

조정지역의 지하수 유동해석

Prediction of Groundwater Level in Chojung Area

안상도(Sang-Do An)* · 김정호(Kyoung-Ho Kim)* · 정영훈(Young-Hoon Chung)*

요 약: 조정지역은 세계 3대 광천수 생산지의 하나로서 지하수 이용업체들이 집중적으로 지하수 개발을 하고 있어 지하수자원의 고갈이 우려되고 있다. 본 연구에서는 조정지역의 지속적인 개발로 인해 장래 예측되는 지하수 장애에 대처하기 위해 수치모형을 이용하여 조정지역의 지하수 유동해석을 수행하였다. 해석 결과 동북쪽에 위치한 산간유역의 수위의 변화에 비하여, 하류 구릉지역에서는 양수정들을 중심으로 수위 강하가 급격하게 일어나고 있다. 이는 하류 구릉지역에 공장들이 밀집하여 있고 생활용수와 농업용수 또한 많은 양을 양수를 하는데 기인한다. 따라서 향후 지하수자원의 고갈이 우려되며, 이에 대한 대책이 심각하게 요구된다.

Abstract: The area of Chojung is famous for its mineral water quality. Because of this reason, massive groundwater development was induced in the area. As a result of excessive pumping, the depletion of the groundwater resources is expected seriously. This study was conducted to analyse groundwater flow in Chojung using a numerical model. Simulation results show the groundwater level change slowly in the mountain area but steep groundwater drawdown occurred in the pumping area in the downstream. This steep groundwater drawdown is due to excessive pumping in the hilly region. Because of this excessive, desiccation of water resources were predicted and proper countermeasure is in great demand.

서 론

우리 나라 지하수 개발은 1970년대부터 본격적으로 추진되어 왔으나, 지하수개발과 이용에 따른 법적 제도적 장치가 완비되지 못한 상태에서 개발이 무분별하고도 무계획적으로 이루어져 왔다. 이러한 무분별한 지하수 개발은 수량고갈, 과잉양수에 의한 지반침하, 해수침입등 각종 지하수 환경재해를 유발하고 있어 지하수의 체계적이고, 합리적인 관리와 개발에 대한 영향평가가 필수적이다. 본 연구에서는 합리적이고 효과적인 지하수개발과 그 이용을 위해 조정지역의 지하수 수위변화를 예측하였다. 지하수 유동에 대한 수치모형을 이용하여 지하수 유동 및 양수에 의한 지하수 수위의 변화를 예측해 보았다.

지하수 수치모델에 관한 연구로서 Pinder와 Bredehoeft(1970)는 유한차분 모델을 이용하여 빙하퇴적물로 이루어진 대수층을 해석하였고, 이후에 이 문제에 대해서, Pinder와 Frind(1972)는 Galerkin 유한요소 모델을 사용하여 대수층을 해석 하였다. McDonald와 Harbaugh(1988, 1991)는 3차원 지하수 유동 해석을 위하여 유한차분법을 이용한 수치모형인 MODFLOW를 개발하였다.

Lasserre(1999)등은 GIS와 연계된 모형과 MT3D-MODFLOW를 사용하여 오염물질 거동을 해석하였다. 농업진흥공사(1987)는 축적층 지하수 유동해석을 위하여 수치모형을 개발하였고, 정(1994)등은 MODFLOW모형을 이용하여 부곡온천을 해석하였

으며, 송(1995)등은 SUTRA모형을 이용하여 해안대수층에서의 염수침입에 대하여 연구하였다. 박과 이(1997)는 담수와 해수의 동수역학을 동시에 고려하는 비확산 전산모형을 이용하여 지하수 개발에 대한 중-동제주 수역의 해수 쪼개의 반응을 해석하였다.

본 연구대상인 조정리 일대를 중심으로 충북에는 다수의 지하수개발 업체들에 의해 경쟁적으로 개발이 이루어지고 있고 그 양도 국내 먹는물 생산량의 많은 양을 점하고 있다. 따라서 천혜의 청정 지하수를 보존하기 위해서는 체계적인 관리가 필요하다. 이에 본 연구에서는 과도한 지하수 개발로 인한 지하수위 하강이나 지반침하등 지하수 장애에 대비하기 위해 지하수 수위 변화를 추정하여 보았다. 우선 조정지역의 함양량을 산정하고 양수현황을 고려한 수치모형을 구축하여 여러 가지 경우에 대한 장래의 지하수위 변동을 예측하였다. 이러한 연구결과는 조정지역의 합리적인 지하수개발과 포괄적인 지하수 자원의 보존방법을 제시하는데 일조 하리라 생각된다.

연구대상 지역

본 대상지역인 조정지구는 청주에서 약 8 km 떨어진 지점에 위치하며 행정구역상 충청북도 청원군 북일면 일대에 위치한다. 본 지역은 전반적으로 완만한 구릉지와 준농림지역으로 형성되어 산계는 소백산맥 중앙의 북사면의 북부에 위치하고, 수계로는 금강상류의 지류인 미호천 수원지의 일부를 이루고 있으며 지형은 장년기에서 노년기에 접어드는 지형으로 좌구산과 구녀산 와우산과 연립하여 대략 북동-남서 방향의 산형

*충북대학교 토목공학과 (Dept. of Civil Engineering, Chungbuk National Univ., Cheongju 361-763, Korea)

