

SWAT-MODFLOW를 이용한 영덕 오십천의 지하댐 타당성 연구

김종태¹ · 정일문² · 김남원² · 정교철^{3*}

¹충남대학교 지질환경과학과, ²한국건설기술연구원 수자원연구실, ³안동대학교 지구환경과학과

Feasibility Study of a Groundwater Dam in Osibcheon, using SWAT-MODFLOW

Jong-Tae Kim¹, Il-Moon Chung², Nam-Won Kim², and Gyo-Cheol Jeong^{3*}

¹Dept. of Geology, Chungnam National University

²Hydrology Research Division, Korea Institute of Construction Technology

³Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

지표수와 지하수의 연계 해석은 지하수 이용에 의한 문제들을 최소화 시킬 수 있다. 본 연구에서는 지하댐 건설 예정지인 경상북도 영덕군 오십천 지역의 현장조사 및 지하수위 분석을 실시하였으며 지표수 및 지하수 연계해석 모형인 SWAT-MODFLOW를 이용하여 지하댐의 지하수위 변화에 대해 해석하였다. 또한 지하댐 건설을 위한 현황분석을 실시하였으며 지하댐 상부에서 양수를 하였을 경우 지하수위 변화를 분석하여 연구지역의 한국형 지하댐 건설에 대한 타당성을 평가하였다.

주요어 : SWAT-MODFLOW, 지하댐, 지하수위, 지표수

Problems that arise from the use of groundwater can be minimized by connecting surface water with groundwater. We investigated the groundwater level at Osibcheon, Yeongdeok-gun, Gyeongsangbuk Province, and performed borehole investigation. We then used the SWAT-MODFLOW model to analyze variations in groundwater level and discharge amount. We also discuss how to assess the potential of groundwater dams in Korean by analyzing the hydrogeological properties of the candidate site.

Key words : SWAT-MODFLOW, groundwater dam, groundwater level, surface water

서 론

수자원은 인간 활동 및 생태계 유지에 필수요소이며 재생이 가능하지만 부적절한 지하수 이용은 지하수 개발과 이용을 어렵게 한다. 특히 국내 수자원의 경우 강우의 시간적, 공간적 불균형이 심하여 수자원 개발과 관리여건이 열악하며 지금까지 용수 공급의 대부분이었던 지표수댐의 개발 역시 위치 선정의 어려움과 지역 이기주의 등으로 인하여 제한을 받아 지속적으로 증가하고 있는 용수 수요를 감당하기에 큰 어려움이 발생하고 있다.

하천이나 호수 이외의 개발 및 관리가 가능한 수자원 중 가장 현실적인 대안은 지하수의 개발과 이용이다. 따

라서 지하수를 이용하여 물 수요에 대비하기 위해서는 정량적인 해석과 합리적인 관리가 필요하며 지표수와 지하수를 효율적으로 이용할 수 있는 방안을 마련하여야 한다. 지표수 및 지하수의 연계는 수자원의 수요, 공급이 불균형인 지역 내 지표수와 지하수를 단일 체계로 통합하여 계획적으로 운영함으로써 수자원의 가용량 증대와 용수공급의 안정성을 확보하는 방법으로 정의된다(이상일 외, 2004; 신현석 외, 2007).

이에 따라 향후 물 부족에 대처하고 지표수 및 지하수를 연계하여 개발 및 이용이 가능한 지하댐이 검토되고 있다. 지하댐은 지하수가 흐르고 있는 지하 대수층에 인공적인 차수벽을 설치, 지하수의 흐름을 억제하여 상류부의

*Corresponding author: jeong@andong.ac.kr

지하수위를 상승시킴으로써 대수층의 저류 용량 및 함양 능력의 증진과 지하수의 지속적인 산출능력 확대를 위한 시설을 말한다. 국내의 경우 1983년 농업진흥공사가 지하댐 건설을 시작하였으며 1996년 지하댐 개발 가능지역을 소유역으로 나누어 조사를 하였다. 이후 국내 지하댐 적용의 한계를 보이며 지하댐 건설은 중단되었으나 1999년 강원도 속초시에서 생활용수 공급이 목적인 쌍천 지하댐이 건설되어 운영 중에 있다(부성안 외, 2002; 김남종, 2005; 김종태 외, 2009). 그러나 대부분의 지하댐이 1980년대 건설되었으며 지역별 대수층 평가와 물수지 분석이 이루어지지 않은 상태에서 지하수 개발심도 및 사용량의 증가로 인하여 정확한 지하수량 평가가 어려운 상태이다.

