

단 보

국내 지하수토양오염 조사 및 복원에 관한 소고

이진용<sup>\*1)</sup>·이강근<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>㈜지오그린21, <sup>2)</sup>서울대학교 지구환경과학부

A Short Note on Investigation and Remediation of Contaminated Groundwater and Soil in Korea

Jin-Yong Lee<sup>\*1)</sup> · Kang-Kun Lee<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>GeoGreen21 Co., Ltd., <sup>2)</sup>School of Earth & Environmental Sciences, SNU

서 론

최근에 들어 국내 지하수토양환경의 오염에 대한 사건기사가 각종 대중매체를 통해 빈번히 보도되고 있으며, 이와 동시에 우리나라의 수리지질학적 특성에 적합한 지하수토양환경오염의 조사 및 복원방법에 대한 연구(차세대 핵심환경기술개발사업과 수자원지속적 확보기술개발사업 등)가 국공립 연구소 및 각급 대학의 관련학과에서 활발히 진행되고 있다. 이들 이론, 실내 및 현장연구 결과들이 계속해서 국내외 저명 학술지 등에 발간되고 있는 것도 주지의 사실이다. 또한 관련법(지하수법과 토양환경보전법)의 정비를 통해 오염 지역에 대한 정밀조사 및 복원을 의무화하고 관련업계의 활성화를 위해 지하수정화업 및 토양복원업을 신설하였거나 신설중이다(박응렬, 2003). 한편 국내 최초의 공식적이고 최대규모인 부산시 문현동 토양지하수오염현장에 대한 복원이 2001년에 시작하여 2003년 8월 현재 복원이 완료된 것으로 알려졌다.

이와 같이 법적, 제도적 장치의 정비 및 국민의 지하수 토양환경에 대한 인식의 향상에 발맞추어 환경당국은 본격적인 의미의 오염토양 및 지하수에 대한 조사 및 복원사업을 촉진하기 위해 민간부문의 사업추진에 앞서 우선 공공기관의 부지에 대한 오염조사 및 복원사업을 의욕적으로 수행하고 있다. 앞서 언급한 부산시 문현동 국방부 부지의 복원사업이 대표적이며 2002

년에 수행된 철도청 부지에 대한 대규모 오염조사사업도 이의 일환으로 볼 수 있다. 또한 환경부는 저유소, 주유소 등 대규모 특정토양오염유발시설을 소유한 기관을 대상으로 유발시설에 대한 신뢰성있는 토양오염 검사를 실시하고, 이를 토대로 민간부문의 자율적인 토양복원을 추진하도록 유도하기 위해 5대 정유사와 자발적인 협약을 체결한 바 있다.

공식적으로 알려진 사례를 제외하고도 전국에 산재한 각 단위 주유소나 국방부 관할 각급 군사시설 등에서도 토양지하수오염의 조사 및 복원사업이 진행되고 있다는 것은 이미 알려진 사실이다(정상용, 2003). 환경부는 2003년부터 국가산업단지의 지하수 및 토양오염에 대한 정밀조사를 실시하고 오염된 부지에 대해서는 정화사업을 시행할 계획이다(건설교통부-한국수자원공사, 2002).

그러나 이와 같은 정부 및 민간부문의 긍정적 노력과 사회적 환경에도 불구하고 실제로 오염 토양지하수에 대한 조사 및 복원사업을 수행하는 과정에서 몇 가지 실질적인 문제들이 노정된 것이 사실이다. 이들 문제들은 특히 오염지역 조사 및 복원사업을 담당하는 해당 전문기관 혹은 업체들의 현장 실무행위와 많은 관련이 있는 것으로 파악되었다. 본 논문에서는 그동안 국내 토양지하수 오염조사 및 복원의 실무적 차원에서 인지된 몇 가지 문제점에 대해 논의하였다.

\* Corresponding author: hydrolee@empal.com

## 지하수토양오염 조사 및 복원 실무

### 현장오염 특성평가 정밀조사

흔히 지하수토양오염 조사 및 복원 전문가에게 알려진 격언 중에 이런 말이 있다. "Spare one dollar for the investigation, and then waste one million dollars for the remediation". 말하자면 오염조사 및 특성화에 1달러 아끼다 복원할 때 백만 달러의 비용을 낭비할 수도 있다는 것이다. 이는 곧 복원시공 전 오염조사의 중요성을 강조하는 말이다. 복원을 위한 매우 중요하고도 핵심적인 전단계는 오염의 원인을 밝히고 오염범위와 양을 정확히 추정하는 것이다. 이에 대해서는 어떤 전문가도 부인하지 않을 것이다. 그런데 이런 개념을 가지고 있으면서도 실무단계에서는 그렇지 않은 경우를 종종 접하게 된다.

