

김해 탄섬의 고투수성 누수 피압대수층에서 수리전도도의 규모종속효과

김태영¹ · 강동환^{1*} · 김성수¹ · 김병우¹ · 권병혁²

¹부경대학교 환경지질학과, ²부경대학교 환경대기학과

The Scale-dependent of Hydraulic Conductivity in Leaky Confined Aquifer with High Permeability at the Ttaan Isle, Gimhae City

Tae Yeong Kim¹, Dong Hwan Kang^{1*}, Sung Soo Kim¹, Byung Woo Kim¹, and Byung Hyuk Kwon²

¹Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University

²Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University

강변여과수 개발예정지역인 낙동강과 밀양강의 합류지점에 위치한 김해시 탄섬 지역에 형성된 지표면하 25~35 m 구간의 고투수성 누수 피압대수층 내 수리전도도의 규모종속효과를 규명하기 위해 양수시험이 수행되었다. 양수시험 시 관측정은 양수정(PW)을 기준으로 남서 방향(MW1, MW2), 북동 방향(MW3, MW4)에 2 m와 5 m 간격으로 개발되었다. 양수시험은 2,500 m³/day의 양수율로 수행되었으며, 양수 후 경과시간에 따른 수위변화 자료를 AQTESOLV 3.5 프로그램에 입력하여 수리전도도를 산정하였다. 양수정에서 산정된 수리전도도는 1.745 × 10⁻³ m/sec 이었으며, 양수정과 MW1 공 사이의 수리전도도는 2.452 × 10⁻³ m/sec, 양수정과 MW2공 사이의 수리전도도는 2.161 × 10⁻³ m/sec, 양수정과 MW3 공 사이의 수리전도도는 2.270 × 10⁻³ m/sec, 양수정과 MW4공 사이의 수리전도도는 2.591 × 10⁻³ m/sec로 산정되었다. 양수정과 관측정의 이격거리(d)에 따른 수리전도도(K) 증가함수는 남서 방향(PW-MW1-MW2 라인)에서는 $\log K = 0.0693 \log d - 2.671$, 북동 방향(PW-MW3-MW4 라인)에서는 $\log K = 0.0817 \log d - 2.655$ 로 추정되었다. 양수정을 기준으로 남서 방향과 북동 방향 대수층에서의 이격거리에 대한 수리전도도 증가함수는 유사하였다. Schulze-Makuch *et al.* (1999)의 규모지수 산정방법을 적용하여, 시험대수층의 시험부피에 대한 수리전도도의 규모지수를 산정하였다. 본 시험대수층의 규모지수는 0.15로서 낮게 나타났으며, 이는 시험대수층이 고투수성 자갈층으로서 불균질성이 매우 낮음을 의미한다. 양수시험에 의해 산정된 투수량계수, 양수시험 시 최대수위변화, 양수정과 관측공 간의 거리 및 양수율에 의해 산정된 영향반경은 남서 방향 7.148 m, 북동 방향 6.912 m로 산정되었다. 양수정에서 영향반경까지의 수리전도도 증가율은 남서 방향 1.40배, 북동 방향 1.49배 정도로서 본 시험대수층 매질의 불균질성이 북동 방향에서 약간 높은 것으로 나타났다.

주요어 : 양수시험, 수리전도도, 불균질성, 규모종속

Pumping test was conducted to understand hydraulic conductivity for leaky confined aquifer with high permeability. Test aquifer was formed in 25~35 m below ground surface at predetermined site of riverbank filtration which junction of Nakdong river and Milyang river in the Ttaan isle, Gimhae city, Korea Monitoring wells were located at intervals of 2 m and 5 m from pumping well in south-west direction (MW1 and MW2 wells) and north-east direction (MW3 and MW4 wells), respectively. Pumping test was continuously conducted for constant pumping rate of 2,500 m³/day, hydraulic conductivity was estimated using AQTESOLV 3.5 program. Hydraulic conductivity were estimated to be 1.745 × 10⁻³ m/sec for pumping well (PW), 2.452 × 10⁻³ m/sec for between PW and MW1 wells, 2.161 × 10⁻³ m/sec for between PW and MW2 wells, 2.270 × 10⁻³ m/sec for between PW and MW3 wells and 2.591 × 10⁻³ m/sec for between PW and MW4 wells. The function of hydraulic conductivity (K) as monitoring distance (d) were estimated to be $\log K = 0.0693 \log d - 2.671$ for south-west direction (PW-MW1-MW2 line), $\log K = 0.0817 \log d - 2.655$ for north-east direction (PW-MW3-MW4 line). Scale exponent of hydraulic conductivity as test volume was estimated using Schulze-Makuch *et al.* (1999) method. Scale exponent of this aquifer was estimated to be 0.15. It means that test aquifer has very low heterogeneity. The radius of influence estimated using

