

# 지하수-지표수 혼합구간의 수직 온도 분포 특성 분석

김 회 정\* / 이 진 용\*\* / 이 성 순\*\*\* / 현 윤 정\*\*\*\* / 이 강 근\*\*\*\*\*+

## Characterization of vertical temperature distribution in Hyporheic zone

Heejung, Kim\* / Jin-Yong, Lee\*\* / Seong-Sun, Lee\*\*\* / Yujung, Hyun\*\*\*\* / Kang-Kun, Lee\*\*\*\*\*+

**요약** : 지하수-지표수 혼합구간(Hyporheic zone)은 지표수와 지하수의 온도변화에 민감하게 반응하는 구간이다. 지표수의 경우 대기온도에 영향을 받아 온도의 변화주기가 짧은 반면, 상대적으로 지하수는 온도 변화주기가 길다. 본 연구에서는 지하수-지표수 혼합구간의 유동강도와 방향을 고려하여 깊이별 온도의 수직적 분포특성 분석하였다. 현장자료를 이용한 1차원 열전달 해석 수행결과, 지하수-지표수 혼합구간에서 지하수 유출과 지표수의 유입이 일어나는 지점에서 온도의 분포는 상이한 양상을 보였다. 혼합구간의 수직적 온도 분포의 변화는 하천기저에서 가장 두드러지게 나타났다. 또한 열전달 해석 결과를 바탕으로 연구지 혼합구간의 온도분포는 유동강도보다 유동방향에 지배 받았다.

**핵심용어** : 혼합수 수직 온도, 지하수 유출, 지표수 유입, 1차원 열전달 해석

**Abstract** : Hyporheic zone, where groundwater-stream water mixing occurs, sensitively responds to heat of groundwater and stream water temperature. Variation of stream water temperature has short time period and time dependent, because stream water temperature is influenced by daily fluctuation and seasonal air temperature. On the other hand, groundwater temperature is insignificant. In this study, we conducted 1-dimensional heat transfer analysis. The results show that there are differences of temperature distribution between gaining stream and losing stream with flux in hyporheic zone. Especially, variations of hyporheic water temperature show a significant difference in adjacent streambed. Also, the results shows that distribution of temperature was more affected by groundwater direction than intensity of flux

**Keywords** : vertical hyporheic water temperature, groundwater up-welling, stream water down-welling, 1-dimensional heat transfer analysis

### 1. 서 론

지난 세기 동안 전 세계에서 급격한 기후변화가 관찰되었으며(Nicholls *et al.*, 1996; Zhang *et al.*, 2000), 최근까지 기후변화와 관련한 연구 결과들을 살펴보면, 홍수나 가뭄 등의 자연재해 빈도가 증가하였으며, 우리나라의 강우패턴은 극

한 강수의 형태로 단시간에 국지적으로 집중될 것으로 예상된다(허창희 외, 1988; 강인식 외, 1992; 이명인 외, 1997; 권태영 외, 1998; 박성규 외, 2002). 이러한 상황에서, 특히 강우패턴 변화에 민감하게 반응하는 지하수-지표수 혼합구간에 대한 연구는 필수적이다. 지하수-지표수 혼합구간은 지하수와 지표수, 서로 상이한 물리, 화

+ Corresponding author : kkleee@snu.ac.kr  
\* 정희원 · 서울대학교 지구환경과학부 박사과정  
\*\* 비희원 · 강원대학교 지질학과 부교수  
\*\*\* 비희원 · 서울대학교 지구환경과학부 박사과정  
\*\*\*\* 정희원 · 서울대학교 지구환경과학부 BK21 계약조교수  
\*\*\*\*\* 정희원 · 서울대학교 지구환경과학부 교수

학, 생물학적 에너지를 지닌 두 수체 사이에 존재 하면서 이들 사이의 에너지 구배에 의해 활발한 혼합이 일어나는 곳으로(Gilliam, 1994; Boulton *et al.*, 1998; Hancock, 2002), 한반도 기후변화에 대응한 수자원 확보와 유지 관리 측면에 있어 분명 연구할 가치가 있는 수리적으로 특수한 공간이다.

