

오염토양의 환경친화적 복구방안

- 위해성에 근거한 복원전략 -

남 경 필 (서울대학교 지구환경시스템공학부)
 박 재 우 (한양대학교 토목공학과)
 안 익 성 (연세대학교 화학공학과)
 황 인 성 ((주) En3)

최 상 일 (광운대학교 환경공학과)
 배 범 한 (경원대학교 토목공학과)
 고 석 오 (경희대학교 토목공학과)

요 약 문

오염토양을 관리하는데 있어 현재 가장 중요하게 인식되는 부분은 오염물질이 정화되었다는 판정을 '어떤 기준으로 내리는 것이 합리적인가?' 하는 것이다. 오염된 토양을 '어느 정도의 수준으로 복구를 하여야 하는가?' 에 대한 의문이 학계와 산업계를 중심으로 꾸준히 제기되어 왔으며 미국의 경우, 환경청(Environmental Protection Agency) 등을 중심으로 그러한 물음에 대한 해답을 찾기 위한 본격적인 연구 및 조사활동이 활발히 진행되고 있다.

지금까지는 오염물질의 토양잔류농도와 획일화된 규제기준을 비교하여 오염여부를 판단한 후 복구여부 및 수준이 결정되어 왔는데 이러한 방법에 문제점이 있으며 현실적이지 못하다는 과학적 증거들이 발견, 축적되면서 이에 대한 대안이 모색되기 시작하였고 그 중의 하나가 '위해성에 근거한 복원전략(risk-based remediation strategy, RBRs)' 이라고 할 수 있다. RBRs는 오염토양의 정화기준을 결정하는데 있어 기존의 화학적 방법(즉, 토양잔류농도)뿐만 아니라 생물학적, 독성학적 방법도 같이 사용함으로써 오염물질의 실질적인 이용성에 따른 생독성을 평가하는

방법이다. RBRs의 가장 큰 장점은 오염물질의 종류 뿐만 아니라 오염지역의 특수성(예; 토지이용용도, 토양 및 지하수 특성, 수용체 집단의 특성 등)을 고려하여 오염물질의 위해성(risk) 여부를 판단하며 그 결과에 의거하여 오염지역의 정화 실시 여부 및 수준을 결정한다는 것이다. 따라서 RBRs에 의한 정화 및 복구사업은 과학적, 합리적, 경제적인 바탕 위에서 시행된다고 볼 수 있다. 이러한 장점들을 이유로 우리나라에서도 향후 오염지역의 정화에 RBRs와 같은 개념이 이용될 것으로 예상되며 학계를 중심으로 이에 대한 인식과 이해의 폭을 넓혀 나가야 할 것이다.

1. 서 론

토양은 일단 오염이 발생되면 그 처리가 용이하지 않으며 대기, 지하수, 지표수 오염의 근원이 되고 나아가 인간을 비롯한 생명체의 주된 생활 터전이라는 점에서 그 오염이 미치는 보건, 생태학적 영향은 지대하다고 할 수 있다. 오염토양의 관리에 있어 가장 중요한 첫 번째 목표는 오염지역을 복원(remediation)하여 종결하는 것이다. 이러한 목표를 달성하기 위하

* Corresponding author: Tel) 02-880-1448, Fax) 02-889-0032, E-mail) kpnam@snu.ac.kr

여 여러 가지 물리, 화학, (미)생물학적 방법들이 공학적 응용을 통하여 오염현장에 적용되고 있으며 그 처리기술은 지난 20여 년 간 많은 발전을 이루어 왔다. 그러나 복원기술 발전에 따른 처리효율의 향상에도 불구하고 '오염토양의 적절한 복원수준(acceptable remediation level)' 과 '깨끗한 토양(how clean is clean?)' 에 관한 결정은 항상 논란의 대상이 되어 온 것 또한 부인할 수 없는 사실이다. 오염된 토양을 오염이 일어나기 전과 같은 토양(pristine soil)으로 회복(restoration)시키는 것이 가장 이상적인 경우이겠지만 그에 소요되는 시간과 막대한 사회, 경제적 비용을 고려해 볼 때 이는 합리적인 방법이 아니므로 현재 모든 국가에서는 동물실험을 통하여 얻은 독성값을 바탕으로 설정한 규제수준을 기준으로 오염토양의 복원(remediation)을 실시하고 있다. 그러나 다음과 같은 과학적인 근거를 바탕으로 위와 같이 결정된 규제수준의 합리성에 대한 의문이 꾸준히 제기되어 왔다 (Linz and Nakles, 1996). 첫째, 기존의 규제수준을 결정하는데 사용된 독성값은 오염물질이 순수한 물에 용해되어 있는 상태에서 산정된 값이므로 수환경에서는 어느 정도 적합하지만(예를 들어, 지하수나 지표수에 오염된 물질의 독성을 결정하는 것) 다양한 구성성분과 특성을 가진 토양이라는 매질에서의 실질적인 독성을 반영하지는 못한다는 것이다. 둘째, 기존의 규제수준은 오염되어 토양에 존재하는 물질이 수용체(인간)에 의해 모두 이용, 흡수되어 그 독성을 발현한다는 것(즉, 이용성 100%)을 전제로 산정되었다고 볼 수 있는데 이 역시 토양유기물과 토양의 불균질성 등을 고려할 때 현실성이 부족한 가정이다. 셋째, 기존의 규제는 가능한 모든 노출경로를 통하여 오염물질이 수용체로 전달되는 경우를 가정하고 있는데 오염현장의 특수성(예; 오염토지의 이용용도, 토양의 종류, 수용체의 특성, 오염물질의 종류, 오염의 형태)에 따라서 노출경로는 가변적이므로 비현실적 요소를 포함하고 있다.

