



<Short Note>

전주시 오송지에서 시피지미터를 이용한 지하수 유출입량
 측정을 통한 물 수지 분석

이창용¹ · 김원빈^{1,2} · 진성욱^{1,*}

¹전북대학교 지구환경과학과 & 지구환경시스템 연구소

²한국지질자원연구원 지하수연구센터

요 약

지하수-지표수 상호작용에 대한 관심의 증가에도 불구하고 국내에서 지하수의 유출입량을 직접 측정한 연구는 드물다. 이 연구에서는 전주시 오송지를 대상으로 시피지미터를 이용하여 지하수 유출입량을 측정하였으며 저수지의 물수지에 대한 분석을 실시하였다. 시피지미터를 저수지 상류에 위치한 4개의 지점에 설치하여 지하수의 유출입량을 측정하였고 연못의 하류 출구에서는 유속계를 이용하여 지표수의 유출량을 측정하였다. 측정은 2018년 6월부터 8월까지의 약 3개월간 주 1~2회 이루어졌으며, 7월 장마기간에는 주 3회 실시되었다. 오송지 상류지점의 지하수 유출입량은 평균 0.41 L/m²d~4.13 L/m²d로 양의 값을 보여 지하수 유입만 일어났다. 오송지 하류 출구에서의 지표수 유출량은 32~8774 L/d로 측정되었는데, 상류지점의 지하수 유출입량을 지표수 유출량과 비교했을 때 평균비는 4개 지점에서 각각 12.49, 7.56, 2.46, 그리고 0.60이었다. 이는 강수량과 증발량을 고려하지 않았을 때, 오송지에서 지하수 유입량이 지표수 유출량보다 대체로 많음을 의미한다. 뿐만 아니라, 오송지가 연중 일정량의 물을 저수하고 있는 경우, 연못 주변에 지하수 형태의 유출이 있음을 암시한다. 이번 연구는 시피지미터와 유속계를 이용한 지하수와 지표수의 유출입량 측정이 저수지와 같은 지표수에서의 물 수지 해석에 기여할 수 있음을 보여준다.

주요어: 지하수, 지표수, 상호작용, 시피지미터, 유속계

Changyong Lee, Wonbin Kim and Sung-Wook Jeon, 2019, Analysis of water budget through measurement of groundwater flux using seepage meters at Osongji in Jeonju-si. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 4, p. 461-472

ABSTRACT: Despite increased interests in groundwater-surface water interaction, there have been few studies that directly measure groundwater fluxes into/out of surface water body in Korea. In this study, groundwater fluxes were measured using seepage meters and analysis of water budget was conducted at Osongji, Jeonju-si. The fluxes of groundwater were measured by installing seepage meters at four locations in the upstream of the pond and the flow rate of surface water was measured using a flow meter at the downstream outlet of the pond. Measurements were made once or twice a week for about 3 months from June to August in 2018, and were made three times a week during the rainy season of July. The average groundwater flux in the upstream of the pond was 0.41 L/m²d~4.13 L/m²d, indicating that only groundwater influx occurred. The surface water outflow rate at the downstream outlet was measured as 32~8774 L/d. When the groundwater flux in the upstream to the surface water outflow rate in the downstream was compared, the average ratios at the four locations were 12.49, 7.56, 2.46, and 0.60, respectively. This means that the groundwater influx to Osongji is considerably larger than the outflow of surface water when precipitation and evaporation rates are not taken into consideration. Also, in case that Osongji has a year-round consistent water volume, it implies that there might be groundwater outflow around the pond. This study shows that measurement of groundwater and surface water fluxes using seepage meters and flow meters can contribute to analyzing water budget in surface water bodies like ponds.

Key words: groundwater, surface water, interaction, seepage meter, flow meter

(Changyong Lee, Wonbin Kim and Sung-Wook Jeon, Department of Earth and Environmental Sciences & The Earth and Environmental Science System Research Center, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea; Wonbin Kim, Groundwater Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-63-270-3429, E-mail: sjeen@jbnu.ac.kr

1. 서론

물의 순환에 있어서 지하수와 지표수는 상호의존적 관계를 가지고 있으며, 지하수는 기저유출의 형태로 지표수에 기여한다(Kim, G. *et al.*, 2015; Han *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2017). 지표수 유량의 40% 이상은 기저유출이 차지하는 것으로 알려져 있고, 특히 갈수기에는 유량의 90% 이상을 기저유출이 차지할 정도로 기저유출은 지표수를 유지시켜 주는 중요한 역할을 한다(Choi *et al.*, 2014; Kang and Jun, 2016).

기저유출을 직접유출로부터 분리하는 수문곡선(hydro-graph) 분리는 유역 및 기상 특성에 따른 변화 때문에 쉽지 않으며, 기저유출을 분리하기 위한 방법으로 지하수감수곡선법, 수평직선분리법, N-Day 법, 가변경사법 등 다양한 방법들이 제안되어 왔다(Choi *et al.*, 2014). 이들 방법들은 시간과 노력이 많이 필요하며, 동일한 자료를 가지고 분석을 하더라도 결과에 큰 차이가 발생할 수 있다. 따라서 최근에는 회귀식 또는 수문모형 등을 이용한 방법들도 제안되고 있다(Choi, Y.H. *et al.*, 2015). 하지만 근본적으로 이들 방법들은 지표수의 유량에 근거하여 지하수 유출량을 추정하는 것으로 직접적으로 지하수 유출량을 측정하는 것이 아니라는 한계가 있다.

한편, 지하수와 지표수의 상호관계는 수질에 대해서도 많은 영향을 미친다고 알려져 있으며, 지하수에 있는 오염물질이 기저유출에 의하여 지표수로 나오게 되어 하천유역의 수질에 영향을 미치게 된다(Choi, Y.H. *et al.*, 2015). 그 예로 매몰지에서 발생한 침출수가 지하수나 주변지역으로 스며들고 강우 시 지표수로 유출되어 수질에 영향을 미칠 수 있음을 보여주었다(Kim, Y.-J. *et al.*, 2017). 또한 물의 순환 과정에서 지하수를 통해 호수로 들어오는 암모늄(ammonium, NH_4^+)이 질산화 되어 질산염(nitrate, NO_3^-)으로 변환되고 또한 호수 내 암모늄이 호수 바닥의 퇴적물에 퇴적되거나 지하 대수층으로 배출되는 현상이 관찰되었다(Stoliker *et al.*, 2016). 이와 같이 지하수와 지표수의 상호관계는 수질오염에 서로 영향을 주며 결과적으로 수생태계를 유지하는데 중요한 역할을 한다. 따라서 이에 대한 정량적인 관계를 평가하는 것이 매우 중요하다.

