

1. 서론

지하수의 상수원으로서의 가치는 지표수 오염의 심화로 인하여 더욱 높아지고 있다. 그러므로 여러가지 오염물질로부터 대수층내의 지하수를 보호하기위한 여러 단계중의 한 요소로 지하의 상수원 보호지역(wellhead protection area)을 설정하는 것이 필요하다. 상수원 보호지역은 “오염물질이 우물을 향하여 이동하고 결과적으로 우물에 도달하는 것이 가능한 지표 및 지하 영역”으로 정의될 수 있다.

상수원 보호지역을 설정하는데는 여러가지 방법이 있을 수 있으나 본 연구에서는 대수층내 가상의 입자가 지하수를 따라 이동하는 경로를 추적하여 얻어지는 우물에 대한 공급지역(zone of contribution 혹은 capture zone)을 이용하여 상수원 보호지역을 설정하는 방법을 소개한다. 가장 간단한 형태인 정상상태의 공급지역은 그 영역안에 존재하는 모든 지하수는 궁극적으로 우물에 도달하게 되는 영역을 가리키며, 방사성 원소등과 같은 유독성분이 오랜 시간 지속되는 오염물질이 관련된 경우에 상수원 보호지역 설정에 적합하다. 그러나, 관련 오염물질의 수명이 짧은 때(예: 비루스, 박테리아등)에는 정상상태의 공급지역은 지나치게 신중한 결과가 되고, 이러한 경우에는 유한한 시간에 대한 공급지역이 더 적합하다.

경로추적은 매우 간단한 개념에 의거하여 얻어지는 방법으로 많은 입력자료가 필요치 않으며 지하수리학에 대한 깊은 지식이 없이도 일선의 종사자들이 쉽게 사용할 수 있어 1단계 보호지역 설정에 적합한 방법이다. 본 연구에서는 2차원 및 3차원 경로추적에 대한 기본 개념과 적용예를 특정 모형들(WHPA¹⁾, GPT3²⁾)을 이용하여 소개한다.

2. 지하수 흐름 계산

우물에 대한 공급지역은 우물 주위의 지하수 흐름이 먼저 밝혀져야 구할 수 있다. 흐름은 지하수두 혹은 수위 분포로 나타낼 수 있고, 그 분포는 수학적 모형을 이용하여 구하거나, 지하수위를 현장 관측함으로써 얻을 수 있다.

대수층내에서의 지하수 흐름이 비압축성 정상상태라 고려될 수 있다면 흐름의 지배방정식은 연속방정식에 Darcy의 법칙을 대입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot (K \cdot k_r \nabla h) = 0 \quad (1)$$

여기서 ∇ 는 gradient 연산자, K 는 포화 수리전도도 (hydraulic conductivity) 텐서, k_r 은 상대 투수계수 (relative permeability), 그리고 h 는 수두이다. 지하수의 포화도에 의존하는 k_r 은 여러가지 방법으로 구할 수 있다.³⁾ 식 (1)에 적절한 경계조건이 주어지면 수두분포를 얻을 수 있다. 일반적으로 식 (1)은 수치적 방법으로 풀어야 하지만, 간단한 포화 흐름의 경우에는 해석적으로도 풀 수 있다. WHPA모형은 수평 2차원 포화 흐름에 대해, GPT3는 2차원 및 3차원 포화-불포화 흐름에 대하여 공급지역을 구하는데 사용될 수 있다.

*동아대학교 토목공학과, 전임강사, *Dan Stevens & Associates, Hydrogeologist

2.1 해석해

대수층의 성질이 일정하고, 흐름이 포화($k=1$) 상태이며 수평 2차원으로 가정될 수 있으면 식 (1)은 Laplace방정식이 되며, 여러 형태의 대수층에대한 해석해가 가능하다. 대상 경로추적모형들로 부터 선택할 수 있는 해석해가 가능한 흐름의 종류는 다음과 같다.

