

여울-소 구조에서 지표수-지하수 혼합대의 흐름 특성 분석에 관한 수치모의 연구

Numerical Modeling of Flow Characteristics within the Hyporheic Zones in a Pool-riffle Sequences

이 두 한* / 김 영 주** / 이 삼 회***

Du Han Lee* / Young Joo Kim** / Samhee Lee***

요약 : 지표수-지하수 혼합대는 하천 및 호소 등에서 지표수와 지하수가 교환되는 공간이다. 지표수-지하수 혼합은 하상의 토층으로 확장되어 다양한 물리적, 생지화학적, 열역학적 교환을 발생시키며 수생태계 내 고유한 생태적 전이대를 형성하는데 주요한 역할을 한다. 과거 실험 및 수치모의 연구에 의하면 혼합대에서 발생하는 물질 교환은 하천의 지형적인 특징으로 발생하는 압력분포에 의해 지배된다. 특히 하천의 구간 규모에서 여울-소 구조는 혼합대의 특성을 지배하는 주요 인자로 알려져 있다. 여울-소 연속 구조는 지표수에서 재순환영역과 정체점을 형성하며 이 독특한 흐름 구조에 의해 혼합대의 흐름특성이 영향을 받는다. 본 연구에서는 3차원 동수역학 모형을 이용하여 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식과 Darcy 방정식을 동시에 해석하여 연속된 여울-소 구조에서 발생하는 지표수의 흐름구조가 혼합대의 흐름에 미치는 영향을 분석하였다. 모의 결과, 여울-소 구조에서 지표수의 재순환영역 및 정체점은 상승류와 하강류 형성과 직접적 연관을 가지며, 재순환영역의 크기가 감소하면 여울 전면부 하강류 형성 구간의 길이가 감소하고 최대 하강류 발생 지점이 하부로 이동하는 특성을 파악하였다. 이와 같은 본 연구의 결과는 혼합대의 현장관측, 하천 관리 및 복원 등의 연구에 활용하여 친환경 하천 조성에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 지표수-지하수 혼합대, 지표수-지하수 교환, 여울-소 구조, 동수역학 모형, 다공성 매질 모형

Abstract : Hyporheic zone is a region beneath and alongside a stream, river, or lake bed, where there is mixing of shallow groundwater and surfacewater. Hyporheic exchange controls a variety of physical, biogeochemical and thermal processes, and provides unique ecotones in a aquatic ecosystem. Field and experimental observations, and modeling studies indicate that hyporheic exchange is mainly in response to pressure gradients driven by the geomorphological features of stream beds. In the reach scale of a stream, pool-riffle structures dominate the exchange patterns. Flow over a pool-riffle sequence develops recirculation zones and stagnation points, and this flow structures make irregular pressure gradient which is driving force of the hyporheic exchange. In this study, 3 D hydro-dynamic model solves the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations for the surface water and Darcy's Law and the continuity equation for ground water. The two sets of equations are coupled via the pressure distribution along the interface. Simulation results show that recirculation zones and stagnation points in the pool-riffle structures dominantly control the upwelling and downwelling patterns. With decrease of recirculation zones, length of donwelling zone formed in front of riffles is reduced and position of maximum downwelling point moves downward. The numerical simulation could successfully predict the behavior of hyporheic exchange and contribute the field study, river management and restoration.

Keywords : *hyporheic zone, hyporheic exchange, pool-riffle structures, hydro-dynamic model, porous media model*

+ Corresponding author : dhlee@kict.re.kr

* 한국건설기술연구원 하천해안연구실 수석연구원 · E-mail : dhlee@kict.re.kr

** 정희원 · 한국건설기술연구원 하천해안연구실 연구원 · E-mail : yjee@kict.re.kr

*** 정희원 · 한국건설기술연구원 하천해안연구실 선임연구위원 · E-mail : samhee.lee@kict.re.kr

1. 서 론

하천은 수리적인 역동성으로 주변의 환경적인 요소들과 상호작용하며 육상생태계에서 수생태계로 이어지는 물질 순환의 통로로서 중요한 역할을 한다. 일반적으로 하천은 상류에서 하류까지 물의 흐름에 따라서 지표수가 하상의 간극수지역으로 유출되었다가 다시 지표수로 유입되는 메커니즘이 반복되며, 이러한 흐름이 나타나는 공간을 지표수-지하수 혼합대(hyporheic zone)라 한다 (Orghidan, 1959).

지표수-지하수 혼합대는 공간적 규모에 따라 유역 규모(catchment scale)와 구간 규모(reach scale)로 나눌 수도 있으며, 상류에서 하류로 갈수록 지형적 변화에 따른 혼합대 흐름특성이 상이하게 나타난다(Boulton 등, 1998). 구간 규모에서 주로 연구되고 있는 혼합대의 특징은 여울-소 구조로부터 야기되는 연직방향의 흐름이며, 이로 인한 지표수와 지하수의 혼합 특성은 압력분포의 영향을 받는다(Hester와 Doyle, 2008).

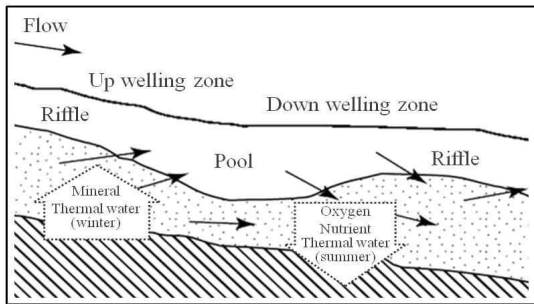


그림 1. 여울-소 구조에서 흐름 특성에 따른 지표수-지하수 혼합대의 생지화학적 특징(modified from Grieg et al., 2007)

이 혼합대에서는 지표수와 지하수의 혼합으로 인하여 고유의 생지화학적 특징이 나타나고, 혼합대 흐름 양상에 따라서 이질적인 특성이 결정된다. 그림 1과 같이 여울(riffle)의 두부(head)에서 발생하는 하강류(down-welling)는 지표수로부터 용존산소와 영양염류를 공급하며, 상승류(up-

welling)가 나타나는 여울(riffle)의 미부(tail)는 지하수로부터 열에너지 교환 및 무기염류의 공급을 받는다(Franken 등, 2001; Brunke와 Gonser, 1997). 특히 혼합대의 열에너지 교환은 열의 완충지대라는 중요한 물리적 특성을 야기한다. 혼합대는 지표수보다 온도의 변화 폭이 적으며, 특히 지하수의 영향이 큰 상승류 지점은 여름철에는 수체의 온도를 낮추어 주고, 겨울철에는 온도를 높여 주어 온도 변화에 민감한 생물이 서식하기 적합한 환경을 조성하는 것으로 알려져 있다 (Schwoerbel, 1961; Evans와 Petts, 1997).

