

퇴적환경, 하천 수위 및 지하수 양수에 따른 수변지역 천부 지하수의 수위와 수질 변동

차은지 · 이승현 · 김규범*

한국수자원공사 K-water연구원

요 약

낙동강 지류인 신천-백천 유역내의 하류(A 지역)와 상류(B 지역) 분지는 퇴적환경과 대수층의 수리적 특성이 상이하여 보 건설 이후 낙동강 수위 상승에 의한 천부 지하수위 및 수질 변동에도 차이를 보인다. A 지역은 투수성이 낮은 세립질 퇴적층으로서 양수시에는 수위 강하가 뚜렷하나, 폐쇄형 분지 형태로서 담수 이후 상승된 지하수의 배출이 어려워 지하수위가 높아진 상태로 유지되며, 일부 음이온 함량의 증가가 나타나 하천수의 유입 또는 혼합을 의미한다. 반면에, B 지역은 조립질 퇴적층으로 지하수위가 A 지역에 비하여 높고 양수에 의한 변동도 작으며 담수 이후 하천수 혼합에 의한 수질 변동이 적은 편이다. 이와 같이 하천수위 변동시 수변지역에서의 지하수위 및 수질 변화가 발생하며, 퇴적분지의 형태와 구성 및 양수 조건 등에 따라 하천수와 지하수의 상호 작용에 차이가 존재하는 것으로 나타났다.

주요어: 하천수위, 지하수, 퇴적환경, 양수

Eun-Jee Cha, Seung-Hyun Lee and Gyoo-Bum Kim, 2015, Changes in shallow groundwater levels and hydro-chemistry according to depositional environment, river water level and groundwater pumping in the riversides. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 1, p. 67-80

ABSTRACT: Two small basins (lower area “A” and upper area “B”), which are located in the Sincheon-Baekcheon watershed, show differences in the changing pattern of shallow groundwater levels and quality due to a various depositional environment and aquifer hydraulic features, after damming at the barrage in the Nakdong river. Groundwater levels in the zone “A” show a remarkable and sharp fall when groundwater pumping because of a fine-grained sediment composition with a low permeability. This closed-type basin does not facilitate groundwater discharge into the river during keeping high level and therefore shallow groundwater levels should be maintained. Increased contents of anion in groundwater after damming also indicates the inflow or mixture of surface water in this zone. However, the zone “B” shows shallow groundwater levels and small fluctuation due to coarser deposits, and little change in groundwater quality despite of damming. This indicates that groundwater levels and quality in the riversides are influenced by the basin shape, sediment composition and groundwater pumping condition due to an interaction between river water and groundwater.

Key words: River water level, Groundwater, Depositional environment, Pumping

(Eun-Jee Cha, Seung-Hyun Lee and Gyoo-Bum Kim, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Republic of Korea)

1. 서 론

지하수와 지표수는 하나의 수자원으로서, 지하수와 하천수의 상호 작용은 두 시스템간의 연결성을 이해함으로써 파악할 수 있다. 지하수위의 상승은 기저유출을 통한 하천수위의 상승을 유발하고 지하

수의 오염은 하천수의 수질 악화에 기여하게 된다. 지하수 사용의 증가는 하천수를 이득하천에서 손실 하천으로 변화시키고 사용 가능한 하천수의 감소를 가져올 수 있다. 지표수와 지하수의 연계에 대한 연구는 지난 수십년간 다양하게 수행되어 왔는데, 최근에는 다양한 추적자를 활용한 지표수-지하수 혼합

* Corresponding author: +82-42-870-7600, E-mail: gbkim@kwater.or.kr

대에서의 물과 오염원의 이동 기작에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Schmidt *et al.*, 2006; Boulton, 2007; Engelhardt *et al.*, 2011; Lautz, 2012; Lautz and Ledford, 2013). 오염원의 상호 작용에 대한 연구로서, 이득하천의 경우 지하수내의 질산성질소나 염도가 하천 수질에 영향을 미치고(Slade and Buszka, 1994; Paine, 2003; McFadden *et al.*, 2013; Peterson and Benning, 2013), 역으로 지표수의 수질이 주변 지하수에 영향을 미치는 사례 연구도 있다(Scanlon and Goldsmith, 1997; Fryar *et al.*, 2000; Rogers *et al.*, 2004). 국내의 경우에도, 하상의 인공구조물(보)에 의한 하천수-지하수 시스템의 변화에 따른 수위/유량 변화와 주요 이온농도의 변화에 대한 연구(Oh *et al.*, 2007), 하천변의 관정내 질산성질소의 고농도가 하천으로 유출되는 특성에 대한 연구(Hyun *et al.*, 2011), 하천변의 비닐하우스 재배지역에서의 지하수 양수에 의한 지표수-지하수 수위의 상호작용 변화에 대한 연구(Kim *et al.*, 2012) 등이 수행되었다.

퇴적환경과 지하수 수문 및 수질의 관계에 대한 연구로는, 소규모 퇴적분지내에서의 지하수의 국지적 및 광역적 흐름 유형에 대한 연구(Tóth, 1963), 충적 분지의 형태와 지하수 수문의 관계에 대한 연구(Larkin and Sharp Jr., 1992), 분지에서의 지하수 유입과 유출에 대한 연구(Tiedeman *et al.*, 1998) 등이 수행된 바 있다. 아울러, 퇴적환경에 따른 지하수 수질 변화에 대해서는 브라질 상파울로 지역의 퇴적환경과 지하수의 이화학 특성 관계에 대한 연구(Hirata *et al.*,

2011), 나이지리아의 5개 퇴적분지에서의 지하수 수질에 대한 광역적 특성 연구(Edet *et al.*, 2011), 분지 내 퇴적 조건에 따른 지하수내 질산성질소의 다양성에 대한 연구(Robertson and Sharp Jr., 2013) 등이 수행되었다. 이와 같이 퇴적환경 및 분지의 유형 등은 지하수와 하천수의 상호 작용 및 지하수 수량 수질 등에 영향을 미칠 수 있으며, 지표의 토지 이용 또는 농작물 재배 유형 등의 변화도 초래할 수 있다.

본 연구에서는 낙동강 중류에 설치된 보의 상류 지역 담수에 따른 하천수-지하수의 상호 작용 및 지하수의 수위 및 수질 변화가 지류 분지의 퇴적환경 및 수리적 특성에 따라 어떠한 차이를 보이는지 현장 조사 자료를 기반으로 평가하는데 목적을 두었다.

2. 연구 지역

연구지역인 신천-백천 유역은 낙동강 중류의 경상북도 성주군 용암면 기산리와 문명리 일대에 위치한 지류 분지로서 출구부가 좁은(약 700 m) 폐쇄된 형상을 하고 있으며, 강정고령보로부터 상류 약 7 km 지점에 위치한다(그림 1).

신천-백천 유역은 서북쪽 및 남쪽에 150 ~ 200 El.m의 산지가 위치하며 서쪽으로부터 남측 경계를 따라 신천, 북쪽에서부터 동측 경계를 따라 백천이 흘러 낙동강 본류와 만난다. 두 지류에 의하여 둘러싸인 중앙의 퇴적분지는 약 20 ~ 25 El.m 정도의 지표 표고를 보이는 평지에 해당한다. 토지의 90% 이



Fig. 1. Location of the study area.

상은 참외 재배를 위한 비닐하우스가 설치되어 12월부터 6월까지 경작이 이루어지고 있다. 본 지역의 지질은 하부로부터 선크브리아시대 편마암류, 트라이아스기-จู라기 화강암류, 백악기의 낙동층, 하산동층, 진주층, 칠곡층, 신라역암 그리고 이들을 부정합으로 덮고 있는 제4기 충적층으로 구성되어 있다(Min and Chung, 1985).

