

ORIGINAL ARTICLE

자유면 대수층에서 강우량에 따른 수리경사 계절 변동 분석 : 효교리

박경덕 · 강동환* · 조원기¹⁾ · 신인규²⁾ · 오윤영²⁾ · 김문수²⁾ · 김현구²⁾

부경대학교 지질환경연구소, ¹⁾온실가스종합정보센터, ²⁾국립환경과학원

Seasonal Variation of Hydraulic Gradient according to Rainfall in Unconfined Aquifer : Hyogyo-ri

Kyoung-deok Park, Dong-hwan Kang*, Won Gi Jo¹⁾, In-Kyu Shin²⁾, Yun-Yeong Oh²⁾, MoonSu Kim²⁾, Hyun-Koo Kim²⁾

Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

¹⁾*Greenhouse Gas Inventory and Research Center, Chungcheongbuk-do 28166, Korea*

²⁾*National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea*

Abstract

In this study, the hydraulic gradient was calculated using the groundwater level and rainfall observed in the Hyogyo-ri area for a year, and the change in the hydraulic gradient according to the rainfall was analyzed. It was found that the groundwater level increased as the rainfall increased in all groundwater wells in the research site, and the groundwater level rise decreased as the altitude of the groundwater well increased. The hydraulic gradient in the research site ranged from 0.016 to 0.048, decreasing during rainfall and increasing after the end of the rainfall. As the rainfall increased, the groundwater level rise in the low-altitude area was more than the high-altitude area, and the hydraulic gradient decreased due to the difference in groundwater level rise according to the altitude. Through this study, it was found that the influence of rainfall is dominant for the fluctuation of the hydraulic gradient in the unconfined aquifer.

Key words : Unconfined aquifer, Groundwater level, Rainfall, Hydraulic gradient

1. 서 론

지하수 유동은 물수지 계산 및 오염물질 거동을 분석하기 위해 필수적으로 고려되는 요소이다. 지하수 유동을 분석하기 위해서 가장 널리 사용되는 방식은 수치모델링(numerical modeling)을 이용한 분석이나, 지형과 지질이 복잡하고 지하수위의 변동이 큰 지역에서는 신뢰도가 낮다는 단점이 있다(Wang and Anderson, 1982). 우리나라의 지층은 불균질 이방성

대수층으로 구성되어 있는 경우가 많으며, 지형적으로도 산지의 비율이 높아 수치모델링을 통한 분석에 어려움이 있다(Chung et al., 1999). 대수층이 균질하지 않고 이방성이 높은 대수층을 대상으로 지구통계 기법(geostatistical method)을 이용한 방식이 사용되고 있으나, 이상치가 존재할 경우 평활화 효과(smoothing effect)에 의한 오차가 발생할 수 있다(Marinoni, 2003).

연구부지의 수리경사(hydraulic gradient)를 산정

Received 16 February, 2023; Revised 22 April, 2023;

Accepted 26 April, 2023

*Corresponding author : Dong-hwan Kang, Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

Phone : +82-51-629-7393

E-mail : dhkang@pknu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© 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.

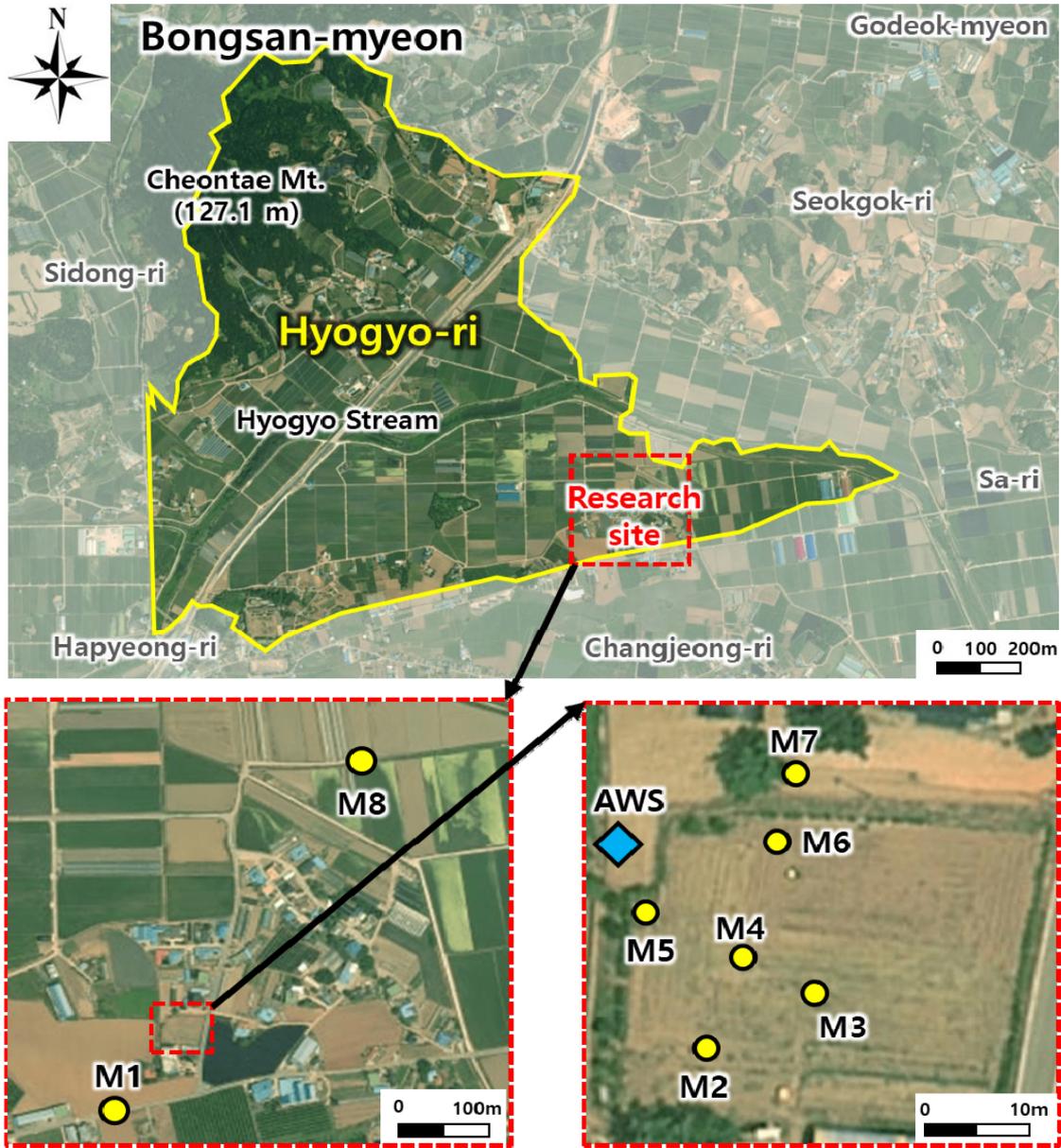


Fig. 1. Location map of research site and monitoring point.

