

대수층-하천 연결 시스템에서 분산오염원에 의한 지하수유출 수질 모델링

Groundwater Outflow Quality Modeling for Nonpoint Source Contaminants in the Stream-Aquifer Setting

이도훈(Do-Hun Lee)*

요약 : 대수층과 하천이 상호 연결된 시스템에서 분산오염원이 대수층에 유입될 때, 이송-분산 방정식의 Monte Carlo 수치실험을 이용하여 수리전도도 및 분산오염원 농도의 공간변화가 지하수유출 농도의 시간 변화에 미치는 영향을 평가하였다. 그리고 공간 분포모형과 공간 적분모형의 비교-분석을 통하여, 모형구조가 간단한 공간 적분모형의 분산오염원 문제에 대한 적용 가능성을 검토하였다.

Abstract : In the stream-aquifer setting, this study evaluated the effects of spatial variability in nonpoint sources and hydraulic conductivity on groundwater outflow concentration history. Monte Carlo experiments based on the advection-dispersion equation were used to determine the statistical moments of groundwater outflow concentration history. The comparison between a spatially distributed model and a spatially integrated model (SID) was made in order to examine the possibility of applying SID to the problems of nonpoint source groundwater pollution.

서론

근래에 도시 및 산업지역에서 침투되는 하폐수, 농경지에서 발생하는 비료와 농약 등의 분산오염원에 의한 지하수 오염 문제가 발생되고 있다. 일반적으로 오염원의 종류는 점오염원과 비점오염원 또는 분산오염원으로 구분된다. 분산오염원의 경우에는 오염원이 넓은 지역에 분포되어 있어서 점오염원과 달리 오염원을 통제하기가 어렵기 때문에 분산오염원 관리가 어렵다. 따라서 체계적이고 효율적인 분산오염원 관리 및 평가를 위한 신뢰성 있는 모형이 필요하다. 일반적으로 지하수 오염물질의 거동분석에 사용되는 물리적 모형은 이송-분산 방정식이다. 이송-분산 방정식을 이용하기 위해서는 오염원 분포, 수리전도도 등의 공간분포를 알아야 한다. 그러나 수리전도도 및 분산오염원은 공간적인 변화가 많기 때문에 정확히 추정을 할 수 없다. 따라서 수리전도도 또는 분산오염원의 공간변화를 해석하기 위하여 통계학적 분석방법을 도입하여 매개변수의 공간변화에 대한 접근을 하고 있다(Neuman, 1982 ; Gelhar, 1984).

본 연구에서는 하천과 자유수면 대수층이 상호 연결된 시스템에서 공간분포 모형인 이송-분산 방정식을 이용하여 Monte Carlo 실험을 통하여 수리전도도 및 분산오염원 농도의 확률밀도함수가 대수정규분포라는 가정아래 수리전도도, 분산오염원 농도 random fields의 분산과 상관길이의 변화가 지하수유출 농도분포에 미치는 효과를 조사하였다. 그리고 공간분포 모형(이송-분산 방정식)과 비교할 때, 모형구조가 간단한 공간 적분모

형의 분산오염원 문제에 대한 적용성을 검토하기 위하여 공간 분포모형과 공간 적분모형의 동적 반응을 비교하였다.

지하수 오염물질 이동 모형

오염물질이 지하에 침투되면 여러가지의 물리적 이송· 확산 및 생화학적 변환 과정을 거치면서 이동하게 된다. 다공성 매질에서의 용질의 거동을 묘사하는 수학적 모형은 지하수의 흐름을 해석하는 방정식과 물질의 이동을 해석하는 방정식의 결합으로 구성된다.

지하수 흐름 방정식

지하수 흐름 방정식은 Darcy법칙과 연속방정식을 결합하여 유도되며 비압축성 흐름 상태에서 다음과 같이 표현된다(Bear, 1972).

$$\nabla \cdot (\bar{K}\nabla h) = 0 \tag{1}$$

식 (1)에서 \bar{K} 는 수리전도도 텐서, h 는 총수두를 의미하며 압력수두와 위치수두를 합한 수두로 정의된다.