이러한 혼합대 형성과 지표수-지하수 교환은 하천의 지형 형상뿐만 아니라 토양 입자 구성, 유속 등에 영향을 받으며, 이는 물질 순환 및 생물 서식처로서의 기능과 밀접한 관련을 가지고 있다. 따라서 하천 생태계를 연구하는데 있어서 지표수와 지하수 흐름은 분리할 수 없으며, 혼합대의 생물 서식처로서 기능을 연구하기 위해서는 하천의 지형적 특성으로부터 야기되는 수리적인 거동 파악이 선행되어야 한다.

국내에서는 혼합대의 중요성이 인지되면서 김구영 등(2006)에 의한 열추적자를 이용한 혼합대 연구를 시작으로 자연 하천 구간에서 혼합대의 생지화학적 특성 파악(김영주와 강호정, 2009) 및 수리적 특성에 따른 교환율(김희정 등, 2009, 2011) 등에 대한 연구가 진행되었다. 그러나 혼합대 형성에 직접적으로 영향을 미치는 지형에 따른 수리적 거동 및 수서 생물(macroorganism) 서식처에 미치는 영향을 파악하는 연구가 미비한 실정이다.

반면, 국외에서는 다양한 범위에서 지형적인 특성으로 인한 혼합대의 수리적인 흐름 변화 연구가 진행되었으며 나아가 생물 서식처로서의 적합성에 대한 연구가 이루어지고 있다. 특히 어류 산란처로서 지표수-지하수 혼합대에 대한 연구는 기존의 하도 구조의 안정성과 하상재료 특성에 국한된 연구에서 벗어나 수리적인 흐름의 안정성 및 부화를 위한 조건 형성까지 고려하는 범위로 확장되었다. Baxter와 Hauer(2000)은 송어 알의 분포와

지형적 특성으로 야기되는 혼합대 흐름간의 관계에 대한 연구를 통해 가을철 황소 송어(bull trout)는 계곡 구역 규모(valley segment scale)에서 상승류가 나타나는 지역 중 세부적인 구간 규모(reach scale)로는 하강류가 나타나는 여울의 두부를 주로 산란처로 선정한다는 결과를 제시하였다.

혼합대 중 상승류가 나타나는 지역은 지하수의 영향으로 열에너지가 공급되어 지표수보다 온도가 높아지고, 일교차 및 연교차가 줄어들기 때문에 한대 협온성 어종에게 적합한 환경을 제공한다. 또한, 구간 규모에서 하강류가 나타나는 여울의 두부는 지표수로부터 용존 산소를 공급 받으며, 그 위치에 산란 동지를 만들 경우 수리적으로 안정하고 지속적인 간극 순환(intragravel)이 발생하여 알이 부화하기에 적합한 환경을 조성하게 된다 (Tonina와 Buffington, 2009).

지표수와 지하수 간의 물질교환은 확산(diffusion), 이송(advection), 난류 운동량 교환(turbulent momentum process) 등에 의해 발생하는데 현재까지의 연구는 이송에 의한 영향을 주로 다루고 있다(Anderson 등, 2005; Buffington과 Tonina, 2009). 이송에 의한 혼합대의 물질교환은 압력 분포에 지배를 받으며 압력 분포 차이는 하상의 형상과 흐름의 상호작용으로 인하여 발생한다(Elliott과 Brooks, 1997b; Huettel과 Webster, 2001). 혼합대의 흐름교환 특성을 분석하기 위한 실험연구는 많지 않은데 Elliott과 Brooks(1997a)은 사면(ripple) 규모의 모래 하상에 대한 실험실 실험을 통해서 고정상 및 이동상 하상의 혼합대 흐름 교환 특성을 분석하였다.

혼합대의 흐름교환 특성을 모의하기 위한 수치모의연구는 다수 있었는데 하상을 다공성 매질(porous media)의 Darcy 흐름으로 가정하여 분석을 수행하였다. Savant 등(1987)과 Salehin 등(2004)은 실험실 수로의 실험값을 이용하여 하상의 압력분포를 경계치로 주는 방식으로 하상 형상을 고려한 다공성 매질 내의 흐름 특성을 분석하였다. Cardenans와 Wilson(2006, 2007b)은 지표

수 흐름을 층류로 가정하여 지표수와 다공성 매질의 Darcy 흐름의 준연계모형을 구축하여 혼합대의 흐름을 모의하였고 이후 이를 확장하여 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식과 $k-\omega$ 난류모형을 적용하여 Elliott과 Brooks(1997a)의 실험결과와 비교하였다. Endreny 등(2011)은 3차원 동수역학 모형을 이용하여 하상의 단차에 의해 도수가 발생하는 경우의 혼합대 흐름특성을 모의하고 이를 실험결과와 비교하였다.

자연 하상 및 하상 복원에서 하상의 구조는 수리 및 생태학적 측면에서 중요한 역할을 하게 된다. Cardenans와 Wilson(2006, 2007b)는 준연계모형을 적용한 단일 여울에 대한 비교만 수행하여 여울-소에 발생하는 재순환영역 및 정체점에 대하여 충분한 분석이 이루어지지 않은 한계가 있다. 본 연구에서는 Endreny 등(2011)의 적용한 것과 동일한 완전 연계 3차원 동수역학 모형을 이용하여 연속된 여울-소 구조에서 발생하는 지표수의 흐름구조와 혼합대 흐름의 상관성을 분석하고자 한다.

2. 이론 및 방법

본 연구에서는 3차원 동수역학 모형으로 상용 모형인 Flow3D 모형을 적용하였는데 연속방정식과 x 방향 운동량 방정식은 각각 다음과 같다 (Hirt와 Nichols, 1981).

$$\frac{V_F}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + \nu A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_i \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 V_F 는 흐름 체적비(fractional volume open to flow), c 는 음속, t 는 시간, u, v, w 는 각

각 x, y, z 방향의 유속, p 는 압력, A_i 는 흐름 면적비(fractional area open to flow), ρ 는 유체의 밀도, u_i 는 i 방향 유속 등을 나타내며 f_i 는 점성항으로 다음과 같이 정의된다(Hirt and Nichols, 1981).

$$f_i = \left\{ wsx_i - \left[\frac{\partial}{\partial x}(A_x \tau_{ix}) + \frac{\partial}{\partial y}(A_y \tau_{iy}) + (A_z \tau_{iz}) \right] \right\} \frac{1}{\rho V_F} \quad (3)$$

여기서 wsx_i 는 벽전단응력으로 벽 부근의 벽 유속분포 법칙(law of the wall velocity profile)에 의해 모의되며, $\tau_{ix}, \tau_{iy}, \tau_{iz}$ 등은 각각 ix, iy, iz 에 작용하는 전단응력을 나타낸다. 운동량 방정식에 적용되는 난류모형은 RNG (Renormalization Group method) $k-\epsilon$ 모형 (Yakhot와 Orszag, 1986)을 적용하였다.