하기 위해 평면방정식을 이용한 방식이 고안되었다 (Pinder et al., 1981; Abriola and Pinder, 1982; Cole and Silliman, 1996; Silliman and Mantz, 2005). 평면방정식을 이용한 방식은 임의의 지역에 위치한 3개 이상 관측공의 수위자료만을 이용하여

연구부지를 대표할 수 있는 수리경사를 산정할 수 있으며, 관측공의 개수가 많고 분포가 균일할수록 신뢰도 높은 값이 산정된다(Silliman and Frost, 1998; Devlin and McElwee, 2007). 평면방정식을 이용한 방식은 수치모델링이나 지구통계기법에 비해 계산

Table 1. Borehole depth and strata thickness in the research site

Well number	M1	M7	M8	
Elevation (m)	23.7	17.6	13.3	
Depth (m)	48.0	36.3	30.2	
Thickness (m)	Colluvium	2.4	4.4	-
	Alluvium	-	-	3.8
	Weathering soil	14.6	9.6	4.7
	Weathered rock	31.0	22.3	21.7

이 간단하여 스프레드시트 기반의 계산 프로그램으로도 제시되었다(Devlin, 2003; Devlin, 2015; Devlin and Schillig, 2016). 평면방정식을 이용한 방식은 지하수 흐름분석 뿐만 아니라 영양염류, 중금속, 유기오염물질 등의 거동 분석에도 사용된다(Wilkin et al., 2009; Messer et al., 2012; Zhang et al., 2013; Wilkin et al., 2014). 국내에서도 매립지 토양층에서 지하수위를 관측하고 수리경사를 산정함으로써 평지 지역의 지하수 흐름을 분석하였다(Kim et al., 2009).

본 연구에서는 효교리 마을에서 2020년 1월 1일부터 12월 31일까지 1개 지점의 AWS(자동기상관측소)와 8개 지점의 지하수공을 설치하여 강우량과 지하수위를 관측하였으며, 지하수위 자료를 이용하여 수리경사를 산정하고 강우의 영향에 의한 지하수위와 수리경사의 변동 특성을 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1. 연구부지 및 지하수위 관측

본 연구는 충청남도 예산군 봉산면 효교리 마을에서 수행되었으며, AWS 및 지하수공을 설치하여 강우량과 지하수위를 1년 동안 관측하였다(Fig. 1). 강우량은 1분 간격으로 지하수위는 10분 간격으로 측정하였으며, 관측 자료는 1개월마다 현장에서 수집하여 정리하였다. 지하수공은 8개이며 M1 지하수공은 해발고도 23.7 m에 위치하며, M8 지하수공의 해발고도는 13.3 m 정도이고, M2~M7 지하수공은 M1 지하수공과 M8 지하수공 사이에 위치하며 해발고도는 17.6~18.4 m 정도이고 지하수공 사이의 간격은 약 5 m 정도이다(Fig. 1).

연구부지 내 시추조사는 M1, M7, M8 지하수공에서

수행되었으며, 지층 구성의 두께는 붕적층 또는 충적층은 2.4~4.4 m, 풍화토는 4.7~14.6 m, 풍화암은 21.7~31.0 m 정도이고, 그 하부는 연암(기반암)으로 분포하고 있다(Table 1). 연구부지 내에서 지형 경사는 0.02 정도이며, M1 지하수공에서 M7 지하수공까지의 지형 경사는 0.04 정도로 급하고, M7 지하수공에서 M8 지하수공까지의 지형 경사는 0.015 정도로서 완만하였다.

2.2. 대수층의 수리경사 및 주흐름방향 산정 방법

본 연구에서의 대수층 수리경사 산정식은 Devlin (2003)이 제시한 방법을 사용하였으며, 동일 대수층에서 측정된 지하수면(groundwater table)이 평면이라는 가정하에서 x , y , z 축을 지나는 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$Ax + By + Cz - D = 0 \quad (1)$$

여기서 x 와 y 는 관측공의 위치, z 는 지하수위를 나타내며, 식 (1)로 표현된 평면과 x , y , z 축이 만나는 점은 각각 $P_1(D/A, 0, 0)$, $P_2(0, D/B, 0)$, $P_3(0, 0, D/C)$ 이다(Fig. 2 (a)).

관측공 사이의 수리경사를 구하기 위해서는 원점에서 점 $A(a, b, 0)$ 를 연결하는 벡터 \overrightarrow{OA} 의 길이가 필요하다. 벡터 \overrightarrow{OA} 의 길이는 벡터 \overrightarrow{OX} 에서 벡터 \overrightarrow{OY} 를 뺀 값인 벡터 \overrightarrow{OP} 를 통해서 구할 수 있는데, 이때 점 A 가 선분 P_1P_2 위에 위치하고 \overrightarrow{OP} 는 선분 P_1P_2 와 평행하므로, 벡터 \overrightarrow{OA} 는 벡터 \overrightarrow{OP} 에 수직이다(Fig. 2 (b)). 벡터 \overrightarrow{OA} 와 벡터 \overrightarrow{OP} 를 내적하면 0이 되므로, 식 (2)가 만들어진다.

