사)한국지하수토양환경학회
춘계학술대회 2001. 4.13-14
한양 대학교 신소재공학관

지하수 함양 특성 해석을 위한 동위원소 적용

김건영, 고용권, 배대석, 김경수, 김천수
한국원자력연구소
kimgy@kaeri.re.kr

요약문

장기적인 강수량 및 지하수위 관측과 강수, 지표수 및 지하수에 대하여 동위원소모니터링을 수행함으로써, 여수지역 소규모 수계에서의 지표수와 지하수 상관관계 및 지하수의 함양특성을 고찰하였다. 지표수 및 지하수의 동위원소조성은 강우량과 강우의 동위원소조성에 직접적으로 영향을 받고 있음을 보여준다. 또한 강우량이 약 20mm이하일 경우는 강우가 지하수로 침투되지 못함을 나타낸다. 지하수의 동위원소조성은 각 강우사건에 의해 변화된 후, 다시 지하수 저류체의 조정으로 변화되는 양상을 확인하였다. 이는 모니터링된 강우 초기에는 강우가 상층부로부터 지하수체계로 유입되고 있음을 보여준다. 혼합방정식을 이용하면 갈수기 이후 첫 번째 강우의 지하수에 침투비율은 16.5%로 산출된다. 지하수의 함양특성에 대하여 기존 방법과 결부시켜, 보완된 동위원소방법을 적용한다면, 지하수 함양율을 보다 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 여수, 동위원소, 혼합방정식, 지하수위변화, 함양률

1. 서론

국내의 지하수 함양량에 대한 연구는 물수지방법 (선우중호, 1992), SCS-SN 방법 (최병수, 1997), 지하수위 강하곡선해석법 (최병수와 안중기, 1998), GIS를 이용한 방법 (한국수자원공사, 1997) 등 많은 연구가 수행되었지만 아직까지 객관적으로 인정되는 방법이 확립되지 못하여 지하수 함양량 산출법을 정량화시키지 못하고 다만 서로 비교분석하여 사용되고 있다. 이에 대하여 산소 및 수소안정동위원소와 삼중수소는 수문순환연구에서 유용하게 활용되는 가장 이상적인 추적자로서 (Mazor, 1991), 계절에 따른 강수의 동위원소변화가 지하수의 동위원소특성에 반영되기 때문에 동위원소의 특성을 지하대수층의 체류시간 및 지하수의 함양특성을 평가하는데 활용될 수 있다 (Maloszewski and Zuber, 1982). 이번 연구에서는 전남 여수시 낙포동내 소유역에서 체계적으로 채취된 강우, 지표수 및 지하수시료에 대하여 시간에 따른 동위원소를 분석함으로서, 기후변화 (강수량 변화)에 의해 나타나는 동위원소 변화특성을 살펴보고, 이를 지속적으로 관측된 강우량 및 지하수위변화 자료와 연계시켜 연구지역의 지하수의 함양특성을 고찰하였다.

2. 지형 및 지질개요

연구지역은 행정구역상으로는 전남 여수시 낙포동 일대에 해당되며 연구지역의 중앙부에는 해발 338m의 제석산이 있고, 남쪽 오천동 지역에는 해발 340m 고지를 정점으로 동서방향의 산계가 발달되어 있다. 전체적으로 표토층의 발달이 미약하며 지형적으로는 경사가 급

하기 때문에 강수의 많은 양이 지표로 직접 유출된다. 연구지역의 지질은 크게 중생대 백악기 유천층군 화산암류와 이를 관입한 알칼리 장석 화강암과 맥암으로 구성되어 있다. 유천층군은 층서상 하부로부터 응방산층, 신성리층, 봉화산 용결응회암 순으로 구성되며, 각 층은 정합적으로 놓인다. 화강암지역은 부분적으로 풍화가 상당히 심화되었으며, 화산암류 분포지역은 신선한 노두의 발달이 양호하며, 암반은 치밀하다.

3. 연구방법

연구지역의 지하수위측정은 여수반도 북동부 해안의 제석산 동측사면에 위치한 시추공에서 이루어졌다. 시추공들은 연구지역에서 남북방향으로 4개소 (K1공, K2공, K3공, K4공)가 있으며, 이중 수위측정은 K3공과 K4공에서 1999년 9월부터 2000년 9월까지 자동수위측정기 (Diver 1215)를 이용하여 매 3시간 간격으로 측정되었다. K3공과 K4공의 지표고도는 각각 57m와 50m (E.L.)이며 시추공 직선거리는 108m이다. 심도는 각각 50.1m와 90.1m (E.L.) 이며, K3공과 K4공에는 각각 1.5m의 케이싱이 설치되어 있다.

