

농촌지역 지하수 오염조사

Investigation of Groundwater Contamination on Rural Area

김 재 흥*
Kim, Jae-heung

1. 머리말

물은 두 개의 수소원자와 한 개의 산소원자로 구성(H₂O)되어 있으며, 그 특성상 접촉하는 거의 모든 물질을 소량이나마 용해시킬 수 있는 능력이 있어서 거의 모든 경우에 용매(solvent) 역할을 한다. 지하수에 용해되어 있는 성분과 농도는 강수의 화학적 조성, 지표와 토양에서 일어나는 생물화학적 반응들 및 물이 통과하는 대수층 구성광물 성분 등에 좌우된다.

우리가 이용하는 지하수의 근원은 대부분 강수에 의해 지표수가 지하로 침투한 것으로서 기반암의 조성광물이 특수한 경우를 제외하고는 일반적으로 지하수의 수질은 지표수의 영향을 받는다. 최근 농약·비료·축산 및 산업폐수 등에 의한 지하수오염이 점차적으로 확산되고 있으며, 지하수개발·이용량의 증가에 따른 폐공양산으로 인한 오염확산이 늘어나고 있어 그 대책이 시급한 실정이다.

본고에서는 2001년부터 농림부에서 농촌지역의 소중한 지하수자원의 보호와 자손후대까지 지속적으로 활용하기 위한 최적이용관리시스템 구축을 목적으로 하는 『농촌지하수 보전·관리사업』의 효율적인 추진을 위하여 지하수오염원인과 조사방법에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 지하수의 오염

가. 지하수 오염원인

지하수 이용량이 점차 늘어나면서 지하수오염에 대한 정부와 국민들의 관심이 고조되고 있으며, 현재 지하수오염은 우리의 예상보다 훨씬 더 널리 퍼져 있음을 알게 되었다. 또한 지하수오염이 이를 사용하는 이들에게 건강상 심각한 위험을 내포하고 있고, 오염된 지하수의 정화에는 수백년의 시간이 걸리고 엄청난 복원비용이 들어감을 알게 되었다.

오염된 지하수는 지하수의 저수지 역할을 하는 대수층의 오염을 가져오며, 오염된 대수층의 복원은 거의 불가능하고, 이를 통해서 흐르는 깨끗한 지하수를 오염시킨다. 또한 오염된 지하수는 지하를 흐르면서 또다른 대수층과 토양의 이차오염을 유발하며 지표로 흘러나와 지표수의 오염을 일으키기도 한다. 따라서 유해물질에 의한 지하수의 오염은 반드시 피해야 한다.

지하수의 수질을 악화시키는 오염원인은 크게 자연환경 자체로부터의 오염과 인간환경으로부터의 오염으로 구분할 수 있다. 자연환경 자체로부터의 오염은 해수의 육지침투, 탄산염암 및 수용성 광물의 용해, 자연방사능 물질의

* 농림부 농촌용수과

나. 지하수 오염체의 이동

지하수내로 침투한 오염물질은 지하수 오염체(Plume)를 형성하면서 이동하는데 이들의 이동방법은 크게 이류(Advection)와 수력학적 분산(Hydrodynamic dispersion)으로 이루어진다. 이류란 오염체의 이동방향이 지하수의 이동방향과 일치하는 경우이고, 수력학적 분산은 오염물질의 이동이 물분자의 기계적혼합(Mechanical mixing)과 분자확산(Molecular diffusion)에 의해 지하수 유동방향과 수직방향으로 퍼져나가는 것을 말한다.

지하수오염의 심각성은 오염된 지역의 크기, 오염물질의 양과 침출속도, 용해도, 유독성, 비중, 오염체의 형태 및 이동속도, 오염체가 이동하는 토양과 암석의 광물성분과 수력학적 특성, 그리고 주변지역에서의 지하수 이용 등에 의해 영향을 받는다. 또한, 오염물질은 토양과 대수층내에서 유기물과 무기물에 흡착과 화학반응을 일으키면서 감소되므로 지하수계 내에서의 오염체의 이동과 변화를 예측하기란 쉽지 않다.