토양 및 지하수내 오염물질 화학적 농도경사가 매우 큰 경우도 적지 않다(Ahrens, 1953). 즉 오염물질의 농도가 어떤 한 위치에서 매우 높다가 바로 인접위치에서는 매우 낮거나 배경수준에 불과할 수 있다. 이는 특정오염물질의 지하학적 거동특성과 지하매질의 불균질성과 깊은 연관이 있다. 오염물질의 정확한 분포를 아는 것이 복원의 범위, 기간 및 비용을 산정하는 핵심적인 요소가 될 수 있다. 오염범위나 농도분포의 추정이 불확실해지면 그만큼 복원비용 추정에 불확실성이 증대된다. 이것은 결국 불필요한 비용의 낭비로 귀결될 수 있다.

흔히 우리나라의 토양 및 지하수오염에 대한 정밀조사는 법체계상 복원을 전제로 한다. 이렇게 복원이 전제된 경우에는 조사에 들이는 비용이 훨씬 많아야 함에도 불구하고 정반대의 현상이 드러나고 있다. 일부 복원을 전문으로 하는 기관 혹은 업체의 경우 극히 적은 비용의 오염조사에도 손해를 감수하고 참여하고 있으며 복원사업의 수주를 통해 손실을 만회하려고 한다. 그러나 많은 경우 복원사업은 조사에 비해 예산이 크기 때문에 해당오염지역의 조사를 수행했다는 실적만으로 수의계약 등을 통한 수주확보를 보장받을 수 없는 상황이다. 그 결과 사업손실 위험성을 최대한 줄이기 위해 조사는 필연적으로 부실해질 수밖에 없다.

또한 결국 오염토양 복원계획이 있다면 "굳이 정밀하게 오염조사를 할 필요가 있는가? 혹은 복원할 때의 재조사를 고려하여 오염조사에 큰 비용을 들일 필요가 있는가?" 하는 생각을 가지고 있는 경우도 적지 않다. 국내 최초 최대규모의 복원사업의 예를 살펴보자. 127

억이라는 엄청난 액수의 복원사업을 시작하기 전에 조사에 소요된 비용은 1억 원이 조금 넘는 것으로 추정된다. 복원사업비의 약 1%에 불과하다. 하지만, 복원사업자는 사업시작 초기에 다시 오염정밀조사를 실시한 것으로 알려져 있다. 물론 이를 복원조사(RI)로 보고 그 복원사업전의 조사와 다르다고 보는 시각도 있겠지만 이미 그 전에 이루어진 부지에 대한 오염조사도 복원을 전제로 한 동일한 성격의 조사임을 부인할 수 없다.

실제로 막대한 비용이 드는 복원 사업일수록 조사는 매우 정밀해야 한다. 이런 정밀한 조사만이 복원설계에 나타나는 복원비용의 내역들이 명확해지고 오히려 비용을 절감할 수 있다. 개략적인 혹은 제한적 자료로 추정된 오염량과 오염범위로는 상세설계에 많은 불확실성을 가져오고 이는 결국 사업비의 낭비로 이어질 수 있다. 정밀조사를 통해 초기에 예상한 것보다 오염범위가 커진다고 하여도 이득이 될 수 있다. 부실한 조사결과를 그대로 믿고 시공을 했을 경우 복원과정에서 생기는 설계변경에 따른 비용발생, 공기지연을 감안한다면 복원전 실제적인 정밀조사는 매우 절실하다.

조사비용뿐만 아니라 조사기간도 지나치게 짧은 경우가 있다. 흔히들 오염원인자, 관계기관 혹은 관련단체들은 조급하게 조사결과를 원하고 또 복원하기를 재촉하기도 한다. 오염지역의 규모에 따라 다르지만 조사기간은 대체로 3-6개월이며 1년을 넘기는 경우는 찾기 힘들다. 실제로 이 정도의 기간으로는 제대로 된 오염조사가 힘들며 지하수오염의 경우 1년 이상의 조사를 통해 계절적 변동을 관찰할 필요가 있다. 그러면 몇 개의 토양시료가 혹은 몇 개의 관정이 충분한가? 기간은 얼마로 혹은 어떤 조사항목으로 하는 것이 충분한가? 단정적으로 답하기는 어려운 문제이다. 다만 제한된 데이터 포인트로는 아무리 좋은 수학적 도구(크리깅 등)를 동원한다고 해도 적절한 수의 원자료 취득을 대신할 수는 없다.

앞서 언급한 바와 같이 조사의 불충분함은 시료채취 지점수나 혹은 조사기간에만 국한되지는 않는다. 향후 복원방법에 대한 개념을 확보하는데 필요가 다른 중요한 요소들 예를 들어 지질로깅, 수리전도도 분포, 토양의 입도분포, 유기물질의 양 등에 대한 조사가 극히 미미하거나 혹은 아예 빠져있다.

### 오염물질 분석

오염지하수토양에 대한 대책을 마련할만한 사회적·

경제적 자원이 부족한 우리나라의 경우 일부 민간부문과 공공부문의 오염 발생자들의 환경에 대한 기본적인 인식은 환경비용은 불필요한 낭비이며 최선의 방법은 관련법에 규정된 정도만 맞추면 된다는 것이다. 따라서 법정대상 오염물질 외에 다른 중요 항목에 대한 부가적인 분석을 경시하는 풍조가 있다.

