

열추적자를 이용한 지하수-하천수 혼합대 연구

김구영^{1*} · 전철민¹ · 김태희¹ · 오준호¹ · 정재훈² · 박승기²

¹한국지질자원연구원 지하수지열연구부, ²공주대학교 생물산업공학부

Use of a Temperature as a Tracer to Study Stream-groundwater Exchange in the Hyporheic Zone

Kue-Young Kim^{1*}, Chul-Min Chon¹, Taehee Kim¹, Jun-Ho Oh¹,
Jae-Hoon Jeoung² and Seung-Ki Park²

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Konju National University

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. During the summer and winter season, time series of temperature data at streambed and groundwater were monitored for six 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 the 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 words : hyporheic zone, streambed, aquifer, mini-piezometer, temperature

본 연구에서는 예산군의 소유역에서 하천수, 하상, 지하수의 수위 및 온도자료를 이용하여 혼합대(hyporheic zone)에서 하천수와 지하수와의 연계연구가 수행되었다. 소유역의 상류, 중류, 하류에서 심도별 지하수위 및 온도 변화를 살펴보고, 상·하류 지역에서 하절기와 동절기에 하상과 지하수의 온도를 장기간 모니터링하고 그 특성을 분석하였다. 동절기에는 하천수와 하상 상호간의 온도구배를 모니터링하고 그 특성에 따라 세 가지로 구분하였다. 하상 온도가 더 낮은 경우, 하상과 하천수의 온도가 비슷한 경우, 그리고 하상 온도가 더 높은 경우이다. 연구지역의 하상과 하천의 연계 상태는 하상의 분포에 대하여 균질한 연결성을 가지고 있지 않으며, 이는 하상 퇴적물이 두텁게 형성되어 있지 않고 불균질한 균열암반이 하상으로 노출되어 있기 때문이다. 지하수-하천수 연계 연구를 통해 획득된 온도 자료는 지하수 유동 모델링시 수위자료와 함께 모델보정(model calibration)에 유용하게 이용될 수 있다.

주요어 : 지하수-하천수 혼합대, 하상, 대수층, 미니피조미터, 온도

1. 서 언

최근 수자원의 중요성이 증대됨에 따라 하천수와 지하수는 상호 연결된 하나의 자원이라는 인식이 대두되었다(Winter *et al.*, 1998). 즉, 지표수자원과 지하수자

원 중 한쪽 영역에서의 물리적, 화학적 변화는 다른 한쪽에도 영향을 미치므로, 이 두 자원의 상호관계를 이해하는 것은 중요하다. 특히 지표수와 지하수의 상호관계에 대한 이해는 물수지분석, 영양분이나 오염물질의 이동경로 파악, 지하수 유동시스템 규명 등 여러

*Corresponding author: kykim@kigam.re.kr

가지 측면에서 필수적인 사항이다.

지하수-하천수 혼합대(hyporheic zone)는 하천 아래와 주변지역의 지표수와 지하수가 혼합되는 영역으로써 그 규모는 지질과 하천의 구조에 따라 수 cm에서 수 km의 범위를 가진다. 이러한 혼합대는 육상계(terrestrial system)와 수계(aquatic system)를 연결해 주며, 지표수와 지하수의 전이대 역할을 한다. 혼합대는 하천 주변 생물에 필수적인 영양분과 용존가스를 제공하며(Triska *et al.*, 1989, 1993; Findlay, 1995; Harvey and Fuller, 1998; Doyle *et al.*, 2003), 용질과 콜로이드의 분포를 조절(Elliot and Brooks, 1997; Woessner, 2000; Packman and Brooks, 2001; Sophocleous, 2002; Kasahara and Wondzell, 2003)하는 점에서 매우 중요하다.

지하수-하천수 연계 연구와 관련하여 다양한 접근방법이 이용되었다. Theis(1941)는 하천수 인근에서 지하수 양수시 하천수로부터 유입된 양을 처음으로 분석하였으며, 이후 이 문제에 관한 많은 해석학적인 연구가 이루어졌다(Glover and Balmer, 1954; Jenkins, 1968; Sophocleous *et al.*, 1988; Wilson, 1993; Chen and Yin, 1999; Butler *et al.*, 2001). 추적자를 이용한 지하수-지표수 연계 연구 또한 활발히 이루어지고 있으며, 화학추적자(chemical tracers)를 이용하여 지하수와 하천수와의 유동관계를 해석하기도 한다. 그러나 주위 환경의 오염문제로 인해 사용하는데 제한이 있다. 자연적인 지구화학적, 혹은 동위원소 추적자는 지하수-하천수 연계연구에서 체류시간을 산정하는데 유용하다(Walker and Krabenhof, 1998; Kendall and McDonnell, 1998).

최근에는 환경친화적인 추적자로서 하천수와 하상(streambed)에서의 온도차를 분석하여 지하수와 하천수의 상호 유동관계를 해석하는 방법이 이용되어지고 있다. 여기서 하상은 하천수에 의해 형성된 길고 좁은 저지를 뜻하며, 기반암을 침식시키거나 모래, 점토, 실트 및 그밖의 상류에서 흘러내려온 고화되지 않은 하천퇴적물 등을 침식시키면서 형성된다.

지하수 유동에 있어 열을 추적자로 사용하는 개념은 1900년대 초 물이 매질을 통과하는 동안 열도 함께 전달된다는 사실을 인식하는데서 시작하였다(Bouyoucos, 1915). 20세기 중반에는 온도추적자를 이용하여 물이 지표로부터 깊은 심도까지 유동하는 속도를 추정하는 방법을 제시하기도 하였다(Rorabough, 1954; Stallman, 1963). 지하수 연구분야의 발전에 있어 열거동 이론은 중요한 역할을 하였으며, 1960년대 추적자로서 열을

이용한 많은 연구가 이루어졌다. 1980년대에는 하상의 온도 자료를 이용한 지하수-하천수 연계 연구가 이루어졌다(Lapham, 1989). 최근에는 하상의 공극수 온도를 이용하여 이득하천과 손실하천을 구분하는 연구가 이루어졌다(Silliman and Booth, 1993; Constantz *et al.*, 2003a, b; Conant, 2004). Stonestrom과 Constantz (2003)는 온도자료를 이용하여 하천수와 지하수 시스템과의 유동량을 추정하기도 하였다.

