

Research Paper

국내 유류오염 군부지 내 자연저감기법 적용 사례 연구

이 환 · 강선홍

광운대학교

A Case Study of Monitored Natural Attenuation at a Military Site Contaminated by Petroleum Hydrocarbon in Korea

Hwan Lee · Seonhong Kang

Kwangwoon University

요약 : 본 연구에서는 유류오염 지역인 유류보급 군부대 일대의 지하수에 대한 수질 측정 및 분석, 추적 자시험, 지하수유형분석 등 수리지질학적 특성을 통하여 오염부지에서 나타나는 자연저감의 효과를 파악하였다. 또한 이 결과를 반영하여 최종적으로 거리별 자연 저감을 및 발현된 생분해능 등을 평가하였다. 거리에 따른 자연저감율을 평가한 결과, 선형기율기(K/V_x)는 -0.0248 로 계산되었으며 산정된 체적저감율은 $1.7 \times 10^{-3}/\text{day}$ 로 나타났다. 연구지역의 발현된 BTEX 총 생분해능은 $9.1 \sim 10.0 \text{ mg/L}$ 의 범위(평균 9.7 mg/L)에 있으며 탈질화 과정이 약 63.6%로 가장 큰 영향을 주는 redox 과정임을 확인하였다. 본 유류오염지역의 지하수 BTEX 오염농도 평균 1.326 mg/L 임을 고려할 때 생분해능은 충분할 것으로 판단된다.

주요어 : 유류오염부지, BTEX, 자연정화, 생분해능

Abstract : In this study, the efficiency of natural attenuation was evaluated through the hydrogeological characteristics such as monitoring and analyses, tracer tests, chemical composition analysis of the groundwater at a military site contaminated by petroleum hydrocarbon in Korea. Also, based on the results, the natural attenuation rate by distance and the expressed biodegradation capacity(EBC) was evaluated. The regression slope of $-0.0248(K/V_x)$ and bulk attenuation rate of $1.7 \times 10^{-3}/\text{day}$ were calculated respectively. The range of total expressed biodegradation capacity(EBC) of BTEX was shown from 9.1 mg/L to 10.0 mg/L (average 9.7 mg/L). It was confirmed that the denitrification which was expressed about 63.6% in the total EBC is the largest influence redox process. Consequently, the biodegradation capacity is considered to be sufficient for remediation in the BTEX average concentration of 1.326 mg/L .

Keywords : Petroleum contaminated site, BTEX, Natural attenuation, Biodegradation capacity

First Author: Hwan Lee, Dept. of Environmental Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea, Tel: +82-2-581-2502, E-mail: kzy9018@hanmail.net

Corresponding Author: Seonhong Kang, Dept. of Environmental Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea, Tel: +82-2-940-5075, E-mail: seonhong@kw.ac.kr

Received: 7 October, 2016. Revised: 17 October, 2016. Accepted: 18 October, 2016.

I. 서론

자연저감(natural attenuation)은 환경매체 내에서 자연적인 기작에 의해 오염물질의 농도, 질량, 독성, 이동성 혹은 부피가 감소하는 것을 말하며 이러한 작용을 이용하여 합리적인 시간 내에 사람의 건강과 환경에 위해를 가하지 않을 정도까지 정화를 이루어내는 것을 자연정화기술(monitored natural attenuation)이라 한다(USEPA 1997; Wiedemeier et al. 1999; Cleary et al. 2001). 이러한 자연정화 기술이 오염 지하수 정화 방안으로 관심의 대상이 되는 이유는 한정된 사회적 자원을 효율적으로 배분하기 위하여 가능한 경제적 비용으로 합리적인 시간 내에 인간과 환경에 위해를 가하지 않게 정화목표를 성취하는데 있다. 오염물질의 오염도가 자연저감 기법으로 어느 정도까지 충분히 감소할 수 있다면 현재의 오염도를 평가하고 그 평가를 기초로 정화비용을 최소화하는 것이며 나머지는 자연의 정화능력에 의존하는 것이다.

만약 오염물질의 오염도가 주어진 시간 내에 충분히 저감된다고 판단되면 오염물질의 농도 변화나 이동을 잘 감시하며 혹시 있을 수 있는 다른 변수들에 대해 대비하면 된다. 이러한 개념은 위해성 평가(risk assessment)에 기초한 정화목표의 설정과 직접적인 연관을 가진다. 정화목표를 설정하는 방법에는 오염물질을 완전히 제거하거나 혹은 법이 정한 수준(MCL)까지 또는 인간에 위해를 가하는 정도를 기반으로 정화목표를 설정하는 방법 등이다(Wiedemeier et al. 1999).

자연저감을 이용한 자연정화기술은 오염된 지역을 아무것도 하지 않고 방치하는 것이 아니라, 자연정화기술을 특정오염지역의 정화방안으로 채택하기 위해서는 상당히 치밀한 조사와 오염예측기술 및 장기모니터링이 필요하다(USEPA 1998). 따라서 상황에 따라서는 자연정화방법을 선정하는 것이 매우 위험천만한 일이 될 수 있으므로 이 기술이 모든 정화지역에 해당되는 당연한 선택이 아니며, 자연정화기술은 모든 오염물질과 오염범위에 적용하기 어려우므로 충분히 계획하고 적절한 평가과정을 거친 후에만 적

용이 가능하다. 오염지역 정화처리에 자연정화기술만을 단독적으로 사용하는 예는 많지 않으며 지중처리 기법에서 자연정화법과 병행하는 경우가 많으며 이에 따른 정화의 효율성과 경제성을 향상하는데 도움이 된다(Lee 2000; Lee 2001).

지하수내 유기 오염물질의 자연저감에서 가장 일반적인 자연저감의 증거는 1) 오염운의 안정되거나 오염물질량이 감소되었다는 이력 자료 2) 전자공여체 및 전자수용체의 감소, 생분해 반응 부산물의 농도 증가, 오염물질의 농도 감소, 2차 화합물의 농도 증가 등 화학분석자료 3) 미생물학적 자료 4) 모델링 자료 등이 있다(Barker et al. 1987; McAllister & Chiang 1994; Wiedemeier et al. 1996; Chapelle 1999, Suarez & Rifai 2000).