오염된 지역의 범위는 정화조와 같은 점오염원(Point sources)부터 오페수가 누수되는 경우의 한정된 지역, 여러개의 도시 및 산업폐기물 매립지 등이 위치하는 광범위한 지역, 그리고 농약과 비료 등 농화학물질의 살포와 같은 비점오염원(Non-point sources)에 의한 비교적 넓은 지역을 생각할 수 있다.

오염물질이 통과하는 암석과 토양의 광물성분과 물리적인 특성 역시 여러방면으로 오염물질에 영향을 미친다. 오염물질이 한 점(Point)에서 유입되었다면 이는 이류와 수력학적인 분산을 통하여 종횡으로 퍼져갈 것이며, 결과적으로 그 농도는 오염체의 이동방향으로 가면서 감소할 것이다. 유기물질과 기타 생물학적으로 분해가 가능한 물질들은 불포화대에

서 산화와 박테리아의 작용에 의하여 파괴될 것이다. 점토나 유기물 등의 특정한 토양 물질들은 미량금속(Trace metals)과 특정한 복합 유기오염물질을 흡착하여 결과적으로 지하환경에서 이들이 이동함에 따라서 그 농도가 감소하기도 한다.

지하수오염지역에서 오랜동안 감시한 결과를 보면 어떤 성분은 농도가 일정한데 비하여 다른 성분은 변동하기도 한다. 이러한 현상은 오염체가 이동경로에서 지질매체와 화학반응을 일으켜, 화학물질들이 용융, 용해되어서 일어난 것이다. 그러므로 대수층 내에서 지하수와 오염체의 이동에 영향을 미치는 요소들은 상당히 복잡하며, 따라서 지하수오염조사는 상당한 기간의 광범위하고도 값비싼 작업을 필요로 한다.

