

김해 탄섬의 고투수성 충적층에서 수렴흐름 추적자시험에 의한 규모종속 수리분산 연구

강동환^{1*} · 심병완² · 권병혁³ · 김일규⁴

¹부경대학교 2단계 BK21 지구환경시스템 사업단, ²한국지질자원연구원 지열자원연구소,
³부경대학교 환경대기과학과, ⁴부경대학교 환경공학과

The Scale-Dependent Dispersion Through Convergent Flow Tracer Tests in Alluvial Aquifer with High Permeability at the Ttaan isle, Gimhae City

Dong Hwan Kang^{1*} · Byoung Ohan Shim² · Byung Hyuk Kwon³ · Il Kyu Kim⁴

¹The second stage of BK21 Graduate School of Earth Environmental System, Pukyong National University

²Geothermal Resources Group, Korean Institute of Geosciences and Mineral Resources

³Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea

⁴Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

ABSTRACT

Convergent flow tracer test for 2 m (IW-1 well) and 5 m (IW-2 well) of test scale was conducted at the alluvial aquifer with high permeability and storativity. Pumping rate for convergent flow tracer test were 2,500 m³/day, and the chloride tracer of 5 kg was instantaneously injected into IW-1 and IW-2 wells. Differences of first arrival time and peak concentration were analyzed by using the concentration breakthrough curves of chloride. Recovered chloride mass were analyzed by recovered cumulative mass curves. And, increment and decrement for chloride concentration were analyzed through chloride concentration versus recovered cumulative mass ratio graphs. Also, increment and decrement ratios of chloride concentration were estimated through linear regression analyses for increment and decrement intervals of chloride concentration. Longitudinal dispersivities were estimated by “Converging Radial Flow With Instantaneous Injection” method using CATTI code. Longitudinal dispersivities estimated by CATTI code were 0.4152 m between pumping well and IW-1 well, and 3.2665 m between pumping well and IW-2 well. Longitudinal dispersivity was increased according to far distance from the pumping well. The longitudinal dispersivity according to distance were estimated as 0.21 between pumping well and IW-1 well, and 0.65 between pumping well and IW-2 well.

Key words : Alluvial aquifer, Convergent flow tracer test, Concentration breakthrough curve, Longitudinal dispersivity, Scale-dependent dispersion

요 약 문

투수성이 높고 대수층의 자유량이 풍부한 강변여과수 개발 예정지역의 충적층에서 시험규모가 2 m (IW-1공)와 5 m (IW-2공)인 경우의 수렴흐름 추적자시험이 수행되었다. 수렴흐름 추적자시험의 양수율은 2,500 m³/day 이었으며, 주입정 (IW-1 및 IW-2공)에 염소이온 5 kg을 순간 주입하였다. 염소이온의 농도이력곡선을 작성하여 초기도달시간과 최고농도의 차이를 분석하였으며, 누적질량회수곡선을 통해 양수 후 경과시간에 따른 염소이온의 질량회수율을 분석하였다. 그리고, 염소이온농도 대 누적질량회수율의 이력그래프를 작성하여 누적질량회수율에 따른 염소이온농도의 증가와 감소 변화를 분석하였다. 또한, 염소이온농도의 증가/감소 구간에 대한 선형회귀분석을 수행하여 농도증가를

*Corresponding author : dhkang@pknu.ac.kr

원고접수일 : 2007. 5. 17 게재승인일 : 2007. 11. 22

질의 및 토의 : 2008. 2. 29 까지

*본 논문은 2007년 춘계학술발표회 특별호 논문입니다.

과 감소율의 변화를 파악하였다. 양수정에서 관측된 경과시간별 염소이온농도 자료를 CATTI 코드의 “Converging Radial Flow With Instantaneous Injection” 해석법에 적용하여 종분산지수를 추정하였다. 추정된 종분산지수는 양수정과 IW-1공 사이의 충전층에서는 0.4152 m, 양수정과 IW-2공 사이의 충전층에서는 3.2665 m이었다. 양수정에서 이격거리가 멀수록 종분산지수는 증가하였으며, 이격거리에 대한 종분산지수의 비는 각각 0.21과 0.65 정도이었다.

주제어 : 충전층, 수렴흐름 추적자시험, 농도이력곡선, 종분산지수, 규모종속 수리분산

1. 서 론

인간에게 있어 물은 생명의 근원이자, 삶을 영유하는데 있어 가장 중요한 물질 중 하나이다. 특히, 음용수로 이용되는 지하수는 매우 중요하고 필수적인 자원이다. 하지만, 인간에 의한 지하수의 무분별한 개발과 농·공업용수로의 과도한 사용으로 인해 지하수가 고갈되고 있다. 이에 최근 저류량이 거의 무한한 강변여과수의 개발을 통해 상수원수를 대체하기 위한 연구들이 몇몇 연구자들에 의해 수행되었다. 강변여과수 개발예정 지역에서 지하수의 개발가능량 산정(정지훈 등, 2004), 강변여과수 취수지역의 수리지질특성(함세영 등, 2002; 정재열 등, 2003), 강변여과수 부지 내 충전층 지하수의 수질특성(김건영 등, 2003; 현승규 등, 2006), 강변여과수 개발 시 취수부지 주변의 지하수 유동모델링(함세영 등, 2004; 함세영 등, 2005) 등이 현재까지 국내에서 수행된 연구의 내용이다.