국내의 경우 각 전문기관 혹은 전문업체에서 보유한 오염조사보고서를 개별적으로 확보하는 것은 어렵다. 그러므로 성급하게 일반화하기는 어렵지만 환경부나 국방부에서 공개한 몇몇 조사보고서와 저자의 실무경험으로 보았을 때 적지 않은 경우 해당 오염물질만을 화학분석의 대상으로 삼을 뿐 이 오염물질과 지구화학적으로 밀접한 연관을 가지는 인자들에 대한 분석은 미미한 형편이다.

유류오염지역에 대한 정밀조사 보고서의 물리·화학 분석 항목을 보면 토양에는 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠 및 자일렌(BTEX)과 석유계총탄화수소가, 지하수에는 BTEX만 있는 경우가 흔하다. 경우에 따라 토양가스 및 휘발성유기화합물 혹은 지하수내 석유계총탄화수소의 자료가 있을 수도 있다. 토양내 유류오염물질의 거동을 좌우하는 주요 인자인 유기탄소량, 입도분포 및 토양 pH 등의 정보는 찾기 힘들며 이는 환경부(2002)에서도 확인 가능하다. 특히 유류에 의한 지하수오염의 경우 법정 오염물질인 BTEX, TCE, PCE뿐만 아니라 이들의 지구화학적 거동 혹은 생분해와 연관되는 핵심적인 지시인자들 즉, pH, 용존산소, 산화환원전위, 전기전도도, 알칼리도, 음이온과 양이온에 대한 부가적인 정보가 반드시 필요하다. 이들 정보는 정화공법으로서의 자연저감을 평가하는 중요한 인자로도 활용된다. 최근 환경부가 고시한 지하수오염평가보고서 작성에 관한 규정(환경부, 2003)내에 자연저감 여부 및 적용가능성을 평가하도록 하고 있다.

특히 염화유기용제류(PCE, TCE)로 오염된 지하수의 조사시에는 더욱 주의가 요망된다. 이들 유기용제는 생분해의 연쇄반응에 의해 원래의 모습이 변화하므로 단순히 법에 명시된 오염물질 PCE, TCE만을 조사 분석할 경우는 오염원 위치, 자연저감능 및 위해성 등을 제대로 평가하기가 힘들다. 특히 이들은 고밀도비수용성액체이므로 깊이별 시료채취가 요구된다. 그럼에도 불구하고 단순 혼합시료를 채취하거나 변형산물 화학종을 분석하지 않는 사례가 종종 나타난다. 모화학종인 PCE, TCE 보다 변형종인 염화비닐(VC)이 더 인간에 유해한 것으로 알려져 있다(Wiedemeier et al., 1999).

조사비용이 약간 더 추가되더라도 이들에 대한 부가적인 분석을 할 필요가 있으며 이들 정보는 복원설계 및 복원공법을 정하는 중요한 기초자료로 활용될 수 있다. 유류오염 지역의 중금속, 농약 등의 잔류성 유기오염물질, 방사능 오염물질 및 화약류로 오염된 토양과 지하수를 조사할 때에도 마찬가지로 대상 오염물질은 물론 이들의 운명과 이동을 좌우하는 다른 핵심적인 지구화학적 인자들에 대한 분석이 병행되어야 할 것이다. 다시 말하지만 법정대상 오염물질 외에 다른 중요항목에 대해 분석을 하지 않는 것은 예산 문제를 핑계삼는 경우와 또는 복원에 필수적인 정밀한 오염조사를 경시하는 풍조와 무관하지 않다.

### 지질로깅(지질매질특성규명)

대체로 토양오염을 다루는 분야에서는 지질로깅이라는 개념은 크게 가지고 있지 않은 것으로 보인다. 이는 유체가 관여하지 않는 한 토양내에서 오염물질의 이동은 거의 미미하기 때문이다. 이동성이 작다는 것을 가정할 경우에는 수리지질학적 단위의 개념이 별 필요 없을 것으로도 기대할 수 있다. 그러나 토양오염의 경우에도 대상 지반내에 저투수성층이 존재하는지 혹은 어떤 깊이나 위치에 존재하는지에 따라 오염물질의 확산여부에 큰 영향을 미칠 수 있다. 흔히 토양오염 조사시 시료채취에만 집중할 뿐 회수된 시료를 통해 혹은 별도의 작업을 통해 지질로깅을 수행하는 경우는 드문 것으로 파악되었다.

