

## 물리·화학적 불균질 특성을 지닌 매질 내 오염물 이동시 보이는 종적률 변화

서병민<sup>1</sup>·정준오<sup>1\*</sup>·김영우<sup>2</sup>·황승민<sup>3</sup>

<sup>1</sup>호서대학교 환경공학과, <sup>2</sup>호서대학교 자동차공학과

<sup>3</sup>호서대학교 벤처전문대학원

### Variations of Longitudinal Moments for a Contaminant Transport in Physically and Chemically Heterogeneous Media

Byong-min Seo<sup>1</sup>, Joon-oh Jung<sup>1\*</sup>, Young-woo Kim<sup>2</sup>, and Seung-min Hwang

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Hoseo University

<sup>2</sup>Department of Automotive Engineering, Hoseo University

<sup>3</sup>Graduate School of Venture, Hoseo, University

물리·화학적 불균질 특성을 가진 매질 중  $K$  임의장과  $K_d$  임의장이 정(+)의 상관관계를 가지는 경우, 매질 내 이동되는 오염물이 보이는 적률변화를 알아보기 위해 등방매질 내 이동되는 비반응성 오염물에 대한 2차원 몬테카를로 시뮬레이션이 시행되었다. 흡착성이 증가함에 따라 변화하는 이차적률들을 관찰하기 위해 1, 2, 5의 지연요소가 설정되었다. 지연된 종이차공간적률,  $Z_{11}^R(t',l')$ 은 오염물의 이동이 진행됨에 따라 증가하며 초기 오염물의 크기가 증가함에 따라 증가한다. 또한 지연요소가 증가함에 따라 감소하며, 일차분석해에 의한 이론적 결과와 비교적 잘 일치함을 보인다. 지연된 종오염물중심분산,  $Z_{11}^R(t',l')$ 은 초기오염원의 크기,  $l_2'$ 가 증가할수록 감소하며 설정된 시뮬레이션에 의해서는 아직 에르고딕 이동상태에 도달하지 않았음을 지시해준다. 지연요소가 증가함에 따라 현저히 감소하여 오염물 중심점에 대한 불확실성이 감소함을 보인다. 지연된 단일입자종이송분산,  $X_{11}^R(t')$ 은 세가지 다른 등급의 지연요소에 대해서 모두 일차근사법에 의한 이론적 결과와 비교적 잘 일치한다. 따라서 종방향의 지연된 이차적률들은 추계론적 시뮬레이션에 의해 산출될 수 있으며, 일차근사법에 의한 분석해는 종방향의 지연된 적률들에 대해 상당히 정확한 근사값을 제공하고 있음을 결론지을 수 있다.

**주요어** : 지연, 지연, 불균질 특성, 추계론적, 비에르고딕 이동

Two dimensional Monte-Carlo simulations of a non-reactive solute plume in isotropic porous media which are physically and chemically heterogeneous are conducted to determine the variations of moment. Retardation factors of 1, 2 and 5 are given to ascertain how the second moments are changed as adsorption increased. Retarded longitudinal second spatial moment,  $Z_{11}^R(t',l')$ , increased during the transport process and as the dimensionless lengths of line plume source,  $l_2'$ , increased.  $Z_{11}^R(t',l')$  decreased as the retardation factors increased, and the simulated moments fit well to the first-order analytical results. Retarded longitudinal plume centroid variance,  $Z_{11}^R(t',l')$ , decreased as the dimensionless lengths of line plume source,  $l_2'$ , increased and as the retardation factor increased. The result indicates that the uncertainty about the plume center decreased, and the ergodic condition for the second spatial moments is far from reaching. Simulated longitudinal one particle displacement covariance,  $X_{11}^R(t')$ , well consistent with the first-order analytical results for the three degrees of retardation factors of 1, 2 and 5 respectively. It is, consequently, concluded that the retarded longitudinal second moments could be produced by stochastic simulation, and that the first-order analytical results definitely provides very close values of the longitudinal retarded moments.

**Key words** : groundwater, retardation, heterogeneous, stochastic, non-ergodic transport

\*Corresponding author: jojung@hoseo.edu

## 서 언

각종 오염원으로부터 유출된 오염물질은 지하수의 흐름에 따라 이동하며 지하수계의 물리화학적 특성 및 지하수 유동변화에 따라 더 넓은 지역에 걸쳐 오염운을 형성한다. 지하수학자들은 이들 오염운들의 크기, 모양 또는 오염 농도 분포특성에 관한 정확한 예측방법에 대해서 1990년대 이후 각종 이론적, 실험적 연구들을 활발히 진행해 오고 있다. 그러나 아직 뚜렷하게 증명된 이론이 정립되지 않고 있으며 여전히 지속적으로 연구해야 할 중요한 과제중의 하나로 남아있다.

물리적 불균질 특성을 가진 매질에서의 오염운 이송에 대한 이론을 정립하기 위해 1980년대 후반 이후 많은 추계론적 이론들이 발표되어왔으며(Kitanidis, 1988; Dagan, 1990, 1991; Rajaram and Gelhar, 1993; Cushman *et al.*, 1994; Zhang and Nueman, 1995; Selroos, 1995; Zhang *et al.*, 1996; Zhang and Zhang, 1997; Zhang and Federico, 1998, 2000; Federico and Zhang, 1999), 이들 이론들을 증명하기 위해 실의 추적자 실험(Mackay *et al.*, 1986; Killely and Moltyaner, 1988; Garabedian and Leblanc, 1991; Hubbard *et al.*, 2001) 및 컴퓨터 시뮬레이션(Hassan *et al.*, 1998, 2002; Zhang and Lin, 1998; Dentz *et al.*, 2002; Hassan *et al.*, 2002; Zhang and Seo, 2004) 등이 행해져 왔다. 최근에는 대규모 실의 추적자 시험이 갖는 불편함 및 컴퓨터 시뮬레이션이 갖는 여러 가지 이점으로 인해 오염운 이송시 보이는 적률연구에 대해 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하는 사례가 증가하고 있으나, 현재까지 행해졌던 수치시뮬레이션들은 대부분 물리적 불균질 특성만을 가진 매질에서의 오염운 이송에 대해 국한되어 행해져왔다.