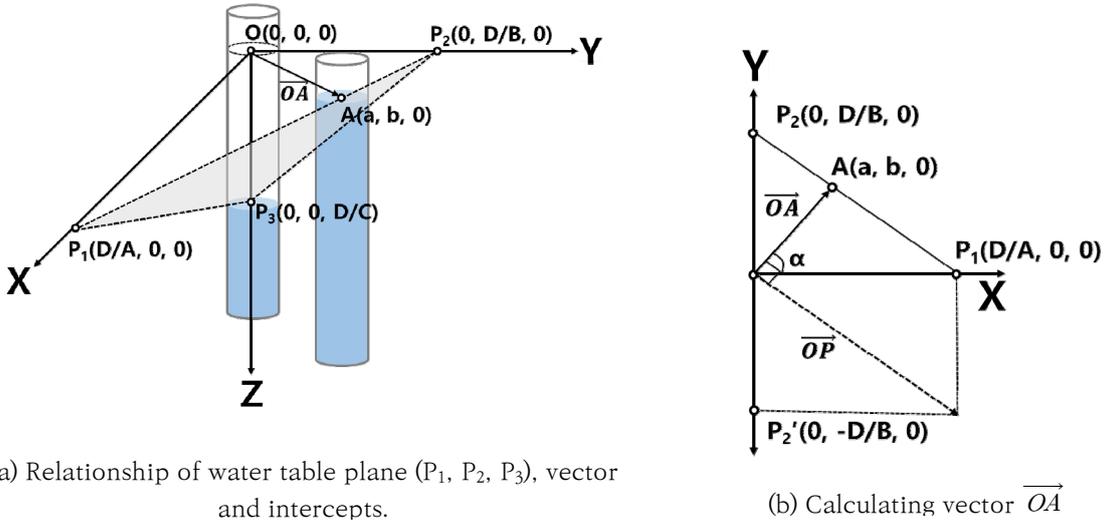


Fig. 2. Schematic diagrams for estimate of hydraulic gradient (Devlin, 2003).

$$\overrightarrow{OA} \cdot \overrightarrow{OP} = (a, b) \cdot \left(\frac{D}{A}, \frac{D}{B}\right) = \frac{aD}{A} - \frac{bD}{B} = 0 \quad (2)$$

이때 $b = \frac{aB}{A}$ 가 성립된다. 한편, 선분 P_1P_2 는 식 (3)으로 표현 가능하며, 식 (2)를 대입한 후 a 에 대해 각각 정리하면 식 (4)와 같다.

$$y = -\frac{A}{B}x + \frac{D}{B} \quad (3)$$

$$a = \frac{\frac{D}{B}}{\frac{A}{B} + \frac{B}{A}} = \frac{DA}{A^2 + B^2} \quad (4)$$

같은 방법으로 b 도 식 (5)와 같이 정리할 수 있다.

$$b = \frac{\frac{D}{A}}{\frac{A}{B} + \frac{B}{A}} = \frac{DB}{A^2 + B^2} \quad (5)$$

벡터 \overrightarrow{OA} 의 길이는 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$|\overrightarrow{OA}| = \sqrt{\left(\frac{DA}{A^2 + B^2}\right)^2 + \left(\frac{DB}{A^2 + B^2}\right)^2} \quad (6)$$

두 관측공의 수위 차는 D/C 로 표현할 수 있으므로, 지하수면의 경사는 식 (7)과 같다.

$$\text{Hydraulic gradient} = \sqrt{\frac{A^2 + B^2}{C^2}} \quad (7)$$

연구부지 내에서 3개 이상의 관측공을 이용하여 수리경사를 산정하는 경우에는 식 (8)과 같은 평면방정식(행렬식)을 적용한다.

$$[x \ y \ z] \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = [D] \quad (8)$$

식 (1)과 같은 평면방정식이 n 개 생성되었다고 가정하였을 때, n 개 평면방정식에 대한 x, y, z 값을 행렬 $[X]$ ($n \times 3$), 계수 A, B, C 값을 행렬 $[A]$ (3×1), 계수 D 값을 행렬 $[D]$ ($n \times 1$)라고 하면 n 개의 관측공을 대표할 수 있는 평면방정식은 행렬식인 식 (9)로 표현할 수 있다.

식 (9)를 다시 행렬 $[A]$ 에 관하여 정리하면 병렬식

$$\begin{pmatrix} Ax_1 + By_1 + Cz_1 = D_1 \\ Ax_2 + By_2 + Cz_2 = D_2 \\ Ax_3 + By_3 + Cz_3 = D_3 \\ \vdots \\ Ax_n + By_n + Cz_n = D_n \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \vdots \\ D_n \end{bmatrix} \Rightarrow [X][A] = [D] \quad (9)$$

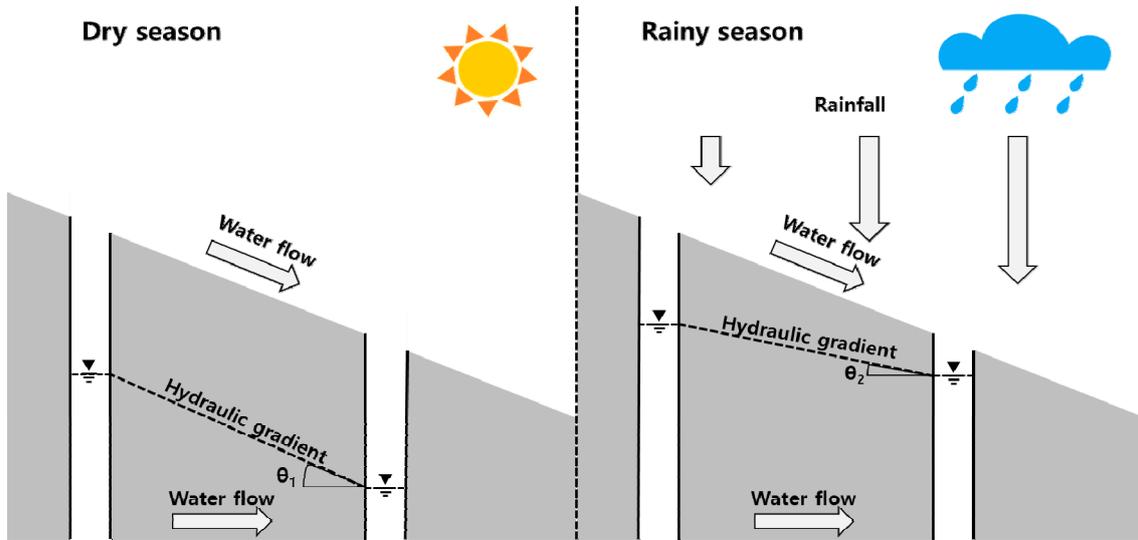


Fig. 3. Schematic diagrams of groundwater hydraulic gradient change according to rainfall.

