

고투수성 충적층에서 수리전도도와 종분산지수의 규모종속효과

The scale dependent effect of hydraulic conductivity and longitudinal dispersivity in the alluvial aquifer with high permeability

강동환*, 김태영**, 김성수***, 김동수****

Dong Hwan Kang, Tae Yeong Kim, Sung Soo Kim, Dong Soo Kim

요 지

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. 시험 대수층의 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 관측정의 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 초기도달 시간과 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.

핵심용어 : 양수시험, 수렴흐름 추적자시험, 수리전도도, 종분산지수, 규모종속효과

1. 서 론

대수층 내 지하수 유동과 수리분산 특성을 규명하기 위해서는 양수시험과 추적자시험이 수행되어야 한다. 국내에서는 수리전도도의 산정을 위한 연구는 수많은 연구자들에 의해 보고되었으며, 분산지수의 산정 및 해석을 현장시험 연구들은 2000년도 이후에 수행되고 있다(강동환, 2006; 강동환 등, 2006; 이진용 등, 2001; 정상용 등, 2006). 그리고, 종분산지수의 규모종속효과에 관한 연구로는 강동환 등(2007)에 의한 고투수성 충적층에서 수렴흐름 추적자시험을 통해 밝혀진 것이 유일하며, 양수시험과 순간충격시험의 시험규모에 따른 수리전도도의 규모종속효과에 대한 연구사례는 보고되지 않았다.

본 연구에서는 강변여과수 개발 예정부지인 김해 판섬 지역의 고투수성 충적층에서 양수시험과 수렴흐름 추적자시험이 동일한 대수층에서 수행되었으며, 시험규모에 따른 수리전도도와 종분산지수가 산정되었다. 그리고 고투수성 충적층 내 수리전도도와 종분산지수의 규모종속효과를 규명하였으며, 또한 규모종속에 의한 시험대수층 내 지하수 유동과 수리분산 특성을 분석하였다.

2. 현장수리시험

시험부지는 경상남도 김해시 생림면 마사리 판섬 일원으로서, 판섬을 중심으로 남서쪽에서 동북 방향으로 낙동강 본류가 흐르고 있으며, 북쪽에는 밀양강이 북동쪽에서 남서 방향으로 유하하여 낙동강에 합류되고 있다(Fig. 1). 시험부지 내 토양층은 모래층(지표면하 0~23 m), 점토층(지표면하 23~25 m), 점토질 자갈층(지표면하 25~35 m) 및 하부의 불투수성 암반층으로 구성되어 있다. 양수시험과 수렴흐름 추적자시험에 이용된 시험공들의 배치도가 Fig. 1에 도시되어 있다. 시험공의 개발심도는 모두 지표면하 35 m 정도이며, 케이싱심도는 지표면하 25 m 까지로서 시험대수층(점토질 자갈층)인 지표면하 25~35 m 구간은 스크린으로 완전관통 되었다. 그리고, 시험부지 내 지표면하 지하수위는 4.86~5.77 m 정도에 형성되어 있다.

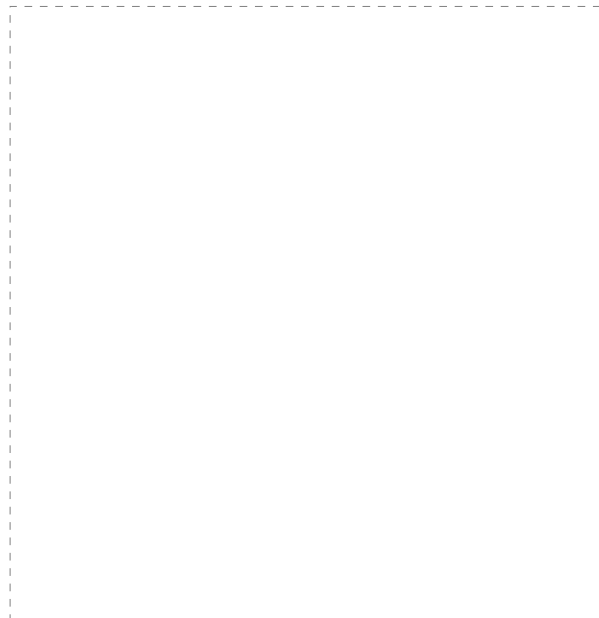


Fig. 1. Test site and water system in study area.