가장 이상적인 오염토양의 관리는 위에 언급한 세 가지 요소들을 모두 반영하여 오염물질이 수용체에 미치는 실질적인 위해성을 바탕으로 오염지역을 복원

(remediation)하는 것이지만 현재 가능한 과학적 방법과 시간, 경제적 비용 등을 고려할 때 이 또한 현실적이지 못하다. 이러한 이유로 미국, 유럽 등의 선진국에서는 위 요소들을 최대한 반영하는 방향으로 오염토양을 관리, 복원하고 있는데 이를 위해성에 근거한 복원전략 (risk-based remediation strategy, RBRS)이라고 할 수 있다. 위해성에 근거한 복원전략은 오염지역을 효율적으로 관리하는 하나의 방법으로서, 현재 주어진 상황하에서 오염현장의 특수성(예; 수용체의 특성, 토지이용용도, 오염토양의 성질 등)을 최대한 반영하여 오염물질의 노출경로별 위해성을 산정한 후 이를 바탕으로 그 지역의 노출경로별 목표정화수준(target cleanup level, TCL)을 결정하는 것을 근간으로 한다.

2. 위해성에 근거한 복원전략

오염물질에 노출된 토양은 오염의 복합성, 물리, 화학적 특성, 그리고 오염물질이 발현하는 위해성 등에서 아주 다양한 형태를 나타내게 되는데 위해성에 근거한 복원방법은 이러한 문제를 위해성평가(risk assessment)라는 과정을 통하여 오염지역의 위해성이나 또는 오염원을 효율적으로 관리하기 위한 의사결정과정 중의 일부라고 할 수 있다. RBCA는 특별한 오염물질, 특수한 오염지역에 국한되는 것이 아니라 일반적인 방법론이며 RBCA를 수행하는 과정에 필요한 오염물질의 독성학적, 물리, 화학적 자료와 오염현장의 수리, 지질학적 자료들을 적절히 변화시킴으로써 효율적인 위해성의 관리(risk management) 또는 오염지역의 정화, 복구라는 목적을 달성할 수 있다.