선형회귀방정식의 형태인 식 (10)과 같이 표현할 수 있다(Snedecor and Cochran, 1991). 식 (10)은 지하수면을 표현할 수 있는 적합한 형태의 최소제곱방정식으로 유도될 수 있다(Hornbeck, 1975).

$$[A] = ([X]^t [X])^{-1} [X]^t [D] \quad (10)$$

여기서, $[X]^t$ 는 $[X]$ 의 전치행렬(transposed matrix), $[X]^{-1}$ 은 $[X]$ 의 역행렬(inverse matrix)이다. 행렬 $[D]$ 의 $D_1 \sim D_n$ 은 평면이 모두 평행하다는 가정하에서 동일한 경사를 가지므로, 모두 임의의 같은 값을 가진다. 식 (10)을 통해 산정된 계수 A, B, C 는 연구부지 내 지하수위 자료를 대표할 수 있는 평면방정식 계수가 된다.

2.3. 지형 고도와 강우에 의한 수리경사 변동

동일 수계의 자유면 대수층에서 2개의 지하수공이 설치된 경우, 지형 고도가 높은 지점과 낮은 지점에서의 지하수위 변동량은 강우 유무에 따른 차이를 보이고 수리경사가 변화하게 된다(Fig. 3). 일반적으로 지하수 흐름은 지형 경사에 지배적인 영향을 받는다(Hahn, 1998). 강우에 의한 지하수 유입량이 유사한 경우에도 지하수 흐름은 지형 고도가 높은 지역에서 낮은 지역으로 형성된다. 동일 수계에서 고도가 높은 고지대에서는 지형 경사를 따라 고도가 낮은 지대로 유출되므로 고도가 낮은 지대에서는 지하수 유입량이 더 많아진다. 강우가 발생하면 고도가 높은 지대보다 낮은 지대에서 지하수위 상승량이 많아지므로, 수계 전체의 지하수 수리경사는 완만하게 형성된다(Bosch et al., 1996).

3. 결과 및 고찰

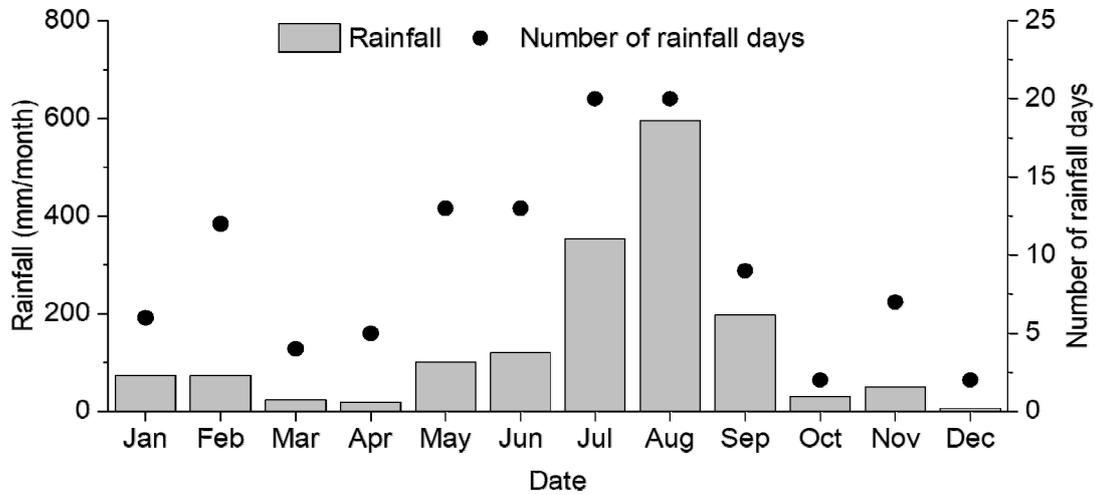


Fig. 4. Monthly accumulated rainfall and number of rainfall days in the research site.

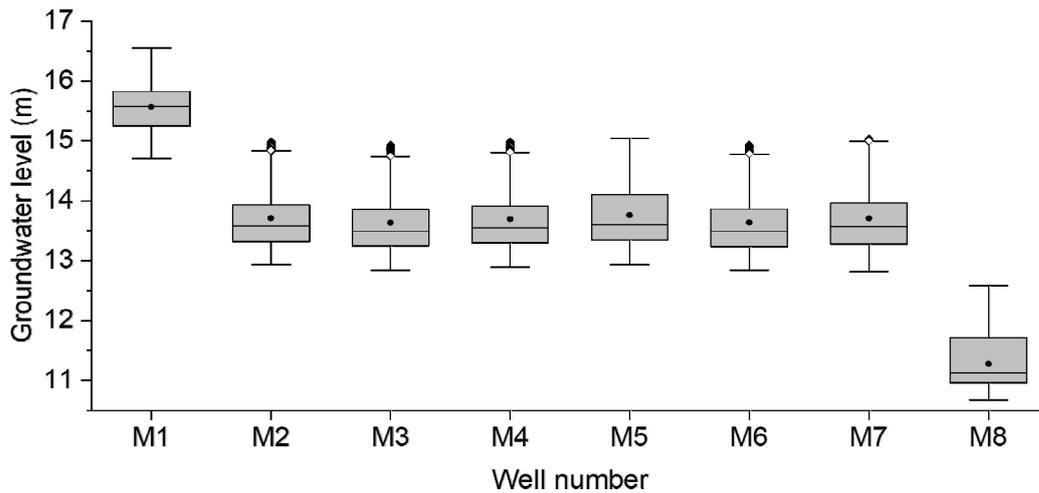


Fig. 5. Box whisker plots of groundwater level by well in the research site.

