# 비정체형 피압투수장내의 물질전달에 관한 추계학적 모델 및 현상 조사

Stochastic Model and Field Investigation of Mass Transport in Nonstationary Confined Aquifers

성관제*

## 1. 서 론

대수층내에서 일어나는 유동 및 물질전달 현상은 유동장 내의 유체역학적 상황(수두 분포 등)뿐 아니라 유동장을 이루는 비균질한 다공성 매질의 수리-지질학적 상태(투수계수 분포 등)에도 영향을 받는다. 그러나 대수층의 투수계수는 실험용 표본이나 국지적인 경우와 달리 공간적으로 극심한 변화를 보일 뿐 아니라 이들 자료를 현장에서 획득하기에는 경제적, 시간적으로 큰 어려움이 따른다. 따라서 대수층의 투수계수를 공간적으로 정확히 표현하는 것은 거의 불가능하며 이와 같은 자료의 빈곤과 무작위성으로 인한 문제점을 극복하고자 지하수 유동 및 물질전달 해석에 추계학적(stochastic) 방법이 개발되었고 현재는 큰 성과를 가지고 사용되고 있다.[Dagan, 1989] 추계학적 해석은 투수계수와 같은 변수들을 랜덤함수로 취급하여 공간에 대한 평균치와 랜덤한 변동 부분의 합으로 나타내고 이들의 통계학적 특성을 규명함으로써 확정적인(deterministic) 해와 달리 평균, 분산, 확률밀도 또는 누적분포 등을 통하여 결과를 추정하고 있다.

한편, 현재까지의 연구들은 대부분 투수계수장이 정체형, 즉 그 평균치가 일정하다는 가정 아래 수행되어 왔는데 이는 실제 현장에서 나타나는 현상을 정확히 표현한 것이라기보다는 수학적 편의에 기인하였다고 보아야 할 것이다. 최근의 여러 현장 조사에서 투수장에 공간적으로 경향이 있다고 믿어지는 결과들이 발표되었고 [Woodbury와 Sudicky, 1991; Rehfeldt 등, 1992] 투수계수가 비정체형인 경우의 대수층 내부 유동 및 물질전달에 관한 연구들이 발표되었다.[Loaiciga 등, 1993; Rubin과 Seong, 1994; Indelman과 Rubin, 1995; 성관제, 1996] 본 연구에서

* 동국대학교 기계공학과

는 Rubin과 Seong[1994]이 제시한 비정체형 유동 및 물질전달 모델 중 투수계수장과 수두 분포의 기울기벡터가 직교하는 경우의 결과를 유사한 특성을 나타내는 현장자료를 이용하여 검증하고 이 결과를 투수계수장의 경향을 무시한 정체형 모델 결과와 비교하였다.

## 2. 비정체형 투수장의 유동 및 물질전달 모델

본 연구에서 사용한 추계학적 해들은 피압대수층에 외부에서 유입이 없는 2차원 정상 유동 경우를 해석한 결과이고 피압대수층의 대수투수계수는 그 평균치가 다음과 같이 선형이라고, 즉 주 흐름 방향($x_1$ 방향)과 수직한 방향($x_2$ 방향)으로 기울기가 $\alpha_2$라고 가정하였다.

$$Y(\boldsymbol{x}) = \langle Y(\boldsymbol{x}) \rangle + Y'(\boldsymbol{x}) = m_o + \alpha_2 x_2 + Y'(\boldsymbol{x}) \tag{1}$$

여기서 < >는 평균연산자이고 랜덤 변동치인 $Y'$은 정체형이라고 가정한다. 식 (1)로 정의된 투수계수를 연속방정식과 Darcy의 법칙에 적용시키면 $Y'$의 랜덤한 성질로 인하여 stochastic 편미분방정식인 지배방정식이 유도된다.

$$\alpha_2 \frac{\partial H(\boldsymbol{x})}{\partial x_2} + \nabla^2 H(\boldsymbol{x}) = -\nabla Y'(\boldsymbol{x}) \cdot \nabla H(\boldsymbol{x}) \tag{2}$$

Rubin과 Seong[1994]은 윗식으로부터 수두 $H$를 $Y$의 표준편차 $\sigma_Y$로 전개하여 $O(\sigma_Y^2)$까지 섭동해를 구하고 이로부터 물질전달 및 이동시간 등에 관하여 연구하였는데 본 논문에서는 이들의 결과 중 물질전달에 관한 결과를 Waste Isolation Pilot Plan(WIPP)현장에 적용하여 투수계수장의 경향을 고려하였을 때와 이를 무시하였을 때 어떤 차이점들이 발생하는지에 관하여 살펴보았다.

