



Assessment of water resources by the construction of subsurface dam

Kim, Sang Jun^{a*}

^aDepartment of Civil & Environmental Engineering, Gachon University

Paper number: 17-074

Received: 13 September 2017; Revised: 10 October 2017; Accepted: 10 October 2017

Abstract

This study shows the assessment methodology for the water resources of subsurface dams. The study area is SSangcheon subsurface dam. It is at the estuary of SSangcheon watershed forming the unconfined alluvial aquifer. there are several candidate area which are geologically similar to it at East coast. The groundwater level was computed by a 2-D FDM model, where the watershed discharge is the input as the infiltration term. The baseflow computed as the mean value of 3 watershed discharge model is $0.5 \text{ m}^3/\text{sec}$. And considering the inflow near the baseflow as the dry season inflow, The groundwater level according to the change of inflow and pumping rate was computed. Specifically, Using the real pumping rate $28000 \text{ m}^3/\text{day}$ which is equal to the supply amount of drinking water to Sokcho city, The inflow which induce the descended groundwater level to the bottom of aquifer or the ascended groundwater level that cause the surface flow was estimated. The simulation for increased pumping rate and additional well construction to increase the water resources, was executed. And at the extreme dry season, available pumping rate was estimated.

Keywords: Subsurface dam, Watershed discharge, Aquifer storage, Water resources

지하댐 설치에 의한 수자원 개발량 평가

김상준^{a*}

^a가천대학교 토목환경공학과

요 지

본 연구는 지하댐에 의한 수자원 개발량을 평가하는 방법론을 제시한다. 연구 대상지역으로 선택한 쌍천 지하댐은 동해안 쌍천유역 하구에 위치하며 비피압 충전 대수층을 형성하고 있다. 동해안에는 지형적으로 유사한 지하댐 후보지가 여러 개 존재한다. 본 연구에서는 대수층의 지하수위를 평면 2차원 FDM 모형으로 산출하였으며, 여기서 유역 유출은 대수층 표면에 침투함으로써 입력된다. 3개의 유역 유출모형의 평균으로서, 기저유량은 $0.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 산출되었다. 그리고 이 기저유량 근처의 유입량을 갈수기 유입으로 간주하여, 유입량 및 양수량 변화에 따른 지하수위를 산출하는 방법으로 수자원 개발량을 평가하였다. 구체적으로는 현재 속초시 생활용수를 공급하고 있는 실제 양수량($28,000 \text{ m}^3/\text{day}$)을 적용하여, 우물 수위가 대수층 바닥에 도달하거나 지하수위가 대수층 표면을 상회하여 지표수 흐름이 발생하는 유입량을 추정하였다. 또한 수자원 개발량을 증대시키기 위하여 우물의 양수량을 증가시키거나 추가 우물을 설치하는 상황을 재현하고, 극심한 갈수기에 가능한 양수량을 산출하였다.

핵심용어: 지하댐, 유역유출, 대수층저류, 수자원개발

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

지하댐(Fig. 1)이란 ‘지하 대수층에 차수벽을 설치하여 물

의 흐름을 차단하고 저류시키는 구조물’이라고 정의할 수 있다. 사막 등의 건조 지역에서 지상댐과 유사한 구조물에 인위적으로 모래를 채워 넣고 그곳에 물을 저장하기도 하는데, 이런 것을 모래 저장댐(Fig. 2)이라고 하여, 지하댐과 구분하는 용어를 사용하기도 한다.

지하댐이 해안 근처에 설치되는 경우는, 수자원의 저류와 더불어 해수에 의한 염해를 방지하는 기능이 추가된다. 우리

*Corresponding Author. Tel: +82-31-750-5337
E-mail: sj282kim@gachon.ac.kr (S. J. Kim)

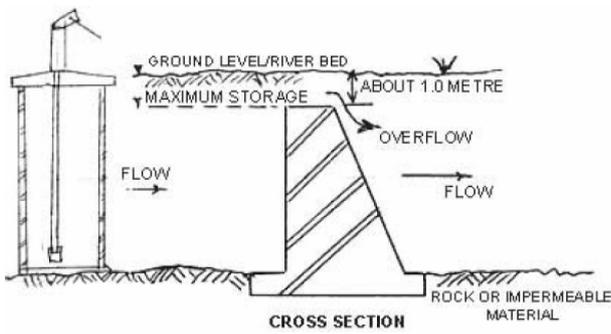


Fig. 1. Typical subsurface dam (Wateraid)

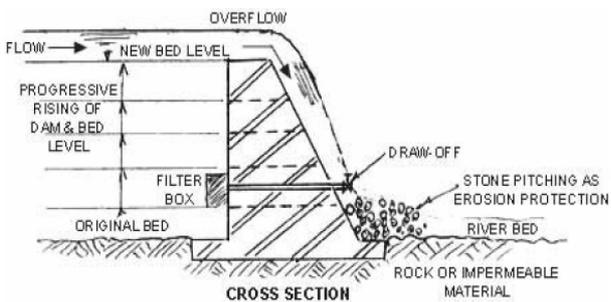


Fig. 2. Typical sand-storage dam (Wateraid)

나라의 경우 이러한 지하댐은, 지형적인 이유로 인하여 주로 동해안에 위치하고 있으며, 2000년에 건설되어 현재 운영되고 있는 쌍천 지하댐(Ministry of Science and Technology, 2007)과 Fig. 3에서 제시하는 바와 같은 설치 후보지가 있는데, 대부분의 경우 하구에 발달한 충적층을 저류공간으로 활용하여 유역의 지표수 혹은 지하수를 이용하는 것이다.