지하수와 지표수의 상호관계를 평가하기 위해 수리적, 수화학적, 열적, 생물학적, 수치적 방법 등 다양

한 방법들이 이용되어 왔다. 지하수위와 하천수위간의 수두구배와 대수층의 수리전도도, 그리고 Darcy의 법칙을 이용한 방법(Kalbus *et al.*, 2006; Bae and Lee, 2008; Jeon *et al.*, 2015)은 비교적 간단한 수식에 의해 지하수의 유출입량을 계산할 수 있지만, 대수층의 불균질성을 반영하기 어렵고 수위와 수리전도도를 정확하게 측정하기 힘들다는 단점이 있다. 또한 지하수 흐름 방정식에 기초한 수치 모델링 방법도 지하수 기여도 평가에 사용되고 있지만(Ahn *et al.*, 2009; Choi, S.-H. *et al.*, 2015a; Berg *et al.*, 2019), 수계에 대한 개념모델의 단순화와 모델링에 사용되는 매개변수들의 불확실성이 존재한다.

지하수와 지표수의 온도차이를 이용한 방법(Kim *et al.*, 2006; Hyun *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2011; Shin *et al.*, 2016)은 비교적 저렴하고 견고한 방법이지만, 열이동이나 열수지에 대한 해석적 또는 수치적 해석을 필요로 한다. 동위원소를 이용하여 지하수의 혼합 비율을 계산하는 방법은 지하수의 기여도 평가에 많이 사용되는 방법이지만(Kim, H. *et al.*, 2015; Choi *et al.*, 2016; Kim, H. *et al.*, 2017; Jung *et al.*, 2019), 혼합 비율을 계산할 때 이성분계 또는 다성분계의 구분에 대한 가정이 들어가고 정확한 단성분(end-member)의 규정이 필수적인 요소이다. 지하수-지표수 혼합대에서의 미생물 분석은 그 지역이 지하수의 영향권에 있는지 지표수의 영향권에 있는지 구분하는 데 사용되기도 하며(Jeon *et al.*, 2018), 지화학적 특성을 수위, 온도, 동위원소, 미생물 및 통계적 분석을 함께 결합하여 종합적인 해석을 시도하려는 노력도 있다(Jeon and Kim, 2011; Kim *et al.*, 2014, 2018; Jeon *et al.*, 2015).

위에서 제시된 지하수-지표수 상호관계 평가 방법들은 모두 장단점이 있지만, 지하수의 유출입량을 직접적으로 측정하는 방법은 아니다. 지하수의 유출입량을 직접 측정하는 방법에는 Lee (1977)에 의해서 고안된 시피지미터(seepage meter)를 이용하는 방법이 있다. 시피지미터를 이용한 방법은 측정범위가 제한적일 수 있어 대표성이 결여될 수 있다는 단점이 있기는 하지만 직접 측정하기 때문에 가장 확실한 방법으로 여겨지며 다른 방법들과의 비교 또는 보정에 이용될 수 있으므로 지하수-지표수 연계 연구에 많이 이용되어 왔다(Lee and Cherry, 1978; Woessner and Sullivan, 1984; Isiorho and Meyer, 1999; Landon

et al., 2001).

하지만 국내에서 시피지미터를 이용하여 지하수의 유출입량을 직접 측정하는 연구는 지금까지 매우 드물었다. 이천시 비닐하우스 밀집지역에서 지하수 양수에 따른 지하수-하천수 상호 유동 변화 분석(Kim *et al.*, 2012), 안성천 상류구간의 하상퇴적물 수리전도도 측정(Lee, J.W. *et al.*, 2015)과 전주시 덕진연못에서의 지하수-지표수 상호유동량 측정(Jo and Jeon, 2018) 정도가 국내 연구사례로 보고되고 있다. 따라서 이번 연구에서는 전주시 오송지를 대상으로 시피지미터를 이용하여 지하수 유출입량을 직접 측정함으로써 국내에서의 지하수 유출입량 측정 사례를 제시하며, 주변의 다른 연못과의 비교분석을 통해 지형과 주변 환경 특성이 지하수 유출입량에 어떠한 영향이 있는지 알아보고자 하였다. 또한, 유속계를 이용해 측정한 지표수의 유출량과의 비교를 통하여 오송지에서의 물수지 분석을 하고자 하였다. 이 연구 결과는 국내에서의 지하수 유출입량에 대한 기초 자료를 제공함과 동시에 지하수-지표수 상호작용 연구에 기여할 수 있는 방법론을 제시한다는 데 의의가 있다고 생각된다.

2. 연구지역 및 연구방법

2.1 연구지역

지하수와 지표수의 상호작용을 평가하기 위한 연

구대상으로는 하천이나 호수 또는 연못이 있다. 하천은 계절에 따른 수위 변동폭이 크고 유입·유출의 다양한 요인들이 있어 물수지 분석이 매우 복잡할 수 있다. 따라서 상대적으로 유입 및 유출의 요소가 제한적이며 규모가 작은 연못을 연구 대상으로 선정하였다. 연구지역인 오송지는 전라북도 전주시 덕진구 송천동에 위치하고 있는 저수지로, 완전한 구릉지로 둘러싸여 있으며 저수지 주변부에 과수원이 있고 비교적 도심지와 떨어져 있다(그림 1). 오송지의 수면적은 29,165 m², 저수량은 47,200 m³, 그리고 집수구역면적은 535,000 m²이다(표 1; Choi, S.-H. *et al.*, 2015b). 주변 수계의 기반암은 옥천계에 해당하는 시대미상의 신동층과 기린봉층을 백악기 편상화강암이 관입하고 있으며, 이들 기반암들은 현상퇴적층에 의하여 부정합으로 덮여있다. 기반암들은 심하게 풍화를 받아서 비교적 완만한 지형을 형성하고 있다(Choi, S.-H. *et al.*, 2015b). 전주 기상청 자료에 따르면 이 지역의 연평균기온 13.3°C이며, 연평균강수량은 1313.1

Table 1. Comparison of Deokjin pond and Osongji (after Choi, S.-H. *et al.*, 2015b).