근래에 몇몇 학자들에 의해 물리적 뿐만 아니라 화학적 불균질 특성을 동시에 지닌 매질 내에서의 오염운 이동에 관한 이론적 연구가 진행된 바 있다(Bellin *et al.*, 1993; Cvetkovic and Dagan, 1994; Espinoza and Valocchi, 1997; Fiori and Bellin, 1999; Zhang, 2003). 그 중 Bellin *et al.*(1993)은 불균질한 분배계수와 지연계수를 가진 매질 내에서의 오염운 이송에 대한  $X_{ij}^R$  적률을 일차근사법에 의해 정의한 바 있으며, Zhang(2003)은 최근 같은 매질에서의  $R_{ij}^R$  적률을 정의한 바 있으나, 아직 이들 이론들을 증명하기 위한 어떤 실험도 국내외에서 행해진 바 없다.

본 연구는 물리·화학적 불균질 특성을 가진 매질 내에서 이송되는 흡착성 오염운의 형태 및 거동을 지시해주는 적률변화에 관한 연구이며, 그들 적률변화를 밝혀내기

위해 추계론적 수치 시뮬레이션 기법이 이용되었다. 따라서 이 연구는 물리·화학적으로 불균질한 대수층 내에서의 오염물질 이송에 관한 이론 정립에 중요한 자료를 제공하고, 지하수학 분야에 추계론적 수치 시뮬레이션 기법 이용에 관한 뚜렷한 지표 제시할 것으로 판단된다.

## 이론적 배경

불균질 특성을 가진 대수층 내에서 이송되는 오염운의 특성을 표현하기 위해서 그 오염운의 이차 공간적률들이 사용되어져 왔다. 이차 공간적률은 오염운의 크기와 확장 정도를 보여주며, Kitanidis(1988)와 Dagan(1990)은 비에르고딕 오염운 이동에 대한 초기값이 인 이차공간적률의 집합적평균(ensemble average of second spatial moment),  $\langle S_{ij}^*(t, l) \rangle$ , 에르고딕 오염운의 이차공간적률 또는 단일입자에 대한 이송공분산(one particle displacement covariance),  $X_{ij}^*(t)$ , 그리고 오염운 중심분산(plume centroid variance),  $R_{ij}^*(t, l)$ , 등의 관계식을 정의하였다. 국부적인 소규모 분산을 무시할 경우엔 이들의 관계는 식 (1)과 같다.

$$Z_{ij}^*(t, l) \equiv \langle S_{ij}^*(t, l) \rangle - S_{ij}^*(0, l) = X_{ij}^*(t) - R_{ij}^*(t, l) \quad (1)$$

여기서 “ $\langle \rangle$ ” 은 무차원,  $\langle \rangle$ 은 집합적평균, 그리고  $S_{ij}^*(0, l)$ 은  $S_{ij}^*(t, l)$ 의 초기값이며 시뮬레이션 동안 일정한 값을 갖는다. 식 (1)의 무차원은

$$\begin{aligned} S_{ij}^*(t, l) &= \frac{\langle S_{ij}(t, l) \rangle}{L^2}; X_{ij}^*(t) = \frac{X_{ij}(t)}{L^2}; R_{ij}^*(t, l) \\ &= \frac{R_{ij}(t, l)}{L^2}; t = \frac{t}{L}; l = \frac{l}{L} \end{aligned} \quad (2)$$

와 같이 정의되며  $L$ 은 임의장의 투수계수,  $K$ 의 상관거리(correlation length)를 의미한다.  $S_{ij}^*(t, l)$ 와  $R_{ij}^*(t, l)$ 는 초기 오염원의 크기  $l$ 의 함수이나,  $l \rightarrow \infty$ 에 따라  $R_{ij}^*(t, l) \rightarrow 0$ 이 되므로  $X_{ij}^*(t)$ 는  $Z_{ij}^*(t, l)$ 과 같아지게 되기 때문에 이 함수가 아니다.

식 (1)은 다시 Dagan(1990)에 의하여 흡착성이 있는 용질이동에 대하여 변형되어 식 (3)과 같이 발표되었다.

$$Z_{ij}^{*R}(t, l) \equiv \langle S_{ij}^{*R}(t, l) \rangle - S_{ij}^{*R}(0, l) = X_{ij}^{*R}(t) - R_{ij}^{*R}(t, l) \quad (3)$$

식 (3)에서 “ $R$ ”은 흡착에 의한 지연(retarded)을 의미한다.

물리·화학적 불균질 특성을 가진 대수층 내 오염운 이송에 관해서는 Dagan(1990) 후 Bellin *et al.*(1993)과

Zhang(2003)에 의해 연구되었다. Bellin *et al.*(1993)은 종방향(longitudinal)과 횡방향(transverse)의 이송공분산에 대한 모멘트를 유도했으며 종방향의 이송공분산,  $X_{II}^R(t)$ 은 아래의 식 (4)과 같다.

$$X_{II}^R(t) = \frac{X_{II}^R(t)}{L^2 \sigma_y^2} = (Z_R^2 \mp 2Z_R)(e^{-t} + t - 1) \mp 4Z_R B(t) + X_{II}^R(t) \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_y^2$ 는  $\ln K$ 의 분산도, 즉, 산출된 임의장의 불균질도이다. 입방형 초기오염원으로부터 이송되는 오염원의 종방향 중심분산,  $R_{II}^R(t)$ 는 Zhang(2003)에 의해 평가되었다. Zhang(2003)은 종방향 중심분산에 대한 일차근사법에 의한 분석해를 식 (5)와 같이 구하였으며,

$$R_{II}^R(t) = \frac{4}{l_1^2 l_2^2 l_3^2} \int_0^t \int_0^2 \int_0^3 \int_0^t (l_1 - x)(l_2 - y)(l_3 - z)(t - \tau) \cdot [v_{II}^R(\tau + x, y, z) + u_{II}^R(\tau - x, y, z)] d\tau dx dy dz \quad (5)$$

