

낙동강 하류 하천구조물 건설 전후의 총적층 지하수위 시계열 특성 비교

김규범 · 차은지* · 정해근 · 신경희

K-water연구원

Comparison of Time Series of Alluvial Groundwater Levels before and after Barrage Construction on the Lower Nakdong River

Gyoo-Bum Kim, Eun-Jee Cha*, Hae-Geun Jeong, and Kyung-Hee Shin

K-water Institute

보의 건설 및 하천 단면의 증가는 하천 수위 상승과 호우기 유출량의 증가를 가져왔다. 낙동강 중하류에 설치된 23개의 지하수 관측망 지하수위 자료를 사용하여 보 담수 전후의 지하수위 시계열 변동 유형의 변화를 분석하였다. 월평균 지하수위 자료를 토대로 담수 전후의 지하수위를 비교한 결과 보의 직상류 주변 지역에서 지하수위 변동이 가장 크게 나타났으며, 8월의 경우 하천 수위 조절 효과로 월평균 지하수위가 0.1 m 감소하였으나 10월에는 1.3 m 상승한 것으로 나타났다. 지하수위 시계열 자료와 하천 수위 자료를 사용하여 군집분석을 실시한 결과, 담수 이전에는 7개 지하수 관측망의 자료가 하천 수위와 유사성 거리가 가까운 그룹이었으나, 담수 이후에는 14개로 증가하여 하천 수위와 유사한 그룹의 범위가 넓어졌다. 지하수위 시계열에 대한 주성분분석 결과, 담수 이전에는 하천 변동성을 대표하는 주성분(주성분 1과 주성분 2)의 설명력이 총 82%이었으나, 담수 이후에는 하천 변동성을 설명하는 주성분(주성분 1)의 설명력이 45%로 줄어들어 지하수위 자료를 설명하는데 하천 요인의 기여도가 줄고 인위적인 양수 등과 같은 기타 요인의 기여도가 높아졌다. 이와 같이 변화되는 수문 환경에 대비하여 지속적인 조사 및 관측이 필요하며, 하천 주변에서는 지표수와 연계되는 지하수 관리 정책이 수립될 필요가 있다.

주요어 : 지하수위, 시계열, 계층적 군집분석, 주성분분석

Increasing the river cross-section by barrage construction causes rises in the average river water levels and discharge rates in the rainy season. The time series patterns for groundwater levels measured at 23 riverside monitoring wells along the lower Nakdong River are compared for two cases: before and after water-filling at the Changnyeong-Haman Barrage. Monthly average groundwater levels indicate a distinct increase in groundwater levels in the upstream riverside close to the barrage. River-water level management by barrage gate control in August, during the rainy season, resulted in a 0.1 m decrease in groundwater levels, while water-filling at the barrage in December caused a 1.3 m increase in groundwater levels. The results of hierarchical cluster analysis indicate that seven groundwater monitoring wells and river water levels were in the same group before barrage construction, but that this number increased to 14 after barrage construction. Principal component analysis revealed that the explanation power of two principal components corresponding to river fluctuation, PC1 and PC2, was approximately 82% before barrage construction but decreased to 45% after construction. This finding indicates that the effect of the river level component that contributes to change in groundwater level, decreases after barrage construction; consequently, other factors, including groundwater pumping, become more important. Continuous surveying and monitoring is essential for understanding change in the hydrological environment. Water policy that takes groundwater-surface water interaction into consideration should be established for riverside areas.

Key words : Groundwater levels, Time series, Hierarchical cluster analysis, Principal component analysis

*Corresponding author: cej@kwater.or.kr

© 2013, 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 언

하천의 변화는 주변지역 지하수의 수문 및 수질 환경에 변화를 가져오는데, 지하수와 지표수의 상호작용을 이해하는 것은 효과적인 수자원 관리를 위하여 필수적인 사항이다. 그 간 우리나라의 수자원관리는 지표수에 편중되어 왔으며, 최근에 대규모 하천 정비 사업을 통하여 수변지역 지하수의 개발과 관리에 대한 관심이 증대되기 시작하였다(K-water, 2012).

전세계적으로 수로 굴착 및 하천의 정비 등에 따라 발생하는 주변 지하수의 변화 및 문제점 해결 등에 대한 다양한 연구들이 수행되어 왔다. Dreher and Gunatilaka (1996)은 오스트리아 비엔나 다뉴브강에 설치된 Freudenu 보의 건설 이후 하천과 주변 지하수위의 상관 관계 및 변화에 대한 모델을 수행하여 지하수위의 조절 및 관리에 대한 연구를 수행한 바 있다. Hill (1996)은 아리조나주의 Yuma 지역에서 농업용 수로의 건설 이후 상승된 지하수위의 강하 기법을 결정하기 위하여 수치모델을 적용하였으며, 수로의 라이닝과 양수정의 설치 등을 제시한 바 있다. Harvey and Sibray (2001)은 Nebraska 지역의 투수성 지반으로 구성된 수로에서의 누수가 주변 지역 지하수 함양에 기여하는지 파악하기 위하여 지하수 관측정 지하수위 분석과 물 시료에 대한 지구화학 및 동위원소 분석 등을 통하여 연구한 바 있다. Hutchings and Petrich (2002)는 Idaho 주의 뉴욕 수로(New York Canal, NYC) 인근에서의 지표수와 지하수의 상호 작용을 연구하였는데, 삼중수소, 질산성질소, 이산화탄소 등을 사용하여 운하내의 지표수가 주변 지하수로 출입하고 천부 지하수 함양원으로서 역할을 함을 밝힌 바 있다. Renken et al. (2005)은 미국 플로리다주 Everglade 지역에 지난 수 십년간 설치된 수로 시스템과 지하수 양수시스템 등이 지표수와 지하수의 상호 이동에 어떤 영향을 미치는지에 대하여 연구하였는데, 수로 시스템을 통한 지표수의 관리가 내륙 농경지 및 주거지의 지하수위를 낮게 조절하고 있고 해안에서의 높은 지하수위는 해수침투를 방지하는데 기여함을 밝힌 바 있다. Arumi et al. (2009)는 칠레의 Cachapoal 강 유역에서의 지하수 함양원은 수로에서의 누수가 약 52%, 관개수의 침투가 약 22% 정도 차지함을 밝힌 바 있다.

