

유류오염부지에서 자연저감기법 적용 사례연구: I. 부지특성 조사

윤정기^{1*} · 이민효¹ · 이석영² · 이진용³ · 이강근⁴

¹국립환경연구원

²삼성건설 기술연구소

³(주)지오그린21

⁴서울대학교

A case study of monitored natural attenuation at the petroleum hydrocarbon contaminated site: I. Site characterization

Jeong Ki, Yun^{1*} · Min Hyo, Lee¹ · Suk Young, Lee² · Jin Yong, Lee³ · Kang Kun, Lee⁴

¹National Institute of Environmental Research

²Research Institute of Technology, Samsung Engineering & Construction

³GeoGreen21 Co., Ltd

⁴School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

ABSTRACT

The study site located in an industrial complex has a Precambrian age gneiss as a bedrock. The poorly-developed, disturbed soils in the study site have loamy-textured surface soil (1 to 2 m) and gravelly sand alluvium subsurface (2 to 6 m) on the top of weathered gneiss bedrock. The depth of the groundwater table was about 3.5 m below ground surface and increased toward down-gradient of the site. The hydraulic conductivity of transmitted zone (gravelly coarse sand) was in the range of $5.0 \times 10^{-2} \sim 1.85 \times 10^{-1}$ cm/sec. The fine sand layer was in the range of 1.5×10^{-3} to 7.6×10^{-3} cm/sec. and the reclaimed upper soil layer was less than 10^{-4} cm/sec. Toluene, ethylbenzene, and xylene (TEX) was the major contaminant in the soil and groundwater. The average depth of the soil contamination was about 1.5 m in the gravelly sand alluvium layer. At the depth interval 2.4~4.8 m, the highest contamination in the soil is located approximately 50 to 70 m from the suspected source areas. The concentration of TEX in the groundwater was highest in the suspected source area and a lesser concentration in the center and southwest parts of the site. The TEX distribution in the groundwater is associated with their distribution in the soil. Microbial isolation showed that *Pseudomonas fluorescens*, *Burkholderia cepacia*, and *Acinetobacter lwoffii* were the dominant aerobic bacteria in the contaminated soils. The analytical results of the groundwater indicated that the concentrations of dissolved oxygen (DO), nitrate, and sulfate in the contaminated area were significantly lower than their concentrations in the none-contaminated control area. The results also indicated that groundwater at the contaminated area is under anaerobic condition and sulfate reduction is the predominant terminal electron accepting process. The total attenuation rate was 0.0017 day^{-1} and the estimated first-order degradation rate constant (λ) was 0.0008 day^{-1} .

Key words : site characterization, petroleum hydrocarbons, biodegradation, monitored natural attenuation, TEX

요 약 문

연구대상부지는 주로 선캄브리아기의 변성암의 일종인 편마암으로 형성되어 있으며, 토양은 하천에 축적된 비교적 투수성이 높은 매질로 구성된 충적토를 모재로 형성되었다. 지하수위는 지표로부터 평균 3.5m 깊이에서 나타나며, 하류

*Corresponding author : jkyun@me.go.kr

원고접수일 : 2003. 08. 29 게재승인일 : 2003. 10. 7

질의 및 토의 : 2004. 3. 30 까지

방향으로 갈수록 깊어지는 경향을 나타내었다. 대상부지의 수리전도도는 자갈이 혼재된 조립질 모래층은 $5.0 \times 10^{-2} \sim 1.85 \times 10^{-1}$ cm/sec, 세립질 모래층은 $1.5 \times 10^{-3} \sim 7.6 \times 10^{-3}$ cm/sec, 복토층은 10^{-4} cm/sec 이하로 나타났다. 연구대상부지의 주요오염물질은 Toluene, Ethylbenzene, Xylene(이하 TEX)이며, 오염토양층은 1.5 m내외로 깊이별 토양중 TEX의 농도는 추정오염원으로부터 70 m 떨어진 곳의 깊이 2.4~4.8 m에서 가장 높았다. 지하수중 TEX의 농도는 추정오염원의 주변 지역에서 가장 높았으며, 조사대상부지의 중앙지역과 남서쪽지역에서도 높게 나타났으며, 이러한 지하수중 TEX의 농도분포는 토양중의 TEX의 농도분포와 상당히 일치하는 경향을 보이고 있다. 연구대상부지에 서식하고 있는 톨루엔 분해 호기성세균의 주종은 *Pseudomonas fluorescence*, *Burkholderia cepacia*, *Acinetobacter lwoffii*로 확인되었다. 지하수 분석결과 전지수용체인 용존산소, 질산염, 황산염 등이 배경지역에 비해 오염지역에서 상당히 낮게 나타났다. 한편, 연구대상부지에서의 계산된 전체 자연저감속도는 0.0017 day^{-1} 이며, 1차 생분해속도는 0.0008 day^{-1} 로 계산되었다.

주제어 : site characterization, petroleum hydrocarbons, biodegradation, monitored natural attenuation. TEX

1. 서 론

토양·지하수는 매체의 특성상 한번 오염되면 대기 수질에 비해 정화하는데 많은 시간과 막대한 비용이 소요되며, 처리후에도 기대했던 효과가 나타나지 않는 경우가 종종 있었다¹⁾. 이에 따라 미국 등 선진각국에서는 효율적이고 비용경제적인 오염부지관리를 위해 위해성평가기법을 이용하여 위해성이 우려되는 지역은 상업적인 처리기술을, 그 외 지역은 자연저감기법을 적용하여 오염부지를 복원하는 추세이다. 자연저감기법은 국가별로 다소 상이하게 적용하고 있으며, 미국의 경우 주어진 합리적인 시간동안 부지특성에 적합한 복원기준을 만족하는 경우에는 적용이 가능하도록 하는 반면²⁾, 영국의 경우는 자연저감기법을 이용한 오염부지복원에 소요되는 시간의 한계를 30년으로 정하고 있다³⁾. 현재 이러한 자연저감기법을 이용한 오염부지의 복원방법은 유류 등의 석유계 탄화수소류 뿐만 아니라 염소화 유기용제 및 일부 중금속 등에 대해서도 폭 넓게 연구가 진행되고 있다.

