여 실행하고 있다.

고려된 현장 조건:

- 처리 부지는 일정 기간 동안만 이용할 수 있기 때문에 사용된 부지가 쉽게 원 상태로 복구되어야 하며 가능한 한 신속히 처리가 시작되어야 한다.
- 부대 내외거주자들의 심미적인 문제와 작업자의 안전과 건강을 고려해야 한다.

Figure 4에서 보듯이 현장여건상 biopile을 대형 비닐하우스 안에 설치하고 공기 주입으로 발생하는 off gas를 활성탄처리조를 거쳐 배기하도록 했으며 강우에 의한 침출수 발생을 방지하고 필요한 영양분 과 수분공급 기능을 갖춘 system이다.

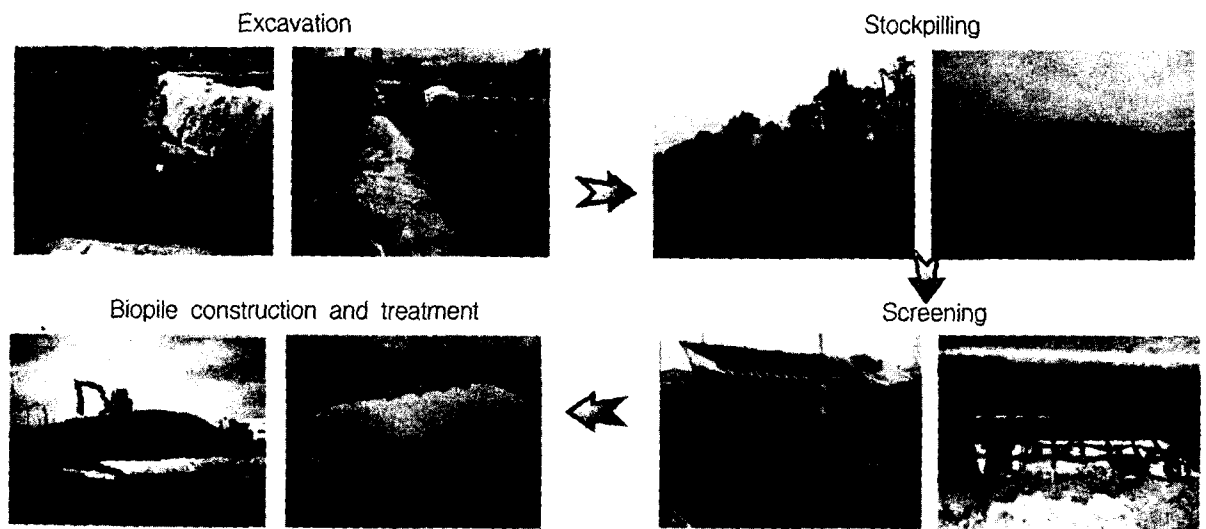


Figure 4. Overview of advanced biopile system by Samsung

삼성 환경팀 system은 초기 투자가 높으나 안전하고 동절기에도 미생물의 활동을 유지할 수 있어 공기를 단축하는 장점을 갖고 있다. 그러나 biopile도 landfarm과 비슷한 문제점을 안고 있다. 경작에 필요한 labor cost는 줄일 수 있으나 적정 환경 수준을 유지하기 위한 monitoring에 필요한 시료 채취와 분석은 landfarm공법과 마찬가지로 cost에 있어서 많은 부분을 차지하고 있다. 그러므로 sensor development, data collection, synthesis, interpretation, remote response 등 복원 현장에서 필요한 기술들이 개발되어 cost를 절감하여야 하겠다.

