

김해시 땅섬의 고투수성 충적층에서 염소이온의 수리분산특성

The hydrodynamic dispersion characteristics of chloride in high permeable alluvial deposit at the Ttaan island, Kimhae city

강동환*, 김태영**, 양성일***, 정상용***

Dong Hwan Kang, Tae Yeong Kim, Sung Il Yang, Sang Yong Chung

요지

낙동강과 밀양강의 합류지점에 위치한 김해시 땅섬 지역의 지표면하 25~35 m 구간에 형성되어 있는 고투수성 충적층 내 염소이온의 수리분산특성을 연구하기 위한 수렴흐름 추적자시험 (convergent flow tracer test)이 수행되었다. 추적자로는 IW-1공과 IW-2공에서 각각 염소이온 5 kg이 순간주입(instantaneous injection) 되었으며, PW공에서 일정한 양수율(2,500 m³/day)로 채수하면서 염소이온농도를 관측하였다. 염소이온 주입 후 경과시간에 따른 염소이온농도 자료를 이용하여 농도이력곡선과 누적질량회수곡선이 산출되었으며, 관측된 염소이온농도의 정규분포를 검증하기 위한 일반통계분석이 수행되었다. 그리고, 농도이력의 증가/감소 구간에서의 험수를 추정하였으며, 두 시험에서 동일한 시간에 관측된 염소이온농도의 상관성이 분석되었다. 본 현장에서 수행된 추적자시험에 의한 종분산지수의 추정은 CATTI 코드(Sauty and Kinzelbach, 1992)에 의해 해석되었다. 추정된 종분산지수는 IW-1공과 PW공 구간에서는 0.4152 m, IW-2공과 PW공 구간에서는 0.4158 m로서 매우 유사한 값으로 나타났다. 이는 추적자시험이 수행된 충적층에서의 용질이송이 방사상으로 비교적 균일함을 의미하는 것이다. 본 연구에서 수행된 추적자시험의 규모(2 m)를 Xu and Eckstein(1995)이 제시한 방정식에 대입하여 산정된 종분산지수는 0.0458 m 이었다. 이러한 결과는, 본 연구지역에서 수렴흐름 추적자시험에 의해 추정된 고투수성 충적층의 종분산지수가 일반적인 자연대수층에 비해 9.1배 정도 높다는 것을 의미한다. 이는 시험대수층의 투수성이 매우 높아 염소이온의 용질이송이 매우 빠르게 발생되었기 때문이다. 본 연구에서 추정된 종분산지수를 Gelhar et al.(1992)의 연구 결과와 비교 분석한 결과에서도 시험규모에 비해 매우 높은 수리분산이 발생된 것으로 나타났다. 그리고 염소이온의 확산면적을 추정하기 위해, 수렴흐름 추적자시험에 의한 종분산지수와 시험대수층의 평균선형유속을 이용하여 종분산계수를 구하였다. 현장에서 수행된 양수시험에 의한 평균선형유속 22.44 m/day와 평균 종분산지수 0.4155 m를 적용하여 산정된 종분산계수는 9.32 m²/day 이었다. 따라서, 시험부지 내 충적층에서 일정한 양수율(2,500 m³/day)로 지하수를 개발할 시에 양수정 주변지역으로 유입되는 염소이온의 확산면적은 1일 9.32 m² 정도일 것으로 나타났다.

핵심용어 : 고투수성, 충적층, 수렴흐름 추적자시험, 염소이온, 수리분산특성

* 정희원 · 부경대학교 지질환경연구소 선임연구원 · E-mail : dhkang@pknu.ac.kr

** 정희원 · 부경대학교 환경지질과학과 교수 · E-mail : chungsy@pknu.ac.kr

*** 부경대학교 환경지질과학과 석사과정생 · E-mail : kimty@pknu.ac.kr

**** 부경대학교 환경지질과학과 석사과정생 · E-mail : yangsi@pknu.ac.kr

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 과다한 사용으로 인해 지하수가 고갈되고 있다. 이에 최근에는 수원(water source)이 무한하고 저유량이 매우 많은 강변여과수의 개발이 수행되고 있다. 지하수공 개발로 인한 오염물질의 유입에 의한 대수층 내 오염화산특성을 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(강동환, 1999). 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. 이 중 시험의 성공률, 추적자의 주입량과 경비, 시험 해석의 용이성 등으로 인해 수렴흐름 추적자시험이 가장 널리 적용되고 있다. 본 연구에서는 고투수성 하상층격층에서 수렴흐름 추적자시험을 수행하여, 농도이력곡선에 의한 종분산지수를 추정하여 염소이온의 수리분산특성을 분석하였다.

