

대전 유성지역 소유역에서의 유출수문곡선 분리를 이용한 지하수 함양률 추정

조성현, 하규철*, 조민조*, 문상호*, 송무영

충남대학교, *한국지질자원연구원 (sh-cho@hanmail.net)

<요약문>

본 연구는 대전 유성지역 유성천 소유역에서 강우시 유출수문곡선으로부터 기저유출성분과 강우성분을 분리하여 동적 평형에 의한 강우의 지하수 함양률을 추정하기 위해서 수행되었다. 보존적인 산소동위원소(^{18}O) 추적자를 이용하여 2성분(기저유출성분과 강우성분) 유출수문곡선 분리하였으며 이로부터 추정된 지하수 함양률은 강우의 0.13이었다. 추적자를 이용한 유출수문곡선분리는 지하수 함양률을 정량적으로 나타낼 수 있다는데 의의가 있다.

key word: 동력학적 평형, 지하수 함양률, 추적자, 유출수문곡선

1. 서론

유출수문곡선(hydrograph)은 시간 경과에 따른 하천의 유량변화를 나타낸 그래프로 지표류(overland flow) 또는 직접유출(direct flow), 중간유출(interflow), 및 기저유출(base flow)등으로 구분하여 분리할 수 있으며, 이러한 기저유출은 지하수가 지표로 배출되는 것으로 함양률 추정에 이용할 수 있다. 유출수문곡선을 분리하는 방법에는 도식적 방법에 의한 임의적인 분리(graphical method), 경험식(예, N-day method)이나 모델(예, SCS runoff curve number method)을 이용하는 방법 등이 있다. 그러나 이 방법들은 국내적용이 의문시되는 매개변수들을 사용하거나 불분명한 경험적 가정을 필요로 하고 있다.

이와는 달리, 보존적인 화학성분이나 동위원소 추적자를 이용한 유출수문곡선분리는 질량보존법칙을 적용하며, 어느 지역에서나 하천으로부터 강우성분과 강우사상 이전의 성분을 구분하는데 이용될 수 있다(Bottomley et al., 1984, 1986; Hooper and Shoemaker, 1986; Moor, 1989; Wels et al., 1991). 그리고 토양수나 또 다른 여러 성분의 분리를 목적으로 한다면 하천수로부터 심부지하수까지 뚜렷이 구분되는 다양한 추적자를 이용해서 지표수, 중간류, 총적층지하수, 천부지하수, 심부지하수 등 3성분 이상으로 나눌 수 있다(Hooper and Shoemaker, 1986; McDonnell et al., 1991; Hinton and Schiff, 1994; Lee and Krothe, 2001). 뿐만 아니라, 강우성분과 기저유출량의 비가 변화하는 관계를 수문학적 과정이나 유출경로의 변화를 추정하는데도 이용할 수 있게 된다(Sklash and Farvolden, 1979; Sklash et al., 1986; McDonnell et al., 1991).

물분자를 직접 구성하는 원소인 산소 동위원소는 물의 흐름을 추적하는데 가장 이상적인 추적자이며, 물-암석 반응이 일어나지 않는 낮은 온도에서는 매우 보존적으로 이동되기 때문에 유출수문곡선 분리

연구에 널리 활용되어 왔다(Kendall and McDonnell, 2000). 본 연구는 산소동위원소(18O) 추적자를 이용하여 집수구역이 명확한 대전 유성지역 유성천 소유역에서 유출수문곡선을 기저유출성분과 강우성분인 2성분계로 분리하여 동적 평형(Theis, 1938)에 의하여 강우에 대한 지하수 함양률을 추정하데 있다.

2. 본론

2.1 지형

유성천은 대전분지의 서북부에 위치하고 있으며 서쪽으로는 계룡산 국립공원의 줄기를 능선으로 공주시와 접하여 고지대를 이루고 동쪽으로는 갑천을 경계로 대전시내와 접하고 있어 평탄한 서고동저의 지형을 나타낸다. 서쪽으로는 갑하산(469 m)과 계룡산 국립공원의 도덕봉(535.2 m)이 남쪽으로는 박산(201.3 m), 북쪽으로는 왕가산(200 m)이 유성천의 강우 집수구역의 경계를 나타낸다. 따라서 상부 지역에 집수된 지하수, 지표수는 하천의 중류에 위치한 집수구역의 지표나 지하를 지나게 된다. 상류지역에는 대전국립묘지와 유성관광컨트리클럽이 있어 집수구역의 상당부분을 차지하고 있다. 유성천의 관측지점에서 상류로 국립묘지 입구의 보를 제외하면 작은 보가 5, 6개 정도 있지만 밀려든 토사에 의해 모두 보의 기능을 상실하여 하천의 유량과 무관하다고 본다(그림 1).