국내의 경우, 지난 수년간 4대강 살리기 사업을 통하여 하천 정비가 실시되었으며, 하천 수위를 과거에 비하여 높게 유지시키게 됨으로써 기존의 지표수-지하수 상

호 작용 형태에 변화가 발생할 것으로 예상된다. 지난 수년간의 국내의 지하수위 분포 특성을 보면, 과거 수십년간 지속된 지하수 양수에 의한 영향을 받아 하천 수위와 유사하거나 다소 낮은 특성을 갖고 있었다(MLTM, 2011). 최근 하천 정비 이후 주변 충적 분지에서의 지하수 변화를 파악하고자 지하수 관측정을 설치 운영하고 있다. Kim et al. (2012)는 경상남도 함안군, 창녕군 및 의령군 일대에 설치된 4대강 지하수 관측정의 자료를 활용하여 보 담수 이전의 강우에 대한 지하수위 반응, 지표수-지하수의 연계성, 지하수위 변동 유형의 공간적 분포 등을 분석한 바 있다. 한편, Mucha (1999)는 슬로바키아 다뉴브강에 설치된 Gabčíkovo 보 상류에서의 지하수위는 보 건설 이후 약 3년에 걸쳐 상승하고 이후 안정화되는 것으로 분석한 바 있다.

이와 같이 국내에서는 지표수와 지하수의 수리학적 상호 작용에 대한 연구가 부분적으로 실시되었으나 외국과 같이 지하수에 의하여 발생하는 문제점(수질변화, 침수, 용수공급, 염수침입 등)의 예측 및 해결을 위한 연구는 거의 수행된 바 없다. 최근 4대강 살리기 사업 이후 하천변에 지하수 관측정이 설치 운영되고 있어 지하수 문제 발생 가능성에 능동적으로 대응하고 있을 뿐 아니라, 계측 기반의 지표수와 지하수의 연계성 연구를 지속적으로 수행할 수 있는 기틀이 마련되었다. 따라서, 본 연구에서는 기초연구로서 하천의 담수 전후를 대상으로 지하수 관측정에서 측정된 지하수위 시계열의 변화를 토대로 지표수의 변화가 지하수에 미치는 영향에 대한 기초적인 특성을 평가하였으며 향후 추가적인 연구의 기반을 마련하고자 하였다.

연구 지역

광역 지형과 지질

연구지역은 낙동강 하류로서 경상남도 창녕군, 함안군 및 의령군 일대를 포함하고 있으며, 창녕함안보 상류 낙동강 주변 및 지류 주변의 충적 평야지대에 해당한다(Fig. 1). 대표적인 지류로는 남강, 광려천 및 계성천 등이 분포하며, 충적 평야는 하천 주변을 따라 폭이 약 0.1~2.0 km의 범위로 약 5~10 El.m 정도의 낮은 지형을 보이고 있어 논 농사가 주를 이루며 일부 비닐하우스 등에서 채소 또는 특용작물 등을 재배하고 있다.

본 지역은 백악기 중기 퇴적암류인 하양층군의 함안층과 진동층 및 백악기 후기 유천층군의 화산암류인 주산안산암이 발달하고 있으며, 이들을 불국사 화성암류인

섬록암, 흑운모 화강암, 화강섬록암 및 화강반암, 그리고 암맥들이 관입하고 있다(Choi and Kim, 1963; Kim and Lee, 1964; Choi and Yeo, 1972).

지하수 관측점과 특성

연구지역내에는 총 27개의 지하수 관측점이 2011년 5월부터 설치 운영 중이며 지하수위, 수온 및 전기전도도 등을 매 시간 간격으로 측정하고 있다. 이 중에서 4개소는 암반 지하수, 23개소는 충적층 지하수를 관측 대상으로 하고 있는데, 본 연구에서는 동일 지하수를 분석 대상으로 검토하고자 충적층 지하수 관측점 23개의 시계열 자료를 활용하여 분석을 수행하였다(Fig. 1).

각 관측지점의 매질의 특성을 시추자료를 토대로 파악한 결과, 대부분의 지점에서 상부 지층은 모래와 점토로 구성되고 광려천 유역, 계성천 입구부, 창녕군 길곡

면 오호리 지역 및 남강 하류의 봉곡천 주변 일부에서는 하부에 자갈이 분포하고 있다. 연구지역 충적층의 평균 심도는 약 16.7m이며 낙동강 본류 주변은 20~25m 정도로 깊이 발달한다. 또한, 충적층의 수리전도도는 평균 0.74 m/d 및 투수량계수는 평균 1.39 m²/d에 해당하며, 암반 관측 지점의 암반은 평균 0.03 m/d 및 1.27 m²/d 정도를 보인다. 각 관측점과 주요 하천까지의 거리는 최소 약 21m에서 최대 약 1,600m로서 평균 600m 정도에 해당된다(Kim et al., 2012).

시계열 분석

하천수위 변동

하천수위는 창녕함안보에서 매 10분 단위로 측정하고 있는데, 낙동강의 수위를 토대로 담수 전후의 수위 변동을 비교하였다(Fig. 2). 2011년 10월 말의 담수 시점 이전의 낙동강 수위는 풍수기와 갈수기의 기저 수위의 변동 폭이 2~3m 정도인 반면에 담수 이후에는 2m 이하로 감소하여 변동 폭이 줄었다. 이와 같은 담수 이후의 풍수기와 갈수기의 기저 수위 변동은 창녕함안보 지점에서의 초기 보 운영에 따른 수위 조절에 의한 것으로서 담수 이전의 자연적인 하천 유량 변화에 의한 것과는 차이가 있다. 즉, 향후 창녕함안보 지점의 수위 조절 기능이 본격적으로 수행되어 안정화되면 풍수기와 갈수기의 기저 수위 변동 폭은 더욱 줄어들 것으로 전망된다.

담수 이전인 2011년 5월부터 2011년 10월 말까지의 창녕함안보 지점의 낙동강 수위는 최대 10.1 El.m, 최소 0.8 El.m로 약 9.3m의 변동 폭을 가지며, 평균 수위 2.5 El.m로 나타났다. 또한, 담수 이후인 2011년 10월 말부터 2013년 2월까지의 최대 10.8 El.m, 최소 2.4

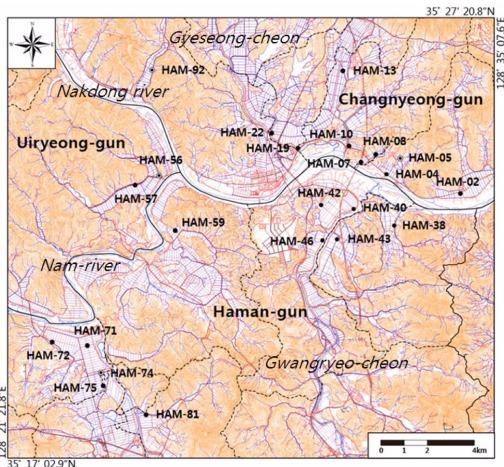


Fig. 1. Location of groundwater monitoring wells in the study area.

