Environmental isotopic and hydrogeochemical study on groundwater recharge in alluvial environment

최병영[1] · 윤성택[1] · 김경호[1] · 채기탁[1] · 김강주[2]

1. 서론

충적층 지하수는 수자원의 확보 및 보존과 관리 측면에서 중요한 관심사가 되어왔다. 국내에서도 최근에 와서 여러 연구자들이 충적층 지하수의 수리지구화학 연구를 수행하였으며 (Min et al., 2003; Chae et al., 2004), 또한 강변여과의 적용 · 타당성 연구를 수행하기도 하였다.

지하수의 산소와 수소 동위원소 ($\delta^{18}O$ 와 δD) 값은 낮은 온도 환경에서 보존성을 지니며 (Issar and Gat, 1981), 지구화학 반응의 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있기 때문에 (Hoefs, 1997), 충진되기 이전의 물이 가지고 있는 동위원소 비율을 반영하며 또한 증발이나 다른 동위원소 조성을 가지고 있는 물과 혼합되지 않는 이상 변하지 않으므로 다양한 물의 기원을 규명하는데 유용하게 쓰인다. 본 연구는 환경동위원소 ($\delta^{18}O$, δD, ^3H)와 수리지구화학 자료를 이용하여 충적층 지하수의 충진 기원을 규명하고자 수행되었다.

2. 연구지역 및 연구방법

본 연구는 충남 부여의 금강 유역에서 수행되었으며 연구 지역 및 시료 채취 위치는 그림 1과 같다. 본 연구를 위하여 충적층 지질 상태가 상이한 지역에 다심도(multi-level) 관측공 3개 (B1, B2, B3)를 설치하고 수리화학 연구를 주기적으로 수행하였다. 2004년 4월과 7월, 그리고 2005년 5월 중에 peristaltic pump를 이용하여 총 69개의 지하수 시료를 채취하였다. 강물 시료는 2004년 7월과 2005년 5월에 두 개가 채취되었으며, 강우 시료는 2004년 7월에 한 개가 채취되었다. 또한 soil water sampler를 이용하여 2005년 5월에 두 개의 soil water 시료를 채취되었다. 양/음이온 및 산소/수소 동위원소는 고려대학교 전략광물자원연구센터에서 분석하였으며, 삼중수소는 2004년 7월에 채취한 시료 중 7개를 선택하여 캐나다 Waterloo 대학에 의뢰하여 분석하였다.

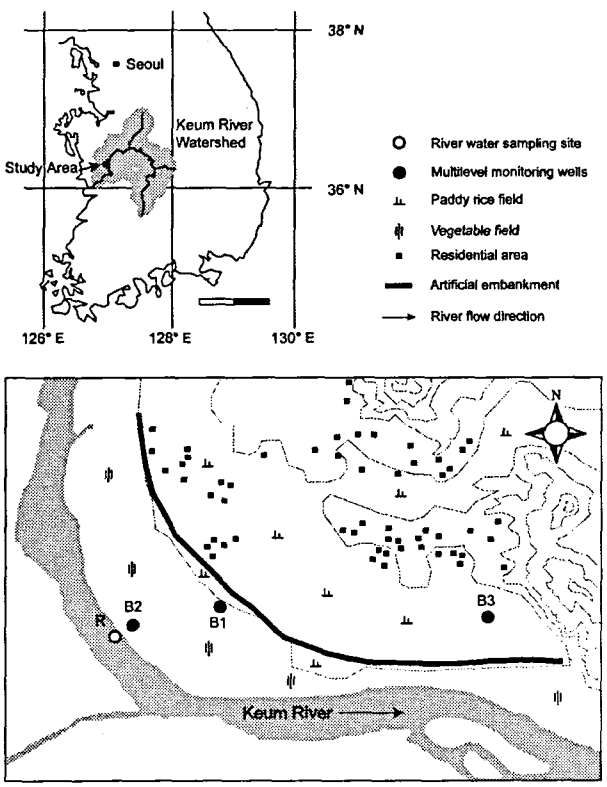

그림 1. 연구지역 및 시료 채취 위치.