화학분석자료 중 생분해능 평가(Expressed Biodegradation Capacity, EBC)는 배경수질과 비교하여 해당 지역의 생물학적 자연저감능을 지시함과 함께 생분해가 가능한 오염물질의 양을 추정할 수 있으며 추가적인 전자수용체의 공급이 있을 경우 생분해량의 추정이 가능하다. 생분해는 자연저감의 한 부분으로서 자연저감의 연구에서 오염물질의 질량 자체를 줄이는 기작으로써 희석 혹은 기화 등으로 인한 농도의 저감보다 실제적인 오염물질의 생분해에 의한 두드러진 저감효과를 가져온다. 아래의 식 1은 BTEX 이용인자를 이용하여 전자수용체의 배경농도와 관측된 전자수용체의 최저농도를 대입하여 발현된 생분해능의 각 과정을 산정하고 redox process가 진행정도를 판단하는데 사용된다(Wiedemeier et al. 1999).

$$EBC_x = \frac{|C_B - C_p|}{F} \quad (1)$$

여기서 EBC_x = 각 과정의 EBC, C_B = 전자수용체의 배경농도, C_p = 전자수용체 측정농도 중 최저농도, F = 이용인자

본 연구에서는 유류오염 지역인 유류보급 군부대 일대의 지하수에 대한 정기적인 수질 측정 및 분석, 추적자시험, 오염 특성분석 등 수리지질학적 특성을 통하여 오염부지에서 나타나는 자연저감의 효과를 파악하는데 있으며, 이 결과를 토대로 최종

적으로 자연저감율과 발현된 생분해능(Expressed Biodegradation Capacity, EBC)을 평가하고자 한다.

II. 실험 부지 및 방법

1. 실험 부지

대상지역은 유류물질 중 휘발유 및 경유로 오염된 지역으로 오염원인은 지하탱크에서 분기하는 송유관의 노후화로 인한 누유로 조사되었다. 유류 저장 및 취급 목적으로 상류부에는 주 오염지역인 대량탱크 시설, 하류부에는 폐기물 수집소, 주유대 시설 등이 존재하고 있다.

기존 지하수 오염조사결과에 따르면 생활용수기준 이상의 지하수의 오염농도 분포가 광범위하게 나타났다. 조사지역의 오염원인 유종을 파악하기 위해 오염관정의 자유상(Free phase) 유류에 대해 유종분석을 수행한 결과, 대체로 풍화가 진행된 휘발유와 경유가 혼재된 것으로 분석되었다(Figure 1).

대상지역의 상류쪽에는 야산이 존재하고 있으며 하류쪽에는 사면 및 평지를 이루어져 있고, 지표하 6.0 m까지는 황갈색의 모래질을 함유한 매립층(Landfilled Layer)으로 구성되었으며 그 이하 심도에서 화강암을 모암으로 하는 완전 풍화된 실트 섞인 모래질을 함유한 풍화대층을 구성되었다.

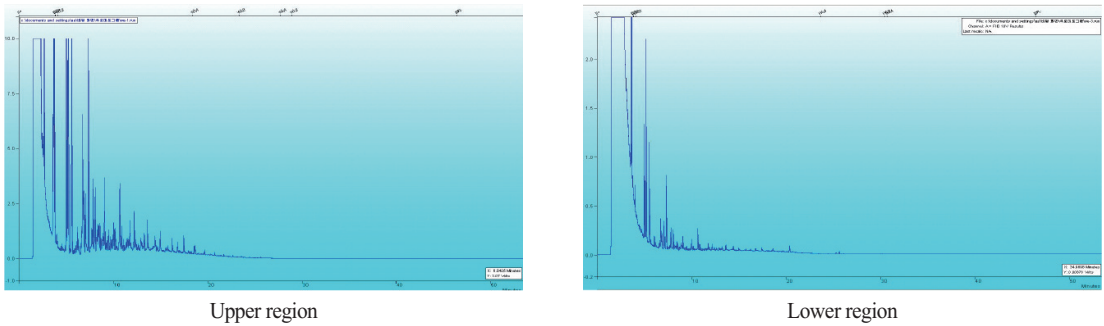


Figure 1. Chromatogram of groundwater sample

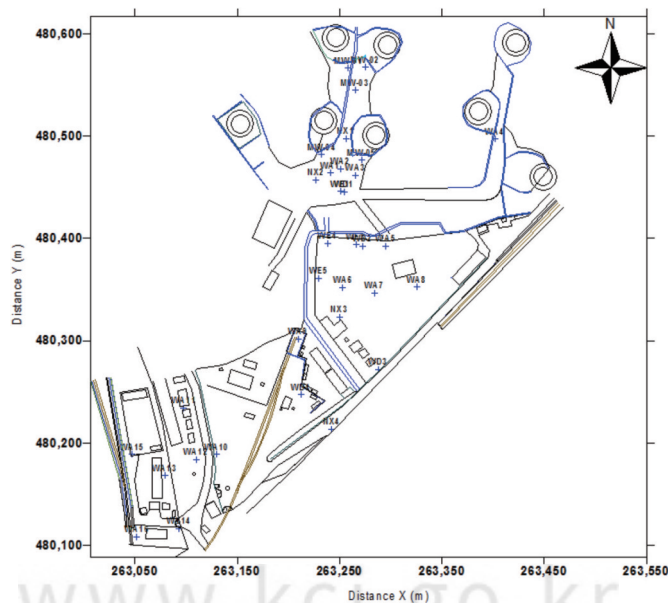


Figure 2. Distribution of groundwater monitoring well

2. 실험방법

2008년 5월부터 2009년 7월까지 총 4회에 걸쳐 32개소의 지하수 관측정을 활용하여(Figure 2), 지하수 시료에 대해 현장 수질측정 및 실내 수질분석을 실시하였다.