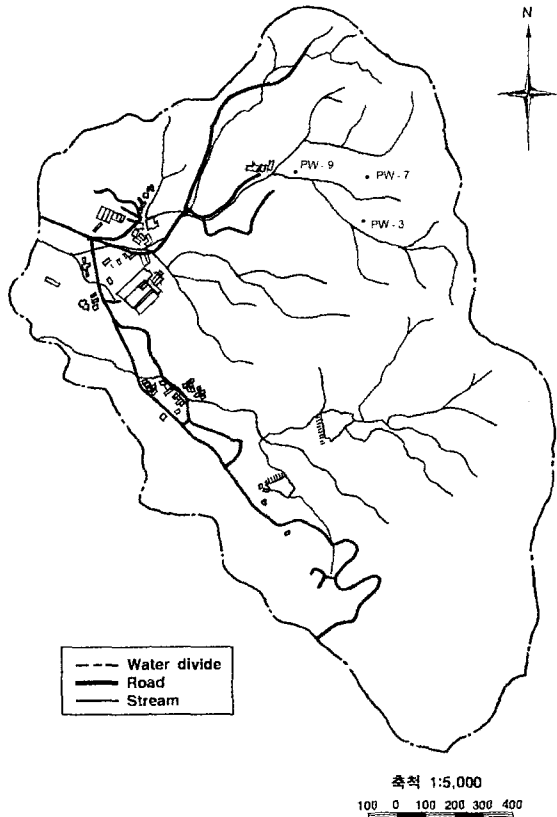


Figure 1. Basin map of Chojung.

을 이루며, 사면은 급경사를 이루고 있다. 이 지역의 지질은 주로 변성퇴적암, 화강암류, 맥암류 지층을 이루고 있는데 가장 넓은 분포를 보이고 있는 것은 반상화강암이며, 현 초정지구는 주로 석영반암으로 이루어져 있다(충북개발연구원, 1997). 토양은 대부분 사질토 및 사양토로 구성되어 있다. 또 대상지 주변에는 인평저수지 및 비룡저수지 배후의 우수한 수림대와 일부 계단식 농경지, 완만한 경사의 임야지, 높은 산악지로 구성되어 있다(충북개발연구원, 1997). 초정리 지역의 유역도는 Figure 1과 같다.

지하수 개발현황

앞에서 언급한바와 같이 초정지역은 용수량이 다른 곳에 비해 무척 많은 지역이다. 1998년도 초정지역의 암반관정의 이용 현황(농어촌진흥공사, 청원군, 1998)는 다음과 같다.

이들 용수가 이루어지는 소규모 관정을 모델링에 모두 고려

Table 1. Total groundwater withdrawal rates (m³/d) in Chojung watershed.

사용 용도	채수량 m ³ /day
상업용수	1808
생활용수	315
농업용수	238
소 계	2361

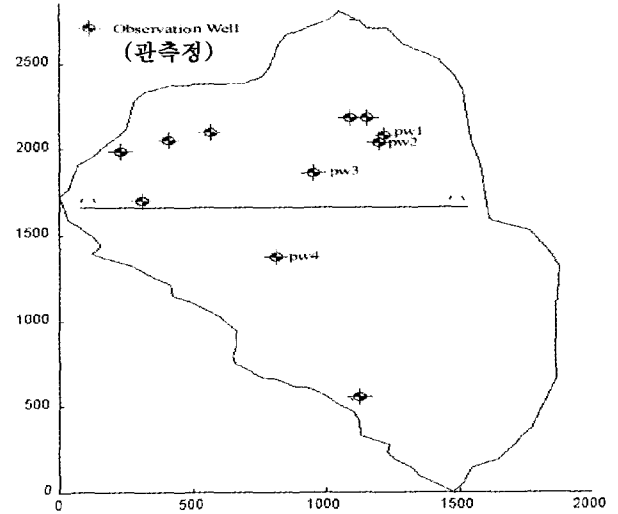


Figure 2. Observation wells marked on the basin map of Chojung.

하기는 매우 어려우므로, 이를 지역상에서 통합하여, 상업용수 지대는 그대로 고려하였으며, 생활용수와 농업용수는 밀집된 지역을 중심으로 모델링에 구현하였다.

수치모델의 구성

본 연구에서는 수치모델링을 위해 미국 지질 조사국(U.S Geological Survey)에서 개발한 MODFLOW 모형을 사용하였다. 수치모형 시뮬레이션을 수행하려면 먼저 대상 유역을 이산화하고 유역경계에 적절한 조건을 지정해야 하며 유역 내부의 각 특정 영역들에는 투수계수, 공극률, 지하수 함양량, 대수층 바닥의 표고 및 두께 등의 입력변수들에 대한 값들이 지정되어야 한다. 초정지역은 지하수 개발이 활발하게 이루어져 왔으나, 장기간의 수위관측 자료등 중요자료의 축적은 거의 전무한 실정이므로, 기존의 연구자료와 환경영향평가 자료를 이용하였다.

유역의 이산화

본 연구에서는 대상영역의 수리지질학적인 특성을 고려하여 유역을 구분하고, 그 유역을 포함하는 격자망을 작성하였다. 격자망의 크기는 46.67 m×31.66 m, 46.64 m×15.83 m, 23.33×31.66 m, 23.33 m×15.83 m의 4종류로서 연구 대상영역인 2.9 km²의 유역에 설정하였으며, 양수정이 주로 위치한 구릉 지대는 세격자를 선택하였다.