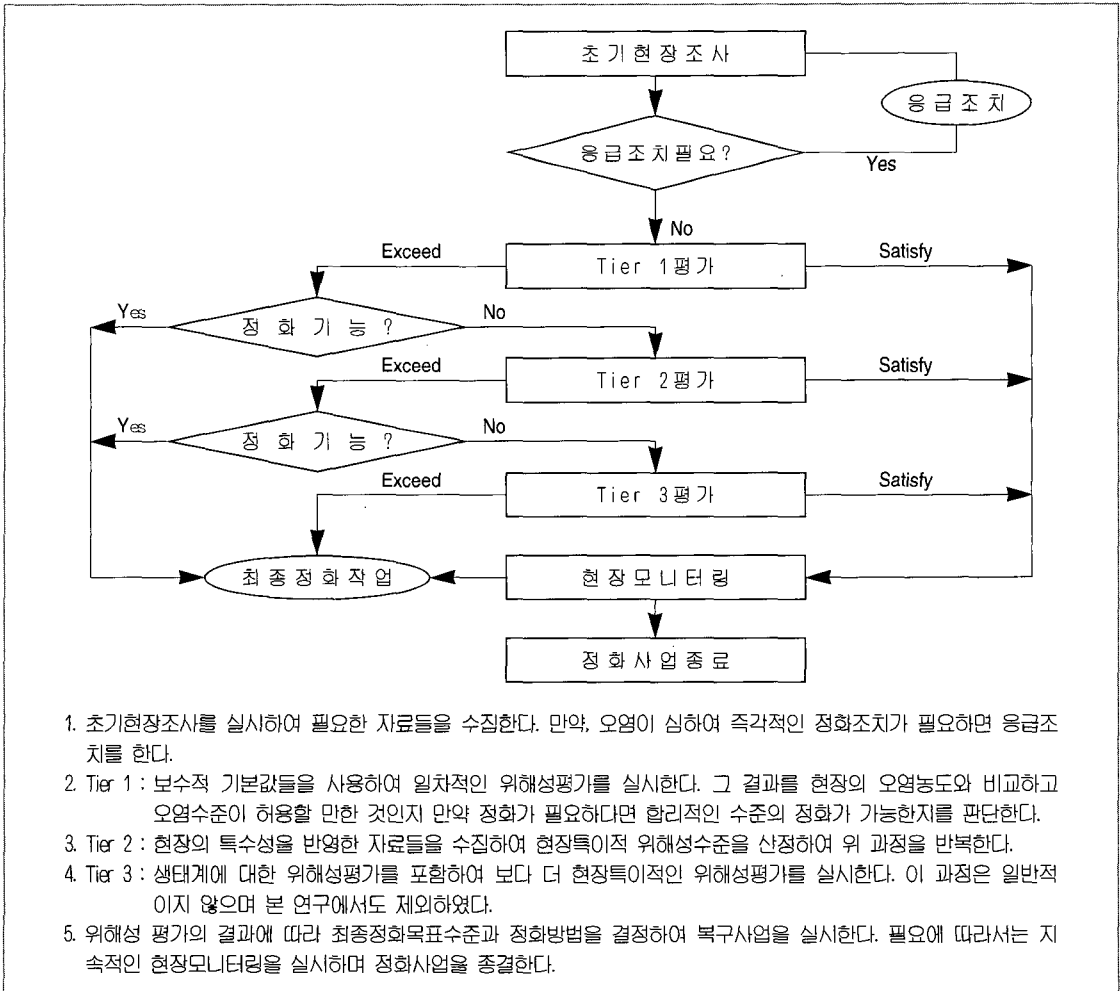
위해성에 근거한 오염토양의 복원은 토양에 존재하는 독성물질이 인간이나 생태계와 같은 수용체(receptor)로 전이되어 발현되는 독성을 감소시키는 것을 목적으로 한다. 따라서 이 과정에서는 토양에 오염된 물질의 절대농도뿐만 아니라 토지이용용도(예; 주거지, 산업/상업용지 등), 노출경로와 기간, 수

용체의 특성 (예; 나이, 체중, 흡입량, 피부면적 등), 그리고 오염이 발생한 토양과 지하수 층의 물리, 화학적 특성 등을 고려해서 산정한 오염토양의 위해성이 중요한 요소가 된다. 예를 들어, 토지이용용도를 고려할 때 오염물질의 인간으로의 전이는 주거지는 24시간 노출을, 산업/상업용지는 8시간 노출을 가정하여 위해성을 산출하는 것이다.

어떤 오염물질이 위해성을 발현하려면 다음의 요소가 충족되어야 한다. 첫째, 그 물질의 토양농도가 안전한 노출허용수준을 초과하여야 하며, 둘째, 오염물질이 수용체로 전달될 수 있는 완전한 노출경로가

있어야 하고, 셋째, 전달된 오염물질과 접촉하는 수용체가 존재하여야만 한다. 이러한 관점에서 본다면 토양에 존재하는 오염물질의 절대농도보다는 노출경로 및 기간이 위해성에 더 큰 영향을 미치는 요소이며 따라서 적절한 처리를 통한 노출경로의 차단 또는 노출의 감소는 위해성을 감소시키는데 중요한 역할을 하는 것임을 알 수 있다.

체계적인 RBCA의 수행을 위하여 필요한 사항들과 중요 결정과정들은 [그림 1]에 간단히 나타난 바와 같으며 RBCA의 수행 순서 및 내용은 아래에 기술한 바와 같다.



1. 초기현장조사를 실시하여 필요한 자료들을 수집한다. 만약, 오염이 심하여 즉각적인 정화조치가 필요하면 응급조치를 한다.
2. Tier 1 : 보수적 기본값들을 사용하여 일차적인 위해성평가를 실시한다. 그 결과를 현장의 오염농도와 비교하고 오염수준이 허용할 만한 것인지 만약 정화가 필요하다면 합리적인 수준의 정화가 가능한지를 판단한다.
3. Tier 2 : 현장의 특수성을 반영한 자료들을 수집하여 현장특이적 위해성수준을 산정하여 위 과정을 반복한다.
4. Tier 3 : 생태계에 대한 위해성평가를 포함하여 보다 더 현장특이적인 위해성평가를 실시한다. 이 과정은 일반적이지 않으며 본 연구에서도 제외하였다.
5. 위해성 평가의 결과에 따라 최종정화목표수준과 정화방법을 결정하여 복구사업을 실시한다. 필요에 따라서는 지속적인 현장모니터링을 실시하며 정화사업을 종결한다.

