한국지하수토양환경학회지 Vol. 11, No. 4, pp. 48~56, 2006 ≪原著≫

복합토양층의 불포화대와 포화대에서 연속주입 추적자시험을 이용한 수리분산특성 연구

정상용[1] · 강동환[1]* · 이민희[1] · 손주형[2]
[1]부경대학교 환경지질과학과, [2]한국농촌공사 환경지질팀

A Study of Hydrodynamic Dispersions in the Unsaturated and the Saturated Zone of a Multi-soil Layer Deposit Using a Continuous Injection Tracer Test

Sang Yong Chung[1] · Dong Hwan Kang[1]* · Minhee Lee[1] · Joo Hyong Son[2]
[1]Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan, Korea
[2]Environmental Geology Team, Korea Rural Community & Agriculture Corporation

ABSTRACT

Using a continuous injection tracer test at a multi-soil layer deposit, the difference of hydrodynamic dispersions in unsaturated and saturated zones were analyzed through breakthrough curves of Rhodamine WT, linear regression of concentration versus time, concentration variation rates versus time, and concentration ratio according to the distance from injection well. As a result of continuous injection tracer test, the difference of the maximum concentrations of Rhodamine WT in unsaturated and saturated zones were 13-15 times after 160 hours, and the increased rate of concentration versus time in unsaturated zone was about 10 times higher than in saturated zone. The fluctuation of Rhodamine WT breakthrough curve and concentration variation rate with time in saturated zone were larger than in unsaturated zone. Rhodamine WT concentration ratio with the distance from the injection well in saturation zone was linearly decreased faster than in unsaturated zone, and the elapsed time necessary for the concentration ratio less than 2 was longer in saturation zone. The differences resulted from the lower concentration and slower hydrodynamic dispersion of Rhodamine WT at the saturation zone of the multi-soil layer deposit, in which groundwater flow significantly flow and aquifer materials have high hydraulic heterogeneity. Effective porosity, longitudinal and transverse dispersivities were estimated 10.19~10.50%, 0.80~1.98 m and 0.02~0.04 m, respectively. The field longitudinal dispersivity is over 12 times larger than the laboratory longitudinal dispersivity by the scale-dependent effect.

Key words : Continuous injection tracer test, Unsaturated zone, Saturated zone, Hydrodynamic dispersion, Breakthrough curve, Dispersivity, Scale-dependent effect

요 약 문

여러 개의 층으로 구성된 토양층에서 연속주입 추적자시험을 수행하여, 불포화대와 포화대 구간에서의 수리분산특성 차이를 추적자의 농도이력곡선, 시간에 따른 농도변화 및 농도변화율, 그리고 거리에 따른 농도비 분석을 통해 비교 · 연구하였다. 연속주입 추적자시험에 의하면, 약 160시간이 경과된 후에 불포화대와 포화대에서 Rhodamine WT 최대농도의 차이는 약 13~15배 정도에 달하였고, 시험시간 대 추적자 농도증가율의 차이는 약 10배 정도로 나타났다. 또한 시간에 따른 추적자 농도이력곡선의 변화와 농도변화율이 불포화대에 비하여 포화대에서 크게 나타났다. 주입공에서의 이격거리에 따른 추적자의 농도비는 포화대 구간에서 더 빠르게 선형적으로 감소하였으며, 그 이후에 농도비가 2배 이하로 완만해 지는데 걸린 시간은 포화대 구간이 더 길었다. 이러한 차이들은 여러 개의 층서로 구성된 토양층의 포화대에서는 지하수가 존재하며, 또한 매질의 불균질성이 크고 투수성이 다양하기 때문에, 비교적 균질한

*Corresponding author : dhkang@pknu.ac.kr
원고접수일 : 2006. 4. 24 게재승인일 : 2006. 7. 24
질의 및 토의 : 2006. 10. 31 까지

층서를 이루는 불포화대에 비하여 추적자 용액의 농도는 낮고, 추적자의 확산이 느리게 진행되어진데서 기인하였다. 그리고 포화대 구간에서의 유효공극율은 10.19~10.50%, 종분산지수는 0.80~1.98 m, 횡분산지수는 0.02~0.04 m의 범위로 산정되었으며, 실내주상시험의 종분산지수와 비교할 때 12배 이상의 규모종속효과가 나타났다.

주제어 : 연속주입 추적자시험, 불포화대, 포화대, 수리분산, 농도이력곡선, 분산지수, 규모종속효과

1. 서 론

현장추적자시험은 추적자의 주입방식에 따라 순간주입 추적자시험(instantaneous injection tracer test)과 연속주입 추적자시험(continuous injection tracer test)으로 구분할 수 있다. 일반적으로 순간주입은 자연경사 추적자시험(natural gradient tracer test)에, 연속주입은 인위경사 추적자시험(forced gradient tracer test)에 해당되는 시험방법이다. 자연경사 추적자시험은 시험기간이 길어서 성공률이 낮으나, 시험대수층의 수리분산특성을 정량적으로 파악함에 있어 높은 신뢰성을 갖는다(이진용 외, 2001; Gelhar et al., 1992). 연속주입 추적자시험은 수평수리경사가 "0" 근접하고, 유속이 낮은 지하수흐름 지역에서 연속적인 오염원(continuous source)에 의한 오염물질의 유동과 수리분산특성을 규명하는데 적합한 시험법이다.

연속주입 추적자시험에 의한 수리분산연구 사례로는 Novakowski(1992)에 의해 발산흐름장(divergent flow field)에서 연속추적자시험의 해석학적인 모델이 개발되었으며, 개발된 모델을 적용하여 수평적으로 단열화된 셰일암반층에서 수리분산특성이 해석되었다. Broermann et al.(1997)은 반응성 및 비반응성 추적자를 이용하여 분산지수, 속도, 분배계수 및 신뢰한계를 결정하였으며, Brouyere et al.(2005)은 추적자의 주입조건에 따른 농도이력곡선의 변화양상을 연구하였다. 국내에서는 김용제 외(2005)는 수리경사가 매우 낮은 대수층에 물을 연속적으로 주입하여 수리경사를 상승시킨 후, 추적자를 주입하여 단열암반층의 수리적인 연결성을 파악하였다.

