

보 건설이 주변지역 지하수 흐름계에 미치는 영향

정수정^{1,2} · 구민호^{1*}

¹공주대학교 지질환경과학과

²한국수자원공사 지하수지반사업팀

Analyzing the Effect of a Weir Construction on the Groundwater Flow System

Soo-Jeong Jeong^{1,2} · Min-Ho Koo^{1*}

¹Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

²K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

ABSTRACT

Visual MODFLOW, a three dimensional groundwater flow model, was used to analyze effects of a weir construction in an alluvial stream on the nearby groundwater flow system. A hypothetical conceptual model was developed to investigate how the groundwater level and the water budget could change after a weir construction depending on the location of tributary streams. A site example, dealing with the Juksan weir installed in the Yeongsan River, was also demonstrated to predict the effects of the weir construction. Model results show that impacts of a weir construction on the groundwater flow system greatly vary depending on how far a tributary is located and whether it is located downstream or upstream from the weir. Therefore, consideration of the location of tributaries in planning the location of a weir could effectively minimize the impacts of a weir construction on the groundwater flow system. It is also demonstrated that model results are highly dependent upon how the model is dealing with small tributaries and agricultural drainage channels, which can be easily found nearby the main streams, acting as major water bodies for groundwater discharge. The model for the Juksan area shows that the weir construction will change the direction of groundwater flow in some areas, leading to changes of groundwater quality and interaction of the Yeongsan River to the aquifer from a gaining to a losing stream. The model also predicted the areas where rise of groundwater level caused by the Juksan weir could adversely affect plant growth, and thereby suggested installing new drainage channels as a countermeasure to drawdown the groundwater level.

Key words : Visual MODFLOW, Weir construction, Groundwater flow, Drain, Water balance

1. 서 론

정부가 추진하고 있는 4대강 정비 사업은 우리나라의 4대강인 금강, 낙동강, 영산강 그리고 한강의 하도를 준설하고 친환경 보(洑)를 설치하여 홍수피해와 물 부족을 근본적으로 해결하고 수질개선과 하천복원으로 건전한 수생태계를 조성하는데 목적이 있다(국토해양부, 2009). 보는 일종의 소규모 댐으로 분류 할 수 있으며, 수위확보를 위하여 하천의 횡단 방향으로 설치하는 시설물이다. Quilis et al.(2009)은 기후 변화로 가뭄의 기간과 주기가 증가하고 물 부족을 유발하여 인간생활을 위협하는데 이를 위한

해결책으로 보 건설로 물을 막아 저장함으로써 해결할 수 있다고 제시하기도 하였다. 하지만 보 설치 시 주변 지역 지하수위가 상승하여 주변 농경지나 저지대가 침수될 가능성이 있어 4대강 사업의 문제점의 하나로 지적되고 있다. 실제 낙동강 일부 지역에서는 4대강 사업 공사 중 지하수 흐름이 교란되면서 주변 농경지에서 침수 피해가 발생하기도 하였다.

지하수와 하천수는 수리적으로 연결된 하나의 수자원으로 하천에 보를 설치하여 하천수위를 상승시키면 하천과 연결된 주변 대수층 지하수의 수위도 동반 상승하게 된다. 농림부(2004) 자료에 의하면 지하수위가 상승하여 지표 하

*Corresponding author : koo@kongju.ac.kr

원고접수일 : 2012. 3. 6 심사일 : 2012. 5. 23 게재승인일 : 2012. 5. 24

질의 및 토의 : 2012. 8. 31 까지

1 m 이내에 이르면 농작물의 생육에 영향을 미치게 되므로 보 설치 후 주변 농경지에서 지하수위가 상승할 경우 농작물에 피해를 줄 수 있다. 따라서 보 설치가 주변 지하수계에 미치는 영향을 분석하여 이로 인해 발생할 수 있는 부정적인 영향을 해결하고 그 영향을 최소화할 수 있는 방안을 모색해야 한다.

최근 배상근 · 이승연(2009)은 4대강 정비 사업으로 인한 하천수위의 변화가 인근 지역의 지하수에 미치는 영향을 분석해야 한다고 강조하였고, 지하수 모델링을 통해 보 설치 후 하천수가 대수층으로 유입되는 현상과 시간이 경과함에 따라 그 영향 범위가 커지는 것을 보여주었다. 김승연(2010)은 보 설치로 인해 발생하는 침수문제에 대한 해결책의 일환으로 무동력 강변여과를 소개하고, 이를 통하여 지하수위 상승으로 인한 침수를 예방하고 깨끗한 여과수를 공급할 수 있을 것이라고 제시하였다.

보 설치 후 발생하는 지하수위 변화는 매우 복잡한 지표수-지하수 상호작용의 결과로 나타나며, 이에 영향을 미치는 수문학적 인자들은 매우 다양하나 크게 두 가지 요인이 중요하게 작용할 것으로 예상된다. 첫째, 보가 설치되는 강의 본류로 합류되는 주요 지류들의 위치이다. 만약 지류가 보 상류에 위치하면 지류에서도 본류로 같이 보 설치의 영향으로 수위가 상승하여 주변 지역 대수층의 지하수위 변화에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 보가 건설되는 위치와 본류 주변에 위치하는 지류의 상대적 위치에 따라 보 설치가 지하수계에 미치는 영향은 크게 달라진다. 둘째, 농경지에 발달해 있는 농업용 수로의 존재이다. 우리나라의 하천 주변 농경지에는 관개용수시스템에 따라 많은 농수로들이 위치하고 있다. 보 설치 후 지하수위가 상승하여 농수로 바닥면보다 수두가 높아지면 농수로는 지하수가 배출되는 배수로의 역할을 하게 된다. 따라서 보 설치가 주변 지하수계에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해서는 지류의 위치와 농수로 배수체계를 종합적으로 고려해야 한다.