*Corresponding author: dhkang@pknu.ac.kr

transmissivity, maximum groundwater level displacement, distance from pumping well and pumping rate during pumping test were 7.148 m for south-west direction and 6.912 m for north-east direction. The increasing rate of hydraulic conductivity from pumping well to maximum radius of influence were estimated to be 1.40 times for south-west direction and 1.49 times for north-east direction. Thus, heterogeneity of test aquifer was a little higher in north-east direction.

Key words : pumping test, hydraulic conductivity, heterogeneity, scale dependent

서 론

물은 생명의 원천이자, 인간이 삶을 영유하는데 있어 꼭 필요한 물질 중 하나이다. 특히, 담수의 98% 이상을 차지하며 음용수로 사용 가능한 지하수는 매우 소중한 자원이다. 하지만, 최근 급속한 산업화와 도시화로 인한 지하수의 무분별한 개발과 과도한 사용으로 인해 지하수가 고갈되고 있으며, 각종 환경오염으로 인해 지표수의 수질이 악화되고 있는 실정이다. 이에 최근에는 지표수를 대수층에 여과시켜 취수하는 강변여과수의 개발을 통해 상수원수를 대체하고 있으며, 이에 대한 연구들이 수행되고 있다. 강변여과수 개발예정 지역에서 지하수의 개발가능량 산정(정지훈 외, 2004), 강변여과수 취수지역의 수리지질특성(함세영 외, 2002; 정재열 외, 2003), 강변여과수 부지 내 총적층 지하수의 수질특성(김건영 외, 2003; 현승규 외, 2006), 강변여과수 개발 시 취수부지 주변의 지하수 유통모델링(함세영 외, 2004; 함세영 외, 2005) 등이 수행되었다.

지하수 개발에 앞서 대수층의 투수성 및 저류성 등의 수리특성을 파악하여야 한다. 양수시험은 대수층의 수리상수를 산출하여 수리적 특성을 규명하는데 가장 널리 수행되는 현장수리시험이다(성현정 외, 2005; 이철우 외, 2002). 양수시험을 통해 대수층의 수리상수를 결정하기 위한 수학적 모델과 그 해석해는 Theis(1935)에 의해 정립되었으며, 이후 여러 연구자들에 의해 다양한 대수층 종류와 시험 조건에 따라 연구되었다. 특히, 누수 피압대수층에 대한 연구로는 준대수층(aquitard) 내 저류가 없는 경우(Hantush and Jacob, 1955), 준대수층 내 저류가 있는 경우(Hantush, 1960), 준대수층과 공내 표면(wellbore skin)에 저류가 있는 경우(Moench, 1985) 및 준대수층 내 저류가 있으며 비양수 대수층의 수위강하를 고려하는 경우(Neuman and Witherspoon, 1969) 등 다양한 저류 조건들에 대하여 연구가 수행되었다.

현장수리시험 수행 시 대수층 매질의 불균질성(heterogeneity)에 의해, 시험의 규모에 따라 수리전도도가 증가하는 규모종속효과(scale dependent effect)가 나

타난다. 국외에서는 실내실험, 순간충격시험 및 양수시험의 규모에 따른 수리전도도의 규모종속효과가 연구되었으며(Rovey and Cherkauer, 1995; Nastev *et al.*, 2004; Martinez-Landa, 2005), 그리고 관측규모에 따른 수리전도도의 규모종속효과에 대한 연구도 수행되었으며(Schad and Teutsch, 1994; Snchez-Via *et al.*, 1996; Illman, 2006), 또한 다양한 매질에 따른 수리전도도의 규모종속효과가 연구되었다(Schulze-Makuch *et al.*, 1999). 규모종속효과의 원인에 대한 연구는 Butler and Healey (1998)와 Rovey(1998)에 의해 수행되었으며, 규모종속효과의 해석에 관한 연구는 Hyun *et al.*(2002)과 Hunt (2006)에 의해 수행되었다.