토양층에서의 지하수 흐름과 용질이송에 의한 수리분산특성을 규명하기 위한 연구는 주로 모래나 점토 혹은 충적대수층에서 수행된 현장추적자시험에 의해 이루어지고 있다(Charles and Steven, 2000; Joseph and Kitanidis, 1994; Liping and Close, 1999). 지표에서 유입되는 오염물은 불포화대를 통과해야만 포화대에 도달되어 지하수에 의해 이송(advection) 및 확산(hydrodynamic dispersion)되어질 수 있다. 따라서, 포화대에서의 수리분산특성은 불포화대의 영향을 많이 받게 된다. 현재 많은 연구가 되어 있지는 않지만, 불포화대에서의 수리분산에 대한 현장연구사례로는 시험부지의 전체 지표면에 추적자를 동시에 주입하여 불포화대 내에서 추적자의 침투양상과 이송특성에 관한 연구(Rudolph et al., 1996)와 불포화대 내에서의 종 · 횡분산의 정량적인 연구(Irene et al., 1999) 등이 수행된 바 있다. 또한 추적자용액의 연속주입에 의해 지하수위를 상승시켜, 불포화대 구간에서 인위적인 수리경사에 의한 추적자의 수리분산특성이 연구되었다(Brouyere et al., 2004)

본 연구에서는 여러 개의 층으로 구성된 토양층에서 연속주입 추적자시험을 수행하여, 불포화대와 포화대 구간에서의 수리분산특성 차이를 추적자의 농도이력곡선, 시간에 따른 농도변화 및 농도변화율, 그리고 거리에 따른 농도비 분석 등을 통해 비교 · 연구하였다. 또한 CATTI 프로그램(Sauty and Kinzelbach, 1992)을 이용하여 포화대 구간의 유효공극율과 분산지수가 산정되었다.

2. 시험 부지 특성

2.1. 지질현황

연구지역은 부산광역시 남구 문현동에 위치하며, 서쪽과 동쪽에는 수정산과 황령산이 있다. 시험부지의 동쪽에 인접하여 동천이 흐르고 있다. 시험부지의 기반암은 녹회색의 안산암으로 이루어져 있으며, 연구지역 주변의 노두에서는 안산암, 안산암질 화산각력암, 응회암질 퇴적암, 반려암, 각섬석 화강섬록암, 흑운모 화강암이 각각 분포하고 있다(장태우 외, 1983). 연구지역 내 충적층의 지층구성은 다소 복잡한 양상을 띠고 있지만, 일반적으로 최상부 매립토층, 실트 · 점토층, 모래층, 점토층, 안산암의 풍화토층, 그리고 안산암의 풍화암층 순으로 이루어져 있다.

2.2. 시험공 및 토양층 특성

연속주입 추적자시험에 이용된 지하수공들의 제원은 Table 1에 있으며, 지하수공의 수직적인 설계단면은 Fig. 1(a), 지하수공의 배치는 Fig. 1(b)에 도시되었다.

심도별로 채취된 토양시료를 이용하여 실내에서 입도분석, 변수위투수시험 및 실내주상시험을 실시한 결과가 Table 2에 있다. 공극율은 비중시험과 건조단위중량시험을 통해 산정된 비중과 건조단위중량을 이용하여 산출되었다.

Table 1. The condition of test wells for continuous injection tracer test

Well No.	Well depth (GL-, m)	Inner diameter (m)	Filter gravel (m)	Casing interval (GL-, m)	Screen interval (GL-, m)	Location
I1	6.0	0.058	0.016			
M1	6.0	0.058	0.016	0.0~3.0	3.0~6.0	Saturated zone
M2	6.0	0.058	0.016			
M3	3.0	0.085	–			
M4	3.0	0.085	–	0.0~1.5	1.5~3.0	Unsaturated zone
M5	3.0	0.085	–			

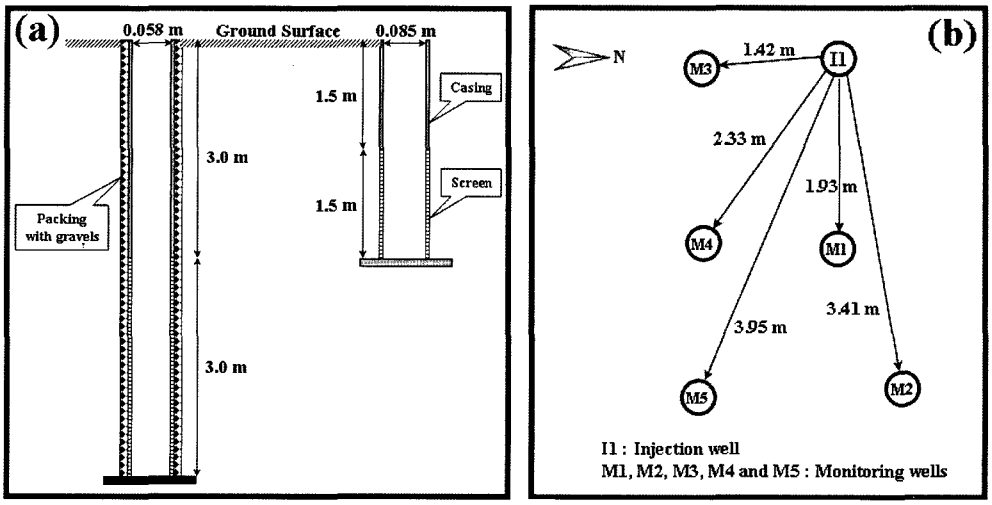

Fig. 1. Vertical profiles and arrangement of test wells : (a) vertical profiles, (b) arrangement.