시험대수층의 수리전도도를 산정하기 위하여 양수시험이 수행되었으며, 양수시험 종료 후 회복

시험이 수행되어 양수시험의 결과와 비교·검토하였다. 양수시험 시 양수량은 2500 m³/day로 일정하게 양수하였으며, 양수정과 관측정의 수위변동이 안정화 될 때까지 지하수위를 관측하였다. 양수 시 MW1공과 MW4공에서는 0.67 m와 0.63 m, MW2공과 MW3공에서는 1.24 m와 1.17 m의 수위변화가 각각 관측되었다. 양수시험과 회복시험의 해석에는 AQTESOLV 3.5 프로그램이 이용되었으며, 양수시험은 누수 피압대수층의 해석해(Hantush, 1960) solution으로, 회복시험은 Theis(recovery) solution을 적용하였다. 시험대수층의 수리전도도는 1.603 ~ 2.591×10⁻³ m/sec 범위로서 자갈층에 해당하는 높은 투수성을 나타내었다(Freeze and Cherry, 1979). 양수정에서의 수리전도도는 양수시험 시 1.745×10⁻³, 회복시험 시 1.603×10⁻³ 으로서 유사하게 나타났다. 그리고 양수정을 기준으로 남서 방향에 위치한 MW1공(2.452×10⁻³), MW2공(2.161×10⁻³)과 북동 방향에 위치한 MW3공(2.270×10⁻³), MW4공(2.591×10⁻³)의 수리전도도가 대칭적으로 나타났다.

본 연구에서 수행된 수렴흐름 추적자시험을 수행하기 위해, 먼저 주입정과 관측정에서 일정한 양수율(2,500 m³/day)을 통해 안정수위를 형성하였다. MW2공에서 추적자용액 주입시험 기간 동안 주입정과 관측정의 안정수위는 지표면하 6.05 m와 14.18 m 이었으며, MW1공에서 추적자용액 주입시험 기간 동안 주입정과 관측정의 안정수위는 지표면하 6.35 m와 13.85 m 이었다. 추적자로는 염소이온(Cl⁻)이 이용되었으며, 1회 시험 당 5 kg이 순간주입(instantaneous injection) 되었다. 추적자 용액의 1회 주입량은 50 L 이었으며, 주입시간은 3분 정도이었다. 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. 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). CATTI 코드에서 추정된 종분산지수는 MW2공과 양수정 사이의 시험대수층에서는 0.4152 m 이었으며, MW1공과 양수정 사이에서는 3.2665 m 인 것으로 나타났다.

3. 규모종속효과

양수시험 시 양수정에서 관측정의 이격거리(d)에 따른 수리전도도(K)의 관계를 추정하였으며, 양대수 그래프(log-log graph)에서 선형 모델이 가장 적합하였다. 양수정에서 관측정의 이격거리에 따른 수리전도도 선형증가함수는 남서 방향에서는 $\log K=0.0693 \log d-2.671$, 북동 방향에서는 $\log K=0.0817 \log d-2.655$ 로 추정되었다(Fig. 2). 양수정을 기준으로 남서 방향과 북동 방향의 수리전도도 함수가 유사하게 나타났으며, 이는 연구지역 내 대수층 매질에서 양수정으로부터 관측정의 거리에 따라 방사상으로 수리전도도가 증가함을 의미하는 것이다. 그리고 시험 대수층에서 관측거리에 따른 수리전도도의 증가기울기는 양대수 그래프에서 0.0693(남서 방향)과 0.0817(북동 방향)로 추정되었다.

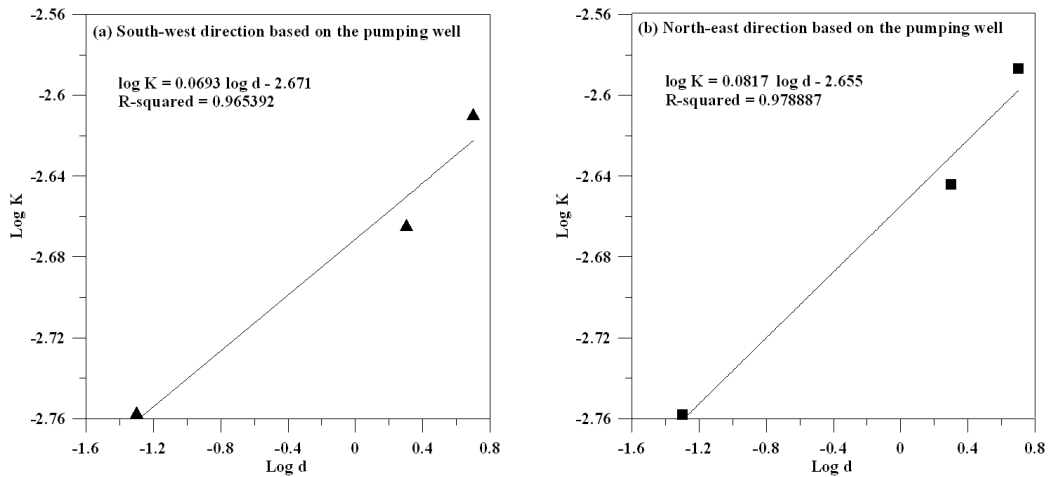


Fig. 4. Increase of hydraulic conductivity with measurement scale.