주요어: 환경동위원소, 수리지구화학, 충적층 지하수, 충진 특성

1) 고려대학교 지구환경과학과 및 천부지권환경연구실(styun@korea.ac.kr)
2) 군산대학교 환경공학과

3. 결과 및 토의

3.1. 양/음이온 분석 결과

양/음이온 분석 결과를 보면, 세 관측정 모두에서 특정 깊이를 기준으로 충적 지하수의 수질이 확연이 달라짐을 알 수 있었다(그림 2). 이 특정 깊이는 산화/환원 상태가 전환되는 소위 'redox front'와 일치함을 확인하였다. 천부에서 산출되는 산화 상태의 지하수는 특징적으로 높은 NO_3, SO_4, Ca 농도와 Eh값 그리고 낮은 HCO_3 농도를 가지며, 환원 상태의 지하수는 그 반대의 특성을 보여주었다. 강우 및 토양수분(soil water)은 산화 상태 지하수에서의 이온 비율과 비슷하였다. 따라서 연구 지역의 지하수는 주로 강우 침투(infiltration)에 의해 충진되었음을 지시하였다. 본 지역 지하수에서의 높은 NO_3, SO_4, Ca 농도 역시 강우 침투 기원을 뒷받침해 준다. 반면, 보다 심부에서 지역적으로 나타나는 환원 상태의 지하수는 천부 산화상태의 지하수와는 다른 충진 과정을 겪은 것으로 보인다.

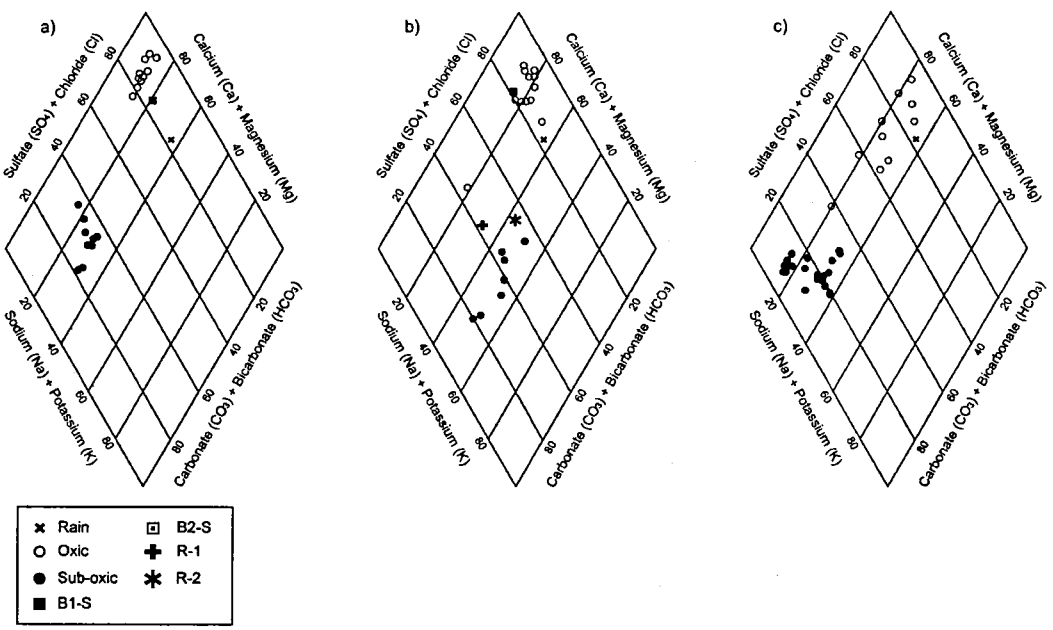

그림 2. 파이퍼다이아그램.

3.2. 산소/수소 동위원소 분석 결과

측정된 산소/수소동위원소 값들을 $\delta^{18}O$-δD 관계도에 도시하였다 (그림 3). 연구 기간 동안의 여름철 평균 기온과 상대습도를 이용하여 Theoretical Evaporation Line (TEL)을 구하고 함께 도시하였는데, 그 회귀식은 $\delta D = 6.3\ \delta^{18}O - 5.1$ 이었다. 연구지역의 지하수는 대부분 Global Meteoric Water Line (GMWL)에서 벗어나 오른쪽에 치우쳐 도시되고 있다. 월별 채수된 지하수의 산소-수소동위원소 회귀식은 아래와 같았으며, 그 기울기 및 분포는 대체적으로 TEL과 일치하였다. 따라서 본 지역의 지하수는 충진 이전에 상당한 정도의 증발의 영향을 받은 것으로 판단된다.