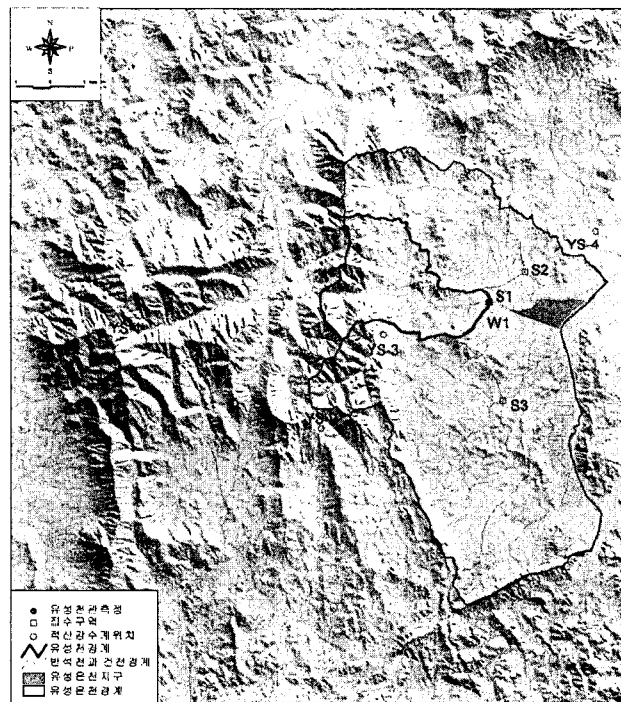


그림 1. 유성천 집수 구역

2.2 시료채취 및 분석

강우, 지표수, 지하수 시료를 채취하였다. 강우는 2001년 7월 21~25일에 내린 것을, 지표수는 2001년 7월 21일~7월 30일에 2시간 내지 66시간 간격으로 모두 36개 시료를 채취하였다. 산소동위원소 조성 분석은 한국기초과학지원연구원의 안정동위원소 질량분석기(모델: VG Isotech PRISM II)로 분석하였으며 분석 정밀도는 $\pm 0.1\%$ 이다.

2.3 강우량, 지표수위와 지하수위, 그리고 하천유량 측정

강우량은 연구지역과 가장 근접해 있는 대전지방기상청에서 측정된 자료를 이용하였다. 지표수위는 S1지점에서 Van Essen instruments사의 수위측정기(diver)를 이용하여 자동 측정하였고 하천 유출량은 S1지점에서 OTT사의 Senza 2000을 이용하여 측정하였다. 이로부터 S1지점에서의 수위-유량곡선을 얻었다(그림 2).

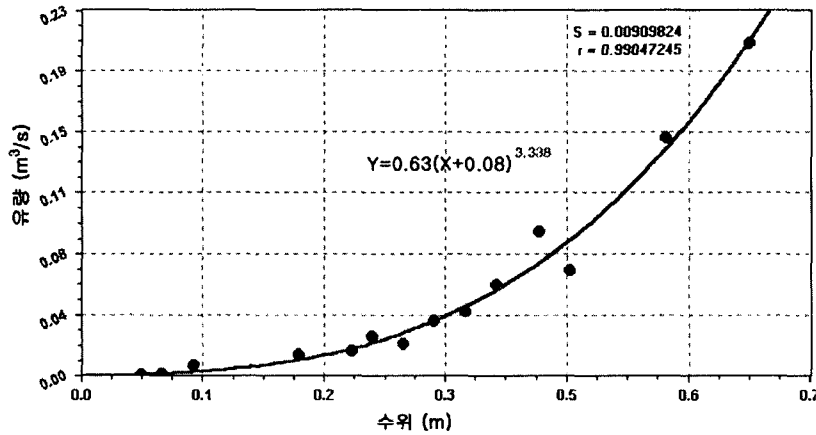


그림 2. 유성천 수위-유량곡선

2.4 2성분계 혼합모델의 적용

강우와 지표수의 동위원소 조성 대비가 클 경우 지표수의 동위원소 조성은 강우의 영향으로 강우사상 전과는 다르게 변화한다. 이 때 강우와 하천수 사이에는 식(1)과 같은 질량평형방정식과 식(2)와 같은 동위원소 조성이 관련된 식이 성립한다. 식(1)과 식(2)를 조합하여 정리하면 식(3)이 유도되는데, 하천수의 유출량, 강우의 동위원소 조성, 강우사상 전후의 하천수의 동위원소 조성을 알면, 하천수와 강우가 어떤 비율로 섞여있는지를 계산할 수 있다.