본 연구의 목적은 보 설치 전 · 후의 지하수계 변화를 모의하는 지하수 흐름 모델을 통하여 보 설치가 지하수

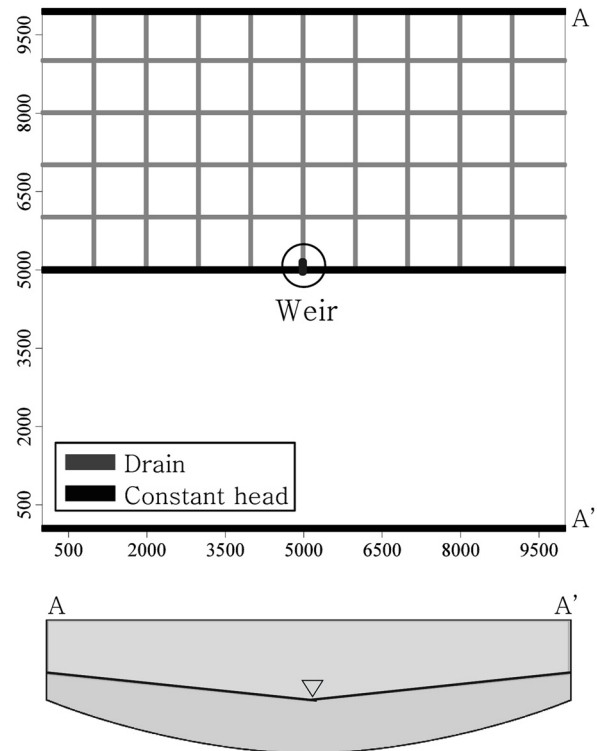


Fig. 1. A hypothetical conceptual model for analyzing effects of a weir construction on the groundwater flow system.

흐름계에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는데 있다. 가상의 개념모델을 통하여 지류의 위치와 농업용 배수로의 존재가 모델 결과에 미치는 영향을 분석하였으며, 영산강 죽산보 지역에 대한 모델 예측 결과를 이용하여 보 설치로 인해 발생할 수 있는 부정적인 영향을 최소화할 수 있는 수문공학적인 방안을 제시하였다.

2. 가상의 개념 모델을 통한 하천 지류 및 배수로의 영향 분석

2.1. 개념모델

Fig. 1은 보를 설치하여 하천수위를 상승시켰을 경우 하

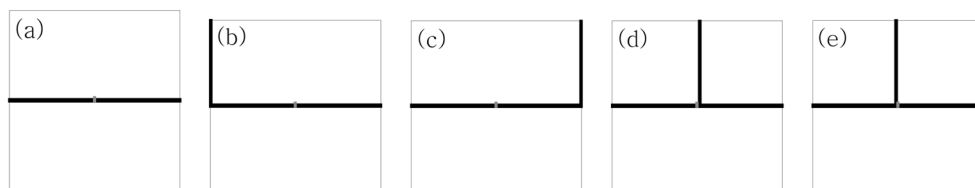


Fig. 2. Models showing different locations of a tributary to the main stream: (a) Model A, (b) Model B, (c) Model C, (d) Model D, and (e) Model E.

천 주변에서의 지하수 흐름을 모사하기 위해 설정한 가상의 개념모델이다. 모델 영역은 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ 의 규모이며, 격자의 크기는 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ 로 설정하였다. 모델의 단면은 실제 하상 층적층의 공간분포를 고려하여 강 부근에서 충적층이 두껍게 발달하고, 강에서 멀어 질수록 얇아지는 것으로 설정하였다. 보는 본류의 중앙에 위치하며, HFB(수평유동차수벽) package를 사용하여 불투수벽 역할을 하는 것으로 가정하였다. 보 설치 전 본류의 수위는 0m이며, 보 설치 후 보 상류의 수위가 5m 상승하는 것으로 설정하였다. 모델영역의 남쪽과 북쪽 끝단의 경계는 10m의

수두를 갖는 일정수두경계로 설정하여 지하수의 흐름이 0.002의 수두구배를 갖고 본류로 흐르는 것으로 하였으며, 지하수 함양은 발생하지 않는 것으로 모델을 단순화 하였다. 대수층의 수리전도도는 1 m/day 로 가정하였으며, 비저유계수 및 비산출률은 정류모델의 결과에 영향을 미치지 않으므로 기본 값으로 설정하였다.

Fig. 2는 본류로 합류되는 지류의 위치를 나타낸 것으로 본류로 유입되는 지류가 없는 경우(Model A)와 지류가 보 최하류(Model B), 보 최상류(Model C), 보 상류 100 m 떨어진 지점(Model D), 보 하류 100 m 떨어진 지