[그림 1] 기본적인 RBCA 진행과정의 흐름도(modified from Atlantic PIRI, 1999)

2.1 현장 자료의 수집(Site Assessment)

위해성에 근거한 복원 전략(risk-based remediation strategy)은 오염현장의 물리, 화학적 자료를 수집하는 것으로부터 시작된다. 여기에는 토양, 토양가스, 지하수에 존재하는 오염물질의 농도, 시료채취 위치, 과거 오염여부, 토지이용용도 등을 알 수 있는 현장지도 등이 포함된다. 시료의 분석은 공인된 방법을 이용하여야 하며 그 검출한계를 명시하여야 한다. 오염물질의 이동경로나 노출경로, 잠재적인 수용체 등에 관한 현장 자료의

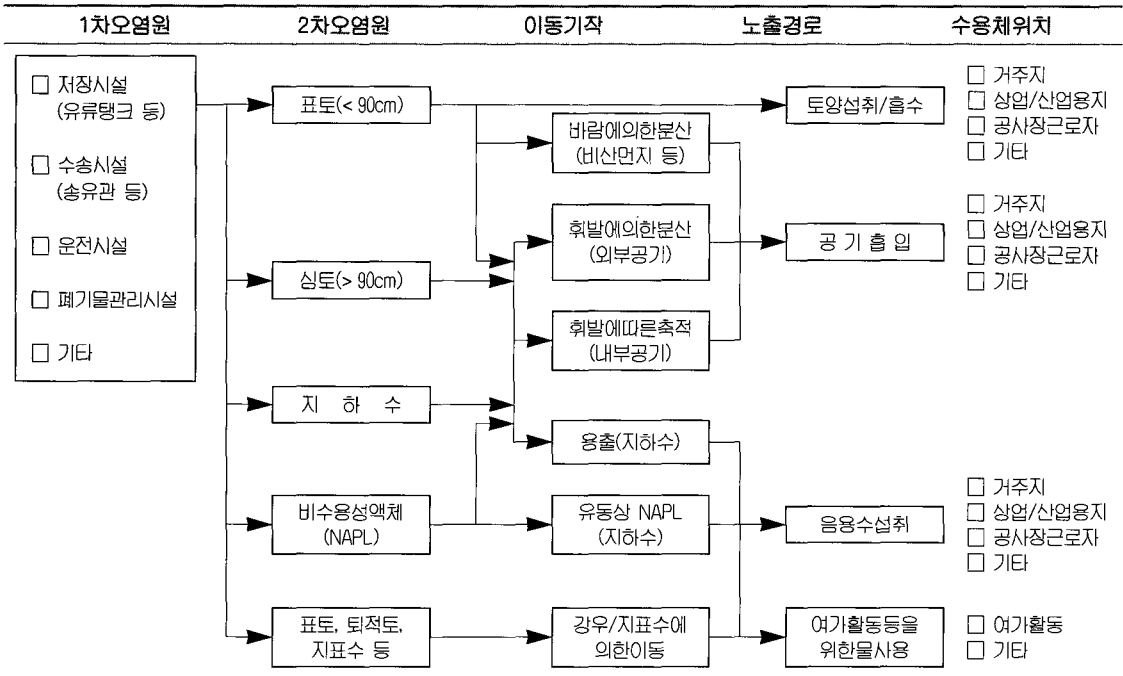
수집 및 평가는 현장의 구체화된 모델(conceptual site model)을 구축하는데 필수적인 요건이다. 일반적으로 다음 [표 1]의 요소들에 대한 조사가 이루어져야 한다.