저밀도비수용성유체의 경우 별다른 인위적인 영향(양수 등)이 없을 경우는 대부분의 오염물질이 지하수면 직상하부에 제한될 것이다. 흔히 알려진 의왕시 유류오염부지의 경우 주로 톨루엔으로 오염되었는데 초기 대응으로 양수후 처리기법(pump and treat)을 적용하였다(Lee et al., 2001). 이 지역의 상부 천층 충적대수층의 두께는 약 6m이고 지하수위는 1.5-3m에 위치한다. 톨루엔은 저밀도유류이므로 대부분 지하수면 직상하부에 오염물질이 존재할 것이고 그렇다면 당연히 지하수 집수정은 상부 6m 이내에 스크린을 설치하여야 하며 지하수 관정을 그 이하로 굴착하면 위험할 것이다. 그런데도 불구하고 실제로 집수관정은 6m 넘게 하부까지 설치되었으며 약 4년 여간의 양수를 통해 오히려 풍화대 및 암반까지 오염시키는 결과를 낳게 된 것으로 평가되고 있다. 이렇게 된 이유는 오염물질의 특성, 수리지질학적 단위, 그리고 지질로깅의 중요성에 대한 개념이 없었기 때문이다.

특히 고밀도 비수용성유체에 의한 오염의 경우에는 지질로깅의 중요성이 더욱 증대된다. PCE와 TCE는 섬유세척제, 금속 탈지제, 유기용제 등 여러 용도로 국내 세탁업체 및 화학 산업계에서 연간 2,800여톤(PCE)과 12,000여톤(TCE)이 사용되고 있는 대표적인 고밀도 오염물질이다. 환경부는 상당수의 국내 산업지역의 지하수가 이들 유기용제로 광범위하게 오염되어 있다고 보고하였다(이강근, 2001).

이들이 저장탱크 혹은 오염원으로부터 누출되면 중력에 의해 하부로 이동하며, 이동 중 일부는 토양 공극 내에 잔류한다. 일정 양 이상의 고밀도 유체가 누출되면 토양공극의 모세관압을 극복하고 계속 지하로 침투한다. 지하수면을 만나더라도 비중이 1보다 크기 때문에 가라앉는다. 고밀도 오염물질의 확산과 이동을 제한하는 가장 효과적인 장벽은 지반내 존재하는 저투수성층이다. 저투수성층의 특성에 따라 오염물질이 지속적으로 하부로 혹은 암반대수층으로 확산될 것인지 아닌지가 결정된다. 그러므로 정밀한 지질로깅 등을 통한 수리지질학적 단위들의 특성(수직 및 수평적 위치, 투수성, 연장성 등)을 파악하는 것은 매우 필수적인 과정이다.

현재 일부에서 수행되는 오염조사 실무관행상 이러한 정밀 지질로깅을 기대하기 어려워 정확한 오염범위의 파악이나 효과적인 정화설계가 어려움을 겪을 것으로 사료된다. 지질로깅이 수행되더라도 단순히 모래층, 점토층, 풍화대, 암반층(연암, 경암)식의 구분은 큰 정보가 되지 못한다.

## 자연저감

자연저감(natural attenuation)이란 환경매체내에서 자연적 기작에 의해 오염물질의 농도, 질량, 독성, 이동성 혹은 양이 감소하는 것을 말하여 이런 작용을 이용하여 합리적인 시간내에 사람의 건강과 환경에 위해를 주지 않을 정도까지 정화를 이루어내는 것을 자연정화 기술이라 한다(USEPA, 1997; Wiedemeier et al., 1999; Cleary et al., 2001; 이진용·이강근, 2001, 2003).

최근 이러한 자연정화기술이 오염 정화방안으로 관심의 대상이 되는 이유는 한정된 사회적 자원을 효율적으로 배분하려는 까닭이다. 즉 가능한 적은 경제비용으로 합리적 시간내에 인간과 환경에 위해를 가하지 않을 정도의 정화목표(농도)를 성취한다면 굳이 엄청난 비용을 들여 적극적이며 인위적인 정화활동을 할 필요가 있느냐 하는 것이다(한정상, 1999). 정화목표를

설정하는 방법에는 오염물질을 완전히 제거하거나 혹은 관련법 이 정한 수준까지, 또는 위해성을 기반으로 설정하는 방법 등이 있다(Wiedemeier et al., 1999; Lee, 2000). 그동안 흔히들 법적으로 정해진 목표 혹은 최저의 오염도를 정화목표를 삼는 경우가 많았다. 그러나 이러한 정화목표의 설정은 기술 및 비용 문제에 봉착하였다.

이 문제를 해결하기 위한 대안의 하나가 위해성 기반 오염정화목표 설정이다. 오염물질이 여러 경로를 통해 사람에게 도달하여 어떤 위해를 발생하는 순간까지 상당한 자연저감이 일어난다면 현재의 오염도를 평가하고 그 평가를 기초로 사람에게 도달했을 때 위해를 발생하지 않을 정도까지만 적극적인 정화를 하는 것이다. 이를 통해 사회적 비용을 최소화하고 나머지는 자연의 정화능력에 의존하는 것이다. 즉 자연이 감당할 수 있을 정도 이상의 정화를 수행하는 것은 오히려 사회적 자원의 비효율적 사용이다. 만약 오염물질의 오염도가 지질 환경매체내에서 주어진 시간내에 충분히 저감된다고 판단된다면 우리는 오염물질의 변화나 이동을 잘 감시하면서 예상치 않은 또 다른 변수들에 대해서 대비하면 된다.