2차원 평면 전체

피압 대수층의 횡적 경계가 우물들로 부터 멀리 떨어져 있어 그 영향을 무시할 수 있으면 영역을 2차원 평면 전체로 가정할 수 있으며, 그 경우 수두분포는 다음과 같다.

$$h = -\frac{Q}{4\pi Kb} \ln r + C \quad (2)$$

여기서 Q 는 우물의 채수량, r 은 우물로부터의 거리, b 는 대수층의 두께, 그리고 C 는 적분 상수이다. 우물이 2개 이상일 때에는 중첩의 원리를 이용하여 새로운 해를 구한다.

2차원 반평면

우물 주위에 하천이나 불투수 경계를 가지는 피압대수층에서의 흐름은 경계조건을 만족시키기 위한 가상의 우물과 중첩의 원리를 이용하여 얻을 수 있다.

두개의 평행한 경계를 가지는 대수층

우물의 주위에 두개의 평행한 경계(하천이나 불투수층의 조합)가 존재하는 경우에 위와 같은 방법으로 해를 구하면 그 해는 무한급수의 형태가 된다. 이 때에는 복소수의 등각사상(conformal mapping)을 이용하면 closed form해가 얻어진다.²⁾

누수 피압대수층 (leaky confined aquifer)

피압대수층의 상부가 불완전하게 차단되어 있으면 누수가 일어난다. 이러한 경우 누수량은 대수층에 인접한 지하수위와 밀접한 관계가 있으며, 지배방정식은 수정된 Bessel의 방정식이 된다.⁴⁾ 수평방면의 경계가 우물로 인한 흐름에 미치는 영향이 무시될 수 있을때 해석해는 Bessel함수로 나타낼 수 있다.

함양이 있는 비피압대수층

비피압대수층의 경우 지표에서의 침투수는 지하수로 함양된다. 대수층에서의 조건들이 간단할 때 이러한 흐름에 대한 수두분포는 해석적으로 얻어질 수 있다.⁴⁾

2.2 수치해

흐름이 불포화이거나, 포화라 하더라도 여러가지 이유로 식 (1)에 대한 해석해가 불가능할 때에는 수치적 방법에 의존하여 수두분포를 구할 수 있다 (예, MODFLOW⁵⁾, VAM3D-CG⁶⁾).

2.3 현장측정

지하수 유역내의 많은 지점에서 수위 자료가 관측되었다면 그 자료를 이용하여 공급지역을 구할 수 있다. 이러한 경우 수학적 모형을 사용하지않고도 지하수 수두분포를 구할 수 있으므로 현장상태를 충실히 반영하는 것으로 여겨지지만 공급지역을 규명하기 위한 수위자료의 충분한 해상도를 갖추는 것은 쉽지않다.

3. 경로 계산

지하수 흐름에 대한 수두분포가 구해지면 그것을 미분하여 지하수 유속벡터를 구한 후 다음과 같은 입자 추적 방법을 이용하여 흐름의 경로를 계산할 수 있다.

$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{v(\tau)}{S\theta} d\tau \quad (3)$$

여기서 x 는 입자의 2차원혹은 3차원 위치벡터, S 는 지하수의 포화도, θ 는 대수층의 유효공극, v 는 유속벡터이다.

수두분포가 해석적인 방법으로 얻어지면 유속벡터도 역시 해석적으로 미분하여 얻을 수 있으며, 그러한 경우 적분은 predictor-corrector방법으로 수행된다. 그외의 경우에는 인접한 cell들의 수두값을 차분하여 유속을 얻은 후, cell내에서 유속이 선형적으로 (piecewise linear) 변한다는 가정을 사용하여 (3)식의 적분을 수행한다.⁷⁾

4. 우물에 대한 공급지역 계산

우물에 대한 공급지역은 유속벡터의 방향을 바꾸어 지정된 시간동안 우물로 부터 입자를 역추적하여 얻을 수 있다. 우물의 주위로 부터 시작한 유한한 수의 입자들을 역추적하여 얻은 경로들의 종점들을 연결하면 구하고자하는 시간에 대한 공급지역이 된다.

5. 모형변수들의 불확실성의 영향 해석

위에서 언급한 방법으로 우물의 공급지역을 계산하려면 여러가지 변수들 (수리전도도, 유효공극, 대수층 두께, 등등)이 입력되어야 한다. 그러나 측정오차, 제한적 자료, 공간적/시간적 비균질성 등으로 인해 이러한 변수들의 값을 정확히 밝히는 것은 거의 불가능하며, 주로 추측에 의하여 결정한다. 하지만 어떠한 변수들의 불확실성이 공급지역의 형태와 크기에 큰 영향을 미친다고 판단되면 그 변수들을 확률변수로 고려하여 Monte Carlo해석을 이용하면 불확실한 변수들의 영향을 평가할수있다.