2.2 구체화된 현장모델(Conceptual Site Model) 확립

현장조사를 바탕으로 오염원, 오염매질, 오염물질의 이동경로(migration pathway) 및 노출경로와 위치, 잠재적인 수용체 등에 관해 구체적으로 열거를

[표 1] 현장조사에서 수집할 자료의 예

- 현행 법적 규제 수준
- 현재 및 미래의 토지이용용도
- 각 매질별 오염물질의 최대농도(예: 토양, 공기, 토양가스, 지표수, 지하수 등)
- 노출지점에서의 오염물질 농도(예: 근처 우물이나 지표수의 오염농도 등)
- 수용체(예: 인간, 생태)로의 예상 가능한 잠재적 노출경로
- 오염물질의 이동(transport) 및 거동(fate)에 관한 정보
- 지하수와 지표수의 이용 실태 및 가능성
- 현장의 수리, 지질학적 특성(예: 지하수 층 깊이, 지하수 흐름 방향 및 유속, 지하수 수질, 수리전도도, 대수층 두께 등)
- 과거의 오염 여부
- 오염물질의 종류, 오염원 위치



[그림 2] 노출경로를 중심으로 제작한 구체화된 현장모델의 예(modified from ASTM, 1995)

하고 이들 사이의 상관관계를 표나 그림으로 나타낸 것을 구체화된 현장모델(conceptual site model; CSM)이라 한다.

[그림 2]는 노출경로를 중심으로 작성한 CSM의 전형적인 예를 보여주고 있다. 위해성의 감소나 제거는 CSM에 나타난 각 요소들을 제한하거나 제거함으로써 달성될 수 있다. 위해성에 근거한 복원의 목표는 오염원이나 노출경로의 감소/제거, 수용체의 접근 제한 등을 통하여 가장 효율적으로, 즉 경제적인 비용으로 만족할만한 위해성 수준을 달성하기 위하여 위해성의 원인을 감소/제거시키는 것이며 이는 정확한 CMS를 제작하여 적절한 관리를 함으로써 달성될 수 있다. 적절하고 완전한 CSM을 작성하기 위해서는 현장 방문이 필수적이며 CSM은 노출경로와 수용체, 현재와 미래의 토지이용용도를 고려한 후 모든 가능한 경우를 예상하여 보수적으로 작성하여야 한다.

2.3 위해성에 근거한 정화수준의 결정

위에서 작성한 CSM을 바탕으로 위해성에 근거한 정화를 위한 오염지역의 평가를 실시한다. RBCA는 현장의 특수성과 실질적인 위해성을 고려하여 오염된 토양, 지하수의 정화수준을 결정하기 위하여 계층화된 방법(tiered approach)을 이용하는 접근법이며(ASM, 2000) 이와 유사한 방법들이 US EPA(1996b), US AFCEE(1998) 등에서도 이용되고 있다.

이 계층화된 접근법은 지나치게 보수적인 독성 자료나 노출에 관한 전제조건(예; 현장의 물리, 화학적 특성, 토지이용용도 등)들을 현장에 맞는 수치들로 바꾸어 위해성평가를 실시하는 것으로서 보다 유연한 접근법이라 할 수 있다. 하지만, 이 경우의 전제조건은 현장자료의 객관성 및 공정성이며 RBCA를 따르더라도 목표로 하는 위해성(target risk)을 여전히 만족시켜야 한다는 것이다. 계층화된 접근법은 일반적으로 Tier 1과 Tier 2 평가과정으로 이루어진다. Tier 2의 결과, 기존의 정화방법으로는 적절한 시간 내에 현장의 목표위해성수준(site-specific target level: SSTL)을 달성하지 못하거나 너무 많은 비용

이 요구된다고 판단된다면 보다 심도 있는 현장 조사 및 자료 확보를 요구하는 Tier 3(advanced site-specific evaluation) 과정을 실시할 수도 있으나 일반적으로는 특히, 우리나라의 현실에 비추어 보면 Tier 3 과정은 거의 필요하지 않다고 할 수 있다.

2.4 보수적인 위해성평가

(Screening-Level Evaluation; Tier 1 Evaluation)

RBCA는 오염물질의 Tier 1 평가로부터 시작된다. Tier 1에 의해 산출된 위해성에 근거한 허용오염수준(risk-based screening level; RBSL)은 토양, 지하수에 존재하는 오염물질이 수용체(인간)에 심각한 위해성을 미치지 않는 수준의 농도임과 동시에 아주 일반적이고 보수적인 일차적 목표정화수준이라고 할 수 있다. RBSL은 오염물질의 독성자료와 합리적인 최대 한의 노출(reasonable maximum exposure; RME), 토양 특성 및 환경 조건들에 대한 평균값 등을 이용하여 산출할 수 있으며 따라서 RBSL은 실제 토양에 존재하는 오염물질의 농도와는 무관하게 계산할 수 있다. 이는 Tier 1 평가는 오염물질에 실제로 노출이 일어나는 지점을 고려하지 않고 오염물질의 수용체로의 노출이 항상 오염지역 근처에서만 일어나는 '가장 나쁜 경우(worst-case-scenario)'를 가정한 경우를 의미한다. 현재 가장 많이 사용되고 인정을 받는 독성자료에 관한 데이터 베이스는 US EPA의 Integrated Risk Information System(IRIS; 매월 개정, 보완됨)이며 이 이외에도 Health Effects Assessment Summary Tables(HEAST; US EPA, 1992) 등이 있으나 HEAST의 자료를 이용할 때에는 다른 연구결과들을 참조하는 등의 주의가 필요하다.

