

소규모유역의 수차모형을 이용한 지하수 유동해석

최 윤 영
도립경도대학 건설환경과
(2003년 4월 22일 접수; 2003년 5월 20일 채택)

Groundwater Flow Analysis using Numerical model in Small Basin

Yun-Young Choi

Dept. of Construction Environment, Kyongdo Provincial College, Yechon 757-807, Korea

(Manuscript received 22 April, 2003; accepted 20 May, 2003)

The applied model for this study area is WINFLOW using finite element method. It is thought that the simulation result by WINFLOW model under the steady flow state reflects well the ground water distribution within the reliability level which shows the error range of 1.1% to 8.0% from the comparison between the computed values and the observed, and analyzed that the constant head distribution is shown along the east-west direction and gentle and stable head gradient along the north-south direction. Ground water of the study area shows stable movement from the south to the stream area, and the particle trace for each location shows relatively linear shape from the upstream to the pumping location while the radius of influence according to the pumping amount shows a significant difference at the down stream area from the pumping location. The simultaneous pumping from P and P1 shows more complicated appearance, not the increase of the radius of influence than pumping from a single well P or P1, and it is analyzed that the particle path takes nearly linear form. It is known that the flow direction of the ground water and the velocity of the flow affect on the magnitude of the radius of influence of the wells from the fact that the more decreasing pattern of the ground water head is observed at the side of the well and the down stream area than the upstream area when the ground water moves from south to north regarding the radius of influence according to the pumping amount.

Satisfactory results in analyses of ground water movement are obtained through the significant reduction of the physical uncertainties in the flow system as well as the relatively convenient model application using WINFLOW model which is proposed in this study.

Key words : Groundwater flow, WINFLOW, Radius of influence

1. 서 론

대수층의 수문지질학적 성질은 일반적으로 아주 복잡하며 경계조건이 대단히 불규칙하고 변화가 심하기 때문에 실제 지하수 현상에 대한 정확한 해석은 어려운 문제들이다. 뿐만 아니라 장래의 예측결과를 얻기 위하여 대수층 자체에 대한 실험을 실시한다는 것은 불가능하다. 따라서 지하수 현상을 그

대로 취급하는 것이 아니라 여러 가지 가정하에 단순화하여 취급하게 되며 이와 같은 단순화과정을 지하수 모형화라 할 수 있다¹⁾. 하지만 대수층의 함양조건과 지질학적 특성인자 상태에 따라 지하수 유동조건이 매우 복잡하게 변화함으로서 완벽하게 모델화 한다는 것은 매우 어려운 실정이다.

지하수유동시스템에 있어서 시스템을 해석하고 유동과정을 모델화 하기 위한 연구과정을 살펴보면, 국외의 연구로서 Hubbert²⁾가 지하수 유동이론을 모델적으로 해석한 것이 시초이며, Toth³⁾의 소규모 배수유역에 대한 지하수 흐름의 이론적 해석, Freeze 와 Witherspoon⁴⁾은 수학적 모델에 의한 3차원적,

Corresponding Author : Yun-Young Choi, Dept. of Construction Environment, Kyongdo Provincial College, Yechon 757-807, Korea
Phone : +82-54-650-0293
E-mail : ychoi@gpc.ac.kr

비균질적, 이방성 유역에 있어서의 정상지하수 흐름에 대해 설명하였다. 이 연구에서 그들은 the Old Wives Lake내부 배수유역의 상부유역에 있어서 수치모델을 적용하였다. 하지만 그들의 모의실험 지점들은 복잡한 지하수면 또는 넓은 지역의 복잡한 지질학적 구성(배열)을 표현하기에는 불충분하였다. 이 후에 Narasimhan과 Witherspoon⁵⁾은 3차원 지하수 흐름체계에 대한 유한차분(Finite Difference) 방정식의 적용을 발전시켰고 Ueshita와 Sato⁶⁾는 과다한 Pumping과 관련된 Nobi 지하수유역의 침강문제 조사에 대한 3차원 모델을 적용시킨 바 있으나 이러한 모델들은 다양한 여러 층들 속에서 많은 제약성을 가지고 있었다. 그리고 Wang & Anderson⁷⁾의 유한차분 및 요소법에 의한 지하수 모델링에 관한 연구가 있었으며 이후에 Gupta et al.⁸⁾는 크고, 다층이며, 시간에 의존하는 수원기간을 가지는 복잡한 지하수시스템에 대한 3차원 유한 요소모델을 개발하였고 최근에 와서 지하수에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 국내에 있어서의 지하수 유동시스템에 관한 연구로는 김영기⁹⁾의 반야월층의 지하수유동에 관한 연구가 있었고, 안종성¹⁰⁾의 동위 원소를 이용한 한강유역내 지하수와 지표수의 연관성에 관한 연구가 있었으며, 고병련¹¹⁾의 제주도 지하수 부존형태와 지하수위 변동에 관한 연구 및 김계남¹²⁾의 암반에서의 지하수 유동특성 분석에 관한 연구가 있었다. 배상근¹³⁾의 대구지역 지하수 유동계의 변동은 지하수 개발에 의하여 변화하는 양수 주변지역의 물환경, 특히, 하천수와 지하수의 교류에 대한 변화, 하천유량에 미치는 영향, 지하수의 흐름 변화와 지하수위 변화 등을 3차원 유한차분법으로 해석하였다. 지하수유동시스템 해석에 있어 모델 매개변수의 초기치는 지형·지질상태에 전적으로 지배된다는¹⁴⁾ 가정하에 본 연구에 적용된 모델은 유한요소법을 이용한 WINFLOW모델이다. 적용모델은 경류 및 부정류상태의 지하수 흐름을 해석할 수 있으며 부정류해석의 피압 및 누수대수층에 대해서는 Hantush와 Jacob¹⁵⁾의 방정식을 이용하고 있다. WINFLOW모델은 분석유역에 대한 DXF(Drawing Interchange Format)파일을 기본도면으로 하여 축척이 주어지면 격자를 자동으로 분할하며 Streamline, particle traces와 지하동수두선을 다양하고 손쉽게 묘사할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 지하수유동시스템 모델의 최적 매개변수를 추정하기 위하여 실제 함양량을 산정하고 초기 매개변수들을 결정하여 관측 지하수두치와 모의발생으로 얻은 계산 지하수두치를 비교 분석하여

모의발생을 통한 최종 수리매개변수를 산정하고 모델의 적용가능성을 검토하였으며, 지하수두 분포 및 유동경로 등 분석유역의 광역적인 지하수 유동시스템을 해석함으로써 향후 분석유역에 대한 지하수 오염해석, 양수정 개발, 영향원해석 등의 지하수 관리 및 이용을 극대화할 수 있는 방향을 제시하는데 그 목적이 있다.

