

PE20)

고투수성 점토질 자갈층에서 수리전도도와 중분산지수의 규모종속효과

강동환, 김태영*, 김성수, 유훈선¹, 권병혁²

부경대학교 환경지질학과, ¹동의과학대학 동의분석센터,

²환경대기학과

1. 서 론

대수층 내 지하수 유동과 수리분산 특성을 규명하기 위해서는 양수시험과 추적자시험이 수행되어야 한다. 국내에서는 수리전도도의 산정을 위한 연구는 많은 연구자들에 의해 보고되었으며, 분산지수의 산정 및 해석을 위한 현장시험 연구들은 2000년도 이후에 수행되기 시작하였다(강동환, 2006; 강동환 등, 2006; 이진용 등, 2001; 정상용 등, 2006). 그리고, 중분산지수의 규모종속효과에 관한 연구로는 강동환 등(2007)에 의한 고투수성 충적층에서 수렴흐름 추적자시험을 통해 밝혀진 것이 유일하며, 양수시험 시 양수정과 관측정 사이의 시험규모에 따른 수리전도도의 규모종속에 대한 연구는 보고된 바가 없다.

시험대수층 매질의 불균질성(heterogeneity)에 의해 현장시험의 규모(scale)가 커질수록 수리전도도와 중분산지수가 증가한다는 국외 연구사례가 다양하게 보고되었다. Rovey and Cherkauer(1995)는 양수시험의 규모(양수정과 관측정 사이의 이격거리)에 따른 수리전도도의 규모종속효과가 대수층 매질의 공극구조(pore structure)에 의해 달라질 수 있음을 보였다. 그리고, Sanchez-Vila 등(1996)은 시험규모의 증가에 따른 유효투수량계수와 수리전도도의 규모종속효과를 규명하였다.

추적자시험의 규모(추적자 주입정과 관측정)에 따른 중분산지수의 규모종속에 관한 연구로는 Gelhar 등(1992)에 의해 추적자시험의 신뢰도(reliability)에 따른 시험규모별 수평/수직 분산지수의 규모종속이 그래프로 제시되었으며, Xu 와 Eckstein(1995)은 시험규모대 중분산지수의 함수를 로그-로그 그래프로 추정하였다. 그리고, Dirk(2005)에 의해 현무암, 화강암, 사암 및 탄산염암층에서 중분산지수의 규모종속이 미시적인 규모와 거시적인 규모에서 분석되었으며, 또한 미고결층에서도 추적자시험의 신뢰도(reliability)에 의해 규모종속이 분석되었다.

이렇듯, 여러 연구자들에 의해 토양층과 단열암반층 내 수리전도도와 중분산지수의 규모종속효과가 보고되고 있으나, 동일한 시험대수층에서 수리전도도와 중분산지수의 규모종속효과를 동시에 고려한 연구는 보고되지 않았다. 이에 본 연구에서는 강변여과수 개발 예정부지인 김해 탄성 지역의 고투수성 충적층에서 양수시험과 수렴흐름 추적자시험이 동일한 대수층에서 수행되었으며, 시험규모에 따른 수리전도도와 중분산지수가 산정되었다. 그리고 고투수성 충적층 내 수리전도도와 중분산지수의 규모종속효과를 규명하였으며, 또한 규모종속에 의한 시험대수층 내 지하수 유동과 수리분산 특성을 비교 분석하였다.

2. 양수시험 및 추적자시험

본 연구의 시험부지는 경상남도 김해시 생림면 마사리 탄점 일원으로서, 탄점을 중심으로 남서쪽에서 북동 방향으로 낙동강 본류가 흐르고 있으며, 북쪽에는 밀양강이 북서쪽에서 남동 방향으로 유하하여 낙동강에 합류되고 있다. 시험부지가 위치한 탄점은 낙동강의 우수퇴적물과 태풍이나 집중호우 시 낙동강에서 범람한 퇴적물들에 의해 형성되었다. 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. 시험부지 내 토양층은 최상부 모래층(지표면하 0~23 m), 점토층(지표면하 23~25 m), 점토질 자갈층(지표면하 25~35 m) 및 불투수성 암반층(지표면하 35 m 이하)으로 구성되어 있다(강동환 등, 2007).