특히, 환경평가시 중요하게 고려되는 이동시간(travel time; 다공성매질의 비균질성으로 인하여 랜덤변수로 취급함)의 누적분포함수(cdf)에 관하여 조사하였다. 입자의 변위 확률밀도함수(pdf)를 $f(t;x_1,x_0)$라고 하면, 이동시간의 cdf는 다음과 같다.

$$G(t;X_{cp},x_0) = \text{Prob}\,[x_1 \geq X_{cp}] = \int_{x_0}^{\infty} f(t;x_1,x_0)\,dx = \frac{1}{2}\,\text{Erfc}\left[\frac{X_{cp} - \langle x_1(t) \rangle}{\sqrt{2X_{11}(t)}}\right] \tag{3}$$

여기서 $x_0$는 입자유출지점, $X_{cp}$는 하류방향에 위치한 검사지역까지의 거리, $\langle x_1 \rangle$는 입자의 평균변위, 그리고 $X_{11}$은 하류방향으로의 입자변위 공분산을 나타낸다. 한편, 유출지점이 한곳으로 국한되지 않고 비교적 넓게 퍼져있다면 이동시간 cdf보다는 전체 유출물질의 얼마만큼이 특정지역을 지나갔는가 하는 문제가 중요하

다. 즉,

$$\frac{\triangle M}{M_0} = \frac{1}{A}\int_A G(t;X_{cp},x_0)\,dA \tag{4}$$

를 예측할 필요가 있다. 특히 WIPP현장과 같은 경우 유출영역이 투수계수의 경향과 같은 방향으로 넓게 퍼져있다면 더욱 중요한 문제가 될 것이다.

## 3. WIPP현장의 자료를 사용한 현장 조사

WIPP 현장은 미국 New Mexico에 위치한 핵폐기물 저장소로서 다년간에 걸친 실험을 통하여 투수계수 및 수두분포가 알려져 있는데 투수계수는 서쪽으로 증가하는 경향을 보이고 주 흐름방향은 남쪽인 것으로 밝혀졌다.[LaVenue등, 1995] 그림 1에는 WIPP 현장의 측정공 위치와 투수계수 및 수두의 기울기벡터가 나타나 있다. 이 기울기벡터들은 현장자료(투수계수 30개와 수두 25개)를 선형회기분석하여 얻은 결과로서 그 사이각은 94.7° 로서 앞에서 언급한 Rubin과 Seong[1994]의 $\alpha_2$-모델과 유사한 상황이다. 여기서 $\alpha_2$-모델의 결과를 사용하기 위하여 투수계수를 수두의 기울기벡터와 수직한 방향으로 선형회기분석한 결과가 그림 2에 나타나 있고 이로부터 투수계수장에 앞에서 언급한 경향이 확실히 존재함을 알 수 있으며 이를 고려한 경우와 무시한 경우의 분석결과를 나타내었다. 물질전달 해석에 필요한 수리-지질학적 파라미터들(투수계수 integral scale $I_Y$, 분산 $\sigma_Y^2$, 기울기 $\alpha_2$ , 수