시료채취는 일회용 베일러를 이용하였으며 전기전도도가 안정화된 대표성을 가진 지하수를 채취하기 위해 최소 3번 이상의 퍼징을 하였고, 지하수위 측정은 Solinst사의 수동 수위측정기를 사용하였다. 현장 전자수용체 측정항목은 용존산소(Dissolved Oxygen, DO), Fe^{2+} 농도로서 대부분의 현장측정항목은 대기 접촉에 민감할 뿐만 아니라 시료 운반 과정에서 쉽게 수치가 변할 수 있으므로 채취 즉시 측정기로 분석을 실시하였다. 용존상태의 Fe^{2+} 는 UV-Spectrophotometer(DR-2010)를 이용하여 현장에서 직접 측정하였으며, 분석 가능한 농도 범위(0~3 mg/L) 이상의 농도일 경우 증류수에 일정량 희석하여 측정하였다.

실내 수질분석에 대한 시료채취는 2008년 5월과 2009년 7월까지 총 4차(1차: '08년5월, 2차: '08년12월, 3차: '09년2월, 4차: '09년7월)에 걸쳐 실시하였으며, 연구지역의 유류오염물질(BTEX)과 주요 양/음이온에 대한 농도분석을 실시하였다.

각 항목에 알맞은 전처리 후 항목별 시료 병에 채

취하였으며(Table 1), 구체적인 분석항목과 시료 채취병 및 전처리에 대한 내용은 Table 2와 같다. 양이온 항목은 분석을 위한 시료는 채취 후 0.45 μ m membrane filter에 여과하였으며 30 mL HDPE 시료 병에 먼저 15 mL 정도 담은 뒤 염산을 3~4 방울 넣고 뚜껑을 닫아 가볍게 흔들어 생성된 가스를 빼낸 뒤 다시 지하수 시료를 채워 넣었다. 채취한 모든 분석시료는 아이스박스에 냉장보관하여 분석실로 즉시 이송하였다.

추적자 시험은 오염물질의 확산에 대하여 어느 관정보다 직접적인 결과를 얻을 수 있고 연구지역 내 가장 오염도가 높은 대량탱크 지역내 3개소의 관정(INW:1개소, MW:2개소)을 대상으로 실시하였다(Figure 3).

주입정(INW)에서 추적자 물질을 주입 후 MW-1에서 추적자 물질의 브롬 이온농도 및 전기전도도(Electric Conductivity)를 측정하였다. 추적자 물질로 Kanto사의 순도 99.0%인 KBr(Potassium Bromide)을 사용하였으며 증류수 60L에 16,630 mg/L 농도로 용해한 뒤 이용하였다. Br⁻ 용액은 주입정에 60 L을 넣었으며 주입 시간은 약 30분 정도가 소요되었고, 주입한 뒤 약 1시간 간격으로 관측정에서 지하수를 채취하여 Br⁻ 이온농도와 전기전도도(EC)의 변화를 측정하였다. Br⁻이온의 농도는 오리온사(ORION

Table 1. Sampling bottles and pre-treatment methods

Analysis item		Sampling bottle	Pre-treatment
Organic compound	BTEX	40 mL Clear Vial	Not filtering
Cation ion	Ca, Mg, Na, K, Fe, NH ₄	30 mL HDPE	Filtering, Acid(HCl) treatment
Anion ion	NO ₃ , SO ₄ , Cl, HCO ₃	40 mL Clear Vial	Filtering
Alkalinity	Alkalinity	100 mL HDPE	Filtering

Table 2. Analysis methods and instruments

Analysis item		Methods	Instrument	Manufacturer
Cation ion	Ca, Mg, Na, K,	AWWA ^{a)} 3111	A.A.	Perkin Elmer/5100PC
	Fe	SW-846 ^{b)} 6020	ICP-MS	Varian/Ultramass700
	NH ₄	The standard method for water in Korea	UV	Varian/Cary 50
Anion ion	Cl, NO ₃ , SO ₄ , Br, HCO ₃	AWWA 4110	I.C.	Dionex/DX-120
	Alkalinity	AWWA 2320		

^{a)} AWWA: Standard Method (AWWA 2000)

^{b)} SW-846: Test method for evaluating solid waste, Physical/chemical method (EPA 2001)

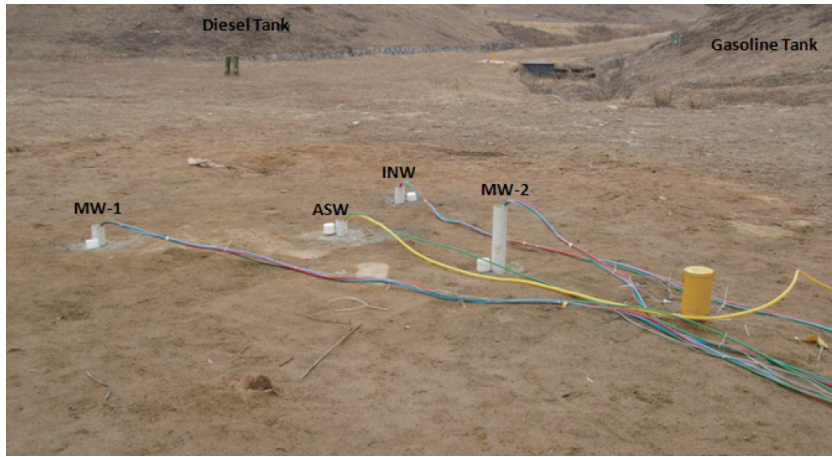


Figure 3. Location of experimental well for tracer test

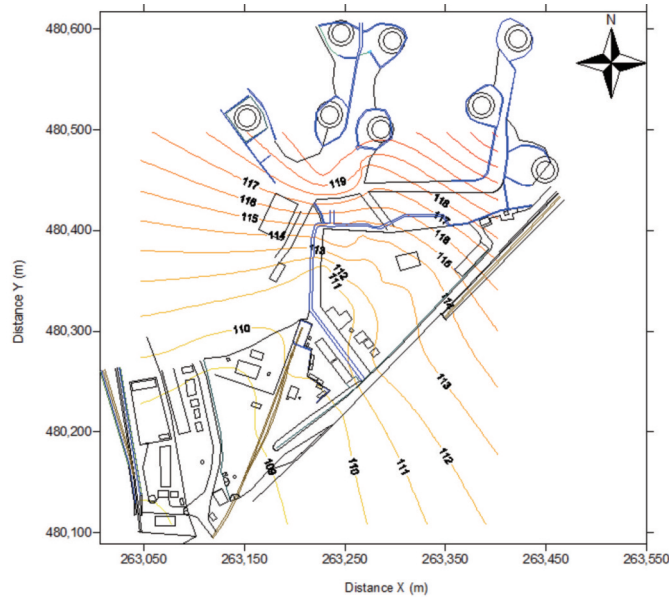


Figure 4. Distribution of groundwater flow in the study area

CO.)의 이온선택성전극(ISE) 및 미터기를 사용하였고 EC 수치변화 측정에는 호리바사(HORIBA CO.)의 전극과 미터기를 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 수리지질학적 특성분석