WHPA모형에서는 다음 변수들을 확률변수로 취급할수있다: 우물에서의 채수량, 수리 전도도, 동수경사, 유효공극, 대수층 두께, 반대수층 (aquitard)의 수리전도도, 그리고 반대수층의 두께. 위 변수들중 두개 이상이 확률변수로 선택되면 존재할지 모르는 변수들 사이의 correlation은 무시되고, 서로 독립적이라고 가정된다. 위 변수들의 분포는 다음과 같은 확률분포들중의 하나로 가정할 수 있다: 정규분포, lognormal, exponential, uniform, Log10 uniform, 그리고 경험적.

Monte Carlo해석 결과는 지정된 시간과 백분율에 대한 공급지역이다. 예를 들면, 모형으로부터 얻어진 90th percentile 공급지역은 실제의 공급지역보다 크거나 같을 확률이 90%이고, 실제 공급지역보다 작을 확률은 10%라는 것을 의미한다.

6. 적용예

6.1 수평 2차원 평면에서의 공급지역

미국 New York주의 Corning시 (그림 1) 부근에 위치하는 작은 계곡의 지하수 유역에 WHPA 모형을 적용하였다. 이 지역에서 가동중인 3개의 우물은 약 25ft(8m) 두께의 비피압대수층으로부터 지하수를 양수하고 있다.⁸⁾

