

[기술보고]

관입형 피조미터와 시피지미터를 이용한 안성천 상류구간 하상 수리전도도 측정

이정우¹ · 전선금² · 이명재² · 김남원¹ · 정일문^{1*} · 이민호³

¹한국건설기술연구원 수자원하천연구소, ²(주)지오그린21, ³한강홍수통제소 하천정보센터

[Technical Report]

Measurements of Streambed Hydraulic Conductivity Using Drive-point Piezometers and Seepage Meters in the Upper Reaches of Anseong Stream

Jeongwoo Lee¹, Seon Geum Chun², Myeong Jae Yi², Nam Won Kim¹,
Il-Moon Chung^{1*}, and Min Ho Lee³

¹Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering
and Building Technology

²Geogreen21 company

³Han River Flood Control Office

Received 20 July 2015; received in revised form 15 August 2015; accepted 20 August 2015

안성천에 위치한 공도 수위표 상류 구간에 대해 하상퇴적층을 통과하는 하천수-지하수 상호교환량과 수리경사를 측정하여 하상퇴적층의 수리전도도를 산정하였다. 하천수-지하수 상호유동량은 자체 제작한 시피지 미터를 이용하여 측정하였고, 수리경사는 장심도와 단심도 두 가지 종류의 관입형 피조미터를 하상퇴적층에 설치하여 피조미터내 수두 차이와 관입깊이 차이를 측정하여 산정하였다. 하천수-지하수 교환량은 -1.55×10^{-6} ~ 1.77×10^{-5} m/s, 연직방향 수리경사는 -0.122에서 0.030로 측정되었다. 교환량과 수리경사로 부터 연직방향 수리전도도를 산정한 결과 1.77×10^{-5} ~ 1.97×10^{-3} m/s로 지점별로 큰 차이를 나타내었다. 측정 결과는 Calver (2001)가 제시한 하상퇴적물 수리전도도의 일반적인 범위내에서 분포하였으며, 모래, 자갈층이 잘 발달되어 있어 기존의 국내 측정 결과 사례에 비해 큰 값을 보이는 것으로 분석되었다. 본 논문에서 적용한 고강도 스테인레스 재질의 피조미터와 시피지미터를 이용하여 하상퇴적층의 수리전도도를 측정하는 방법은 내구성과 휴대성이 우수하여 실무에서 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 하천수-지하수 상호교환량, 피조미터, 시피지미터

Streambed hydraulic conductivity along the upper reaches of the Gongdo stage of Anseong Stream was estimated through measurements of stream-aquifer exchange rates (using a seepage meter) and vertical hydraulic gradients (using a manually driven piezometer). From the measured data, it was found out that the stream-aquifer exchange rates varied from -1.55×10^{-6} to 1.77×10^{-5} m/s, the corresponding vertical hydraulic gradient varied from -0.122 to 0.030, and the values of the streambed vertical hydraulic conductivity were estimated from 1.77×10^{-5} to 1.97×10^{-3} m/s, with variations representing local differences. The results are within the general range of streambed hydraulic conductivity values suggested by Calver (2001) and are slightly higher than values previously measured at other stream sites in Korea. The combined use of a drive-point piezometer and seepage meter (both constructed of high-strength stainless steel) is expected to be of practical use in the estimation of streambed hydraulic conductance, given the durability and portability of the instruments.

Key words: stream-aquifer exchange, piezometer, seepage meter

*Corresponding author: imchung@kict.re.kr

© 2015, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

하상 수리전도도(streambed hydraulic conductivity)는 하천과 대수층간의 수리적 연결성을 결정하는 중요한 인자로 혼합대(hyporheic zone)에서의 하천수-지하수 교환량의 크기 및 공간 분포, 용질이송 특성, 서식환경 등에 큰 영향을 미친다. 따라서 하천과 대수층을 연계한 지하수 유동 모의, 지하수 양수와 하천유량간의 상관성 분석 등 하천수-지하수 연계 해석을 위해서는 기본적으로 하상 수리전도도의 측정과 이에 대한 공간적 특성 파악이 선행되어야 한다.

