

자연저감(자연정화)에 관한 소고(1)

Natural Attenuation

한정상(Jeong-Sang Hahn)

미국은 불량유해 폐기물 처분장을 정화하는데 앞으로 30년 간 약 3,730~17,000억불을 투자해야만 한다(Russell 등, 1991). 이에 소요되는 예산은 종합환경영양조치보상 책임법 일명 특별기금법(CERCLA)나 자연보전복원법(RCRA)에 의해 규정된 것으로서 이 예산의 대부분은 에너지성(DOE), 국방성(DOD), 연방정부기관 및 여러 주 정부나 또는 EPA의 감리하에 쓰여진다.

1993년에 EPA가 발표한 바에 의하면 지하수 오염지역으로서 지정된 NPL(National Priority List) 부지는 2,000여개, RCRA 부지는 1,500~3,000개소, 지하 연료용 유류부지는 약 295,000개소, DOD 부지가 20,000개소로서 미국 전역에 약 330,000 부지가 정화 대상 부지로 지정되었거나 지정대상 고려부지이다.

오염토양 및 지하수는 정화에 쓰여질 수천억 불의 막대한 예산은 국민건강보호나 교육, 사회보장 및 기간산업 개발에는 사용될 수 없는 예산이다. 만일 이와 같은 막대한 예산을 국민건강과 환경보호에 동등한 이익을 제공할 수 있도록 사용될 수 있다면 매우 합리적인 처사이겠으나 실제로는 그렇지 못하다.

실제로 이들 오염부지 때문에 발생하는 미 국민의 건강위해는 미 정부가 생각하는 것보다는 그다지 심각하지 않다(Milloy, 1995). 이미 정화작업을 실시한 대다수의 기 오염된 토양과 지하수 부지는 현실적으로 오염 이전과 비슷한 상태로 복원하지 못했다.

NRC(National Research Council)가 1994년에 발표한바에 의하면 “오염된 지하수와 토양의 영구적인 정화목표를 충족시킬 수 있는 공학적인 정화방법은 몇 개 되지 않는다는 사실을 여러개의 문제부지를 정화처리 해 본 후에야 비로소 인식하게 되었다”고 한다. 또한 Freeze와 Cherry(1989)는 5년 전에 이미 정화에 대한 일반적인 경향을 파악하고 다음과 같이 지적한바 있다.

“즉 오염대수층의 정화목표가 음용수 수질기준에 부합되도록 정화코저한 대수층 복원계획은 예외 없이(모두) 실패하였다”고 솔직한바 있고, 지난 26년간 정화기술과 정화방법의 진척이 거의 없었기 때문에 20세기는 물론 21세기에도 인공정화의 성공을 기대하기 어려울 것이다.

실제로 음용수 기준은 일반적인 명목상의 기준으로서 성취 불가능한 정화목표이다. 따라서 매년 수십억불씩 사용하여 국민과 환경건강을 개선시킬 수 있다고 하는 말은 현재뿐만 아니라 추후에도 증명할 수 없을 것이다.

이와 같은 표면적으로 나타난 잘못된 여건을 개선하기 위해서는 현재 요구하고 있는 여러 가지 과학적이고, 법적인 가정을 전반적으로 재검토해 볼 필요가 있다.

현재와 같이 고비용, 저효율의 인공정화를 유도하고 있는 2가지의 제도적인 가시(thorn)가 있는데 그것은 바로

- 1) CERCLA의 연대보증(42 U.S.C 9601-9675)제도와
- 2) 안정음용수법에서 명시하고 있는 MCL로 규정하고 있는 정화목표치이다.

첫 번째 경우 때문에 발생되고 있는 문제점은 실제 소요될 정화비용중 최소 50% 정도가 정화와는 전혀 관련이 없는 법적인 경비(변호사 비용)로 지출되도록 CERCLA법이 이를 합법적으로 보장해 주고 있으며, 두 번째 경우는 연방, 주 및 지방단체가 수행하고 있는 대다수의 정화작업이 1개 오염부지당 평균 2,700만불이나 소요되는 특별기금활동(superfund action)과 동일하게 취급하고 있기 때문이다.

