

## 자유면 사질대수층에서의 분산지수 결정

조규현 · 김동주  
고려대학교 지구환경과학과  
djkim@korea.ac.kr

### 요약문

대수층에서 오염물질의 이동은 대류, 확산, 흡착 등의 물리화학적 현상에 영향을 받는다. 지하수 유동과 오염 물질 운송에 관련된 분석은 지하수 자원의 관리와 평가, 복원사업에 필요한 요소이다. 본 연구의 목적은 사질대수층에서의 2차원 plume 모니터링을 통하여 오염운의 관측치와 모사치를 비교하므로써 종분산지수와 횡/종분산지수비를 결정하는 것이다. 실내 자유면 대수층 실험에서 MT3D를 이용한 case study로부터 추정된 종분산지수는 0.4 cm였으며 횡/종분산지수비는 1/5로 나타났다.

**Key words** : dispersivity, box model, sandy aquifer materials, MT3D

### 1. 서론(Introduction)

지표에서 발생한 오염물질의 대수층으로의 유입은 지하수 오염을 야기시키며, 대수층에서 오염물질은 대류, 확산, 흡착 등의 물리화학적 현상에 의해 지배되며 이동을 하게 된다. 지하수 유동과 오염물질 운송 모델링은 지하수 자원의 관리와 평가, 복원사업에 필요한 요소이다. 대수층에서 보존성 화합물의 운송은 공극유속(pore water velocity)과 수리분산계수(hydrodynamic dispersion coefficient)에 영향을 받으며, 수리분산계수의 결정에 필요한 분산지수(dispersivity)는 모델링 연구에 중요한 정보를 제공하게 된다. 오염물질 운송에서 분산지수의 결정에 관한 연구는 실내실험으로부터 결정하는 방법(Lau et al. 1958, Bear 1959, Reynold 1978, Hahn 1986)과 현장실험으로 나눌 수 있다. 현장실험에 의한 방법은 오염운을 mapping 하여 대류-확산 운송방정식(advection-dipersion equation)을 이용하는 방법(Pinder 1973)이 있으며, 대수층에 추적자를 주입하여 natural gradient test(Sudicky et al. 1983, Mackay et al. 1986, LeBlanc et al. 1991)와 forced gradient test(Hoopess and Harleman 1967, Grove and Beetem 1971, Pickens and Grisak 1981)로 분산지수를 측정하는 방법이 있다. 본 연구의 목적은 분산지수 결정에 있어서 실험의 경제성과 용이성 및 정확도를 기하기 위하여 실내 자유면 대수층 모형을 구축하여 사질 대수층에서의 2차원 plume 모니터링을 통하여 오염운의 관측치와 모사치를 비교하므로써 종분산지수와 횡/종분산지수비를 결정하는 것이다.

### 2. 실험재료 및 방법(Materials and Methods)

#### 2.1 2차원 실내 실험(2-D box test)

본 연구에 사용된 실험실 규모의 모형(Fig.1)은 길이 110 cm, 폭 28 cm, 높이는 71.4 cm 규모의 Polycarbonate (PC) 재질로써 모형의 바닥면으로부터 60 cm 높이 까지는