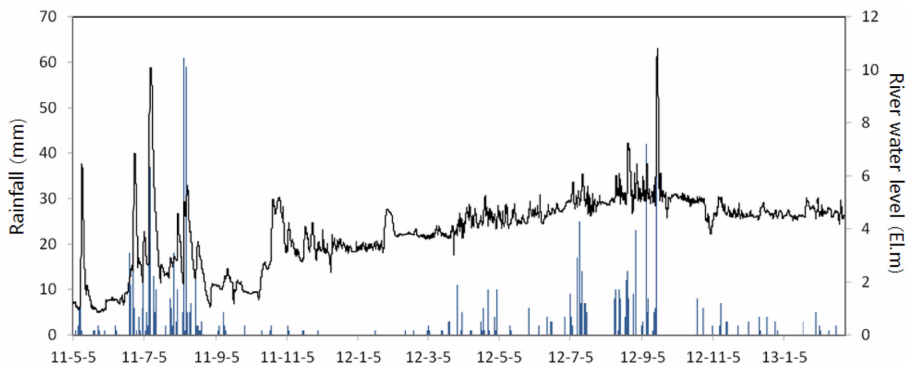


Fig. 2. Hydrograph of river water levels at the Changnyeong-Haman Barrage and rainfall at the Jindong Weather Station.

El.m로서 약 8.4 m의 변동 폭을 가지며, 평균 수위는 4.4 El.m로 나타났다. 즉, 담수 이후에 평균 수위는 상승하였으나 풍수기와 갈수기의 하천 수위 변동 폭이 약 1 m 정도 줄어들었음을 알 수 있다. 담수 이전의 낙동강 수위는 풍수기인 7~9월에 상승하여 강우 사상에 대하여 크게 변동하는 특성을 보이는 반면, 담수 이후에는 보에 의한 수위 조절 효과로 하천 수위의 상하 변동 폭이 줄어들었음을 알 수 있다. 또한, 담수 이후가 이전에 비하여 호우 발생시 하천 단면적 증가에 의한 배출 능력 증대로 고수위 지속 시간이 상대적으로 짧아졌음을 알 수 있다.

지하수위 시계열 특성

연구지역에 2011년에 설치된 23개의 층적층 지하수 관측정의 1시간 간격 자동 관측 자료를 활용하여 담수 전후의 시계열 변화를 분석하고자 각 관측정별로 월평균 지하수위를 산정한 후 월별 변화를 비교하였다(Table 1). 일부 관측정(HAM-7, HAM-56A, HAM-13, HAM-72, HAM-81, HAM-92A)을 제외하고는 농번기(2012년 3월~6월)의 지하수위가 타 기간에 비하여 상대적으로 낮은 특성을 보여 지하수 양수가 지하수위 강하에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 한편, 농번기의 낮은 지하수위를 보이는 지점이 하천과의 거리에 상관없이 연구지역 내 골고루 분포하고 있어 지하수 양수가 하천 수위 또는 강우와 함께 지하수위 변동에 중요한 요인임을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 보 담수 이전의 2011년 5월과 6월에도 유사하게 나타나는 현상으로서 지하수위 변동에 강우와 하천수위 뿐 아니라 지하수 양수가 영향을 미치는 것으로 파악된다(Kim et al., 2012).

대부분의 지하수 관측정에서 2011년 10월 말 담수 시점을 기준으로 이전에 비하여 이후에 월평균 지하수위가 상승하였음을 보여준다. 약 1년 9개월간의 지하수위 상승 정도를 평가해보면, HAM-7, HAM-8, HAM-57, HAM-74, HAM-75, HAM-81 등 6개 지점은 타 지점과 달리 지하수위가 하강한 것으로 나타났다. HAM-7 및 HAM-8은 낙동강에 매우 가깝게 위치함에도 불구하고 하강하는 것으로 나타났는데, 이는 제내지의 배수펌프장에 의한 수로내 수위 조절의 영향을 받는 것으로 보인다. 반면에, 나머지 4개 지점은 하천에서 다소 거리가 이격되어 있는 지점들로서 낙동강 본류 및 연결된 지류(남강, 광려천, 계성천 등)에서의 하천 수위 상승이 지하수위 상승에 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 보인다. 한편, 지하수위 상승 경향이 크게 나타난

지점은 HAM-4 (지하수위 추세: 0.00556 m/d), HAM-40 (0.00467 m/d), HAM-19 (0.00380 m/d), HAM-42 (0.00347 m/d), HAM-46 (0.00274 m/d), HAM-38 (0.00273 m/d) 등의 순으로 나타났다. 이들 지점들은 창녕함안보의 직상류 수 km 이내의 근거리이면서 낙동강 인근에 위치하는 지점들로서 하천수위 상승량이 가장 큰 보 구조물 직상류 인근에 위치하고 있다. 즉, 하천수위 상승량이 가장 큰 보 직상류 하천 주변 지역에서 지하수위 상승이 크게 나타났다. HAM-19, HAM-40 및 HAM-46은 보 담수에 의한 물 꼬리 영향이 나타나는 계성천 변 및 광려천변에 설치된 것으로서 보의 담수로 인한 수위 상승 영향이 직접 반영되는 지점이다. 또한, HAM-42는 낙동강과 광려천 사이에 위치하여 두 하천의 수위 상승 영향이 중첩되어 반영되는 지점이다.

담수 전후의 호수기와 갈수기의 지하수위 상승 특성을 비교하기 위하여 Table 1의 월평균 지하수위 중 6월, 8월, 10월 및 12월의 수위를 비교해 보았다. 호수기인 8월의 23개 지하수 관측정의 월평균 지하수위 분포를 비교해 보면, 담수 이전인 2011년 8월은 약 5.0 El.m, 2012년 8월은 약 4.9 El.m로서 0.1 m 감소한 것으로 나타났다. 이는 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 보 직상류의 낙동강 인근 일부에서의 상승을 제외하고는 거의 변화가 없거나 감소한 것을 알 수 있다. 이는 강우 기간 중에는 강우에 의한 지하수위 상승이 발생하나 월평균적으로는 풍수기 하천의 배수능 향상이 주변 지하수의 배출에도 영향을 미치는 것으로 추정된다. 반면에 6월의 월평균 지하수위는, 2011년 3.3 El.m에서 2012년에는 4.0 El.m로 평균 0.7 m의 상승이 나타났고, 10월의 경우에는 2011년 3.8 El.m에서 2012년에 5.1 El.m로 평균 1.3 m의 상승이 나타났다(Fig. 3(a) 및 Fig. 3(c)). 또한, 12월의 경우에는 담수 이후의 2개년(2011년 12월과 2012년 12월)을 비교한 것으로서, 4.8 El.m에서 4.7 El.m로 거의 변화가 없었음을 알 수 있다(Fig. 3(d)). 이와 같은 결과는, 호수기의 지하수위는 낙동강 본류의 보 직상류를 제외하고는 담수 전후에 큰 변화가 없음을 보여 주는데, 이는 홍수기에 증가된 하천 유량이 하천 정비(단면 증가)에 의하여 빠르게 배출되고 인근 지역의 지하수위 강하에도 긍정적인 영향을 미치는 것으로 파악된다. 그러나, 갈수기가 시작되는 10월의 경우를 보면, 담수 이전에 비하여 하천 주변에서 지하수위가 상승되어 있음을 알 수 있어 향후 갈수기 지하수위 관리가 중요해 졌음을 알 수 있다. 또한, 6월의 경우에는 보 담수 전후에 농업활동에 변화가 거의 없어 유사한 수준의 지

Table 1. Trends of monthly average groundwater levels from June 2011 to February 2013 at each monitoring well.