이와 같이 고비용의 정화방법을 적용토록 한 주된 과학적인 판단은 다음과 같은 애매모호한 가정에 근거를 두고 있다. 즉 토양과 지하수환경내로 유입된 유독성 오염물질은 이를 적절히 정화하지 않는 한 영구적으로 지하환경내에 잔존해 있다는 터무니없는 가설 때문이다.

실제로서 오염된 토양과 지하수환경으로 유입된 유독성 오염물질은 자연저감(natural attenuation)이라 불리는 자연적인 자체 정화작용에 의해 현재 적용하고 있는 공학적인 정화법 보다 훨씬 빠르고, 더 완벽하게 정화되고 있다.

EPA는 자연저감을 다음과 같이 정의하였다.

“자연저감이란 인간건강과 생태계를 보호할 수 있는 수준으로서 오염물질의 독성, 이동성 및 양(volume)을 효율적이며 자연적으로 감소시키는 생분해, 분산, 희석, 흡착, 휘발작용은 물론 생물 및 화학적인 안정화(stabilization)로 정의하였다.

자연저감에 의존한다는 것은 책임을 회피(do-nothing ducking of responsibility)하거나 그냥 쉽게 해법을 얻으려는 것이 아니다.

일반적으로 자연저감기작에 의한 정화는 장기간의 관측이 필요하며, 오염물질이 자연적으로 감소되어 국민건강과 환경이익을 확실하게 제공해주는 기작(mechanism)을 이용하는 방법이다.

현재 우리들이 사용하고 있는 인공정화기법(engineered remediation methodology)은 간단히 말해 오염물질을 한 곳에서 다른 곳으로 이동만 시키는 방법인데 반해 자연저감에 의한 정화는 실제로서 오염물질의 양과 독성을 저감시키는 자연적인 기작을 이용하는 방법이다.

인간과 환경건강에 미치는 잠재적인 위해를 기준으로 할 때

* (사)대한지하수환경학회(The Korean Society of Groundwater Environment, Seoul, Korea)

현재 적용하고 있는 공학적인 정화방법들은 대체적으로 그 효과가 별로 신통치 않으며, 비용이 많이 소요되는데도 불구하고 규제기관을 상술한 2가지 이유 때문에 이를 선호하고 있다.

많은 오염부지에서 경험한바와 같이 실제적인 위해와 자연저감기작을 하나의 정화방법으로 정착시키면 인공정화의 범위를 상당히 줄일 수 있을 것이다(Milloy, 1995). 환언하면 정화방법의 결정 과정에서 자연저감기작을 하나의 정화방법으로 명확히 포함시킬 수 있다면 CERCLA를 수정하지 않고서도 정화비용을 엄청나게 절감시킬 수 있다.

따라서 CERCLA가 규정하고 있는 정화활동(cleanup action), 법적 및 정치적인 영향력을 검토하고 오염도양과 지하수환경에서 독성을 자연저감(natural attenuation)시킬 수 있는 과학적인 증거들을 정리해 보기로 하자.

지난 30여년간 우리의 주변 환경으로 배출된 산업-부산물(industrial by-products)은 생태계가 이를 섭취할 때까지, 자연계 내에서 반영구적으로 독립적으로 거동하거나 잔존해서 인간의 생명을 단축시키고 불임을 일으킨다고만 믿어 왔다.

