

## 오염부지관리와 MNA의 적용성

이민호 · 윤정기 · 이길철 (국립환경연구원)

이석영 (삼성건설기술연구소)

노회정 · 김문수 · 김혁 (국립환경연구원)

### 1. 서 론

#### 1.1. 복원기법으로서 MNA 이용동향

미국의 경우 슈퍼펀드법의 제정이후 유해폐기물매립지를 포함한 오염부지의 정화를 위해 막대한 비용이 지출되었지만 오염부지에 대한 복원이 당초 예상했던 목표에 미치지 못하고, 오염부지의 복원을 어느 정도까지 해야 하는지에 대한 의구심이 의회내부에 제기되면서 오염부지 정화를 위한 예산지원도 점차 줄어들고 있는 실정이다.

이에 따라 오염부지복원을 위한 대안으로 위해성평가를 통해 위해도가 크지 않은 지역은 오염물질의 자연정화능에 의해 복원되도록 유도하는 MNA의 적용기술이 EPA에 의해 제시되어 유류등 유기성오염물질 등에 오염된 부지의 정화수단으로 '90년대 중반이후 많이 적용되고 있다. EPA의 '98년 보고서에 의하면 지하매설저장시설부지에서의 지하수정화기법으로 46%가, 그리고 오염토양정화기술로 10%가 MNA기법을 사용한 것으로 나타나 앞으로 본 기술의 적용은 점차 증가할 것으로 판단된다.

유럽국가들 중 영국은 2000년에 연방 환경청에서 MNA를 오염부지의 지하수처리기술의 하나로 적용할 수 있도록 지침서가 발간되어 이용자는 본 지침서에 따라 본 기법을 적용하고 있으며, 독일, 네덜란드 등에서도 MNA를 유류등 유기성오염

물질로 오염된 일부지역에서 적용하고 있다.

그러나 MNA기법은 자연생태계를 이용한 친환경적이면서 비용경제적인 기술인 반면 일반 공학적인 정화기술에 비해 처리기간이 오래 걸리고 오염부지의 특성, 오염물질의 종류, 사회경제적인 여러 여건이 조화를 이루어야 적용될 수 있는 기술이다.

본고는 MNA기법을 유류오염부지에 적용한 사례연구와 선진국에서 적용하고 있는 MNA기법의 각 단계별 필요 절차를 알아보고 우리나라에서 해당 기법의 확대 적용을 위한 방안에 대해 알아보았다.

## 1.2. 자연저감과 자연정화의 정의

Natural Attenuation (NA)이란 “지하수에서 자연적으로 발생하는 물리적, 화학적, 생물학적 공정들의 효과, 또는 오염물질들의 부하, 농도, 유량 또는 독성을 감소시키는 이러한 공정들의 복합적인 영향을 말한다.

또한 Monitored Natural Attenuation (MNA)란 “NA 공정들이 주변환경에 영향을 주지 않으며 정화목표가 합리적인 시간 내에 성취될 수 있는 충분한 속도로 이루어지고 있음을 확인하는 지하수 관측활동을 말한다. 이러한 관측활동을 미국이나 영국에서는 일반적으로 한세대 혹은 30년 이내로 규정하고 있다.

### MNA의 주요 장점과 단점

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> <li>· 상대적으로 친환경적임</li> <li>· 처리비용이 적게 소요</li> <li>· 자연 공정들을 이용함</li> <li>· 에너지 사용감소 및 적극적 공정으로부터의 배출물질의 감소</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 정화목적을 달성하기 위해 장기간소요</li> <li>· 장기간의 관측이 요구함</li> <li>· 부지특성에 따른 정화작업의 세밀화로 고비용 소요</li> <li>· 치환 산물의 독성이 위해성을 증가시킬 수 있음</li> </ul>

### 1.3. MNA의 적용성

자연저감(natural attenuation)을 적용할 때는 자연적인 공정들이 a) 주위환경을 보호하고, b) 합리적인 시간 내에 정화 목적들을 성취하는 속도로 진행될 수 있음이 증명되어야 한다. 그 증명은 정화 공정들을 입증할 수 있는 시스템을 관측함으로써 얻을 수 있다. 다시 말해 MNA 적용조건은 위해성평가결과 수용체에 별다른 문제가 없고 MNA 설정기간동안 해당부지에서 오염물질의 plume이 부지경계선을 넘지 않은 조건에서 본 기법의 적용이 가능하다.

영국 환경청에서 규정하고 있는 MNA 허용을 위한 주요 기준은 다음과 같다.

- (1) 자연정화가 최소한 2~3년간의 모니터링자료를 통해 신뢰할 정도로 나타나며, 이 기간동안 수용체에 대한 위해가 없다는 것이 증빙되어야 함.
- (2) 자연정화는 모니터링기간 또는 그 이상의 기간동안 확인된 수용체를 보호하는데 효과적이다.
- (3) 자연정화는 통해 예측한 대로 자연정화가 일어나고 있다는 것을 증빙하는데 적합할 수 있도록 모니터링 네트워크를 구축하여 관측하여야 한다.
- (4) MNA를 위한 정화목적들이 한세대 혹은 30년 이내 성취되어야 한다. 이때 MNA를 위한 소요기간이 다른 복원 대안과 비교하여 합리적이어야 한다.

한편, MNA는 또한 적극적인 정화 대책 (예; 공화적인 오염원 제거), 차단(containment) 시스템, 처리 시스템, 응용된 NA(예; 오염물의 분해를 촉진하기 위한 영양분, 산소, 유기물질 공급)를 결합한 통합처리접근의 형태가 될 수도 있다.

