한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회
2006년 4월 14일 동국대학교

열추적자를 이용한 지하수-하천수 혼합대 연구

김구영[1] · 전철민[1] · 김태희[1] · 성현정[1] · 오준호[1]· 김용제[1] · 정재훈[2] · 박승기[2]

[1]한국지질자원연구원 지하수지열연구부
[2]공주대학교 생물산업공학부
e-mail: kykim@kigam.re.kr

요 약 문

A study on stream-groundwater exchange was performed using head and temperature data of stream water, streambed, and groundwater. Groundwater level and temperature were obtained from multi-depth monitoring wells in small-scale watershed. In the summer time, time series of temperatrue data at streambed and groundwater were monitored for three months. In the winter time, we measured the temperature gradient between stream water and streambed. The observed data showed three typical types of temperature characteristics. First, the temperature of streambed was lower than that of stream water; second, the temperature of streambed and stream water was similar; and last, the temperature of streambed was higher than that of stream water. The interconnections between the stream and the streambed were not homogeneously distributed due to weakly developed sediments and heterogeneous bedrock exposed as bed of the stream. The temperature data may be used in formal solutions of the inverse problems to estimate groundwater flow and hydraulic conductivity.

key word : hyporheic zone, streambed, aquifer, mini-piezometer, temperature

1. 서론

지하수-하천수 혼합대(hyporheic zone)는 하천 아래와 주변지역의 지표수와 지하수가 혼합되는 영역으로써 그 규모는 지질과 하천의 구조에 따라 수 ㎝에서 수 ㎞의 범위를 가진다. 이러한 혼합대는 육상계(terrestrial system)와 수계(aquatic system)를 연결해주며, 지표수와 지하수의 전이대 역할을 한다. 혼합대는 하천 주변 생물에 필수적인 영양분과 용존가스를 제공하며, 용질과 콜로이드의 분포를 조절하는 점에서 매우 중요하다(Cardenas et al., 2004). 본 연구에서는 예산군의 소유역에서 하천수, 하상, 지하수위 및 온도자료를 이용하여 하천수와 지하수와의 연계연구를 수행하였다. 이를 위해 약 3km 미만의 소규모 수계의 하천을 대상으로 하상 공극수와 지표수의 온도를 관측하여 두 온도 간의 차이에서 발생하는 일반적인 특성을 파악함으로서, 장기적이고 체계적인 지하수-하상-지표수 간의 관측시스템을 구축하는데 기초적인 자료를 생산하였다.

2. 연구방법

연구지역은 공주대학교 예산캠퍼스가 위치하고 있는 예산군의 소유역이며, 수계는 동서방향으로 약 3㎞, 남북으로 약 4㎞에 이르는 소규모의 수계이다. 연구지역의 해발고도는 120m 이하로 완만한 경사를 이루는 지형을 이루며 토양층의 발달이 양호한 지역이다. 소유역 내에서 지하수와 하천수와의 연계 연구를 위하여 상류, 중류, 하류 세 지점에 서로 다른 심도를 가지는

세 개의 관정을 설치하였다. 각각의 관정의 설치심도는 20m, 30m, 40m이며 스크린은 각 관정의 하부 10m에 설계하였다. Site A와 C는 하천과 인접해 있으며, site B는 하천과 약 350m 떨어져 있다.

본 연구는 온도 추적자를 이용하여 하천수와 지하수와의 연관성을 보는데 목적이 있으므로 site A와 site C의 하상퇴적물에 미니피조미터(mini-piezometer)를 설치하여 하상과 하천수에서의 수위와 온도를 모니터링 하였다. 상류에 해당하는 site A 지점의 경우 하상퇴적물의 발달정도는 미미하며 암반위에 퇴적물이 얇게 퇴적되어 나타난다. 반면 하류에 해당하는 site C에서는 상대적으로 하상퇴적물이 발달되어 있다. Site A에서 미니피조미터는 하천바닥에서 약 50㎝에 설치하였으며, 피조미터 하부 30㎝에 스크린을 설치하였다. Site C에서 미니피조미터는 약 70㎝에 설치하였으며, 마찬가지로 피조미터 하부 30㎝에 스크린을 설치하였다.