$$Q_t(t) = Q_o(t) + Q_n(t) \quad (1)$$

$$C_t(t)Q_t(t) = C_o(t)Q_o(t) + C_n(t)Q_n(t) \quad (2)$$

$$\frac{Q_o(t)}{Q_t(t)} = \left[\frac{C_t(t) - C_n(t)}{C_o(t) - C_n(t)} \right] \quad (3)$$

여기서, $Q_t(t)$: 지표수의 총유출량, $Q_o(t)$: 강우사상전의 지표수 유출량, $Q_n(t)$: 강우량, $C(t)$: 지표수의 동위원소 조성, $C_o(t)$: 강우사상전의 하천수의 동위원소 조성, $C_n(t)$: 강우의 동위원소 조성이다.

위 혼합 모델식(mixing model)은 1) 강우와 강우사상전의 하천수의 동위원소 조성이 서로 달라야 한다. 2) 강우사상 지속 기간 동안 강우의 동위원소 조성이 일정해야 한다. 3) 통기대수(vadose zone water)와 지하수는 동위원소 조성이 같거나, 통기대수가 하천에 기여하는 것이 미미해야 한다. 4) 지표 유출 기간동안 지표저류가 최소이어야 한다. 라는 조건을 만족하여야 적용할 수 있다(Sklash and Farvolden, 1979). 그런데 위 식으로 기저유출성분을 분리하기 위해서는 강우사상전에 하천에 흐르는 지표수가 전적으로 지하수에 의존하는 기저유출이라는 가정이 성립되어야 한다. 강우사상이 연속적으로 두 번 이상 올 때, 이전 강우의 영향을 받은 지표수가 집수구역을 완전히 빠져나가지 않은 상태에서 다음 강우에 의해 지표수에 혼합된다면 기저유출성분이 과하게 정해질 수 있기 때문이다.

2.5 강우에 의한 기저유출 기여도

강우사상전의 지표수를 기저유출이라고 가정하고 식(1)에서 $Q_o(t)$ 을 강우사상동안 기저유출량으로 나타내면 식 (4)와 같이 표현할 수 있다(Eshleman et al., 1993).

$$\int Q_o(t) dt \quad (4)$$

그런데 강우사상전의 기저유출량은 이번 강우사상에 의한 것이 아니므로 이를 제거해 주고 기저유출의 기여도를 동적 평형에 의해서 강우에 의한 함양률로 가정한다면 식(4)는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\int Q_o(t) dt}{P} \quad (5)$$

3. 연구결과 및 토의

강우사상전의 하천의 산소동위원소비($C_o(t)$)는 -8.9‰이었고, 강우량($C_r(t)$)은 산소동위원소비가 -13.0‰인 강우가 총 78.6mm이었다. 집수구역의 면적은 9.87km³이므로 유역에 내린 총 강우량(P)은 776,165.8 m³이 된다. 연구기간동안의 하천유량(Q_t), 강우량(Rainfall), 산소동위원소비(d18O), 기저유출에 대한 하천유량($Q_o(t)/Q_t(t)$) 그리고 기저유출량($Q_o(t)$)을 나타내면 표 1과 같다. 그림 3은 강우량과 식(3)를 이용해서 유출수문곡선을 분리한 그림이다. 그림에서 옅은 회색 부분은 이번 강우사상 영향이 아니므로 이를 제거하고 식(4)를 이용하여 기저유출량을 구하면 99,806.5 m³이고 식(5)를 이용하여 이 강우사상에 대한 함양률을 구하면 0.13이다.