그러나, 국내에서는 수리전도도의 규모종속효과에 관한 연구가 미비한 실정이며, 이에 본 연구에서는 고투수성 누수 피압대수층에서 수행된 양수시험에 의한 수리전도도의 규모종속효과를 규명하였다. 또한, 양수시험 시 최대영향반경을 산정하여 수위강하구역 내 수리전도도의 규모종속함수를 추정하였다.

연구지역

본 조사지역은 경상남도 김해시 생림면 마사리 판심 내 총적층(alluvium)으로 형성된 지역이다. 수계는 시험부지를 중심으로 남서-북동 방향으로 낙동강 본류가 흐르고 있으며, 부지의 북쪽에는 밀양강이 북서쪽에서 남동쪽으로 유하하여 낙동강에 합류되고 있다(Fig. 1). 시험 부지 일대는 밀양강과 낙동강이 합류되는 지점으로, 유수의 영향으로 형성된 총적층으로서 넓은 평야를 형성하고 있다.

시험부지 대수층의 수직적인 지질층서를 시추 조사한 결과, 상부 23 m 구간에는 모래층이 존재하며 그 하부에는 2 m 두께의 점토로 구성된 가압층이 형성되어 있었다. 점토층의 하부에는 대략 10 m 두께의 고투수성 자갈층이 존재하여 누수 피압대수층을 형성하고 있으며, 자갈층의 하부에는 불투수성 암반층으로 구성되어 있었다(강동환 외, 2007).

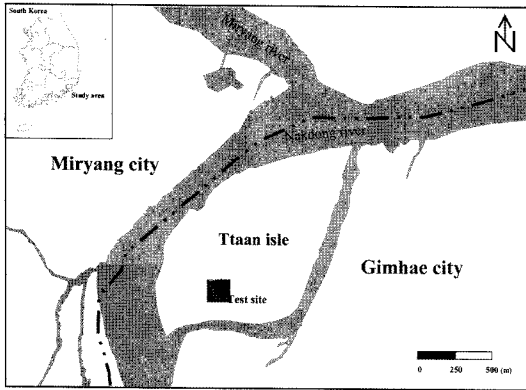


Fig. 1. Location and water system of study area.

양수시험

본 연구지역의 시험대수층에서 양수시험 시 1개의 양수정(PW공)과 6개의 관측정(MW1공, MW2공, MW3공,

MW4공, MW5공 및 MW6공)이 이용되었다. 양수정과격의 이격거리는 MW1공과 MW4공은 5 m 이었으며, MW2공, MW3공, MW5공 및 MW6공은 2 m 이었다. 양수정을 기준으로 남서 방향에는 MW1공, MW2공, 북동 방향에는 MW3공과 MW4공, 북서방향과 남동방향에는 각각 MW5공과 MW6공이 위치하고 있다(Fig. 2(a)).

양수정과 MW1, MW2, MW3, MW4 관측정은 모두 지표면하 심도 35 m까지 개발되었다. 지표면하 심도 25 m까지는 케이싱이 설치되었고, 자갈로 구성된 지표면하 심도 25~35 m 구간은 완전관통(full screen) 되었다(Fig. 2(b)). 시험대수층의 수직누수 여부를 확인하기 위하여 북서-남동 방향에 2개 관측정(MW5, MW6)이 지표면하 심도 20 m까지 개발되었으며, 케이싱은 지표면하 심도 13 m까지 설치되었고 스크린은 케이싱 최하단부에서 점토층 상부까지 10 m 구간에 설치되었다(Fig. 2(c)). 양수시험 시 사용된 양수정과 관측정에 대한 제원이 Table 1에 정리되어 있으며, 지표면하 지하수 심도는 4.66~5.77 m 정