본 연구에서 활용하고자 하는 SWAT-MODFLOW 모형(김남원 외, 2004a, b; Kim et al., 2008)은 준분포형 장기유출모형인 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형(Arnold et al., 1993)을 우리나라 실정에 맞게 개선한 완전연동형 지표수-지하수 통합모형으로 하천-대수층 상호작용 해석, 지하수 함양의 공간분포 해석, 양수에 의한 지하수계와 하천유량의 변화 해석 등 지표수, 지하수와 관련된 다양한 해석이 가능하다. SWAT 모형은 미국에서 개발된 유역모델로서 현재는 Window 환경 및 지리정보 시스템과 연계된 모형 인터페이스가 개발되었다. 그러나 SWAT 모형은 주로 지표수 관리에만 적용되어 왔으며 지하수 영역의 해석에는 어려움이 있다. 지하수 유동 해석 프로그램인 Visual MODFLOW는 지하수 흐름 해석을 제외한 나머지 물 순환 성분에 대한 해석 방법이 포함되어 있지 않으므로 주요입력 자료인 지하수 함양량의 결정에 어려움이 많다. 따라서 SWAT 모형과 Visual MODFLOW 모형을 상호 보완하면 수문순환 성분을 요소별로 정량화할 수 있다. SWAT-MODFLOW 모형은 SWAT 모형에서 산정된 지하수 함양량을 MODFLOW 모형의 Recharge Package에 넘겨 지하수 흐름에 의한 수두의 변화를 계산한다. 또한 이 모형은 SWAT 모형에서 산정된 소유역 내 하천수위와 MODFLOW 모형의 River Package를 이용하여 하천-대수층간의 물교환량을 계산한다. 이는 SWAT 모형에서 계산된 하천수위와 SWAT 모형의 입력 자료인 하도의 수리전도도, 하도의 바닥 폭, 하도 깊이와 사용자 입력변수인 하천바닥의 두께를 이용하여 강 바닥층의 수리전도도를 계산하여 MODFLOW 모형에 이 값을 넘겨준다. MODFLOW 모형은 이 값을 이용하여 하천수위와 대수층의 수두를 비교하여 하천-대수층간 물교환량을 산정한다(한국건설기술연구원, 2007).

연구지역인 경상북도 영덕군 영덕취수장의 취수원인 오십천의 경우 가뭄으로 유량이 감소되어 취수량 확보에 어려움이 있으므로 수자원 확보를 위한 대책으로 지하댐 건설이 제시되고 있다. 따라서 본 연구에서는 지표수 및 지하수 통합모형으로 개발된 SWAT-MODFLOW 모형을 이용해 지하댐 효과를 검토하였다. 또한 지하댐의 건설 전·후의 지하수위 비교뿐만 아니라 지하댐 상부에서 양수를 실시하였을 경우 발생하는 지하수위 변화를 분석하여 연구지역의 지하댐 건설 타당성을 평가하였다.

연구지역 특성 분석

대상유역은 경상북도 영덕군 영덕읍 오십천 유역으로 영덕취수장의 시설 노후화와 최근 가뭄으로 인한 취수원 고갈로 인해 지하수위 및 수위 감소가 예상되어 지하댐 건설이 요구되고 있다. 연구지역인 영덕군은 북쪽으로 울진군, 서쪽은 영양군, 청송군, 남쪽은 포항시, 동쪽은 동해와 접하고 있으며 태백산맥으로 인해 서쪽은 높고 동쪽으로 점점 낮아지는 지형을 이룬다. 또한 산지에서 하천은 동해로 흘러가는데 북쪽에서부터 남쪽으로 송천, 영덕오십천, 도천, 유천 등이 흐른다. 특히 송천(길이 25 km, 유역면적 220.4 km²), 영덕오십천(길이 40 km, 유역면적 380.0 km²)은 다른 하천과 비교하여 비교적 긴 하천으로 송천 하류는 영해평야로 이루어지며 영덕오십천 하류는 영덕평야로 경지와 취락이 집중되어 있다.

연구지역의 지질은 백악기말~신생대초에 활발하게 진행된 마그마 분출작용에 의하여 화강암, 화강섬록암 등 심성암류와 산성~중성 반암류 그리고 화산암, 화산쇄설암 등 화성기원의 암상이 고지형을 이루었으며 이후 신생대 제 3기에 형성된 구조분지에 퇴적물질과 화산기원의 쇄설암 및 응회암이 퇴적되었다. 제 4기에 들어 지속적인 해수면 상승과 하강의 반복에 따라 해안에 평행하게 일련의 해안 단구성 사력퇴적층이 발달하여 지질시대적으로 최상 위층을 형성하였으며 지금의 충적대수층이 만들어졌다.

