

지하수 오염복원에서 현장규모 이방성의 효과

이재민¹ · 이병선² · 우남철^{1*}

¹연세대학교 지구시스템과학과, ²한국농어촌공사 농어촌연구원

Effects of Site-scale Anisotropy of an Aquifer on Groundwater Remediation

Jae Min Lee¹ · Byung Sun Lee² · Nam Chil Woo^{1*}

¹Department of Earth System Sciences, Yonsei University

²Rural Research Institute, Korea Rural Corporation

ABSTRACT

As a preliminary survey to improve efficiency of well-based permeable reactive barrier system for groundwater remediation, this site-scale study was carried to identify the flowpaths and controlling factors of plume at a remediation site in Suwon City, Korea. A total of 22 monitoring wells were installed as a grid system in the 4 m × 4 m square area by 1-m interval. For the groundwater characterization, various tests were performed including water-level monitoring, water sampling & analysis, pumping and slug tests, and tracer tests. The aquifer appeared to be unconfined with hydraulic conductivities (K) ranging from 2.6×10^{-4} cm/s to 9.5×10^{-3} cm/s. The average linear velocity of groundwater was estimated to be 2.94×10^{-6} m/s, and the longitudinal dispersivity of a conservative tracer to be 5.94×10^{-7} m²/s. Groundwater plume moves preferentially through the high-K zones, and the relatively high ion concentrations along the low-K zones implying deterred groundwater flow. Consequently, the spatial variation of hydraulic conductivity caused by aquifer heterogeneity and anisotropy appears to be the most important factor to maximize the effect of plume treatment system for application of in-situ groundwater remediation techniques.

Key words : Site-scale study, Hydraulic conductivity (K), Tracer test, Heterogeneity, Anisotropy

1. 서 론

국내 지하수 오염문제는 최근 환경단체의 보고서에서도 적신호로 분류할 만큼 심각성이 증가하고 있다. 환경부에서 2008년 상·하반기에 걸쳐 4,827개 지점에 대해 수행한 지하수 수질 측정 결과에 따르면, 총 335지점(총 6.9%)에서 먹는 물 수질 기준을 초과한 것으로 보고되고 있다. 주요 초과 오염물질인 미생물(38.4%)과 질산성질소(23.2%)는 주로 하수, 분뇨와 축산폐수, 질소 비료가 주요 오염원인 것으로 보고되었다(환경부, 2009). 전 세계적인 기후변화 추세와 함께, 물 부족국가로 분류되어 온 우리나라로서는 수자원의 보존과 관리 측면에서도 오염된 지하수의 정화와 복원이 필요하며, 이러한 수요에 따라 다양한 지하수 오염 정화·복원기술이 국내에서 연구·개발되어

왔다.

지하수 오염 복원기술의 개발 과정에서 원천적인 과학적 원리와 오염물질의 반응 메커니즘은 다양한 실내 실험과 모사 등을 통해 확보되며, 이렇게 준비된 실내연구의 결과들은 pilot 규모의 소규모 부지에서 그 결과의 타당성과 효율성을 확보하게 된다. 이러한 과정을 거쳐 실효성과 적용성이 확보된 기술에 한하여, 실질적인 부지규모의 오염된 지하수의 복원에 적용하게 된다. 이와 같은 기술 개발의 실내 규모 → pilot 규모 → 부지 규모의 기술적용 과정에서 각 기술의 규모종속성(scale dependency)이 확인된다. 여기서 규모종속성은, 기술적용의 주변 환경에서 발생하는 변수의 종류와 규모에 따라서 또한 변하게 된다. 즉, 실내 실험의 경우 오염물질의 정화기술을 개발할 때 일반적으로 적용되는 회분식 실험(batch test)과 주상실험

*Corresponding author : ncwoo@yonsei.ac.kr

원고접수일 : 2010. 6. 25 심사일 : 2010. 7. 29 게재승인일 : 2010. 10. 29

질의 및 토의 : 2011. 2. 28 까지

(column tests)에서는 대체로 그 성분과 입도 등이 균질한 매질을 이용하게 된다. 그러나 이러한 실험결과들을 복합적인 성분과 서로 다른 크기의 입자들이 혼재된 자연환경에 적용시킬 때에는, 실내 실험결과로부터 예상치 못했던 결과들이 나타날 수 있다. 그러므로 실내실험을 통해 오염물질의 정화가능성이 규명된 기술들에 대해서는 먼저 소규모의 pilot 부지규모 실험을 통해 자연매질이 지니는 이질성(heterogeneity)과 이방성(anisotropy)에 대한 그 적용성을 먼저 평가하게 된다.

위와 같은 연구개발의 과정에서 볼 때, 국내에서는 지하수 오염복원 기술과 연구들이 주로 실내실험 규모에서 수행되어 왔으며(김남호 외, 2006; 소효은 외, 2002; 송나은 외, 2005; 양민준, 이민희, 2008; 장순웅 외, 2006), 일부 연구는 부산 문현지구와 같이 미디어를 통해 국민들에게 공개된 부지의 오염정화 사업과 관련해서 pilot 규모의 지하수 오염복원 실증시험이 수행된 바 있다(손주형 외, 2002; 이민희 외, 2002; B.S. Lee et al., 2009; E.S. Lee et al., 2008).

개발된 지하수 오염복원 기술을 오염된 부지에 적용하기 위해서는, 부지의 오염된 매체, 특히 지하수의 유동경로가 되는 지층의 수리적 특성에 대한 정확한 이해가 필수적이다. 오염물질이 지하수로 유입되면, 상류지역에서 내려온 맑은 지하수와 혼합되면서 오염운(plume)을 이루고, 이 오염운이 지하수와 함께 하류구배 지역으로 이동하고 확산하게 된다. 이 과정에서 오염운이 통과하는 지질매체의 수리적 특성, 즉 투수성의 공간적 분포(균질성과 이방성과 매체의 물리화학적 특성(입도, 성분, 구성광물) 등이 오염물질의 분산(dispersion), 저감(attenuation), 지연(retardation)에 영향을 미치게 되며(Fetter, 2001), 결국 개발된 지하수 오염복원 기술들 역시 현장에 적용 시 이러한 요인들에 의해 그 적용성이 제한될 수 밖에 없다.

이와 동일한 관점에서, 이 연구는 관정형 반응벽체 공법을 통한 지하수 오염 복원기술의 효율성을 평가하기 위한 현장 실증실험의 일환으로 수행되었으며, 목적은 오염 부지 규모의 대수층에 대한 수리전도도의 공간적 변화를 규명하고, 이로 인한 지하수의 유동 특성의 변화를 확인하기 위하여 수행되었다.