1) 전체 조사부지의 지하수 유동분석

2008년 5월에 조사한 수위를 바탕으로 조사지역

의 등수위도를 작성하여 지하수 유동방향을 나타내었다(Figure 4). 등수위선도는 지반고의 지형구배와 유사하게 나타났으며, 지하수의 주 흐름대는 북 또는 북동에서 남서방향인 것으로 나타났다.

2) 상류오염지역 LNAPL 유동분석

조사기간내 총 4차 걸친 상류오염지역(탱크지역)에 위치한 관측정내 자유상 유류두께 및 지하수위의 평균치 이용하여 지하수 흐름과 자유상 유류분포의 상관성을 평가하고자 하였다. 화살표는 지하수의 등

수위선을 바탕으로 작성한 지하수 흐름방향 벡터이다(Figure 5). 10 cm 이상의 자유상 유류가 존재하는 구간은 오염면적 중 좌측 상하부 길게 분포하고 있으며 이는 지하수의 주 흐름방향과 유사한 것으로 나타났다.

3) 상류오염지역 추적자 시험

추적자 시험결과, MW-1에서 브롬 이온농도와 전기전도도 수치는 유사한 추세선을 보이고 있으며, 추적자로 쓰인 Br의 농도는 배경농도 0.0 mg/L에서 최

고농도 325 mg/L로 급격한 변화를 보였다(Figure 6).

주입정과 관측정이 자연적인 지하수의 흐름방향에 위치하고 규칙적인 농도 이력곡선 자료가 존재한다면, Type Curve Matching 방법 중 상용화된 프로그램인 CATTI(Sauty & Kinzelbach 1992)의 식 2와 같이 이용해서 유효공극률(Efficiency Porosity), 종분산도(Longitudinal dispersivity)를 구할 수 있다.

$$C(x, t) = \frac{\Delta M}{2An_e \sqrt{\pi D_L t}} \exp\left[-\frac{(x-ut)^2}{4D_L t}\right] \exp(-\lambda t) \quad (2)$$

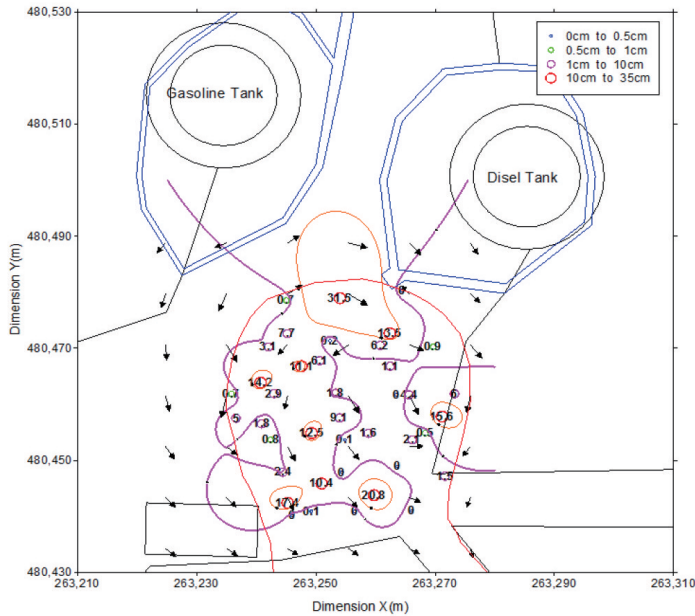


Figure 5. Distribution of free-phase LNAPL and groundwater flow in the tank area

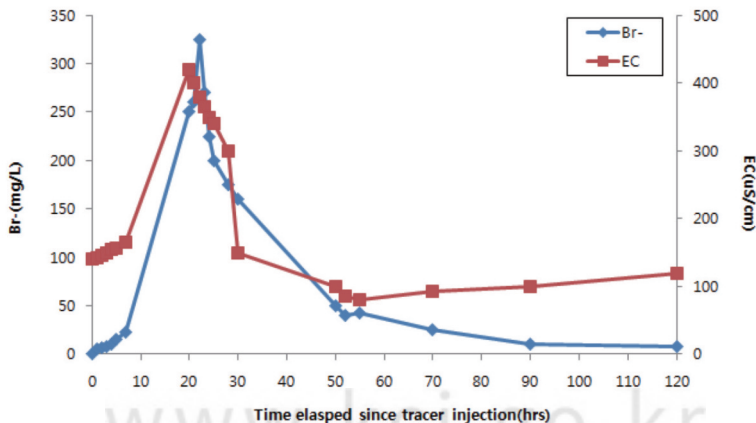


Figure 6. Variation of Br- and EC concentration in MW-1

ΔM = 단위 단면적 당 주입한 추적자의 질량 [kg], x = 주입정과 관측정 사이의 거리[m],
 A = 지하수 흐름의 단면적[m²],
 α_L = 종분산도[m], $D_L(\alpha_L u)$ = 종분산계수[m²/s],
 u = 평균선속도[m/s], λ = 붕괴비[1/s]

주입정과 관측정이 수두구배(Hydraulic Gradient) 방향으로 위치하므로, 상기 식을 이용하여 유효공극률과 종분산지수(Longitudinal dispersivity, α_L)는 0.275 및 0.1 m로 각각 산정되었다. 여기서 얻어진 유효공극률은 지하수 선형유속을 계산하는데 활용하였다.