3. 연구결과 및 토의

상류지역(site A)과 하류지역(site C)을 중심으로 하상 및 하천수의 온도구배를 측정하기 위하여 휴대용 열전대 센서 온도계(thermocouple thermometer)를 사용하였다. 열전대 센서는 0.1℃의 해상도를 가지며 길이 1.5m 직경 5㎜의 스테인레스 스틸로 제작된 보호관으로 구성되어 있다. 하천 및 하상의 온도구배가 뚜렷할 것으로 예상되는 동절기인 12월에 현장조사를 실시하였다. 동일 지점에서 3회 이상 측정하여 평균값을 사용하였으며, 온도측정 깊이는 보호관의 접근이 가능한 지점까지로 설정하였다.

하천 및 하상의 온도 측정결과는 Table 1에 제시하였다. 우리나라의 동절기인 12월에는 이득하천의 경우 하상의 온도가 하천수의 온도보다 높을 것으로 예상되며, 손실하천의 경우 하천수의 온도와 유사할 것으로 예상될 수 있다. 측정 당일의 대기 온도는 약 2℃ 내외의 온도를 유지하였다. 상류지역(site A)의 경우 지표수의 온도는 3.8~4.5℃의 범위로 비교적 일정하며 하상의 온도는 2.7~4.5℃ 범위로 지표수의 온도보다 다소 낮게 나타났다. 하류지역(site C)의 경우는 하천수의 온도가 5.4~5.8℃로 일정한 온도를 유지하는 반면에 하상의 온도는 2.9~9.7℃로 매우 넓은 온도범위를 보이고 있다. 그러나 수계의 유동방향과 상류/하류 여부는 하상과 하천수의 온도구배에 직접적인 상호 연관성을 관찰할 수 없었다. 약 수 m의 거리에서도 하상의 온도는 수℃이상 변하고 있으며 지하수에 영향을 받는 것으로 여겨지는 높은 온도의 하상 지점은 상/하류 및 지형과 관계없이 무작위로 산재되어 있었다.

이러한 온도구배 경향을 크게 세 가지로 구분하여보면 첫 번째로 하상의 온도가 더 낮은 경우(상류의 Y01-02, Y03과 하류의 Y10), 두 번째로 하상과 하천수의 온도가 비슷한 경우(상류의 Y01-01, Y02, Y04와 하류의 Y06, Y07, Y13), 세 번째로 하상의 온도가 더 높은 경우(하류의 Y05, Y08, Y09, Y11, Y12)이다. 두 번째와 세 번째의 경우는 전술한 바와 같이 각각 손실하천과 이득하천의 경우에 해당될 수 있을 것이다. 그러나 첫 번째의 경우와 같이 오히려 하천수의 온도보다도 더 낮은 온도를 가지는 하상의 경우는 손실과 이득의 개념으로는 잘 설명할 수 없다. 이러한 경우 하천의 유출특성 중 중간유출(interflow)의 경우를 고려해 볼 수 있다. 중간유출은 고투수성 불포화대층 하부에 저투수성 층이나 암반이 발달한 경우, 충진되는 물이 지하수면에 도달하기 전에 지하수와는 상관없이 수평이동을 하는 경우이다. 온도 관측시기는 동절기였으며 많은 강설로 인해 지하로 함양된 저온의 물이 중간유출을 거쳐 일부 지점에서 지표수 보다 낮은 하상 온도를 나타내는 것으로 보인다.

본 연구지역의 상류에서는 암반을 하상으로 하여 퇴적물이 거의 쌓여있지 않은 하천이며 하류의 경우도 하상퇴적물의 깊이가 두텁지 않은 하천이다. 따라서 하상 온도가 낮은 첫 번째의 온도구배 경향은 중간유출의 특성으로 해석할 수 있을 것으로 판단되며, 이와 더불어 연구

지역의 하상과 지하수의 연계 상태는 하상의 분포에 대하여 균질한 연결성을 가지고 있지 않을 수 있음을 시사하는데 이는 우리나라 대수층의 대표적인 특성인 균열암반과 관련이 있을 것으로 판단된다. 지하수와 하천수의 상호관계를 살펴보기 위해 하천수, 하상, 그리고 지하수의 온도를 모니터링 하였다. 관측기간은 2005년 7월 부터 9월까지 약 3개월이며, site A와 site C에서의 자료는 Fig. 1(a),(b)와 같다.