Table 2. Physical and hydrological parameters of soil layers at the test site

Sampling interval (GL-, m)	#10 sieve Residual gravel (%)	#200 sieve Cumulative passage rate (%)	Porosity (%)	Laboratory hydraulic conductivity (m/sec)	Laboratory longitudinal dispersivity (cm)
2.5~2.7	4.15	18.14	51.1	2.43×10^{-5}	2.3
2.7~3.7	0.70	71.30	52.3	1.02×10^{-8}	0.2
3.7~4.2	19.16	3.72	43.3	9.27×10^{-4}	16.5

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_w} G_s \quad (1)$$

여기서 n은 공극율, γ_d는 물질의 건조단위중량[N/m^3], γ_w는 물의 단위중량[N/m^3], G_s는 진비중[무차원]이다. 시험결과에 의하면 지표면하 3.7~4.2 m 구간에 존재하는 토양층이 다른 구간의 토양에 비하여 수리전도도는 40배 이상, 종분산지수는 8~80배 정도 높은 것으로 나타났다. 따라서 조립질 모래로 구성된 이 구간이 시험부지에서 주대수층에 해당된다.

연속주입 추적자시험 이전과 시험완료 1개월 경과 후에 관측된 시험부지 내 I1, M1 및 M2공의 지하수위는 지표면하 3.02~3.07 m의 범위였다. 3개 공의 지하수위차는 5 cm 이내이었으며, I1공에서 가장 높고, M2공에서 가장 낮았다. 지하수는 I1공에서 M2공 방향인 서쪽에서 동쪽으로 흐르고 있었다.

시험부지에서 지표면하 6.0 m까지의 평균적인 토양주상도가 Fig. 2에 도시되어 있다. 시험부지의 토양층은 최상부에 매립층, 세립질 모래층, 실트와 점토의 혼합층, 조립질 모래층, 점토와 조립질 모래의 혼합층, 그리고 최하부의 점토층으로 구성되어 있다. 지하수위는 지표면하 3.0 m 부근에 형성되어 있으며, 연속주입 추적자시험 기간 동안 포화대구간의 지하수위는 지표면하 2.5 m 부근에 형성되었다.

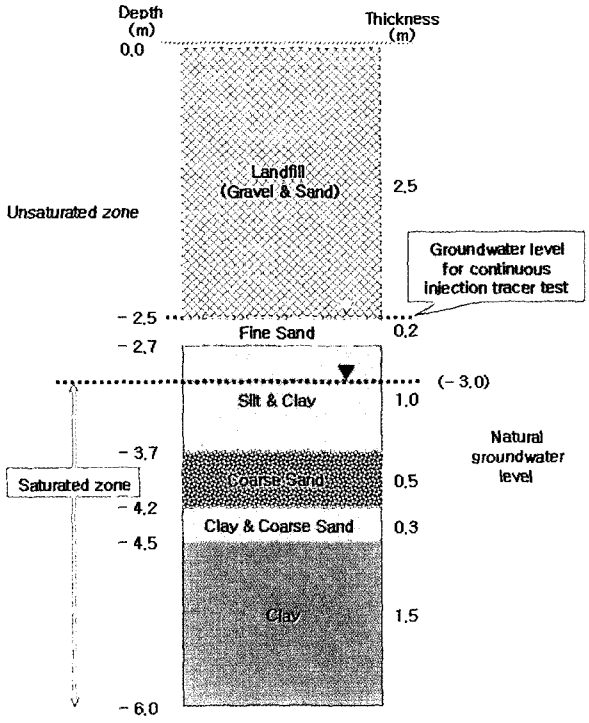

Fig. 2. Typical soil cross section at the test site.

2.3. 현장 수리전도도

현장수리전도도는 순간충격시험(slug/bail test)으로 산출되었으며, 그 결과가 Table 3에 정리되어 있다. 순간충격시험은 주입시험(slug test)과 회복시험(bail test)의 2단계로 수행되었다. 주입시험 시에는 시험공에 물을 순간적으로 주입하여 경과시간에 따른 시험공 내 수위강하를 관측하였으며, 회복시험 시에는 시험공 내 지하수를 순간적으로 양수하여 경과시간에 따른 수위회복을 관측하였다. 따라서, 순간충격시험의 해석은 주입시험과 회복시험의 단계별로 해석되었으며, 적용된 해석법은 Bouwer-Rice 해석법 및 Hvorslev 해석법이다. 추적자시험 부지 내 I1, M1 및 M2공에서의 수리전도도는 1.55×10^{-7}~5.35×10^{-6} m/sec의 범위로 나타났다. 시험공의 평균 수리전도도는 I1공에서 7.81×10^{-7} m/sec, M1공에서 1.14×10^{-6} m/sec, M2공에서 3.48×10^{-6} m/sec로서 M2공에서의 수리전도도가 가장 높게 나타났다. I1, M1 및 M2의 3개 공에서의 평균 수리전도도는 1.80×10^{-6} m/sec이다.

3. 연속주입 추적자시험

3.1. 시험 조건

연속주입 추적자시험 시 주입 및 채수에 관련된 조건들이 Table 4에 있고, 추적자시험에 이용된 주입공과 관측공의 배열상태와 자연 상태의 지하수흐름방향은 Fig. 3에 도시되었다. 농도가 50 mg/L인 Rhodamine WT 용액을 주입공(I1)의 지표면하 3.5 m 지점에서 일정한 주입율(1.8 L/min)로 약 6일 동안 연속적으로 주입하였다. 주입과 동시에, 관측공(M1, M2, M3, M4 및 M5공)에서 지하수를 채수하여 Rhodamine WT 농도를 측정하였다. 지하수 내 Rhodamine WT의 농도는 부유물질들에 의한 측정오차를 줄이기 위해 샘플시료를 24시간 침전시킨 후에 분석하였으며, 시험부지 내 지하수의 수소이온농도(pH)는 6.5 이상이어서 Rhodamine WT의 농도에는 영향을 미치지 않

Table 3. Hydraulic conductivities calculated by slug/bail teste (unit: m/sec)