이러한 반영구적이며 설득력이 있는 독성론에 대한 가설들이 이들 독성물질을 별도로 완전히 분리하거나 처리할 수 있는 기술(예: EPA의 SITE 계획 등)이 가용하다는 생각과 뒤섞이어 실제 인간과 환경의 건강 보호와는 별로 연관성이 없으며, 성취 가능성이 거의 없고, 고비용의 규제법과 환경법을 만들 수 있는 동기를 부여했다. 이러한 맥락에서 RCRA나 CERCLA 법 제정 당시에 지하환경의 실체성 즉 지하환경의 무한한 자연저감능을 전혀 고려치 않았다는 사실을 지적하고자 한다. 이러한 초기가정들은 거의 모든 부분에서 잘못된 것이었다는 사실이 최근(1995~1999) 몇 년 사이에 알려지게 되었다. 즉 대다수의 오염물질은 지하환경내에서 이들이 인간건강에 악영향을 미치기 이전에 분해되거나 매우 잘 격리된다는 사실이다. 따라서 공학적으로 오염물질을 추출분리하는 현재의 정화방법은 빠른 공법도 아닐 뿐만 아니라 실패한 사례가 더욱 많다. 그릇된 가정을 근거로 해서 제정된 법들은 법적인 가정과 실제 사이에 상충되는 현상이 증대될 때마다 더 복잡해지게 마련이다.

이를 보상하기 위해서 입법자(국회의원)들은 실제 문제성에 부합하는 새로운 모델을 재 개발하기는 커녕 잘못된 법을 약간 수정만 해서 문제를 더욱 난해하고 복잡하게 만들곤 하는데 그 대표적인 예가 CERCLA와 그 수정법인 SARA이다. 그래서 1995년 제104차 미의회는 여러 가지의 CERCLA의 규정을 전반적으로 재검토하여 겨우 손질한 것이 다음 내용이다.

“지하수나 지하에 소재한 유해물질은 예견 가능한 장래에 문제를 일으킬 수 있는 유해 물질이기 때문에 반듯이 제거되어야 한다”는 것이다.

Rachel Carson의 Silent Spring이 발간되면서 모든 오염물질은 마치 시간을 기다리는 시한폭탄과 같다는 그릇된 전제가 대중화되기 시작했다.

이 책에서 저자는 2차대전이후부터 사용된 농약중 DDT는 거의 방해를 받지 않고 곤충과 이를 먹이사슬로 하는 조류들의 번식에 심각한 악영향을 주었으며 그 후에도 DDT를 계속 사용하여 맹금류 수에 심각한 제충격을 주었다고 애매모호한 기술을 한바 있다.

그러나 미국에서 맹금류(주로 먹이사슬이 곤충류와 가장 밀접한 관계를 가진 종)들은 DDT 사용을 금지하기 이전부터 심각한 사회적인 문제가 된바 있고, 실제로는 DDT 사용을 금지시킨 후에도 맹금류의 수는 급격하게 증가하였다.

그러나 Silent Spring은 DDT와 관련하여 다음과 같은 진실을 기술한 부분도 있다. 즉 DDT는 지난 반세기 동안 환경으로 유입된 대다수 화학물질에 비해 크게 지속되진 않았다는 사실이다.

Ames와 Gold(1991)은 Silent Spring의 기술내용중에서 “지구역사상 처음으로 현재 인류는 태반에서 임신되는 순간부터 사망할 때까지 위험한 화학물질에 노출되어 있다”는 기술내용에 대해 다음과 같은 반증을 제시하여 Silent Spring의 내용이 과장되었음을 지적하였다.

실제로 인간들은 우주에서 오는 자연방사능과 같은 자연적으로 발생하는 발암성 물질의 범람속에서도 이에 적응하면서 꾸준히 진화를 계속해 왔다. 뿐만 아니라 식물들도 곰팡이, 세균이나 기타 약탈자로부터 자신을 보호하기 위해 일종의 자연 농약을 자체적으로 만들어 왔기 때문에(Ames와 Gold 1991) 결국 자연적으로 생성되는 전체 발암물질의 양은 도리어 산업용으로 합성되는 양을 감소시키는 역할을 해왔다고 반박하였다.