본 연구지역의 지질조사에 의하면(지암엔지니어링, 1996), 특별한 이상지대가 발견되지 않았으며 대부분 화강암층으로 구성된 대수층이므로 1개의 층으로 해석하여 모델을 간단히 구성하는 데에는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

즉, 초정지역의 다층의 대수층에 대하여 각 층의 분포와 위치, 각 층의 수리매개변수의 결정, 대수층 사이의 결피로서 나타나는 누수율의 측정자료 등이 없는 상태에서 가정으로서 다층구조로 해석을 한다면 정확한 해석이 못되며, 또한 대부분의 양수가 피압 대수층에서 일어난다는 점을 고려하여 본 연구 모

델팅에서는 1개 층의 다공질 매체로 구성하여 모델링을 수행하였다.

경계조건

본 연구지역에서의 현장 계측자료를 토대로, 계측된 시점의 지하수 수두분포를 초기 지하수 수두 분포로 설정을 하였다. 대상영역의 표고분석도(충북개발연구원, 1997)를 분석한 결과 서쪽과 북동쪽 평야지대를 제외한 동남, 북쪽 산악지대를 기준으로 높은 지형이 계속적으로 유지되고 있으며(충북개발연구원, 1997), 또한 모사영역의 동남, 북쪽의 산악경계는 거의 EL+200 m를 이루고 있으므로 이 경계를 기준으로 유입경계를 설정하였다(Cauchy형 경계조건). 유입경계의 지하수위를 영역 내의 양수에 영향을 받지 않는다는 전제하에 공급원의 수두로서 사용하였다. MODFLOW 모형에서 유입경계를 적용하기 위해서 외부공급원에서 영역내로의 유입·유출을 모사할 수 있는 일반 수두경계를 사용하였다.

실제 해석대상 지역을 제외한 곳은 비유동 경계(No flow boundary)를 설정하였으며, 실제 수두 값이 계산되는 영역은 모두 3158개로 이산화 되었으며, 현장 양수정 주변에는 증평 저수지를 원천으로 하는 간헐하천들과 큰피골 소류지와 교재 소류지에서 유입되는 간헐하천들이 해석영역에 포함된다. 하천과 강은 주변 지하수계와 이들 지표수계의 수두차(수리경사)에 따라서 지하수가 배출되거나 또는 하천에서 지하수계로 지표수가 유입된다. 이에 대하여 강과 대수층 사이의 상호작용을 모사할수 있도록 하였다.

모델의 공급경계가 유역의 남쪽을 중심으로 북쪽 및 동쪽에 부분적으로 분포하고 있고, 유역의 유출지역은 특별한 이상 지질대가 형성된 지역이 아니라면, 지하수 유동방향에 대한 결론은 지형을 관찰함으로써 얻을 수 있다(U.S. Geological Survey, 1998). 지형도를 관찰하면 유출은 해석영역 중심부에서 서쪽 및 북서쪽 평야지역으로 간헐천을 따라서 이루어지며, 이들 경계를 통한 지하수 및 하천유출을 고려하여 모사하였다. 유출면적의 과다 부여를 방지하기 위하여 지형을 고려하여 최소 고도와 하천 부근의 최소면적의 인근지역에만 유출기능을 부여하였다.

초정지역에 대한 수리매개 변수

투수계수분포

투수계수분포는 기존의 조사된 자료에 의하면 그 분포는 $1 \times 10^{-6} \sim 1.3 \times 10^{-5}$ (m/s), 저투수계수는 $4.71 \times 10^{-4} \sim 1.34 \times 10^{-5}$ 의 범위의 값을 가지며(지암Eng(주), 1996), 중산간 이상 지역의 수리지질자료에 대해서는 조사된 것이 전무하여 필요한 수리매개변수들의 값을 추정하였다.

초정지역의 함양을 산정

함양율은 지하수 수치 모델링에서 매우 중요한 입력자료이며, 본 연구에서는 미국 토양보존국(U.S. Soil Conservation Service, SCS)이 개발하여 미계측 유역에서 직접유출량 산정에

널리 사용하고 있는 SCS-CN 방법을 적용하여 지하수 함양율을 산정하였다. SCS방법은 직접유출량의 크기에 직접적으로 영향을 미치는 인자로서 유역을 형성하고 있는 토양의 종류, 토지이용상태, 식생피복의 처리상태 및 토양의 수문학적 조건 등을 고려하여 이들 인자들이 직접유출에 미치는 복합적인 영향을 양적으로 표시하는 것으로서, 본 연구에서는 본 연구대상영역과 동일한 영역에 대한 함양율 산정에 SCS-CN방법이 적용된 연구(박재성, 1999)가 선행되었으므로, 이 논문을 참조하였다. 그러나 본 논문에서는 함양율 산정에 참고된 논문(박재성, 1999)에서는 청주기상대의 1986년부터 1995년까지(10년)의 강우자료를 이용했으나 본 논문에서는 연구대상영역에 좀더 근접한 증평 기상대의 1989. 1. 1~1999. 12. 31(11년)기간의 강우량 자료를 사용하여 함양율 산정을 좀더 정확히 계산 하였다. 계산 결과를 CN값을 횡축으로 하고, 침투율을 종축으로 취하여 도시한 것이 Figure 3이고, 이것으로부터 아래의 회귀방정식과 같은 CN값과 침투율의 관계곡선(1)을 얻을 수 있다.

침투율을 종축으로 취하여 도시한 것이 Figure 3이고, 이것으로부터 아래의 회귀방정식과 같은 CN 값과 침투율의 관계곡선 식(1)을 얻을 수 있다.