본 연구에서는 시험부지 내 대수층의 수리전도도와 중분산지수를 산정하기 위해 양수시험과 수렴흐름 추적자시험이 수행되었다(강동환 등, 2007). 양수시험에는 양수정(PW공)과 4개의 관측정(MW1공, MW2공, MW3공 및 MW4공)이 이용되었다. 수렴흐름 추적자시험은 2회 수행되었으며, 추적자(염소이온)는 MW1공과 MW2공에서 주입되고 양수정(PW공)에서 추적자농도가 관측되었다. 양수시험과 추적자시험에 이용된 양수정(PW)과 다른 공간의 이격거리는 MW1공과 MW4공이 5 m, MW2공과 MW3공은 2 m 이다. 양수정을 기준으로 MW1공과 MW2공은 남서방향, MW3공과 MW4공은 북동방향에 위치하고 있다. 개발심도는 모두 지표면하 35 m 이고 케이싱심도는 지표면하 25 m 이며, 시험대수층 구간(점토질 자갈층, 지표면하 25~35 m)은 스크린으로 완전관통(fully penetration) 되어 있다. 시험부지 내 지표면하 지하수심도는 4.66~5.77 m의 범위로서, 이는 주변 하천수의 유입으로 인해 지하수면이 지표면 부근에 형성되어 있었다.

시험대수층의 수리전도도를 산정하기 위해 양수시험이 실시되었으며, 양수시험 후 양수정에서 회복시험이 수행되었다. 양수시험 시 양수량은 2,500 m³/day 이었으며, 양수정과 관측정 내 지하수위 관측은 지하수위 안정 시까지 1~30분 간격으로 측정되었다. 양수시험 동안 최대수위변화량은 MW1공 0.67 m, MW2공 1.24 m, MW3공 1.17 m, MW4공 0.63 m 이었다. 이는 양수정을 기준으로 남서방향과 북서방향의 수위강하추(cone of depression)가 방사상 대칭임을 보여주는 것이다. 본 연구에서는 AQTESOLV 3.5 프로그램을 이용하여 양수시험을 해석하였으며, 누수 피압대수층(leaky confined aquifer)으로 가정하여 해석하였다. 그리고 회복시험은 Theis(recovery) 해석법을 적용하였다. 시험대수층의 수리전도도는 양수정과 관측정의 거리 및 배치에 따라 1.603~2.591×10⁻³ m/sec의 범위로 산정되었으며, 이는 자갈층에서의 일반적인 수리전도도 범위에 해당하는 것이다(Freeze and Cherry, 1979). 양수정을 기준으로 남서 방향(MW1공, MW2공)과 북동 방향(MW3공, MW4공)의 수리전도도가 방사상으로 동일거리에서는 5% 정도의 매우 적은 차이를 나타내었다. 양수정과 관측정 사이의 이격거리가 2 m에서 5 m로 증가함에 따라 남서방향에서 1.13배, 북동방향에서는 1.14배 증가하였다. 따라서, 양수정을 기준으로 남서방향에서 이격거리에 따른 수리전도도의 증가율은 북동방향과 유사함을 알 수 있었다.

본 연구의 시험대수층에서 수행된 수렴흐름 추적자시험에 관한 내용은 강동환 등(2007)의 논문에 세부적으로 설명되어 있다. 염소이온의 초기도달시간은 MW1공 주입시험에 비해 MW2공 주입시험에서 3배 정도, 최고농도도달시간은 2배 정도 빠르게 나타났다. 그리고 PW공에서 관측된 최고농도는 MW1공 주입시험 시 101.88 mg/L, MW2공 주입시험 시 111.57 mg/L로서 약간의 차이를 나타내었다. 추적자의 도달시간과 최고농도의 차이는 MW1공이 MW2공에 비해 PW공으로부터의 이격거리가 2.5배 멀었기 때문이다. 본 현장에서 수행된 2회의 수렴흐름 추적자시험 자료를 CATTI 프로그램에 입력하여 추정된 종분산지수는 0.4152 m (MW2공 주입시험)와 3.2665 m (MW1공 주입시험)로서, 이격거리가 2.5배 멀어짐에 따라 종분산지수는 약 8배 정도 증가하였다.