본 연구에서는 예산군의 소유역에서 하천수, 하상, 지하수위 및 온도자료를 이용하여 하천수와 지하수의 연계연구를 수행하였다. 이를 위해 약 3 km 미만의 소규모 수계의 하천을 대상으로 하상 공극수와 지표수의 온도를 관측하여 두 온도 간의 차이에서 발생하는 일반적인 특성을 파악함으로써, 장기적이고 체계적인 지하수-하상-지표수 간의 관측시스템을 구축하는데 기초적인 자료를 생산하였다.

2. 이론적 배경

지표수와 지하수의 상호관계는 크게 하천의 유출특성과 이득 및 손실 여부에 따라 개념화시킬 수 있다. 하천의 유출특성은 지표유출(runoff), 중간유출(interflow), 기저유출(base flow), 통로유출(throughflow)로 구분할 수 있다. 지표유출은 강수율(precipitation rate)이 침투율(infiltration rate)을 초과할 때 발생한다. 중간유출은 고투수성 불포화대층 하부에 저투수성 층이나 암반이 발달한 경우, 충전되는 물이 지하수면에 도달하기 전에 수평이동을 하는 흐름을 말하며 지역에 따라서 하천 유량의 상당한 부분을 차지한다. 기저유출은 하천으로 직접 유출되는 지하수를 의미하며 하천에서의 수리경사도에 비례한다. 통로유출은 경사면의 토양에 침투한 물이 불포화대를 통해서 수평이동하여 경사면 하부에서 누출되는 흐름으로 하천으로 유입되기 전에 지표로 배출되는 점이 중간유출과 다르다.

지하수 유동경로를 따라 두 지점간의 온도차이가 있으면, 열은 유동하는 지하수를 따라 거동하며, 이를 열이류(advective heat flow)라 한다. 반면 유동하지 않는 고체나 유체 내에서 열은 전도에 의해 거동하기도 하는데 이를 열전도(conductive heat flow)라 한다. 일반적으로 온도추적자를 이용한 지하수-하천수 연계 연구시 하천수와 하상 온도를 모니터링 하고 이를 수치모델을 이용하여 해석한다. 그러나 모델링 이전에 온도자료의 패턴만으로도 일반적인 특성을 알 수 있다. 즉, 하천수 온도의 변화폭에 비해 하상에서의 온도 변

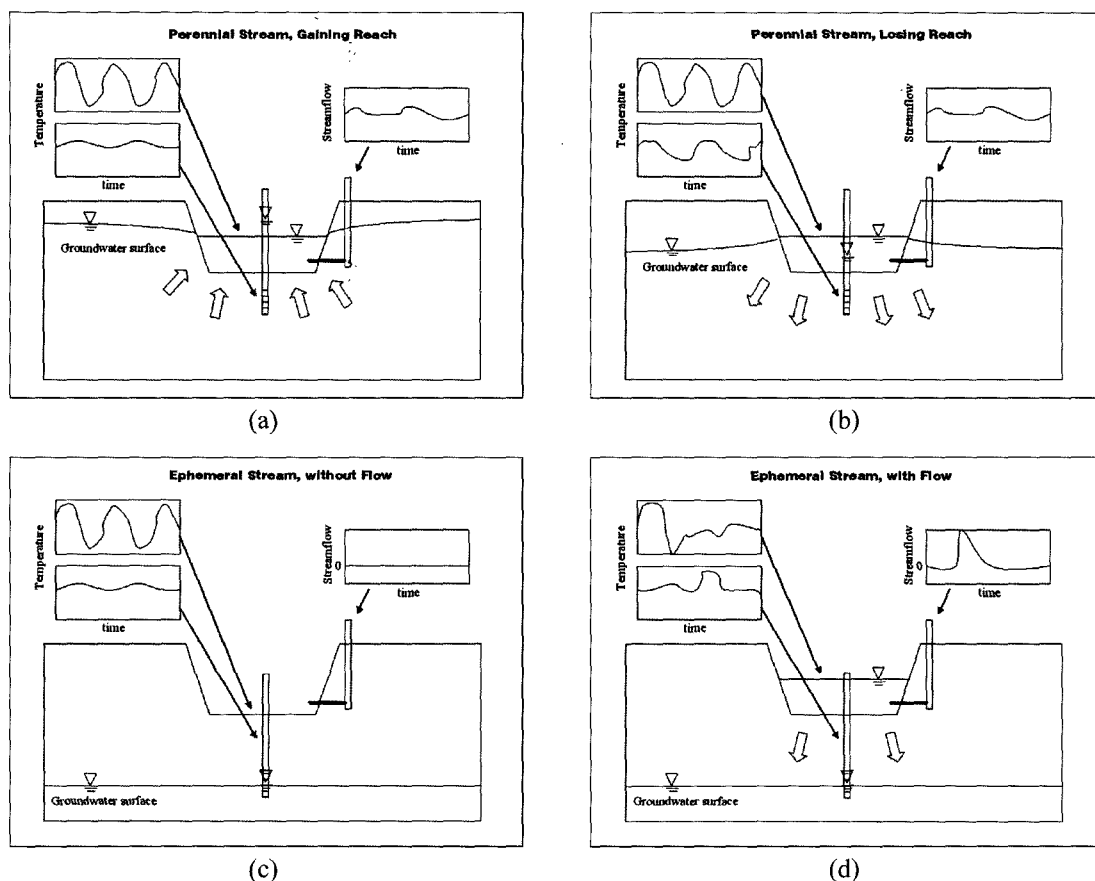


Fig. 1. Idealized stream channel for four possible interactions with groundwater; (a) a perennial stream gaining water from the underlying sediments, (b) a perennial stream losing water to the underlying sediments, (c) an ephemeral stream without flow, and (d) an ephemeral stream with flow (after Constantz *et al.*, 2003a).

화폭이 현저히 감소한다면 이는 이득하천으로써, 지하수가 하천으로 배출되는 시스템이다(Fig. 1(a)). 반면 하상에서의 온도 패턴이 하천수의 온도와 유사하게 변동한다면 이는 손실하천으로써 하천수가 대수층으로 배출되는 시스템이다(Fig. 1(b)).

