소규모유역의 수치해석모형을 이용한 지하수 유동 해석

최 윤 영 | 경북도립경도대학 건설환경과 교수

1. 서 론

대수층내에서 발생하는 유동시스템은 대수층의 조건에 따라 시·공간적으로 변동이 매우 심하고 대수층내의 지하수 유동상태를 나타내는 특성인자들은 그 수가 매우 많으므로 지하수 유동시스템해석에 모두 반영한다는 것은 어려운 문제들이다. 특히, 대수층의 함양조건과 지질학적 특성인자 상태에 따라 유동조건이 매우 복잡하게 변화함으로서 대수층 내의 지하수 유동시스템은 강한 비선형성을 갖게 됨으로서 이들 관계를 해석하는데 있어서 완벽하게 모델화 한다는 것은 매우 어려운 실정이다.

지하수유동시스템에 있어서 시스템을 해석하고 유동과정을 모델화 하기 위한 연구과정을 살펴보면, 국외의 연구로서 Hubbert(1940)가 지하수 유동이론을 모델적으로 해석한 것이 시초이며, Toth(1963)의 소규모 배수유역에 대한 지하수 흐름의 이론적 해석, Freeze와 Witherspoon(1966)은 수학적 모델에 의한 3차원적, 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 Witherspoon(1976)은 3차원 지하수 흐름체계에 대한 유한차분(Finite Difference) 방정식의 적용을 발전시켰고 Ueshita와 Sato(1979)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 & Anderson(1982)의 유한차분 및 요소법에 의한 지하수 모델링에 관한 연구가 있었으며 이후에 Gupta et al.(1984)는 크고, 다층이며, 시간에 의존하는 수원기간을 가지는 복잡한 지하수 시스템에 대한 3차원 유한 요소모델을 개발하였고 최근에 와서 지하수에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 국내에 있어서의 지하수 유동시스템에 관한 연구로는 김영기(1976)의 반야월층의 지하수유동에 관한 연구가 있었고, 안종성(1983)의 동위원소를 이용한 한강유역내 지하수와 지표수의 연관성에 관한 연구가 있었으며, 고병련(1984)의 제주도 지하수 부존형태와 지하수위 변동에 관한 연구 및 김계남(1990)의 암반에서의 지하수 유동특성 분석에 관한 연구가 있었다. 배상근(1991, 1992)의 대구지역 지하수 유동계의 변동은 지하수 개발에 의하여 변화하는 양수 주변지역의 물환경, 특히, 하천수와 지하수의 교류에 대한 변화, 하천유량에 미치는 영향, 지하수의 흐름변화와 지하수위 변화 등을 3차원 유한차분법으로 해석하였으며, 이순탁(1996)의 지하수 수온, 안정동위체, 방사성동위체 및 지하수 수질 등의 환경추적자(Environmental

Tracers) 분석에 의한 제주 화산섬에서의 지하수 유동, 최윤영(1998)의 지하수 유동시스템 해석 등의 연구가 있었다. 지하수유동시스템 해석에 있어 모델 매개변수의 초기치는 지형·지질상태에 전적으로 지배된다는 가정하에 본 연구에 적용된 모델은 유한요소법을 이용한 WINFLOW모델이다. 적용모델은 정류 및 부정류상태의 지하수 흐름을 해석할 수 있으며 부정류해석의 피압 및 누수대수층에 대해서는 Hantrush와 Jacob(1955)의 방정식을 이용하고 있다. WINFLOW모델은 분석유역에 대한 DXF(Drawing Interchange Format)파일을 기본도면으로 하여 축척이 주어지면 격자를 자동으로 분할하며 Streamline, particle traces와 지하등수두선을 다양하고 손쉽게 묘사할 수 있는 장점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 지하수유동시스템 모델(WINFLOW)을 이용한 분석을 실시하기 위해 최적 매개변수들을 통한 실제 함양량을 산정하고 초기 매개변수들을 결정하여 관측 지하수두치와 모의발생으로 얻은 계산 지하수두치를 비교 분석하여 유역에 대한 모델의 적용가능성을 검토하였으며, 모의발생을 통한 최종 수리매개변수를 산정하고 지하수두 분포 및 유동경로 등 분석유역의 광역적인 지하수 유동시스템을 해석하였다.