자연저감(Natural Attenuation)에 의한 오염물질의 분해에 대한 인식은 이미 오래 전부터 그 경로와 주요한 기작에 대한 연구가 행해져 왔다⁴⁾.

자연저감과정(Natural attenuation process)에는 휘발, 흡착, 이류, 분산, 생분해 등의 다양한 과정이 포함된다^{1,2,5)}. 그러나 자연저감과정에서 가장 중요하게 고려되는 과정으로는 토착미생물에 의한 오염물질의 생분해이다. 이러한 생분해과정은 오염물질을 분해하여 무기화(mineralization) 함으로서 오염물질의 농도뿐만 아니라 오염물질 양에 대한 직접적인 감소를 가져오기 때문이다.

우리나라에서도 지하저장시설(UST)로부터 누출된 유류 등의 석유계 탄화수소에 의한 토양 및 지하수오염이 최근 사회문제로 대두되고 있다.

이에 따라 오염부지의 효율적 관리를 위해 기존의 공학

적인 복원방법이외에 자연저감기법의 현장적용에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 아직까지 해당기법의 현장적용을 위해서는 현재까지 일률적으로 규정되어있는 복원기간 등 제도적인 보완이 요구되며, 기술적인 면에 있어서는 현장적용에 대한 사례가 없어 이에 대한 많은 연구가 요구되고 있다.

MNA기법적용을 위한 부지특성조사는 오염물질의 자연저감이 사람의 건강과 환경보호를 위해 충분한 비율로 일어나고 있는지를 결정하기 위한 데이터를 수집하고, 오염물질의 운명 및 거동모델을 통해 오염대의 앞으로의 확대 및 농도를 예측하기 위한 충분한 지역특성자료를 제공하는데 있다.

따라서 본고에서는 MNA기법적용을 위한 일환으로 해당지역에 대한 토양의 지질학적 특성 조사와 '98년도에 해당지역에 대한 오염도 조사결과⁶⁾를 토대로 지하수의 흐름방향을 중심으로 불투수층까지 토양깊이별 오염도조사 및 관측정을 통한 오염물질 및 영향인자의 지화학적 모니터링결과를 제시하고자 한다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 연구대상부지

연구대상부지는 서울로부터 45 km떨어진 경기도에 위치한 공장부지로, 주변지역은 남동쪽에는 해발 205 m의 오봉산이 도로를 경계로 인접하고 있고, 서북쪽으로는 공장부지를 끼고 소하천이 흐르고 있으며 하천을 경계로 약 300 m 우측으로 수원~서울간의 1번 국도가 지나고 있다. 연구대상부지는 '94년 10월 모일간지에 "○○시 화학공장 주변 1만여평 죽음의 땅"이라는 언론보도후 환경부 지시에 의거 국립환경연구원이 대상지역에 대한 오염범위의 재확인 및 오염원인을 규명하고자 토양정밀조사를 수행하였던 지역이다. 한편 연구대상지역의 면적은 화학공장부

지 23,494 m²와 의류제조 공장부지 95,867 m²를 합하여 119,361 m²이다.

2.2 조사지점선정

본 연구에서는 오염물질과 반응산물 그리고 수리화학적 조건의 변화를 장기관측하기 위해 1998년 11월 연구대상 부지내 41개 지점에서 토양 시료를 깊이별로 채취하였고 같은 장소에 지하수 관측정을 각각 설치하였다. 또한 1999년 5월에 추가로 23개의 장기관측정을 설치하였으며 관측정의 위치는 Fig. 1과 같다.

2.3 시료채취 및 조제

2.3.1 토양

시료채취는 Geoprobe와 무한궤도 시료채취장비(stem auger)를 이용하여 토양 core를 풍화된 모암이 나올 때까지 일정 간격으로 연속 굴착하였다. 채취된 토양 core는 토양의 물리화학적 및 형태학적 특성조사와 유류의 오염 분포조사에 사용하였다. 특히 토양단면상에서 나타나는 토양의 형태적 특성은 문셀(Munsell)칼라차트를 이용하여 구분하였다.

한편, 시료의 조제는 이·화학분석용 시료의 경우 토양 화학분석법에 준하였고, TEX 및 토양미생물분석용 시료는 수분을 함유한 생토시료를 채취하여 돌이나 나뭇가지 등을 제거한 후 시료로 사용하였다.

2.3.2 지하수

모니터링을 위하여 토양을 채취한 공에 1.0~8.0 m까지 well screen을 가진 직경 2.5~5.0 cm, 길이 8 m의 PVC관 또는 스테인레스 스틸관을 넣어 관측정을 설치하였다. 이렇게 설치된 지하수관측정은 1998년에 30개소와 1999년에 설치한 40개소를 합하여 모두 70개소에 이른다.

실제 지하수의 정확한 화학적 특성을 얻기 위해 폴리에

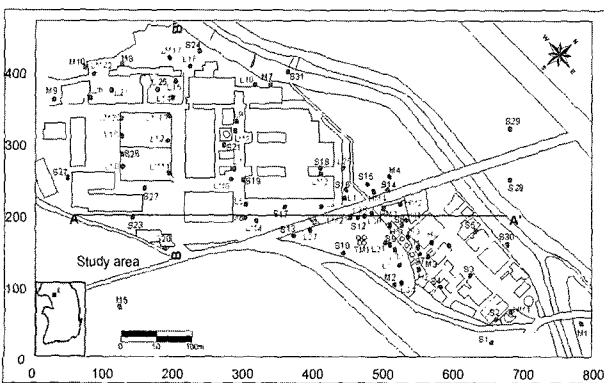


Fig. 1. Overview of the study site and monitoring well location.

