

서울시 오염우려시설 관정의 토지이용 유형에 따른 지하수 수질특성 연구

음용용수팀

이제승 · 엄정훈 · 최유리 · 홍주희 · 최예덕 · 박진아
신승희 · 김주현 · 이은경 · 권승미 · 박찬구 · 어수미

Properties of Groundwater Quality According to the Types of Land Use in Seoul City

Drinking water Team

**Je-seung Lee, Jung-hun Eom, Yu-ri Choi, Ju-hee Hong, Ye-duk Choi,
Jin-a Park, Seung-hee Shin, Ju-hyun Kim, Eun-geung Lee,
Seung-mi Kwon, Chan-koo Park and Soo-mi Eo**

Abstract

This study was conducted to investigate the properties of groundwater quality, with respect to the different types of land use in Seoul city. We grouped the type of land use into 6 classifications: urban general(mixed with residential area, commercial area etc.), gas station, car wash, market place, construction site, and factory site. The results suggested that, among the 18 groundwater parameters, trichloroethylene, tetrachloroethylene and arsenic were required special attention in groundwater quality management because these were detected relatively high frequency. Trichloroethylene was the most frequently detected parameter in the groundwater, from every type of land use, followed by tetrachloroethylene, which was found most commonly at factory sites and waste storage yards. These two chlorinated organic solvents were mostly detected at a well depth below 100m, and also showed a high concentration at that depth. Arsenic, out of the four heavy metals analyzed, was the most common element that existed in the groundwater in the various types of land use in this study.

Key words : Groundwater, Types of land use, Trichloroethylene, Tetrachloroethylene, Arsenic

서론

우리나라는 현재 용수공급을 주로 지표수에 의존하고 있고 지하수는 비상시의 대체용수 및 물 부족의 대안으로 인식하고 있으나, 지표수의 오염, 댐에 의한 용수공급의 한계 및 물소비량의 증가 등으로 인하여 지하수 이용량이 점차 증가하고 있는 추세이다. 2011년 말 현재 지하수 개발·이용시설은 145만개에 달한다. 지하수 총 이용량은 2011년 기준 우리나라의 연간 지하수 개발 가능량 109억톤/년에 비하여 36%에 머물러, 장래 물 부족에 대비한 대체수원으로서 지하수의 가치가 매우 높음을 알 수 있다(1).

그러나 지하수의 경우 오염을 확인하기가 어렵고 유동성이 있어 오염원을 파악하기 쉽지 않다. 또한 일단 지하수 오염이 발견된 경우 정화에 상당한 시간과 비용이 소요되므로 본래의 상태로 회복하는 것이 쉽지 않다(2). 따라서 지하수 오염을 사전에 예방하는 것이 무엇보다 중요하며, 오염이 우려되는 시설에 대해서는 정기적인 지하수 수질 모니터링을 통해 오염여부를 신속히 파악하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

서울시의 지하수 수질감시는 주로 지하수 수질 측정망, 민방위비상급수시설 관정, 오염우려시설로 선정된 관정에 대한 정기적인 수질검사를 통해 이루어진다. 이 중에서 민방위 비상급수시설은 천재지변이나 가뭄 등 물 부족 상황발생에 대비해서 시민들에게 용수공급 목적으로 관리되는 지하수 시설이다. 수질측정망은 환경부에서 운영하는 국가측정망을 보조하는 지역측정망으로 운영되고 있고, 오염우려지역에 대해서는 관할 지방환경청에서 관리하고, 일반지역에 대해서는 지자체에서 운영하고 있다(3). 서울시의 경우 25개 자치구별로 각 4개소의 지하수 측정망이 운영되고 있다. 이들 측정망은 서울시의 특성상 산업단지, 축산단지, 가축매몰지 등의 오염우려시설이 없어 주로 도시주거지역 또는 상업지역의 지하수 관정들이 포함되어 있다. 한편 서울시는 자체적으로 오염 우려지역의 지하수 관정 약 900여 개소를 선정하였고, 그 중 약 300여 개소를 매년 중점관리 대상관정으로 하여 연 2회 수질감시를 하고 있다. 이들 중점

관리 지하수 관정은 토지이용 형태별로 주유소, 세차장, 공장, 공사장, 재래시장, 폐기물야적장 등의 시설이 해당한다. 이러한 시설들은 도시지역에서 발생할 수 있는 오염우려시설의 특징을 반영하여 선정한 것이라 할 수 있다.