2.5 Tier 1 RBSL과 현장농도 비교

각 오염물질별로 적용 가능한 RBSL이 결정이 되면 그 농도와 현장에서 채취한 시료에서 추출된 오염물질의 농도를 비교하여 위해성 여부를 판단한다. 따라서 Tier 1 RBSL은 오염 토양의 일차적인 정화목표

치(primary remediation goal; PRG)라고 할 수 있다. 이론적으로는 노출이 발생하는 지점의 농도(exposure point concentration)와 비교를 하여야 하겠지만 일반적으로는 현장의 최고농도와 비교하는 것을 Tier 1 평가에서는 권장한다. 현장시료의 채취 및 분석방법은 Tier 1 평가 결과에 큰 영향을 미치는 요소로 작용하므로 반드시 공인된 방법을 이용하여 현장의 오염상황을 대표하는 객관성 있는 조사가 이루어져야 할 것이다. US EPA(1996a)에서는 Max Test나 Chen Test 등의 방법을 통하여 대표성과 재현성 있는 오염현장 시료를 확보하고 있다.

2.6 현장 특수성을 반영한 위해성평가 (Site-Specific Evaluation; Tier 2 Evaluation)

Tier 1 평가 결과, 오염물질의 농도가 RBSL을 초과할 경우에 일반적인 방법으로 정확도가 가능하다면 Tier 1 RBSL 이하로 오염물질의 농도를 감소시키는 정화조치를 취하여야 한다. 만일, 그러한 경우가 아니라면 현장 특이적인 자료의 수집을 요구하는 Tier 2 평가를 실시한다. 하지만, 오염토양의 정화방법에 일반적으로 Tier 2 평가를 위하여 추가적으로 필요한 자료는 Tier 1과 비교하여 볼 때 크게 증가하지 않으므로 Tier 2 평가를 실시하는 편이 오염원 처리자의 입장에서는 유리한 선택일 수 있다. 또한, Tier 1 평가가 보수적인 자료와 가정들을 근거로 행해지는 관계로 수용체에 대한 실질적인 위해성(realistic risk)의 측면에서 본다면 Tier 1 RBSL은 위해성을 과도하게 평가하는 측면이 없지 않으며 Tier 2 평가 결과는 대부분의 경우 Tier 1 결과보다는 더 완화된 수준이 된다. 이는 곧 Tier 1 RBSL에만 의존한다면 오염지역에 대한 과도한 정화 처리의 가능성을 의미하며 따라서 비경제적인 정화, 복구사업이 초래될 가능성을 내포하고 있다. 이러한 이유로 US EPA, ASTM, US AFCEE 등에서는 현장의 상황을 보다 정확히 반영하는 자료들을 이용한 Tier 2(경우에 따라서는 Tier 3) 평가에 의한 정화, 복구결정을 허용하고 있다.

Tier 2 평가의 목표는 오염현장의 특수성을 반영하

는 노출경로나 물리, 화학적 변수들을 이용하여 현장 특이적 목표수준을 산출하는데 있으며 전체적인 평가 과정은 Tier 1과 유사하다. Tier 2 평가에 의한 오염 허용수준을 SSTL(site-specific target level)이라고 하는데 일반적으로 Tier 1보다는 조금 높은 수준을 보인다. 이는 곧 높은 농도의 오염이 허용되는 것을 의미하지만, 기본적으로 충족되어야 할 것은 Tier 1 수준의 목표위해성(target risk)을 유지해야만 한다는 것이다. 즉, Tier 1과 Tier 2 평가에 의해 산출된 RBSL과 SSTL은 서로 다른 수치이지만 각각에 의한 목표위해성은 비슷하거나 같아야만 한다. 이것이 가능한 이유는 Tier 1에서 사용된 보수적이고 엄격한 전제조건과 가정들을 Tier 2 평가에서는 현장 상황에 보다 근접한 자료들로 대체함으로써 불필요한 노출경로의 제거나 수용체로의 노출빈도 감소와 같은 실질적으로 위해성을 감소시키는 요소들을 반영하기 때문이다.