2. 수치해석모델의 기본이론

본 연구에 있어서 수치해석에 의한 실제유역에서의 지하수유동계를 파악하기 위하여 사용된 WINFLOW모델은 유한요소법에 근거한 모델로서 분석유역에 대한 모델구축이 매우 쉬우며 MODFLOW 모델¹⁶⁾과 유사한 분석결과를 나타내는 것으로 입증된 바 있다¹⁷⁾. 현재, 우리나라의 지하수 유동해석에는 MODFLOW를 주 모델로 이용하고 있어 WINFLOW모델의 적용가능성은 충분히 타당한 것으로 판단된다. WINFLOW모델은 2차원모델로서 3차원 모델인 MODFLOW와 달리 다양한 지질조건하의 지하수유동해석에는 다소 문제점을 가지고 있으나 대수층조건이 비교적 단순한 조건하에서는 쉽게 모델구축을 할 수 있는 장점을 가지고 있으며 관정의 지하수두, 저수지, 하천 및 지질구조 등의 지형 및 지질조건과 몇가지의 수리매개변수 등을 이용하여 지하수 유동, 우물의 영향분포 및 오염원 경로추적 등을 해석할 수 있다. WINFLOW모델의 기본이론을 보면 누출이 있는 비등방, 비균질 대수층에서의 2차원 지하수 흐름에 대한 지배방정식¹⁸⁾은 다음 식과 같이 나타날 수 있다.

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} (T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) \\ + Q + \frac{K'}{B'} (h_a - h)$$

여기서, S 는 대수층 저류상수, h 는 평균 수두, T_{xx} 는 x 방향의 투수량 계수, T_{yy} 는 y 방향의 투수량 계수, Q 는 대수층의 연직 흐름율, K' 는 대수층의 상부 또는 하부층의 연직투수율, B' 는 대수층 상부 또는 하부층의 두께, h_a 는 인접 대수층에서의 수두 및 t 는 시간이다. 본 연구에서 사용한 유한요소모델인 WINFLOW모델의 구조는 Fig. 1과 같다.

또한, 본 연구에서 채택한 유한요소법을 이용한 Winflow모델에서의 부정류 문제를 해결하거나 반복 선형 해를 구하기 위하여 필요한 변수들에 대한 개략적인 내용을 나타내면 Table 1과 같다.

소규모유역의 수치모형을 이용한 지하수 유동해석

3. 모델의 적용 및 분석

3.1. 기상학적 특성

본 연구유역이 위치하고 있는 상주시의 지형여건은 서북이 소백산맥의 지맥으로 에워싸고 있고, 동쪽으로 영강이 흐르고 있으며, 서쪽으로는 지산천이 위치하며 대부분이 구릉지로서 비교적 개방된 시가지를 형성하고 있다. 하천은 동쪽에 영강, 남쪽에 이안천, 서쪽에 이안천의 지류인 지산천이 있으

며, 영강과 이안천이 시가지 동남쪽에서 합류하여 낙동강으로 유입되고, 평야의 형성은 영강과 이안천을 따라 시가지방향으로 광활하게 형성되어 있다.

상주시의 기후는 경상북도의 북서부 내륙지방에 위치하여 대륙성이 강하며 위도에 비하여 하계기온이 높고 기온의 연교차가 비교적 큰 지역으로 분지형 산악기후에 속한다. 기상현황을 조사 분석하기 위하여 1992년~2001년 10년간의 연도별에 따른 기온, 강우량 및 상대습도 등의 기상상태를 조사하였다(Table 2)¹⁹⁾. 본 유역의 연평균 기온은 12.2°C이며, 연평균 최고 및 최저기온은 각각 34.2°C와 -14.1°C이다. 연 최대 강수량은 1998년의 2,042.7mm이고, 연최소 강수량은 1994년 857.8mm로 변화의 폭이 심하며 연평균 강수량은 1,285.0mm정도로 나타났다.

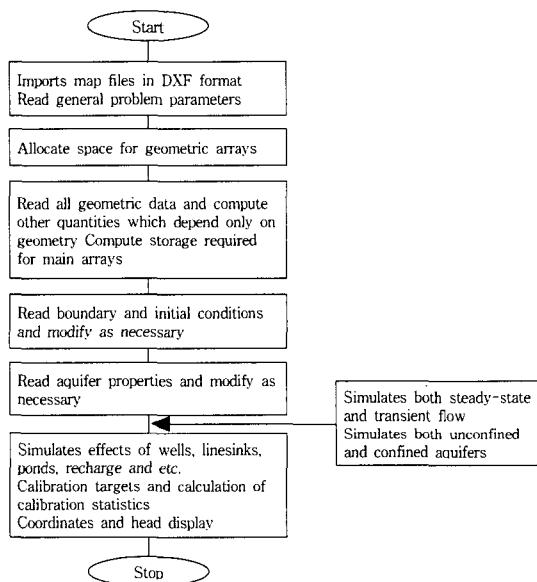


Fig. 1. Flow diagram of WINFLOW model.

3.2. 지형 및 지질특성

본 연구 대상유역은 행정구역상 경북 상주시 양촌동 150번지 일대이며 좌표는 동경 127° 51'~128° 13', 북위 36° 25'~36° 50' 사이에 위치하고 있다 (Fig. 2). 유역내 경사도는 동서방향 1/200~1/300, 남북방향 1/300~1/400정도로 완만한 구릉지이고 인근에 병성천이 유하하고 있다. 지질형태는 초장년기를 나타내고 있으며, 중생대 백악기 불국사층군의 하상층 및 석영반암과 화강반암이 지질경계를 형성하고 있다. 연구유역의 대부분이 제4기 충적층으로 구성되어 있으며, 지층구성은 상부로부터 토

Table 1. Choice of WINFLOW solution strategy parameters

TYPE OF SOLUTION	WINFLOW PARAMETERS						
	LINEAR	STEADY	DT	ALPHA	TOL	MAXIT	NSYS
Steady state	• Linear(ized)	T	T	-	-	Default 5 ⁽¹⁾	-
	• Modified nonlinear	F	T	-	-	Default 5 ⁽¹⁾	999
	• Nonlinear	F	T	-	-	Default 5 ⁽¹⁾	1, 2, ...
Unsteady	• Linear(ized)	T	F	Physically based	0.5~1.0	-	Default 5 ⁽¹⁾
	• Quasi-linearized	F	F	Physically based	0.5~1.0	Very large	Default 5 ⁽¹⁾ or 999
	• Modified nonlinear	F	F	Physically based	0.5~1.0	small	Default 5 ⁽¹⁾
	• Nonlinear	F	F	Physically based	0.5~1.0	small	Default 5 ⁽¹⁾
	• Nonlinear & Change of status	F ⁽²⁾	F	Physically based	1.0 ⁽²⁾	small	Should be larger than 5

※ (1) Iterations can occur during linear(ized) solutions when rising water nodes are activated or 3rd-type leakage fluxes are modified

(2) If a change of status is anticipated, this version of Winflow requires LINEAR.FALSE. and ALPHA=1.0. Critical time steps probably depend on the confined aquifer storativity, $S = S_0B$