최근 국내에서 혼합구간의 수리적 특성에 기초한 혼합구간의 특성화 연구가 진행되어 왔다(김영주와 강호정, 2009; 김희정 외 2009; Kim *et al.*, 2011; Hyun *et al.*, 2011). 특히, 김영주와 강호정(2009)은 분자생물학적 분석을 통한 혼합구간의 생지화학적 특징에 관한 연구를 진행하였으며, 김희정 외 (2009)는 혼합구간의 수리적 특성 연구를 진행하였다. Kim *et al.* (2011)은 혼합구간 간극수 및 지하수 지표수의 지구화학적 자료를 다변량 통계분석을 이용하여 인자분석 및 군집분석을 진행하였으며, Hyun *et al.* (2011)은 혼합구간의 깊이별 온도와 EC자료 이용하여 혼합구간의 이동수의 유동률을 추정하는 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 혼합구간의 깊이별 온도 분포 변화 특성을 1차원 열전달 해석 결과를 이용하여 연구하였다. 본 연구를 통해 혼합구간의 수리적 특성(지하수 유출 및 지표수의 유입)과 유동률이 혼합구간의 온도 분포에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

## 2. 연구지역

연구지역은 경기도 과주시에 위치한 문산천이다(그림 1.a). 이곳은 경기도 북부에 위치하여 비교적 다른 지역에 비하여 유역의 개발 진행이 미비한 상태로 자연하천의 면모를 잘 나타낸다(그림 1.b). 이 지역은 편마암이 기저층을 이루고 있으며 하천의 하류구간에서는 충적층 부정합이 나타난다. 토양모재는 제 4기층이며, 퇴적양식은 충적층, 하천 유역의 경사는 0~2%이며, 유효 토심은 깊고 배수등급은 약간 불량한 물리적 특성을 나타

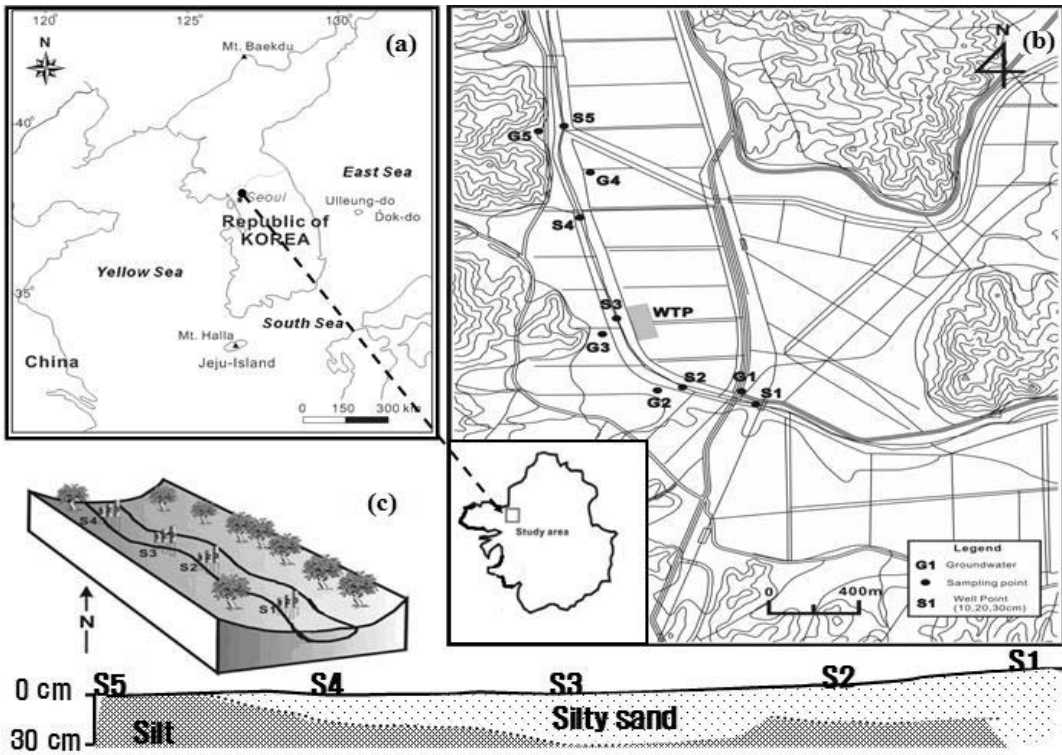


그림 1. 연구지역 및 온도 측정 지점

낸다. 유역 하천의 표토 토성은 미사질 양토와 사양토, 양토로 구성되어 있으며, 하상 재료는 상류 지역은 자갈을 포함한 굵은 모래, 중 하류의 경우 중사 이하로 구성되어 있다(김희정 외, 2009).

연구 현장의 깊이별 온도와 혼합구간의 유동속도를 측정하기 위하여 소형관정을 하천바닥에서 10, 20, 30, 40, 50 cm 깊이로 S1, S2, S3, S4, S5 지점에 설치하였다(그림 1.c).