Test	Analysis method	I1	M1	M2
Slug	Bouwer-Rice	7.77×10^{-7}	1.82×10^{-6}	4.08×10^{-6}
	Hvorslev	1.02×10^{-6}	2.37×10^{-6}	5.35×10^{-6}
	Average	8.99×10^{-7}	2.09×10^{-6}	4.72×10^{-6}
Bail	Bouwer-Rice	5.72×10^{-7}	1.55×10^{-7}	1.95×10^{-6}
	Hvorslev	7.53×10^{-7}	2.02×10^{-7}	2.53×10^{-6}
	Average	6.63×10^{-7}	1.79×10^{-7}	2.24×10^{-6}
Well average		7.81×10^{-7}	1.14×10^{-6}	3.48×10^{-6}

Table 4. Conditions for continuous injection tracer test

Test wells	Injection well : I1 Monitoring wells : M1, M2, M3, M4, M5
Tracer and Injection concentration	Rhodamine WT, 50 mg/L
Injection rate and Total injection time	1.8 L/min(8.24×10^{-5} m/sec), 6.76 day
Groundwater sampler	length 92 cm, volume 210 mL
Rhodamine WT analysis	UV/VIS spectroscopy (Lamda Bio 40)

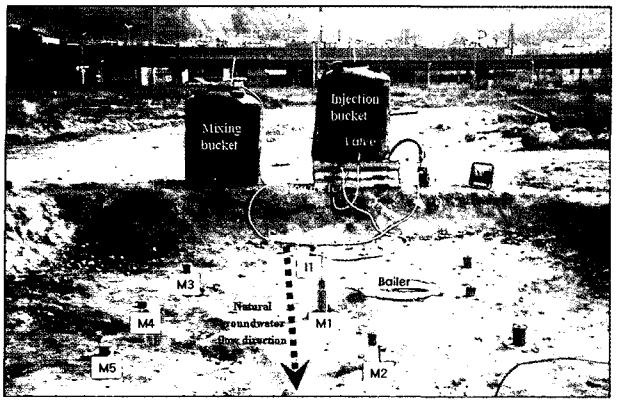

Fig. 3. Layout for continuous injection tracer test.

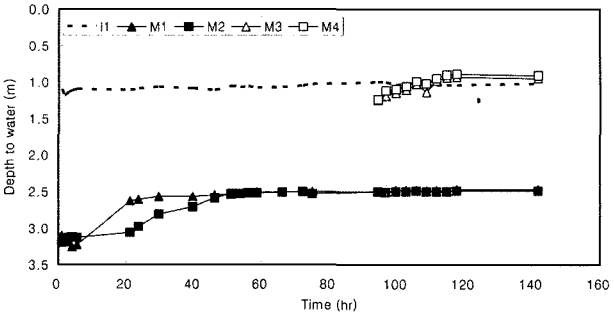

Fig. 4. Groundwater-level variations of injection and monitoring wells for continuous injection tracer test.

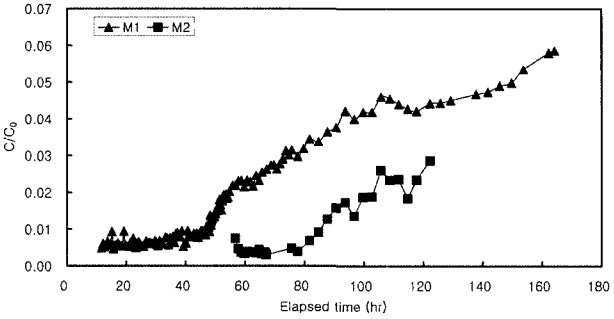

Fig. 5. Breakthrough curves of Rhodamine WT at M1 and M2 monitoring wells.

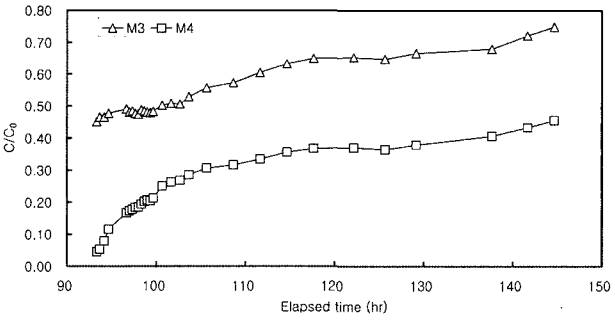

Fig. 6. Breakthrough curves of Rhodamine WT at M3 and M4 monitoring wells.

았던 것으로 판단된다(김정우 외, 2004; Feuerstein and Sellek, 1963). Rhodamine WT의 농도분석에 이용된 분석기기는 Perkin Elmer사의 UV/VIS spectroscopy(Lambda Bio 40)로서 파장의 정확도는 ±0.3 nm이고, 1회 분석 시 사용가능한 cell holders는 13개이다.

형광추적자로서 Rhodamine WT는 다른 형광성 염료들에 비해 최소검출능력, 광화학적 · 미생물학적 분해 비율, 흡착성, 저렴한 가격, 낮은 독성 등의 장점을 가지고 있다(문상호 외, 2001). Rhodamine WT의 벤토나이트 점토 내 흡착율은 28% 정도로서 다른 염료들에 비해 적은 편이다(Repogle et al., 1966). 국내에서는 용수댐에서 누수경로 파악을 위한 추적자시험(지오그린21, 2003), 양수시험과 동시에 실시하는 추적자시험의 사례 연구(Lee et al., 2003) 등에서 Rhodamine WT가 추적자로서 이용되었다.

3.2. 불포화대와 포화대의 수리분산특성

3.2.1. 지하수위 분포

연속주입 추적자시험 시작 후 포화대구간에 있는 M1공은 30시간, M2공은 50시간 후부터 관측공 내 지하수위가 지표면하 2.5±0.05 m의 범위로 일정하게 형성되었다(Fig. 4). 불포화대 구간인 M3와 M4공의 지하수위는 시험시작 105시간 후부터 지표면하 1.0±0.1 m의 범위에 형성되었다. 추적자시험 기간 동안 주입공인 I1공에서의 지표면하 지하수위도 1.0±0.04 m 정도의 범위로 높게 형성되었다. 이것은 I1공에서의 투수성보다 훨씬 큰 주입율로 추적자가 유입되었기 때문이다. 연속주입 추적자시험 기간 동안 포화대구간의 지하수위는 평균적으로 0.5 m 정도 상승하였다.