	Deokjin pond	Osongji
Watershed area (m ²)	3,770,000	535,000
Water storage (m ³)	88,741	47,200
Water area (m ²)	99,174	29,165
Ave. depth (m)	0.89	1.62



Fig. 1. Satellite photograph of Osongji and Deokjin pond and locations of the installed seepage meters and outlet for surface water in Osongji.

mm이다(Korea Meteorological Administration, 2019). 오송지 지역 내에 내린 강수는 온전히 자연배수의 형태로 오송지로 유입되기 때문에 집수구역의 70%가 경작지로 이용되고 있음에도 물 부족 현상이 일어나지 않는다(Choi, S.-H. *et al.*, 2015b). 오송지로 유입되는 큰 하천은 없으며, 집수구역내에서 모인 강수는 지표 유출이나 기저유출 형태로 오송지로 모두 유입되는 것으로 판단된다. 오송지의 지표수는 남쪽에서 북쪽 방향으로 흐르며 저수지의 북쪽 끝에 있는 소규모 댐의 한 곳의 유출구를 통해 하루 개천으로 흘러 나간다. 연못의 수심은 남쪽이 얇고 북쪽이 깊으며 평균 수심은 1.62 m이다(Choi, S.-H. *et al.*, 2015b). 한편, 오송지에서의 측정결과와 비교하기 위한 주변의 또 다른 연못인 덕진연못은 수면적이 99,174 m², 저수량은 88,741 m³, 그리고 집수구역면적이 3,770,000 m²로, 오송지가 덕진연못에 비해 약 1/7 작은 집수구역면적을 가지고 있지만 저수량은 덕진연못의 반을 조금 넘어 수질문제가 큰 쟁점이 되지 않고 있다(Choi, S.-H. *et al.*, 2015b). 반면 덕진연못은 도시화의 과정에서 연못으로 유입되는 하천이 차단되어 상류에서 양수되는 지하수와 수면에 직접 내리는 강우만으로 유지가 되고 있어 수질이 매우 불량한 상태이다(Choi, S.-H. *et al.*, 2015a, 2015b).

2.2 연구방법

오송지의 지하수 유출입량을 측정하기 위하여 Jo and Jeon (2018)에서 사용한 시피지미터(그림 2)를 이용하였고, 오송지 출구에서의 지표수 유출량을 측정하기 위해선 유속계(JDC ELECTRONIC, Switzerland)를 이용하였다. 시피지미터 측정법은 Lee (1977)에

의해 최초로 고안된 것으로, 하천이나 호수의 바닥에 시피지미터를 설치한 후 시피지미터 상부에 연결된 채집봉투 속에 일정량의 물을 넣은 후 일정한 시간 동안 변화된 물의 양을 측정하여 유출입량을 계산하는 원리이다. 시피지미터의 단위 면적당 유출입량(F)은 식 (1)로 계산된다.

$$F = \frac{V}{At}$$

F = Influx/out flux per unit seepage meter area [L/m² day]

V = Volum of water in the bag [L]

A = Area of seepage meter [m²]

t = Measurement period[day]

(1)

식 (1)에서 V 는 측정기간 동안 변화된 채집봉투 속 물의 부피이며, A 는 시피지미터의 단면적, t 는 측정기간을 의미한다. 식 (1)의 결과에 있어서 물의 부피 변화량이 양(+)의 값을 가지면 지하수가 지표수로 유입됨을 의미하며, 변화량이 음(-)의 값을 가지면 지표수가 지하수로 유출됨을 의미한다.

이번 연구에 사용된 시피지미터는 페드럼통을 잘라 높이 0.25 m, 지름 0.58 m로 제작되었으며 아랫면은 뚫려있고 윗면은 막혀있다. 막혀있는 위쪽 면에는 채집봉투를 연결할 고무마개를 넣을 수 있는 지름 50 mm의 구멍을 만들어 주었다. 고무마개는 시피지미터에 딱 맞아 들어가게 하기 위해서 하직경 50 mm, 상직경 55 mm 크기를 사용하였다. 고무마개와 채집봉투를 연결하고 채집봉투에 시피지미터로부터 물이 들어오고 나올 수 있게 하기 위하여 고

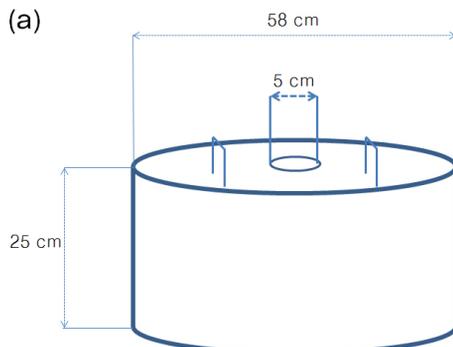


Fig. 2. Schematics (a) and a real picture (b) of the seepage meter (after Jo and Jeon, 2018).

무마개의 중앙에 구멍을 뚫어 외경 10 mm, 내경 8 mm의 테프론 튜브(PTEE)를 끼워 넣어 주었다. 채집봉투는 폴리에틸렌(polyethylene) 재질의 주머니를 사용하였으며, 이는 강수량과 수중생물 등 다른 외부요인에 대한 영향을 받지 않게 하여 봉투로 유입된 지하수를 보호하며 정확한 실험값을 얻기 위함이다. 튜브와 봉투를 스테인리스 금속 재질(stainless steel; SUS) 밴드를 사용하여 측정시간 동안 분리되지 않게 연결하였다. 시피지미터를 설치하기에는 점토질부터 세립질의 자갈까지의 퇴적물이 있는 곳이 적절하며 잔잔하고 얇은 수역에 적합하다. 또한 시피지미터 설치하는 경사가 없는 평평한 퇴적층에 설치하며 시피지미터에 꽂은 채집봉투가 물에 완전히 잠길 수 있는 수위가 필요하다. 시피지미터에 채집봉투가 빠지지 않게 고정을 시킨 후 일정한 측정기간 뒤에 채집봉투 속 물의 변화량을 측정함으로써 지하수의 유출입량을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 2018년 6월에서 8월까지 총 3개월의 기간 동안 주 1~2회 측정하였으며, 강수량이 많은 7월엔 주 3회 측정을 하였다(표 2). 시피지미터 설치 장소는 그림 1에 도시되어 있으며, 총 4개 지점에 시피지미터를 설치하였다.

지표수의 유출량은 오송지의 북서쪽에 위치한 유출구(그림 1)에서 유속계를 이용하여 측정된 유출수의 선속도와 측정 당시 지표수가 빠져나가는 유출구의 단면적을 곱해 주어 계산하였다. 유속계는 직경 66 mm 높이 137 mm이며, 측정범위는 2.0~150 km/h (또는 999 m/s)이다. 유속은 지름 60 mm의 유속 측정용 바람개비를 이용하여 측정하였다. 지표수 유출량 측정은 3개의 지점(그림 3a)을 선정하여 각 지점마다 유속, 깊이, 길이를 측정하였고, 세 지점의 길이와 깊이의 평균을 구하여 유출구의 단면적을 구하였다. 오송지 지표수 유출구의 모양을 그림 3b에 나타내었고, 유출구의 앞부분의 바닥은 경사져 있어서 삼각형으로 가정하여 면적을 계산하였다. 유속은 각 지점 길이의 중간 지점에서 측정하였다. 지표수 유속은 3개의 지점의 유속을 평균하여 계산하였으며, 유출구의 평균 단면적과 평균 유출 선속도를 곱하여 오송지 지표수의 유출량을 구하였다.