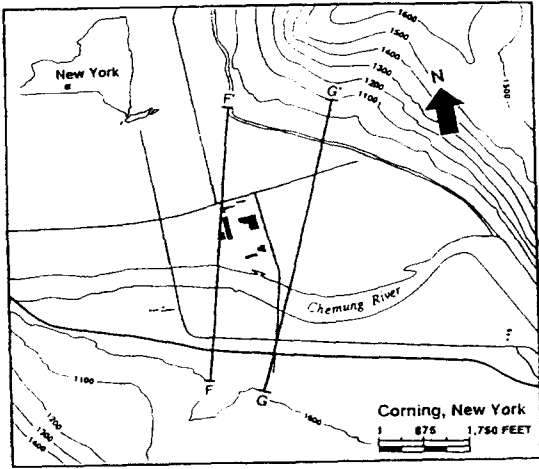


그림 1. Corning시 부근의 지하수유역

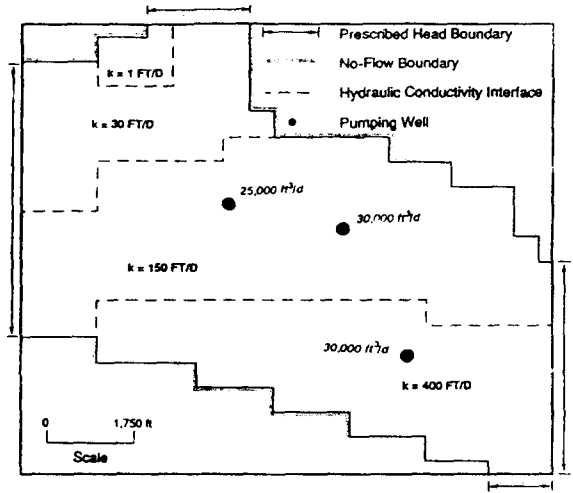


그림 2. 수치해에 사용된 경계조건 및 대수층 성질

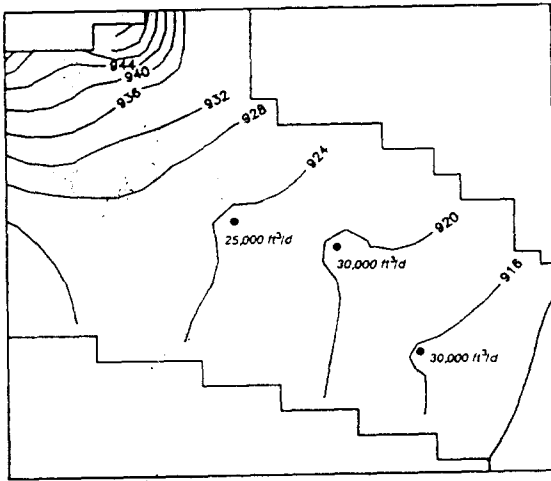


그림 3. 대수층내의 수두분포

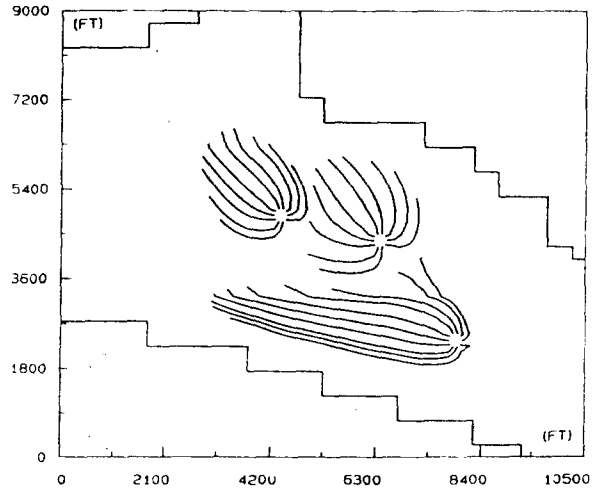


그림 4. 3개의 우물에 대한 5년 공급지역

비교적 작은 유역이지만 대수층의 성질이 비균질하여 (그림 2) 지하수의 흐름은 MODFLOW를 이용한 수치방법으로 구했다. 수치 모형에 사용된 경계조건, 주요 모형변수, 우물의 위치들은 그림 2에 표시되어 있다. 그림 3에 주어진 수두분포는 유역내에서 계곡을 따라 흐르는 지하수의 대체적인 경향을 명백히 나타내고 있다. 수치모형으로 부터 얻어진 수두분포를 WHPA 모형에 입력하여 각 우물에 대하여 5년 공급지역을 얻은 결과는 그림 4와 같다.

6.2 3차원 흐름에 대한 경로추적

3차원 흐름에 대한 경로추적의 예로서 가상의 비등방성, 비피압 대수층내의 포화-불포화 지하수 흐름에 대하여 GPT3 모형을 적용시켰다. 대수층의 형태는 그림 5에 주어진 것과 같으며, 관련된 주요 변수들은 표 1에 나타나 있다. 흐름에 대한 경계조건으로 양 측면 경계($x=0$ 와 1000m)에 수두가 60m 로 지정되었다. 그외의 경계에서는 불투수 조건이 지정되었다. 흐름은 $z=400\text{m}$ 선에 대하여 대칭이므로 모형실험은 대수층 반쪽에서만(즉, $0 < z < 400$) 수행되었다. 이 흐름에 대한 수두분포는 VAM3D-CG를⁶⁾ 이용하여 얻었다.

흐름에 대한 모형실험의 결과는 GPT3에 입력되어 양쪽 측면 경계에서 시작한 각각 4개의 입자를 추적하여 얻어진 정상상태의 경로를 그림 6에 도시하였다. 그 경로들은 8개의 입자들이 지하수면에서 시작하였으므로 대수층내의 지하수면을 나타내고 있다.

표 1. 대수층의 지하수 흐름과 관련된 변수들

K_{xx} : 5 m/day, K_{yy} : 2 m/day, K_{zz} : 0.5 m/day
유효 공극: 0.35, 잔여 포화도: 0.05
불포화 흐름에관계된 변수들: $n=2$, $\alpha=0.5$, $\beta=2$, $\gamma=1$