틸렌(PE; polyethylene) 호스로 연결된 저속의 수증 펌프를 관정에 투입하여 관정 부피의 3배에 해당하는 지하수를 먼저 양수하여 버린 다음 시료를 채취하였다. 한편 채수된 시료가 대기와 반응하여 화학적 특성이 변하는 것을 막기 위해 폴리에틸렌 호스를 밀폐된 플로우셀(closed flow-through cell)에 직접 연결시켰다.

한편, 지하수 시료의 조제는 BTEX분석용 시료의 경우 테프론 마개가 달린 70 ml 유리병에 빈 공간이 없도록 물을 가득 채운 후 원자흡광광도계용 진한 염산을 일정량씩 넣어 pH 2이하가 되도록 하여 4°C에서 보존하였다. 또한 이온 분석용(NO₃⁻, SO₄²⁻)시료는 0.45 μm 시린지용 필터로 여과하여 60 ml HDPE(High Density Polyethylene)병에 각각 넣고 원자흡광광도계용 진한 염산을 일정량씩 넣어 보존하였다. 알칼리도 분석용 시료는 별도로 125 ml의 HDPE 병에 시료를 채수하였고, 이들 시료는 분석시까지 4°C에서 냉장보관 하였다.

2.4 추적자 실험

현장추적자 실험은 본 연구에서 지하수의 유동속도와 유동방향을 파악하기 위하여 실시하였다.

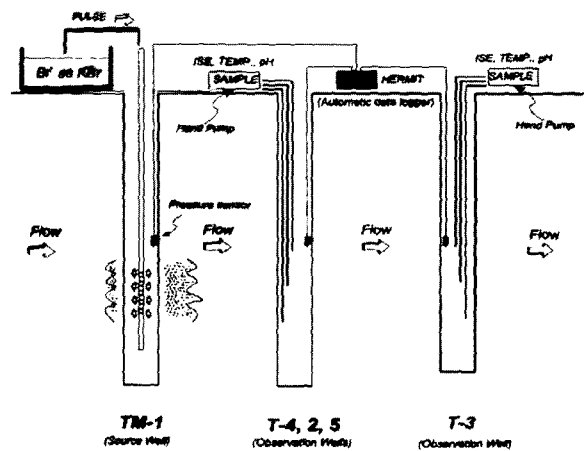
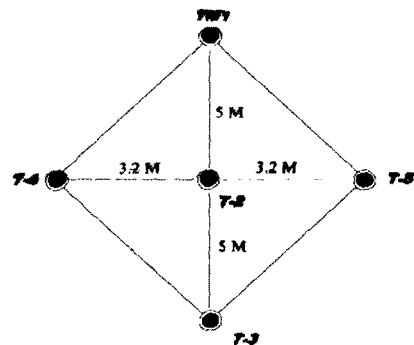


Fig. 2. Monitoring well installation for tracer test.

본 실험을 위하여 조사대상부지에 Fig. 2와 같이 관측정을 설치하고 자연구배방식을 이용하여 TMI관정에서 추적자를 주입하고 T-2, 3, 4, 5의 각 관정에 도달하는 추적자의 농도변화를 관찰하였다. 추적자로는 현장의 배경치가 염소(Cl^-)에 비해 현저히 낮고, 보존성 추적자인 Br^- (KBr)를 이용하였다. 추적자를 주입하기전 각 관정에서 수위, 온도, EC, Br^- 등을 측정하였다. 수위는 평균 수두구배(hydraulic gradient)를 계산하는데 사용되었다. 추적자는 20l의 수돗물에 72g의 KBr 을 용해시켜 사용하였다. 시료의 주입은 저속정량펌프를 이용하였고 주입완료시까지 총 12분 28초가 소요가 되었다. 주입후에는 약 1시간 간격으로 관측정에서 추적자 농도변화를 관찰하였다. 추적자의 농도변화는 브롬선택성전극으로 측정하였고 전기전도도도 동시에 측정하였다. 일부의 지하수시료를 채취하여 이온크로마토그래피(IC)로 분석, 농도보정에 이용하였다.

추적자시험 분석에는 CATTI(Computer Aided Tracer Test Interpretation)프로그램을 이용하였다.

2.5 분석방법

2.5.1 토양

토양의 이·화학적은 토양화학분석법⁷⁾ 및 토양조사방법⁸⁾에 준하여 분석하였으며, TEX(Toluene, Ethylbenzene, Xylene)는 토양 약 5g을 메틸알콜 10ml로 추출한 후 토양오염공정시험방법⁹⁾에 준하였다.

토양미생물의 분석은 미생물의 분포계수측정을 위해 증류수 2ml에 토양 1g을 넣고 잘 섞어 5분 동안 방치 후 상층액 1ml를 십진희석법에 의해 희석하여, MSB 배지에 500 μ l씩 각각 3개의 평판에 도말하고 톨루엔 증발통에 넣어 30°C에서 72시간 동안 배양한 후 확인할 수 있는 집락을 계수하였다.

톨루엔 증발통은 직경 10cm, 높이 15cm의 원통으로 대장균군 최적화계수법에서 사용하는 다람판에 톨루엔 200 μ l를 넣고 탈지면으로 막아 천천히 증발되도록 하고 뚜껑을 막았다. 집락의 계수는 그 수가 30~300의 범위에 드는 것을 골라 산술평균을 내어 계산하였다.

미생물의 동정은 미생물의 계수를 위해 사용한 평판에서 독립된 집락을 평판배지에 백금으로 잘 도말하여 순수 배양된 균주를 API NE20 동정용 Kit를 사용하여 동정하였다. 이때 우점하는 종을 파악하기 위해 집락의 모양 등을 세심하게 관찰한 후 동일한 종으로 판단된 3개의 집락을 API NE20 Kit를 이용 동정한 후 모두 동일한 미생물종으로 밝혀진 것만 우점하는 종으로 결정하였다.