지표수-지하수 연계 해석

SWAT-MODFLOW 모형

지표수 해석 모형은 상대적으로 느린 흐름인 지하수 흐름 해석에 문제점을 가지고 있으며, 지하수 모형은 대수층을 제외한 물 순환 성분에 대한 해석이 어려워 지하수 함양량의 결정에 어려움이 많다. 따라서 가뭄 및 지하수위의 하강이 지속되면 필요 용수량을 산정하고 지표수

및 지하수의 연계 해석이 이루어지면 수자원 확보가 가능하다. 국내에서 지표수 및 지하수의 연계해석은 많이 시도되지 않았으나 국외의 지표수-지하수 결합은 1990년대 미국에서 많이 발표되었다. Lal et al. (1998)은 유한 체적법을 이용한 2차원 지표수 및 지하수 유출모형 HSE (Hydrologic Simulation Engine)를 개발하였으며 Sudicky et al. (2005)은 지표수-지하수의 완전분포형 3차원 수치 모형을 개발하여 유출량을 계산하였다. Sophocleus et al. (1999)은 SWAT 모형과 MODFLOW 모형을 연동시켜 지하수 성분 모의 기능을 개선하였으며 Eckhardt et al. (2002)은 중간유출이 지배적인 중규모 유역에의 적용을 위해 SWAT-G 모형을 개발하였다. 또한 토지이용 변동에 따른 영향 연구(Fohrer et al., 2001; Weber et al., 2001) 및 모형의 자동보정(Van Griensven and Bauwens, 2003)에 대한 연구가 계속되고 있다. 본 연구에서는 지하댐 건설의 기존 설계 원리와 이론을 검토하여 기술개발 기간을 단축하고 함양량 증대, 저류량 확대, 효율 증대를 통하여 국내 지하수 자원을 추가 확보하기 위하여 한국형 지표수 및 지하수 통합모형으로 개발된 SWAT-MODFLOW를 이용해 지하댐 효과를 검토하였다.

기상자료

지하수 함양 및 지하수위는 강수량에 의해 크게 영향을 받으므로 본 연구에서는 연구지역 강수량 분석을 선행하였으며, SWAT 모형의 입력변수로 최고 및 최저 기온, 풍속, 상대습도, 일조시간을 기상자료로 사용하였다. 기상 자료는 Table 1과 같이 기상청의 10년 관측자료를 참고

하였다. Table 2는 영덕 기상관측소의 10년 강수량 및 강우일수로써 10년 평균 강수량은 1224.4 mm이며 1년간 평균 전체강우일수는 85일로 나타났다. 2008년의 경우 가뭄이 지속되어 연강수량이 729.3 mm이며 30 mm 이상 강우일수가 5일에 불과했다. Fig. 1은 연구지역 일대의 최근 10년간 연평균 강수량의 변동 추이이다. 2004년, 2005년, 2006년, 2007년은 10년 평균과 거의 일치하지만 2000년, 2001년, 2008년은 연평균 강수량 보다 낮게 나타났다.

입력자료

연구 대상인 영덕오십천의 유역면적은 370.00 km²이며

Table 1. Annual meteorological data for the study area.

Year	Relative humidity (%)	Temperature (Minimum) (°C)	Temperature (Maximum) (°C)	Wind speed (m/s)	Hours of sunshine (hr)
1999	61.6	-10.3	33.0	2.8	6.2
2000	61.0	-8.8	34.9	2.8	6.4
2001	60.3	-14.2	36.0	3.1	8.5
2002	63.2	-10.1	33.5	3.1	7.0
2003	66.3	-11.8	32.7	2.8	6.1
2004	62.4	-13.3	36.2	2.8	7.1
2005	61.5	-11.8	36.9	2.9	7.1
2006	65.7	-10.6	35.0	2.8	6.3
2007	65.7	-5.3	35.7	2.7	5.3
2008	63.7	-9.3	37.7	3.0	6.2
Average	63.1	-10.6	35.2	2.9	6.6

Table 2. Yearly precipitation data for the study area.