하상의 수리전도도를 측정 혹은 추정하기 위한 방법으로 정변수위법(constant- and falling head permeameter test), 침윤시험(seepage test), 순간충격시험(slug test), 양수시험(pumping test), 입경분석(grain size analysis), 지하수 유동모델링 혹은 지표수-지하수 연계 모델링의 역해석 방법 등 다양하다.

정·변수위법은 위, 아래가 뚫린 원통형의 투수시험기(permeameter)를 하천바닥에 관입하고 주입량과 수위차, 혹은 시간에 따른 수위변화량을 측정하여 Darcy 혹은 Hvorsley 공식(1951)으로 연직방향 수리전도도를 산정하는 방법이다. 이 방법을 이용한 Lee and Cherry (1978), Duwelius (1996), Chen (2000), Landon et al. (2001) 등 다양한 연구가 수행되었다. 국내에서는 Kim (2010)이 갑천유역내 21개 지점에 대해 하천바닥층의 연직방향 수리전도도를 산정하고 이를 양수에 따른 하천수 감소량을 추정하기 위한 Hunt (1999)의 해석해에 사용하였다.

침윤시험은 투수시험과 마찬가지로 연직방향 수리전도도를 측정하기 위한 것으로 아래가 뚫린 원통형의 시피지미터(seepage meter)로 하상을 통과하는 하천수와 지하수의 상호유동량을 측정하고 이와 동시에 피조미터(piezometer)로 수두차이를 측정하여 Darcy 공식으로 수리전도도를 산정하는 방법이다(Woessner and Sullivan, 1984; Landon et al., 2001; HRFCO, 2011; Kim et al., 2012; Kim et al., 2013). HRFCO (2011), Kim et al. (2012)은 피조미터 대신에 관정을 하천내에 설치하여 수두차이를 측정하고 시피지 시험 결과와 함께 수두차이-유동량 관계를 유도하였으며, 이를 연속적으로 측정할 수두로부터 하상퇴적층을 통과하는 장기간 유동량을 산정하였다. Kim et al. (2013)은 강원도 양구군 해안면에 위치한 소하천내 두 지점에 대해 시피지미터로 유동량을 측정하고, 각 지점별 35개 측점에 대해

PVC관으로 지하수두를 측정하여 Darcy 공식으로 연직 수리전도도를 산정하였다.

순간충격시험은 하부 측면에 스크린이 있는 파이프를 하천바닥을 관통하여 설치하고 더미를 주입 혹은 제거하여 순간적인 수위 변화를 유발한 후 그 회복 양상을 관측하여 수평방향 수리전도도를 추정하는 방법이다(Springer et al., 1999; Landon et al., 2001; Rus et al., 2001). 국내에서는 Kim et al. (2006)이 예산군에 위치한 소하천에 대해 하천수, 하상, 지하수의 수위 및 온도 자료를 이용하여 혼합대에서 하천수와 지하수의 연계 연구를 수행하면서 하천내 2개 지점에 대해 미니 피조미터를 이용한 슬러그 시험을 수행하여 하상퇴적물의 수리특성을 해석하였다.

양수시험은 하천내에 직접 양수정을 설치하여 수위변화량으로부터 수리전도도를 산정하거나, 하천주변에서 지하수 양수에 따른 지하수위 변화 또는 하천수 감소량을 측정하고 Hunt (1999)의 해석해 등으로 추정된 값과의 적합 과정을 통해 수리전도도를 역산하는 방법이다(Kelly and Murdoch, 2003; Fox, 2007). 이러한 방법으로 하상 수리전도도를 추정한 Hunt et al. (2001), Kelly and Murdoch (2003), Fox (2007) 등의 해외 연구는 있으나, 국내에서는 아직 적용된 바 없다.