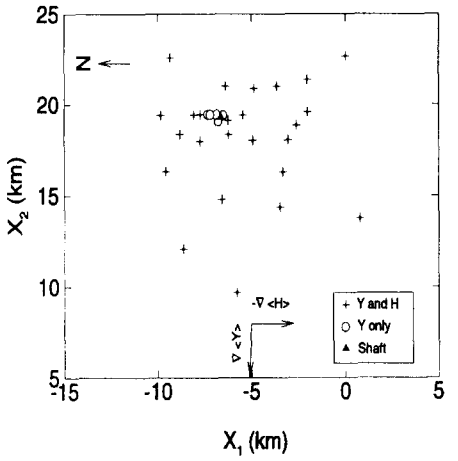



그림 1. WIPP현장의 측정공 위치 및 투수계수와 수두의 기울기벡터

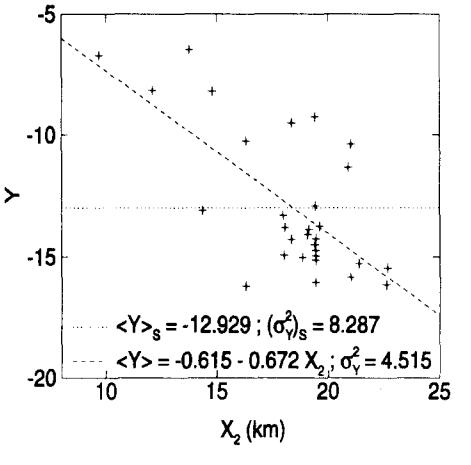


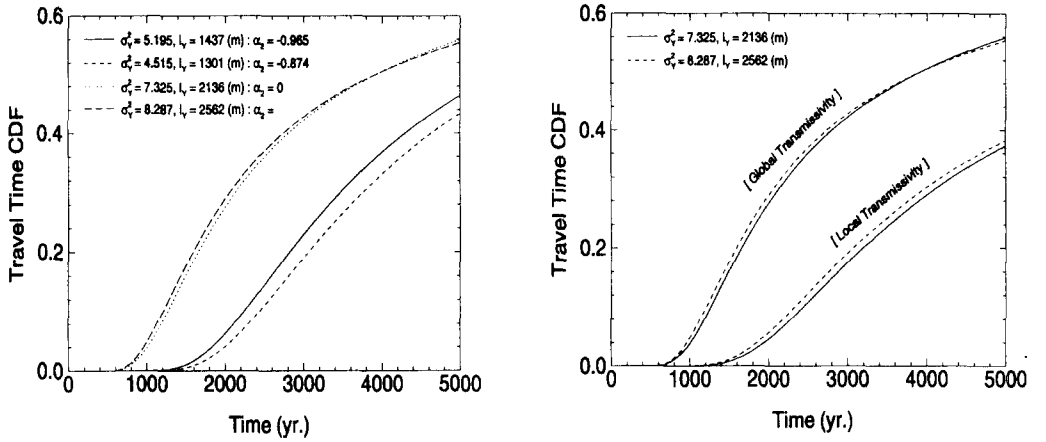

그림 2. 투수계수를 $x_2$-방향으로 선형회기분석한 결과

두기울기 $J_0$ 등)은 투수계수와 수두의 변이도 모델링을 통하여 연구되었고[성관제와 Rubin, 1996] 본 논문에서는 이 파라미터들을 사용하여 만일 저장폐기물이 유출될 경우 지하수층내에서의 이동에 관하여 연구하였다.

3.1 이동시간의 누적분포함수(cdf)

입자의 이동시간은 입자가 유출된 지점으로부터 하류방향으로 임의로 정한 거리, $X_{cp}$ 만큼 떨어진 곳에 도달하는데 걸리는 시간으로서 유동장을 이루는 다공성 매질의 비균질성으로 인하여 랜덤함수가 되고 따라서 대수층의 수리-지질학적 파라미터를 사용하여 그 누적분포함수를 구할 수 있다. 이 cdf는 환경분야에서 특히 필수적으로 오염지역의 오염 정도를 예측하거나 원상복구시 필수적이라 할 수 있다.

그림 3에는 경향을 고려한 $\alpha_2$-모델 및 이를 무시한 정체형 $\alpha=0$ 모델의 해석결과, WIPP현장 출입구위치에서 유출된 입자가 검사거리 5km일 때, 이동시간 cdf가 주어져있으며 그림 (a)에서 볼 수 있듯이 두 모델이 완전히 다른 결과를 보이고 있다. 이 때 정체형 모델에서는 전지역(global)의 평균 투수계수를 사용하였다. 한편, 정체형 모델에서 투수계수를 유출지점의 국지적(local)인 값을 사용하면 그림 (b)와 같이 전혀 다른 결과에 도달하게 되며 이 때의 결과는 비정체형 결과와




( a ) ( b )

그림 3. WIPP현장 출입구위치에서의 입자변위 누적밀도함수 (a) $\alpha_2$-모델과 $\alpha$=0-모델 결과 비교 (b) Global 평균치와 local 평균치의 결과 비교.

비교적 근사한 특성을 보인다. 그러나 때에는 그림 4에 나타난 것과 같이 유출 지점의 위치에 상관없이 항상 비정체 결과보다 위험한 예측을 하게됨을 알 수 있다.

3.2 검사거리를 지난 유출량 비교

앞에서 언급한데로 유출지역이 한 곳에 국한되어 있지 않다면, 즉 다른 투수계수를 가지는 곳에서 일시에 일어난다면, 입자 이동시간 cdf는 정의하기도 쉽지 않을 뿐더러 별 의미가 없을 것이다. 따라서 이 때에는 전체 유출량의 얼마만큼이 검사지역을 통과하였는가를, 즉 식(4)와 같이 정의된 mass fraction을 살펴보아야 한다.

그림 5에는 WIPP 출입구를 중심으로 동서방향 양 쪽 500m에 걸쳐 물질이 유출되었을 경우를 가정하여 검사거리 5km인 경우의 mass fraction을 조사한 결과가 나타나 있다. 여기서 알 수 있는 것은 유출 지역 투수계수의 크기가 큰 영향을 미치며 같은 양이 유출되었더라도 그 위치에 따라 검사지역을 통과한 양이 다름을 알 수 있다. 이러한 성질은 저장소의 설계 및 시공 시 또는 유사시 대책 수립에 매우 큰 영향을 미칠 것이다.

