

순간수위 변화시험, 단공양수시험 및 단계양수시험을 통한 수리상수 추정연구

조윤주¹ · 이진용^{1*} · 전성천² · 천정용² · 권형표²

¹강원대학교 지질학과, ²(주)지오그린21

Estimation of Hydraulic Parameters from Slug, Single Well Pumping and Step-drawdown Tests

Yun-Ju Jo¹, Jin-Yong Lee^{1*}, Seong-Chun Jun², Jeong-Yong Cheon², and Hyung-Pyo Kwon²

¹Department of Geology, Kangwon National University

²GeoGreen21 Co., Ltd.

본 연구는 연구지역의 수리상수를 추정하여 오염된 지하수의 정화공법 설계에 효과적으로 사용하는데 목적이 있다. 이를 위하여 수행된 수리시험은 순간수위변화시험, 단공양수시험 및 단계양수시험이다. 순간수위변화시험은 대표적인 Bouwer and Rice 직선법과 C-B-P 특성곡선법(type curve)으로 해석하였다. Bouwer and Rice법으로 해석한 평균 수리전도도 값은 4.48×10^{-3} cm/sec 이며 중앙값은 1.16×10^{-3} cm/sec이다. C-B-P법으로 구한 평균 수리전도도 값은 2.37×10^{-3} cm/sec이며 중앙값은 7.09×10^{-4} cm/sec이다. 두 해석 결과 연구지역의 하부가 화강암으로 이루어져 있어 대체로 투수성이 낮아 Bouwer and Rice법으로 해석한 수리전도도가 높게 나타난다. 단공양수시험은 GW7, GW12 및 MW9 관정에서 수행하였으며 여러 종류의 특성곡선법을 적용하여 해석하였다. GW7 관정은 GW12 및 MW9 관정보다 수리전도도 및 투수량계수가 낮으며 이는 기반암의 파쇄대 및 절리의 여부와 관련된 것으로 판단된다. 단계양수시험은 KDPW1 및 KDPW2 관정에서 수행하였으며 해석방법에 따라 수리상수 값의 차이가 나타나지만 매우 미미하며 본 연구에서 해석한 수리상수 값은 오염지하수 정화설계에 있어 적절히 활용될 것으로 판단된다.

주요어 : 순간수위변화시험, 단공양수시험, 단계양수시험, 수리전도도, 투수량계수

The aim in this study is used to develop the remediation technologies for contaminated ground water. Slug, single well pumping and step-drawdown tests have been used to obtain hydraulic parameter estimates in the field. Slug tests yield hydraulic conductivity values using the Bouwer and Rice and C-B-P analysis methods. The mean and median hydraulic conductivity values of Bouwer and Rice method are 4.48×10^{-3} and 1.16×10^{-3} cm/sec, respectively. On the other hand, C-B-P method gave mean and median hydraulic conductivity values of 2.37×10^{-3} and 7.09×10^{-4} cm/sec, respectively. These analyses show a trend for the Bouwer and Rice method to yield lower hydraulic conductivity values in low permeability zones of granite in the study area. Sing well pumping test data were calculated through type curve in GW7, GW12 and MW9 wells. It could be interpreted that the differences of hydraulic conductivity and transmissivity values between GW7 and GW12, MW9 is related with fault clays and fractures in the bedrock among the wells. Step-drawdown tests were carried out in the KDPW1 and KDPW2 wells. The hydraulic parameter of KDPW1 and KDPW2 showed very litter difference between the values. The study of hydraulic parameter estimates can be used to purify in contaminated groundwater.

Key works : slug tests, single well pumping tests, step-drawdown tests, hydraulic conductivity, transmissivity

*Corresponding author: hydrolee@kangwon.ac.kr

서 론

최근 유기성 유해 폐기물로 오염된 지하수에 대한 사회적 관심이 늘어나면서 이를 정화하기 위한 정화처리 공법 개발이 활발히 이루어지고 있다(Ko and Lee, 2010; Suk and Yeh, 2010). 본 연구지역은 2003년 토양 및 지하수 정밀조사 용역 결과 TCE 오염으로 인한 정화명령을 받아 복원사업을 실시하기 위한 복원공법 기본설계를 지속적으로 수행해 왔다(강원도, 2005). 본 연구지역에서 수행되고 있는 양수처리시스템을 이용한 오염정화 설계를 효율적으로 수행하기 위해서는 지하수 유동 및 오염물질의 이동에 대한 평가뿐만 아니라 지하매질에 대한 특성 값 즉 수리상수를 알아야 한다. 대수층의 수리적 특성을 파악하기 위하여 현장에서 수행되는 수리시험은 순간수위변화시험(slug tests)과 양수시험(pumping tests)이 있다(이진용 외, 1999; 조윤주 외, 2010a; 조윤주 외, 2010b; Lee and Lee, 1999). 이는 수리전도도(hydraulic conductivity; K), 투수량계수(transmissivity; T) 및 저유계수(storativity; S)와 같은 수리상수 값을 구하기 위해 수행된다. 순간수위변화시험은 지하수가 오염되었다고 여겨지는 지역에서 수리상수를 추정하기 위해 널리 사용되는 방법이다(Butler and Healey, 1998; Butler et al., 1996). 순간수위변화시험은 한 관정에서 시행할 수 있는 매우 경제적인 시험법으로 순간적인 수위변화를 일으켜 그 회복 양상을 관측함으로써 수리상수 값을 추정한다. 이는 물을 순간적으로 덜어내거나 혹은 더해서 순간수위 변화를 측정한다(Bouwer and Rice, 1976). 양수시험은 단공에서 행해지는 수리시험에 비해 비교적

넓은 지역에 대한 수리적 특성을 나타내는 상수를 구할 수 있다. 단공양수시험은 관측공 없이 양수정만으로 시행하는 방법이다(이용수, 2008; 최병수, 1998; 최병수, 2007). 단계양수시험 역시 일정시간 간격으로 양수량을 증가시켜 수위변화 및 수위강하를 관측하는 단공시험이다(이철우 외, 2002; 이진용 외, 2005; 정상용 외, 2009; 최현미 외, 2010; 한정상, 1998; Dawson and Istok, 1991; Hantush, 1964; Kawecki, 1995; Kruseman and de Ridder, 1991). 단계양수시험은 3단계 이상 진행되며 각 단계에서의 양수시간을 일정하게 유지하며 각 단계별로 관정 내 지하수위가 안정될 때까지 양수를 수행하여 단계별 비양수량을 구하고 적정 양수량을 산출한다(이진용 외, 2005; 최현미 외, 2010). 본 연구에서는 TCE로 오염된 산업단지에서 순간수위변화시험, 단공양수시험 및 단계양수시험을 수행하여 수리상수를 추정하였다.