본 연구에서는 2013년도에 서울시보건환경연구원에서 분석한 수질측정망 시료와 중점관리관정 지하수 시료를 이용하여 서울시의 토지이용 형태에 따른 지하수 오염특성을 고찰하고자 하였다. 수질측정망 지하수의 경우는 도시 일반지역으로 분류하였고, 중점관리관정 지하수는 시설이 위치한 토지이용 형태별로 구분하였다. 이러한 고찰은 도시지역 지하수 수질특성을 이해하고, 주요 지하수 오염물질 파악을 통해 우선 관리대상 항목 선정 등 지하수 관리에 유용한 자료가 될 수 있을 것이다.

연구방법

1. 토지이용 유형구분

조사대상 지하수 시설이 위치한 토지이용 유형은 도시 일반지역(서울시 지하수 수질측정망), 주유소(지하저장탱크), 세차장, 재래시장, 공사장, 폐기물야적장, 공장 등으로 구분하였다(그림 1). 도시 일반지역은 서울시 지하수 측정망(monitoring

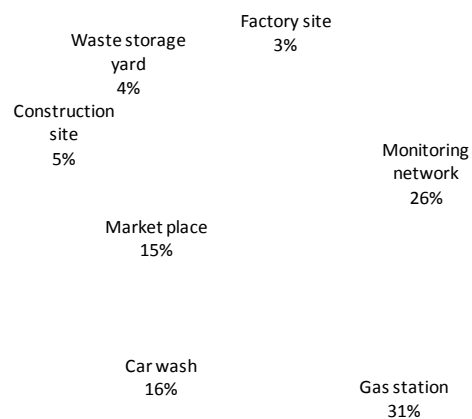


Fig. 1. Types of land use in this study.

network) 지점으로 주로 주거지 및 상업시설 등의 다양한 업종 및 시설들로서 지역적으로 자치구별로 균등하게 분포되어 있어 도시 지역의 평균적인 지하수질을 나타낼 것으로 판단된다. 나머지 지점들은 서울시에서 지정하여 관리하는 중점관리 지하수 관정에 해당한다. 그 중 주유소는 도시 전 지역에 산재하여 분포하고 지하 유류저장 탱크가 매설되어 있으며, 유류오염의 가능성으로 인해 중점관리 관정 중 가장 많은 지점을 차지한다. 그 외 세차장, 재래시장, 공사장, 폐기물야적장 그리고 공장지역 등 도시 지역의 특징을 반영한 지점들로 이루어져 있다. 재래시장은 다른 지점들에 비해 공간적으로 넓은 특징이 있고, 다양한 영업활동이 이루어지고 있다. 폐기물 야적장은 도시에서 발생된 폐기물 중 재활용 가능한 물질을 선별하여 회수하는 소규모 자원회수시설에 해당하며, 폐기물의 종류가 다양하고 작업장 내 다량의 폐기물을 야적보관하고 있다. 토지이용 유형별 분포는 주유소가 31%로 가장 많았고, 도시 일반지역이 26%, 세차장 16%, 재래시장 15%, 공사장 5%, 폐기물 야적장 4%, 공장 3%의 순으로 구성되어 있다.

2. 대상시료 및 조사방법

조사대상 시료는 2013년 상·하반기별로 서울시 25개 구청 지하수 담당부서에서 채취하여 당일 보건환경연구원으로 의뢰되었으며, 휘발성 유기화합물 분석을 위한 40 mL 유리 바이알과 그 외 항목 분석을 위해 폴리에틸렌 무균채수용기로 구분하여 의뢰되었다.

도시 일반지역을 나타내는 측정망 지하수와 오염우려시설 중 중점관리관정의 지하수 등 총 708개 지하수 시료를 대상으로 하였다. 시료는 원칙적으로 같은 지점이 상·하반기로 의뢰되는 관계로 지점수는 대략 시료수의 절반 정도라고 할 수 있으나, 상·하반기 별로 다른 지점이 다수 있었고, 같은 지점 시료의 농도차 등을 고려하여 채취지점이 아닌 의뢰된 시료별로 통계처리하였다.

