

# 유류오염지역 지하수환경 조사

## [A technical review on groundwater investigation of petroleum contaminated site]

이진용(Jin-Yong Lee)<sup>1</sup> · 이명재(Myeong-Jae Lee)<sup>1</sup> · 이강근(Kang-Kun Lee)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(주)지오그린21 (GeoGreen21 Co., Ltd.)

<sup>2</sup>서울대학교 지구환경과학부(School of Earth and Enviro. Scis., SNU)

**요약:** 최근 유류에 의한 지하수·토양오염이 사회적 관심으로 대두되면서 유류오염지역 지하수환경을 평가하는 업무가 환경수리지질학자 혹은 엔지니어들에겐 평상적인 일이 되었다. 다수의 사례로 보아 이런 평가업무를 수행할 때 몇 가지 점들에서 현장 및 실내분석에 문제점과 개선점을 안고 있다. 이런 점들은 지하수관정의 설치, 지하수 시료의 채취 그리고 지하수 모델링 등과 관계된다. 본 논문은 현장 및 실내분석 모델링 경험을 바탕으로 이에 대해 논의하였다.

**Abstract:** Recently groundwater and soil contamination with petroleum hydrocarbons becomes one of concerns of our environmental community. Environmental hydrogeologists commonly are involving in evaluating conditions of groundwater environment for the petroleum contaminated site. Some problems relating to this task have been exposed, which is associated with installation of monitoring wells, groundwater sampling, groundwater modeling, and etc. This review discussed about the problems based on experiences of field and modeling studies.

## 1. 개요

최근 우리나라에서도 국민의 환경인식의 제고와 관련법들의 정비로 지하수 및 토양의 오염에 대한 사회적 관심이 부각되고 있다. 특히 유류에 의한 크고 작은 지하수의 오염은 빈번히 매스컴에 보도되고 있으며 많은 전문가 및 엔지니어의 개입을 요구하고 있다. 또한 과거에 주로 연구영역으로 남아있던 지하수환경 분야가 공익은 물론 경제적 이득을 취할 수 있는 사업의 영역으로 발전할 가능성을 보이고 있다. 그런데 이런 일들이 지하수환경 분야를 공부하고 또 업계에서 동종 업무를 담당하고 있는 저자들에게는 매우 기쁘고 고무적인 일이라고 하겠으나 그 만큼 책임감이 따라야 할 것이다.

본 리뷰는 지하수환경업무 수행에 있어 엔지니어로서 알아야 할 몇 가지 기본적인 개념들에 대해 논의하고 또 특별히 유류오염지역 조사시 유의할 점에 대해 토의하였다. 본 리뷰의 내용은 저자들의 개인적 의견임을 밝힌다.

## 2. 본론

### 2.1 지하수관정의 설치

일반적으로 지하수오염을 조사할 때에는 적절한 깊이 및 구경의 지하수 관측정을 설치하게 된다. 그런데 이런 지하수 관측정을 설치할 때 주의해야 할 몇 가지 점이 있다. 물론 지하수 관정을 설치하는 목적과 오염물질의 특성에 따라 그 디자인은 달라져야 한다. 관정을 설치할 때 관정 스크린의 총 표면적에 대한 총 slot 면적의 비율인 open area 및 slot의 크기에 대한 지침은 ASTM에 잘 설명되어 있다.

만약 조사를 하려고 하는 오염지역의 오염원이 비중이 물보다 작은 비수용성 유체(LNAPLs)라면 특히 관정의 스크린 설치에 유의해야 한다. 흔히 최근에 지하수 오염사례에 보고되는 이런 류의 석유화합물은 휘발유, 등유, 경유 등이다. 지하수에서 오염이 나타나는 성상은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데 그 하나는 물위에 자유상(free product)으로 나타나는 것과 물에 용존되어 나타나는 것이다. 휘발유의 경우 일반적으로 관심이 높은 BTEX 성분