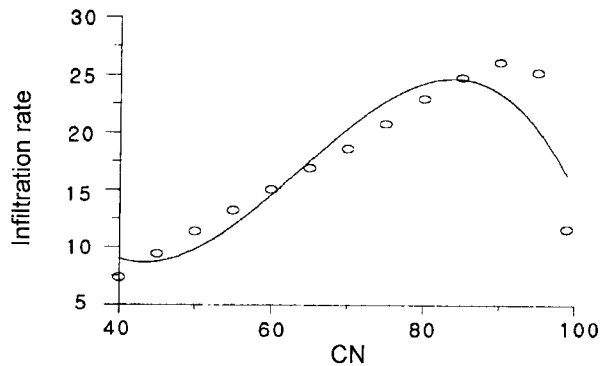


Figure 3. Relationship between infiltration rate and CN.

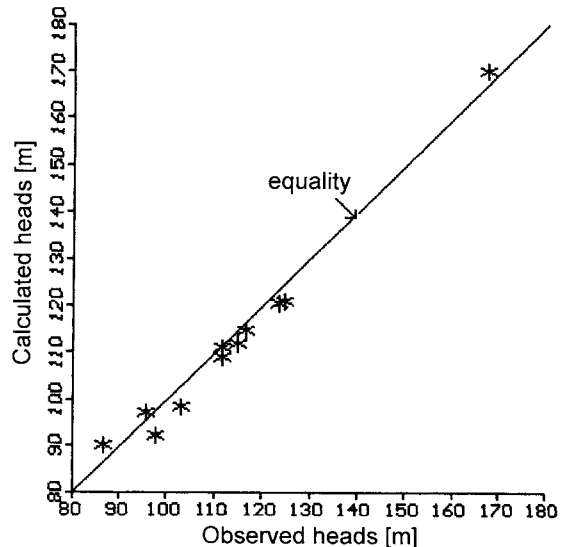


Figure 4. Calibration results (Steady state).

$$y = -0.000482x^3 + 0.091921x^2 - 5.25038x + 102.783 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.8599$$

여기서 x는 CN지수를 나타내고, y는 침투율, R²는 결정계수(coefficient of determination)를 나타낸다. 인용논문에서 얻은 CN 지수와 식(1)에 의하여 본 대상유역의 평균 함양율은 약 13.89%로 산정되었다.

모델링

평형상태에 대한 모델링

모델링에 필요한 모든 입력변수를 고려하여 구성된 수치모델을 이용하여 지하수 흐름에 대하여 평형상태분석(steady state simulation)을 한다. 평형상태분석은 모델 구축과정의 일환이면서 현장에서 직접 얻어진 지점의 실측자료 주변의 추정자료에 대한 1차적인 모델 검증단계로서 현재의 수위 분포와 모델의 계산수위가 일치할 때까지 투수량계수 등 다른 인자 등을 조절하는 과정이다. 이 과정은 대수층의 저류기능은 고려치 않고 대수층으로 들어오는 유입량과 대수층으로부터 유출되는 양이 평형을 이루는 시점에서 지하수위 분포상태를 수학적 모델로 구축하는 과정이다. 본 논문에서는 98년도 초정지역의 양수현황(Table 1)을 고려하여 평형상태분석을 수행하였고, Figure 2에서 표시된 관측정보로부터 관측된 수위를 모델 보정 보정에 이용하였다.

일반적으로 모델보정은 상술한 수리특성인자와 함양율 등을 합리적인 범위 안에서 조정해 가면서 시행하며 그 결과는 Figure 4와 같다. 보정작업을 끝마친 모델에서 과거의 채수전 지하수 수위 분포를 유추하기 위하여 양수를 고려하지 않고 평형상태 분석을 수행하였고, Figure 5와 같은 과거 비채수시 초기 안정 수위를 얻었다. Figure 5에서 보여주는 수두분포로부터 대상영역의 남쪽과 동, 북쪽 일부지역이 지하수 공급경계이고 서쪽과 북서쪽이 지하수 유출경계라는 것을 알 수 있다. 수두분포는 지형경사와 어느 정도 부합하고 있으나 정확히 일치하지는 않았다. 일반적으로 수두경사와 지형경사는 일치하지만, 지형경사가 심한 경우에는 지하수두의 경사가 그에 비해 상대적으로 완만한 증가를 보이기 때문이다.

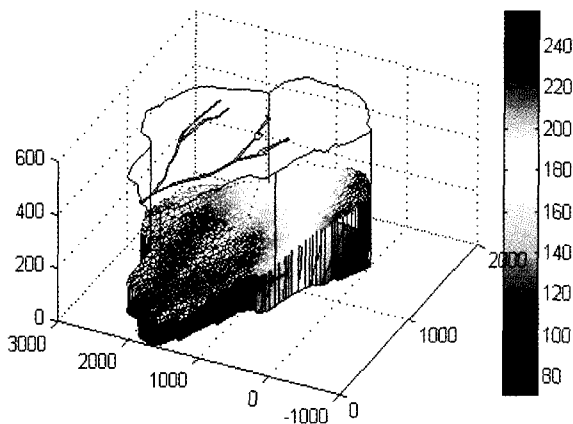


Figure 5. 3D-distribution of steady state head before well pumping.

Table 2. Water balance results for steady state modeling before well pumping (m³/day).