4) 지하수 수질유형 분석

지하수는 일반적으로 지하매질을 통과하면서 수암반을 통해 각기 다른 이화학적 특성을 가지게 되고 수암반용 정도에 비례하여 용존농도를 가지게 된다. 지하수의 이화학적 특성을 평가하기 양이온 및 음이온 분석결과를 바탕으로 Piper 다이어그램에 도시하였다(Figure 7).

분석결과, 조사지역내 지하수는 대부분 전형적인 지하수 수질 유형인 Ca-HCO₃ 유형으로 나타났으며, 폐기물 수집소 부지에서는 외부 요인으로 판단되는 SO₄²⁻ 성분이 상대적으로 크게 나타남에 따라

Ca-SO₄ 유형도 확인되었다.

2. 자연저감 효과분석

1) 전자수용체의 농도변화

연구지역 내 지하수의 산화/환원환경 상태를 평가하고자 총 4차에 걸쳐 전자수용체(DO, NO₃⁻, Fe²⁺, SO₄²⁻)에 대하여 분석하였으며, 이중 DO, Fe²⁺는 현장 측정치를 이용하였다. 총 4차에 걸친 전자수용체 분석항목의 최대/최소 수치, 중앙 및 분위수(25%, 75%) 수치를 비교할 수 있도록 box plot을 도시하였다(Figure 8).

DO의 1차 측정 중간수치는 2.4 mg/L이며 2차 측정은 2.1 mg/L, 3차 측정은 1.2 mg/L로 감소하는 추세를 보이다가, 4차 측정에서 1.9 mg/L로 증가하였다. 4차 측정은 계절적 강우의 유입으로 인해 증가한 것으로 추정된다. NO₃⁻농도의 경우, 배경농도 평균치가 30.2~33.0 mg/L임을 감안 할 때 0~6.2 mg/L 범위의 낮은 수치를 보였으며 3차 측정부터 임시 증가하는 추세를 보이고 있다.

Fe²⁺의 농도는 1차 측정에서 4차 측정까지 점차 감추세를 보이고 있어 3개월 환원과정은 미비한 것으로 판단된다. SO₄²⁻농도의 경우, Fe²⁺가 시기별 증감