입경 2 mm이하의 사질토를 채워 사질 자유면 대수층을 구축하였고 모형의 우단에는 길이 10 cm, 폭 25 cm, 높이 71.4 cm의 수조를 설치하였으며, 대수층과 수조를 분리하는 연직 아크릴 벽면에는 배수가 가능한 직경 0.8 cm의 유출구를 가로로 14개 세로로 20개를 설치하여 대수층에서 수조로의 지하수 흐름이 원활하도록 하였다. 모형의 좌단 상부에는 정량 펌프(peristaltic pump)를 이용하여 강우모형 조절기(rainfall simulator)를 통하여 보충수(recharge)를 유입시킴으로써 정상류 상태(steady-state)의 지하수 흐름을 발생시켰다. 보충수(recharge rate)와 배출수(discharge rate)가 동일하고 manometer의 수위가 일정함을 확인하므로써 정상류상태(steady-state)임을 확인할 수 있었다. 강우모형 조절기는 길이 15 cm, 폭 3 cm, 높이 5 cm의 아크릴 모형으로 바닥면에는 직경 1 mm의 outlet을 길이와 폭방향에 대해서 1 cm 간격으로 45지점에 유출구를 설치하여 모형의 폭방향으로 보충수를 균질하게 부과하였다. 대수층의 수위 측정을 위해서 모형의 최우단과 최좌단 그리고 지하수위 조절조에 manometer를 설치하여 세 지점에서 수위를 측정하였다. 정상류 상태의 지하수 흐름에 KCl용액(3 g/L) 1L를 강우발생장치(rainfall simulator)를 이용하여 모형의 좌측 보충수 유입지점의 57 cm 깊이에 폭방향으로 11.5분 동안 일정하게 주입하였고, 추적자 주입이 끝난 후 1차 증류수를 정량 펌프를 이용하여 일정하게 주입(28 mL/min)하였다. 추적자의 오염운을 모니터링하기 위하여 수평적으로 11지점 수직적으로 16지점에서 총 176개의 sampling port를 통하여 1 mL glass syringe로 0.7 mL를 채취하여 Ion Chromatography(IC)로 분석하였다. 본 연구에서는 종분산지수와 횡/종분산지수비의 결정을 위하여 경과시간 16시간에서의 오염운을 이용하였다.

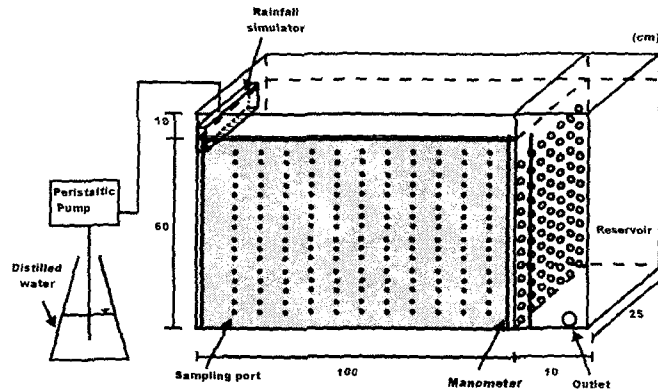


Fig.1 Schematic experimental setup of 2-dimensional sand tank model

## 2.2 2차원 오염운 모델링(2D solute plume modeling)

GMS(Groundwater Modeling System)는 최근 미 국방성에서 개발한 지하수 흐름 및 오염물질 운송을 모사하는 3차원 프로그램이며, 여기에는 지하수흐름을 모사하는 MODFLOW가 있으며, 오염물질 운송을 모사하는 MT3D가 있으며 본연구에서는 이 2가지의 프로그램을 이용하여 KCl 오염운을 모사하였다. 2차원 지하수 및 KCl 운송모델링을 위한 격자 설정은 다음과 같다. y축 방향에 대해서는 모형 강우기에 의한 면적으로 보충수와 추적자를 주입하였기 때문에 하나의 cell로 구성하였고 x축과 z축에 대해서는 각각 2cm의 간격으로 cell을 나누었다. 자유면 대수층에 대한 격자는 x축은 50cell (100 cm), y축 1cell (25 cm), z축 28cell (56 cm)로 구성하였다. 지하수위 조절조 (Water Storage Reservoir)의 격자의 수는 x, z방향으로 5cell (10 cm), 38cell (56 cm)로 하였으며 y방향에 대해서는 1cell (25 cm)로 구성하였으며, 보충수 유입영역의 격자는 모형의 최우단 상부에 위치하는 2개의 cell을 지정으로서 모델링에 사용된 총 격자의 수는 1650개였다. 모델링에 사용된 수리지질

파라미터의 입력치는 다음과 같다(Table 1). 관측된 2차원 오염운을 모사할 수 있는 최적의 종분산지수와 횡/종분산지수비를 획득하기 위하여 6개의 다른 종분산지수(1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.3, 0.2 cm)에 대해서 횡/종분산지수비(1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0)을 설정하여 case study를 수행하였다(Table 2). 관측한 오염운과 모사한 오염운의 침투농도가 가장 일치하는 결과를 비교함으로써 최적의 종분산지수와 횡/종분산지수를 결정하였다.

