

서울 대도시 지하수 수질의 공간적 변화 특성

윤순열 · 윤성택 · 소철섭 · 채기탁, 이평구*

고려대학교 지구환경과학과

*한국지질자원연구원

e-mail: styun@mail.korea.ac.kr

요약문

서울시 대도시 지하수의 수리지구화학 및 오염 특성을 토지 이용 특성(청정지역, 주거지역, 농업지역, 교통혼잡지역, 공단지역)과 관련하여 고찰함으로써 대도시 지하수 수질의 효율적 관리에 활용하기 위한 3개년 모니터링 연구를 수행하고 있다. 본 논문에서는 현재까지의 연구 결과를 요약하여 소개한다. 총용존고체 함량(TDS)은 지하수 수질 특성 파악에 손쉽고 효과적으로 활용할 수 있는 파라미터임이 확인되며, 청정지역, 주거지역, 농업지역, 교통혼잡지역, 공단지역의 순으로 증가하는 경향이 뚜렷하다. 따라서, 서울 도시 지하수 수질은 일차적으로 부근의 도시화 특성과 밀접한 상관성을 가짐을 확인하였다. 한편, 청정지역의 수질 특성 자료를 제시하여 지하수 오염도 평가의 기준(배경 수질) 자료로 활용토록 하였다.

서울 동부 지역 암반 지하수의 수질 특성을 보면, 강북, 노원, 도봉 등 중랑천 상류 지역의 지하수가 동대문, 성동, 송파구 등 하류쪽의 지하수에 비해 낮은 TDS 함량을 갖는 경향이 있다. 서부 지역 지하수는 동부 지역에 비해 높은 TDS 값을 보이며, 공단부지 면적이 큰 영등포, 금천, 구로구 일대 및 종로, 중구 등 교통혼잡지역 등에서 매우 높은 TDS 함량을 나타내었다. 결국, 서울시 지하수의 TDS 함량은 수-암 반응보다는 인위적인 오염원에 의해 크게 지배되는 것으로 판단된다.

1. 서론

도시 지하수(urban groundwater)의 지하수 체계 교란 및 수질 악화는 수자원 부족과 보건 측면에서 중요한 문제의 하나로 부각되고 있다. 외국에서는 도시 지하수에 대한 관심이 대단히 높으며 그 만큼 연구도 활발히 진행되고 있다. 특히, 토지 이용과 관련한 장기간의 모니터링을 통하여 수리·수질 자료를 광범위하게 축적하고, 이를 지하수 수질의 체계적 관리에 활용하고 있다. 이에 반하여, 국내 대도시 지역 지하수의 연구와 관리는 체계성이 부족하고 저조한 실정이며, 특히 토지 이용 특성과 관련한 시·공간적 수질 특성 파악은 거의 이루어진 바 없다. 이에, 본 연구진은 토지 이용 특성과 관련하여 서울시 암반 지하수의 수리지구화학 및 오염 특성을 시·공간적 측면에서 체계적으로 규명하고자 3개년에 걸친 지구화학 모니터링 연구를 수행하고 있다. 본 연구 결과는 서울 도시 지하수의 오염 특성 규명, 환경 변화 예측, 오염을 최소화하기 위한 효과적인 관리체계 수립 등에 있어 필수 기초 자료로 제공될 것이다.

2. 연구 내용 및 방법

지역별 도시화 및 토지 특성 자료에 근거하여 청정지역, 주거지역, 농업지역, 교통

혼잡지역, 공단지역 등 5개 특성 지역으로 구분하고, 특성지역별로 대표 지하수 시료 채취, 현장 측정, 이화학 분석 등을 수행하고 있다. 연구 대상 지하수공의 심도는 거의 대부분 30-150 m의 범위이다. 시료 채취는 동부, 서부, 중부 및 3년 모니터링 지역으로 나누어 연차적으로 수행되고 있으며, 건기와 우기로 구분하여 진행된다. 분석 항목은 주요 양이온, 음이온 외에도 중금속 등 미량 원소, 환경동위원소($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$, tritium), 유기오염물질(TCE, PCE, BTEX) 등이다.

