

OC7 MODFLOW에 의한 관정밀집지에서의 지하수 유동시스템 해석

고병련*, 이병철, 최윤영¹

제주산업정보대학 토목과, ¹경북도립경도대학 건설환경과

1. 서 론

대수층내에서 발생하는 유동시스템은 대수층의 조건에 따라 시·공간적으로 변동이 매우 심하고 대수층내의 지하수유동 상태를 나타내는 특성인자들은 그 수가 매우 많으므로 지하수유동 시스템의 해석에 모두 반영한다는 것은 매우 어려운 문제들이다. 특히, 대수층의 함양조건과 지질학적 특성인자 상태에 따라 유동조건이 매우 복잡하게 변화함으로써 대수층 내의 지하수 유동시스템은 강한 비선형성을 갖고 있으며, 이들 관계를 해석하는데 있어서 완벽하게 모델화 한다는 것은 매우 어려운 실정이다.

본 연구에서는 지하수와 같은 유체의 유동해석을 수치적으로 해석하는 방법 중에서 가장 보편적으로 이용되고 있는 유한차분법에 의한 FDM(유한차분법)방식의 USGS MODFLOW/ EM버전으로서 2차원 및 3차원 모델을 모두 고려할 수 있는 유동프로그램을 사용하여 정상상태(Steady State) 및 천이상태(Transient)의 유동해석을 실시하였다.

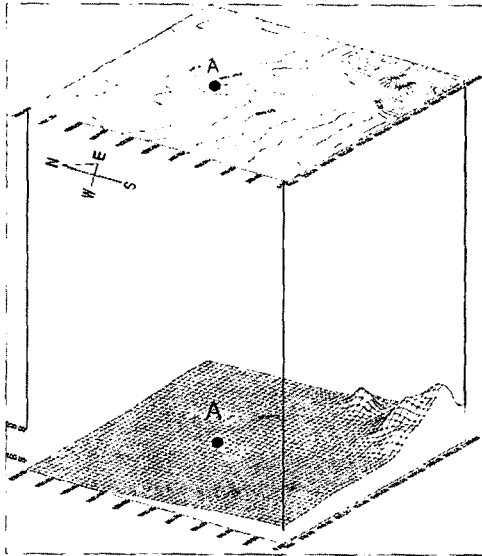
2. 연구대상지역 및 경계조건

2.1. 연구대상지역

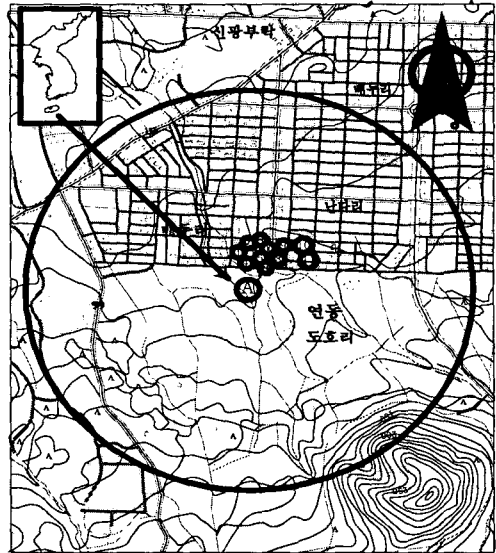
본 연구대상지역으로 선정한 지역은 우리 나라의 가장 대표적인 도서지역인 제주도로써 관정밀집지를 형성하고 있는 제주시 연동일부지역(그림 1)을 선정하였으며 유역특성 분석을 위하여 현지답사 및 지하수 유동과 관련된 자료를 수집하고 이 지역의 자연환경과 실태를 면밀히 파악하여 그림 1에서와 같이 A지점에서 지하수를 개발할 경우 이 지역에 미치는 지하수유동에 대한 분석을 실시하였다.

2.2. 경계조건

본 조사유역은 강, 댐등의 특별한 경계조건이 없으므로 General Head-Boundary를 설정하지 않았고 분수령을 최대한 고려하여 경계를 설정하였으며 격자경계는 지하수 분리선(Water Divide Line)으로서 비공급 경계로 지정하였다. 양수량에 따른 삼차원 비정상류 해석을 위한 초기조건은 정수두 조건으로 하였다. 이에 따른 경계조건으로 지하수면을 자유수면 경계로 하였으며 측면 및 하부경계는 불투수경계로 하였다. MODFLOW모델에 적용할 투수계수(K) 및 저류계수(S)는 표 1과 같다.



a) 연구대상지역 주변 지형도



b) 연구대상지역 분석관정 현황도

그림 1. 연구대상지역 지형 및 분석관정 현황도

연구유역에 적용된 3차원 지하수유동 해석을 위한 유한차분망(격자망)을 작성하기 위하여 조사지역 주변의 분포암석을 파악하고 각 지층의 지질특성에 맞는 수리인자를 설정한 후 사각형 격자망으로 구성하였는데, 종·횡축에 있어 격자요소는 65×81개, 총격자수는 5265개이고 격자간격은 15.0m으로 1/3,000의 축척을 사용하였다.