이득하천일 경우 하상 온도는 대수층의 지하수 유동에 의해 영향을 받을 것이다. 즉, 하상 온도는 지하수의 온도를 반영하며, 상대적으로 일정한 값을 보일 것이다. 반면 손실하천일 경우 하상 온도는 하천수의 온도와 유사하게 변화할 것이다. 즉 하상 온도는 일일변화의 특성을 가지며 그 평균값은 하천수온도의 평균값과 유사할 것이다. 지하수와 하천수간에 유동이 없는 경우 하상의 온도는 대류(conduction)에 의해 변화한다. 그 결과 하상의 온도는 하천수 온도와 마찬가지로 일일변화의 특성을 보이며, 그 평균값은 하천수온도의 평균값과 지하수 온도 사이의 값을 보일 것이다(Silliman

and Booth, 1993). Fig. 1(c)와 (d)는 간헐천에서 하천수 유동이 없을 때와 있을 때를 도시한 그림이다.

3. 연구방법

연구지역은 공주대학교 예산캠퍼스가 위치하고 있는 예산군의 소유역이며, 수계는 동서방향으로 약 3km, 남북으로 약 4km에 이르는 소규모의 수계이다. 연구지역의 해발고도는 120m 이하로 완만한 경사를 이루는 지형을 이루며 토양층의 발달이 양호한 지역이다(Fig. 2). 소유역 내에서 지하수와 하천수와의 연계 연구를 위하여 상류, 중류, 하류 세 지점에 서로 다른 심도를 가지는 세 개의 관정을 설치하였다(Fig. 3). 각각의 관정의 설치 심도는 20m, 30m, 40m이며 스크린은 각 관정의 하부 10m에 설계하였다. A지점과 C지점은 하천과 인접해 있으며, B지점은 하천과 약 350m 떨어져 있다.

본 연구는 온도 추적자를 이용하여 하천수와 지하수와의 연관성을 보는데 목적이 있으므로 Fig. 3과 같이 A지점과 C지점의 하상퇴적물에 미니피조미터(mini-piezometer)를 설치하여 하상과 하천수에서의 수위와 온도를 모니터링 하였다. 상류에 해당하는 A지점의 경우 하상퇴적물의 발달정도는 미미하며 암반위에 퇴적물이 얇게 퇴적되어 나타난다. 반면 하류에 해당하는 C지점에서는 상대적으로 하상퇴적물이 발달되어 있으나 두껍지는 않다. A지점에서 미니피조미터는 하천바

닥에서 약 50cm에 설치하였으며, 피조미터 하부 30cm에 스크린을 설치하였다. C지점에서 미니피조미터는 약 70cm에 설치하였으며, 마찬가지로 피조미터 하부 30cm에 스크린을 설치하였다.

4. 연구결과

4.1. 강우 및 수위

연구지역에서 강수량 및 각 관측정에서의 지하수위

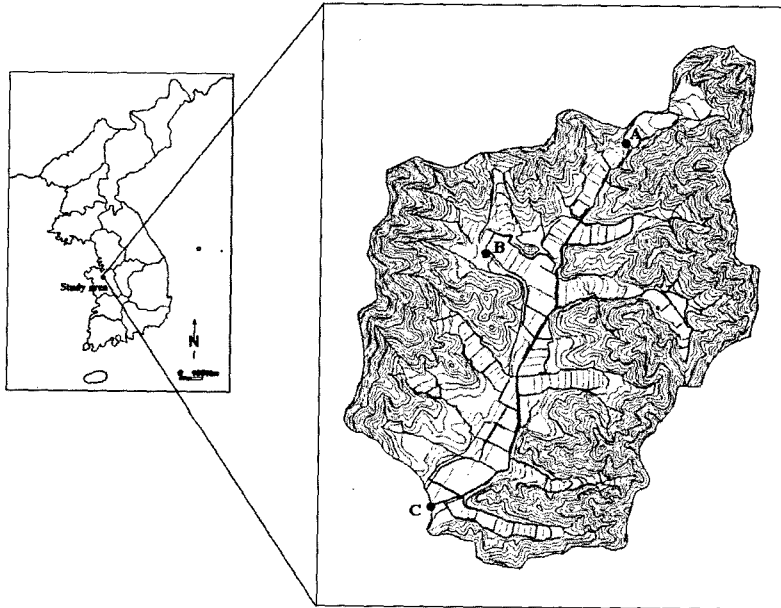


Fig. 2. Site map of the study area: A, B, C indicates the location of multi-depth wells.

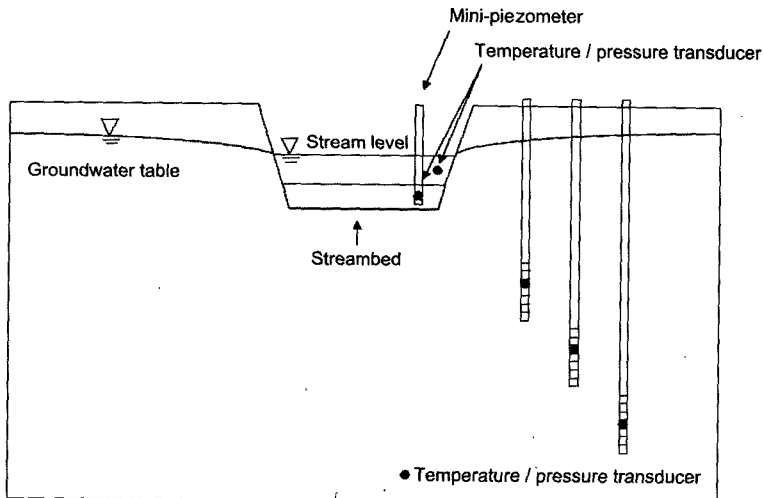


Fig. 3. Schematic diagram of multi-depth wells and mini-piezometer design.

를 2005년 7월부터 12월까지 6개월간 모니터링 하였다(Fig. 4). 연구지역내에서 6개월(7-12월) 동안의 강우량은 총 1,051 mm이며, 7월부터 9월까지 3개월간 995 mm의 강우현상이 있었다.

A지점에서 지하수위는 EL+84-87 m 범위에서 변동하고 있으며, B지점에서 지하수위는 EL+74-78 m, C지점에서 지하수위는 EL+48-49 m 범위에서 변동하고 있다. 전체적으로 상류에서 하류로 감에 따라 지하수위는 낮아짐을 알 수 있다.