연구지역 및 연구방법

연구지역

수리 시험이 수행된 지역은 강원도 원주시의 북쪽에 위치하고 있는 산업단지이다(Fig. 1a). 본 지역은 해발고도 203 m의 우두산과 191.7 m의 무명산 사이의 계곡으로 이어지는 완만한 층적층 대지에 위치하며 계곡수는 산업단지 조성과 관련한 인위적인 배수로를 따라 이동하여 원주천으로 유입되고 있다(강원도, 2005; 조윤주 외, 2010c; Back and Lee, 2010; Jo et al., 2010). 연구지역의 지하수 흐름 방향은 도로관리사업소가 위치한 무명산과 우두산에서 부터

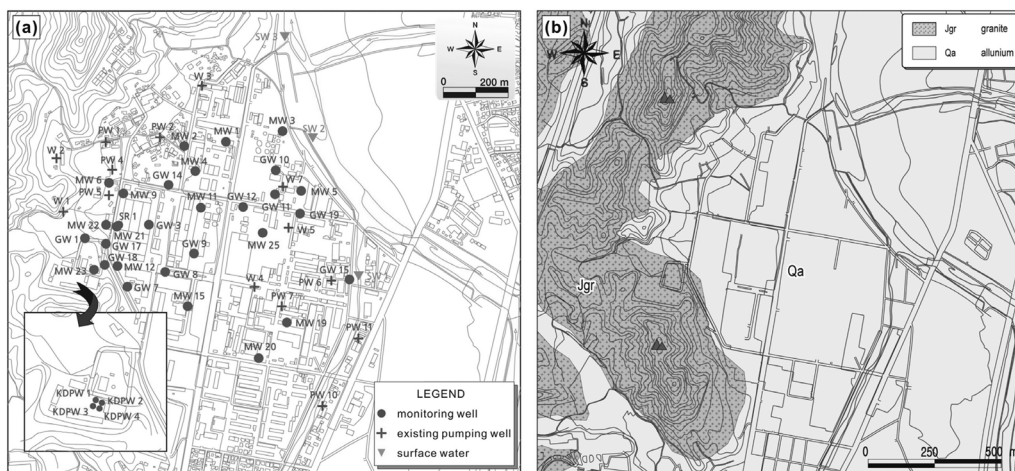


Fig. 1. (a) Location of study area and the slug, single well and step-drawdown tests points and (b) general geology map.

계곡과 사천천 및 원주천으로 유동하는 형태(북동방향)를 보이며, 상대적으로 고도가 높은 도로관리사업소 부근에서 지하수 흐름 속도가 산업단지 부지보다 빠른 것으로 나타났다.

연구지역 일대의 기반암은 주라기 흑운모화강암으로 신생대 4기 충적층이 그 위를 덮고 있다(박병권 외, 1989). 일부 지역은 복토되어 있고, 과거 논이 있던 원주천과 사천천 부근은 점토질 토양이 분포한다. 상대적으로 고도가 높은 도로관리사업소 부지는 상부토양이 얇고 흑운모화강암이 풍화되어 지표 가까이 나타난다(조윤주 외, 2010c; Fig. 1b).

수리시험

본 연구에서 수행한 수리시험(hydraulic tests)은 순간수위변화시험, 단공양수시험 및 단계양수시험이며 관정의 제원은 Table 1에 정리하였다. 순간수위변화시험은 베일러(bailer)를 이용하여 관정 내 지하수를 순간적으로 제거하거나 더미(stainless steel 재질)를 주입 또는 추출하는 방식으로 수위변화를 일으킨 후 수위회복을 관찰하는 방법으로 기존이용관정 28개(GW1, 3, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 17, 18, 19; MW1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 11, 12, 15, 19, 20, 21, 22, 23, 25)와 신규관정 5개(SR1; KDPW1, 2, 3, 4)에서 순간수위변화시험을 수행하였다. 순간수위변화시험은 초기 수위 변동값의 정밀도에 따라 해석에 차이가 유발할 수 있으므로 자동수위 기록계는 Solinst사의 Levelogger를 이용하여 수위변화를 관측하였다. Levelogger는 수위회복이 빠른 지역에서는 0.5초 간격, 그 외 지역은 1초 간격으로 측정하였다.

본 연구지역은 지하수의 흐름이 비교적 빠르고 지하수량이 많아 지하수위 강하를 유발시키기 위해서는 다량의 양수를 수행해야 한다. 그러나 오염된 지역의 특성상 다량의 양수로 인한 별도 처리가 필요하며 오염분포에 대한 교란이 발생할 수 있는 제약으로 저양수량의 단공양수시험을 수행하였다. 단공양수시험은 산업단지 내의 지하수 흐름방향을 고려하여 기존관정(GW7, 12; MW9)에서 수행하였다. 소형 수증펌프를 이용하여 일정 양수량으로 60분간 양수하였으며 양수 시 수위변화를 관측하기 위하여 양수정에서 Solinst사의 Levelogger Gold를 설치하여 자동관측을 수행하였으며, 수동 수위계로 지하수위를 측정하여 보정하였다. 연구지역의 수리지질학적 특성과 영향반경을 조사하기 위하여 수행한 단계양수시험은 신규관정(KDPW1, KDPW2)에서 수행하였다(Fig. 2). KDPW1 및 KDPW2 관정에서 수행한

Table 1. Summary of well completions.