2.5.2 지하수

온도, pH, 전기전도도(electric conductivity), 산화환원전위(redox potential) 및 용존산소(dissolved oxygen)는 현장에서 Orion model250A 및 YSI DO meter를 이용하여 측정하였고, 철(II)도 분광광도계(DR2010, HACH)를 이용하여 현장에서 측정하였다.

NO_3^- , SO_4^{2-} 은 IC(DX-120, DIONEX)로 분석하였으며, TEX는 P&T를 이용 GC/FID로 분석하였고 알칼리도(Alkalinity)는 electrometric titration방법으로 측정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 수리지질학적 특성

연구대상부지의 토양은 약간 풍화된 선캄브리아기의 변성암의 일종인 편마암위에 퇴적된 충적층을 모재로 하고 있으나 하천의 영향을 많이 받았으며, 1970년대에 공장부지로 개발되면서 그 충적층위에 1 내지 2m 정도 두께의 복토한 특성을 갖고 있다(Fig. 3).

충적층은 토성에 따라 두 층으로 구별되는데 상부의 1~2m는 중사에서 세사토로 그 하부의 1~2m는 자갈이 많은 극조사(極粗砂)로 이루어져 있고, 자갈함량은 지점에 따라 10~90%까지 다양한 변화를 보이고 있다. 이 두 개의 모래층은 연구대상부지의 전지역에 걸쳐 잘 분포되어 있다. 그 두께는 연구대상부지의 북동쪽에서 가장 두껍고, 남서쪽에서 가장 얇다. 천층지하수는 깊이 3.0~4.5m에서 나타났으며, 충적층 밑에는 모암이 풍화된 잔적토로 형성되어 천층지하수와 심층지하수를 분리시키는 역할을 하는 것으로 추정되고 있다. 연구대상부지의 지하수 흐름의 하류에 해당하는 의류제조회사의 지표는 약 40%가 아스팔트 및 콘크리트로 포장되어 강우에 의한 함양이 지하수 하류구 배쪽에 주는 영향은 그다지 크지 않을 것으로 판단된다.

복토층은 주변의 변성암 풍화 잔적토로 토성은 양토이며, 운모 등 점토 광물이 많았다. 그러나 충적층은 점토광물이 거의 없고 산화철과 같은 산화광물로 이루어진 석영과 장석의 모래를 주성분으로 하고 있다.

Table 1은 연구대상부지 토양의 이·화학적 특성을 나타낸 것이다. 토양 pH는 5.08이고 TOC는 0.184%로서 우리나라 농경지(밭토양)의 평균 화학성⁸⁾인 pH 6.5, 유기물 함량 3.0%에 비해 다소 낮은 편이며, CEC도 3.04 cmol/kg으로 일반산림지역 토양의 10.7~16.3 cmol/kg에 비해 매우 낮은 편이며, 주 대수층의 토성은 사토(Sand)로 공극률이 44.1%로 매우 투수성이 큰 토양이다. 한편 포장용수량은 30%로써 토성과 유효수분과의 관계에서 볼 때 세사토의 28.8%에 가까운 수치를 나타내었다.

Table 1. Physico-chemical properties of soil

pH	TOC (%)	CEC (cmol/kg)	T-N (%)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	Ex. Base (me/100g)				Particle density	Bulk density	Porosity (%)	Water holding capacity (%)	Texture
					Ca ²⁺	Mg ⁺	Na ⁺	K ⁺					
5.08	0.184	3.04	0.11	5.22	2.287	0.735	0.305	0.375	2.67	1.49	44.1	30	sand sand 89.1% silt 4.9% clay 6.0%

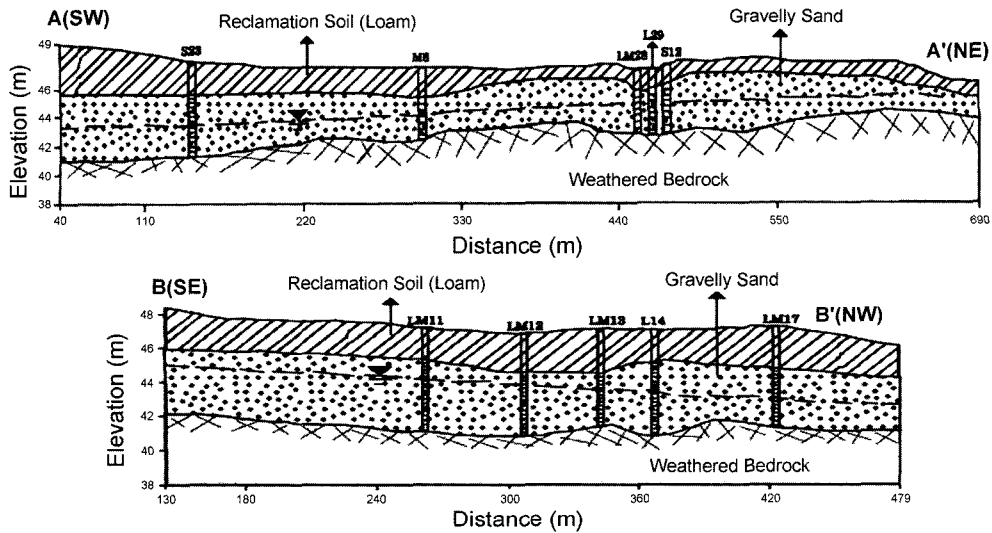


Fig. 3. Vertical profiles of the study site.

연구대상부지의 지하수위는 지표로부터 평균 3.0~4.5 m에 형성되어 있으며, 강우에 의한 지하수의 함양 그리고 주변지역으로부터의 지하수의 유입으로 인한 지하수위 변동은 수직방향으로 최대 2m에 이르고, 강우에 의한 지하수위의 반응은 자연시간이 하루 이하로 매우 빠른 편이다.