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(Fig. 3). CATTI 프로그램에 의해 추정된 종분산지수에 비해 Xu 와 Eckstein(1995)의 방정식에 의한 종분산지수가 Gelhar 등(1992)의 연구 사례에 더욱 적합하였다. 또한, 앞서서도 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.

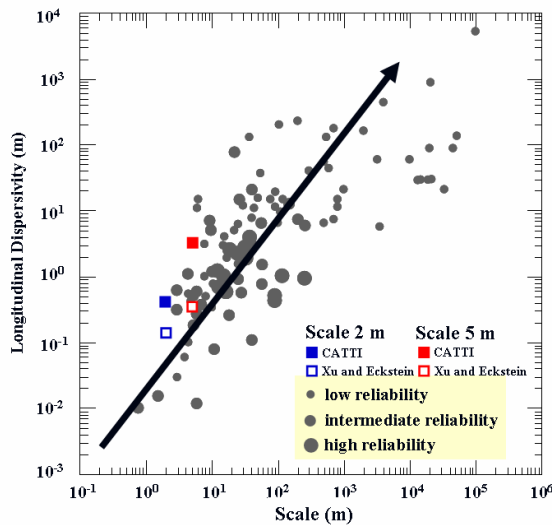


Fig. 3. Longitudinal dispersivity magnitude and reliability analysis with tracer test scales

4. 결 론

본 연구에서는 김해 탄섬의 고투수성 충적층에서 수행된 양수시험과 수렴흐름 추적자시험에 의해 수리전도도와 종분산지수의 규모종속효과가 확인되었으며, 아래의 결과들이 도출되었다.

1. 양수시험 시 양수정에서 관측정의 이격거리에 따른 수리전도도 증가함수는 선형적이었으며, 남서 방향에서는 $\log K=0.0693 \log d-2.671$, 북동 방향에서는 $\log K=0.0817 \log d-2.655$ 로 추정되었다. 시험부지 내 대수층의 수리전도도 규모종속효과는 선형적으로서 양수정을 기준으로 남서 방향과 북동 방향의 수리전도도 함수가 유사하게 나타났다.

2. 시험대수층에서 수렴흐름 추적자시험에 의해 추정된 종분산지수는 양수정과 MW2공 사이에서는 0.4152 m, 양수정과 MW1공 사이에서는 3.2665 m로 산정되어 시험규모에 따른 종분산지수의 규모종속이 나타났다. 기존의 연구자들에 의해 산정된 시험규모에 따른 종분산지수의 규모효과와 비교한 결과, 양수정 MW2공 사이의 대수층에서는 1.42 ~ 12.07 배, PW공과 MW1공 사이의 대수층에서는 5.72 ~ 17.80 배 정도이었다.

3. 본 연구를 통해 고투수성의 점토 섞인 자갈층에서 수리전도도와 종분산지수의 규모종속효과를 확인하였으며, 또한 양수정에서의 거리에 따른 수리전도도 증가는 선형적으로 나타남을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 강동환, 2006, 추적자시험을 이용한 단열암반층과 토양층에서 수리분산특성 연구, 이학박사학위논문, 부경대학교, p.148.
- 강동환, 심병완, 권병혁, 김일규, 2007, 김해 탄섬의 고투수성 충적층에서 수렴흐름 추적자시험에 의한 규모종속 수리분산 연구, 한국지하수토양환경학회지, 12(6), 17-25.
- 강동환, 정상용, 김병우, 2006, 수평적으로 불균질한 단열암반층에서 단공주입양수 추적자시험에 의한 수리분산특성, 한국지하수토양환경학회지, 11(6), 53-60.
- 이진용, 천정용, 이강근, 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 Resources Research, 28(7), p.1955-1974.
- Neuman, S. P., 1990, Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media, Water Resources Research, 26(8), 1749-1758.
- Sauty, J. P., and Kinzelbach, W., 1992, CATTI: Computer aided tracer test interpretation, International Groundwater Modeling Center, Golden, Colorado.
- 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.