오송지의 지하수 총 유입량은 측정된 시피지미터 단위면적당 지하수 유입량(L/m² day)에 오송지의 집수구역면적(m²)(Choi, S.-H. *et al.*, 2015b)을 곱하여 계산하였으며, 지표수 유출량은 위에서 설명한 것처럼

지표 유출수의 평균 선속도(m/s)에 측정 당시 유출구의 평균 단면적(m²)을 곱하여 계산하였다. 오송지의 지하수 총 유입량과 지하수 유출량의 비(R)는 식 (2)로 계산되었다.

$$R = \frac{F \times A_W}{V_s \times A_O}$$

$$R = \frac{\text{Groundwater in flux}}{\text{Surface water outflow}} [-]$$

F = Groundwater in flux per unit seepage meter area [L/m² day]

A_W = Watershed area of Osongji [m²]

V_s = Linear velocity of surface water outflow [m/s]

A_O = Cross sectional area of outlet of Osongji [m²]

(2)

3. 연구결과

3.1 오송지의 지하수 유입량

2018년 6월부터 8월까지 시피지미터를 이용하여 측정된 오송지에서의 단위면적당 지하수 유출입량을 기상청 자료를 통해 얻은 전주지역의 측정기간 동안의 강수량과 비교하였다(그림 4). 결과는 비슷한 지점에 있는 2개의 시피지미터의 측정값끼리 비슷한 값을 보여주었다. 하지만 1, 2 지점(site 1, 2)과 3, 4 지점(site 3, 4)의 측정값들은 서로 큰 차이를 보여주었다. 이는 연못의 측정지점들간의 불균질성을 반영하였거나, 3, 4 지점의 시피지미터가 2017년 오송지 환경정비사업으로 인해 인위적으로 만들어진 퇴적층 위에 설치되었기 때문에 지하수 유출이 적게 나타났을 가능성이 있다. 이러한 결과는 같은 호수내에서도 위치에 따라 지하수 유출입량이 다를 수 있으며 지하수 유출입량에 대한 해석에 있어 대수층과 호수 퇴적물의 불균질성을 고려해야 함을 지시한다. 한편 그림 4를 보면 측정 시점에 따라 지하수의 유출입량의 차이가 있긴 하지만 연구기간 내의 측정값들이 모두 양의 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 측정기간 내 오송지의 측정지점에서는 지하수가 지표수로 빠져나가는 유출이 없고 지표수로 들어오는 지하수 유입만이 있다는 것을 나타낸다. 또한 강수량과 비교를 해보면 강수에 대한 지하수 유입에 시간적인 공백이 존재하여 오송지에 비가 온 후 일정시간 이후에 지하수 유입량이 점진적으로 증가하는 추세를

Table 2. Groundwater influx and surface water outflow measured in Osongji.

Date	Groundwater influx per unit area (L/m ² d)				Total groundwater influx (L/d)				Total surface water outflow (L/d)	Total groundwater influx / Total surface water outflow			
	Site1	Site2	Site3	Site4	Site1	Site2	Site3	Site4	Outlet	Site1	Site2	Site3	Site4
Start (5/30)													
06/01	3.40	4.17	0.59	0.44	1817.11	2229.17	317.49	236.43	483.01	3.76	4.62	0.66	0.49
06/06	5.62	4.87	0.23	1.11	3007.35	2606.10	125.64	595.80	0.00	-	-	-	-
06/08	6.70	9.39	0.50	1.42	3586.93	5025.76	268.51	759.94	0.00	-	-	-	-
06/19	2.27	2.07	0.12	0.72	1215.91	1105.37	62.64	386.88	0.00	-	-	-	-
06/26	1.60	0.65	0.22	0.98	856.93	347.40	118.70	526.89	0.00	-	-	-	-
06/28	3.98	0.74	0.11	0.64	2127.84	395.17	60.80	344.51	2045.05	1.04	0.19	0.03	0.17
07/02	2.47	2.23	0.00	0.39	1322.30	1195.64	0.00	207.72	0.00	-	-	-	-
07/04	6.33	5.61	0.00	0.45	3384.28	2999.24	0.00	243.18	2879.17	1.18	1.04	0.00	0.08
07/06	6.48	2.46	0.42	0.03	3465.34	1317.23	222.92	15.20	2452.03	1.41	0.54	0.09	0.01
07/09	2.78	1.16	1.01	0.33	1486.11	621.46	540.40	179.01	2713.59	0.55	0.23	0.20	0.07
07/11	3.37	1.15	0.42	0.03	1803.60	613.02	222.92	15.20	1207.35	1.49	0.51	0.18	0.01
07/13	1.61	1.16	0.07	0.02	861.27	618.09	35.46	10.13	537.68	1.60	1.15	0.07	0.02
07/16	4.17	0.45	0.40	0.00	2229.17	243.18	216.16	0.00	228.19	9.77	1.07	0.95	0.00
07/18	5.11	5.11	0.08	0.54	2735.80	2735.80	40.53	288.78	71.54	38.24	38.24	0.57	4.04
07/20	4.51	2.39	0.97	0.19	2411.55	1276.70	516.76	101.33	235.87	10.22	5.41	2.19	0.43
07/23	4.86	2.27	1.77	0.11	2600.69	1215.91	945.71	60.80	32.33	80.44	37.61	29.25	1.88
07/25	7.73	5.32	0.72	0.34	4134.09	2847.25	385.04	182.39	0.00	-	-	-	-
07/27	3.98	4.17	0.47	0.21	2127.84	2229.17	253.31	111.46	0.00	-	-	-	-
07/30	5.56	4.29	0.00	2.18	2972.22	2296.72	0.00	1165.25	0.00	-	-	-	-
08/01	6.33	4.81	0.68	1.52	3384.28	2573.67	364.77	810.61	0.00	-	-	-	-
08/10	1.73	1.39	0.00	0.00	923.19	743.06	0.00	0.00	0.00	-	-	-	-
08/14	3.98	2.78	0.55	0.28	2127.84	1489.49	293.84	151.99	0.00	-	-	-	-
08/17	3.33	2.93	0.29	0.10	1783.33	1567.17	155.37	54.04	0.00	-	-	-	-
08/21	3.09	2.08	0.33	0.10	1651.61	1114.58	177.32	55.73	0.00	-	-	-	-
08/28	2.27	1.71	0.38	0.26	1215.91	914.83	202.65	137.51	8774.44	0.14	0.10	0.02	0.02
Average	4.13	3.01	0.41	0.50	2209.30	1612.85	221.08	265.63	866.41	12.49	7.56	2.85	0.60
Standard deviation	1.75	2.08	0.40	0.55	936.45	1112.86	215.97	296.59	1894.79	23.90	14.29	8.34	1.20

보이는 것을 알 수 있다.