2. 연구 부지

경기도 수원 인근에 위치한 연구 부지는 총 면적 약 0.04 km²로서, 부지 서쪽에는 고도 약 175 m의 산지가 있고, 동쪽에는 상수원으로 유입되는 하천이 있다. 부지의

평균해발고도는 125 m, 서쪽 능선과의 지형기복은 약 50 m 이다. 이은재 외(2008)의 조사에 의하면 토양층은 지표면으로부터 약 0.6~2 m 깊이까지 복토층이 나타나고 있고, 복토층으로부터 약 50 cm 아래는 점토가 섞인 구간으로 투수성이 매우 낮다. 그 이하는 하상퇴적물이 20 cm 구간을 이룬다. 하상퇴적물 아래 약 2.7~4.0 m 구간은 풍화토와 풍화대를 이루고 풍화대 아래로는 기반암이 나타났다. 선캄브리아기 경기편마암 복합체에 속하는 화강편마암이 연구부지의 기반암을 이루며(Oh and Yoon, 1972), 기반암 상부는 하천을 따라 남-북측으로 층적층이 발달하고 있다. 이곳은 하천 직강공사가 있었고, 현재 농경지로 활용되고 있는 부지는 복토 작업을 통해 형성된 것으로써 인위적 교란이 심하다고 할 수 있다. 부지의 전반적인 지하수의 유동 특성에 관한 연구는 이은재 외(2008)에 의해 수행된 바 있으며, 본 연구는 이 지역의 일부 구간인 Fig. 1(a)에 표시된 지역으로, 산지와 하천 사이의 평탄한 부지이며, 작물 재배농지로 사용되었던 곳이다.

3. 연구 방법

이 연구에서는 지하수 오염정화 기술의 현장 실증시험을 위한 정밀 부지특성화를 목적으로 하여, 대수성 시험과 추적자 시험을 통한 매질 투수성의 공간적 변화를 정밀하게 평가하고자 하였다. 이를 위해 수행된 연구 내용과 순서는 다음과 같다:

- 지하수 관측망 구축: 기존의 연구(이은재 외, 2008)에서 밝혀진 지하수 유동 방향(Fig. 1(a))을 바탕으로 Fig. 1(b)와 같이 평탄한 부지에 1 m 등간격으로 총 22개의 관측정망을 구축하여 현장 시험에 활용하였다. 관측정의 설치심도는 Fig. 1(c)에 보이는 바와 같이 3.0~4.5 m 범위에 있다. 각 관측정의 직경은 외경이 3 inch이고, 한 관측정에 한 개의 피조메타를 설치하였으며, 각 피조메타의 스크린 길이는 1.5 m이다. 관측정의 위치와 해발고도는 수 cm 이내의 오차 범위를 갖는 GPS(Trimble 4000 SSI)로 측정하였다.

- 배경 지하수위 및 수질 모니터링 : 시추 검층자료(농림수산식품부, 2009)를 통해 상부 대수층까지의 지층 구조를 확인하였고, 관측정내 지하수위를 측정하였다. 지하수위는 총 15회에 걸쳐 측정하였다. 그리고 #2, #7, #16, #19 등 총 4개의 관측정에 자동 수위/수질측정기(CTD-Diver, SWS)를 설치하여 주기적인 지하수위 변동을 관측하였다. 지하수질 조사를 위하여 2008년 6월 12일에 지하수 시료채취를 수행하였다. 연동식 펌프(peristaltic

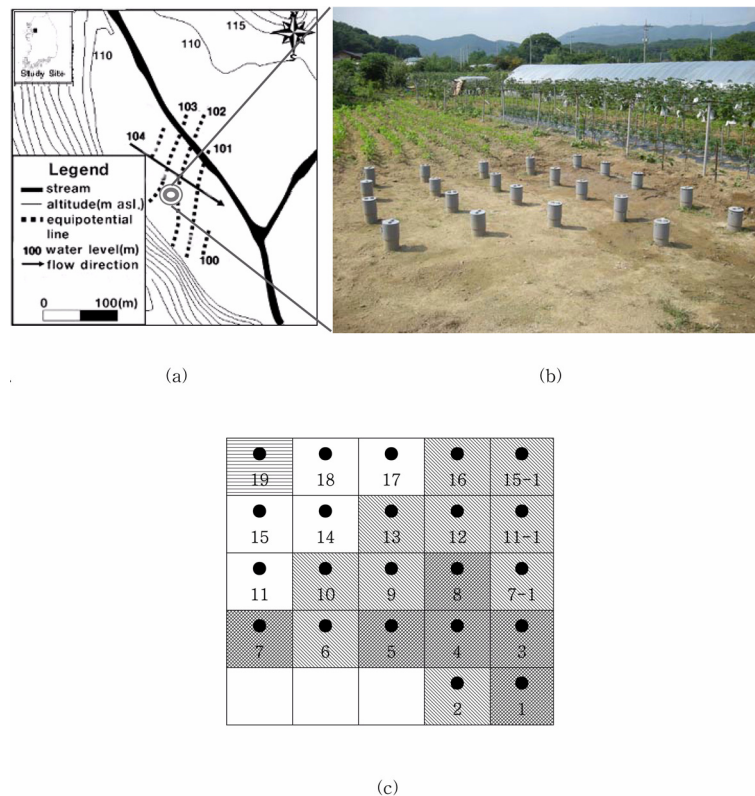


Fig. 1. Information on local and pilot scale field

(a) Study site (modified from 이은재 외, 2008)

(b) Location of pilot-scale field and monitoring wells

(c) Representation of monitoring well network and depth of monitoring wells

(▨) : 3.0 m, (□) : 3.5 m, (▩) : 4.0 m, (■) : 4.5 m

pump)를 이용하여 고인물의 4~5 배를 양수하고 수온이 일정해진 후 채수하였다. pH, 수온, 산화/환원전위(ORP), 용존산소(DO) 및 전기전도도(EC) 등 수리물리특성 자료는 채수 즉시 Orion 사의 휴대용 pH/수온 측정기(Thermo Orion 290A, USA), 휴대용 ORP 측정기 (Thermo Orion Star series, USA), 휴대용 DO 측정기(Thermo Orion Star series, USA) 및 TOA 사의 휴대용 EC 측정기 (TOA, CM-14P, Japan)를 이용하여 측정하였다. 지표로부터 심도 1.5 m 깊이에서 시료를 채취하여 0.45 μm 여과지를 이용하여 부유물질을 제거하였다. 채수한 지하수 시료로 3번 세척한 후 polyethylene 채수병에 담았고, 양이온 시료는 농축질산을 이용하여 pH 2 이하로, 음이온 시료는 4°C 이하로 냉장 보관하여 운반하였다. Na, K, Ca, Mg, Si의 양이온과 Fe, Mn 미량 금속, Cl, NO₃, HCO₃, SO₄, Br의 음이온분석을 서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원(NICEM)에 의뢰하여 수행하였다. 음이온은 Dionex사의 이온크로마토그래피(IC, DX-500,

USA)를 이용하였고, 양이온 및 미량금속은 Shimadzu사의 유도결합플라즈마 발광광도기(ICP-AES, ICPS-1000IV, Japan)를 이용하여 분석하였다. 알칼리도(alkalinity)는 0.01 N HCl을 이용한 적정법으로 측정하였다.