국내에서 농업용 지하댐 몇 개가 건설되기 시작한 1980년대 초중반 시기에, 지하댐 설계와 관련한 수량 산출은 유역면적이나 충적층의 면적, 두께 및 공극률 등을 이용한 단순한 공식에 의존하기도 하였으며, 계획된 바의 수량을 확보하지 못하는 사례도 발생하였다(Ministry of Agriculture and Forestry, 1996). 이후 2000년도에 속초시 상수원 개발의 일환으로 쌍천 지하댐이 설치되고, 지하댐에 대한 연구가 활발하게 이루어 졌는데, 근래에 들어 몇 번의 혹독한 가뭄을 겪으면서, 특히 광역 상수도의 혜택이 미치지 못하는 해안 및 도서 지방을 중심으로 지하댐의 필요성이 재삼 언급되고 있다. 특히 동해안에 위치한 속초시의 경우 쌍천 이외의 수자원 공급지를 찾지 못하고 있으며, 쌍천 유역에 추가 지하댐을 건설하는 방안 등, 수자원 확보를 위한 조사가 진행되고 있다.

쌍천 하구역을 포함한 동해안의 지하댐 후보지는, 대부분 하천 퇴적물에 의한 충적 대수층의 형태이다. 그리고 이 공간이 저류지의 역할을 수행할 수 있는 조건 여하에 따라서 지하

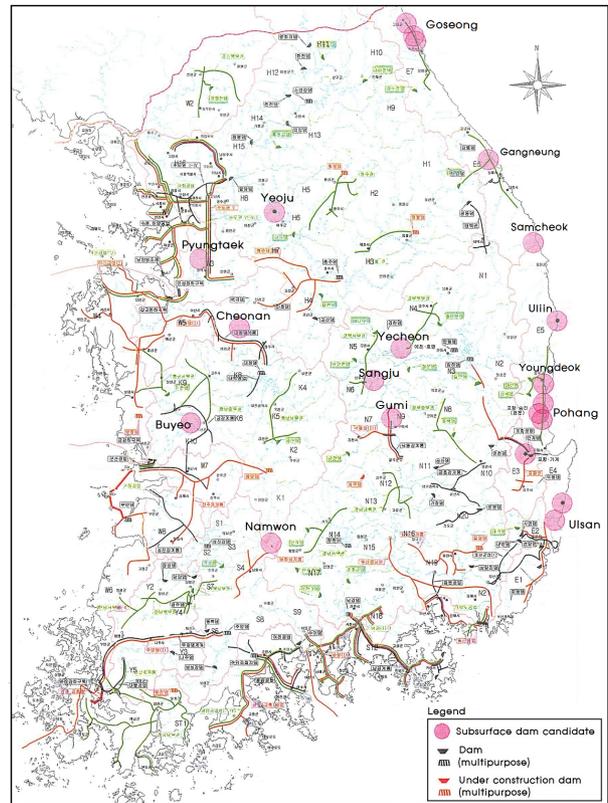


Fig. 3. Proposed subsurface dam sites (Ministry of Construction and Transport, 2002)

댐의 성패가 달려 있다고 볼 수 있다. 지하댐과 관련한 변수들의 물리적인 해석은 지상댐의 경우보다 난해하다. 그 이유는 지상댐의 경우에는 분석 대상이 주로 지표수만으로 구성되어 있고 따라서 물의 유입과 유출에 대한 분석이 비교적 용이하나, 지하댐은 지표수와 지하수가 공존 및 상호작용하는 구조이므로 정확한 수량산출이 어렵기 때문이다. 본 연구에서는 유역에서 유출된 지표수가 지하대수층으로 유입되고 저류되는 시공간적 구조를 파악하는데 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 즉 지표수와 지하수의 연결 고리에 대한 분석 및 모델링을 통하여 수자원을 확보 평가 방법론을 제시하는데 그 목적을 두고 있다.

1.2 연구 동향

지하댐 설치를 계획하려면 수량의 공급지인 유역과 저류지인 지하대수층, 그리고 저류공간을 만들고 해수를 차단하기도 하는 차수벽 등을 분석 평가하여, 건설 후에 공급할 수 있는 수량, 수질, 지하수위 등 관련 물리량을 정확히 예측하여야 한다. 지하댐에 관한 연구의 예를 살펴보면: 지하수댐 최적지 선정을 위한 방법론(Lee and Kim, 2003; Farid et al., 2014);