2. 수렴흐름 추적자시험

2.1 시험부지의 수리지질특성

본 조사지역은 경상남도 김해시 생림면 마사리 판섬 일원의 충적층 지대이다. 수계는 시험 부지를 중심으로 남서-동북 방향으로 낙동강 본류가 흐르고 있으며, 부지의 북쪽에는 밀양강이 북쪽에서 남쪽으로 유하하여 낙동강에 합류되고 있다. 시험 부지 일대는 밀양강과 낙동강이 합류되는 지점으로, 유수의 영향으로 형성된 충적층으로서 넓은 평야를 형성하고 있다.

수렴흐름 추적자시험에 이용된 추적자의 주입정과 양수정에 대한 제원은 표 1에 정리하였으며, 3개 공 모두 자갈로 구성된 지표면하 25~35 m 구간에만 스크린이 설치되었다. 시험부지 대수층의 수직적인 지질층서를 시추 조사한 결과, 상부 23 m 구간에는 모래층이 존재하며 그 하부에는 2 m 두께의 점토로 구성된 불투수층이 형성되어 있었다. 점토층의 하부에는 10 m 두께의 고투수성 자갈층이 존재하여 주대수층을 형성하고 있으며, 자갈층의 하부에는 불투수성 암반층이 있었다. 수렴흐름 추적자시험에 수행된 3개 공 내 자갈대수층의 투수량계수와 저류계수는 양수시험(pumping test)에 의해, 수리전도도는 회복시험(recovery test)에 의해 산정되었다.

표 1. 수렴흐름 추적자시험에 이용된 주입정과 양수정의 제원(단위: meters)

| Well No. | Design | Depth (GL-, m) | Screen interval (GL-, m) | Inner diameter (mm) | Elevation (m) |
|----------------|--------|-------------------|-----------------------------|------------------------|------------------|
| Injection well | IW-1 | 35 | 25~35 | 75 | 3.978 |
| | IW-2 | 35 | 25~35 | 75 | 6.226 |
| Pumped well | PW | 35 | 25~35 | 100 | 5.860 |

* GL- : Depth from ground surface.

2.2 추적자시험 및 농도이력곡선

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 m 이었으며, IW-2공에서 추적자용액 주입시험 기간 동안 주입정과 관측정의 안정수위는 지표면하 5.10 m와 13.9 m 이었다.

② 추적자로는 염소이온(Cl⁻)이 이용되었으며, 1회 시험 당 5 kg이 순간주입(instantaneous injection) 되었다. 염소이온의 주입농도는 약 100,000 mg/L 정도였으며, 추적자시험의 1회 주입량은 50 L로서 주입시간은 3분 정도였다.

③ 관측정(양수정)에서의 관측은 현장에서는 전기전도도를 측정하였으며, 일정 시간 간격으로 샘플링하여 실내에서 염소이온농도를 분석하였다. 추적자시험 초기에는 10분 간격으로 샘플링 하였으며, 전기전도도가 높게 나타난 이후부터는 2분 간격으로 샘플링 하였다.

현장에서 수행된 수렴흐름 추적자시험 기간 동안 IW-1공과 IW-2공에서 염소이온을 순간주입한 후, 양수정(관측정)에서 염소이온의 초기도달시간은 IW-1, 2공 모두에서 약 30분 정도 경과되었다. 염소이온의 최고농도도달시간과 농도는 IW-1공에서 52분 경과 시에 111.57 mg/L, IW-2공에서 44분 경과 시에 107.35 mg/L로 관측되었다. 따라서, IW-1공과 PW공 사이의 대수층 구간에서 염소이온의 확산이 더욱 빠르게 나타난 것으로 판단되었다.

염소이온용액의 순간주입 후, 관측공 내 경과시간에 따른 염소이온농도의 이력이 도시되어 있다. 최고농도도달 시점까지의 농도이력은 유사한 경향을 보이고 있으나, 최고농도 이후의 농도감소 기울기는 IW-1공과 양수정(PW) 사이의 대수층 구간에서 높게 나타났다(그림 1).