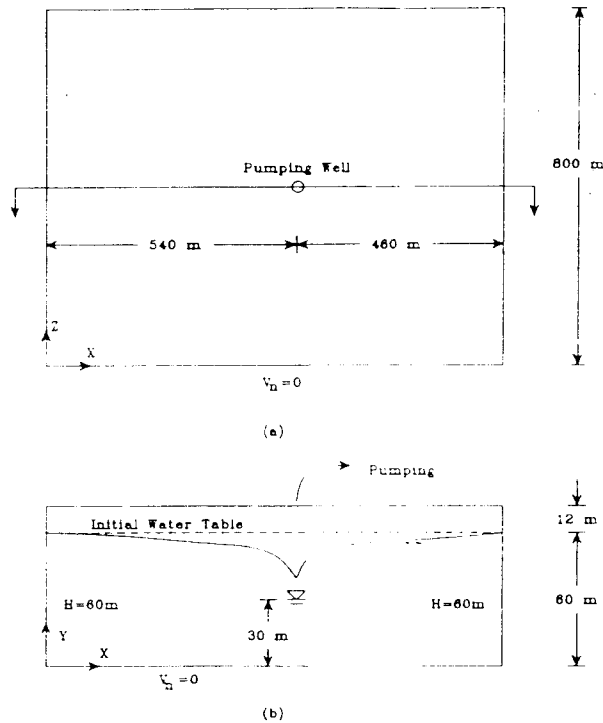
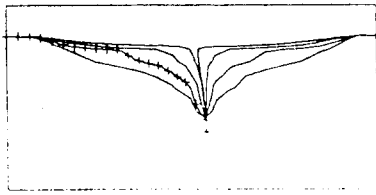
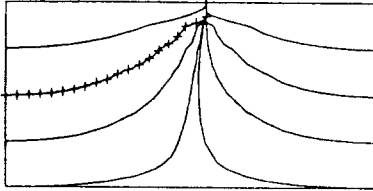


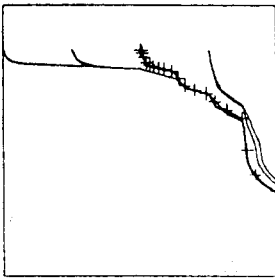
그림 5. 비피압대수층 (a) 평면도, (b) 정면도



(b)

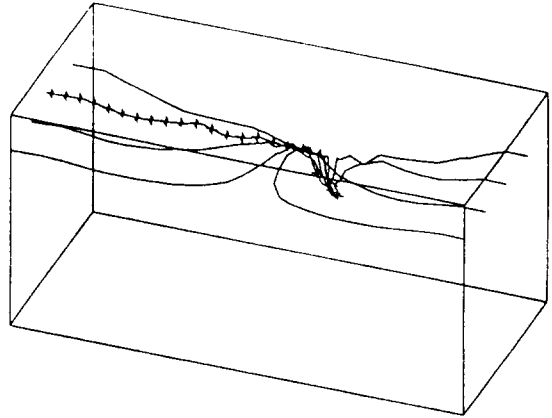


(c)



(d)

Distortion: (1.0, 6.9, 1.3)



(a)

그림 6. 여러각도에서 본 3차원 경로: (a) 투시도, (b) 정면도, (c) 평면도, (d) 측면도.

7. 참고 문헌

1. Blandford, T.N. and P.S. Huyakorn, WHPA: A modular semi-analytical model for the delineation of wellhead protection areas, US EPA, Office of Ground-Water Protection, 1992.
2. Park, N. and P.S. Huyarkon, GPT3: A user's guide on general particle tracking model in three dimensions, prepared for the US DOE and Westinghouse Savannah River Lab, SC, USA, 1992.
3. Brooks, R.H. and A.T. Corey, Properties of porous media affecting fluid flow, ASCE J. Irrig. Drain Div., 92(IR2), 61-88, 1966.
4. Bear, J., Hydraulics of groundwater, McGraw-Hill, New York, 1979.
5. McDonald, M.G. and A.W. Harbaugh, MODFLOW: A modular three-dimensional finite difference flow model, IGWMC Ground Water Modeling Software, IGWMC, Colorado, USA, 1991.
6. Panday, P.S. and P.S. Huyakorn, VAM3D-CG: A user's guide to variably saturated analysis model in 3-dimensions with conjugate gradient solver, Herndon, VA, USA, 1990.
7. Pollock, D.W, Semianalytical computation of path lines for finite-difference models, Ground Water, v. 26, no. 6, 743-750, 1988.
8. Ballaron, P.B., Ground-water flow model of the Corning area, New York, Publication No. 116 of the Susquehanna River Basin Commission, Harrisburg, PA, USA, 1988.