$v_{II}^R$ 은 지연된 유속공분산,  $u_{II}^R$ 은 지연된 중심분산이다. 초기 오염원이 평균 유동방향에 수직방향으로 배열된 선형 오염원의 경우에는  $l_1=0, l_3=0$ 이므로 식 (5)는 식 (6)와 같이 줄어들 수 있다.

$$R_{II}^R(t) = \frac{4}{l_2^2} \int_0^t \int_0^2 (l_2 - y)(t - \tau) v_{II}^R(\tau, y) d\tau dy \quad (6)$$

이들 분석해에 의해 계산된 이차적률들은 시뮬레이션에 의해 계산된 적률들과 서로 비교 검토되었다.

### 추계론적 시뮬레이션

물리화학적 불균질 특성을 가진 매질 내 이송되는 오염원이 보이는 적률계산은 추계론적 시뮬레이션에 의해 시행되었다. 시행된 추계론적 시뮬레이션은 소위 몬테카를로 시뮬레이션으로 알려져 있으며 많은 수의 공통적인 통계학적 특성을 가진 임의장을 산출하여 그들 임의장 내 이송되는 오염원의 적률을 계산한다. 따라서 시뮬레이션은 대략 영역디자인, 임의장산출, 유동모델, 입자추적 및 적률계산 등의 다섯 단계로 구성된다.

시뮬레이션 영역은 x방향으로 512, y방향으로 256개의 셀들로 이루어진 2차원 유한차분격자이다(Fig. 1). 영역은 x, y 방향의 단위길이(unit length)를 각각 갖는 정사각형 셀들로 구성되었다. 고정수두경계조건이 영역의 x방향

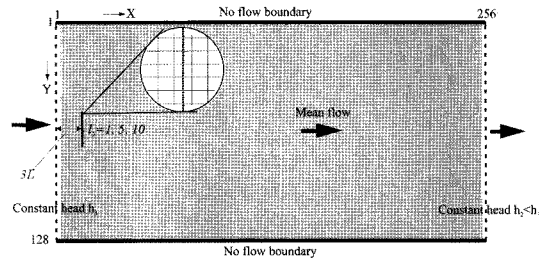


Fig. 1. Schematic diagram showing the location of the initial plume source and boundary conditions of the simulation domain.

양쪽 끝에 설정되었고 no-flow 경계조건이 영역의 y방향 양끝에 위치하여 영역 내에서는 x 방향으로의 균일한 지하수흐름을 갖는 통계학적 등방특성 갖는다.  $\ln K$ 의 상관거리는 3으로 각 단위격자의 길이는  $0.33L$ 과 같다. 설정된 경계조건효과에 의해 영향을 받는 영역은 경계로부터  $3L$  안쪽 영역(Bellin *et al.*, 1992)이기 때문에, 적률계산시에는 경계조건에 영향을 피하기 위해 각각의 경계로부터  $3L$ 의 거리만큼 떨어져 있는 내부영역을 따로 설정하여 입자추적 시 내부영역 내 입자의 이동만을 모델링하였다.

시뮬레이션의 다음 단계는 임의장을 산출하는 것이며 Zhang and Seo (2004)는 최근 물리적 불균질 특성을 가진 매질 내 적률변화에 관한 연구에서, 사용되는 임의장의 수에 따라 결과가 크게 영향을 받음을 밝힌바 있으며, 높은 불균질도를 가진 경우 최소 1600개 이상의 임의장이 사용되어야 함을 주장한 바 있다. 불균질도가 각기 다른 임의장 내 이송되는 오염원의 적률변화는 이전 연구(서병민, 2005)를 통해 다루어졌기 때문에, 이 연구에서는 다양한 불균질도에 대해서는 다루어지지 않았다. 비교적 낮은 불균질도, 에 대해서만 시뮬레이션되었으며 총 1600개의 각기 다른 임의장이 산출되었다. 산출된 임의장과 정(+)의 상관관계를 갖는 분배계수장 및 지연계수장 또한 산출되어 시뮬레이션에 이용되었다. 산출된 투수계수, 분배계수, 및 지연계수 임의장들 간의 상호관계는 식 (7)과 같다.

$$K_d(X) = a \cdot K(X), R(X) = 1 + K_d(X), V_R(X) = V(X)/R(X) \quad (7)$$

식 (7)에서  $K(X)$ 는 투수계수  $K$  임의장,  $K_d(X)$ 는 분배계수 임의장,  $a$ 는 지연요소(retardation factor),  $R(X)$ 는 지연계수 임의장, 그리고  $V_R(X)$ 는 지연유속이다.

임의장은  $\ln K$ 의 평균값, 분산, 상관거리 등을 이용하여 등방지수공분산함수(isotropic exponential covariance

function)에 의해 산출된다. 임의장 산출에 사용된 난수 생성기(random number generator)는 Robin *et al.*(1993)에 의해 발표되었으며 Burr *et al.*(1994)에 의해 최초로 3차원 이방성대수층에 대한 시물레이션에 이용되었다. 이전 연구(Zhang and Seo, 2004)를 통해서도 그 이용도가 입증된 바 있다. 생성된 임의장들이 갖는 통계학적 특성이 입력 인자와 잘 일치하는지를 알아보기 위해 시물레이션된 변동도(variogram)는 Fig. 2(심볼)에 표시되었으며 시물레이션된 변동도들은 지수모델변동도(곡선),  $\gamma_Y = \sigma_Y^2[1 - \exp(-3r/\lambda)]$ , 와 잘 일치함을 보이고 있다.