	Inner diameter (mm)	Well depth (m)	Well screen length (m)	Well casing length (m)	Water level (m)
GW1	50.8	15.0	7.5	7.5	4.30
GW3	50.8	24.5	10.5	14.0	7.27
GW7	50.8	24.0	13.5	10.5	1.87
GW8	50.8	20.3	9.8	10.5	5.00
GW9	50.8	17.5	10.8	6.7	5.16
GW10	50.8	14.3	6.0	8.3	4.45
GW12	50.8	18.5	10.5	8.0	2.17
GW14	50.8	21.5	12.0	9.5	3.07
GW15	50.8	15.5	10.5	5.0	3.35
GW17	50.8	13.0	9.0	4.0	6.68
GW18	50.8	17.0	12.0	5.0	10.51
GW19	50.8	20.0	17.0	3.0	2.26
MW1	50.8	16.0	5.5	10.5	1.67
MW2	50.8	20.5	5.5	15.0	4.38
MW3	50.8	17.0	5.0	12.0	4.41
MW4	50.8	26.5	7.0	19.5	3.38
MW5	50.8	13.5	3.0	10.5	3.29
MW6	50.8	24.5	6.5	18.0	10.97
MW9	50.8	21.0	6.0	15.0	7.13
MW11	50.8	19.5	6.0	13.5	5.6
MW12	50.8	9.4	1.9	7.5	0.01
MW15	50.8	16.5	3.0	13.5	4.21
MW19	50.8	11.3	2.3	9.0	2.73
MW20	50.8	13.0	12.0	1.0	2.84
MW21	50.8	19.0	5.5	13.5	6.06
MW22	50.8	25.3	7.3	18.0	9.31
MW23	50.8	20.0	8.0	12.0	6.36
MW25	50.8	13.0	1.0	12.0	1.83
KDPW1	101.6	50.0	20.0	30.0	9.81
KDPW2	101.6	30.0	25.5	4.5	9.71
KDPW3	101.6	50.0	20.0	30.0	9.47
KDPW4	101.6	30.0	25.5	4.5	9.19

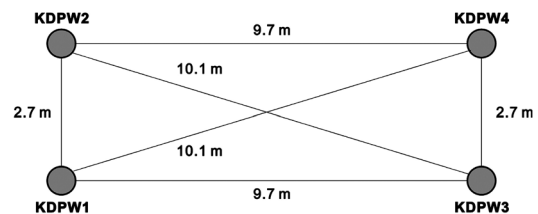


Fig. 2. The layout of the step-drawdown test wells.

단계양수시험은 양수량이 적은 단계에서부터 시작하여 단계적으로 양수량을 증가시켰다. 양수시에 수위변화를 관측하기 위하여 Hermit 2000, Hermit 2000 압력센서 및 Solinst사의 Levelogger Gold를 이용하여 수위변화를

관측하였으며, 수동수위 측정기를 이용하여 자동으로 관측된 결과를 확인 비교하였다.

결과 및 토론

순간수위변화시험

순간수위변화시험 결과를 해석하기 위해서는 대상 대수층이 자유면대수층인지 혹은 피압대수층인지를 판단해야 한다. 2009년 7월 28일부터 9월 11일까지 33개 관정에서 수행한 순간수위변화시험의 결과를 해석하는 대표적인 모델은 자유면 대수층에서의 시험결과를 해석하는 Bouwer and Rice법(Bouwer and Rice, 1976; Bouwer, 1989) 및 피압대수층에 적합한 Cooper-Bredehoeft-Papadoplus법(C-B-P법; Cooper et al., 1967; Papadoplus et al., 1973)이 있다. 연구지역은 수리지질학적 여건으로 보아 자유면 대수층으로 보아야 하나 피압대수층의 특성도 가지고 있으므로 위 두 가지 방법을 모두 적용하여 해석하였다. 본 연구에서는 두 모델을 수리해석 프로그램(Aqtesolv ver. 3.5 (HydroSOLVE, Inc.))에 적용하여 해석하였으며 시험자료를 이용하여 구한 수리전도도는 Table 2와 같다. Bouwer and Rice법으로 해석한 평균 수리 전도도 값은 $4.48 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 이며 중앙값은 $1.16 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 이다. C-B-P 법으로 구한 평균 수리전도도 값은 $2.37 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 이며 중앙값은 $7.09 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 이다.

수리전도도가 낮게 나타나는 관측정은 GW18, MW23 및 신규관측정 부근으로 연구지역의 남동쪽에 해당한다. GW18의 시추자료에 의하면 층적/풍화토 구간이 0~7m로 나타나며 그 하부로 17m까지 비교적 경도가 높은 연암층이 발달하고 있다. 심도가 깊어질수록 경암으로 이어지며 지하수가 매우 적어 굴착하부에서 지하수가 유입되는 것으로 나타난다. 수리전도도가 높게 나타나는 관측정은 GW8, GW10 및 MW5로 GW8의 시추자료에 의하면 0~14m로 층적층이 나타나며 그 하부로 18.3m까지 부분적으로 파쇄대가 발달된 연암(화강암)이 이어진다. 20.3m까지는 절리가 약간 있는 경암(화강암)이 발달되어 있다. 전체적으로 파쇄대 및 절리가 발달한 구간에서 수리전도도가 높게 나타나며 연구지역의 수리전도도는 시추자료와 일치하는 것으로 나타난다(Table 3).

Bouwer and Rice법과 C-B-P법의 수리전도도를 비교하면(Fig. 3) Bouwer and Rice법으로 구한 수리전도도가 C-B-P법으로 구한 수리전도도보다 약간 크게 나타난다. 이는 주로 자유면 대수층에 적용하는 Bouwer and Rice법과 피압대수층에 적용하는 C-B-P의 해석적 방법이 다르기 때문

Table 2. Results of the slug tests conducted in study area.

Wells	Initial water level (m)	Initial displacement (m)	Bouwer and Rice (cm/sec)	C-B-P (cm/sec)
GW1	10.70	0.1230	2.10E-04	1.22E-04
GW3	17.23	0.3575	1.96E-03	2.60E-03
GW7	22.13	0.6016	3.05E-04	4.09E-04
GW8	15.30	0.2613	1.25E-02	1.66E-02
GW9	12.16	0.1649	2.34E-03	7.17E-04
GW10	9.85	0.1401	1.23E-02	1.38E-02
GW12	16.33	0.1871	8.73E-04	5.30E-04
GW14	18.43	0.0229	1.90E-03	9.46E-04
GW15	12.15	0.1648	1.07E-02	5.16E-03
GW17	6.32	0.2531	1.43E-04	2.95E-04
GW18	6.49	0.1823	2.90E-05	1.20E-04
GW19	17.74	0.1210	5.96E-03	6.40E-03
MW1	14.33	0.0825	2.44E-03	1.92E-03
MW2	16.12	0.0235	1.78E-03	6.64E-04
MW3	12.59	0.0048	1.69E-03	1.19E-03
MW4	23.12	0.0183	6.15E-04	5.89E-04
MW5	10.20	0.2780	3.79E-02	6.41E-03
MW6	13.53	0.0147	1.28E-03	5.94E-04
MW9	13.87	0.0737	2.41E-03	1.29E-03
MW11	13.90	0.0376	3.23E-03	4.77E-04
MW12	9.39	0.0175	1.24E-02	2.86E-03
MW15	12.30	0.1483	7.71E-04	4.21E-04
MW19	8.60	0.0784	2.30E-02	3.70E-03
MW20	10.20	0.1523	5.01E-04	7.09E-04
MW21	12.94	0.2015	2.46E-03	2.33E-03
MW22	16.16	0.1314	1.54E-03	5.96E-04
MW23	13.64	0.4820	2.14E-04	9.59E-05
MW25	11.17	0.0669	3.85E-03	4.69E-04
SR01	5.79	0.4172	8.64E-04	4.24E-03
KDPW1	40.19	0.2801	9.64E-04	1.00E-03
KDPW2	20.29	0.1980	3.09E-04	5.62E-04
KDPW3	40.53	0.2726	2.03E-04	1.98E-04
KDPW4	20.81	0.2190	1.30E-04	1.73E-04

Table 3. Borehole data of slug test wells.