Table 1. Coordinates of measurement sites and results of stream and streambed temperature measurement using thermocouple thermometer

ID	N [deg.mmsss]	E [deg.mmsss]	Stream temperature [℃]	streambed temperature [℃]	Measuring depth [㎝]	Water depth [㎝]
Y01-01	36.39469	126.51513	4.4	4.5	49	1
Y01-02	36.39469	126.51513	4.5	3.4	24	1
Y02	36.39458	126.51500	4.4	4.4	19	1
Y03	36.39456	126.51502	4.1	2.7	24	1
Y04	36.39444	126.51487	3.8	3.4	14	1
Y05	36.38454	126.51105	5.6	7.0	50	3
Y06	36.38455	126.51107	5.8	4.8	41	3
Y07	36.38453	126.51096	5.6	4.7	37	3
Y08	36.38461	126.51125	5.6	8.0	66	4
Y09	36.38461	126.51138	5.6	7.0	50	6
Y10	36.38464	126.51144	5.4	2.9	39	1
Y11	36.38468	126.51156	5.7	9.7	86	5
Y12	36.38472	126.51175	5.6	9.0	30	30
Y13	36.38487	126.51204	5.6	4.4	42	3

Site A에서 하천수의 온도는 여름철(7월~8월) 약 17~25℃의 범위에서 일일변동(diurnal fluctuation)을 보이고 있으며, 하상의 경우 18~20℃의 범위에서 미약한 일일변동 값을 보인다. 반면 지하수의 경우 일일변동이 없으며 40m 심도의 BH-1호공에서는 13.7~17.6℃의 범위를, 30m와 20m 심도의 BH-2, BH-3호공에서는 12.6~16.2℃의 범위를 보인다. Site C에서 하천수의 온도는 여름철(7월~8월) 약 18~32℃의 범위에서 일일변동(diurnal fluctuation)을 보이고 있으며, 하상의 경우 18~23℃의 범위에서 변동하며 일일변동은 보이지 않았다. 반면 지하수의 경우 BH-7, BH-8, BH-9호공 모두에서 유사하며 12.9~16.7℃의 범위를 보인다. Site A에서 여름철 하상의 온도는 하천수의 온도에 비해 평균 약 1℃정도 낮으며, 일일변동의 특성을 지니고 있다. 반면, 지하수의 온도는 하천수나 하상의 온도에 비해 낮게 나타나며, 일일변화의 특성도 보이지 않는다. 9월 20일경부터 하상의 온도는 감소하기 시작하여 지하수와 하상의 온도가 서로 역전되는 현상이 나타난다.

Fig.1(c),(d)는 8월 14일부터 16일까지 3일간의 자료를 도시하였으며, 상류와 하류에서 하상의 온도가 다른 경향을 보임을 알 수 있다. Site A와 C 모두 하천에서의 온도는 일일 온도변화에 의해 민감하게 반응하고 있으며, site A에서는 일일 3℃의 변화를, site C에서는 일일 6℃의 변화폭을 보이고 있다. 반면 하상의 온도를 살펴보면 site A에서는 평균 19.5℃로 일일변화의 특성을 보이며 하천수의 온도와 유사하게 변화하는 반면, site C에서는 하천수의 온도 변화폭이 A지점에 비해 약 2배임에도 불구하고 일일변화의 특성을 보이지 않으며 일정한 온도를 유지하고 있다. 소유역의 상류에 위치한 site A의 경우 하상의 온도는 하천수의 온도와 마찬가지로 일일