• 대수성 시험: 대수층 내 관측정들의 수리적 연결성과 지하수의 유동 특성을 파악하기 위하여 양수 시험과 순간 충격 시험을 시행하였다. 양수시험은 Fig. 1(b)의 4개의 관측정(3일 #14; 4일 #1, #6, #12)에서 수행하였다. 이때 관측정의 물이 마르지 않도록 미리 적정 양수량을 계산하여, #14 관측정에서는 약 3.7 L/min의 양수율로 총 100분 동안, #12번 관측정에서는 3.2 L/min의 양수율로 약 80분간, #6 관측정에서는 약 5.3 L/min의 양수율로 90분간, #1 관측정에서는 약 2.8 L/min의 양수율로 70분 동안 양수하였다. 양수 시험과 별도로, Dummy(직경 4.5 cm, 길이 60 cm 정도의 원통형) 주입방식의 순간충격시험을 수행하였다. 지하수위 변화는 TD-Diver(SWS)를 이용해 1초 간격으로 모니터링 하였으며, Dummy 주입 후 지하수

위가 초기 안정 수위로 회복될 때까지 시험을 진행하였다. 지하수위 변동 자료는 AQTESOLVE for windows (ver.3.01, HydroSOLVE) 프로그램을 이용하여 분석하였고, 해석방법은 자유면 대수층에서 적용할 수 있는 Bouwer-Rice 수식으로 해석하였다.

• 추적자 시험: 보존성 추적자를 이용하여 지하수와 함께 움직이는 오염원의 이동을 조사하였다. 시험은 2008년 6월과 7월 2차에 걸쳐 multi-well test 방법으로 진행되었으며, 추적자로는 브롬(Br)을 사용하였다. 연구부지 내 관측정의 배경 지하수질을 분석해 본 결과 브롬 성분이 검출되지 않았으며, 브롬은 보존성 추적자로서 보통 표면이 음전하를 띠는 토양 매질과 반응하지 않고 지하수에 의해 이송되기 때문에 이 부지에서의 시험에 적절한 추적자로 판단되었다. 추적자 용액은 수조에 KBr 용액을 넣고 이곳 농가에서 사용하는 지하수로 희석시켜 농도 847 mg/L의 용액을 40 L 제조하였다. 이 용액을 연동식 펌프를 이용하여 약 100 분간 일정한 속도로 주입하였다. 추적자

주입 후 시간에 따라 관측공내 지하수의 전기전도도를 검침(Minisonde 4a, HYDROLAB multiprobe)을 이용해 측정하였고, 각각의 자료값들을 농도이력곡선(Break-Through curve)으로 나타냈다.

1차 시험에서는 부지의 광역적인 지하수 유동방향인 남동쪽 흐름과 #19 관측정에서의 물 빠짐 현상이 느린 현상특성을 고려하여, #14 관정을 추적자 주입공으로 선정하였다. 1차 시험결과를 바탕으로 정확한 지하수의 유동경로와 특성을 확인하고자 7월 10~11일 이틀 동안 2차 추적자 시험을 수행하였다. 이때에는 주입정으로 #11 관측정을 사용하였으며, 모니터링 시간 간격을 약 40분으로 조정하여 보다 조밀한 간격의 밀도 높은 관측 데이터를 수집하였다. 관측정 #7-1, #11-1, #15-1은 1차 추적자 시험의 결과 오염원의 이동방향이 부지의 동쪽으로 나타나서 이를 보다 정확히 분석하기 위한 2차 시험을 위해 추가로 설치되었다.

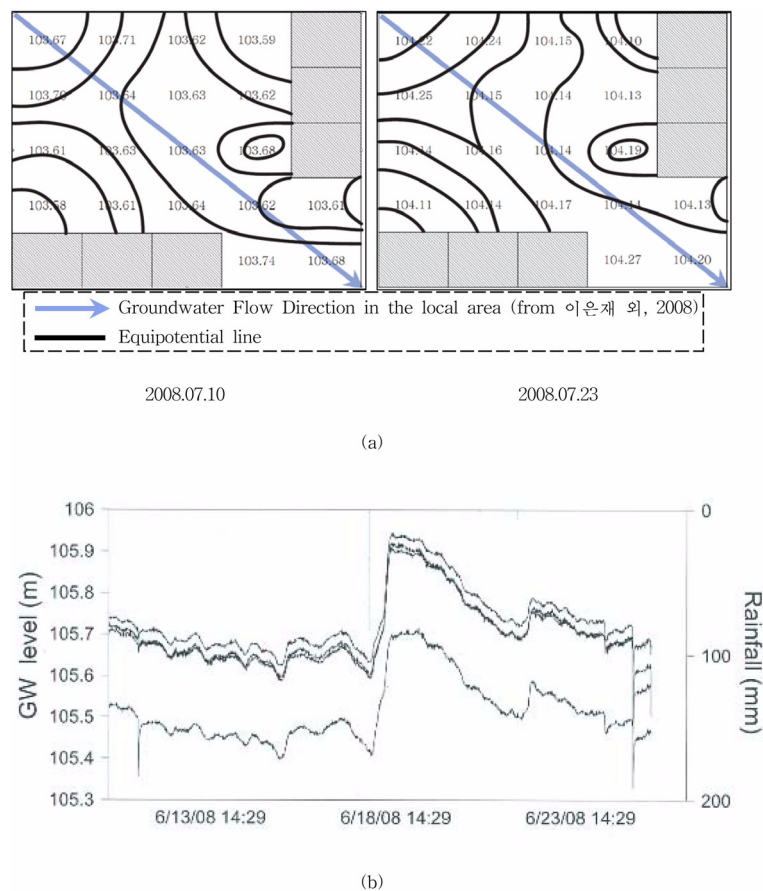


Fig. 2. Groundwater level and monitoring data

- a) Groundwater level data and equipotential line on July 10 and July 23, 2008
b) Groundwater level fluctuation of monitoring wells #2, #7, #16, #19

4. 연구 결과 및 토의

4.1. 지하수위와 수질

4.1.1. Pilot 규모에서의 수위 분포

Pilot 규모에서 2008년 7월의 강우 전(10일)과 강우 후(23일)에 각각 나타난 지하수위 자료를 통해 스피라인 방법에 의해 등수위선도를 작성해 보면, Fig. 2(a)와 같이 나타나 지하수 유동 방향이 서 → 동(또는 북동)으로 형성되어 하천으로 유출되는 것으로 나타난다. 그리고 #8 관정에서 상대적으로 수위가 높게 형성되어 있어서 #8 관정 주변으로 돌아나가는 형태를 보이고 있다. Pilot 규모에서 나타난 지하수 유동 특성은 앞서 이은재 외(2008)의 연구에서 밝혀진 광역적 흐름 방향인 북서 → 남동 방향(Fig. 1(a))과는 차이가 있음을 보인다. 그리고 자동 수위측정기를 통해 수집된 2008년 6월 13일부터 23일까지의 지하수위 변동 자료와 수집 기간 중의 강우를 그래프로 도시해본 결과, Fig. 2(b)와 같이 수위를 측정한 네 개 관정에서의 수위 변동 경향이 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 두 번의 강우 사건에 대해서 모두 12 시간 내외로 지하수위가 상승한 것을 볼 때, 이 연구 부지의 천부 대수층은 자유면 대수층임을 지시해 준다.