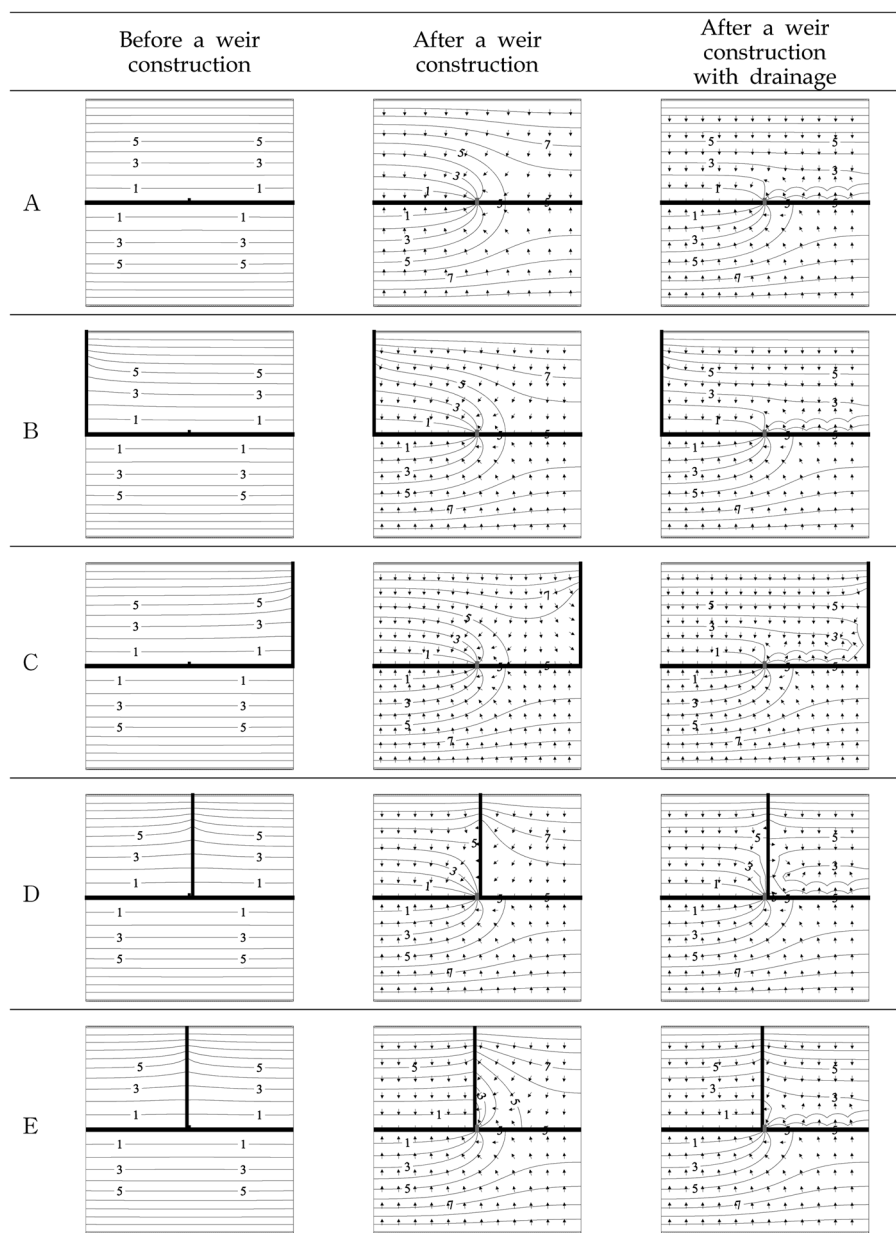


Fig. 3. Model results showing distribution of water level and flow directions.

점(Model E)에 위치하는 경우로 구분하여 분석을 수행하였다. 모든 지류의 수두구배는 지하수와 동일하게 0.002의 경사를 가지는 것을 가정하였으며 일정수두경계로 설정하였다.

국내 농경지에 많이 분포하는 배수로와 지하수계와의 상호작용을 분석하기 위하여 Fig. 1과 같이 본류의 상부 50 km²의 면적에 총 85 km의 배수로를 설정하였다. 배수로 바닥면, 즉 배수고도(drain elevation)는 보 설치 전 지하수위와 동일한 것으로 가정하여 보 설치 후 지하수위가 상승하면 배수로를 통해 지하수가 유출되도록 하였다. 배수로를 통한 지하수 유출은 배수경계(Drain package)를 이용하여 모사하였으며 배수로의 전도계수는 1 m²/day를 기본 값으로 설정하였다.

2.2. 모사 결과

Fig. 3은 정류 모사 결과, 보 설치 전과 후 그리고 배수경계가 반영된 보 설치 후의 지하수위 분포를 나타낸 것이며, 지류와 배수경계가 설정된 모델 상부 영역을 대상으로 계산된 물수지 분석 결과는 Table 1과 같다.

지류가 없는 Model A의 경우 보 설치 전에는 본류로 균일하게 지하수가 배출되는 흐름이 발생하였으나(A1), 보 설치 후에는 보 상류지역의 하천수위 및 인근 지하수위가 동반 상승하면서 상대적으로 수위가 낮은 보 하류 지역으로의 지하수 흐름이 증가하였다(A2). 또한, 보 상류 인접 지역에서는 수위상승으로 인해 일부구간이 손실하천으로 변화면서 106.5 m³/day 정도가 대수층으로 유입되는 것으로 분석되었다. 배수경계가 반영된 모델의 경우(A3) 배수

Table 1. Water balance analyses for 5 different conceptual models (unit: m³/day)

		Before a weir		After a weir		After a weir & drain	
		Inflows	Outflows	Inflows	Outflows	Inflows	Outflows
A	Prescribed head	304.8	0.0	240.1	0.0	304.7	0.0
	Upstream	0.0	153.2	106.5	42.4	593.5	0.0
	Downstream	0.0	151.6	0.0	304.2	0.0	207.2
	Drain	—	—	—	—	0.0	691.4
	Total	304.8	304.7	346.6	346.6	898.2	898.6
B	Prescribed head	309.1	0.0	247.7	0.0	310.0	0.0
	Upstream	0.0	152.4	76.3	42.1	593.5	0.0
	Downstream	0.0	142.3	0.0	260.8	0.0	200.1
	Tributary	3.0	18.6	1.6	22.6	2.2	18.8
	Drain	—	—	—	—	0.0	687.2
	Total	312.1	313.3	325.5	325.5	905.7	906.0
C	Prescribed head	309.7	0.0	264.4	0.0	306.6	0.0
	Upstream	0.0	143.8	78.6	14.2	563.2	0.0
	Downstream	0.0	150.9	0.0	271.7	0.0	206.5
	Tributary	3.0	18.6	1.3	58.4	128.6	22.8
	Drain	—	—	—	—	0.0	769.6
	Total	312.7	313.3	344.3	344.2	998.4	998.9
D	Prescribed head	316.6	0.0	266.5	0.0	310.2	0.0
	Upstream	0.0	141.4	16.7	48.2	493.7	0.0
	Downstream	0.0	144.0	0.0	301.8	0.0	250.3
	Tributary	5.2	37.1	159.1	92.2	480.1	45.5
	Drain	—	—	—	—	0.0	988.9
	Total	321.8	322.5	442.3	442.3	1,284.0	1,284.6
E	Prescribed head	316.6	0.0	280.0	0.0	315.2	0.0
	Upstream	0.0	145.1	145.6	25.6	621.1	0.0
	Downstream	0.0	140.3	0.0	145.5	0.0	144.8
	Tributary	5.2	37.1	4.0	258.4	4.2	174.4
	Drain	—	—	—	—	0.0	621.9
	Total	321.8	322.5	429.6	429.5	940.6	941.1

로를 통한 지하수 유출이 일어나 배수경계를 반영하지 않은 모델(A2)보다 지하수위가 낮게 모사되었으며 본류에서 대수층으로의 물 유입량도 $594 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 증가하는 것으로 나타났다.

지류가 보 하류에 멀리 떨어진 Model B의 경우 지류로 소량의 지하수 유출이 발생하는 것으로 모사되었으나 전체적인 지하수위 분포와 물수지가 Model A와 유사하게 나타났다. 한편 지류가 보 상류에 멀리 떨어진 Model C의 경우 보 설치 후 보 상류 수위가 상승하면 지류의 수위도 동일하게 상승하는 것으로 모사하였다. 보 설치 후 지류로의 지하수 유출량이 약간 증가하였고(C2), 배수경계를 반영할 경우 배수로로 통한 유출이 발생하면서 지류에서 대수층으로 $129 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 물 유입이 발생하는 것으로 나타났다(C3). 하지만 전체적인 물수지는 Model B와 거의 유사한 것으로 나타나 지류가 보에서 멀리 떨어질 경우 지류가 지하수위 변화에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 분석된다.

