

# 토양 및 지하수의 오염과 복원 기술에 관하여

## 1. 서론

근래에 들어 언론 매체에서 지하수 오염의 심각성을 지적하는 기사들을 자주 접하게 된다.

지하수의 무분별한 채취, 그에 따른 지하수의 고갈과 지반의 붕괴 가능성 그리고 채취 종료후 무책임하게 방치됨으로써 토양의 역오염 가능성 등이 그 기사들에서 주로 다루어 지고 있다. 그러면 우리는 과연 마시기에 안전한 지하수를 채취하고 있는가 라는 의문에 어떤 대답을 할 수 있을까?

우리나라는 60년대 이후 식량의 자급화와 공업 발전을 위해, 환경오염을 걱정할 여유도, 관심도 없이 엄청난 양의 맹독성 농약들이 땅에 뿌려왔으며 공업 폐수와 폐기물들 그리고 생활 오수를 방류하거나 매립하여왔다. 그 결과 우리의 대기와 하천은 오염되어, 맑은 공기는 사라진지 오래이며, 수돗물을 마음놓고 마실 수 없는 지경에 이르렀다. 금수강산이라는 어휘가 무색하게 우리의 하천은 시커먼 잿빛으로 변해갔다. 한편 미국 등 선진국들은 80년대부터 환경 보전에 대한 관심을 보이면서 정부 차원의 노력을 기울여, 90년대 후반에 이르러서는 국제적인 환경 규제의 가능성을 구체화 하였다. UN과 OECD를 중심으로 인류의 건강과 행복한 삶의 구현이라는 대명분 아래, 환경 오염의 규제와 오염된 환경의 복원은 '상호 노력'의 차원을 넘어, 새로운 무역 장벽으로 작용하며 국제 사회에서 인류의 생존을 위한 의무 조항으로 다가오고 있다. 더구나 국민의 생활 수준이 향상되면서 국내 여론도 '깨끗한 환경에서 행복한 삶'이라는 삶의 질을 논하게 되었다. 정부와 산업계는 환경정화, 특히 상수,하수의 수질 환경 복원에 많은 돈과 시간을 소비하여 왔다. 대기환경의 복원은 현실적으로 너무나 어려웠었고, 토양오염은 대기나 수질오염과 달리 육안으로 쉽게 관찰되는 것이 아니어서 그 위험성이 인식되지 않은 채 수질 환경만이 관심을 끈 것이 사실이었다. 하지만 수질의 개선은 피부로 와닿지 않고 수많은 가



안익성

연세대학교 화공·생명공학부 교수

정들이 수돗물을 불신하여 직접 음용하지 않고 있다. 대신에 값비싼 정수기를 구입, 설치하거나, 약수를 받거나 생수라는 것을 구입, 이용하고 있다. 특히 음용수로는 생수를 많이 애용한다고 한다. 이렇듯 우리의 식수원이 수돗물에서 지하수 쪽으로 이동하고 있다. 그런데 우리의 지하수가 과연 안전한가에 대한 아무런 해답도 없다는 것은 실로 이해하기 힘든 현상이다. 결론적으로 말하면 저자는 국내 지하수의 질을 결코 신뢰하지 않는다.

이는 지하수의 기본 정의만을 살펴보아도 쉽게 이해될 수 있다. 지하수란 땅속을 흐르는 물이다. 그러므로 지하수가 깨끗하기 위해서는 통과 매체인 토양이 깨끗하여야 한다. 그렇다면 우리의 토양은 깨끗한가? 아니다. 결코 그렇지 않다. 서두에 기술한 것처럼 우리는 60년대부터 조국 근대화의 기치아래, 수많은 농약과 맹독성 산업 폐기물을 방출, 매립하여왔다. 지금 이 시점에도 무단 폐기로 국내 굴지의 산업체들이 고발되는 한심한 실정이다. 이러한 오염물의 방출, 매립은 하천 뿐 만 아니라 토양의 오염을 초래하였을 것이라는 것은 어렵지 않게 유추할 수 있는 것이다.