다공성 매질로 구성된 지하수 영역에서도 위의 연속방정식과 운동량 방정식이 동일하게 적용된다. 다공성 매질의 공극률(porosity, V_f)는 전체 부피에 대한 공극의 비율로 정의된다. 단단히 다져진 구체의 경우에는 다짐 정도에 따라 공극률이 대략 25%~47% 정도를 나타낸다. 다공성 물질의 운동량 방정식은 다공성 물질 내의 유속은 압력 차이에 비례한다는 Darcy의 법칙으로 다음과 같이 표현된다.

$$U = - \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (4)$$

여기서는 k 는 다공성 물질의 고유투수계수 (intrinsic permeability)로 유체의 성질에 독립적이며 길이 스케일의 제곱의 단위를 가진다. k 값은 자갈의 경우 $10^{-7} \sim 10^{-9} \text{ m}^2$ 의 범위에 있으며 점토의 경우 $10^{-13} \sim 10^{-16} \text{ m}^2$ 의 범위에 있다. 투수계수가 작을수록 흐름에 대한 저항은 커지는데 이 저항은 다공성 물질을 모형화할 때는 항력으로 간주된다. 다공성 매질 내의 이와 같은 흐름 저항

은 운동량 방정식에서 다음과 같이 유속에 비례하는 항력 항을 추가하는 것으로 표현된다.

$$\mathbf{b} = F_d \mathbf{u} \quad (5)$$

여기서 \mathbf{b} 는 체력(body force), \mathbf{u} 는 다공성 매질 내에서의 유속벡터를 나타내며, F_d 는 다공성 매질의 항력계수로 고유투수계수 k 는 항력계수와 다음과 같은 관계를 가진다.

$$k = \frac{V_f \mu}{\rho F_d} \quad (6)$$

투수계수 k 는 유체의 특성이 아닌 매질의 기하학적 특성에 의해 결정되므로 매질의 크기와 같은 기하학적 특성으로부터 유도하는 것이 가능하다. Carmen-Kozeny 방정식은 동수반경이론 (hydraulic radius theory)에서 유도된 식으로 다음과 같이 표현된다.

$$k = \frac{D^2 V_f^3}{180(1 - V_f)^2} \quad (7)$$

여기서 D 는 매질의 크기이며 180은 Carmen-Kozeny 상수이다. 이 방정식은 매질이 거의 비슷한 크기의 구형으로 구성된 경우에는 잘 맞는 것으로 알려져 있으며, Carmen-Kozeny 상수는 공극률과 매질의 형상비(aspect ratio)에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 다공성 매질의 항력을 공극률 모형(porosity dependent drag)을 적용하여 분석하였다. 공극률 모형에서 항력계수는 다음과 같이 표현된다.

$$F_d = a V_f^{-b} \quad (8)$$

여기서 $a = 180/D^2$ 이며 b 는 일반적으로 $1.8/D \sim 4.0/D$ 사이의 값을 취한다. 이 식은 pore

Reynolds number가 1.0 보다 작은 경우에 유효한데, 공극이 작고 매질 내의 흐름이 느린 경우에는 대부분 유효한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 하상재료에 대하여 등방성과 균질성을 가정하여 다공성 매질에 의한 흐름 저항 효과에 의한 간극수역의 변화를 모의하였다. 하상재료는 투수성이 좋은 자갈로 가정하여 공극률 0.3, 고유투수계수 10^{-6} cm^2 으로 가정하였으며 이때의 항력계수는 1,000이 된다.

Flow3D 모형에서는 식 (1), (2), (3)을 지표수 및 지하수 영역에 대해서 동일하게 적용하게 해석하는데 지하수 영역에서는 식(5)에 의한 항력항이 추가된다(Endreny 등, 2011). 수치기법은 유한체적법이 적용되며 자유수면에 대한 계산은 VOF(Volume of Fluid, Hirt와 Nichols, 1981) 기법이 적용된다.

자연상태의 여울-소 구조에 대해서는 여울 사이의 간격이 하폭의 5~8배 정도라는 것은 알려져 있으나 구체적인 규모에 대한 연구는 현재까지 제한적으로 이루어져 왔다. 본 연구에서는 Rodriguez 등(2000)이 실제 하천에 적용한 여울-소 구조를 기본으로 연직 2차원 형태의 인공적 여울-소 구조를 모의하였다. 여울 사이의 간격(L)을 기본값으로 하여 여울 정상부에서 소의 최심선까지는 $0.2L$ 로 설정하였으며 여울의 깊이는 $0.02L$ 로 설정하였다. 본 모의에서 적용된 여울의

깊이는 실제 하천에 비해서는 10배 이상이 깊은 것인데 이는 여울의 흐름 특성을 보다 잘 재현하기 위하여 인위적인 왜곡을 준 것이다. 전체 모의 구간의 설정은 그림 2~그림 4와 같으며 하상경사는 $1/300$ 으로 가정하였다. 유입부와 유출부의 영향 및 계산시간을 고려하여 여울-소 구조는 3개를 배치하였다.

경계조건은 유입부 및 유출부에서 최대한 등류가 형성되어 개별 여울-소에서 유사한 흐름 조건이 형성되도록 설정하였다. 유입부 경계조건은 수위조건으로 설정하였으며 유출부 경계조건은 Neumann 조건으로 설정하였다. 다공성매질의 바닥 경계와 지표수의 계산영역의 상부 경계는 대칭(symmetry) 조건으로 설정하였다. 그리고 초기 조건으로는 수위가 유입부 경계조건과 동일한 것으로 설정하였다.