3. 규모종속효과

본 연구에서 수행된 양수시험에 의해 산정된 5개의 수리전도도를 이용하여, 관측정의 이격거리(d)에 따른 수리전도도(K)의 함수를 추정하였다. 양수정과 관측정의 이격거리에 대한 수리전도도의 함수는 PW공 기준 남서방향에서는 $\log K = 0.0693 \log d - 2.671$, 북동방향에서는 $\log K = 0.0817 \log d - 2.655$ 로 추정되었다. 양수정을 기준으로 남서 방향과 북동 방향의 수리전도도 함수가 유사하게 나타났으며, 이는 연구지역 내 대수층 매질에서 양수정으로부터 관측정의 거리에 따라 방사상으로 수리전도도가 증가함을 나타내었다. 시험대수층에서 나타나는 관측거리에 대한 수리전도도 증가의 기울기는 양대수 그래프에서 0.0693(남서 방향)과 0.0817(북동 방향)로 추정되었으며, 이는 기존의 연구사례에 비해 매우 낮은 값이다. 수리전도도의 규모종속효과는 대수층의 불균질성에 의해 나타나며, 특히 매질 생성 시 만들어진 1차 공극보다 매질 생성 후에 발생한 2차 공극의 불균질성에 의한 1차 공극과 2차 공극의 차이에 의해 규모종속효과의 크기가 크게 달라진다. 즉, 절리가 있는 빙력토의 경우, 양대수 그래프에서 기울기가 1로서, 매질의 투수성이 낮고 절리 등의 2차 공극이 투수성을 좌우하기 때문에 규모종속효과가 더 크게 나타났다 반면에, 매질의 투수성이 비교적 높은 빙하기원의 퇴적물에서는 양대수 그래프에서 기울기가 0.38로서 매질의 1차 공극이 크기 때문에 2차 공극에 의한 불균질성이 빙력토에서 만큼 커지지 않으므로 규모종속효과가 상대적으로 낮게 나타났다. 따라서 본 연구의 대수층 매질은 1차 공극이 매우 큰 자갈층으로서, 2차 공극 등에 의한 불균질성이 작기 때문에 양대수 그래프에서 0.0693과 0.0817의 낮은 기울기가 나타났다.

본 연구에서 수행된 수렴흐름 추적자시험의 규모만을 고려하여 Arya(1986), Neuman(1990) 및 Xu 와 Eckstein(1995)의 연구에 적용하여 비교하였다. 본 시험부지에서 수행된 수렴흐름 추적자시험 자료를 CATTI 코드에 의해 추정된 종분산지수가 PW공과 MW2공 사이의 대수층에서는 1.42~12.07 배 이었으며, PW공과 MW1공 사이의 대수층에서는 5.72~17.80 배 정도이었다. 따라서, 본 시험부지 내 대수층의 확산도가 일반적인 자연대수층에 비해 매우 높음을 알 수 있었다. 그리고, 본 연구에서 추정된 종분산지수와 Xu 와 Eckstein(1995)의 연구를 적용한 종분산지수를 Gelhar 등(1992)에 의해 제시된 그래프에 도시하여 비교하였다. CATTI 프로그램에 의해 추정된 종분산지수에 비해 Xu 와

Eckstein(1995)의 방정식에 의한 종분산지수가 Gelhar 등(1992)의 연구 사례에 더욱 적합하였다. 또한, 앞에서도 언급하였듯이 본 연구에서 추정된 종분산지수가 Xu 와 Eckstein(1995)의 방정식으로 산정된 종분산지수에 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. 요약