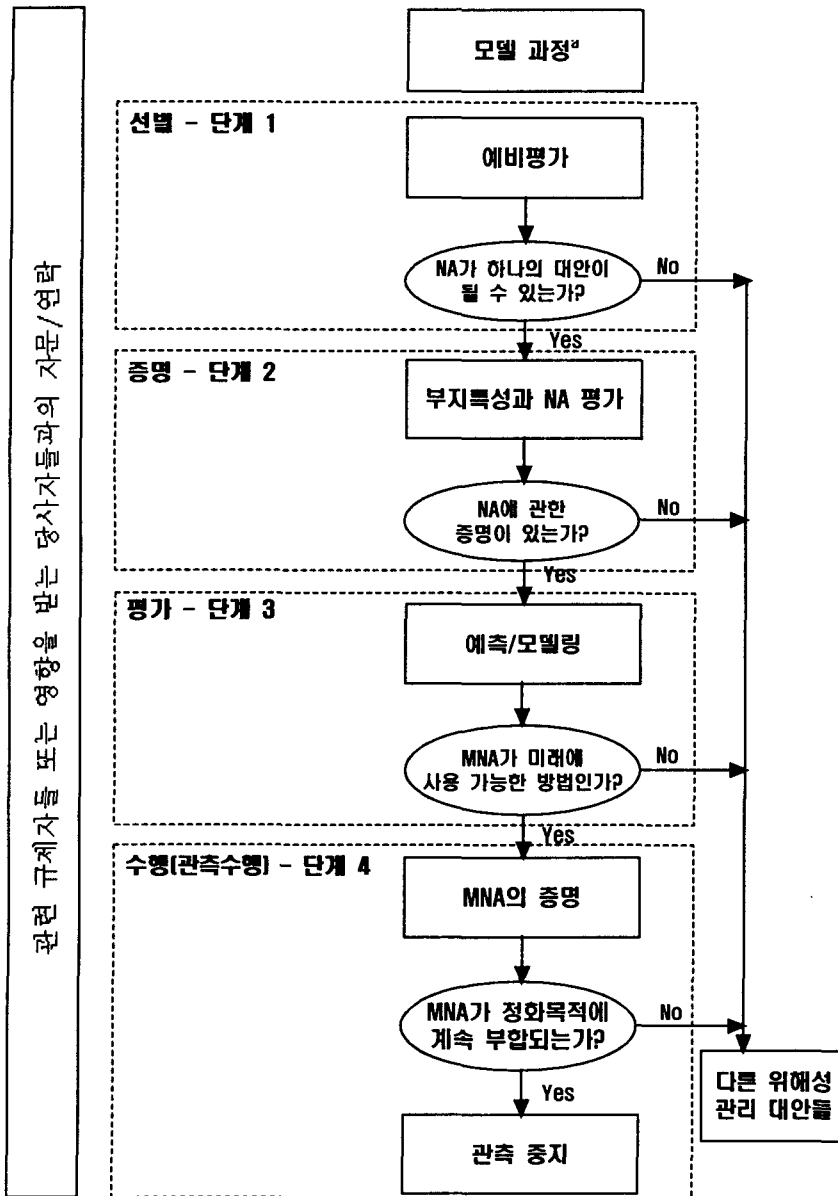
## 2. 전체적인 접근방법

### 2.1. 구성 체제

#### 가. 구조

MNA를 지하수 오염의 위해성 관리 전략(risk-management strategy)으로서 평

가하고 수행하기 위해 조직화된 결정과정과 반복된 자료 수집/분석을 포함한 다 단계 과정을 거치도록 하고 있다. 주요 단계별 설명은 아래와 같고, 이를 요약한 흐름도는 그림 1과 같다.



\*오염부지 관리를 위한 모델 과정

그림 1. 오염부지 정화기법(MNA)으로서 NA를 평가하기 위한 전 과정

**선별 단계**는 기술적, 실용적, 법적, 경제적 제한성에 대한 예비 평가를 토대로 NA의 실행가능성을 고려한다. 이 공정은 오로지 NA 가능성이 보여지는 곳에서 제한된 자료를 사용하여 계획된다. 전형적으로, 이 단계는 대체할 수 있는 적극적인 정화방법들도 고려할 수 있는 “가능성 단계(feasibility stage)”이다.

**증명/평가 단계**는 MNA를 하나의 복원 전략의 부분으로써 연속적인 수행을 보조하기 위해 과학적으로 방어할 수 있는 증거를 제시하려는 목적으로 보다 상세히 NA를 나타낸다. 평가는 포괄적인 부지 특성과 미래의 지하수 내 오염물의 운명과 이동을 예측하기 위한 예측모델링에 의해 나타나는 NA의 진행 효과(current effectiveness)를 확인하기 위한 자연감쇄능의 평가와를 결합하여 행한다.

**수행 단계**는 평가기간 동안 행해진 예측과 동일 선상에서, 정화 목적들이 성취된다는 것을 증명하기 위한 장기간 관측 요구사항들을 다루고 있다. 관측을 통해서 얻어진 측정치가 목표에 부합되지 않는 경우를 대비하고 예측하지 못한 문제점들에 대한 대비계획을 준비한다.

MNA구성체제의 핵심은 어떤 부지에서 수리지질학적, 생물화학적, 지화학적 특성을 설명하는 개념 모델이다. 이 모델은 평가의 연속적인 단계동안 부가적인 자료가 수집되면 지속적으로 수정된다. 이 과정은 평가에서 불확실성수준이 감소됨에 따른 추가적인 비용의 증가를 수반한다.

#### **나. 주요 고려사항들(Key Consideration)**

다음의 요소들은 MNA를 기본으로 하는 정화 전략을 계획하기 전에 고려해야 한다.

##### **접촉 (liaison) 과 협상 (negotiation)**

지하수 오염을 정화하기 위하여 MNA를 선택할 경우, 관련 규제자(환경부 및 지자체 관련기관), 토지소유주, 보험업자, 금융업자, 잠재 토지구매자를 포함한 다양한 이해당사자들과의 (stakeholders)와의 접촉과 동의가 요구된다. 규제자의 경우, 규칙적인 협의 와 자문(consultation)이 선별, 증명, 평가 수행 단계 전반에서 요구된다. 표 1에서는 실제 자료에 대한 규제자의 인정과 그 자료에 대한 문제부지소유

자의 설명이 필요로 하는 곳에서의 중요한 결정 단계들을 나타내고 있다.

### **시간 (Time-scale)**

MNA 시행 시 만족할만한 결과를 도출하기 위해서는 수십 년의 시간이 걸릴 수도 있다. 따라서 MNA는 지하수의 지화학, 토지 소유와 법적 변화들을 포함한 다양한 기술적, 경제적, 규제 조건들의 변화에 영향을 받기 쉽게 된다. 이러한 요소들은 하나의 장기간 정화전략일 경우, MNA의 설계와 적용 시 충분히 고려되어야 한다. 이는 장래를 위해 부지사용(land-use)을 위한 계획수립의 제한과 같은 제도상의 통제를 수용하고, 장기간 관측 프로그램이나 예상치 못한 문제점이 나타날 때를 대비한 계획을 관리하기 위한 조건부 날인 증서(escrows)와 같은 재정적 규정(financial provisions)을 두는 것을 의미한다.

정화 목표들을 성취하기 위한 합당한 시간영역은 지하수(현재와 미래의) 자원의 가치와 다른 수역과 수용체에 대한 위해성과 같은 요소들을 고려하면서, 부지특성의 관점에 따라 결정되어야 한다. 규제기관은 비용편익을 염두에 두면서 오염 지하수의 정화가 효과적이고 빠르게 성취되고 있는지를 확인한다. 지속가능한 개발의 관점에서, 환경규제기관은 기술적으로 실행가능한 곳에서, 미래 세대가 오염을 물려받아서 안될 것이며, 오염에 대한 정화는 30년 이내에 실질적으로 종료될 수 있는지를 판단한다.

### **예상치 못한 문제발생 시 대비 계획 (Contingency plan)**

정화 프로그램이 예측된 대로 수행되지 못할 경우에는 반드시 예상치 않은 문제가 존재하므로 이에 대한 대비계획을 수립하여야 한다(환경의 변화에 의한 결과 또는 개념모델에서 정의되지 않고 예측되지 않은 부분의 결과).