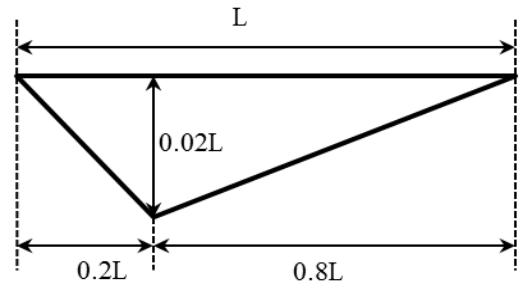


그림 2. 모의를 위한 인공 여울-소 형상

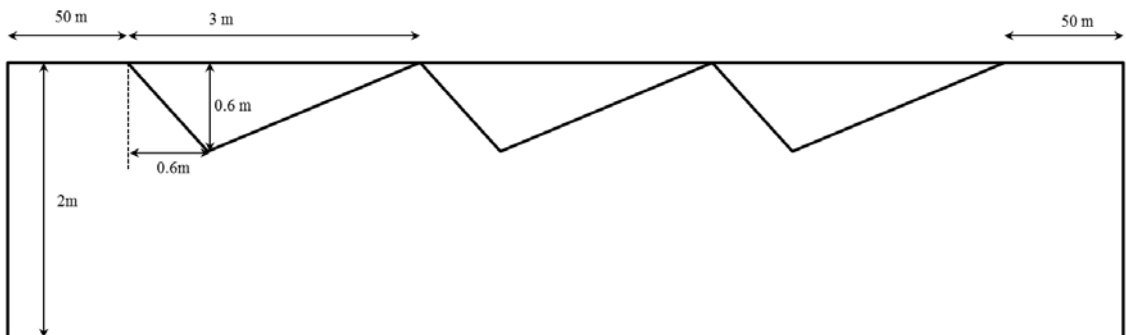


그림 3. 전체 수치모의 영역

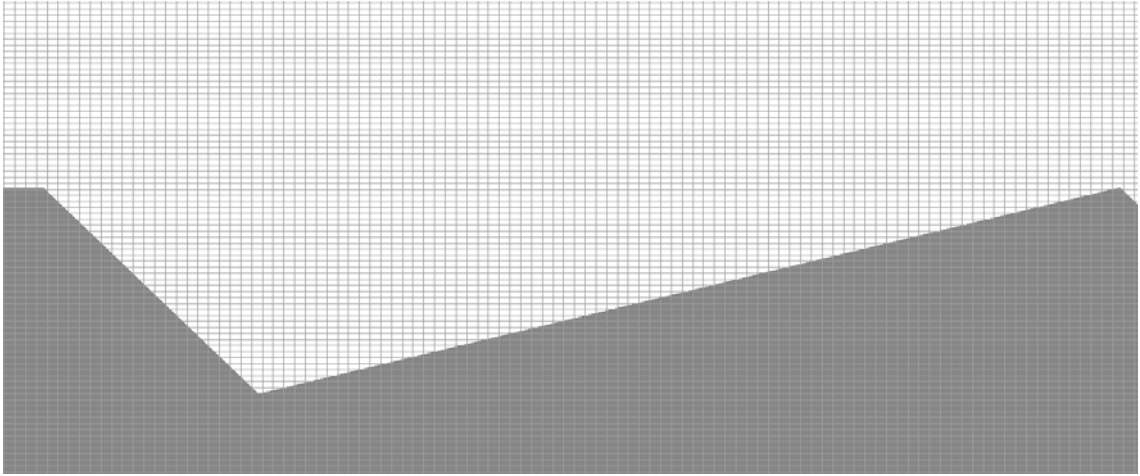


그림 4. 수치모의를 위한 격자 구성(첫 번째 소 부분)

3. 수치모의 결과 분석

지표수의 흐름 구조와 혼합대 흐름의 상관관계를 분석하기 위하여 상류경계 수심이 0.6m인 경우에 대해서 지표수 및 지하수에 대한 수치모의를 수행하였으며 그 결과를 지표수 유속 분포, 지하수 흐름의 연직 분포, 여울-소 내부의 상세 흐름 구조, 지표수 및 지하수의 혼합특성 등의 관점에서 분석하였다.

(1) 여울-소 내부의 지표수 유속 분포

여울-소 구조에서는 여울 정상부에서 소의 최심부까지 급한 경사로 하상이 형성되며 다음 여울 정상부까지는 비교적 완만한 구조로 하상이 상승한다. 이와 같은 구조적 특징으로 인하여 여울 정상부에서 흐름 분리가 발생하고 소 내부에서는 큰 와류가 나타나는 재순환영역(recirculation zone)이 형성된다. 재순환영역의 크기는 흐름 상태와 여울-소의 기하학적 형상에 따라 달라지는데 재순환영역이 여울의 상승부와 접하는 부분에서는 유속이 매우 낮은 정체점(stagnation point)이 형성된다.

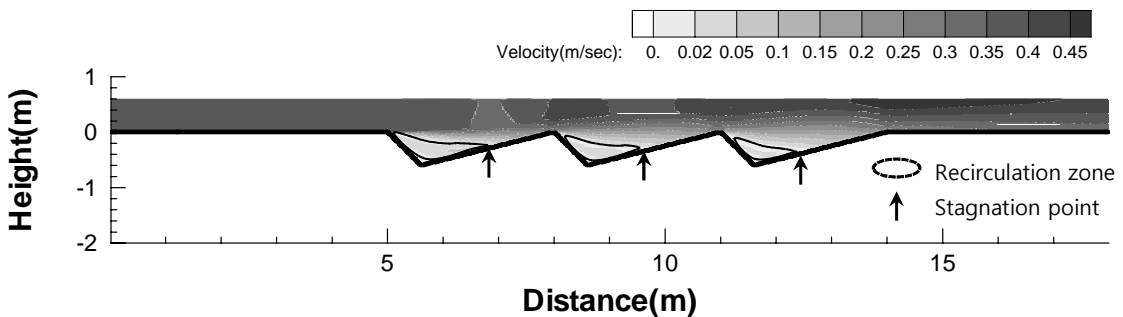


그림 5. 지표수 전체 유속 분포

그림 5는 모의 결과 중 지표수 영역의 유속분포를 도시한 것인데, 소의 하층부에서는 재순환영역이 형성되며 하류방향으로 갈수록 소 내부의 재순환 영역의 규모는 감소하는 경향을 나타내고 있

다. 소 내부의 재순환영역과 소 상층부 사이에는 흐름 분리가 발생하며 정체점이 형성되는 것도 관찰할 수 있다. 정체점의 위치는 첫 번째 소에서는 사면의 중간부분에 형성되지만 하류 방향에 위치

하는 두 번째 및 세 번째 소의 사면에서는 다소 하층부로 이동하여 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이는 연속된 소-여울을 지나면서 하류방향으로 에너지 감세가 발생하면서 나타나는 현상으로 판단된다.