이송-분산 방정식

지하수 오염물질 거동분석에 있어서 용질의 시·공간 분포를 묘사하기 위하여 위에 언급한 지하수흐름 방정식뿐만 아니라, 아래에 제시되는 이송-분산 방정식(Bear, 1972)을 필요로 한다.

$$\nabla \cdot (\bar{D}\nabla C) - \bar{v} \cdot \nabla C = \frac{\partial C}{\partial t} \tag{2}$$

* 한국수자원공사 수자원연구소 (대전광역시 유성구 전민동 638)

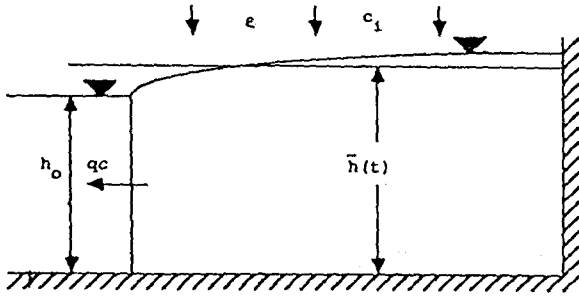
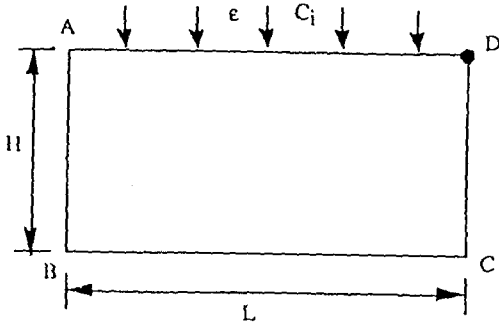


Figure 1. Stream-aquifer setting subject to nonpoint sources.



On A-B, B-C, C-D : $\nabla h \cdot \bar{n} = 0, \nabla C \cdot \bar{n} = 0$
 On A-D : $\nabla q \cdot \bar{n} = \epsilon, C(x, H, t) = C_i$
 At D : $h(x, H, t) = H$

Figure 2. Simulation shape and boundary condition.

식 (2)에서 C 는 지하수농도, \bar{D} 는 동수역학적 분산계수 텐서, \bar{v} 는 평균 선형지하수 속도(average linear groundwater velocity)로 Darcy속도를 유효공극률로 나눈 속도로 정의되며, 방정식 (1)을 풀어서 \bar{v} 의 시·공간 분포를 결정한다.

공간적분모형(Spatially integrated model)

공간분포 모형인 이송-분산 방정식을 적용하기 위해서는 매개변수 및 입력상태의 공간분포를 필요로 한다. 그러나 공간적분모형은 매개변수들의 공간분포를 필요치 않은 간단한 구조를 가지고 있으며, 물수지 방정식과 물질수지 방정식에 기초하고 있다. 대수층과 하천이 연결된 시스템(Figure 1)에서 자유수면 대수층의 물수지 방정식은 다음과 같다.

$$n \frac{dh}{dt} = \epsilon - q \pm R' \tag{3}$$

식 (3)에서 \bar{h} = 포화 대수층의 평균두께, n = 유효공극률, ϵ = 함양률, q = 지하수유출률, R' = sources/sinks 등으로 각각 정의된다. 그리고 함양률이 주어지면 이 식에서는 \bar{h} 와 q 의 두개의 미지수를 포함하고 있기 때문에, 시스템을 완성하기 위해서는 또 하나의 방정식을 필요로 한다. Gelhar and Wilson(1974)은 q 를 \bar{h} 의 선형함수로된 모형을 제안하였다.

$$q = a(\bar{h} - h_0) \tag{4}$$

K-field

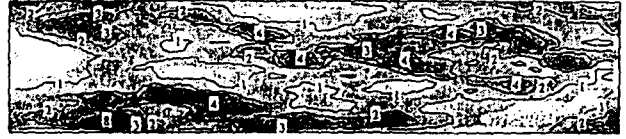


Figure 3. Hydraulic conductivity realization. (Integer values of ln K are contoured)