Well	Elevation (m)	Depth (m)	Thickness (m)	Stratigraphic
GW8	99.7	14.0	14.0	alluvium
	95.4	18.3	4.3	soft rock
	93.4	20.3	2.0	hard rock
GW10	99.5	9.0	9.0	alluvium
	98.0	10.5	1.5	weathered rock
	97.0	11.5	1.0	hard rock
	96.5	12.0	0.5	soft rock
	94.2	14.3	2.3	hard rock

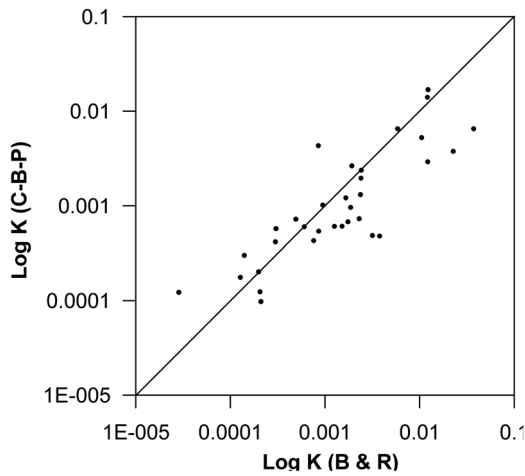


Fig. 3. Comparison of K values obtained by the Bouwer and Rice and C-B-P methods.

이다(함세영 외, 2001). 일반적으로 투수성이 큰 매질에서는 C-B-P법이 투수성이 낮은 매질에서는 Bouwer and Rice법이 수리전도도가 높게 나타난다고 보고된바 있다(이진용 외, 1999; 함세영 외, 2001; Mas-Pla et al., 1997). 본 연구지역은 충적층 하부가 화강암으로 이루어져 있으며 대체로 투수성이 낮아 Bouwer and Rice법으로 해석한 수리전도도가 높게 나타나는 것으로 판단된다. 그러나 두 해석방법의 차이는 적으며 관측정 별로 국지적인 편차를 보여주고 있다.

단공양수시험

일반적으로 양수시험을 해석하기 위한 많은 개념모델과 해석방법들이 나와 있으며(Dawson and Istok, 1991; Kruseman and de Ridder, 1991) 본 연구에서는 해석 시 상용프로그램인 Aqtesolv ver. 3.5 (HydroSOLVE, Inc.)를 이용하였다. GW7, GW12 및 MW9 관정에서는 각각

3.11 l/min(4.48 m³/day), 4.28 l/min(6.16 m³/day), 3.32 l/min(4.76 m³/day)의 양수량으로 60분간 양수를 수행하였다. GW7, GW12 및 MW9 관정은 양수시간동안 각각 1.3 m, 0.25 m, 0.18 m의 수위강하를 보였다. 각 관정에서 나타나는 수위 변화는 초기에 급격하게 수위가 떨어지다가 약 10분 후에 지하수위가 완만하게 안정되는 것으로 나타났다(Fig. 4).

양수시험의 측정결과는 관측정의 수위강하 결과를 피양대수층, 자유면대수층의 조건으로 가정하여 여러 종류의 특성곡선법(type curve)을 적용하여 해석하였다(Table 4).

Table 4. Result of the single well tests in GW7, GW12 and MW9.

Well	Aquifer type	Analysis method	K (cm/sec)	T (cm ² /sec)
GW7	Confined	Theis	1.94E-05	0.0397
		Cooper-Jacob	3.48E-05	0.0710
		Papadopulos-Cooper	1.58E-05	0.0322
	Unconfined	Theis	1.74E-05	0.0357
		Cooper-Jacob	2.29E-05	0.0468
		Papadopulos-Cooper	2.24E-04	0.457
GW12	Confined	Theis	1.12E-03	1.804
		Cooper-Jacob	2.00E-03	3.224
		Papadopulos-Cooper	2.13E-03	3.435
	Unconfined	Theis	1.19E-03	1.918
		Cooper-Jacob	1.14E-03	1.836
		Papadopulos-Cooper	1.92E-03	3.083
MW9	Confined	Theis	1.28E-03	1.787
		Cooper-Jacob	2.47E-03	3.457
		Papadopulos-Cooper	2.09E-03	2.93
	Unconfined	Theis	1.11E-03	1.555
		Cooper-Jacob	9.82E-04	1.374
		Papadopulos-Cooper	2.03E-03	2.842

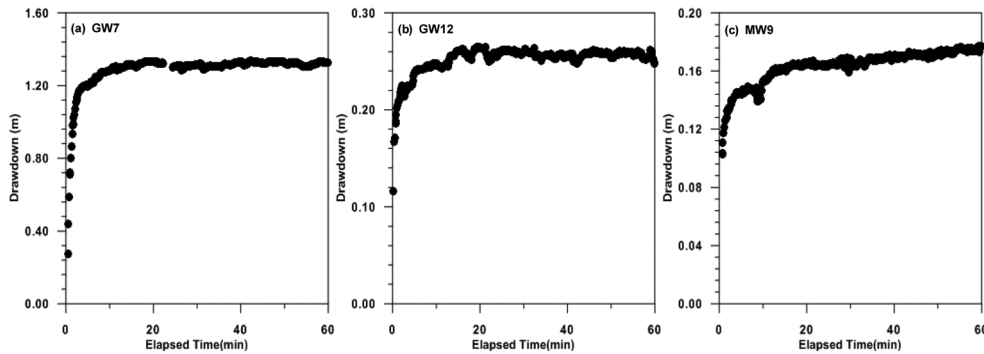


Fig. 4. Results of single well pumping tests in GW7, GW12 and MW9.