그리고 지하수의 평균 흐름방향은 Fig. 4에서와 같이 추정오염원지역인 동쪽에서 서쪽으로 연구대상지역내에 인접한 소하천과 거의 평행한 방향으로 흐르는 것으로 나타났다 그러나 국부적으로 나타나는 지하수 흐름방향의 변화는 공장내 다양한 지하시설과 계절적인 함양량

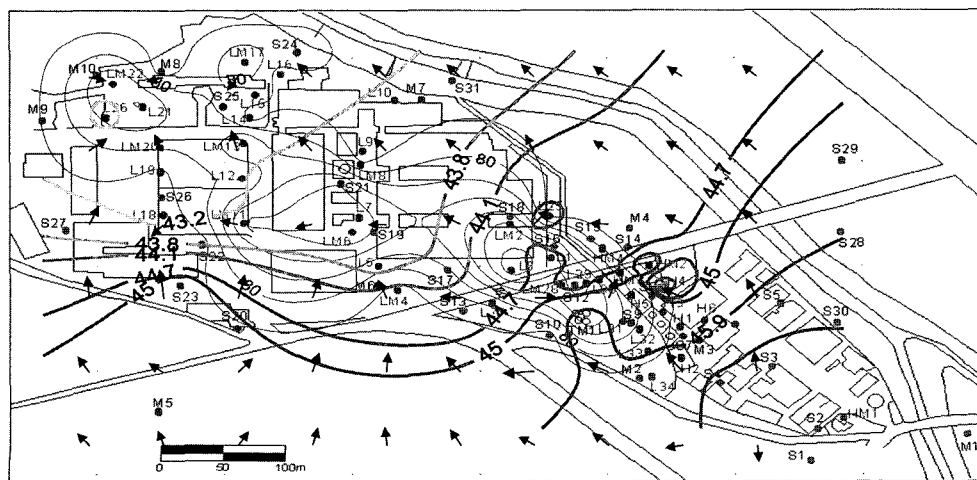


Fig. 4. Groundwater table contour.

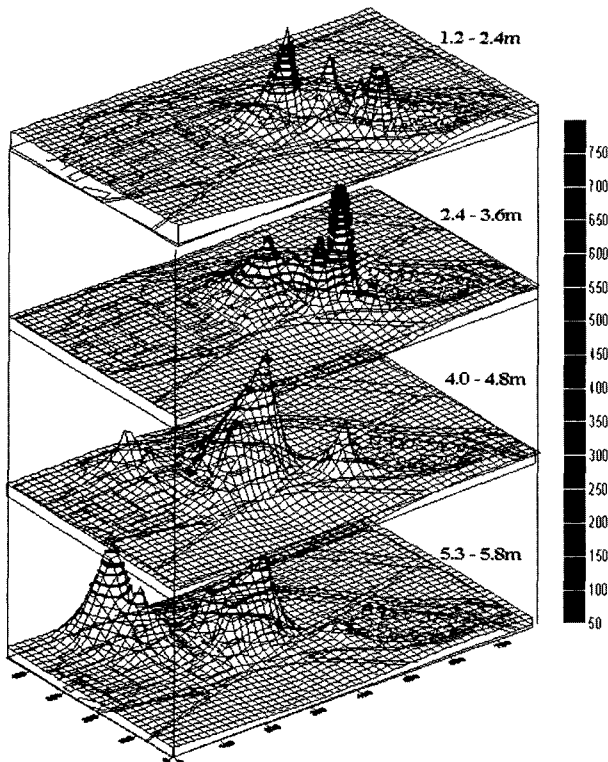


Fig. 5. TEX distribution of soil.

(recharge)의 차이에 기인하여 흐름방향이 지점에 따라 다소 상이하게 나타날 수 있을 것으로 판단된다.

평균 수두구배(hydraulic gradient)는 약 0.0075내외이고 우기에는 0.0014로 증가한다. 연구대상부지의 대수층의 수리전도도는 추적자 시험, 순간수위변화시험, 양수시험, 그리고 토양 입도분석자료를 이용하여 추정하였다¹⁰⁾.

자갈이 혼재된 조립질 모래층은 $5.2 \times 10^{-2} \sim 1.85 \times 10^{-1}$ cm/sec로 연구대상부지의 대수층 중 가장 크게 나타났고, 세립질 모래층의 수리전도도는 $1.5 \times 10^{-3} \sim 7.6 \times 10^{-3}$ cm/sec로 비교적 작은 값을 나타내었다. 복토층의 수리전도도는 10^{-4} cm/sec 이하로 가장 작은 값을 보여주었다.

추적자 시험 및 실험실에서 구해진 지하수 수리계수 등을 이용하여 Darcy식에 따라 계산된 연구대상부지내 주요 대수층 지하수의 평균 유동속도는 0.03~3.6 m/day이었다.

3.2 토양 · 지하수의 오염 특성

3.2.1 토양오염특성

연구대상부지 토양과 지하수에 대한 오염조사결과 주요한 오염물질은 Toluene, Ethylbenzene, Xylene(TEX)이었으며, 그밖에 등유와 경유가 지점에 따라 다소 혼재되어 있는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 1999년 5월에 채취된 토양시료 분석을 통해

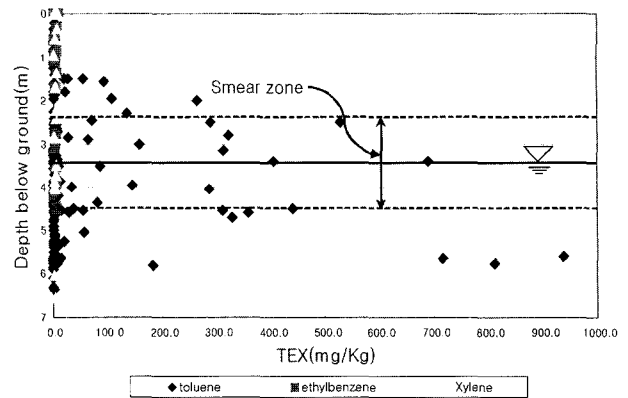


Fig. 6. Vertical distribution of TEX in soil.