입경분석을 통한 하천바닥층의 수리전도도를 산정하는 방법은 하상에서 획득한 시료에 대해 입도분석을 실시하고 Hazen (1893)의 경험식과 같은 수리전도도와 입경 사이의 관계를 이용하여 수리전도도를 추정하는 방법이다(Vukovic and Soro, 1992; Landon et al., 2001). 이 방법은 시료 채취 및 간단한 체분석만으로 수리전도도를 산정할 수 있어 매우 간단한 방법이나, 다른 방법들과 달리 수평 혹은 연직 방향성을 고려하지 못하는 단점이 있다. 국내에서는 Lee et al. (2013)이 이 방법으로 강원도 양구군 해안면에 위치한 소하천내 5개 지점에 대해 하상의 수리전도도를 산정한 바 있다.

지하수 유동모델링 또는 지표수-지하수 연계 모델링의 역해석을 통한 수리전도도 산정 방법은 모의 지하수위가 관측 지하수위와 적합할 때까지 미지수인 하천바닥층의 수리전도도 값을 검보정하여 구하는 방법이다. Kim et al. (2008)과 Kim et al. (2012)은 SWAT-MODFLOW 지표수-지하수 결합모형을 각각 무심천 및 신둔천 유역에 적용할 때 이 방법으로 하천바닥층 수리전도도 값을 구해 모델링을 수행하였다.

이상과 같이 하천바닥층 수리전도도 측정에 관한 다양한 연구가 수행되었으며, 소수이긴 하지만 국내에서도

여러 방법이 성공적으로 적용되었다. 이러한 여러 방법 중에서 시피지미터와 피조미터를 혼용하는 방법은 수리 상수값뿐만 아니라 하천과 대수층간 교환량을 직접 측정함으로써 하천수와 지하수의 상호유동특성을 파악할 수 있는 장점이 있어 효용성이 가장 크다. 그러나 이 방법을 이용한 기존의 국내 사례는 소규모 하천의 짧은 구간을 대상으로 하였기에 공간적인 특성 파악에 한계가 있으며, 피조미터 대신 지하수 관측정을 설치함으로써 비용이나 휴대성 측면에서 불리하거나, PVC관으로 비교적 얇게 매설하였기 때문에 수두차 측정이 용이하지 않다.

따라서 본 연구에서는 휴대성과 실무 적용성을 높이기 위해서 고강도 스테인레스 재질의 시피지미터와 관입형 피조미터를 사용하여 하천-대수층 상호유동량 및 수리경사를 측정하는 방법을 기술하고, 이를 중소하천 규모인 안성천 상류 하도구간에 적용하여 하상퇴적층의 연직방향 수리전도도를 산정하였다.

재료 및 방법

하상퇴적층 수리전도도 측정 지점

안성천 공도 수위표 상류부 약 20.0 km에 대해 약 1.5~2 km 간격으로 하상퇴적층의 수리전도도를 측정하였다. Fig. 1과 같이 측정 지점은 하천 접근성과 하천수심 등 측정 여건을 고려하여 T1~T15, S1~S9 총 24개 지점을 선정하였다. 하상물질은 최상류부에서 굵은 자갈층 우세 지역과 중류부 일부에서 실트질층이 우세한 지

점도 있으나, 조사구간 대부분은 모래층이 지배적이다. 전체 24개 지점에 대해 하상퇴적층을 통과하는 지하수와 하천수간의 상호유동량을 측정하였고, S1, S3, S4, S6, S7, S8, S9와 같이 7지점을 제외한 17개 지점에 대해 하상퇴적층내 수두를 측정하였다. 따라서 유동량 및 수두가 모두 측정된 17개 지점에 대해 연직방향 수리전도도를 산정하였다.

하천수-지하수 상호 유동량 측정 방법

하상퇴적층을 통과하는 지하수와 하천수간의 상호유동량(exchange rate)을 측정하기 위해서 시피지미터(seepage meter)를 자체 제작하였다. 시피지미터는 한쪽 면이 뚫린 원통형 드럼에 기지의 체적의 물이 담긴 플라스틱 주머니를 드럼에 연결한 구조를 가지는 투수시험 장비이다. 이를 이용하여 하저면의 유입·유출량을 측정하여 하천과 대수층과의 상호 연결성을 판단할 수 있고, 하천수위 및 하상퇴적층의 수두 측정을 함께 수행하여 연직방향 수리전도도를 산정할 수 있다.