주지하다시피 자연저감을 이용한 자연정화기술은 오염된 지역에서 아무 것도 하지 않고 가만히 내버려두는 것이 아니며 또한 단순히 모니터링만 하는 것도 아니다(USEPA, 1998; 이석영 외, 1999; 한정상, 1999). 자연정화기술을 특정 오염지의 정화방안으로 채택하기 위해서는 치밀한 조사와 저감 예측기술이 필요하다. 상황에 따라서는 자연정화기술을 채택하는 것이 위험천만한 일이 될 수도 있다. 결국 이 정화기술은 모든 오염지역에 해당되는 당연한 혹은 필수적인 선택은 결코 아니다. 잘 계획된 정밀한 평가를 거친 후에 적용이 가능하다. 자연저감을 이용한 자연정화기술은 결코 오염 지하수정화를 위한 만병통치약이 아니며 모든 오염물질에 적용가능한 것도 아니다.

최근 미국 등지에서는 자연정화기술을 오염 지하수/토양의 정화에 적극적으로 활용하고 있다. 국내 지하수법과 토양환경보전법에도 자연저감기술을 하나의 정화공법으로 공식적으로 인정하고 있다. 그런데 일부 복원관련 전문기관 혹은 복원업체들의 정화계획서를 보면 천편일률적으로 적극적인 공법 적용 후 자연저감을 최종 공법으로 제시하고 있다. 이 부분에 대해서는 두 가지의 해석이 가능하다.

첫째는 여기서 말하는 자연저감은 정화공법으로서의 자연정화법을 의미하는 것이 아니라 적극적 복원이

끝난 후 즉 정화목표가 달성된 후 오염도가 다시 상승하지 않는지를 감시하는 사후모니터링(이강근, 2002)의 개념으로 볼 수 있다. 이런 경우 혼선을 피하기 위해 사후 감시관리라는 용어를 사용해야 할 것으로 사료된다.

두번째로 이 자연저감이 자연정화기술을 의미한다면 문제는 복잡하다. 왜냐하면 자연저감기술을 특정오염지역에 적용하기 위해서는 앞서 언급한 자연저감이 일어나는지 혹은 어느 정도 속도로 일어나는지에 대한 정량적 조사 및 평가가 있어야 하기 때문이다. 만약에 자연정화기술을 복원 후반기에 적용하기 위해서는 전체복원기간을 고려하여 선행된 적극적인 정화공법에서 달성할 정화목표와 이후 자연정화기술을 통해 달성할 정화목표를 결합하여 최종적으로 복원목표를 달성하는 계획을 세워야 할 것이다. 현재는 정량적 평가 과정없이 다분히 기계적으로 자연저감을 사용하고 있으며 복원 후 사후 모니터링이라는 개념과도 혼동하고 있는 경우가 적지 않다. 저자가 아는 한 자연정화기술을 정화공법으로 적용된 공식적 사례는 아직 국내에는 없다.

### 현장 적용성 평가

일반적으로 오염지역 정화를 위한 복원방법의 결정 및 복원설계를 위해서는 복원조사 및 적용성 평가 등을 거치게 된다. 또한 각 단계별 결정을 위해서는 오염조사를 통해 획득한 다수의 수리지질학적 인자들을 면밀히 검토할 필요가 있다. 그러나 경쟁하는 몇 개의 안이 있을 경우 중요한 소수의 판단기준이 있다 해도 기계적으로 선택이 쉬운 경우는 드물다. 이럴 경우 AHP(Saaty, 1980) 등의 방법론이 동원되기도 한다.

특히 가능성이 있는 소수의 선택된 몇 개의 복원방안을 평가하기 위해서는 기초적인 평가인자들에 대한 검토 외에 적절한 벤치규모의 시험을 통해 적용성을 평가하기도 한다. 이러한 평가를 통해 적절한 정화공법이 선택된다. 선택된 정화공법을 현장에 실규모로 적용하기 전에 실시설계인자를 도출하기 위해 소규모 현장 파일럿 시험을 실시하여야 한다. 이 시험을 통해 예상한 영향반경 혹은 정화효율이 달성되는지를 판단하고 실규모로 적용했을 경우 발생할 수 있는 규모의 존성 영향 등을 평가하고 이에 대한 대책을 강구하게 된다. 이를 통해 효과적인 정화설계 및 관리대책을 수립할 수 있다.

오염지하수 정화를 위해 양수 및 처리기법(pump

and treat)을 적용한다면 기 수행된 양수시험 등의 자료 등을 통해 영향반경 등(집수정의 우물손실)을 추정하고 현장에 소수의 집수관정을 설치하고 실제로 소규모 정화처리를 실시하여 기대한 양수기의 효율이 나오는지 혹은 유수분리기 및 수처리기의 처리용량이 적절 한지, 오염물질의 농도가 어느 정도 감소하는지 평가해야 한다. 우리는 흔히 일반적인 건설턴키공사를 위한 조사시 정밀조사를 통해 획득한 다수의 인자들이 실시설계에 반영되지 못하고 사장되는 경우를 접해온 한다.