4.1.2. 현장 부지의 지하수질

현장 시험 부지의 각 관정에서 2008년 6월에 채수 시 측정된 수리특성과 지하수 시료분석을 통해 측정된 9개의 이온들(Na, K, Ca, Mg, Si, Fe, Mn, Cl, NO₃, HCO₃, SO₄, Br)에 대한 농도 값은 Table 2와 같다. 그리고 지하수 성분의 공간적 변화를 알기 위해 위의 9개 이온들의 농도 값을 stiff diagram으로 도시한 결과는 Fig. 3과 같다.

Pilot 규모 부지의 지하수 시료를 분석한 결과 전체적인 지하수 유형은 Ca-HCO₃ 유형이다. 그런데 특별히 Fig. 3에 박스로 표시된 관정(#10, #15, #17, #18, #19)에서는 지하수 수질유형이 비록 Ca-HCO₃ 일지라도, 주변관정보다 상대적으로 이온함량이 높아서 다른 관정들과 뚜렷이 구분되는데, 이것을 순간충격시험 결과와 비교해 보았을 때 수위 회복이 상대적으로 느린 구간과 서로 일치한다. 지하수 수질은 지하 매질의 공극을 채우고 있는 지하수와 매질의 반응 특성에 따라 결정된다. 따라서 지하수와 반응시간이 길면, 지하수와 매질이 충분히 반응해 지하수에 많은 용존 이온들이 존재 할 수 있게 된다(Zektser and Everett, 2006). 그리고 #9 관정에서는 Ca-Cl 유형이 뚜렷하여 나머지 관정들과 구분되었는데, 이는 염소이온을 포함하는 외부오염물질의 영향을 받은 것으로 생각된다. 마찬가지로 #2, #11 관정에서도 Ca-Cl 유형이 나타났지만,

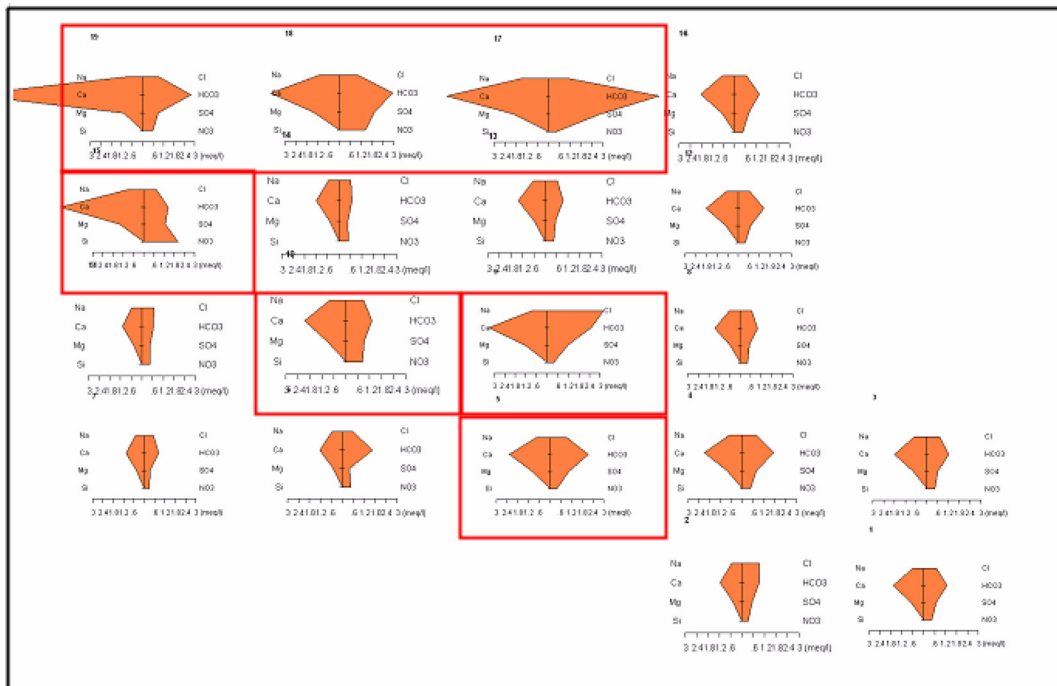


Fig. 3. Stiff diagram showing groundwater quality in the study area.

Table 1. Information on tracer tests (injection well : 1st-#14/ 2nd-#11)

Tracer	KBr	50	g	Tracer	KBr	50	g
	Volume	40	L		Volume	40	L
	Br conc	847	mg/L		Br conc	847	mg/L
	EC	1600	uS/cm		EC	1754	uS/cm
		Time	GW level Fluctuation (m)			Time	GW level Fluctuation (m)
Initial				Initial	7/10	9:56	1.1
Starting	6/25	10:40	0.95	Starting		11:22	1.09
		10:41	0.90			11:23	1.08
		10:42	0.90			11:24	1.07
		10:43	0.90			11:25	1.06
		10:45	0.89			11:26	1.05
		10:50	0.88			11:27	1.05
		11:00	0.87			11:32	1.05
		11:10	0.86			11:37	1.04
		11:30	0.86			11:42	1.03
		12:00	0.85			11:52	1.04
						12:12	1.04
Ending	6/25			Ending	7/10	12:42	1.04
						12:52	1.04
						12:56	1.05
		12:10	0.88			13:00	1.06

Table 2. Concentrations of chemical compounds in groundwater samples in June, 2008