(2) 지하수 흐름의 연직 유속 분포

지하수 흐름의 연직분포는 상승류와 하강류의 발생 정도를 의미하는데 모의 결과를 도시하면 그림 6과 같다. 그림 6은 지표수의 유속 분포와 지하수의 연직 유속 분포를 함께 도시하고 있는데 지하수의 유속은 대략 10^{-5} m/sec의 규모를 나타내므로 지표수 및 지하수의 스케일바는 그림 6의 범례와 같이 서로 다르게 나타내었다. 여기서 지하수 유속의 양수는 상승류를 나타내고 음수는 하강류를 의미한다.

계산 영역의 시작부에서는 경계조건으로 인하여 강한 상승류가 발생하는 양상을 보이나 일정구간을 지나서 첫 번째 소가 시작되기 전의 직선부 중앙에서부터는 경계조건의 영향이 거의 사라진다. 따라서 본 모의에서 유입부 경계조건에 의한 영향은 첫 번째 소가 시작되는 지점에서는 거의 없다고 판단할 수 있다. 마찬가지로 계산영역의 최하류인 유출부에서 다소 강한 하강류가 발생하나 그 전의 유출부 직선부에서 안정된 양상을 나타내고 있어 하류 경계 조건에 의한 영향은 여울-소 구조 내에서 거의 나타나지 않는다고 판단할 수 있다.

혼합대 흐름의 발생 양상은 그림 6에서 보는 것과 같이 여울의 전면부에서는 하강류가 발생하며 후면부에서는 상승류가 발생한다. 하강류의 상대적 속도는 첫 번째 여울에서 가장 강하게 나타나며 하류로 갈수록 약해지는 양상을 보인다. 여울 전면부 사면에서의 하강류 발생지점은 첫 번째 여울에서는 비교적 사면의 상부 구간에 위치하나 하류로 갈수록 여울 사면의 하부로 다소 이동함을 알 수 있다. 상승류의 경우에는 여울 정점의 직하류 부분에서 최고 유속이 발생하며 상승류 발생 구간은 하류방향에 따라 큰 변화는 없다.

다공성 매질로 구성된 지하수 구간의 흐름은 하상의 압력분포에 의해 결정되는데 여울-소 구조에서 하상에 작용하는 압력은 수위에 의한 정수압과 유속에 의한 동수압의 합으로 다소 복잡한 양상을 나타낸다. 여울의 전면부와 후면부는 수위가 유사하지만 지형적 굴곡에 의한 유속의 차이로 인하여 동수압의 차이가 발생하며 이로 인하여 전면부에서는 하강류가, 후면부에서는 상승류가 발생한다. 하강류의 상대적 속도도 여울 전면부와 후면부의 동수압의 차이에 영향을 받게 되는데 동수압의 차이는 각 소 내부의 유속과 관련을 갖는다. 본 모의에서는 앞서 설명한 것과 같이 하류방향으로의 에너지 감세가 발생하며 이로 인하여 하류 방향으로의 평균 유속이 감소하고 여울 사이의 상대적 유속 차이도 감소하게 된다. 즉, 하류 방향의 에너지 감세 효과가 동수압 차이를 감소시켜 하강류의 속도가 감소하는 경향을 나타나게 된다.

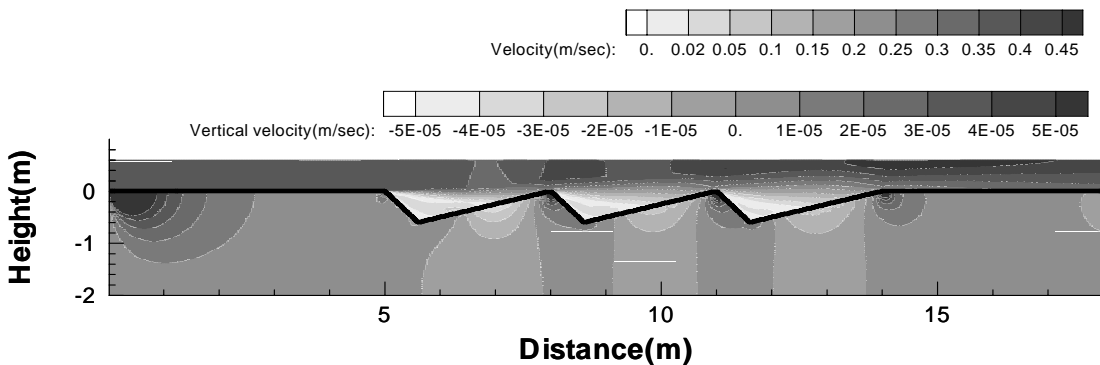


그림 6. 지표수-지하수 전체 유속분포

(3) 여울-소 내부의 상세 흐름 구조

여울-소 구조에서 지표수 흐름과 혼합대 흐름 사이의 상세한 관계를 분석하기 위하여 그림 7~그림 9와 같이 각 소 내부의 유속분포와 유속벡터를 도시하였다. 앞서 설명한 것과 같이 유속 스케일은 지표수와 지하수에서 다르게 적용하였으며 스케일바는 그림 6과 동일하다.

그림을 통해서 각 소 내부에서 형성되는 재순환영역의 크기와 형상을 확인할 수 있으며 하강류가 재순환영역의 하류 끝단에서 발생하는 양상도

확인할 수 있다. 또한 앞서 언급한 대로 각 소의 시작 부분에서 단면확대에 따른 상층부와 하층부 사이의 흐름분리가 시작되어 여울의 전면부 중간 지점의 정체점에서 완전 분리가 발생한다. 분리된 영역의 하층부는 재순환영역이 형성되며 정체점 하류에서 하강류가 발생한다. 하강류 발생의 중심점에서는 연직방향의 지하수 흐름이 발생하며 그 양쪽으로 분리되는 흐름에 의해서 여울 전면부 사면 하단 부 및 여울 후면부 사면 상단부에서 상승류가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