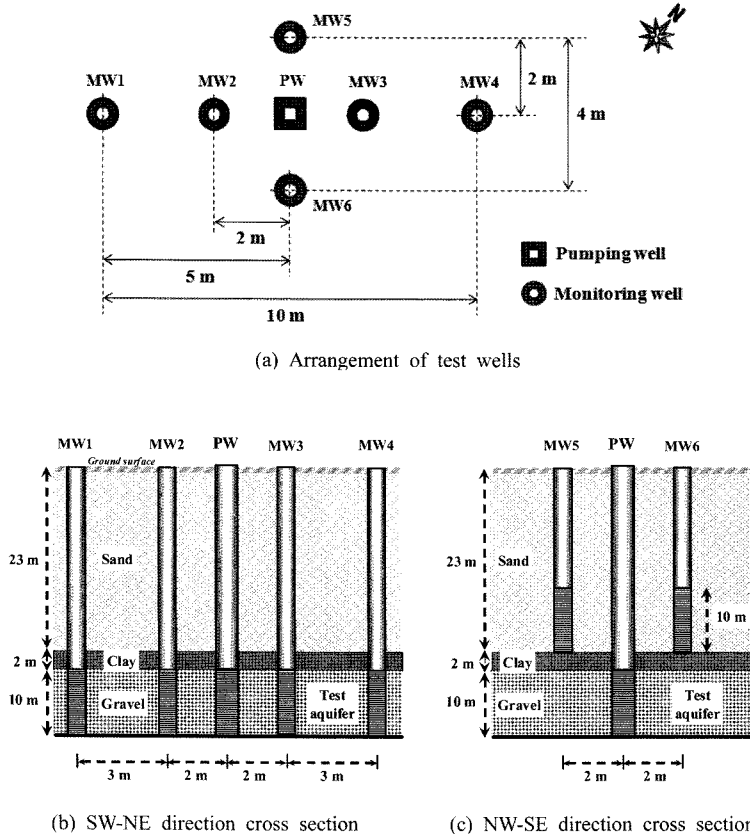


Fig. 2. Arrangement and cross sections of test wells for pumping test.

Table 1. Well design for pumping test and groundwater level.

Well No.	Groundwater Level (*GL-, m)	Well Depth (*GL-, m)	Casing Depth (*GL-, m)	Well Inner Diameter (m)
PW	4.91	35	25	0.100
MW1	4.86	35	25	0.075
MW2	4.83	35	25	0.075
MW3	4.96	35	25	0.075
MW4	5.77	35	25	0.075
MW5	4.66	23	13	0.075
MW6	4.80	23	13	0.075

*GL-: Below the ground surface

Table 2. Coefficient characteristic of the medium, test volume and scale exponent for test aquifer.

Well	Coefficient characteristic of the medium, <i>c</i>	Average test volume (Range), <i>V</i> (m ³)	Average scale exponent (Range), <i>m</i>
MW1	0.001	481 (434-527)	0.146 (0.143-0.148)
MW2	0.001	198 (178-217)	0.150 (0.147-0.153)
MW3	0.001	170 (153-186)	0.160 (0.157-0.163)
MW4	0.001	509 (459-558)	0.153 (0.151-0.155)

도에 형성되어 있었다.

본 연구에서 수행된 양수시험 시 양수량은 2,500 m³/day로 일정하였으며, 양수정과 관측정의 수위변동이 안정화될 때까지 경과시간별 지하수위를 관측하였다. 양수시작 후 10분까지는 1분 간격으로 관측하였으며, 이후 수위안정 시까지 2~30분 간격으로 관측하였다. 양수시험 시 최대수위강하량은 MW1공과 MW4공에서는 0.67 m와 0.63 m, MW2공과 MW3공에서는 1.24 m와 1.17 m로 관측되었으며, 이는 양수정을 중심으로 방사상 대칭 수

위하강추(cone of depression)가 형성되었음을 보여주는 것이다. 그리고 MW5공과 MW6공에서는 0.06 m 정도로 수위변화가 관측되었으며, 이를 통해 시험대수층이 누수 피압대수층임을 알 수 있었다.

양수시험 해석에는 누수 피압대수층 모델인 Hantush solution(1960), 회복시험은 Theis(recovery) solution이 적합하였다(Fig. 3). 시험대수층의 수리전도도는 1.603~2.591 × 10⁻³ m/sec 범위로서 자갈층에 해당하는 높은 투수성을 나타내었으며(Freeze and Cherry, 1979), 양수정에서 양

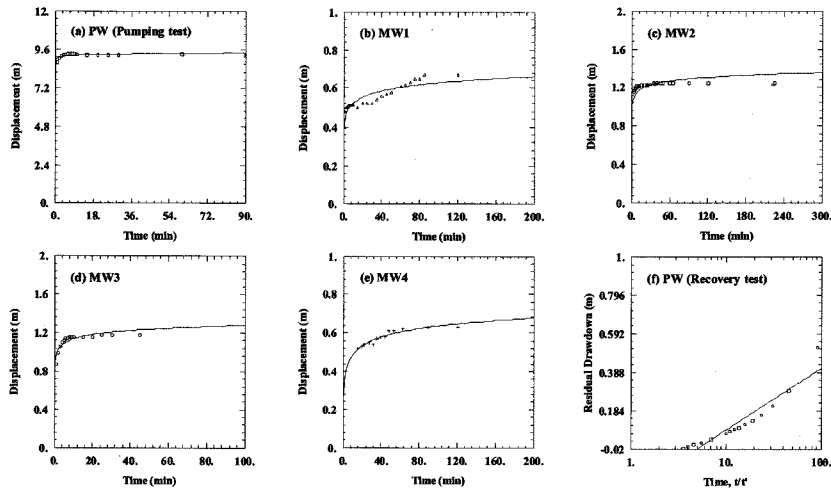


Fig. 3. Displacement versus time plotting and type curve fitting on pumping and recovery tests.