현장 파일럿 시험이 실시된다면 다행이지만 적지 않은 경우 이런 파일럿 시험없이 기초자료 검토 혹은 실내시험 정도에 그치고 나머지 설계는 경험에 의존한다. 예측하지 못한 오염물질의 특성이나 혹은 지반의 불균질성으로 인해 상당한 기간의 파일럿 시험을 수행하고도 실제 복원기간중에 설계변경을 해야 할 경우가 빈번하게 발생한다. 그런데 현장적용성 평가를 하지 않고 경험적 판단에만 의존한다면 어떻게 될 것인가?

### 복원완료 검정

2003년 8월에 국내 최초의 공식적 오염부지 복원사업이 마무리되었다. 그런데 한가지 궁금증이 생기는 것은 과연 어떤 기준과 방법으로 복원의 완료 혹은 성공을 확인하였느냐는 것이다. 좀 더 구체적으로 말하면 토양시료를 몇 군데에서 또 어디에서 어떤 방법으로 채취하여 분석을 하였는지 이에 대한 기준이 알려지지 않고 있다. 만약 어떤 기준에 의해 N 개소에서 각 1개 시료를 채취하여 복원대상 오염물질의 농도를 분석하였다고 하자. 모든 시료가 복원목표농도 이하라면 아무 문제도 없을 것이다. 그러나 이 중에서 N-1개는 복원목표농도 이하이고 단 1개가 이를 초과하였다면 이를 복원의 미완료로 보아야 할 것인가?

실제 토양정밀조사에서는 임의의 개수의 시료분석 결과 중 단 한 개 혹은 한 지점이라도 규정치를 초과하면 정밀조사를 수행하도록 되어있다. 그렇다면 복원에서는 어떻게 해야 하나? 저자가 아는 한 국내에서 아직 이에 대한 어떠한 기준이나 방법도 제시된 바가 없다. 그 결과 복원사업 의뢰자와 수행자 사이에 향후 분쟁의 소지가 있다. 이러한 문제를 해소하기 위해서는 다음과 같은 몇 가지 중요한 사항에 대하여 기준이 하루 빨리 마련되어야 한다(기본적으로 현장내 원위치 복원처리의 경우에 해당한다).

① 복원완료 확인을 위해 몇 지점에서 몇 깊이로 시

료를 채취해야 하는지에 대한 기준이 있어야 한다. 토양정밀조사에서처럼 복원대상면적을 기준으로 지점수를 정할 수 있다.

② 오염자료에 대한 통계적 처리기준이 없다. 즉 개개의 오염농도를 개별적으로 다루는 것이 아니라 통계적 처리를 통해 복원완료를 판단 한다고 할 때 N개의 오염물질 농도를 단순 산술평균할 것인지, 기하평균을 할 것인지, 질량평균을 할 것인지, 혹은 부피평균을 할 것인지 정할 필요가 있다. 많은 경우 오염물질의 농도를 포함한 지구화학적 인자들은 로그 분포한다고 알려져 있으므로 기하평균을 채택하는 것도 단순히 택할 수 있는 방법 중의 하나로 볼 수 있다. 어떤 식의 기준이든 전문가들의 논의를 통해 확정할 필요가 있다.

③ 만약 이들 기준에 의해 평가했을 때 복원이 완료되지 않았다면 사후 기술적 혹은 행정적 처리는 어떻게 할 것인가?

## 전문 실무자

2000년대 들어 토양 및 지하수환경에 대한 관심이 고조되면서 관련 학계에 많은 우수한 연구자들이 유입되었고 국가 주도의 대규모 연구사업도 시행되고 있다. 또 그들이 다수의 우수한 연구 결과들을 내고 있는 것은 주지의 사실이다. 그럼에도 불구하고 관련업계에서는 조사 및 복원을 전문적으로 수행하는 잘 훈련된 실무자들이 실제로 부족한 형편이다. 물론 국내의 상황이 이러한 분야에 대한 사업이 초창기이고 시장의 규모가 작음을 감안할 때 어쩌면 당연한 현실일지도 모른다. 그러나 학계의 전문인력의 수와 비교하였을 때 업계는 상당히 미미한 것이 사실이다. 관련사업의 활성화를 위해서는 오히려 업계쪽에 더 많은 인력이 있어야 하며 이를 위해서는 학계에서 보다 실무적인 다수의 인력을 양성할 필요가 있다.

## 국가/공공 전문기관

현재 우리나라 공공기관에서 발주하는 대부분의 토양지하수오염의 조사 및 복원사업은 극히 소수의 국가전문기관에서 독점하고 있으며 상당수의 민간부문 사업도 크게 다르지 않다. 우선 관련법령에 이들 기관들을 토양정밀조사, 토양환경평가 전문기관으로 지정하고 있으며 이들 기관만이 전문조사를 수행할 수 있도록 하고 있다. 그 결과 이들 기관들은 민간 전문기술기

업들을 하청업체로 거느리고 지배하고 있다. 이들 기관들은 또한 민간비영리 전문기관들에 대해서도 상대적 우위를 점하고 있다.