3. 연구 방법

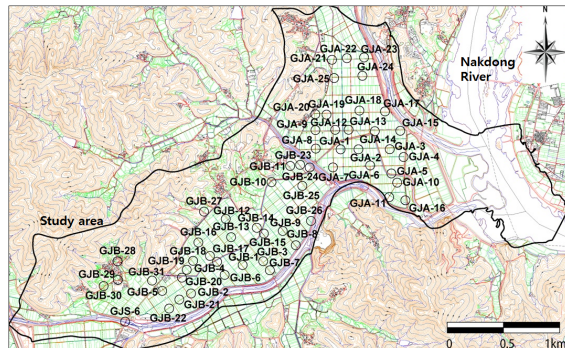
정기적인 지하수위 및 수질 조사를 위하여 기존

관정 및 신규 굴착 관측정을 모니터링공으로 지정하여 운영하였으며(표 1; 그림 2, 3), 보 담수 이전 및 이후로 구분하여 지하수위 측정 및 수시로 채취가 수행되었다. 조사대상 관정은 대부분 심도 30 m 미만의 농업용 관정이며, 지하수 관측정은 심도 20 m 미만 충적층 관측정이다. 지하수위 수동 측정은 총 5회(2010년 3월, 2011년 6월, 2011년 10월, 2012년 4월, 2012년 9월)에 걸쳐 기존 우물 및 관측정에서 이루어졌으며, 자동 관측은 6개의 관측정에서 1시간 간격으로 측정되었다. 현장 수질 조사 및 수시로 채취는 총 2회(1차 조사: 2011년 6월, 2차 조사: 2012년 9

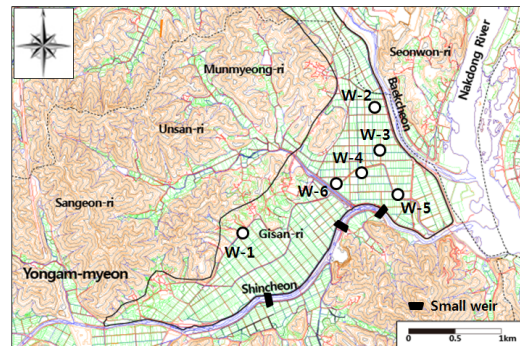
Table 1. Number of water level measurements and water sampling sites.

No. of groundwater level measurements sites		No. of water quality measurements at the sites	No. of groundwater sampling	No. of surface water sampling
Manual	Automatic			
56	6	52	11 (8)*	6 (5)*

Remark) * means the number of 1st sampling, June 2011.

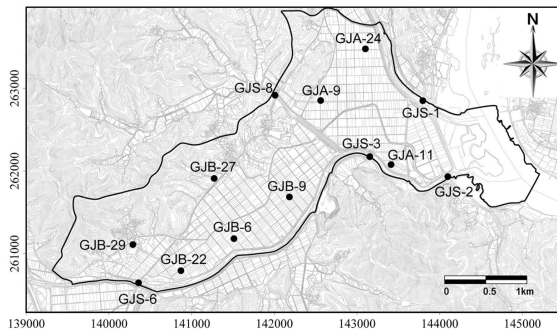


(a) Manual level measurements

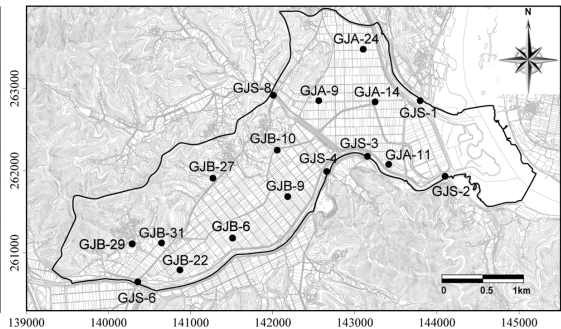


(b) Automatic monitoring sites

Fig. 2. Location of groundwater level measurements.



(a) Water quality sampling, June 2011



(b) Water quality sampling, September 2012

Fig. 3. Location of groundwater sampling.

Table 2. Characteristics of land use, topography, hydrology, soil, and geology for two sedimentary basins.

Watershed	Zone A	Zone B
Topography	- Closed basin - Flood plain type	- Semi-open basin - Alluvial fan type
Land use of basin	- Greenhouse: > 90% - Other: < 10%	- Greenhouse: > 90% - Other: < 10%
Hydrology	- The Nakdong river and two streams (Shincheon, Baekcheon streams) surround the area and meets at the eastern closed end - No small weir along the Baekcheon stream and one small weir along the Shincheon stream	- Only Shincheon stream flows along the southern boundary - The northern boundary is mountainous area - Two small weirs are along the Shincheon stream
Soil	- Soil texture: mainly silt loam - Subsoil texture: mainly fine silt - Effective soil depth: mostly 100 cm - Soil drainage: moderately well drained	- Soil texture: mainly silt loam, loam and sandy loam - Subsoil texture: mainly fine silt and coarse loam - Effective soil depth: mostly 100 cm, partly 20~50 cm (upper basin) - Soil drainage: very poorly drained (upper basin) ~ moderately well drained (lower basin)
Geology	- Alluvial deposit thickness: 5~25 m · Average: 17.7 m · St. Dev.: 4.6 m - Stream sediments: mostly clay to sand (finer than basin B) - Average hydraulic conductivity: 4.41×10^{-6} m/s	- Alluvial deposit thickness: 2~10 m · Average: 4.7 m · St. Dev.: 2.4 m - Stream sediments: mostly silty sand to gravel (coarser than basin A, diameter < 10 cm) - Average hydraulic conductivity: 4.45×10^{-5} m/s

월)에 걸쳐 실시되었다.

현장 지하수 수질 측정은 수온(T), 수소이온농도(pH) 및 전기전도도(EC), 용존산소(DO), 산화환원전위(ORP)에 대하여 Horiba pH meter (D-25, D-54)를 이용하여 수행되었으며, 알칼리도는 산중화적정법으로 현장에서 측정되었다. 양이온 및 음이온 분석을 위하여 셀룰로스 질산염 막필터를 이용하여 $0.45 \mu\text{m}$ 이하로 여과하여 부유물을 제거하였으며, 이 중 양이온 분석 시료는 유기작용과 금속 이온들의 침전이나 용기 내 흡착을 막기 위해 농질산을 첨가하여 pH를 2 이하로 유지하였다. 채취된 시료는 4°C 로 수온을 유지하여 실험실로 운반하여 IC (이온크로마토그래피)와 ICP-AES (유도결합 플라즈마 원자흡광 분석기)로 음이온과 양이온을 분석하였다.

4. 퇴적환경과 수리특성

연구 지역의 분지는 퇴적환경, 입자의 구성, 지형적 특성 등을 토대로 연구지역 중앙부의 남북으로 흐르는 무명천을 중심으로 하류인 동측(A 지역)과 상류인 서측(B 지역)으로 나눌 수 있다(그림 1; 표 2). A 지역

은 낙동강과 인접한 지역으로서 신천, 백천이 만나는 분지로서 낙동강 본류의 과거 홍수 범람 지역에 해당되며 출구부가 좁은 특성을 보인다. B 지역은 낙동강 본류와 이격되어 있으며 신천을 따라 이동된 퇴적물이 쌓이는 선상지 특성을 갖는다. 지표 토양 특성을 보면, A 지역은 Silty loam이 주를 이루고 B 지역은 Silty loam 내지 Sandy loam까지 다양한 구성을 갖는다. A 지역의 8개 시추 자료를 분석한 결과, 총적층의 평균 두께가 17.7 m, 표준편차 4.6 m이며, B 지역은 30개의 시추자료를 분석한 결과 평균 두께가 4.7 m, 표준편차 2.4 m로서, A 지역의 총적층 두께가 상대적으로 두꺼운 편이다(KRC, 1991, 1996a, 1996b; K-water, 2009). 하천 및 그 주변에서의 총적층의 구성은 신천 상류에서부터 십 여 cm에 이르는 굵은 자갈부터 세립질의 점토질까지 연속적인 분포 특성을 보이며, A와 B 지역의 경계부터 낙동강과 만나는 지역까지는 실트 내지 점토가 분포하고 있다. 연구지역내 총적층의 수리전도도는 1.33×10^{-6} m/s ~ 1.47×10^{-4} m/s의 범위를 보이나, A 지역 총적층의 평균 수리전도도는 4.41×10^{-6} m/s, B 지역은 4.45×10^{-5} m/s으로 굵은 입자로 구성된 B 지역이 큰 편이다.