식 (4)에서 a 는 지하수유출 상수, h_0 는 하천수위로 정의된다. Figure 1의 상황에서 보존성 물질의 물질수지 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$d \frac{(nhC)}{dt} = \epsilon C_i - qC \pm R' \tag{5}$$

식(5)에서 C_i 는 함양농도, C 는 지하수유출 농도를 의미한다. 식(5)에서는 시스템이 완전 혼합된다는 가정아래 지하수유출 농도는 대수층의 평균농도와 같다는 가정을 사용하였다. 그리고 정상류 흐름($\epsilon=q$)일때, 식(5)는 아래식처럼 간단하게 표현된다.

$$\frac{dC}{dt} + \frac{C}{T_c} = \frac{C_i}{T_c} \pm \frac{R'}{nh} \tag{6}$$

식(6)에서 $T_c = nh/q$ 로 정의되며, 대수층의 체류시간(residence time)을 의미한다. $R'=0$ 일 경우, 방정식 (6)의 해는 다음과 같이 표현된다

$$C(t) = C_a \exp(-t/T_c) + C_i(1 - \exp(-t/T_c)) \tag{7}$$

식(7)에서 C_a 는 초기농도, C_i 는 함양농도를 의미한다.

연구방법

Monte Carlo 수치모의에 선정된 모의영역의 모양은 Figure 2에 보여진 2차원의 직사각형이며, 모의에 사용된 경계조건도 Figure 2에 수학적으로 설명되었다. A-B, B-C, C-D 경계면에는 no flux 경계조건을 적용하였고, A-D 경계면에는 일정한 함양률(ϵ)과 농도(C_i)를 적용하였으며, D에서는 총수두를 대수층의 두께(H)로 고정시켰다. 그리고 모의에 사용된 변수들의 값은 다음과 같다: 대수층의 길이(L)=100 m, 두께(H)=10 m, 공극률(n)=0.3, 함양률(ϵ)=0.0018 m/day, 종분산도(a_1)=10 m, 횡분산도(a_2)=1 m.

다음은 Monte Carlo 실험에 필요한 random field 모의 발생 기법에 대해 간단히 설명한다. 수리전도도 및 분산오염원을 무작위변수로 간주하여 second-order stationary random field을 발생시켰다. 이들 변수들의 확률밀도함수는 대수정규분포라는 가정아래 주어진 평균, 분산, 공분산을 이용하여 random field 을 모의시켰다.

수리전도도의 2차원 random field의 발생은 Turning Bands Methods(Mantoglou and Wilson, 1982)를 사용하였으며, 공분산함수는 다음과 같은 Bessel함수를 가정하였다.

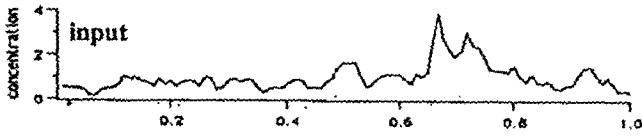


Figure 4. Nonpoint source realization.

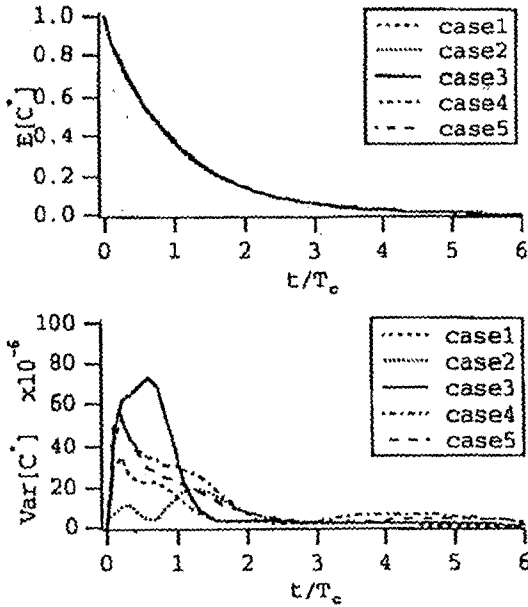


Figure 5. Mean and variance for the groundwater outflow concentration response. ($E[C^*]$ =평균농도, $Var[C^*]$ =분산농도)

$$C(r) = \sigma^2 (r/\lambda) K_1 \{r/\lambda\}$$

이 식에서 r 은 lag거리를 나타내며, λ 는 상관길이를 의미한다. Figure 3은 TBM방법을 사용하여 모의·발생한 수리전도도 random field의 예를 보여주고 있다. 그리고 1차원 분산오염원 농도의 realizations은 Ripley(1987)의 이동평균과정 알고리즘을 이용하여 발생시켰으며, 아래의 지수함수를 공분산함수로 가정하였다.