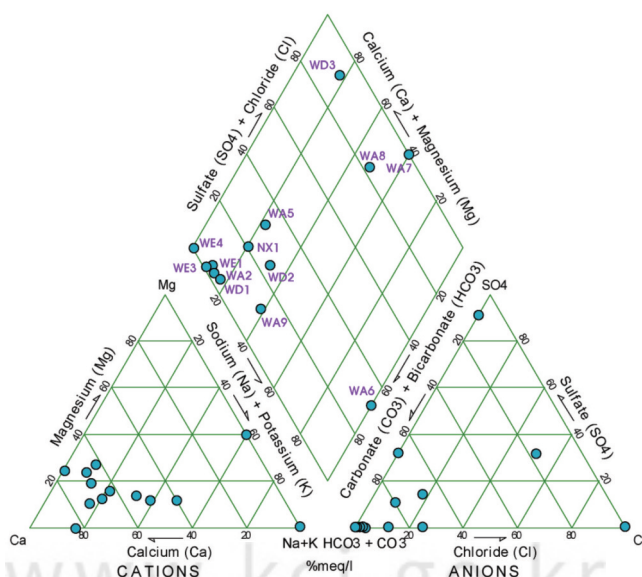


Figure 7. Piper diagram

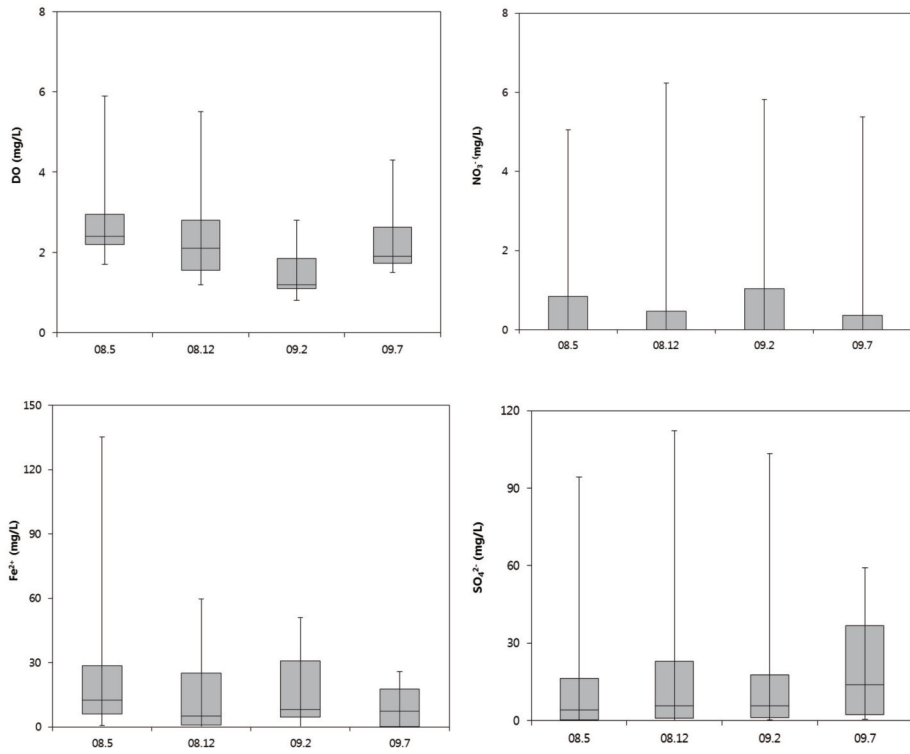


Figure 8. Box plots of redox concentration

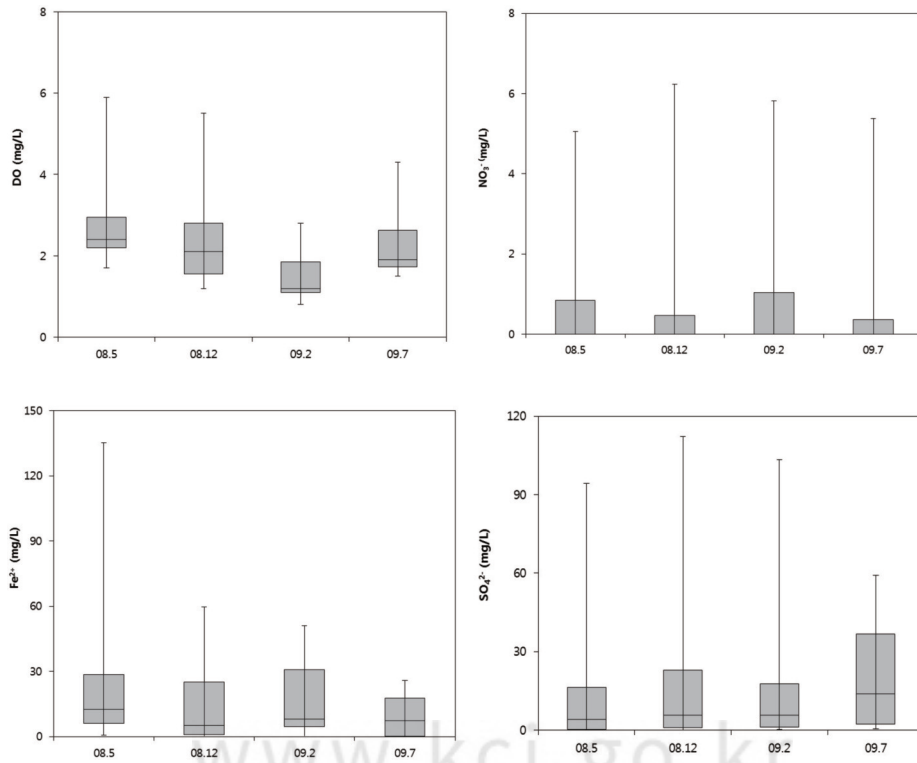


Figure 9. Box plots of BTEX concentration

추세가 반비례하고 있으며 특히 폐기물 수집소내 위치한 관정(WA-07)에서 103.4 mg/L의 높은 농도의 수치를 보여 황산염 환원과정에 의한 자연저감이 일부 진행 중인 것으로 판단된다.

2) 오염물질(BTEX)의 농도변화

본 연구기간 중 총 4차에 걸쳐 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌에 대하여 최대/최소 수치, 중앙 및 분위수(25%, 75%) 수치를 비교할 수 있도록 box plot을 도시하였다(Figure 9). 전체 평균 벤젠의 농도는 0.70 mg/L(1차)에서 1.20 mg/L(2차)로 소폭 상승하였고 이후 0.58 mg/L(3차)에서 0.14 mg/L(4차)로 전체적으로 감소하는 추세를 보였다. 전반적으로 BTEX의 개별 항목 모두에서 1차 분석시에 비교하여 2차 분석시 일부 시료(주로 대량탱크 주변과 폐기물 수집소

에서 큰 농도의 영향으로 일시 상승하였다가, 3, 4차 시 전체적으로 소폭 감소하는 것으로 나타났다.

연구지역 내 지하수는 지하수 생활용수 기준 이상의 오염상태가 확인됨에 따라 계절에 따른 장기적인 모니터링이 필요하며, 적극적인 정화가 종료된 시점 이후에 자연저감 기능에 의존할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3) 거리에 따른 저감평가

상류부의 대량탱크지역부터 하류부의 폐기물 수집소까지 Figure 4의 지하수 수두구배를 고려하여 선정된 관측정(Figure 10)을 이용하여 오염원으로부터 거리가 멀어짐에 따른 자연저감율을 평가하였다.

특히 대량탱크구간과 폐기물 수집소 사이의 사면을 형성하는 지형구배로 인한 큰 수두차를 보이고 있

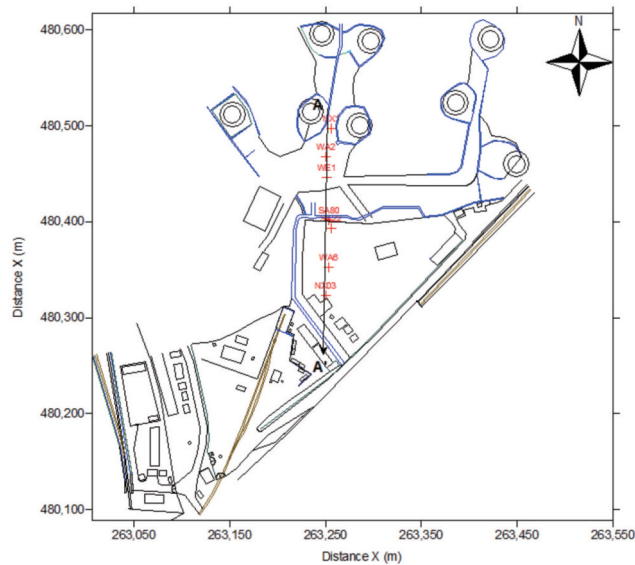


Figure 10. Distribution of groundwater monitoring well for bulk attenuation assessment

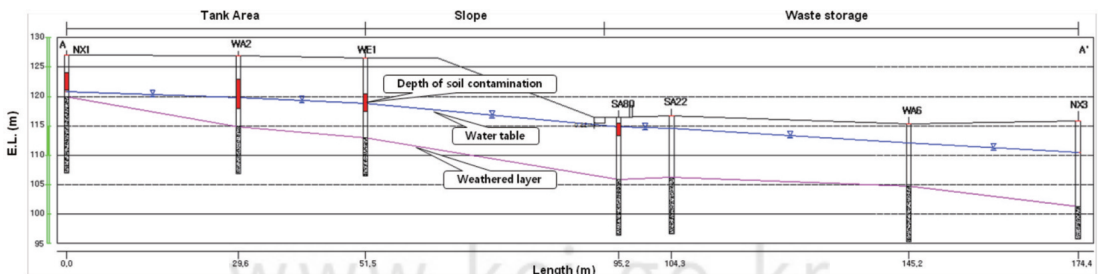


Figure 11. Longitudinal section of contamination aspect by distance from contamination source

으며 탱크 사면 직하부에는 배수로(회수트렌치)가 위치하고 있다(Figure 11). 인용관정의 수평거리에 따른 토양 및 지하수의 오염양태는 유사하게 나타났으며, 대량탱크 하단부에 위치한 WE1 관정에서 토양 및 지하수내 평균 BTEX 농도가 각각 845.9 mg/kg, 32.48 mg/L로 매우 높은 수치를 보였다. 토양오염 농도는 배수로(회수트렌치) 인접 하부에 위치한 SA80 관정에만 확인된 반면 지하수 오염농도는 폐기물 수집소 하류부에 위치한 관측정까지 확인된 것으로 나타나, 토양보다 지하수에 의해 오염범위가 더 넓게 나타났다(Figure 12).