표 1. 대전 유성천 집수구역에서의 하천유량(Q_t), 강우량(Rainfall), 산소동위원소비(d18O), 기저유출에 대한 하천유량(Q_o/Q_t), 그리고 기저유출량(Q_o).

| Date | Q_t (m ³) | Rainfall | d ¹⁸ O | Q_o/Q_t | baseflow Q_o (m ³) | Date | Q_t (m ³) | Rainfall | d ¹⁸ O | Q_o/Q_t | baseflow Q_o (m ³) |
|---------------|----------------------------|----------|-------------------|-----------|-------------------------------------|---------------|----------------------------|----------|-------------------|-----------|-------------------------------------|
| 01-7-21 1:10 | 0.760 | 0.0 | -8.9 | 1.0 | 0.751 | 01-7-22 21:00 | 1.348 | 0.0 | -9.9 | 0.8 | 1.018 |
| 01-7-21 7:30 | 0.746 | 0.7 | -8.9 | 1.0 | 0.737 | 01-7-23 1:00 | 1.306 | 0.0 | -9.9 | 0.7 | 0.968 |
| 01-7-21 11:00 | 3.973 | 4.8 | -10.8 | 0.5 | 2.079 | 01-7-23 5:00 | 1.224 | 0.0 | -9.9 | 0.8 | 0.922 |
| 01-7-21 13:00 | 3.326 | 0.3 | -10.9 | 0.5 | 1.652 | 01-7-23 9:00 | 1.184 | 0.0 | -9.8 | 0.8 | 0.910 |
| 01-7-21 15:00 | 2.686 | 0.0 | -10.9 | 0.5 | 1.366 | 01-7-23 13:10 | 1.244 | 0.0 | -9.6 | 0.8 | 1.015 |
| 01-7-21 17:00 | 2.290 | 0.0 | -10.5 | 0.6 | 1.399 | 01-7-23 19:00 | 1.107 | 0.0 | -9.6 | 0.8 | 0.906 |
| 01-7-21 19:40 | 2.079 | 0.0 | -10.3 | 0.7 | 1.354 | 01-7-24 1:00 | 0.999 | 0.0 | -9.4 | 0.9 | 0.856 |
| 01-7-21 21:00 | 1.993 | 0.0 | -10.3 | 0.7 | 1.322 | 01-7-24 7:00 | 0.999 | 0.0 | -9.5 | 0.9 | 0.853 |
| 01-7-21 23:00 | 1.910 | 0.0 | -10.3 | 0.7 | 1.264 | 01-7-24 13:30 | 0.964 | 0.0 | -9.4 | 0.9 | 0.849 |
| 01-7-22 1:00 | 1.750 | 0.0 | -10.2 | 0.7 | 1.195 | 01-7-25 1:00 | 0.898 | 0.0 | -9.5 | 0.8 | 0.755 |
| 01-7-22 3:00 | 1.674 | 0.0 | -10.1 | 0.7 | 1.161 | 01-7-25 9:00 | 0.882 | 0.0 | -9.5 | 0.8 | 0.750 |
| 01-7-22 5:00 | 1.649 | 0.0 | -10.2 | 0.7 | 1.117 | 01-7-25 19:20 | 0.882 | 0.3 | -9.3 | 0.9 | 0.796 |
| 01-7-22 7:00 | 1.600 | 0.0 | -10.1 | 0.7 | 1.115 | 01-7-26 5:00 | 0.805 | 0.0 | -9.3 | 0.9 | 0.720 |
| 01-7-22 8:50 | 1.576 | 0.0 | -10.2 | 0.7 | 1.062 | 01-7-26 15:00 | 0.704 | 0.0 | -9.1 | 0.9 | 0.658 |
| 01-7-22 11:00 | 1.528 | 0.0 | -10.1 | 0.7 | 1.083 | 01-7-27 1:00 | 0.775 | 0.0 | -9.2 | 0.9 | 0.709 |
| 01-7-22 13:00 | 1.436 | 2.0 | -10.0 | 0.7 | 1.036 | 01-7-27 11:00 | 0.651 | 0.0 | -9.2 | 0.9 | 0.596 |
| 01-7-22 15:10 | 1.392 | 0.0 | -9.9 | 0.8 | 1.046 | 01-7-27 17:30 | 0.626 | 0.0 | -9.0 | 1.0 | 0.599 |
| 01-7-22 17:00 | 1.414 | 0.0 | -9.9 | 0.7 | 1.049 | 01-7-30 11:30 | 0.565 | 0.0 | -8.8 | 1.0 | 0.579 |