Month	HAM-2	HAM-4	HAM-5(A)	HAM-7	HAM-8	HAM-10	HAM-13	HAM-19	HAM-22	HAM-38	HAM-40	HAM-42	HAM-43	HAM-46	HAM-56(A)	HAM-57	HAM-59	HAM-71	HAM-72	HAM-74(A)	HAM-75	HAM-81	HAM-92(A)
Jun-11	-0.5	2.1	5.0	8.6	3.1	2.6	7.8	0.9	3.2	4.1	-0.3	0.9	1.5	0.6	4.5	6.5	2.6	4.2	5.9	1.9	1.9	3.0	6.2
Jul-11	1.1	4.2	6.4	9.6	5.3	3.5	8.2	2.7	3.4	5.9	1.7	2.4	3.0	2.2	6.1	7.6	4.2	5.9	7.4	4.2	3.7	3.7	7.1
Aug-11	0.3	3.6	6.8	9.8	5.5	3.7	8.2	2.4	3.6	6.3	1.4	3.9	3.2	2.6	5.6	8.2	5.7	5.7	7.1	4.5	4.4	3.9	7.4
Sep-11	0.4	2.3	6.3	9.2	3.6	3.6	7.9	1.2	3.5	5.5	0.0	1.6	2.4	1.8	4.3	7.8	4.3	4.5	5.9	4.5	4.4	3.5	7.0
Oct-11	0.8	2.4	5.9	9.0	4.1	3.2	7.8	0.8	3.1	4.5	-0.3	-2.6	1.6	0.8	4.5	7.4	5.0	4.2	5.6	3.7	4.2	3.1	6.4
Nov-11	1.5	4.0	6.8	9.4	5.1	3.9	8.1	2.5	3.4	6.1	0.9	3.0	3.2	2.5	5.5	7.8	6.1	4.5	6.0	4.0	4.4	3.5	7.1
Dec-11	1.5	3.8	6.9	9.2	5.6	4.0	7.9	2.5	3.1	6.3	1.4	3.1	3.1	2.4	5.3	7.9	6.1	4.1	5.9	3.6	4.4	3.4	7.1
Jan-12	1.1	4.0	6.8	8.8	4.5	3.4	7.7	2.4	3.0	6.2	1.4	2.9	2.8	2.0	5.3	7.3	5.7	3.8	5.5	3.5	3.9	3.2	7.0
Feb-12	0.8	4.5	6.9	8.7	4.5	3.2	7.6	2.6	3.2	6.2	1.7	2.5	2.9	2.1	5.4	6.9	5.5	3.5	5.4	2.5	2.9	2.9	6.8
Mar-12	1.0	4.5	6.9	8.7	4.2	3.4	7.7	2.6	3.3	6.0	1.7	2.2	2.5	2.0	5.6	6.8	4.9	3.5	5.4	1.9	2.3	2.5	6.9
Apr-12	1.0	5.2	7.1	9.1	4.2	3.9	8.0	2.9	3.5	6.4	2.2	1.8	2.8	2.1	6.1	7.1	4.4	4.2	6.1	1.6	1.7	2.8	7.3
May-12	0.6	5.3	7.1	9.1	4.5	4.2	8.2	3.1	3.7	5.8	2.3	0.5	2.6	2.1	6.1	6.5	3.2	4.1	6.0	1.4	1.5	2.8	7.1
Jun-12	0.2	5.6	6.4	9.1	0.7	4.2	8.4	3.3	3.6	4.9	2.6	1.5	3.1	2.1	6.1	5.5	2.8	4.4	6.3	1.8	2.1	3.0	6.4
Jul-12	0.6	6.1	7.1	9.2	2.5	4.5	8.6	3.2	3.5	6.2	3.2	2.0	3.7	2.8	6.8	6.4	4.3	5.2	7.1	3.7	3.8	3.5	7.0
Aug-12	-0.2	6.4	6.8	9.2	2.1	4.6	8.6	3.5	3.6	5.1	3.4	2.0	3.2	2.9	7.1	6.4	5.2	5.6	7.4	4.1	4.4	3.7	6.8
Sep-12	1.8	6.6	7.6	9.4	5.3	4.9	8.4	4.1	3.9	7.6	3.6	3.7	4.7	3.7	7.2	7.7	6.3	6.3	7.7	4.5	4.6	3.9	7.6
Oct-12	1.2	5.8	7.4	9.0	4.3	4.6	8.0	3.4	3.8	6.6	2.8	2.5	3.4	2.9	6.6	7.5	6.1	5.1	6.5	3.9	4.1	3.2	6.8
Nov-12	1.2	5.3	7.4	8.9	4.6	4.5	8.0	3.4	3.5	7.0	2.5	3.8	3.5	2.9	5.9	7.5	6.2	4.4	5.9	2.5	2.8	2.4	7.1
Dec-12	1.4	5.3	7.3	8.8	4.7	4.3	7.8	3.6	3.6	6.9	2.5	3.8	3.7	2.9	4.5	-	6.0	4.3	6.0	2.7	3.2	2.7	7.2
Jan-13	1.6	5.3	7.3	8.8	3.9	4.2	7.7	3.4	3.5	6.8	2.5	3.8	3.5	2.9	4.1	-	5.8	4.3	5.9	2.6	3.1	2.9	7.0
Feb-13	1.2	5.4	7.3	8.9	4.4	4.0	7.8	3.5	3.5	7.0	2.5	4.1	3.5	3.1	4.1	-	6.0	4.5	6.2	2.6	2.9	2.9	7.0
Slope (m/d)	0.00129	0.00556	0.00256	-0.00049	-0.00105	0.00226	0.00020	0.00380	0.00062	0.00273	0.00467	0.00347	0.00250	0.00274	0.00067	-0.00131	0.00240	0.00013	0.00034	-0.00134	-0.00084	-0.00091	0.00043