보 상류 가까운 곳에서 지류가 유입되는 Model D의 경우도 Model C와 마찬가지로 보 설치 후 본류와 함께 지류의 수위도 동반 상승한다. 지류의 좌안 및 본류의 우안에 해당하는 지역은 보 설치 후 지류와 본류의 수위가 동시에 상승하므로 전체적으로 지하수위가 상승하게 된다. 지류의 물수지를 보면 지류 우안의 대수층에서 지류로 $92 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 지하수가 유출되며, 지류에서 지하수위가 낮은 좌안 대수층으로 $159 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 물이 유입된다(D2). 배수경계를 반영할 경우(D3) 지류 및 보 상류 본류로부터 지류 좌안의 대수층으로 유입되는 물의 양이 크게 증가하였으며($974 \text{ m}^3/\text{day}$) 유입된 물은 배수로로 통해 배출되는 것으로 나타났다. 하지만 배수로로 통해 배출된 지하수는 결국 하천으로 유입되어야 하는데 본류와 지류의 수위가 모두 상승하였으므로 자연배수에 의해 하천으로 유입될 수 없다. 따라서 보 상류 가까운 곳에서 지류가 유입되는 Model D의 경우 배수로로 통해 유출된 지하수를 처리할 수 있는 별도의 배수펌프장 설치가 요구된다.

한편 보 하류 가까운 곳에서 지류가 유입되는 Model E의 경우 지류의 수위는 보 설치 후에도 보 설치 전의 수위를 유지하므로 보 상류 지류 좌안 지역 대수층으로부터 많은 양의 지하수가 지류로 유출되면서($258.4 \text{ m}^3/\text{day}$) 보 설치에 의한 지하수위 상승이 다른 경우(Model A-D)와 비교할 때 상대적으로 작게 발생한다. Model E의 경우 지류의 우안은 보 설치의 영향을 거의 받지 않는다. 배수경계를 반영할 경우(E3) 보 상류 본류로부터 많은 양의 물이 대수층으로 유입되며, 배수로로 통해 다시 배출

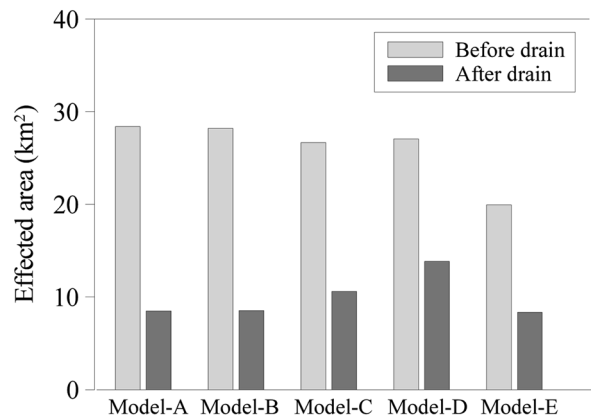


Fig. 4. Comparison of the area affected by a weir construction with and without applying drainage: the area is estimated based on the water-level change more than 0.5 m.

된다. 배수로로 통해 배출된 지하수는 지류로 빠져나갈 수 있으므로 Model D와 같이 별도의 배수처리시설이 요구되지 않는다.

Fig. 4는 Model 별로 보 설치의 영향을 받는 지역의 면적을 계산하여 도시한 것으로 지하수위 변화가 0.5 m 이상 발생하는 지역의 면적을 나타낸 결과이다. 그림과 같이 농수로로 통한 지하수 유출을 나타내는 배수경계를 모델에 반영하였을 경우 영향면적은 크게 감소하였으며, 지류의 위치에 따른 영향면적의 차이를 보면 Model E의 영향면적이 배수경계 반영 여부에 관계없이 가장 작은 것으로 나타났다. 따라서 보와 인접한 하류에 본류로 합류되는 지류가 있을 경우 보 설치로 인한 지하수위 영향 지역이 최소화될 수 있을 것으로 예상된다.

본 모델에서 배수로로 모사하기 위해 이용한 배수경계 조건은 모델 결과에 큰 영향을 미치는 중요한 경계조건이다. 하지만 경계조건의 입력 자료인 전도계수는 현장조사를 통하여 알아내기 어려운 값이므로 불확실성이 상존하며, 결과적으로 모델 결과의 신뢰도에 영향을 주는 주요 모델변수이다. 따라서 전도계수의 불확실성이 모델 결과에 미치는 영향을 알아보기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 지하수위 영향 범위가 가장 넓은 Model D를 대상으로 전도계수를 $0.01 \sim 100 \text{ m}^2/\text{day}$ 로 변화시키면서 정류모사를 수행하였다.

Fig. 5는 전도계수를 변화시켰을 때 보 설치 후에 발생하는 지하수위 변화량을 나타낸 것이다. 전도계수가 $0.01 \text{ m}^2/\text{day}$ 로 매우 작은 경우 배수로로 통한 지하수 유출이 거의 일어나지 않아 모델영역 전체에 걸쳐 수위상승이 발생하였으며(Fig. 5a), 전도계수가 $100 \text{ m}^2/\text{day}$ 로 커질

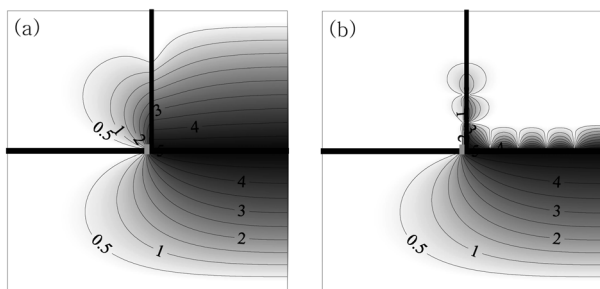


Fig. 5. Effects of the drain conductance on water levels: (a) $C = 0.01 \text{ m}^2/\text{day}$ and (b) $C = 100 \text{ m}^2/\text{day}$.