지하수공 개발로 인한 오염물질의 유입에 의한 대수층 내 오염확산 특성을 파악하기 위해서는 현장 추적자시험이 필수적이다. 이러한 추적자시험은 시험공의 개수에 따라 단공 추적자시험(single well tracer test)과 다공 추적자시험(multi well tracer test)으로 분류된다. 다공 추적자시험은 자연경사(natural gradient) 추적자시험과 인위경사(forced gradient) 추적자시험으로 나누어지며, 인위경사 추적자시험에는 수렴흐름(convergent flow) 추적자시험, 발산흐름(divergent flow) 추적자시험 및 재순환(recirculation flow) 추적자시험 등이 있다(강동환, 2006). 이중 시험의 성공률, 추적자의 주입량과 경비, 시험 해석의 용이성 등으로 인해 수렴흐름 추적자시험이 가장 널리 적용되고 있다. Dirk(1989)에 의해 수평적으로 균질한 대수층의 방사상 수렴흐름에 대한 라플라스 변환해(Laplace transform solution)가 개발되었으며, 또한 실제적인 펠클릿수(Peclet number)의 범위에서 라플라스 변환해의 타당성이 평가되었다(Moench, 1991). Chen et al.(1996)은 다공성 매질에서 수행된 수렴흐름 추적자시험의 꼬리효과(tailign effect)에 의한 종분산지수의 차이를 라플라스 변환해로 평가하였으며, 또한 Moench(1991)의 연구와 비교 분석하였다.

국내 및 국외에서 다양한 추적자시험법이 토양과 암반층에서 적용되었으며, 대수층 매질 및 추적자시험 조건을 고려한 분산지수(dispersivity)가 추정되었다. 이러한 자료들을 이용하여, 1990년대 중반 이후부터 종분산지수(longitudinal dispersivity)를 이용한 규모종속 수리분산(scale-dependent dispersion) 연구가 활발하게 진행되고 있다. Dirk(2005)에 의해 현무암, 화강암, 사암 및 탄산염 암층에서 종분산지수의 규모종속이 미시적인 규모와 거시적인 규모에서 분석되었으며, 또한 미고결층에서는 추적자시험의 신뢰도(reliability)에 의해 규모종속이 분석되었다. Gelhar 등(1992)은 신뢰도(reliability)에 따라 시험규모별 수평 및 수직 분산지수 그래프 산출하여 분석하였으며, Xu와 Eckstein(1995)은 시험규모 대 종분산지수의 합수를 로그-로그 그래프로 추정하였다.

본 연구에서는 강변여과수 개발 예정부지인 김해 탄성 지역의 고투수성 충전층에서 수렴흐름 추적자시험이 수행되었으며, 추적자시험의 규모에 따른 염소이온의 규모종속 수리분산특성을 규명하였다. 또한 규모종속 수리분산의 연구 사례와 비교 분석하여, 본 연구지역에서의 고투수성에 의한 수리분산특성을 규명하였다.

2. 수학적 모델 및 지배방정식

방사상 수렴흐름에 의한 용질이송 모델은 다음의 11가지 가정들에 의해 지배되어 진다(Moench, 1989). 먼저, 양수정(pumped well)의 직경은 유한하고, 균질·등방한 일정 두께의 대수층에 수평적으로 완전관통(fully penetration) 되어야한다. 두 번째는 양수정을 기준으로 방사상 수렴흐름이며, 등온의 정상류 흐름장(isothermal steady state flow field)이 형성되어야 한다. 이를 위해, 추적자시험 이전에 일정한 양수율에 의한 정상상태를 만들어야 한다. 세 번째는 양수정 인근에 위치한 추적자 주입정(injection well)은 완전관통 되어야하며, 시험대수층 내 속도분포를 균일하게 하여야 한다. 네 번째는 주입정의 직경은 유한하고, 양수정과 이격거리에 비해 매우 적어야 한다. 다섯 번째는 주입된 추적자는 주입공 내 지하수와 순간적으로 완전히 혼합되어야 한다. 여섯 번째는 시

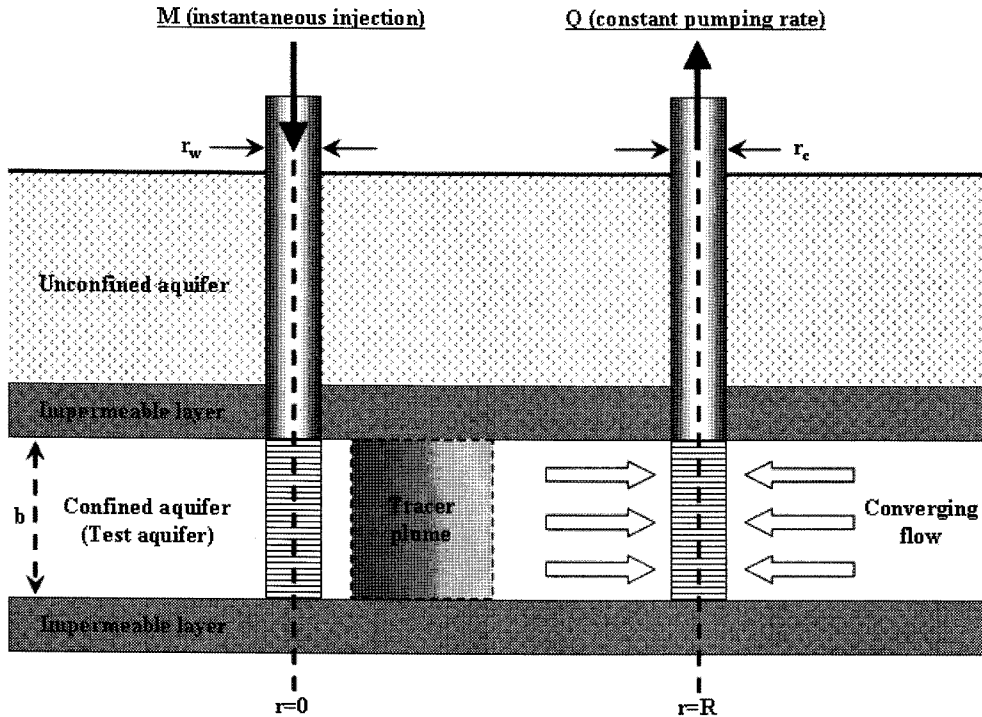


Fig. 1. Schematic diagram of radially convergent tracer test.