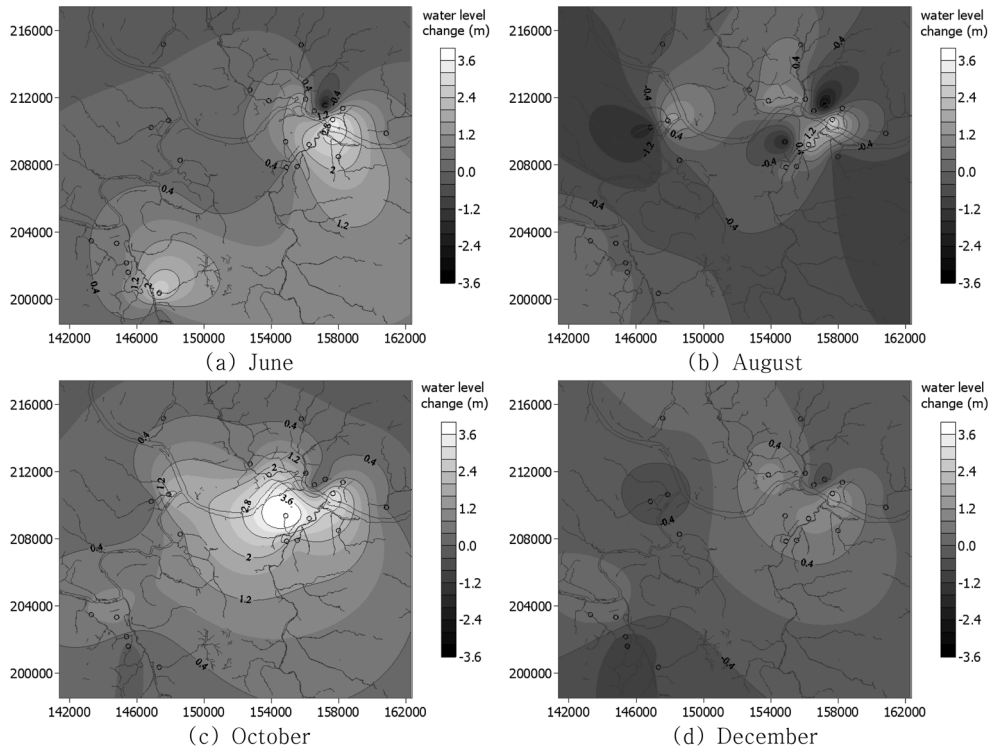


Fig. 3. Distribution map of changes in monthly average groundwater levels in June, August, October, and December.

하수 양수가 이루어졌음에도 지하수위 상승이 나타나고 있어 담수로 인하여 주변지역 농업용수 등 수자원의 총량이 증대되는 효과가 발생하였음을 보여준다.

지하수위 유형 분류 및 변화

연구지역내 지하수 관측정의 지하수위 변동 유형을 분류하기 위하여 계층적 군집분석을 실시하였다(Fig. 4). 군집분석이란 N개의 관찰치를 대상으로 p개의 변수를 측정했을 때 관측한 p개의 변수를 이용하여 N개 관찰치 사이의 유사성을 분석하여 가까운 것들끼리 순서대로 군집화하는 분석 방법이다. 특히, 계층적 군집분석이란 개별 대상 간의 유사성 거리를 구하여 가장 가까이 있는 대상들로부터 시작하여 결합해 감으로써 나무모양의 계층구조를 형성해가는 방법으로서 군집이 형성되는 과정을 파악할 수 있다(Park et al., 1999).

계층적 군집분석 결과 도출된 덴드로그램(Dendrogram)에서 3단계 분류 기준 하에서 담수 이전과 이후에 각각 3개 그룹으로 나누어 진다. 즉, 담수 이전에는 HAM-10, HAM-81, HAM-22, HAM-74A, HAM-75,

HAM-56A, HAM-71, HAM-38, HAM-8 및 HAM-59 등이 그룹 1(10개소), HAM-2, HAM-40, HAM-4, 하천(River), HAM-19, HAM-46, HAM-43 및 HAM-42 등이 그룹 2(8개소), HAM-5A, HAM-72, HAM-57, HAM-92A, HAM-13 및 HAM-7 등이 그룹 3(6개소)으로 분류된다. 그러나, 담수 이후에는 담수 전의 그룹 1에 속하는 많은 관측정들이 하천 수위 변동이 속한 그룹 2로 이동하여 분류되어 있음을 알 수 있다. 즉, 담수 전 그룹 1에 속하던 관측정 중에서 HAM-74A, HAM-75, HAM-81, HAM-22, HAM-71, HAM-10, HAM-59 및 HAM-8 등(8개소)이 담수 이후에는 하천과 동일한 그룹에 속하게 되었다. 이와 같이 담수 이전에는 하천과 유사성 거리가 멀리 떨어져 있던 관측정들이 담수 이후에는 하천과 유사성 거리가 가까워 졌음을 알 수 있다. 반면에, 담수 이전에는 하천과 동일한 그룹에 속하던 HAM-2는 담수 이후에 완전히 별도의 그룹으로 분리되었는데, 이는 HAM-2이 창녕함안보 하류에 설치된 지하수 관측정으로서 보 건설 이후에는 상류의 하천 수위 변동과 완전히 차별화 되었음을 보여준다. 한편, 담수 이전에 하천과 유사성 거리가 멀었던 6개 관측정(그

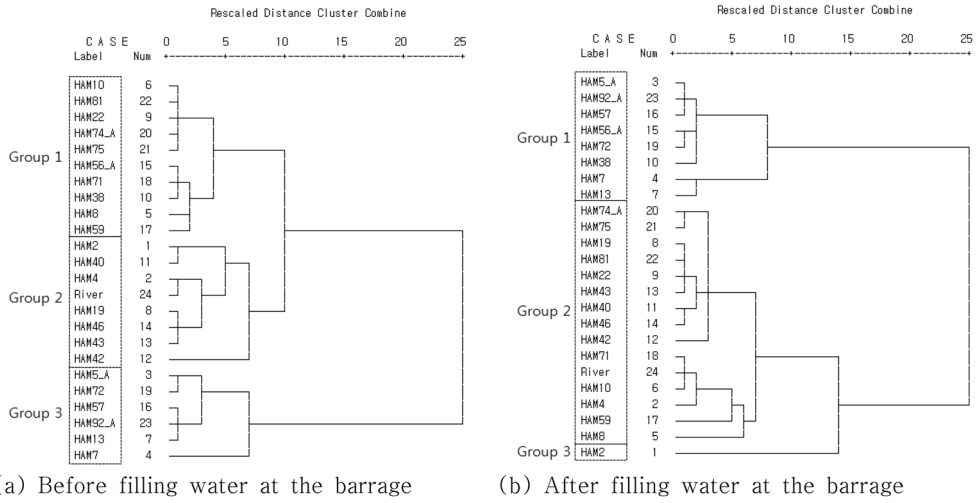


Fig. 4. Results of hierarchical cluster analysis for two cases: before and after water filling at the barrage.