2. 수치해석모델의 기본이론

본 연구에 있어서 수치해석에 의한 실제유역에서의 지하수유동계를 파악하기 위하여 사용된 WINFLOW 모델은 유한요소법에 근거한 모델로서 분석유역에 대한 모델구축이 매우 쉬우며 MODFLOW(McDonald and Harbaugh, 1988)모델과 유사한 분석결과를 나타내는 것으로 입증된 바 있다(Doug Rumbaugh, 1996). WINFLOW모델은 2차원모델로서 3차원모델인 MODFLOW와 달리 다양한 지질조건하의 지하수 유동해석에는 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 지배방정식(Bear, 1972, 1979)은 다음 식과 같이 나타날 수 있다.

$$S\frac{\partial h}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(Txx\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(Tyy\frac{\partial h}{\partial y}\right)+Q+\frac{K'}{B'}(ha-h)$$

여기서, 는 대수층 저류상수, h는 평균 수두, Txx는 x 방향의 투수량 계수, Tyy 는 y방향의 투수량 계수이다. Q는 대수층의 연직 흐름율이며, K'는 대수층의 상부 또는 하부층의 연직투수율이고 B' 는 대수층 상부 또는 하부층의 두께, ha 는 인접 대수층에서의 수두 및 t는 시간이다. 본 연구에서 사용한 유한요소 모델인 Winflow모델의 전체적인 구조는 그림 1에 나타낸 흐름도와 같다.

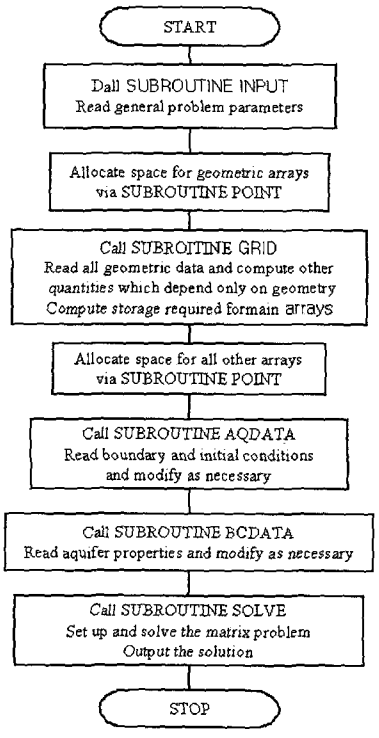

그림 1. WINFLOW모델의 흐름도

3. 모델의 적용 및 분석

3.1 분석 대상유역 및 분석자료

본 연구 대상유역은 2개소로서 먼저, 행정구역상 경북 상주시 양촌동 150번지 일대이며 좌표는 동경 127°51′~128°13′, 북위 36°25′~36°50′ 사이에 위치하고 있다. 지형특성은 완만한 구릉지이고 인근에 병성천이 유하하고 있으며 총 관정수는 5개(P, P1, P2, P3, P4)지점으로 이 중에서 2개 지점(P, P1)이 양수정이다. 각 관측정의 제원은 다음의 표 1과 같다.

본 연구대상유역(그림 2)에 대하여 지형측량을 실시하여 지질조사와 더불어 관측지점에 대한 세부사항을 도시하였다. 펌프를 설치하여 양수를 하는 지점은 P와 P1지점이고 관측정은 P2, P3, P4지점이다. 단일정에 대한 영향원 해석을 위해서는 양수정이 1지점만 필요하나 군정에 의한 양수정의 상호 간섭 현상을 파악하기 위해서는 2개 지점에 대한 양수정이 필요하다.

본 연구 유역의 지형형태는 대부분 제4기 충적층으로 구성되어 있으며, 지층구성은 상부로부터 토사층, 풍화토층, 풍화암층 및 연암층 순서로 형성되어 있다. 지질분포형태는 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 피복하고 있다.