### **비용 편익 (Costs and benefits)**

많은 경우, MNA를 수행하는데 있어 전체 비용은 적극적인 정화 해결방안들보다 상당히 저렴할 것이다. 그러나 부지 조사를 위한 초기 투자는 좀더 포괄적인 자료를 요구하기 때문에 커지게 된다. 전체 비용의 절감을 위한 가능성을 별개의 문제로 하고, NA는 상대적으로 비관입적이고, 부지 내의 자연적인 공정일 경우 비용이 절감될 것이다. 그러나 기술적, 실용적 한계는 존재한다.

### **불확실성과 검증에 대한 부담 (Uncertainty and the burden of proof)**

상당한 기술적, 법적, 경제적 불확실성이 NA를 둘러싸고 있다. 자료를 많이 수집하고 검증절차를 거칠 경우 NA를 지배하는 복잡한 몇 가지 생물화학적 공정의 불확실성을 제거할 수 있다. 이러한 접근법은 복합적이고, 독립적이며 증거의 일치됨에 기초로 하고 있으며, 주요한 내용은 다음과 같다 :

- (1) 현장 규모에서 입증된 오염물의 유실
- (2) NA의 지화학적/생화학적 지표들의 존재와 분포
- (3) 직접적인 미생물학적 실험 자료(이러한 일련의 증거는 처음 몇 년 동안 결론에 이르지 못할 때에만 사용될 수 있음)

제안자는 NA가 합당한 시간-영역 내에서 정화 목적들을 달성하는가에 대한 가능성을 보여주는 충분한 증거를 제공해야 하는 부담(onus)을 가지고 있을 것이다. 더 많은 자료가 획득될 때 요구되는 평가 공정 내에 연속 단계들(successive stages)의 불확실성은 감소된다.

### **자료 요구**

NA를 보조하기 위한 증거를 위해서 상당한 자료의 수집과 분석이 요구된다. 일반적으로 측정되는 매개변수들의 형태들은 다음과 같다.

- (1) 원래의 오염원과 재생성 오염물, 그리고 대사 부산물의 농도들을 포함하는 화학적 매개변수
- (2) 산화환원전위, 전자수용체(예를 들어 용존산소, 질산염, 황산염, 이산화탄소, 메탄가스)와 일반적인 수질매개변수(pH, 전도도, 알칼리도)를 포함하는 지질화학적 매개변수들
- (3) 물리적인 매개변수(광물학, 수리전도도, 동수구배, 온도)
- (4) 생물학적 매개변수(생분해 속도)

### **제삼자(Third parties)**

MNA에 관한 제삼자에 의한 동의/수락의 중요성은 간과되어서는 안된다. 예를 들어, 제삼자의 행동이나 제외는 정화 프로그램에 영향을 미치며, 정화 프로그램은

이들 제삼자에게 차례로 큰 영향을 미칠 것이다. 오염물들이 경계를 지나 이동한다면 이웃의 소유지 내에서 오염물의 이동과 관련하여 잠재적인 민사적인 책임(civil liabilities)에 놓여지게 된다. 이해관계자들은 항상 이웃들과 상담하고 연락해야만 하며, 규제기관은 부지 외부로의 이동이 예상되어지는 곳에서 이용가능한 지하수 오염 관련 정보를 갖도록 노력해야 한다.

#### **다. 적용(Application)**

MNA는 독립적으로 혹은 적극적인 정화 방법을 결합한 통합된 일련의 처리 접근(an integrated treatment train approach)의 부분으로 적용된다. MNA와 적극적인 정화 기술이 통합될 수 있는 부지 조건들의 예는 다음과 같다.

- (1) 오염은 주변은 자연정화로, 반면 오염원 근원지는 적극적 정화방법을 선택한다.
- (2) NA는 적극적인 정화가 그것의 목적들을 달성한 후 잔류 오염을 관리하기 위해 사용된다.
- (3) 영양분과 산소 방출 화합물들 또는 수소 방출 화합물주입 등 부지내 생분해 촉진방법들은 응용 NA 공정으로 적용된다.
- (4) 만약 MNA가 목표달성에 실패하게 된다면, 적극적인 정화법이 고려되어야 한다.

전문가적인 판단은 MNA를 적용하는 기간동안 내내 요구될 것이며, 전체적인 수리지질학적, 지화학적 이해가 필수적으로 고려될 것이다. 미생물학, 화학을 포함한 다른 이론들 또한 요구된다.

## **2.2. 법규 상담(자문) 및 허용 기준 (Regulatory consultation and criteria for acceptance)**

우리나라의 경우 이에 대한 규정이 없어, 영국의 사례를 들면 다음과 같다.

환경청이 상담하고자 하는 부지에서의 중요한 결정들이 아래 표 1에서 나타내고 있다. 일반적으로 문제의 소지자(the problem holder)는 다음 단계가 시작되기 전에, 각 단계의 끝에서 규제자에게 결과와 결론을 제출해야 할 것이다. 그러나 일련



의 대화는 단계 전반에 걸쳐 열어 놓고, 통상적인 자문 기간을 최소화하기 위하여 규칙적인 업데이트 자료가 제공되어야 한다. 자문은 또한 반드시 작업이 수행되는 조건에서 법률의 추가적인 요구사항들을 반영해야 한다.

표 1. 환경청(영국)이 요구하는 중요 결정요소

단 계	결 정	확 인 요 소
선별	<ul style="list-style-type: none"> <li>· MNA가 정화 대안이라는 초기 견해를 뒷받침할 수 있는 충분한 부지 자료가 있는가?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 초기 개념모델 (conceptual model)</li> <li>· NA는 확인된 수용체가 존재한다면 이를 보호할 것이며, 다른 모든 정화 목적들에도 부합할 것이라는 예측들</li> <li>· 수용체들에 대한 직접적인 위해성이 없는지와 좀 더 자세한 평가를 위한 충분한 시간이 있는지에 대한 판단</li> </ul>
증명과 평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 부지 특성 자료와 모델링의 결과들이 NA가 발생하고 있으며, 위해성 관리 목적들을 달성할 수 있다라고 증명할 수 있는가?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 상세한 보고서 :               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 일련의 증거들 (lines of evidence)</li> <li>- 오염물의 운명과 거동에 관한 모델링을 근거로 한 예측들</li> <li>- 불확실성들과 가정들</li> <li>- 관측 확인과 우발사고에 대한 계획</li> </ul> </li> </ul>
수행	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 관측 프로그램이 충분히 확고한 것인가?</li> <li>· 관측 결과들이 정화 목적들이 달성되어, 관측이 끝날 수 있다는 것을 증명할 수 있는가?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 시료채취, 작업 기준, 정도관리, 예상치 못한 문제에 대한 대비계획을 포함한 상세한 관측전략 제안서</li> <li>· 끝내기 위한 관측결과, 자료 분석과 판단을 한 상세 보고서</li> </ul>

규제기관은 부지와 부지 주변과 연관된 특정 위해성에 따라 그것의 고유한 장점들에 대해 각 경우별로 평가해야한다. 책임은 현재와 미래 모두 NA가 효과적인 방법이라고 추천한 제안자에게 돌아간다. 이는 MNA가 정화 목적에 부합하는가를 증명하기 위하여 과학적으로 변호할 수 있고, 독립적이며, 객관적인 일련의 증거들을 제공하는 것을 요구한다. NA와 관련한 불확실성이라 하는 것은 상세한 부지특성과 장기간의 관측, 예상치 못한 문제점에 대한 대비계획의 준비가 필수 불가결한 것이

라는 것을 뜻한다.