함대수층 내에서 추적자의 이송은 이류(advection)와 역학적인 분산(mechanical dispersion)에 의해서만 발생하며, 분자확산(molecular diffusion)은 무시된다. 일곱 번째는 역학적인 분산은 휘크의 법칙(Fick's law)에 따른다. 여덟 번째는 주입되는 추적자농도는 밀도효과(density effect)를 고려하지 않아도 될 정도로 낮아야 한다. 아홉 번째는 추적자는 비반응성(non-reactive)이며, 대수층 매질에 선형흡착(linear sorption)이 발생하는 것으로 가정한다. 열 번째는 양수정 내로 유입된 추적자는 지하수와 순간적으로 완전히 혼합된다. 마지막으로, 양수정 내 추적자 농도는 대수층 내 추적자 농도와 다르다는 가정이다.

수렴흐름 추적자시험의 개념도가 Fig. 1에 도시되어 있다. 위의 11가지 가정을 만족하는 수평적으로 무한하고 균질·등방인 시험대수층에서의 지하수 흐름장은 $r=0$ 인 z -축을 기준으로 좌우 대칭(symmetry)의 수렴흐름이 형성된다.

위의 일반적인 가정 하에서 수행된 수렴흐름 추적자시험 시 방사상 방향(radial direction)의 평균공극유속(average pore velocity)은 식 (1)과 같다.

$$V = -\frac{A}{r}, \quad r_c \leq r < \infty \quad (1)$$

여기서 $A = \frac{Q}{2\pi b n_e}$, A 는 대수층의 단면적[L²], r 은 양수정

의 중심에서 이격된 거리[L], b 는 대수층 두께[L], n_e 는 대수층의 유효공극율[무차원], r_c 는 양수정의 내경[L]이다. 역학적인 분산이 휘크 법칙을 따르며, 분산계수(dispersion coefficient)가 지하수 유속에 비례한다는 가정 하에, 주입정에 순간적으로 주입된 추적자의 방사상 수렴분산(convergent dispersion)은 다음의 지배방정식으로 표현된다(Chen et al., 1996).

$$\frac{a_L A \delta^2 C}{r} + \frac{A \delta C}{r} + \frac{M}{2\pi r b n_e} \delta(R-r) = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2)$$

여기서 a_L 은 종분산지수[L], C 는 추적자농도[ML⁻³], M 은 주입된 추적자질량[M], R 은 양수정과 주입정 사이의 이격거리[L], δ 는 Dirac delta 함수이다. 추적자시험 이전에 대수층에서 추적자의 농도는 0이며, 초기농도 조건은 식 (3)과 같다.

$$C(r, 0) = 0, \quad r_c \leq r < \infty \quad (3)$$

양수정은 수학적 모델에서 강하대(sink)로 처리된다. 양수정 내부 벽면과 매우 인접한 대수층 매질에서의 추적자농도는 평형을 이룬다고 가정하며, 따라서 농도경사(concentration gradient)는 0이다. 양수정 내에서 추적자농도의 경계조건은 식 (4)와 같다.

$$\frac{\partial C(r_c, t)}{\partial r} = 0 \quad t > 0 \quad (4)$$

여기서 r_c 는 정상상태 도달 이후 경과된 양수시간[T]이다. 양수정에서 무한거리에 위치한 지점에서의 농도경계조건은 식 (5)와 같다.

$$C(r \rightarrow \infty, t) = 0 \quad (5)$$

3. 수렴흐름 추적자시험

3.1. 시험부지의 수리지질특성

본 연구에서 수렴흐름 추적자시험이 수행된 시험부지는 경상남도 김해시 생림면 마사리 탄섬 일원이다. 수계(water system)는 시험부지를 중심으로 남서-동북 방향으로 낙동강 본류가 흐르고 있으며, 북쪽에는 밀양강이 북에서 남으로 유하하여 낙동강에 합류되고 있다. 시험부지 일대는 밀양강과 낙동강이 합류되는 지역으로, 유수의 영향으로 형성된 충적층이 넓은 평야를 형성하고 있다.

본 조사지역의 지질은 중생대 백악기에 형성된 유천층군과 불국사 관입암류가 기반암으로 분포하고, 제 4기 충적층이 부정합으로 최상부에 위치하고 있다. 유천층군은 하부의 주사산 안산암질암류와 상부의 운문사 유문암질암류로 대별되며, 불국사화강암류는 화강암질암류와 산성암맥류로 구분된다. 또한, 최상부에 위치한 제 4기 충적층은 밀양강 및 낙동강 수계를 따라 넓은 충적평야를 형성하고 있다.

수렴흐름 추적자시험에 이용된 추적자의 주입정과 양수정에 대한 제원은 Table 1에 정리되어 있다. 1개의 양수정(pumping well)과 2개의 주입정(injection well)이 개발되었으며, 시험대수층 구간인 지표면하 25~35 m 구간에 만 스크린이 설치되었다. 시험부지에서는 지표면하 23 m 까지 모래층이 존재하며, 그 하부에는 2 m 두께의 점토로 구성된 불투수층이 형성되어 있었다. 불투수성 점토층의 하부에는 10 m 두께의 점토질 자갈층이 존재하고, 점토질 자갈층의 하부에는 불투수성 압반층이 형성되어 있었다.