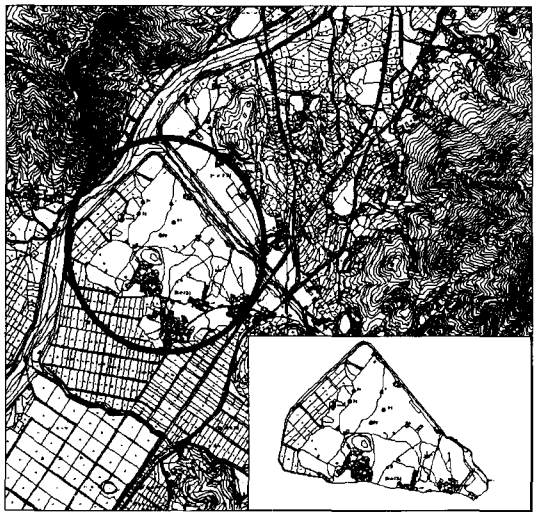

그림 2. 분석유역의 수치지도

3.2 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 Theis 방법에 의해 결정된 투수량 계수는 P1, P2, P3 및 P4지점의 경우에 각각 0.004995, 0.05045, 0.005466 및 0.00738(m2/sec)를 나타내었고, 저류계수는 각각 0.05949, 0.09619, 0.01685 및 0.01816으로 분석되었다.

먼저, 본 분석에 이용된 정호의 제원에 대한 결과는 표 3.2와 같다. 본 분석에 이용된 관정은 총 5개 지점으로서 지하수두는 거의 E.L. 200m이하 지점에 위치하고 있으며, P1지점이 EL. 183.557m으로 가장

표 1. 각 관측정의 제원

(Unit : m)

관측정 No.	P	P1	P2	P3	P4
지반고(EL.)	185.000	186.949	186.341	182.994	183.024
안정수위(EL.)	182.050	183.557	183.458	180.992	180.871
표고차(P지점에서)	0.000	1.949	1.341	-2.006	-1.976
P지점과의 거리	0.000	96.265	170.583	183.094	150.771

* P 지점(EL. 185.0m) : 3마력, 양수량 Q=5m³/hr
P1 지점(EL. 186.949m) : 1마력, 양수량 Q=1.5m³/hr

높은 수치를 보이고 있고 P4지점이 EL. 180.871m로 가장 낮은 수치를 보이고 있다. 다음으로, 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 년평균강우량에 대한 평균침투량율을 고려한 약 21%(낙동강 하천정비기본계획연구보고서, 1992. 경상북도)를 계산에 적용하였다. 본 분석에서 지하수유동 해석을 위한 유한요소망의 격자망(X,Y) 구성은 종·횡축에 있어 격자요소는 60×60개이다.

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.

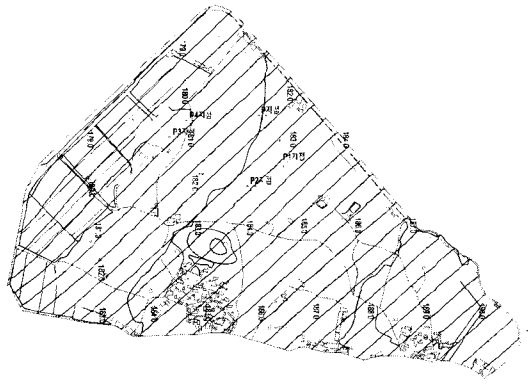

그림 3. 대상유역의 지하수두 포텐셜 분포도

3.3 모델 적용

3.3.1 정류상태 해석

본 분석에서는 WINFLOW모델을 이용하여 실제 분석대상 유역인 양촌유역에 대한 정류상태하의 지하 등수두분포 분석을 실시하였으며 모의발생 결과에 의한 지하수두의 포텐셜 분포도는 다음의 그림 3과 같다. 그리고 청하면유역에 대한 지하수두의 포텐셜 분포를 구하기 위하여 이용한 실측 지하수두와 분석 결과치에 대한 통계 분석은 다음의 표 2와 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, 그림 4에서 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 수로방향을 잘 반영하는 것으로 나타났다.

