

MODFLOW를 이용한 지하댐 건설 전·후 지하수 유동 해석과 개발가능량 산정

Characteristics of Groundwater Flow near Groundwater Dam before and after Construction of Dam

박창근¹⁾, 박재현²⁾

Chang-Kun Park, Jae-Hyeon Park,

요 지

최근 국가에서 수자원 개발의 다변화를 모색함에 따라 지하수가 새로운 수자원으로 대두되고 있다. 이러한 지하수를 이용하는 방안 중 하나가 하천의 하류부에 지하댐을 건설하여 지하수자원을 이용하는 것이다. 본 논문에서는 속초시 쌍천 지하댐 유역을 적용대상으로 선정하여 USGS의 MODFLOW 모형을 이용한 수치모형 실험을 통해 양수로 인한 지하수위의 변동 양상을 살펴보았다. 또한 지하댐의 위치와 형태를 조절하여 지하수의 최적 관리방안을 모색해 보았다. 지하댐 건설 지역에서의 수자원 보존과 지속 가능한 개발을 위하여 양수량에 대한 지속적인 평가와 규제가 필수적이고 또한 신뢰성이 높은 모델의 구축이 필요하다. 이를 위해서는 장기간의 지하수 수위 변동자료, 정밀 지질도와 대수층의 분포에 대한 data base 구축 등이 요구되며, 대수층에 대한 수리매개변수 등과 같은 기본 자료의 정확한 평가가 요구된다.

1. 서 론

최근 들어 지역적으로 수자원 부족현상이 증가하고 있는 가운데 효율적인 수자원 이용이 사회적 문제로 대두되고 있는 실정이다. 따라서 다목적댐의 건설이나 강변 여과수를 이용 수자원을 개발하여 수자원의 부족 현상을 해소하려는 노력이 끊이지 않고 있다. 우리나라의 연평균 강수량은 1,283mm로서 세계 평균의 약 1.3 배에 달하지만 전체강우의 2/3 가량이 홍수기(6월 21일~ 9월 20일)에 집중되어 강우의 시간적 분포가 고르지 못하고, 또한 지역적으로도 불균형을 이루고 있어 수자원 관리 측면이나 수자원 확보에 어려운 점이 있다. 따라서 이러한 것들이 물부족 현상이 나타나는 주된 원인이라고 볼 수 있다.

다목적댐의 건설은 수자원의 확보외에도 홍수조절 등의 치수기능도 담당하고 있다. 그러나 수자원의 확보 측면만을 고려할 때 지상댐에 의한 수자원 확보는 더 이상 능사만은 아니다. 환경단체의 반대와 수물지 주민들에 대한 보상비의 증가로 지상댐의 건설 여건 악화가 그 주된 원인으로 들 수 있고, 따라서 국가의 근본적인 수자원 확보방안은 환경과파괴가 적은 방향으로 전환되어야 할 것이다. 이에 따라 최근 새로운 수자원으로 대두되는 것이 지하수이다. 이러한 지하수를 이용하는 방안 중 하나가 하천의 하류부분에 기반암까지 차수벽을 설치하여 바다로 무효로 방류되는 지하수를 이용할 수 있는 지하댐을 건설하여 수자원을 확보하는 방법이다. 따라서 본 논문에서는 속초시 쌍천 지하댐 유역을 적용대상으로 선정하여 지하수 유동 및 양수에 의한 지하수위의 변화를 예측하여 합리적인 지하수 관리방법을 제시하고자 한다.

2. 수치모형 실험

1) 관동대학교 SOC공학부 부교수 e-mail : ckpark@kwandong.ac.kr

2) 인제대학교 토목공학과 조교수 e-mail : jh-park@inje.ac.kr

2.1 입력자료와 경계조건

2.1.1 격자망의 구성

모델의 격자망은 각 하천 유역의 지형적 특성과 수리지질학적인 측정치를 반영하기 위하여 전체 유역을 활성격자로 설정하여 적용함이 바람직하나 지하댐 설치 유역인 쌍천 하류 지역(1.274km²)에 대하여 구성되었다. 본 모델링에서는 동서방향으로 1,600m, 남북방향으로 1,000m이며 행과 열의 간격은 20m의 등간격으로 설정하였다. 설정한 구간에서 격자수는 동서방향으로 80개, 남북방향으로 50개이다. 구성한 격자망에서 격자의 수는 4,000개, 격점의 수는 4131개 지점이다.