Table 1. Input parameters used in MT3D modeling

$T_0$ (min)	Tracer Vol.(mL)	Tracer conc.(ppm)	$S_y$ (-)	$K$ (cm/min)	$\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )	recharge (cm <sup>3</sup> /min)	porosity (n)	water content ( $\theta$ )
11.5	1000	1500	0.20	1.61	1.66	28.00	0.4	0.4

### 3. 결과 및 토의 (Results and Discussion)

#### 3.1 2차원 실내 실험(2-D box test)

실내 자유면 대수층에서의 종/횡분산지수비를 수행한 case study 분석 결과는 Table 2와 같다. Case 1, 2, 3에서 모사치의 침투농도는 각각 75.8-91.0 mg/L, 91.2-108.0 mg/L, 103.0-133.0 mg/L로 관측치의 침투농도 137 mg/L보다 낮은 침투농도의 범위를 나타내었으며 case 4는 129.9-143.0 mg/L로 가장 일치하는 침투농도를 나타내었다. case 5와 case 6는 각각 145.9-171.0 mg/L와 183.0-236.0 mg/L로 관측치보다 매우 높은 침투농도를 보여주었다. Case study 분석 결과 관측치와 모사치에서 오염운의 침투농도가 가장 잘 일치

Table 2. Simulated peak concentrations of chloride with various  $\alpha_L$  and  $\alpha_T / \alpha_L$

	$\alpha_L$ (cm)	$\frac{\alpha_T}{\alpha_L}$	peak conc (mg/L)		$\alpha_L$ (cm)	$\frac{\alpha_T}{\alpha_L}$	peak conc (mg/L)
case 1	1	1	75.8	case 4	0.4	1	129.9
		0.8	76.0			0.8	131.2
		0.6	81.0			0.6	134.0
		0.4	83.8			0.4	135.8
		0.2	88.6			0.2	137.0
		0	91.0			0	142.5
case 2	0.8	1	91.2	case 5	0.3	1	145.9
		0.8	97.1			0.8	152.3
		0.6	99.3			0.6	160.0
		0.4	100.7			0.4	165.0
		0.2	101.1			0.2	169.0
		0	108.0			0	171.0
case 3	0.6	1	103.0	case 6	0.2	1	183.0
		0.8	113.0			0.8	199.0
		0.6	116.0			0.6	212.0
		0.4	125.7			0.4	217.0
		0.2	132.0			0.2	222.0
		0	133.0			0	236.0

하는 중분산지수와 횡/중분산지수비는 각각 0.4 cm와 1/5이었으며, 동일 토양에 대한 주상 실험의 중분산지수는 0.32 cm이었다(백두성 등 2001). 실내 자유면 2차원 대수층실험과 주상실험에 의해 획득된 중분산지수 값은 Moltyaner and Killey(1988)가 사질토양에 대하여 획득한 값(0.21-0.25 cm)과 Pickens and Grisak(1981)에 의해 획득된 수치(0.01-0.1 cm)보다는 약간 높게 나타났으나 Champ et al.(1985)에 의해 측정된 값 0.48 cm보다는 낮은 수치를 보여주었다. 또한, Moltyaner and Killey(1988)의 현장상태의 사질 자유면 대수층 현장실험으로부터 획득한 횡/중분산지수비 1/4과 Bear(1972)가 제시한 1/3과도 비교적 근접함을 보여주고 있다. 오염운의 비교 결과 관측치와 모사치에 있어서 이동거리와 침투 농도의 위치가 일치하지 않는 것을 알 수 있으며(Fig. 2), 관측치에서의 침투농도는 수평, 수직적인 방향으로 60 cm와 31 cm지점에 침투 농도가 관측된 반면 모사치에서는 수평적으로 68 cm, 수직적으로는 47 cm에 위치함으로서 모사치에서의 침투농도가 관측치 보다는 좀 더 상부에 위치하고 하류방향으로 이동해 있는 것을 알 수 있었다.

