

지하수 수질과 토지이용, 토양 특성 및 지질과의 정량적 통계분석

고경석 · 조성현 · 이진수 · 김통권 · 김재곤 · 오인숙

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
e-mail: kyungsok@kigam.re.kr

요 약 문

논산지역의 간이상수도 수질을 모니터링한 결과 약 13-21% 정도가 간이상수도 수질기준을 초과하는 것으로 확인되었으며 그 원인은 주로 질산성질소, 탁도, 일반세균 등에 의함을 알 수 있었다. 연구지역의 지하수 수질에 영향을 미치는 인자를 정량적으로 해석하기 위하여 토지이용도, 토양도 및 지질도를 작성하여 판별분석을 수행하였다. 판별분석 결과 지하수 수질과 지질은 겉보기 오차율이 5.56%로 매우 밀접한 상관성을 나타내었으나 토지이용과는 52.63%로 상관성이 없는 것으로 나타났으며 이는 점오염원의 효과를 고려하지 못하였기 때문으로 사료된다. 토양특성과는 오차율이 13.16%로 비교적 잘 일치하는 결과를 보여주었으며 이는 토양발달이 지질과 밀접한 상관성을 가지기 때문으로 판단된다.

Key words: 간이상수도, 판별분석, 토지이용도, 토양도, 지질도

1. 서언

간이상수도는 500만에 가까운 농어촌인구가 사용함에도 불구하고 많은 연구가 수행되어 못하고 있다. 최근 들어 수질기준 초과하는 오염현상이 전국 곳곳에서 나타남에 따라 오염방지를 위한 효율적인 관리방안에 대하여 관심이 증가하고 있다. 환경부에서는 매년 간이상수도 현황을 통계연보로 조사하여 발표하고 있으며 분기별로 수질을 검사하여 그 오염 실태를 파악하고 있다. 광역상수도에 기초하여 대부분의 수도공급을 하고 있는 우리나라의 현실상 간이상수도 현황에 대한 연구는 김영규(1992), 이용 등(2001) 및 고경석 등(2004)을 제외하고는 거의 이루어진바가 없다.

시범연구지역인 논산지역의 간이상수도 수질에 대하여서는 1차년도에 조사가 이루어진바 있으며 수질검사 기준에 의해 분기별로 1년에 4차례 분석이 이루어지고 있다. 그러나 수질 조사가 14개 항목에 한정되어 조사되고 부정기적으로 도나 시에서 먹는물 수질 기준전체에 대해 조사를 실시하고 있는 실정이다. 지하수 수질에 대한 특성을 알아보기 위해서는 주요 이온 성분에 대한 분포도와 모니터링 결과가 중요하다. 특히 질산성질소와 같은 비점오염원에 대한 모니터링은 토지이용 등에 따른 오염분포의 변화양상을 확인할 수 있는 수단으로 이용될 것이다. 따라서 본 연구에서는 논산지역의 지하수 수질을 조사하고 이를 토양특성, 지질 및 토지이용과 관련하여 정량적인 통계분석을 통하여 해석하고자 하였다.

2. 연구지역 및 방법

연구지역인 논산시는 중생대 화강암이 분포하는 지역은 평야지대, 선캠브리아 변성암이 분포하는 지역은 구릉지대, 육천층군인 변성퇴적암이 분포하는 지역은 산지 지형을 이루고 백악기 화산암이 분포하는 지역은 산릉을 이루는 등 그 구분이 뚜렷하게 나타난다. 토지이용도는 논, 밭, 초지 및 임야, 인공초지, 주거지, 공업 및 교통시설, 점오염원, 수계로 분류되어 작성되었으며, 토양

₩도는 토지 발달의 정도에 따라 크게 4분류하고 다시 11개로 세분류하여 토양도를 작성하였다. 대분류된 토양의 특성은 Entis(Entisols)는 토양발달이 극히 미약하고 토심이 얇으며 토양화과정에 나타나는 층위의 발달이 없거나 발달의 초기단계인 토양이며, Epts(Inceptisols)는 토양의 발달정도가 미약하나 Entisols보다 더 진화된 토양이다. Alfis(Alfisols)는 A, B, C층의 발달이 명확히 구분되며 표토의 유기물함량은 비교적 낮은 편이다. B층은 A층으로부터 이동된 aluminum silicates의 함량이 높다. B층은 수용성 양이온 (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} 등)의 함량이 높다. B층의 base saturation이 35% 이상으로 알려져 있다. Entisols과 Inceptisols에 비해 상대적으로 수용성 양이온과 음이온의 함량이 높다. 연구지역에서 낮은 지역에 분포하며 주로 논으로 활용되고 있다. 마지막으로 Ultis(Ultisols)는 Alfisols보다 풍화가 많이 진행되어 발달된 토양으로서 점토의 함량이 높은 B층이 두꺼우나 수용성 양이온과 음이온의 함량이 상대적으로 낮다. 연구지역에서는 국부적으로 나타나며 주로 밭으로 이용되고 있다.