의 함량이 높고 이들 물질은 비교적 용해도가 높아 용존상태로 잘 나타난다. 그러므로 휘발유의 경우는 이들 BTEX의 지하수내 용존농도를 분석함으로써 특성화가 상대적으로 쉬운 편이다. 그런데 등유나 경유의 경우 이들 내 BTEX의 성분이 소량으로 들어있어 상당량의 자유상의 유류가 지하수내에 떠 있다고 해도 혹은 기름냄새가 지하수에서 난다고 해도 용존상으로 큰 농도를 보이지 않는 경우도 드물지 않다. 이때 지하수 오염을 확인하는 혹은 평가하는 다른 방법으로 자유상 유류의 존재여부를 파악하게 된다. 그런데 지하수 관측정의 부적절한 설치는 종종 잘못된 결과를 내기도 한다.

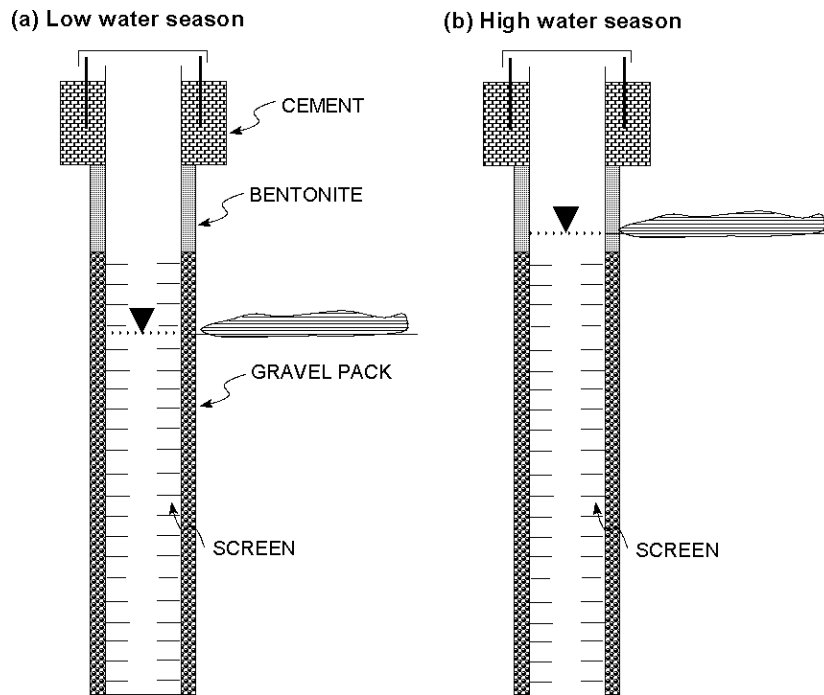
오염지역의 현장조사를 책임진 환경수리지질학자는 조사할 당시의 지하수위를 고려하여 그림. 1(a)와 같은 식으로 관정을 설치하려고 할 것이다. 다행히 이 조사 혹은 관정설치 당시에 지하수위는 무공관 아래쪽에 있어 혹은 자유상의 오염물질이 있다면 스크린을 통해 지하수 관정내로 유입이 손쉬울 것이고 따라서 조사자가 이를 인지할 가능성이 높다.

그런데 만약 관정설치 시기가 건기이고 관정이 설치되어 본격적으로 지하수시료를 채취하거나 혹은 오염변동을 조사하려고 하는 시기가 설치 당시와 달리 우기이면 지하수위가 무공관 최하부위까지 상승한다면 문제가 발생할 것이다. 즉 자유상의 오염물질은 지하수위 상승과 함께 이동하여 지하수 관정내에서 사라질 것이기 때문이다. 무공관 혹은 벤토나이트 봉인(seal)에 막혀 자유상 오염물질이 관정내로 들어올 수 없기 때문이다(그림 1(b)). 이런 결과로 인해 현장조사자는 자유상오염물질이 그 관측정 지점을 흘러가 버렸거나 혹은 오염이 어떤 방식에서든 저감된 것으로 판단하는 경우도 발생할 수 있다.