일반적으로 규제자가 요구하는 입증의 정도는 실제 또는 감지된 위해 정도에 따라 영향을 받을 것이며, 이는 다음과 같은 차례로 영향을 받을 것이다.

- (1) 부지의 민감도, 지하수의 전략상 중요한 자원으로서의 가치와 취약성이 있는 수용체의 존재 및 수용체의 근접도
- (2) 오염물의 이동성, 지속성, 독성과 같은 유해특성과 그러한 특성들을 가진 다른 물질들을 감소시키기는 가능성 (the potential) ;
- (3) 오염의 심각성, 관련법에서 규정하는 심각한 오염, 예로 EC 지하수관리규정의 List I 과 II로 지정된 물질의 심각한 오염.
- (4) 감쇄를 일으키는 dominant한 기작의 성질, 특히 공정의 가역성

### 3. 사례연구

#### 3.1. 배 경

조사대상 부지는 경기도 의왕시 고천동에 위치한 (주) H화학과 (주) J모직 공장부지를 대상으로 선정되었다. 해당지역은 '98년 10월 24일 조선일보 사회면에 “의왕시 화학공장 줄줄 새는 기름탱크, 주변 1만여 평 죽음의 땅”이라는 언론보도 후 환경부 지시에 의거 당 연구원이 대상지역에 대한 오염범위의 재확인 및 오염원인을 규명하고자 토양정밀조사를 수행하였던 지역이다. 연구대상지역의 면적은 H화학 공장부지 23,494m<sup>2</sup>과 J모직 공장부지 95,867m<sup>2</sup>를 합하여 119,361m<sup>2</sup>이다.

본 연구는 오염물질이 TEX, 그 중에서도 톨루엔으로 오염되어있는 해당 부지를 MNA기법을 적용할 경우 복원기술의 하나로 받아들일 수 있을지 그 여부를 판단하기 위해 대상으로 3년('99 - '01)간 연구를 수행하였다.

#### 3.2. 부지환경 및 특성

H화학은 제품생산을 위해 크실렌, 경유, 톨루엔 등 다양한 유기용제류를 저장

하고 있으며, 이들 용제류의 연간 사용량은 톨루엔이 500~800톤/년, 크실렌이 1,100~1,400톤/년을 사용하고 있으며, J모직은 BTEX를 연간 50~120ℓ 정도를 사용하고 있는 것으로 나타났다. 해당지역에 대한 오염원인 규명을 위한 토양 및 지하수오염분포, 지하수의 흐름방향, 토양 및 지하수에서 검출되는 오염물질 등을 종합 검토하여 H화학의 유류저장 탱크부근을 토양 및 지하수오염의 주 오염원으로 추정하여, 이 부근의 오염토양개선 및 오염물제거작업을 수행하였다. 조사대상부지와 조사지점은 그림 A9.12에 나타내었다.

43지점의 시추주상도를 근거로 하여, 대상지역은 최상부층(1층)인 자유면 대수층과, 주대수층(2층)인 피압/자유면 대수층(대부분 사질토로 구성), 그리고 기반암층(3층)인 캠브리안 편마암으로 구성되어 있다.

조사대상인 주 대수층은 사질토의 자유면 대수층으로 계절에 따른 연간 수위변동 폭이 최대 약 2.5m로 매우 크고, 또한 부지의 상부층(1층)은 실트나 점토가 많은 복토층으로 구성되어 있기 때문에, 조사연구부지 여러 곳에 오염물질이 산재되어 잡혀있을 것으로 추정된다. 평균적인 지하수위는 지표 하 약 2-3m지점에 주로 위치한다. 주 대수층인 2층에서의 수리전도도는 slug 시험, 추적자 시험, 단기양수 시험, 그리고 입자분석을 통해 얻은 값들을 근거로 하여  $2.6 \times 10^{-4} \text{m/s} \sim 6.3 \times 10^{-4} \text{m/s}$  범위의 값을 가짐을 알 수 있다.

### 3.3. 선별작업

초기평가('99년)로, 미국 EPA의 BIOPLUME III 프로그램을 사용하여, 대수층 내 오염운의 범위를 추정하였으며 하천에 어떠한 영향이 있을지가 고려되었다. 부지조사를 통해 동수구배, 대수층의 수리전도도, 그리고 오염물의 영역과 정도에 관한 정보를 얻었다. 대수층의 공극률에 대한 정보는 실험을 통해 얻었으며, 대수층 분산지수는 추적자 실험을 통해서 구하였다. 이 모델을 통한 결과는 다음과 같다.

- (1) 현장부지에서 조사된 현 상태를 모델을 통해 모사를 하여 현재의 plume이 어떻게 될 것인가를 예측하기 위하여 BIOPLUMEIII를 사용하여 수집된 수리계수와 2차('99. 6과 '99. 9)에 걸쳐 조사한 지하수의 지화학적 parameter 등을 이용하여 예비평가를 하였다.
- (2) plume이 현재 정한 범위 즉 J 모직 부지 안에서 자연정화에 의해 안정이 될

것으로 보이며, 최악의 경우로 보아도 수년 내에 그 밖으로 확산되지는 않을 것이다.

이러한 초기 모델링 결과와 함께, 많은 자연저감의 증거들이 관측되고 있다. 또한 조사작업 초기에 토양에 존재하는 오염원지역을 제거하였으며, 정기적인 관측(분기별 1회)의 결과 지하수 오염원은 느린 속도로 이동하나 축소되고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 자연저감이 발생하고 있음을 보여주는 지화학적 그리고 생화학적인 증거들도 제시되었다. 이상과 같은 일련의 증거들은 이 부지에 대한 MNA 적용이 대체정화방법이 될 수 있음을 말해준다.

### 3.4. 현장측정 및 분석

오염원의 수평·수직적 분포와 농도 변화를 파악하기 위하여 지하수 관측정을 40개소(간이관측공 25개, 정규관측공 15개) 설치하였으며, '98년 정밀조사시 기 설치된 간이관측공 30개소도 함께 이용되었다. 토양은 47개 지점에서 깊이별로 풍화된 모암이 나타나는 0~6m 깊이까지 토양단면상에 나타나는 지질특성과 산화·환원정도, 육안으로 나타나는 유류의 오염분포 등을 고려하여, 조사지점에 따라 깊이별로 3~8점씩 총 160점을 채취하였다.

토양의 경우 BTEX분석용 시료는 토양오염공정시험방법에 준하여 채취·분석하였다. 토양의 pH, 총유기탄소(TOC), 질소·인 및 양이온치환용량등 화학성은 토양화학분석법에 준하여 분석하였으며, 토성은 피펫법으로 측정하여 미 농무성에서 제정한 방법으로 분류하였다.