토양의 흡착성으로 오염물들은 토양에 장기간 체류하며 빗물이 땅으로 스며들면서 오염물질의 이동을 초래하여 오염지역이 확산된다. 인구에 비해 절대 국토 면적이 작은 우리 현실에서 오염되지 않은 땅을 찾이란 쉽지 않을 것이다. 그러므로 오염 토양을 통과해 흐르는 지하수는 설사 육안으로는 맑아 보일지라도 음용수로 사용할 수 없는 정도의 오염물을 함유할 수 있다. 그러므로 우리가 섭취하고 있는 지하수의 수질에 대해 의구심을 감출 수 없다.

최근 환경에 대한 TV 특별 프로그램에서 수

도권 모 지역의 토양 오염 실태를 방송하였다고 한다.

국내 토양환경복원의 전문가가 출연하여 땅속에 시추관을 임의로 설치하고 채취한 공기의 냄새 여부로 오염 지역을 파악하는 장면이 연출되었다고 한다. 환경공학에 대한 전문 지식이 있을 수 없는 시청자들을 상대로 토양 오염의 심각성을 이해시키기 위해서 이런 말도 되지 않는 monitoring 방법을 사용하였을 것으로 믿고 싶다. 하지만, 만에 하나 이런 한심한 방법으로 조사가 이루어져 왔다면 국내 토양과 지하수의 오염 실태에 대한 통계 자료는 신빙성이 있을 수 없다. 따라서 현재 토양 환경에 대한 관심과 복원 기술 개발이 가장 활발한 미국의 토양 및 지하수 오염 실태와 그에 대한 학계의 연구 동향 등을 소개하고자 한다.

## 2 미국의 토양 및 지하수 오염과 주요 복원기술

미국의 경우 음용수의 30% 가량을 지하수에 의존하며 전력용수를 제외할 경우 전체 물 사용 중 지하수가 차지하는 비율이 40%에 이르고 있다고 한다. 1970년대 Love Canal에서의 사고, CIVIL ACTION 이라는 영화로 소개된 미국 메사췌세츠주 Woburn에서의 사고등으로 해서 미국 국민들은 그들이 사용하는 지하수가 안전하지 않을 수 있다는 경각심을 가지게 되었다. 1980년 미국 의회는 'Superfund' 로 더 잘 알려진 Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act (CERCLA)를 통과시켜 기존의 오염지역을 처리, 복원하도록 규정하였다. Superfund 프로젝트로 대변되는 토양 및 지하수 복원에 대한 노

력은 많은 미국 대학 및 기업의 환경 연구를 촉진하는 매개체가 되어 수많은 연구 결과를 낳았으며, 많은 환경 벤처기업의 출현이 이들의 소산이라 할 수 있다. 20여년의 연구 결과를 본인이 모두 알지 못하는 점도 있고, 또한 짧은 분량의 용지에 모두 소개할 수도 없지만, 토양 오염의 메커니즘과 복원기술 부분을 중심으로 기술할까 한다.

토양은 무기물과 유기물, 공기 그리고 물로 구성되어 있다. 고체로서 토양은 대부분의 무기물과 유기물이 결합한 형태인데 그 사이에 존재하는 공극을 물 또는 공기가 채우고 있다. 토양의 무기물은 우리가 흔히 바닷가에서 볼 수 있는 모래라고 이해하면 될 듯 싶다. 토양 무기물은 흔히 Aluminosilicate라 하여 Al과 Si라는 원소에 O 또는 OH의 결합으로 이루어진 결정체이다. Al 또는 Si 대신 Fe이나 Mg와 같은 다른 금속 원소의 치환으로 음전하를 띠게 된다. 그러므로 전하를 중성으로 하는 과정에서 기타 금속 이온과 결합할 수 있으며 이것이 토양의 중금속 오염의 주요 메커니즘이 되기도 한다. 토양의 유기물은 생명체가 퇴화되어 형성된 것으로 주로 식물체의 퇴화물로 구성된다고 알려져 있다. 생명체의 종류가 다양하듯이 토양 유기물은 특정한 구조 혹은 화학식을 정의할 수는 없다. 하지만 carboxyl group 혹은 amine group 등의 극성부분의 존재로 인해 중금속이나 극성 유기화합물이 결합할 수 있으며, aliphatic chain이나 aromatic group들로 인해 비극성 유기화합물이 결합할 수도 있다. 토양 유기물의 많고 적음은 흔히 농업 부분에서 토양의 비옥 여부의 기준이 되지만, 토양 환경공학에서는 토양 유기물은 PCB, PAH, dioxin, 유류 등과 같은 비극성이면서 맹독성을 갖는 환경오

