

**Assessment of Monitored Natural Attenuation as Remediation
Approach for a BTEX Contaminated Site in Uiwang City**
(의왕 시내 BTEX 오염 부지에서 자연 정화법 이용 적합성 고찰)

이 민효, 윤 정기, 박 종환, 이 문순, 강 진규, 이 석영*

국립환경연구원, 토양환경과

*Environmental Sciences Division, Oak Ridge National Laboratory

(Fax 02 358 2961, E-mail syl@ornl.gov)

Summary

In the United States (U.S.), the monitored natural attenuation (MNA) approach has been used as an alternative remedial option for organic and inorganic compounds retained in soil and dissolved in groundwater. The U.S. Environmental Protection Agency (EPA) defines the MNA as "*in-situ* naturally-occurring processes include biodegradation, diffusion, dilution, sorption, volatilization, and/or chemical and biochemical stabilization of contaminants and reduce contaminant toxicity, mobility or volume to the levels that are protective of human health and the environment".

The Department of Soil Environment, National Institute Environmental Research (NIER) is in the process for demonstrating the MNA approach as a potential remedial option for the BTEX contaminated site in Uiwang City. The project is charactering the research site in terms of the nature and extend of contamination, biological degradation rate, and geochemical and hydrological properties. The microbial-degradation rate and effectiveness of nutrient and redox supplements will be determined through laboratory batch and column tests.

The geochemical process will be monitored for determining the concentration changes of chemical species involved in the electron transfer processes that include methanogenesis, sulfate and iron reduction, denitrification,

and aerobic respiration. Through field works, critical soil and hydrogeologic parameters will be acquired to simulate the effects of dispersion, advection, sorption, and biodegradation on the fate and transport of the dissolved-phase BTEX plume using Bioplume III model. The objectives of this multi-years research project are (1) to evaluate the MNA approach using the BTEX contaminated site in Uiwang City, (2) to establish a standard protocol for future application of the approach, (3) to investigate applicability of the passive approach as a secondary treatment remedy after active treatments.

In this presentation, the overall picture and philosophy behind the MNA approach will be reviewed. Detailed discussions of the site characterization/monitoring plans and risk-based decision-making processes for the demonstration site will be included.

1. Introduction

토양 및 지하수의 오염문제는 전국적으로 심각한 문제가 되어 토양환경보전법과 지하수환경보전법등이 제정·시행되고 있다. 그 중 유류에 의한 오염은 더욱 시급히 해결을 필요로 하고 있다. 따라서 그에 부응하는 유류 오염 부지의 토양 및 지하수 정화방법에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으며, 상용화된 새로운 기술들이 널리 보급되고 있다(한국토양환경학회, 1997). 이러한 기술들은 기술자체에 장단점들도 있으나 오염지역 자체의 특수성 때문에 실제 이용 면에서 많은 제약을 받고 있다. 오염부지의 특성에 따라 다르기는 하지만 근래들어 미국에서는 “Monitored Natural Attenuation (MNA)”에 의한 정화도 하나의 remedial option (alternatives)으로 널리 보급되고 있다(Wiedemeier et al., 1998). U.S. EPA는 MNA를 “인위적인 노력 없이 토양과 지하수 내 오염물질의 농도, 독성, 이동, 부피가 자연적으로 감소되는 과정으로, 그 감소 메카니즘에는 생분해, 확산, 희석, 흡착, 휘발, 화학적-생물학적 안정화가 포함된다”고 정의하고 있다(U.S. EPA, 1997).

국립환경연구원에서는 MNA를 의왕시내 오염부지 현장을 중심으로 연구함으로써 이러한 방법이 국내에서 활용되는데 도움을 주고자 하였다. 실험부지로 선택된 의왕시 오염부지는 주로 BTEX, 그 중에서도 toluene에 의해 심하게 오염된 장소로,

오랫동안 토양의 vadous zone과 지하수를 통하여 오염물질의 이동현상을 보여주고 있는 곳이다(국립환경연구원, 1999).