3. 결과

3-1. 장기 관측지점 지하수의 수리지구화학 특성: 수질기준과의 비교

2000-2001년에 취득된 수질 자료를 음용수 수질 기준과 비교하여 보면, F, Al, As, Cd, Pb, Cr 등 대부분의 분석 항목은 모든 시료에서 기준을 초과하지 않았다. 그러나, 예상되는 대로 NO_3 의 경우는 총 85개 시료 중 34개에서 음용수 수질 기준을 초과하였다. Mn(13개), Fe(7개), Cl(2개), SO_4 , pH, Cu 및 Zn(각 1개) 등도 일부 지역에서 기준치를 초과하였다. 2000년 8월의 채수 시료(30개)에 대한 TCE 및 PCE 분석 결과를 보면, 각각 6개 시료에서 기준치를 초과하였는데, 이들은 대부분 공단지역의 시료였다.

3-2. 주요 용존 이온의 분포 특성

수리지구화학적 진화 및 인위적 오염 정도를 지시할 수 있는 총용존고체함량(TDS)은 평균적으로 공단지역에서 가장 높게 나타났다(평균 538.7 mg/l). 교통 밀집 지역(평균 449.4 mg/l), 주거지역(평균 384.6 mg/l), 농업지역(평균 352.6 mg/l)에서도 높은 TDS 값을 나타낸 반면, 청정지역의 경우에는 가장 낮은 값(평균 157.8 mg/l)을 나타내었다. 따라서, 도시 특성에 따라 지하수의 수질 특성이 크게 변화됨을 알 수 있다. TDS는 관정 심도와는 유의한 상관관계를 보여주지 않아, TDS로 대표되는 용존 이온종의 농도 특성은 자연적 기원(수-암 반응) 보다는 오염 요인에 더욱 지배됨을 알 수 있다. TDS 증가와 더불어 Ca, Na, HCO_3 , Cl 등의 농도는 정(+)의 관계로 증가하는 양상을 보여주었다. 한편, NO_3 는 주거지역과 농업지역에서, Mg와 SO_4 는 공단지역에서 특히 높은 평균 함량을 보인다.

한편, 2개년에 걸친 3차례의 모니터링 결과에 대하여 독립표본 T-test를 수행한 결과, 수질의 시간별(계절별) 차이는 공간적 차이(도시 특성)에 비해 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 그러므로, 도시특성 집단별로 구분하여 용존 이온 함량의 변화 특성을 고찰할 수 있었다. Piper's diagram 상에서 보면, 용존 양이온 중에는 Ca 함량비가 전반적으로 높은 반면, 음이온의 경우에는 지배적인 이온종이 HCO_3 로부터 Cl+ NO_3 를 향하여 넓게 변화한다. 특히, 음이온의 분포 특성은 도시 특성과 밀접한 연관성을 보여주는데, 농업지역과 주거지역에서는 Cl+ NO_3 , 공단지역에서는 SO_4 의 함량비가 높게 나타났다. 따라서, 도시특성별 오염원의 종류를 적절히 반영하는 이온종은 Cl, NO_3 , SO_4 인 것으로 확인되었다.

3-3. 미량원소의 분포 특성

주요 이온종과는 달리, 미량원소의 분포 특성은 국부적인 오염원의 존재에 의해 영향을 받는 것으로 보인다. 즉, 도시특성 집단 간에 평균 농도의 차이를 설명하기에는 집단 내에서의 변화가 너무 컸으며, TDS와의 상관관계도 나타내지 않았다. 미량원소별 고농도 지역은 매우 국부적으로 불규칙하게 분포되는 특성을 나타낸다. 고농도 지역을 살펴보면, As는 농업지역과 산업지역에서, Br과 Cu는 교통혼잡지역에서, Ni는 교통혼잡지역과 산업지역, Zn은 농업지역과 산업지역에서 각각 높은 함량분포를 보여주었다.

3-4. 유기오염물질의 분포 특성

우기인 2000년 8월에 채수한 30개 지하수 시료에 대한 트리클로로에틸렌(TCE) 및

테트라클로로에틸렌(PCE)의 분석을 수행하였다. TCE의 경우, 공단지역에서 가장 높은 함량(평균 637 ppb)을 보여주었으며, 농업지역(평균 129 ppb), 교통혼잡지역(평균 47 ppb), 주거지역(평균 20 ppb), 청정지역(평균 2 ppb)의 순으로 감소하였다. PCE의 평균 함량은 공단지역(171 ppb), 농업지역(22 ppb), 주거지역(15 ppb), 교통혼잡지역(10 ppb), 청정지역(4 ppb)의 순으로 감소하였다. 그러나, 이들 유기오염물질의 농도 분포는 미량원소의 경우에서와 마찬가지로 동일 도시특성 집단 내에서도 큰 차이를 나타내었다. 즉, 매우 국부적인 분포 경향을 나타내었다.