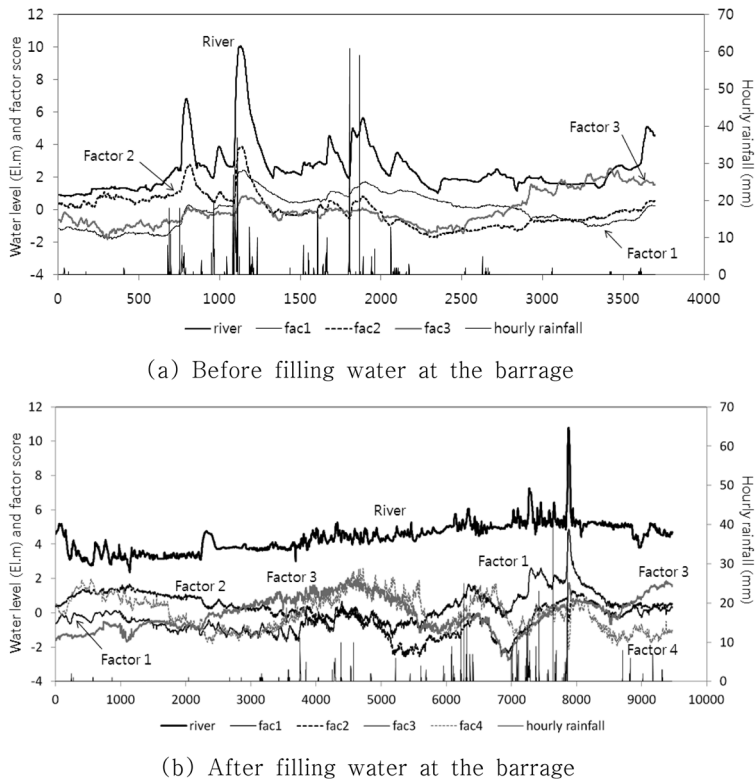


Fig. 5. Time series for river water level, factor scores, and hourly rainfall for two cases: before and after water filling at the barrage.

그룹 3)은 담수 이후에도 별도의 그룹으로 분류되고 있어 담수의 영향이 매우 적었음을 보여준다. 이상 군집분석

결과를 종합해 보면, 담수 이후가 담수 이전에 비하여 하천 수위와 지하수위의 유사성을 보이는 지점이 보다

많아지고 공간적으로 넓어졌음을 알 수 있는데, 이는 담수로 인하여 하천수위 상승 효과가 주변 지하수에도 나타났고 보 지점에서 일정하게 하천수위를 관리함으로써 과거에 비하여 하천의 변동 폭 등 변동성이 낮아져 지하수위도 상대적으로 변동성이 줄어든 효과가 반영된 것으로 보인다.

담수 전후에 지하수위 변동을 설명할 수 있는 대표성분을 추출하기 위하여 지하수위 시계열 자료에 대한 주성분 분석을 실시하였다. 2011년 10월말까지의 담수 이전의 23개 지하수위 시계열 자료에 대한 주성분은 3개가 도출되었으며 전체 자료의 약 89.7%를 설명하고 있다. 주성분 1에 의하여 68.1%, 주성분 2에 의하여 13.9% 및 주성분 3에 의하여 7.7%가 설명된다. 여기에서 주성분 1은 하천 수위와의 Pearson 상관계수가

0.66, 주성분 2는 0.63, 주성분 3은 0.21로 모두 유의(유의수준 0.01)한 것으로 나타나 주성분 1과 주성분 2는 하천수위 변동과 관련성이 높음을 알 수 있다. 주성분 1과 주성분 2는 하천 수위 상승에 따라 지하수위 상승이 잘 나타나고 있으나 지하수위의 강하 형태에는 다소 차이가 있다. 즉, 주성분 1은 주성분 2에 비하여 지하수위 상승폭이 작고 강하 속도도 느리고 완만하여 상승된 지하수위가 일정기간 동안 지속적으로 유지되게 하는 요인으로 작용한다(Fig. 5(a)). 약 0~700시간 동안의 자료에서 보듯이 주성분 3은 5월 및 6월의 농번기 지하수 양수에 의한 지하수위 강하를 설명해주는 요인으로 판단되는데, 주성분 1과 달리 양수 효과가 반영된 지하수위 변동이 짧은 주기로 반복되는 특성을 갖고 있다. 보 담수 이후인 2011년 11월 이후에는 총 4개의 주

Table 2. Component matrix for two cases: before and after water filling at the barrage.

(a) Before filling water at the barrage				(b) After filling water at the barrage				
Wells	comp.1	comp.2	comp.3	Wells	comp.1	comp.2	comp.3	comp.4
HAM-2	0.531	0.146	0.669*	HAM-2	0.226	0.809*	0.251	0.109
HAM-4	0.780*	0.548	0.148	HAM-4	0.775*	-0.537	0.181	-0.158
HAM-5A	0.920*	-0.341	0.132	HAM-5A	0.622*	0.389	0.552	0.002
HAM-7	0.970*	-0.107	-0.004	HAM-7	0.705*	0.072	-0.223	0.610
HAM-8	0.763*	0.151	0.170	HAM-8	0.083	0.842*	0.316	0.137
HAM-10	0.851*	-0.470	0.112	HAM-10	0.864*	-0.217	0.034	0.127
HAM-13	0.936*	0.203	-0.164	HAM-13	0.706*	-0.505	-0.197	0.242
HAM-19	0.865*	0.457	-0.035	HAM-19	0.852*	-0.316	0.232	-0.159
HAM-22	0.663*	-0.374	-0.534	HAM-22	0.575*	-0.317	0.358	0.125
HAM-38	0.909*	-0.234	-0.186	HAM-38	0.474	0.653*	0.448	-0.095
HAM-40	0.914*	0.376	-0.002	HAM-40	0.786*	-0.472	0.200	-0.196
HAM-42	0.652*	0.042	-0.639	HAM-42	0.355	0.627*	-0.056	-0.362
HAM-43	0.931*	-0.090	-0.224	HAM-43	0.755*	0.193	-0.015	-0.126
HAM-46	0.954*	-0.160	-0.161	HAM-46	0.903*	0.152	-0.010	-0.126
HAM-56A	0.775*	0.604	0.108	HAM-56A	0.862*	-0.364	0.097	-0.100
HAM-57	0.818*	-0.486	0.132	HAM-57	0.215	0.908*	0.058	0.080
HAM-59	0.659*	-0.294	0.391	HAM-59	0.311	0.794*	-0.179	-0.374
HAM-71	0.907*	0.342	-0.069	HAM-71	0.966*	-0.072	-0.156	0.038
HAM-72	0.839*	0.446	-0.084	HAM-72	0.931*	-0.193	-0.119	0.121
HAM-74A	0.726*	-0.451	0.240	HAM-74A	0.625*	0.417	-0.583	-0.121
HAM-75	0.665*	-0.559	0.402	HAM-75	0.517*	0.478	-0.658	-0.118
HAM-81	0.972*	-0.049	-0.075	HAM-81	0.664*	0.173	-0.607	0.184
HAM-92A	0.925*	-0.318	-0.162	HAM-92A	0.493	0.550*	0.351	0.413
River	0.660*	0.631	0.211	River	0.765*	-0.461	0.160	-0.233