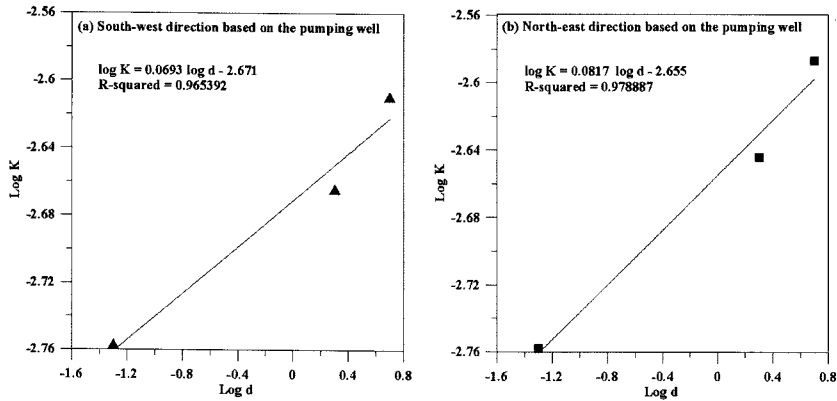


Fig. 4. Functions of hydraulic conductivity with monitoring scale.

수시험과 회복시험에서 산정된 수리전도도의 차이가 10% 이내로 유사하게 나타났다. 양수정을 기준으로 남서 방향(MW1공, MW2공)과 북동 방향(MW3공, MW4공)의 수리전도도가 거리에 따라 대칭적이었다. 양수정에서 관측정의 이격거리가 2m에서 5m로 증가함에 따라 남서 방향에서는 수리전도도가 2.161×10^{-3} m/sec에서 2.452×10^{-3} m/sec로 1.13배 증가하였으며, 북동 방향에서는 2.270×10^{-3} m/sec에서 2.591×10^{-3} m/sec로 1.14배 증가하였다. 양수정과 관측정의 이격거리에 따른 수리전도도의 증가율도 남서와 북동 방향에서 유사하게 나타났다. 이를 통해 본 시험대수층 내 수리전도도의 분포가 매우 낮은 이방성을 형성하고 있음을 알 수 있다.

규모종속효과

양수시험 시 양수정에서 관측정의 이격거리(d)에 따른 수리전도도(K)의 관계는 양대수 그래프(log-log graph)에서 선형 모델이 가장 적합하였다(Fig. 4). 양수정에서 관측정의 이격거리에 따른 수리전도도 증가함수는 남서 방향(PW-MW1-MW2 라인)에서는 $\log K = 0.0693 \log d - 2.671$, 북동 방향(PW-MW3-MW4 라인)에서는 $\log K = 0.0817 \log d - 2.655$ 로 추정되었다. 결정계수(Coefficient of determination)는 남서 방향 0.965, 북동 방향 0.979로서 매우 높게 나타났다. 양수정을 기준으로 남서 방향과 북동 방향의 수리전도도 함수가 유사하게 나타났으며, 이는 연구지역 내 대수층 매질에서 양수정과 관측정의 이격거리에 따라 방사상으로 수리전도도가 증가함을 의미한다. 시험대수층에서 관측거리에 대한 수리전도도 증가함수의 기울기는 양대수 그래프에서 0.0693(남서 방향)과

0.0817(북동 방향)로 추정되었다. Rovey and Cherauer (1995)의 연구에서는 수리전도도의 규모종속효과는 대수층 매질의 불균질성이 높을수록 시험규모(관측거리)에 따른 수리전도도 증가함수의 기울기가 1에 근접함을 보였다. 본 연구에서는 관측거리에 따른 수리전도도 증가함수의 기울기가 0.1 이하로 나타났으며, 이는 대수층 매질의 불균질성이 매우 낮음을 의미하는 것이다.