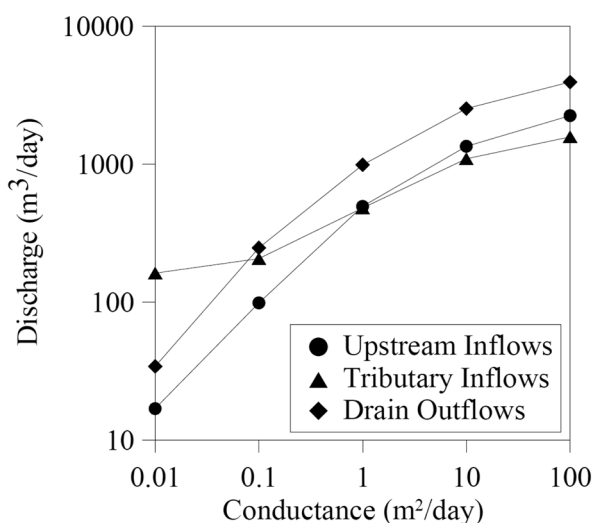


Fig. 6. Changes of the water budget with the drain conductance.

경우 지하수위 영향 범위는 현저하게 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 5b). 즉, 전도계수가 커질수록 배수로를 통한 지하수 배출량이 증가하며, 동시에 본류 및 지류의 손실 하천 구간을 통하여 대수층으로 유입되는 물의 양도 증가하였다(Fig. 6). 이상의 결과와 같이 전도계수는 보 설치 후 발생하는 지하수위 및 물수지 변화에 큰 영향을 미치는 모델 변수이다.

3. 실제 모델 적용 사례

3.1. 연구 지역 및 모델 설계

연구지역은 한반도의 남서부에 위치한 나주지역으로, 북서쪽의 청림산과 북동쪽의 여미산 및 동쪽에 가야산 등의 산지가 분포하고 있다. 주요 수계는 나주시 북부를 동에서 서로 관통하다 함평군 및 무안군과의 경계를 따라 남쪽으로 흐르며 서해로 유입되는 국가하천인 영산강(국토해양부,

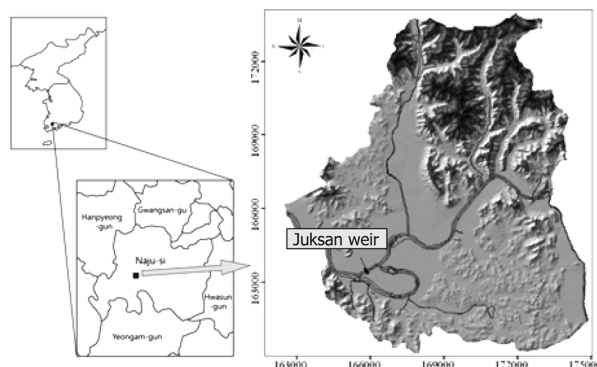


Fig. 7. The model area showing the location of the Juksan weir in the Yeongsan river.

2010)과 이에 유입되는 문평천, 덕산천 그리고 만봉천 등의 지류들이 존재한다. 본 연구지역은 영산강 중류에 해당하며 동북부 지역은 높은 고도의 산악을 보이고, 그 외 지역은 지형 고도가 낮은 평야가 발달되어 있다(Fig. 7).

모델 영역은 유역경계와 하천을 기준으로 본 연구 지역을 모두 포함하면서 전체적인 지하수 흐름을 파악할 수 있도록 동서방향으로 12.2 km, 남북방향으로 13.0 km로 설정하였다. 집수유역에 해당하는 95.8 km^2 는 활성셀(Active Cell)로 지정하였으며, 지하수 흐름에 직접적인 영향을 미치지 않는 집수유역 밖은 불활성셀(Inactive Cell)로 설정하였다. 주요 지역의 격자 크기를 $20 \times 20 \text{ m}$ 로 하였으며, 모델링 작업의 용이성과 설정 가능한 격자 개수의 제한을 고려하여 외부로 갈수록 확장시켰다(Fig. 8a).

경계조건은 현장조사 및 수치지도를 통해 하천 및 지류 현황 등을 파악하여 실제 지하수계에 부합하도록 모델에 반영하였다. 보 설치 구간인 영산강, 구하도, 문평천, 만봉천 그리고 일부 하천과 저수지는 일정수두경계로 설정하였다. 이 때 이들의 수위는 일 년 평균위를 반영하였고, 그 중 영산강은 만봉천에서 문평천까지의 구간은 $-1.22 \sim -1.32 \text{ m}$, 문평천 이하 구간은 $-1.32 \sim -1.35 \text{ m}$ 로 입력하였다. 소규모 하천 및 자연형 수로는 배수경계로 설정하였다(Fig. 8b). 배수로의 배수수두(Drain EL.)는 배수로 바닥의 고도 이상으로 지하수위가 상승하면 지하수의 유출이 발생할 것으로 예상되므로 현장에서 측정한 배수로 바닥의 고도 값을 입력하였다. 배수경계의 전도계수는 수로의 모양과 크기 및 수로 바닥 퇴적물의 수직방향의 수리전도도에 의하여 결정되는데, 수로의 기하학적 형태에 대한 자료는 수집하였으나, 퇴적물의 수리전도도에 대한 자료가 전무하여 이 지역 충적층의 수리전도도 측정값을 대신 이용하여 전도계수를 산정하였다.

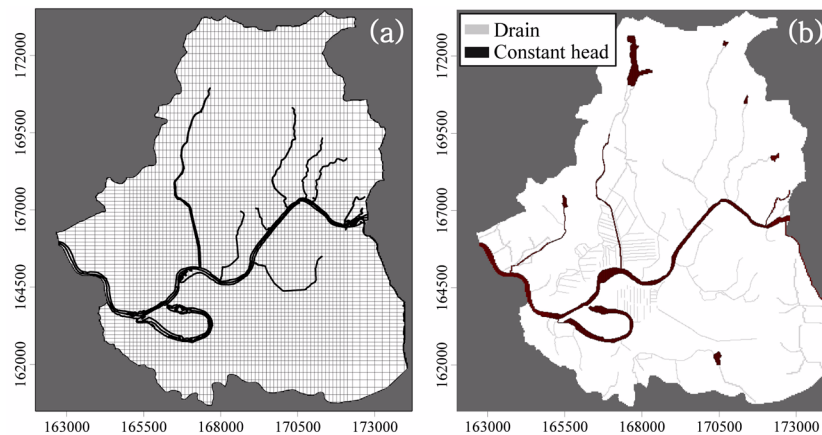


Fig. 8. Model grid and boundary conditions of the study area.