A지점에서의 수위를 살펴보면 심도가 가장 깊은 BH-1에서의 수위가 가장 높으며, 심도가 가장 얇은 BH-3, 그리고 BH-2의 순서로 수위가 변동하고 있음을 알 수 있다(Fig. 4(b)). A지점에서 초기 약 2개월(7월-8월) 동안의 수직수리구배를 살펴보면, BH-1과 BH-2 사이에서는 약 7×10^{-2} 이며, BH-2와 BH-3 사이에서는 약 -1×10^{-2} 이며, BH-1과 BH-3 사이에서는 약 6×10^{-2} 이다. 수직수리구배에서 양의 값은 지하수의 상향유동

을, 음의 값은 지하수의 하향유동을 의미한다. 전체적으로 지하수는 하부에서 상부로 유동하고 있다.

B지점에서의 수위를 살펴보면 심도가 가장 얇은 BH-6에서의 수위가 가장 높으며, BH-5, 그리고 BH-4 순서로 수위가 변동하고 있음을 알 수 있다(Fig. 4(c)). B지점에서 수직수리구배를 살펴보면, BH-6과 BH-5 사이에서는 약 7×10^{-2} 이며, BH-5와 BH-4 사이에서는 5×10^{-2} 이다. 전체적으로 지하수는 상부에서 하부로 유동하고 있음을 알 수 있다.

C지점에서의 수위를 살펴보면 심도가 가장 깊은 BH-7에서의 수위가 가장 높으며, 심도가 가장 얇은 BH-9, 그리고 BH-8의 순서로 수위가 변동하고 있음을 알 수 있다(Fig. 4(d)). C지점에서 수직수리구배를 살펴보면, BH-7과 BH-8 사이에서는 7×10^{-3} 이며, BH-8과 BH-9 사이에서는 -4×10^{-3} 이며, BH-7과 BH-9 사이에서는 5×10^{-3} 이다. Fig. 5는 C지점에서 3개월간(7월-9월)의 강우, 하천수위, 하천유량을 함께 도시하였으며, 강

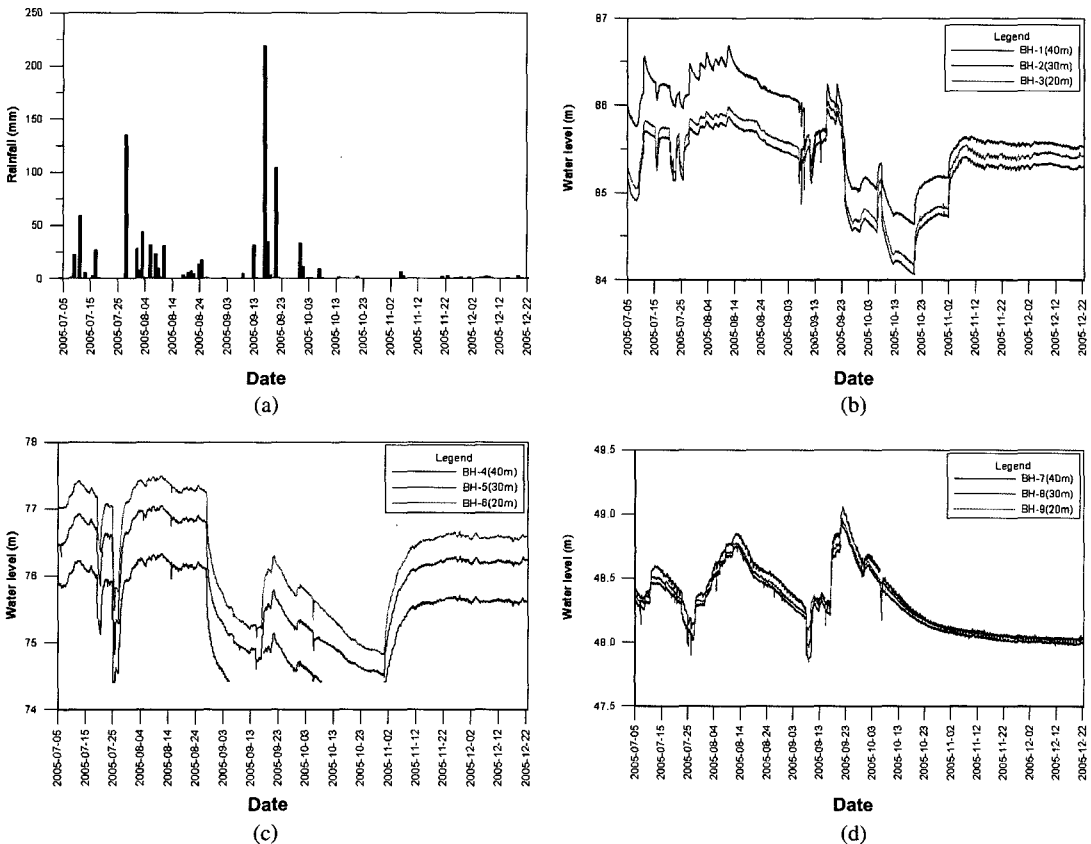


Fig. 4. Precipitation and water-level at study site. (a) Precipitation at study site, (b) water-level at site A, (c) water-level at site B, (d) water-level at site C.

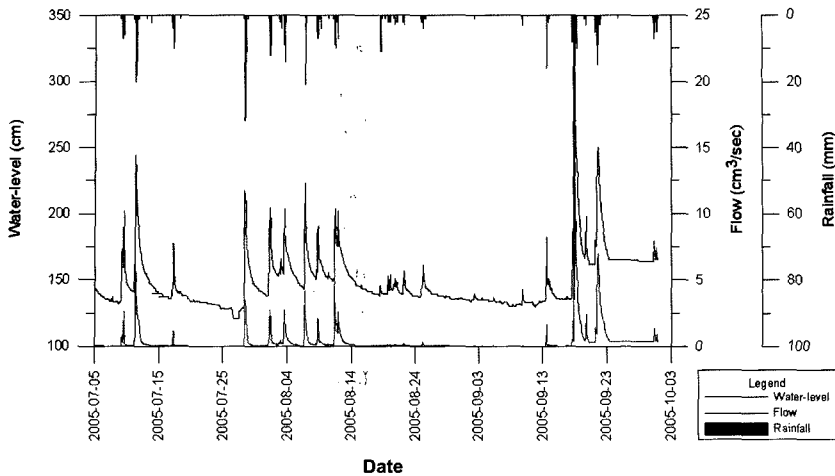


Fig. 5. Stream-stage and flow rate variations due to rainfall at site C.