5. 연구 결과

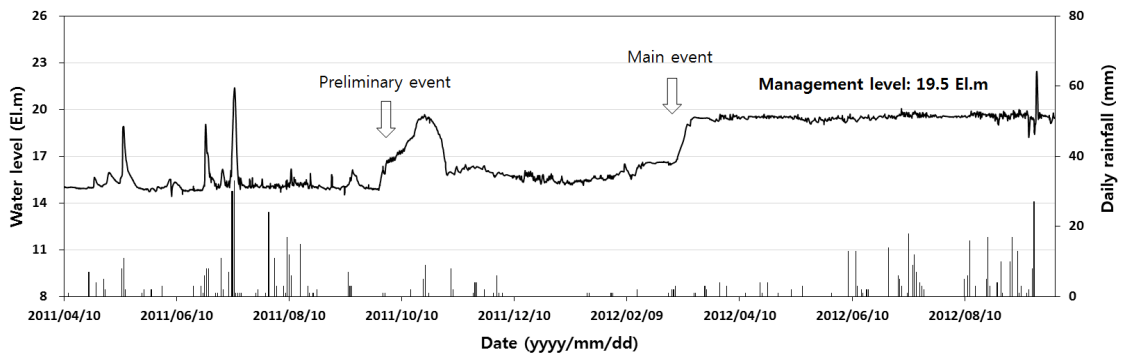
5.1 하천 및 지하수의 수문 변화

신천-백천 유역은 2011년 10월 강정고령보의 시험 담수(1차 담수) 이후 2012년 3월부터 본격적인 담수(2차 담수)가 이루어졌다. 낙동강의 수위는 보 담수 이전에는 약 15.0 El.m를 기점으로 강우시 상승하는 형태를 보였으나, 담수 이후에는 강정고령보의 관리 수위인 약 19.5 El.m를 기준으로 거의 변화가 없다(그림 4).

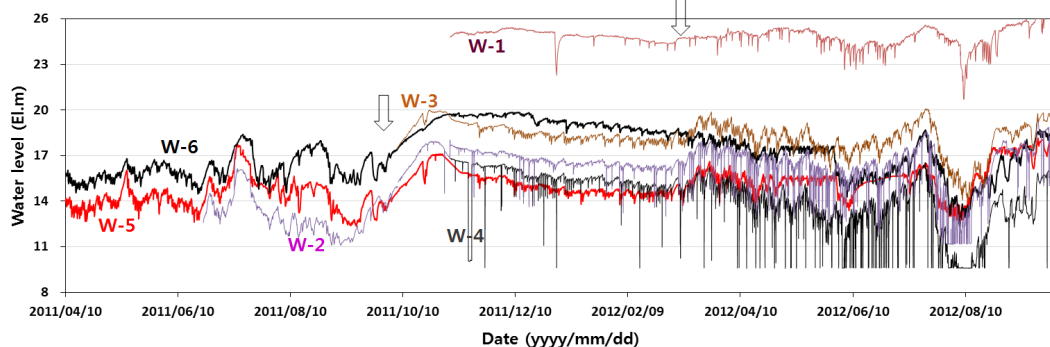
연구지역내 설치된 6개의 지하수 관측정의 지하수위 시계열 자료를 토대로 담수 전후의 시점에 대한 지하수위 변동량을 분석해 보았다(표 3). 담수 이전의 자료는 각 지점별 관측개시일이 상이하여 동일한 시점으로 비교하진 못하였으나, 각 지점별 지하수위 상승 특성은 다음과 같다. W-1 지점은 담수 이후 0.95 m, W-2는 1.48 m, W-3은 0.84 m 상승, W-4는 0.78 m 하강하였으며, W-5와 W-6은 각각 4.11 m, 1.58 m 상승한 것으로 나타났다. 낙동강 수위가 약 4 m

정도 상승한 것을 고려하면 지하수위는 이보다 상승 폭이 적게 나타났다. 낙동강 본류와 지류에 상대적으로 근접한 W-2, W-5 및 W-6의 상승 폭이 커서 하천의 수위 상승이 수변 지역 지하수위 상승에 영향을 미침을 알 수 있다. 특히, W-2의 경우에는 2차 담수 이후 주변에서의 지하수 양수가 활발함에도 불구하고 지하수위 상승량이 크게 나타나고 있어 하천의 영향을 설명해 주고 있다. W-1, W-3 및 W-4의 경우, 1차 담수로 인하여 상승된 지하수위가 2차 담수시까지 장기간 유지되는 현상이 존재하여 2차 담수에 의한 수위 상승 효과는 상대적으로 적은 것으로 나타나며, 특히 W-3는 A 지역 분지의 중앙 지점으로서 하천 수위 상승에 의한 영향이 뚜렷하지 않으며, W-4는 지속 반복적인 지하수 양수 영향으로 수위 상승 폭이 적은 것으로 해석된다(그림 4).

1차 담수 이전의 자료를 보유한 3개 관측정(W-2, W-5, W-6)에 대하여 하천수위와 지하수위의 교차상관관계를 분석한 결과는 표 4와 같다. 비교적 하천에 인근한 이들 3개 지점의 담수 이전의 교차상관계



(a) Water levels of the Nakdong river and daily rainfall



(b) Groundwater levels at 6 monitoring sites

Fig. 4. Time series of river water levels and groundwater levels (arrow: water-filling events).

수는 낙동강 하류 하천변 23개 지하수 관측정의 평균값인 0.601과 유사하게 높은 값을 보이고 있으나 (Kim *et al.*, 2012), 담수 이후의 교차상관계수는 지나치게 낮은 값을 보여 유의한 의미를 갖지 않는다. 이와 같은 현상은 담수 이전에는 두 인자간의 Peak 특성이 뚜렷하고 반복성이 유사하였으나(그림 4), 담수 이후의 하천수위는 보 수문의 조절에 의하여 일정하게 유지되어 Peak 특성을 거의 보이지 않아 두 인자간의 통계적 상관관계는 오히려 줄어들었기 때문이다. W-2의 경우에는 2012년 농번기의 지하수

양수에 의한 급격한 수위 변동도 상관관계를 떨어뜨리는 요인으로 작용하고 있다.

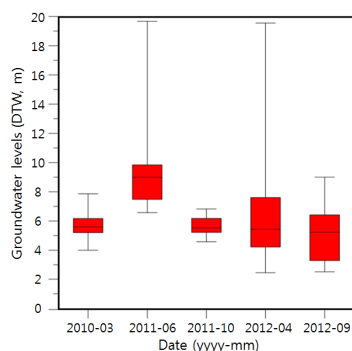
지하수 관측정에서의 시계열 분석과 별도로, 광역적 지하수위 변동을 파악하기 위하여 하천 담수 전후 5회에 걸쳐 수행한 56개 지점의 지하수위 조사 자료를 Box-plot으로 도시하였다(그림 5). 연구지역의 2차 담수 시점인 2012년 3월을 기점으로 A 지역은 지하수위 심도 차이가 잘 나타나는 반면에 B 지역은 큰 차이가 없는 것처럼 보인다. 전반적으로 A 지역이 B 지역에 비하여 세립질로 구성되어 있고 수

Table 3. Comparison of groundwater levels before and after water-filling event.

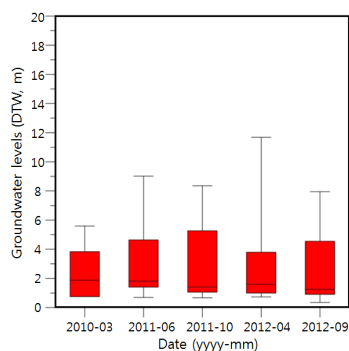
Wells	Before water-filling (El.m) ^{a)}	After water-filling (El.m) ^{b)}	Difference (m)	Remarks
W-1	24.60	25.65	0.95	Periods: a) 2012.2.1.~2012.2.29. b) 2012.9.1.~2012.9.28.
W-2	16.20	17.68	1.48	
W-3	17.99	18.83	0.84	
W-4	15.01	14.23	-0.78	Average Nakdong river levels: a) 16.21 El.m, b) 19.59 El.m
W-5	13.32	17.43	4.11	Periods: a) 2011.9.1.~2011.9.30. b) 2012.9.1.~2012.9.28.
W-6	15.96	17.54	1.58	
				Average Nakdong river levels: a) 15.18 El.m, b) 19.59 El.m

Table 4. Changes in cross-correlation coefficient and lag time between groundwater level and river water level before and after water-filling at the barrage.

Wells	Before water-filling		After water-filling	
	Cross-correlation coefficient	Lag time (days)	Cross-correlation coefficient	Lag time (days)
W-2	0.549	7	0.222	27
W-5	0.678	6	0.195	2
W-6	0.478	8	-0.258	0



(a) Zone A



(b) Zone B

Fig. 5. Changes in groundwater levels for two zones.