3.2.2. 농도이력곡선 분석

연속주입 추적자시험 시 5개 관측공에서 시간에 따른 Rhodamine WT 농도를 관측한 결과, 포화대 구간의 관측공(M1, M2공)과 불포화대 구간의 관측공(M3, M4, M5공)의 Rhodamine WT 농도가 매우 큰 차이를 나타내었다. M1과 M2공에서의 Rhodamine WT 농도는 6일 동안에 초기주입농도의 6%와 3% 정도에 도달하였으나(Fig. 5), M3와 M4공에서는 5일 동안 초기주입농도의 75%와 45% 정도에 이르렀다(Fig. 6). M5공의 초기지하수위는 개발심도 하부에 형성되어 있었으며, 또한 연속주입 추적자시험 기간 동안에도 지하수위가 지하수공 저면 하부에 존재하여 채수가 불가하였다. 이는 주입공에서의 이격거리가 3.95 m로서 가장 멀리 이격되어 있어 추적자용액의

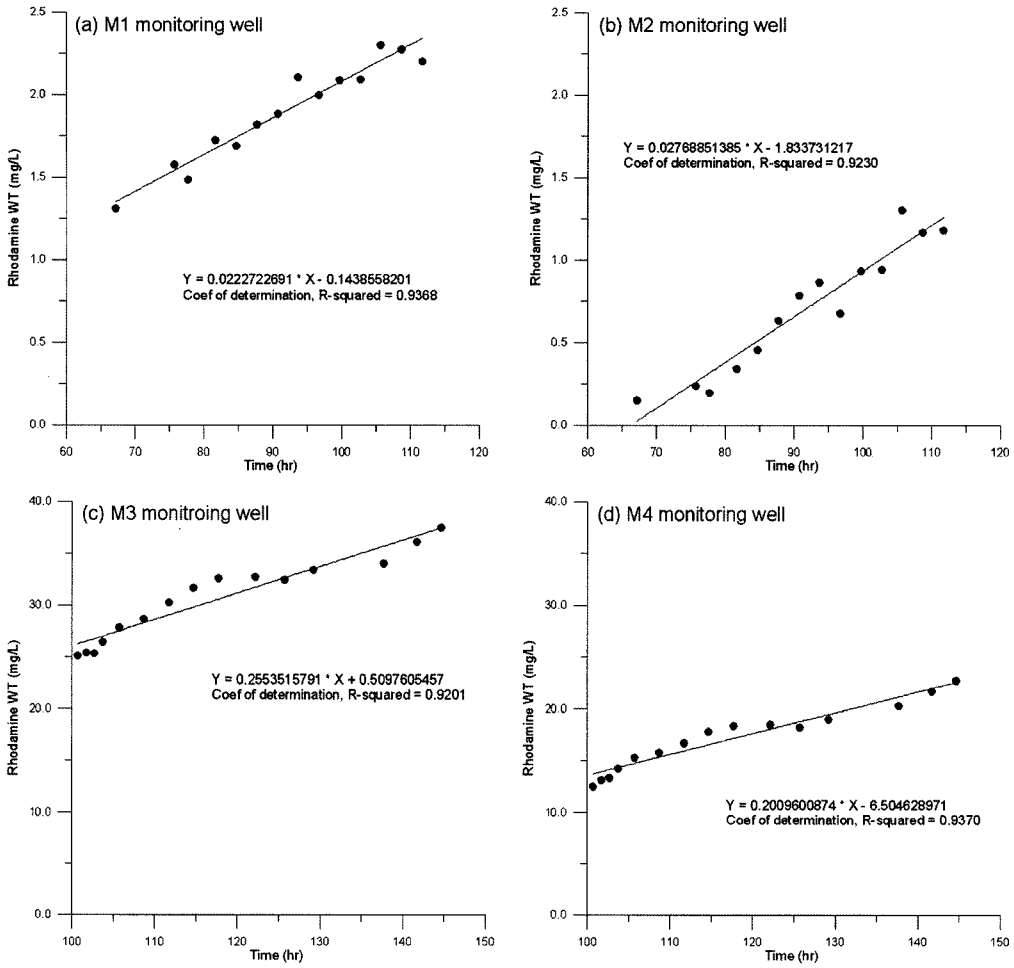

Fig. 7. Linear regression analysis of concentration as a time function at monitoring wells.

주입에 의한 지하수위 상승이 미미하였기 때문이다. 포화대 구간의 관측공(M1, M2공)과 불포화대 구간의 관측공(M3, M4공) 사이에서 나타나는 Rhodamine WT의 농도 차이는 포화대에 지속적으로 충진 되는 지하수에 의한 Rhodamine WT 용액의 희석(dilution)과 점토층에 의한 Rhodamine WT의 흡착(sorption)에 의한 것으로 판단된다. 불포화대 구간에서는 공극수(pore water)와 모관수(capillary water) 등에 의한 Rhodamine WT 용액의 농도희석은 매우 적고, 또한 대부분 자갈과 모래로 구성되어 있어 포화대에 비해 흡착에 의한 농도감소도 매우 작았다.

시험부지 내 포화대와 불포화대 구간의 관측공들 사이에서 시간에 따른 농도증가 경향을 분석한 결과, 포화대 구간인 M1, M2공에서의 농도증가 경향이 불포화대 구간인 M3, M4공에 비하여 불규칙하게 나타났다. 그리고, 포화대 구간에서 불포화대 구간에 비하여 시간에 따른 농도 이력곡선이 더 큰 변화를 나타내었다. 이러한 원인은 Sudicky(1986)가 언급한 바와 같이 불포화대 구간에 비하여 포화대 구간의 층서적인 불균질성과 다양한 투수성에 의한 것으로 판단된다.