한편, 오송지와 인접한 주변 연못에서의 지하수 지표수 상호유동량에 대한 비교를 통해 각 연못의 환경에 따른 지하수 유출입량에 대한 비교 평가가 가능하므로, 이전 연구인 Jo and Jeon (2018)의 연구에서의 지하수 유출입량과의 비교 분석을 하였다. 비

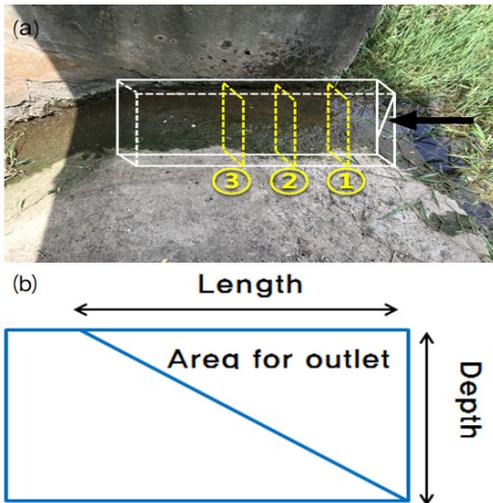


Fig. 3. Location for measuring surface water outflow rate at the outlet of Osongji (a); schematics for calculating the cross sectional area for outflow at the outlet of Osongji (b).

교대상인 주변의 덕진연못의 결과(그림 5)를 보면 덕진연못에서 시피지미터로 측정된 단위면적당 지하수 평균 유출입량은 $-0.757 \text{ L/m}^2\text{d} \sim +0.909 \text{ L/m}^2\text{d}$ 이며, 강수량과 지하수 유입량은 대체로 비례하였다 (Jo and Jeon, 2018). 오송지와는 대조적으로 강수 후 지하수 유입량은 비교적 즉각적인 반응을 보였다. 오송지에서 시피지미터로 측정된 단위면적당 지하수 평균 유입량은 $+0.41 \text{ L/m}^2\text{d} \sim +4.13 \text{ L/m}^2\text{d}$ 로 덕진연못에 비해 약 5배 이상 많았다. 덕진연못의 최대 유입량인 $+1.82 \text{ L/m}^2\text{d}$ 를 오송지의 결과와 함께 도시하면(그림 4), 덕진연못의 최대 유입량은 1, 2 지점의 측정값 보다는 낮고 3, 4 지점의 측정값 보다는 높게 나타났다. 또한 덕진연못은 음(-)의 값을 보이는 지표수의 유출도 나타나지만, 오송지는 전부 양(+)의 값을 보이며 지표수로부터 지하수로의 유출이 나타나지 않았다.

또한 오송지는 강수에 대해 지하수의 유입량이 약 1달 정도의 기간 후 점진적으로 변화하는 반면에 덕진연못은 비교적 즉각적인 반응을 보였으며, 이는 각 수계에서 주변의 환경에 따라서 강수가 땅으로 스며들고 다시 지표수로 나오는 시간이 다르다는 것을 보여준다(Choi et al., 2014). 오송지와 덕진연못의 단위 면적당 지하수 유출입량 비교 결과는 오송지 유역내에 내린 강수가 온전히 자연배수의 형태로 오송지로

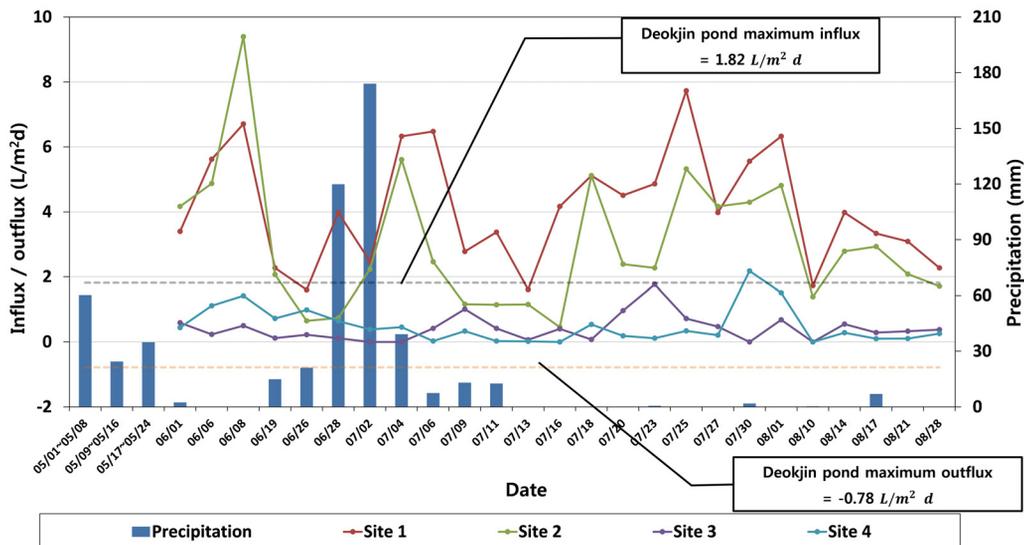


Fig. 4. Groundwater influx/outflux and precipitation at Osongji in May ~ August, 2018 in comparison with the maximum influx/outflux of Deokjin pond measured in 2017 (after Jo and Jeon, 2018).

유입되어 집수구역에 비해 저수량이 크며 따라서 수생태 환경문제가 나타나지 않는다고 설명한 Choi, S.-H. *et al.* (2015b)의 결과와도 부합한다.

3.2 오송지의 지하수 유입량과 지표수 유출량 비교

오송지 유출구에서의 지표수 유출량은 유속계로 측정된 선속도와 단면적을 곱하여 구하였다. 측정기간 중인 7월 8일 자료를 예(표 3)로 들면, 3개의 지점(그림 3)의 길이, 깊이, 유속을 측정하면 측정 당시의 평균 길이는 1.90 m, 평균 깊이는 0.09 m, 따라서 평균 면적은 0.0855 m²이 나오며, 평균 유속은 0.37 m/s로 나타난다. 따라서 지표수 유출량을 계산하면 0.0855 m² × 0.37 m/s × 86400 s/d = 2733.26 m³/d값을 얻을 수 있다. 이러한 방식으로 계산된 지표수 유출량은 32~8774 L/d로 시기별로 큰 편차를 보였으며, 측정기간 중의 평균 유출량은 866 L/d였다(표 2).