$\delta D = 6.7\ \delta^{18}O - 3.9$, $R^2 = 0.95$; 2004년 4월

$\delta D = 6.5\ \delta^{18}O - 5.3$, $R^2 = 0.97$; 2004년 7월

$\delta D = 6.1\ \delta^{18}O - 7.3$, $R^2 = 0.96$; 2005년 5월

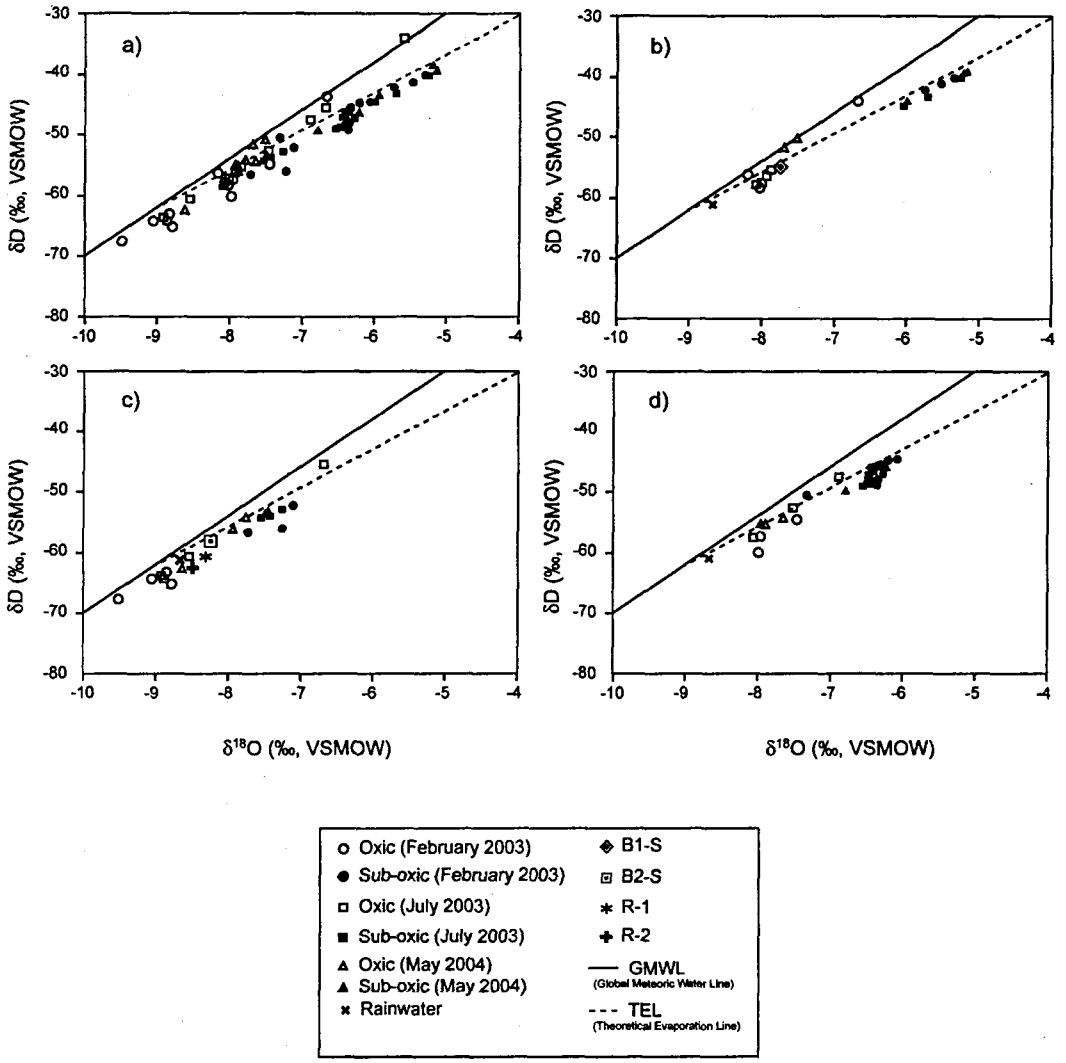

그림 3. 산소/수소 동위원소.

하지만, 모든 관측정에서 심부에서 산출되는 환원 상태의 지하수가 산화 상태의 지하수에 비하여 보다 높은 산소/수소 동위원소 값을 가지면서 동시에 명확히 낮은 d-excess 값을 나타내었다. d-excess 값을 보면, B1 관측정에서는 산화 상태 지하수가 7.9, 환원 상태의 지하수가 2.9였으며, B2 관측정에서는 산화 상태 지하수가 7.5, 환원 상태 지하수는 5.1이었다. B3 관측정에서는 산화 상태의 지하수가 6.5, 환원 상태 지하수가 4.1이었다. 따라서 심부 환원 상태의 지하수는 산화 상태의 지하수에 비하여 충진 이전에 더 극심한 증발의 영향을 받았음을 알 수 있다. 연구 지역 지하수의 충진원으로서 강우와 관개용수 만이 가능함을 고려하면, 환원 상태 지하수의 높은 동위원소 값은 증발 비율이 높은 시기에 충진되었음을 지시한다고 판단된다. d-excess 값은 'kinetic fractionation'의 지시자로서 상대습도의 영향을 가장 많이 받음이 알려져 있는데, 낮은 값일수록 충진시 상대습도가 낮았음을 지시한다. 따라서 본 지역의 환원 상태 지하수는 증발 비율이 높고 상대 습도가 낮은 시기, 즉 가뭄철에 주로 충진된 것으로 판단된다.