Thermal Treatment

Thermal treatment 역시 국내에서는 최초로 농업기반공사에서 도입 실행한 공법이다. Thermal treatment는 biological treatment 공법들에 비해 단기간에 처리할 수 있다는 장점이 있으나 역시 단점도 갖고 있다. 다른 ex-situ공법과 마찬가지로 on-site에서 처리 한 후 퇴매우기를 하여야 하므로 적지 않은 처리장 공간이 부지 내에 있어야 한다. 더욱이 효율을 높이기 위한 전처리가 필요한데 그 중 토양구조 분쇄, 잡석제거, 토양수분함량 등을 고려하여야 한다. 이 공법은 주로 유류오염 토양에 많이 사용되고 있으나 무기물 오염제거에도 사용될 수 있다. 저자가 참여하였던 pilot scale의 수은(Hg) 제거 작업은 좋은 예라 할 수 있다. 수은의 경우 mass balance, 즉 회수율이 성공여부를 판가름하며, 회수율이 높다는 말은 secondary contamination의 가능성이 없어 안전하다는 것이다.

이 공법의 가장 큰 문제는 열처리에 의한 오염토양 자체의 물리 화학적 성질의 변화이다. 그 중 토양의 texture와 structure의 변화는 engineering property의 변화를 가져오기 때문에 퇴매우기 용으로 recycle이 가능한가를 점검하여야 한다. 점토광물의 구조변화에 따른 이온 흡착능력, 식물양분과 유기물이 손실은 농지용 복토로의 활용을 어렵게 한다.

다행이도 thermal treatment라는 공법이 농업기반공사라는 공기관에 의하여 실행되었으므로 실행 중 문제점들과 장점들이 자세히 평가되었으리라 생각된다. 이러한 평가 자료들이 계속 축적되어 다른 복원 사업 설계에도 이용될 수 있기를 바란다.

Soil Washing

Soil Washing 기법도 국내에서 많이 연구되었으나 현장 적용사례는 소수에 불과하다. 본인도 소규모 demonstration을 한 경험을 토대로 문제점과 개선 방향을 생각 하고자 한다. Soil Washing의 개념은 물리적인 분리와 용매를 사용한 추출의 개념으로 나누며 개발 당시는 물리적인 개념에 중점을 두어 오염물을 함유하고 있는 입자의 크기(particle size)와 비중을 고려하였다. 유기화합물의 토양 오염이 문제가 되면서 무해한 용매를 사용하기 시작하였다. 물리적인 방법의 좋은 예는 uranium과 thorium 등 방사선 물질이 포함된 입자를 선별하였던 예를 들 수 있다. 입자선별의 주 방법은 광산 채광에서 사용되었던 hydrocyclon이 이용되었다. 용매에 의한 추출은 중금속의 경우 산성 용액과 chelating agent, 그리고 유류의 경우 surfactant나 alcohol류가 사용되기도 하였다. 본 기법은 오염토양의 특성에 따라서는 많은 장점이 있으나 지하수 문제 외에도 제거된 오염물질의 처리 처분 등 많은 문제점을 안고 있다. 오염된 용매의 recycle과 미세입자의 dewatering process, 그리고 disposal 방법은 주 공정에 비교될 만큼 중요한 문제들이다. 공정상의 문제점들은 보통 conceptual design이나 laboratory test에서는 나타나지 않으므로 pilot scale 정도의 검증을 통한 설계가 이루어 져야 한다. 본인의 경험으로는 오염된 하상토, 광미, 저질 등의 정화에 soil washing 방법이 중요한 역할을 할 것으로 판단된다.

Bioslurping, Soil Vapor Extraction (SVE), Bioventing, and Air Sparging

국내 유류에 의한 토양 지하수 오염의 양상은 크게 두 가지로 나눌 수 있다: 토양층(saprolite)의 심도가 깊고 지하수 수위가 높아 유류가 토양층에 남아 있는 경우와 반대로 토양심도가 낮고 지하수 수위

가 낮아 유류가 암반 균열에 주로 머물러 있는 경우를 들 수 있다. Bioslurping, soil vapor extraction, bioventing과 air sparging으로 알려진 in-situ 오염 정화 방법들은 주로 토양층에 있는 유류를 정화하는 방법들로 오염 정도, 형태, 유종 등에 따라 선택되는 기법들이지만, blower system을 써서 공기를 주입하거나 추출 한다는 공통점이 있다. 삼성 환경팀이 사용하는 hybrid fuel remediation system(HFRS)은 위의 기법들을 함께 수행 할 수 있는 system으로 조건에 따라 쉽게 개별적인 공법으로 전환 사용되고 있어 함께 논하고자 한다. 위의 in-situ 기법들은 유류 오염 토양-지하수 정화에 국내에서 가장 많이 사용되는 방법들로 정화가 진행되는 동안 biological process가 병행되고 있으므로 경우에 따라서는 biodegradation을 촉진 시키는 수단으로 이용되고 있다.