수자원 개발량과 지하수위 산출을 위한 모델링(Kim et al., 2011; Ouerdachi et al., 2012; Kim, 2016), 적정 수량산출 및 타당성 분석(Onder and Yilmaz, 2005; Kim et al., 2014), 지하댐에 대한 염해 저감기법(Yun et al., 2004; Ahmed, 2017), 모래 저장댐에 인여 지표수 저장 및 회수(Seo et al., 2007; Quilis et al., 2009; Hut et al., 2008); 차수벽의 재료 및 시공(Agricultural Infrastructure Corporation, 2004; Ahmed et al., 2010) 등을 열거 할 수 있다. 여기서, 특히 지하댐의 실제 현장을 중심으로 한 연구의 예를 살펴보면: Onder and Yilmaz (2005)는 터키의 Camli Koyu 지역(대수층 면적 2 km × 5 km, 평균 두께 68 m 규모이며, 투수계수는 4.2×10^{-4} m/sec이다)에 지하댐을 설치할 경우에 대한 분석을 제시하였다. 여기서 지하수 분석 모형은 MODFLOW를 사용하였으며, 염수(해수) 침입을 방지하고 지하수 고갈에 안전할 수 있는 적정 양수량을 제시하였다. Apaydin and Zengin (2016) 연구의 Elmadag dam은 지상 11 m, 지하 15 m의 지상-지하 병용댐으로서 모래와 자갈로 이루어진 충적 대수층에 건설되었는데, 댐의 용량은 지상과 지하를 합하여 $3 \times 10^6 m^3$ 이라고 하였다. 세계 각국의 지하수 건설 현황에 대한 조사는 Agricultural Infrastructure Corporation (2004); Ishida et al. (2011) 등의 연구에서 확인할 수 있다.

2. 연구대상 지역

본 연구의 대상지역은 강원도 속초시에 위치한 쌍천(Fig. 4)과 그 하구지역이다. 쌍천은 유역면적 $66 km^2$, 유로연장 19 km이며, 설악산에서 발원하여 동해로 유출한다. 하구에는 충적 대수층(Qa)이 약 10 m 두께로 분포되어 있는데, 이곳에 저류 공간을 만들고 해수 침입을 막기 위하여, 해안으로부터 약

300 m 떨어진 위치에 830 m 길이의 지하댐을 2000년도에 완공하였다. 유역의 유출은(특히 갈수기에는) 대부분이 저류공간에 유입되고 몇 개의 우물에서 취수되고 있다.

쌍천에서 도출되는 수자원은 주로 속초시 생활용수로서, 하루에 약 $30,000 m^3$ 의 물을 공급하고 있다. 그러나 유출량이 적은 갈수기에는 안정적인 수자원 공급에 미흡하여, 유역 혹은 하구 대수층에서 수자원을 추가로 확보할 방안이 고심하고 있다. 본 연구는 이곳을 대상지역으로 하여, 유역 유출, 지표수 지하수 연계, 지하댐으로 형성된 하구 대수층에서의 흐름 및 저류, 염수 침입 등의 연구를 통하여 수자원 개발량에 관한 평가를 수행하고자 한다.

3. 수자원 개발량(분석 및 평가)

3.1 지표수 유출

지하댐에 의해 형성되는 저류 공간에는 지표수 또는 지하수가 자연적으로, 혹은 인공적으로 유입되며, 따라서 지하댐 설치에 의한 수자원 개발량은 유역의 유출 혹은 지표수 분석과 연계하여 평가되어야 한다. Table 1은 유출을 발생시키는 강우와, 유출 모형에 의해 산출된 월별 유출량을 나타내고 있다. 여기서 강우량은 1968~2002년까지 35년간 속초 측후소 관측 자료의 평균이며, 유출량은 하천정비기본계획(Yangyang-gun, 2011)에서 제시된 값을 적용하였다.

표에서 제시된 모형(Kajiyama, TANK, 및 DAWAST)의 평균값을 적용한다면, 쌍천 유역의 수자원 부존량은 강우 총량의 55% 유출로서 연간 $49 \times 10^6 m^3$ 라고 할 수 있다. 또한 12월에서 3월 사이의 갈수기 유출(약 $0.5 m^3/sec$)을 기저유출로 간주한다면, 기저유출량은 연간 $16 \times 10^6 m^3$ 이다.

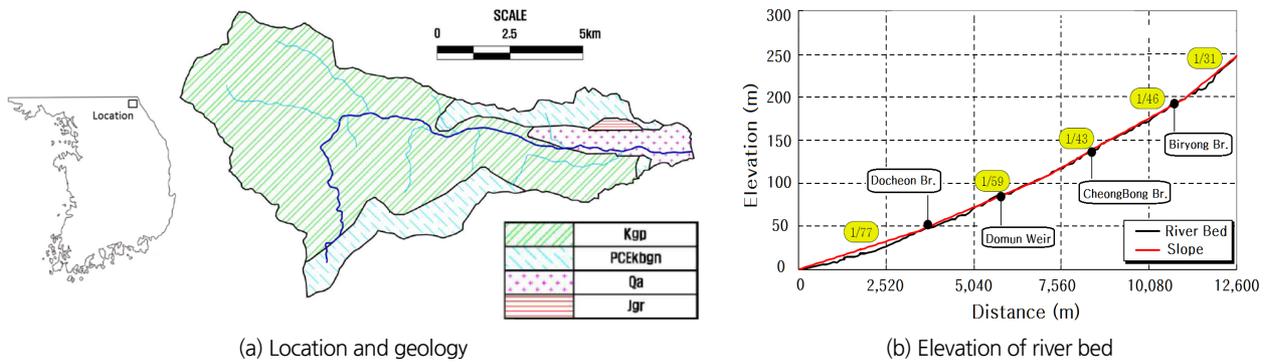


Fig. 4. Characteristics of study area (Yangyang-gun, 2011)