시물레이션의 다음단계는 산출된 1600개의 임의장들을 대상으로 지하수 정류유동방정식(8)을 이용하여 block centered finite difference scheme에 의한 각 절점에서의 수두계산이다. 수두계산은 3차원 유한차분 지하수 모델링 프로그램으로 널리 사용되고 있는 MODFLOW가 사용되었다. 모델영역 전반에 걸쳐 유동하는 지하수의 평균 수리경사는 0.00298로 설정되었다.

$$\nabla \cdot [K(x) \nabla h] \tag{8}$$

수두계산의 다음단계는 입자추적(particle tracking)이며 입자추적을 위해서는 잘 알려져 있는 코드인 MODPATH가 이용되었다. 세가지 크기 다른 길이(0)의 선형 비반응성(non-reactive) 오염원이 추적되었다. 선형오염원은 평균 유동방향(x 방향)에 수직방향(y 방향)으로 나열되었으며 경계효과를 피하기 위해 좌측 고정수두경계에서 3L(9셀)만큼의 거리에 위치했다. 초기 오염원은 길이에 따라 크기 다른 수의 오염물질 입자들로 구성되며 각 셀에 5개씩의 입자들을 가진다. 초기 오염원으로부터 기원된 오염원은

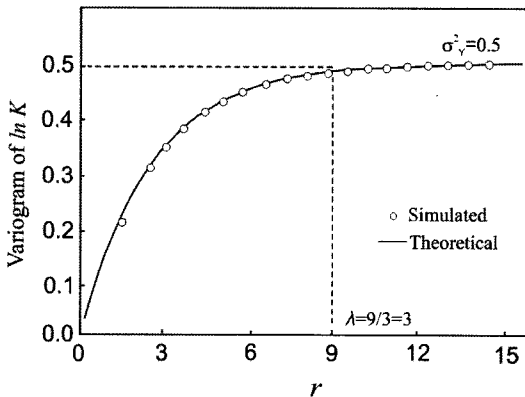


Fig. 2. The simulated (the open circles) and theoretical (the curves) variogram of  $\ln K$ , as a function of separation distance,  $r$ .

지하수의 흐름을 따라 이동해 가며 그 오염원을 형성하는 입자들의 추적은 하나의 입자라도 내부영역을 벗어나게 되면 중지되도록 설정하였다.  $m$ 개의 임의장에 대해 입자추적이 시행된 후, 각 임의장에 대해 종방향 오염원 중심위치,  $R_{11}^{R,m}(t,l)$ 와 이차공간적률,  $S_{11}^{R,m}(t,l)$ 이 계산되었으며 계산과정은 각각 식 (9)와 식 (10)과 같다.

$$R_{11}^{R,m}(t,l) = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N x_1^{m,p}(t) \tag{9}$$

$$S_{11}^{R,m}(t,l) = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N [x_1^{m,p}(t) - R_{11}^{R,m}(t,l)][x_1^{m,p}(t) - R_{11}^{R,m}(t,l)] \tag{10}$$

여기서,  $x_1^{m,p}(t)$ 는  $m$  번째 임의장에서의  $t$  시간 경과 후  $p$ 번째 입자의 위치를 의미하며  $N$ 은 총 입자수를 지시해 준다.  $M$ 은 시물레이션에 이용된 총 임의장의 수이며 이 연구에서는 총 1600개의 크기 다른 임의장이 사용되었다. 오염원 중심의 평균값,  $\langle R_{11}^R(t,l) \rangle$ , 오염원들의 평균 이차공간적률,  $\langle S_{11}^R(t,l) \rangle$ , 그리고 오염원 중심공분산,  $R_{11}^R(t,l)$ 은 식 (11), (12) 및 (13)에 의해서 계산되었다.

$$\langle R_{11}^R(t,l) \rangle = \frac{1}{M} \sum_{M=1}^M R_{11}^{R,m}(t,l) \tag{11}$$

$$\langle S_{11}^R(t,l) \rangle = \frac{1}{M} \sum_{M=1}^M S_{11}^{R,m}(t,l) \tag{12}$$

$$R_{11}^R(t,l) = \frac{1}{M} \sum_{M=1}^M [R_{11}^{R,m}(t,l) - \langle R_{11}^R(t,l) \rangle] [R_{11}^{R,m}(t,l) - \langle R_{11}^R(t,l) \rangle] \tag{13}$$

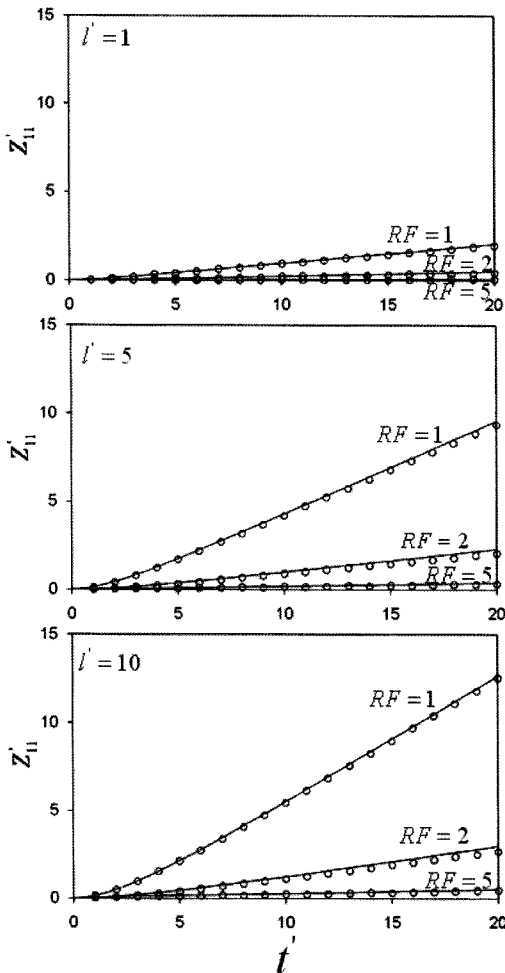
일단  $\langle S_{11}^R(t,l) \rangle$ 과  $R_{11}^R(t,l)$ 이 계산되면, 에르고딕 오염원의 이차공간공분산,  $X_{11}^R(t)$ ,이 적률들 간의 관계식 (1)에 의해 얻어질 수 있다.