2.7 잠정적인 정화 조치 (Interim Remedial Action)

오염된 현장의 특성상 완전한 정화, 복구조치가 기술적인 문제와 같은 현실적 이유로 거의 불가능하다고 판단되는 경우나 현재의 오염농도, 노출경로 등을 고려해 볼 때 그 위해성이 심각하여 즉각적인 저감조치가 필요하다고 판단되는 등의 경우에는 앞서 기술한 단계적 접근법에 의한 위해성평가를 실시하기 전에 잠정적인 정화조치를 하는 것이 더 효율적일 수도 있다. 이러한 잠정적인 정화조치는 Tier 1 평가가 끝난 후에도 적용될 수 있는데 주로 최대오염농도를 보이는 지역에 대한 처리를 하는 것으로 오염원의 제거, 오염원으로부터의 이동 및 확산방지, 주된 노출경로 차단, 오염현장의 이용 제한 등의 방법을 생각할 수 있다.

2.8 현장 모니터링 및 관리

단계적 접근법에 의한 오염토양의 위해성평가 결과에 따라 정화, 복구조치가 취해진 경우 대부분의 현장은 주기적인 모니터링을 통하여 정화에 사용된

방법이 토양의 오염원 처리에 효율적이었는지, 정화된 토양의 상태(예; 오염물질의 잔류농도, 지하수로의 이동 등)가 시간이 지나면서 개선되고 있는지를 평가하여야 한다. 이 과정을 통하여 Tier 1, Tier 2 평가에 사용된 수학적 모델이나 가정들이 합리적이었는지를 판단할 수 있으며 그 결과에 따라 적절한 조치(예; 정화사업종결, 재평가 등)를 취하여야 한다.

현장에 적용된 정화방법의 특성상 지속적인 관리를 필요로 하는 경우도 있다. 예를 들어, 반응벽체(reactive barrier), 캡핑(capping), 수리학적 제어(hydraulic control), 토지이용제한 등의 방법이 사용된 경우는 현장의 오염물질 농도가 정화 목표수준에 도달할 때까지 지속적인 관리가 필요하다.

3. 위해성에 근거한 복원전략의 활용방안

위해성평가는 노출경로와 오염물질의 독성치 산정 과정에 관한 여러 가정들을 전제조건으로 하고 있고 목표위해성 수준도 오염형태 및 수용체의 특성 등의 현장 상황에 따라 가변적일 수 있으므로 위해성평가의 결과는 어느 정도의 불확실성을 내포하고 있다. 그럼에도 불구하고 위해성평가는 오염의 심각성을 파악하고 목표정화수준을 결정하는데 있어 현재 사용될 수 있는 유용한 수단임에는 틀림이 없으며 이는 위해성에 근거한 복원전략(RBRS)이 기존의 획일화된 규제 및 복원과 비교하여 다음과 같은 많은 장점과 활용성을 가지고 있기 때문이다.

- 위해성에 근거한 합리적, 과학적, 경제적 정화기준의 마련이 가능
- 위해성에 근거한 정화기준이므로 실질적인 수용체 건강보호가 가능
- 오염지역의 특수성을 반영한 정화기준마련이 가능
- 오염지역의 토지이용용도에 따른 차등적 정화기준의 설정이 가능
- 많은 오염지역들의 실질적 위해성에 따른 복구 우선 순위의 결정이 가능

• RBRS에 대한 정부차원의 대비를 통한 오, 남용 방지
 우선, 오염지역의 정화기준을 각 지역의 특수성을 고려하여 결정할 수 있으므로 실질적인 위해성에 따른 차등적 정화기준의 적용이 가능하며 따라서 복구사업을 보다 합리적, 경제적, 과학적으로 수행할 수 있다. 본 연구 결과를 이용하여 각 오염지역에서 오염물질의 노출 경로별, 오염물질별 목표정화수준을 산정할 수 있으며 이를 이용하면 오염의 확산이나 노출방지를 위한 조치가 필요한 노출경로와 오염물질을 구별해 낼 수도 있다. 이런 장점은 오염지역을 복구하는데 있어 토지의 이용 용도를 고려할 수 있도록 차등적 정화기준의 적용이 가능하게 해주며 이는 사회, 경제적 비용을 고려해 볼 때 큰 의미를 가진다고 생각된다. RBRS를 이용하면 또한 오염지역들의 효율적인 관리가 가능해지는데 이는 필요한 경우, 많은 복구 대상지역들의 상대적 위해성을 평가함으로써 정화의 우선 순위를 결정할 수 있기 때문이다. RBRS의 개념을 도입하면 오염물질의 토양잔류농도가 높은 지역이 반드시 위해성이 높게 산정된다고 볼 수 없다. 토양 잔류농도가 낮은 지역에서의 오염물질의 토양으로부터의 수용체에 의한 이용률이 높다면 그 위해성은 반대의 경우보다 더 높게 나타날 수도 있다. 따라서 위해성평가에 따른 복구의 우선 순위는 잔류농도보다는 토양에 존재하는 오염물질이 얼마나 수용체로 노출이 일어나며 그 과정에서 얼마나 흡수, 이용이 되느냐 하는 것에 의해 결정된다. 이런 점에서 RBRS는 오염물질의 실질적인 위해성을 토양으로부터 제거하는 방법이며 복구 후 토양의 안전성도 함께 고려하는 방법이므로 궁극적으로는 국민건강 증진 및 동, 식물 생태계 보존에도 역할을 할 것으로 판단된다. 나아가 최근 토지의 외국자본에 대한 개방이 확대되고 미군부대반환 등의 문제와 관련하여 RBRS의 오, 남용에 대한 정부 차원의 대비책 마련으로도 활용될 수 있을 것이다.