지하수의 경우 BTEX 및 이온( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ) 분석용 시료 및 알칼리도 측정용 시료는 수질오염공정시험방법에 준하여 채취하여 분석하였다.

한편 온도, pH, 전기전도도(EC), 산화환원전위(ORP), 용존산소(DO)는 현장에서 측정장비를 이용하여 측정하였으며, 2가 철( $\text{Fe}^{2+}$ )은 흡광광도계(DR2010, HACH)를 이용하여 현장에서 측정하였다.

### 3.5. 위해성평가

현장연구부지에서 자연정화방법의 적용가능성과 위해성에 기초한 토양 및 지하

수의 정화기준을 산정하기 위해 실시한 위해성평가를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다. 사용된 위해성평가 모델은 RBCA(Risk Based Corrective Action)이다.

조사대상부지에서의 기준위해성 평가(Baseline Risk Assessment)결과 각각의 노출경로중 지하수의 노출경로에서만 위해계수(Hazard Quotient ; HQ)와 위해지수(Hazard Index ; HI)가 기준한계 값인 1.0을 초과하는 13으로 나타나 오염물질의 위해 한계치가 목표위해치를 초과하였으나, 다른 노출경로 즉, 실내 및 실외노출경로와 토양의 노출경로는 모두 목표위해치 이하인 것으로 평가되었다. 그러나 현장부지 내 및 인근에서도 지하수를 음용하는 경우가 없어 위해성 면에서는 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 특히 조사대상부지 토양의 기준위해성평가 결과는 수용체인 건물 내 근무자와 건설근로자에 대한 위해 계수가 toluene의 경우 0.012~0.009, ethylbenzene은 0.009~0.006, xylene은 0.0003~0.0002이었으며, 모든 수용체에 대한 위해지수는 0.02~0.015로 목표위해치인 1.0에 크게 미달하는 것으로 나타났다. 각 노출경로별 기준위해성 평가결과는 표 2에 나타내었다.

표 2. 각 노출경로별 기준위해성 평가결과

노출경로	위해계수		위해지수	
	최고치	목표치	총합	목표치
공기노출 (실외)	0.067	1.0	0.085	1.0
공기노출 (실내)	0.54	1.0	0.69	1.0
토양노출	0.012	1.0	0.021	1.0
지하수노출	13	1.0	13	1.0

이상의 위해성평가 결과를 토대로 조사대상부지에 대한 정화기준(Risk-based screening level ; RBSL)을 산정한 결과 주 오염물질인 toluene의 경우 120 mg/kg으로 계산되어 현장부지의 대표농도인 toluene 67 mg/kg에 비해 크게 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과로 볼 때, 현장부지는 자연정화방법이 적용되어도 부지 내 수용체에 대한 위해성에 대한 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

### 3.6. 미생물학적 실험

토양의 그람 음성세균을 동정하는데 이용되는 API NE20로 세균을 동정한 결과 상대적으로 TEX의 농도가 높은 초기 오염토양에서는 *Pseudomonas fluorescence*가 우점하였고, 오염이 확산된 지역은 *Burkholderia cepacia*가 우점하고 있는 것으로 나타났다. 그 외 *Acinetobacter lwoffii*도 몇 지점에서 분리 동정되었다. 오염이 안 된 곳이나 TEX의 농도가 낮은 지역에서는 API NE20으로는 동정할 수 없는 집락의 크기가 작은 그람 양성균이 우점하는 것으로 나타났다. 집락의 크기가 작은 것들이 주로 그람 양성균이었다. 따라서, 현장부지에 서식하고 있는 틀루엔 분해 호기성세균의 주종은 *Pseudomonas fluorescence*, *Burkholderia cepacia*, *Acinetobacter lwoffii*이다.

### 3.7. 일련의 증거

주요한 일련의 증거와 이차적인 일련의 증거들이 조사기간동안 충분히 수집되었으며, 이 증거들은 조사대상부지에서 자연저감이 발생하고 있음을 보여주기에 충분하다.

#### 가. 주요한 일련의 증거

년도별 지하수중 TEX의 평균농도를 보면 '99년 6월과 9월은 149 mg/l, 142 mg/l, 2000년 1월, 4월, 9월은 82.1 mg/l, 42.0 mg/l, 17.0 mg/l이었고, 2001년 2월, 7월과 9월은 17.2 mg/l, 14.8 mg/l, 34.4 mg/l으로 시일이 경과할 수록 그 농도가 뚜렷이 감소하는 경향이다. 이와 함께 오염 plume의 중심농도도 '99년 326~837 mg/l, 2000년 100~157 mg/l, 2001년 43.6~110.9 mg/l으로 년도가 경과할수록 크게 감소하였다. 그림 2는 시기별 지하수중 TEX농도변화를 보여준다. 그림 3은 시기별 지하수 중 TEX 분포변화(mg/L)를 도시하였으며, 이를 통해서도 오염원이 축소되고 있으며 그 농도 또한 뚜렷이 낮아지고 있음을 알 수 있다.

#### 나. 이차적인 증거

자연저감의 이차적인 증거는 대수층 내 가용한 전자수용체에 기초하여 평가된다. 년도별 지하수중 전자수용체의 조사결과 DO, Fe<sup>2+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 등은 배경농

도관측공에 비해 오염관측공에서  $Fe^{2+}$ 의 농도가 크게 높고, DO,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ 의 농도가 낮게 나타나고 있다.