### 결과 및 토론

물리·화학적 불균질 특성을 가진 임의장 내 이동되는 오염원에 대한 시물레이션은  $\sigma_Y^2 = 0.5$ 의 비교적 낮은 불균질도, 크기 다른 세가지 크기의 초기 선형오염원( $l_2' = 1, 5, 10$ ), 그리고 세가지 다른 등급의 지연요소( $a = 1, 2, 5$ )에 대해 시행되었다. 1600개의 크기 다른 임의장에 대한 시물레이션 결과 최종적으로 산출된 적률은 무차원 종이차공간적률,  $Z_{11}^R(t,l)$ 과 무차원 종오염원중심분

산,  $R_{11}^R(t, l')$  및 무차원 단일입자종이송분산,  $X_{11}^R(t)$  등이며 무차원 시간 ( $t'$ )에 대해서 Fig. 1, Fig. 2 및 Fig. 3에 각각 심볼로 제시되었다. 또한 그에 따른 Bellin *et al.* (1993) 및 Zhang(2003)에 근거한 일차근사법에 의한 이론적 결과가 곡선의 형태로 함께 제시되었다.

종이차공간적률에 대한 시뮬레이션 결과에서는 다음과 같은 주목할 점들이 관찰된다(Fig. 3). (1) 종이차공간적률,  $Z_{11}^R(t, l')$ 은 무차원시간이 증가함에 따라, 즉 오염원의 이송이 진행됨에 따라, 증가한다. 이는 이전의 연구(Zhang and Seo, 2004; Seo, 2005)에서 제시되었던 결과와 같은 결과이며, 오염원이 이송되는 동안에 그 크기가 증가



**Fig. 3.** The simulated dimensionless longitudinal second spatial moments,  $Z_{11}^R(t, l')$  (the open circles) as functions of the dimensionless time,  $t'$ , for  $\sigma_Y^2 = 0.5$ ; a)  $Z_{11}^R(t, l')$  for  $l'_2 = 1$ ; b)  $Z_{11}^R(t, l')$  for  $l'_2 = 5$ ; c)  $Z_{11}^R(t, l')$  for  $l'_2 = 10$ . The curves are the corresponding first order analytical solutions obtained by Dagan (1988).

함을 제시해 주는 것이다. (2) 종이차공간적률,  $Z_{11}^R(t, l')$ 은 초기 오염원의 크기가 증가함에 따라, 즉  $l'_2$ 가 1, 5 및 10으로 증가함에 따라 증가한다. 이 또한 물리적 불균질 특성을 가진 매질에 대한 연구결과와 같은 결과로, 초기 오염원의 크기가 클수록 오염원의 분산도가 커짐을 의미한다. (3) 종이차공간적률,  $Z_{11}^R(t, l')$ 은 자연요소,  $a$ 가 증가함에 따라 감소한다. 이는 매질이 갖는 흡착성이 오염원의 이송을 억제해주는 역할을 하여, 흡착성이 클수록 오염원의 분산도는 감소함을 의미한다. 또한, 자연계수와 매질의 불균질 특성이 정(+)의 상관관계를 가지고 있기 때문인 것으로 판단된다. (4) 시뮬레이션된 종이차공간적률,  $Z_{11}^R(t, l')$ 은 이론적 일차분석해법(Fig. 3에서의 곡선)과 제시된 무차원 시간동안에는 적어도 잘 일치함을 보인다.

중오염원중심분산,  $R_{11}^R(t, l')$ 의 적률변화는 Fig. 4에 도시되었으며, Fig. 3과 유사한특성 및 다른 특성 몇가지가 동시에 관찰된다. (1) Fig. 3에서와 같이 오염원 이송이 진행됨에 따라 중오염원중심분산,  $R_{11}^R(t, l')$ 은 증가한다. 이는 오염원이 이송될수록 오염원의 중심점에 대한 불확실성이 증가함을 지시해준다. (2) 초기오염원의 크기,  $l'_2$ 가 증가할수록 중오염원중심분산,  $R_{11}^R(t, l')$ 은 감소한다. 이는 초기 오염원의 크기가 클수록 오염원 중심에 대한 불확실성이 감소함을 의미하는 것으로,  $l'_2$ 가 증가하면 할수록 중오염원중심분산,  $R_{11}^R(t, l')$ 는 점점 감소하여 0에 가까워지며, 이런 경우는 에르고딕 이송이라 한다. 이 연구의 시뮬레이션 결과는  $l'_2$ 가 증가함에 따라 중오염원중심분산,  $R_{11}^R(t, l')$ 이 감소한다 하더라도 0에 가까워지지 않았으므로 에르고딕 이송상태에 아직 도달하지 않았음을 지시해준다. (4) 자연요소  $a$ 가 1, 2, 5로 증가함에 따라 중오염원중심분산,  $R_{11}^R(t, l')$ 은 현저히 감소함이 관찰된다. 이는 앞의 Fig. 3에서 제시된 종이차공간적률,  $Z_{11}^R(t, l')$ 에 대한 시뮬레이션 결과와 같으며, 자연요소가 증가할수록 오염원 중심점에 대한 불확실성 역시 감소하여 예측이 용이해짐을 의미한다.