3-5. 서울 도시 지하수의 배경 수질 설정

서울 지역의 지질 조성은 비교적 단순하여, 주로 선캠브리아기 편마암류와 중생대 혹은모화강암으로 구성된다. 특징적인 오염원이 존재하지 않는 청정지역의 지하수는 서울시 지하수의 수질 오염 정도 및 수질 변화를 평가하는데 있어 기준 자료(배경 수질)로 활용할 수 있을 것이다. 2000년 연구의 결과로 도출된 배경 수질을 원소종별로 나열하면, Na(10.75 mg/l), K(1.22 mg/l), Ca(19.86 mg/l), Mg(1.64 mg/l), Cl(9.03 mg/l) 및 HCO₃(54.78 mg/l)이다.

3-6. 동위원소 연구 결과: 예비 해석

서울 지하수의 충전 특성(기원, 연령 등)을 규명하기 위하여 산소-수소 동위원소 및 삼중수소 분석 연구를 수행하고 있다. 산소-수소 동위원소 분석 자료를 보면, 모든 지하수는 순환강우선(MWL) 근처에 밀집 도시되지만 그 범위는 매우 넓다. 따라서, 서울 지하수는 여러 번에 걸친 강우 사건에 수반되어 충전된 강우 기원으로 판단되며, 각 강우 사건 중 충전에 수반되어 다양한 증발 효과를 겪은 것으로 해석된다. 삼중수소분석(12개 시료) 결과를 보면, 대부분의 지하수는 아주 최근에 충전된 빗물에서 기원함을 나타내었다. 그러나, 극히 일부의 심부 관정(심도 200 m 내외)에서는 매우 낮은 삼중수소값을 보여주어 충전 시기가 오래된 지하수도 일부 존재함을 확인하였다. 서울 지하수의 연령 규명에 관한 연구는 현재 추가로 진행 중에 있다.

3-7. 동부 및 서부 지역 지하수의 수리지구화학 및 수질 특성

2000년에 조사된 동부 지역의 지하수 시료(총 57개) 중에는 13개 시료에서 음용수 수질 기준을 초과하는 질산성질소가 검출되었는데, 이들 지역은 대부분 노원, 중랑, 광진, 성동구 등 인구밀집지역이다. 반면, 2001년에 집중 연구된 서부 지역에서는 총 35개 시료 중 11개 시료에서 질산성질소의 음용수 기준을 초과하였다.

TDS 값을 근거로 평가해 보면, 서울 동부 지역 암반 지하수의 수질은 다른 지역에 비하여 비교적 양호한 편이다. 한편 TDS 값의 변화 경향을 살펴보면, 중랑천을 따라 한강 분류(하류)로 내려오면서 점차 높아지는 경향을 보인다. 즉, 동대문구(평균 458.6 mg/l), 성동구(평균 496.0 mg/l), 송파구(평균 563.1 mg/l)에서 비교적 높은 TDS 함량을 보인다. 이는, 지하수가 하류를 향해 이동하는 과정 중에 지표 기원 오염물질의 점진적인 농집이 수반됨을 시사하는 것으로 생각된다. NO₃ 농도는 인구밀집지역으로 알려진 중랑, 광진, 노원, 성동구에서 대체적으로 높은 값을 나타내었다.

서부 지역 암반 지하수는 동부 지역에 비해 높은 TDS 값을 보이는데, 특히 공단부지의 절대 면적이 넓은 영등포(평균 576.2 mg/l), 금천(평균 476.7 mg/l), 구로(평균 462.9 mg/l)에서 높은 값을 나타내었다.

연구 결과를 보다 정량적으로 표현하기 위한 수리지구화학 연구가 진행 중에 있다.

4. 참고문헌

- 1) Christenson, S. and Rea, A., 1993, Ground-Water Quality in the Oklahoma City Urban Area. In: Nash & McCall eds., REGIONAL GROUND-WATER QUALITY, Chapman and Hall, pp. 589-611.
- 2) Pitt, R., Clark, S. and Field, R., 1999, Groundwater contamination potential from stormwater infiltration practices: Urbanwater, vol. 1, p. 217-236.
- 3) Trauth, R. and Xanthopoulos, C., 1997, Non-point pollution of groundwater in urban areas: Wat. Res., 31(11), p. 2711-2718.
- 4) Zilberbrand, M., Rosenthal, E. and Shachnai, E., 2001, Impact of urbanization on hydrochemical evolution of groundwater and on unsaturated-zone gas composition in the coastal city of Tel Aviv, Israel: Jour. Contaminant Hydrol., 50, p. 175-208.