Table 1. Designs of injection and pumping wells used tracer tests

Design	Depth (GL-, m)	Screen interval (GL-, m)	Inner diameter (mm)	Elevation (EL+, m)	
Injection well	IW-1	35	25~35	75	3.978
	IW-2	35	25~35	75	6.226
Pumping well	PW	35	25~35	100	5.860

* GL- : Depth from ground surface.

수렴흐름 추적자시험이 수행된 3개 공 내 자갈대수층의 수리전도도는 회복시험(recovery test)에 의해, 저류계수는 양수시험(pumping test)에 의해 산정되었다(Table 2). 시험대수층 구간에서 회복시험에 의해 산정된 수리전도도는 138.5 m/day이었으며, 이러한 값은 높은 투수성을 가진 모래와 자갈층에 해당된다(Freeze and Cherry, 1979). Todd와 Mays(2005)에 의하면, 피압대수층에서 저류계수의 범위는 $5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-3}$ 정도이다. 따라서, 본 연구지역에서 산정된 저류계수는 2.823×10^{-3} 로서 높은 것으로 나타났다.

3.2. 추적자시험 조건 및 수행

본 연구에서 수행된 수렴흐름 추적자시험의 방법과 조건들은 아래와 같다.

① 수렴흐름 추적자시험을 수행하기 위해, 먼저 주입정과 관측정에서 일정한 양수율(2,500 m³/day)을 통해 안정수위를 형성하였다. IW-1공에서 추적자용액 주입시험 기간 동안 주입정과 관측정의 안정수위는 지표면하 6.05 m와 14.18 m이었으며, IW-2공에서 추적자용액 주입시험 기간 동안 주입정과 관측정의 안정수위는 지표면하 6.35 m와 13.85 m이었다.

② 추적자로는 염소이온(Cl⁻)이 이용되었으며, 1회 시험당 5 kg이 순간주입(instantaneous injection) 되었다. 추적자 용액의 1회 주입량은 50 L이었으며, 주입시간은 3분 정도이었다.

③ 관측정(양수정)에서의 관측은 현장에서는 전기전도도를 측정하였으며, 실내에서는 일정 시간 간격으로 채수한 시료를 이용하여 염소이온농도를 분석하였다. 추적자시험 초기에는 10분 간격으로 샘플링 하였으며, 전기전도도가 높게 나타난 이후부터는 2분 간격으로 시료 채수하였다.

Table 2. Hydraulic conductivity and storage coefficient in the test aquifer

Depth (GL-, m)	Description	Hydraulic conductivity (m/day)	Storage coefficient
25~35	Gravel mixed clay	138.5	2.823×10^{-3}

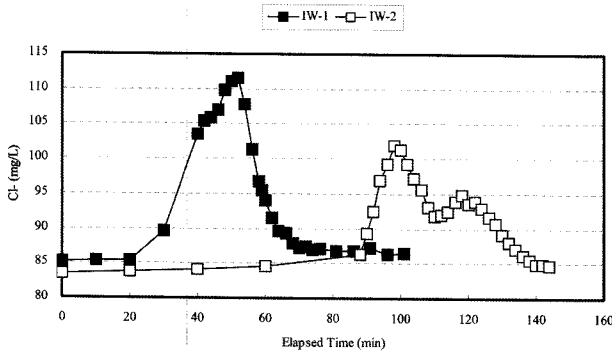


Fig. 2. Breakthrough curves of chloride in PW well with injected in IW-1 and 2 wells.

3.3. 농도이력곡선

현장에서 수행된 수렴흐름 추적자시험에 의해 산출된 염소이온의 농도이력곡선이 Fig. 2에 작성되어 있다. 양수정(관측정)에서 염소이온의 초기도달시간은 IW-1공 주입 시에서는 30분, IW-2공 주입 시에는 90분 정도 경과되었다. 염소이온의 최고농도도달시간과 농도는 IW-1공 주입 52분 경과 후에 111.57 mg/L, IW-2공 주입 98분 경과 후에 101.88 mg/L로 관측되었다.

IW-1공에 비해 IW-2공을 이용한 추적자시험 시 PW공에 추적자의 초기도달시간은 3배 정도이었으나, 최고농도 차이는 약 10 mg/L 정도로서 적게 나타났다. 그러나, 양수정의 배경농도가 약 85 mg/L 정도인 것을 감안한다면, 최고농도의 차이도 약 1.6배 정도 발생한 것으로 판단된다. 초기도달시간의 차이는 양수정에서의 이격거리가 각각 2 m와 5 m로서 2.5배이었기 때문이며(Pang and Hunt, 2001; Su et al., 2005), 최고농도의 차이가 상대적으로 적은 것은 시험대수층의 높은 투수성에 의한 빠른 이류확산(advective dispersion)에 의한 것이다. 본 연구에서 수행된 추적자시험에 의한 농도이력곡선에서 꼬리(tailing)는 IW-1공 주입 시 70분, IW-2공 주입 시 140분 경과 후에 나타났으며, 이는 시험대수층 매질 중 점토가 우세한 영역에서의 기질확산(matrix diffusion)에 의한 것으로 판단된다(Haggerty et al., 2001).

IW-2공을 이용한 추적자시험의 염소이온 농도이력곡선에서는 주입 후 98분 경과 시까지는 증가, 이후 110분 경과시까지는 감소, 이후 110~118분 사이에서는 다시 증가하였다가 118분 이후에 감소하였다. 추적자 주입 후 110~118분 사이에서의 불규칙적인 염소이온농도의 변화는 이진용 등(2001)에 의해 수행된 다공질 천층대수층에서 수행된 자연구배 추적자시험에서도 나타난 바 있으며, 이는 자갈과 점토가 섞인 시험대수층의 다양한 이류공극

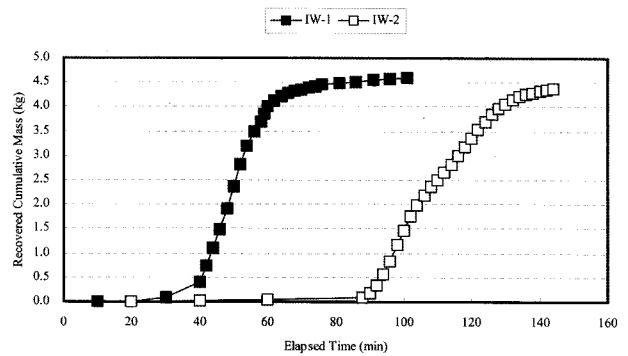


Fig. 3. Recovered cumulative mass curves of chloride in PW well with injected in IW-1 and 2 wells.