연구지 토양 분석을 위하여 입도분석을 실행하였다(그림 2). 그 결과, S3-30 시료를 제외한 모든 토양 시료는 점토를 10% 이상 함유하고 있었다. 그리고 S2-30, S4-30, S5-10, S5-20, S5-30의 토양시료는 실트를 50% 이상을 함유하고 있다. 또한, S1-30, S2-30, S4-30, S5-10, S5-20, S5-30을 제외한 토양 시료는 모래를 거의 80% 이상 함유하는 것으로 입도 분석 결과 확인되었다. 상류지점의 하천에서 채취한 토양 시료와 하천기저에서부터 혼합구간의 깊이가 낮을수록 토양의 입도가 모래와 같고, 하류지점에서 채취한 토양 및 혼합구간의 깊이가 깊어질수록 실트를 많이 함유하고 있는 토양으로 조사되었다. 하

지만 S3 지점의 토양의 경우 혼합구간의 깊이와 상관없이 모두 비슷한 토양 입도를 나타냈다.

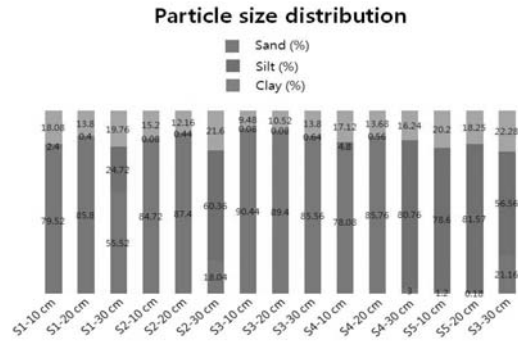


그림 2. 연구지점에서 채취한 토양시료의 입도 분석 결과

연구지는 대표적인 한반도 기후의 특징인 대륙성기후를 나타낸다. 연 평균 강수량은 1500 mm/year이며 대부분의 강수는 7월(576.6 mm/month), 8월(295.1 mm/month), 9월(111.5 mm/month)에 집중된다(그림 3). 여름철(7, 8, 9월)과 겨울철 (11, 12, 1월) 평균 기온은 각각 23°C와 -3°C이다.

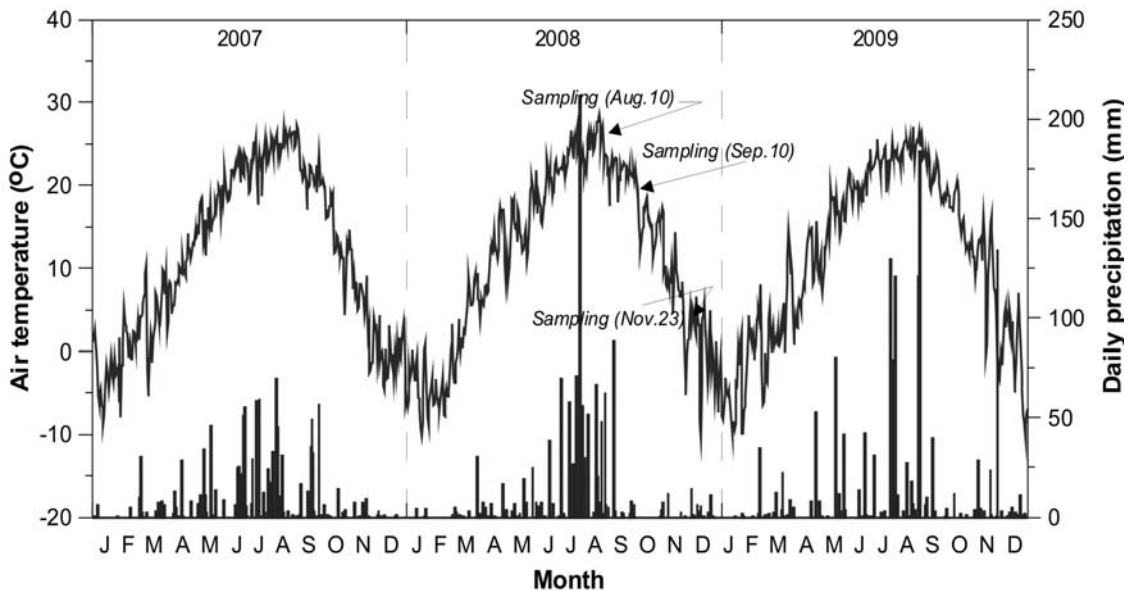


그림 3. 현장 대기 온도와 강수량 (modified from Kim *et al.*, 2011)