Table 2. Meteorological data of study area

Dist. Years	Temp.(°C)			Rainfall (mm)	Relative Humidity(%)		Wind Velocity (m/sec)	
	Min.	Max.	Mean		Mean	Min	Mean	Max.
1992	-12.4	34.2	12.7	1,084.6	69.0	9.0	1.5	9.2
1993	-13.6	31.4	12.0	1,474.7	67.0	14.0	1.8	12.5
1994	-12.8	36.6	12.5	857.8	56.0	14.0	2.0	11.6
1995	-13.0	35.1	11.2	984.6	62.0	12.0	1.9	11.2
1996	-15.3	35.0	11.3	1,040.0	68.9	14.0	1.8	10.2
1997	-15.3	35.0	12.2	1,380.7	65.0	14.0	1.5	9.0
1998	-12.9	32.4	12.7	2,024.7	64.6	13.0	1.4	10.7
1999	-13.8	34.5	12.0	1,651.8	65.0	12.0	1.6	12.2
2000	-13.0	35.2	11.8	1,328.6	64.0	13.0	1.5	()
2001	-17.4	35.2	11.7	826.6	70.0	12.0	1.5	
평균	-14.1	34.2	12.2	1,285.0	65.1	12.9	1.65	10.6



Fig. 2. Numerical map of study area.

사층, 풍화토층, 풍화암층 및 연암층 순서로 형성되어 있다. 분포형태는 연암층인 기반암층 상부로는 기반암의 풍화대층이 기반암의 풍화 및 변질정도에 따라 분포범위가 국부적으로 불규칙하게 나타나고

있고, 또한 풍화대층 상부로는 퇴적층이 풍화대층과는 부정합으로 분포하고 있으며, 이러한 퇴적층을 매립층, 또는 전·답토층이 괴복하고 있다. 본 유역의 지질현황은 Fig. 3에 나타내었다.

소규모유역의 수치모형을 이용한 지하수 유동해석

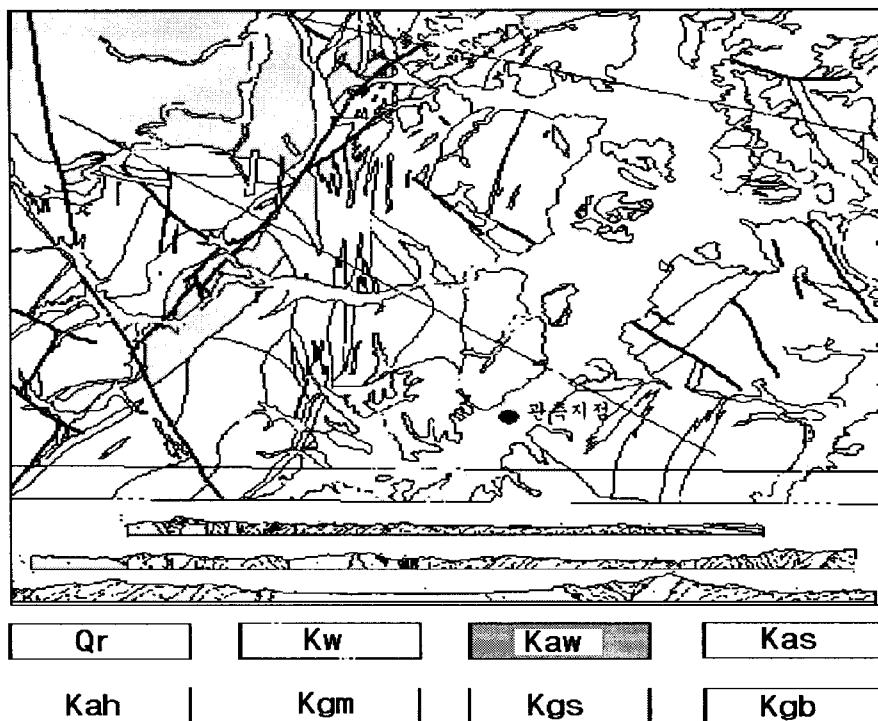


Fig. 3. Geological distribution of study area.

Table 3. Characteristics of each well

(Unit : m)

Well No.	P	P1	P2	P3	P4
Elevation	185.000	186.949	186.341	182.994	183.024
Stable W.L.(EL.)	182.050	183.557	183.458	180.992	180.871
From P Station (Height Difference)	0.000	1.949	1.341	-2.006	-1.976
From P Station (Distance Difference)	X	58.2	150.2	129.3	42.5
	Y	79.3	88.6	130.5	143.7

* P Station : 3HP, Pumping Q=5m³/hr, P1 Station : 1HP, Pumping Q=1.5m³/hr

여기서, Qr은 하성층(역, 사, 점토 등), Kw는 석영반암 및 화강반암, Kaw는 알카리 화강암, Kas는 상소리층(회백색 사암 및 역암), Kah는 회동리층(갈색, 회백색 역암 및 사암), Kgm은 묵하리층(회백색 역암 및 흑색 세일), Kgs는 삼덕리층(흑색 세일 및 사암), Kgb는 의담리층(기저역암)을 나타낸다.

3.3. 양수량에 따른 기간별 관측현황

본 분석에 이용된 관정은 총 5개 지점으로서 지하수두는 거의 EL. 200m이하 지점에 위치하고 있으며, P1지점이 EL. 183.557m으로 가장 높은 수치를 보이고 있고 P4지점이 EL. 180.871m로 가장 낮은 수치를 보이고 있다(Table 3). 펌프를 설치하여

양수를 하는 지점은 P와 P1지점이며 관측정은 P2, P3, P4지점이다. 단일정에 대한 영향원 해석을 위해서는 양수정이 1지점만 필요하나 군정에 의한 양수정의 상호 간섭 현상을 파악하기 위하여 2개 지점에 대한 양수정을 설치하였으며 각 관정의 제원은 다음의 Table 3과 같다.

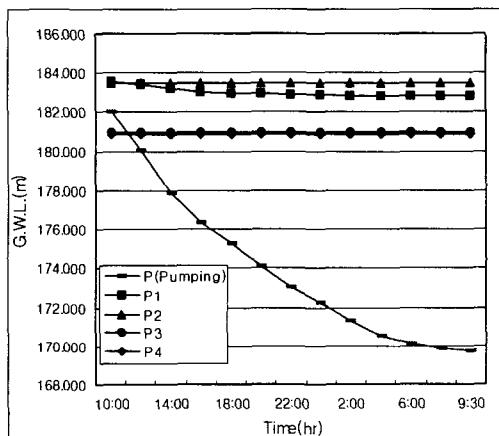
상주시 양촌유역을 선정하고 관측자료 등을 통하여 정확한 수리 매개변수를 추정하기 위하여 지속적인 양수측정을 실시하였다. 1차 양수측정을 위하여 2002년 1월 14일 오전 10:00부터 15일 오전 9:30 까지 지속적인 양수측정을 실시하였으며 양수정은 P지점이고 양수량은 5m³/hr이다(Fig. 4). 이후 단일정에 대해 6차까지 양수량을 달리하여 연속 측정을

실시하였다.