2.1.2 경계조건

모의대상 지역의 남쪽, 북쪽 지역에서 편마암류 및 화강암류 지층은 저투수성 구간이므로 총적층과의 경계구간을 무활성셀(Inactive cell)로 처리하였다. 동쪽의 해안은 평균해수면이 E.L.+0m이므로 일정수두(Constant head)로 처리하여 대수층에서 바다로 유출되는 지하수량을 고려하였고, 모의대상 지역을 관통하는 쌍천과 그 지류는 RIV(River package)로 처리하여 쌍천과 지하수계 사이에서 일어나는 지하수 유동의 상관관계를 고려하였다. 그리고 수직차수벽을 설치한 지점들은 HFB(Horizontal Flow Barrier Boundary)로 처리하여 수직차수벽이 지하수계 내에서 지하수 유동에 미치는 영향에 대해 고려하였다.

2.1.3 대수성 수리특성인자

본 실험에서 대수층의 수리전도도와 저류계수는 대한지하수환경학회의 『속초시 쌍천취수원 개발에 따른 수리지질연구 용역 보고서(1998)』와 (주)한국토지공사 종합감리공단 쌍천취수원 감리단의 『속초시 도문동 쌍천 취수원 개발사업 전면책임 감리용역 보고서(1998)』에서 조사된 자료를 참고하여 격자의 대표치로 입력하였으며, 지하수 함양량 또한 상기 보고서에서 조사된 자료를 참고하여 단위면적당 지하수 함양량을 적용하였다. 그리고 대수층의 형태는 1개 층의 다공질 매체로 구성하여 모델링을 수행하였다.

표 2.1 MODFLOW 모의를 위한 경계조건 및 입력자료

입력인자		내용
격자망	격자의 수 격자의 크기	80×50 20m
대수층의 형태	1층	총적층 - 포화대두께 20m(Avg.)
양수량	1번 집수정	9,000m ³ /day
	3번 집수정	5,000m ³ /day
	4번 집수정	4,000m ³ /day
	5번 집수정	10,000m ³ /day
수리상수	수리전도도	72.5m/day ~ 146.9m/day
	저류계수	0.001 ~ 0.18

2.2 수치모형실험

본 실험에서는 USGS의 MODFLOW 모형을 사용하여 대상구간을 모의하였고 차수벽의 영향을 고려하지 않은 조건인 Case 1과 차수벽을 고려한 조건인 Case 2로 크게 2가지의 안을 설정하여 실험을 진행하였다. 먼저 비채수 정류상태에서의 지하수위 보정(Calibration) 작업을 실시한 후 지하댐 건설 전·후 지하수 유동 해석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 비채수 정류상태에서의 지하수위 보정

표 2.1의 제반일자를 입력자료로 USGS의 MODFLOW 모형을 사용하여 비채수 정류시의 수위를 계산하였다. 수치모형실험에서 계산된 수위와 5개 관측지점에서 관측된 실측 수위를 비교, 분석하면서 민감도 분석을 통해 비채수 정류상태에서 수위보정 작업을 실시하였다. 비교에 이용된 지하수위는 대한지하수환경학회의

『속초시 쌍천취수원 개발에 따른 수리지질연구 용역 보고서(1998)』에서 1998년 2월에 측정된 지하수위 자료이다. 이 시기에는 쌍천 취수원에서 지하수를 채수·이용하던 시기이다. 따라서 보정에 이용된 지하수위 자료는 쌍천 취수원의 집수정에서 지하수를 이용하더라도 거의 영향을 받지 않는 지점에서 관측된 것들이다. 5개 관측지점의 실측 수위와 수치모델의 모델수위를 서로 비교·보정한 바 각 대비지점에서 실측수위와 모델수위는 표 3.1과 같다.