Water Balance	
Inflow	CONSTANT HEAD=0.00
	DRAINS=0.00
	RECHARGE=999.92
	RIVER LEAKAGE=188.6
	HEAD DEP BOUNDS=3076.3
TOTAL IN=4264.8	
Outflow	STORAGE=0.00
	CONSTANT HEAD=0.00
	DRAINS=697.89
	RECHARGE=0.00
	RIVER LEAKAGE=2658.7
HEAD DEP BOUNDS=908.28	
TOTAL OUT=4264.8	

본 연구지역 일대에서의 비채수시 정상상태로 모사한 결과 물수지 분석표는 Table 2와 같으며 유역대상으로 유입되는 총 지하수 유입량과 유역 외부로 유출되는 총 유량은 4264.8 m³/day로서 이를 유역면적으로 나누어 유동량을 속도 단위로 계산해보면 0.0015 m/day로서 일반적인 지하수유동 속도와 비슷한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 전체적으로 유역에 유입, 유출되는 유동량이 표준적인 지하수 시스템과 어느 정도 일치함을 보여준다. Table 2에서 보는 바와 같이 지하수 공급의 대부분은 산악지대로부터의 유입과 강우에 의한 함양을 통해 이루어짐을 알 수 있다. 초정지역의 대수층은 매우 잘 발달되어 지하수 부존량이 많은 것으로 조사되었고, 지형적으로 유입 경계인 산악지대가 경계외부에도 계속 높은 고도를 유지하므로, 지하수 유입의 경계가 되고 있음을 알 수 있다. 연구 대상 영역내의 하천의 경우 일반적인 대규모의 하천이 아니라 수위가 낮은 간헐하천이므로, 대수층으로의 유입되는 누수보다는 대수층으로부터의 유출이 우세함을 알 수 있다.

민감도 분석

본 연구대상 영역의 중산간 지역에서는 정확한 수리매개변수의 자료를 얻기 어렵다. 따라서 모델링 결과가 이 변수들의 불확실성에 얼마나 영향을 받는지 조사되어야한다. 이를 위하여 중산간 지역의 투수계수를 1×10⁻³에서 1×10⁻⁷ 까지 10배의 간격으로 변화를 주었으며, 또한 산간지역으로 부터의 유입을 나타내기 위해 사용된 G.H.B(General Head Boundary) 패키지의 수리전도계수(Hydraulic Conductance)를 기준값으로부터 -80%에서 +80%까지 변화를 주면서 모델링 결과에 미치는 영향을 비교하였다.

여기서 수리전도계수란 MODFLOW모형에서 대수층과 외부와의 유동상태를 식으로 표시할 때, Grid Dimensions과 투수계수를 단일상수로 조합하여 좀더 간단하게 식을 표현하는 데 사용되는 값이다. 다시 말해 지하수계와 강, 수체 또는 배수로 등은 지하수체와 각각의 주어진 수두의 차로써 유동이 결정되며, 수두차와 각각의 영역의 고유 수리전도계수와의 곱으로 유

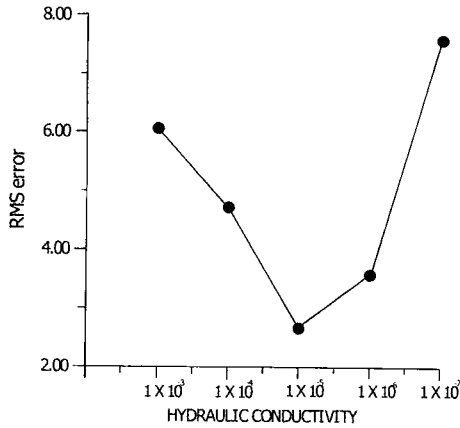


Figure 6. Sensitivity analysis of the effects of varying hydraulic conductivity.

동되는 유량이 결정된다. 현장측정자료가 획득이 가능한 경우에는 이들 측정자료를 사용해서 효율적인 전도계수를 계산할 수 있으며, 그렇지 못한 경우에는 전도계수값을 다소 임의적으로 선택하거나 모델보정과정시 조정을 해야 한다.

정량적 민감도 분석을 위하여 관측치와 모델링 결과치와의 오차를 보여주는 RMS(Root Mean Square) 오차를 사용하였다. 관측치는 Figure 2에서 표기된 관측정보로부터 얻은 관측치를 사용하였다. 중산간 지역의 투수계수의 변화에 따른 민감도를 보여주는 Figure 6을 보면, RMS 오차가 최대 8 m에서 최소 2.5 m로 변하고 있으나 투수계수의 변화폭인 10000에 비하면 큰 변화가 아니다. Figure 7은 산간지역으로 부터의 유입량을 결정하는데 중요한 변수인 G.H.B 패키지의 전도계수에 대하여 분석을 하였고, 투수계수의 변화폭 보다는 변화의 폭이 작은 변수이므로, 변화의 폭을 %로 나타내고 있으며 그에 따른 RMS 오차 역시 크지 않다. 따라서 중산간 지역 수리매개변수의 불확실성은 지하수 개발이 집중되고 있는 구릉지대에 그다지 큰 영향을 미치지 못하고 있음을 알 수 있다. 또한, Figure 8에서는 보정을 마친 수리 매개변수를 BASE PARAMETERS로 설정하고, 기준으로 삼아 그 기준에 비례하여 매개변수를 변화시켜 민감도분석을 하였고, Figure 2에서, 산악지대로부터 근접한 순서의 관측정 4개를 비교의 대상으로 선택하였다. 그 결

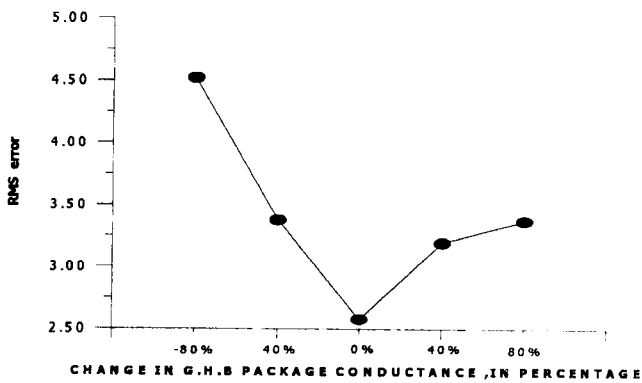


Figure 7. Sensitivity analysis of the effects of varying G.H.B package conductance