3.3. 삼중수소 분석 결과

삼중수소의 농도를 표 1에 정리하였다. 연구 지역의 삼중수소 농도는 4.2 TU 이상으로서 최근에 충진되었음을 지시한다. 하지만 환원 상태 지하수는 B2를 제외하고는 보다 높은 값을 보여주어 산화 상태의 지하수와는 충진 시기가 다름을 나타내었다. 현재 강우의 삼중수소 함량은 계속 감소하는 추세로서 10 TU 이하의 값을 보여줌을 고려하면, 환원 상태의 지하수는 상대적으로 오래 전에 충진되었고 체류시간이 긴 것으로 해석된다.

표 1. 삼중수소 농도

관측정		삼중수소 농도 (TU)
B1	산화 상태 지하수	6.7
	환원 상태 지하수	13.5
B2	산화 상태 지하수	4.2
	환원 상태 지하수	4.2
B3	산화 상태 지하수	6.1
	환원 상태 지하수	10.1, 8.9

한편, 수/암 반응의 지시자 역할을 하는 SiO_2 함량과 산소동위원소 값과의 상관관계를 도시한 그림 4를 보면, 환원 상태 지하수의 무거운 산소동위원소 값이 SiO_2 농도와 비례하는 관계를 보여주었다. 이러한 경향 역시 환원 상태 지하수의 긴 체류 시간을 지시하는 것으로 해석된다.

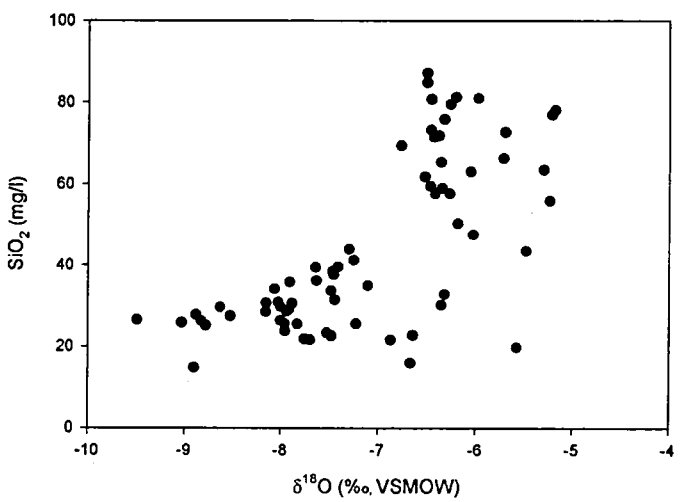

그림 4. 산소동위원소비와 SiO_2 농도의 관계

이상의 결과를 요약하면, 산화 상태의 지하수는 강우 및 지표수의 직접 충진에 기원하며 따라서 지표 기원 오염물질의 영향이 크고 상대적으로 증발의 영향을 적게 받은 반면, 환원 상태 지하수는 상대적으로 오래 전의 가뭄 시기에 주로 충진된 물로 해석된다. 아울러, 연구 지역 충적층 지하수의 수질 및 동위원소 값이 특정 깊이를 기준으로 뚜렷이 구분되고 두 수체간의 혼합 특성이 보이지 않는 것으로 보아, 이 지역 대수층은 특정 심도를 경계로 크게 두 수체로 구분되어 있는 것으로 해석된다.

4. 참고문헌

Chae, G. T., Kim, K., Yun, S. T., Kim, K. H., Kim, S. O., Choi, B. Y., Kim, H. S., and Rhee, C. W., 2004. Hydrogeochemistry of alluvial groundwaters in an agricultural area: an implication for groundwater contamination susceptibility. Chemosphere 55, 369-378.

Hoefs, J., 1997. Stable isotope geochemistry, 4th edition. Springer, Berlin Heidelberg New York, 201 pp.

Issar, A. and Gat, J., 1981. Environmental isotopes as a tool in hydrogeological research in an arid basin. Ground Water 19, 490-494.

Min, J. H., Yun, S. T., Kim, K., Kim, H. S., and Kim, D. J., 2003. Geologic controls on the chemical behavior of nitrate in riverside alluvial aquifers, Korea. Hydrological Processes 17, 1197-1211.