그런데 이런 자유상 물질은 흔히 다시 건기가 되어 지하수위가 무공관 하부로 하강하면 다시 나타나게 되는 것을 현장에서 적지 않게 경험한다(Clement, 2000: personal communication; Lee et al., 2001). 실제로 건기 우기의 강수량 차이가 뚜렷한 우리나라의 천층대수층의 연중 지하수위변동(건기 전후)은 상당하다(Lee et al., 2001, 그림 2). 그러므로 지하수위변동에 의한 지하수관정내 자유상 오염물질의 출현과 사라짐에 대해 관정자체의 영

향이 없는지를 면밀히 검토할 필요가 있다.

유류오염지역에서 조사용 지하수 관정을 설치할 때에는 가능한 인접한 기존 지하수관정의 지하수위에 대한 정보를 입수하여 연중 지하수변동이 어느 정도 되는지를 파악하고 혹은 이것이 여의치 않다면 가장 가까운 지하수 국가관측망 자료 등을 수자원공사 등으로부터 입수하여 지하수위 변동폭을

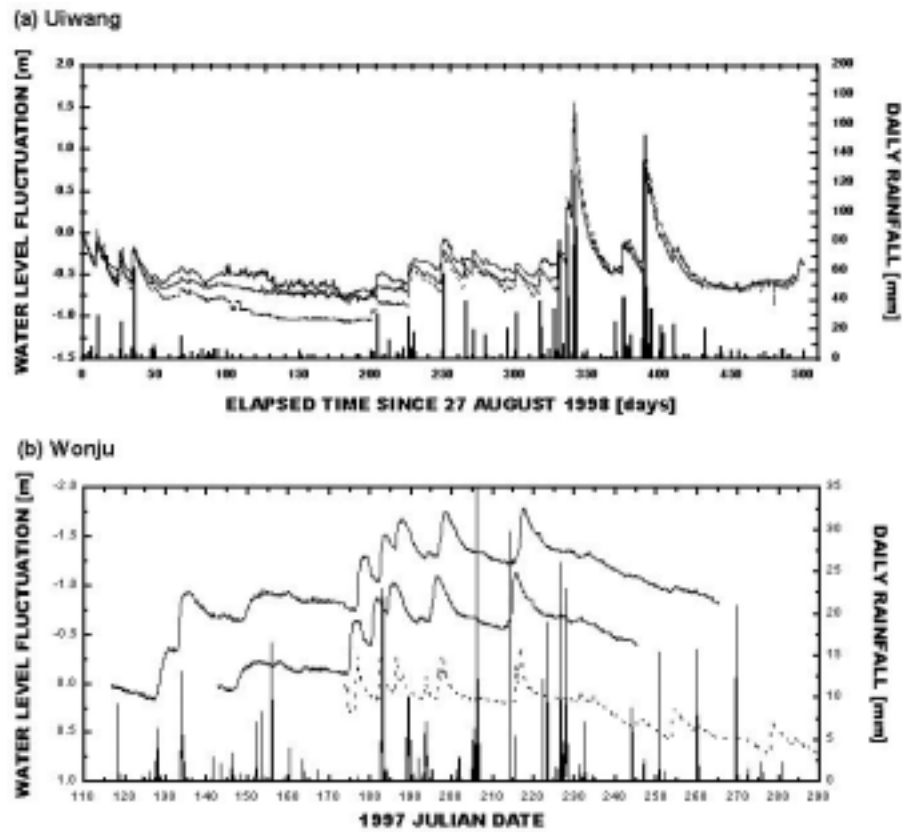


<그림 1. 지하수위 변동에 따른 자유상 물질의 위치변화>

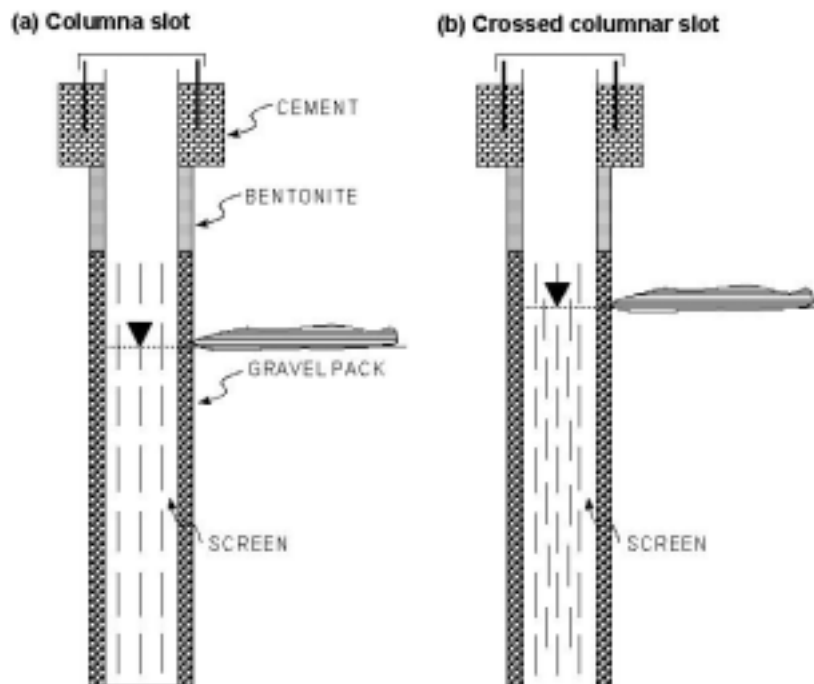
최대한 고려하여 스크린 구간을 정해야 할 것이다. 그렇다고 하여 무한정 스크린을 길게 하는 것은 상부로부터 오염된 지표수 혹은 빗물이 그대로 유입될 가능성과 수리시험시 어려움을 줄 수 있으므로 적절한 판단이 요구된다.

그런데 스크린을 설치할 때 그 모양에도 각별히 신경을 써야할 것으로 본다. 가로로 흔히 지하수개발 관정에서처럼 수직으로 slot을 만들었을 경우 자유상 오염물질이 관정내로 유입되는데 어려움이 있을 수 있으므로 되도록 가로로 slot을 설치하는 것이 좋을 것으로 사료된다. 또한 스크린의 강도유지 문제로 부득이 가로로 slot을 설치할 때라도 지하수위가 slot 구간사이에 걸려져서 문제가 발생하지 않도록 slot를 엇갈리게 설치하는 것이 좋다(그림

3).



<그림 2. 자연 지하수위의 변동>