본 연구지역은 수리지질학적 여건으로 볼 때 자유면대수층으로 보아야 하나 피압대수층의 특성도 가지고 있기 때문에 여러 가지 방법을 모두 적용하여 해석하였다. 양수시험 관측 자료의 특성곡선 맞춤에 의한 수리상수를 추정해 보면, GW7 관정의 수리전도도는 피압대수층으로 가정하였을 때 $1.58 \times 10^{-5} \sim 3.48 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ (기하평균 $2.20 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$)이며, 자유면대수층으로 가정하였을 때 $1.74 \times 10^{-5} \sim 2.24 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ (기하평균 $4.47 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$)이다. 투수량계수는 피압대수층으로 가정하였을 때 $0.0322 \sim 0.0710 \text{ cm}^2/\text{sec}$ (기하평균 $0.045 \text{ cm}^2/\text{sec}$)이며 자유면대수층으로 가정하였을 때 $0.3565 \sim 0.4567 \text{ cm}^2/\text{sec}$ (기하평균 $0.091 \text{ cm}^2/\text{sec}$)이다. 시추자료에 의하면 0~3 m까지 충적층이 발달하였고 화강암 기원의 풍화토가 7.5 m까지 이어진다. 풍화토는 아래로 갈수록 약간 단단해지며 15 m까지 화강암 기원의 풍화암이 나타난다. 풍화암의 상부는 연약하여 쉽게 부서지지만 하부로 갈수록 단단해진다. 24 m까지는 연암 및 풍화암으로 21 m부근에 파쇄대가 존재한다.

GW12 관정의 수리전도도는 피압대수층으로 가정하였을 때 $1.12 \times 10^{-3} \sim 2.13 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ (기하평균 $1.69 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$)이며, 자유면대수층으로 가정하였을 때 $1.14 \times 10^{-3} \sim 1.92 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ (기하평균 $1.38 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$)이다. 투수량계수는 피압대수층으로 가정하였을 때 $1.804 \sim 3.435 \text{ cm}^2/\text{sec}$ (기하평균 $2.713 \text{ cm}^2/\text{sec}$)이며 자유면대수층으로 가정하였을 때 $1.836 \sim 3.083 \text{ cm}^2/\text{sec}$ (기하평균 $2.214 \text{ cm}^2/\text{sec}$)이다. 시추자료에 의하면 0~2.8 m까지 충적층이 나타나며 7.3 m까지 화강암기원의 무른 풍화암이 나타난다. 풍화암은 10 m까지 이어지며 부분적인 절리와 함께 파쇄대가 나타난다. 18.3 m까지 나타나는 연암층은 15.5 m 부근에서 파쇄대가 나타나며 부분적인 절리가 존재한다.

MW9 관정의 수리전도도는 피압대수층으로 가정하였을 때 $1.28 \times 10^{-3} \sim 2.47 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ (기하평균 $1.88 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$)이며, 자유면대수층으로 가정하였을 때 $9.82 \times 10^{-4} \sim 2.03 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ (기하평균 $1.30 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$)이다. 투수량계수는 피압대수층으로 가정하였을 때 $1.787 \sim 3.457 \text{ cm}^2/\text{sec}$ (기하평균 $2.626 \text{ cm}^2/\text{sec}$)이며 자유면대수층으로 가정하였을 때 $1.374 \sim 2.842 \text{ cm}^2/\text{sec}$ (기하평균 $1.824 \text{ cm}^2/\text{sec}$)이다. MW9 관정의 시추자료는 없으나 GW12 관정과 수리상수 값이 비슷하며 GW7 관정은 GW12 및 MW9 관정에 비해 수리전도도 및 투수량계수가 낮은 것으로 나타난다. 이는 시추자료에서 보논바와 같이 기반암에서 나타나는 파쇄대 및 절리의 여부에 따라 약간의 차이가 나타나는 것으로 판단된다(Table 5).

Table 5. Borehole data of single pumping wells.

Well	Elevation (m)	Depth (m)	Thickness (m)	Stratigraphic
GW7	112.2	3.0	3.0	alluvium
	100.2	15.0	12.0	weathered rock
	91.2	24.0	12.0	soft rock
GW12	104.5	2.8	2.8	alluvium
	97.0	10.3	7.5	weathered rock
	89.0	18.3	8.0	soft rock

단계양수시험

단계양수시험은 TCE 오염농도가 상대적으로 높은 연구 지역 남동쪽의 도로관리사업소 부근에서 수행하여 관정의 효율과 대수층의 생산성을 평가하였다. KDPW1 및 KDPW2 관정에서 수행한 단계양수시험은 양수량이 적은 단계에서부터 시작하여 단계적으로 양수량을 증가시켰다. 양수시에 수위변화를 관측하기 위하여 Hermit 2000, Hermit 2000 압력센서 및 Solinst사의 Leveloger Gold를 이용하여 수위변화를 관측하였으며, 수동수위 측정기를 이용하여 자동으로 관측된 결과를 확인하여 비교하였다. KDPW1 관정에서는 양수량을 각각 2.99 l/min, 6.33 l/min, 8.86 l/min, 11.37 l/min으로 증가시켜가며 4단계 양수를 수행하였으며 각 단계별 지속시간은 60분으로 하였다. KDPW2 관정에서는 양수량을 2.90 l/min, 6.18 l/min, 8.88 l/min, 10.95 l/min으로 증가시켜가며 4단계 양수를 수행하였고 마찬가지로 단계별 지속시간은 60분으로 하였다. KDPW1 및 KDPW2 관정에서는 각각 0.99 m 및 1.16 m의 수위강하를 보였다. 이는 짧은 시간에 양수하였음에도 불구하고 정상상태(steady state)에 도달한 것으로 판단된다(최현미 외 2010; Fig. 5).

단계양수시험을 수행한 KDPW1 및 KDPW2 관정은 연구지역에 새로 설치한 신규관정이며 신규관정부근의(BH-1)의 시추자료를 살펴보면 0~2 m까지 소량의 자갈이 섞인 실트질 모래로 매립층이 덮여있으며 6 m까지 풍화토가 나타난다. 풍화토는 갈색에서 황갈색으로 풍화도는 매우 심하다. 풍화토에 이어 29 m까지 나타나는 풍화암 역시 풍화정도가 매우 심하며 실트질 세립암에서 중립모래 및 암편으로 분해되어 매우 조밀하게 나타난다. 34 m까지 나타나는 연암층은 흑운모화강암으로 29~32.6 m까지 균열 및 절리가 매우 발달하였고 부분적으로 파쇄대가 발달하였다. 연암층의 하부는 경암의 강도를 보이며 균열 및 절리가 잘 발달해 있다. 경암층은 흑운모 화강암으로 60.8 m까지 이어진다(Table 6).