우와 하천수위 및 유량의 상관관계를 살펴보았다. 관측자료는 1시간 단위이며, 강우에 대한 하천수위는 1시간 이내의 즉각적인 반응을 보였으며 최대상관계수는 0.52로 나타났다. 강우에 대한 하천유량 역시 1시간 이내의 반응을 보였으며 최대상관계수는 0.79의 높은 상관성을 보였다.

4.2. 순간충격시험

하상의 수리특성은 지하수-지표수 상호작용에 있어 매우 중요한 역할을 한다(McDonald and Harbaugh, 1984; Sophocleus *et al.*, 1995; Hunt, 1999; Zlotnik and Huang, 1999; Butler *et al.*, 2001; Kollet and Zlotnik, 2003). 하상퇴적물의 수리전도도는 일반적으로 1.0×10^{-7} - 1.0 cm sec^{-1} 의 범위를 가진다(Calver, 2001). Landan 등(2001)은 순간충격시험(slug test), 정·변수위 시험(falling- and constant-head permeameter test), 침출수 측정기(seepage meter) 등을 이용하여 하상의 수리전도도값을 현장에서 측정하였다. 본 연구에서는 위의 여러 방법 중 순간충격시험을 이용하여 하상의 수리전도도를 측정하였다.

연구지역의 하상퇴적물의 수리전도도를 측정하기 위해 A지점과 C지점에 설치된 미니피조미터에서 수리시험을 수행하였다. 미니피조미터에 순간적으로 물을 주입하여 시간에 따라 회복되는 수위자료를 이용하여 하상퇴적물에서의 수리특성을 해석하였다.

상류에 해당하는 A지점의 경우 수리전도도는 $1-2 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$, 하류에 해당하는 C지점에서의 수리전도도는 $5-6 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$ 였다. A지점에서의 수리전도도가 C

지점에 비해 약 50배 정도 낮으며, 이는 C지점의 경우 투수성이 양호한 퇴적물이 상대적으로 두텁게 형성되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

4.3. 온도

지하수와 하천수의 상호관계를 살펴보기 위해 Fig. 3의 모식도와 같이 하천수, 하상, 그리고 지하수의 온도를 모니터링 하였다. 지하수위와 마찬가지로 관측기간은 2005년 7월부터 12월까지 약 6개월이며, A지점과 C지점에서의 자료는 Fig. 6(a), (b)와 같다.

A지점에서 하천수의 온도는 여름철(7월-8월) 약 17-25°C의 범위에서 일일변동(diurnal fluctuation)을 보이고 있으며, 하상의 경우 18-20°C의 범위에서 미약한 일일변동 값을 보인다. 반면 지하수의 경우 일일변동이 없으며 40 m 심도의 BH-1호공에서는 13.7-17.6°C의 범위를, 30 m와 20 m 심도의 BH-2, BH-3호공에서는 12.6-16.2°C의 범위를 보인다. 하절기 하상과 하천수의 온도는 지하수의 온도보다 높으나 10월부터 역전현상이 나타났다. 동절기(11월-12월) 지하수의 온도는 14.9-17.3°C의 범위를 보이며, 하상의 온도는 12.5°C에서 1.4°C까지 감소하였다. 하절기와 유사하게 하상의 온도는 일일 변화를 보였으며, 그 변동폭은 다소 증가하는 경향을 보였다.

C지점에서 하천수의 온도는 여름철(7월-8월) 약 18-32°C의 범위에서 일일변동을 보이고 있으며, 하상의 경우 18-23°C의 범위에서 변동하며 일일변동은 보이지 않았다. 반면 지하수의 경우 BH-7, BH-8, BH-9호공 모두에서 유사하며 12.9-16.7°C의 범위를 보인다. A지

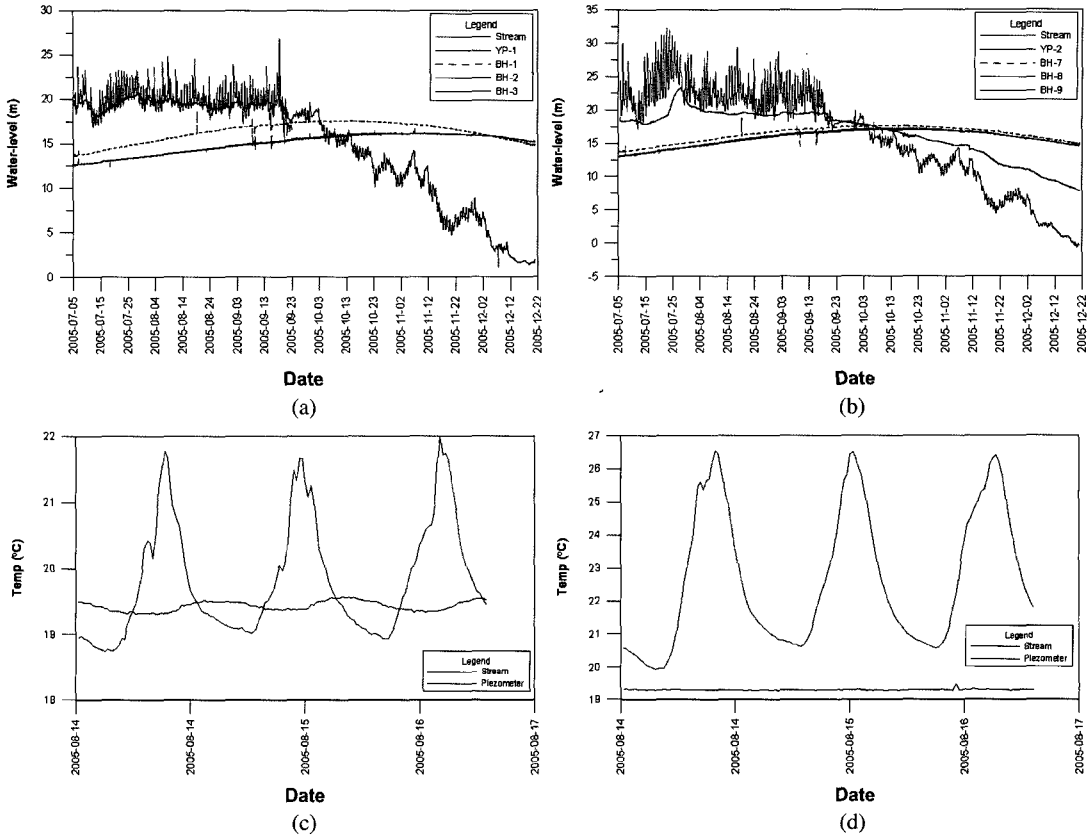


Fig. 6. Temperature data at site A (a) and site C (b) for six months. (c) and (d) illustrates the temperature data at site A and site C for three days.