표 1. MODFLOW모델에 적용된 매개변수(K, T)

| 층 구분 | 투수계수 (K) | 저류계수 (S) | 비 고 |
|---------------|------------------------------------|------------------------|-----------------|
| 1층(EL. -100m) | $5.9 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ | 1.428×10^{-4} | 층적 및 현무암 |
| 2층(EL. -200m) | $1.8 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ | 1.417×10^{-4} | Marine Sediment |
| 3층(EL. -300m) | $5.2 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ | 1.409×10^{-4} | 응회암 |

3. 지하수 유동분석

3.1. 정류상태에 따른 지하수 유동분석

분석결과는 모델에서 계산된 지하수두와 관측수두를 비교할 수 있도록 정호에 따른 수두분포표를 작성하여 비교하였으며, 표 2에 나타난 바와 같이 연동유역의 관측치와 계산된 지하수두와의 상대오차백분율(E.P.)을 비교 검토한 바, 0.0008~0.03의 범위를 나타내었고 그림 2에서 보는 바와 같이 관측치와 거의 일치하였다.

지하수계에서의 지하수두와 모델에서 분석된 지하수두를 유사하게 일치시킨 Calibration 과정을 거친 후 각종 Stress에 따른 정류 및 천이상태 하에서 시뮬레이션을 실시하는 Historical Matching에서도 Influx = Outflux이어야 하는데 정류상태 하에서의 물수지 분석결과에 대한 불일치 척도가 거의 0%로서 유출량과 유입량이 동일하게 분석되었다.

분석결과, 연구대상유역인 연동유역의 양수 전에 대한 지하등수두분포와 유속벡터를 보면 지하수 유동분포는 북측인 해안방향으로 고르게 유출되고 있는 것으로 분석되었으나 국부적으로 다른 대수층에 비해 큰 지하수두를 나타내고 있는 지점 등이 존재하고 있는 것으로 나타나고 있다.

표 2. 관측치와 계산치에 대한 지하수두 비교

| 관정명 및 No. | 안정수위(EL.m) | 분석수위(EL.m) | 표 고(EL. m) | 심 도(m) | 비 고 |
|-----------|------------|------------|------------|--------|-----|
| ① | 22.0 | 21.60 | 90 | 90 | |
| ③ | 16.0 | 16.21 | 106 | 93 | |
| ④ | 12.0 | 12.34 | 110 | 115 | |
| ⑤ | 32.0 | 30.98 | 130 | 135 | |
| ⑥ | 30.0 | 29.92 | 92 | 129 | |
| ⑧ | 32.0 | 31.99 | 95 | 133 | |
| ⑩ | 38.0 | 37.97 | 100 | 150 | |
| ⑪ | 38.0 | 37.97 | 100 | 145 | |
| A | - | 27.60 | - | - | |

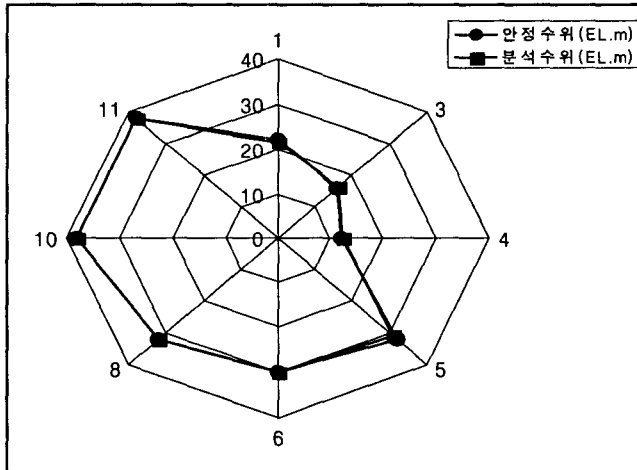


그림 2. 관측치와 계산치에 대한 지하수두의 비교

3.2. 부정류 상태에 따른 지하수 유동분석

가. 중·단기간 양수경과 후의 유동변화

5일, 10일, 30일, 50일 양수경과 후에 따른 지하수 유동시스템 해석에서 동시에 양수할 경우에 대한 지하수 유동변화, 수두저하 변동 등을 분석하기 위해 지하수두 및 유동경로를 2차원과 3차원으로 모의발생을 실시하였다. 유속벡터에 의해 모의된 결과는 상류유역의 지하수 유동분포가 각 정호를 기점으로 유량이 집중되고 있으며 상류방향보다 하류방향에서 우물의 영향권이 다소 크게 작용하고 있는 것으로 분석되었지만 양수시간이 경과할수록 수두차는 점차 안정화되어 가고 있으며, 양수정 외곽지역에서 보다 빠르게

지하수두 안정화가 이루어지고 있는 것으로 분석되었다.

나. 장기간 양수경과 후의 유동변화

80일, 100일, 120일 및 150일 양수경과 후에 따른 지하수 유동시스템 해석 결과는 관측치와 계산치에 대한 지하수두 및 유동경로를 2차원 및 3차원으로 도식하였으며 유속 벡터를 보면 상류유역의 지하수 유동분포가 각 정호를 기점으로 유량이 집중되고 있으나 중·단기간보다 수두저하 변동폭이 현저히 줄어드는 것을 알 수 있으며 양수 120일 이후에는 지하수두가 회복되고 있는 것으로 분석되었다.