양수정(pumping well) 및 관측정(monitored well)의 수

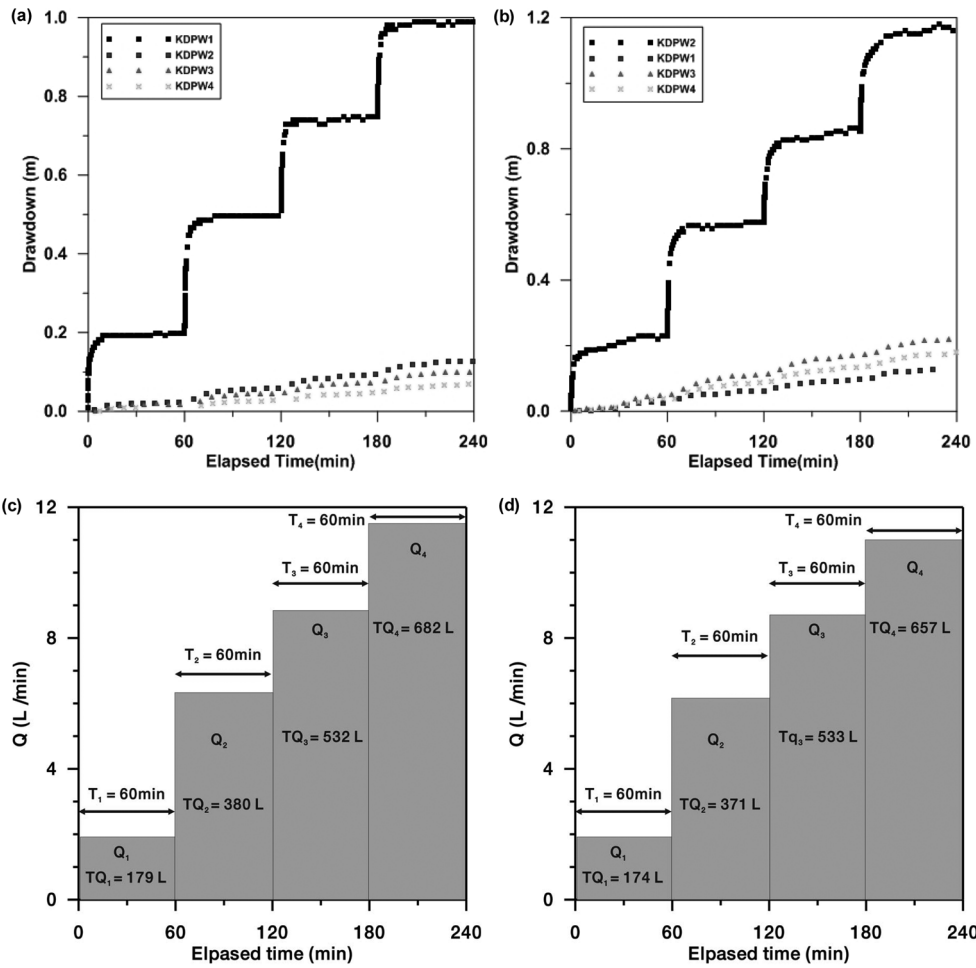


Fig. 5. Results of step-drawdown tests in KDPW1 and KDPW2.

Table 6. Borehole data of step-drawdown test well.

Well	Depth (m)	Thickness (m)	Stratigraphic
BH-1	2.3	2.3	fill
	6.0	3.7	weathered soil
	29.0	23.0	weathered rock
	34.0	5.0	soft rock
	60.8	26.8	hard rock

위강하 결과를 이용하여 피압대수층, 자유면대수층의 다양한 조건으로 가정하여, 여러 종류의 특성 곡선법을 적용하여 해석하였다. KDPW1 관정에서 단계 양수시험 관측자료의 특성곡선 맞춤에 의한 수리상수를 추정해 보면(Table 7), KDPW1(암반), KDPW3(암반), KDPW2(층적) 및 KDPW4(층적) 관정에서 수리전도도는 피압대수층으로 가정하였을

때 각각 기하평균 값은 8.78×10^{-4} , 1.24×10^{-3} , 2.25×10^{-3} , 2.08×10^{-3} cm/sec 이며, 자유면대수층으로 가정하였을 때 각각 기하평균 값은 3.34×10^{-4} , 6.82×10^{-4} , 3.62×10^{-4} , 2.65×10^{-3} cm/sec이다. 투수량계수는 피압대수층으로 가정하였을 때 각각의 기하평균 값은 1.756, 4.813, 4.187, 3.958 cm²/sec이며, 자유면대수층으로 가정하였을 때 각각의 기하평균 값은 1.289, 1.946, 2.648, 5.035 cm²/sec 이다. 한편, 대수층은 피압대수층이나 자유면 대수층으로만 이루어진 대수층이 아닌 복합적으로 이루어진 누수대수층 구조로 해석해야 적절한 경우가 있을 수 있다(김민환, 1998). KDPW1 및 KDPW3 관정이 암반관정으로 누수대수층으로 가정하였을 때 수리전도도는 각각 4.61×10^{-4} , 1.42×10^{-3} cm/sec이며 투수량계수는 각각 0.922, 3.214 cm²/sec이다.

Table 7. Results of the step-drawdown tests conducted in KDPW1.