3.1. 강우와 지하수위 변동 분석

연구부지 내에서 관측된 연간 누적 강우량은 1636.6 mm 정도이고 강우 일수는 111일이었으며, 강우량은 5~9월에 많고 1~4월과 10~12월에 적었으며 강우 일수도 유사한 경향을 보였다(Fig. 4). 연구부지 내에 설치된 8개 지하수공별 지하수위는 M1에서 가장 높고 M8에서 가장 낮았으며, M2~M7의 지하수위는 M1과 M8의 중간 정도로 형성되었다(Fig. 5). 2020년 동안

관측된 지하수위는 M1에서 14.7~16.6 m (평균 15.6 m), M2~M7에서 12.8~15.0 m (평균 13.7 m), M8에서 10.7~12.6 m (평균 11.3 m) 정도이었다. 지형 고도가 높은 M1의 지하수위는 M2~M7 지역보다 2 m 정도 높고, 지형 고도가 낮은 M8의 지하수위는 M2~M7보다 2.4 m 낮게 형성되었다. 평지에 해당하는 M2~M7 지하수공들 사이의 지하수위 차는 0.1 m 정도로서 매우 유사한 값을 보였다. 지하수공별 연간 표준편차는 M1에서 0.47 m, M2~M7에서

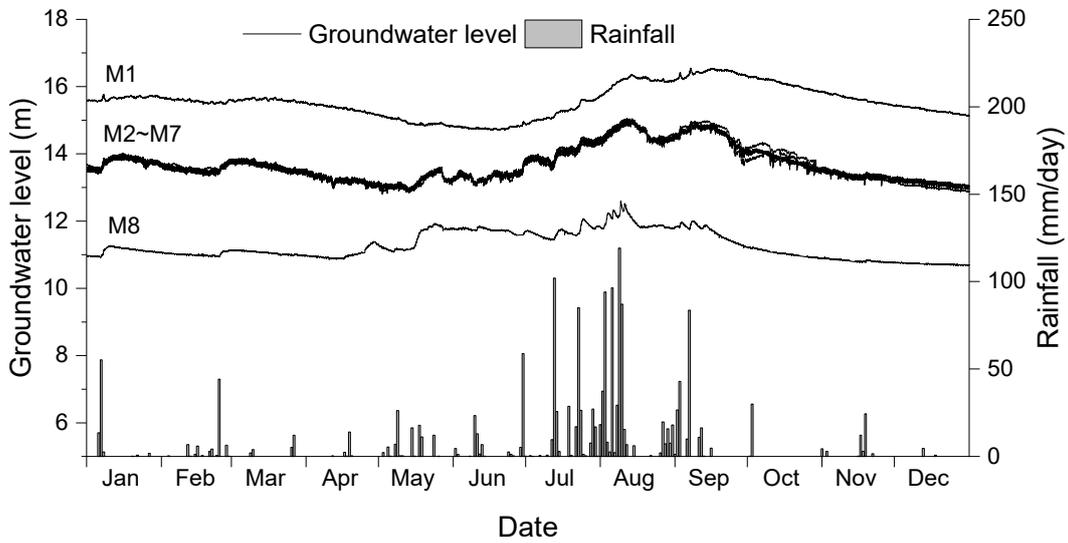


Fig. 6. Time series graphs of daily accumulated rainfall and groundwater level in the research site.

0.51~0.53 m, M8에서 0.54 m로 지형 고도가 높은 M1에서 연간 지하수위 변동 폭이 가장 작고 지형 고도가 낮아질수록 지하수위 변동 폭이 증가하였다.

연구부지 내에서 2020년 동안 관측된 강우량과 지하수위 자료의 시계열 그래프를 작성하였다(Fig. 6). 1월부터 4월까지의 강우 발생 시 지하수위가 일시적으로 상승하다가 하강하였으며, 강우량과 강우 일수가 증가하기 시작하는 5월부터 지하수위가 전체적으로 상승하면서 풍수기(8~9월)에 가장 높은 지하수위가 형성되었다. 풍수기가 종료되는 9월 말부터는 지하수위가 갈수기 수준으로 하강하였으며, 이 시기에는 소량의 강우가 발생하더라도 지하수위가 증가하지는 않았다. 강우에 의한 지하수위 변화는 지하수공의 위치에 따라 차이를 보였다. M1의 경우 단기간의 강우에는 지하수위 변화가 거의 없고 풍수기가 시작되는 7월부터 지하수위가 서서히 상승하였다. M1은 고지대에 위치하므로 강우 발생 시 유입된 지하수가 고도가 낮은 지역으로 유출되어 고도가 낮은 지하수공들에 비해 지하수위 상승 속도와 상승 폭이 크지 않았다. M2~M7의 경우 1월과 2월 강우 시 지하수위가 0.3 m 상승하였고, 5월 중순 8.2 mm의 강우량을 기록한 이후부터 지하수위가 서서히 상승하였다. M8은 5월의 강우 발생 시 지하수위가 급격히 상승한 후 풍수기 동안 12 m 정도의 높은 지하수위를 유지하다가 강우량이 감소하는 9월 중순부

터 지하수위가 하강하였다.

연구부지 내 8개 지하수공별 월평균 지하수위를 산정하였으며, 월 누적 강우량에 따른 월평균 지하수위의 회귀함수를 추정하였다(Fig. 7). 모든 지하수공에서 월 누적 강우량이 증가할수록 월평균 지하수위가 상승하는 것으로 나타났으며, 지하수공의 고도에 따라 지하수위가 상승하는 속도(기울기)가 다르게 나타났다. 고도가 가장 높은 M1에서는 월 누적 강우량과 월평균 지하수위 회귀함수의 결정계수가 0.0860 정도로서 다른 지하수공들에 비해 매우 낮았으며, 이는 M1에서는 강우에 의한 지하수위 영향성이 낮음을 의미한다. 고도가 낮은 M2~M7에서는 월 누적 강우량과 월평균 지하수위 회귀함수의 결정계수는 0.5214~0.5780 범위이고, M8에서는 0.6696으로 높았다. 고도가 낮을수록 월 누적 강우량에 대한 월평균 지하수위의 영향성이 높음을 알 수 있었다. 본 연구부지 내에서 M1은 고도가 가장 높아서 강우가 발생하면 강우에 의한 지하수 유입량이 증가하고 동시에 고도가 낮은 지역으로의 지하수 유출량이 증가하므로 실제적인 지하수 상승량은 강우량에 의한 유입량보다 적다. 고도가 낮으면서 평지에 해당하는 M2~M9에서는 강우에 의한 지하수 유입량과 고도가 높은 지역에서 유입되는 지하수의 양이 동시에 증가하므로 지하수위 상승량이 강우량에 의한 유입량보다 많다(Hahn, 1998).