대수층의 저유량이 풍부한 강변여과수 개발 예정지역의 충적층(지표면하 25~35 m 구간)에서 수리전도도와 종분산지수의 규모종속효과를 규명하기 위해 양수시험과 수렴흐름 추적자시험이 수행되었다. 양수시험과 추적자시험의 규모는 2 m 와 5 m 이었으며 양수시험은 5개 공, 추적자시험은 3개 공을 이용하여 수행되었다. 양수시험은 일정한 양수율(2,500 m³/day)로 수행되었으며, 양수 시작 후 경과시간에 따른 수위변화 자료를 AQTESOLV 3.5 프로그램에 입력하여 해석하였다. 시험대수층의 수리전도도는 양수정에서 1.745×10^{-3} m/sec, 양수정에서 이격거리가 2 m 구간에서는 2.161×10^{-3} m/sec와 2.270×10^{-3} m/sec 이었으며, 이격거리가 5 m 구간에서는 2.452×10^{-3} m/sec와 2.591×10^{-3} m/sec로 산정되었다. 그리고, 양수정에서 회복시험 시 Theis(Recovery) 방법에 의해 해석된 수리전도도는 1.603×10^{-3} m/sec이었다. 양수정에서 관측점의 이격거리(d)에 따른 수리전도도(K) 증가함수는 $\log K = 0.0693 \log d - 2.671$ 와 $\log K = 0.0817 \log d - 2.655$ 로 추정되었으며, 결정계수는 각각 0.965와 0.979로서 매우 높게 나타났다. 따라서 양수정에서의 이격거리가 멀수록 수리전도도가 증가하는 규모종속을 확인하였으며, 또한 시험대수층의 수리전도도가 방사상으로 유사하게 분포하고 있음을 알 수 있었다. 수렴흐름 추적자시험의 양수율은 2,500 m³/day 이었으며, 2개의 주입정에 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 농도 증가율과 감소율의 변화를 파악하였다. 양수정에서 관측된 경과시간별 염소이온농도 자료를 CATTI 코드의 “Converging Radial Flow With Instantaneous Injection” 해석법에 적용하여 종분산지수를 추정하였다. 양수정에서 이격거리가 2 m인 경우의 종분산지수는 0.4152 m, 이격거리가 5 m인 경우의 종분산지수는 3.2665 m 이었다. 따라서 양수정에서 이격거리가 멀수록 종분산지수가 증가하는 규모종속효과를 확인하였으며, 또한 이격거리에 대한 종분산지수의 비는 각각 0.21과 0.65 정도로서 증가하였다.

참고 문헌

강동환, 2006, 추적자시험을 이용한 단일암반층과 토양층에서 수리분산특성 연구, 이학박

사학위논문, 부경대학교, p.148.

- 강동환, 심병완, 권병혁, 김일규, 2007, 김해 탄섭의 고투수성 충적층에서 수렴흐름 추적자 시험에 의한 규모종속 수리분산 연구, 한국지하수토양환경학회지, 12(6), 17-25.
- 강동환, 정상용, 김병우, 2006, 수평적으로 불균질한 단열암반층에서 단공주입양수 추적자 시험에 의한 수리분산특성, 한국지하수토양환경학회지, 11(6), 53-60.
- 이진용, 천정용, 이장근, 이민효, 윤정기, 2001, 다공질 천층 대수층에서의 추적자 이동 연구, 지질학회지, 37(2), 309-316.
- 정상용, 강동환, 김병우, 2006, 부산시 좌천동 단열암반층에서 자연구배 추적자시험을 이용한 수리분산특성 연구, 대한지질공학회지, 16(3), 245-254.
- Arya, A., 1986, Dispersion and reservoir heterogeneity, Ph. D. dissert., University of Texas, Austin.
- Gelhar, L. W., Welty Claire, and Rehfeldt Kenneth R., 1992, A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, Water Resour. Res., 28(7), 1955-1974.
- Dirk Schulze-Makuch, 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, 603p.
- Neuman, S. P., 1990, Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media, Water Resources Research, 26(8), 1749-1758.
- Rovey, C. W. and Cherkauer D. S., 1995, Scale dependency of hydraulic conductivity measurements, Ground Water, 33, 769-780.
- Sánchez-Vila, X., Carrera, J. and Girardi, J. P., 1996, Scale effects in transmissivity, Journal of Hydrology, 183, 1-22.
- 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.