Fig. 2는 본 조사에서 제작, 사용한 시피지미터를 나타낸 것으로 직경 0.3 m, 높이 0.3 m의 크기를 가지는 G-type과 직경 0.7 m, 높이 0.2 m의 K-type 두 가지이다. 재질은 모두 스테인레스이며 원통에 밸브를 두 개 설치하여 하나에는 비닐 주머니를 다른 하나에는 공기 빼는 호스를 연결하였다. 유속에 의해 비닐 주머니가 옆으로 누우면 유입, 유출량이 측정되지 않을 수 있으므로 유속이 빠른 경우에는 다른 플라스틱 통으로 비닐 주머니를 덮어주거나 비닐 대신 플라스틱 백을 사용하였다.



Fig. 1. Locations of hydraulic conductivity measurement points.



Fig. 2. Seepage meters for water flux measurement through streambed for study sites.



Fig. 3. Illustration of seepage meter plugged into the streambed for study sites.

본 조사에서는 주로 비닐 주머니를 사용하였으며, 유속에 의한 영향을 줄이기 위해서 유속과 수심이 낮은 갈수기에 측정 시험을 수행하였다. 사질토와 같이 하천바닥에 관입이 용이한 경우는 높이가 상대적으로 긴 G-type을 이용하였고, 점토층과 같이 투수성이 작아 유동플럭스가 작거나 얇은 자갈층으로 관입이 어려운 경우는 상대적으로 높이가 작고 단면적이 넓은 K-type을 이용하였다.

비닐 주머니와 연결된 밸브가 닫힌 상태에서 공기 호수 밸브를 열어 드럼내 공기를 배출시키면서 시피지미터를 하상퇴적층에 관입시켰으며, 시피지미터내로 횡방향 유입을 차단하고 종방향 유동을 원활하게 하기 위해 최대한 깊게 매설하였다. 매설 후 수시간 동안의 장비 안정화 단계를 거친 후에 공기 밸브를 닫고 비닐 주머니 밸브를 열고 측정을 시작하였다. 일정 시간동안 비닐 주머니로 유입되거나 빠져나간 물의 양 변화를 측정하고 이를 경과시간 및 시피지 단면적으로 나누어 단위면적당 유동량을 산정하였다. 지점당 2~3개의 시피지미터를 설치하였고, 각 설치 지점에 대해서도 수회 반복 측정 후 평균하여 유동량을 산정하였다. 대표성을 높이기 위해서는 측정 지점의 확충을 통해서 점데이터에서 면데이터로의 확대가 필요할 것이다. Fig. 3은 시피지 측

정 및 설치 모습의 예를 나타낸 것이다.

하상퇴적층 수리경사 측정 방법

하상퇴적층의 연직방향 수리경사를 측정하기 위해서 스테인레스 재질의 관입형 피조미터를 사용하였다. 이 장비는 끝단이 뾰족하고 측면에 미세 구멍이 뚫려있는 스크린 부분과 관입 깊이를 조절할 수 있는 연결봉으로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 길이가 짧은 것과 긴 것 두 가지 종류의 피조미터를 사용하였다. 길이가 긴 피조미터1은 내경 2.5 mm, 외경 3.2 mm로서, 스크린(길이 40 cm)과 2개의 긴 연결봉(길이 90 m)을 연결한 것으로 총길이가 220 cm이다. 길이가 짧은 피조미터2는 스크린과 1개의 짧은 연결봉(길이 60 cm)으로 구성되어 있으며 총길이는 100 cm이다. 장심도 피조미터1은 하천바닥층의 지하수두를 측정하는데 사용하고, 단심도 피조미터2는 하저면으로부터 얕게 설치함으로써 하천수위 측정 대응으로 활용하였다. 두 피조미터의 수두 차이를 관입깊이 차이로 나누어 연직방향 수리수두경사값을 계산한 후 시피지미터로 측정된 유동량과 함께 Darcy 공식에 대입하여 연직수리전도도값을 산정하였다.