<그림 3. Columnar slot and crossed columnar slot>

## 2.2 지하수 시료 채취

지하수 시료채취 및 화학분석은 유류에 의한 지하수오염에 대한 정량적 평가의 기본적 도구이며 일반적으로 수행된다. 어떤 경우에도 현장에서의 지하수 시료채취는 그 정당한 절차와 엄격한 QA/QC를 거쳐야 하지만 특별히 그 오염이 사회적 문제 혹은 오염관련 당사자간의 이해관계가 개입되어 있는 경우에는 더욱 철저한 관리가 요구된다. 우선 cross-contamination에 주의를 기울여야 할 것이다. 오염범위 자체가 보상이나 혹은 복원비용 산정의 중요한 기준이 되기 때문이다. 지하수 시료채취 및 동시에 행해지는 현장측정 도구들은 가능하면 일회용으로 사용하는 것이 바람직 하지만 이는 비용적으로 만만치 않은 일이다. 최근에는 지하수시료를 채취하는 일회용 bailer가 실용화되고 있다. 한정된 측정장비와 채취도구로서 가장 바람직한 채취는 오염이 가장 낮을 것으로 추정되는 곳에서 시작하여 고농도의 오염지역으로 시료를 채취하는 것이다.

흔히 주위를 기울이지 않는 것 중의 하나가 수위계이다. 시료를 채취하는 도구에 대해서는 사실은 대부분의 현장작업자들이 주의를 기울이지만 수위계의 경우 여기저기 오염지역 여러군데를 같은 수위계를 많이 사용한다. 오염이 심한 곳은 수위계 자체에 상당량의 유류들이 부착되어 회수되고 또 제대로 세척을 하지 않고 또 다른 지하수관정의 지하수위를 재는 경우가 허다하다. 물론 이런 류의 부주의가 정량적으로 다른 관정의 지하수오염을 어느 정도 유발하는지는 알 수 없다. 가능하다면 이때에도 일회용 수위계 소위 종이테이프 등으로 만든 수동수위계가 있다면 유류오염지역에 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 현실적으로 하나의 수위계를 사용한다면 이도 시료채취순서와 마찬가지로 저농도 지역에서 고농도지역으로 측정해 나가는 것이 바람직 할 것이다.