시범연구지역으로 선정된 논산시에 대하여 126개의 시료를 채취하여 분석을 실시하였다. 2004년 10월에서 12월에 걸쳐 126개소에서 현장조사와 시료채취를 실시하고 현황조사를 실시하였다. 채취되는 지하수 시료는 관측정의 수리지구화학적 대표성을 나타내기 위하여 양수를 하면서 온도, 수소이온농도(pH) 및 전기전도도를 측정하여 이들이 안정된 값을 나타낼 때까지 기다린 후 시료를 채취되었다.

판별분석은 두 개 이상의 모집단에서 추출된 표본들이 가지고 있는 정보들을 이용하여 이 표본들이 어느 모집단에서 추출된 것인지를 결정해 줄 수 있는 기준을 찾는 방법이다. 판별분석은 한개 이상의 판별 변수의 조합으로 이루어진 판별함수(discriminant functions)에 의해 그룹내 분산에 대해 그룹간 분산을 최대화하고자 하는데 목적을 둔다(Wilson, 2002). 판별분석을 수행하기 위해서는 정성(범주, category) 종속 변수와 독립변수들의 세트가 필요하다. 범주-종속 변수는 각각 개체를 한 개의 정해진 그룹에 속하도록 하는 변수이며, 선형의 판별함수는 다음과 같이 정의된다.

$$D = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_pX_p$$

위 식에서 X_1, X_2, \dots, X_p 는 독립변수들의 값이며, B_0, B_1, \dots, B_p 는 자료로부터 측정된 계수들이다. 본 연구에서는 토지이용도를 범주변수로 설정하고 토양 특성 자료를 사용하여 토지이용에 따른 판별함수를 구한 후 토양특성에 따른 토지이용의 변화나 공통성을 해석하고자 하였다. 판별분석(DA)을 위해서는 주성분분석과 마찬가지로 XLSTAT[®]을 이용하였다. 판별 분석에는 지하수 시료 126개에 대한 분석자료를 이용하여 지질, 토지이용 및 토양 특성별로 분류하여 연구를 수행하였다.

3. 연구결과

3.1. 간이상수도 수질 모니터링 결과

지하수 수질조사는 분기별로 실시되는 간이상수도 수질에 대한 논산지역의 2004년 3/4분기에서 2005년 3/4 분기까지의 5회간의 14개 항목의 정기 분석 항목에 대한 논산시 수도사업소의 수질 모니터링 결과를 살펴보면 약 13-21% 정도가 수질 기준을 초과하는 것으로 확인되었다 (표 1; 그림 1). 각 성분별 분포도에서 확인할 수 있었던이 수질기준 초과 지역은 거의 같은 곳에서 반복적으로 발생하고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 탁도 같은 것은 지역적인 것과는 상관없이 관정 관리 상태에 따라 많은 영향을 받는 것으로 사료되었다. 2005년 2/4분기와 3/4분기에 있어 지하수 수질초과 비율은 이전보다는 약 5% 정도 감소하였음을 알 수 있었다. 이는 농촌 생활용수를 모두 간이급수시설로 전환하여 수질오염 관리를 보다 효율적으로 하였기 때문으로 사료된다. 비록 질산성질소, 비소, 불소 등 자연적인 요인에 의해 발생하는 수질오염은 제거하기 어려웠지만 일반세균, 대장균 같은 요인은 관리 여부에 따라 충분히 방지할 수 있음을 확인하였다.

시범연구지역인 논산의 경우 옥천대의 영향에 따라 비소 오염이 관찰되는데 1개소가 수질기준인 50 µg/L를 초과하며, WHO 기준인 10 µg/L를 적용하면 9개 정도의 시료가 기준을 초과하여 전체에서 약 7 % 내외를 차지하였다. 지하수의 공간적인 비소분포양상을 조사한 결과 주로 옥천대 변성퇴적암과 밀접한 상관성이 있는 것으로 나타났다. 각 수질성분의 지질별 농도분포 결과에서도 주요 오염성분인 Na^+ , Cl^- , NO_3^- 는 화강암 분포지역에서 높은 값을 보여주며 이 지역이 대부분 낮은 고도에 위치하고 농경과 거주지가 집중되어 오염에 취약한 특징을 가지는 것으로 판단한다. 이에 반해 pH와 비소는 옥천대 변성퇴적암 지역에서 상대적으로 높게 나타나고 있다. 이는 비소가 지표 오염물질의 유입과는 상관이 없으며 지질특성에 기원하였음을 보여준다. 흑색세일 등을 포함하는 변성퇴적암류에 비소는 황화물 형태로 존재할 수 있으나 지질별 지하수 수질분석에서 pH는 상대적으로 높고 SO_4^{2-} 함량은 특별히 차이가 난다고 할 수 없으므로 이 지역의 비소유출 기작을 단언할 수 없으며 비소 기원물질의 지구화학적 특성에 대한 확인과 보다 정밀한 조사가 요구된다.