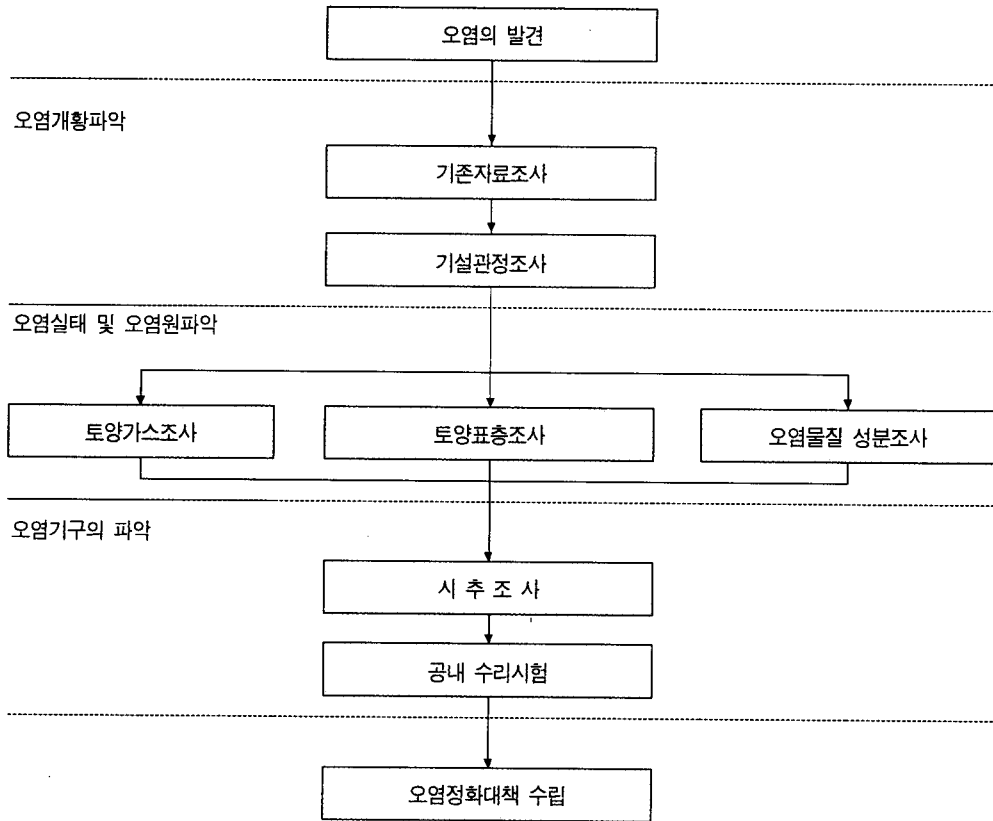
3. 지하수 오염조사

지하수오염의 진행은 수자원으로서의 지하수의 유용성을 저하시킬 뿐아니라 우리의 건강에 중대한 영향을 가져오는 위험성을 내포하고 있다. 여기서는 오염실태와 오염기구(Mechanism)를 정확히 파악하여 적절한 오염정화대책을 수립하기 위한 조사방법을 소개한다.

정화대책 수립을 위한 지하수오염조사는 오염물질의 종류에 관계없이 오염개황조사, 오염실태 및 오염원조사, 오염기구조사 등 3단계로 구분 추진한다<그림-1>. 또한 지하수와 토양은 따로 떼어놓고 생각할 수 없으므로 항상 함께 조사되고 복원계획도 수립되어야 할 것이다.

가. 오염개황조사

토양 및 지하수오염이 발견된 단계에서는 오염이 검출된 용수 또는 관정의 오염농도 등 단편적인 정보만 얻어지는 경우가 대부분이다.



〈그림 - 1〉 지하수오염조사의 추진방법

효율적 오염조사를 시행하기 위해서는 대상지역의 지형, 수문지질, 오염물질의 이용상황, 시설관정의 오염상황 등의 파악이 중요하다.

○ 기존자료조사 : 현지조사를 추진하는 전 단계의 예비적조사로서 법령에 의한 각종 신고자료와 오염지역 주변의 지형도, 지질도, 수리지질도, 지질주상도, 항공사진, 물리탐사 결과 등의 기존자료를 취득·정리하여, 오염지역 주변의 지형, 수문지질구조, 지하수오염상황, 오염물질의 사용실태, 오염주변지역의 토지와 지하수 이용실태, 과거의 사업활동 등을 파악한다. 또한 자료 부족시는 오염물질 취급사업장의 청문조사나 탐문조사를 시행한다.

○ 시설관정 지하수조사 : 토양·지하수오염 지역 주변의 시설관정에 대하여 지하수위와

오염농도를 측정하여, 지하수위와 오염농도의 분포상황 등을 파악하므로써 오염지역과 오염원의 위치를 추정한다. 지하수조사에서는 공내 유향유속계와 추적자(tracer)시험에 의한 지하수의 유향·유속 측정으로 지하수 유동방향을 구할 수 있다. 지하수위 측정결과를 기초로 지하수위표고를 구하여 대수층마다의 지하수위 등고선도를 작성한다. 이때, 기존자료 등에서 우물자재에 관한 자료가 없는 경우에는 전기검층과 수중TV 카메라 등을 이용해 심도를 측정하여 취수대상으로 하고있는 대수층을 파악한다. 지하수오염농도의 측정은 시설관정에서 지하수를 채수·분석하여 대수층마다의 지하수오염분포를 파악한다. 지하수는 기설 양수 펌프로 양수된 것을 채수하거나, 채수기와 소

형수중펌프로 직접 관정에서 채수한다. 석유계 탄화수소의 경우는 지하수면에 피막상으로 떠 있기 때문에 기설 양수펌프로 회수가 어려우므로 흡착제와 부력기 등을 이용하여 직접 지하수면상에서 채수하는 방법이 좋다. 더욱이 석유계탄화수소는 우물자재 부분에 지하수면이 있을 때만 관정에서 유출되기 때문에 주변 지층중에 오염물질이 존재하고 있어도 관정에 유입되지 않는 경우가 있으므로 주의하여야 하며, 관정내에 유입된 석유계탄화수소의 두께는 주변 지층 중의 두께보다 두꺼워진다는 것이 알려져 있다.