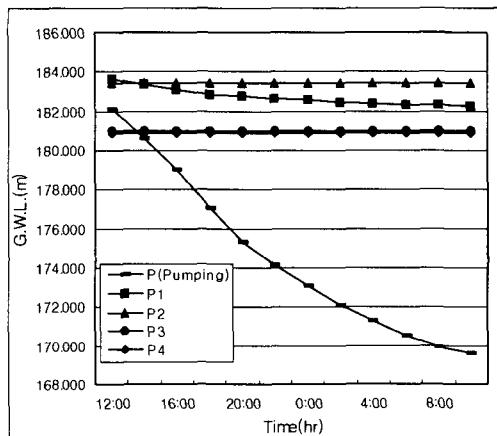
본 관측에서 양수정(P)의 양수량을 $5\text{m}^3/\text{hr}$ 에서 4 m^3/hr 로 $1\text{m}^3/\text{hr}$ 를 작게 하여 관측을 3회에 걸쳐 실시한 결과 같은 양수 지속시간일 경우에 $5\text{m}^3/\text{hr}$ 일 때는 P지점에서 약 12~13m 수두저하가 일어났다. 하지만 $4\text{m}^3/\text{hr}$ 일 경우에는 약 9~10m 정도의 수두저하가 발생되었으며 인근 관측공의 수두저하도 다소 적은 변화폭을 나타내었으나 그 수두저하 변동 특성은 일부 관측공을 제외하고 유사하게 나타났다 (Fig. 5).

그리고 양수정(P)의 양수량을 $4\text{m}^3/\text{hr}$ 로 관측을 실시하고 P지점 및 P1지점에서 $4\text{m}^3/\text{hr}$ 및 $1\text{m}^3/\text{hr}$ 로 동시에 양수할 경우의 수두저하 변화는 상당한 차이를 나타내었다. 양수정(P)의 양수량을 $4\text{m}^3/\text{hr}$ 로 양

수할 경우의 수두저하 변화는 P지점에서 약 12m정도의 수두저하가 일어났으며 P1~P2지점의 경우에는 약 0.3m내의 수두저하가 발생되었다. 하지만 P 및 P1지점에서 $4\text{m}^3/\text{hr}$ 와 $1\text{m}^3/\text{hr}$ 의 동시 양수를 실시할 경우의 수두저하폭은 P지점에서 약 13m, P1지점에서 6m, P2~P4지점에서 약 0.3m내외의 변화폭이 발생되어 두 양수정의 동시 양수가 실시될 경우에는 단일 양수보다 그 영향이 상당히 크게 나타나고 있다. 또한, P지점의 양수량을 $1\text{m}^3/\text{hr}$ 증가한 $5\text{m}^3/\text{hr}$ 로 양수측정을 실시한 결과, 수두저하폭은 P2지점에서 약 0.14m, P3지점에서 약 0.17m, P4지점에서 0.15m의 변화폭이 더 발생되어 두 양수정의 동시 양수에서 P지점의 양수를 $4\text{m}^3/\text{hr}$ 에서 $5\text{m}^3/\text{hr}$ 로 $1\text{m}^3/\text{hr}$ 를 증가시킬 경우에 P3, P4 및 P2지점의 순으로

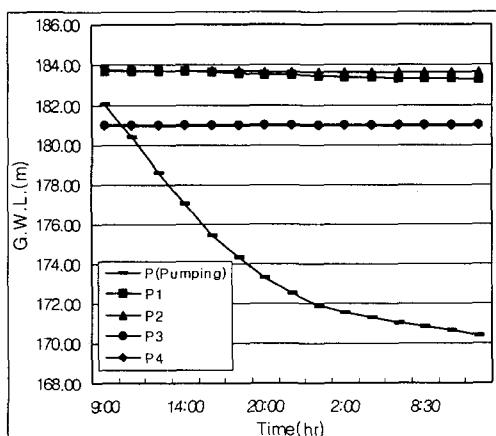


Pumping date : 1. 14.

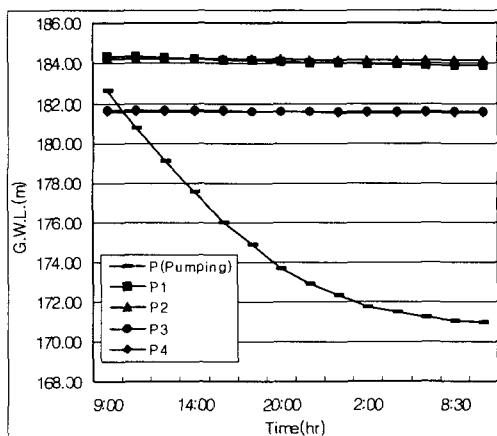


Pumping date : 2. 17.

Fig. 4 Variable distribution of water level drawdown(P Station : Q=5 m^3/hr).



Pumping date : 4. 5.



Pumping date : 5. 18.

Fig. 5. Variable distribution of water level drawdown(P Station : Q=4 m^3/hr).

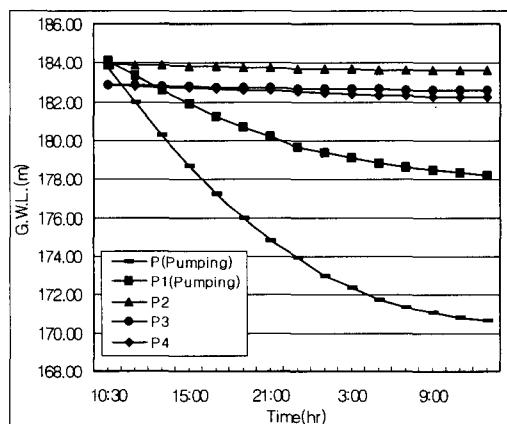
소규모유역의 수치모형을 이용한 지하수 유동해석

수두저하의 변화폭이 다소 크게 나타났다(Fig. 6). 각 조건별 관정의 수위관측을 볼 때 P2관정이 인근 관정의 영향에 비하여 수위변화가 작게 나타나고 있는데 이는 양수정의 양수량이 다소 적은 영향과 더불어 P 및 P1지점보다 상류에 위치하여 있고 타 관측정보다 원거리에 있기 때문에 하류 관측정보보다 수위변동 영향이 적은 것으로 판단된다. 다음의 Table 4는 관측일시와 횟수에 대하여 나타낸 것이다.