얻은 조사지역의 토양내 TEX 오염분포도이다. 토양중 TEX의 분포는 약 600 m에 걸쳐 연구대상부지 전지역에 상당히 넓게 분포하고, 오염의 분포 성상을 보아 2곳 이상의 오염원이 있을 것으로 추정되나 본 연구에서는 오염 농도가 가장 높은 곳을 추정 주요오염원(이하 추정오염원)으로 선정하여 연구를 진행하였다. 오염토양의 두께는 1.5 m 내외였으며, 오염농도는 추정오염원으로부터 멀어질수록 그리고 지표로부터 깊어질수록 낮아지는 경향을 나타내었다.

토양중 TEX 농도는 화학공장의 유기용제 저장탱크 주변인 H5지점에서 약 1,202.0 mg/kg으로 가장 높았으며, 다음으로 오염원의 중심부에 위치한 L30, L31 및 연구대상부지 중앙부분인 L5, LM2 그리고 의류제조공장부지내의 L26, LM17, L21지점의 순으로 오염도가 높게 나타났다.

한편, 깊이별 토양중 TEX의 농도는 추정오염원로부터 70 m 떨어진 곳의 깊이 2.4~4.8 m에서 가장 높았으며, 오염면적도 가장 넓게 나타났다. 이는 Fig. 6에서 보이는 천층지하수의 분포깊이와 일치하는 것으로 LNAPL(Light Non-Aqueous Phase Liquid)인 석유계탄화수소로 오염된 부지에서는 토양과 지하수의 오염이 서로 상관성이 있음을 보여주고 있다. 그리고 지하수의 흐름방향을 따라 상류에서 하류쪽으로 갈수록 세립질 모래층 또한 하류방향으로 두꺼워지며, 오염층의 깊이가 깊어지는 양상을 보이고 있다. 이는 Borden(1995)¹¹⁾ 등이 보고한 바와 같이 결국 더 많은 NAPL이 공극사이에 잔류하게 될 가능성을 시사해주는 것이다.

이와 같은 현상은 유출된 오염물질이 수직방향으로 이동하여 자갈이 함유된 조립질 모래층에 다다르게 되고, 이 과정에서 일부는 휘발 등에 의해 소실되고 대부분의 오염물질은 토양입자에 흡착되어 잔류성 물질로 남게 된다. 그리고 지하수위의 수직변동은 smear zone을 형성하여 용해도가 높은 성분 특히 TEX를 수직적으로 재 분포시키는

역할을 하며, 이러한 지하수위의 변동은 토양내에 흡착되어있는 잔류성 오염물질이 지속적인 오염원으로 작용하는 역할을 도와주게 되는데 기인하는 것으로 판단된다¹¹⁾.

이와 같은 연구대상부지에서 토양오염의 분포는 자갈이 함유된 조립질 모래층으로 형성된 주요 대수층의 두께와 높이의 불규칙성, 지하수위 변동에 따른 토양내 NAPL의 잔류와 분산, 초기에 오염지하수 처리방법으로 적용되었던 양수 및 처리에 의한 영향이 그 요인인 것으로 생각된다.

3.2.2 지하수오염특성

지하수중 TEX의 농도는 추정오염원의 주변지역인 H5와 L29 및 S12에서 TEX농도가 837.3 mg/l, 924.2 mg/l, 325.5 mg/l으로 가장 높았으며, 조사대상부지의 중앙지역과 남서쪽지역에서도 높게 나타났다. 이러한 지하수중 TEX의 농도분포는 토양중의 TEX의 농도분포와 상당히 일치하는 경향을 보이고 있어 토양내에 흡착된 TEX가 지하수오염에 대한 2차 오염원으로 작용하고 있다는 것을 나타내주고 있다.

또한 이러한 지하수중 오염물질의 분포는 수리지질학적 인 대수층 매질의 특성과 지하수위의 변동에 크게 영향을 받는다.

한편, 연구대상부지에 분포되어 있는 오염물질은 지하수흐름과는 달리 지하수층 위에 떠서 이동하는 LNAPL로 대수층에서 매질 등과의 반응을 통해 지연현상을 보이게 된다. 따라서 현장부지에서 이러한 지연계수(R, retardation coefficient)를 고려하면 오염물질의 이동속도는 지하수의 유동속도보다 느리게 된다.

지연현상이 일어날 경우 대수층내에서의 오염물질의 이동속도는 지하수의 공극유속이나 비반응성 오염물질보다 지연계수만큼 지연되어 저동한다는 것을 의미한다.

이 지역의 주요 오염물질인 TEX의 지연계수(R)는 2.18이었으며, 현장연구부지에서 주 오염물질인 TEX의 평균 이동속도는 0.01~1.65 m/day로 계산되었다. 그러나 연구대상부지의 지질학적 불균일성과 앞에서 언급한 지하수양수 처리 등의 과정에 의해 이러한 흐름은 상당히 왜곡되었을 것으로 사료되며, 또한 TEX의 이동속도에는 생분해가 고려되지 않았기 때문에 실제 이동속도는 이보다 훨씬 더 늦을 것으로 판단된다.

Lee(2001)¹²⁾ 등은 본 연구부지의 추정오염원지역에서 TEX의 지하수에 대한 부하량을 연간 17.6~55.2 kg으로 보고한 바 있다.