한편, 관측 관정이 있는 P~P4지점은 유속벡터의 분포도가 남측경계면에서 북측으로 유출되고 있는 것

표 2. 관측치와 계산치의 통계분석 결과

(Unit : EL. m)

구분 / 관정번호	관측수두	분석수두	통계분석치
P	182.05	182.20	Residual Mean = -0.0280 Residual Standard Dev. = 0.0738 Residual Sum of Squares. = 0.0312 Absolute Residual Mean = 0.0631 Res. Std. Dev. / Range = 0.0275
P1	183.56	183.59	
P2	183.46	183.44	
P3	180.99	180.92	
P4	180.87	180.92	

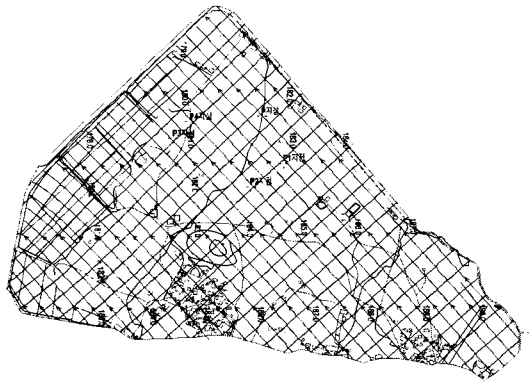

그림 4. 유속벡터 분포

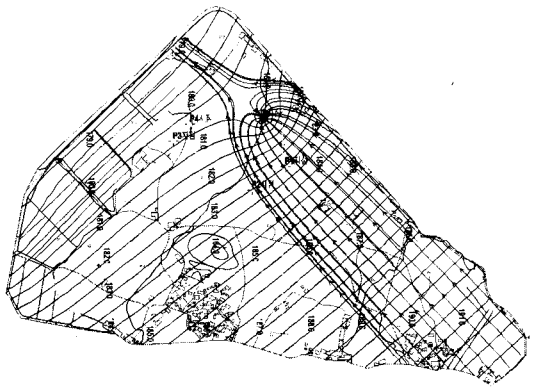

그림 5. 지하등수두분포 변동분석 (Well, P)
(Pumping 120㎥/day, After 24 hour)

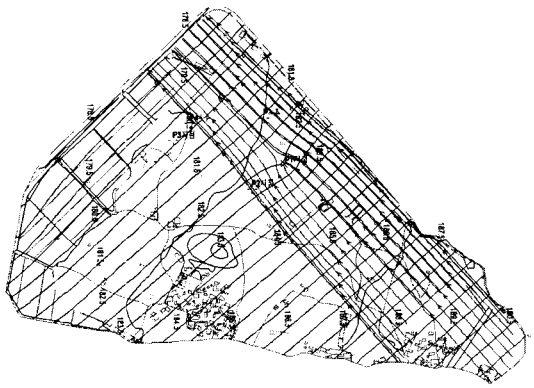

그림 6. 지하등수두분포 변동분석(Well, P1)
(Pumping 24㎥/day, After 24 hour)

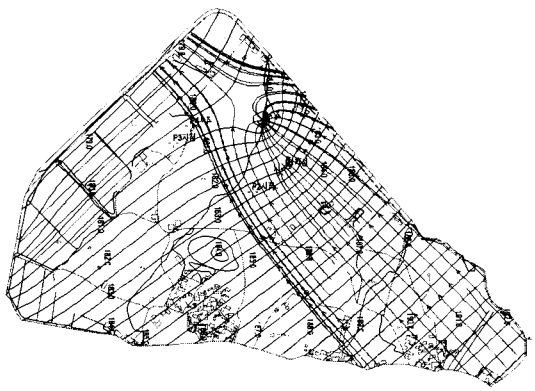

그림 7. 지하등수두분포 변동분석(Well, P & P1)
(Pumping 120㎥/day & 24㎥/day,
After 24 hour)