염원의 주요 결합지역이 된다. 흔히 토양 오염에 의한 피해를 묘사함에 있어 오랜 기간 누적되어 만성적인 피해를 끼친다 함은 위에서 언급한 토양 구성물과 환경 오염원의 결합에 기인한다. 특히 유기화합물이라는 오염원과 토양 유기물과의 강력한 비극성 결합으로 인해 극미량의 오염원이 오랜 세월, 오염지역을 통과하는(빗)물로 계속해서 유출된다.

오랜 세월의 오염 역사로 인한 오염지역의 확산과 함께, 이는 오염 토양의 복원에 천문학적 비용이 요구된다는 학계나 연구기관의 보고의 근거가 되기도 한다. 참고로 1994년 National Research Council의 조사에 의하면 미국 내에는 약 300,000에서 400,000개 지역의 토양 및 지하수가 복원을 요할 만큼 오염되어 있으며 그 처리 비용으로 약 5천억에서 1조 달러가 소요될 것으로 추정하였다.

토양오염을 오염원별로 살펴보면, 지하 저장창고의 균열에 의한 석유, 화학품등의 누출, 생활 하수 및 공업 폐수의 매립지로부터 누출, 산업 현장 등에서 부주의한 맹독 물질의 사용 및 폐기, 맹독성 농약의 사용, 군부대 훈련 및 저장기지에서 폭발성 물질의 누출 등이 있다. 이렇게 다양하게 오염된 토양을 복원하는 기술을 소개하기에 앞서, 오염도 측정기술의 중요성을 먼저 간단히 짚고 넘어 가고자 한다. 토양 공간은 3차원 공간이다. 오염 지역의 퍼짐 역시 3차원적으로 이루어진다. 그러므로 단순히 거리뿐만 아니라 깊이에 대한 조사가 동시에 이루어져야 한다. 토양의 구성이 비균일적일 것은 쉽게 추측할 수 있을 것이다. 따라서 토양을 통한 물질의 이동 역시 3차원내 어느 방향으로든 동일하게 이루어질 것이라 추정할 수 없다. 따라서 오염 현황을 측정하기위해서는 국내 TV 프

로그래에 나온 것처럼 몇 개의 시추관을 저장 소로부터 일정 거리별로 설치해서는 안된다. 오염 지역과 오염 여부를 결정할 수 있는 시추관의 수와 위치의 결정 만으로도 박사 학위를 받을 수 있을 만큼 난해한 문제이다. 그리고 채취 및 분석의 샘플은 약취 정도로 끝날 수는 없다. 당연히 토양을 직접 분석하여야 한다. 이러한 토양 오염 정도를 결정하는 monitoring 과정 만으로도 엄청난 시간과 경비를 필요로 한다. 그리고 정확성 여부가 항상 논란거리가 된다.

이제 왜 미국의 EPA가 그토록 강력한 정부 기관이 될 수 밖에 없었는지 이해할 수 있을 것이다.

수질이나 대기 오염의 처리라는 제1세대 환경 기술, 사전오염예방이라는 제 2세대에 이어, 토양·지하수 등 생태계의 복원이 제 3세대 환경 기술로 분류되고 있는 것은 그 중요성과 함께 기술적 어려움 때문인 것이다. 시추관 몇 개로 냄새 맡고 결정할 수 있는 정도가 아닌 것이다.