시뮬레이션 및 일차 분석해에 의해 계산된 단일입자 종이송분산(달리 표현하면 에르고딕 오염원의 무차원 종이차공간적률),  $X_{11}^R(t)$ 이 Fig. 5에 심볼과 곡선의 형태로 각각 제시되었으며 시뮬레이션 결과에서는 다음과 같이 몇가지 주목할 만한 사항들이 관찰된다. (1)시뮬레이션된 단일입자종이송분산,  $X_{11}^R(t)$ 은 무차원 시간이 증가할수록, 즉 오염원 이송이 진행될수록 증가한다. (2)시뮬레이션된 단일입자종이송분산,  $X_{11}^R(t)$ 은 자연요소  $a$ 가 증가할 수록 감소한다. (3)시뮬레이션된 무차원 단일입자종이송분산,  $X_{11}^R(t)$ 은 세가지 다른 등급의 자연요소

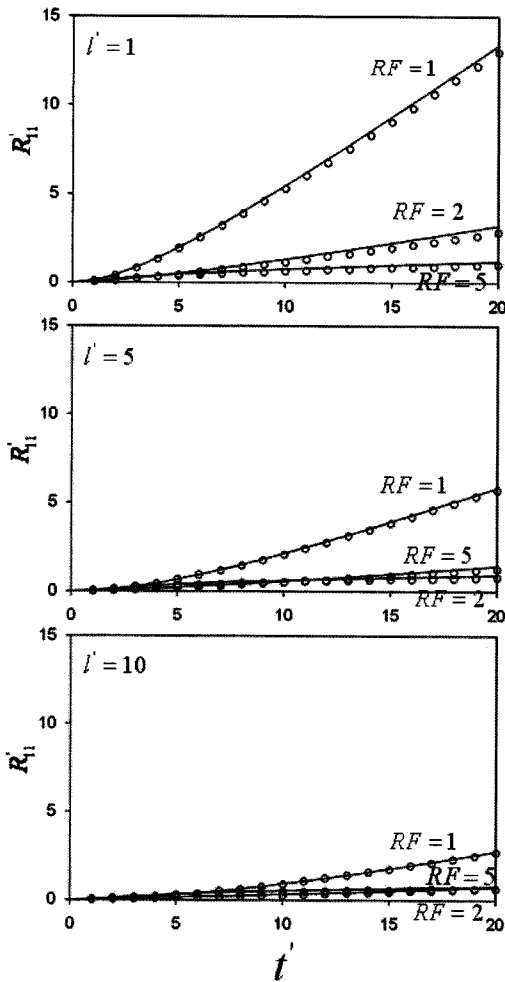


Fig. 4. The simulated dimensionless longitudinal plume centroid variance,  $R_{11}^R(t, I')$  (the open circles) as functions of the dimensionless time,  $t'$ , for  $\sigma_y^2 = 0.5$ ; a)  $Z_{11}^R(t, I')$  for  $l_2' = 1$ ; b)  $R_{11}^R(t, I')$  for  $l_2' = 5$ ; c)  $R_{11}^R(t, I')$  for  $l_2' = 10$ . The curves are the corresponding first order analytical solutions obtained by Zhang (2003).

a=1, 2, 5에 대해서 모두 일차근사법에 의한 이론적 결과(Bellin et al., 1993)와 비교적 잘 일치한다. (4)시뮬레이션된 단일입자종이동분산,  $X_{11}^R(t')$ 은 초기 오염원의 크기에 영향을 받지 않아  $l_2' = 1, 5, 10$ 의 세 경우 거의 같은 값을 보이나 RF=1인 경우 이송 후기에 서로 약간 일치하지 않는 경향이 있다.  $X_{11}^R(t')$ 은 단일입자의 이송에 관한 적률이기 때문에  $Z_{11}^R(t, I')$ 이나  $R_{11}^R(t, I')$ 과는 달리 이론적으로는 초기 오염원의 크기에 따라 적률이 변화되지 않는다. 따라서 세 개의 다른 크기의 오염원으로부터 얻어진 값이 거의 같은 시뮬레이션 결과가 얻어

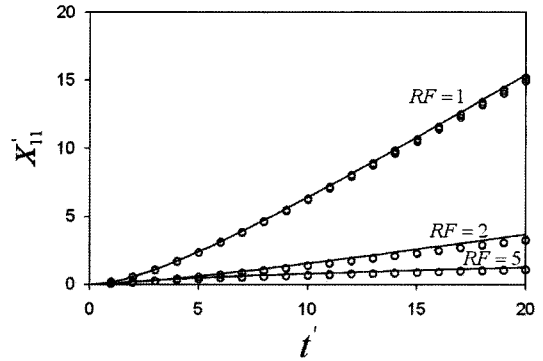


Fig. 5. The simulated dimensionless second spatial moments of an ergodic plume or the one particle displacement variances,  $X_{11}^R(t')$ , as functions of the dimensionless time,  $t'$ , for  $RF=1, 2, 5$ . The curves are the corresponding first order solutions obtained by Bellin et al.(1993).

져야 한다. Fig. 5에서는 각기  $l_2'$ 값을 갖는 시뮬레이션 결과들이 거의 같은 위치에 표시되는데 이는 앞에서 언급된 바와 같은 이유의 결과이며 시뮬레이션의 이론적 타당성을 뒷받침해주는 결과이기도 하다. 이들 관찰사항들은 결과적으로, Dagan(1988), Bellin et al.(1993) 및 Zhang(2003)의 일차근사법에 의한 이론은 지연된 종적률  $X_{11}^R(t')$ 에 대해서 상당히 정확한 근사값을 제공하고 있음을 결론지을 수 있으며, 이 결과는 이전의 몇몇 연구(Barry et al., 1988; Rubin, 1990; Chin and Wang, 1992; Bellin et al., 1992; Zhang and Lin, 1998; Zhang and Seo, 2004)에서 행해졌던 물리적 불균질 특성을 가진 매질 내 오염물 이송에 대한 적률변화 연구결과들과 일치하는 것이다.