의뢰된 시료는 먹는물, 생활용수, 공업용수 그리고 농어업용수 등 각각의 용도별로 별도의 수질기준에 의거 분석을 진행하였으나, 공통되는 항목을 주로 고찰하기 위해 총대장균수를 제외한 생활용

수 수질기준으로 한정하여 고찰을 하였다. 따라서 본 연구에서 수질기준초과 여부에 대한 판단은 지하수 관정의 허가된 용도에 상관없이 생활용수 수질기준을 적용하였다(표 1). 또한 적용한 시험방법은 먹는물 용도의 지하수는 먹는물 수질공정시험기준으로 하였고, 그 외 용도의 지하수는 수질공정시험기준에 의거 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 주로 검출되는 오염물질과 농도수준

총대장균수를 제외한 생활용수 수질기준 항목으로 측정망 시료와 오염우려지역 중 중점관리 대상 관정 지하수 총 708개 시료를 분석하였다. 수소이온농도, 질산성질소, 염소이온은 일반 오염물질로, 나머지 항목들은 특정유해물질로 분류된다. 표 2는 일반오염물질의 농도를 나타내고 있다. 수소이온농도 지수의 경우 6.9 ± 0.5 로 거의 중성에 가까운 것으로 나타났다. 질산성질소 농도는 5.3 ± 5.1 mg/L 수준으로 생활용수 수질기준 20 mg/L에 비해 평균 25%이었고, 기준을 초과한 시료는 5건이었다. 염소이온 농도는 62.5 ± 61.1 mg/L, 기준초과 시료는 6건으로 나타났다.

그림 2는 특정유해물질의 검출율과 생활용수 기준초과 비율을 보여준다. 특정유해물질에서 주로 검출되는 물질은 트리클로로에틸렌(TCE), 테트라클로로에틸렌(PCE), 비소(As)로서 4.5% 이상 검출되었다. 톨루엔(Toluene)과 1,1,1-트리클로로에탄(1,1,1-TCA)은 2% 정도의 시료에서 검출이 되었고, 나머지 항목들의 검출율은 1% 미만으로 나타났다. 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌(이하 BTEX)은 대표적인 유류오염의 지표인데 지하수 관정이 위치하고 있는 토지의 이용유형 중 주유소가 가장 많은 부분인데도 불구하고 검출율이 상당히 낮게 나타났다. 이는 토양오염예방을 위해 2007년부터 환경부에서 추진한 클린주유소의 운영에 따라 유류누출 감지장치 설치와 이중벽탱크, 이중배관 그리고 흘림 및 넘침방지시설 등 누출방지시설의 확대에 따른 것으로 판단된다.

Table 1. Summary of water quality parameter in this study

Parameter		Standard & Method	Groundwater standard(mg/L)	Analytical method
General pollutants	pH*		5.8 ~ 8.5	pH meter
	NO ₃ -N		20	Ion chromatography
	Cl ⁻		250	
	Cd		0.01	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
	As		0.05	
	Pb		0.01	
	Cr ⁶⁺		0.001	
	hazardous pollutants	Hg		0.0005
Organic-P			0.005	Gas chromatography
Phenol			0.1	UV-Visible spectrometry
CN			0.05	
Trichloroethylene(TCE)			0.03	Gas chromatograph/ mass spectrometry
Tetrachloroethylene(PCE)			0.01	
1,1,1-Trichloroethane(1,1,1-TCA)			0.15	
Benzene			0.015	
Toluene			1	
Ethybenzene			0.45	
Xylene		0.75		

* no unit.

Table 2. Concentration of three general pollutants

Parameter	pH	NO ₃ -N (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)
Average(n=708)	6.9	5.3	62.5
S.D.	0.5	5.1	61.1

그러나 염소계 유기용제인 트리클로로에틸렌 및 테트라클로로에틸렌은 검출율이 각각 15.5% 및 6.2%로서 특히 높게 나타나 토양 및 지하수 관리에 관심을 가져야 할 물질인 것으로 나타났다. 중금속은 납, 6가 크롬, 비소, 수은을 분석하였는데



Fig. 2. Detection rate and standard exceeding rate of each water quality parameter.