관정 NX-01과 과 NX-03 관측정의 지하수위(EL 기준)은 120.5 m, 110.55 m이고 두 관정의 직선거리 는 174.4 m이므로 지하수 수두구배(hydraulic gradient)는 아래의 식 3과 같다.

지하수 수두구배(i) :

$$\frac{dh}{dl} = \frac{120.5 - 110.55(m)}{174.4(m)} = 0.057 \quad (3)$$

또한 수리전도도 동수구배 관계식은 아래의 식 4 와 같이 표현된다.

$$Q = K \frac{dh}{dl} A \quad (4)$$

여기서 Q: 유량(cc/sec), A: 대수층의 단면,

K: 조사구간의 평균 수리전도도

토양 매질의 유효 공극률은 추적자 시험 결과치를 인용하여 0.275이므로 지하수 선형유속은 아래의 식 5와 같다.

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \frac{q}{n_e} = \frac{(3.81 \times 10^{-4}) \times 0.057 \times 86,400}{0.275} \\ &= 6.82 \text{ cm/day} \end{aligned} \quad (5)$$

거리저감율은 오염지점에서부터 멀어지면서 지하수 유동에 의해 각 관정에서 나타나는 BTEX의 농도를 자연로그값으로 나타낸 비율이며 Figure 12에 나타내었다. 계산된 선형기울기는 $-0.0248(K/V_x)$ 이며, 상기의 지하수의 선형유속(6.82 cm/day)을 곱한 체적 저감비율은 $1.7 \times 10^{-3}/\text{day}$ 로 산정되었다.

탱크 사면에 위치한 배수로(회수트렌치)에 의한 자유상 유류 회수, 지하수 함양에 의한 희석 등 물리적인 효과로 오염물질 일부만이 폐기물 수집소로의 오염이동·확산을 가져왔을 것으로 추정된다.

4) 생분해능 평가

본 연구에서는 총 4차에 걸친 수질 측정/분석 결과치를 바탕으로 BTEX를 대상으로 생분해능평가(EBC)를 산정하였고(Table 3, 4), 오염되지 않은 최적의 배경 지하수 수질을 확보하기 위해 연구부지 반

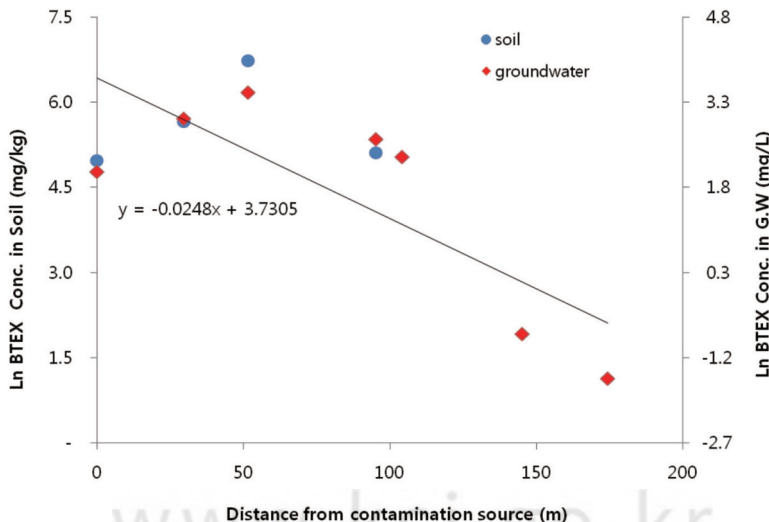


Figure 12. Variation of BTEX concentration by distance from contamination source

Table 3. Input parameter for EBCx calculation in BTEX

Parameter	F ^{a)} (mg/mg)	'08.05		'08.12		'09.02		'09.07	
		C _B	C _P	C _B	C _P	C _B	C _P	C _B	C _P
DO	3.140	6.000	1.700	6.717	1.200	3.050	0.800	5.633	1.700
NO ₃ ⁻	4.900	33.015	0.319	30.271	0.275	31.269	0.531	28.868	0.490
Fe ³⁺	21.800	0.069	0.028	0.141	0.046	0.117	0.089	0.114	0.071
SO ₄ ²⁻	4.700	9.831	0.305	10.280	0.765	10.517	0.367	14.388	0.583

^{a)} F is BTEX utilization by average mass ratio of electron acceptor and metabolic by-product(Wiedemeier et al. 1999)

Table 4. Results of EBCx calculation in BTEX

Redox condition	Calculated EBC					Ratio(%)
	'08.05	'08.12	'09.02	'09.07	Mean	
EBC _{DO} (mg/L)	1.369	1.757	0.716	1.253	1.274	13.0
EBC _{NO₃⁻} (mg/L)	6.673	6.122	6.273	5.791	6.215	63.6
EBC _{Fe³⁺} (mg/L)	0.002	0.004	0.0013	0.002	0.002	0.0
EBC _{SO₄²⁻} (mg/L)	2.027	2.024	2.1596	2.937	2.287	23.4
Total (mg/L)	10.07	9.907	9.151	9.983	9.778	100.0

경 2 km 이내의 비오염지역의 6개의 관정을 확보하여 평균 수질농도를 인용하였다.