(advective pore)과 이송경로(transport path)의 차이에 의해 발생할 것으로 추정된다.

추적자시험공에서 양수 후 경과시간에 따른 추적자의 누적질량회수곡선은 시험대수층의 추적자 회수가능성, 회수율 및 확산정도를 추정하는데 적용되고 있다(강동환 등, 2006). 본 연구에서 수행된 수렴흐름 추적자시험 동안 양수정에서 관측된 염소이온의 누적질량회수곡선(recovered cumulative mass curve)이 Fig. 3에 작성되어 있다. IW-1공 주입 시에는 101분 경과 시점에서 4.58 kg, IW-2공 주입 시에는 144분 경과 시점에서 4.36 kg의 염소이온이 회수되었다. IW-1공과 IW-2공에서 주입된 염소이온의 질량은 각각 5 kg이었으며, 따라서 염소이온의 회수율은 각각 91.6%와 87.2%이었다. IW-2공에서의 누적질량회수율이 약 4.4% 정도 낮았으며, 이는 양수정에서의 이격거리가 멀었기 때문이다. 추적자 주입정과 양수정의 이격거리가 멀어질수록 주입된 추적자의 이송경로가 다양하고, 양수에 의한 영향반경의 범위를 벗어나는 추적자의 양이 증가하게 되어 누적질량회수율이 감소한다(강동환 등, 2006).

IW-1공과 IW-2공을 이용한 추적자시험의 누적질량회수곡선 중 선형증가구간(IW-1공 주입 시 40~60분, IW-2공 주입 시 90~130분)의 경향은 유사하게 나타났으며, 이는 양수정과 IW-1공, 양수정과 IW-2공 사이의 대수층 구간에서 염소이온의 누적질량회수율이 선형적으로 비례함을 의미하는 것이다.

수렴흐름 추적자시험 동안 양수정에서 동일한 누적질량회수율에 대한 염소이온농도의 이력그래프를 작성하였다(Fig. 4). IW-1공과 IW-2공 주입 시 양수정에서 관측된 염소이온의 농도이력은 전체적으로 유사한 경향을 보였으나, 30~70%의 회수율 구간에서는 IW-2공이 매우 낮은 것으로 나타났다. IW-1공 주입 시에는 누적질량회수율이 56% 정도까지는 양수정의 염소이온농도가 증가하였으며,

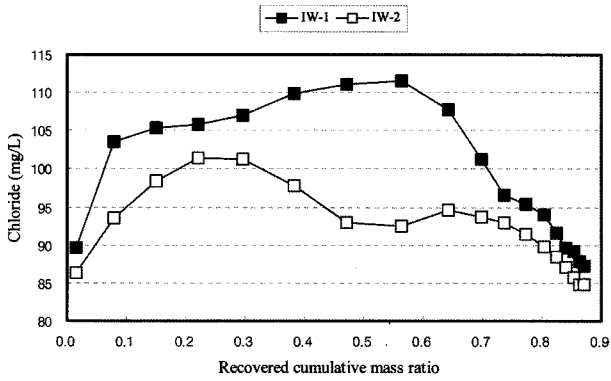


Fig. 4. Breakthrough curves of chloride concentration versus recovered cumulative mass ratio.

이후에는 급격하게 감소하였다. IW-2공 주입 시에는 누적 질량회수율이 22% 정도까지 증가하고, 이후 56% 정도까지 감소하고, 이후 64% 정도까지는 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보였다. IW-2공에서 누적질량회수율에 대한 염소이온농도의 증가와 감소의 변화가 다양한 것은 양수정에서의 이격거리가 멀어 시험대수층의 수평적인 불균질성이 높았기 때문이다(강동환 등, 2006).

3.4. 시험규모별 염소이온농도의 증가/감소 선형회귀분석

정상용 등(2006)에 의하면, 선형회귀분석을 통해 자연구배 추적자시험 시 추적자의 브롬이온농도 증가/감소율을 추정하였다. 본 연구에서는 수렴흐름 추적자시험 동안 염소이온의 최고농도 도달시간을 기점으로 하여 추적자 주입 후 경과시간에 따른 염소이온농도의 증가구간과 감소구간에 대한 선형회귀분석이 실시되었다(Fig. 5).