이런 식으로 환경당국이 일반기업의 시장접근 제한을 한 것에는 이윤을 추구하는 일반기업이 국가/공공기관보다 윤리의식이 부족하거나 혹은 기술력이 부족할 것이라는 전제를 두기 때문이다. 일반기업의 윤리적 측면에서 본다면 오염 원인자와의 부적절한 관계 등으로 인하여 오염조사 및 복원사업에 문제를 발생시킬 소지는 충분히 있다고 인정된다. 혹시 그럴지라도 사전 시장접근의 제한이 아니라 사후감독으로 접근해야 한다. 민간에게 시장을 완전개방하고 국가는 관련업무에 대한 적절한 감시 및 정도관리 기능만을 가져야 한다. 기술력에서 국가기관이 민간기업에 큰 우위를 보이지는 않는 것으로 사료된다. 현재 단순히 기술로만 보면 오히려 민간기업에서 국가전문기관으로 유입되고 있는 실정이다.

만약 국가산하기관이 오염조사 및 복원사업을 지금처럼 할 수 있는 상황이라면 많은 경우 민간기업은 이들과의 경쟁력이 없을 것이다. 사업비용 혹은 기술에서 경쟁우위에 있다 하더라도 의뢰자가 국가전문기관에 사업을 주었을 경우 얻게 되는 다른 부가적 이익(행정적 편의, 공공기관의 사회, 경제적 안정성, 국가기관간의 온정주의)을 무시할 수 없을 것이다. 전체적으로 기술력과 경험이 부족한 사업형성 초기에는 똑같이 기술력이 부족하더라도 국가공공기관이 직접 사업을 주도하는 것도 바람직할 것이다. 그러나 기술력과 경험이 어느 정도 성숙해져가는 단계에서는 반드시 사업의 감리감독 업무만을 수행하도록 해야 할 것이다. 물론 국가가 직접 시행하는 매우 중요한 오염조사 및 복원사업을 수행할 수는 있을 것이다. 예를 들어 국가기간사업과 민간사업을 구분하여 국가전문기관은 중요한 국가사업에만 참여할 수 있도록 할 필요가 있다.

혹은 공사금액으로 제한할 필요도 있다. 국가전문기관이 경우에 따라서 해당 전문기술을 보유하고 있지 않으면서 관급공사에 참여하는 일이 빈번하다. 앞서 언급한 바와 같이 국가전문기관은 주로 실무기술보다는 관리 및 기획기술을 보유하고 있으므로 감리감독의 기능 그리고 중요한 환경정책기획 기능만을 가지면 될 것이다. 국가공공기관의 조사 및 복원사업에의 무혈입성은 무경쟁 혹은 제한적 경쟁으로 인해 기술의 발전속도를 늦추게 되는 결과가 초래될 수 있다. 국민의 세금으로 운영되는 국가전문기관이 민간사업자와 경쟁을 한다는 것은 결코 바람직한 일이 아니다. 지하수토

양오염조사 및 복원사업을 활성화하겠다고 하면서 공식적인 조사권한을 국가 혹은 공공전문기관에 묶어두는 것은 모순이다.

## 기타사항

이외에도 토양정밀조사시 지하수오염조사를 단순히 선택사항으로 한다던지 하는 관행은 잘못된 것이다. 우리나라의 경우 지하수위가 높아 평지의 경우 2-3 m 이내에 지하수위를 형성하고 있고 수위의 상승-하강 폭도 커서 토양오염과 지하수 오염은 직결되어 있는 경우가 대부분이다. 두 지반 환경계를 분리된 시스템으로 보는 시각은 수정되어야 한다. 토양정밀조사시에도 반드시 지하수오염 여부를 조사해야 한다. 필수사항이지 선택사항이 아니다. 즉, 토양오염의 복원이 완료되었다 하더라도 지하수오염은 허용기준치를 위배되는 경우가 많기 때문에 토양정밀조사시에도 반드시 지하수오염 여부를 조사해야 한다. 토양과 지하수에 대한 동시 조사 및 평가는 필수사항이지 선택사항이 아니다.

## 품질보증

현장 실무조사를 하다보면 일반업계의 잘못된 시료 채취 행위를 자주 접하곤 한다. 그런데 대학 등에서 연구를 할 때에는 표준시료채취 절차 및 전처리 등을 준수하여 했을 일들을 현업에서는 비용 등의 이유로 무시하는 경우가 적지 않다. 반드시 각 해당 오염물질에 맞는 시료병과 전처리가 필요하며 그리고 교차오염(cross-contamination)의 가능성도 최대한 줄여야 한다. 특히 유류오염지역 등을 조사할 때는 가능한 일회용 시료채취 장비를 사용해야 하며 일회용이 여의치 않을 경우에는 반드시 한 지점에서 사용한 후 깨끗하게 세척하여 다른 지점에서 사용해야 할 것이다. 누가 보아도 인정할 수 있는 표준 현장실무가 이루어져야 한다. 대부분 자료의 오류는 현장에서 발생한다고 한다.