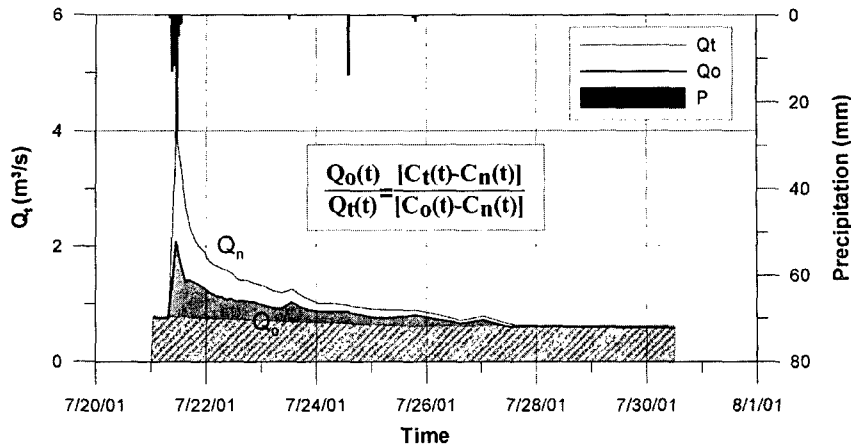


그림 3. 유성천에서의 유출수분곡선 분리

그러나 위에서 구한 함양률은 하나의 강우사상에 대한 것이므로 유역을 대표 한다고 볼 수 없다. 선형강우의 조건에 따라서 직접유출량이 변하기 때문이다. 또한 그 함양률은 천부지하수에 관한 것이지만 광역적인 지하수함양에 대해서 언급할 수 없다는 단점이 있다. 이 방법에 의해 유역의 대표 함양률 추정하는 것은 찾아야할 숙제일 것이다.

4. 결론

유출량과 지하수/지표수의 산소 동위원소 조성을 이용하여 대전 유성지역 유성천 소유역에서 유출수 분곡선으로부터 기저유출을 분리하고 동적평형에 의해 강우사상에 의한 함양률을 추정하였다. 강우사상 동안의 강우에 대한 함양률은 0.13이다.

5. 참고문헌

- Bottomley, D. J., Craig, D. and Johnston, L. M., 1984, Neutralization of acid runoff by groundwater discharge to streams in Canadian Precambrian Shield watersheds. *J. Hydrol.*, Vol. 75, 1~26.
- Bottomley, D. J., Craig, D. and Johnston, L. M., 1986, Oxygen-18 studies of snowmelt runoff in a small Precambrian Shield watershed: Implications for streamwater acidification in acid-sensitive terrain. *J. Hydrol.*, Vol. 88, 213~234.
- Eshleman, K. N., Pollard, J. S. and O'brien, A. K., 1993, Determination of contributing areas for saturation overland flow from chemical hydrograph separations. *Water Resources Research*, Vol. 29 No. 10, 3577~3587.
- Hinton, M. J and Schiff, S. L., 1994, Examining the contributions of glacial till water to storm runoff using two-and three-component hydrograph separations. *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 4, 983~993.
- Hooper, R. P. and Shoemaker, C. A., 1986, A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 10, 1444~1454.
- Kendall, C. and McDonnell, J. J., 2000, *Isotope tracers in catchment hydrology*. Elsevier Science B. V., 839.
- Lee, E. S and Krothe, N. C., 2001. A four-component mixing model for water in a karst terrain in

- south-central Indiana, USA. Using solute concentration and stable isotopes as tracers. *Chemical Geology*, Vol. 179, 129-143.
- Lee, K. S., Grundstein, A. J., Wenner, D.B., Choi, M.S., Woo, N.C. and Lee, D.H., 2003, Climatic controls on the stable isotopic composition of precipitation in Northeast Asia. *Climate Research*, Vol. 23, 137-148.
- McDonnell, J. J., Stewart, M. K. and Owens, I.F., 1991, Effect of catchment-scale subsurface mixing on stream isotopic response. *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 12, 3065~3073.
- Moore, R. D., 1989, Tracing runoff sources with deuterium and oxygen-18 during spring melt in a headwater catchment, Southern Laurentians, Quebec. *J. Hydrol.*, Vol. 112, 135~148.
- Sklash, M. G. and Farvolden, R. N., 1979, The role of groundwater in storm runoff. *J. Hydrol.*, Vol. 43, 45~65.
- Sklash, M. G., Stewart, M. K. and Pearce, A. J., 1986, Storm runoff generation in humid headwater catchments, 2. A case study of hillslope and low-order stream response. *Water Resources Research*, 22, 1273-1282.
- Uhlenbrook, S., Frey, M., Leibundgut, C. and Maloszewski, P., 2002, Hydrograph separations in a mesoscale mountainous basin at event and seasonal timescales. *Water Resources Research*, Vol. 38, No. 6. 31 - 1-31 - 14.
- Wels, C., Cornett, J. and LaZerte. B., 1991, Hydrograph separation: A comparison of geochemical and isotopic tracers. *J. Hydrol.*, Vol. 122, 253~274.