이상에서 살펴보았듯이 대수층의 투수계수장에 공간적 경향이 존재한다고 의심될 때에는 철저한 현장자료의 검사를 통하여 이를 확인할 필요가 있으며 경향의

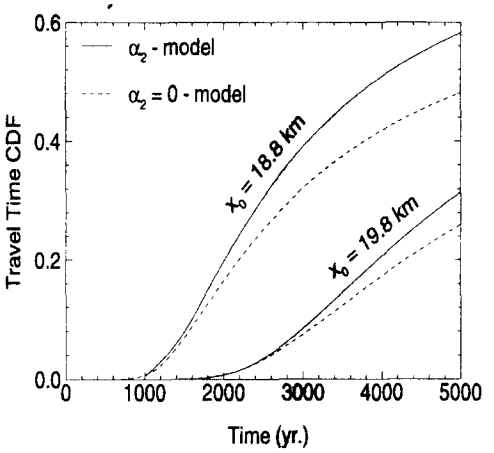



그림 4. 위치에 따른 입자이동시간 cdf의 $\alpha_2$-모델 및 $\alpha$=0 모델 결과 비교

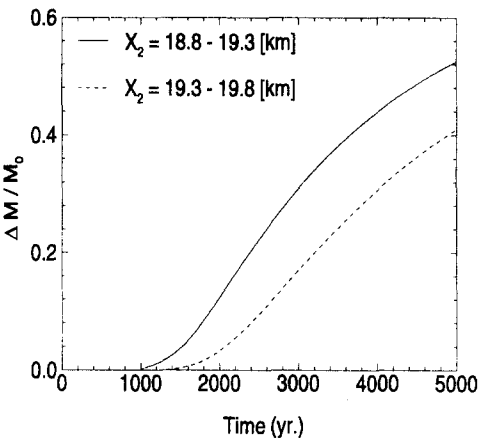



그림 5. 전체 유출량 중 하류방향으로 5km이상 지나간 유출량

존재가 확인된 경우에는 반드시 그 경향의 특성을 충분히 고려한 비정체형 모델을 결과를 사용하여야 한다. 그 경향을 무시하고 단순히 큰 값의 분산을 사용하는 것은 매우 위험하며 특히 WIPP와 같이 환경에 돌이킬 수 없는 영향을 미치는 경우에는 모델 설정을 신중하게 고려할 필요가 있다.

## 4. 참 고 문 헌


성관제, Rubin, R., (1996) "비정체형의 투수율이 존재하는 유동장에서의 stochastic 유동모델의 검증에 관한 연구", 대한기계학회 1996년춘계학술대회논문집B pp. 452-456

성 관 제, (1996) "비정체형 2차원 다공성 매질의 대수투수계수-수두 교차공분산에 관한 연구", 한국수자원학회지 제29권 제5호, pp. 215-222.

Dagan, G. (1989) *Flow and transport in porous formations.* Springer-Verlag.

Indelman, P. and Rubin, Y. (1995) "Flow in heterogenous media displaying a linear trend in the log conductivity. *Water Resour. Res.,* Vol. 31, No. 5, pp. 1257-1265.

LaVenue, A. M., RamaRao, B. S., de Marsily, G., Marietta, M. G.,(1995) "Pilot point methodology for automated calibration of an ensemble of conditionally simulated transmissivity fields, 2. Application, *Water Resour. Res., 31 (3),* 495-516, 1995.

Loaiciga, H. A., Leipnik, R. B., Marino, M. A. and Hudak, P. F. (1993) "Stochastic groundwater flow analysis in the presence of trends in heterogeneous hydraulic conductivity fields." *Math Geol.*, Vol. 25, No. 2, pp. 161-176.

Rehfeldt, K. R., Boggs, J. M., Gelhar, L. W. (1992) "Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer : 3. Geostatistical analysis of hydraulic conductivity." *Water Resour. Res.,* Vol. 28, No. 12, pp. 3325-3336.

Rubin, Y. and Seong, K. (1994), "Investigation of flow and transport in certain cases of nonstationary conductivity fields", *Water Resour. Res.*, Vol. 30, pp. 2901-2911.

Woodbury, A. D. and Sudicky, E. A. (1991). "The geostatistical characteristics of the Borden aquifer." *Water Resour. Res.*, Vol. 27, No. 10, pp. 533-546.