Table 3. Concentration of hazardous pollutants in pollutant detected samples

Parameter	TCE (n=110)	PCE (n=44)	Benzene (n=5)	Toluene (n=16)	Ethylbenzene (n=6)	Xylene (n=10)
Average	0.034	0.010	0.004	0.015	0.004	0.011
S.D.	0.080	0.027	0.002	0.039	0.002	0.016
Parameter	1,1,1-TCA (n=15)	As (n=32)	Cd (n=2)	CN (n=1)	Phenol (n=5)	
Average	0.009	0.017	0.006	0.010	0.006	
S.D.	0.014	0.013	0.003	-	0.001	

비소를 제외하면 거의 검출되지 않았다. 납과 6가 크롬은 전체 시료에서 전혀 검출되지 않았고 카드뮴의 경우 검출된 시료가 2건에 불과하였다. 생활용수 수질기준을 적용한 기준 초과율은 트리클로로에틸렌과 테트라클로로에틸렌이 각각 2.8% 및 1.0%로 나타났고, 비소, 카드뮴, 시안, 페놀의 경우 기준초과 시료가 일부 있었으나 그 비율은 미미하였다. BTEX를 비롯한 나머지 항목의 기준 초과 시료는 전혀 없었다.

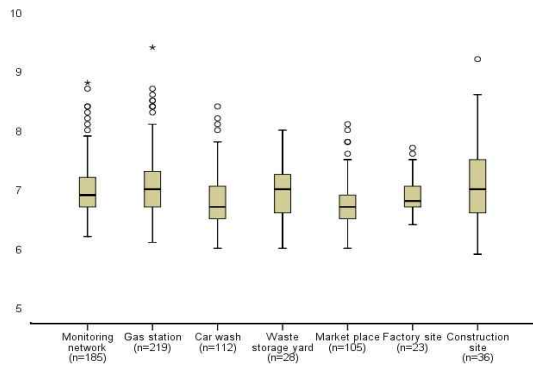
표 3은 각 물질이 검출된 시료의 특정유해물질의 농도수준을 나타내었다. 부적합 비율이 높았던 염소계 유기용제의 농도 수준이 높게 나타났으며, 검출된 시료들의 평균농도는 생활용수 기준 정도로 높았는데, 이것은 고농도로 검출된 시료가 다수 존재하는데 기인한다. 트리클로로에틸렌의 경우 수질기준이 0.03 mg/L 인데, 전체 검출시료 110건 중 13개 시료에서 0.1 mg/L 이상으로 검출되었다. 이들 염소계 유기용제는 주로 드라이클리닝 용제, 금속부품의 탈지제정제, 공업물질의 용제, 산업용 세척제 및 섬유공업 재료 등으로 용도가 다양하며(4), 2012년 환경부 측정망 운영결과에서도 수질기준을 초과하는 빈도가 높은 물질로서, 산업단지 및 도시주거지역에서 주로 초과되는 것으로 나타나고 있다(1). 염소계 유기용제이지만 1,1,1-트리클로로에탄의 평균농도는 수질기준의 6.0%에 불과하였다.

BTEX 중 톨루엔만 검출율이 2% 정도였는데, 평균농도는 수질기준 대비 1.5%로 낮게 나타났고, 이들 유류계 오염물질의 검출율, 초과율 및 농

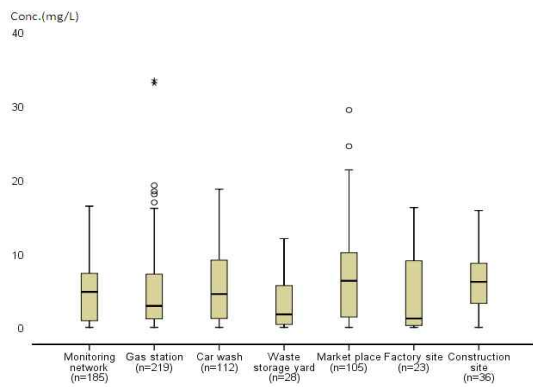
도수준으로 볼 때 유류로 인한 지하수 오염정황은 거의 없다고 볼 수 있다. 중금속 중 비소의 경우는 검출되는 비율도 높았고, 검출된 지점의 평균농도도 0.017 mg/L로 수질기준 0.01 mg/L를 상회하고 있으며, 표준편차도 타 항목에 비해 상대적으로 낮게 나타났다. 비소는 오염되지 않은 지하수에서도 0.01 mg/L 이하로 검출될 수 있고, 자연적인 부화(enrichment)에 의해 0.01~5.0 mg/L 정도로 나타날 수 있어(5) 인위적인 오염에 의한 것은 아닌 것으로 판단되지만, 서울지역이 국내 인구밀도가 가장 높고, 고도로 도시화와 산업화가 이루어진 관계로 인위적 오염원에 의한 것으로 보는 견해도 있다(6). 전체적으로 검출되는 물질과 검출율 및 농도수준을 감안하면 서울시 지하수 관리에서 관심을 가져야 할 물질은 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌 등 유기염소계 용제와 중금속 중 비소인 것으로 판단된다.