리전도도가 작으며 지하수 부존성이 상대적으로 낮은 특성을 보이고 있어 낙동강 본류에 인접해 있음에도 불구하고 지하수위가 깊게 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 연구지역내 넓게 분포하는 비닐하우스의 참외 재배 기간(12월~6월) 동안 지하수 양수가 동시적이면서 광범위하게 이루어져 수리전도도가 낮은 A 지역이 B 지역 보다 지하수위가 깊어지는 특성을 보이게 된다. 특히, A 지역의 2011년 6월에 지하수위 분포를 보면 비닐하우스 인근 지하수 양수에 의한 지하수위 강하 현상을 잘 보여주고 있다(그림 5a). A 지역에서 2012년 4월의 경우에도 양수에 의한 영향이 유사하게 나타나나 2011년 6월에 비하여 지하수위가 얕아졌음을 알 수 있는데 이는 낙동강 담수에 의한 영향이 지하수 양수 영향을 상쇄하는 것으로 보인다. B 지역의 경우, 비닐하우스의 지하수 집중 양수기간 동안 지하수 양수 효과가 나타나고 있으나 A 지역보다 매우 얕은 편이며, 이는 조립질의 퇴적환경에 의한 높은 지하수 부존성에 의한 것이다(그림 5b). 또한, B 지역 남측에 분포하는 신천에는 낙동강 본류의 역류를 방지하고 농업용수를 공급하기 위한 3개의 소규모 보가 존재하고 있어 낙동강 수위 상승 효과가 상류까지 미치지 못하는 것도 요인으로 작용하다(그림 2b 참조). 아울러, 이들 소규모 보의 담수 영향으로 인근 직상류 주변 지역에서는 지하수위가 얕게 존재하기도 한다.

5.2 지역별 수질 변화

5.2.1 현장 지하수 수질 특성

1차 현장 수질 조사(2011년 6월)에 의한 A 및 B 지역의 수질 특성을 보면, A 지역은 지하수 온도가 최소 15.7°C, 최대 21.2°C의 범위를 보이며 평균 17.2°C를 나타낸다. 전기전도도는 최소 406 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 최대 1,110 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 평균 658.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에 해당한다. 또한, 산화-환원전위는 최소 -117 mV, 최대 471 mV로서 평균 46.2 mV이며, DO는 최소 0.99 mg/L, 최대 5.47 mg/L로서 평균 2.5 mg/L에 해당한다. B 지역은 지하수 온도가 최소 14.8°C, 최대 23.7°C의 범위를 보이며 평균 17.8°C로서 A 지역에 비하여 약간 높아 A 지역에 비하여 지하수위가 얕은 B 지역이 대기 온도(조사 시점의 구미 관측소 일 평균 기온 26.4°C, 일중 최고 온도 34.1°C)의 영향을 받는 것으로 보인다(KMA, 2011). B 지역 전기전도도는 최소 233

$\mu\text{S}/\text{cm}$, 최대 733 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 평균 500.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에 해당하여 A 지역에 비하여 낮은 특성을 보이는데, 이는 A 지역의 이온 함량이 B 지역보다 전반적으로 높는데 기인한다. 산화-환원전위는 최소 -176 mV, 최대 216 mV로서 평균 -16.0 mV으로 A 지역에 비하여 낮은 편이다. DO는 최소 0.58 mg/L, 최대 4.90 mg/L로서 평균 2.4 mg/L에 해당한다.

2차 조사(2012년 9월) 결과에 의하면, A 지역은 지하수 온도가 최소 16.1°C, 최대 20.7°C의 범위를 보이며 평균 17.2°C로 나타난다. 전기전도도는 최소 390 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 최대 831 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 평균이 618 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에 해당한다. 산화-환원전위는 최소 -181 mV, 최대 276 mV로 평균 25.8 mV이다. DO는 최소 0.85 mg/L, 최대 5.29 mg/L로서 평균 2.47 mg/L에 해당한다. B 지역은 지하수 온도가 최소 16.9°C, 최대 25.4°C의 범위를 보이며 평균 21.4°C로서 A 지역에 비하여 약간 높다. 1차 조사와 마찬가지로 대기 온도의 영향이 지하수위가 얕은 B 지역 수온에 영향을 미치는 것으로 보인다(조사 시점의 구미 관측소 일 평균 기온 23.3°C, 일중 최고 온도 29.5°C). 전기전도도는 최소 56 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 최대 688 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 평균 633 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에 해당하여 A 지역과 유사하다(KMA, 2012). 산화-환원전위는 최소 -94 mV, 최대 267 mV로서 평균 58.6 mV로 A 지역에 비하여 높은 편이다. DO는 최소 1.03 mg/L, 최대 6.49 mg/L로서 평균 2.9 mg/L에 해당한다.

1차와 2차 조사 결과를 지역별로 비교해 보면 다음과 같다(그림 6). 지하수 온도의 경우에는 조사 시점별로 큰 차이가 나타나진 않으나 B 지역 중상류 일부 지역에서 차이가 발생하였는데 이는 B 지역 지하수위가 A 지역 보다 얕아 국부적으로 양수에 의한 지표 온도 영향을 받는 것으로 추정된다. 전기전도도의 경우에는 A 지역 하류인 낙동강 인접 지역에서 2차 조사 시 높아진 것을 알 수 있는데 이는 용존이온 함량의 증가보다는 낙동강 수위 상승으로 인하여 상대적으로 오염도가 높은 지표수가 혼합된 영향으로 보인다. DO의 경우에도 A 지역 하류부에서 감소세가 나타나고 있어 수위 상승으로 인한 시료 채취 심도의 상대적 증가가 영향을 미치는 것으로 보인다.

이상 지하수의 현장 수질 조사 결과를 종합해 보면, 연구지역 동측인 A 지역에서 낙동강의 수위 상승으로 인한 지하수 수질 변화 현상이 나타나는 것

Table 5. Result of geochemical analysis for groundwater and surface water samples.

Content	Zone	Site	Ca ²⁺			Mg ²⁺			Na ⁺			K ⁺			HCO ₃ ⁻			Cl ⁻			SO ₄ ²⁻			NO ₃ ⁻		
			2011	2012	Diff.	2011	2012	Diff.	2011	2012	Diff.	2011	2012	Diff.	2011	2012	Diff.	2011	2012	Diff.	2011	2012	Diff.	2011	2012	Diff.
Ground water	Zone A	GJA-9	63.8	54.9	-8.9	11.3	10.3	-1.0	17.1	13.9	-3.2	1.8	1.2	-0.6	235.0	243.8	8.8	11.7	12.3	0.6	7.0	7.2	0.2	0.2	0.1	-0.1
		GJA-11	61.3	43.7	-17.6	13.3	11.7	-1.6	15.4	14.4	-1.0	1.2	1.1	-0.1	273.0	203.1	-69.9	11.1	11.6	0.5	6.5	3.7	-2.8	0.8	0.1	-0.7
		GJA-14	99.7			29.9			26.6			2.5			552.7			6.9			9.8			0.1		
		GJA-24	105.0	94.6	-10.4	29.5	25.7	-3.8	26.5	26.6	0.1	1.8	1.6	-0.2	459.0	467.4	8.4	12.0	20.3	8.3	10.7	21.8	11.1	0.3	0.2	-0.1
		Average	76.7	73.2	-3.5	18.0	19.4	1.4	19.7	20.4	0.7	1.6	1.6	0.0	322.3	366.8	44.4	11.6	12.8	1.2	8.1	10.6	2.6	0.4	0.1	-0.3
	Zone B	GJB-6	58.0	39.3	-18.8	16.3	11.3	-5.0	14.5	10.6	-3.9	0.7	6.3	5.6	256.0	223.3	-32.7	11.2	15.1	3.9	0.2	1.4	1.2	0.2	0.1	-0.1
		GJB-9	79.0	65.0	-14.0	17.0	16.1	-0.9	16.0	14.8	-1.2	1.5	15.0	13.5	259.0	304.6	45.6	32.3	29.2	-3.1	25.2	13.8	-11.4	0.1	0.2	0.1
		GJB-10	59.8			14.5			10.2			0.8			182.8			23.1			12.7			16.0		
		GJB-22	43.5	52.0	8.5	11.9	14.2	2.3	14.3	15.8	1.5	1.8	1.9	0.1	155.0	235.3	80.3	16.6	20.1	3.5	26.9	41.4	14.5	0.1	0.2	0.1
		GJB-27	95.8	76.6	-19.2	18.7	10.5	-8.2	10.6	7.6	-3.0	1.1	2.7	1.6	206.0	172.2	-33.8	27.0	16.0	-11.0	30.6	28.2	-2.4	110.0	101.8	-8.2
		GJB-29	49.3	74.3	25.0	18.6	18.0	-0.6	32.0	16.3	-15.7	1.1	0.9	-0.2	234.0	203.2	-30.8	26.3	41.0	14.7	23.1	25.4	2.3	15.5	24.0	8.5
		GJB-31	32.6			10.1			13.5			8.8			101.7			25.3			30.7			0.2		
		Average	65.1	57.1	-8.0	16.5	13.5	-3.0	17.5	12.7	-4.8	1.2	5.2	4.0	222.0	203.3	-18.7	22.7	24.3	1.6	21.2	21.9	0.7	25.2	20.4	-4.8
Surface water	Baekcheon	GJS-1	14.8	16.7	1.9	5.7	3.9	-1.8	19.2	8.2	-11.0	3.0	2.7	-0.3	55.3	64.4	9.1	25.0	8.8	-16.2	20.0	18.1	-2.0	6.0	7.0	1.0
	Sincheon	GJS-2	24.7	15.4	-9.3	6.7	3.2	-3.5	11.7	6.6	-5.1	3.4	2.6	-0.8	98.3	59.8	-38.5	14.4	6.9	-7.5	20.7	13.3	-7.4	1.9	6.5	4.6
	Sincheon	GJS-3	32.0	17.6	-14.4	6.3	3.6	-2.7	12.1	6.6	-5.5	3.0	2.3	-0.7	96.0	75.6	-20.4	12.8	6.3	-6.5	18.4	11.9	-6.5	1.8	4.9	3.1
	Sincheon	GJS-4	18.5			3.8			3.8			7.0			2.2			70.3			6.7			12.3		
	Sincheon	GJS-6	22.0	8.8	-13.2	5.7	2.0	-3.8	9.1	4.3	-4.8	3.3	1.6	-1.7	69.4	41.6	-27.8	9.8	3.7	-6.1	14.8	6.4	-8.4	4.2	4.4	0.2
	Other	GJS-8	50.9	18.4	-32.5	14.3	4.1	-10.2	17.3	5.2	-12.1	6.6	3.8	-2.9	186.0	55.3	130.7	24.1	6.8	-17.3	31.2	19.7	-11.5	1.7	8.7	7.0
	Average		28.9	15.9	-13.0	7.7	3.4	-4.3	13.9	6.3	-7.6	3.9	2.5	-1.3	101.0	61.2	-39.8	17.2	6.5	-10.7	21.0	13.6	-7.4	3.1	6.1	3.0