한편, 시피지미터로 측정된 단위면적당 지하수 유입량과 오송지의 집수구역 면적을 곱하여 구한 총 지하수 유입량은 4개 지점별로 차이가 나며, 각 지점별 평균은 1, 2, 3, 4 지점이 각각 936 L/d, 1112 L/d, 215 L/d, 296 L/d 였다(표 2). 이에 따라 오송지의 각 지점별 지하수 유입량으로 계산된 오송지의 총 지하수 유입량과 지표수 유출량 비는 4개의 지점 순서대로 12.79, 7.56, 2.46, 0.60 이었다(표 2). 이 결과는 강수와 증발 등 다른 변수를 고려하지 않았을 때, 오송지에서 한 지점에서의 지하수 유입량을 근거로 계산된 값을 제외하고는 대체적으로 측정된 지하수 유입량이 지표수 유출량보다 많음을 의미한다.

그림 6은 오송지의 물 순환 시스템을 모식화한 것이다. 오송지의 물 순환을 간단한 식(식 3)으로 표현을 하면, 지표수 유입(S_{in})과 지하수 유입(G_{in}), 그리고 강수량(P)의 합은 지표수 유출(S_{out})과 지하수 유출(G_{out}), 그리고 증발(E)의 합과 같다.

Table 3. An example for calculating cross sectional area for surface water outflow at the outlet of Osongji measured on July 8, 2018 (from Fig. 3), along with the linear velocity of surface water.

	Site ①	Site ②	Site ③
Length (m)	2.05	1.9	1.75
Depth (m)	0.10	0.09	0.08
Linear velocity (m/s)	0.3	0.4	0.4

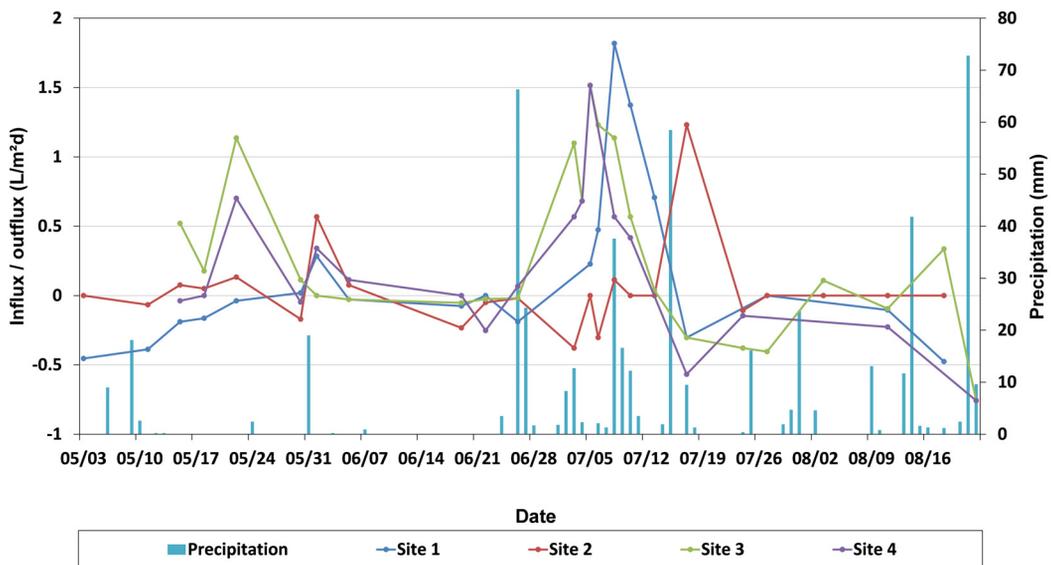


Fig. 5. Groundwater influx/outflux and precipitation of Deokjin pond in May ~ August, 2017 (after Jo and Jeon, 2018).

$$S_{in} + G_{in} + P = S_{out} + G_{out} + E \quad (3)$$

S_{in} = Surface water in flow

G_{in} = Groundwater in flux

P = Precipitation

S_{out} = Surface water out flow

G_{out} = Groundwater out flux

E = Evaporation

본 연구에서는 지표수 유입(S_{in}) 및 강수(P)와 증발(E)을 고려하지 않기 때문에, 지하수 유입(G_{in})은 지표수 유출(S_{out})과 지하수 유출(G_{out})의 합과 같다고 가정할 수 있다(식 4).

$$G_{in} = S_{out} + G_{out} \quad (4)$$

만일 지하수 유출(G_{out})이 없다면, 지하수 유입(G_{in})은 지표수 유출(S_{out})과 같다고 할 수 있다(식 5).

$$G_{in} = S_{out} \quad (5)$$

하지만, 표 2에서 계산된 각 지점별 지하수 총 유입량 대비 지표수 총 유출량의 비는 강수와 증발 등 다른 변수를 고려하지 않았다고 하더라도 비교적 큰 차이를 보이고 있는데, 이에 대해 다음과 같은 요인을 생각해 볼 수 있다.

첫째, 시피지미터를 통한 지하수 유출입량 측정 자체의 정확성에 대한 불확실성이 존재한다. 시피지미터의 호수 바닥면과의 밀착 여부와 채집봉투 연결부

분의 저항성이 오차에 기여했을 수 있다(Belanger and Montgomery, 1992).

둘째, 이번 연구에서는 오송지 상류의 4개 지점에서만 측정을 하였으므로 호수 전체의 유입량을 제대로 반영하지 못했을 수 있다. 시피지미터를 이용한 지하수 유입량 측정의 근본적인 한계일 수 있으나 호수 전체의 물 수지를 파악하는 데 있어 단서를 제공하는 점은 유용하다고 판단된다.

셋째, 지표수 유출량 측정 또한 불확성이 존재한다. 지표수 유출구의 기하학적 구조가 일정하지 않으므로, 지표수 유출량을 측정할 때 지표 유출수의 선속도와 유출구 단면적 계산에 있어서 오차가 있을 수 있다. 또한 지하수의 유입량은 몇일 동안의 평균량임에 반해 지표수 유출량은 측정시점의 순간 선속도와 단면적을 고려하였기 때문에 차이가 발생할 수 있다.

마지막으로, 지하수 유입량과 지표수의 유출량 비의 값을 구할 때, 강수량과 증발량을 고려하지 않았다. 물 순환에 있어서 강수량과 증발량이 수계에 많은 영향을 줄 수 있기 때문에(Lee, J.H. et al., 2015), 향후 이에 대한 보정이 고려되어야 할 것이다.