### 요약 및 결론

영역 내 균일한 평균유속  $\mu$ 를 가지며 물리화학적 불균질 특성을 가진 매질 내 이송되는 오염물이 보이는 적률변화를 알아보기 위해 등방매질 내 이송되는 비반응성 오염물에 대한 2차원 몬테카를로 시뮬레이션이 시행되었다. 시뮬레이션 동안에 발생할 수 있는 불확실성을 감소하기 위해 여러 가지 방법들이 시도되었으며, 투수계수  $K(x)$ 가 로그-정규분포를 가지며 비교적 낮은 불균질도  $\sigma_y^2 = 0.5$ 인 1600개의 각기 다른 임의장이 산출되었다. 투수계수와 정(+)의 관계를 가진 지연계수장이 세가지 다른 값의 지연요소 a=1, 2, 5에 의해 산출되었으며, 평균유동 방향에 수직방향으로 배열된 세가지 각기 다른 크기의 초기 오염원  $l_2' = 1, 5, 10$ 으로부터 이송되는 오

염운을 시뮬레이션하기 위해 입자추적이 시행되었다. 오염운의 종방향 분산 및 중심점의 불확실성을 지시해주는 지연된 종이차공간적률  $Z_{11}^R(t, I)$ , 지연된 오염운 종 중심분산  $R_{11}^R(t, I)$ , 그리고 단일입자종이송분산  $X_{11}^R(t)$  이 계산되었으며, 그 결과에 근거하여 다음과 같은 주된 결론을 얻을 수 있다.

1. 종이차공간적률,  $Z_{11}^R(t, I)$ 은 오염운의 이송이 진행됨에 따라 증가하며 초기 오염운의 크기가 증가함에 따라 증가한다. 이는 이전의 물리적 불균질 특성을 가진 매질에 대한 연구결과(Zhang and Seo, 2004; 서병민, 2005)와 같은 결과이다. 또한 종이차공간적률,  $Z_{11}^R(t, I)$ 은 지연요소,  $a$ 가 증가함에 따라 감소하며, 일차분석해에 의한 이론적 결과와 적어도 제시된 무차원 시간동안에는 잘 일치함을 보인다.

2. 종오염운중심분산,  $R_{11}^R(t, I)$ 은 오염운 이송이 진행됨에 따라 증가하며, 종이차공간적률,  $Z_{11}^R(t, I)$ 과는 달리 초기오염원의 크기,  $I_2$ 가 증가할수록 감소한다. 그러나 설정된 시뮬레이션에 의해서는 아직 에르고딕 이송상태에 도달하지 않았음을 지시해준다. 또한, 지연요소  $a$ 가 1, 2, 5로 증가함에 따라 종오염운중심분산,  $R_{11}^R(t, I)$ 는 현저히 감소하여 지연요소가 증가할수록 오염운 중심점에 대한 불확실성이 감소함을 보인다.

3. 시뮬레이션된 단일입자종이송분산,  $X_{11}^R(t)$ 은 무차원 시간이 증가할수록 증가하며 지연요소  $a$ 가 증가할수록 감소한다. 단일입자종이송분산,  $X_{11}^R(t)$ 은 초기 오염운의 크기에 영향을 받지 않아  $I_2=1, 5, 10$ 의 세 경우 거의 같은 값을 보이며 세가지 다른 등급의 지연요소  $a=1, 2, 5$ 에 대해서 모두 일차근사법에 의한 이론적 결과(Bellin *et al.*, 1993)와 비교적 잘 일치한다. 결과적으로, Dagan (1988), Bellin *et al.*(1993) 및 Zhang(2003)의 일차근사법에 의한 이론은 지연된 단일입자종이송분산,  $X_{11}^R(t)$ 에 대해서 상당히 정확한 근사값을 제공하고 있음을 결론 지을 수 있다.

## 사 사

본 연구는 2007년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비(2007-0097) 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

서병민, 2005, 불균질도가 높은 대수층 내에서의 비에르 고딕 용질이동에 관한 수치시뮬레이션, 지질공학회지,

15(3), 245-255.

- Bellin, A., Salandin, P., and Rinaldo, A., 1992, Simulation of dispersion in heterogeneous porous formations: statistics, first order theories, convergence of computations, *Water Resour. Res.*, 28(9), 2211-2227.
- Barry, D., Coves, A.J., and Sposito, G., 1988, On the dagan model of solute transport in ground-water application to the Borden site. *Water Resour. Res.*, 24(10), 1805-1817.
- Burr, D.T., Sudicky, E.A., and Naff, R.L., 1994, Nonreactive and reactive solute transport in three-dimensional heterogeneous porous media: Mean displacement, plume spreading, and uncertainty, *Water Resour. Res.*, 30(3), 791-815.
- Chin, D.A. and Wang, T., 1992, An investigation of the validity of first order stochastic dispersion theories in isotropic porous media, *Water Resour. Res.*, 28(6), 1531-1542.
- Cushman, J.H., Hu, B.X., and Ginn, T.R., 1994, Non-equilibrium statistical mechanics of preasymptotic dispersion, *J. Stat. Phys.*, 75, 859-878.
- Cvetkovic, V. and Dagan, G., 1994, Transport of Kinetically sorbing solute by steady random velocity in heterogeneous porous formations, *J. Fluid Mech.*, 265, 189-215.
- Dagan, G., 1988, Time-dependent macrodispersion for solute transport in anisotropic heterogeneous aquifers, *Water Resour. Res.*, 24(9), 1491-1500.
- Dagan, G., 1990, Transport in heterogeneous porous formations: Spatial moments, ergodicity, and effective dispersion, *Water Resour. Res.*, 26(6), 1281-1290.
- Dagan, G., 1991, Dispersion of a passive solute in non-ergodic transport by steady velocity fields in heterogeneous formations, *J. Fluid Mech.*, 233, 197-210.
- Dentz, M., Kinzelbach, H., Attinger, S., and Kinzelbach, W., 2002, Temporal behavior of a solute cloud in a heterogeneous porous medium, 3. Numerical simulations, *Water Resour. Res.*, 38, 23-1-13.
- Espinoza, C. and Valocchi, A.J., 1997, Stochastic analysis of one-dimensional transport of kinetically adsorbing solutes in chemically heterogeneous aquifers, *Water Resour. Res.*, 33(11), 2429-2445.
- Fiori, A. and Belline, A., 1999, Non-ergodic transport of kinetically sorbing solutes, *J. Contam. Hydrol.*, 40, 201-219.
- Federico, V.D. and Zhang, Y.K., 1999, Solute transport in heterogeneous porous media with long-range correlations, *Water Resour. Res.*, 35(10), 3185-3192.
- Garabedian, S.P., Leblanc, D.R., Gelhar, L.W., and Celia, M.A., 1991, Large-scale natural gradient tracer test in sand and gravel, Cape Code, Massachusetts. 2. Analysis of Spatial moments for a non-reactive tracer, *Water Resour. Res.*, 27(5), 911-924.
- Hassan, A., Cushman, J.H., and Delleur, J.W., 1998, A Monte Carlo assessment of eulerian flow and transport perturbation models, *Water Resour. Res.*, 34, 1143-1163.
- Hassan, A., Andricevic, R. and Cvetkovic, V., 2002, Evaluation of analytical solute discharge moments using numerical modeling in absolute and relative