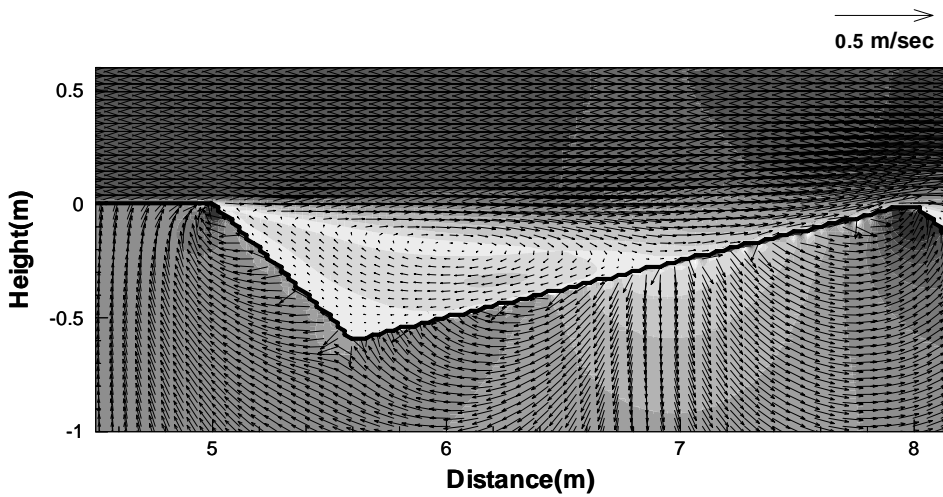


그림 7. 첫 번째 소 유속 벡터도(지표수 및 지하수)

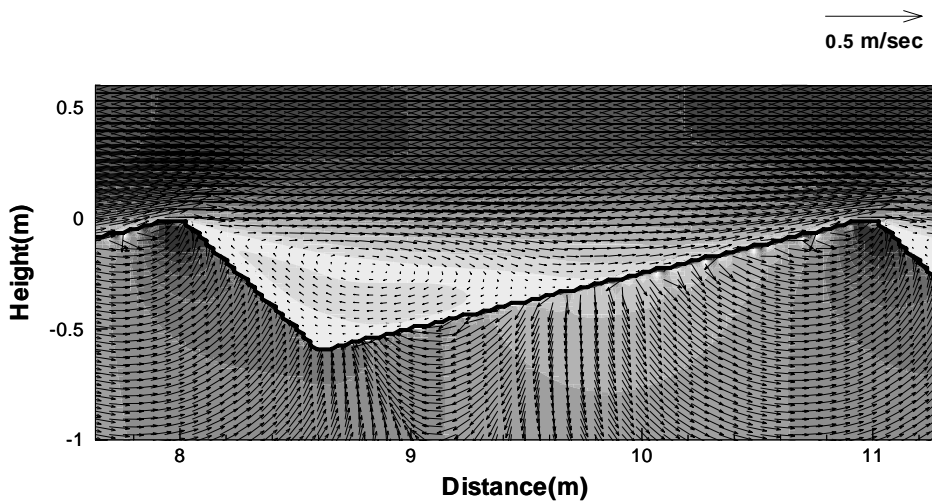


그림 8. 두 번째 소 유속 벡터도(지표수 및 지하수)

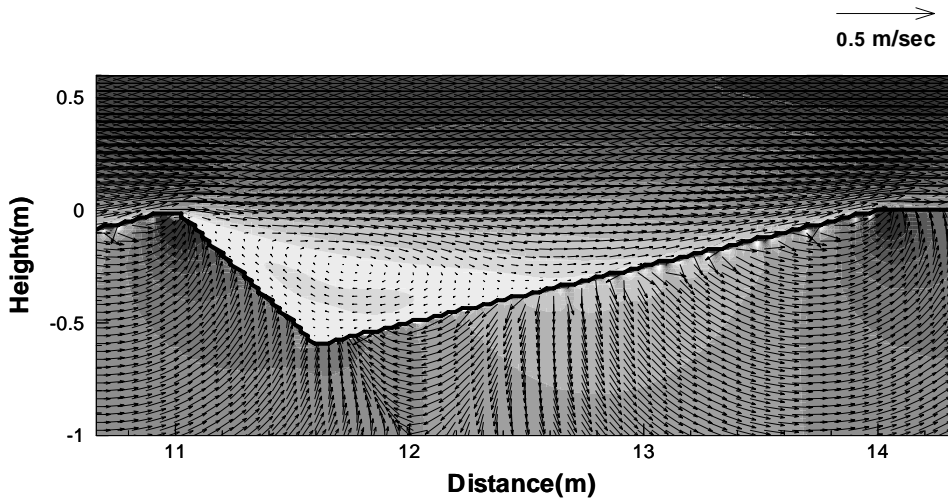


그림 9. 세 번째 소 유속 벡터도(지표수 및 지하수)

(4) 지표수 및 지하수의 혼합특성

그림 10은 Elliott(1990)이 사런 규모 하상에서 혼합대 흐름을 실험한 결과인데 본 연구의 수치모의 영역에 비해서 규모가 작아 직접적인 비교는 곤란하지만 흐름 양상의 정성적 비교는 가능하다. 실험은 실험실 수로에 중간 모래 및 잔 모래를 이용하여 길이 0.181m, 높이 0.028m의 사런을 조성하고 평균 유속 0.132m/sec의 흐름을 유하시켜 지표수가 지하수로 유입되는 양상을 관측하였다. 지하수 내의 흐름 패턴은 염료 투입을 통해서 관측하였는데 그림 10에서 화살표는 염료 투입 후 10분 단위의 관측결과이며 십자 및 원형은 각각 30분 및 90분 단위의 관측결과를 나타내고 있다.

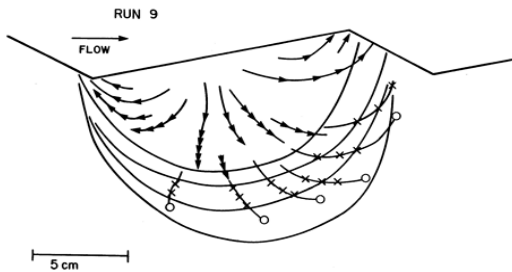


그림 10. 사런에서의 혼합대 흐름 실험 결과(Elliott, 1990)

지표수 및 지하수 간의 혼합특성을 분석하기 위하여 속도 벡터로부터 접선방향의 선분을 연결하여 유선을 도시하고 지표수 표층에서의 연직방향 유속을 함께 그림 11과 같이 도시하였다. 이를 그림 9와 비교하면 중 혼합대 흐름 양상이 그림 10과 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 11에서는 지하수 표층의 연직유속 분포를 통해서 전체 여울-소 구조에서의 상승류와 하강류 발생 구간, 최대 하강류 발생지점, 최대 상승류 발생지점 등을 확인할 수 있다. 또한 대부분의 하강류는 바로 하류의 여울 후면에서 상승하게 되며 첫 번째 여울 사면에서만 일부 하강류가 지하수 흐름으로 유입됨을 확인할 수 있다. 하강류의 유량은 그림 11의 그래프 상에서 하강류 구간의 면적으로 유추할 수 있는데 첫 번째 여울 사면에서 최대의 하강류 유량이 발생하며 그 직후 여울 후면부에서 최대의 상승류가 발생함을 확인할 수 있다.