No.	Temp (°C)	pH	ORP (mV)	EC (μS/ cm)	DO (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Si (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Cl (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	Br (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	Charge balance (%)
1	11.59	6.23	234	379	0.00	14.24	4.78	33.82	8.29	6.20	BDL	0.84	25.45	32.42	34.45	<0.1	78.71	-0.3
2	14.31	6.16	248	301	0.00	12.55	4.58	23.04	5.84	6.27	0.98	0.77	32.28	25.49	26.39	<0.1	54.92	7.2
3	11.52	6.22	245	369	2.15	16.05	6.63	36.44	9.34	6.08	BDL	0.70	24.35	29.48	33.66	<0.1	74.44	-8.2
4	11.42	6.68	136	761	0.00	16.55	5.92	42.42	10.32	6.35	1.01	1.04	27.87	37.73	34.59	<0.1	107.39	-1.3
5	11.44	6.42	148	354	0.85	17.50	5.17	45.31	11.67	6.13	BDL	1.94	32.95	49.19	29.89	<0.1	130.58	3.4
6	11.66	6.18	264	300	0.00	12.74	5.59	24.83	5.95	6.12	0.13	0.31	20.65	19.76	36.67	<0.1	101.29	12.4
7	11.87	6.12	287	239	0.00	11.88	4.57	21.00	5.23	6.11	0.77	0.55	19.64	16.15	22.90	<0.1	51.26	-2.6
8	11.53	6.22	284	307	0.00	14.08	6.63	28.99	7.31	5.86	0.18	0.46	23.18	25.13	32.42	<0.1	59.80	-5.1
9	11.62	6.21	283	541	0.29	19.81	4.20	66.45	14.97	5.08	0.18	2.66	113.74	56.98	28.74	<0.1	151.93	12.7
10	11.73	6.15	263	402	0.00	18.42	5.04	41.20	11.64	4.99	0.98	1.30	32.15	44.32	64.83	<0.1	79.32	-0.4
11	11.89	6.02	293	245	0.00	13.06	6.76	21.48	5.66	5.88	BDL	0.42	24.18	22.03	36.76	<0.1	40.27	-0.5
12	11.77	6.25	294	337	0.00	15.05	6.43	36.31	8.31	6.13	0.43	0.69	23.14	32.36	31.49	<0.1	89.09	-2.3
13	11.87	6.64	207	434	0.00	13.97	6.46	28.52	7.01	6.04	0.48	0.37	23.06	26.10	36.31	<0.1	59.19	-2.9
14	11.92	6.35	194	272	0.00	12.87	6.77	24.21	6.11	5.89	BDL	0.32	21.53	22.74	37.16	<0.1	40.27	-5.1
15	11.92	5.87	357	413	0.00	21.02	4.57	97.56	17.14	5.66	BDL	0.96	27.01	60.17	158.06	<0.1	87.87	-14.5
16	11.73	6.30	354	393	0.00	14.99	6.23	36.89	8.22	5.72	BDL	0.43	23.07	38.17	36.62	<0.1	81.76	-1.4
17	11.81	6.62	277	924	0.00	33.69	4.39	112.59	23.15	5.41	BDL	2.86	39.22	136.46	32.82	<0.1	373.43	6.5
18	12.10	6.62	212	765	0.00	24.79	4.23	77.00	17.89	5.24	BDL	0.90	36.27	94.97	112.53	<0.1	181.83	6.4
19	12.34	6.48	214	625	0.00	19.27	2.88	200.11	12.99	5.44	1.95	3.15	33.28	43.06	46.72	<0.1	169.63	-39.7

*BDL denotes below detection level

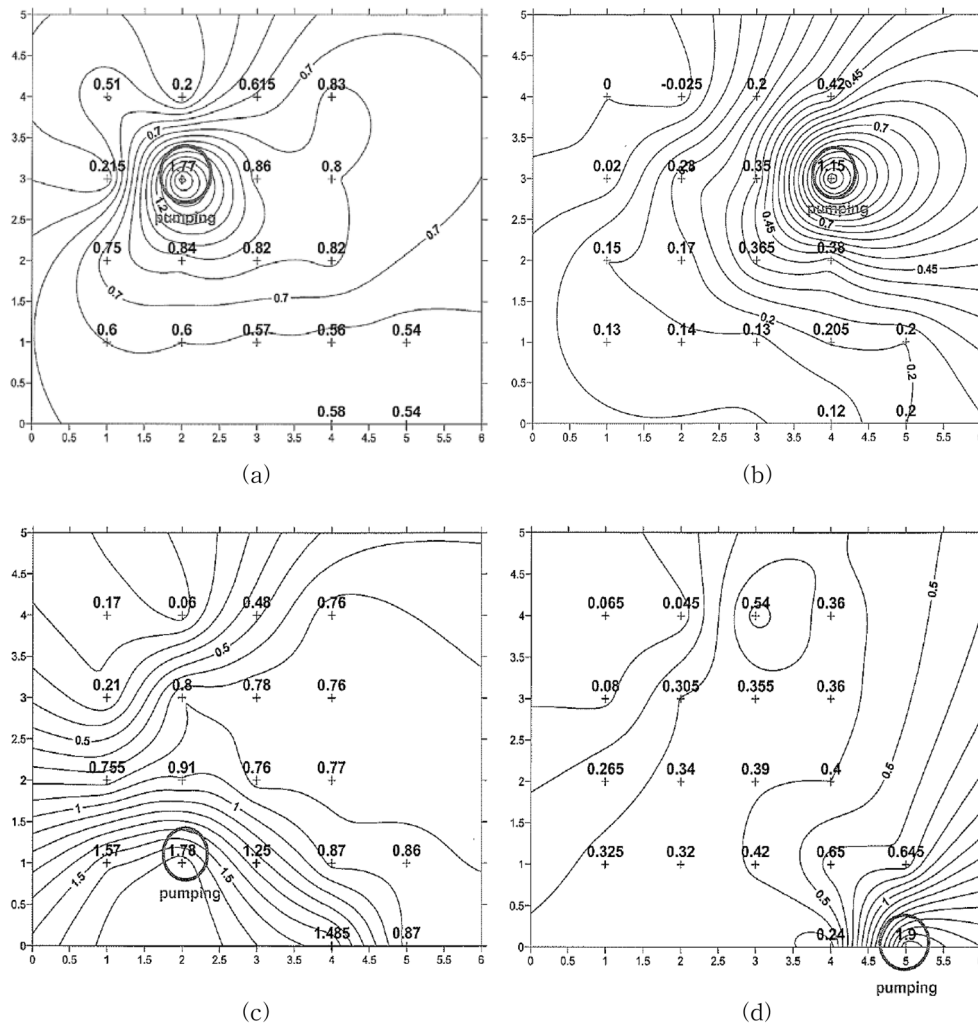


Fig. 4. Cone of depressions resulted from pumping tests at (a) #14 (b) #12 (c) #6 (d) #1.

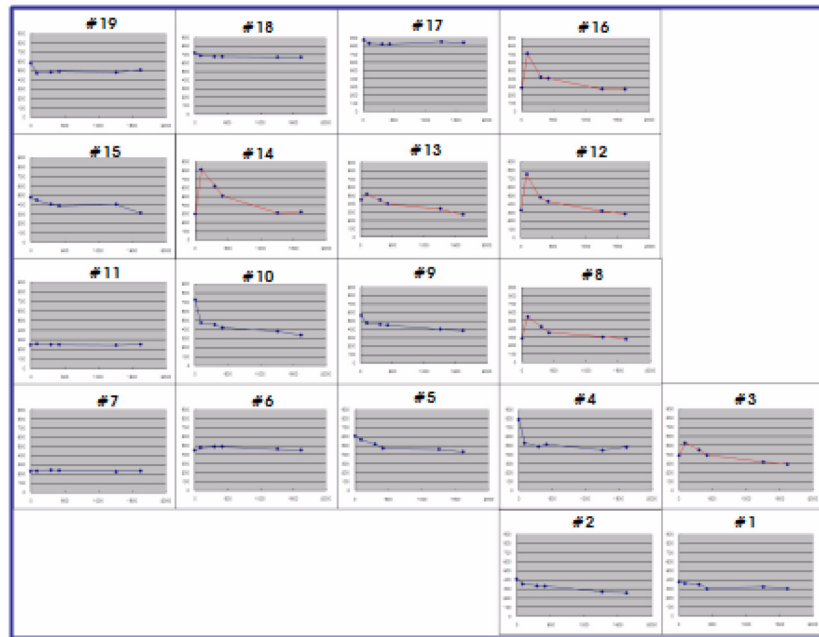
이는 저농도 시료에서 용존이온의 상대적인 함량차이로 인해 생긴 것으로써 큰 의미는 없는 것으로 생각된다. #19 관정에서 측정된 Ca 농도 값이 과측정 되어 전하균형이 39%로 나타나 신뢰성이 떨어지지만 나머지 관정에서의 전하균형오차는 신뢰 구간에 포함되는 것으로 분석되었다(Table 2).