강우의 시료채취는 별도로 제작된 시료채취기를 사용하여 일별 강수를 누적하여 채취하였으며 강우량은 여수기상관측소의 관측자료를 이용하였다. 지표수와 지하수 시료는 자동시료채취기 (ISCO 6700)를 사용하여 2000년 5월부터 9월까지 매일 동일한 시각에 채취되었다. 지하수시료는 K3공에 대하여 지표에서 10m 깊이에서 채취되었으며 지표수는 시추공에 인접한 소규모 수계의 하류 (5m E.L.)에서 채취되었다. 이렇게 채취된 물시료의 산소와 탄소 동위원소 ($\delta^{18}O$ 및 $\delta^{13}C$)는 한국원자력연구소내 안정동위원소질량분석기 (VG SIRA II)를 이용하여 분석하였고, 수소동위원소 (δD)분석은 Micromass Optima를 사용하였다.

이번 연구에서 강수 및 지표수와 지하수내에 포함되어 있는 동위원소분석을 통하여 지표수와 지하수의 상관관계를 해석하는데 사용된 혼합방정식은 다음과 같다

$\delta_o Q_o + \delta_n Q_n = \delta_t Q_t$ (δ_o, δ_n, δ_t : 기존 (old), 새로운 (new), 혼합된 (total) 지표수나 지하수의 동위원소조성, Q_o, Q_n, Q_t : 각각의 유량).

여기서 유량에 대한 질량보전식은 $Q_o + Q_n = Q_t$로 표현될 수 있으므로, 혼합된 지표수나 지하수에 대한 새로운 지표수나 지하수의 비율은 $\frac{Q_n}{Q_t} = \frac{\delta_t - \delta_o}{\delta_n - \delta_o}$ 로 표현될 수 있다.

4. 연구결과 및 토의

연구기간동안의 지하수위 관측자료를 보면 천부지하수위 변화는 우리나라의 기후특성에 따른 강우량의 변화와 직접 연관됨을 알 수 있다. 지하수 저류체의 한정된 체적때문에 충분한 강우에 의해 지하수의 함양이 시작되면 거의 일시에 최대지하수위에 가까운 값을 보이게 된 후, 다시 다음의 강우가 유입되기 전까지 계속적인 지하수위 강하를 보이면서 전반적으로 높은 지하수위를 나타낸다 (Fig. 1). 강우량이 집중된 2000년 6월과 9월 사이의 강우량과 K3공 지하수위와의 상관관계를 자세히 살펴보면 12개의 강우사건 (Event)에 대해 모든 지하수위는 강우가 시작된 이후 급격하게 증가된 후, 약 2일 이내에 최대수위에 도달함을 보여준다 (Fig. 2). 또한, 약 20mm이하의 강우량을 보이는 경우에는 지하수위가 상승되지 않음이 확인되었다 (2000년 6월 22일 강우량: 21.4mm). 따라서 이를 연구지역 시추공지하수에 함양되는 최저임계강우량으로 설정할 수 있으며 이는 다음의 동위원소결과와도 일치한다.

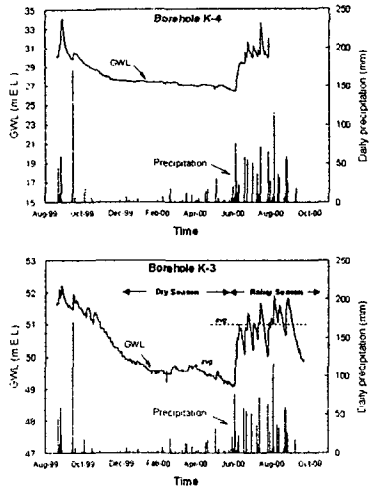

Fig. 1. Groundwater level hydrograph for K3 borehole and daily amount of precipitations.

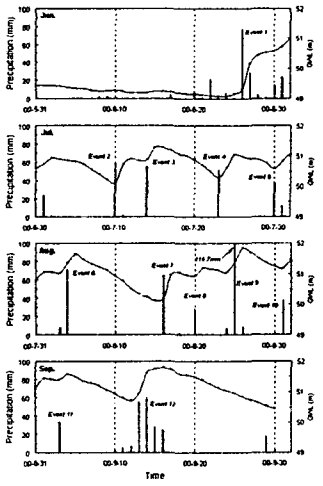

Fig. 2. Groundwater level hydrograph for borehole during rainy season.