4. 결론

물 순환에 있어서 지하수와 지표수의 상호 작용에 대한 연구에 대한 중요성이 증대되고 있다. 지하수-지표수 상호작용 연구를 위해서는 지하수의 유출입량에 대한 정보가 중요하지만, 지하수 유출입량을 직접 측정한 사례는 지금까지 국내에서 거의 드물었다. 본 연구에서는 자체 제작한 시피지미터를 이용하여 전주시 오송지에서 지하수 유출입량을 측정

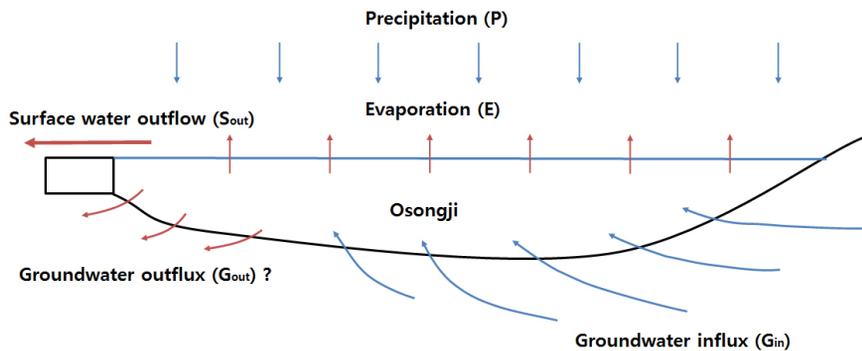


Fig. 6. Conceptual hydrologic circulation system of Osongji.

하고 유속계를 이용하여 오송지 지표수 출구지점에서 측정된 지표수 유출량과의 비교를 통하여 오송지의 물수지에 대한 분석을 실시하였다.

전주시 오송지의 상류 부분에서 4개의 시피지미터를 이용하여 측정한 단위면적당 지하수 유출입량은 0.41 L/m²d~4.13 L/m²d로 지하수의 유입을 지지하였으며, 측정지점에서는 지하수의 유입만이 있음을 보여주었다. 또한 시피지미터를 설치한 장소에 따라 지하수의 유입량의 차이가 있음을 보여주었다. 인근의 덕진연못의 지하수 유입량과 비교했을 때, 오송지의 단위면적당 지하수 유입량이 약 5배 정도 많았다. 또한 덕진연못에서는 동일 지점에서도 지하수의 지표수로의 유입 외에도 지표수에서 지하수로의 유출도 있었지만 오송지의 측정지점에서는 유입만 있고 유출이 일어나지 않음을 알 수 있었다. 이는 오송지가 자연배수 시스템으로 주위 집수구역에서 충전된 강수가 고스란히 지하수로 유입됨을 의미한다.

오송지의 지하수와 지표수 관계를 비교해 보면 강수와 증발 등 다른 변수를 고려하지 않았을 때 지하수 유입량이 지표수 유출량보다 대체적으로 많았다. 보다 정확한 물수지 분석을 위해서는 연구에 사용된 시피지미터의 정확도 검증과 오송지의 위치에 따른 지하수 유출입량 차이, 지표수 유출량 측정의 불확실성, 그리고 강수량과 증발량 등의 고려가 필요하다.

본 연구는 물 순환 연구에 있어서 시피지미터를 이용한 지하수 유출입량에 대한 직접적인 측정이 물수지 분석과 지하수-지표수의 상호 관계 이해에 기여할 수 있음을 보여준다. 국내에서 직접 측정법에 대한 연구사례가 많지 않았으므로 한 지역에서의 실제 지하수 유출입량 측정값을 제시하였다는 것에 의미가 있다고 생각한다. 불확실성에 대한 검증과 측정방법에 대한 보완을 한다면 시피지미터를 이용한 지하수와 지표수 상호작용 평가에 대한 활용도가 증대될 것으로 생각된다. 또한 다른 지하수 기여도 평가 방법과의 비교를 통해서 개별 방법간의 상호검증에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2016R1D1A1A02937479)과 극지연구소 국내 학·연

극지연구진흥프로그램 사업(PE19900)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, S.-S., Lee, B.-C., Choi, Y.-Y. and Park, D.-I., 2009, Analysis of characteristics of groundwater movement on pumpage using a combined surface flow and groundwater. *Journal of Korean Society of Water Science and Technology*, 17, 127-139 (in Korean with English abstract).
- Bae, S.K. and Lee, S.H., 2008, Interaction between groundwater and surface water in urban area. *Journal of Korea Water Resources Association*, 41, 919-927 (in Korean with English abstract).
- Belanger, T.V. and Montgomery, M.T., 1992, Seepage meter errors. *Limnology and Oceanography*, 37, 1787-1795.
- Berg, S.J., Grosso, N.R., Sherrier, M.P., Mudrick, K., Ohr, M., Hwang, H.-T., Park, Y.-J., Callaghan, M.V., Frey, S.K. and Sudicky, E.A., 2019, Natural stimuli calibration with fining direction regularization in an integrated hydrologic model. *Ground Water*, 57, 21-35.
- Choi, S.-H., Kim, S.-H. and Kim, K., 2015a, Assessment for the possibility of water-ecosystem restoration applying LID techniques in the Deokjin Park Area, Jeonju City. *Economic and Environmental Geology*, 48, 470-499 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.-H., Kim, S.-H., Lee, J.W., Kim, K. and Oh, C.H., 2015b, A study on obtaining waters to restore the water-ecosystem of Deokjin Pond in Jeonju: New paradigm for restoration of urban reservoirs. *Economic and Environmental Geology*, 48, 467-475 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.-H., Kim, K. and Moon, S.-H., 2016, Calculation of rainwater and groundwater fraction in sewerage: A case study in Deokjin Park, Jeonju. *Economic and Environmental Geology*, 49, 361-370 (in Korean with English abstract).
- Choi, Y.H., Kum, D., Ryu, J., Jung, Y., Kim, Y.S., Jeon, J.H., Kim, K.S. and Lim, K.J., 2015, A study of total nitrogen pollutant load through baseflow analysis at the watershed. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31, 55-66 (in Korean with English abstract).
- Choi, Y.H., Park, Y.S., Ryu, J., Lee, D.J., Kim, Y.S., Choi, J. and Lim, K.J., 2014, Analysis of baseflow contribution to streamflow at several flow stations. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30, 441-451 (in Korean with English abstract).
- Han, J.H., Lim, K.J. and Jung, Y., 2016, A Study on relationship between streamflow variability and baseflow contribution in Nakdong River Basin. *Journal of the*