4.2. 대수층의 이방성과 수리전도도

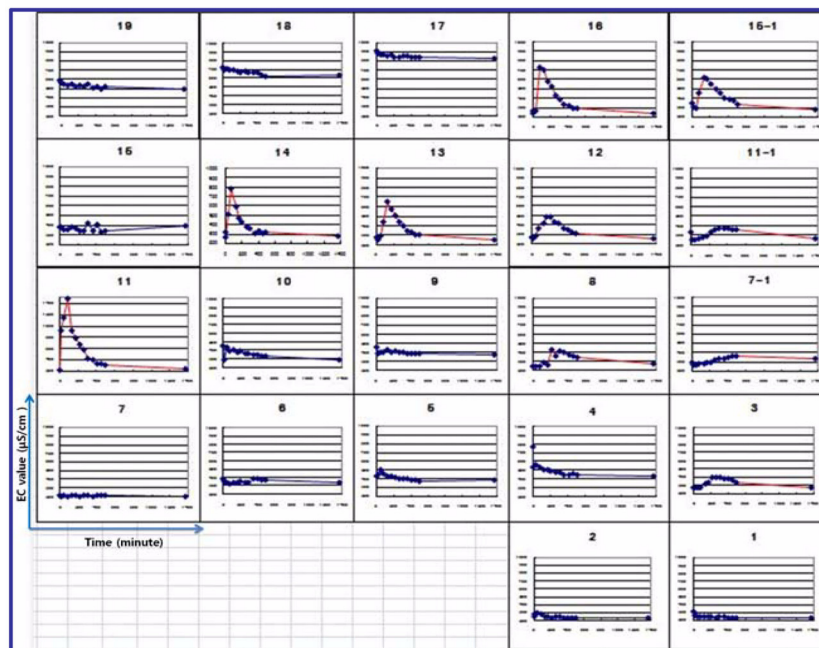
2008년 6월 3일~4일 이틀 간 4개의 관측정에서 양수시험을 수행한 후, 각 관측공에서 나타나는 최종 수위강하를 Surfer 8(Golden Software, U.S.A) 프로그램을 이용하여 도시해 본 결과는 Fig. 4와 같다. 먼저 Fig. 4(a)는 #14 관측공에서 양수한 결과이며, 형성된 수위하강추를 보면, 수위 등고선이 동쪽, 또는 북동쪽(오른쪽 상부)으로 뚜

렷하게 형성되어진 것을 확인할 수 있다. 이것은 일반적인 지하수 유동 방향에 따라 나타날 수 있는 수위하강추 형태로 미루어 볼 때, #14 관측정으로부터 동쪽 방향으로 대수층의 투수성이 다른 방향에 비하여 높게 나타남을 지시하며, 따라서 이 대수층에서의 수평적 이방성이 존재함을 알 수 있다. 전체적인 지하수위의 분포에서 해석된 지하수 유동방향은 북서 → 남동 방향이 우세한 것으로 보이지만, 실질적으로 대수층의 투수성은 #14 관측정으로부터 동북동 방향으로 높은 투수성이 나타나고 있어, 오염원의 실질적인 이동방향은 이 방향이 우세할 것으로 해석된다. 이는 지하매질의 이방성에 의해 선택적 유동경로가 형성되어진 것으로 해석할 수 있다.

6월 4일에 진행된 3번의 양수시험 결과, 앞서 진행되었던 #14 관측정에서 양수를 수행할 때와 마찬가지로 #1,



(a)



(b)

Fig. 5. Break-Through curves of electrical conductivity for the tracer tests at (a) #14 and (b) #11

#6, #12 관측정에서의 양수 때에도 북서쪽의 #15, #18, #19 관측정에서의 수위강하는 일어나지 않았다. 이와 같은 수위강하의 특성으로부터 위의 세 개의 관측정의 지하수는 다른 관측정의 지하수와 연결성이 거의 없다고 판단

하였다. 앞서 수행되었던 지하수질 분석 결과(Fig. 3)에서 보이듯이, #15, 17, 18, 19 관측정에서 각각의 주요 이온의 농도가 상대적으로 훨씬 크게 나타난다. 지하수의 수질은 지하매질과의 반응을 통해 결정되기 때문에 대수층

암석의 종류, 반응시간과 용융역학, 지하수의 흐름 등에 따라 수질유형이 결정된다(Fetter, 2001; Zektser and Everett, 2006). 즉, 이 관정들의 스크린 구간의 투수성이 매우 낮은 이유로 인해 지하수의 유동이 상대적으로 낮아지고, 결과적으로 지하수와 지질매체 간의 물-암석 반응 시간을 길게 만들어, 다른 관정들보다 상대적으로 많은 용존이온 함량을 보이게 된 것으로 유추할 수 있다. 결론적으로, 이들 4개의 관측정들은 스크린 구간의 투수성이 낮은 점토가 barrier 역할을 해서 결국 다른 관측정들과의 연결성이 차단된 것으로 판단할 수 있다. 이후 수행된 순간충격시험에서도 이들 네 개의 관정에서 수위 회복이 느리게 나타났다. 순간충격시험 결과, 각 관측공에서 측정된 수리전도도는 최소 2.6×10^{-4} ~ 최대 9.5×10^{-3} cm/s 범위로 나타났으며(Table 3), 수리전도도가 낮은 구간(#15, #17, #18, #19 : low-K zone)의 기하평균($K_{average}$)은 3.5×10^{-4} cm/s이며, 수리전도도가 높은 구간(high-K zone)의 기하평균($K_{average}$)은 4.2×10^{-3} cm/s이다.

4.3. 오염원의 거동 특성

1차 추적자 시험결과, Fig. 5(a)에 나타난 것과 같이 북동, 동, 남동 쪽(전체적으로는 서에서 동쪽 방향)으로 추적자가 이동해 간 것을 확인할 수 있었다. 이은재 외(2008)에 의해 광역적인 부지에 대해 수행된 연구결과를 통해 예측한 남동쪽이 아니라, 본 연구에서 작은 pilot 규모의 부지에 대해서는 동쪽 방향으로의 유동이 지배적인 것은, 양수시험에 의한 수위하강추의 형태에서 알 수 있듯이 동쪽 방향으로 매질의 투수성이 상대적으로 높게 나타나는 매질의 국지적 이방성에 의한 영향으로 판단된다. 2차 추적자 시험결과, Fig. 5(b)에 나타난 것처럼 #11에서 #14로의 추적자 유동을 제외하고 전체적인 오염원의 유동 방향은 앞서 수행한 1차 시험과 동일한 결과를 산출하였다. 1차 추적자 시험 이후에 추가로 설치한 관측정(#7-1, #11-1, #15-1)에도 추적자가 도달한 것을 통해 동쪽 방향으로의 유동성이 나타남을 명확히 확인할 수 있다.