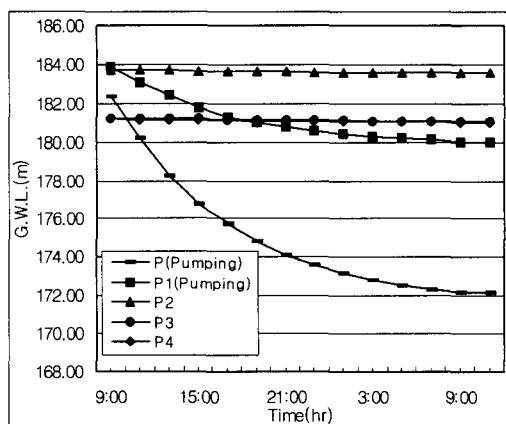
3.4. 매개변수 및 경계조건 설정

연구유역의 수리지질학적인 특성을 파악하여 이를 근거로 모델링을 실시하였다. 유역의 수리지질학적인 특성을 고려하여 유역을 구분하고 그 유역을 포함하는 요소망을 구성하였다. 상주시 양촌유역은

비피압대수층으로서 관측자료를 이용하여 Theis 방법에 의해 결정된 투수량 계수는 P1, P2, P3 및 P4 지점의 경우에 각각 0.004995, 0.05045, 0.005466 및 0.00738(m^2/sec), 저류계수는 각각 0.05949, 0.09619, 0.01685 및 0.01816으로 분석되었다. 모의발생을 위한 지하수 함양량은 갈수기 및 풍수기를 고려하지 않고 모델링의 주목적인 지하수 유동을 파악하기 위하여 일반적으로 지하수 함양에 직접적인 영향을 미치는 강우, 증발산 하천유입 등을 고려하여 상주시의 평균강우량에 대한 평균침투량을 고려한 약 21%(낙동강 하천정비기본계획연구보고서, 1992. 경상북도)를 계산에 적용하였다. 본 분석에서 지하수유동 해석을 위한 유한요소망의 격자망(X,Y) 구성은 종·횡축에 있어 격자요소는 60×60 개이며 격



Pumping date : 5. 26. (P : Q=4 m^3/hr , P1 : Q=1 m^3/hr)



Pumping date : 9. 14. (P : Q=5 m^3/hr , P1 : Q=1 m^3/hr)

Fig. 6. Variable distribution of water level drawdown.

Table 4. Observed data of study area

No.	Dist.	Time		Pumping Quantity	Remark
		Start	End		
1		2002. 1. 14. AM 10:00	1. 15. AM 09:30	P, Q = 5 m^3/hr	
2		2002. 2. 17. AM 12:00	2. 18. AM 11:00	P, Q = 5 m^3/hr	
3		2002. 3. 15. AM 11:30	3. 16. AM 10:00	P, Q = 5 m^3/hr	
4		2002. 4. 5. AM 09:00	4. 6. AM 11:30	P, Q = 4 m^3/hr	
5		2002. 4. 19. AM 10:00	4. 20. AM 11:00	P, Q = 4 m^3/hr	
6		2002. 5. 18. AM 07:30	5. 19. PM 12:00	P, Q = 4 m^3/hr	
7		2002. 5. 26. AM 10:30	5. 27. PM 12:00	P, Q = 4 m^3/hr P1, Q = 1 m^3/hr	The Same Time
8		2002. 7. 16. AM 09:00	7. 17. AM 11:00	P, Q = 4 m^3/hr P1, Q = 1 m^3/hr	The Same Time
9		2002. 9. 14. AM 10:00	9. 15. PM 12:00	P, Q = 5 m^3/hr P1, Q = 1 m^3/hr	The Same Time

자망 간격은 17m×17m이다.

경계설정에 있어서 유역 분수계를 지하수 분리선 (Water Devide Line)으로서 비공급 경계로 지정하였다. 동측과 북측지역은 소하천, 서측 및 남북측지역은 분수계를 경계지역으로 설정하였으며 이에 따른 경계조건으로서 상부경계는 일정수두경계, 측면 및 하부경계는 불투수경계로 하였다.

4. 모델 적용

4.1. 정류상태 해석

본 분석에서는 WINFLOW모델을 이용하여 실제 분석대상 유역인 양촌유역에 대한 정류상태하의 지하등수분포 분석을 실시하였으며 모의발생 결과에 의한 지하수두의 포텐셜 분포도는 다음의 Fig. 7 과 같다. 그리고 청하면유역에 대한 지하수두의 포텐셜 분포를 구하기 위하여 이용한 실측 지하수두와 분석 결과치에 대한 통계 분석은 다음의 Table 5와 같다.

양촌유역에 있어 관측치와 계산치에서 가장 작은 변동폭을 나타낸 관정은 P2지점으로서 0.016m, 가장 큰 변동폭을 나타낸 관정은 P지점으로서 0.151m로 산정되었고 관측치와 계산치의 잔차 평균은 0.028, 잔차합계의 제곱은 0.0312, 절대오차 평균은 0.0631로 나타났다. 분석유역에 대한 정류상태에서의 지하수두 분포를 보면 전체적으로 지하수두는 완만한 경사를 이루며 관측정 하류의 병성천과 소하천으로 유하하고 있는 것으로 분석되었으며 이는 관측치와 거의 유사한 결과를 나타내었다.

또한, Fig. 8에서 보는 바와 같이 양촌유역에 있어 계산치에 의한 지하수두 분포를 이용하여 벡터 추적을 실시하였다. 벡터추적을 한 결과를 보면 양촌유역은 지하수가 북측방향으로 모든 지점에서 고르게 유출되고 있는 것으로 분석되었으며 이와 같은 결과는 지하수두 분포가 지형과 하천의 수로방

향을 잘 반영하는 것으로 나타났다.

한편, 관측 관정이 있는 P~P4지점은 유속벡터의 분포도가 남측경계면에서 북측으로 유출되고 있는 것을 고려해볼 때 각 관정에 있어 지속적인 안정채수량에 대한 영향은 관정의 상류측이 가장 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

4.2. 부정류상태 해석

본 분석에서는 WINFLOW모델을 이용하여 실제 분석대상 유역인 양촌유역에 대한 부정류상태하의 지하등수분포 변동분석을 실시하였으며 P지점 양수량 5m³/hr, P1지점 1m³/hr일 때 각각에 대한 모의 발생 결과는 다음의 Fig. 9~11과 같다. 먼저, 양수량(P지점)에 따른 양수기간 24일 경과 후의 지하수두 포텐셜 분포를 보면 P 및 P1지점에 대한 수두저하 현상을 제외하고는 다른 지점에서의 지하수두는 정류상태일 경우와 유사한 분포를 나타내고 있어 타 관정 주변의 지하수유동계는 거의 변동이 없음을 보이고 있다. 다음으로, 양수량(P1지점)에 따른 양수기간 24일 경과 후의 지하수두 포텐셜 분포를 보면 P1지점에 대한 수두저하 현상을 제외하고는

Table 5. Comparison of observation and analysis values
(Unit : EL. m)

Well No.	Dist.	Observation G.W.L	Analysis G.W.L	Statistical Values
P		182.05	182.20	Residual Mean = -0.0280
P1		183.56	183.59	Residual Standard Dev. = 0.0738
P2		183.46	183.44	Residual Sum of Squares = 0.0312
P3		180.99	180.92	Absolute Residual Mean = 0.0631
P4		180.87	180.92	Res. Std. Dev. / Range = 0.0275

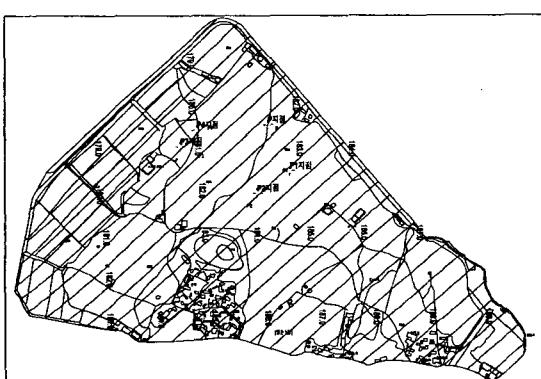


Fig. 7. Potential distribution of groundwater.