건강위해를 과학적인 수치로 정량화하기 위해서는 새로운 화학물질이 인간 건강에 미치는 영향을 이들 물질의 배경독성 및 규모에 따라 과학적으로 측정하고 규명한 후 제시되어야지 막연하게 독성물질은 무조건 반영구적으로 인간과 환경에 지속적으로 악영향을 미친다고 호도해서는 안될 것이다. 현 지구환경을 발암성 물질이 전혀 존재하지 않는 상상적인 에텐동산으로 생각해서는 안된다.

현재뿐만 아니라 지구가 생성된 이래부터 지구환경을 발암성 물질이 전혀 존재하지 않는 에텐동산은 결코 아니었음을 명심할 필요가 있다.

따라서 진정한 해를 얻으려면 진정한 문제가 무엇인가를 규명하고 확인해야만 한다. DDT는 독성물질이고, 또한 고등동물에게 악영향을 준다고 해서 모든 오염물질이 DDT와 같다는 생각은 잘못된 사고방식이다.

실제로 대다수의 오염물질은 토양이나 지하로 유입되면 즉시 또는 서서히 소멸되기 시작한다. 일반적으로 유해물질은 전자(electron)를 가진 유기탄소의 골격구조를 가지고 있기 때문에 이러한 물질을 분해시킬 수 있는 유기체(생물)가 지구역사 초기부터 지구상에서 진화해 왔고, 이들 유기체(생명체)들은 인간이 공업용이나 농업용으로 유기물질을 합성해서 유독성 물질로 사용하기 이전부터 이들을 분해시켜 왔다.

즉 방사능 물질은 자체적으로 붕괴되고, 중금속은 토양광물에 흡착되거나 침전되어 비용해성 결정으로 광화한다. 또한 유독성 오염물질이 지하 매체와 반응하거나 흡착되면 수용성 상태에서 이동 가능성은 제한되어 생태계에 미치는 영향을 감소된다. 이와 같이 거동 능력이 제한되면 이에 따른 노출 위험도 감소되기 마련이다. 예를 들면 Chernobyl 원전에서 누출된 방사능 동위원소중 ¹³⁷Cs는 토양광물 표면에 흡착되어 자연상태로 존재할 때보다 더 빨리 붕괴되었다고 한다. 이와 같은 이유로 세슘에 관련된 건강위해는 보다 극소화되었다. 많은 종류

의 증속속과 유기독성물질은 환경적인 시간 규모에서 볼 때 일단 지하매체에 흡착되면 다시 탈착되지 않으며(상온, 상압하) 생분해가 되거나 희석되어 규제농도 이하로 감소된다.

이러한 현상도 여러 가지의 요인으로 발생한다. 광물표면에 다소 느슨히 결합된 오염물질들은 처음에 가끔 광물표면의 미세한 사공극(dead end porosity)으로 확산하여 점차적으로 광물표면에 단단히 결합된다. 그러면 새로운 광물상이 이들 위에 성장하여 흡착된 오염물질을 주변환경과 차단시킨다.

표면차단은 미생물에 의한 생분해로부터 유기독성 물질을 보호하는 역할을 하기도 하나 더욱 중요한 것은 이들 오염물질이 생태계에 노출되지 않는다는 것이다.

이와 같은 표면차단은 환경독성의 전체적인 감소를 의미하며 초기오염물질의 독성을 50%이상 감소시킨다.

따라서 토양내에 존재하는 모든 오염물질은 시한폭탄(waiting time bomb)이라는 사고는 그릇된 생각이다. 방사능 동위원소나 대다수의 유독성 유기오염물질은 그 농도에 비례해서 분해되며, 그 상대적인 지속성은 반감기로 표현한다. 오염 물질은 그 특성(토양화학과 생물학적)에 따라서 반감기가 모두 다르다.

클로로포름이나 Pentachlorophenol 같은 발암성 유기오염 물질은 토양내에 서식하는 토착미생물에 의해 빠르게 생분해되어 독성이 적은 부산물로 바뀐다. 이들의 반감기는 6개월 이내이다. 생분해에 의한 저감율과 방사능 붕괴율은 오염물질이 농도가 저농도일 때는 다를 수도 있다.