나. 오염실태 및 오염원조사

지하수오염지역에는 기설관정이 적은 지역도 많고 오염실태와 오염원 파악에 필요한 적정한 위치에 관정이 존재하지 않는 경우가 대부분이다. 이러한 문제해결을 위하여 표층부에 있어서의 토양중 또는 토양가스 중의 오염농도분포조사와 관정 내 지하수중의 오염물질의 조성성분조사를 한다.

○ 토양가스조사 : 휘발성유기염소화합물과 일부 석유계탄화수소와 같이 휘발성이 높은 성분이 함유된 오염물질에 대하여는 토양과 지하수중에 존재하는 오염물질이 기화한 토양가스성분을 분석하면 개략적인 오염물질의 침투범위와 고농도의 오염체(Plume)가 분포하는 범위를 추정할 수 있다. 토양가스조사는 오염범위와 오염상황을 개괄할 수 있는 광범위한 토양가스조사(광역토양가스조사)와 오염원 위치지역 내에 있어서의 오염물질의 지하침투위치를 파악하기 위한 오염원위치지역 내 토양가스조사의 두가지로 나눌 수 있다.

광역토양가스조사에서는 가스농도가 낮은 지역도 포함되기 때문에 고감도 분석방법이 필요하게 된다. 조사지점은 격자상으로 배치하

는 경우가 많으나 지하수의 흐름을 횡단하는 방향으로 여러개의 축선을 설정하여 각 축선에서의 토양가스 고농도대 분포조사를 통하여 오염물질의 이동경로를 파악, 오염원의 위치를 찾아내는 방법을 사용한다. 오염원 위치지역 내 토양가스조사에서는 광역토양가스조사에서 추정된 오염원 위치지역에 대하여 세밀한 격자상(1~10m 간격정도)의 토양가스조사를 실시하여 오염물질의 지하 침입장소인 토양가스 고농도지점을 찾는다. 오염물질의 침입위치의 파악을 위해서는 중~저감도의 분석방법으로도 가능한 경우가 많다.

토양가스 조사방법에는 여러 가지가 있으며 목적에 따라 적절한 조사방법을 선정하는 것이 중요하다. 또한 조사방법에 있어서도 굴착공의 깊이, 굴착 후 시간, 가스 흡입속도, 기상조건, 지표면의 피복상태 등에 의하여 토양가스의 발생상황이 변화하여 측정치가 1/2에서 2배정도 변화하기 때문에 측정치의 해석에 주의가 필요하다.

○ 표층토양의 조사 : 중금속과 비휘발성 유기염소화합물(PCB 등)은 토양·지하수 중을 이동하기 어려워 표층부 토양에 집적되기 쉽다. 따라서 이들 물질에 의한 오염실태를 파악하기 위해서는 표층부 토양을 분석하여 토양오염농도의 분포를 조사하는 방법이 일반적이다.

표층토양조사에서는 1,000m²(30m×30m 정도)에 따라 1개소 정도의 비율로 조사지점을 설정하여 지표면하 15cm 정도까지의 범위에서 5지점 혼합방식으로 토양을 채취한다. 표층토양중의 오염농도는 원자흡광법, ICP 발광분광분석법 등의 분석법에 의하여 용출량이나 함유량을 구할 수 있다. 또한 현장성, 신속성, 낮은 코스트 등에 뛰어난 간이분석법으로서 중금속의 경우에는 산추출을 이용한 신속측정법과 X선형광분석법(XRF) 등이 PCB의 경우에는 효소면역법(EIA법)이 개발되어 있다.

○ 오염물질의 성분조성에 의한 조사 : 기설 관정조사 만으로 오염범위와 오염원 특성을 파악하기가 어려우나, 지하수중에 포함된 오염물질의 성분조성을 알 수 있으면 그 구성비에서 오염물질의 유동방향을 파악한다거나 오염원의 종류파악 등이 가능한 경우도 있다. 또한 휘발성 물질에 의한 오염에서는 이 방법을 토양가스 중의 오염물질에 응용하는 것도 가능하다.