변동의 특성을 보이는 것으로 보아 하천수가 지하수로 유동하는 것으로 판단된다. 하류에 위치한 site C의 경우 하상의 온도가 시간에 따라 일정한 값을 보이는 것으로 보아 지하수가 하천수로 유동하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 지하수-하천수 연계 연구를 위해 온도추적자를 이용한 예비연구로써 소규모 수계의 하천을 대상으로 하상의 공극수와 지표수의 온도를 관측하였다. 두 온도 간의 차이에서 발생하는 일반적인 특성을 파악함으로서, 장기적이고 체계적인 지하수-하상-지표수 간의 관측시스템을 구축하는데 기초적인 자료를 생산하였다. 또한 연구지역의 상류와 하류 두 지점에서 대표적으로 하절기 하천수, 하상, 지하수 온도자료를 이용하여 상호관계를 살펴보았다. 이러한 온도 자료는 향후 연구지역에서 좀더 체계적인 관측시스템 설계와 장기간 관측을 통해 지하수와 하천수와의 상관관계를 규명하고 이들 자료는 지하수 유동 모델링시 수위자료와 함께 모델보정(model calibration)에 유용하게 이용될 것이다.

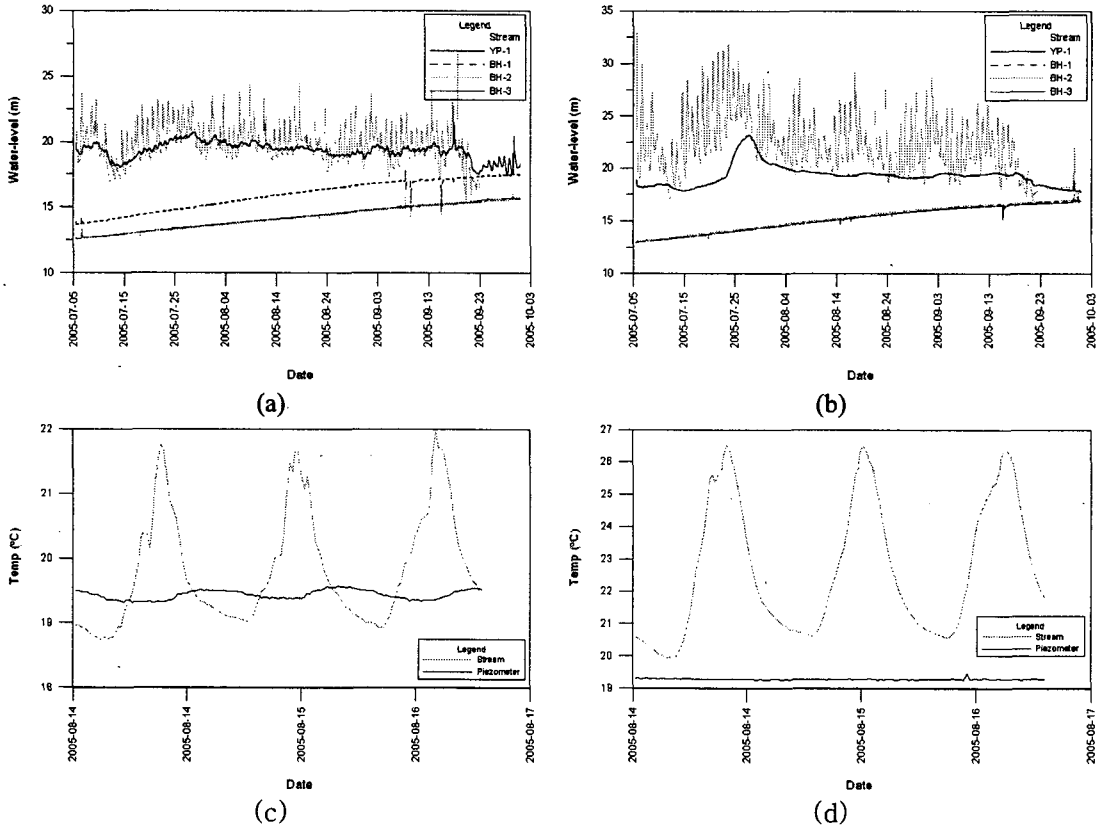

Fig. 1. Temperature data at site A (a) and site C (b) for four months. (c) and (d) illustrates the temperature data at site A and site C for three days.

사사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 3-2-2)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

Cardenas, M.B., Wilson, J.L., Zlotnik, V.A., 2004. Impact of heterogeneity, bed forms and stream curvature on subchannel hyproheic exchange. Water Resour. Res., 40, W08307, doi:10.1029/2004WR003008.