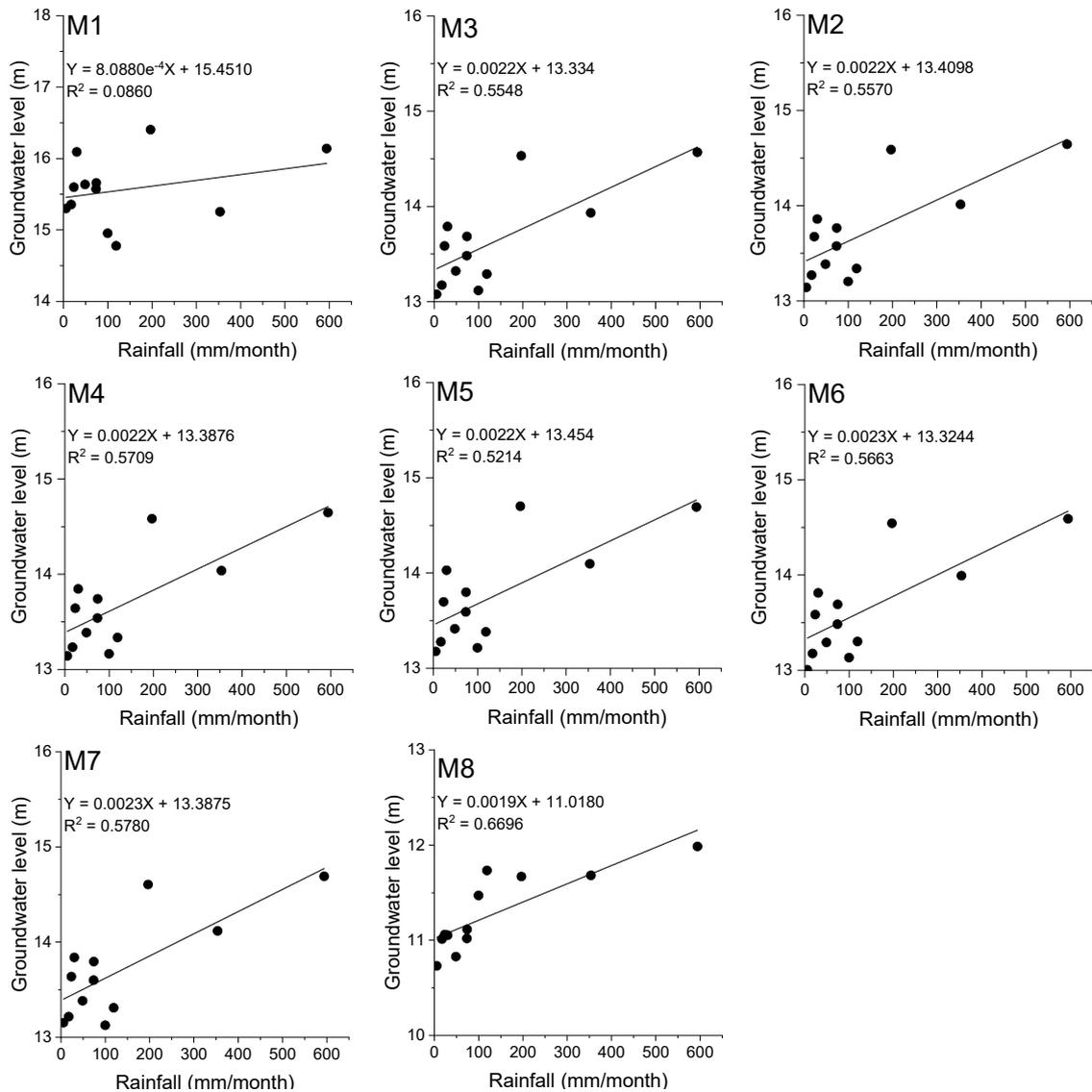


Fig. 7. Regression functions of monthly average groundwater level according to monthly accumulated rainfall by well.

3.2. 강우에 따른 지하수 수리경사 변동 분석

연구부지 내 관측공들의 지하수위 자료를 Devlin (2003)이 제시한 방법에 적용하여 월별 수리경사를 산정하였으며, 본 연구부지 내 수리경사는 0.016~0.048의 범위로 나타났다(Fig. 8). 월별 수리경사는 1~4월에 0.03~0.04의 값을 유지하다가 강우 일수와 강우량이 증가하기 시작하는 5월부터 낮아지기 시작하였고,

7월에 최저값에 도달하였다가 8월부터 서서히 높아지면서 10월부터 다시 0.04에 도달하여 12월까지 0.03~0.04의 값을 유지하였다. 계절별로 보면 봄, 가을, 겨울에는 높은 수리경사를 형성하고 여름에는 수리경사가 낮아지는 경향을 보였다.

연구부지 내에서 1년 동안의 수리경사와 강우량을 시계열 그래프로 비교 분석하였다(Fig. 9). 갈수

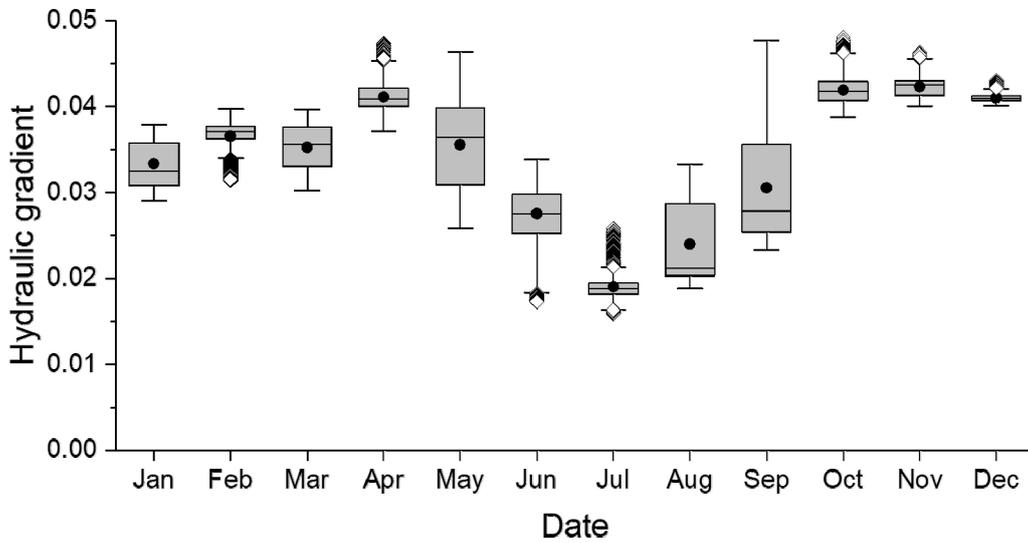


Fig. 8. Box whisker plots of hydraulic gradient by monthly in the research site.