을 고려해볼 때 각 관정에 있어 지속적인 안정채수량에 대한 영향은 관정의 상류측이 가장 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

3.3.2 부정류상태 해석

본 분석에서는 WINFLOW모델을 이용하여 실제 분석대상 유역인 양촌유역에 대한 부정류상태하의 지하등수두분포 변동분석을 실시하였으며 P지점 양수량 120m^3/day, P1지점 24m^3/day일 때 각각에 대한 모의발생 결과는 다음의 그림 5~7과 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 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 지하수유

동계도 다소 변동폭을 나타내고 있다.

3.4 입자추적 해석

본 분석에서는 WINFLOW 모델을 이용하여 부정류 상태하에서 분석유역의 각 관정에 대한 오염경로를 추정하기 위하여 입자추적 해석을 실시하였다.

3.4.1 P 관정

P관정의 경우에 지하수는 대체적으로 상류부에서 하류부로 안정되게 유동하고 있다. 먼저, 그림 8에서 보는 바와 같이 양수량이 120m³/day인 비정상류 모의발생일 경우에 P관정이 위치하고 있는 지역의 상류지역에 있어서 입자추적을 실시하였다. 계산결과에서 보면 P지점에 있어 입자경로는 하류 병성천유역으로 거의 직선에 가까운 형태를 가지는 것으로 분석되었다. 하지만 상류지역에서 P지점으로 근접할수록 입자의 영향반경은 다소 작아지는 경향을 나타내고 있다.

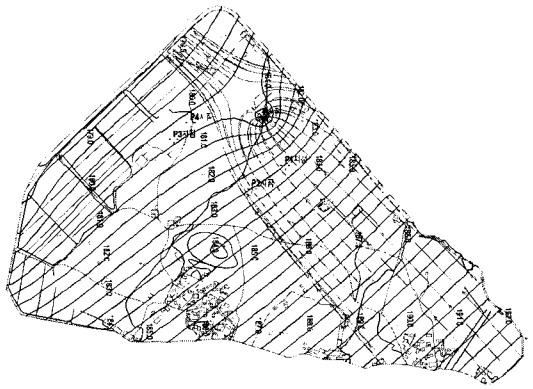

그림 8. 입자추적 결과(P : Pumping 120㎥/day)

3.4.2 P1 관정

P1관정의 경우에도 지하수는 대체적으로 상류부에서 하류부로 완만하게 유동하고 있다. 그림 9에서 보는 바와 같이 양수량이 24m³/day인 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 상류지역으로 부터의 입자 영향반경은 양수량이 적은 관계로 P지점보다 적은 크기를 나타내고 있다.

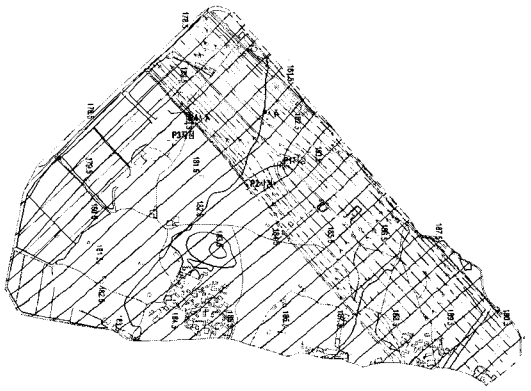

그림 9. 입자추적 결과(P1 : Pumping 24㎥/day)

3.4.3 동시양수(P 및 P1관정)

그림 10에서 보는 바와 같이 P 및 P1관정의 동시양수인 경우에 대한 분석결과를 보면, P 및 P1지점에서 각각 단일정일 경우보다 영향반경의 크기가 다소 복잡해진 양상을 나타내고 있으나 입자경로는 직선에 가까운 형태를 가지는 것으로 분석되었다.