DDT의 생분해 저감율은 거의 20년이기 때문에 산업용 화학물질은 빠른 시일내에 저감되지 않는다. 예를 들면 장수명 방사능 핵종의 반감기는 수천-수백 만년이 되는 것도 있다.

CERCLA의 목적은 인간과 환경의 건강에 악영향을 주는 위해를 최소화하기 위해서라고 명시되어 있다. 일반적으로 특별기금법의 저축을 받는 오염토양과 지하수를 정화하는데 소요되는 기간은 2년이다. 그런데 현재 실행 단계까지 가는데 필요한 제반행정 절차가 평균 10년이 소요된다고 한다. 예를 들어 1개 발암물질이 토양내에서 생분해에 의해 저감되는 율, 즉 반감기를 1년이라고 할 때 확인에서부터 실행단계에까지 소요되는 시간이 10년이 걸린다는 사실은 적어도 10배의 반감기가 지났다는 뜻이며, 이는 오염물질의 농도가 초기농도에 비해 1,000분 1로 감소했다는 뜻과 같다.

이는 특별기금법의 법적인 절차를 밟는 기간동안, 즉 현장에서 인공 정화를 전혀 실시하지 않는(doing nothing but superfund paperwork) 기간동안, 다시 말하면 10년 동안 소송을 하거나 이로 인해 기다리는 시간동안에 오염물질의 독성은 자연기작에 의해 1/1,000로 감소한다. 이는 매우 고무적인 자연현상이라고 하지 않을 수 없다.

이 정도의 감소율이라면 오염물질의 농도를 음용수 수질기준 이하로 저감시킬 수 있을 뿐만 아니라 동시에 이 정도의 저감은 채수처리와 같은 고비용의 공학적인 정화방법을 적용해서 도달할 수 있는 저감량 보다 훨씬 좋은 방법일 수도 있다.

그러나 지하환경이 오염물질의 농도를 이와 유사하게 감소시키는 기작들도 있고 때로는 아닐 수도 있다. 어떠한 것이 이와 같은 작용을 하며 또한 이와 같은 작용을 하지 않는지를 알아내기 위해서는 지하환경에서 오염물질을 저감시키는 기작원

인이 무엇인지를 알아야만 한다.

이러한 기작원인은 오염물질의 물리, 화학적 및 생물학적인 특성과 이들 특성이 서로 결합된 매우 복잡한 기작에 따라 좌우된다. 이 분야는 현재 계속 연구되고 있지만 가장 중요한 1차수(order) 정도의 오염물질 저감은 이미 잘 알려진 사실이며, 예측이 가능하다(Dragun, 1988). 따라서 오염물질의 거동에 따른 영향은 충분히 평가할 수 있다. 여러 가지의 저감 경로를 세부적으로 파악하지 않고서는 오염부지 정화에 대한 방법의 신뢰성은 제고시킬 수 없다.

수치적인 목표치와 지침이 없이 결정된 생태학적인 위해성을 평가하는데 있어서 자연저감의 정량화는 더 비판적이 될 수도 있다.

오염물질의 자연저감능은 기존의 복잡한 지하환경내에서 자체 정화능과 지하환경을 거의 원상태로 회복을 시키는 기작이라는 사실은 간단한 리트머스 시험처럼 확실하다. 따라서 자연저감에 대한 수치적인 분석평가를 실시해서 오염물질에 노출된 특정 생태계의 위해성을 근사적으로 계산해야 한다.

현재 구미 선진국에서 실시하고 있는 오염토양과 지하수의 정화는 지하에서 오염물질의 농도를 감소시키는, 궁극적으로 인간에게 미치는 위해를 감소시키기 위해 수행되고 있다. 그러나 실제적으로 경비가 많이 소요되는 공학적인 해법만을 계속 고집하려는 경향이 있다. 현재와 같이 무조건적으로 적용하고 있는 공학적인 해법보다 분명히 저렴하고 효율적인 방법은 지하환경이 오염물질을 저감시킬 수 없는 오염물질만을 골라서 공학적인 정화법을 이용해서 이를 정화하고, 자연저감이 되는 오염물질은 지구화학적인 자연저감에 맡기도록 하는 방법이다.