본 연구의 목적은 (1) 실험실 내에서 batch와 column test를 통하여 biodegradation rate과 불포화 및 포화상태에서 toluene의 mobility를 점검하고, (2) 현장 정밀 조사를 통하여 오염물질의 분포, biogeochemical process, hydrological process들을 이해하며, (3) 장기적인 monitoring을 수행한 후 model simulation을 통하여 long-term contaminant fate와 redistribution을 예측한 다음, (4) risk assessment와 cost-benefit analysis를 통한 alternative들을 평가해 봄으로써, (5) 전체적으로 MNA를 remediation option으로 받아들일지 여부에 대한 판단의 참고로 삼고자 하는데 있다. 본 발표에서는 의왕시 오염 부지를 중심으로 이러한 본 연구의 계획과 현재 진행상태를 중점적으로 개진하고자 한다.

2. Site Description

오염부지는 경기도 의왕시에 위치하고 있으며, 본 지역의 지질은 Precambrian기의 granitic gneiss로 형성되어 있다(Fig 1). 토양은 광물이 풍화된 후 old stream을 따라 이동되어 축적된 alluvium을 모재로 형성되었으며, alluvium은 자갈, 모래, 점토 등이 혼합된 비교적 투수율이 높은 매질이었다. 그 alluvium의 밑에는 모암이 풍화된 잔적토(saprolite)로 형성되어 천층 지하수와 심층 지하수를 분리시키는 역할을 하고 있는 것으로 추정된다.

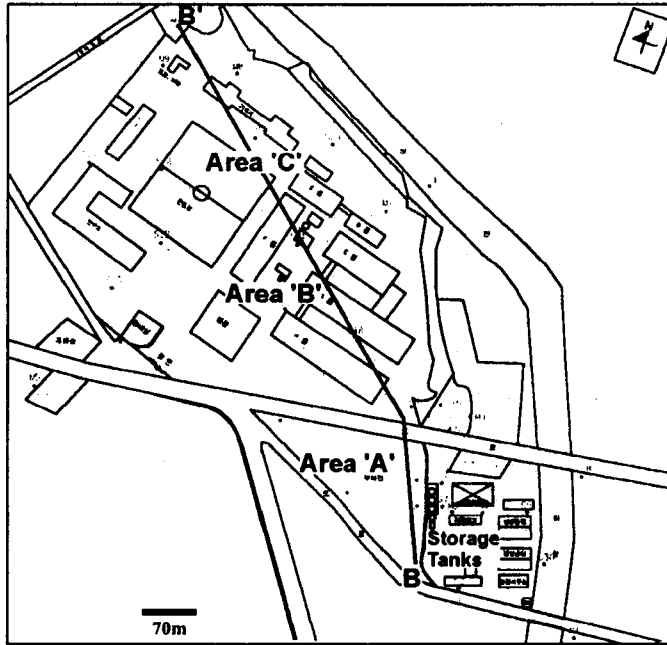


Fig. 1. Schematic diagram of the study site

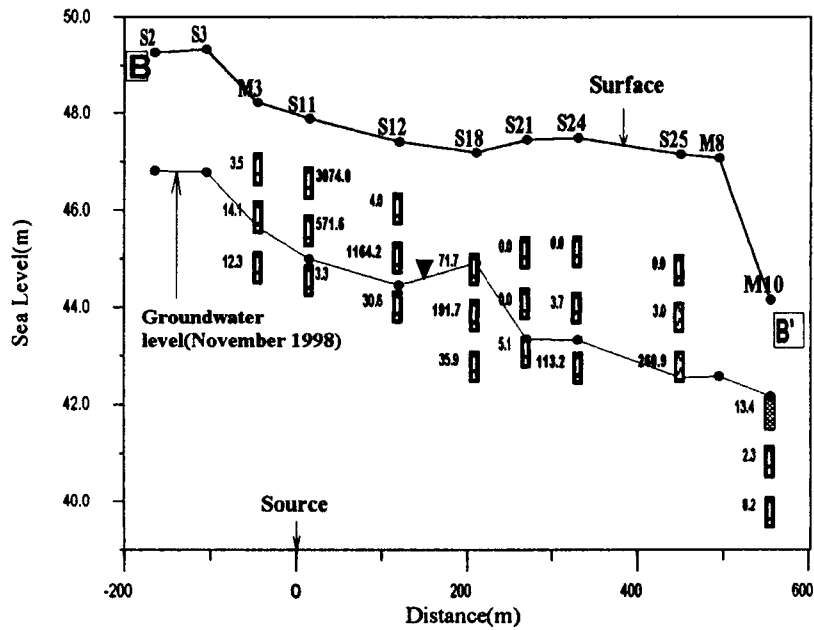


Fig.2. BTEX contents(mg/kg) at the different depths of the soils along a cross section(B-B', see Figure 1) of the research area.