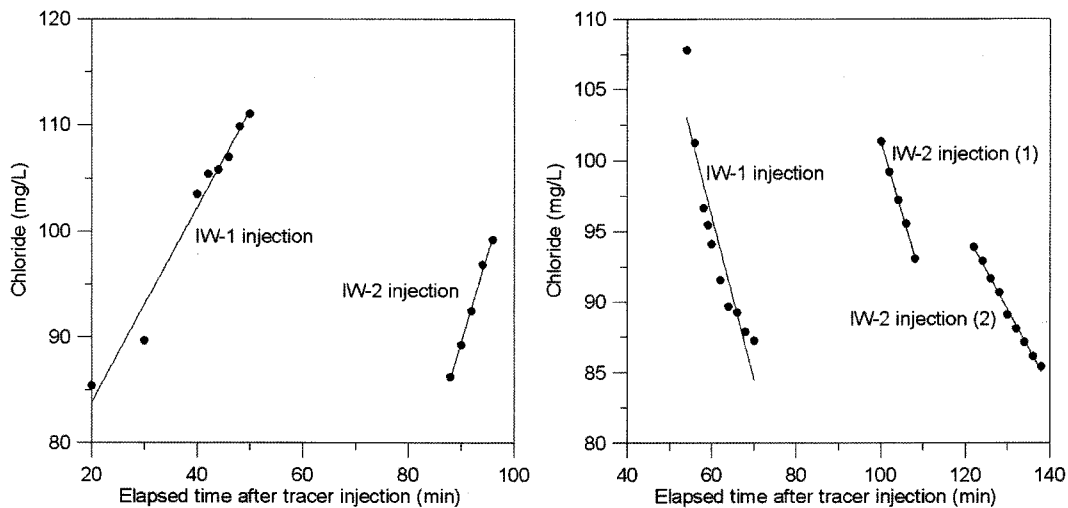


Fig. 5. Linear regression analysis of the chloride concentration versus time for the increment (left) and decrement (right) intervals of chloride concentration.

염소이온농도의 증가구간에서는 IW-1공 주입 시의 기울기에 비해 IW-2공 주입 시의 기울기가 1.8배 정도 높게 나타났으며, 이는 짧은 시간에 염소이온농도의 증가가 높게 나타났음을 의미하는 것이다. 염소이온농도의 감소구간에서는 IW-1공 주입 시의 기울기에 비해 IW-2공의 첫 번째 감소구간(100~110분)에서의 기울기는 1.14배 정도 낮게 나타났으나, IW-2공의 두 번째 감소구간(120~140분)에서의 기울기는 1.96배 정도 낮았다. 따라서, 본 연구에서 수행된 수렴흐름 추적자시험에 의한 염소이온농도의 증가/감소 구간의 선형회귀분석에 의해 IW-2공 주입 시에 농도증가율이 높고, IW-1공 주입 시에는 농도감소율이 더욱 높음을 알 수 있었다.

3.5. 규모종속 수리분산

본 연구에서 실시되어진 수렴흐름 추적자시험의 결과 해석은 관측정에서 측정된 추적자 용액의 시간에 따른 농도자료와 종거리, 양수율, 추적자질량 및 대수층 두께 등을 추적자시험 전문해석프로그램인 CATTI에 입력한 후, “Converging Radial Flow With Instantaneous Injection” 해석법을 적용하여 type curve matching법으로 종분산지수를 추정하였다(Sauty and Kinzelbach, 1992). 추적자시험 해석을 위해 입력된 값들은 Table 4에 정리되어 있다. CATTI 코드에서 추정된 종분산지수는 IW-1공과 양수정 사이의 시험대수층에서는 0.4152 m이었으며, IW-2공과 양수정 사이에서는 3.2665 m 인 것으로 나타났다. 이격거리에 대한 종분산지수의 비는 각각 0.21과 0.65 정도로서 양수정에서 이격거리가 멀수록 종분산지수가 더욱 증가하

Table 3. Results of linear regression analysis for the increment (left) and decrement (right) intervals of chloride concentration

Concentration trend	Injection well	Slope	Intercept	R-squared
Increment	IW-1	0.9165	65.5421	0.9711
	IW-2	1.6704	60.8703	0.9935
Decrement	IW-1	-1.1564	165.4339	0.8686
	IW-2(1)	-1.0107	202.3807	0.9965
	IW-2(2)	-0.5896	165.9124	0.9938

Table 4. Input parameters for CATTI code and estimated longitudinal dispersivities

Well no.	Longitudinal distance (m)	Pumping rate (m ³ /day)	Injection mass (kg)	Aquifer thickness (m)	Longitudinal dispersivity (m)
IW-1	2	2,500	5	10	0.4152
IW-2	5	2,500	5	10	3.2665

Table 5. Estimated longitudinal dispersivities from adapted other researches

References	Estimated equation		Longitudinal dispersivity	
	IW-1	IW-2	IW-1	IW-2
CATTI	Type Curve Matching		0.4152	3.2665
Arya, 1986	0.177 L ^{0.728}		0.2932	0.5712
Neuman, 1990	0.0175 L ^{1.46}		0.0481	0.1835
Xu and Eckstein (1 : 1 : 1)	1.20 (logL) ^{2.958}		0.0344	0.4160
Xu and Eckstein (1 : 1.5 : 2)	0.94 (logL) ^{2.693}		0.0371	0.3583
Xu and Eckstein (1 : 2 : 3)	0.83 (logL) ^{2.414}		0.0458	0.3496

는 규모종속(scale dependent) 수리분산 효과를 나타내었다(Gelhar et al., 1992; Neuman, 1995; Xu and Eckstein, 1995; Dirk, 2005). 본 연구지역의 시험대수층에서 시험규모가 2.5배 증가할 때 종분산지수는 7.9배 정도 높게 추정되었으며, 이는 시험대수층에서 염소이온의 수리분산을 정량화한 종분산지수가 규모종속적임을 의미하는 것이다.

본 연구에서 수행된 수렴흐름 추적자시험의 규모(Table 5에서 “L”로 표기)만을 고려하여 Arya(1986), Neuman(1990) 및 Xu와 Eckstein(1995)의 연구에 적용한 결과를 Table 5에 정리하였다. 본 현장에서 수행된 수렴흐름 추적자시험 자료를 CATTI 코드에 의해 추정된 종분산지수가 IW-1공 주입시험에서는 1.42~12.07배이었으며, IW-2공 주입시험에서는 5.72~17.80배 정도이었다. 따라서, 본 연구지역의 시험대수층의 확산도가 일반적인 자연대수층의 평균적인 확산 정도에 비해 매우 높음을 알 수 있었다.