## 부 언

본 논문에서 언급한 몇 가지 사실과 문제점은 제한된 관련 공개자료 및 저자의 개인적인 실무경험을 바탕으로 기술한 내용이므로 정량적 수치 혹은 견해에 있어 차이가 있거나 일정부분 오해의 여지가 있을 것

으로 사료된다. 그러나 저자와 다른 기관 혹은 전문업체에서 실무에 종사하는 다수의 사람들과의 토론을 통해 일정부분 공감을 하는 사실만을 소개하려고 노력하였음을 밝히는 바이다. 또한 본 논문이 여러 가지 문제점만 제시하고 이에 대한 적절한 대안이 명확히 제시되지 못한 부분이 많으나 관련 전문가들의 토론의 기회가 될 수 있을 것이다. 본 논문이 우리나라 지하수토양오염 조사 및 복원실무의 현실을 직시하는 기회가 되기를 기대한다.

## 사 사

본 논문의 준비는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 3-5-1)에 의해 수행되었습니다. 또한 좋은 수정의견을 주신 우남철 교수님, 서용석 교수님 및 익명의 심사위원님께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 건설교통부, 한국수자원공사. 2002. 「지하수관리 기본계획 보고서」. 건설교통부, 한국수자원공사, 520p.
- 박응렬. 2003. 2003년 토양환경보전대책. 오염 토양지하수 정화사례 및 사후평가 방안에 관한 워크샵, 한국지하수토양환경학회, 5-9p.
- 이강근. 2001. 「21세기 프론티어연구개발사업 수자원의 지속적 확보기술 개발 세부과제 신청계획서」. 서울대학교, 93p.
- 이강근. 2002. 복원모니터링. 제1차 토양환경단기교육: 토양오염평가와 정화, 한국지하수토양환경학회, 3/91-3/98p.
- 이석영, 이민효, 윤정기, 박종환, 이문순, 강진규. 1999. 오염부지의 자연정화법 적용 전망, '99 세계 환경의 날 기념 국제세미나: 21세기 토양환경관리를 위한 발전 방향, 국립환경연구원, p.131-146.
- 이진용, 이강근. 2001. 「자연저감(정화)기술(MNA): 그 이론」. KOREARTH NET, p.19
- 이진용, 이강근. 2003. 오염지하수 정화방안으로서의 자연저감법 적용성 평가. 세계 물의 해 기념 지하수심포지움, 2003/05/30, 올림픽 파크텔, pp. 105-116.
- 정상용. 2003. 「오염 토양지하수 정화사례 및 사후평

- 가 방안에 관한 워크샵」. 한국지하수토양환경학회, 1p.
- 한정상. 1999. 자연저감(자연정화)에 관한 소고(1). 지하수환경학회지 6(1): 48-51.
- 환경부. 2002. 「토양복원 기술 및 사례집」. 환경부, 106p.
- 환경부. 2003. 지하수오염평가보고서의작성에관한규정. 환경부, 환경부고시 제2003-34호(2003.2.7).
- Ahrens, L.H. 1953. A fundamental law of geochemistry. *Nature* 172: 1148.
- Cleary, R.W., Rorech, G.J., McCreadie, H. 2001. 「Introduction to monitored natural attenuation [MoNA], Natural Attenuation, Risk Assessment, and Risk-Based Corrective Action」. NGWA's Short Course Material, Westerville, Ohio.
- Lee, C.H. 2000. 「Site assessment and in-situ remediation technology application for contaminated sites」. Ph.D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Lee, J.Y., Cheon, J.Y., Lee, K.K., Lee, S.Y., Lee, M.H. 2001. Factors affecting the distribution of hydrocarbon contaminants and hydrogeochemical parameters in a shallow sand aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology* 50(1-2): 139-158.
- Saaty, T.L., 1980, *The Analytical Hierarchy Process*, New York, Mc Grao-Hill.
- USEPA. 1997. Use of monitored natural attenuation at Superfund, RCRA corrective action, and underground storage tank sites. Draft interim final, OSWER Directive 9200.4-17, USEPA, Washington, DC.
- USEPA. 1998. Seminars: monitored natural attenuation for ground water, ORD EPA/625/K-98/001, USEPA, Washington, DC.
- Wiedemeier, T.H., Rifai, H.S., Newell, C.J., Wilson, J.T. 1999. 「Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface」. John Wiley & Sons, Inc., New York, 617p.

투 고 일 2003년 1월 6일

심 사 일 2004년 1월 7일

심사완료일 2004년 2월 5일

이진용

(주)지오그린21

151-818 서울시 관악구 봉천7동 산4-8 서울대학교  
연구공원 본관 519, 520호

Tel: 02-875-9491

Fax: 02-875-9498

E-mail: hydrolee@empal.com

이강근

서울대학교 지구환경과학부

151-747 서울시 관악구 신림동 산56-1

Tel: 02-880-8161

Fax: 02-874-7277

E-mail: kkleee@snu.ac.kr