Table 2. Distribution and identification of the toluene degrading aerobic bacteria

Sampling area	Depth (m)	Population density (CFU/g)	TEX (mg/kg)	ID. bacteria
Background area	0.2~1.2	5.2×10E4	N.D	<i>Burkholderia cepacia</i>
	1.2~2.0	2.3×10E2	N.D	
	3.0~4.1	4.6×10E1	N.D	
Hot spot	0.0~0.7	6.5×10E2	7.016	<i>Pseudomonas fluorescence</i>
	1.7~2.4	6.0×10E5	179.499	
	2.4~3.6	4.6×10E1	236.240	
	3.6~4.8	1.5×10E3	8.252	
Margin of plume	1.2~2.4	6.2×10E4	0.839	<i>Burkholderia cepacia</i>
"	3.6~4.0	1.2×10E3	0.901	<i>Acinetobacter lwoffii</i>

Table 3. Analytical results for groundwater

Elements	Contaminated area(n=51)		Background
	Mean Conc.	Concentration Range	HM1
TEX (mg/l)	148.99	1.67~1,440.13	2.047
DO (mg/l)	0.49	0.05~3.32	0.60
NO ₃ ⁻ (mg/l)	3.47	0.02~84.55	11.863
Fe ²⁺ (mg/l)	52.31	0.03~191.16	0.03
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	29.84	0.27~575.84	83.191
Alkalinity (mg/l)	198.17	37.73~543.79	67.26
ORP (mV)	-142.56	-273.20~222.80	172.9
pH	6.63	6.08~7.33	7.24
EC (μS/cm)	399.30	147~616	616
Temp (°C)	19.08	13.80~24.00	14.9

3.3 자연저감특성 분석

3.3.1 토양미생물 특성

일반적으로 오염토양 및 지하수의 복원수단으로 자연저감의 효율성을 평가하기 위해서는 3가지의 일련의 증거들이 부지특성조사 및 모니터링을 통해 증명되어야 한다^{1, 2, 13)}.

본 연구에서는 연구대상부지에 대한 특성조사를 통해 오염물질을 분해할 수 있는 토착미생물의 존재와 오염물질의 생물학적 감소를 증명하는 지화학적 인자들의 분포 특성을 확인하여 자연저감의 가능성을 판단하고자 하였다.

우선 현장에서 채취한 토양시료를 오염정도 및 깊이별로 분류하여 호기성 톨루엔 분해세균을 계수 및 동정결과 Table 2에서와 같이 호기성 분해세균은 최고 6.0×10^5 CFU/g로 계수되어 현장연구부지에서 오염물질을 분해하는 토착미생물의 존재를 확인하였다.

그리고 토양의 그람음성 세균을 동정하는데 이용되는 API NE20로 이들 세균을 동정한 결과 상대적으로 TEX의 농도가 높은 초기 오염토양에서는 *Pseudomonas fluorescense*가 우점하였고, 오염이 확산된 지역은 *Burkholderia cepacia*가 우점하고 있는 것으로 나타났다. 그 외 *Acinetobacter lwoffii*도 LM13-1 지점에서 분리 동정되었다. 오염이 안된 곳이나 TEX의 농도가 낮은 지역에서는 API NE20로는 동정할 수 없는 집락의 크기가 작은 그람 양성균이 우점하는 것으로 나타났다.

3.3.2 지화학적 인자 분포특성

오염물질의 생물학적인 감소를 증명할 수 있는 지화학적 인자들의 분포를 조사한 결과 Table 3에서 보는바와 같이 최종전자수용체인 용존산소, 질산염, 황산염의 농도가 배경지역에 비해 크게 낮았으며, 2가철농도의 증가와 산화환원전위의 현저한 저하, pH 중성 등 연구부지의 지화학적 인자의 분포특성으로 볼 때 TEX의 주요한 저감 기작이 토착미생물에 의한 생분해에 기인하는 것으로 판단할 수 있다.

Table 4는 전자수용체 및 대사산물의 농도를 근거로 하여 현장부지에서의 전자수용체이용현황 및 생분해능(EAC)을 산출한 것이다. 이러한 생분해능은 현장부지의 미생물에 의해 이용 가능한 전자수용체의 개개별 상대적인 양을 생분해 반응 중에 소비되는 BTEX의 양으로 환산함으로써 계산할 수 있다.

본 연구대상부지의 경우 용존산소의 결핍과 낮은 산화환원전위, 그리고 낮은 질산염 및 황산염 농도와 높은 2가철 농도 등으로 미루어 혐기성상태에서 자연적인 오염물질의 분해가 이루어지고 있으며, 주도적인 분해과정으로는 황산염 환원과 질산염환원 과정이 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 다음으로 철환원작용이 큰 작용을 하는 것으로 나타났으며, 생분해능(EAC)은 21.39 mg/l이었다. 그리고 이러한 전자수용체의 이용 결과의 대부분은, 약 70%이상은 BTEX의 산화로부터 생긴 결과이며, 나머지 30%는 다른 유기물질의 산화에 의한 결과로 믿어진다¹⁴⁾.

Table 5는 현장부지에서 생분해속도를 계산한 것이다. 본 연구에서는 Buscheck(1995)¹⁵⁾ 등이 사용한 직선회귀식을 통해 현장부지 생분해 속도를 계산하였다. 현장부지에서의 계산된 전체 자연저감속도는 0.0017 day^{-1} 이며, 1차 생분해속도는 0.0008 day^{-1} 로 전체 저감속도의 약 47%를 차지하고 있는 것으로 계산되었다. 1차 생분해속도에 근거한 연구대상부지에서 TEX의 반감기는 65.38일(0.18 years)로 계산되었다. 생분해는 오염물질의 저감에 영향을 미치는 물리화학적 인자들중 오염물질을 직접적으로 분해하여 그 양을 감소시키는 역할을 하기 때문에 현장에서 생분해 속도의 평가는 지하수에서 오염물질의 거동을 예측하고 자연저감에 의한 오염부지정화 가능성을 판단하는데 중요하다.

그러나 연구대상부지의 경우 생분해 외에도 Lee(2001)¹⁶⁾가 보고한 바와 같이 연구대상지역의 지질학적 특성과 강우에 의한 지하수의 함양으로 인한 희석 및 혼합도 영향

Table 4. The amount of available electron acceptors in groundwater by different sampling date at the study site and its expressed assimilated capacity (EAC) (unit : mg/l)

Date	Aerobic biodegradation	Nitrate Reduction	Sulfate Reduction	Ferrous Iron Reduction	Total
Jun. 1999	0.32	3.53	17.12	0.43	21.39

Table 5. Calculated field scale biodegradation rate

Date	Slope (m=k/v)	R ²	Total Attenuation Rate Constant (k) (day)	Biodegradation Rate Constant (λ) (day)	λ/k (%)
Jun. 1999	-0.0018	0.936	0.0017	0.0008	46.6

을 주었을 것으로 판단된다. 그러나, 이러한 영향들은 지하수 내의 산화환원에 민감한 물질들의 분포에 따라 하나씩 분리해 낼 수는 없다¹⁷⁾.