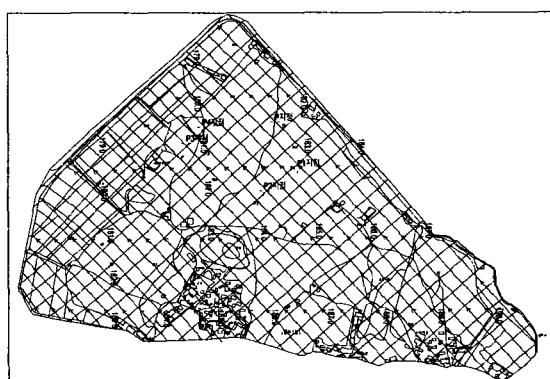


Fig. 8. Distribution of velocity vector(Steady State).

소규모유역의 수치모형을 이용한 지하수 유동해석

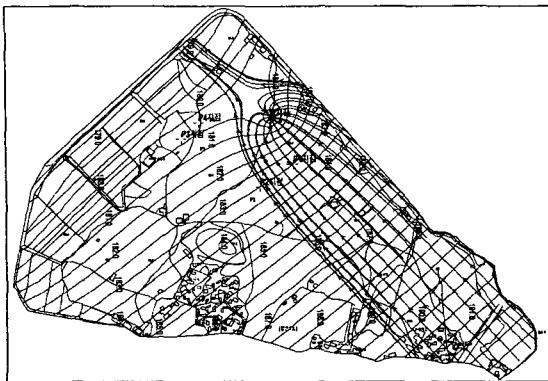


Fig. 9. Groundwater level distribution from unsteady state(Well, P).
(Pumping 5m³/hr, After 24 hour)

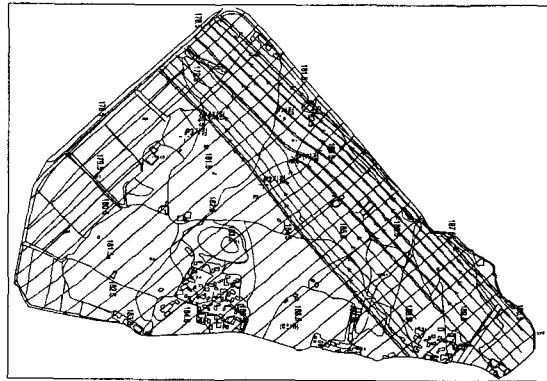


Fig. 10. Groundwater level distribution from unsteady state(Well, P1).
(Pumping 1m³/hr, After 24 hour)

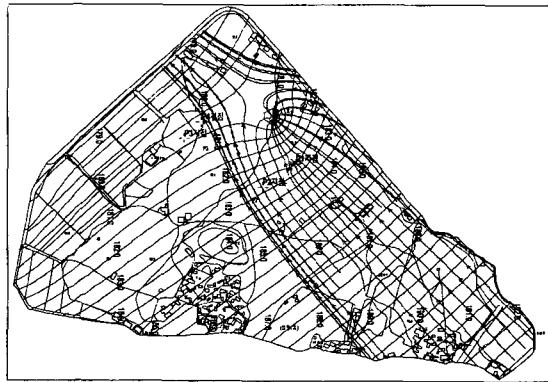


Fig. 11. Groundwater level distribution from unsteady state(Well, P & P1).
(Pumping 5m³/hr & 1m³/hr, After 24 hour)

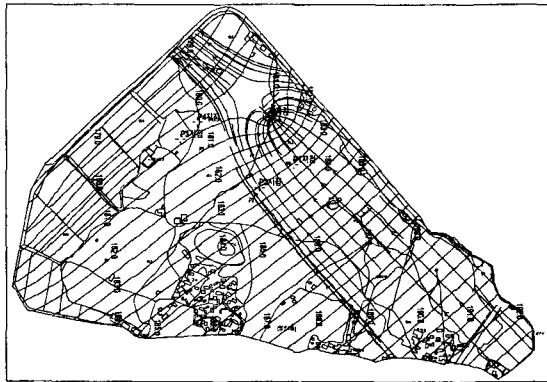


Fig. 12. Particle tracer of well(P : Pumping 5m³/hr, After 24 hour).

다른 지점에서의 지하수유동계는 거의 변동이 없음을 보이고 있다. 마지막으로, 동시 양수량(P지점, P1지점)에 따른 양수기간 24일 경과 후의 지하수두 포텐셜 분포를 보면 P 및 P1지점에 대한 수두저하 현상이 단일공일 경우 보다 차이를 보이고 있으며 다른 관정주변의 지하수유동계도 다소나마 변동폭을 나타내고 있다.

4.3. 입자추적 해석

본 분석에서는 WINFLOW 모델을 이용하여 부정류 상태하에서 분석유역의 각 관정에 대한 오염경로를 추정하기 위하여 입자추적 해석을 실시하였다. P관정의 경우에 지하수는 대체적으로 상류부에서 하류부로 안정되게 유동하고 있다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 양수량이 5m³/hr인 비정상류 모의발생일 경우에 P관정이 위치하고 있는 지역의 상류지역에 있어서 입자추적을 실시하였다. 계산결과에서 보

면 P지점에 있어 입자경로는 하류 병성천유역으로 거의 직선에 가까운 형태를 가지는 것으로 분석되었다. 하지만 상류지역에서 P지점으로 근접할수록 입자의 영향반경은 다소 작아지는 경향을 나타내고 있다. P1관정의 경우에도 지하수는 대체적으로 상류부에서 하류부로 완만하게 유동하고 있다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 양수량이 1m³/hr인 비정상류 모의발생일 경우에 P1관정이 위치하고 있는 지역의 상류지역에 대한 입자추적을 실시하였다. 이에 대한 계산결과를 보면 P1지점에 있어 입자경로도 직선에 가까운 형태를 가지는 것으로 분석되었다. 그러나 상류지역으로부터의 입자 영향반경은 양수량이 적은 관계로 P지점보다 적은 크기를 나타내고 있다.