### 3. 연구방법 및 결과

#### 3.1 물질균형방정식

연속방정식(continuity equation)은 보존계에서 물리량의 전달을 표현하는 미분방정식이다. 질량, 에너지, 운동량 및 기타 물리량들은 보존의 법칙을 따르며 연속방정식으로 표현이 가능하다. 연속방정식의 일반형은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot f = s \quad (3-1)$$

여기서,  $\phi$ 는 질량,  $f$ 는  $\phi$ 의 유동률을 설명하는 함수,  $s$ 는 생성이나 소멸을 설명하는 함수이다. 이 식은 면적과 두께가 각각  $A$ 와  $dx$ 인 반무한판을 통한 유동률을 고려하여 유도할 수 있다(그림 4). 질량은 반무한판의 왼쪽과 오른쪽을 통해 이동하며 왼쪽을 통해 들어가는 질량을  $m_{\Sigma}$ , 오른쪽으로 나오는 질량을  $m_{\Sigma} + \frac{\partial m_{\Sigma}}{\partial x} dx$ 라 하자. 시간  $dt$  동안의 질량 증가량은 판으로 들어오는 질량과 빠져나가는 질량의 합이며 다음과 같다.

$$\left(m + \frac{\partial m}{\partial t} dt\right) - m = m_{\Sigma} - \left(m_{\Sigma} + \frac{\partial m_{\Sigma}}{\partial x} dx\right) \quad (3-2)$$

여기서  $m$ 은 판 내부의 질량이며 다음과 같다.

$$m = \rho A dx \quad (3-3)$$

여기서  $\rho$ 는 단위부피당 질량을 의미하며,  $m_{\Sigma}$ 는 다음과 같다.

$$m_{\Sigma} = \rho v A dt \quad (3-4)$$

여기서  $v$ 는 수평축을 따른 질량의 이동속도이다.

따라서 식 (3-2)는 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A dx) dt = - \frac{\partial}{\partial x}(\rho v A dt) dx \quad (3-5)$$

식 (3-5)의 양변를  $A dx dt$ 로 나누면 다음 식을 얻는다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0 \quad (3-6)$$

식 (3-6)을 3차원으로 확장하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (3-7)$$

여기서  $\mathbf{v}$ 는 각 축 방향의 속도이다.

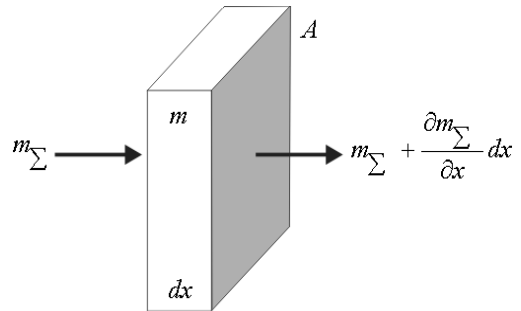


그림 4. 반무한 판을 통과하는 질량

식 (3-7)에서 생성과 소멸  $s$ 를 고려하고 단위 시간당 단위면적당 판으로 들어가는 질량인 유동률(플럭스)  $\rho \mathbf{v}$ 를 고려하면 식 (3-1)을 쉽게 얻을 수 있다. 식 (3-1) 및 식 (3-7)에서 포텐셜  $\phi$ 는 압축성 흐름에서의 유체의 밀도와 같이 단위부피당 물리량으로 정의된다. 물질 균형방정식은 초기 조건과 경계조건을 설정하여 풀 수 있다.

#### 3.2 열전달 해석

열은 다공질 매질안에서 전도, 이송, 복사 3가지 과정에 의해 이동한다. 전도는 열 플럭스 온도의 변화의 일차원 법칙과 관계하여 설명 할 수 있다. 이송에 의한 열 이동은 지하수의 이동에 의해

열의 이동되는 것을 의미하며, 복사는 온도자체에서 발산하는 복사열에 의한 것이다(Domenico and Schwartz, 1998). 푸리에 법칙은 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동하는 전도에 대해 말한다. 이 과정은 열전도라고 하며 액체와 고체에서 다음과 같이 표현된다.

$$H = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3-8)$$

여기서  $H$ 는 열 플럭스 이고  $T$ 는 온도,  $\lambda$ 는 물질의 열 전도도를 나타낸다. 고체안의 유체에 대해 다룰 때, 유체와 고체상태 안에서 에너지의 이동에 관해 선행적으로 유효 열전도도에 대하여 유념해야 한다.