표 1. 논산지역 간이상수도 수질 모니터링 결과.

분 기	총개소	오염개소	F (<1.5mg/L)	NO3-N (<100mg/L)	As		일반세균 (<100)	대장균 (-)	탁도 (0.5)	색도
					10	50				
'04 3/4분기	138	26	5	5	6	1	1	1	13	
'04 4/4분기	126	27	6	20	7	1				
'05 1/4분기	130	27		10			14	7	4	
'05 2/4분기	133	17	2	3			6	7	7	
'05 3/4분기	145	22	4	6					11	2

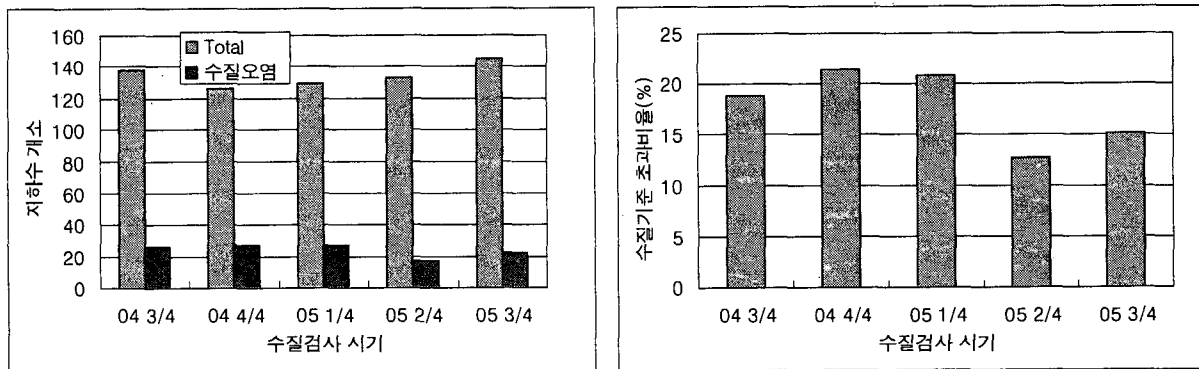


그림 1. 논산지역 간이상수도 수질모니터링 현황.

3.2. 판별 분석을 이용한 수질특성 해석

지질 특성을 이용한 판별분석 결과는 3개의 지질 즉, 화강암, 변성퇴적암(옥천계) 및 편마암의 3개 그룹에 대하여 분석을 수행하였다. 판별분석에서 얻어진 판별함수(discriminant function) 1(DF1)은 고유값이 3.418이고 총 분산(total variance)의 91.1%를 설명하며 매우 높은 유의성(99.99%)을 가짐을 알 수 있었다. 표준화된 판별함수계수로부터 판별함수 1은 전기전도도(EC), Ca, Mg, Si가 가장 중요한 판별 변수임을 알 수 있었으며, 그 다음으로 As, HCO_3^- , Na 및 pH가 판별함수 1에 영향을 미침을 알 수 있었다. 이는 농업활동과 인간거주 등 인위적인 요인과 지질 요인이 복합적으로 지하수 수질에 작용함을 확인시켜 주는 결과이다.

판별함수 1(DF1)과 판별함수 2(DF2)에 대한 각 그룹별 점수(case score) 분포와 각 변수들의 판별함수 인자적재(factor loadings) 값은 그림 2에 나타나 있으며, 지질특성에 따라 각 그룹은

판별함수 1과 2에 의하여 효과적으로 구분됨을 알 수 있다. 그림 2에서 판별함수 1은 pH, As 등에 양의 영향을, Si, NO₃, Na, EC에 의해서는 음의 영향을 미친다. 그림 2로부터 화강암, 변성퇴적암 및 편마암 지역의 지하수 시료는 효과적으로 분리됨을 알 수 있다. 이는 단순히 지질에 의해 구분이 되어진다는 의미보다는 지질에 의해 발생된 지형, 토지이용, 토양 특성이 복합적으로 작용하여 얻어지는 결과로 해석되어진다.