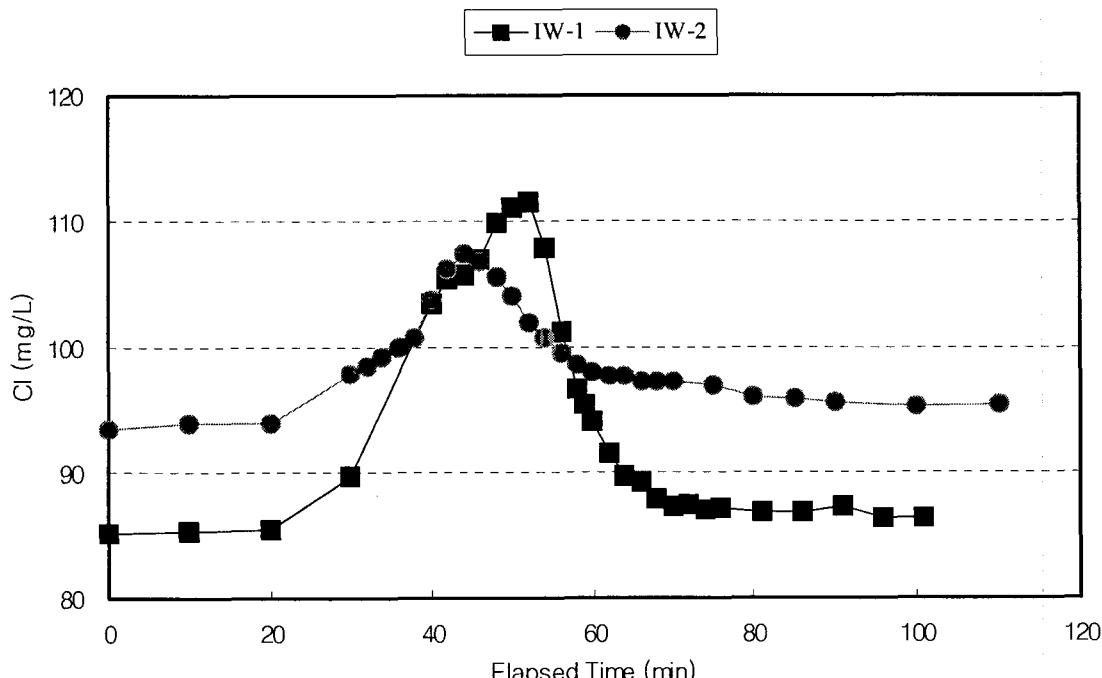


그림 1. 수렴흐름 추적자시험 시 양수정에서 관측된 염소이온농도의 이력그래프.

2.3 종분산지수 추정

본 연구에서 실시된 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. 추적자시험 해석을 위해 입력된 값들은 표 2에 정리하였다.

분산지수란 대수층 내로 유입된 오염물질을 분산시키는 대수층의 특성으로서 길이로 표시하며 대수층의 수리분산을 정량화시키는 인자이다(한정상, 1998). CATTI 코드에서 추정된 종분산지수는 IW-1공과 양수정 사이의 대수층에서는 0.4152 m였으며, IW-2공과 양수정 사이에서는 0.4158 m인 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구지역 시험대수층에서의 평균적인 종분산지수는 0.4155 m 정도인 것으로 추정되었다.

표 2. CATTI 프로그램에 이용된 입력변수와 추정된 종분산지수

| 시험공 | 종거리 (m) | 양수율 (m ³ /day) | 주입질량 (kg) | 대수층 두께 (m) | 종분산지수 (m) |
|------|------------|------------------------------|--------------|---------------|--------------|
| IW-1 | 2 | 2,500 | 5 | 10 | 0.4152 |
| IW-2 | 2 | 2,500 | 5 | 10 | 0.4158 |

김해 만섬의 시험대수층에서 추정된 종분산지수를 시험규모만을 고려하여 Xu and Eckstein(1995)의 연구에 적용·산정하였으며, CATTI 코드에 의해 추정된 종분산지수와 비교하였다. 본 현장에서 수행된 수렴흐름 추적자시험을 Xu and Eckstein(1995)의 연구에 적용하여 산정한 종분산지수는 0.0458 m 이었다. CATTI 코드에 의해 추정된 종분산지수가 약 9배 정도 높게 나타났다. 이는 김해 만섬 자갈대수층의 확산도가 일반적인 자연대수층에 비해 매우 높다는 것을 의미하는 것이다.

본 연구에서 추정된 종분산지수를 Gelhar et al.(1992)의 연구 결과그래프에 도시하여 기존의 연구사례와 비교 분석한 결과, 본 연구지역에서 추정된 종분산지수가 시험규모(2 m)에 비해 상당히 높은 것으로 나타났다. 이는 시험대수층 구간에 오염물질이 유입되었을 경우에는 확산이 매우 빠르게 발생할 수 있음을 의미하는 것이며, 따라서 시험대수층 내에서는 오염원에서의 이격거리에 따른 농도저감이 높을 것으로 판단되었다.