그런데 지하수내 용존 오염물의 농도를 구하려고 지하수 시료를 채취하면서 정작 지하수위 떠 있는 자유상 물질(product)을 함께 하나의 시료에 채취하는 경우를 종종 발견하게 된다. 그런데 이럴 경우 그 오염물질의 용해도 이상의 비정상적인 분석값을 얻게 된다. 지하수내의 용존 오염물질과 자유상

의 오염물질과는 상태(phase)가 전혀 다른 것이다. 그러므로 시료채취는 목적에 맞게 적절하게 이루어져야 한다.

## 2.3 지하수 모델링

최근에는 지하수환경을 평가하는 도구로서 전문 지하수모델링이 점차 일반적으로 인정을 받고 있다. 한국지하수토양환경학회에서 매년 이런 모델링 전문가 교육과정을 개설하고 있다. 그런데 이 모델링에 대한 그릇된 혹은 이해부족에서 오는 여러 가지 폐해 또한 없지 않다. 그 동안은 이 모델링이라는 것은 학술적 도구 혹은 연구테마로 주로 이용되었다. 그런데 우리나라에서는 지금의 지하수환경오염 문제를 다루는 곳에 사용되기보다도 일부 건설이나 터키공사시 간단히 구색 맞추는 식의 모델링이 행해졌다. 또한 일부 환경영향평가지도 사용되었는데 뻔한 결론에 맞추는 식의 지하수 모델링이 성행된 것 또한 주지의 사실이다. 사실 가장 쉬우면서도 가장 어려운 것이 이 모델링이 아닌가 한다. 원하는 결론을 얻기 위해서는 얼마든지 그 방향으로 모델링을 할 수가 있다. 물론 이것은 사실이 아니다. 실제 현장조건을 제대로 반영하여 적절한 경계조건과 물성치를 주어 조정하고 모의를 한다면 그렇게 원하는 결과만을 나타내지는 못할 것이다. 실제로 우리나라에서 지하수 모델링의 질을 따지는 논의는 크게 없었다. 누가 하든지 했으면 그만이지 모델링 과정의 적절성은 크게 따지지 않았다. 그런 결과 어떤 중요한 결정에서 판단근거의 최후순위로 밀리거나 아예 근거로 채택조차 않는다.

외국의 사례를 들면 광범위한 오염이 발생한 한 지역에서 오염원을 가진 두 관련 회사의 배상 및 복원금액을 분할하기 위해 모델링을 공식적 증거로 채택하고 이를 미국환경청과 법원에서 승인하는 경우가 적지 않다 (Guiguer, 2001, personal communication).

이런 모델링에 대해 국내의 부정적인 인식은 사실 모델러의 책임 또한 적지 않다. 대상 지하수시스템에 대한 적절한 이해를 하지 못하고 또 중요한 여러 수리지질학적 파라미터들을 현장에서 구하지 않거나 혹은 비슷한 수리지질학적 조건을 갖는 물성치들에 대한 연구를 게을리하고 단순히 문헌적

자료만을 따르는 경우가 적지 않다.

지하수 전문 프로그램으로 흔히 Visual MODFLOW를 사용한다. 이 모델링 프로그램의 한계에 대한 인식이 필요하다. 단열암반 대수층에 대한 적용성에 있어서는 상당한 어려움을 가지고 있다. 특히 이 프로그램은 자유상 오염물질(free product)의 거동에 대한 모의나 예측은 불가능하다. 또한 지상에 설치된 유류저장고에서 새어나온 유류오염물질이 불포화대를 거쳐 얼마만큼의 시간을 거쳐 어떻게 포화대에 도달하는지에 대한 정보는 줄 수 없다. 위에서 언급한 일반적 지하수모델링의 한계점은 동일하게 유류오염지역에 대한 지하수 모델링에도 적용된다.