피조미터 설치시에는 상단 입구 부분의 마모 및 변형



Fig. 4. Piezometers for measurement of hydraulic head in streambed for study sites.



Fig. 5. Illustration of piezometers plugged into the streambed for study sites.

Table 1. Results of seepage experiment for study sites (2013. 4)

Site	Flux (m/s)	Site	Flux (m/s)	Site	Flux (m/s)	
Up -stream	T1	2.88×10^{-6}	Middle -stream	T6	5.78×10^{-6}	
	S1	5.75×10^{-7}		T7	2.86×10^{-6}	
	S2	-1.55×10^{-6}		S4	-3.33×10^{-7}	
	S3	-1.67×10^{-7}		S5	2.58×10^{-6}	
	T2	2.72×10^{-6}		S6	1.39×10^{-6}	
	T3	2.98×10^{-6}		T8	3.40×10^{-6}	
	T4	4.75×10^{-6}		T9	1.70×10^{-6}	
T5	4.16×10^{-6}	T10	1.77×10^{-5}	Down -stream	T11	2.16×10^{-6}
		T12	8.17×10^{-7}			
		S7	3.18×10^{-6}			
		S8	3.85×10^{-6}			
		T13	3.85×10^{-6}			
		S9	1.33×10^{-6}			
		T14	7.76×10^{-7}			
		T15	1.97×10^{-6}			

을 최소화하기 위해 고무망치를 사용하여 관입하였다. 설치 완료 후에는 피조미터내 수두가 안정될 때까지 수일 후에 수두를 측정하였다. Fig. 5는 피조미터 설치 모습의 예를 나타낸 것이다.

결과 및 고찰

하천수-지하수 상호유동량 측정 결과

하상퇴적층을 통한 유입 · 유출량 측정값을 시피지미터 단면적으로 나누어 하상퇴적층의 단위면적당 시피지 플럭스(seepage flux)를 산정하였다. 측정 결과를 상, 중,

하류로 구분하여 Table 1과 같이 정리하였다. 대부분의 지점에서 지하수가 하천으로 유출되고 있었으며, 음의 부호가 붙은 지점과 같이 하천수가 지하수계로 유입되는 되는 지점이 존재하였다. 상류는 단위면적당 유동량 즉, 유동속도가 $-1.55 \times 10^{-6} \sim 4.75 \times 10^{-6}$ m/s의 범위로 나타났으며, 중류는 $-3.33 \times 10^{-7} \sim 1.77 \times 10^{-5}$ m/s, 그리고 하류는 $7.76 \times 10^{-7} \sim 3.85 \times 10^{-6}$ m/s의 범위로 측정되었다. 평균적으로 보면, 상류, 중류, 하류 각각 1.70×10^{-6} m/s, 2.59×10^{-6} m/s, 1.72×10^{-6} m/s로 측정되어 큰 차이를 보이지 않았다.

Table 2. Results of piezometer experiment for study sites

Site		Vertical hydraulic gradient	Site		Vertical hydraulic gradient	Site		Vertical hydraulic gradient
Up -stream	T1	0.015	Middle -stream	T6	0.023	Down -stream	T11	0.030
	S1	-		T7	0.026		T12	0.011
	S2	-0.047		S4	-		S7	-
	S3	-		S5	0.015		S8	-
	T2	0.005		S6	-		T13	0.021
	T3	-0.006		T8	0.004		S9	-
	T4	-0.122		T9	-0.096		T14	0.001
	T5	0.010		T10	-0.017		T15	0.001

Table 3. Results of the estimated streambed hydraulic conductivity for study sites

Site		Hydraulic conductivity (m/s)	Site		Hydraulic conductivity (m/s)	Site		Hydraulic conductivity (m/s)
Up -stream	T1	1.92×10^{-4}	Middle -stream	T6	2.53×10^{-4}	Down -stream	T11	7.20×10^{-5}
	S1	-		T7	1.10×10^{-4}		T12	7.43×10^{-5}
	S2	3.30×10^{-5}		S4	-		S7	-
	S3	-		S5	1.72×10^{-4}		S8	-
	T2	5.44×10^{-4}		S6	-		T13	1.83×10^{-4}
	T3	4.97×10^{-4}		T8	8.50×10^{-4}		S9	-
	T4	3.89×10^{-5}		T9	1.77×10^{-5}		T14	7.76×10^{-4}
	T5	4.16×10^{-4}		T10	1.04×10^{-3}		T15	1.97×10^{-3}