HFRS는 vapor extraction과 air injection을 동시에 수행할 수 있으며, bioslurping도 함께 수행하기 위하여 oil/water separator, air striper, off-gas treatment vessel 등이 system에 포함되어 있다(Figure 5). 현재 세 개의 현장에서 운영되고 있으며 treatment well 마다 free product가 많아 모두 bioslurping mode 로 운영되고 있고, HFRS의 축소형인 mobile unit도 한곳의 현장에서 이용되고 있다.

HFRS공법 중 SVE 등은 과거에 많이 거론된 기법들이므로 bioslurping의 문제점들과 개선 방향만을 제시하고자 한다. HFRS공법은 우선 bioslurping으로 free product를 제거하고, SVE mode로 전환 하여 잔유분을 제거하는 순서를 택하고 있다. Bioslurping operation에서 가장 어려운 문제는 slurping tip을 수위에 따라 지속적으로 위치를 보정 시켜 주어야 한다는 것이다. 이런 문제는 extraction well의 oil skimmer pump들도 함께 갖고 있는 문제점이다(Figure 6). 지하수수위는 groundwater의 recharge rate에 따라 수시로 변하는데 tip이나 pump위치는 수동적으로 보정하여야 하므로 project budget 중 인건비가 많은 부분을 차지하게 된다. 따라서 수위 변화에 따라 tip 자체가 수위를 따라 다닐 수 있는 smart tip 을 개발하는 것이 급선무 이므로 이에 대한 연구가 진행 중에 있다. 근래에 bioslurping system을 이용하는 복원 현장이 증가하는 추세이므로 대학의 연구과제가 되었으면 하는 바람이다.

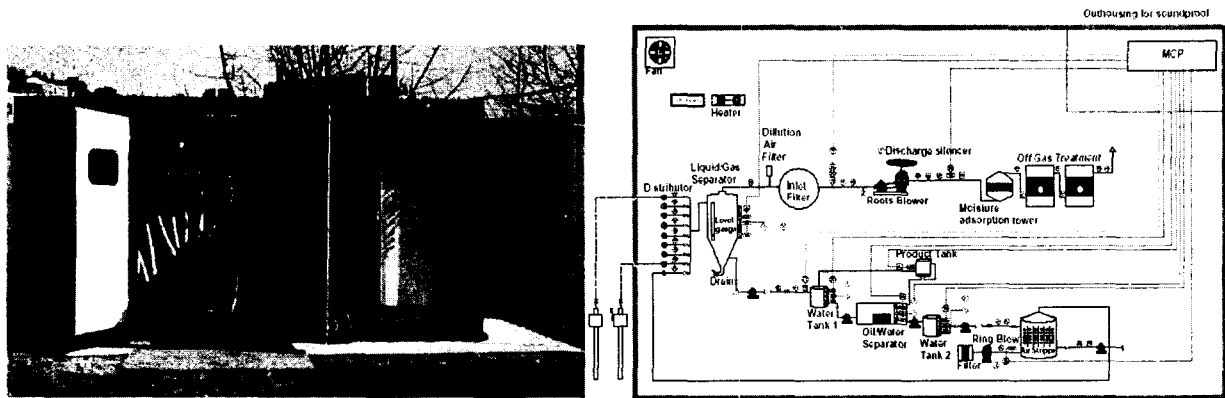


Figure 5. Photographic feature and diagram of the advanced biopile system installed at the site