점과 마찬가지로 하절기 하상과 하천수의 온도가 지하수의 온도보다 높으나 10월부터 역전현상이 나타났다. 동절기 지하수의 온도는 14.5-16.9°C의 범위를 보이며, 하천수의 온도는 10.8°C에서 -0.7°C까지, 그리고 하상의 온도는 15.0°C에서 7.8°C까지 감소하였다. A지점과는 달리 하상의 온도가 일일변화를 보이지 않았으며, 지하수의 온도변화와 유사한 경향을 보였다.

Fig. 6(c),(d)는 8월 14일부터 16일까지 3일간의 자료를 도시하였으며, 상류와 하류에서 하상의 온도가 다른 경향을 보임을 알 수 있다. A지점과 C지점 모두 하천에서의 온도는 일일 온도변화에 의해 민감하게 반응하고 있으며, A지점에서는 일일 3°C의 변화를, C지점에서는 일일 6°C의 변화폭을 보이고 있다. 반면 하상의 온도를 살펴보면 A지점에서는 평균 19.5°C로 일일변화의 특성을 보이며 하천수의 온도와 유사하게 변화하는 반면, C지점에서는 하천수의 온도 변화폭이 A지점에 비해 약 2배임에도 불구하고 일일변화의 특성

을 보이지 않으며 일정한 온도를 유지하고 있다.

소유역의 상류에 위치한 A지점의 경우 하상의 온도는 하천수의 온도와 마찬가지로 일일변동의 특성을 보이는 것으로 보아 하천수가 지하수로 유동하는 것으로 판단된다. 하류에 위치한 C지점의 경우 하상의 온도가 시간에 따라 일정한 값을 보이는 것으로 보아 지하수가 하천수로 유동하는 것으로 판단된다.

상류지역(A지점)과 하류지역(C지점)을 중심으로 하상 및 하천수의 온도구배를 측정하기 위하여 휴대용 열전대 센서 온도계(thermocouple thermometer)를 사용하였다. 열전대 센서는 0.1°C의 해상도를 가지며 길이 1.5 m 직경 5 mm의 스테인레스 스틸로 제작된 보호관으로 구성되어 있다. 하천 및 하상의 온도구배가 뚜렷할 것으로 예상되는 동절기(12월 8일)에 현장조사를 실시하였다. 동일 지점에서 3회 이상 측정하여 평균값을 사용하였으며, 온도측정 깊이는 보호관의 접근이 가능한 지점까지로 설정하였다.

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 [°C]	streambed temperature [°C]	Measuring depth [°C]	Water depth [°C]
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

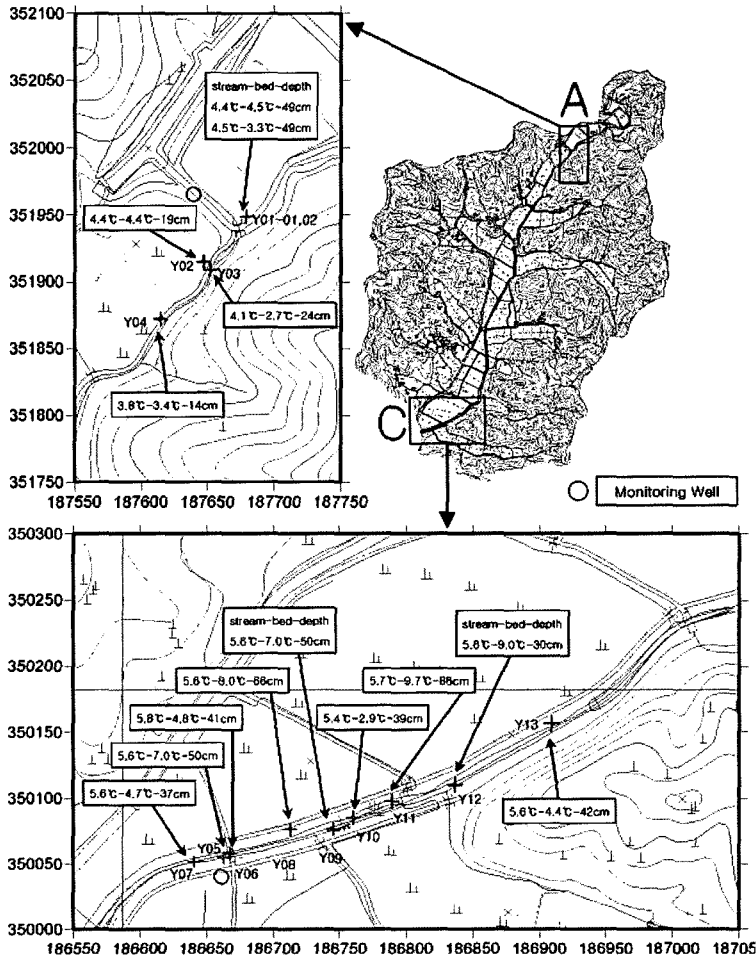


Fig. 7. Site map of Yesan, Korea. A and C are locations at which sediments and water temperatures were measured. Circles represent monitoring wells and crosses represent points measured by thermocouple thermometer. The stream-bed-depth represent, respectively, stream temperature, streambed temperature and measuring depth.