으로 해석되며, B 지역은 상대적으로 큰 변화가 없는 것으로 파악된다.

5.2.2 이화학 특성

하천수와 지하수의 이화학 분석 결과를 보면(표 5; 그림 7), 전반적으로는 지하수의 이온 함량이 높은 것으로 나타나고 있으나, 일부 이온(K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻)의 경우에는 하천수가 높은 경우가 다소 나타나고 있고, 특히 하천수에서 음이온 일부가 높은 함량을 보이는 것은 상류로부터의 오염물질의 유입 및 집적의 영향으로 추정된다.

연구지역 전체에 대한 하천수와 지하수의 이온 함량 분포를 비교해 보면, 지하수의 경우에는 K⁺를 제외한 양이온 함량이 2차 조사 시에 감소한 것으로 나타났으며, 음이온은 뚜렷한 변화를 보이지 않았다. 하천수의 경우에는 NO₃⁻를 제외한 대부분의 항목에서 감소한 것으로 나타났다(그림 7). 하천수의 Cl⁻과 SO₄²⁻의 함량 변화를 보면 대부분의 지점에서 2차 조사 시 감소하는 경향을 보이는데, 특히 낙동강 수위 상승 영향이 직접 미치는 GJS-1, GJS-2, GJS-3 등의 지점에서는 뚜렷한 감소 현상이 나타나고 있어 수량 증가가 오염 성분의 감소를 초래하는 것으로 보인다(표 5). 한편, GJS-8 지점은 A와 B 지역 경계부의 하천 바닥이 주변 지형보다 높은 천정천으로서 타 지점과는 상이한 수질 특성을 보이고 있다.

지하수를 대상으로 A 지역과 B 지역의 특성을 비교해 보면, A 지역이 B 지역에 비하여 양이온(Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺) 함량은 높은 편이며 음이온(Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻) 함량은 낮은 것으로 나타났으며, 담수 이전(2011년 1차 조사)과 이후(2012년 2차 조사)에도 두 지역은 유사한 차이를 보이고 있다(그림 8). A 지역의 양이온 함량이 상대적으로 높은 것은 낮은 수리전도도, 깊은 우물 및 깊은 지하수위 등으로 지하수 시료채취 심도가 깊어진 것이 원인으로 판단된다. 반면에 B 지역은 얕은 입자와 높은 수리전도도 등으로 양수량이 상대적으로 풍부하여 얕은 우물이 형성되어 있고 시료의 채취 심도도 상대적으로 얕은 것이 양이온 함량이 낮고 음이온 함량이 상대적으로 높은 요인으로 작용한다. 2차 조사에서 B 지역이 K⁺ 함량이 크게 나타난 것은 2개 지점(GJB-6 및 GJB-9)에서 높은 값이 나타난 것이 영향을 미치고 있다(표 5).

1차 및 2차 조사로 구분하여 2개 지역을 비교해 보았다. A 지역은 양이온의 경우에는 전반적으로 감소하는 경향을 보이는데 담수에 따른 하천수의 일부 혼합 등으로 지하수위가 상승하여 시료 채취 심도가 얕아진 것이 원인으로 판단된다. B 지역 양이온의 경우에는 감소된 경우와 증가된 경우가 혼재하고 있는데 이는 하천수의 상승 영향이 B 지역까지 미치지 못하기 때문으로 보이며, B 지역 내에서도 신천에 인접한 GJB-6과 GJB-9의 경우에는 Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺

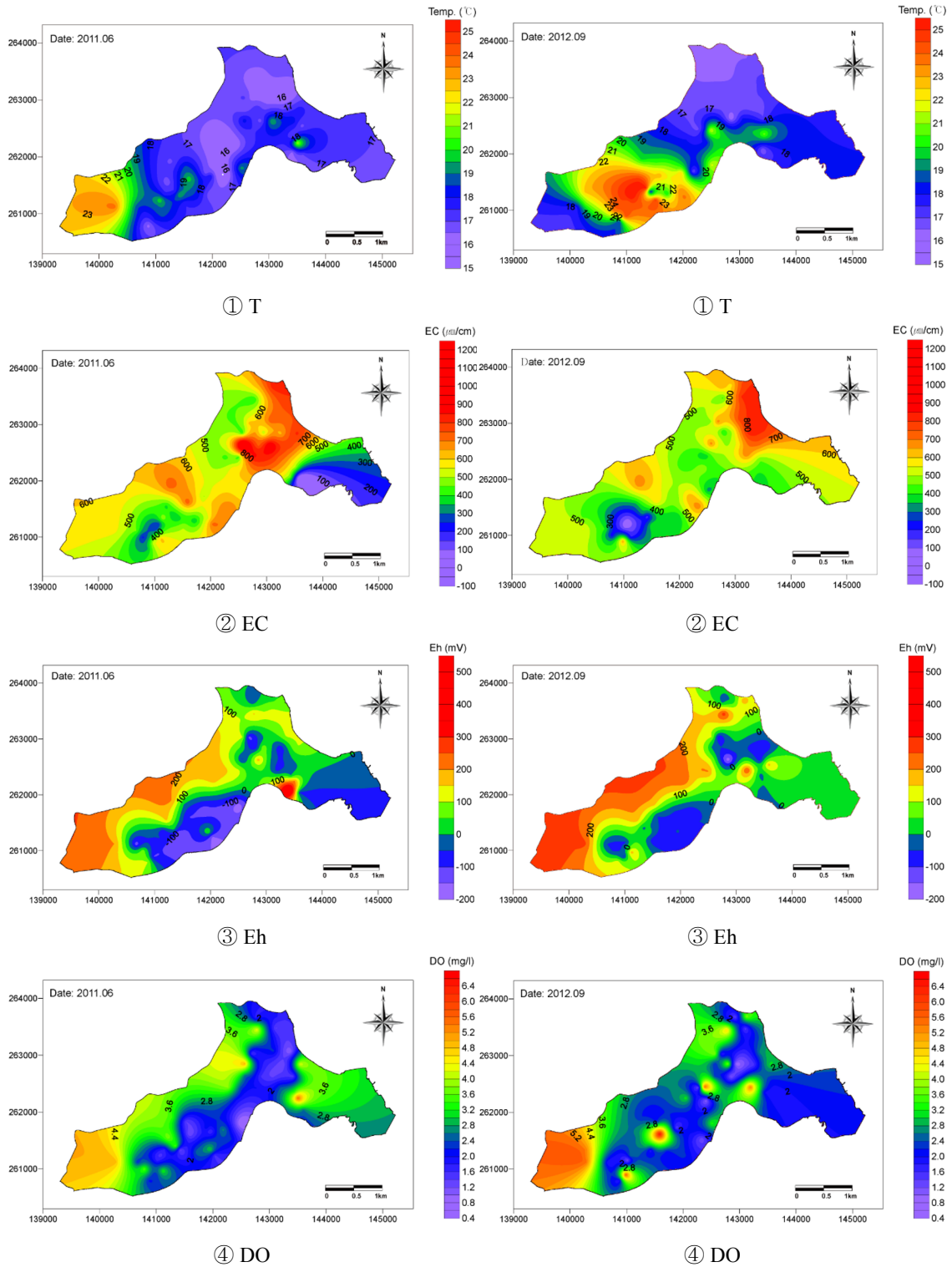


Fig. 6. Distribution of groundwater quality for T, EC, Eh, and DO.

의 함량이 감소하여 하천수의 영향을 일부 받는 것으로 추정된다. 음이온의 경우에는 A 지역과 B 지역 간에 뚜렷한 차이가 존재하진 않으나, 지점에 따른 차이는 일부 나타나고 있다. Cl^- 과 SO_4^{2-} 의 경우에 낙동강 수위 상승의 영향을 받은 A 지역은 담수 이후에

증가하는 경향을 보이나 B 지역은 혼재된 양상을 보인다. B 지역이라도 신천에 인접한 GJB-6, GJB-22, GJB-29 등은 담수 이후에 증가하는 양상을 보인다. 특히, A 지역내 백천에 인접한 GJA-24의 경우에는 Cl^- 과 SO_4^{2-} 가 담수 이후에 급증하고 있어 담수 이후

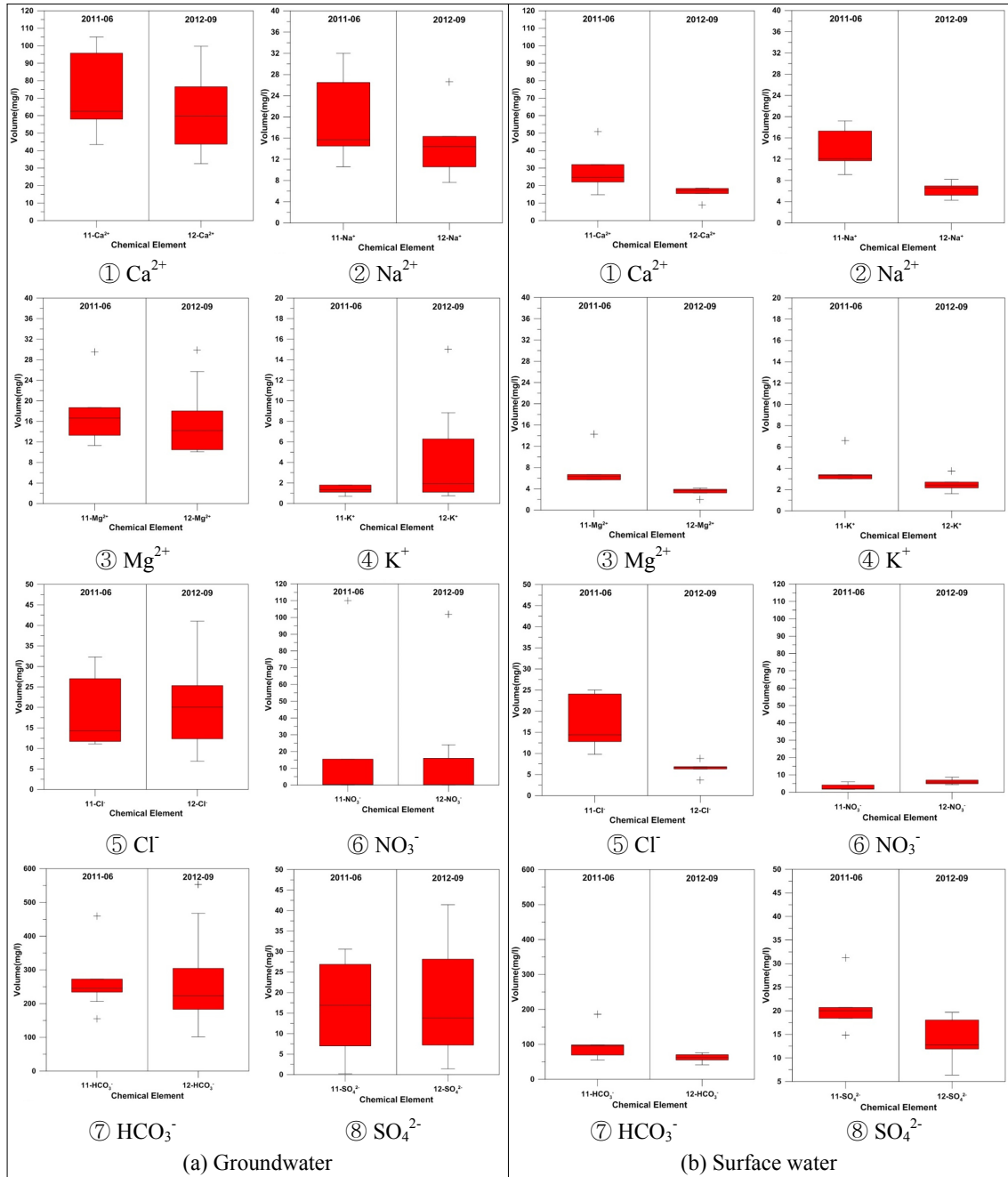


Fig. 7. Box-plots of groundwater and surface water.

수위 상승으로 상대적인 오염도가 높은 하천수의 혼합 가능성을 시사하고 있다(표 5).

6. 토 의

하천 담수에 따른 하천수와 지하수의 상호 작용을 파악하기 위하여 담수 이전 상태인 2011년 3월의

수문 조건을 정류모델로 설정하여 Modflow를 활용한 수치 모델을 수행하였다(그림 9). 모델의 격자망은 충적 분지와 산지 등을 구분하여 25 m 내지 33 m 단위로 설정하고, 레이어는 충적층과 암반층 2개로 구성하였으며, 충적층은 입도 분포를 고려하여 사력층과 점토-모래 혼합층으로 분류하였다. 낙동강, 신천, 백천 등은 하천경계(River boundary)로 설정하