기인 10~12월 동안의 수리경사는 약 0.04 정도로 형성되었으며, 1~2월에는 강우 발생 이후의 수리경사가 일시적으로 낮아지고, 강우량이 감소한 3~4월에 수리경사가 서서히 높아졌다. 5월부터는 강우량이 증가하면서 수리경사가 낮아지는 경향을 보였으며, 7월 초에는 수리경사가 최저값(0.016)에 도달하고 강우량이 가장 많았던 8월 중순까지 0.02 정도의 수리경사를 형성하였다. 9월부터는 강우량이 감소하면서 수리경사가 증가하였으며, 10~12월 동안 수리경사는 0.04 정도로 형성되었다. 본 연구부지 내 수리경사는 강우량에 따라 수리경사가 변동하였으며, 기존의 연구에서도 강우량이 많은 풍수기에는 수리경사가 낮아지고 갈수기에는 수리경사가 높아지는 경향을 보였다(Bosch et al., 1996).

월 누적 강우량에 따른 월평균 수리경사 회귀함수를 작성하였으며, 강우량이 증가할수록 월평균 수리경사가 낮아지는 경향을 보였다(Fig. 10). 본 연구부지 내 월 누적 강우량에 따른 월평균 수리경사 회귀함수의 결정계수는 0.6494 정도로 높았으며, 기울기는 음의 값으로서 월 누적 강우량이 증가할수록 월평균 수리경사는 낮아지는 경향을 보였다. 본 연구부지 내 수리경사는 강우에 의해 지배적인 영향을 받고 있으며, 강우량이 증가할수록 수리경사는 낮아지는 경향을 보였다. 동일 수계에서 강우 발생 시 지하수위는 고도가

높은 지역에서는 천천히 상승하고 고도가 낮은 지역에서는 빠르게 상승하므로 고도가 높은 지역과 낮은 지역의 지하수위 차가 감소하여 수리경사가 낮아졌다(Bosch et al., 1996).

4. 결론

본 연구부지 내에서 1년 동안 관측된 지하수위는 M1 지하수공에서 14.7~16.6 m, M2~M7 지하수공에서 12.8~15.0 m, M8 지하수공에서 10.7~12.6 m의 범위로 나타났다. 모든 지하수공에서 강우 발생 시 지하수위가 증가하였으며, 고도가 높은 지역에서 낮은 지역으로 갈수록 강우 발생 시 지하수위 상승량이 많았다. 강우 발생 시 고도가 높은 M1 지하수공에서는 고도가 낮은 지역으로 지하수가 유출되어 지하수위 상승량이 상대적으로 적었으며, 고도가 낮은 M2~M8 지하수공에서는 고도가 높은 지역에서 지하수가 유입되어 지하수위 상승량이 고도가 높은 지역(M1)에 비해 상대적으로 많았다.

연구부지 내에서 수리경사는 0.016~0.048의 범위를 보였으며, 1~4월에는 수리경사가 0.03~0.04 정도로서 높고, 5월부터 수리경사가 낮아지면서 7월에 최저값에 도달하고, 9월부터 서서히 높아지면서 10~12월 동안 0.04 정도의 수리경사를 형성하였다. 본 연구부지

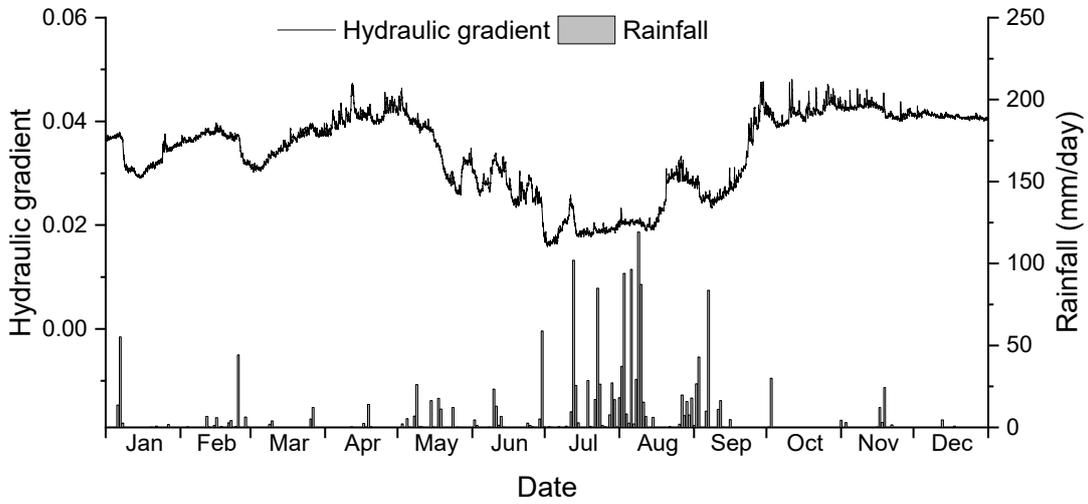


Fig. 9. Time series graphs of daily accumulated rainfall and hydraulic gradient in the research site.

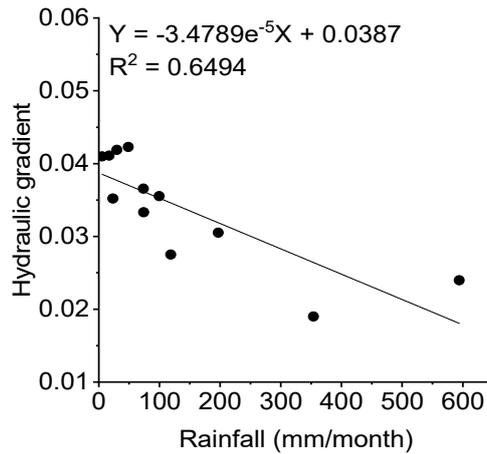


Fig. 10. Regression function of monthly average hydraulic gradient according to monthly accumulated rainfall in the research site.