다음의 보정 결과는 민감도 분석에 의해 입력인자의 값을 변화시켜가며 비교·분석한 것이다. 모의영역 내에서 수위보정에 가용한 5개 수위관측 지점에서 보정된 수위는 실제 수위에 비교적 잘 근접한다.

표 3.1 관측수위와 모델수위 비교

공 번	Obs Heads(m)	Cal Heads(m)	Cal-Obs Heads(m)
BH-7	11.25	10.87	-0.38
BH-8	10.42	11.05	0.63
BH-31	0.96	0.82	-0.14
BH-32	1.24	1.07	-0.17
BH-36	7.03	6.80	-0.23

3.2 지하댐 건설 전·후 지하수 유동 해석

3.2.1 지하댐 미설치 및 비양수 자연상태 모의

모의구간으로 유입되는 총 지하수량은 약 2,091m³/day 규모이고, 이 중에서 지하수함양량은 약 1,015m³/day 정도이며 하천에서 대수층으로 유입되는 양은 1,076m³/day 정도이다(표 3.2 참조). 모의구간으로 일단 유입된 지하수는 충적층에서 기저유출의 형태로 주변 쌍천으로 배출되는 양이 1,939m³/day 규모이고, 해안으로 유출되는 양은 152m³/day 정도로 모의되었다. 따라서 모의구간으로 유입되거나 유출되는 지하수량은 서로 평형을 이루고 있음을 알 수 있다.

3.2.2 지하댐 설치 및 비양수 자연상태 모의

모의구간으로 유입되는 총 지하수량은 지하댐 미설치 경우와 비슷한 2,088m³/day정도이며, 이 중 지하수 함양량은 1,015m³/day이고 일부 하천에서 대수층으로 유입되는 양은 1,073m³/day 규모이다(표 3.2 참조).

모의 구간에서 유출되는 총 지하수량은 2,088m³/day로서 총 유입량과 비슷하다. 하류지역에 지하댐을 설치함으로 인해 해안으로 유출되어 나가던 지하수 중 약 74m³/day(152m³/day - 78m³/day)이 차단되어 지하댐 상류지역에 저류된다. 지하댐 설치로 인해 대수층내의 일부구간에서 지하수위가 상승하여 대수층에서 하천으로 자연 배출되는 양은 자연상태의 흐름에 비해 1일 약 79m³/day(2,018m³/day - 1,939m³/day) 정도 증가한다. 즉 지하댐은 해안으로 무효 방류되는 지하수를 어느 정도 차단시켜 주는 역할을 한다.

표 3.2 지하댐 설치 전·후 물수지 분석(비양수시 정류상태) (단위 : m³/day)

구 분		지하댐 無	지하댐 有
유입	정수위(해안에서 유입량)	0	0
	함양량(강우→대수층)	1,015	1,015
	하천유입량(하천→대수층)	1,076	1,073
	총 유입량	2,091	2,088
유출	정수위(해안으로 유출량)	152	78
	함양량(강우→대수층)	0	0
	하천유출량(대수층→하천)	1,939	2,018
	총 유출량	2,091	2,088

4. 효율적인 지하댐의 위치 및 형태

지하댐을 보다 효율적인 형태로 적정한 위치에 설치하는 것이 지하수의 체계적이고, 합리적인 관리와 개발을 하는데 중요한 요소라고 사료되어 지하댐의 위치와 형태를 변경하여 현재의 안과 비교 분석하였다.

4.1 수치모형실험

제2장에서 수행한 동일한 격자망과 경계조건을 사용하여, 지하댐의 형태와 위치를 4개의 안으로 나누어 실험을 진행하였다. 각각의 안은 지하댐의 길이를 현재보다 짧게 하거나 비슷한 정도로 설정하였다. 또한 순수 지하댐에 의한 수자원을 평가하기 위해 최악의 조건 즉 지하수 함양량은 없고(RCH=0) 하천유입량도 없다(RIV=0)는 조건을 적용하여 양수기간에 따라 모의를 수행하였다.