Table 1. Monthly average rainfall and discharge at SSangcheon watershed

Item	Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Remarks
Rainfall (mm)		53	57	52	70	84	116	217	290	206	89	66	43	1968~2002
Discharge (m ³ /sec)	Kajiyama	0.55	0.62	0.56	1.00	0.88	0.99	3.65	4.77	3.59	1.24	0.82	0.52	
	TANK	0.55	0.66	0.53	0.57	0.70	0.97	3.42	4.16	3.96	1.46	1.08	0.67	
	DAWAST	0.41	0.61	0.65	0.66	0.63	0.71	2.94	4.28	4.17	1.29	0.9	0.54	

3.2 모형의 설계(충적 대수층)

본 연구에서 개발 가능량을 평가하는 방법은 대수층(Fig. 5)에서 지하수 흐름의 특성을 분석하는 방식으로 비롯된다. 지하수 흐름은 수치 모형에 의하여 산출되며, 여기서 격자의 크기는 $dx = dy = 20\text{ m}$ 이다. 대수층의 지형정보 및 수리상수 등은 관련 보고서(Ministry of Construction and Transport, 2002; Ministry of Science and Technology, 2007)의 자료와, 역해석에 의하여 결정된 값(Kim, 2016)을 적용하였다(Table 2).

지하댐에 의하여 형성되는 저류 공간의 크기는 다음 식으로 산정할 수 있다.

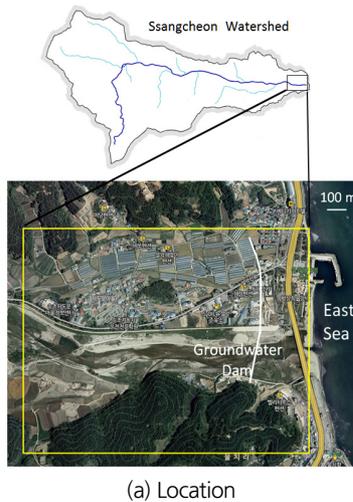
$$\begin{aligned} \text{저류 공간의 크기} &= \text{대수층 면적} \times \text{대수층의 유효 평균두께} \\ &\quad \times \text{유효공극율} \\ &\approx (400\text{ m} \times 800\text{ m}) \times 10\text{ m} \times 0.2 = 6.4 \times 10^5\text{ m}^3 \end{aligned} \tag{1}$$

지하댐에 의하여 형성되는 공간은 저류 공간이면서 또한 흐름의 공간이다. 본 연구에서는 대수층에 대한 흐름 방정식으로서 평면 2차원 Boussinesq 식을 채택하며 그 식은 다음과 같다.

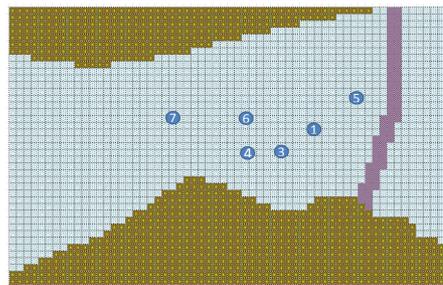
$$S_y \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K(H - \zeta) \frac{\partial H}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K(H - \zeta) \frac{\partial H}{\partial y} \right\} + W \tag{2}$$

여기서, S_y 는 비산출율(specific yield)로서 무차원이며, t 는 시간, H 는 지하수위, ζ 는 대수층 바닥 표고, K 는 투수계수이다. 또한 W 는 단위면적 단위시간당의 침투량 [L/T]이다.

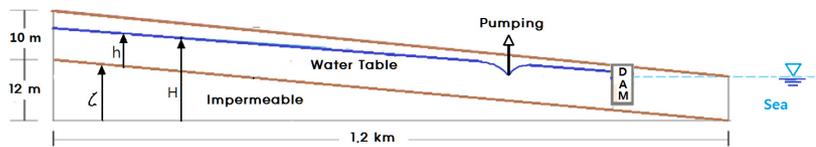
한편, Eq.(2)와 같은 2차원 흐름을 전제로 하여, 용질 분산을 나타내는 식은 다음과 같다.



(a) Location



(b) Grid and pumping wells



(c) Typical cross section

Fig. 5. Alluvial aquifer at the estuary of SSangcheon watershed

Table 2. Hydraulic parameters in FDM modelling

Item	Mean depth	Slope of aquifer (from west to East sea)	Permeability (aquifer)	Permeability (subsurface dam)	Specific yield	Longitudinal dispersivity
Value	10 m	1/100	90 m/day	5 m/day	0.2	15 m

$$\frac{\partial hC}{\partial t} = -V_x \frac{\partial hC}{\partial x} - V_y \frac{\partial hC}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial hC}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial hC}{\partial y} \right) - Q \delta(x-x_o) \delta(y-y_o) - \lambda hC \quad (3)$$

여기서, C 는 용질의 농도(단위면적, 단위깊이당 질량), h 는 지하수위($H-\zeta$), V_x, V_y 는 각각 x, y 방향의 평균유속, D_x, D_y 는 분산계수(dispersion coefficient)이다. 또한 Q 는 단위시간당 투여되는 질량, δ 는 Dirac delta함수이며, λ 는 감쇠율[T^{-1}]을 나타낸다.