토양과 지하수의 오염분포는 BTEX 저장탱크의 주변에 가장 심하게 오염되어 있으며, 그 오염물질의 많은 부분이 이동되어 plume의 유동거리는 지하수의 흐름방향으로 약 600 m, 그 쪽은 plume의 중간지점에서 150 m 정도였다(국립환경연구원, 1999). 토양 오염깊이는 지표로부터 8 m정도이며, 오염원으로부터 멀어질수록 깊어지며 오염 극대치도 plume의 이동방향에 따라 낮아지고 있었다(Fig 2). 지하수의 오염농도도 지하수의 흐름에 따라 낮아지고 있으며, 이에 대해서는 앞으로의 조사에 의해 자세히 규명될 것이다. 현재의 data만으로는 MNA적용의 적합성여부 평가에 어려움이 있기 때문에, 현재 현장에 간이 측정 well과 장기 monitoring well을 설치중에 있다.

3. Approach for Assessment

Hydrological data collection: 지하수의 특성조사를 통하여 다음과 같은 영향인자들의 수치를 수집하고자 한다. 지하수를 통한 BTEX의 이동에 영향을 미치는 인자는 (1) groundwater hydraulics, (2) hydraulic conductivity, (3) effective porosity, (4) advective groundwater velocity, (5) preferential flow paths, (6) groundwater user 등으로 이중 많은 부분은 개략조사를 통하여 측정되었고, 정밀조사에 의해 보다 상세한 data를 확보하고자 하고 있으나, 현재로는 지하수 경로에 영향을 미칠수 있는 지질단층현상과 지하수의 사용자는 조사 지역 내에는 없는 것으로 알려졌다.

Soil and geochemistry: 토양 pH, texture, mineralogy, total organic carbon 등 baseline data를 수집하여 geochemical processes를 이해하는데 사용하고자 한다. 토양내 residual BTEX phase의 분포와 풍화(differential vaporization and dissolution)에 의한 조성변화를 추정하고, 지하수에 용해된 BTEX의 조성비율의 변화도 plume의 방향과 거리에 따라서 측정할 예정이다. 개략조사의 결과에 의하면 많은 양의 BTEX가 토양의 불포화층에 잔류하고 있는 것으로 나타났기 때문에, BTEX의 이동을 추정할 수 있는 기존 vadous-zone transport model을 선택, 평가할 필요가 있다는 결론을 내렸다. 지하수의 화학적인 성질들은 생분해 속도를 결정하는 중요한 indicator들로서, 본 연구에서는 용존 산소량, nitrate/nitrite의 감소, ferrous iron의 증가, sulfate의 감소, methane의 생성, redox potential의 변화 등을

지속적으로 조사하여 BTEX의 감소 속도와 비교 분석하여 conceptual model에 이용하고자 한다.

Groundwater model: 오염물질인 BTEX의 지하수내 이동과 변화에 대한 이해는 site assessment에 중요한 부분이며 그것은 modeling으로 이루어 질수 있다. Modeling은 (1) advection, dispersion, sorption, and biodegradation process들에 의한 오염범위의 확장과 농도를 예측하고, (2) plume의 확장에 따른 receptors의 위해도를 평가하며, 그리고 (3) MNA를 remedial option으로 고려할 때 필요하다. 본 연구에서는 Bioplume III computer model을 사용하여 자연적으로 일어나는 이러한 위의 process들에 의해 지하수에 용해된 BTEX의 이동과 정화의 가능성을 예측하고자 한다. 이 model은 BTEX를 생분해할 수 있는 충분한 indigenous microbial population이 있다는 것과 충분한 양의 electron acceptor가 지하수에 있다고 가정하고 있다. Model의 input data로는 BTEX의 농도, hydraulic conductivity, electron acceptors, dispersivity, retardation, reaeration등으로써 calibration과 sensitivity analysis를 거쳐, simulation의 결과를 현재의 plume과 앞으로의 확장을 예측, 비교 평가하고자 한다.

4. Alternatives and Evaluation

지난 3개월동안의 조사 결과를 참고로 다음의 4가지 alternative를 선정하였으며 그 alternative들은 다음과 같은 가정 하에서 선정되었다.