4. 고찰 및 결과

4.1. 정류상태에 따른 지하수 유동분석

연구대상지역인 연동지역에서 가상정인 A개발 정에서 양수(150m³/day, 년중 120일))를 실시할 경우 인근 관정에 미치는 영향을 분석하기 위하여 지하수 유동시스템 해석모델인 MODFLOW이용하여 양수 영향분석을 실시한 결과, 연동유역의 정류상태에 대한 관측치와 계산된 지하수두와의 상대오차백분율(E.P.)을 비교 검토한 바, 0.0008~0.03의 범위를 나타내어 관측치와 거의 일치하였으며, 상대오차 백분율은 0.08~3.0%의 작은 오차 값을 나타내었다. 연동유역의 양수 전에 대한 지하수두 유속벡터를 보면 지하수 유동분포는 북측인 해안방향으로 고르게 유출되고 있는 것으로 분석되었으나 국부적으로 다른 대수층에 비해 큰 지하수두를 나타내고 있는 피압대수층 지점 등이 존재하고 있는 것으로 나타났다.

4.2. 부정류 상태에 따른 지하수 유동분석

연구대상지역인 연동유역의 양수에 따른 5일, 10일, 30일, 50일, 80일, 100일, 120일, 150일 경과 후에 대한 지하수 유동해석 결과(표 3)를 보면 중·단기간 양수경과 후의 유동변화에서 관측치와 계산된 지하수두의 수두차를 파악하기 위하여 2차원 유속벡터를 보면 상류유역의 지하수 유동분포가 각 정호를 기점으로 유량이 집중되고 있으며 상류방향보다 하류방향에서 우물의 영향권이 다소 크게 작용하고 있는 것으로 분석되었다.

분석결과로 볼 때 양수시간이 경과할수록 수두차는 점차 안정화되어 가고 있으며 양수정 외곽지역에서 보다 빠르게 지하수두 안정화가 이루어지고 있는 것으로 분석되었다. 장기간 양수경과 후의 유동변화에서 관측치와 계산된 지하수두의 수두차를 파악하기 위하여 2차원 유속벡터를 보면 상류유역의 지하수 유동분포가 각 정호를 기점으로 유량이 집중되고 있으나 중·단기간보다 수두저하 변동폭이 현저히 줄어드는 것을 알 수 있으며 양수 120일 이후에는 지하수두가 점차 회복하고 있는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 양수량에 비해 지하수 함유량이 더 활발히 진행되고 있다는 것을 보여주고 있는 것이라 할 수 있다.

표 3. 지하수두 변동분석 비교(양수 후)

(단위 : EL.m)

| 관정 No. | 양 수 기 간 | | | | | | | | 비고 |
|--------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| | 5일 | 10일 | 30일 | 50일 | 80일 | 100일 | 120일 | 150일 | |
| ① | 20.16 | 19.19 | 17.45 | 16.25 | 15.57 | 15.10 | 15.40 | 15.88 | |
| ② | 19.62 | 18.64 | 16.94 | 15.73 | 15.03 | 14.54 | 14.84 | 15.01 | |
| ③ | 19.71 | 18.74 | 16.96 | 15.72 | 15.00 | 14.51 | 14.64 | 14.78 | |
| ④ | 20.88 | 19.91 | 18.04 | 16.77 | 16.07 | 15.62 | 15.92 | 16.29 | |
| ⑤ | 21.02 | 20.04 | 18.08 | 16.78 | 16.06 | 15.61 | 15.89 | 16.17 | |
| ⑥ | 21.20 | 20.21 | 18.15 | 16.80 | 16.06 | 15.61 | 15.66 | 15.73 | |
| ⑦ | 18.20 | 17.21 | 15.25 | 13.93 | 13.19 | 12.72 | 12.96 | 13.22 | |
| ⑧ | 20.76 | 19.76 | 17.68 | 16.32 | 15.55 | 15.09 | 15.33 | 15.74 | |
| ⑨ | 19.84 | 18.85 | 16.90 | 15.58 | 14.82 | 14.34 | 14.48 | 14.86 | |
| ⑩ | 20.57 | 19.55 | 17.35 | 15.93 | 15.13 | 14.67 | 14.78 | 15.21 | |
| ⑪ | 21.68 | 20.60 | 18.04 | 16.51 | 15.67 | 15.22 | 15.51 | 15.82 | |
| A | 22.49 | 21.51 | 19.33 | 17.93 | 17.19 | 16.77 | 17.02 | 17.35 | |

참 고 문 헌

제주도(2000), 제주도 지하수보전·관리계획보고서

제주도(2000), 제주시·애월도폭 지질보고서

제주도(1994~1997), 제주도 장기관측망 설치 및 조사 실적보고서

Glenn M. Duffield(1996), AQTESOLV for windows User Guide, By Hydro SOLVE, Inc.

3-D Ground water Numerical Analysis, Visual Modflow