$$H_e = \lambda_e \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3-9)$$

여기서  $H_e$ 는 유효 에너지 플럭스를 의미하며,  $\lambda_e$ 는 유효 열전도도를 의미한다. 시스템에서 유체가 이동하면, 유체이동에 따라 열의 이동이 생긴다. 여기에는 두 가지 종류의 이동이 있다. 내부 요인에 의해 흐름이 발생할 때, 그 이동은 전도에 의해 발생한다. 이런 경우 Darcy의 법칙이 적용된 지하수의 이동이 유체의 에너지 구배에 의해 일어나는 것과 같다. 두 번째 종류는 자유이송인데, 이것은 온도구배에 의해 유체의 밀도가 영향을 받아 유체의 이동이 일어난다는 것이다. 열이송은 1차원 전도 이송 확산 방정식에 의해 지배받는다(Carlsaw and Jaeger, 1959; Stallman, 1965; Goto *et al.*, 2005).

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_e \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - n \rho_f c_f v_f \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3-10)$$

여기서  $T$ 는 온도를,  $t$ 는 시간,  $z$ 는 깊이를 나타낸다.

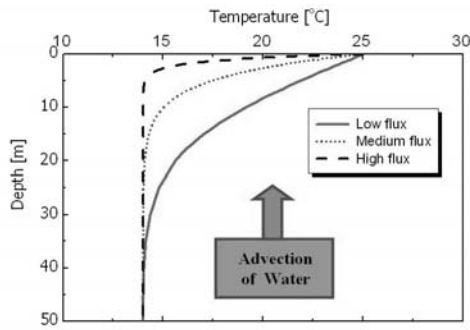
$$\lambda_e = \lambda_o + \rho c \beta |v_f| \quad (3-11)$$

$$\lambda_o = \lambda_f^n \lambda_g^{(1-n)} \quad (3-12)$$

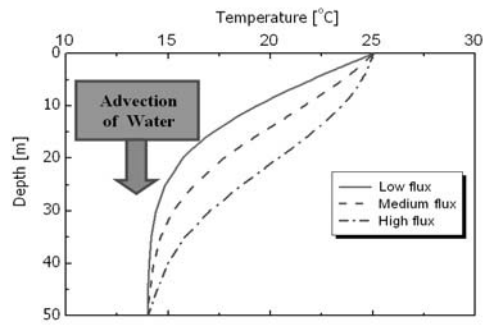
표 1. 연구에 사용된 물리특성

Physical properties	
$\rho_{sb}$	2516 kg/m <sup>3</sup>
$C_{sb}$	1915 J/°Ckg
$\lambda_g$	3.37 W/m°C
$\lambda_f$	0.6 W/mK
$n$	0.32
$\lambda_o = \lambda_f^n \lambda_g^{(1-n)}$	1.92 W/m°C

$\lambda_e$ 는 유효 열 전도도,  $\lambda_o$ 는 유체의 유동이 없을 때 기선의 열전도도,  $\rho$ 는 토양의 밀도,  $c$ 는 토양의 비열,  $\rho_f$ 는 유체의 밀도  $C_f$ 는 유체의 비열,  $\beta$ 는 분산,  $n$ 은 공극률,  $v_f$ 는 유체의 수직 이동 (+는 지하수의 유출),  $\lambda_g$ 는 토양입자의 열전도도를 말한다. 이와 같은 공식은 포화대와 비포화대에서 적용이 가능하며, 본 연구에서는 완전 포화된 지하수-지표수 혼합구간에서 진행하였다. Conant(2004)는 혼합구간 온도분포에 수직방향 유동율이 미치는 영향의 개념을 소개한 바 있다. 본 연구에서는 표 1에 나타난 문산천의 기본 물성을 사용하여 유동 강도 및 유동 방향을 고려한 온도분포의 변화를 그림 5와 같이 계산하였다. 표 1에 주어진 값들은 문산천에서 채취한 토양 시료로부터 얻은 현장 측정값과 실험실 시험 자료를 이용하여 얻은 것으로, 현장의 수리적 특성을 반영하는 채취 토양의 자연 상태를 고려한 단위중량 및 공극률 역시 계산하였다. 그림 5에서 동일한 물성의 혼합구간에 대하여 유동 방향과 유동 강도에 따라 온도분포가 달라질 수 있음을 알 수 있다.