$$C(r) = \sigma^2 \exp(-r/\lambda)$$

Figure 4은 분산오염원 농도의 1차원 random field의 예를 보여주고 있다. 본 연구에서 사용된 Monte Carlo 실험 과정의 순서는 다음과 같이 요약된다:

과정1) 위에 언급한 random field 도출방법에 의해 수리전도도 및 분산오염원 농도의 1개의 realization을 발생시킨다.

과정2) 과정 (1)에서 발생된 realization을 이송·분산 방정식의 입력자료로 사용하여, Figure 1에 표시된 모의영역 및 경계 조건에 대한 수치모의를 통하여 지하수유출 농도분포를 결정한다. 수치모의에서는 유한요소 프로그램인 SUTRA(Voss, 1984)를 사용하여서 해를 구하였다.

과정3) 과정 (1)과 (2)를 반복수행하여 지하수유출 농도분포에 대한 여러개의 realizations을 결정한다.

과정4) 과정 (3)에서 획득한 지하수유출 농도분포 realizations

Table 1. Simulation cases. [$\ln K \sim N(\mu, \sigma^2)$; $\mu=0.405$ m/day]

경우	σ^2	상관길이 (m)
1	0.4	$\lambda_x = \lambda_y = 10$
2	1.0	$\lambda_x = \lambda_y = 10$
3	2.0	$\lambda_x = \lambda_y = 10$
4	2.0	$\lambda_x = 10, \lambda_y = 5$
5	4.0	$\lambda_x = \lambda_y = 10$

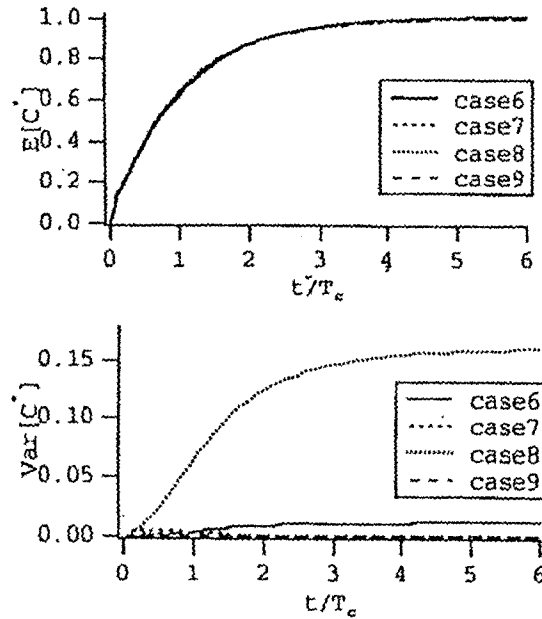


Figure 6. Mean and variance for the groundwater outflow concentration response. ($E[C^*]$ =평균농도, $Var[C^*]$ =분산농도)

의 통계적 모멘트(평균과 분산)를 구한다.

결 과

수리전도도 공간변화의 영향

수리전도도 확률밀도함수의 분산과 상관길이의 변화가 지하수유출 농도분포에 미치는 영향을 분석하기 위하여 이송·분산 방정식의 몬테카를로 수치실험을 통하여 얻은 지하수유출 평균농도와 분산농도의 시간분포를 Figure 5에 제시하였다. Figure 5에서 C^* 는 지하수유출 초기농도로 스케일된 농도이며, 모의시간은 체류시간(T_c)으로 스케일되었다. Figure 5의 결과는 5개의 realizations을 분석하여 결정되었으며, 몬테카를로 실험에서 각 경우에 통계된 확률분포의 2차 모멘트와 상관길이의 변화를 Table 1에 제시하였으며, Table 1에 표시된 $\ln K \sim N(\mu, \sigma^2)$ 의 의미는 $\ln K$ random field는 정규분포이며, 평균과 분산값은 각각 μ 와 σ^2 임을 뜻한다. Table 1에서 경우 1, 2, 3, 5는 모두 동일한 1차 모멘트와 상관길이를 가지며, 수리전도도 확률밀도함수의 분산값만을 변화시켰다. 경우 3과 4는 수리전도도 확률밀도함수의 평균과 분산은 같지만, 경우 4는 좌표축 방향에 따라 상관길이가