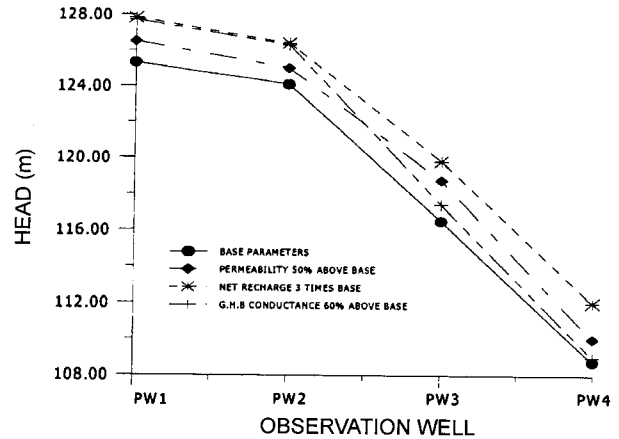


Figure 8. Computed head profiles from well 1 (close to mountain area) to well 4 (far from mountain area) for sensitivity analysis of model parameters.

과 투수계수의 증가, 함양율의 증가가 수두의 증가를 초래 하는 것은 예상한 바와 같게 나타났는데 비해, 산악지대의 유입을 결정하는데 큰 영향을 미치는 G.H.B conductance의 증가는 산악지대 수두의 증가에 영향을 미치고 있으나, 해석 관심대상 지대인 구릉지대로 갈수록 영향이 적음을 볼 수 있다. 따라서 모델이 비교적 안정되었음을 알 수 있다.

예측모델링

지하수 유동체계 확립후 지하수 개발에 따른 지하수 환경의 변화를 예측하기 위해 Table 1에 도시된 초정지역의 1998년 양수 현황을 고려하여 수치해석을 수행하였다.

총 양수량 2361 m³/day을 적용하여 부정류 모델링을 수행하여 1998년의 총 양수에 의해 초정지역의 지하수 시스템이 향후 어떤 반응을 보이는지 양수정에서의 채수시와 과거 비채수시 수위자료를 비교함으로써, 시스템 자체의 특성에 기인한 지하수위 하강량과 채수로 인한 지하수위 하강량을 쉽게 구별할 수 있도록 하였다.

Figure 9와 Figure 10의 그림은 초정지역의 총 채수현황을 고려하여, 1년과 10년후의 모델링 예측 결과이며 그림의 지하수위 등고선도에서 ▶로 표시된 실선은 채수시의 수위분포를 나타내며, ●로 표시된 실선은 비채수시 초기 안정수위 분포를 나타내고 있다. Figure 9과 Figure 10에서 알 수 있는 바와 같이 전체적인 지하수 강하의 폭은 거의 일정하게 나타나고 있다.

양수후 초정지역에서 나타나는 수두 강하를 좀더 시간적으로 보기 위해 Figure 2에서 보듯이 산악지대를 기준으로 구릉지대까지 A-A'의 직선을 긋고, 거리별로 수두를 조사하여 Figure 11과 같이 양수에 따른 거리별 수두의 변화를 도시하였다. 그 결과, 전체적으로 동북쪽에 위치한 산간유역의 수위 변화는 거의 없는데 비하여, 공장들이 밀집한 하류 구릉지역에서는 양수정들을 중심으로 수위하강이 일어나고 있다. 본 연구 대상지역의 특이한 상황은 대부분 지역의 지하수 유출은 지형을 고려하여 설정한 유출경계와 하천에 의한 누수로 일어나는데 비해

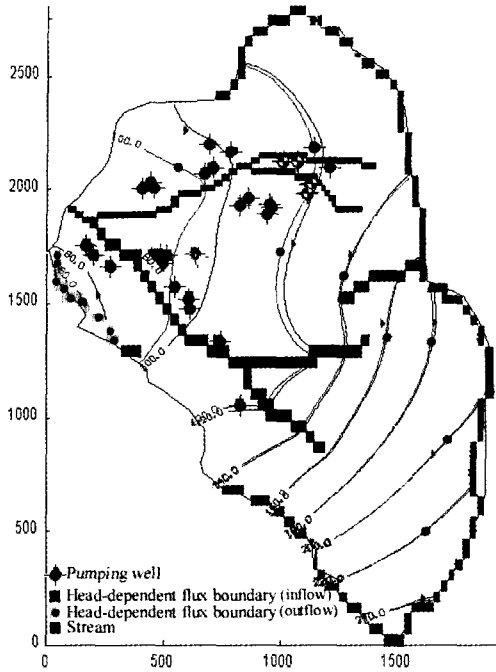


Figure 9. Groundwater-level predicted after 1 year compared with steady state head (● : Steady state head without pumping, ▶ : simulated head).