Year	Annual Precipitation (mm)	Number of raining days	Number of raining days (More than 30 mm)	Number of raining days (More than 50 mm)	Number of raining days (More than 70 mm)
1999	1,363.7	94	16	10	4
2000	1,017.3	72	9	6	2
2001	1,002.5	77	9	2	2
2002	1,380.0	82	15	8	3
2003	1,840.2	110	18	12	7
2004	1,272.9	79	16	8	4
2005	1,204.0	77	10	5	4
2006	1,236.4	82	15	5	3
2007	1,197.5	91	10	5	2
2008	729.3	86	5	1	0
Average	1,224.4	85	12	6	3

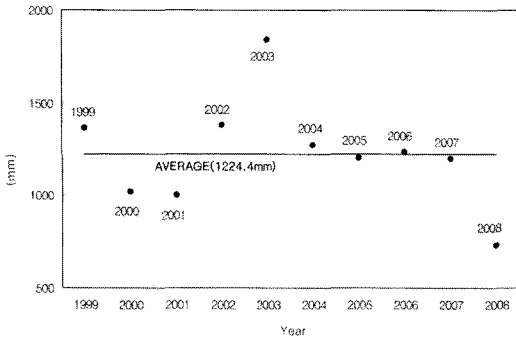


Fig. 1. Variations in annual precipitation at the study area.

하도 연장은 115.26 km로 나타났다(Table 3). Fig. 2는 영덕오십천 및 상류 하천의 흐름도이며, Fig. 3은 연구지역의 위치, 영덕오십천 수계 및 해석을 위한 소유역 구분을 보여준다. 소유역은 총 17개이며 소하천 및 영덕오십천 중·상류 따라 구분하였다. 지하댐은 지방 1급 하천인 영덕오십천 본류에 계획되었으며 8번 소유역에 위치하고 있다. 총적층 및 암반층의 투수계수는 연구지역 시추 자료를 참고하였으며 그 결과 총적층의 투수계수는 29.38 m/d, 암반층 투수계수는 8.60×10^{-3} m/d, 지하담체의 투수계수는 1.0×10^{-8} m/d로 산정하였다.

SWAT 모형을 적용하기 위해서는 기상 자료를 비롯하여 수치표고모델(DEM), 토지피복도, 토양도의 지형자료가 필요하다. DEM은 국가수자원관리 종합정보에서 제공하는 자료를 사용하였으며 토지피복도는 환경부에서 제공하는 중분류 토지피복도를 이용하였다. 토양도의 경우 농업과학기술원에서 제공하는 정밀도를 사용하였으며 대상유역은 63개의 토양통(Soil series)이 분포하는 것으로 나타났다. Fig. 4는 연구지역 지형분석을 위한 DEM 자

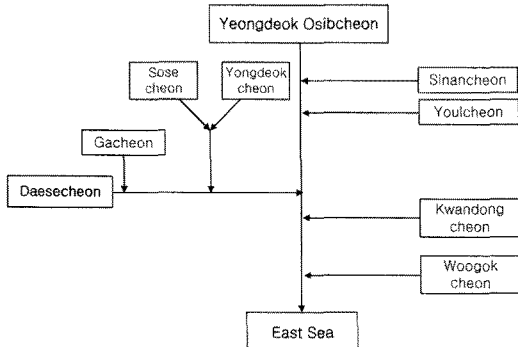


Fig. 2. Map of sub-basins within the Yeongdeok Osibcheon watershed.

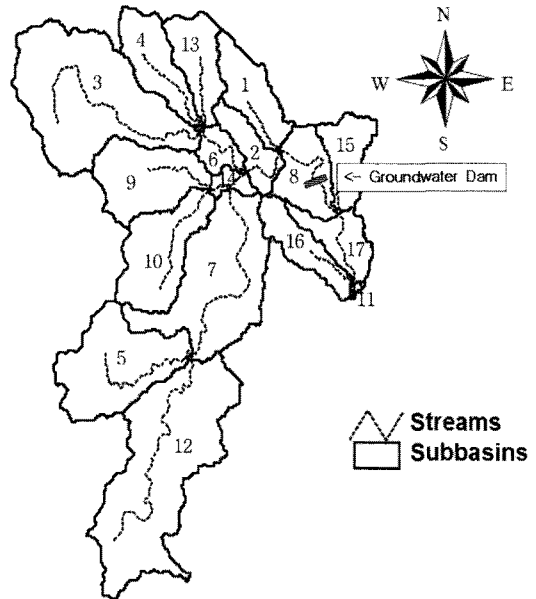


Fig. 3. Streams network and sub-basins of the study area.