본 연구에서 추정된 종분산지수와 Xu와 Eckstein(1995)의 연구를 적용한 종분산지수를 Gelhar 등(1992)에 의해 제시된 그래프에 도시하였다(Fig. 6). 현장시험에 의

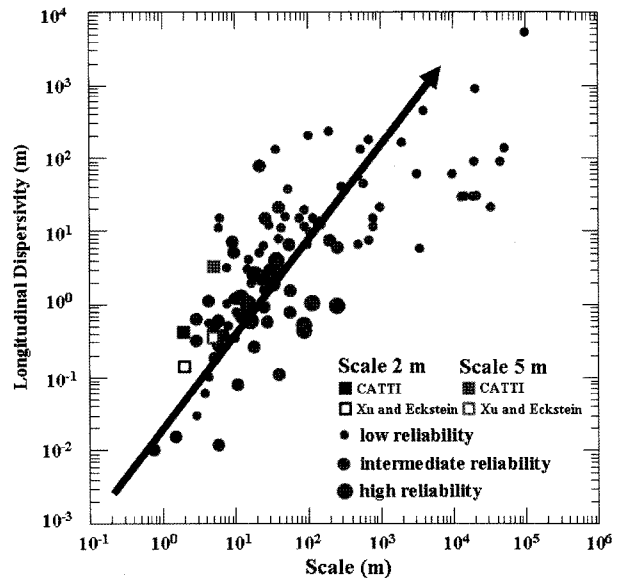


Fig. 6. Longitudinal dispersivity magnitude and reliability analysis with tracer test scales (modified by Gelhar et al., 1992).

해 추정된 종분산지수에 비해 Xu와 Eckstein(1995)의 방정식에 의한 종분산지수가 Gelhar 등(1992)의 연구 사례

에 더욱 적합하였다. 또한, 앞에서도 언급하였듯이 본 연구에서 추정된 중분산지수가 Xu 와 Eckstein(1995)의 방정식으로 산정된 중분산지수에 비해 12~17배 정도 높았다. 이러한 결과들은 본 연구지역의 시험대수층 구간에 오염물질이 유입되었을 경우에는 확산이 매우 빠르게 발생할 수 있음을 의미하며, 따라서 시험대수층 내에서는 오염원에서 이격거리에 따른 농도저감이 높게 나타날 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 고투수성 층적층에서 수행된 수렴흐름 추적자시험에 의한 규모종속 수리분산을 연구하였으며, 다음의 결과들이 도출되었다.

1. 본 연구에서 수행된 수렴흐름 추적자시험에 의한 염소이온의 농도이력곡선 분석에 의하면 IW-1공에 비해 IW-2공을 이용한 추적자시험 시 양수정에 추적자의 초기 도달시간은 3배 정도 지연되었으며, 양수정의 배경농도(85 mg/L)를 고려한 최고농도의 차이는 약 1.6배 정도이었다. 초기도달시간의 차이는 양수정에서의 이격거리 차이(2.5 배)에 의한 것이며, 최고농도의 차이가 상대적으로 적은 것은 시험대수층의 높은 투수성에 의한 빠른 이류확산에 의한 것이다.

2. 수렴흐름 추적자시험 동안 회수된 염소이온의 질량은 IW-1공 주입시험 시 4.58 kg(91.6%), IW-2공 주입시험 시 4.36 kg(87.2%) 이었다. 누적질량회수곡선에서 회수율이 선형적으로 증가하는 구간은 IW-1공 주입시험 시 40~60분, IW-2공 주입시험 시 90~130분 정도로서 증가 경향은 유사하게 나타났다. 염소이온의 누적질량회수곡선 분석을 통해 양수정과 IW-1공, 양수정과 IW-2공 사이의 대수층 구간에서 염소이온의 질량회수율이 시험규모에 선형적으로 비례함을 알 수 있었다.

3. 수렴흐름 추적자시험 동안 양수정에서 동일한 누적 질량회수율에 대한 염소이온농도의 이력그래프를 분석한 결과 2회의 추적자시험 시 양수정에서 관측된 염소이온의 농도이력은 전체적으로 유사한 경향을 보였으나, 30~70%의 회수율 구간에서는 IW-2공의 주입시험 시에 매우 낮은 것으로 나타났다. IW-1공 주입시험 시에는 염소이온농도가 누적질량회수율 56%를 전후로 증가/감소하였으나, IW-2공의 주입시험 시에는 양수정 사이 대수층구간의 수평적인 불균질성이 높아 누적질량회수율에 대한 염소이온농도의 증가와 감소의 변화가 다양하게 나타났다.

4. 수렴흐름 추적자시험 동안 염소이온농도의 증가구간에 대한 선형회귀분석에 의하면 염소이온농도의 증가구간

에서는 IW-2공 주입시험 시의 기울기가 1.8배 정도 높게 나타났다. 염소이온농도의 감소구간에서는 IW-1공 주입시험 시의 기울기가 1.14~1.96배 정도 높게 나타났다. 이를 통해, IW-2공 주입시험 시에는 농도증가율이 높고, IW-1공 주입시험 시에는 농도감소율이 더욱 높음을 알 수 있었다.