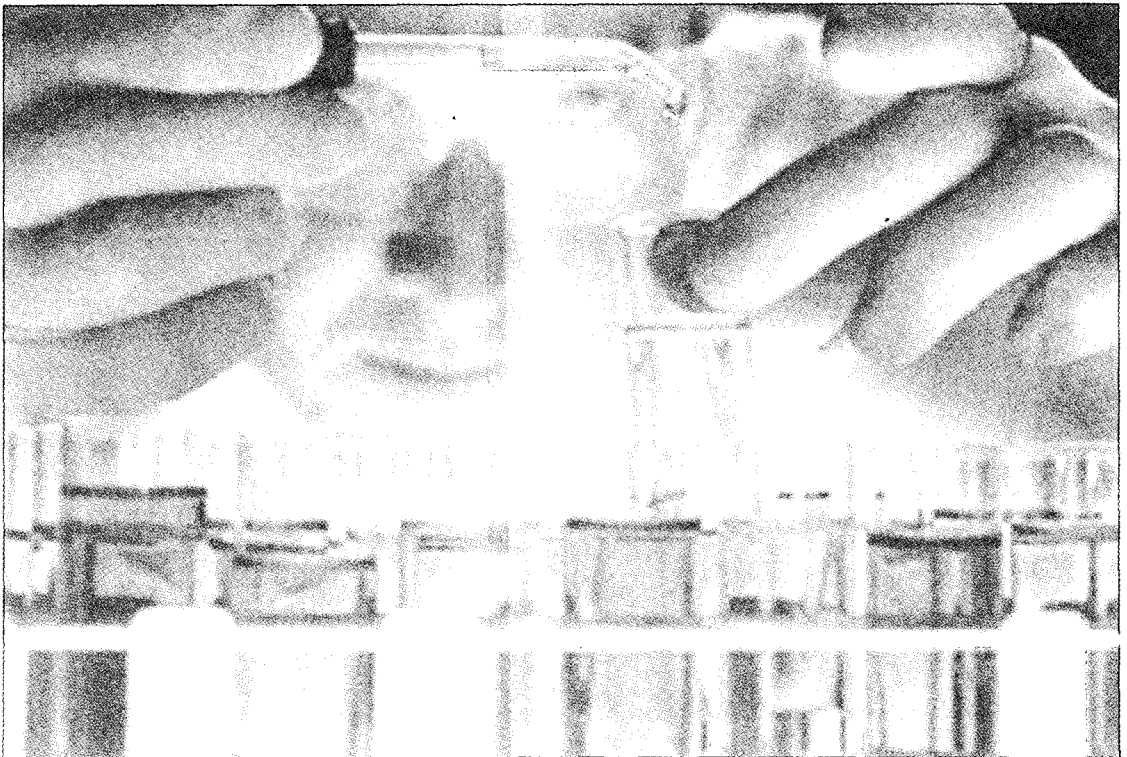
이제 오염 토양(지하수)의 복원 기술에 대해 살펴 보기로 하자. 가장 대표적인 기술로는 'pump and treatment'가 있다. 이름 그대로 토양 또는 지하수를 퍼올려서 화학적 또는 생물학적인 처리시설이 있는 곳으로 운반하여 처리하는 'ex-situ' 기술이다. 고비용 문제, 처리시설에 대한 인근 주민의 반대, 운반 과정 중이나 처리시설에서 오염원의 누출 등 여러 문제로 인해 토양복원기술 개발의 기폭제가 된 기술이다. 앞서 밝힌 바와 같이 오염지역의 결정이 정확하기 어렵다는 이유로 인해, 과연 오염지역 모두를 정화하였는지 단언하기 어려운 점도 있다. 이러한 문제점을 극복하고자 개발되고 있는 기술들의 공통점은 'in-situ' 기술들이다. 'in-