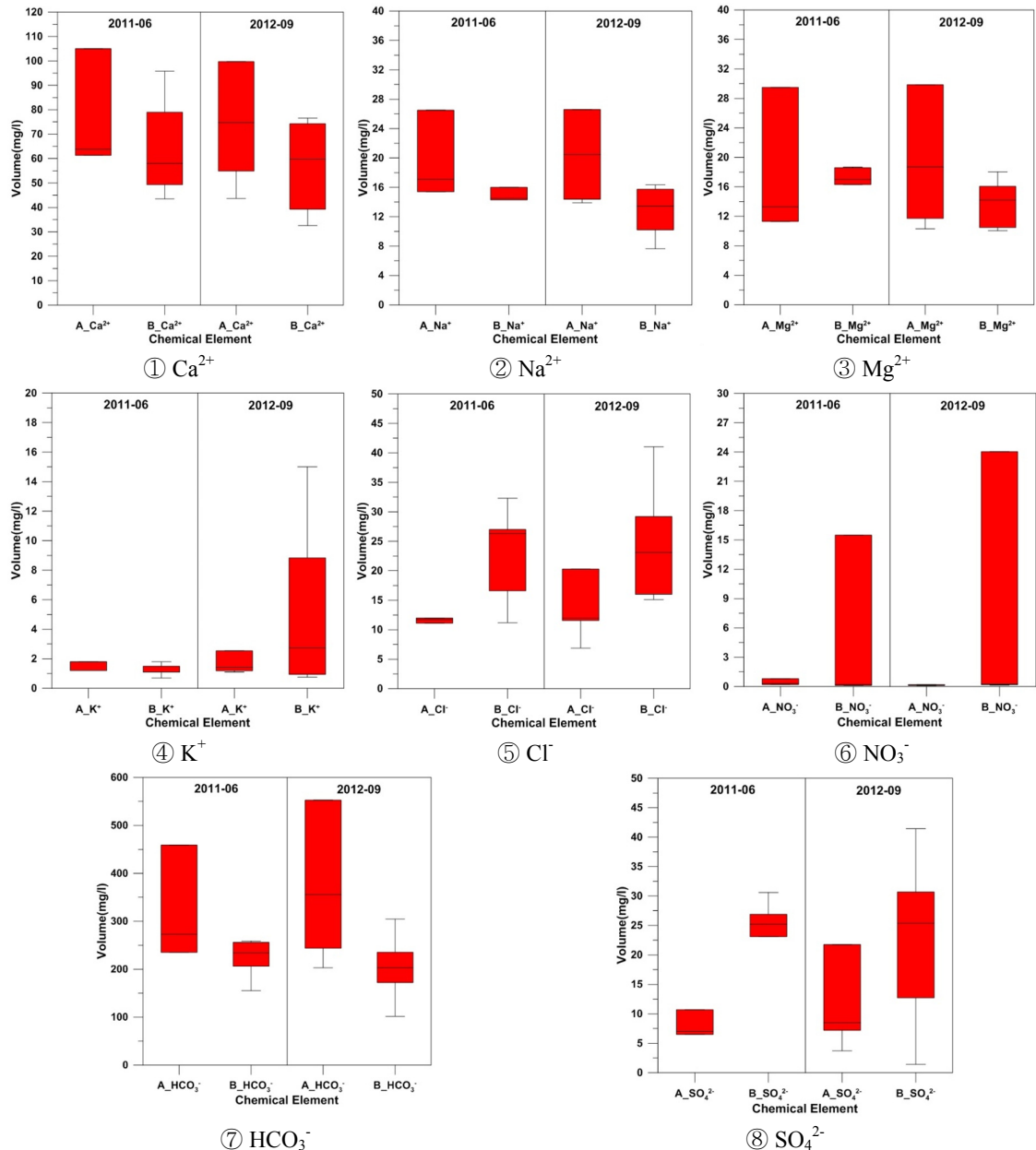


Fig. 8. Comparison of groundwater ion contents for each region.

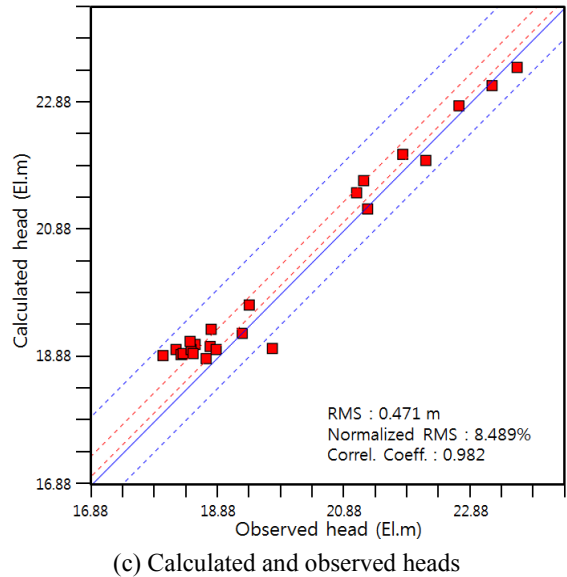
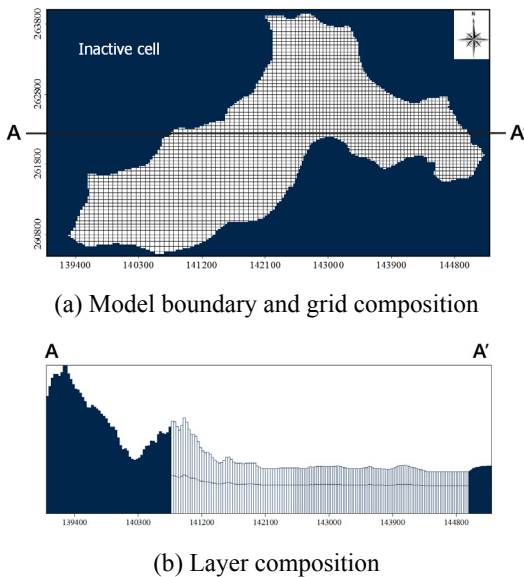


Fig. 9. (a) Model composition, (b) layer composition, and (c) comparison of calculated and observed groundwater levels in a steady-state model.

였으며, 지하수 함양량은 고령교 낙동강 중권역인 고령교 인근 지하수 함양율 12.47%를 적용하여 연평균 강우량 1,025.0 mm 중 128.0 mm/year로 설정하였다(MLTM, 2007). 모델에서 예측된 지하수위와 실제 계측 수위는 약 0.982의 높은 상관관계를 보였으며, 지하수위가 낮은 지역에서의 상관관계가 상대적으로 낮은 편이다. 이들 지역은 주로 A 지역으로서 저투수성 지층에서 지하수 양수에 의한 잦은 수위 변동이 장주기 시간 간격의 수치 모델에 정밀하게 반영되지 못하는 한계점이 존재되는 것으로 보인다.

하천 담수 이후의 변화를 예측하기 위하여 강정 고령보의 담수 후 운영 수위인 19.5 El.m로 하천 수위를 상승시킨 조건으로 분기 단위의 부정류 모델을 수행하였으며, 향후 10년간의 물수지 변화를 파악해 보았다(그림 10). 수치 모델에 의한 향후 10년 동안의 물수지 인자들의 변화를 보면, 담수 후 초기 수년 동안 하천으로부터 주변 대수층으로의 유입과 유출의 증가폭이 상대적으로 크게 나타나고 있어 하천 담수로 인한 지하수 저류량의 증가를 잘 보여준다. 담수 후 수 년이 경과하면서 하천수와 지하수의 상호 작용이 안정화되어 물수지에서의 연년 변화는 현저히 줄게 된다. 금회 지하수 조사는 담수 이전과 담수 이후 약 반 년이 경과한 시점에서 이루어진 것으로서 담수 초기의 분지내 유입되는 수자원 증가 및

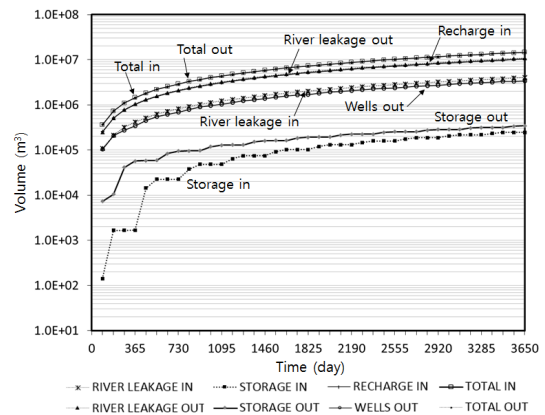


Fig. 10. Changes of water budget factors estimated by a numerical model.

지하수 유동의 현저한 변화가 지하수위 및 수질에 영향을 미치는 것으로 보인다. 전 절에서 언급한 A 지역과 B 지역에서의 지하수위 및 수질의 담수 전후의 변동 차이는 이와 같은 물수지의 현저한 변화에 의한 물의 흐름에 의한 영향으로 판단된다. 이와 같은 현상은 기 언급한 바와 같이 낙동강 본류에 인접한 A 지역에서의 담수 이후 지하수위 상승과 Cl^- 및 SO_4^{2-} 이온의 증가로 반영되었으며 하천수의 혼합 가능성을 의미한다.