2. 토지이용 유형별 수질특성

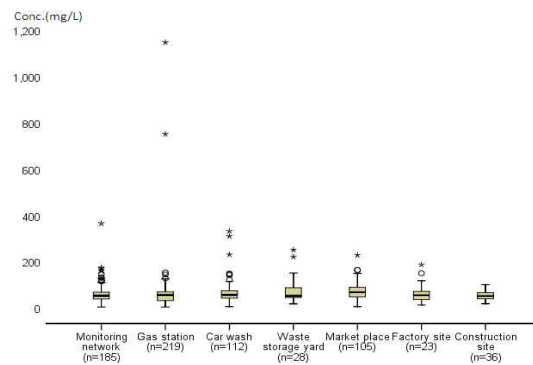
지하수 관정이 위치한 지점의 토지이용 유형별로 수질특성을 고찰해 보았다. 그림 3은 일반 오염물질의 농도분포를 나타내고 있다. 일반 오염물질의 경우는 각 토지유형의 지하수에서 넓은 농도 범위를 나타내고 있고, 특이한 농도를 나타내는 지역은 없었다. pH의 경우, 세차장과 재래시장 지하수의 중간값이 6.7로 다른 지역들에 비해 다소 약산성을 보이니, 전체 지역에서 6.7~7.0의 범위로 중성에 가깝게 나타나고 있다. 이러한 범위는 국내 오염우려지역 전체에서 나타나는 지하수의



(a) pH



(b) Nitrate-N



(c) Chloride ion

Fig. 3. Box plots of general pollutants concentration according to the land use. The mark ‘*’ and ‘○’ in the plot mean the values outside 3 times and 1.5 times the size of the box from the top of the box, respectively.

pH범위와 대체로 비슷한 수준으로 볼 수 있다(5). 서울시 강수의 pH는 지역적으로 4.5~4.7로서 산성을 띠고 있는데(7), 산성인 빗물이 토양을 통과하면서 암반층과의 반응으로 중화되는 것으로 판단된다(8).

질산성 질소와 염소이온 농도는 각 토지용도별로 큰 차이를 보이지 않았으나, 일부 지하수에서 기준대비 상당히 고농도의 측정값을 나타내기도 하였다. 이는 지하수 시설 주위에 오염원이 있거나, 낮은 하수관거로부터의 누수 그리고 지하수 시설의 불완전한 케이싱과 그라우팅에 의한 오염물질 유입 등이 원인이 될 수 있다(9).

표 4는 각 토지이용 유형별 특정유해물질의 검출율과 기준 초과율을 보여준다. 중금속을 제외하면 모든 토지이용 유형의 지하수에서 트리클로로에틸렌과 테트라클로로에틸렌이 가장 높은 검출율을 보였다. 도시 일반지역 지하수에서의 이 두 물질의 검출율과 비교하여 주유소, 세차장, 폐기물야적장 그리고 공장지역 지하수는 검출율이 더 높았고, 재래시장, 건설현장에서는 낮았다. 특히 폐기물야적장과 공장지역 지하수에서 검출율이 높았는데, 트리클로로에틸렌의 경우 각각 42.9%와 39.3%, 테트라클로로에틸렌은 25.0% 및 13.0%로 나타났다.