4. 결론

위해성에 근거한 복원전략을 시행하는 과정에서 항상 염두에 두어야 할 것은 위해성평가(risk

assessment)는 과학이지만 위해성관리(risk management)는 과학이 아니라 그러한 과학적 사실에 근거한 의사결정과정(decision-making process)이라는 점이다. 위해성관리에서는 위해성평가의 목표인 수용체의 보호뿐만 아니라 현실적으로 사용 가능한 복구 방법, 비용, 시간적 요소, 사회적 요구 등이 모두 중요한 고려 요소이다. 예를 들어, 가장 보수적이고 안전한 목표위해성은 발암물질의 경우 10-6(백만 명 중 한 명의 '확률'로 발암위해성이 존재함을 의미하며 백만 명 중 한 명에서 '발생'하는 것과는 다름)이지만 오염물질이나 오염토양의 특성, 수용체의 크기 등에 따라서 그 수치는 과도한 규제가 되기도 한다. 이와 유사하게, 유효한 노출경로나 노출과 관련된 입력변수들의 합리적 선택은 목표정화수준에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이러한 유연성은 RBRs의 가장 큰 장점 중 하나이지만 '위해성'에 대한 정확한 이해를 바탕으로 적용되어야만 한다. 결론적으로, 위해성에 근거하여

오염지역을 정화한다는 것은 과학적 사실에 근거한 자료 분석을 바탕으로 오염지역의 상황과 주변여건, 이용 가능한 정화방법, 소요기간 및 비용 등을 감안한 최종의사결정 과정을 내포하고 있다. 이러한 과정을 통한 최종복원수준 결정은 정화의무자나 관계기관뿐만 아니라 학계, 시민단체 등으로 구성된 위원회 성격의 한시적 기구에서 활발한 참여와 토론을 거쳐(risk communication) 거시안적으로 이루어져야 한다.

5. 감사의 글

본 보고는 (사)한국지하수토양학회 산하 '위해성에 근거한 복원전략 연구회'의 활동의 일환으로 수행된 연구내용을 요약한 것으로서 학회의 지원에 감사드립니다. 아울러 본 원고의 원활한 집필을 위하여 도움을 주신 서울대학교 공학연구소에도 감사드립니다.

참고문헌

- ASTM, 1995, Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites(E 1739-95), American Society for Testing Materials, PA, USA.
- ASTM, 2000, Standard Guide for Risk-Based Corrective Action(E 2081-00), American Society for Testing Materials, PA, USA.
- Atlantic PIRI, 1999, Atlantic RBCA Reference Documentation for Petroleum Impacted Sites Ver. 1.0, Atlantic Partnership In RBCA Implementation.
- Linz, D.G., and Nakles, D.V., 1996, Environmentally Acceptable Endpoints in Soil: Risk-Based Approach to Contaminated Site Management Based on Availability of Chemicals in Soil, Academy of Environmental Engineers, MD, USA.
- US AFCEE, 1998, Handbook for Remediation of Petroleum-Contaminated Sites(A Risk-Based Strategy), US Air Force Center for Environmental Excellence, TX, USA.
- US EPA, Updated Monthly, Integrated Risk Information System(IRIS), Environmental Protection Agency, National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development, OH, USA.
- US EPA, 1992, Health Effects Assessment Summary Tables(HEAST), Environmental Protection Agency, Environmental Criteria and Assessment Office, Office of Health and Environmental Assessment, Office of Research and Development, OH, USA.
- US EPA, 1996a, Soil Screening Guidance: Technical Background Document(EPA/540/R-95/128), Environmental Protection Agency, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D.C., USA.
- US EPA, 1996b, Soil Screening Guidance: User's Manual, Environmental Protection Agency, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D.C., USA.