- (1) Receptor는 현재 부지밖에 위치한 지역에서 지하수를 먹는 물로 사용하는 주민, 그리고 천층 지하수의 일부가 주변을 흐르고 있는 하천으로 들어와서 surface water를 오염시킬 때 생기는 환경오염을 들이다.
- (2) 현재 plume의 영향을 받는 지역은 공장부지로서 소유자가 계속 사용하며 (brown field), 사용자는 지하수를 이용할 계획이 없다.
- (3) 현재 토양과 지하수의 오염 기준치들을 regulatory guide로 이용하지만 land value에 큰 영향을 미치지 않는 한 cleanup 기준치는 risk assessment를 통하여 조정될수 있다(발표자의 의견).

위의 가정을 고려하여 다음과 같은 alternative들로 나누어 remediation option으로의 평가를 시도하였다.

Alternative-1: MNA를 기본 정화방법으로 설정하고 장기 monitoring계획을 수립하는 방법.

Alternative-2: MNA를 area "B"와 "C"의 정화방법으로 설정하고 area "A"의 오염물질(residual source)은 공학적인 방법으로 제거한 후 계속 monitoring을 하는 방법(Fig. 1 참조).

Alternative-3: Enhanced MNA를 area "B"와 "C"의 정화방법으로 설정하고 area "A"의 오염물질은 공학적으로 제거한후 장기 monitoring을 계속하는 방법 (여기서 enhanced라는 용어는 간단하고 경제적인 방법으로 생분해 속도를 촉진시키는 것을 의미하는데 공기주입에 의한 촉진 방법을 예로 들 수 있다).

Alternative-4: Area "A"와 "B"의 오염물질을 공학적으로 제거한 후 잔류하는 BTEX를 area "C"와 함께 MNA로 정화하는 방법.

평가의 기준은 long-term effectiveness와 performance, implementability, 그리고 cost등에 두었으며 그중 implementability에는 부지의 특성, 위에서 가정한 potential exposure pathways와 remediation goal 등을 고려하였다. 앞으로 계속될 연구를 위의 평가 기준에 따라 고려할 때 "alternatives-2"나 "alternatives-3"중에서 하나가 가장 적합할 것으로 고려되는데, 그 이유는 다음과 같다.

- (1) 부지 이용도를 고려할 때 area "A"의 일부는 오염원인자의 소유가 아니며, 소유주는 그 대지를 처분하거나 개발할 계획으로 있어 그 정화가 시급히 요구되고 있으며,
- (2) Area "A"에는 불포화층에 BTEX가 많이 잔류하고 있어 지속적인 source로 남아 있을 것이며, MNA의 근본적인 평가수단인 오염 지하수의 확산과 생분해 modeling만으로는 평가하기가 어려운 점을 들 수 있다.
- (3) 여기서 alternatives-4를 선호하지 않는 이유는 area "B"의 오염은 plume의 이동에서 온 이차적인 오염이며, 건물들이 많이 위치하고 있어 공학적인 정화는 건물들의 기반에 영향을 줄 가능성이 있다는 우려 때문이다.

위에서 서술한 alternatives option들은 MNA approach를 설명하기 위하여 발표자가 개인적인 의사로 평가해본 것이며, 국립환경연구원의 공식적인 입장이 아님을 강조하는 바이다.

5. Reference

한국토양환경학회. 1997. 오염토양 복원 기술 및 제도 발전에 관한 연구용역 국립환경연구원. 서울.

Wiedemeier, T., J. T. Wilson, D. H. Kampbell, R. N. Miller, J. E. Hanson. 1998. Technical Protocol for Implementing Intrinsic Remediation with Long-term Monitoring for Natural Attenuation of Fuel Contamination Dissolved in Groundwater. Vol II. Air Force Center for Environmental Excellence Technology Transfer Division. Brooks AFB. San Antonio. Texas.

U.S. EPA. 1997. Use of Monitored Natural Attenuation at Superfund, RCRA Corrective Action, and Underground Storage Tank Sites. Office of Solid Waste and Emergency Response. U.S. Environmental Protection Agency. Washington DC.

국립환경연구원. 1999. 의왕시 소재 유류 오염 부지 등에 대한 토양정밀조사 보고서. 국립환경연구원. 서울.