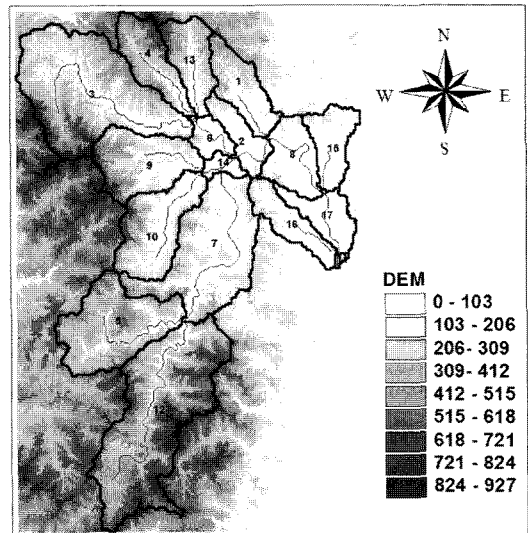


Fig. 4. Digital Elevation Model of the study area.

료이며 SWAT 모형은 토양층을 중심으로 물수지를 파악하는 모형이므로 토양 분류법의 최하위 단위인 토양통 자료를 구축하는 것이 핵심이다. 이를 위해 1:25,000의 정밀 토양도로부터 얻어진 토양통을 실제 분석에 이용했으며 토지이용도와 토양도를 중첩시켜 구한 HRU(수문응답단위, Hydrological Response Unit) 분포를 수문응답의 기본단위로 사용하였다(Fig. 5, Fig. 6).

SWAT-MODFLOW 해석

지표수-지하수 연계해석을 통한 지하댐 건설 타당성 평가는 아직 국내·외에서 미흡한 실정이므로 정확한 자료 획득이 가능한 과거 기상자료를 이용해 지하댐 타당성을 평가하였다. 해석기간은 1999년부터 2008년까지 10년간 모의를 수행하였으며 초기 1년(1999년)은 모형의 안정화를 위한 워밍업 기간으로 결과에서는 제외하였다. 모형 해석은 지하댐 건설로 인한 댐 상·하류의 지하수위 비교, 상류 지역 양수로 인한 지하수위 비교로 나누어 해석을 하였다.

지하댐 건설 전·후의 지하수위 비교

지하댐이 건설되었을 경우 댐 상류와 하류에서의 지하수위 변화를 분석하였다. Fig. 7은 지하댐 상류에서 지

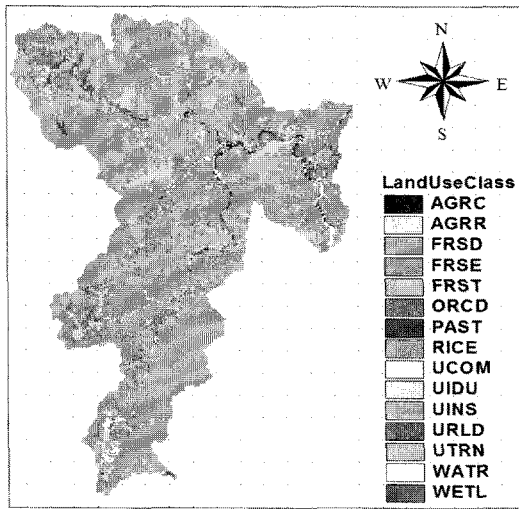


Fig. 5. Land-use map of the study area.

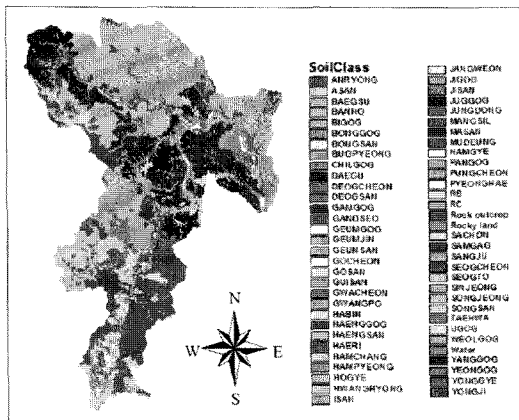


Fig. 6. Soil map of the study area.

하댐 건설 전·후의 지하수위를 비교한 그래프(2000년~2008년)로서, 지하댐 건설 후 지하수위가 최대 2.85 m, 평균 0.54 m 상승한 것으로 나타났다. 또한 여름의 경우 강우로 인해 지하수위의 차이가 거의 없지만 겨울의 경우 지하수위 변화가 크게 나타났으며 이는 지하댐이 겨울철 가뭄에 도움이 되는 것을 의미한다.