하천 및 하상의 온도 측정결과는 Table 1과 Fig. 7에 제시하였다. 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°C 내외의 온도를 유지하였으며, 지하수 온도의 경우 A지점(BH-1, 2, 3)에서 15.6-15.7°C, B지점(BH-4, 5, 6)에서 15.9-16.0°C, C지점(BH-7, 8, 9)에서 15.2-15.3°C의 범위를 보였다. 상류지역(A지점)의 경우 지표수의 온도는 3.8-4.5°C의 범위로 비교적 일정하며 하상의 온도는 2.7-4.5°C 범위로 지표수의 온도보다 다소 낮게 나타났다. 하류지역(C지점)의 경우는 하천수의 온도가 5.4-5.8°C로 일정한 온도를 유지하는 반면에 하상의 온도는 2.9-9.7°C로 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 °C 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, 충전되는 물이 지하수면에 도달하기 전에 지하수와는 상관없이 수평이동을 하는 경우이다. 기상청 자료에 의하면 12월 3일부터 8일동안 연구지역에 내린 강설량은 26.2cm이며(Fig. 8), 많은 강설로 인해 지하로 함양된 저온의 물이 중간유출을 거쳐 일부 지점에서 지표수보다 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 중간유출

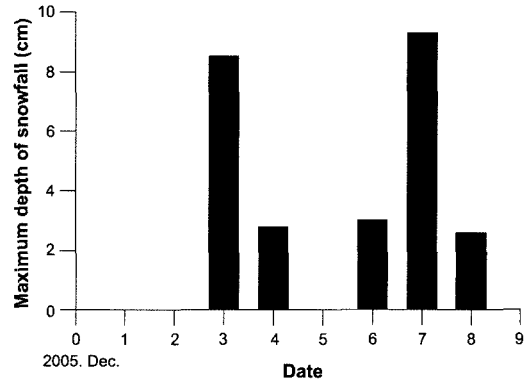


Fig. 8. Maximum depth of snowfall at the study site on December 2005.

의 특성으로 해석할 수 있을 것으로 판단되며, 이와 더불어 연구지역의 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.

5. 토의 및 결론

본 연구는 지하수-하천수 연계 연구를 위해 온도추적자를 이용한 예비연구로써 약 3 km 미만의 소규모 수계의 하천을 대상으로 하상의 공극수와 지표수의 온도를 관측하였다. 수계의 규모와 불균질한 하상을 고려해볼 때 관측지점이 부족한 한계점은 있으나 향후 하천수, 하상, 지하수의 온도를 이용한 연계 연구에 기본적인 자료를 제시하였다. 또한 두 온도 간의 차이에서 발생하는 일반적인 특성을 파악함으로써, 장기적이고 체계적인 지하수-하상-지표수 간의 관측시스템을 구축하는데 기초적인 자료를 생산하였다.

소유역의 상류에 위치한 A지점에서 온도 시계열자료를 분석한 결과 하상의 온도는 하천수의 온도와 마찬가지로 일일변동의 특성을 보이는 것으로 보아 하천수가 지하수로 유동하는 것으로 판단된다. 반면, 하류에 위치한 C지점의 경우 하상의 온도가 시간에 따라 일정한 값을 보이는 것으로 보아 지하수가 하천수로 유동하는 것으로 판단된다. 그러나 이러한 관계는 지하수와 하천수가 연계되어 있다는 가정에 기반을 둔 결론이며 그렇지 않을 경우 열 대류 및 하천 유량/유속의 영향에 대한 고려를 수반하여 해석해야만 한다.

상류지역과 하류지역을 중심으로 하상 및 하천수의 온도구배를 측정된 결과, 수계의 유동방향과 상류/하류

여부는 하상과 하천수의 온도구배에 직접적인 상호 연관성을 관찰할 수 없었다. 이는 연구지역의 하상과 하천의 연계 상태는 하상의 분포에 대하여 균질한 연결성을 가지고 있지 않을 수 있음을 시사하며 이는 우리나라 대수층의 대표적인 특성인 균열암반과 관련이 있을 것으로 판단된다.

하천수 및 하상의 온도구배 이상대(anomaly)를 찾거나 규칙성을 찾고 균열암반특성의 반영 여부를 증명하기 위해서는 더욱 세밀한 간격의 측정지점에서 자료를 취득해야하며 또한 하절기 및 기타 계절의 영향을 고려해서 계절적 변화에 따른 온도구배의 변동도 모니터링 해야만 할 것이다. 향후 이러한 연구를 통하여 최종적으로 지하수와 지표수의 연계가 분명하고 온도구배 및 유동의 증거가 뚜렷한 지점을 선정할 수 있게 될 것이다. 이렇게 선정된 지역에서 장기간의 자동 수위/온도 기록기를 이용한 관측을 통해서 지표수-지하수의 연계 특성을 더욱 정밀하게 규명할 수 있을 것이다. 이와 더불어 온도 및 수위의 관계가 분명하게 정립된 지하수-지표수 연계 지역에 대하여 정기적인 수질 모니터링 자료를 결합함으로써 지하수-지표수 연계 시스템의 유동특성에 대한 이해를 뒷받침할 수 있을 것으로 기대된다. 지하수-지표수의 연계특성의 규명은 또한 용질의 거동과도 밀접한 관계가 있으며 따라서 영양분 및 오염물질의 이동특성 및 경로 파악에의 단계로까지 온도추적자를 이용할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 온도 자료는 향후 연구지역에서 좀더 체계적인 관측시스템 설계와 장기간 관측을 통해 지하수와 하천수의 상관관계를 규명하고 이들 자료는 지하수 유동 모델링 시 수위자료와 함께 모델보정(model calibration)에 유용하게 이용될 것이다.