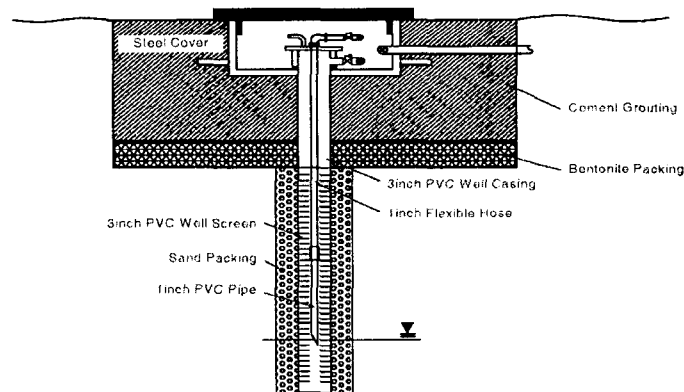


Figure 6. Extraction well diagram

Groundwater Pumping and Oil/Water Separator

Free product를 제거하는 방법은 slurping 외에도 다양한 형태로 많이 개발되어 있다. 과거에 많이 사용되는 방법은 비교적 큰 집수정을 만들고 부상 유입구를 설치하고 diaphragm pump로 지하수와 유류층을 뽑아 올려 유수분리기(oil/water separator)로 보내는 방법이다. 이 방법에 있어서 중요한 점은 지하수 수위 sensor를 이용하여 pump의 작동을 조절하는 것이다. 즉, pump는 주로 시간을 두고 수위차로 모인 부상 유류와 지하수를 유수분리기로 보내는 역할을 한다. Figure 7은 국내 회사에서 개발한 유수분리기로 동절기에도 사용할 수 있으며 효율이 높아 배출수의 오염농도는 수질환경관리법의 배출 기준 보다 낮은 수치를 보여 준다.

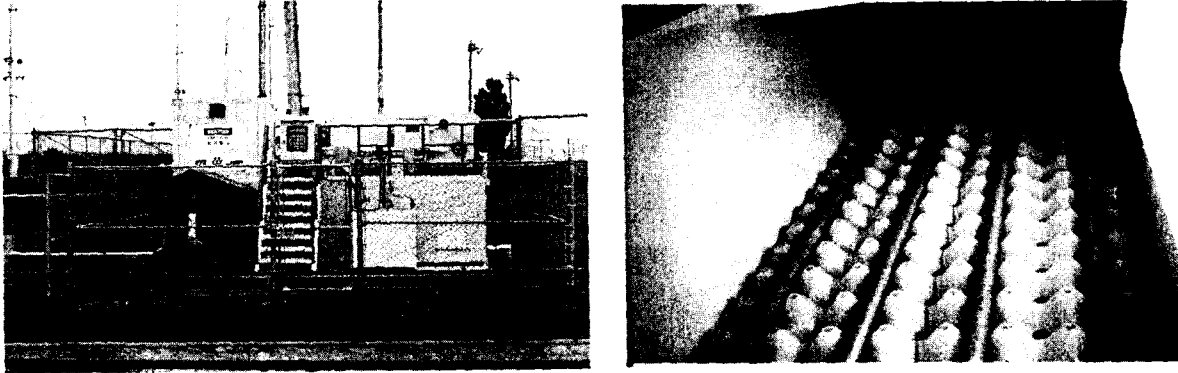


Figure 7. Photographic features of the oil/water separation system installed at the site

삼성 환경팀은 미국에서 개발된 free product recovery pumping system을 두 현장에 설치 운영하고 있다. 이 pump들은 유류와 지하수의 비중 차이를 이용 free product만 제거할 수 있으나 slurping system과 마찬가지로 pump가 유류층에 위치하여야 하는 단점을 안고 있다 (Figure 8). 이런 단점을 해결하기 위하여 본 팀은 수위 sensor와 pump위치를 알리는 sensor를 부착하여 원격으로 조작하는 tele monitoring system (TMS)을 개발하여 사용 중이다. TMS는 오염 토양지하수 복원공법의 자동 감지 (data logging) 시스템으로서, 대상 부지 복원관리를 무인 자동화시켜 관리효율을 증진하고, free product collection tank의 sensor로 over flow를 막아주어 통합관리가 용이하며, 원격지에서 복원관리 운영을 효과적으로 제어할 수 있다. 본 recovery system은 보온 장치가 되어 있어 겨울에도 작동되며 monitoring에 소요되는 인건비를 절감시킬 수 있는 장점을 갖고 있다.