내 지하수의 수리경사는 봄, 가을, 겨울에 높고 여름에 낮은 경향을 보였다.

월 누적 강우량에 따른 월평균 수리경사 회귀함수를 작성하였으며, 강우량이 증가할수록 월평균 수리경사가 낮아지는 경향을 보였다. 본 연구부지 내 수리경사는 강우에 의해 지배적인 영향을 받고 있으며, 강우량이 증가할수록 수리경사는 낮아지는 경향을 보였다. 동일 수계에서 강우 발생 시 지하수위는 고

도가 높은 지역에서는 천천히 상승하고 고도가 낮은 지역에서는 빠르게 상승하므로 고도가 높은 지역과 낮은 지역의 지하수위 차가 감소하여 수리경사가 낮아졌다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 농축산지역 지하수 중 질산성질소 수질관리 개선사업(V)의

지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2020-04-02-052).

본 논문은 “2021년도 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터 사업(2021R1A6C101A415)”의 지원을 받아 수행하였습니다.

REFERENCES

- Abriola, L. M., Pinder, G. F., 1982, Calculation of velocity in three space dimensions from hydraulic head measurements, *Groundwater*, 20, 205-213.
- Bosch, D. D., Sheridan, J. M., Lowrance, R. R., 1996, Hydraulic gradients and flow rates of a shallow coastal plain aquifer in a forested riparian buffer, *Trans. ASAE*, 39, 865-871.
- Chung, S. Y., Yoo, I. K., Yoon, M. J., Kweon, H. W., Heo, S. H., 1999, Application of geostatistical methods to groundwater flow analysis in a heterogeneous anisotropic aquifer, *J. Eng. Geol.*, 9, 147-159.
- Cole, B. E., Silliman, S. E., 1996, Estimating the horizontal gradient in heterogeneous, unconfined aquifers: Comparison of three-point schemes, *Groundwater Monit. Remediat.*, 16, 84-91.
- Devlin, J. F., 2003, A Spreadsheet method of estimating best-fit hydraulic gradients using head data from multiple wells, *Groundwater*, 41, 316-320.
- Devlin, J. F., McElwee, C. D., 2007, Effects of measurement error on horizontal hydraulic gradient estimates, *Groundwater*, 45, 62-73.
- Devlin, J. F., 2015, HydrogeoSieveXL: an Excel-based tool to estimate hydraulic conductivity from grain-size analysis, *Hydrogeol. J.*, 23, 837-844.
- Devlin, J. K., Schillig, P. C., 2016, Hydrogeo Estimator XL: an Excel-based tool for estimating hydraulic gradient magnitude and direction, *Hydrogeol. J.*, 25, 867-875.
- Hahn, J. S., 1998, *Groundwater Environment and Pollution*, Pakyoungsa, Seoul, Korea, 1011.
- Hornbeck, R. W., 1975, *Numerical methods*, Quantum Publishers, New York, USA, 310.
- Kim, T. Y., Kang, D. H., Kim, S. S., Kwon, B. H., 2009, Variation characteristics of hydraulic gradient and major flow direction in the landfill soils, *J. Environ. Sci. Int.*, 18, 315-323.
- Marinoni, O., 2003, Improving geological models using a combined ordinary-indicator kriging approach, *Eng. Geol.*, 69, 37-45.
- Messer, T. L., Burchell II, M. R., Grabow, G. L., Osmond, D. L., 2012, Groundwater nitrate reductions within upstream and downstream sections of a riparian buffer, *Ecol. Eng.*, 297-307.
- Pinder, G. F., Celia, M., Gray, W. G., 1981, Velocity calculation from randomly located hydraulic heads, *Groundwater*, 19, 262-264.
- Silliman, S. E., Frost, C., 1998, Monitoring hydraulic gradient using three-point estimator, *J. Environ. Eng.*, 124, 517-523.
- Silliman, S. E., Mantz, G., 2005, The effect of measurement error on estimating the hydraulic gradient in three dimensions, *Groundwater*, 38, 114-120.
- Snedecor, G. W., Cochran, W. G., 1991, *Statistical methods*. 8th Edition, Wiley Blackwell USA, 503.
- Wang, H. F., Anderson, M. P., 1982, *Introduction to groundwater modeling: Finite Difference and finite element methods*, Academic Press, London, UK, 237.
- Wilkin, R. T., Acree, S. D., Ross, R. R., Beak, D. G., Lee, T. R., 2009, Performance of a zerovalent iron reactive barrier for the treatment of arsenic in groundwater: Part 1. Hydrogeochemical studies, *J. Contam. Hydrol.*, 106, 1-14.
- Wilkin, R. T., Acree, S. D., Ross, R. R., Puls, R. W., Lee, T. R., Woods, L. L., 2014, Fifteen-year assessment of a permeable reactive barrier for treatment of chromate and trichloroethylene in groundwater, *Sci. Total Environ.*, 468-469, 186-194.
- Zhang, Y., Cao, W., Wang, W., Dong, Q., 2013, Distribution of groundwater arsenic and hydraulic gradient along the shallow groundwater flow-path in Hetao Plain, Northern China, *J. Geochem. Explor.*, 135, 31-39.

-
- Full-time Researcher. Kyeong-Deok Park
Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University
godsla6593@nate.com
 - Ph.D. Dong-Hwan Kang
Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University
dhkang@pknu.ac.kr
 - Associate Researcher. Won-Gi Jo
Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea
girwg@korea.kr
 - Researcher. In-Kyu Shin
National Institute of Environmental Research
sik5932@korea.kr
 - Environmental Researcher/Ph.D. Yun-Yeong Oh
National Institute of Environmental Research
magojina@korea.kr
 - Senior Researcher/Ph.D. Moon-Su Kim
National Institute of Environmental Research
hyd009@korea.kr
 - Director/Ph.D. Hyun-Koo Kim
National Institute of Environmental Research
khk228@korea.kr