표 4.1 각 Case 별 지하댐의 위치 및 형태

유형	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
지하댐	<ul style="list-style-type: none"> 길이 : 893m 형태 ⑥번을 남쪽의 불투수층까지 연장 	<ul style="list-style-type: none"> 길이 : 836m 형태 ⑤번과 ⑥번을 ④번과 직선으로 남쪽의 불투수층까지 연장 	<ul style="list-style-type: none"> 길이 : 881m 형태 ③번과 ④번을 북동쪽으로 이동하고 ⑤번과 ⑥번은 Case 2와 동일 	<ul style="list-style-type: none"> 길이 : 907m 형태 ⑤번과 ⑥번을 해안 쪽으로 더 가깝게 이동
그림				

4.2 실험 결과

양수 기간에 따라 각 Case 별 모의를 수행한 결과 양수 30일까지는 변화가 미미하나 60일을 전후하여 지하수위의 변동 폭이 커지는 것을 알 수 있었으며, 양수 90일 경과 후 Case 3과 Case 5를 비교해 볼 때 Case 3이 Case 5 보다 지하수위가 약 1m 가량 강하되었다.

수치모형실험 결과 각 Case 별 지하수위 분포는 그다지 큰 차이는 없지만 Case 5와 Case 6의 경우가 다른 두 경우보다 지하수위 변동 폭이 완만하며 양수에 의한 지하수 장애 현상도 조금은 덜한 것으로 나타났다. 하지만 Case 5와 Case 6의 경우와 같이 해안과 가까이 설치되어 있어 저류효과는 탁월하다고 하나 염수가 대수층 내로 침입하여 지하수 오염에 큰 문제를 내포하고 있는 것은 사실이다. 따라서 지하댐의 위치 및 형태를 결정할 때에는 염수침입에 대한 충분한 조사가 필요하며 보다 많은 적용성 검토가 이루어져야 한다고 사료된다.