(1) 지하수 유출



(2) 지표수 유입

그림 5. 유체의 유동강도에 따른 온도 분포의 변화

유동 속도 측정을 위해 S1~S5 지점에 소형관 정을 깊이별로 설치하여 얻은 수두 구배를 이용하여 혼합수의 유동방향과 Darcy 속도를 계산하였

다(그림 6). S1과 S2 지점은 지하수의 유출, 그리고 S3, S4, S5는 지표수의 유입이 발생하는 것을 현장실측을 통해 확인하였다.

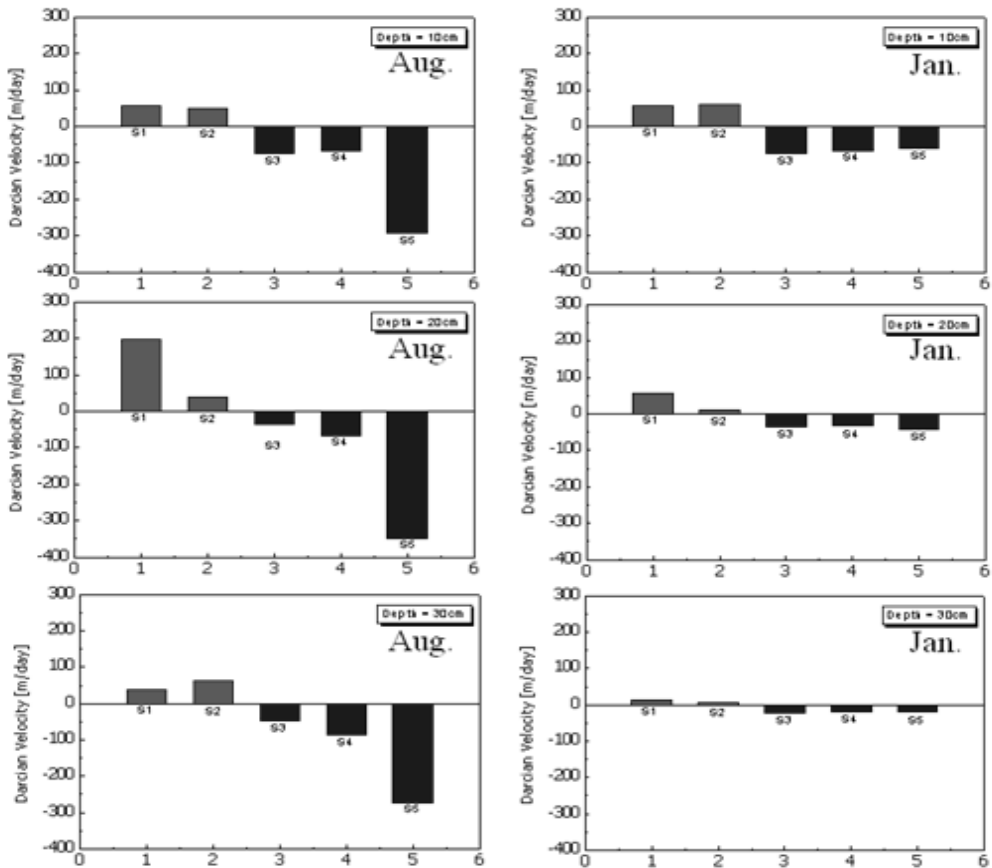


그림 6. 현장의 수두구배 측정을 통하여 계산된 계절별 Darcy 속도

### 3.2 혼합구간의 간극수 유동과 온도

깊이에 따른 온도 분포는 전도 이송을 고려한 열전달 방정식을 통해 계산되었다. 해석 결과(그림 7) 혼합구간의 온도분포는 지표수 및 지하수의 유동 및 방향에 의해 제어되고 있음을 보여주었다. 혼합구간의 유동강도는 전반적으로 중간정도를 나타내었다(그림 5). 겨울철의 경우 현장 데이터와 잘 부합되었지만 여름철의 현장 데이터와는 잘 부합되지 않았다. 이는 여름철에 계산된 유동률이 과대평가되었기 때문이다. 여름철의 S5지점의 유동속도는 304 m/day, 반면 겨울철 같은 지점의

유동속도는 24 m/day로 계산되었다. 이는 여름철 강수에 혼합구간의 유동률이 겨울철에 비하여 영향을 받았기 때문으로 사료된다.