Well	Aquifer type	Analysis method	K (cm/sec)	T (cm ² /sec)	
KDPW1 (pumping)	confined	Theis	3.62E-04	1.397	
		Papadopulos-Cooper	1.10E-03	2.206	
	leaky	Hantush-Jacob	5.04E-04	1.008	
		Hantush	4.41E-04	0.8817	
		Neuman-Witherspoon	4.41E-04	0.8814	
	unconfined	Theis	3.58E-04	1.383	
		Neuman	3.30E-04	1.276	
		Moench	3.14E-04	1.214	
	KDPW3 (monitoring)	confined	Theis	1.19E-03	4.619
			Papadopulos-Cooper	1.29E-03	5.015
leaky		Hantush-Jacob	2.31E-03	4.621	
		Hantush	1.12E-03	2.24	
		Neuman-Witherspoon	1.12E-03	2.236	
unconfined		Theis	1.19E-03	4.633	
		Neuman	5.14E-04	1.996	
		Moench	5.18E-04	2.008	
KDPW2 (monitoring)		confined	Theis	2.17E-03	4.04
			Papadopulos-Cooper	2.33E-03	4.34
	unconfined	Theis	2.18E-03	4.071	
		Neuman	6.70E-04	1.248	
KDPW4 (monitoring)	confined	Theis	2.59E-03	4.927	
		Papadopulos-Cooper	1.67E-03	3.179	
	unconfined	Theis	2.61E-03	4.948	
		Neuman	2.67E-03	5.071	
		Moench	2.68E-03	5.086	

KDPW2 관정에서 단계양수시험 관측자료의 특성곡선 맞춤에 의한 수리상수를 추정해보면(Table 8), KDPW2, KDPW4, KDPW1 및 KDPW3 관정에서 수리전도도는 피압대수층으로 가정하였을 때 각각 기하평균 값은 6.06×10^{-4} , 1.35×10^{-3} , 1.76×10^{-3} , 5.59×10^{-4} cm/sec이며, 자유면대수층으로 가정하였을 때 각각 기하평균값은 5.17×10^{-4} , 1.17×10^{-3} , 1.51×10^{-3} , 5.02×10^{-4} cm/sec이다. 투수량계수는 피압대수층으로 가정하였을 때 각각의 기하평균 값은 1.130, 2.558, 3.518, 2.186 cm²/sec 이며, 자유면대수층으로 가정하였을 때 각각의 기하평균 값은 0.964, 2.232, 3.018, 1.964 cm²/sec이다. 각각의 해석방법에 따라 수리전도도 및 투수량계수 값의 차이가 나타나지만 이는 매우 미미하며 각각의 수리상수들은 오염지하수 정화설계에 적절히 활용될 것으로 판단된다.

Table 8. Results of the step-drawdown tests conducted in KDPW2.

Well	Aquifer type	Analysis method	K (cm/sec)	T (cm ² /sec)
KDPW2 (pumping)	confined	Theis	4.91E-04	0.9152
		Papadopulos-Cooper	7.48E-04	1.395
	unconfined	Theis	5.42E-04	1.01
		Neuman	5.22E-04	0.9739
		Moench	4.89E-04	0.9115
KDPW4 (monitoring)	confined	Theis	1.31E-03	2.492
		Papadopulos-Cooper	1.38E-03	2.625
	unconfined	Theis	1.33E-03	2.519
		Neuman	1.10E-03	2.091
		Moench	1.11E-03	2.112
KDPW1 (monitoring)	confined	Theis	1.67E-03	3.335
		Papadopulos-Cooper	1.86E-03	3.712
	unconfined	Theis	1.67E-03	3.347
		Neuman	1.44E-03	2.876
		Moench	1.43E-03	2.857
KDPW3 (monitoring)	confined	Theis	1.07E-03	2.145
		Papadopulos-Cooper	5.74E-04	2.243
	unconfined	Theis	5.48E-04	2.145
		Neuman	4.80E-04	1.879
		Moench	4.80E-04	1.879

결론

상기에서 우리는 TCE로 오염된 산업단지에서 순간수위변화시험, 단공양수시험 및 단계양수시험을 수행하여 수리상수를 추정하였다. 연구지역 일대는 주라기 흑운모 화강암을 기반암으로 충적층이 그 위를 덮고 있으며 일부 지역은 복토되어 있다. 순간수위변화시험은 총 33개 관정에서 수행하였으며 결과를 해석하기 위해서는 대상 대수층이 자유면대수층인지 혹은 피압대수층인지를 판단해야 하므로 Bouwer and Rice법 및 C-B-P법으로 해석하였다. Bouwer and Rice법으로 해석한 평균 수리 전도도 값은 4.48×10^{-3} cm/sec 이며 중앙값은 1.16×10^{-3} cm/sec이다. C-B-P법으로 구한 평균 수리전도도 값은 2.37×10^{-3} cm/sec 이며 중앙값은 7.09×10^{-4} cm/sec이다. 본 연구지역은 충적층 하부가 화강암으로 이루어져 있으며 대체로 투수성이 낮아 자유면 대수층에 적용하는 Bouwer and Rice 법으로 해석한 수리전도도가 높게 나타났으나 두 해석방법의 차이가 적으며 관측정별로 국지적인 편차를 나타낸다. 본 연구지역은 지하수의 흐름이 비교적 빠르고 지하수량이 많아 지하수위 강하를 유발시키기 위해서는 다량의 양수

를 수행해야 하나 오염된 지역의 특성상 다량의 양수로 인한 별도 처리가 필요하며 오염분포에 대한 교란이 발생할 수 있는 제약으로 저양수량의 단공양수시험을 수행하였다. 단공양수시험은 산업단지 내의 지하수 흐름방향을 고려하여 3개의 관정에서 수행하였으며 측정결과는 관측정의 수위강하 결과를 피압대수층, 자유면대수층의 조건으로 가정하여 여러 종류의 특성곡선법을 적용하여 해석하였다. 연구지역의 수리지질학적 여건은 자유면대수층으로 보아야 하나 피압대수층의 특성도 가지고 있기 때문에 여러 가지 방법을 모두 적용하여 해석하였다. 3개의 관정에서 측정된 수리전도도 및 투수계수는 시추자료를 살펴본 결과 층적층 하부의 화강암 내에 파쇄대 및 절리의 여부에 따라 약간의 차이를 나타내는 것으로 판단된다. 단계양수시험은 KDPW1 및 KDPW2 관정에서 수행하였으며 각각 0.99 m 및 1.16 m의 수위강하를 보였다. 이는 짧은 시간에 양수하였음에도 불구하고 정상상태에 도달한 것으로 판단된다. 또한 단계양수시험에서 해석된 수리상수 값은 자유면대수층, 피압대수층 및 누수대수층의 해석방법에 따라 차이가 나타나지만 그 차이는 매우 미미하다. 본 연구에서는 연구 지역의 오염된 지하수의 정화공법을 설계하는데 있어 적합한 수리상수를 추정하였으며 적절히 활용될 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 “토양지하수오염방지기술개발사업 (173-092-010)”으로 지원받은 과제입니다. 본 논문에 대하여 좋은 수정의견을 주신 심사위원님들께 감사드립니다.