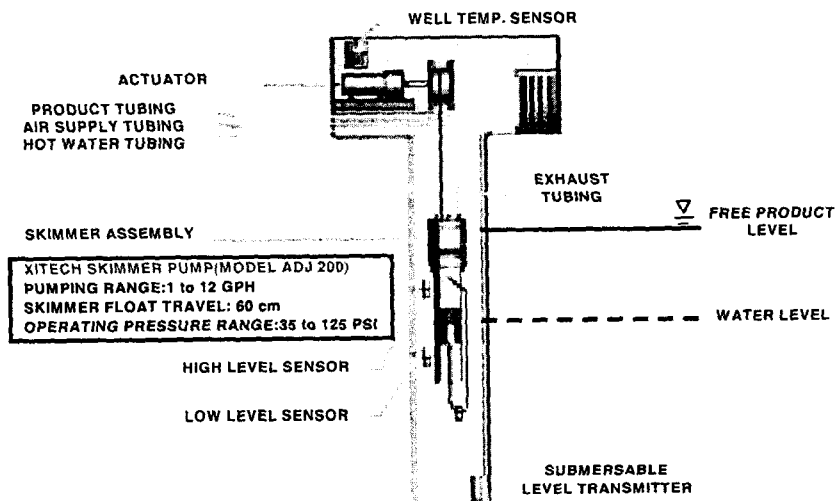


Figure 8. Diagram of skimmer pump for the free product recovery system in treatment well

3. 결론

여러 가지 이유들로 토양-지하수 복원 사례들은 실제 시행되고 있는 것보다 많이 알려져 있지 않다. 복원 사업 규모가 작다는 이유도 하나이지만 복원 결과에 대한 검증절차의 결여와 발주인의 복원에 대한 개념의 부재에도 있다. 토양-지하수 복원이 기대에 못 미치는 경우는 있을 수 있으며 특히 in-situ 복원의 경우 문제가 생기는 일이 있다. 여러 가지 이유가 있으나 그 중에서도 다음과 같은 것을 지적하고 싶다.

- 1) 사전 조사 평가의 미흡으로 인한 복원 방법과 목표의 부적절한 설정
- 2) 복원 기준의 부재와 현장조건들을 고려한 시행기준의 유연성 결여
- 3) 기간 중에 있을 상황변화에 대한 발주자와 시행자 간의 이해와 대처방법에 대한 이해 부족
- 4) Risk based decision에 대한 이해 부족과 responsible decision maker (or mediator)의 부재

현재 토양-지하수 복원 업계에서 필요한 것은 window dress용 신기술이 아니라 현재 사용되고 있는 기술들을 한걸음 발전 시켜야 할 때이다. 과거 신기술 개발은 multiple contaminant site를 위한 다목적 system 개발에 주력하여 왔다. 앞으로 얼마나 복합기술이 필요한 site들이 나올지는 미지수이나 현재 알려진 site들은 복원 기술의 문제가 아니라 실행상의 문제들이라고 생각한다. 현재 국내 시장에 요구되는 것은 기존 기술의 현장적용과 그 효율성을 높이기 위한 기법의 개발이다, 삼성 환경팀에서 시도하고 있는 것은 물론 작은 예들에 불과 하고, 다른 그룹에서도 관심을 갖고 진행하고 있을 것이다. 이와 같은 개선 노력으로 know-how가 지속적으로 축적되지 않는 이상 국내 토양지하수 복원사업의 효율성 증가는 기대하기 어려우며 그 효과 또한 만족스럽지 못할 것이다. 복원사업은 high quality와 기법향상으로 cost저감을 이루어 customer를 만족시켜야 건전한 시장이 형성되고 환경보존이라는 대의에 동참하는 자부심을 갖게 될 것이다.