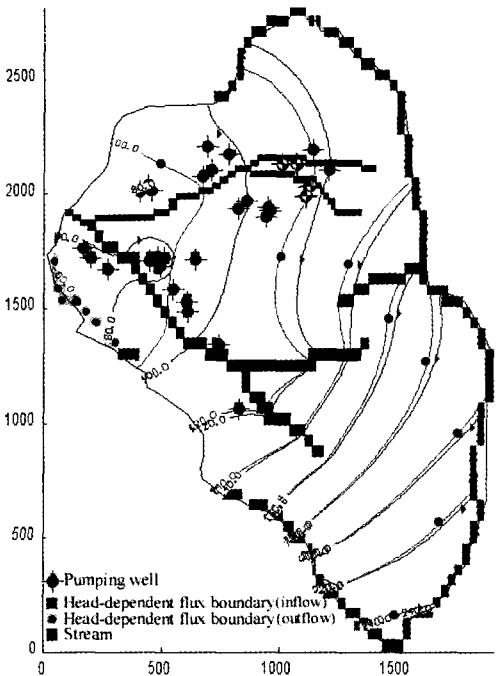


Figure 10. Groundwater-level predicted after 10 year compared with steady state head (● : Steady state head without pumping, ▶ : simulated head).

여, 본 해석 대상지역의 경우 양수정들이 매우 밀집한 관계로 대부분의 유출이 양수를 통하여 일어난다는 것이다. 본 유역내의 하천은 낮은 수위를 유지하며 피압대수층과 수리적으로 연결되었다고 가정되었으며 대부분 피압대수층 수두보다 작은 수두를 유지하며 그 결과 지하대수층으로 간헐하천 쪽으로 누수

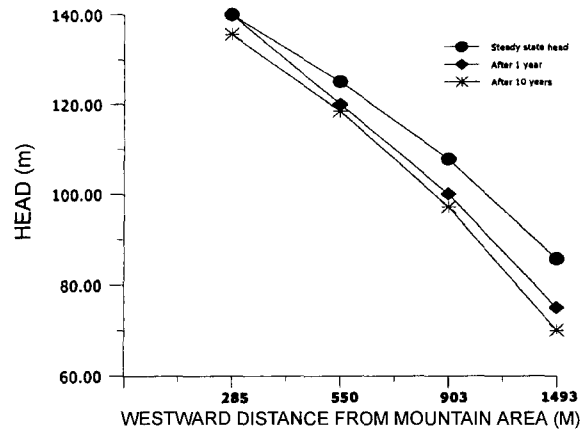


Figure 11. Computed head profiles heading west from mountain area.

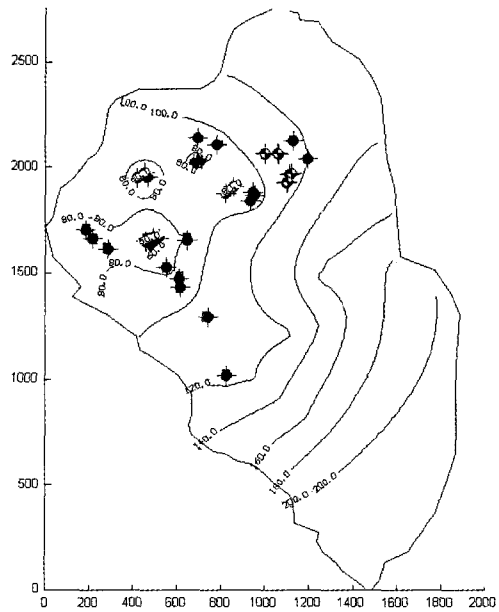


Figure 12. Groundwater-level predicted after 100 days due to a planned groundwater withdrawal in Chojung watershed.

가 일어남을 볼 수 있다. 하지만 전체적으로 하천에 의한 유입, 유출량이 매우 작으며 이중 대부분은 대수층으로부터 간헐하천쪽으로의 유출량이 크다. 따라서 본 유역내의 하천의 특성은 지하대수층의 저장된 물이 간헐하천으로 유출되어 설정된 유출경계에 의해 유동하는 역할을 하는 이득하천인 것으로 판단할 수 있다.

본 연구지역에는 (주)스파클과 (주)일화 등의 먹는물 생산업체와 목욕탕 및 유흥음식점 등과 같은 유흥업소들도 용수는 암반관정을 개발하고 있는 실정으로, 본 지역에서의 개발은 더욱 심화될 것이다. 청원군청에 신고되어 계획되고 있는 취수계획량으로 용수량을 조사해 보면 다음과 같다(지암엔지니어링, 1996).

향후 초정지역에 채수계획량의 양수가 실제로 일어날 경우에 대하여 초정지역의 지하수 시스템의 반응을 해석하기 위하여 채수계획량을 모두 고려하여 모사를 하였다. Figure 12와

Table 3. Planned groundwater withdrawal rates (m³/d) in Chojung watershed.

사용 용도	채수계획량 m ³ /day
상업용수	6030
생활용수	1955
농업용수	1410
소 계	9395

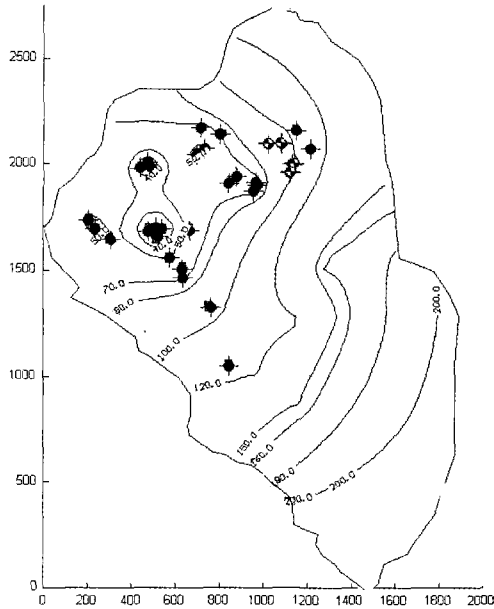


Figure 13. Groundwater-level predicted after 1 year due to a planned groundwater withdrawal in Chojung watershed.