이상 연구지역의 지하수위 및 수질 분포와 변동

특성을 종합적으로 기술하면, 본 연구지역은 분지의 출구부가 낙동강과 직접 접하고 있으나 낙동강과 지류로 둘러 싸여 출구부가 좁은 폐쇄형 분지 형태로서 지하수 배출이 용이하지 않은 특성을 보이며, 낙동강 본류 수위 상승 효과가 분지내의 지형, 토양, 수문 조건 등에 따라 지점별로 차이를 보이는데 이와 같은 특성은 지하수위 및 수질에 영향을 미치고 있다. 주로 신천을 따라 분포하는 B 지역은 낮은 배수성의 토양이 발달하고 있으나, 신천에 설치된 3개 소규모 보의 존재가 낙동강 본류 수위가 지류에 미치는 영향을 차단시키는 역할을 하고 있어 낙동강 수위 상승이 분지내 지하수위에 큰 영향을 미치지 못하고 있다. 이는 지하수위 관측 자료와 하천 수위간의 교차상관계수가 매우 낮은 것에서도 알 수 있다. 반면에, 주로 백천을 따라 분포하는 A 지역은 B 지역에 비하여 낙동강과 인접하여 있고 보가 설치되어 있지 않기 때문에 낙동강 본류 수위의 상승 작용이 신천을 따라 직접 영향을 미치게 된다. 따라서, 낙동강 본류 수위의 변화는 A 지역내 지하수위 변동과 수질의 변화를 야기하고 있다. 한편, W-2 지점 지하수 관측정의 지하수위와 낙동강 본류 수위간의 교차상관계수가 낮은 것은 이 지역의 낮은 수리전도도와 양수에 의한 단기간의 급격한 지하수위 변동 때문으로 판단되며 이와 같은 현상이 하천 수위와 지하수위 변동간의 교차상관관계를 저해하는 요인으로 작용하고 있다.

7. 결 론

낙동강 본류의 수위 변동은 주변 수변지역 축적층 지하수의 수위 및 수질에 변화를 가져오게 된다. 강정고령보 상류의 신천-백천 유역의 축적 분지를 대상으로 낙동강 수위 변동에 따른 지하수의 변화를 분지의 퇴적환경 차이와 지하수 양수 조건 등을 고려하여 분석하였다. 세립질과 조립질로 구성된 퇴적입자의 분포 특성 차이, 낙동강 본류의 수위 상승이 주변 지하수위 변동에 직접 영향을 미칠 수 있는 범위의 차이, 대수층의 수리성과 산출성의 차이로 인한 양수에 의한 지하수위의 급격한 변동성의 차이, 분지 형태에 따른 유출입의 차이 등은 보의 담수 이전과 이후의 연구지역 분지내 지하수위와 수질 변화에 차이를 가져왔다. 향후 지속적인 관측과 수질 분

석 등을 통하여 장기간의 데이터를 확보한다면 보다 정량적인 평가가 가능할 것으로 본다.

사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁 시행한 물관리연구사업(11기술혁신C05)에 의한 '수변지하수활용고도화' 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Boulton, A.J., 2007, Hyporheic rehabilitation in rivers: restoring vertical connectivity. *Freshwater Biology*, 52, 632-650.
- Edet, A., Nganje, T., Ukpong, A.J. and Ekwere, A.S., 2011, Groundwater chemistry and quality of Nigeria: A status review. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 5(13), 1152-1169.
- Engelhardt, I., Piepenbrink, M., Trauth, N., Stadler, S., Kludt, C., Schulz, M., Schüth, C. and Ternes, T.A., 2011, Comparison of tracer methods to quantify hydrodynamic exchange within the hyporheic zone. *Journal of Hydrology*, 400, 255-266.
- Fryar, A.E., Wallin, E.J. and Brown, D.L., 2000, Spatial and temporal variability in seepage between a contaminated aquifer and tributaries to the Ohio River. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 20(3), 129-146.
- Hirata, R., Gesicki, A., Sracek, O., Bertolo, R., Giannini, P.C. and Aravena, R., 2011, Relation between sedimentary framework and hydrogeology in the Guarani aquifer system in São Paulo state, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 31(4), 444-456.
- Hyun, Y., Lee, K.K., Kaown, D. and Lee, S.S., 2011, Modeling groundwater flow and contaminant transport in groundwater dependent ecosystems. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47(3), 309-321 (in Korean with English abstract).
- Kim, G.B., Son, Y.C., Lee, S.H., Jeong, A.C., Cha, E.J. and Ko, M.J., 2012, Understanding of surface water-groundwater connectivity in an alluvial plain using statistical methods. *The Journal of Engineering Geology*, 22(2), 207-221 (in Korean with English abstract).
- Kim, N.W., Lee, J.W., 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(10), 1051-1067 (in Korean with English abstract).
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2011,

- Monthly Weather Report (June, 2011), Publication number 11-1360000-000002-06. Seoul, Korea, 115 p (in Korean).
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2012, Monthly Weather Report (September, 2012), Publication number 11-1360000-000002-06. Seoul, Korea, 118 p (in Korean).
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 1991, Report on Groundwater Survey for Aneon Area of Seongju-gun, Kyungsangbukdo Province. Seoul (in Korean).
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 1996a, Report on Groundwater Survey for Sanmangtae, Sooyangjeong, Baekun, Kwangsan Areas of Seongju-gun, Kyungsangbukdo Province. Seoul (in Korean).
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 1996b, Basic Survey Report on Groundwater Development for Irrigation Water Supply. Seoul (in Korean).
- K-water (Korea Water Resources Corporation), 2009, Report on the Analysis of Long-term Groundwater Levels for the National Groundwater Monitoring Wells Located at the Nakdong Watershed. Daejeon, 286 p (in Korean).
- Larkin, R.G. and Sharp Jr., J.M., 1992, On the relationship between river-basin geomorphology, aquifer hydraulics, and groundwater flow direction in alluvial aquifers. *Geological Society of America Bulletin*, 104(12), 1608-1620.
- Lautz, L.K., 2012, Observing temporal patterns of vertical flux through streambed sediments using time-series analysis of temperature records. *Journal of Hydrology*, 464-465, 199-215.
- Lautz, L.K. and Ledford, S.H., 2013, Stream-groundwater interaction buffers seasonal changes in urban stream water quality. *Proceedings of American Geophysical Union Fall Meeting 2013*, Abstract #H13P-03.
- McFadden, G., Flewelling, S.A., Herman, J.S. and Mills, A.L., 2013, Generality of nitrate removal in streambed sediment on the Southern Delmarva Peninsula. *Proceedings of American Geophysical Union Fall Meeting 2013*, Abstract #H43A-1420.
- Min, K.D. and Chung, C.D., 1985, Gravity survey of the subsurface structure between Waekwan-Pohang in Kyungsang basin. *The Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 18(4), 321-329 (in Korean with English abstract).
- MLTM (Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs), 2007, Master Plan for Groundwater Management in Korea (2007-2011). Seoul, Korea, 149 p (in Korean).
- Oh, J.H., Kim, T., Sung, H.C., Kim, Y.J. and Song, M.Y., 2007, Interaction between groundwater and stream water induced by the artificial weir on the streambed. *Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 12(2), 9-19 (in Korean with English abstract).
- Paine, J.G., 2003, Determining salinization extent, identifying salinity sources, and estimating chloride mass using surface, borehole, and airborne electromagnetic induction methods. *Water Resources Research*, 39(3), 3-1~3-10.
- Peterson, E.W. and Benning, C., 2013, Factors influencing nitrate withing a low-gradient agricultural stream. *Environmental Earth Sciences*, 68(5), 1233-1245.
- Robertson, W.M. and Sharp Jr., J.M., 2013, Variability of groundwater nitrate concentrations over time in arid basin aquifers: sources, mechanisms of transport, and implications for conceptual models. *Environmental Earth Sciences*, 69(7), 2415-2426.
- Rodgers, P., Soulsby, C., Petry, J., Malcolm, I., Gibbins, C. and Dunn, S., 2004, Groundwater-surface water interactions in a braided river: a tracer-based assessment. *Hydrological processes*, 18, 1315-1332.
- Scanlon B.R. and Goldsmith, R.S., 1997, Field study of spatial variability in unsaturated flow beneath and adjacent to playas. *Water Resources Research*, 33(10), 2239-2252.
- Schmidt, C., Bayer-Raich, M. and Schirmer, M., 2006, Characterization of spatial heterogeneity of ground-water-stream water interactions using multiple depth streambed temperature measurements at the reach scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, 849-859.
- Slade, R.M. and Buszka, P.M., 1994, Characteristics of Streams and Aquifers and Causes and Sources of Salinity in Surface and Shallow Ground Waters in the Upper Colorado River Basin, Texas. U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations Report 94-4036, 81 p.
- Tiedeman, C.R., Goode, D.J. and Hsieh, P.A., 1998, Characterizing a ground water basin in a New England mountain and valley terrain. *Groundwater*, 36(4), 611-620.
- Tóth, J., 1963, A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 68(16), 4795-4812.

Received : December 8, 2014

Revised : January 13, 2015

Accepted : January 19, 2015