성분이 전체 자료의 약 85.0%를 설명하는 것으로 분석되었다. 주성분 1에 의하여 45.0%, 주성분 2에 의하여 25.0%, 주성분 3에 의하여 10.0% 및 주성분 4에 의하여 5.1%가 설명된다. 여기에서, 주성분과 하천 수위의 Pearson 상관계수를 보면, 주성분 1은 하천수위와 0.77, 주성분 2는 -0.46, 주성분 3은 0.16, 주성분 4는 -0.23의 값을 보여 유의수준 0.01하에서 유의한 것으로 분석되었다. 주성분 1은 하천 수위의 상승과 하강 현상을 잘 반영하고 있어 하천과 연계성이 높고 담수 이전에 비하여 높은 상관계수를 보여주고 있으며, 주성분 2, 주성분 3 및 주성분 4는 약 4,500~6,000시간 기간인 4월에서 6월에 낮은 값을 보이고 있어 농번기 지하수 양수 등 기타 요인에 의한 지하수위 변동성을 설명하고 있다(Fig. 5(b)). 담수 이전에는 하천 수위 변동성을 반영하는 주성분(주성분 1 및 주성분 2)이 지하수위 시계열 자료의 전체의 약 82.0%를 설명해 준 반면에 담수 이후에는 약 45.0%로 줄어들었는데, 이는 담수 이후에 하천 수위가 일정하게 유지됨으로 인하여 주변 지역 지하수위 변동성을 분류하는데 그 영향이 줄어들었음을 알 수 있다.

담수 이전에는 주로 주성분 1에 의하여 지배받던 지하수위 시계열 자료들이 담수 이후에는 주성분 1과 2로 구분되는 경향을 보였다(Table 2). 즉, 담수 이전 자료와 담수 이후 자료에 대한 주성분 분석을 실시하여 도출된 성분 매트릭스(Component matrix)를 보면, 담수 이전에는 가장 우세한 성분이 주성분 1로 나타난 경우가 HAM-2를 제외한 22개 모든 관측정이 해당되었으나, 담수 이후에는 가장 우세한 성분이 주성분 1인 경우가 16개 관측정, 주성분 2인 경우가 7개로 나타났다. 위에서 언급한 바와 같이 담수 이전에 주성분 1은 하천수위 변동과 유사한 성분이며, 담수 이후에는 주성분 1은 하천수위 변동과 유사하고 주성분 2는 지하수 양수 등 기타 요인이 반영된 성분에 해당된다. 이와 같은 주성분 변화의 요인은 담수 전후의 하천수위 변동 폭과 지하수위 변동 폭의 차이 등에 의한 것으로 판단된다. 즉, 위에서 언급한 바와 같이 보 담수 이후에는 하천수위의 변동 폭이 크게 줄어들어 안정화 되었으며, 이와 함께 담수 이전에는 월평균 지하수위의 표준편차가 0.9m이었으나 담수 이후에 0.7m로 줄어들면서 하천 수위와 관련된 수위 변동 성분의 영향이 지하수위 시계열 자료에서 줄어들었음을 알 수 있다. 따라서, 주성분 1에 의하여 강하게 설명되던 관측값이 주성분 2가 부각되면서 대체되는 효과를 가져왔다. 담수 이후에 주성분 1에서 주성분 2로 대표성이 변화된 지하수 관측정은 HAM-8, HAM-

38, HAM-42, HAM-57, HAM-59, HAM-92A 등으로서 담수 이후에는 지하수 양수 작용이 수위 변동에 미치는 상대적인 영향이 증가하여 별도 주성분으로 도출되었음을 의미한다.

토 론

하천 주변 총적층에서의 지하수위 변동은 일반적으로 강우, 하천수위 및 인위적 양수 등에 의하여 영향을 받는다. 하천내에 대형 구조물의 설치 및 하천 폭과 깊이의 확대는 하천 수위 및 유량의 변화를 야기하고 주변 총적층 지하수위의 변화에도 영향을 미친다. 창녕함안보의 최근 약 1년 9개월의 하천 수위 자료를 보면, 과거에 비하여 호우시 고수위 지속시간이 짧아져 홍수 관리가 용이해 졌음을 알 수 있다. 반면에, 하천 주변의 총적 분지에서의 지하수위는 지역에 따라 상승하는 경우가 발생하였으며, 보의 직상류 주변의 총적층 지하수위가 상류 지역에 비하여 상대적으로 높은 상승을 보이고 있다.

계층적 군집 분석 결과는 하천과 유사한 변동성을 보이는 관측정의 갯수가 보의 담수 이전에 비하여 이후에 증가하였음을 보여준다. 지하수위는 인위적 요인이 없다면 하천에 비하여 변동 폭이 작은 특징을 갖는데, 과거에 비하여 하천 수위가 높게 유지되고 일정하게 관리되면서 하천의 변동성이 작아지는 것이 주변의 지하수위에도 영향이 미쳐 하천과 유사한 변동을 보이는 지하수위 그룹이 증가하게 되는 효과를 가져온 것으로 보인다. 이와 같은 결과는, 지하수위 변화가 하천 수위와의 연계성이 높아졌음을 의미하며 지표수 지하수 연계 관리의 중요성이 커졌다고 할 수 있다.

연구지역의 일부는 과거 대형 태풍 상륙시 침수가 빈번하게 발생하는 지역으로서 보 건설 이후 호우기의 배수능 증대에 대한 효과가 중요하게 분석되어야 한다. 하천 단면적의 증가를 통하여 호우기의 하천 배수능이 증가되었으나, 하천 유출량의 증가 및 수위 조절이 주변 지역 지하수위 강하에 어떤 영향을 미치는지에 대한 연구는 전무한 실정으로서, 설치 운영 중인 4대강 지하수 관측정의 지속적인 운영 관리 및 평가가 필요하다. 즉, 호우가 예상될 경우 적절한 시간에 하천 수위를 조절하는 것이 주변 지하수위 강하에 어떻게 영향을 미치는지 모사함으로써 호우시 침수 면적과 기간을 감소시키는데 보 운영이 긍정적으로 기여할 부분을 찾을 필요가 있다. 한편, 위에서 분석한 바와 같이 연구지역 총적층 지하수

위는 11월부터 2월까지 갈수기 기간 동안 높게 유지되는 특성을 보이고 있다. 이는 동절기에 지하수 이용이 최소화되는 기간으로서 농번기 양수에 의한 인위적인 지하수위 강하 효과가 반영되는 4-6월과 차별화 되는 현상으로서 지속적인 관측과 평가가 요구되며, 동절기 지하수위 조절과 보 운영과의 관계에 대한 연구가 필요하다.