판별분석은 각 토양시료들이 현장조사에서 얻어진 지질, 토지이용 및 토양 특성 자료에 의한 판별분석 결과가 어느 정도 일치하는가를 확인할 수 있게 해준다. 표 2는 초기 지질 분류와 판별분석에 의한 예측자료가 어느 정도 오차를 보여주는지를 나타내는 혼돈 행렬(confusion matrix)이다. 판별분석 결과 전체 자료의 초기 설정값과 예측값 사이의 오차는 5.56%이며, 판별분석에 의해 예측된 자료는 화강암으로 분류되는 시료가 71개로 3개 감소하였으며 옥천계 시료는 38개로 1개 증가, 편마암은 17개로 2개 증가함을 알 수 있었다. 이러한 지질 분류에 의한 판별분석 결과는 수질 특성을 예측할 수 있는 기법으로 사용될 수 있을 것이다.

토지이용에 따른 판별분석결과는 오차율이 52.63%로 지질특성과는 달리 뚜렷한 상관성을 보이지 않음을 알 수 있었다. 이는 연구지역에 점오염원으로 존재하는 인자들에 대한 평가가 고려되지 않았고 또한 토지이용 영향 반경효과가 복합적으로 통계분석에 이용되지 못하였기 때문으로 사료된다. 즉 각각 시료들은 대부분 2개 이상의 토지이용에 영향을 받고 있으나 판별분석시에는 주요 인자 한개씩만 고려되어 이의 효과를 나타내지 못하기 때문이다. 따라서 이러한 인자를 복합적으로 적용할 수 있는 방법이 고려되어야 토지이용의 영향을 나타낼 수 있을 것으로 사료된다.

토양 특성에 대한 판별분석 결과 4개 대분류의 경우 오차율이 13.16%, 8개의 소분류에 대해서는 37.72%의 오차율을 보여주어 토지이용보다는 비교적 정확한 분포를 보여주는 것으로 사료되었다. 이는 토양 발달이 지질과 밀접한 상관성으로 보여주기 때문에 나타나는 결과로 판단된다.

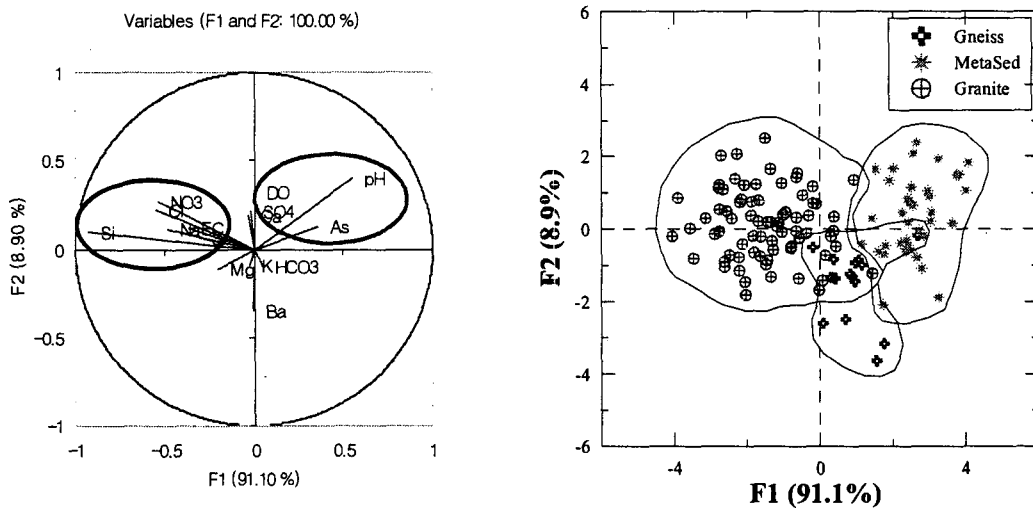


그림 2. 지질 특성에 따른 판별분석 결과.

표 2. Confusion matrix for discriminant analysis (오차=5.56%).

	to Granite	to Ogchen	to Pre-C	Sum
from Granite	70 55.56%	1 0.79%	3 2.38%	74 58.73%
from Ogchen	0 0.00%	36 28.57%	1 0.79%	37 29.37%
from Pre-C	1 0.79%	1 0.79%	13 10.32%	15 11.90%
Sum	71 56.35%	38 30.16%	17 13.49%	126 100.00%

사사

본 연구는 21C 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원 (과제번호: 3-4-2)에 의해 수행되었습니다.

4. 참고문헌

- 고경석, 이진수, 김용제, 2004, 농촌지역 간이상수도 수질에 대한 수리지화학적 특성: 충남 금산군 일대, 한국지하수도양환경학회 추계 학술발표 회, 55-61.
- 김영규, 1992. 일부 농촌지역 간이상수도의 운영실태와 수질에 관한 조사연구. 한국환경위생학회 지, 18(2), 39-51.
- 이용, 박규홍, 이상수, 안진선, 2001, 농촌지역 간이상수도의 효율적인 관리를 위한 기초조사 연구: 경기도 안성시 일부지역을 중심으로. 한국물환경학회·대한상수도학회 2001년 공동추계학술발표 회 논문집, 243-246.