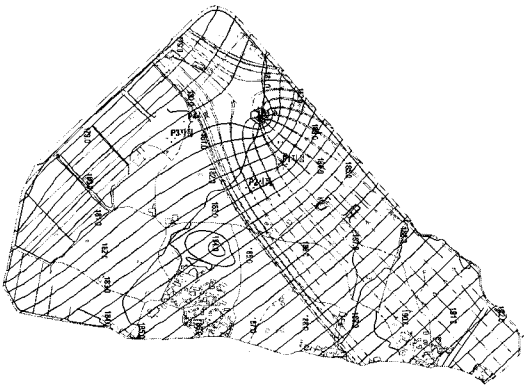

그림 10. 입자추적 결과(P & P1)

표 3. 정류상태하의 관측치와 분석치의 비교 (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	-

표 4. 부정류상태하의 관측치와 분석치의 비교 (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	-

3.5 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.

3.5.1 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, 표 3에 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 표 4는 부정류상태하에서 P 및 P1의 단일양수와 동시양수일 경우에 대한 인근 관정의 수두분포를 나타낸 것이다.

3.5.2 입자추적 및 영향원 해석

본 분석에서 모의발생한 결과치를 이용하여 지하수 입자추적 및 영향원 해석을 실시한 결과(그림 11~13)를 살펴보면, 지하수는 대체적으로 상류부에서 하류부로 안정되게 유동하고 있다. 먼저, 양수량이 120m^3/day인 P관정이 위치하고 있는 지역의 분석결과를 보면 P지점에 있어 입자경로는 하류 병성천유역으로 거의 직선에 가까운 형태를 가지는 것으로 분석되었다. 하지만 상류지역에서 P지점으로 근접할수록 입자의 영향반경은 다소 작아지는 경향을 나타내고 있다. 양수량이 24m^3/day인 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 복잡해진

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.

4. 결 론

본 연구에서는 양촌리유역의 지하수유동 해석을 위해서 WINFLOW 모델을 제안하였으며, 분석결과에서 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.

그리고 모의발생한 결과치를 이용하여 지하수 입자추적 및 영향원 해석을 실시한 결과, 지하수는 대체적으로 상류부에서 하류부로 안정되게 유동하고 있으며 양수량이 120㎥/day인 P관정이 위치하고 있는 지역의 분석결과를 보면 P지점에 있어 입자경로는 하류 병성천유역으로 거의 직선에 가까운 형태를 가지는 것으로 분석되었다. 하지만 상류지역에서 P지점으로 근접할수록 입자의 영향반경은 다소 작아지는 경향을 나타내고 있었으며 양수량이 24㎥/day인 상류 모의발생일 경우에 P1관정이 위치하고 있는 지역의 입자추적을 결과는 P지점보다 상대적으로 양수량이 적은 관계로 영향반경이 작게 나타났다. P 및 P1관정의 동시양수인 경우에는 P 및 P1지점에서 각각 단일정일 경우보다 영향반경의 크기가 증가한 것

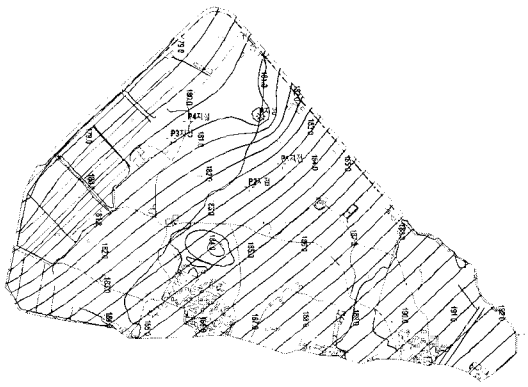

그림 11. 양수량의 변화에 따른 지하수두 변동(Well : P)

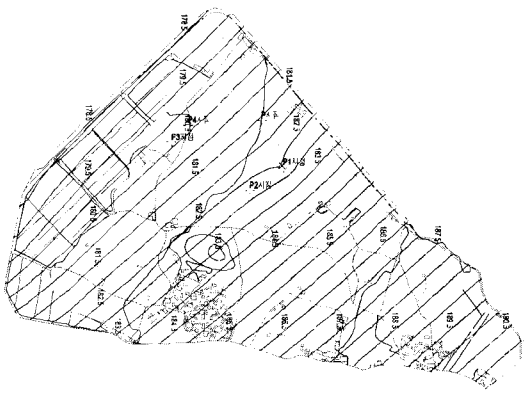

그림 12. 양수량의 변화에 따른 지하수두 변동(Well : P1)