3.2.3. 농도변화의 선형회귀분석

포화대와 불포화대의 4개 관측공에서 시간에 따른 Rhodamine WT 농도에 대한 선형회귀분석(linear regression analysis)을 실시하여, 포화대와 불포화대 관측공들에서 시간에 대한 농도변화 함수를 산정하였다(Fig. 7). 포화대 구간에서 관측공들의 시간에 따른 농도회귀직선의 기울기는 M1공 0.022, M2공 0.028 이고, 불포화대 구간의 관측공에서는 M3공 0.255, M4공 0.201이다. 회귀직선의 기울기는 포화대와 불포화대의 각 구간별로는 유사한 값을 보였으나, 불포화대 구간이 포화대 구간에 비해 10배 정도 높은 것으로 나타났다. 이와 같이 불포화대 구간에서 Rhodamine WT 농도의 증가율이 높아, Fig. 8에서와 같이 시험시작 6일 후에 그 농도는 M3와 M4공에서 각각 초기농도의 75%와 45%까지 도달하였다.

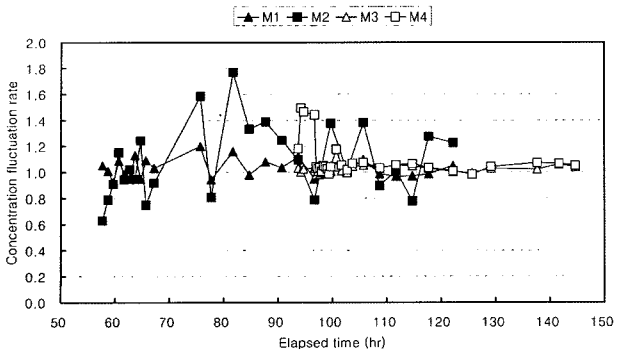

Fig. 8. Concentration fluctuation rates versus elapsed time at monitoring wells.

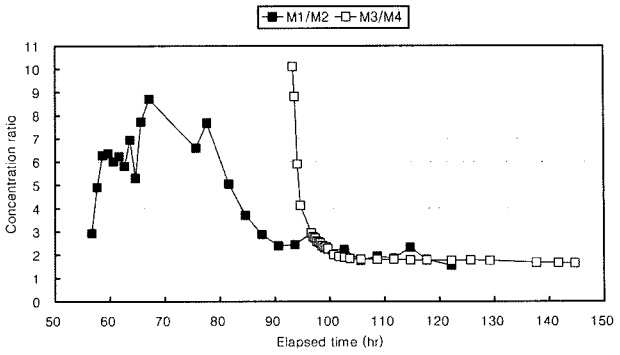

Fig. 9. Concentration ratio measured at monitoring wells in the saturated and unsaturated zones.

3.2.4. 농도변화율 분석

포화대와 불포화대 구간에 위치한 4개 관측공에서 시간에 따른 Rhodamine WT 농도의 변화율(Fig. 8)은 현재 시점의 Rhodamine WT 농도를 이전 시점의 Rhodamine WT 농도로 나누어 준 값이다. 즉, 농도변화율이 1.0보다 크면 Rhodamine WT 농도가 증가한 것을 의미하며, 1.0보다 낮으면 Rhodamine WT 농도가 감소하였음을 의미한다. 주입공에서 관측공 사이에 존재하는 대수층의 구성 매질이 균질할수록 농도변화율은 1.0에 근접한다. 포화대 구간인 M1, M2공에서의 농도변화율을 비교하여 보면, M1공의 농도변화율이 M2공에 비해 1.0에 근접하게 나타나고 있다. 이러한 원인은 주입공에서 먼 거리에 위치한 M2공에서 토양층의 불균질성이 크기 때문인 것으로 판단된다. 불포화대 구간에 위치한 M3, M4공에서도 주입공으로부터의 거리가 가까운 M3공에서의 농도변화율이 더 1.0에 근접하게 나타났다.

포화대와 불포화대 구간의 농도변화율을 비교하여 보면, 불포화대 구간의 농도변화율이 훨씬 더 1.0에 근접하였다. 한정상(1998)이 언급한 바와 같이 다양한 토양층으로 구성된 포화대 구간에서 공극규모의 불균질성과 균일하지 않은 투수성으로 인해 Rhodamine WT의 농도변화율이 크게 나타난 것이다. 또한, 불포화대 구간에서는 Rhodamine WT의 농도희석이나 흡착현상이 상대적으로 약하기 때문에 농도변화율이 1.0에 근접하게 나타났다.

3.2.5. 거리에 따른 농도비 분석

포화대와 불포화대 구간에 설치된 관측공들 사이의 동일관측시간에서 거리에 따른 농도비를 나타낸 그래프를 작성하여 주입공에서의 거리에 따른 농도변화를 분석하였다(Fig. 9). 주입공과 관측공들 사이의 직선거리비가 포화대 구간의 관측공에서는 약 1.77배, 불포화대 구간의 관측공에서는 약 1.64배로 비슷한 간격으로 배치되어 있다(Fig. 2).

포화대에 위치한 M1, M2공에서의 Rhodamine WT 농도비는 주입 후 67시간 까지는 M1공의 농도가 M2공에 비해 3~9배 정도로서 급격하게 증감하는 것으로 나타났으며, 이후 90시간까지 M1공과 M2공의 농도비가 3배 이하로 감소하였다. 불포화대 구간에 위치한 M3, M4공에서의 Rhodamine WT 농도비는 100시간 까지는 10배에서 2배 정도까지 급격하게 감소하였으며, 그 이후에는 2~1.8배 범위 내에서 완만하게 감소하였다.

주입공에서 관측공의 거리에 따른 Rhodamine WT의 농도비분석 결과, 포화대 구간에서는 90시간이 경과한 후부터, 불포화대 구간에서는 100시간 이후부터 농도비가 완만해지는 경향을 보였다. 농도비 변화가 완만하게 형성된다는 것은 농도감소율이 거리에 선형 비례함을 의미한다. 즉, 연속주입 추적자시험 부지의 포화대와 불포화대 구간에서 Rhodamine WT의 농도는 주입공에서의 거리에 따라 일정하게 변화한다.