본 연구에서는 Eq.(2)와 Eq.(3)의 해를 구하기 위하여, 기 개발된 FDM (Kim, 2016)을 이용하기로 한다. 수치모형의 이론적 배경 등의 내용은 앞선 연구로 대신한다.

3.3 경계조건

쌍천 유역의 기저유량은 전술한 바와 같이 $0.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이다. 그리고 이 물이 대수층에 유입되는 형식은 저수로를 통한 하천 흐름, 지표면 흐름 및 지하수 흐름으로 볼 수 있다. 본 연구에서 사용하는 모형은 Eq. (2)로 표현되는 비포화 평면 2차원 모형이며, 따라서 유역의 유출이 저류공간(대수층)에 유입되는 형식에 대한 가정이 필요하다. 본 연구에서는 모형의 운영을 지표수 흐름이 크게 발생하지 않는 갈수기로 국한하여 유역 유출이 저류공간으로 연직 침투하고, 측방향 유입은 불투수

경계조건으로 가정하였다. 즉, 유입은 Eq. (2)에서 침투 혹은 양수를 나타내는 항(W)만으로 구현된다.

이러한 가정의 타당성을 검토하기 위하여; 기저유량 $0.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ 를 대수층(표면적 $\approx 400 \text{ m} \times 800 \text{ m}$)에 대한 침투율로 환산할 경우 5.6 mm/hr 이다. 그런데 쌍천 하구의 대수층은 모래와 자갈의 혼합체로서, 투수계수가 3750 mm/hr ($= 90 \text{ m/day}$)이며, 그리고 이것은 다음과 같은 Horton 침투 공식에서의 최종 침투율로 볼 수 있다(Gupta, 1989).

$$f_p = (f_o - f_c)e^{-kt} + f_c \quad (4)$$

여기서, f_p 는 침투율[LT^{-1}], f_o 는 초기 침투율, f_c 는 최종 침투율, k 는 감소율[T^{-1}]이다.

즉, 최종 침투율 5.6 mm/hr 를 크게 상회하는 투수계수를 갖는 대수층 특성을 고려하면 상기의 가정에는 무리가 없는 것으로 생각된다. 침투율은 대수층의 모든 cell에서 음의 값으로 설정된다. 그러나 우물에서의 양수량은 양의 값으로 입력되어야 한다.

3.4 유입량 변화에 따른 지하수위 산출

Table 3은 각 우물에서의 평균적인 양수량을 보여준다. 그리고 Fig. 6은 평균 양수량으로 양수할 경우, 대수층으로의 유입량 변화에 따른 지하수위 산출 결과이다. 지하수위는 유입

Table 3. Monthly average pumping rate (2014~2015) ($\times 100 \text{ m}^3/\text{day}$)

Month Well	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Average
No. 1	39	35	34	48	50	44	52	47	45	45	46	47	44
No. 3	28	23	27	37	44	32	39	34	32	34	35	41	34
No. 4	24	22	27	35	36	28	36	32	33	34	34	35	31
No. 5	55	32	23	36	61	50	55	45	45	48	45	51	44
No. 6 + No. 7	86	69	99	140	143	105	149	138	143	144	143	143	125
Sum	230	180	209	295	332	259	331	294	296	304	303	317	279

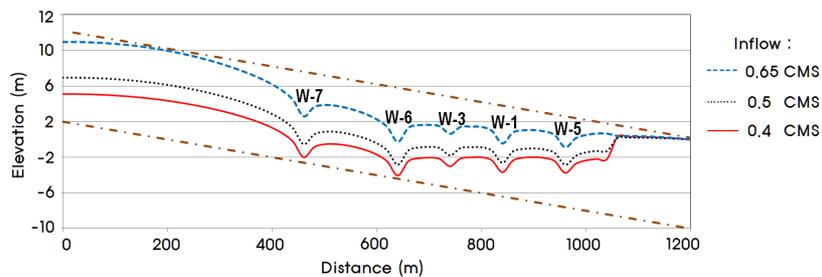


Fig. 6. Groundwater elevation due to inflow variation (average pumping rate)

량이 작아질수록 하강하게 된다. 먼저 유입량이 가장 크게 설정된 $0.65 \text{ m}^3/\text{sec}$ 경우는, 우물 수위가 지표면까지 도달하는 경우이며, 이때 지표수 흐름이 발생하는 것으로 판단할 수 있다.