Fig. 8은 지하댐 건설로 인한 하류지역의 지하수위 하강에 대한 해석 결과로써 지하댐 하류에서 지하댐 건설 전·후의 지하수위를 비교한 그래프(2000년~2008년)이다. 해석 결과 지형적인 조건에 따라 최대 0.14 m 지하수위가 하강하는 지역도 있으나 대부분 댐 건설 전과 비슷한 값을 나타냈다. 지하댐 건설로 인해 상류지역에서의 지하수 유입이 줄어들어 하류지역의 지하수위가 다소 감소할 것으로 예상되었으나 연구지역은 댐 하류가 해안에 인접하여 고도가 전체적으로 낮아 지하수위 감소가 거의 없는 것으로 판단된다.

상류지역 양수 후 지하수위 비교

연구지역인 경북 영덕군은 2008년 이후 가뭄이 지속되고 있으며 안정적인 취수량 확보를 위해 방사상 집수정 시설을 계획하고 있다. 이에 따라 지하댐 직상부에서 집수정 설치 시 채수 가능한 유량 산정을 위해 수리모델 분석이 실시되었다(영덕군, 2009). 방사상 집수정의 채수 가능량 산정은 세계적으로 범용되고 있는 Visual

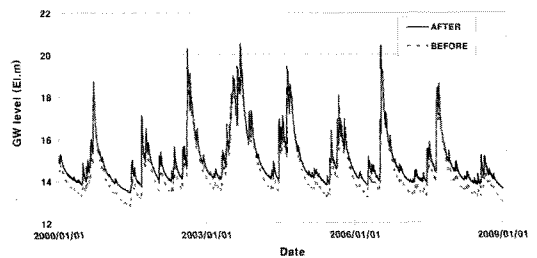


Fig. 7. Simulated variations in groundwater level at the upper dam.

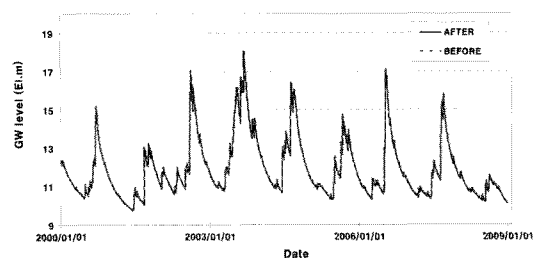


Fig. 8. Simulated variations in groundwater level at the lower dam.

Table 3. Input data for SWAT-MODFLOW.

Watershed	Basin area (km ²)	River channel (km)	Permeability (m/d)		
			Alluvium	Bedrock	Groundwater dam
Yeongdeok Osibcheon	370.00	115.26	29.38	8.60×10^{-3}	1.00×10^{-8}

MODFLOW를 사용하였으며 대수층 두께는 28.9 m, 지하수위는 7.3 m, 층의 투수계수는 Table 3과 같이 하였다.

모델 면적 크기는 600 m × 700 m이며 방사상 집수정 부근은 1 m × 1 m의 미세 격자로 구성하였다. 또한 수직이방성의 영향을 반영하기 위해 수평방향 투수계수의 0.5배, 0.75배에 해당하는 수직방향 투수계수 변화를 가정하여 해석하였다. Fig. 9~Fig. 10은 수직이방성의 영향을 고려한 양수 시 2차원 지하수 등수위분포도를 나타낸다.

분석 결과 연구지역에서 방사상 집수정을 2개 설치할 경우 수직이방성의 변화범위 내 채수가능량은 각각 14,400 m³/d, 16,600 m³/d로 나타났다. 최소 양수 조건인 $K_z = 0.50 K_x$ 일 경우 시간 경과에 따른 양수량 감소 및 안전성을 고려하여 채수가능량인 14,400 m³/d의 70%를 적용하여 10,080 m³/d를 적용취수가능량으로 산정하였다. 따라서 본 연구에서는 영덕지역 필요수량인 10,080 m³/d를 지하댐 직상부에서 양수하였을 경우 지하댐에 미치는 영향을 SWAT-MODFLOW를 이용해 분석하였다. Fig. 11은 지하댐 건설 전·후 지하수위와 댐 건설 후 필요수량을 양수한 경우 댐 상부에서 지하수위를 비교한 그림으로써 분석 결과 지하댐 건설 후와 비교해 양수로 인한 지하수위의 감소가 확인되었으나 지하댐 건설 전 보다 최대 2.3 m, 평균 0.15 m 높은 지하수위를 보인다. 즉 지하댐 건설 후 적정취수가능량을 양수하더라도 지하수위는 현재 지하댐 건설 전 보다 높다는 것을 의미한다. 이는 연구지역에 지하댐이 건설될 경우 필요수량의 확보가 충분히 가능하다는 것을 보여주며 향후 모형해석 결과를 바탕으로 검증이 이루어지면 모의 결과의 타당성을 좀 더 정확하게 평가할 수 있을 것으로 판단한다.