하천 구조물의 설치에 따른 주변 지하수위 변동의 대표적인 사례는 다뉴브강에 설치된 Gabčíkovo 보에서 찾을 수 있다. 슬로바키아는 1992년에 Gabčíkovo 보 설치 이후 다뉴브강 주변에 약 1,000개소의 지하수 관측정을 설치하였으며, 수위 및 수질 변화를 수년간 관측하고 평가한 바 있다(Mucha, 1999). 아울러, 다뉴브강 및 주변의 식생, 조류, 어류 등에 대한 수년간의 종합적인 조사 분석을 통하여 보 건설 이후의 변화를 평가하였다. 이번 연구는 보의 담수 이후 불과 1년 정도의 관측 자료를 활용하여 평가한 것으로서 지표수와 지하수의 상호 작용이 현재에도 진행 중으로서 두 수문 인자간의 평형 상태에 도달하기 위한 시간이 필요할 것으로 보인다. 따라서, 본 연구에서는 보의 담수 이후 초기 지하수위 변동에 대한 정량적 평가를 통하여 향후 발생 가능한 현상과 조사 연구 방향을 제시하고자 하였다. 연구 결과에서 보듯이 지하수위의 변화는 하천수와 연계되어 진행 중에 있는 것으로 보이며, 이와 관련하여 향후 지하수 수위 및 수질, 토양, 지표수 수질, 농작물의 재배 영향, 식생 및 어류 등에 대한 종합적이고 지속적인 연구 조사가 추진될 필요가 있겠다.

결 언

낙동강 중하류 지역에서의 하천 구조물(창녕함안보) 설치 전후를 대상으로 23개 지하수 관측점에서 측정된 지하수위 변동 유형의 변화를 비교 평가한 결과는 다음과 같다.

첫째, 낙동강 하천 단면의 증가 및 보에 의한 하천수위의 관리는 하천 수위 변동 폭의 감소 및 호우기 고수위 지속 시간의 감소를 가져왔다.

둘째, 연구지역내 평균적인 지하수위 상승이 있었음에도 풍수기의 지하수위는 보의 담수 전후에 큰 변화를 보이지 않고 있는데, 이는 풍수기 하천 배출 능력이 증가하여 주변 지하수위 강하에 긍정적 영향을 미쳤음을 보여주고 있다. 반면에, 담수 이후 갈수기의 경우에는 하천 인근의 저지대 충적 분지에서 지하수위가 얇게 형성

될 수 있으므로 지속적인 조사 및 관리가 필요하다.

셋째, 23개 지하수위 시계열 자료와 하천수위 자료를 토대로 계층적 군집분석과 주성분 분석을 수행한 결과, 담수 이후에는 하천과 유사성 거리가 가까운 지하수 관측정의 갯수가 늘어났는데, 이는 하천 수위가 상승하고 일정한 수위 관리가 이루어지면서 지하수위도 상승하고 시계열의 변동성도 줄어든 효과가 작용한 것이다.

일반적으로 지표수와 지하수는 단일 수자원으로 강조하고 있으나, 실제 수자원 관리 측면에서 두 수문인자가 연계되어 평가되거나 운영되는 경우는 거의 없었다. 그러나, 4대강 살리기 사업 이후 하천 수위의 상승은 주변 지하수위에 변화를 가져오고 지역에 따라서는 지하수 침수 민원이 제기되는 등 수자원 관리의 중심에 지하수가 위치하게 되었다. 현재 설치되어 있는 지하수 관측망의 자료에 대한 지속적인 평가와 분석을 통하여 지표수가 함께 고려된 하천 주변의 지하수 관리 방법론이 정착되길 기대해 본다.

사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기술혁신C05)에 의한 ‘수변지하수활용고도화’ 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Arumi, J. L., Rivera, D., Holzapfel, E., Boochs, P., Billib, M., and Fernald, A., 2009, Effect of the irrigation canal network on surface and groundwater interactions in the lower valley of the Cachapoal River, Chile, *Chile Journal of Agricultural Research*, 69(1), 12-20.
- Choi, S. O. and Yeo, S. C., 1972, Geological Map of the Namji area, Geological Survey of Korea, 27p (in Korean).
- Choi, Y. G. and Kim, T. Y., 1963, Geological Map of the Euiryeong area, Geological Survey of Korea, 29p (in Korean).
- Dreher, J. and Gunatilaka, A., 1996. Groundwater management in the city of Vienna. Modelling, testing & monitoring for hydro power plants-II, *International Journal of Hydro Power and Dams*, 2, 545-554.
- Harvey, F. E. and Sibray, S. S., 2001, Delineating groundwater recharge from leaking irrigation canals using water chemistry and isotopes, *Ground Water*, 39(3), 408-421.
- Hill, B. M., 1996, Use of a numerical model for management of shallow ground-water levels in the Yuma, Arizona area, *Ground Water*, 34(3), 397-404.

- Hutchings, J. and Petrich, C. R., 2002, Influence of Canal Seepage on Aquifer Recharge near the New York Canal, The Idaho Department of Water Resources, Idaho, 31p.
- K-water, 2012, 4 Major Rivers Restoration Project; Technical Note, Daejeon, 193p.
- 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.
- Kim, N. J. and Lee, H. G., 1964, Geological Map of the Yeongsan area, Geological Survey of Korea, 52p (in Korean).
- MLTM (Ministry of Land, Transportation, and Maritime Affairs), 2011, Annual Report of Groundwater Monitoring in Korea, Seoul, 650p (in Korean).
- Mucha, I., 1999, Plenipotentiary of the Slovak Republic for Construction and Operation of Gabčíkovo-Nagyymaros Hydropower Scheme; Gabčíkovo Part of the Hydroelectric Power Project Environmental Impact Review, Ground Water Consulting Ltd., Bratislava, Slovakia, 399p.
- Park, S. H., Cho, S. S., and Kim, S. S., 1999, Korean SPSS for Statistical Analysis, SPSS Academy, Seoul, 471p (in Korean).
- Renken, R. A., Dixon, J., Koehmstedt, J., Ishman, S., Lietz, A. C., Marella, R. L., Telis, P., Rogers, J., and Memberg, S., 2005, Impact of Anthropogenic Development on Coastal Ground-Water Hydrology in Southeastern Florida, 1900-2000, Circular 1275, U.S. Geological Survey, 77p.

김규범

한국수자원공사 K-water연구원 수변지하수활용고도
화연구단 305-730 대전광역시 유성구 유성대로
1689번길 125 (전민동)
Tel: 042-870-7640
E-mail: gbkim@kwater.or.kr

차은지

한국수자원공사 K-water연구원 수변지하수활용고도
화연구단 305-730 대전광역시 유성구 유성대로
1689번길 125 (전민동)
Tel: 042-870-7643
E-mail: cej@kwater.or.kr

정해근

한국수자원공사 K-water연구원 수변지하수활용고도
화연구단 305-730 대전광역시 유성구 유성대로
1689번길 125 (전민동)
Tel: 042-870-7648
E-mail: jhg@kwater.or.kr

신경희

한국수자원공사 K-water연구원 수변지하수활용고도
화연구단 305-730 대전광역시 유성구 유성대로
1689번길 125 (전민동)
Tel: 042-870-7615
E-mail: silver4826@kwater.or.kr

원고접수일 : 2013년 3월 28일

수정본채택 : 2013년 5월 23일

게재확정일 : 2013년 5월 27일