오염물질의 성분조성에서 오염물질의 유동 방향을 파악하는 방법은 토양·지하수 중에서의 체류시간과 이동거리에 따라 생물학적 또는 화학적분해가 진행되어 휘발성유기염소화합물의 농도구성비가 변화하는 것 또는 휘발유, 등유, 경유 등의 석유계탄화수소에 포함되어 있는 저비점성분이 감소하는 경향이 있는 것에 주목하여 그들 성분의 농도구성비의 분포에서 오염물질의 유동방향을 추정하는 것이다. 농도가 변화한 곳에서는 휘발유에 첨가되어있는 착화제가 상품에 따라 다르다는 것에 주목하여 지하수중의 휘발유에 함유되어 있던 착화제의 종류에서 오염원인 휘발유의 위치를 찾은 사례도 보고되고 있다

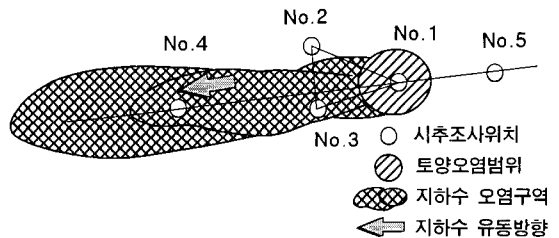
오염물질의 성분조성에서 오염원의 종류를 추정하는 방법은 지하수에 포함된 오염물질의 안정동위원소의 자연존재비를 측정하여 그 안정동위원소 비에서 오염물질의 공급원을 추정하는 방법이다. 질산성질소에 의한 지하수오염에서는 공급원을 추정 또는 동정하기 위한 방법으로 잘알려져 있고, 공기중의 질소의 동위원소비($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)를 기준으로한 N치에서 화학비료와 축산배수, 가정용배수 등의 질소 공급원에 대하여 정성적으로 고찰이 가능하다.

다. 오염기구 해명조사

오염기구해명조사는 오염지역의 수문지질구조를 파악함과 동시에 지층이나 지하수에 있어서

의 3차원적인 오염기구를 파악하는 것을 목적으로 하고 있으며 다음과 같은 조사가 있다.

○ 시추조사 : 시추조사에서는 오염물질의 분포상황을 파악하기 위하여 심도별 지질과 코아채취 및 전기검층에 의한 지질구조를 파악함과 동시에 지질코아 시료에 포함된 오염물질 농도를 용출량 혹은 함유량으로부터 측정한다. 시추조사에는 타설관정조사법과 같이 지질코아의 채취를 하지 않고 3차원적인 지하수 오염상황만을 파악하기 위한 방법도 포함된다. 휘발성유기염소화합물과 석유계탄화수소와 같은 이동성이 높은 오염물질에 대한 오염원 주변의 시추조사지점 배치의 기본적인 방법은 <그림-2>와 같다.



<그림-2> 오염원 주변의 시추조사지점 배치계획

시추조사는 No.1에서부터 차례로 시행한다. No.4와 같이 하류부 지점에는 심도별 지하수 오염농도를 파악하기 위하여 시추하는 방법도 효과적이고, 타설관정조사법과 코아 비회수시추 등 지질상황에 맞는 방법을 택한다. 중금속과 PCB와 같이 오염물질의 이동성이 낮은 경우에는 격자상으로 시추위치를 설치하는 것이 일반적이고, 토양오염의 가능성이 높은 장소에서는 다시 깊은 심도의 시추조사를 실시한다.

시추방법에는 핸드오가식, 로타리식, 타격관입식 등이 있고 타격관입식에는 진동식 햄머를 이용하는 방법과 크로라에 탑재된 타격식 굴삭기를 이용하는 방법 등이 있다.