결 론

지표수 및 지하수 통합 모형인 SWAT-MODFLOW를 이용하여 영덕군 오십천 유역에서 지하댐 건설시의 지하수위 변화, 상류지역에서의 양수시 지하댐 상·하류지역의 지하수위 변화를 분석하였다. 10년 기상자료 중 초기 1년(1999년)은 위명업 기간으로 제외한 후 2000년~2008년에 대한 분석 결과 지하댐 직상부에서는 댐 건설로 지하수위

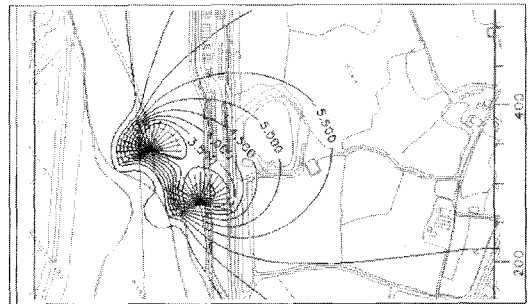


Fig. 9. Simulation of groundwater flow in the study area ($K_z = 0.75 K_x$, EL.m).

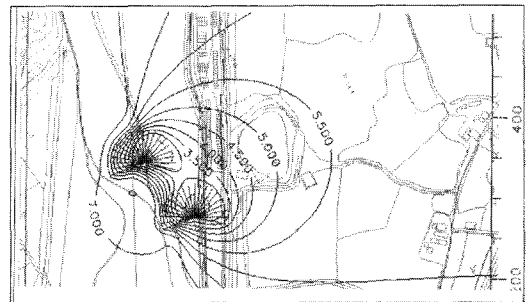


Fig. 10. Simulation of groundwater flow in the study area ($K_z = 0.50 K_x$, EL.m).

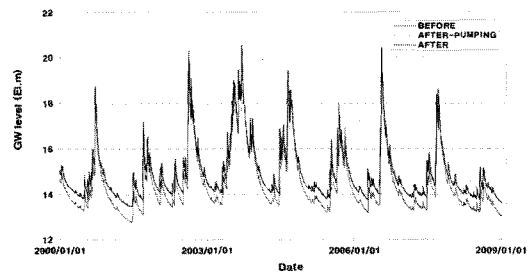


Fig. 11. Temporal variations in groundwater level after pumping.

가 최대 2.85 m, 유역 평균 0.54 m 상승한 것으로 나타났다. 또한 댐 건설로 인한 하류의 지하수위 하강 문제에 대한 해석 결과 최대 0.14 m 감소하였으나 대부분 0.05 m 이하로 댐 하부의 지하수위 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 경북 영덕군은 2008년 이후 가뭄이 지속되고 있

어 안정적인 취수량 확보를 위해 방사상 집수정 시설을 계획하고 있으며 필요수량은 10,080 m³/d이다. 따라서 댐 건설 후 필요수량을 양수하였을 경우에 대해 해석한 결과 지하수위는 지하댐 건설 후에 비해 하강하지만 지하댐 건설 전보다 최대 2.3m, 평균 0.15m 높게 나타났다. 이는 지하댐 건설이 차후 직·간접적으로 수자원 확보에 큰 역할을 할 수 있음을 뒷받침하며 향후 계절별 지하수위 변화 양상, 수리지질구조 및 풍화정도에 따른 대수층 자료 등이 추가로 검토되어야 할 것이다. 또한 해안에 건설되는 지하댐의 경우 댐 하류 지하수위 감소로 인해 염수침입 문제가 발생할 수 있으므로 차수벽에 대한 정확한 조사와 해석 및 지표수 유출량과의 연관성 분석도 필요하다.

사 사

이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이다[NRF-2010-355-C00115]. 이에 감사를 드린다. 또한 논문을 완성하기 까지 본문의 내용수정 및 교정에 많은 도움을 준 추창오 박사에게 감사를 드린다.