시간에 따른 지표수의 동위원소조성변화를 강우량과 함께 살펴보면, 강우량이 적은 갈수기인 6월21일까지는 지표수의 $\delta^{18}O$값은 거의 일정한 값 (평균 -7.8‰)을 보여주다가 6월22일 이후의 강우 (-10.9‰)에 의해 지표수의 동위원소조성이 크게 변화되었음 (-8.39‰)을 보여준다 (Fig. 3). 이를 혼합방정식에 적용하면 6월22일 발생된 강우에 의해 새로이 유입된 지표수는 혼합된 지하수중 약 20%를 차지하는 것으로 계산된다. 이후 계속되는 각 강우사건에 대한 지표수의 동위원소변화는 매우 빨리 나타나며, 다시 기존값으로 회복되는 특성을 보여준다. 이는 새로운 강우가 혼합된 지표수는 강우사건 이후 곧바로 지표유출로 손실되며, 지표수는 기저유출을 통하여 지하수의 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

K3공 지하수의 시간에 따른 지하수위변화와 동위원소조성변화를 살펴보면, 지표수와 마찬가지로 지하수의 동위원소조성도 강우량이 적은 시기에는 거의 일정한 값 (평균 -7.5‰)을 보이다가 강우량이 많은 6월말 이후에 변화되고 있음을 보여준다 (FIg. 4). 그러나 그 변화폭은 지표수에 비해 크지 않다. 혼합방정식을 적용하여 강우에 대한 K3공 지하수의 함양율을 계산해 보면, 6월 26일에 나타난 강우사건 1에 의해 6월 27일에 나타난 지하수의 함양율은 16.5%으로 산출된다. 또한 지표수의 동위원소조성에서는 확인되었던 6월22일 강우 (21.4 mm)에 의한 동위원소변화가 지하수에서는 확인되지 않는 것으로 보아, 지하수위변화에서 보여진 바와 같이 임계 침투강우량 이하의 강우사건은 지하수 함양에 기여하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 또한 지표수의 동위원소조성은 강우 후 바로 변화된 것과는 달리 지하수의 동위원소변화의 극점은 강우 후 약 2일 이내에 나타남으로서, 지하수의 동위원소조성변화가 각 강우에 의한 지하수위변화와 일치하고 있음을 알 수 있다 (Fig. 4)

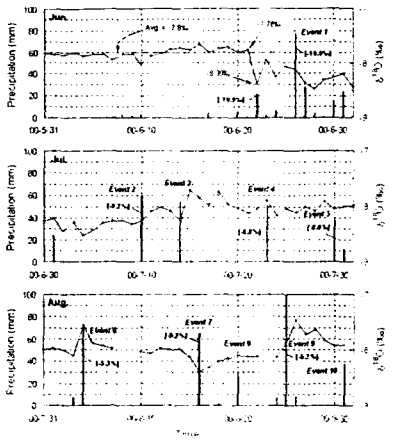

Fig. 3. Isotopic variation of surface water and amount of precipitation during rainy season.

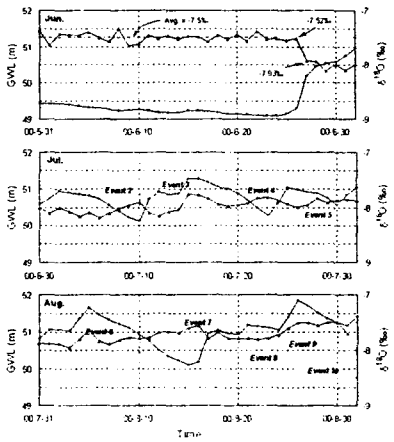

Fig. 4. Isotopic variation of groundwater and groundwater level hydrograph during rainy season.

이와 같이 동위원소를 이용한 지하수 함양특성의 해석은 강우, 지표수 및 지하수의 상관관계를 간접적인 추정방법이 아닌 직접 분석을 통하여 정량적으로 해석할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 동위원소를 이용한 지하수 함양율분석을 수리체계의 물수지분석과 함께, 함양/배출지역에서의 지하수 모니터링 및 지표수의 유량측정과 병행한다면 지하수 함양율에 대하여 불확실성을 줄이면서 보다 정량적인 평가를 할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

선우중호 (1992) 지하수자원 기본조사 보고서.

최병수 (1997) 소유역의 지하수 함양량 산정에서 SCS-CN방법의 적용, 농공기술, 56, p. 11-20.

최병수, 안중기 (1998) 지역단위 자연함양율 산정방법 연구, 지하수환경, 5, p. 57-65.

한국수자원공사 (1997) 공간자료를 이용한 지하수 함양량 계산기법 연구, 1997 연구요약보고서, p. 699-716.

Maloszewski, P. and Zuber, A. (1982) Determining the turnover time of groundwater system with the aid of environmental tracers, 1. Models and their applicability, Journal of Hydrology, 57, p. 207-231.

Mazor, E. (1991) Applied Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology. Open University Press, Buckingham, U.K.