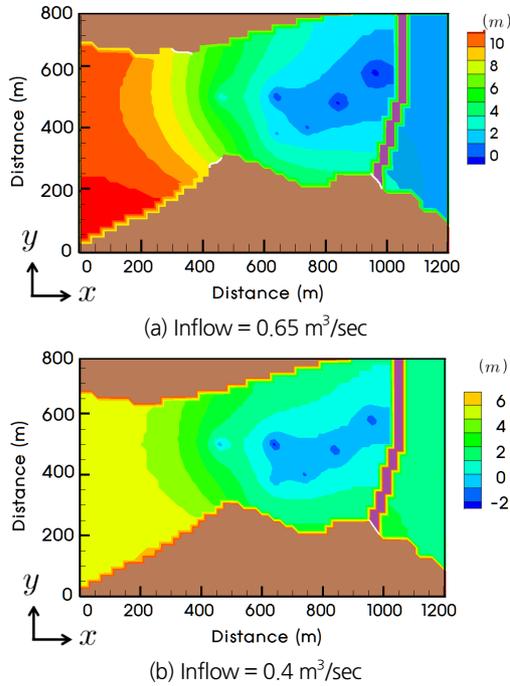


Fig. 7. Groundwater elevation (average pumping rate)

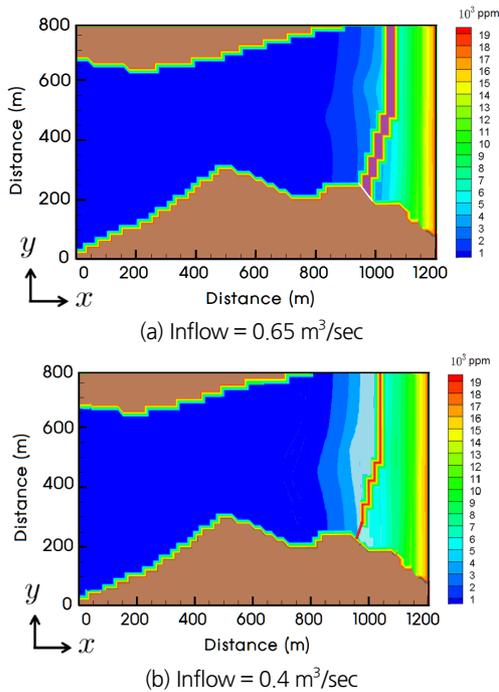


Fig. 8. Chlorine ion (Cl^-) concentration (average pumping rate)

유입량이 가장 작게 설정된 $0.4 \text{ m}^3/\text{sec}$ (기저유량의 80%) 경우에, 우물 수위는 가장 낮아지게 되며, 지하수위는 EL.-3 ~ EL.-2 m 범위에 분포하게 된다. 여기서 Well 6 and 7 지점에서는 우물 수위가 대수층 바닥에 도달하며, 이는 평균적인 취수가 가능한 한계치의 유입량임을 의미한다.

지하수위의 평면적인 분포와 해수 침입에 의한 염소이온 농도 분포는 Figs. 7 and 8에 각각 제시하였다. Fig. 7에서 우물에 의한 지하수위가 서로 영향 범위에 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 8에서 염소이온 농도는 0~4,000 mg/L 범위에서 해변과 거의 평행한 모습으로 나타나지만, 해변과 가장 가까운 위치에 있는 Well 5에서 가장 크게 분포되는 것을 알 수 있다.

3.5 개발 가능량의 추정

전술한 바와 같이 쌍천 지하댐의 수자원은 속초시의 생활 용수로 공급되고 있다. 그런데 속초시는 대부분의 수자원을 쌍천 유역에만 의존하는 형편이라서, 유역 내에 추가적인 지하댐을 구상하는 등 수자원 확보에 고심하고 있다. 본 연구에서는 수자원 확보의 대안으로서, 현재의 지하댐 저류공간에서 우물의 유량을 늘리거나 혹은 추가 우물을 설치하는 경우의 지하수위 변화를 검토하였다.

3.5.1 Case I (Inflow = $0.4 \text{ m}^3/\text{sec}$; Increased pumping rate)

Fig. 6에서 가장 갈수기를 나타내는 유입량 = $0.4 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 경우, 추가 양수에 여지가 있는 곳은 Well 1, 3 and 5이며 따라서 여기서의 양수량을 늘리는 경우이다. Fig. 9는 그 결과로서 제시되는 지하수위를 나타낸다. 이 그림에서 세 개 우물의 양수량을 각각 20% 늘린 경우 양수량의 증가는 총 $2,400 \text{ m}^3/\text{day}$ 가 되는데 이때, 우물 수위는 대수층 바닥까지 도달하는 것을 보여준다.

3.5.2 Case II (Inflow = $0.4 \text{ m}^3/\text{sec}$; Additional pumping)

유입량 = $0.4 \text{ m}^3/\text{sec}$ 에서 대수층 상류부에 추가 우물을 설치하는 경우이다(Fig. 10). 그림에서 나타난 지하수위를 보면, 추가 우물 Well 8을 설치하여 추가적인 양수를 하게 되면 다른 우물에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 여기서 Well 8의 수위를 대수층 바닥까지 진행하게 모의할 경우, 가능한 양수량 증대는 총 $3,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 산정되었다.