- Korean Society of Agricultural Engineers, 58, 27-38 (in Korean with English abstract).
- Hyun, Y., Kim, H., Lee, S.-S. and Lee, K.-K., 2011, Characterizing streambed water fluxes using temperature and head data on multiple spatial scales in Munsan stream, South Korea. *Journal of Hydrology*, 402, 377-387.
- Isiorho, S.A. and Meyer, J.H., 1999, The effects of bag type and meter size on seepage meter measurements. *Ground Water*, 37, 411-413.
- Jeon, H.-T. and Kim, G.-B., 2011, Evaluation of interactions between surface water and groundwater based on temperature, flow properties, and geochemical data. *The Journal of Engineering Geology*, 21, 45-55 (in Korean with English abstract).
- Jeon, W.-H., Lee, J.-Y., Cheong, W.-Y., Park, Y.-H., Oh, S.-H., Eum, D.-H. and Park, J.-Y., 2015, A multi-method approach revealing the groundwater-stream water interaction in the Inbuk stream, Korea. *Geosciences Journal*, 19, 325-340.
- Jeon, W.-H., Park, S., Lee, J.-Y., Lee, J.-S. and Cho, Y.-J., 2018, Evaluation of the groundwater and stream water interaction using metagenomics analysis in the hyporheic zone, Inje of Gangwon Province. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54, 293-300 (in Korean with English abstract).
- Jo, I.-H. and Jeon, S.-W., 2018, Measurement of groundwater-surface water exchange rates using seepage meters: A case study of Deokjin Pond in Jeonju-si. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54, 433-441 (in Korean with English abstract).
- Jung, Y.-Y., Koh, D.-C., Yoon, Y.-Y., Kwon, H.-I., Heo, J., Ha, K. and Yun, S.-T., 2019, Using stable isotopes and tritium to delineate groundwater flow systems and their relationship to streams in the Geum River basin, Korea. *Journal of Hydrology*, 573, 267-280.
- Kalbus, E., Reinstorf, F. and Schirmer, M., 2006, Measuring methods for groundwater - surface water interactions: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, 873-887.
- Kang, H.S. and Jun, S.M., 2016, Impact analysis of baseflow on river and ecosystem. *Proceedings of the Korea Water Resources Association Annual Conference*, 584-588 (in Korean).
- Kim, G., Yoon, J., Park, K., Baek, J. and Kim, Y., 2015, Quantification of Baseflow contribution to nutrient export from a agricultural watershed. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 29, 347-357 (in Korean with English abstract).
- Kim, H., Cho, S.-H., Lee, D., Jung, Y.-Y., Kim, Y.-H., Koh, D.-C. and Lee, J., 2015, Old water contributions to a granitic watershed, Dorim-cheon, Seoul. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 20, 34-40 (in Korean with English abstract).
- Kim, H., Cho, S.-H., Lee, D., Jung, Y.-Y., Kim, Y.-H., Koh, D.-C. and Lee, J., 2017, Influence of pre-event water on streamflow in a granitic watershed using hydrograph separation. *Environmental Earth Sciences*, 76:82, doi 10.1007/s12665-017-6402-6.
- Kim, H., Kaown, D., Mayer, B., Lee, J.-Y. and Lee, K.-K., 2018, Combining pyrosequencing and isotopic approaches to assess denitrification in a hyporheic zone. *Science of the Total Environment*, 631-632, 755-764.
- Kim, H., Lee, J.-Y., Lee, S.-S., Hyun, Y. and Lee, K.-K., 2011, Characterization of vertical temperature distribution in hyporheic zone. *Journal of Wetlands Research*, 13, 265-273 (in Korean with English abstract).
- Kim, H., Lee, J.-Y., Park, Y., Hyun, Y. and Lee, K.-K., 2014, Groundwater and stream water exchange revealed by water chemistry in a hyporheic zone of agricultural area. *Paddy and Water Environment*, 12, 89-101.
- 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, 525-535 (in Korean with English abstract).
- Kim, N.W., Lee, J., Chung, I.M. and Kim, C.H., 2012, Change of groundwater-streamflow interaction according to groundwater abstraction in a green house land. *Journal of Korea Water Resources Association*, 45, 1051-1067 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-J., Jung, W.-H. and Kim, G.-H., 2017, Needs for the management of baseflow in the vicinity of burial sites. *Journal of The Korean Society of Water and Wastewater*, 31, 219-228 (in Korean with English abstract). Korea Meteorological Administration, 2019, http://www.weather.go.kr/weather/climate/average_regional07.jsp#a2 (August 8, 2019).
- 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., 1977, A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries. *Limnology and Oceanography*, 22, 140-147.
- Lee, D.R. and Cherry, J.A., 1978, A field exercise on groundwater flow using seepage meters and minipiezometers. *Journal of Geological Education*, 27, 6-10.
- Lee, J.H., Han, Y., Koh, D.-C., Kim, S. and Na, U.-S., 2015, A review on the application of stable water vapor isotope data to the water cycle interpretation. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 20, 34-40 (in Korean with English abstract).

- Lee, J.W., Chun, S.G., Yi, M.J., Kim, N.W., Chung, I.-M. and Lee, M.H., 2015, Measurements of streambed hydraulic conductivity using drive-point piezometers and seepage meters in the upper reaches of Anseong stream. *The Journal of Engineering Geology*, 25, 413-420 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.C., Kim, H.Y., Kim, H.J., Han, J.H., Kim, S.J., Kim, J. and Lim, K.J., 2017, Analysis of baseflow contribution based on time-scales using various baseflow separation methods. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 59, 1-11 (in Korean with English abstract).
- Shin, K.-H., Kim, T.-H., Kim, D.-G., Bae, J.-S., Doe, J.-W. and Kim, G.-B., 2016, Analysis of groundwater flow in a riverside alluvial basin using temperature and water level data. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 493-500 (in Korean with English abstract).
- Stoliker, D.L., Repert, D.A., Smith, R.L., Song, B., LeBlanc, D.R., McCobb, T.D., Conaway, C.H., Hyun, S.P., Koh, D.-C., Moon, H.S. and Kent, D.B., 2016, Hydrologic controls on nitrogen cycling processes and functional gene abundance in sediments of a groundwater flow-through lake. *Environmental Science and Technology*, 50, 3649-3657.
- Woessner, W.W. and Sullivan, K.E., 1984, Results of seepage meter and mini-piezometer study, Lake Mead, Nevada. *Ground Water*, 22, 561-568.

Received : June 13, 2019

Revised : August 9, 2019

Accepted : August 9, 2019