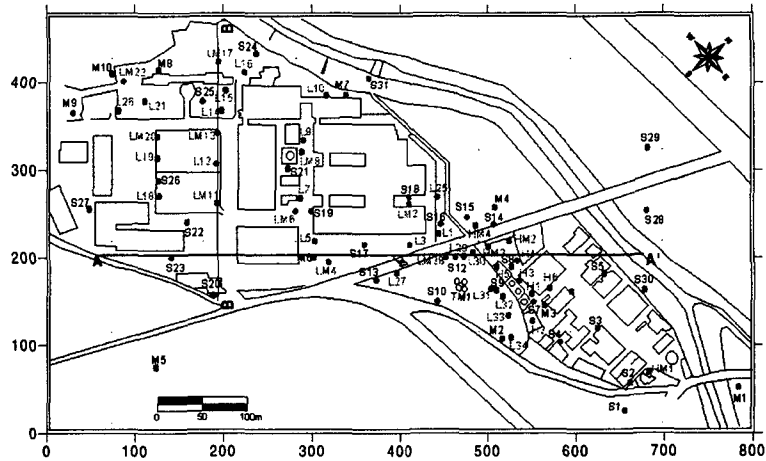


그림 2. 현장부지 시료채취 지점도

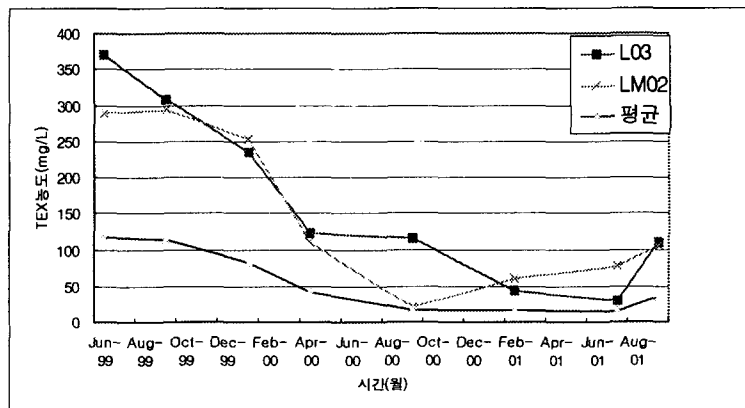


그림 3. 시기별 지하수중 TEX농도변화

이와 같은 현상은 시기별 전체평균값에서도 같은 경향을 보이고 있다. 이상의 TEX의 농도와 전자수용체 등 영향인자와의 관계분석결과 부지 내 비오염지역에 비해 오염지역에서 DO,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$  농도의 뚜렷한 감소와  $Fe^{2+}$ 의 증가와 ORP의 현저한 저하, pH 중성 등의 현상으로 미루어 보아 대상부지는 혐기성 상태에서 토착

미생물에 의한 오염물질의 생분해가 이루어지고 있는 것으로 판단된다. 또한 이와 함께 투수성이 큰 현장부지의 지질학적 특성상 강우에 의한 지하수의 재유입으로 인한 희석 및 분산도 TEX의 감소에 부수적인 요인이 되었을 것으로 추정된다(표 3). 연도별 지하수중 alkalinity는 배경농도 관측공에 비해 오염관측공에서 높게 나타났으며, ORP와 DO는 오염관측공에서 측정치가 낮게 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 시기별 전체평균값에서도 같은 경향을 보이고 있다.

표 3. 시기별 전자수용체 농도변화

전자 수용체	관측공	Jun-99	Sep-99	Jan-00	Apr-00	Sep-00	Feb-01	Jul-01	Sep-01
DO (mg/L)	HM1 (배경치)	0.6	1.27	2.65	2.68	0.5	4.59	4.31	2.18
	L3 (오염원)	0.6	0.43	0.66	0.66	-	2.26	0.5	1.35
	전체평균	0.49	0.45	0.87	0.99	0.29	2.27	1.81	1.40
Nitrate (mg/L)	HM1 (배경치)	11.86	17.63	13.5	3.17	38.75	13.913	15.272	15.134
	L3 (오염원)	0.08	1.16	3.62	1.72	0.11	0.233	0.094	0.188
	전체평균	3.47	2.62	3.15	0.86	2.59	1.32	1.82	1.78
Iron (II) (mg/L)	HM1 (배경치)	0.03	0.01	0	0	0.09	0.37	0	0
	L3 (오염원)	-	21.4	28.77	55	7.38	101.37	0.21	59.21
	전체평균	52.31	50.64	50.91	54.69	47.26	56.66	44.03	51.92
Sulfate (mg/L)	HM1 (배경치)	83.19	143.56	67.18	33.68	123.75	97.56	72.542	118.77
	L3 (오염원)	0.63	17.45	12.9	4.03	16.89	2.855	18.394	1.22
	전체평균	29.84	13.32	11.49	6.09	19.01	11.01	17.59	11.50

#### 다. 오염물질(TEX)의 지하수·토양 매체간 상관성 평가

토양과 지하수는 오염물질의 거동에 있어 매우 밀접한 관계를 가지고 있을 것으로 판단된다. 이러한 가정 하에 토양깊이별로 채취한 시료의 농도와 지하수의 농도와의 상관성을 조사한 결과는 표 4와 같이 토양 2~3m 깊이에서 채취한 TEX의 농



도가 지하수 중의 TEX농도와 높은 상관성( $r=0.876$ )을 보이고 있다(그림 4).

표 4. 조사대상 부지의 토양깊이별 TEX농도와 지하수중 TEX 농도와의 관계

토양깊이	회귀식	상관계수
1 m	$y = 0.0007x + 1.7364$	$R = 0.091$
2 m	$y = 0.5845x - 36.041$	$R = 0.88$
3 m	$y = 1.2422x + 8.8219$	$R = 0.855$
4 m	$y = -0.0212x + 122.38$	$R = 0.02$
2-3 m	$y = 1.2108x + 8.7344$	$R = 0.876$
깊이별 합	$y = 0.906x + 118.3$	$R = 0.584$

\* y : 토양 중 TEX농도, x : 지하수중 TEX농도

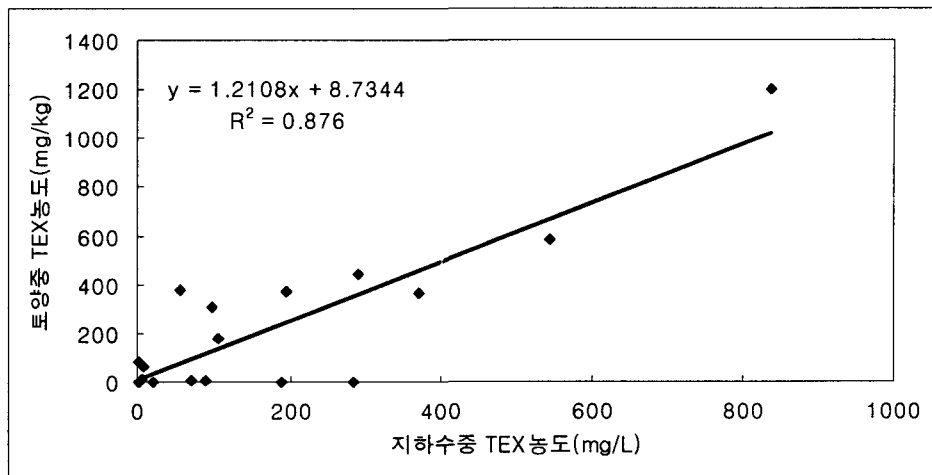


그림 4. 지하수중 TEX농도와 토양(2-3m) 중 TEX 농도간의 상관성

이와 같이 이 구간의 토양깊이(2~3m)에서 지하수와 토양 내 오염물 농도간의 상관성이 높은 이유는 오염물을 함유하고 있는 지하수 층이 외부의 영향(강우, 강설, 대기압 등)에 쉽게 반응하는 천부대수층으로 상당수 조사지점의 지하수위가 지표 하 2~3m에 걸쳐있고, 이들 조사지점의 지하수위 변동폭이 2m정도로 큰데 기인된 것으로 판단된다. 따라서 지하수에 의해서 이송되는 오염물은 이러한 영향으로 수직적으로 분포하게 되며, 토양 내에 분포하는 점토질 혹은 실트질 매질과 같은 저투수성 매질에 흡착되어 오염물질의 smear zone을 형성하게 된다. 이러한 결

과로 인해 토양 중 TEX농도와 지하수중 TEX의 농도와의 상관성이 2~3m구간, 즉, 지하수위 변동구간(fluctuation zone)에서 높게 나타나는 것으로 판단된다. 2m 구간의 상관계수가 0.88로 가장 높으나 선택되지 않은 이유는 분산도가 너무 크기 때문이다. 이들 토양(2~3m) 및 지하수 중 TEX농도와의 분포도는 그림 5와 같다.