사 사

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

참고문헌

- Bouyoucos, G. (1915) Effects of temperature on some of the most important physical process in soils: Mich. Coll. Ag. Tech. Bull. v. 24, 63p.
- Butler, J.J., Zlotnik, V.A. and Tsou, M.-S. (2001) Drawdown and stream depletion produced by pumping in the vicinity of a partially penetrating stream. *Ground Water*, v. 39, p. 651-659.
- Calver, A. (2001) Riverbed permeabilities: Information from pooled data. *Ground Water*, v. 39, p. 546-553.
- Chen, X. and Yin, Y. (1999) Evaluation of stream depletion for vertical anisotropic aquifers. *Jour. Environ. Systems*, v. 27, p. 55-70.
- Conant, B.J. (2004) Delineating and quantifying ground water discharge zones using streambed temperature. *Ground Water*, v. 42, p. 243-257.
- Constantz, J., Cox, M.H., Sarma, L. and Mendez, G. (2003a) The Santa Clara River-The last natural river of Los Angeles. In heat as a tool for studying the movement of groundwater near streams, ed. Stonestrom and Constantz, J, 21-27. USGS Circular 1260. Reston, Virginia: USGS.
- Constantz, J., Cox, M.H. and Su, G.W. (2003b) Comparison of heat and bromide as ground water tracers near streams. *Ground Water*, v. 41, p. 647-656.
- Doyle, M.W., Stanley, E.H. and Harbor, J.M. (2003) Hydrogeomorphic controls on phosphorus retention in streams. *Water Resour. Res.*, v. 39, 1147, doi: 10.1029/2330WR002038.
- Elliot, A.H. and Brooks, N.H. (1997) Transfer of non-sorbing solutes to a streambed with bed forms: Theory, *Water Resour. Res.*, v. 33, p. 123-136.
- Findlay, S. (1995) Importance of surface-subsurface exchange in stream ecosystems: The hyporheic zone, *Limnol. Oceanogr.*, v. 40, p. 159-164.
- Glover, R.E. and Balmer, G.G. (1954) River depletion resulting from pumping a well near a river. *Transactions, American Geophysical Union*, v. 35, p. 468-470.
- Harvey, J.W. and Fuller, C.W. (1998) Effect of enhanced manganese oxidation in the hyporheic zone on basin-scale geochemical mass balance, *Water Resour. Res.*, v. 29, p. 89-98.
- Hunt, B. (1999) Unsteady stream depletion from ground water pumping, *Ground Water*, v. 37, p. 98-102.
- Jenkins, C.T. (1968) Techniques for computing rate and volume of stream depletion by wells. *Ground Water*, v. 6, p. 37-46.
- Kasahara, T. and Wondzell, S.M. (2003) Geomorphic controls on hyporheic exchange flow in mountain streams, *Water Resour. Res.*, v. 39, 1005, doi: 10.1029/2002WR001386.
- Kendall, C. and McDonnell, J.J. (1998) Isotope tracers in catchment hydrology, Elsevier Science: Amsterdam, 839p.
- Kollet, S.J. and Zlotnik, V.A. (2003) Stream depletion predictions using pumping test data from a heterogeneous stream-aquifer system (a case study from the Great Plains, USA). *J Hydrology*, v. 281, p.96-114.
- Landon, M.K., Rus., D.L. and Harvey, F.E. (2001) Comparison of instream methods for measuring hydraulic conductivity in sandy streambeds. *Ground Water*, v. 39, p. 870-885.
- Lapham, W.W. (1989) Use of temperature profiles beneath streams to determine rate of vertical ground-water flow and vertical hydraulic conductivity. *Water-Supply Paper 2337*. Denver, Colorado: USGS.
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W. (1984) A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow

- model. U.S. Geological Survey Open File Report 83. Reston, Virginia: USGS.
- Packman, A.I. and Brooks, N.H. (2001) Hyporheic exchange of solutes and colloids with moving bed forms, *Water Resour. Res.*, v. 37, p. 2591-2605.
- Rorabaugh, M.I. (1954) Streambed percolation in development of water supplies, U.S. Geological Survey Groundwater Notes on Hydraulics, n. 25, 13p.
- Silliman, S.E. and Booth, D.F. (1993) Analysis of time-series measurements of sediment temperature for identification of gaining vs. losing portions of Juday Creek, Indiana. *J. Hydrology*, v. 146, p. 131-148.
- Sophocleus, M. (2002) Interactions between groundwater and surface water: The state of the science, *Hydrogeol. J.*, v. 10, p. 52-67, doi:10.1007/s10040-001-0170-8.
- Sophocleus, M.A., Koussis, A.D., Martin, J.L. and Perkins, S.P. (1995) Evaluation of simplified stream-aquifer depletion models for water rights administration. *Ground Water*, v. 33, p. 579-588.
- Sophocleus, M.A., Townsend, M.A., Vogler, L.D., McClain, T.J., Marks, E.T. and Coble, G.R. (1988) Experimental studies of stream-aquifer interactions along the Arkansas River in Central Kansas-Field testing and analysis. *J. Hydrology*, v. 98, p. 249-273.
- Stallman, R.W. (1963) Methods of collecting and interpreting ground-water data. U.S. Geological Water-Supply Paper, 1544-H, p. 36-46.
- Stonestrom, D.A. and Constantz, J., ed. (2003) Heat as a tool for studying the movement of ground water near streams. USGS Circular 1260. USGS.
- Thies, C.V. (1941) The effect of a well on the flow of a nearby stream. *Transactions, American Geophysical Union*, v. 22, p. 734-738.
- Triska, F.J., Kennedy, V.C., Avanzino, R.J., Zellweger, G.W. and Bencala, K.E. (1989) Retention and transport of nutrients in third-order stream in northwestern California: Hyporheic processes, *Ecology*, v. 70, p. 1893-1905.
- Triska, F.J., Duff, J.H. and Avanzino, R.J. (1993) The role of water exchange between a stream channel and its hyporheic zone in nitrogen cycling at the terrestrial-aquatic interface, *Hydrobiologia*, v. 251, p. 167-184.
- Walker J.F. and Krabbenhoft, D.P. (1998) Groundwater and surface-water interactions in riparian and lake-dominated systems. In *Isotope Tracers in Catchment of Hydrology*, Kendall C, McDonnell JJ (eds). Elsevier Science: Amsterdam, p. 467-488.
- Wilson, J.L. (1993) Induced infiltration in aquifers with ambient flow. *Water Resour. Res.*, v. 29, p. 3503-3512.
- Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L., and Alley, W.M. (1998) Ground water and surface water, a single resource, U.S. Geological Survey Circular 1139, 79 p.
- Woessner, W.W. (2000) Stream and fluvial plain ground water interactions: Rescaling hydrogeologic thought, *Ground Water*, v. 38, p. 423-429.
- Zlotnik, V.A., Huang, B.R. (1999) Effect of partial penetration and streambed sediments on aquifer response to stream stage fluctuations. *Ground Water*, v. 37, p. 599-605.