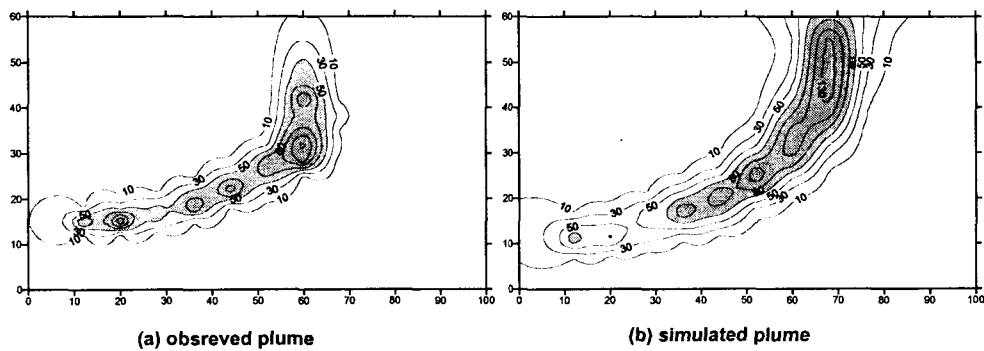


Fig 2. Comparison of observed(a) and simulated plume(b) after 16hr from monitoring time

#### 4. 결론(Conclusion)

사질 대수층에서 보존성 화합물의 운송 모델링에 필요한 횡/중분산지수비를 결정하기 위하여 실내 자유면 대수층 모형에서의 2차원 오염운 실험을 수행하였다. 2차원 실내 모형실험으로 획득한 오염운과 MT3D 모델링을 통한 case study 분석결과 관측치와 모사치의 침투 농도가 가장 일치하는 중분산지수와 횡/중분산지수비는 각각 0.4 cm와 1/5이었다. 이 수치들은 앞서 연구된 사질 대수층서의 분산지수 값들과 비교적 잘 일치하고 있으며 향후 오염된 사질 대수층 복원(remediation)을 위한 기초 자료로 사용될 수 있을 것이라 사료된다.

#### 5. 참고문헌(References)

1. 김정석, 김동주, "실내 자유면 사질 대수층의 수리상수 결정", 지하수환경학회지, 6(3), pp.152-157, (1999)
2. 백두성, 박춘화, 김동주, 김희성, 이한웅, 박용근, "사질토양에서의 과산화수소 및 미생물에 의한 Benzene의 이동 및 분해특성", 지하수환경학회지, 6(2), pp.49-56, (2001)
3. 이승섭, 김정석, 김동주, "사질 자유면 대수층 모형에서의 지하수 모델링", 지하수환경학회지, 6(4), pp.188-193, (1999)
4. Bear J., "Some Experiments in Dispersion", Journal of Geophysical Research, Vol 66,

- No. 8, pp2455-2467, (1961)
5. Mallants D., Espino A., Hoorick M. V., Feyen J., Vandenberghe N., and Loy W., "Dispersivity Estimation from a Tracer Experiment in a Sandy Aquifer", GROUND WATER, Vol. 38, No. 2, pp304-310, (2000)
  6. Moltyaner G. L., and Killey R. W. D., "Twin Lake Tracer Tests : Longitudinal Dispersion", WATER RESOURCES RESEARCH, Vol. 24, No. 10, pp1613-1627, (1988)
  7. Moltyaner G. L., and Killey R. W. D., "Twin Lake Tracer Tests : Trnasverse Dispersion", WATER RESOURCES RESEARCH, Vol. 24, No. 10, ppl628-1637, (1988)