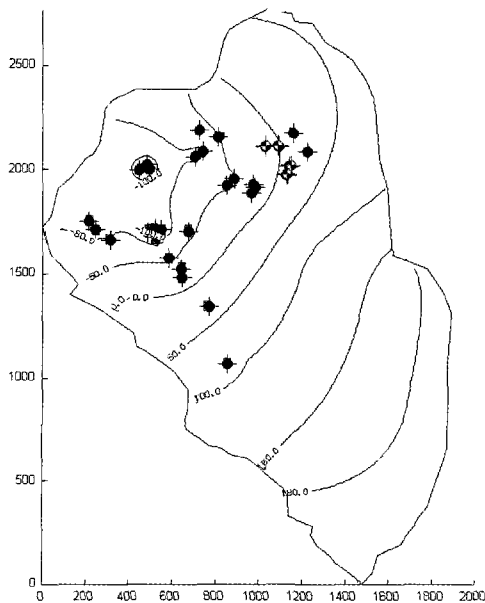


Figure 14. Groundwater-level predicted after 10 years due to a planned groundwater withdrawal in Chojung watershed.

Figure 13, 14는 각각 100일, 1년, 10년에 대한 모사 결과이다.

결론 및 토의

본 연구에서는 MODFLOW모형을 이용하여 조정지역의 과도한 지하수 개발로 인한 지하수 흐름의 변화를 예측하였다.

본 연구에서는 현장지질 조사자료를 참조한 결과 조사영역에 특별한 이상지대가 발견되지 않았으며 대부분 화강암층으로 구성된 대수층이므로 1개 층의 다공질 매체로 구성하였다.

대수층 수리 특성과 침투량은 모형의 매개변수 보정과정에서 결정하였으며 가장 불확실성이 큰 중산간 지역의 매개변수는 민감도 분석을 통하여 해석 결과에 미치는 영향을 검토하였으며 그리 큰 영향을 미치지 못 하는 것으로 판단되었다.

1998년도 조정지역 총 양수량(농어촌진흥공사, 청원군, 1998)을 고려한 모델링 결과 Figure 9와 Figure 10에서 나타나듯이, 동북쪽에 위치한 산간유역의 수위의 변화는 거의 없는데 비하여, 하류경사의 구릉지대에서는 양수정들을 중심으로 국부적으로는 최대 20 m 까지 수위 강하가 일어나고 있다. 이는 하류 경사지역에 공장들이 밀집하여 있고 생활용수와 농업용수 및 기타 많은 양을 양수를 하는데 기인한다. 그러나 국부적인 지하수 강하 20 m는 큰 수위하강이 아니며 또한 산악 지대로부터 지속적인 지하수가 함양되고 있다.

그러나 총 취수계획량인 9395 m³/day의 양수가 일어나는 모델에서는 산악지대의 수두저하는 물론이고 양수정이 많이 밀집한 평야지대에는 매우 급격한 수두강하로 지하수 수자원의 고갈이 우려된다. 따라서 조정지역의 수자원의 보존과 지속 가능한 개발을 위하여 채수량에 대한 지속적인 평가와 규제가 필수적이고 신뢰성이 높은 모델의 구축이 필요하다. 이를 위해서는 장기간의 지하수 수위 변동자료, 정밀 지질도와 대수층의 부포에 대한 data base작성 등이 요구되며, 대수층에 대한 수리매개 변수 등과 같은 기본자료의 정확한 평가가 요구된다.

사 사

이 연구는 한국학술진흥재단에서 지원하는 ‘97년도 대학 부설 연구소 과제’ 연구의 일부로서, 지원해주신 학술진흥재단에 감사드립니다.

참고문헌

- 농어촌진흥공사, 청원군, 1998, “조정·미원지구 환경영향조사 보고서”.
- 박남식,이용두, 1997, “중·동 제주 수역의 지하수 개발로 인한 해수침투”, 대한지하수환경학회 제4권 제1호, pp. 5-13.
- 박재성 등, 1999, “소유역의 지하수함양을 추정기법”, 대한지하수환경학회 제6권 제2호, pp. 76-86.
- 송재우 등, 1995, “SUTRA 수치모형을 이용한 해안대수층의 염수침입에 관한 연구”, 대한토목학회지 논문집 제15권 1호, pp. 173-179
- 정상욱 등, 1994, “MODFLOW 모형을 이용한 부곡은천지역 지하수 유동해석”, 한국수문학회지 제27권 제1호, pp. 79-87.
- 지애편지니어링(주), 1996, “일화 먹는 샘물 환경영향조사 보완 내역서”.
- 충북개발연구원, 1997, “조정지구 관광개발 기본계획”, pp.28-33.

- Lasserre, F. *et al.*, 1999, "A GIS-linked model for the assessment of nitrate contamination in groundwater", *Journal of Hydrology*, 224, pp. 81-90.
- McDonald, M. G., and Harbaugh, A. W., 1991, "MODFLOW: A Modular three-dimensional Finite Difference Flow Model", IGWMC Ground Water Modeling Software, International Ground Water Modeling Center. Colorado, USA. 12p.
- Pinder, G. F., and Bredehoeft, J. D., 1970, "Digital analysis of areal flow in multiquifer groundwater systems: A quasi three dimensional model", *Water Resour. Res.*, Vol. 6 No. 1, pp. 194-210.
- Pinder, G. F., and Frind, E. O., 1972, "Application of Galerkin's procedure to aquifer analysis" *Water Resour. Res.*, Vol. 8, No 1, pp. 108-120.
- U. S. Geological Survey, 1998, "Basic Groundwater Hydrology", Chap. 13.