Fig. 14에서 보는 바와 같이 P 및 P1관정의 동시 양수인 경우에 대한 분석결과를 보면, P 및 P1지점에서 각각 단일정일 경우보다 영향반경의 크기가

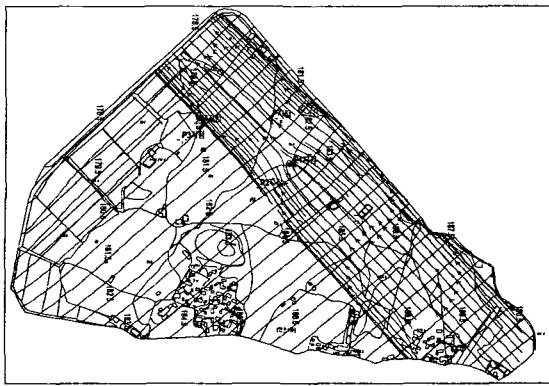


Fig. 13. Particle tracer of well(P1 : Pumping 1m³/hr, After 24 hour).

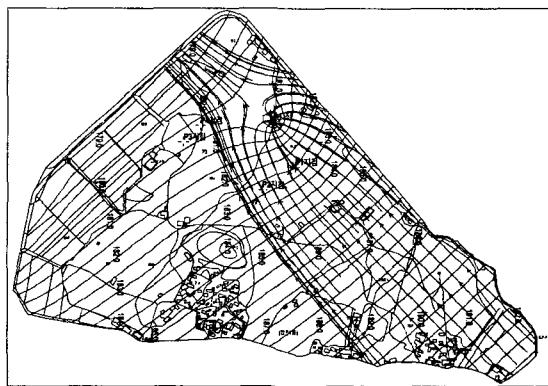


Fig. 14. Particle tracer of well(P & P1, After 24 hour).

다소 복잡해진 양상을 나타내고 있으나 입자경로는 직선에 가까운 형태를 가지는 것으로 분석되었다.

4.4. 분석결과의 비교검토

본 분석에서는 상주시 양촌유역의 지하수 유동해석을 위하여 WINFLOW 모델의 이론과 알고리즘에 관측값을 매개변수로 적용 분석한 결과를 토대로 수두분포, 유동경로 및 양수량의 영향권을 검토하였다.

4.4.1. 수두분포 및 유동경로 해석

본 연구에서는 양촌유역의 정류상태하의 지하수두분포 해석을 위해서 WINFLOW 모델을 제안하였으며, 분석결과는 계산된 지하수두와 관측수두를 비교할 수 있도록 정호에 따른 수두분포표를 작성하여 비교하였다. 먼저, Table 6에 나타낸 바와 같이 관측치와 각 방법에 따라 계산된 지하수두와의 오차백분율(E.P)은 0.011~0.080의 범위를 나타내었다. 모의발생한 결과에 있어 관측치와 계산치가 가장 큰 차이를 나타내고 있는 지점은 P지점으로서 오차백분율이 0.08의 값을 나타내었고, 가장 작은 차이를 보이고 있는 지점은 P2로서 0.011의 값을 나타내었다. 따라서, 본 분석에 있어 WINFLOW 모델에 의해 산정된 계산치와 관측치의 오차를 비교해 볼 때 본 분석에 의한 모의발생 결과치는 양촌유역에

대한 정류상태하에서의 지하수두 분포를 신뢰도 수준에 있어 잘 반영하고 있는 것으로 판단되며 남북방향으로는 완만하고 안정된 수두경사를 이루는 것으로 분석되었다. 다음의 Table 7은 부정류상태하에서 P 및 P1의 단일양수와 동시양수일 경우에 대한 인근 관정의 수두분포를 나타낸 것이다.

4.4.2. 입자추적 및 영향원 해석

본 분석에서 모의발생한 결과치를 이용하여 지하수 입자추적 및 영향원 해석을 실시한 결과(Fig. 15~17)를 살펴보면, 지하수는 대체적으로 상류부에서 하류부로 안정되게 유동하고 있다. 먼저, 양수량

Table 6. Relation of observed values and computed values(Steady state)

(Unit : E.L. m)

Dist. Well No.	Observed Head	Computed head	Relative Error (%)	Remark
P	182.05	182.20	0.080	Max
P1	183.56	183.59	0.016	-
P2	183.46	183.44	0.011	Min
P3	180.99	180.92	0.039	-
P4	180.87	180.92	0.028	-

Table 7. Relation of observed values and computed values(Unsteady state)

(Unit : E.L. m)

Pump. Well Well No.	P			P1			P & P1			Remark
	Obser.	Compu.	Resid.	Obser.	Compu.	Resid.	Obser.	Compu.	Resid.	
P2	183.46	183.51	-0.05	183.46	183.36	0.10	183.46	183.30	0.14	-
P3	180.99	180.86	0.13	180.99	180.87	0.12	180.99	180.80	0.19	-
P4	180.87	180.75	0.12	180.87	180.86	0.01	180.87	180.67	0.20	-

소규모유역의 수치모형을 이용한 지하수 유동해석

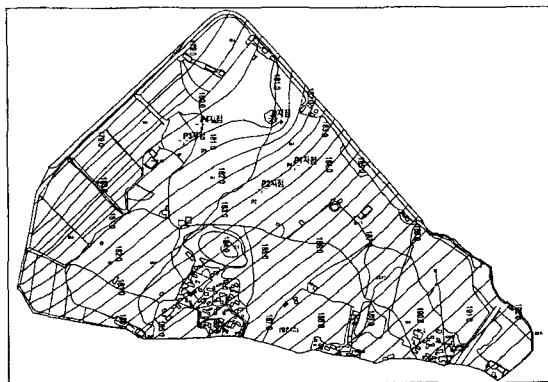


Fig. 15. Groundwater level variation for pumpage (Well : P).

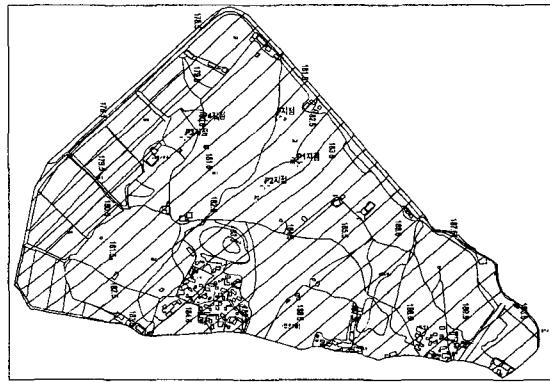


Fig. 16. Groundwater level variation for pumpage (Well : P1).