5. 수렴흐름 추적자시험에 의한 경과시간별 염소이온농도를 CATTI 코드에 입력하여 추정된 중분산지수는 IW-1공과 양수정 사이에서는 0.4152 m, IW-2공과 양수정 사이에서는 3.2665 m이었다. 양수정에서 이격거리에 대한 중분산지수의 비는 각각 0.21과 0.65 정도로서, IW-2공과 양수정 사이 대수층의 중분산지수가 더욱 높은 규모종속 효과를 나타내었다. 또한, 본 연구에서는 시험규모가 2.5 배 증가할 때 중분산지수는 7.9배 높게 추정되어 시험대수층에서 염소이온의 중분산지수가 규모종속적임을 알 수 있었다. 본 연구에서 추정된 중분산지수가 Xu와 Eckstein(1995)의 방정식으로 산정된 중분산지수에 비해 12~17배 정도 높았으며, 따라서 본 연구지역의 시험대수층에 오염물질의 유입 시 확산이 매우 빠르게 발생하고 이격거리에 따른 농도저감효과가 높게 나타날 것이다.

사 사

이 논문은 부경대학교 BK21 지구환경시스템 사업단 및 기상청 기상지진기술개발사업단(CATER 2006-2101)에 의하여 연구비가 지원되었으며, 지원기관에 감사한다. 그리고, 현장에서 수고를 아끼지 않은 김성수, 김태영, 양성일, 정휘계 군에게도 감사함을 전합니다.

참 고 문 헌

- 강동환, 2006, 추적자시험을 이용한 단일암반층과 토양층에서 수리분산특성 연구, 이학박사학위논문, 부경대학교, p. 148.
- 강동환, 정상용, 김병우, 2006, 수평적으로 불균질한 단일암반층에서 단공주입양수 추적자시험에 의한 수리분산특성, 한국지하수토양환경학회지, 11(6), 53-60.
- 김건영, 고용권, 김천수, 김형수, 김성이, 2003, 강변여과수 개발을 위한 낙동강 층적층 지하수의 지구화학적 특성연구, 지질공학회지, 13(1), 80-105.
- 이진용, 천정용, 이강근, 이민효, 윤정기, 2001, 다공질 천층 대수층에서의 추적자 이동 연구, 지질학회지, 37(2), 309-316.
- 정상용, 강동환, 김병우, 2006, 부산시 좌천동 단일암반층에서 자연연구배 추적자시험을 이용한 수리분산특성 연구, 대한지질공학회지, 16(3), 245-254.

- 정재열, 함세영, 김형수, 손건태, 차용훈, 장성, 백건하, 2003, 창원시 대산면 강변층적층의 지하수위 변동 특성, *지질공학회지*, **13**(4), 457-474.
- 정지훈, 박재현, 박창근, 양정식, 김대근, 정교철, 최용선, 부성안, 2004, 방사형 집수정에 의한 강변여과수 산출량 산정에 관한 연구, *지질공학회지*, **14**(4), 417-427.
- 함세영, 정재열, 김형수, 한정상, 류수희, 2004, 창원시 북면 낙동강 주변 하성퇴적층의 지하수유동 모델링 연구, *자원환경지질학회지*, **37**(5), 499-508.
- 함세영, 정재열, 김형수, 한정상, 차용훈, 2005, 창원시 대산면 강변여과수 취수부지 주변의 지하수 유동 모델링, *자원환경지질학회지*, **38**(1), 67-78.
- 함세영, 정재열, 류상민, 김무진, 김형수, 2002, 창원시 대산면 강변여과수 취수지역의 수리지질 특성, *지질학회지*, **38**(4), 595-610.
- 현승규, 우남철, 신우식, 함세영, 2006, 강변여과수 부지 내 층적층 지하수의 수질특성과 변화, *자원환경지질학회지*, **39**(2), 151-162.
- Arya, A., 1986, Dispersion and reservoir heterogeneity, Ph. D. dissert., University of Texas, Austin.
- Chen, J.S., Liu, C.W., Chen, C.S., and Yeh, H.D., 1996, A Laplace transform solution for tracer tests in a radially convergent flow field with upstream dispersion, *Journal of Hydrology*, **183**, 263-275.
- Gelhar, L.W., Welty, C., and Rehfeldt, K.R., 1992, A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, *Water Resour. Res.*, **28**(7), 1955-1974.
- Dirk, S.M., 2005, Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior, *Ground Water*, **43**(3), 443-456.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979, *Ground Water*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, p. 603.
- Haggerty, R., Fleming, S.W., Meigs, L.C., and McKenna, S.A., 2001, Tracer tests in a fractured dolomite, 2. Analysis of mass transfer in single-well injection-withdrawal tests, *Water Resources Research*, **37**(5), 1129-1142.
- Moench, A.F., 1989, Convergent radial dispersion: A Laplace transform solution for aquifer tracer testing, *Water Resources Research*, **25**(3), 439-447.
- Moench, A.F., 1991, Convergent radial dispersion: A note on evaluation of the Laplace transform solution, *Water Resources Research*, **27**(12), 3261-3264.
- Neuman, S.P., 1990, Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media, *Water Resources Research*, **26**(8), 1749-1758.
- Neuman, S.P., 1995, On advective transport in fractal permeability and velocity fields, *Water Resour. Res.*, **31**(6), 1455-1460.
- Pang, L. and Hunt, B., 2001, Solutions and verification of a scale-dependent dispersion model, *J. Contam. Hydrol.*, **53**, 21-39.
- Sauty, J.P. and Kinzelbach, W., 1992, CATTI: Computer aided tracer test interpretation, International Groundwater Modeling Center, Golden, Colorado.
- Su, N., Sander, G.C., Liu, F., Anh, V., and Barry, D.A., 2005, Similarity solutions for solute transport in fractal porous media using a time- and scale-dependent dispersivity, *Applied Mathematical Modeling*, **29**, 852-870.
- Todd, D.K. and Mays, L.W., 2005, *Groundwater Hydrology*, John Wiley & Sons, Inc., p. 636.
- Xu, M. and Eckstein, Y., 1995, Use of weighted least-squares method in evaluation of the relationship between dispersivity and field scale, *Ground Water*, **33**(6), 905-908.