시추조사에서 채취된 지질코아는 될 수 있

는대로 흐트러지지 않은 상태로 지질상황을 관찰함과 동시에 1~3개소/m 정도의 비율로 채취한 시료를 분석한다. 오염물질이 휘발성이 높은 유기염소화합물 혹은 석유계탄화수소인 경우는 오염물질이 휘발되지 않는 사이에 현장에서 신속하게 오염도를 측정하여야 유효하며, 지층 오염상황과 굴삭용수(이수)의 오염 상황에 의하여 시추계획을 임기응변적으로 변경할 필요가 있다.

토양의 간이분석에서는 검지관과 GC-PID 등을 이용한 헤드스페이스법에 의한 휘발성유기염소화합물 또는 석유계탄화수소의 현장분석, 효소면역법 등에 의한 석유계탄화수소와 PCB의 현장분석, 산추출을 이용한 신속측정법에 의한 중금속의 분석 등이 실용화되어 있다.

○ 공내수리시험 : 오염대수층의 투수성조사는 오염지하수의 이동을 평가하거나 지하수양수법에 의한 정화대책계획입안을 위해서도 중요하다. 또한, 지층의 투기성은 토양가스흡인법에 의한 정화대책계획을 세우기 위해서도 중요하다.

투수계수 측정을 위한 원위치투수시험에는 다공식양수시험, 단공식투수시험, 단공식양수시험, 공내유속측정시험, 추적자시험 등의 방법이 있으나, 현장에서 가장 많이 이용되고 있는 방법은 다공식양수시험과 단공식투수시험이다.

다공식양수시험은 대수층의 평균적인 투수계수와 저류계수를 정밀하게 구하는데 유효한 시험이나, 다량으로 양수되는 오염지하수처리를 위하여 수처리장치와 배관, 방음장치의 설치를 필요로 하는 등 상당한 비용이 든다. 한편, 단공식 투수시험은 적은 비용으로 간단하게 실시가 가능하고 주의깊게 시험을 실시하면 국소적인 투수계수 평가가 가능하며, 오염대수층에 적용함으로써 시험공 주변의 오염대수층에 미치는 영향을 최소한으로 억제하며, 조사공에 인접한 건물의 영향도 다공식투수시험보다는 월등히 적게 할 수 있다. 단공식투수시험에서는 슬러그시

험법(slug test)을 이용하면 오염지하수의 양수와 그 처리가 필요없게 된다.

지층의 투기성을 나타내는 지표에는 투기계수가 있고 현장 투기시험에 의해 구할 수 있다. 그러나 투수계수와 같이 지반 고유의 수치로서 투기계수를 구할 수는 없고, 대규모의 시험장치에 알맞는 공간확보도 어렵다. 따라서 진공펌프로 일정하게 압력을 제거한 후 대기압에 돌아올 때까지의 압력회복곡선에서 지층마다의 상대적인 투기성을 판단하는 간편한 시험방법을 이용하는 경우도 있다.

4. 맺는 말

지하수 및 토양오염 조사법에는 조사목적에 따라 여러 가지 방법이 있을 수 있으며 금번에는 관련 정책입안자나 실무자에게 도움이 되도록 일반적인 조사방법을 소개하였다.

특히, 농림부에서는 식량생산 뿐만아니라 수질 및 대기정화, 생태계보전 등의 환경적 기능과 함께 아름다운 자연경관으로 심미적 기능까지 갖추어 모든 국민의 삶의 터전이 되고 있는 농촌지역의 소중한 지하수자원을 각종 오염원으로부터 보호하면서 최적개발·이용할 수 있는 「농촌지하수 보전관리사업」을 2001년부터 신규 시행코자 하고있으며, 이 사업시행시 지하수의 조사에 도움이 되기를 바란다.

지하수는 한번 오염되면 정화에 많은 시간이 걸리고, 오염된 지하수의 복원비용은 사전 오염방지비용의 약 200배 이상 소요되는 것으로 보고(미국 EPA)되고 있다. 이러한 이유로 농촌지역 지하수자원의 오염을 사전에 방지하고자 하는 「농촌지하수 보전관리사업」시행의 시급성이 여기에 있다. 지하수환경의 보전 관리는 정부사업의 시행만으로는 한계가 있으며 무엇보다도 국민의 사전 오염방지노력이 중요하다.