시험부피에 따른 수리전도도의 규모종속효과(scale effect)는 Schulze-Makuch *et al.*(1999)에 의해 식 (1)로 표현되었다.

$$K = c(V)^m \tag{1}$$

여기서 k 는 수리전도도 [LT^{-1}], c 는 단일매질에서 단일의 열림(opening)과 단일간의 상호 연결성 및 다공질 매질에서 평균공극입경과 공극간의 상호 연결성 같은 지질학적 매질의 변수와 연관된 매질계수특성(coefficient characteristic of the medium) [$L^{1-3m}T^{-1}$]이다. 또한, m 은 규모지수(scale exponent)로서 시험부피와 수리전도도간의 양대수 그래프에서의 기울기[무차원], V 는 시험부피 [L^3]로서 양수시험에 의한 시험부피는 식 (2)로 산정되었다.

$$V = Qt / n_e \tag{2}$$

여기서 Q 는 양수율 [L^3], t 는 양수시험 시 총 관측시간 [T], n_e 는 매질의 유효공극율[무차원]이다. 본 시험대수층은 자갈층으로서, 시험부피 산정 시 유효공극률 값은 일반적인 자갈의 유효공극률 범위인 0.28-0.34를 적용하였다(Freeze and Cherry, 1979; Table 3). 자갈층의 매질계수특성은 대수변환된 시험부피($\log V$)와 수리전도도($\log K$) 회귀직선의 절편에 의해 0.001로 산정되었다. 이는

Table 3. Scale exponent in comparison with another medium.

	Medium	Scale exponent, m
In this study	Gravel	0.15
	Heterogeneous porous media	0.50
Schulze-Makuch <i>et al.</i> (1999)	Double-porosity media	0.75
	Fracture and conduit flow media	1.00

Table 4. Calculation of radius of influence.

Well No.	Distance (m)	Pumping Rate (m ³ /day)	Transmissivity (m ² /day)	Maximum Displacement (m)	Radius of Influence (m)
MW1	5	2,500	2.119 × 10 ³	0.672	7.148
MW4			2.239 × 10 ³	0.630	6.912

Table 5. Scale effect of hydraulic conductivity in radius of influence for pumping test (Pumping rate : 2,500 m³/day).

	Pumping well	South-west direction	North-east direction
Scale (m)	0.05	7.148	6.912
Hydraulic conductivity (m/sec)	1.745 × 10 ⁻³	2.444 × 10 ⁻³	2.592 × 10 ⁻³

대수변환된 시험부피가 0 이면 실제 시험부피는 1 m³이며, 이때의 수리전도도는 실제 시험부피가 단위부피(1 m³) 일 때 해당하는 값이다. 따라서 시험대수층의 매질계수 특성, 시험부피, 수리전도도 값들을 식 (1)에 대입하여 구한 본 시험대수층의 규모지수는 평균 0.152 이었으며, 범위는 0.146~0.160으로 산정되었다(Table 2).

산정된 규모지수를 Schulze-Makuch *et al.*(1999)에 의해 제시된 대수층 매질과 비교해 본 결과, 본 연구의 시험대수층 매질의 규모지수가 평균 0.15 정도로서 매우 낮게 나타났다(Table 2). Schulze-Makuch *et al.*(1999)는 규모지수가 0.50 이하이면 매질이 비교적 균질한 것으로 판단하였으며(Table 3), 이러한 기준을 적용하면 본 시험대수층 매질의 불균질성은 매우 낮은 편이다. 따라서 본 시험대수층에서 시험규모에 따른 수리전도도의 규모종속효과는 적을 것으로 판단된다.

본 연구에서 수행된 양수시험 시 시험대수층 내 영향반경을 산정하여, 이 범위 내에서 수리전도도의 규모종속효과를 추정하였다. 영향반경은 식 (3)의 Thiem equation(1906)을 적용하여 구하였다.

$$R_i = \frac{e(2\pi T_{s_{max}} Q)}{r} \quad (3)$$

여기서 R_i 는 양수시험 시 영향반경[L], T 는 투수량계수[L²T], Q 는 양수율[L³T], 그리고 s_{max} 는 관측공에서의 최대 수두강하량[L]이다. MW-1공과 MW-4공에서 양수시험 영향반경을 산정한 결과, 양수정에서 남서 방향

(MW-1) 7.148 m, 북동 방향(MW-4) 6.912 m로 나타났다(Table 4). 양수정을 기준으로 남서방향과 북동방향의 영향반경 차이가 5% 이내로 유사하게 산정되었으며, 따라서 연구지역의 누수 피압대수층이 방사상으로 균일한 흐름인 것으로 판단된다.