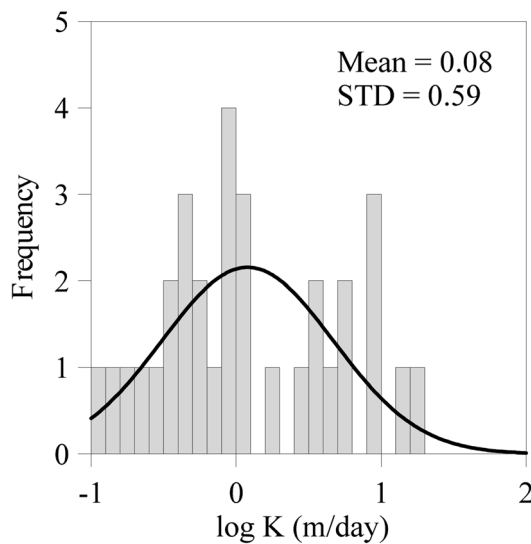


Fig. 9. Histogram of the log-transformed hydraulic conductivity of the alluvial aquifer.

지하수 유동 모델의 신뢰도를 높이기 위해서는 수리전도도, 비저유계수 및 비산출률과 같은 대상 지역 대수층의 수리상수를 모델에 잘 반영해야 한다. 층서는 시추주상도를 이용하여 충적층 및 풍화토까지를 1층인 충적층, 그 하부를 2층인 암반층으로 단순화하였다. 제 1층인 충적층의 수리전도도는 관측공에서 수행한 현장수리시험(순간수위변화시험)을 통하여 구하였으며(Fig. 9) 로그변환식을 통해 구한 대푯값으로 3.13 m/day를 이용하였다. 2층인 암반층의 수리전도도는 현장수리시험을 통해 산정된 8.64×10^{-3} m/day 값을 이용하였다. Fig. 10는 연구지역의 충적층 두께를 나타낸 것으로 영산강 주변에서는 충적층이 두껍게 발달하고 산지로 갈수록 미약하게 발달하는 것을 볼 수 있다.

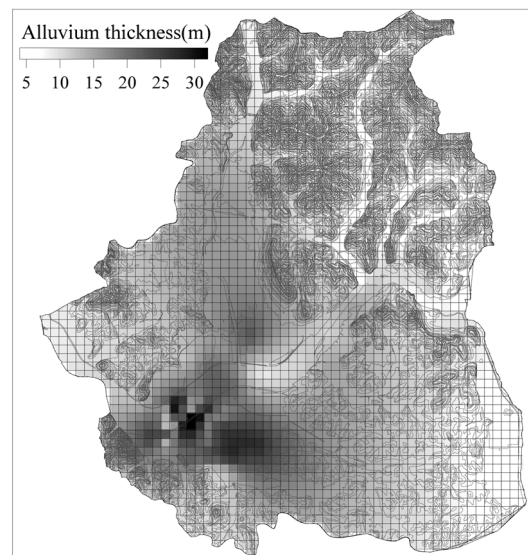


Fig. 10. Spatial distribution of thickness of the alluvial aquifer.

3.2. 모델 보정 및 결과

현장 자료가 전무한 지하수 함양량을 단일 보정인자로 사용하여 모델 보정을 수행하였다. 50~200 mm/yr의 범위에서 함양량을 변화시키면서 모델 보정을 수행하였으며 27개 관측점에서 측정된 지하수위 자료가 이용되었다. 보정 결과 함양량이 100 mm/yr일 때 Normalized RMS(Root Mean Square) 오차가 5.65%로 가장 작게 나타났다(Fig. 11). 모델 보정을 통하여 산정된 함양량은 문상기 외(2002)가 국가 지하수 관측망 자료에 지하수위 변동곡선법을 적용하여 산정한 지하수 함양율인 6.6%와 거의 일치하는 결과이다.

Fig. 12a는 보 설치 전 연구지역 지하수 흐름계를 나타낸 것으로 정류모사 결과이다. 영산강 주변에서의 수위분포를 자세히 보기 위해 산지 지역은 회색으로 처리하였다.

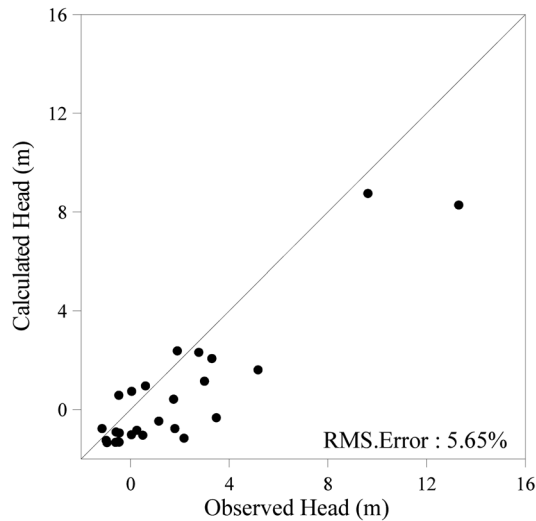


Fig. 11. Comparison of simulated water levels to measured water levels at 27 observation wells.

영산강 주변의 지하수위는 약 -2.15~8.00 m의 분포를 보이며, 전반적인 지하수 유동방향은 주변 산악 지역에서 영산강, 구하도(Old river channel) 및 문평천 등의 인근 하천으로 유출 되는 경향을 잘 보여준다. 물수지 분석 결과(Table 2) 모델 영역 내 대수층으로의 지하수 유입량은 약 35,700 m³/day으로 강수의 함양 및 일부 손실하천 구간을 통하여 발생하며, 대수층으로 유입된 지하수는 영산강 본류 및 지류, 소하천 및 자연형 수로를 통하여 배출 되는 것으로 나타났다. 지하수 배출량의 약 60%는 배수 경계로 설정된 소하천 및 배수로를 통하여 발생하는 것으로 나타났는데, 이러한 결과는 모델 설계 시 소하천 또는 농경지 배수로를 모델에 정밀하게 반영하는 것이 매우 중요하며 이러한 수체들이 유역 물수지 변화에 큰 영향을 미치는 것을 잘 보여준다.

3.3. 보 설치 후 지하수계 변화

보 설치 후 보 상류의 관리수위는 3.5 m이며 보 하류와 구하도는 현재상태의 수위를 유지하는 하는 것으로 정류모사를 실시하였다. 이 때 보는 Fig. 7과 같이 모델영역의 좌측하단 영산강 본류에 설치되는 것으로 가정하였다.