situ' 기술이란 오염 토양을 건드리지 않고서 정화하는 기술을 말한다. 혹자는 종래의 'pump and treatment'의 변형으로서 오염지역 인근에 처리시설을 설치하고 퍼올린 토양이나 지하수를 정화하는 기술까지 포함시키기도 한다. 구체적인 처리기술은 크게 '이동'과 '분해'로 구분할 수 있다. '이동'이란 오염원을 토양과 지하수에서 다른 매체로 옮기는 것을 말한다. 흔히 air or vapor stripping이라 알려진 기술은 토양안으로 공기나 증기를 불어넣어 토양내에 존재하는 유류 등 휘발성 물질을 기체상으로 이동시킨 후 다시 회수하는 기술이다. 물론 회수된 기체내 오염물질의 분해 또는 농축이라는 처리 과정이 추가되어야 한다. soil washing은 토양을 물 또는 유기용매의 액체로 씻어내는 기술이다. 물에 의한 세척은 중금속이나 수용성이 있는 극성 유기화합물에 의해 오염된 토양의 정화에 흔히 쓰이는 방법이다. 유기용매에 의한 세척은 비극성 유기물의 이동을 위하여 제안되었으나, 가입된 독성 유기용매의 토양내 잔존이라는 문제로 인해 더 이상 관심을 끌지 못하고 있다. 대신에 친수성과 소수성을 함께 갖는 계면활성제에 의한 토양 세척이 크게 각광을 받았으나 이 역시 토양내 잔존이라는 문제의 극복이 과제로 남아 있다.

'분해'에 속하는 기술에는 생물학적인 분해 기술이 있다. 물론 '이동' 기술을 통해 토양의 고체상에서 옮겨진 오염원을 별도로 분해하는데는 화학적 산화·환원법이 이용될 수 있다. 또한 흡착, 침전 등을 통해 별도로 분리·농축시키는 방법도 사용할 수 있다. Biodegradation 혹은 Bioremediation이라는 이름으로 알려진 생물학적인 분해기술은 유기오염물의 분해를 일으킬 수 있는 미생물을 이용하는 것이다. 오염

토양내 이미 존재하는 미생물을 활성화시키거나, 외부에서 분해 미생물을 배양, 가입하는 것으로 가장 경제적이고도, 분해 과정 중 독성 화합물이 가입되지 않으며, 발생할 확률도 낮은 기술로 평가받고 있다. 요즈음 미국 학계의 토양 복원기술 연구의 대부분을 차지하는 이 생물학적 복원 기술은, 생물학이나 생화학 분야에서, 수많은 오염원 각각을 분해하는 새로운 미생물의 발견과 분해기작의 규명이 이루어지면서 그 발전 속도가 빨라지고 있다. 나무 등의 식물을 이용하는 Phytoremediation 역시 크게 각광을 받고 있다. 포플러나무나 버드나무 처럼 공기 정화 효과가 있다고 과거 도로변에 많이 심어졌던 나무들을 오염 토양에 심었을 경우, 먼저 뿌리를 통한 수분의 흡수가 일종의 pump

역할을 수행하여 물에 의한 토양 세척 효과가 있고, 함께 흡수되는 오염물이 뿌리에 공생하는 미생물이나 식물 자체에 의해 분해되거나, 흡수 또는 대기로의 증발 등에 의해 토양에서 제거된다는 보고가 학계에서 점증하였다. 이런 환경 기술의 수요자가 되는 미국 산업체 일부에서는 이 기술을 크게 신뢰하지 않는 면이 있는 것도 사실이다. 식물의 뿌리가 이를 수 없는 깊은 곳의 토양오염은 처리할 수 없으며, 오염도가 식물이 견딜 수 있는 농도를 상회하는 경우 이용할 수 없다는 단점은 있으나 무엇보다도 이 기술의 가장 큰 장점은 보기 흉하게 버려졌던 오염 토양을 울창한 숲으로 바꾸는 시각적 효과이다. 그래서 많은 환경벤처 기업이 애용하는 기술이기도 하다. 요즈음 전세계적으로 바이오