이전 단락에서 규모지수의 산정을 통해 확인하였듯이, 본 연구지역의 자갈층에서도 불균질성에 의한 수리전도도의 규모종속효과가 나타났다. 양수량이 2,500 m³/day인 경우의 양수시험 시 영향반경과 관측규모에 따른 수리전도도 증가함수를 이용하여, 영향반경 이내에서의 규모종속효과를 추정해 보았다(Table 5). 영향반경이 7.148 m인 MW1 관측정 규모에서의 수리전도도는 2.444 × 10⁻³ m/sec, 영향반경이 6.912 m인 MW4 관측정 규모에서의 수리전도도는 2.592 × 10⁻³ m/sec로 산정되었다. 양수정을 기준으로 한 수리전도도의 증가율은 남서 방향에서는 1.40배, 북동 방향에서는 1.49배 정도인 것이다. 이러한 결과를 통해 본 시험대수층 매질의 불균질성이 북동 방향에서 약간 높았으며, 이로 인해 수리전도도의 규모종속효과도 높게 나타났음을 알 수 있다.

요약 및 결론

본 연구에서는 김해 탄성 지역의 고투수성 누수 피압대수층 내 수리전도도의 규모종속효과를 규명하기 위한 양수시험이 수행되었으며, 도출된 결과는 아래와 같다.

1. 시험대수층의 수리전도도는 1.603~2.591 × 10⁻³ m/sec

범위로서 높았으며, 양수정을 기준으로 남서 방향과 북동 방향의 수리전도도가 대칭적이었다. 양수정과 관측정의 이격거리가 2m에서 5m로 증가함에 따라 남서 방향의 수리전도도는 1.13배 증가하였으며, 북동 방향에서는 1.14 배 증가하였다. 따라서, 시험규모에 따른 수리전도도의 증가율도 양수정을 기준으로 남서 방향과 북동 방향에서 유사하였다.

2. 양수정과 관측정의 이격거리에 따른 수리전도도의 증가함수는 양수정에서 남서 방향(PW-MW1-MW2 라인)으로는 $\log K = 0.0693 \log d - 2.671$, 북동 방향(PW-MW3-MW4 라인)으로는 $K = 0.0817 \log d - 2.655$ 로 추정되었다. 원자료와 증가함수의 결정계수는 남서 방향 0.965, 북동 방향 0.979로 매우 높았다. 따라서, 본 시험대수층 매질에서는 양수정과 관측정의 이격거리에 따른 수리전도도의 변화가 시험규모에 종속적임을 알 수 있었다.

3. 본 연구지역에서 수행된 양수시험 조건에서 시험대수층의 영향반경은 남서 방향(MW-1 방향)에서는 7.148 m, 북동 방향(MW4 방향) 6.912m로 산정되었다. 양수정을 기준으로 한 남서 방향과 북동 방향의 영향반경 차이가 5% 이내로서, 이는 연구지역의 누수 피압대수층 내 양수에 의한 수위강하량이 방사상으로 유사함을 의미한다.

4. 양수량이 2,500 m³/day인 경우의 양수시험 시 영향반경과 관측규모에 따른 수리전도도 증가함수와 산정된 영향반경을 이용하여 규모종속효과를 추정된 결과, 양수정을 기준으로 남서 방향의 수리전도도 증가율은 1.40배, 북동 방향에서는 1.49배 정도인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구지역의 시험대수층 매질의 불균질성에 의한 수리전도도의 규모종속은 북동 방향에서 약간 높았으나, 매우 미미한 차이를 나타내었다.

사 사

본 논문은 기상청 기상지진기술개발사업단(CATER 2006-2101)에 의하여 연구비가 지원되었으며, 지원기관에 감사한다.

참 고 문 헌

김건영, 고용권, 김천수, 김형수, 김성이, 2003, 강변여과수 개발을 위한 낙동강 충적층 지하수의 지구화학적 특성연구, 지질공학회지, 13(1), 80-105.
 성현정, 김용제, 이철우, 김구영, 우남칠, 2005, 균열암반에서의 양수시험자료 해석과 일반 방사상 유동모델의 적용성 연구, 자원환경지질학회지, 38(2), 177-185.