2차 추적자 시험에서 획득한 자료인 모니터링 시간에 따른 관측공에서의 EC 값을 명암으로 환산하여 추적자 오염원의 생성과정을 Fig. 6(a)에 표현하였다. 이 과정에서도 주입공으로부터 오염원이 생성되어 먼저 북동방향으로 진행되는 것이 확인되며, 약 210분이 경과한 후에 비로소 광역적인 지하수 유동방향인 남동향의 흐름이 형성됨을 알 수 있다. 보다 구체적으로, #11 주입공에서부터 #14, #13, #16 (#15-1) 관측공을 지나는 흐름(서 → 북동)이 가장 우세하고, #11 → #14 → #13을 거쳐 #11-1 관측

Table 3. Hydraulic conductivity values (K) calculated with the Bouwer and Rice method for monitoring wells

MW No.	Hydraulic conductivity (cm/sec)
#1	5.1×10^{-3}
#2	3.8×10^{-3}
#3	9.5×10^{-3}
#4	6.3×10^{-3}
#5	1.2×10^{-3}
#6	2.3×10^{-3}
#7	6.2×10^{-3}
#7-1	2.6×10^{-3}
#8	8.8×10^{-3}
#9	2.1×10^{-3}
#10	1.5×10^{-3}
#11	5.8×10^{-3}
#11-1	2.7×10^{-3}
#12	7.8×10^{-3}
#13	7.1×10^{-3}
#14	7.4×10^{-3}
#15	6.1×10^{-4}
#15-1	2.6×10^{-3}
#16	7.1×10^{-3}
#17	2.8×10^{-4}
#18	2.6×10^{-4}
#19	3.4×10^{-4}

공으로의 흐름이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 오염원의 생성과 이동을 오염원이 EC 400 μ S/cm에 도달하는데 걸리는 시간-등고선으로 보면 Fig. 6(b)와 같다.

추적자 시험을 통해 현장에서 획득한 수리 인자들을 이용하여 산출한 오염원의 종분산 계수(D_L)는 5.94×10^{-7} m²/s이다. 여기서, 주입공인 #11 관측정과 오염원의 주된 유동 경로의 하나인 #16 관측정간 거리 $\sqrt{13}$ m, 수두차 0.02 m, 유효공극률 0.15, 수리전도도(K) 7.1×10^{-5} m/s이므로, 평균선형유속은 2.94×10^{-6} m/s이다. 또한 규모종속 효과를 갖는 인자인 종분산 지수(α_L)는 $0.83(\log(L))^{2.414} = 0.202$ m이다. 추적자 물질인 Br의 확산계수(D^*) 1.74×10^{-4} m/d $\times 0.1$ 를 고려하면, 종분산 계수 ($DL = \alpha_L v_x + D^*$)는 5.94×10^{-7} m²/s이다.

추적자 시험 결과에서 예측되는 지하수 유동 경로와 순간충격시험을 통해 구한 각 관측정들의 수리전도도를 비교한 결과, 대체로 수리전도도 값이 높은 곳과 지하수 유동 방향이 서로 일치하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 7). 즉, 매체의 수리전도도 차이가 지하수와 오염원의 이동 방향을 좌우하는 요인으로 작용하는 것을 볼 수 있다.

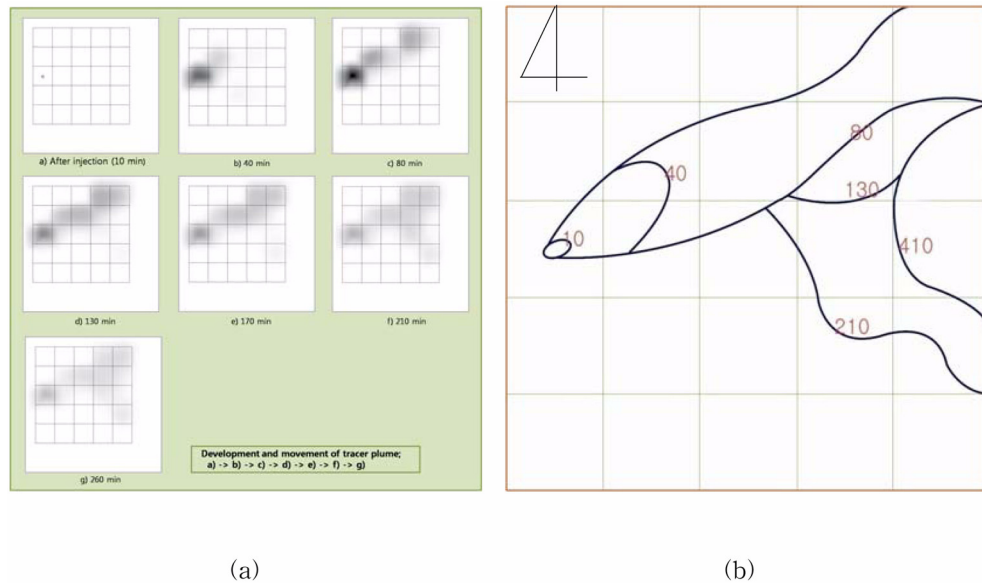


Fig. 6. (a) Development and movement of tracer plume (b) Time-contour lines at electrical conductivity at 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (unit : minutes).

#19 3.4×10^{-4}	#18 2.6×10^{-4}	#17 2.8×10^{-4}	#16 7.1×10^{-3}	#15-1 2.6×10^{-3}
#15 6.1×10^{-4}	#14 7.4×10^{-3}	#13 7.1×10^{-3}	#12 7.8×10^{-3}	#11-1 2.7×10^{-3}
#11 5.8×10^{-3}	#10 1.5×10^{-3}	#9 2.1×10^{-3}	#8 8.8×10^{-3}	#7-1 2.6×10^{-3}
#7 6.2×10^{-3}	#6 2.3×10^{-3}	#5 1.2×10^{-3}	#4 6.3×10^{-3}	#3 9.5×10^{-3}
			#2 3.8×10^{-3}	#1 5.1×10^{-3}

Fig. 7. Relationship between hydraulic conductivity and flow direction of tracer plume (unit of K: cm/sec).

5. 결 론

지하수 환경 정화·복원의 실증에서 자연환경의 다양한 변수와 규모종속성 때문에 현장 실증은 대단히 어려우며 효율적인 정화를 위해서는 지하수의 유동 경로가 되는

지층의 수리적 특성에 대한 정확한 이해가 필수적이다.