Table 4. Comparison of hydraulic conductivities between sites

Other studies	Method	Hydraulic Conductivity (m/s)
Lee et al. (2013)	Empirical formula (Hazen method)	$6.76 \times 10^{-5} \sim 5.00 \times 10^{-4}$
Kim et al. (2006)	Slug test	$1.00 \times 10^{-6} \sim 6.00 \times 10^{-5}$
Kim et al. (2012)	Seepage meter + mini pizometer	$1.64 \times 10^{-8} \sim 3.93 \times 10^{-8}$
HRFCO (2011)	Seepage meter + well	$1.18 \times 10^{-5} \sim 1.26 \times 10^{-5}$
Present study	Seepage meter + drive-point pizometer	$1.77 \times 10^{-5} \sim 1.97 \times 10^{-3}$

피조미터 수두 측정 및 하상 수리전도도 산정 결과

장심도 피조미터에서 측정된 수두에서 단심도 피조미터를 이용하여 측정된 수두를 감하고 이를 관입깊이 차이로 나누어 Table 2와 같이 연직방향 수리경사를 구하였다. 음의 부호가 붙은 경우는 연직하향의 흐름으로 하천수가 지하수계로 유입되는 것을 의미한다. 시피지 측정과 마찬가지로 지점에 따라 일부 손실하천의 특징을 보였으나 대부분 이득하천의 양상을 나타내고 있다.

시피지 플릭스값과 연직방향 수리경사를 Darcy 공식에 대입하여 Table 3과 같이 하상퇴적층의 연직방향 수리전도도를 산정하였다. 상류구간은 $3.30 \times 10^{-5} \sim 4.97 \times$

10^{-4} m/s, 중류구간은 $1.77 \times 10^{-5} \sim 8.50 \times 10^{-4}$ m/s, 그리고 하류구간은 $7.20 \times 10^{-5} \sim 1.97 \times 10^{-3}$ m/s의 범위로 측정되었다. 따라서 지점간에 최대 100배 이상의 차이가 나는 등 공간적으로 수리전도도 값이 크게 상이한 것을 알 수 있다. 수중보 직하류부에 위치해 있어 수면 단차 영향을 받아 시피지 플릭스가 크게 측정된 지점 T10, 굽은 모래층이 두껍게 쌓여 있어 수두차이가 매우 작은 지점 T15 등 이상치 가능성이 높은 지점을 제외하면, 전체 구간의 평균 수리전도도는 약 2.82×10^{-4} m/s인 것으로 분석되었다.

Calver (2001)에 따르면 하상퇴적물의 수리전도도는

일반적으로 $1.0 \times 1.0^{-9} \sim 1.0 \times 1.0^{-2}$ m/s의 범위를 가지며 $1.0 \times 1.0^{-7} \sim 1.0 \times 1.0^{-3}$ m/s 범위에 집중되어 있다. 따라서 Table 3의 결과는 이 범위 내에서 분포하고 있어 측정 값이 타당한 것으로 판단된다. Table 4는 기존의 국내 하천을 대상으로 하상 수리전도도 측정 결과를 본 논문의 결과와 함께 나타낸 것이다. 측정 지점의 하상퇴적층의 재료, 측정 방법 등의 차이로 다양한 분포를 나타낸 것으로 보이며, 특히 본 논문의 조사 지역과 같이 모래, 자갈층이 잘 발달되어 있는 지역은 상대적으로 크게 산정된 것으로 판단된다.