포화대와 불포화대 구간에 위치한 관측공에서 Rhodamine WT 농도비가 2배 이하로 완만해지는데 걸린 시간은 포화대 구간이 20시간, 불포화대 구간이 4시간 정도이었다. 이것은 불포화대의 토양층이 포화대의 토양층에 비해 훨씬 균질하기 때문이다. 따라서, 대수층 매질이 균질할수록 오염원에서의 거리에 따른 오염물질 농도비가 빠른 시간에 선형 비례적으로 변화함을 알 수 있었다.

3.3. 포화대 구간의 분산지수 산정

시험부지 내 포화대 구간에 해당하는 I1공과 M2공 사이의 토양층 내에서 유효공극율, 종분산지수 및 횡분산지수를 산정하기 위해 입력된 추적자시험 조건과 매개변수들이 Table 5에 정리되어 있다. 다르시유속은 순간충격시험에 의한 평균수리전도도 1.80×10^{-6} m/sec와 자연 상태 및 추적자시험 시의 수리경사(0.01~0.15)에 의해 산정된

Table 5. Input parameters and values for CATTI code

Input parameter	Value	
Injection concentration	5×10^{-2} kg/m^3	
Infiltration rate	3×10^{-5} m^3/sec	
Total injection time	6.76 day	
Aquifer thickness	2.0 m	
Hydraulic conductivity	1.80×10^{-6} m/sec	
Hydraulic gradient	0.01~0.15	
Regional Darcian velocity	2.11×10^{-8}~2.64×10^{-7} m/sec	
Distance	Longitudinal	3.36 m
	Transverse	0.59 m

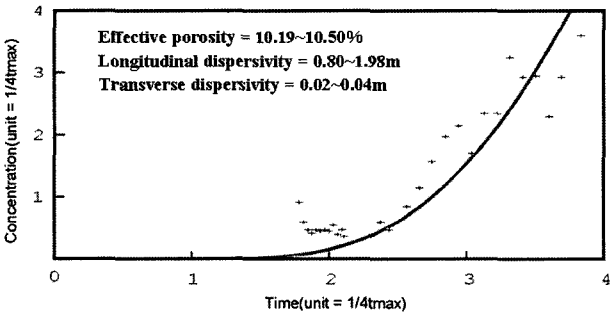

Fig. 10. Breakthrough curve of M2 data fitted with CATTI code simulation.

(0.21~2.64)$\times10^{-7}$ m/sec가 적용되었다. 이러한 수리지질학적 조건들과 M2공에서 관측된 시간에 따른 Rhodamine WT 농도를 입력한 후, CATTI 프로그램(Sauty and Kinzelbach, 1992)을 이용하여 유효공극율과 분산지수가 산정되었다. 시험부지 내 포화대 구간의 다르시유속이 2.11×10^{-8} m/sec인 경우에는 유효공극율 9%, 종분산지수 0.80 m 및 횡분산지수 0.04 m로 산정되었다. 다르시유속이 2.64×10^{-7} m/sec인 경우에는 유효공극율 10.50%, 종분산지수 1.98 m 및 횡분산지수 0.02 m로 산정되었다(Fig. 10). 실내주상실험에 의해 산정된 종분산지수(Table 2)와 비교할 때, 추적자시험에 의한 종분산지수가 최소 12배 이상 크게 나타나는 것은 규모종속효과(scale dependent effect)로 볼 수 있었다.

4. 토의 및 결론

여러 개의 층으로 구성된 토양층에서 연속주입 추적자시험을 수행하여, 불포화대와 포화대 구간에서의 수리분산특성 차이를 추적자의 농도이력곡선, 시간에 따른 농도변화 및 농도변화율, 그리고 거리에 따른 농도비 분석을 통해 비교 · 연구하였다. 시험부지 토양의 불포화대는 자갈과 모래로 구성된 매립토와 하부에 가는 모래층과 실트 · 점토층로 구성되었으며, 포화대는 실트 · 점토층, 굵은 모래층, 점토 · 굵은 모래층, 그리고 최하부에는 점토층으로 구성되어 있다. 순간충격시험으로 산출된 포화대에서의 수리전도도는 평균 1.8×10^{-6} m/sec 로 투수성이 양호한 편이다. 추적자시험기간 동안 불포화대의 지하수위는 지표면하 1.0 ± 0.1 m 범위이고, 포화대의 지하수위는 2.5 ± 0.05 m 범위에 있었다.

연속주입 추적자시험에 의하면, 포화대 구간에 설치된 관측공에서 Rhodamine WT의 최대농도는 약 160시간이 경과된 후에 주입농도의 6%와 3%, 불포화대 구간의 관측공에서는 약 120시간이 경과된 후에 주입농도의 75%와 45% 정도가 관측되었다. 따라서 불포화대와 포화대에서 최대농도의 비는 약 13~15배 정도에 달하였다. 시험시간 대 Rhodamine WT 농도에 대한 선형회귀 직선의 기울기는 포화대와 불포화대의 각 구간에서는 유사한 값을 보였으나, 불포화대 구간이 포화대 구간에 비해 10배 정도 높은 것으로 나타났다. 이렇게 구간별로 큰 농도차이와 시간에 대한 농도 증가율의 큰 차이는 포화대 구간에서 지하수에 의한 추적자 용액의 희석과 점토층에 의한 흡착으로 농도가 상당히 감쇄(retardation)되었기 때문이다.

포화대 구간에서 불포화대 구간에 비하여 시간에 따른 추적자 농도이력곡선의 변화가 크게 나타나고, 또한 추적자의 농도변화율이 1.0보다 크게 나타났다. 그 이유는 불포화대 구간(2개 층으로 구성)에 비하여 포화대 구간(4개 층으로 구성)의 층서적인 불균질성과 다양한 투수성에 의한 것으로 판단된다.