이 연구에서는 이미 광역적인 지하수 유동 방향을 알고 있는 지역에 대하여 지질매체의 특성으로 인해 국지적인 규모(4 m × 4 m)에서 나타날 수 있는 매질의 이방성과 이로 인한 오염원의 거동특성을 규명하고자 하였다. 또한 지

하수 오염의 정화 처리에 앞서 pilot 규모의 부지에서 나타날 수 있는 지하수 유동 특성에 대해 보다 정밀한 연구를 통한 정확한 수리인자 산출의 중요성을 확증하고자 하였다.

1. 연구 부지의 광역적인 지하수위 분포에 따라 해석한 지하수 유동방향은 북서 → 남동 방향이 우세한 것으로 보였으나, 양수 시험에 의한 지하수위 하강분포와 순간충격 시험에 의해 얻은 수리전도도의 분포는 지하수의 흐름이 서 → 동 내지 서 → 북동 방향이 우세한 것을 보여주며, 이러한 방향은 추적자에 의한 오염원의 이동으로 확인된다. 이러한 지하수와 오염원 이동 방향성의 차이는 지하매질이 갖는 자연적인 이방성과 이질성에 의해 지하수의 유동경로가 선택되기 때문인 것으로 해석된다.

2. 순간충격시험을 통해 획득한 각 관측공에서 측정된 수리전도도는 최소 2.6×10^{-4} ~ 최대 9.5×10^{-3} cm/s 값을 가지는 것으로 나타났으며, 이들의 기하평균은(K_{mean})은 2.7×10^{-3} cm/s이다. 양수 시험에서 연결성이 차단된 것으로 보이는 #15, #17, #18, #19 관정은 순간충격시험에서도 물 빠짐이 느리고, 수리전도도 값이 1 order 정도 상대적으로 낮게 나타났다.

3. 추적자 시험 결과, 상대적으로 수리전도도 값이 큰 구간들에서 오염원의 유동성이 우세하게 나타난다. 이는 국지적인 규모에서 나타나는 수리전도도 값의 차이가 지하수 오염원의 이동방향에 상당한 영향을 줄 수 있음을 지시한다.

이 연구의 결과, 국지적인 규모에서도 지질매체의 특성에 의한 수리전도도의 이질성과 이방성으로 인해 지하수의 유동 방향이 달라질 수 있음을 확인할 수 있었고, 수리전도도가 높은 구간으로 선택적인 유동경로가 형성되는 것을 확인하였다. 일반적으로 지하수 오염 복원사업과 관련하여 지하수 수리특성 조사를 수행할 때, 지하수 관측공의 설치 및 시험에 관련된 제반 비용 문제로 인해 적은 수의 관측공을 통해 획득한 대수층의 수리전도도를 조사 부지의 대표성을 갖는 값으로 가정한다. 결국에는 이러한 조사결과를 근거로 수리전도도의 대표성을 가정하고, 이에 의존하여 오염정화 시설을 설치하고 운용하게 된다. 그러나 이 연구의 결과에서 보이듯이, 비록 작은 pilot 규모의 부지에서도 지질매체가 가지는 수리전도도의 이질성과 이방성은 지하수 오염원의 유동 방향에 심각한 영향을 줄 수 있다. 따라서 지하수 오염 정화시설을 설치하는 오염 지하수 복원사업의 경우에는, 이러한 부지 규모에서 발생하는 대수층 매질의 이방성과 이질성에 대한 정밀조사가 정화시설의 성능과 효율성 및 복원사업 전체의 경제성

을 좌우하는 요소로 작용할 수 있다.

사 사

본 연구는 농림수산식품부의 농림기술개발과제(과제번호 106108-3) 및 두뇌한국21(BK21)의 연구비 지원으로 이루어졌다.

참 고 문 헌

- Fetter, C.W., 2001, Applied Hydrogeology. 4th ed., Prentice Hall, p. 598.
- Igor S. Zektser. and Lorne G. Everett., 2006, Ground Water Resources of the World and Their Use, NGWA Press.
- Lee, B.S., Kim, J.H., Lee, K.C., Kim, Y.B., Franklin W. Schwartz, Lee, E.S., Woo, N.C., and Lee, M.K., 2009, Efficacy of Controlled-release KMnO_4 (CRP) for Controlling Dissolved TCE Plume in Groundwater : A Large Flow-tank Study, *Chemosphere*, **74**, 745-750.
- Lee, E.S., Woo, N.C., Lee, B.S., Lee, K.C., Woo, M.H., Kim, J.H., Kim, H.K., Franklin W. Schwartz, 2008, Characterization of Controlled-release KMnO_4 (CRP) Barrier System for Groundwater Remediation: A pilot-scale flow-tank study. *Chemosphere*, **71**, 902-910.
- Oh, I.S. and Yoon, Y.Y., 1972, Explanation of geological map : Suwon SHEET-6625IV. Korea Geological Survey.
- 김남호, 김인수, 최애정, 이민희, 2006, 과산화수소를 이용한 현장원위 화학적 산화법과 공기분사법(Air-sparging)을 연계한 디젤 오염 토양/지하수 동시 정화 실내 실험 연구, *지하수토양환경*, **11**(6), 8-17.
- 농림수산식품부, 2009, 농촌지하수의 질산성질소 오염에 대한 현장 정화처리 기술 개발, p. 211-214.
- 소효은, 최경민, 이승재, 김현기, 2002, 계면활성제 첨가에 따른 지하수 폭기법의 폭기효율 변화 연구, *자원환경지질*, **35**(5), 421-428.
- 손주형, 이상화, 강현민, 이민희, 정상용, 2002, 용존공기가압부상장치가 포함된 화학적 처리공정에 의한 오염 지하수 정화, *자원환경지질*, **35**(6), 581-588.
- 송나인, 김인수, 이민희, 2005, 무기응집제를 이용한 중금속 오염 지하수 정화연구, *지질학회지*, **41**(2), 253-267.
- 양민준, 이민희, 2008, 해바라기, 갯, 강낭콩을 이용한 수생법(Rhizofiltration)의 우리나라 오염된 지하수 정화 효율 규명, *지하수토양환경*, **13**(4), 30-39.
- 이민희, 정상용, 최상일, 강동환, 김민철, 2002, 계면활성제 원위치 토양 세정법을 이용한 유류 오염 지역 토양 · 지하수 정화 실험, *지하수토양환경*, **7**(4), 77-86.

이은재, 우남철, 이병선, 김양빈, 2008, 경기도 지역 농경지의 천부 지하수 내 질산염 오염특성과 변화, *지원환경지질*, **41**(4), 393-403.

장순용, 이시진, 조수형, 윤준기, 2006, 디젤오염 토양 및 지하수

복원을 위한 공기주입정화법 실험실 연구 : 공기주입량과 공기주입방식의 영향, *지하수토양환경*, **11**(4), 10-17.

환경부, 2009, 2008년 지하수 수질측정망 운영결과, p. 1-6.