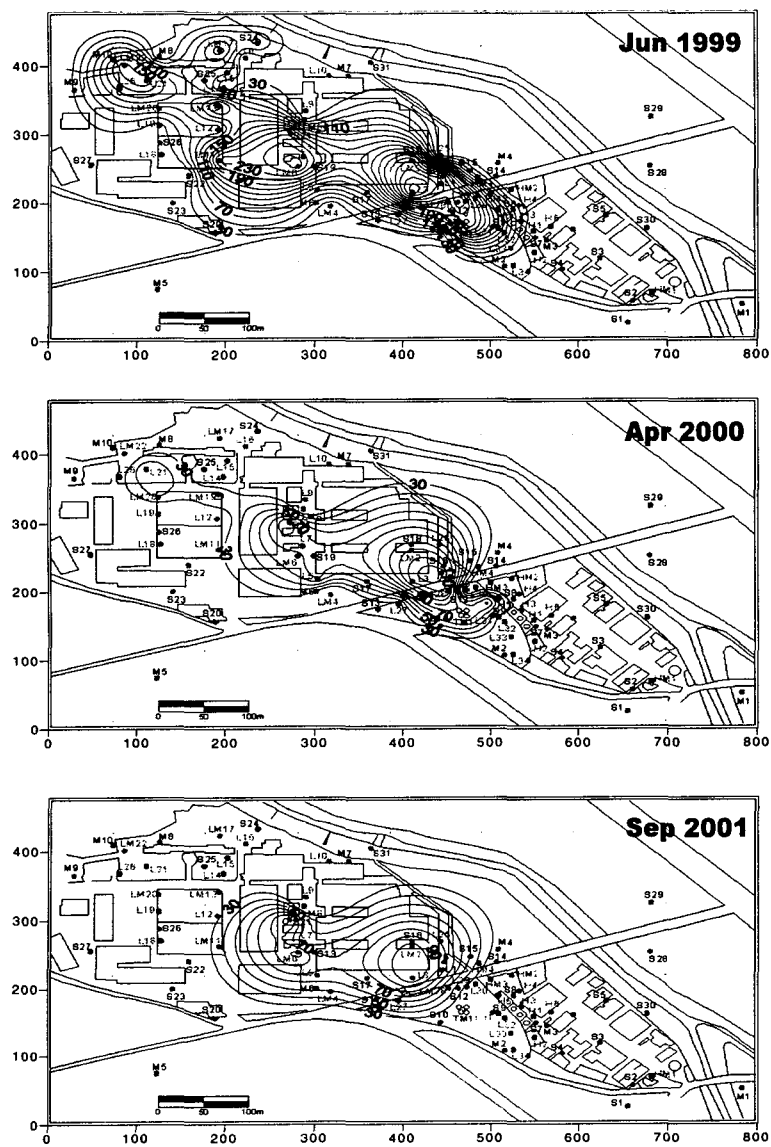


그림 5. 시기별 지하수 중 TEX 분포변화(mg/L)

### 라. 모델 시뮬레이션 평가

1999년 6월을 기점으로 오염운의 거동과 자연저감을 예측하기 위하여, 모두 54개 지점에서 시기별로 8차례 지하수의 오염농도를 관측하였으며, MODFLOW를 이용하여 지하수 유동체계를 보정한 후, RT3D로 농도보정을 하여 5, 10, 20년 후를 각각 예측하였다. 사용된 모델은 다양한 전자 수용체를 이용한 동력학적으로 제한된 BTEX 분해(Kinetic-limited Degradation of BTEX using Multiple Electron Acceptors) 반응모델을 사용하였다.

1999. 6월 오염운 중심의 농도는 약 350 mg/ℓ이었으나 2001. 9월의 오염운 중심의 농도는 약 230 mg/ℓ으로 2년 2개월이 조금 지나는 동안(809일 경과) 농도가 대략 120 mg/ℓ 감소하였음을 알 수 있다. 또한 오염운의 중심이 809일이 경과한 후 약 81 m 이동하였지만, 오염운은 수축되고 있음을 확인할 수 있다.

이러한 보정결과를 바탕으로 오염운의 거동과 자연저감을 예측한 결과, 20년의 시간이 경과 후 오염운의 중심은 J 모직 부지경계까지 이동하며 그 때의 오염운 중심의 농도는 약 26 mg/ℓ로 초기농도의 약 93%가 자연저감 될 것으로 예측된다.

지하수 내 TEX농도와 토양 내 TEX농도간의 회귀직선공식에 의거 토양 내 TEX농도가 우려기준(80 mg/kg이상)이 되는 지하수의 농도는 58.858 mg/ℓ이다. 따라서, 모델 예측에 의해 16년 후 지하수의 오염운 중심의 농도는 58.8 mg/ℓ이하가 되며, 이때 조사지역 토양의 TEX농도가 토양오염 우려기준이하가 될 것으로 예측된다.

## 3.8. 논 의

연구대상부지에서 NA가 성공적으로 진행되고 있음이 일련의 증거들을 통해 증명되었다. 부지조사를 통해 위해성평가를 하였으며, 초기자료를 바탕으로 모델링을 적용하여 MNA의 선별작업을 하였다. 이러한 평가를 바탕으로 MNA의 적용가능성을 검증하였으며, 3년에 걸쳐 수행하였다. 그 결과 NA를 증명하는 일차적인 일련의 증거들과 이차적인 일련의 증거들이 충분히 수집되었으며, 이 같은 사실은 대상부지에서 자연저감이 발생하고 있음을 증명하는 것이다.

또한 지하수 중 TEX농도와 토양 중 TEX농도와의 상관성을 평가하여, 지하수 운명·이송모델(RT-3D)의 결과와 결합시켜 토양 중 TEX농도의 저감정도를 예측하는 기법을 개발하였다.