이철우, 이대하, 정지곤, 김구영, 김용제, 2002, 양수시험 시 방사상흐름을 보이는 균열암반 대수층에서의 우물 손실, 한국지하수토양환경학회지, 7(4), 17-23.
 정재열, 함세영, 김형수, 손건태, 차용훈, 장성, 백건하, 2003, 창원시 대산면 강변충적층의 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, 우남칠, 신우식, 함세영, 2006, 강변여과수 부지 내 충적층 지하수의 수질특성과 변화, 자원환경지질학회지, 39(2), 151-162.
 Butler Jr., J. J. and Healey, J. M., 1998, Relationship between pumping-test and slug-test parameters, scale effect or artifact?, Ground Water, 36, 305-313.
 Freeze, R. A. and Cherry, J. A., 1979, Groundwater, Prentice hall, Englewood, N. J. 604p.
 Hantush, M. S., 1960, Modification of the theory of leaky aquifers, Jour. of Geophys. Res., 65, 3713-3725.
 Hantush, M. S. and Jacob, C. E., 1955, Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer, Am. Geophys. Union Trans. 36, 95-100.
 Hyun, Y., Neuman, S. P., Vesselinov, V. V., Illman W. A., Tartakovsky D. M. and Federico, V.D., 2002, Theoretical interpretation of a pronounced permeability scale effect in unsaturated fractured tuff, Water Resources Research, 38, 281-288.
 Hunt, A. G., 2006, Scale-dependent hydraulic conductivity in anisotropic media from dimensional crossover, Hydrogeology Journal, 14, 499-507.
 Illman, W. A., 2006, Strong field evidence of directional permeability scale effect in fractured rock, Journal of Hydrology, 319, 227-236.
 Martinez-Landa, L., 2005, An analysis of hydraulic conductivity scale effects in granite (Full-scale Engineered Barrier Experiment (FEBEX), Grimsel, Switzerland), Water Resources Research, 41, 1-13.
 Moench, A. F., 1985, Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers, Water Resources Research, 21, 1121-1131.
 Nastev, M., Savard, M. M., Lapcevic, P., Lefebvre, R. and Martel, R., 2004, Hydraulic properties and scale effects investigation in regional rock aquifers, southwestern Quebec, Canada, Hydrogeology Journal, 12, 257-269.
 Neuman, S. P. and Witherspoon, P. A. 1969, Theory of flow in a confined two aquifer system, Water Resources Research, 5, 803-816.
 Rovey, C. W., 1998, Digital simulation of the scale effect in hydraulic conductivity, Hydrogeology Journal, 6,

- 216-225.
 Rovey, C. W. and Cherkauer D. S., 1995, Scale dependency of hydraulic conductivity measurements, *Ground Water*, 33, 769-780.
 Snchez-Vila, X., Carrera, J. and Girardi, J. P., 1996, Scale effects in transmissivity, *Journal of Hydrology*, 183, 1-22.
 Schad, H. and Teutsch, G., 1994, Effects of the investigation scale on pumping test results in heterogeneous porous aquifers, *Journal of Hydrology*, 159, 61-77.
 Schulze-Makuch, D., Carlson, D. A., Cherkauer, D. S and Malik, P., 1999, Scale dependency of hydraulic conductivity in heterogeneous media, *Ground Water*, 37, 904-919.
 Theis, C. V., 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Am. Geophys. Union Trans.*, 16, 519-524.
 Thiem, G., 1906, *Hydrologische Methoden*, Gebhardt, Leipzig, 56p.

2008년 10월 9일 원고접수, 2008년 12월 11일 게재승인

김태영

부경대학교 환경지질과학과
 608-737, 부산시 남구 대연3동 599-1
 Tel: 051-629-6631
 Fax: 051-629-6623
 E-mail: kimty@pknu.ac.kr

강동환

부경대학교 환경지질과학과
 608-737, 부산시 남구 대연3동 599-1
 Tel: 051-629-6631
 Fax: 051-629-6623
 E-mail: dhkang@pknu.ac.kr

김성수

부경대학교 환경지질과학과
 608-737, 부산시 남구 대연3동 599-1
 Tel: 051-629-6631
 Fax: 051-629-6623
 E-mail: kimss@pknu.ac.kr

김병우

부경대학교 환경지질과학과
 608-737, 부산시 남구 대연3동 599-1
 Tel: 051-629-6631
 Fax: 051-629-6623
 E-mail: bwkim@pknu.ac.kr

권병혁

부경대학교 환경대기과학과
 608-737, 부산시 남구 대연3동 599-1
 Tel: 051-629-6644
 Fax: 051-629-6638
 E-mail: bhkwon@pknu.ac.kr