이 $5\text{m}^3/\text{hr}$ 인 P관정이 위치하고 있는 지역의 분석결

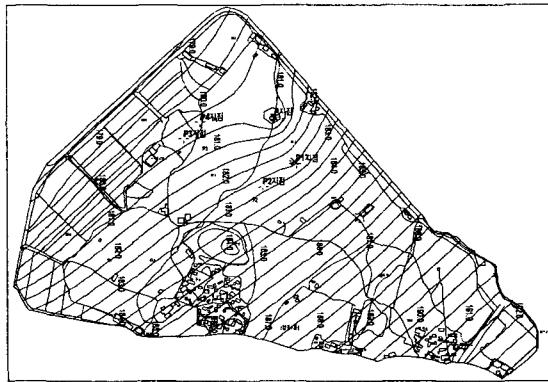


Fig. 17. Groundwater level variation for pumpage (Well : P & P1).

과를 보면 P지점에 있어 입자경로는 하류 병성천유역으로 거의 직선에 가까운 형태를 가지는 것으로 분석되었다. 하지만 상류지역에서 P지점으로 근접 할수록 입자의 영향반경은 다소 작아지는 경향을 나타내고 있다. 양수량이 $1\text{m}^3/\text{hr}$ 인 상류 모의발생일 경우에 P1관정이 위치하고 있는 지역의 입자추적을 결과는 P지점보다 상대적으로 양수량이 적은 관계로 영향반경이 작게 나타내고 있다.

P 및 P1관정의 동시양수인 경우에 대한 분석결과를 보면, P 및 P1지점에서 각각 단일정일 경우보다 영향반경의 크기가 증가한 것보다는 다소 복잡 해진 양상을 나타내고 있으며 입자경로는 직선에 가까운 형태를 가지는 것으로 분석되었다.

그리고 양수량의 변화에 따른 지하수두 영향원 변동을 살펴보면 지하수가 남측에서 북측(병성천)으로 유동할 경우에 상류부보다 관정 측면과 하류부에서 더욱 지하수두가 감소하는 변화경향을 나타내는 것으로 분석되었다.

5. 결 론

본 연구 대상유역에 적용된 모델은 유한요소법을 이용한 WINFLOW이며, 분석유역의 합양량과 초기 매개변수들을 결정하여 모의발생을 통한 수리상수를 산정하고 지하수두 분포 및 유동경로 등 분석유역의 광역적인 지하수 유동시스템을 해석하였으며 이에 따른 결과치를 이용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 정류상태하에서의 WINFLOW 모델에 의한 모의 발생 결과치는 산정된 계산치와 관측치의 오차백분율($0.011\sim 0.080$ 의 범위)를 비교해 볼 때 지하수두 분포를 신뢰도 수준에 있어 잘 반영하고 있는 것으로 판단되며 동서방향으로는 일정 수두분포, 남북방향으로는 완만하고 안정된 수두경사를 이루는 것으로 분석되었다.
- 2) 분석유역에서의 지하수 유동은 남측에서 하천지역으로 안정된 유동형태를 보이고 있으며, 각 지점에 대한 입자추적은 상류에서 양수지점까지 비교적 직선에 가까운 형태를 보이고 있으나 양수지점의 하류부에서는 양수량의 크기에 따라 영향 반경도 많은 차이를 나타내었다.
- 3) P 및 P1관정의 동시양수인 경우에는 P지점 또는 P1지점의 단일정일 경우보다 영향반경의 크기가 증가한 것보다는 다소 복잡해진 양상을 보였으며 입자경로는 직선에 가까운 형태를 가지는 것으로 분석되었다.
- 4) 양수량에 따른 영향원을 살펴보면 지하수가 남측에서 북측(병성천)으로 유동할 경우에 상류부보다 관정 측면과 하류부에서 더욱 크게 지하수두가 감소하는 변화경향을 나타내어 지하수유동방향 및 유속이 관정의 영향원 분포에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서 제시한 WINFLOW 모델을 이용하여

지하수 유동해석을 실시한 결과 비교적 손쉬운 모델 적용과 더불어 유동시스템의 물리적 불확실성을 크게 감소시킴으로서 지하수 유동해석에 있어 양호한 결과를 얻을 수 있었으며 본 모델을 이용함에 있어 매개변수의 정확한 추정을 위해 수문관측자료, 지질구조 및 수위관측자료가 보다 많이 축적된다면 더욱 우수한 계산 결과치를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 3-3-1)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) Strack, O. D. L., 1989, Groundwater Mechanics, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 6, 104-113.
- 2) Hubbert, M. K., 1940, The Theory of Groundwater Motion, J. Geol., 48, 162-165.
- 3) Toth, J., 1963, A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins, J. Geophy. Res., 8, 145-147.
- 4) Freeze, R. A. and P. A. Witherspoon, 1966, Theoretical analysis of regional groundwater flow: Analytical and numerical solutions to the mathematical model, WRR, 2, 763-769.
- 5) Natasimhan, T. N. and P. A. Witherspoon, 1976, An integrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media, WRR, 12, 83-101.
- 6) Ueshita, K. and T. Sato, 1976, study on the Resonable Recover of Groundwater in the Nobi Plain, Proceeding of japan Society of civil Engineers, 287, 89-97.
- 7) Wang, H. F. and M. P. Anderson, 1982, Introduction to Groundwater Modeling-Finite Difference and Finite Element methods, W. H. Freeman and Company, 21, 96-103.
- 8) Gupta, S. K., C. R. Cole and G. F. Pinder, 1984, A finite element three dimensional groundwater model for a multiaquifer system, WRR, 20, 55-67.
- 9) 김영기, 1976, 반야월층의 지하수 유동에 관한 연구, 공산지질학회지, 9(4), 38-48.
- 10) 안종성, 1983, 동위원소를 이용한 한강유역내 지하수와 기표수의 연관성에 관한 연구, 한국수문학회지, 16(4), 66-69.
- 11) 고병련, 1984, 제주도의 지하수 부존형태와 지하수위 변동에 관한 연구, 건국대학교 공학석사학위논문, 38-48pp.
- 12) 김계남, 1990, 암반에서의 지하수 유동특성분석, 한국수자원학회지, 23(2), 31-34.
- 13) 배상근, 1992, 대구지역의 지하수 유동계의 해석, 계명대학교 산업기술연구소 논문보고집, 15 (2), 73-86.
- 14) Morris O. A. and A. I. Johnson, 1967, Summary of hydrologic and phisical propertie of rock and soil materials, as analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey., 8, 121-136.
- 15) Hantush, M. S. and C. E. Jacob, 1955, Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer, Trans. Amer. Geophys., Union, 36, 88-97.
- 16) McDonald, M. G. and A. W. Harbaugh, 1988, A Modular Three-Dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model, USGS Techniques of Water Resource Investigations, 6, 18-23.
- 17) Rumbaugh, J. O., 1996, Two-Dimensional Groundwater Flow Model, Geraghty and Miller, Inc., Reston, Virginia, 20, 212-239.
- 18) Bear, J., 1972, Dynamics of fluids in porous media, American Elservier Publishing Company, Inc., New York, 44, 47-52.
- 19) 한국수자원공사, 1991-2001, 수문자료집, 31-88pp.