Table 2. Simulation cases. [$\ln C_i \sim N(\mu, \sigma^2)$; $\mu = 6.8078$ mg/l]

경우	σ^2	상관길이 (m)
6	0.2	$\lambda = 8$
7	0.2	$\lambda = 20$
8	0.2	$\lambda = 40$
9	0.2	$\lambda = 8$

다른 이방성 상관길이를 사용하였다. Figure 5에서 알 수 있는 것처럼 지하수유출 평균농도의 동적 변화는 모든 경우에 일치하고 있고, 지하수유출 분산농도의 시간분포는 수리전도도 확률밀도함수의 2차모멘트 값에 따라 변하고 있으나 최대크기는 0.00008 이하로 수리전도도 random field의 2차 모멘트가 지하수유출 농도변화에 미치는 영향은 중요하지 않음을 알 수 있다. 이처럼 수리전도도 공간변화가 지하수유출 농도분포에 미치는 영향이 적은 데 대한 물리적 메커니즘은 분산오염원으로부터 침투되는 travel time이 서로 다른 용질들이 지하수유출 경계면에서는 혼합되어서 수리전도도의 공간변화로 인한 용질의 이송·분산 효과는 최소화 되기 때문이다.

분산오염원 공간변화의 영향

Figure 6은 이송·분산 방정식의 몬테카를로 수치실험을 통하여 얻은 지하수유출 평균농도와 분산농도의 시간분포를 보여주고 있다. Figure 6의 결과는 10 개의 realizations을 분석하여 결정되었으며, 몬테카를로 실험에서 통제된 확률밀도함수의 2차 모멘트와 상관길이의 변화를 요약하여 Table 2에 제시하였다. Table 2에 나타난 $\ln C_i \sim N(\mu, \sigma^2)$ 의 의미는 $\ln C_i$ random field는 정규분포이며, 평균과 분산값은 각각 μ 와 σ^2 임을 뜻한다. Table 2에서 경우 6, 7, 8는 분산오염원 농도의 1차 모멘트와 2차 모멘트는 동일하며, 상관함수의 상관길이만을 변화시켰다. 그리고 경우 8과 9는 분산오염원 농도의 확률밀도함수의 평균과 상관길이는 같지만, 분산값만을 변화시켰다. Figure 6에서 알 수 있는 것처럼 지하수유출 평균농도의 시간분포는 모든 경우에 일치하고 있으나, 지하수유출 분산농도 반응은 각 경우에 따라 차이가 있다. 그러므로 그림의 결과는 분산오염원 상관함수의 상관길이는 지하수유출 분산농도의 시간분포에 영향을 미치고 있다. 특히 상관길이가 모의영역길이의 40%인 경우 8에서는 지하수유출 분산농도는 모의시간에 따라 증가하고 있기 때문에, 이 경우에는 지하수유출의 분산농도를 평가하는 것이 중요하게 된다.

모형의 비교

앞절에서 제시한 공간 적분모형의 적용성을 검토하기 위하여 공간분포 모형인 이송·분산 방정식의 지하수유출 평균농도반응과 공간적분모형의 지하수유출 농도반응을 비교하였다. 공간적분모형의 지하수유출 농도반응은 식 (7)에 의해 결정된다. Figure 7은 두 모형사이에서 비교된 지하수유출 농도의 시간분포를 보여주고 있다. 이 그림에서는 실선은 공간 적분모형(SID)의 반응을 나타내며, 점들은 공간분포모형의 반응을 나타낸다. 공간 분포모형 반응의 경우에는 Monte Carlo 실험의 경우 1과