Conant (2004) 와 Constantz (1992)의 연구에서는 하천기저 30 cm 이하에서 측정된 온도의 변화 양상이 뚜렷하지 않았다. 본 연구에서는 지표수의 영향을 최대한 반영하는 혼합구간의 온도 분포 연구를 위하여 현장의 온도측정을 하천기저에서 10, 20, 30, 40, 50 cm 깊이를 달리하여, 여름철과 겨울철 두 번 측정하였다. 특히 S1과 S3지점의 유동강도는 비슷하지만 지하수의 유입과 유출의 방향성은 상이하게 측정되었다.

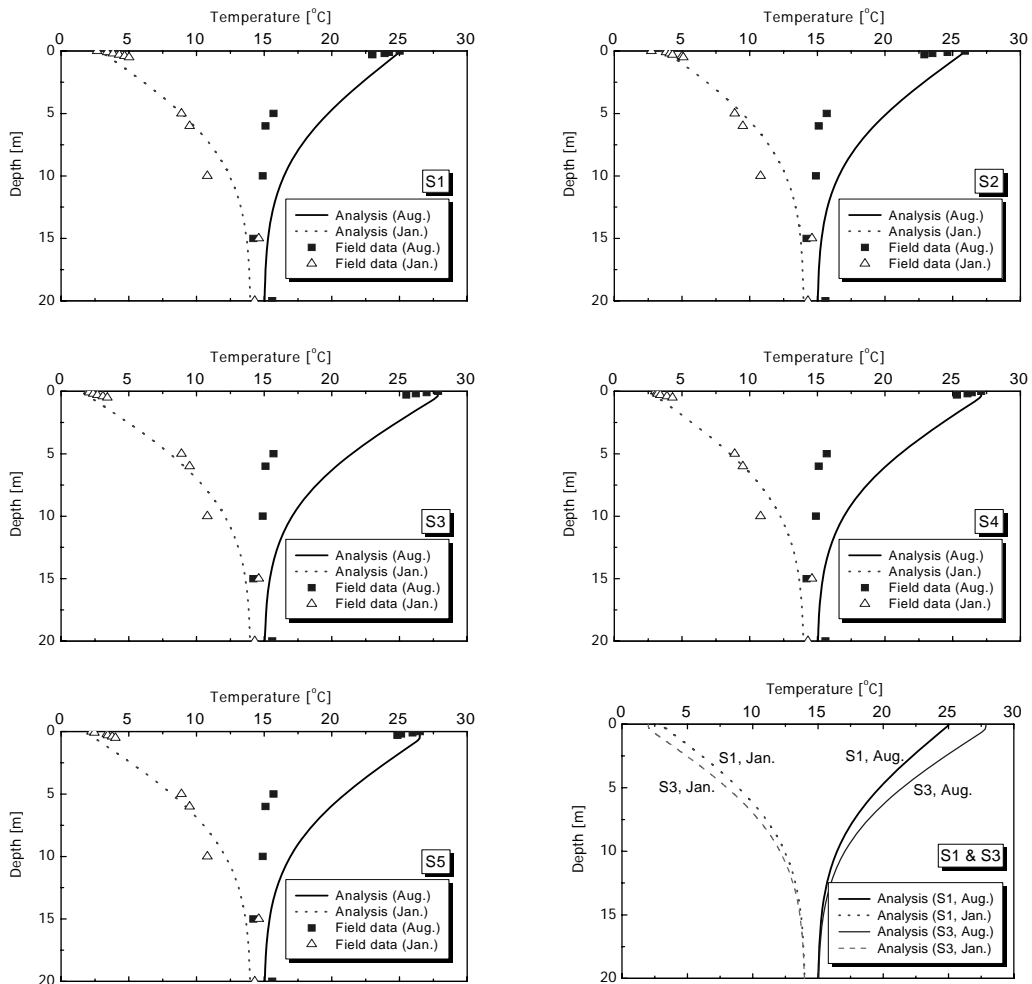


그림 7. 혼합구간의 온도분포를 이용한 모델링 결과

따라서 혼합수 유동률은 비슷하지만 혼합수의 이동 방향성이 상이한 S1지점과 S3지점의 온도분포 모델링하여 그림 7에 나타내었다. 지하수의 유출이 강한 S1지점, 반면에 지표수의 유입이 강한 S3지점의 온도 분포를 비교하여 보면 혼합수 유동률은 온도의 분포에 막대한 영향을 미치지 않는 것이다. 그러나 그림 7의 마지막 그래프를 살펴보면 지하수 및 지표수의 유입 유출의 방향에 의해 혼합수간의 깊이별 온도분포가 영향을 받고 있음을 나타내었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 1차원 열전달 해석을 통하여 지하수-지표수 혼합구간의 수직적 온도 변화(열의 전도와 이송) 특성을 알아보았으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