참고문헌

강원도, 2005, 원주시 우산공단 일대 토양 및 지하수오염 복원을 위한 정밀조사 및 기본설계용역 최종보고서. 한국수자원공사, 309 p.
 김민환, 1998, 누수대수층에 대한 수리상수 추정과 해석. 지하수환경, 5(3), 123-128.
 박병권, 우영균, 장호완, 1989, 원주도폭 지질보고서(1 : 50,000). 한국지질자원연구소, 37 p.
 이용수, 2008, 단공양수시험 분석법 개발. 강원대학교, 석사학위논문, 57 p.
 이진용, 송성호, 이강근, 2005, 단계양수시험 해석시 시간선택이 해석결과에 미치는 영향. 지하수토양환경, 10(2), 59-65.
 이진용, 이강근, 정형재, 배광옥, 1999, 순간수위변화 및 양수시험을 통한 수리상수 추정의 문제점 분석. 지하수환경, 6(1), 14-22.
 이철우, 이대하, 정지곤, 김구영, 김용제, 2002, 양수시험시

방사상호를 보이는 균열암반 대수층에서의 우물손실. 지하수토양환경, 7(4), 17-23.
 정상용, 김병우, 김규범, 권해우, 2009, 단계양수시험 해석시 우물상수 산정 방법이 우물효율에 미치는 영향. 지질공학, 19(1), 71-79.
 조운주, 이진용, 천정용, 전성천, 권형표, 2010a, TCE 오염지역에서의 순간수위변화시험 분석. 지하수토양환경학회 춘계학술대회(초록), 군산대학교, pp. 132.
 조운주, 이진용, 천정용, 전성천, 권형표, 2010b, TCE 오염지역에서의 양수시험 결과 분석. 춘계 지질과학기술공동학술대회(초록), 대구 EXCO, pp. 168.
 조운주, 이진용, 이명재, 김형수, 2010c, TCE 오염 지하수질 특성 및 오염물질 군집분석. 지질학회지, 46(1), 49-60.
 최병수, 1998, 단공 양수시험에 의한 대수층조사 방법. 농공기술 60(98.9), 101-110.
 최병수, 2007, 단공시험 해석에서 저류계수의 보정방법. 지하수토양환경, 12(3), 36-43.
 최현미, 이진용, 천정용, 전성천, 권형표, 2010, 단계양수시험을 통한 최적양수량, 우물효율 및 영향반경 산정. 지질공학 20(2), 127-136.
 한정상, 1998, 지하수환경과 오염, 박영사, 서울, 1071 p.
 함세영, 김문수, 성익환, 이병대, 김광성, 2001, 순간충격시험에 의한 화강암지역이 수리적 매개변수 산출. 지질공학, 11(1), 63-79.
 Baek, W. and Lee, J.Y., 2010, Source apportionment of trichloroethylene in groundwater of an industrial complex in Korea: a 15-year dispute and perspective. Water and Environment Journal (in press).
 Bouwer, H., 1989, The Bouwer and Rice slug test- an update. Ground Water, 27, 304-309.
 Bouwer, H. and Rice, R.C., 1976, A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. Water Resources Research, 12(3), 423-428.
 Butler, J.J.Jr. and Healey, J.M., 1998, Relationship between pumping-test and slug-test parameters: scale effect of artifact?. Ground Water, 36(2), 305-313.
 Butler, J.J.Jr., McElwee, C.D. and Wenzhi, L., 1996, Improving the quality of parameter estimates obtained from slug tests. Ground Water, 34(3), 480-490.
 Cooper Jr., H.H., Bredehoeft, J.D. and Papadopoulos, I.S., 1967, Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. Water Resources Research, 3(1), 263-269.
 Dawson, K.J. and Istok, J.D., 1991, Aquifer Testing: Design and Analysis of Pumping and Slug Tests, Lewis Publishers, Michigan, 344 p.
 Hantush, M.S., 1964, Hydraulics of wells, In: V.T. Chow (ed.), Advances in Hydrosciences, Academic Press, New York, I, 281-432.
 Jo, Y.J., Lee, J.Y., Yi, M.J., Kim, H.S. and Lee, K.K., 2010, Soil contamination with TCE in an industrial complex: contamination levels and implication for groundwater contamination. Geosciences Journal (submitted).
 Kawecki, M.W., 1995, Meaningful interpretation of step-drawdown tests, Ground Water, 33(1), 23-32.
 Ko, N.Y. and Lee, K.K., 2010, Information effect on remediation design of contaminated aquifers using the using the pump & treat method. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 24(5), 649-660.

- Kruseman, G.P. and de Ridder, N.A., 1991, Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, 2nd Edition, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands, 378 p.
- Lee, J.Y. and Lee, K.K., 1999, Analysis of the quality of parameter estimates from repeated pumping and slug tests in a fractured porous aquifer system in Wonju, Korea. *Ground Water*, 37(5), 692-700.
- Mas-Pla, J., Yeh, T.-C.J., Williams, T.M. and McCarthy, J.F., 1997, Analyses of slug tests and hydraulic conductivity variations in the near field of a two-well tracer experiment site. *Ground Water*, 35(3), 492-501.
- Papadopoulos, I.S., Bredehoeft, J.D. and Cooper JR., H.H., 1973, On the analysis of "slug test" data. *Water Resources Research*, 9, 1087-1089.
- Suk, H.J. and Yeh, G.T., 2010, Development of particle tracking algorithms for various types of finite elements in multi-dimensions. *Computers and Geosciences*, 36, 564-568.

2010년 3월 29일 원고접수, 2010년 6월 10일 게재승인

조윤주

강원대학교 지질학과
200-701 강원도 춘천시 효자2동 강원대학길1
Tel: 033-250-8551
Fax: 033-242-8550
E-mail: jyj0820@kangwon.ac.kr

이진용

강원대학교 지질학과
200-701 강원도 춘천시 효자2동 강원대학길1

Tel: 033-250-8551
Fax: 033-242-8550
E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr

전성천

(주)지오그린21
152-719 서울시 구로구 구로동 197-10번지 E&C벤
처드림타워 2차 901호
Tel: 02-6330-2500
Fax: 02-6330-2517
E-mail: skybeast@hanmail.net

천정용

(주)지오그린21
152-719 서울시 구로구 구로동 197-10번지 E&C벤
처드림타워 2차 901호
Tel: 02-6330-2500
Fax: 02-6330-2517
E-mail: cildon@paran.com

권형표

(주)지오그린21
152-719 서울시 구로구 구로동 197-10번지 E&C벤
처드림타워 2차 901호
Tel: 02-6330-2500
Fax: 02-6330-2517
E-mail: asp07@naver.com