결 론

본 논문에서는 안정천에 위치한 공도 수위표로부터 상류쪽으로 약 20 km 하도구간에 대해 하천바닥을 통과하는 하천수와 지하수의 상호유동량과 수리경사를 측정하여 하상퇴적층의 연직방향 수리전도도를 산정하였다. 하천수-지하수 상호유동량은 자체 제작한 시피지 미터를 이용하여 측정하였고, 수리경사는 장심도와 단심도 두 가지 종류의 관입형 피조미터를 하상퇴적층에 설치하여 피조미터내 수두 차이와 관입깊이 차이를 측정하여 산정하였다.

하천수-지하수 상호유동량 측정값을 시피지미터 단면적으로 나누어 단위면적당 유동량 산정한 결과 상류구간은 $-1.55 \times 10^{-6} \sim 4.75 \times 10^{-6}$ m/s, 중류구간은 $-3.33 \times 10^{-7} \sim 1.77 \times 10^{-5}$ m/s, 그리고 하류구간은 $7.76 \times 10^{-7} \sim 3.85 \times 10^{-6}$ m/s로 공간적으로 비교적 큰 편차를 나타내었다. 피조미터 수두 측정 당시 대부분의 지점에서 연직상향의 흐름이 발생하였으며, 수리경사는 $-0.122 \sim -0.030$ 의 범위의 값으로 산정되었다. 단위면적당 유동량과 수리경사 측정값으로부터 하상퇴적층의 연직방향 수리전도도를 산정한 결과, 상류구간은 $3.30 \times 10^{-5} \sim 4.97 \times 10^{-4}$ m/s, 중류구간은 $1.77 \times 10^{-5} \sim 8.50 \times 10^{-4}$ m/s, 그리고 하류구간은 $7.20 \times 10^{-5} \sim 1.97 \times 10^{-3}$ m/s의 값을 가져 구간별, 지점별로 하천수계와 지하수계의 수리적 연결성의 큰 차이를 나타내었다.

본 논문에서 적용한 고강도 스테인레스 재질의 시피지미터와 피조미터를 이용하여 하상퇴적층의 수리전도도를 측정하는 방법은 굵은 자갈과 같이 하상물질이 매우 단단한 경우에도 설치 가능하고, 반복적인 관입 및 제거에 따른 마모, 파손이 적어 장기간 반복적인 재사용이 가능하며, 장비의 규격 측면에서 휴대성 또한 우수한 장점이 있어 실무에서 매우 유용하게 활용될 수 있을

것으로 기대된다.

하천과 지하수와의 수리적 연결 특성 파악을 위해 보다 다양한 지점에 대한 하상 수리전도도 측정이 점차적으로 확대되어야 할 것이며, 측정 자료의 축적과 함께 하천 규모, 하상 재료, 하천변 대수층 수리특성치 등 다른 인자들과의 상관성 분석 등을 위한 연구 조사가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 한강홍수통제소 “하천변 지하수 이용에 따른 영향권 설정 방안 연구” 과제의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Calver, A., 2001, Riverbed permeabilities: Information from pooled data, *Ground Water*, 39, 546-553.
- Chen, X. H., 2000, Measurement of streambed hydraulic conductivity and its anisotropy, *Environmental Geology*, 39, 1317-1324.
- Duwelius, R. F., 1996, Hydraulic conductivity of the streambed, East Branch Grand Calumet River, Northern Lake County, Indiana, US Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 96-4218.
- Fox, G. A., 2007, Estimating streambed conductivity: guidelines for stream-aquifer analysis tests, *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, 50(1), 107-113.
- Hazen, A., 1893, Some physical properties of sands and gravels, Massachusetts State Board of Health, 24th Annual Report.
- Hunt, B., 1999, Unsteady stream depletion from ground water pumping, *Ground Water*, 37, 98-102.
- Hunt, B., Weir, J., and Clausen, B., 2001, A stream depletion field experiment, *Ground Water*, 39(2), 283-289.
- Hvorsley, M. J., 1951, Time lag and soil permeability in groundwater observations, U.S. Army Waterways Experiment Station Bulletin 36, Vicksburg, Mississippi.
- Kelly, S. E. and Murdoch, L. C., 2003, Measuring the hydraulic conductivity of shallow submerged sediments, *Ground Water*, 41(4), 431-439.
- Kim, G. B., 2010, Application of analytical solution for stream depletion due to groundwater pumping in Gapcheon watershed, South Korea, *Hydrological Processes*, 24, 3535-3546.
- Kim, H., Lee, J. Y., and Lee, K. K., 2013, Spatial and temporal variations of groundwater-stream water interaction in an agricultural area, Case study: Haean Basin, Korea, *Research Journal of Earth and Planetary Sciences*, 3(1), 1-12.
- Kim, K. Y., Chon, C. M., Kim, T., Oh, J. H., Jeoung, J. H., and Park, S. K., 2006, Use of a temperature as a tracer