- dispersion frameworks, *Water Resour. Res.*, 38, 1-1-8.
- Hubbard, S., Chen, J., Peterson, J., Majer, E.L., Williams, K.H., Swift, D.J., Mailloux, B., and Rubin, Y., 2001, Hydrogeological characterization of the South Oyster vacterial transport site using geophysical data, *Water Resour. Res.*, 37(10), 2431-2456.
- Killey, R.W.D. and Moltyaner, G.L., 1988, Twin lake tracer tests: setting methodology, and hydraulic conductivity distribution, *Water Resour. Res.*, 24(10), 1585-1612.
- Kitanidis, P.K., 1988, Prediction by the method of moments of transport in a heterogeneous formation, *Jour. Hydrology*, 102(1-4), 453-473.
- Mackay, D.M., Freyberg, D.L., Roberts, P.V., and Cherry, J.A., 1986, A natural gradient experiment in a sand aquifer, 1. Approach and overview of plume movement, *Water Resour. Res.*, 22, 2017-2030.
- Rajaram, H. and Gelhar, L.W., 1993, Plume scale-dependent dispersion in heterogeneous aquifer, 1. Lagrangian analysis in a stratified aquifer, *Water Resour. Res.*, 29(9), 3249-3260.
- Robin, M.J.L., Gutjahr, A.L., Sudicky, E.A., and Wilson, J.L., 1993, Cross-correlated random field generator with direct Fourier transform method, *Water Resour. Res.*, 29(7), 2385-2397.
- Rubin, Y., 1990, Stochastic modeling of macrodispersion in heterogeneous porous media, *Water Resour. Res.*, 26(1), 133-141.
- Selroos, J.O., 1995, Temporal moments for non-ergodic solute transport in heterogeneous aquifers, *Water Resour. Res.*, 31(7), 1705-1712.
- Zhang, D. and Neuman, S.P., 1995, Eulerian-Lagrangian analysis of transport conditioned on hydraulic data, 3. Spatial moments, travel time distribution, mass flow rate, and cumulative release across a compliance surface, *Water Resour. Res.*, 31(1), 65-75.
- Zhang, Y.K., Zhang, D., and Lin, J., 1996, Non-ergodic solute transport in three-dimensional heterogeneous isotropic aquifers, *Water Resour. Res.*, 32(9), 2955-2963.
- Zhang, Y.K. and Zhang, D., 1997, Time-dependent dispersion of non-ergodic plumes in two-dimensional heterogeneous porous media, *Journal of Hydrologic Engineering*, 2(2), 91-94.
- Zhang, Y.K. and Federico, V.D., 1998, Solute transport in three-dimensional heterogeneous media with a Gaussian covariance of log hydraulic conductivity, *Water Resour. Res.*, 34(8), 1929-1934.
- Zhang, Y.K. and Lin, J., 1998, Numerical simulations of transport of non-ergodic plumes in heterogeneous aquifers, *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 12(2), 117-140.
- Zhang, Y.K. and Federico, D.V., 2000, Nonergodic solute transport in heterogeneous porous media: Influence of multiscale structure, in Zhang, D., and Winter, C.L., eds., *Theory, Modeling, and Field Investigation in Hydrogeology: A Special Volume in Honor of Shlomo P. Neuman's 60th Birthday*: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper, 348, 61-72.
- Zhang, Y.K., 2003, Non-ergodic solute transport in physically and chemically heterogeneous porous media, *Water Resour. Res.*, 39(7), 1197.
- Zhang, Y.K. and Seo, B., 2004, Numerical simulations of non-ergodic solute transport in three-dimensional heterogeneous porous media, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 18, 205-215.

---

2008년 12월 1일 원고접수, 2009년 3월 24일 게재승인

#### 서병민

호서대학교 환경공학과  
336-795, 충남 아산시 배방면 세출리 165  
Tel: 041-540-9650  
e-mail: bmseo@hoseo.edu

#### 정준오

호서대학교 환경공학과  
336-795, 충남 아산시 배방면 세출리 165  
Tel: 041-540-5742  
e-mail: jojung@hoseo.edu

#### 김영우

호서대학교 자동차공학과  
336-795, 충남 아산시 배방면 세출리 165  
Tel: 041-540-9683  
e-mail: ywkim@hoseo.edu

#### 황승민

호서대학교 벤처전문대학원  
137-867, 서울시 서초구 서초3동 1463-10  
Tel: 02-523-3015  
e-mail: hwangsm@hoseo.edu