1차 조사결과 발현된 생분해능은 EBC_{DO}는 1,369 mg/L가 산정되었고 2차 조사에서는 1,757 mg/L가 산정되었으며 3차에서는 이보다 감소한 0,716 mg/L, 그리고 4차에서는 1,253 mg/L로 산정되어 호기성 호흡으로 발현된 생분해능은 평균 1,745 mg/L로써 13%를 차지한다. 탈질화과정(Denitrification)은 1차 조사에서 6,673 mg/L로 산정되었고 2차에서는 6,121 mg/L로 산정되었으며, 추가적으로 3차에서는 6,273 mg/L로 산정되었으며 4차 조사에서는 5,791 mg/L로 전자수용체 진행과정 중 가장 우세하게 나타났다. 발현된 탈질과정의 평균 생분해능은 6,215 mg/L로써 63.6%를 차지한다. 황산염 환원과정은 1차 조사에서 2,027 mg/L로 산정되었으며 2차 조사에서는 2,024 mg/L로 다소 감소하는 경향을 나타냈으며 이후 3차, 4차 조사에서 각각 2,159 mg/L, 2,937 mg/L로 수치적으로 큰 변동을 보이지 않았으며 평균 2,287 mg/L로써 23.4%를 차지한다.

상기의 발현 생분해능의 범위는 9.1~10.0 mg/L로 본 유류오염지역의 지하수 BTEX 오염농도 평균 1,326 mg/L임을 고려할 때 생분해능은 충분할 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 유류오염 지역인 유류보급 군부대 일대의 지하수에 대한 수질인자별 농도변화, 추적자 시험, 지하수유형분석 등 수리지질학적 특성을 통하여 오염부지에서 나타나는 자연저감의 효과를 파악하고자 하였으며, 이 결과를 토대로 최종적으로 거리별 자연저감을 및 발현된 생분해능(Expressed Biodegradation Capacity, EBC) 등을 평가하고자 하였다. 연구 결과는 아래와 같다.

1. 지하수의 주 흐름대는 북 또는 북동에서 남서방향인 것으로 나타났으며, 주 오염지역인 대량탱크 부지 내 자유상 유류는 오염면적 중 좌측 상하부 길게 분포하고 있으며 이는 지하수의 주 흐름방향과 유사한 것으로 나타났다.

2. 추적자시험 결과 유효공극률은 0.275로 나타났으며 중분산지수 (α_L)는 0.1 m로 산정되었다. 지하수 수질유형은 일반적인 Ca-HCO₃ 유형으로 나타났으며 폐기물 수집소에서는 외부 요인으로 판단되는 SO₄²⁻ 성분이 상대적으로 크게 나타나 Ca-SO₄ 유형도 확인되었다.

3. 전자수용체에 대한 분석결과, 전체적인 전자수용체 항목별, 관정 위치별로 농도의 높고 낮음이 다

양하게 나타나며, 향후 오염물질 분해 및 자연저감이 충분히 일어날 것으로 사료된다. 총 4차에 걸친 BTEX 분석 결과 유류탱크 주변과 폐기물 수집소 등에서만 큰 농도 상승이 나타나고 전체적으로는 소폭 감소하였다. 연구지역 내 지하수는 지하수 생활용수 기준 이상의 오염상태가 확인됨에 따라 계절에 따른 장기적인 모니터링이 필요하며, 적극적인 정화가 종료된 시점 이후에 자연저감 기능에 의존할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 거리에 따른 자연저감율을 평가한 결과, 선형기울기는 $-0.0248(k/V_x)$ 로 계산되었으며 산정된 체적저감율(k)은 $1.7 \times 10^{-3}/\text{day}$ 로 나타났다. 또한 연구지역의 발현된 BTEX 총 생분해능은 9.1~10.0 mg/L의 범위(평균 9.7 mg/L)에 있으며 현장부지에서 탈질화 과정이 약 63.6%로 가장 큰 영향을 주는 redox 과정임을 확인하였다. 따라서 본 유류오염지역의 지하수 BTEX 평균 오염농도가 1,346 mg/L임을 고려할 때 생분해에 의한 자연저감이 충분할 것으로 판단된다.

References

- Barker JF, Patrick JF, Major D. 1987. Natural attenuation of aromatic hydrocarbons in a shallow sand aquifer. *Ground Water Monit. Rev.* 7: 64-71.
- Chapelle FH. 1999. Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated ground water: the perspectives of history and hydrology. *Ground Water.* 37: 122-132.
- Cleary RW, Rorech GJ, McCreadie H. 2001. Introduction to monitored natural attenuation [MoNA], Natural Attenuation, Risk Assessment, and Risk-Based Corrective Action: NGWA's Short Course Material. Westerville, Ohio.
- Lee CH. 2000. Site assessment and in-situ remediation technology application for contaminated sites. Ph.D. dissertation. Seoul National University. Seoul, Korea. [Korean Literature]
- Lee JY. 2001. Hydrogeological investigation and attenuation characteristics for a petroleum contaminated site. Ph.D. dissertation. Seoul National University. [Korean Literature]
- McAllister PM, Chiang CY. 1994. A practical approach to evaluate natural attenuation of contaminants in ground water. *Ground Water Monit. Rem.* 14: 161-173.
- Sauty JP, Kinzelbach W. 1992. CATTI: Computer aided tracer test interpretation. International Groundwater Modeling Center. Golden, Colorado.
- Suarez MP, Rifai HS. 2002. Evaluation of BTEX remediation by natural attenuation at a coastal facility. *Ground Water Monit.* 22: 62-77.
- USEPA. 1997. Use of monitored natural attenuation at Superfund, RCRA corrective action and underground storage tank sites. Draft interim final. OSWER Directive 9200.4-17. USEPA. Washington, DC.
- USEPA. 1998. Seminars: Monitored natural attenuation for groundwater. ORD EPA/625/K-98/001. USEPA. Washington, DC.
- Wiedemeier TH, Wilson JT, Campbell DH, Miller RN, Hansen JE. 1996. Approximation of biodegradation rate constants for monoaromatic hydrocarbon (BTEX) in groundwater. *Ground Water Monit. Rem.* 16: 186-194
- Wiedemeier TH, Rifai HS, Nwell CJ, Wilson JT. 1999. Natural Attenuation of Fuel and Chlorinated Solvents in the Subsurface. John Wiley & Sons Inc. New York: 617.
- Wiedemeier TH. 1999. Natural attenuation of chlorinated solvents-performance and cost results from multiple air force demonstration sites. Air Force Center for Environmental Excellence. Texas: 101.