주입공에서 이격거리에 따른 Rhodamine WT의 농도비 분석에 의하면, 포화대 구간에서는 주입 후 90시간, 불포화대 구간에서는 100시간이 경과한 후부터 Rhodamine WT의 농도가 선형적으로 감소하였으며, 그 이후에는 농도비 변화가 2배 이하로 완만하였다. 농도비가 2배 이하로 완만해 지는데 걸린 시간은 포화대 구간은 20시간, 불포화대 구간은 4시간 정도로 나타났다. 이러한 차이는 포화대 구간에서 토양층의 불균질성이 더 크기 때문이다.

시험부지 내 포화대 구간에서 다르시유속이 2.11×10^{-8} m/sec인 경우에는 유효공극율 9%, 종분산지수 0.80 m 및 횡분산지수 0.04 m이며, 다르시유속이 2.64×10^{-7} m/sec인 경우에는 유효공극율 10.50%, 종분산지수 1.98 m 및 횡분산지수 0.02 m로 산정되었다. 실내주상실험에서 구한 종분산지수와 비교할 때, 12배 이상의 규모종속효과가 나타났다.

결론적으로 여러 개의 층서로 구성된 토양층의 포화대

에서는 지하수가 존재하며, 또한 매질의 불균질성이 크고 투수성이 다양하기 때문에, 비교적 균질한 층서를 이루는 불포화대에 비하여 추적자 용액의 농도는 낮고, 추적자의 확산이 느리게 진행되어 졌다. 본 연구 결과는 오염물질이 지하의 저장고(주유소 저류탱크, 유독물질 저장탱크 등)나 폐기물매립지에서 연속적으로 유출되면서 불포화대와 포화대를 오염시키는 경우에 불포화대와 포화대에 대한 수리분산특성을 비교평가하는데 기여할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 한국농촌공사 부산 문현지구 유류오염정화사업(2001~2002)의 실증시험중 지하수정화부분 연구비와 2004학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었으며, 연구비를 지원한 2개의 기관에 감사한다.

참 고 문 헌

김용제, 김태희, 김구용, 황세호, 채병곤, 2005, 파쇄대 응회암 대수층의 지하수 유동 특성화 기법, 지하수토양환경, **10**(4), 33-44.

김정우, 이진용, 천정용, 이명재, 김형수, 이강근, 2004, 형광추적자 Rhodamine WT의 측정농도에 영향을 주는 요인 고찰, 지질학회지, **40**(3), 331-340.

문상호, 함세영, 우남칠, 이철우, 2001, 지하수 추적자, 시그마프레스, p. 148.

이진용, 천정용, 이강근, 이민효, 윤정기, 2001, 다공질 천층 대수층에서의 추적자 이동 연구, 지질학회지, **37**(2), 309-316.

장태우, 강필종, 박석환, 황상구, 이동우, 1983, 부산가덕도폭, 한국동력자원연구소, p. 22.

지오그린21, 2003, 용수댐 추적자시험 및 수위/수질 조사분석, p. 225.

한정상, 1998, 지하수환경과 오염, 박영사, p. 1071.

Broermann, J., Bassett, R.L., Weeks, E.P., and Borgstrom, M., 1997, Estimation of a_L, Velocity, Kd and Confidence Limits from Tracer Injection Test Data, *Ground Water*, **35**(6), 1066-1076.

Brouyere, S., Carabin, G., and Dassargues, A., 2005, Influence of Injection Conditions on Field Tracer Experiments, *Ground Water*, **43**(3), 389-400.

Brouyere, S., Dassargues, A., and Hallet, V., 2004, Migration of contaminants through the unsaturated zone overlying the Hesbaye chalky aquifer in Belgium: a field investigation, *Journal of Contaminant Hydrology*, **43**(3), 389-400.

Charles, H. and Steven, M.G., 2000, Rate-limited mass transfer of macrodispersion: Which dominates plume evolution at the Macrodispersion Experiment(MADE) site?, *Water Resources Research*, **36**(3), 637-650.

Feuerstein, D.L. and Sellek, R.E., 1963, Fluorescent tracers for dispersion measurements, *American Society of Civil Engineers Proceedings*, **89**(SA4), p. 1-21.

Gelhar, L.W., Welty, C., and Rehfeldt, K.R., 1992, A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, *Water Resources Research*, **28**(7), 1955-1974.

Irne, F., Kasteel, R., Flurry, M., and Flhler, H., 1999, Longitudinal and lateral dispersion in an unsaturated field soil, *Water Resources Research*, **35**(10), 3049-3069.

Joseph, T. and Kitanidis, P.K., 1994, Solute dilution at the Borden and Cape Cod groundwater tracer tests, *Water Resources Research*, **30**(11), 2883-2890.

Lee, J.Y., Kim, J.W., Cheon, J.Y., Yi, M.J., and Lee, K.K., 2003, Combined performance of pumping and tracer tests: A case study, *Geosciences Journal*, **7**(3), 237-241.

Liping, P. and Murray, C., 1999, A field study of nonequilibrium and facilitated transport of Cd in an alluvial gravel aquifer, *Groundwater*, **37**(5), 785-792.

Novakowski, K.S., 1992, The Analysis of Tracer Experiments Conducted in Divergent Radial Flow Fields, *Water Resources Research*, **28**(12), 3215-3225.

Repogle, J.A., Myers, L.E., and Brust, K.J., 1966, Flow measurements with fluorescent tracers, *Journal of the Hydraulics Division ASCE*, **92**, 1-15.

Rudolph, D.L., Kachanoski, R.G., Celia, M.A., Leblanc, D.R., and Stevens, J.H., 1996, Infiltration and solute transport experiments in unsaturated sand and gravel, Cape Cod, Massachusetts: Experimental design and overview of results, *Water Resources Research*, **32**(3), 519-532.

Sauty, J.P. and Kinzelbach, W., 1992, CATTI: Computer aided tracer test interpretation, International Groundwater Modeling Center, Golden, Colorado.

Sudicky, E.A., 1986, A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer: spatial variability of hydraulic conductivity and its role in the dispersion process, *Water Resources Research*, **22**(13), 2069-2082.