2.4 종분산계수와 오염물질의 확산범위

수렴흐름 추적자시험에 의해 추정된 종분산지수를 이용하여, 김해 만섬 지역 강변여과수 개발공 주변의 오염원에 의한 지하수공 주변으로 오염물질 유입 시 오염원에서 지하수공으로 확산되는 속도를 예측하였다. 먼저, 오염물질 유입에 의한 대수층에서 오염물 확산을 예측하기 위해 종분산계수를 산정하였다. 종분산계수(longitudinal dispersion coefficient)는 시간에 따른 오염물질의 확산면적을 의미하며, 종분산지수와 지하수 평균선형유속(average linear velocity)의 곱으로 산정될 수 있다. 산정된 종분산계수를 적용하여, 연속적인 오염물질의 유입 시 시험대수층이 균질하고 등방성인 경우의 오염물질 확산면적을 추정하였다. 강변여과수 개발 예정인 대수층에서 오염물질

의 지속적인 유입에 의한 확산면적은 1일 9.32 m^2 정도인 것으로 산정되었다. 따라서, 오염물질 유입 후 10일 경과 시에는 오염물질이 오염원(source)에서 5.45 m 정도까지 확산되어 질 것이다.

3. 결 론

본 연구에서 수행된 수렴흐름 추적자시험의 결과를 이용하여 김해 판섬의 자갈대수층 구간의 종분산지수를 추정하여 오염물 유입 시 확산정도를 평가하였다.

1. 김해 판섬 자갈대수층에서 수행된 수렴흐름 추적자시험 기간 동안, 양수정(관측정)에서 염소 이온의 초기도달시간은 약 30분 정도이었으며, 염소이온의 최고농도도달시간과 농도는 IW-1공에 추적자용액 주입 후 52분 경과 시에 111.57 mg/L , IW-2공에 추적자용액 주입 후 44분 경과 시에 107.35 mg/L 로 관측되었다. 최고농도도달 시점까지 염소이온의 농도이력은 2회의 추적자시험에서 유사한 경향을 보이고 있으나, 최고농도도달 이후의 농도감소 기울기는 IW-1공과 양수정(PW) 사이의 대수층 구간에서 더욱 높은 것으로 나타났다.

2. 일정한 양수율($2,500 \text{ m}^3/\text{day}$)로 형성된 정상 상태 하에서 수행된 수렴흐름 추적자시험의 결과를 이용해 CATTI 코드에서 추정된 종분산지수는 IW-1공과 양수정 사이에서는 0.4152 m , IW-2공과 양수정 사이에서는 0.4158 m 이었다. 따라서, 본 연구지역 내 자갈대수층에서의 평균적인 종분산지수는 0.4155 m 정도인 것으로 추정되었다.

3. 본 연구에서 추정된 종분산지수를 기존의 연구사례와 비교 분석한 결과, 추적자시험의 규모 (2 m)에 비해 종분산지수(0.4155 m)가 매우 높은 것으로 나타났다. 따라서 연구지역 내 자갈대수층에서 $2,500 \text{ m}^3/\text{day}$ 이상의 양수율로 채수하는 조건에서 오염물질의 확산은 매우 빠르게 발생할 것으로 예측된다. 그러나, 자갈대수층 내 지하수의 양이 수천~수만 톤 정도이며 낙동강으로부터의 충진이 무한하기 때문에 오염물질의 농도회석효과가 매우 높을 것으로 사료된다.

4. 김해 판섬 지역 강변여과수 개발공 주변의 오염원(낙동강, 농경작)에 의한 개발공 내로의 오염물질의 확산범위를 추정한 결과, 오염물질의 지속적인 유입에 의한 확산면적은 1일 9.32 m^2 정도인 것으로 산정되었다. 따라서, 오염물질 유입 후 10일 경과 시에는 오염물질이 오염원에서 5 m 이상 확산되어 질 것으로 예측되었다.

참 고 문 헌

1. 강동환, 2006, 추적자시험을 이용한 단열암반층과 토양층에서 수리분산특성 연구, 이학박사학위 논문, 부경대학교, p.148.
2. 한정상, 1998, 지하수환경과오염, 박영사, p.1071.
3. Gelhar, L. W., Welty Claire, and Rehfeldt Kenneth R., 1992, A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, Water Resources Research, 28(7), p.1955-1974.
4. 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), p.905-908.