참고문헌

- 김남원, 정일문, 원유승, 2004a, 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형, (I) 모형의 개발, 한국수자원 학회논문집, 37(6), 499-507.
- 김남원, 정일문, 원유승, 2004b, 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형, (II) 모형의 적용, 한국수자원 학회논문집, 37(6), 509-515.
- 김남중, 2005, 지하댐의 개발 방향과 전망, 유신기술회보, 12, 99-112.
- 김종태, 김만일, 정일문, 김남원, 정교철, 2009, 지하댐 건설에 따른 유역 내 지하수위 변화 특성 해석, 지질공학, 19(2), 227-233.
- 부성안, 이기철, 김진성, 정교철, 고양수, 2002, 지하수댐 물막이벽 시공법과 해안지역 염수침입 방지기술 개선 방안, 지질공학, 12(2), 215-234.
- 신현석, 강두기, 김상단, 2007, 낙동강유역 SWAT 모형 구축 및 물수지 시나리오에 따른 유허분석, 한국수자원 학회논문집, 한국수자원학회, 40(3), 251-263.
- 영덕군, 2009, 가뭄대비 영덕취수장 대체수원개발 보고서, 278p.
- 이상일, 김병찬, 김수민, 2004, 지표수-지하수를 연계한 수자원의 효율적 이용, 한국수자원학회논문집, 한국수 자원학회, 37(10), 789-798.
- 한국건설기술연구원, 2007, 지표수 수문성분 해석시스템 개발, 384p.
- Arnold, J. G., Allen, P. M. and Bernhardt G., 1993, A comprehensive surface-groundwater model., Journal of Hydrology, 142, 47-69.
- Eckhardt, K., Haverkamp, S., Fohrer, N. and Frede, H.G.,

- 2002, SWAT-G a version of SWAT99-2 modified for application to low mountain range catchments, Physical and Chemistry of the Earth, Oceans & Atmosphere, 27, 641-644.
- Fohrer, N., Haverkamp, S., Eckhardt, K. and Frede, H.G., 2001, Hydrologic response to land use changes on the catchment scale, Physics and Chemistry of the Earth B: Hydrology, Oceans & Atmosphere, 26, 577-582.
- Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S. and Arnold, G. J., 2008, Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model, Journal of Hydrology, 356, 1-16.
- Lal, A. M., Belnap, M. and Van Zee, R., 1998, Simulation of overland and groundwater flow in the everglades national park, Proceedings of the international water resources engineering conference in memphis, Tennessee, Volume one, American Society of Civil Engineers, 610-615.
- Sophocleus, M. A., Koelliker, J. K., Govindaraju, R. S., Birdie, T., Ramireddygar, S. R. and Perkins S. P., 1999, Integrated numerical modeling for basin-wide water management: the case of the Rattlesnake Creek basin in south-central Kansas, Journal of Hydrology, 214, 179-196.
- Sudicky, E. A., Therrien, R., Park, Y. J., McLaren, R. G., Jones, J. P., Lemieux, J. M., Brookfield, A. E., Colautti, D., Panday, S. and Guvanasen, V., 2005, On the challenge of integrated surface-subsurface flow and transport modelling at multiple catchment scales, Geological Society of America Abstracts with Program, 37(7), 28.
- Van Griensven, A. and Bauwens, W., 2003, Multiobjective antocalibration for semidistributed water quality models, Water Resources Research, 39, 1348-1356.
- Weber, A., Fohrer, N. and Möller, D., 2001, Longterm changes of land use in a mesoscale watershed due to socio-economic factors-effects on landscape functions., Ecological Modelling, 140, 125-140.

2011년 6월 10일 원고접수, 2011년 6월 24일 게재승인

김종태

충남대학교 지질환경과학과 박사후연구원

305-764 대전광역시 유성구 궁동 220

Tel: 054-820-7735

Fax: 054-822-5467

E-mail: jongtae98@empal.com

정일문

한국건설기술연구원 수자원연구실

411-712 경기도 고양시 일산서구 대화동 2311

Tel: 031-910-0334

Fax: 031-910-0251

E-mail: imchung@kict.re.kr

김남원

한국건설기술연구원 수자원연구실
411-712 경기도 고양시 일산서구 대화동 2311
Tel: 031-910-0256
Fax: 031-910-0251
E-mail: nwkim@kict.re.kr

정교철

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 송천동 388
Tel: 054-820-5753
Fax: 054-822-5467
E-mail: jeong@andong.ac.kr