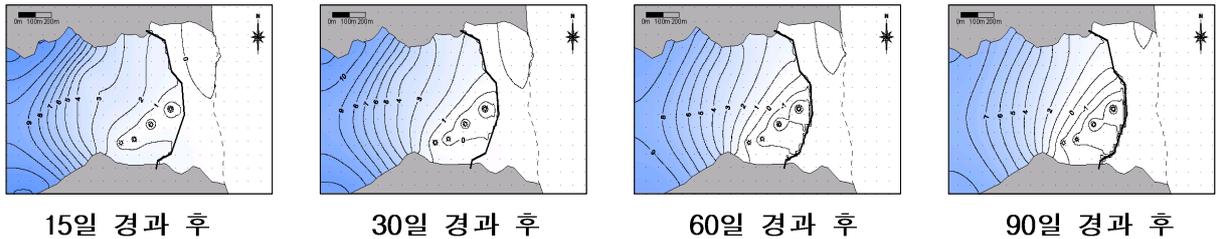


그림 4.1 Case 3 지하수위 분포도

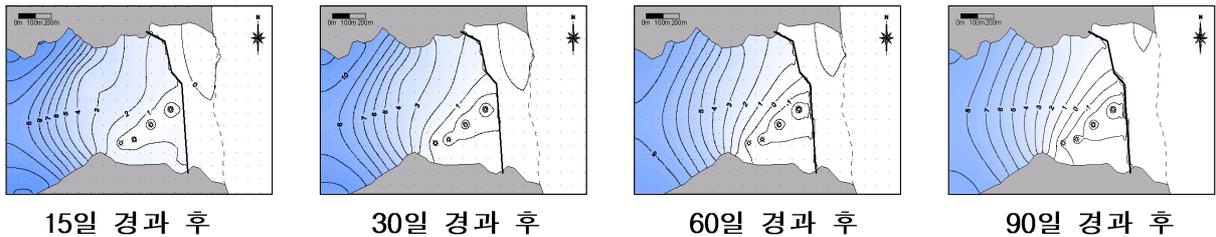


그림 4.2 Case 4 지하수위 분포도

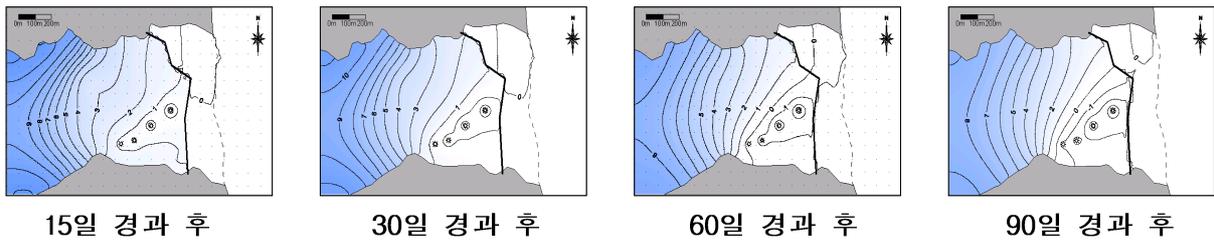


그림 4.3 Case 5 지하수위 분포도

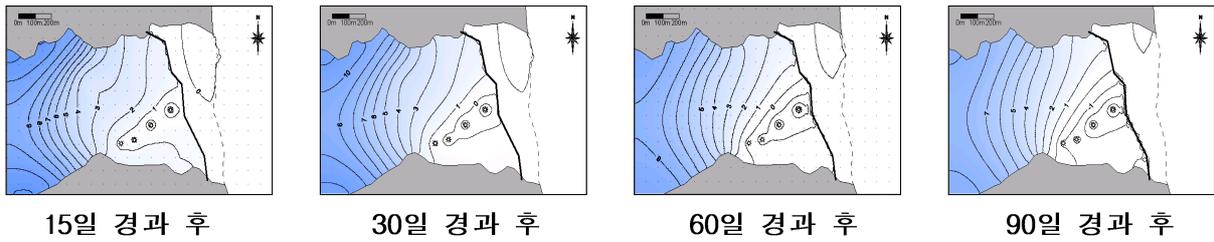


그림 4.4 Case 6 지하수위 분포도

5. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 USGS의 MODFLOW 모형을 이용한 수치모형실험을 통해 지하댐 건설 전·후 지하수 유동 특성에 관해 살펴보았다. 또한 순수 지하댐에 의한 수자원의 평가를 위하여 지하댐의 위치 및 방향을 조절하여 지하수위 최적 관리방안을 모색해 보았다. 실험을 통해 도출된 결론을 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 수치모형실험에서 지하댐 건설 전·후 지하수 유동 해석을 수행한 결과 해안으로 자연히 유출되는 상당량의 지하수를 차단시켜주는 역할을 할 뿐만 아니라 해수의 담수대 내로의 침입속도를 지연시켜주는 역할을 한다는 것을 알 수 있었다.

둘째, 보다 체계적이고 합리적인 지하수자원 관리를 위하여 최적의 지하댐 위치 및 형태를 산정하였다.

향후 강우-유출관계와 유량-지하수위 관계 등의 기초수문자료가 축적된다면 지상댐에서 사용되는 것과 같이 지하댐도 효율적인 모니터링과 운영이 가능한 댐운영 기법의 개발이 필요할 것이다. 앞으로 지하댐 건설 지역에서의 수자원 보존과 지속 가능한 개발을 위하여 양수량에 대한 지속적인 평가와 규제가 필수적이고 신뢰성이 높은 모델의 구축이 필요하다. 이를 위해서는 장기간의 지하수 수위 변동자료, 정밀 지질도와 대수층의 분포에 대한 data base 구축 등이 요구되며, 대수층에 대한 수리매개변수 등과 같은 기본 자료의 정확한 평가가 요구된다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(1996), 지하수관리 기본계획
2. 건설교통부(1996), 수자원 장기 종합계획(1997~2011)
3. 속초시(1998), 속초시 도문동 쌍천 취수원 개발사업 최종 보고서
4. Andersen, P. F., 1993, A Manual of instructional problems for the U.S.G.S. MODFLOW model: Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U. S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-93/010, 279 p.
5. Argus Interware, Inc., 1997, User's Guide Argus ONE., Argus Open Numerical Environments A GIS Modeling System, Version 4.0, Jerico, NY, Argus Holdings, Limited, 506 p.
6. Harbaugh, A.W., and McDonald, M.G., 1996, User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model: U.S.Geological Survey Open-File Report 96-485, 56 p.