- to study stream-groundwater exchange in the hyporheic zone, *Economic and Environmental Geology*, 39(5), 525-535.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S., and Arnold, J. G., 2008, Development and application of the integrated SWAT- MODFLOW model, *Journal of Hydrology*, 356(1-2), 1-16.
- Kim, N. W., Lee, J., Chung, I. M., and Sung, G. Y., 2012, Analysis of effects of groundwater abstraction on streamflow for Sinduncheon watershed, *Journal of Korea Water Resources Association (KWRA)*, 45(12), 1259-1273.
- Landon, M. K., Rus, D. L., and Harvey, F. E., 2001, Comparison of instream methods for measuring hydraulic conductivity in sandy streambeds, *Ground Water*, 39, 870-885.
- Lee, D. R. and Cherry, J. A., 1978, A field exercise on groundwater flow using seepage meters and mini-piezometers, *Journal of Geology. Education*, 27, 6-10.
- Lee, Y., Lim, H. S., Yoon, H. I., and Park, Y., 2013, Stream water and groundwater interaction revealed by temperature monitoring in agricultural areas, *Water*, 5, 1677-1698.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Han River Flood Control Office (HRFCO), 2011, Assessment of streamflow depletion according to groundwater withdrawals near stream.
- Rus, D. L., McGuire, V. L., Zurbuchen, B. R., and Zlotnik, V. A., 2001, Vertical profiles of streambed hydraulic conductivity determined using slug tests in central and western Nebraska, *US Geological Survey Water-Resources Investigation Report*, 01-4212.
- Springer, A. E., Petrouson, W. D., and Semmens, B. A., 1999, Spatial and temporal variability of hydraulic conductivity in active reattachment bars of the Colorado River, Grand Canyon, *Ground Water*, 37(3), 338-344.
- Vukovic, M. and Soro, A., 1992, Determination of hydraulic conductivity of porous media from grain-size composition, Littleton, Colorado, *Water Resources Publications*.
- Woessner, W. W. and Sullivan, K. E., 1984, Results of seepage meter and mini-piezometer study, Lake Mead, Nevada, *Ground Water*, 22(5), 561-568.

이정우

한국건설기술연구원 수자원하천연구소
411-712 경기도 고양시 일산서구 대화동 2311
Tel: 031-910-0529
Fax: 031-910-0251
E-mail: ljw2961@kict.re.kr

전선금

주식회사 지오그린21
152-719 서울시 구로구 구로동 197-10 이앤씨벤처
드림타워2차 901호
Tel: 02-6330-2504
Fax: 02-6330-2507
E-mail: jeonsk79@daum.net

이명재

주식회사 지오그린21 환경사업본부
152-719 서울시 구로구 구로동 197-10 이앤씨벤처
드림타워2차 901호
Tel: 02-6330-2503
Fax: 02-6330-2507
E-mail: tankguy@geogreen21.com

김남원

한국건설기술연구원 수자원하천연구소
411-712 경기도 고양시 일산서구 대화동 2311
Tel: 031-910-0256
Fax: 031-910-0251
E-mail: nwkim@kict.re.kr

정일문

한국건설기술연구원 수자원하천연구소
411-712 경기도 고양시 일산서구 대화동 2311
Tel: 031-910-0334
Fax: 031-910-0251
E-mail: imchung@kict.re.kr

이민호

한강홍수통제소 하천정보센터
137-049 서울시 동작구 서초로 328
Tel: 02-590-9988
E-mail: leeminho@korea.kr