Fig. 12b는 보 설치 후 모델 영역 내 지하수위 분포와 흐름방향을 나타낸 것으로 영산강 주변 지하수위는 약 -1.15~8.00 m의 분포를 보인다. 보 상류 영산강 주변지역을 중심으로 지하수위가 상승하며 영산강 본류에서 우안 농경지와 구하도로 지하수 흐름방향이 바뀌면서 국부적으로 손실하천으로 변하는 것으로 나타났다. 이로 인해 본류에서 대수층으로의 유입량이 증가하고 이 지역에서는 지하수의 수질 변화가 발생할 것으로 예상된다.

수위가 상승한 영산강 보 상류와 문평천에서 대수층으로 유입되는 물의 양이 각각 2,530, 2,980 m³/day로 보 설치 전 보다 상당히 증가하였으며, 보에서 멀리 떨어진 만봉천의 물수지는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 또한 지하수위가 상승함에 따라 자연형 수로로의 배출량이 증가하면서 대수층에서 배수경계로 배출되는 양이 25,900 m³/day로 보 설치 전보다 17.6% 증가하는 것으로 나타났다(Table 2).

현재 우리나라의 관개용수는 저수지에서 용수로, 농경지, 배수로를 통해 소하천으로 이어지는 용수공급시스템으로 되어 있다(장규상 · 김재옥, 2010). 또한 우리나라의 기후나 농업 특성상 배수로나 소하천에는 연중 물이 흐르기 어렵고 건조화 현상이 발생한다. 앞의 예측 모델링의 물수지 분석 결과에서와 같이 보를 설치함에 따라 본류에서 대수층으로의 유입량이 발생하고 이들이 배수경계로 유출되면서 배수로 및 소하천의 유량을 증가시킬 것으로 예상된다. 이렇게 유출되는 물은 용수로나 배수로의 배수 또는 분수의

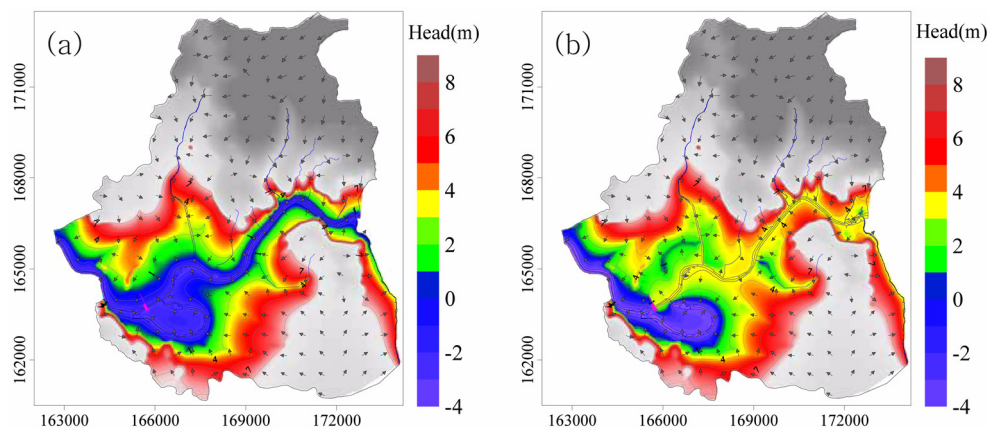
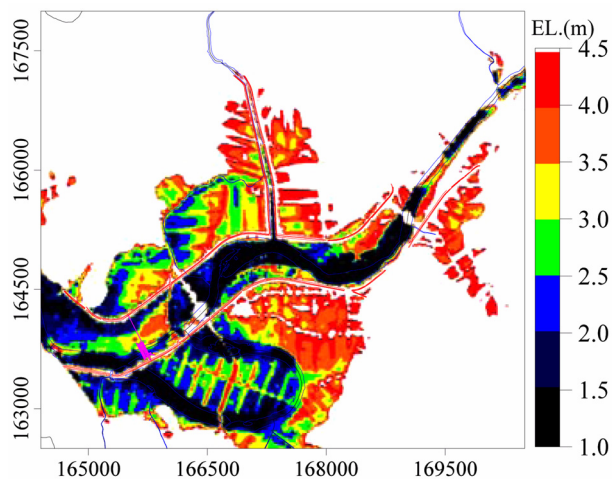


Fig. 12. Distribution of water level (a) before and (b) after construction of the Juksan weir.

Table 2. Comparison of the water balance before and after a weir construction (unit: m³/day)

	Before a weir construction		After a weir construction			
	Inflows	Outflows	Before applying new drain		After applying new drain	
			Inflows	Outflows	Inflows	Outflows
Recharge	25,341.0	0.0	25,315.0	0.0	25,322.2	0.0
Yeongsan River upstream	39.4	3,617.8	2,528.1	1,014.5	4,007.4	936.5
Yeongsan River downstream	0.0	984.2	0.0	1,045.5	0.0	971.7
Old river channel	0.0	1,690.2	0.0	3,950.4	0.0	3,908.6
Munpyeongcheon	641.6	1,724.5	2,983.7	1,574.9	3,730.5	1,574.9
Manbongcheon	0.0	1,710.2	0.0	1,632.9	0.0	1,632.8
Tributary and Reservoir	9,729.7	4,662.6	9,638.0	5,314.0	9,692.6	5,293.4
Drain	0.0	21,367.0	0.0	25,927.0	0.0	28,435.7
Total	35,751.7	35,756.5	40,464.8	40,459.2	42,752.7	42,753.6

**Fig. 13.** Land surface elevation of the study area.

조작관리 및 유지를 위해 필요한 유지용수의 기능을 할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 보 설치 후 기존 관개시스템의 물수지에 변화가 발생할 것으로 추측된다.

Fig. 13은 본 연구지역의 지반 표고를 분석한 것으로

농작물 생육에 영향을 미칠 수 있는 지하수위(1 m 이내)와 죽산 보의 관리 수위(3.5 m)를 고려하여 표고 4.5 m 이하의 지역을 표시하였다. 즉, 죽산보 설치 후 지하수위 상승 정도에 따라 지하수가 농작물 생육에 영향을 미칠 수 있는 가능성이 있는 지역을 나타낸다.