현재까지 미국에서 실시한 오염토양과 지하수의 정화사례를 살펴보면 불행하게도 기존의 공학적인 정화기술로는 요구하는 정화수준에 도달할 수 있다는 확신을 가질 수가 없다는 것이 공통적인 생각이다. 인공 정화는 매우 비쌀 뿐만 아니라 가끔 최종적인 성공 여부를 확신할 수 없기 때문에 이제부터라도 정화 목표를 현명하게 설정해야 한다는 비판을 받아오고 있는 것이 현실이다. 오염부지를 얼마나 깨끗히 정화해야 하느냐(how clean is clean)라는 질문은 오염물질의 농도가 zero 기준(zero contaminant level)이어야 한다는 뜻이 아니라 오염물질의 지하거동 요인이나 인간건강에 미치는 위해성에 근거해서 이를 결정해야 한다.

지구상의 모든 생명체는 독성이 없는(toxin-free) 지구상에서 진화한 것이 아니다. 막연한 상상력으로 설정한 규제 목표나 정화 노력은 원시적(경험이 없는)이거나 대단히 비싼 대가를 요구한다. 따라서 정화 작업은 최종적으로 인간이나 환경건강에 명백하고 실제적으로 공헌할 수 있는 것을 목표치까지 수행해야 한다.

인공적인 정화 노력은 고가이고, 또한 정화 자체가 건강위해를 가끔 유발시킬 수 있기 때문에 실제 건강이익을 증명할 수 없는 경우에는 수행하지 말아야 한다. 따라서 환경적으로 수용 가능한 결과는 과학적인 기초에 의해 결정되어야만 한다. 미국의 각종 유해물질의 규제지침 내용과 이들 규제 내용이 정화 전략과 비용에 어떻게 영향을 주고 있는지? 자연저감의 기초 이론과 화학반응에 영향을 주는 물리, 지구화학 및 생물학적인

제어기작은 무엇인지를 알아보고, 또한 자연저감 기작에 의해 오염물질이 현저히 저감된 연구사례와 자연저감 방법의 적용성에 대해 구미 선진국에서 고려하고 있는 현재와 미래의 전망과 미국 각 주정부에서 시행하고 있는 자연저감을 이용한 정화방법에 대해서 알아 볼 필요가 있다.

현재까지 우리보다 수십년 앞서 국민건강과 환경을 보호하기 위하여라는 명제하에서 막대한 예산을 투자하고서도 문제 해결의 실마리를 제대로 풀지 못하고 있는 미국의 예를 중점적으로 검토하여 그 문제성을 파악하므로서 우리가 현재 시행하고 있는 국내 토양과 지하수환경 정책을 다시 한번 되돌아보는 기회가 되었으면 한다.

지금까지 알려진 가장 경제적이고 효율적인 정화방법의 일종으로서 널리 인식되고 있는 자연저감 기작의 구체적인 내용

과 사례는 물론, 오염지하수와 토양정화를 위해성에 기초하여 정화목표치를 설정하는 방법 등에 관해 지면이 허락하는데로 계속 연재할 예정이다.

참고문헌

Milloy, S. J, 1995, Science-based Risk Assessment. National Environmental Policy Institute, Washington, D.C.
Freeze, R. A and Cherry, J. A., 1989, Guest editorial, "What has gone wrong", Groundwater 27, p. 458-464.
Ames, B. N and Gold, L. S., 1991, Cancer prevention strategies greatly exaggerate Risks, Chem. Eng. News Jan. 7.
Dragun, J, 1988, The Soil Chemistry of Hazardous Materials, Hazardous Materials Control Research Institute, Silver Spring, MD.