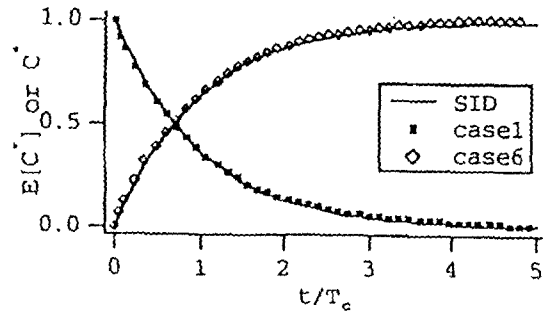


Figure 7. Comparison of groundwater outflow concentration responses.

6을 비교 대상으로 채택하였다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 공간 분포모형의 지하수유출 평균농도반응과 공간 적분모형의 지하수유출 농도반응은 일치하고 있다. 따라서 공간 적분모형은 지하수유출 평균농도의 반응을 예측·평가 할때 유용하게 응용될 수 있다고 사료된다.

결론 및 토의

수리전도도 및 분산오염원의 확률밀도함수가 대수정규분포라는 가정아래 이송·분산 방정식을 이용한 몬테카를로 수치실험을 통하여 수리전도도 및 분산오염원의 확률밀도함수의 2차 모멘트와 상관길이의 변화가 지하수유출 농도분포에 미치는 영향을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수리전도도 확률밀도함수의 2차모멘트와 상관길이는 지하수유출 평균농도와 분산농도의 시간분포에 거의 영향을 미치지 않는다.
2. 분산오염원 농도 확률밀도함수의 2차모멘트는 지하수유출 평균농도와 분산농도의 시간분포에 영향을 미치지 않지만, 상관길이의 크기에 따라서 지하수유출 분산농도의 변화가 있다. 따라서 분산오염원 농도의 공간분포를 추계학적으로 모델링을 할 때에는 상관길이를 신뢰성 있게 추정하는 것이 중요하다.
3. 공간 적분모형의 지하수유출 농도반응은 공간 분포모형의 지하수유출 평균농도반응과 잘 비교되며, 대수층과 하천이 상호 연결된 시스템에서 지하수유출 평균농도의 시간분포를 평가할 때 공간 적분모형은 유용하게 적용될 수 있다고 사료된다.

본 연구에서 고려된 수리전도도 및 분산오염원의 공간변화가 지하수유출 농도분포에 미치는 영향이 적은 이유는 하천과 대수층이 상호 연결된 시스템에서는 지하수가 유출되는 하천경계면이 좁아지기 때문에 하천경계면에서 발생하는 지하수유출 농도의 공간적 평균 효과 때문이다.

향후에는 본 연구의 결론을 일반화하기 위하여 불포화흐름, 생화학적 반응 등을 고려하고, 본 연구에서 고려되지 않은 공극률 등의 공간변화 및 3차원 흐름의 영향에 대한 검토가 수행되어야 할 것이다. 그리고 현장실험을 통하여 본 연구에서 수치실험을 통하여 얻은 결론을 검증하여야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- Bear, J., 1972, Dynamics of fluids in porous media, New York, Elsevier.
- Gelhar, L.W., and Wilson, J.L., 1974, Groundwater quality modeling, Ground Water, 12(6), p. 399-408.
- Gelhar, L.W., 1984, Stochastic analysis of flow in heterogeneous porous media, in Bear, J., and Corapcioglu, Ed., Fundamentals of transport phenomena in porous media, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 673-717.
- Mantoglou, A., and Wilson, J.L., 1982, The turning bands method for simulation of random fields using line generation by a spectral method, Water Resources Research, 18(5), p. 1379-1394.
- Neuman, S.P., 1982, Statistical characterization of aquifer heterogeneities: An overview, Geological Society of America Special Paper, 189, p. 81-102.
- Ripley, B.D., 1987, Stochastic simulation, New York, John Wiley.
- Voss, C.I., 1984, A finite-element simulation model for saturated-unsaturated, fluid-density-dependent ground-water flow with energy transport or chemically-reactive single-species solute transport, U.S. Geological Survey, National Center, Reston, Virginia.