하지만 일반적으로 지하매질의 불균일성이 오염물질의 생분해 과정 동안에 오염물질의 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 나타나 지하매질의 불균일성이 비록 작은 규모라 할지라도 무시할 수는 없을 것으로 판단되며, 지속적인 지하수의 모니터링을 통한 오염물질의 자연저감의 평가가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 자연저감기법적용을 위해 오염물질의 자연저감이 사람의 건강과 환경보호를 위해 충분한 비율로 일어나고 있는지를 결정하기 위한 데이터를 수집하고, 향후 오염물질의 운명을 예측하기 위한 충분한 지역특성자료를 제공을 위한 부지특성조사결과이다.

연구대상부지는 주로 선캄브리아기의 변성암의 일종인 편마암으로 형성되어 있으며, 토양은 하천에 축적된 비교적 투수성이 높은 매질로 구성된 충적토를 모재로 형성되었다. 지하수위는 지표로부터 평균 3.0~4.5 m 깊이에서 나타나며, 대상부지의 수리전도도는 자갈이 혼재된 조립질 모래층은 $5.0 \times 10^{-2} \sim 1.85 \times 10^{-1}$ cm/sec, 세립질 모래층은 $1.5 \times 10^{-3} \sim 7.6 \times 10^{-3}$ cm/sec, 복토층은 10^{-4} cm/sec 이하로 나타났다.

연구대상부지의 주요오염물질은 Toluene, Ethylbenzene, Xylene(이하 TEX)이며, 오염토양층은 1.5 m내외로 깊이별 토양중 TEX의 농도는 추정오염원으로부터 70 m 떨어진 곳의 깊이 2.4~4.8 m에서 가장 높았다. 지하수중 TEX의 농도는 추정오염원의 주변지역에서 가장 높았으며, 조사대상부지의 중앙지역과 남서쪽지역에서도 높게 나타났으며, 이러한 지하수중 TEX의 농도분포는 토양중의 TEX의 농도분포와 상당히 일치하는 경향을 보이고 있다.

연구대상부지에 서식하고 있는 틀루엔 분해 호기성세균의 주종은 *Pseudomonas fluorescence*, *Burkholderia cepacia*, *Acinetobacter lwoffii*로 확인되었다.

지하수분석결과 전자수용체인 용존산소, 질산염, 황산염 등이 배경지역에 비해 오염지역에서 상당히 낮게 나타났다. 한편, 연구대상부지에서의 계산된 전체 자연저감속도는 0.0017 day^{-1} 이며, 1차 생분해속도는 0.0008 day^{-1} 로 계산되었으며, 자연저감의 보다 정확한 평가를 위해서는 지속적인 지하수모니터링과 오염물질의 거동을 예측하기 위한 모델링작업이 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. National Research Council (NRC), Natural Attenuation for Groundwater Remediation. National Academy Press, Washington, D.C. (2001).
2. U.S. EPA, Use of monitored natural attenuation at superfund, RCRA corrective action, and underground storage tank sites, OSWER Directive 9200.4-17P, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, D.C. (1999).
3. Environment Agency, Guidance on the assessment and monitoring of natural attenuation of contaminants in groundwater, R&D Publication 95 (2000).
4. Alexander, M., Biodegradation and bioremediation. Academic press, Inc., California (1994).
5. Wiedemeier, T.H., Wilson, J.T., Kampbell, D.H., Miller, R.N., and Hansen, J. Technical protocol for implementing intrinsic remediation with long-term monitoring for natural attenuation of fuel contamination dissolved in groundwater, Volume 1 & 2, Air Force Center for Environmental Excellence, Technology Transfer Division, Brooks AFB, San Antonio, Texas (1995).
6. 국립환경연구원, 의왕시 소재 유류오염부지 등에 대한 토양 정밀조사 보고서(1998).
7. 농업기술연구소, 토양화학분석법(1988).
8. 삼정 토양학, 향문사(1986).
9. 환경부, 토양오염공정시험방법(1999).
10. Cheon, J.Y., Field and numerical studies on groundwater and soil environments of an LNAPL-contaminated site. MS thesis, Seoul National University, Seoul. Korea (2000).
11. Borden, R.C., Gomez, C.A., Becker, M.T. "Geochemical indicators of intrinsic bioremediation", *Ground Water* 33, pp. 180-189 (1995).
12. Lee, C.H., Lee, J.Y., Cheon, J.Y., and Lee, K.K. "Attenuation of petroleum hydrocarbons in smear zones : case study". *J. Environ. Eng.* 127(7), pp. 639-647 (2001).
13. ASTM Standard guide for remediation of groundwater by natural attenuation at petroleum release sites, ASTM E 1943-1998. Philadelphia, P.A. (1998).
14. Newell, C.J., McLeod, R.K., and Gonzeles, J.R., Bioscreen: Natural attenuation decision support system, Version 1.4. prepared for the Air Force Center For Environmental Excellence, Brooks AFB, Texas (1997).
15. Buscheck, T.E., and Alcantar, C.M., Regression techniques and analytical solutions to demonstrate intrinsic bioremediation. In, Proceedings of the 1995 Battelle International Conference on In-Situ and On Site Bioreclamation, April 1995.
16. Lee, Jin-Yong, 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 (2001).
17. Christensen, T.H., Bjerg, P.L., Banart, S.A., Jakobsen, R., Heron, G. and Albrechtsen, H. "Characterization of redox conditions in groundwater contaminant plumes" *J. Contam. Hydro.* 45, pp. 165-241 (2000).