## 2.4 Darcian velocity

지하수 분야를 공부한 모든 엔지니어들이 잘 알고 있는 내용이지만 안타깝게도 실제로 환경평가보고서 혹은 유류오염지역 지하수·토양정밀조사 보고서에 자주 나오는 몇 가지 사실에 대해 언급하고자 한다. 첫째 지하수 유속에 대한 것이다. 이때 지하수 유속이란 지하수가 흐름방향으로 지하매질 내를 단위 시간당 어느 정도의 거리를 흘러가는지를 의미한다. 이를 지하수 용어로 평균 선형속도(average linear velocity)라고 한다. 그런데 흔히 specific discharge or Darcian velocity를 지하수 유속으로 혼동하는 경우를 심심치 않게 발견한다. Darcy's law에 의하면 다공성 매질을 통과하는 지하수의 흐름은 다음과 같이 나타낸다.

$$v = \frac{Q}{A'} = -K \frac{dh}{dl} \quad [1]$$

이때  $v$ 는 지하수 유속이 아닌 specific discharge (Darcian velocity)이고  $\frac{dh}{dl}$ 은 수두구배이다. Fetter (1988)도 주지하다시피 이를 지하수가 이 속도로 흐르는 것을 의미하는 것으로 오해해서는 안된다. 아마도  $v$ 의 차원(dimension)이 일반적인 속도의 단위 즉 [L/T]이기 때문에 종종 오해가 발생하는 것 같다. 실제로 지하수의 흐름속도를 나타내는 평균선형속도는 다음과 같이 나타낸다.



$$V_x = \frac{Q}{n_e A} = \frac{v}{n_e} = \frac{Kdh}{n_e dl} \quad [2]$$

이때  $n_e$ 는 유효공극율이다. 이렇게 계산값을 바탕으로 비로소 지하수가 일년에 몇 미터를 흘러간다고 말할 수 있는 것이다. 그런데 이와같은 개념도 현재 현업에서 현장업무를 수행하고 보고서를 작성하는 과정중에 간과되고 있다.

## 2.5 수위

지하수관측정을 통해 측정하는 지하수위는 그 지점의 그리고 스크린이 설치된 구간의 평균수두(hydraulic head)를 나타낸다. 이들 수두가 같은 지점을 연결해 놓은 지도를 등수선도(potentiometric map)이라 한다. 이때 하나의 조건이 붙는데 대상 대수층이 하나라는 것이다. 즉 어떤 관정들은 천층대수층에 스크린을 설치하고 또 다른 관정들은 암반대수층에 스크린을 설치하여 거기서 측정한 지하수위를 모두 이용하여 하나의 등수선도를 그려서는 안된다는 것이다. 그리고 같은 대수층이라도 스크린이 각각 다른 깊이에 설치되어 있는데도 측정한 수위를 등수선도에 별다른 언급없이 나타내는 것은 이 대수층내 지하수의 흐름이 2차원 수평흐름이라는 것을 가정하고 있기 때문이다. 이에 대한 이해가 필요하다.

## 3. 토론

저자들은 이 리뷰에서 몇 가지 지하수환경 이론과 실무에서 너무도 당연한 몇 가지를 얘기하였다. 그것은 유류오염지역의 조사에 관한 것도 있고 또 일반지하수환경조사에 관한 것도 있다. 대부분의 수리지질학자 및 업계 엔지니어는 구태여 이런 기본적인 얘기를 왜하나 하고 의아해 할 것이다. 그럼에도 불구하고 본 리뷰의 목적은 저자와 같이 현업에 종사하는 엔지니어들이 간과하기 쉬운 기본적인 것을 짚어보자는 것이다.

## 참고문헌

- Fetter, C.W., 1988. Applied Hydrogeology, 2nd edition, Merrill Publishing Company, Ohio, 592p.
- Lee, J.Y., J.Y. Cheon, K.K. Lee, S.Y. Lee, and M.H. Lee, 2001. Factors affecting the distribution of hydrocarbon contaminants and hydrogeochemical parameters in a shallow sand aquifer, Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 50, No. 1-2, p. 139-158.