3.5.3 Case III (Inflow = $0.2 \text{ m}^3/\text{sec}$; Variation of pumping rate)

Fig. 11은 극심한 갈수기로서 유입량 = $0.2 \text{ m}^3/\text{sec}$ 경우에 양수량 변화에 따른 지하수위를 나타낸다. 여기서 양수량은 각 우물에서 동일하게 설정되었으며, Well 6 and 7에서 지하

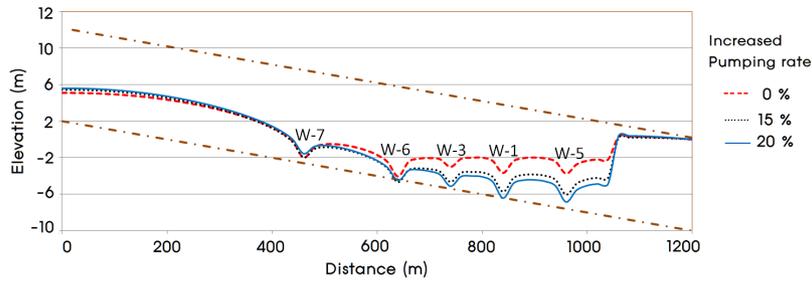


Fig. 9. Groundwater elevation (Inflow = 0.4 m³/sec; Increased pumping rate at Well 1, Well 3, Well 5)

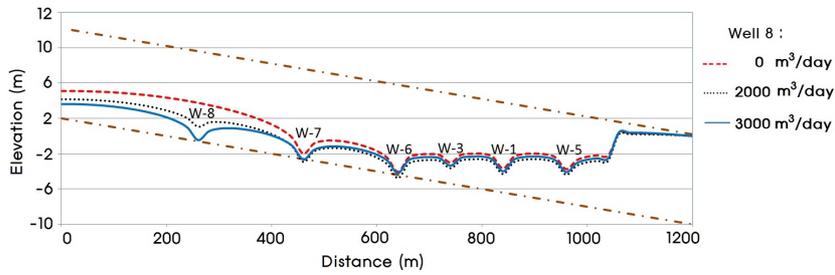


Fig. 10. Groundwater elevation (Inflow = 0.4 m³/sec; Additional pumping Well 8)

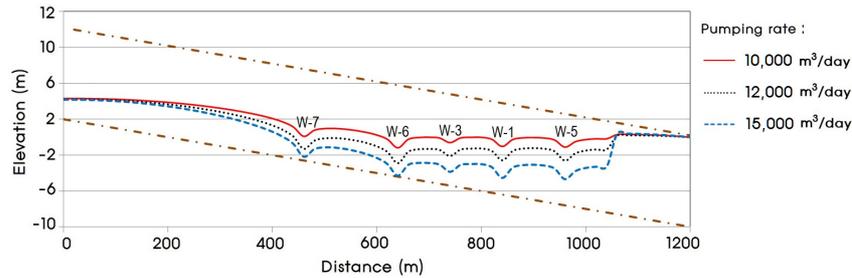


Fig. 11. Groundwater elevation (Inflow = 0.2 m³/sec; Variation of pumping rate)

수위가 대수층 바닥에 이를때 까지, 가능한 최대 양수량은 총 15,000 m³/day임을 나타내고 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 쌍천 지하댐을 연구 대상으로 하여, 하구 충적층에 지하댐을 설치하는 경우 수자원 개발량 평가의 방법론을 제시하는데 그 목적이 있다. 그리고 그 방법으로서, 비피압 지하수 흐름을 산출할 수 있는 평면 2차원 FDM 수치모형을 이용하며, 지표수 흐름이 크게 발생하지 않는 갈수기 유량이 대수층으로 유입될 경우, 지하수위를 산출하고 이를 분석하여 양수 가능량을 평가하는 방법을 사용하였다. 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 쌍천 유역의 유출은 세 개의 모형(Kajiyama, TANK, 및 DAWAST)의 평균값을 적용하며, 기저유량을 약 0.5 m³/sec로 산정하고, 기저유량 근처의 갈수기 유입량이 대수층(면적 ≈ 400 m × 800 m; 용량 ≈ 6.4 × 10⁵ m³)에 침투된다고 가정하였으며, 그 타당성을 검증하였다.
- 2) 양수량 = 28,000 m³/day이며, 유입량 = 0.65 m³/sec의 경우 지하수위는 지표면까지 도달하며, 지표수 흐름이 발생하는 것으로 판단할 수 있다. 유입량 = 0.4 m³/sec(기저유량의 80%)인 경우에 지하수위는 해수면보다 낮은 EL.-3 m ~ EL.-2 m 범위에 분포한다. 그리고 이때 우물 수위가 대수층 바닥에 도달하므로 이는 평균적인 취수가 가능한 한계치로서 분석되었다.
- 3) 양수량 = 28,000 m³/day 인 경우, 각 우물은 상호 영향범위에 있다. 염소이온 농도 등고선은 대체로 해안선과 평행으로 형성되며, 0~4,000 mg/L에 분포한다.