### 3.9. 결 론

- 1) TEX의 MNA는 단계적으로 일련의 증거를 수집함으로써 성공적으로 수행되고 있음이 증명되었다.
- 2) 위해성 평가 모델인 RBCA를 사용하여 Tier 1단계 (on-site)의 평가를 하였다. 기준위해성평가(Baseline Risk Assessment)와 누적위해성평가를 한 결과 지하수를 제외한 모든 경로(공기노출 및 토양노출)에서 기준이하로 나타났다. 지하수를 음용 및 사용하는 경우가 없어 지하수는 위해성 면에서는 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.
- 3) 오염원은 천천히 이동하고 있으나, 그 규모는 축소되고 있으며 시기에 따른 농도 또한 감소하고 있다. 이는 일차적인 일련의 증거로써 NA가 발생하고 있음을 증명한다.
- 4) TEX의 농도와 전자수용체 등 영향인자와의 관계분석결과, 대상부지는 혐기성 상태에서 토착미생물에 의한 오염물질의 생분해가 이루어지고 있는 것으로 판단된다.
- 5) 토양깊이별로 채취한 시료의 농도와 지하수의 농도와의 상관성을 조사한 결과는 토양 2~3m 깊이에서 채취한 TEX의 농도가 지하수 중의 TEX농도와 높은 상관성( $r=0.876$ )을 보이고 있으며, 그 회귀식은  $y = 1.2108x + 8.7344$ 이다.
- 6) RT-3D 모델 모사결과, 오염원의 중심이 809일이 경과한 후 약 81 m 이동하였지만, 오염원은 수축되고 있고 농도는 약 120 mg/ℓ 감소하였음을 확인할 수 있다.
- 7) RT-3D 모델을 통한 오염원의 거동과 자연저감을 예측한 결과, 20년의 시간이 경과 후 오염원의 중심은 J 모직 부지경계까지 이동하며 그 때의 오염원 중심의 농도는 약 26 mg/ℓ로 초기농도의 약 93%가 자연저감 될 것으로 예측된다.
- 8) 지하수와 토양 내 TEX농도간의 회귀직선공식과 지하수 운명·이송모델(RT-3D)을 통한 예측결과를 연계해서 사용하면, 토양 내 TEX농도는 약 16년 후 토양오염 우려기준이하가 될 것으로 예측된다.

## 4. MNA기법의 적용성과 적용확대를 위한 발전방향

### 4.1. 현황 및 문제점

#### 가. 제도적인 면

##### ▶ 토양환경보전법

- 시행령 제10조 2항의 규정에 의거 특정토양오염유발시설의 방지시설 등에 관한 고시 제3조와 관련하여 자연분해법을 오염토양정화방법의 하나로 규정.
- 법 15조 관련 정기적인 토양오염도검사나 토양오염실태조사결과 토양오염우려기준 이상을 초과하는 지역은 최대 4년의 기한 내에 복원하도록 규정.

##### ▶ 지하수법

- 제16조의 3항과 관련 지하수유발시설관리자는 지하수기준을 초과하여 정화 명령을 받은 경우 정화방법, 정화기간 등이 포함된 정화계획서를 작성하여 시장·군수에게 제출해야 한다.

#### 나. 기술적 측면

- ▶ 정화기법으로써의 MNA적용을 위한 안내서 등 관련 정보가 매우 부족하다
- ▶ 자연정화기법의 적용을 위해서는 여러 단계의 확인과정을 거쳐야 하며 각 단계별 오염부지소유자와 규제자(환경청 등)간에 긴밀한 협의 및 자문이 필요하나 이에 대한 전문성이 부족하다.

### 4.2. 현 상태에서의 MNA의 적용성

- ▶ 일반적인 공학기술과 병용하여 보조기술로 적용 가능함.
- ▶ 모니터링결과 오염물질의 자연저감효과가 나타나는 지역의 경우 대상오염물질(유류)의 농도가 토양오염우려기준과 대책기준사이로 4년 이내 토양오염우려기준 이하로 감소될 수 있는 지역에 한정하여 적용, 이때 해당기간 내 우

려기준 이내로 내려가지 않을 경우 응용 NA를 적용.

※ 지하수법에는 정화기한이 명시되어 있지 않고, 두 법간에 관리 대상물질도 상이함.

#### 4.3. 적용확대를 위한 발전방향

- ▶ 오염부지의 관리를 위해성 개념도입. 복원기한은 부지의 위해성정도에 따라 차등 적용할 수 있도록 수 개 그룹으로 구분
- ▶ 적용범위 등 관련 법적 근거 마련
- ▶ 토양·지하수업무의 통합관리를 위해 환경부내 소관업무를 일원화하고 중기적으로는 단일법 제정
- ▶ MNA적용 지침서의 작성 등 이용자를 위한 각종 관련 정보 제공
- ▶ 규제자(해당 공무원)의 전문성 향상을 위한 교육프로그램 신설

#### 4. 참고문헌

1. American society for testing and materials, 1996. Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites, ASTM E 1739-95, Philadelphia, P. A.
2. Bitterfeld/ Spittelwasser Site Case Study, Comparison of solutions for a large contamination based on different national policies, ConSoil 2000.
3. Bonaventura, C., and F. M. Johnson. 1997. Healthy environments for healthy people: Bioremediation today and tomorrow. Environmental Health Perspectives 105(Supplement 1) : 5~20.
4. Domenico, P. A. and Franklin, W. S., 1990, Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley & Sons, Inc.
5. EPA/600/R-98/128, US EPA, 1998, Technical Protocol for Evaluating Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Ground Water.
6. Environment Agency, 2000, Guidance on the assessment and monitoring of natural attenuation of contaminants in groundwater, R&D Publication 95.
7. Fetter, C. W., 1994, Applied Hydrogeology, 3rd ed., Prentice Hall, Inc.

Englewood Cliffs.

8. John A. Connor, Richard L. Bowers, J. Peter Nevin, R. Todd Licher. 1998. Software Guidance Manual for RBCA Tool Kit for chemical Releases, Groundwater Services, INC. Houston, Texas.
9. Lee, Jin-Yong, 2001, Environmental site assessment and evaluation of attenuation characteristics for a petroleum contaminated site, Thesis for A Ph. D. degree, school of earth and environmental sciences, Seoul National University.
10. Lee, S. Y., Lee, M. H., *et al.*, 2000, Monitored Natural Attenuation for Contaminated Soil and Groundwater Remediation: Concept and Application, Proceedings of the Commemorative International Symposium for the 40th Anniversary of KSACB : 45~63.
11. NRC. 1994. Alternatives for Ground Water Cleanup. Washington. D.C. : National Academy Press.
12. Parsons Engineering Science, Inc., 1999, Natural attenuation of fuel hydrocarbons performance and cost results from multiple air force demonstration sites, Air Force Center for Environmental Excellence.
13. Todd H. Wiedemeir, Wilson, J.T *et al.*, 1995, Technical Protocol for Implementing Intrinsic Remediation with Long-term Monitoring for Natural Attenuation of Fuel Contamination Dissolved in Groundwater, Vol I, Air Force Center for Environmental Excellence Technology Transfer Division, Brooks Air Force Base, San Antonio, Texas.
14. 건설부, 2001, 지하수법.
15. 이민효, 이석영 외 10인, 1999, 자연정화촉진방법에 의한 유류오염부 지에서의 유류분해능에 관한 연구(I), 국립환경연구원보고서.
16. 이민효, 이길철 외 9인, 2000, 자연정화촉진방법에 의한 유류오염부 지에서의 유류분해능에 관한 연구(II), 국립환경연구원보고서.
17. 이민효, 이길철 외 9인, 2000, 자연정화촉진방법에 의한 유류오염부 지에서의 유류분해능에 관한 연구(III), 국립환경연구원보고서.
18. 한정상, 한규상, 1998 오염지하수·토양의 자연평화와 위해성평가, 도서출판 한림원.
19. 환경부, 1999, 토양오염공정시험방법.
20. 환경부, 1999, 수질오염공정시험방법.
21. 환경부, 2002, 토양환경보전법.