지하수 구역의 흐름 양상을 지배하는 인자는 지표수 구간의 전체 압력분포인데 지표수 구간의 압력분포는 여울-소 구조의 수심과 유속에 직접적인 영향을 받게 된다. 즉, 여울-소 구조에서의 유속구조가 지하수 구역의 상승류 및 하강류를 지

배하게 되는 것이다. 그림 11과 같이 연속된 여울-소 구조에서는 하류 방향으로의 에너지 감세로 인하여 소 내부에서 형성되는 재순환영역의 규모와 위치가 달라지는데 이는 직접적으로 혼합대의 흐름에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 본 모의에서 에너지 감세에 따라 가지적으로 크기가 달라지는 인자는 재순환영역의 길이(L_r), 여울 전면부 하강류 형성 구간 길이(L_d), 최대 하강류 발생 지점(H_{md}) 등인데 이 인자들은 서로 밀접한 연관을

가진 것으로 보인다. 이들 사이의 상관을 알아보기 위해서 각 소 내부에서의 재순환영역의 길이, 여울 전면부 하강류 형성 구간 길이, 최대 하강류 발생 지점 등을 구하여 소의 길이(L)로 나누어 무차원화시켜 비교하면 표 1과 같다. 재순환영역의 길이가 감소하면 여울 전면부 하강류 형성 구간의 길이는 감소하며 최대 하강류 발생 지점도 하부로 이동하는 양상을 확인할 수 있다.

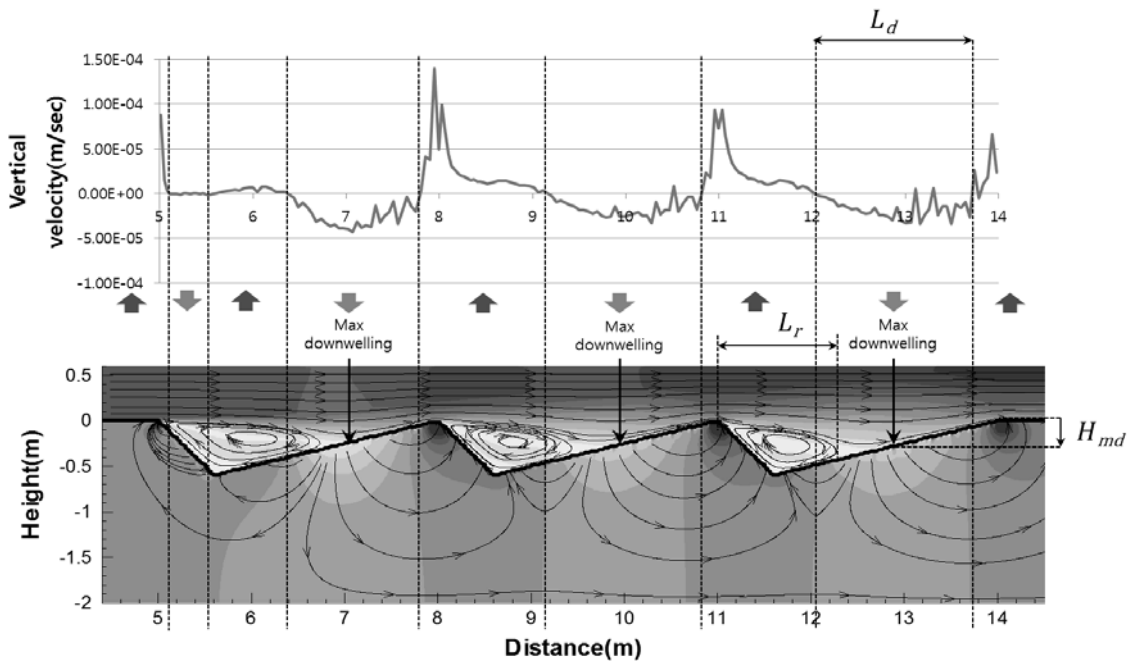


그림 11. 여울-소 구조의 유선 및 지하수 표층의 연직 유속 분포

표 1. 재순환영역의 규모와 하강류 형성 특성 비교

구간	재순환영역의 길이(L_r/L)	여울 전면부 하강류 형성 구간 길이(L_d/L)	최대 하강류 발생지점(H_{md}/L)
첫 번째 소	0.59	0.45	0.45
두 번째 소	0.48	0.53	0.46
세 번째 소	0.43	0.58	0.48

그리고 그림 11을 통해서 지표수에서 유입된 하강류가 상승류로 혼합될 때까지의 시간, 즉 체체시간을 계산할 수 있다. 체체시간의 공간적 분포 산정은 지표수로부터 유입되는 산소확산계수와 열전도도를 적용하여 혼합대의 DO 및 수온특성을 파악할 수 있으며, 이러한 조건에 따라 호기성 또는 혐기성 수생물의 서식 환경 적합성을 추정할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 3차원 동수역학 모형을 이용하여 낙차구조물에서의 지표수와 지하수 혼합대 특성을 연구한 Endreny 등(2011)의 연구를 확장하여 가상적인 여울-소 연속 구조에서 지표수-지하수 혼합대의 흐름특성을 파악하고자 하였다. 수치 모의 결과를 통해서 3차원 동수역학 모형을 이용하여 혼합대 흐름을 정량적으로 분석할 수 있음을 확인하였다. 또한, 여울-소 구조에서의 지표수 흐름 구조와 혼합대 흐름 구조 사이에 다음과 같은 몇 가지 상관성을 확인할 수 있었다.

- (1) 여울-소 구조에서 혼합대의 흐름 구조는 지표수의 흐름구조에 지배적인 것으로 판단되며, 특히 여울-소 구조에서 지표수의 재순환영역 및 정체점이 상승류와 하강류 형성에 직접적 연관이 있음을 확인하였다.
- (2) 지표수에 발생한 하강류의 대부분은 직하류 여울 후면부에서 상승류로 나타나며 일부만이 지하수로 유입되는 것을 확인하였다.
- (3) 소 내부의 재순환영역의 크기가 감소하면 여울 전면부 하강류 형성 구간의 길이는 감소하며 최대 하강류 발생 지점도 하부로 이동하는 것을 확인하였다.