- 4) 유입량 $0.4 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 경우, Well 1, 3 and 5에서 양수량을 증대시킨다면, 각각 우물에서 20%의 양수량 증가로서 총 $2,400 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 양수량 증가가 가능하다. 대수층 상류부에 추가 우물(Well 8)을 설치하는 경우에는 $3,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 양수량 증가가 가능하다.
- 5) 유입량 = $0.2 \text{ m}^3/\text{sec}$ (기저유량의 40%)의 극심한 갈수기를 가정할 경우, 최대 $15000 \text{ m}^3/\text{day}$ 양수량이 가능하다.

본 연구의 방법론을 보다 명확하게 증명하고, 여타의 다른 지역에 적용, 예측하여 소기의 성과를 거두기 위해서는 대상 지역에서 장기적인 지표수 혹은 지하수 관측이 필요할 것으로 사료된다. 본 연구에서 개발된 수치모형과 분석 방법은, 비피압 대수층의 특성을 보이는 우리나라 해안 지역에서 지하담 설계와 수자원 개발량 평가 등의 목적으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

References

- Agricultural Infrastructure Corporation (2004). *A study on constructing technique · material · cost evaluation for underground dam and pneumatic fracturing effect in hard rock aquifer*, 21st Century Frontier R&D Program Report No. 3-4-1.
- Ahmed, A. T. (2017). "Experimental and numerical study for seawater intrusion remediation in heterogeneous coastal aquifer." *Journal of Environmental Management*, Vol. 198, No. 1, pp.221-232.
- Ahmed, T. K., Abdullah, S. A., and Saud, A. G. (2010). "Analysis and design of a deep subsurface dam." *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS*, Vol. 10, No. 3, pp. 27-35.
- Apaydin, A., and Zengin, E. (2016). "A combined surface and groundwater storage project: the Elmadag dam (Turkey)." *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol. 49, No. 3, pp. 237-243.
- Farid, D., Mohammad, H., Amin, B., and Hasan, D. (2014). "Locating suitable sites for construction of underground dams through analytic hierarchy process." *International Conference on Earth, Environment and Life Sciences (EELS-2014)* Dec. 23-24, Dubai (UAE).
- Gupta, R. S. (1989). *Hydrology and hydraulic systems*. Prentice Hall.
- Hut, R., Ertsen, M., Joeman, N., Vergeer, N., Winsemius, H., and Giesen, N (2008). "Effects of sand-storage dams on groundwater levels with examples from Kenya." *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 33, No. 1-2, pp.56-66.
- Ishida, S., Tsuchihara, T., Yoshimoto, S., and Imaizumi, M. (2011). "Review: Sustainable use of groundwater with underground dam." *Japan Agricultural Research Quarterly*, Vol. 45, No. 1, pp. 51-61.
- Kim, J. T., Kim, K. B., Chung, I. M., and Chung, G. C. (2014). "Analysis of flow duration and estimation of increased groundwater quantity due to groundwater dam construction." *Journal of Engineering Geology*, Vol. 24, No. 1, pp. 91-98.
- Kim, N. W., Na, H., and Chung, I. M. (2011). "Integrated surface-groundwater hydrologic analysis for evaluating effectiveness of groundwater dam in Ssangcheon watershed." *Economic and Environmental Geology*, Vol. 44, No. 6, pp. 525-532.
- Kim, S. J. (2016). "A Study on the flow and dispersion in the coastal unconfined aquifer (Development and application of a numerical model)." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 1, pp. 61-72.
- Lee, S. I., and Kim, B. C. (2003). "Site suitability analysis for underground dam using analytic Hierarchy process." *Journal of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 8, No. 4, pp. 36-44.
- Ministry of Agriculture and Forestry (1996). *A technical study of groundwater dam Development in a small basin area*.
- Ministry of Construction and Transport (2002). *Report for plan of the development of groundwater dam*. GW Project No. 2002-1a.
- Ministry of Science and Technology (2007). *Application of sustainable water resources development technology by using groundwater dam*. 21st Century Frontier R&D Program Report 3-6-2.
- Onder, H., and Yilmaz, M. (2005). "Underground Dams; A tool of Sustainable Development and Management of Groundwater Resources." *European Water*, Vol. 11, No. 21, pp. 35-45.
- Ouerdachi, L., Boutaghane, H., Hafsi, R., Tayeb, T., and Bouzahar, F. (2005). "Modelling of underground dams application to planning in the semi arid areas (Bikra, Algeria)." *Energy Procedia*. Vol. 18, pp. 426-437.
- Quilis, R. O., Hoogmoed, M., Ertsen, M., and Foppen, J. W. (2009). "Measuring and modelling hydrological processes of sand-storage dams on different spatial scales." *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 34, No. 4-5, pp.289-298.
- Seo, K. S., Park, N. S., Shi, L., and Kim, S. Y. (2007). "Optimal management of water resources via aquifer storage and recovery of surplus surface water." *Proceeding of 2007 KSCE conference Wateraid*, http://www.wateraid.org.uk/site/in_depth/technology_notes/302.asp.
- Yangyang-gun (2011). *Basic plan report for SSangcheon river maintenance*.
- Yun, S. H., Park, J. H., and Park, C. K. (2004). "A study for reducing sea water intrusion in the groundwater dam operation.", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 2, pp. 97-108.