지하수, 지표수 온도와 깊이별로 측정된 혼합구간의 간극수 온도를 열 균형방정식을 이용하여 계산한 결과, 혼합구간 간극수의 수직적 온도분포는 현장의 수리지질학적특성을 반영하였다. 또한 혼합수간의 온도 구배는 혼합구간에서 발생하는 수리학적 특징인 지하수의 방출과 지표수의 유입 이송 시스템을 보여주었다. 연구지의 국지적인 수직 온도분포는 간극수의 유동방향의 차이와 유동률의 크기 따라 연구 지점 및 계절적으로 유의하게 나타났다. 이는 혼합구간의 깊이별 온도 분포는 유동강도와 유동방향에 영향을 받고 있으며, 특히 연구현장의 경우 모델링 수행결과 유동강도보다는 유동방향에 영향을 받고 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 두뇌한국(BK21) 서울대학교 지구환경과학사업단과 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업(2011-0001120)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 강인식, 허창회, 민경덕, 1992, 한반도 여름철 강수량의 장기예측. 한국기상학회지, 28, 283-292.
- 권태영, 오성남, 박상욱, 1998, 한반도 여름강우의 장기변동과 지역적 특성. 한국기상학회지, 34, 20-30.
- 김영주, 강호정, 2009, 자연 하천의 생태학적 중요 지점으로서 지표수-지하수 혼합대의 생화학적 기작. 습지학회지, 11(1), 123-130.
- 김희정, 현윤정, 이강근, 2009, 지하수 종속 생태 환경에서 수문-생태학적 특성 조사 및 분석. 한국습지학회지, 11(3), 1-8.
- 박성규, 하경자, 2002, 장마의 종관 특성과 장마 형태 변화에 관한 고찰. 대기, 12(3), 348-351.
- 이명인, 강인식, 1997, 한반도 기온변동성과 온난화. 한국기상학회지, 33, 429-443.
- 허창회, 강인식 1988, 한국 지역강수의 변동성에 관한 연구. 한국기상학회지, 24, 38-48.
- Boulton, A.J., Findlay, S., Marmonier, P., Stanley, E.H., Valett and H.M., 1998, The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29, 59-81.
- Carlsaw, H.S. and Jaeger, J.C., 1959, *Conduction of heat in solids*, Clarendon, Oxford, UK., 510 p.
- Conant, B. Jr., 2004, Delineating and Quantifying Ground Water Discharge Zones Using Streambed Temperatures, *Groundwater*, 42(2), 243-257.
- Constantz, J., 1998, Interaction between stream temperature, streamflow, and groundwater exchanges in alpine streams, *Water Resources Research*, 34(7),



- 1609-1615.
- Domenico, P.A and Schwarts, W., 1998, *Physical and chemical hydrology*, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc. NewYork.
- Gilliam, J.W., 1994, Riparian wetlands and water quality, *J. Environ. qual.*, 23, 896-900.
- Hancock, P.J., 2002, Human impacts on the stream-groundwater exchange zone, *Environmental Management*, 6, 763-781.
- Hyun, Y., Kim, H., Lee, S.S., Lee, K.K., 2011, Characterizing streambed water flux using temperature and head data in Munsan stream, South Korea, *Journal of Hydrology*, 402, 377-387.
- Kim, H., Lee, J.Y., Hyun, Y. and Lee, K.K., 2011, Groundwater and stream water exchange revealed by water chemistry data in hyporheic zone, *Hydrological Sciences Journal*.(Submitted)
- Nicholls, N., Gruza, J.J., Karl, T.R., Ogallo, L.A., Parker, D.E., 1996, *Observed climate variability and change. In: Climate Change 1995, The Science of Climate Change*. Intergovernmental Pannel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, 133pp.
- Stallman, R.W., 1965, Steady one-dimentional fluid flow in a semi-infinite porous medium with sinusodal surface temperature, *Journal of Geophysical Research*, 70, 2821-2827.
- Goto, S., Yamano, M. and Kinoshita, M., 2005, Thermal response of sediment with vertical fluid flow to periodic temperature variation at the surface, *Journal of Geophysical Research*, 110, B01106, 11p.
- Zhang, X., Vincent, L., Hogg, W.D., Niitsoo, A., 2000, Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th Century, *Atmosphere-Ocean*, 30, 3.

- 논문접수일 : 2011년 04월 04일
- 심사의뢰일 : 2011년 04월 19일
- 심사완료일 : 2011년 08월 11일