테크놀러지가 크게 각광받아서인지는 몰라도 위의 생물학적인 복원기술이 토양오염을 해결할 수 있다고 이야기하는 사람이 늘고 있다. 이 글을 쓰는 저자도 Bioremediation을 7-8년 연구하였지만 동의할 수 없는 주장이다. 앞서 밝힌 바와 같이 생물학적인 복원기술은 오염원으로 서 중금속 보다는 유기화합물의 분해에 사용하는 기술이다. 이들 유기화합물이 토양 구성물 중 하나인 토양유기물과 강력히 결합한다는 사실은 앞에서 밝힌 바 있다.

이 강력한 결합을 깨뜨리지 않고서는, 오염물은 미생물의 먹이가 될 수 없고 따라서 생물학적인 분해기술 만으로는 토양의 완전한 복원은 달성할 수 없다. 또한 미생물의 토양내 이동이 물이나 공기가 통과하는 것처럼 쉽지 않다는 사실은 Bioremediation이 결코 유일무이한 토양 복원기술이 될 수 없음을 분명히 한다. Biosurfactant를 합성, 분비하는 미생물의 사용을 제안하기도 하지만 좀더 지켜보아야 할 것이다. 요즘은 미국내 토양환경공학의 대가들 사이에서는 Bioremediation 보다 Biostabilization이라는 용어가 더 많이 사용되는 것도 생물학적인 복원기술의 이러한 한계에 대한 인식을 전제로 한 것이다.

### 3. 맺음말

본인은 미국에서 토양환경공학을 전공하면서 Superfund Project에 참여하였다. 1996년 이 Project에 참여하는 미국 10개 대학의 연구진이 한자리에 모여 5년간의 연구 결과와 앞으로의 방향에 대해 논의하는 자리가 있었다. 그 때만 하여도 뚜렷한 결과와 비전이 보이지 않아 안타까움을 토로하는 이가 적지 않았으나, 본인이

미국을 떠나 오던 2000년 초에 이르러서는 이제 수많은 학교, 정부 산하 연구소 및 기업에서 그간 쏟아부은 노력이 결실을 맺을 날이 멀지 않음을 직감할 수 있었다.

오염원의 독성 연구, 오염 경로, 토양 오염 메커니즘, 이동 현상, 분해 미생물의 분해 및 성장 기작, 미생물의 이동현상, 토양 미생물의 생존 활성화 연구, 계면활성제 등의 세척제 작용 메커니즘, 세척제 소재 개발 등 기본적인 연구에 대한 착실한 결과의 축적을 목격하였기 때문이다. 그리고 이를 기반으로한 환경산업이 다한층 번창할 것임은 자명하며, 나날이 증가하고 있는 전세계적인 환경에 대한 관심 및 우려 그리고 무역의 규제로 까지 발전하고 있는 환경규제를 미국 정부와 환경산업체들은 즐기고 있을는지 모른다는 생각을 하였다. 과연 우리는 어떤 준비를, 어떤 대처를 하고 있나 걱정하지 않을 수 없다. 토양환경분야를 대학에서 배우는 수학이라면 초등학교 산수 수준이라는 제 1세대 환경기술인 수질분야가 아직도 주종을 이루고 있는 우리의 환경 연구를 바라보면 참으로 걱정스러울 뿐이다. 환경복원은 조도해 나가야 할 정부 및 오염자 측 입장에서 보면 시간과 돈만을 쓰면서 그에 대한 구체적인 product는 없는 것처럼 보인다. 하지만 그렇다고 모른 척할 수도 없다. 반면 환경복원 기술을 갖고 있는 산업체 입장에서 보면, 엄청난 시장이다. 앞에서 소개한 것처럼 미국내 토양복원만도 1조 달러의 시장이다. 충분히 도전하여 불만한 큰 시장인 것이다.