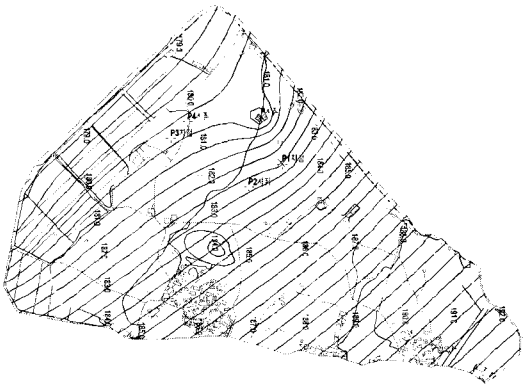

그림 13. 양수량의 변화에 따른 지하수두 변동 (Well : P & P1)

보다는 다소 복잡해진 양상을 보였으며 입자경로는 직선에 가까운 형태를 가지는 것으로 분석되었다. 양

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

감사의 글

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

참/고/문/헌

Davis, S.N. and Dewiest, R.J.M., 1966, Hydrogeology, John Wiley and Sons.

Freeze, R. A. and Witherspoon, P. A., 1966, Theoretical analysis of regional groundwater flow: 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model, WRR, 2.

Gupta, S. K., Cole, C. R. and Pinder, G. F., 1984, A finite element three dimensional groundwater model for a multiaquifer system, WRR, 20.

Hantush, M.S. and C.E. Jacob, 1955, Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 36.

Hubbert, M.K, 1940, The Theory of Groundwater Motion, J. Geol., 48.

McDonald, M.G. and A.W.Harbaugh, 1988, A Modular Three-Dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model, USGS Techniques of Water Resource Investigations, Book 6, Chapter A1.

Morris O.A. and Johnson, A.I., 1967, Summary of hydrologic and phisical propertie of rock and soil materials, as analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey.

Natasimhan, T. N. and Witherspoon, P. A., 1976, An integrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media, WRR, 12.

Rumbaugh, J.O., 1996, Two-Dimensional Groundwater Flow Model, Geraghty and Miller, Inc., Reston, Virginia.

Strack, O.D.L., 1989, Groundwater Mechanics, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Toth, J., 1963, A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins, j. Geophy. Res.

Ueshita, K. and Sato, T., 1976, study on the Resonable Recover of Groundwater in the Nobi Plain, Proceeding of japan Society of civil Engineers, 287.

Wang, H.F., Anderson, M.P., 1982. Introduction to Groundwater Modeling-Finite Difference and Finite Element methods, W.H. Freeman and Company.

고병련, 1984, 제주도의 지하수 부존형태와 지하수위 변동에 관한 연구, 건국대학교 공학석사학위논문.

김영기, 1976, 반야월층의 지하수 유동에 관한 연구, 공산지질학회 논문집, 9(4).

김계남, 1990, 암반에서의 지하수 유동특성분석, 한국수자원학회지, 23(2).

농림부, 1967, 지하수조사 시험보고서.

배상근, 1992, 대구지역의 지하수 유동계의 해석, 계명대학교 산업기술연구소 논문보고집, 15(2):73-86.

안종성, 1983, 동위원소를 이용한 한강유역내 지하수와 기표수의 연관성에 관한 연구, 한국수문학회지, 16(4).

Lee soontak, 1996, Groudwater Movement in the Volcanic Island of cheju, Korea, Ph.d.(Sc.) Thesis, Inst. of Geosci., Univ. of Tsukuba.

최윤영, 1998, 지하수 유동시스템 해석, 영남대학교 박사학위논문.

포항철강공업관리공단, 1989, 포항철강공단 홍수대비조사연구 보고서.

한국수자원공사, 1991-2001, 수문자료집.