본 연구의 결과는 수치모의에 의해 제시된 결과이나 하상의 구성물질이 균질하고 등방성이라고 가정할 경우 유사한 양상이 나타날 것으로 판단되며, 본 연구의 결과를 활용하여 하천 현장에서의

혼합대 발생 구간의 예측, 미시적인 생지화학적 특성 분석, 하상 생물서식처 평가 및 조성 등의 활용이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 Eco-STAR project(수생태 복원사업단) 중 현대건설과 공동연구로 수행 중인 자연형 하상 복원 및 하도 육역화 관리 기술개발(과제번호: EW12-07-10)의 일부로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김구영, 전철민, 김태희, 오준호, 정재훈, 박승기, 2006, 열추적자를 이용한 지하수-하천수 혼합대 연구, 대한자원환경지질학회지, 39(5), 525-535
- 김영주, 강호정, 2009, 자연 하천의 생태학적 중요 지점으로서 지표수-지하수 혼합대의 생지화학적 기작. 한국습지학회지, 11(1), 123-130.
- 김희정, 현윤정, 이강근, 2009, 지하수 종속 생태 환경에서 수문-생태학적 특성 조사 및 분석. 한국습지학회지, 11(3), 1-8.
- 김희정, 이진용, 이성순, 현윤정, 이강근, 2011, 지하수-지표수 혼합구간의 수직 온도 분포 특성 분석, 한국습지학회지, 13(2), 265-273
- Anderson JK, Wondzell SM, Gooseff MN, and Haggerty R. 2005. Patterns in Stream Longitudinal Profiles and Implications for Hyporheic Exchange Flow at the H.J. Andrews Experimental Forest, Hydrol. Proc., 19(15), 2931-2949.
- Buffington JM and Tonina D. 2009. Hyporheic Exchange in Mountain Rivers II : Effects of Channel Morphology on Mechanics, Scales, and Rates of Exchange, Geogr. Compass, 3, 1 -25.

- Baxter CV, Hauer FR. 2000. Geomorphology, hyporheic exchange, and selection of spawning habitat by bull trout (*Salvelinus confluentus*), *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57(7), 1470-1481.
- Boulton AJ, Findlay S, Marmonier P, Stanley EH, Valett HM. 1998. The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annual Review of Ecology and Systematics* 29, 59-81.
- Brunke M and Gonser T. 1997. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology* 37, 1-33.
- Cardenas MB and Wilson JL. 2006. The influence of ambient groundwater discharge on hyporheic zones induced by current-bedform interactions, *J. Hydrol.*, 331, 103-109.
- Cardenas MB and Wilson JL. 2007a. Dunes, turbulent eddies, and interfacial exchange with permeable sediments, *Water Resour. Res.*, 43, W08412.
- Cardenas MB and Wilson JL. 2007b, Hydrodynamics of coupled flow above and below a sediment-water interface with triangular bedforms, *Adv. Water*, 30, doi: 10.1016/j.advwatres.2006.06.009.
- Elliott AH. 1990. Transfer of solutes into and out of streambeds. Ph.D. thesis, Rep KH-R-52, WM Keck Lab of Hydraulic and Water Resources, Calif. Inst. of Technol., Pasadena.
- Elliott AH and Brooks NH. 1997a. Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: Laboratory experiments, *Water Resour. Res.*, 33, 1137-1151.
- Elliott AH and Brooks NH. 1997b. Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bed forms: Theory, *Water Resour. Res.*, 33, 123-136.
- Endreny TL, Lautz L, and Siegel DI. 2011. Hyporheic flow path response to hydraulic jumps at river steps: Flume and hydrodynamic models, *Water Resour. Res.*, 47, W02517, doi:10.1029/2009WR008631.
- Evans EC and Petts GE. 1997. Hyporheic temperature patterns within riffles., *Hydrological Sciences Journal.*, 42(2), 199-213.
- Franken RJM, Storey RG, and Williams DD. 2001. Biological, chemical and physical characteristics of downwelling and upwelling zones in the hyporheic zone of a north-temperate stream., *Hydrobiologia*, 444, 183-195.
- Greig SM, Sear DA, Carling PA. 2007. A review of factors influencing the availability of dissolved oxygen to incubating salmonid embryos, *Hydrological Processes*, 21, 323-334.
- Hester ET, and Doyle MW. 2008. In-stream geomorphic structures as drivers of hyporheic exchange. *Water Resources Research*, 44, 17.
- Hirt CW and Nichols BD. 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comput. Phys.*, 39(1), 201-225.
- Huettel M and Webster IT. 2001. Porewater flow in permeable sediments, in: B. P. Boudreau, B. B. Jorgensen (Eds.), *The Benthic Boundary Layer: Transport Processes and Biogeochemistry*, Oxford University Press, pp. 144-179.
- Orghidan T. 1959. Ein neuer lebensraum des unterirdischen wassers: Der hyporheische biotop. *Archiv für Hydrobiologie*, 55,

392-414.

Rodríguez JF, Garcia MH, Bombardelli FA, Guzman JM, Rhoads BL, and Herricks EE. 2000. Naturalization of urban streams using in-channel structures, Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management, ASCE, July 30-August 2, 2000, Minneapolis, Minnesota.

Salehin MA, Packman I, and Paradis M. 2004. Hyporheic exchange with heterogeneous streambeds: Laboratory experiments and modeling, Water Resour. Res., 40, W11504, doi:10.1029/2003WR002567.

Savant SA, Reible DD, and Thibodeaux LJ. 1987. Convective transport within stable river sediments, Water Resour. Res., 23, 1763-1768.

Schwoerbel J. 1961. Über die Lebensbedingungen und die Besiedlung des hyporheischen Lebensraumes. Arch. Hydrobiol. Suppl. 25, 182-214.

Tonina D and Buffington JM. 2009. A three-dimensional model for analyzing the effects

of salmon redds on hyporheic exchange and egg pocket habitat., Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 66, 2157-2173.

Yakhot V and Orszag SA. 1986. Renormalization group analysis of turbulence 1. Basic theory, J. Sci. Comput., 1(1), 1 -51.

기 호

- A_i : 흐름면적비
- c : 음속(m/sec)
- D : 매질의 크기(mm)
- F_d : 다공성 매질의 항력계수
- f_i : 점성항
- k : 다공성 물질의 고유투수계수(intrinsic permeability)
- t : 시간(sec)
- u_i : i 방향 유속
- V_f : 공극률
- wsx_i : 벽전단응력(N/m²)

- 논문접수일 : 2011년 11월 18일
- 심사의뢰일 : 2011년 11월 21일
- 심사완료일 : 2012년 02월 15일