Fig. 14a는 보 설치 전 정류모사를 통해 얻은 지하수위와 지반 표고 값을 이용하여 지하수위 영향 지역을 예측한 것으로, 지하수위가 지표 하 1.0 m 이내에 위치하는 지역을 엷은 파란색으로 표시하였다. 그림과 같이 일부 저지대는 보 설치 전에도 지하수위 영향 지역인 것으로 나타났다. 보 설치 후에는 보 상류의 우안과 좌안의 저지대를 중심으로 지하수 영향지역이 확대되며, 그 면적은 보 설치 전 영향지역을 제외하고 총 1.04 km²인 것으로 나타났다(Fig. 14b).

보 설치 후 발생한 지하수위 영향지역을 해결하기 위해, 즉 지하수위를 낮추는 방법으로 4개의 신규 배수로를 영향지역 주변에 설치하는 모델링을 수행하였다. 이때 배수로로 배출된 물은 인근 하천을 통하여 유출되는 것으로 가정하였다. Fig. 14c는 신규배수로의 위치 및 신규

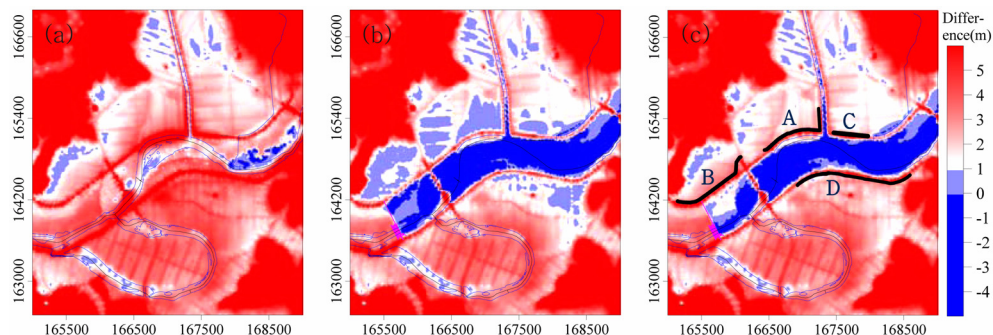
**Fig. 14.** Model results showing distribution of depths to water levels: (a) before a weir construction, (b) after a weir construction, and (c) after applying the new drainages.

Table 3. Depths and lengths of the new drainage installation and model simulated discharge into the drainage

	Drain EL. (m)	Length (m)	Discharge (m ³ /day)
A	1.0	122	1,787.4
B	0.5~0.3	108	582.7
C	1.35~1.75	51	354.4
D	2.5	180	447.8

배수로가 반영된 보 설치 후 지하수위 영향지역을 나타낸 것이다. 신규 배수로의 위치는 현장에서 실제 배수로 설치가 가능한 지점으로 선정하였으며, 배수로의 심도와 길이는 시행착오법을 통해 최적의 값을 산정하였다(Table 3). 신규 배수로 설치 시 Fig. 14c와 같이 지하수위 영향지역이 거의 해소되는 것으로 나타났다. 또한 Table 3과 같이 모델링을 통해 예측된 배수로의 일배출량은 실제 신규 배수로 설계 시 배수계획량에 반영될 수 있을 것이다. 또한 물수지 분석 결과, 신규 배수를 통한 유출량이 발생하면서 영산강 보 상류와 문평천에서 대수층으로의 유입량이 증가하고 이는 배수경계를 통한 유출량의 증가로 이어지는 것으로 해석된다(Table 2).

4. 결 론

Visual MODFLOW를 이용하여 보 설치가 주변 지하수계에 미치는 영향을 분석하였으며, 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 가상의 개념모델을 통한 분석 결과, 본류로 유입되는 지류가 보 상류에 있는 경우와 하류에 있는 경우, 보에서 가까운 경우와 먼 경우, 각각 보 설치가 지하수 흐름계에 미치는 영향이 크게 다른 것으로 나타났다. 따라서 보 위치 선정 시 본류로 합류되는 지류의 위치를 고려할 경우 보 설치로 인한 지하수위 영향 지역을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

2) 지하수 배출원 역할을 하는 소하천 또는 농배수를 모델의 경계조건으로 어떻게 설정하느냐에 따라 모델 결

과가 크게 달라지는 것으로 나타나 보 설치의 영향을 평가하는 지하수 모델 개발 시 개념모델에서 매우 중요하게 다루어져야 하는 수체인 것으로 해석된다.

3) 또한 배수경계의 입력변수인 전도계수에 대한 민감도 분석 결과, 전도계수가 클수록 배수로를 통한 유출량이 증가하면서 지하수위 영향 범위가 현저하게 감소하는 것으로 나타나 전도계수는 모델의 결과에 큰 영향을 미치는 수리인자인 것으로 분석되었다.

4) 죽산보 사례 모델 결과, 보 설치 후 보 주변지역에서 지하수 흐름 방향이 바뀌면서 영산강 일부구간이 손실 하천으로 변하게 되며 지하수의 수질과 물수지에 변화가 발생하는 것으로 예측되었다. 또한, 모델을 통하여 보 설치 후 작물생육에 영향을 미치는 지하수위 영향지역을 예측하였으며, 이를 해결하기 위해 영향지역 부근에 신규배수를 설치하는 방안을 제시하였다.

참 고 문 헌

- 국토해양부, 2009, 4대강살리기 마스터플랜.
- 국토해양부, 한국수자원공사, 한국지질자원연구원, 2010, 나주 지역 지하수 기초조사.
- 김승현, 2010, 무동력 강변여과를 이용한 지하수위조절과 하천 수질개선, 한국수자원학회, **43**(4), 14-16
- 농림부, 2004, 농업생산기반정비사업계획설계기준-배수편.
- 문상기, 우남칠, 이광식, 2002, 지하수위 유형과 유역별 지하수 함양률의 관련성 연구: 국가 지하수 관측망 자료의 분석, 한국지하수토양환경학회, **7**(3), 45-59.
- 배상근, 이승현, 2009, 보의 건설이 지하수에 미치는 영향, 한국수자원학회, **42**(9), 17-22
- 장규상, 김재옥, 한국농어촌공사 농어촌연구원, 2010, 논 농업지역과 연계된 소하천의 친환경적 관리방안.
- Quilis, R.O., Hoogmoed, M., Ertsen, M., Foppen, J.W., Hut, R., and de Vries, A., 2009, Measuring and modeling hydrological processes of sand-storage dam on different spatial scales, *Physics and Chemistry of the Earth* **34**, 289-298.