트리클로로에틸렌의 기준 초과율은 공장지역 지하수에서 17.4%로 가장 높았고, 폐기물야적장에서 7.1%, 도시 일반지역과 주유소 지하수에서 3.2% 그리고 세차장에서 0.9%로 나타났다. 테트라클로로에틸렌의 기준 초과율은 폐기물야적장 14.3%, 공장지역 4.3% 그리고 주유소 0.9%이었다. 비소의 경우 폐기물야적장 및 공장지역 지하수를 제외하고 모든 토지이용 유형에서 검출이 되었고, 건설공사장 지하수에서 16.7%로 가장 높은 검출율을 보였다. 건설공사장 지하수에서의 높은 검출율은 비록 검출건수가 적음에도 불구하고, 건설공사장의 특성상 지하굴착 및 콘크리트 타설 등의 공정이 많은 것과 관련이 있을 것으로 판단된다. 또한 분석대상이었던 중금속 중 유일하게 도시 일반지역 지하수에서 7.0%로 높게 검출되는 것으로 보아 지층 및 암반 등으로부터 자연발생적인 용출의 영향이 있을 것으로 판단된다.

또 다른 유기염소계 용제인 1,1,1-트리클로로에탄은 폐기물야적장 및 공장지역 지하수에서 검출율은 10% 이상으로 높았으나, 검출된 시료수가 매우 적었고 기준을 초과하는 지역도 없었다. BTEX는 유류 지하저장탱크가 매설된 주유소 지하수와 세차장 지하수에서도 5% 미만으로 낮은 검출율을 보였고, 유기용제와 달리 폐기물야적장이나 공장지역 지하수에서 거의 검출이 되지 않았다.

그림 4는 특정오염물질 중 본 연구의 관심대상이 되는 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌 그리고 비소에 대해 각 토지이용 유형별로 검출되었던 시료의 농도분포를 보여준다. 그림 4(a)에서 트리클로로에틸렌은 폐기물야적장 및 공장지역 지하수에서 중간값이 각각 0.014 mg/L 및 0.028 mg/L 이었고, 두 지역 모두에서 제3사분위수가 0.1 mg/L 이상으로 매우 크고, 중간값은 제1사분위수와 가까이 위치하고 있다. 즉, 이 두 지역 지하수의 측정값은 상대적으로 고농도의 측정값들이 많음을 의미한다. 특히 공장지역 지하수는 9건 검출시료 중 4개 시료가 0.1 mg/L를 초과한 시료이었다. 테트라클로로에틸렌의 경우(그림 4(b))는 폐기물야적장 지하수에서 중간값이 0.021 mg/L 정도로 나타났으나, 트리클로로에틸렌에 비해 전체적으로 농도수준은 낮았다. 이 두 물질은 일부 지점의 지하수에서 특이하게 고농도 사례가 발생하는 경우가 다른 물질에 비해 많았다.

함 등(4)은 공단지역 지하수 수질 특성에 관한 연구를 통해 유기물질인 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌이 오염발생 지역의 지하수에서 국지적으로 나타나고, 무기오염물질은 오염범위가 상대적으로 광범위한 것으로 파악한 바 있다. 본 연구에서도 폐기물야적장과 공장지역 등 오염가능성이 높은 지역의 지하수에서 이들 유기용제의 검출빈도와 농도가 높게 나타났다. 이들 유기염소계 용제의 경우 토양이나 지하수 중의 혐기성 환경에서 분해되어 디클로에틸렌(Dichloroethylene) 및 비닐클로라이드(Vinylchloride)로 분해가 일어날 수 있는데(10, 11), 이 경우 분해물질의 독성이 더 커지는 특징이 있다. 특히 비닐클로라이드는 1급 발암물질로 분류되는 물질로서 국내수질기준에 설정되진 않았지만, 세계보건기구에서 권고하는 맥

는물 기준이 0.005 mg/L 정도로 낮은 물질이다. 따라서 지하수에서 트리클로로에틸렌과 테트라클로로에틸렌이 분해되어 농도가 낮더라도 독성이 더 큰 디클로에틸렌이나 비닐클로라이드의 농도가 높을 가능성이 있으므로, 조사대상 물질인 두 가지 유기용제 외에 이들의 분해로 생성되는 두 가지 물질에 대한 조사도 필요할 것으로 판단된다.

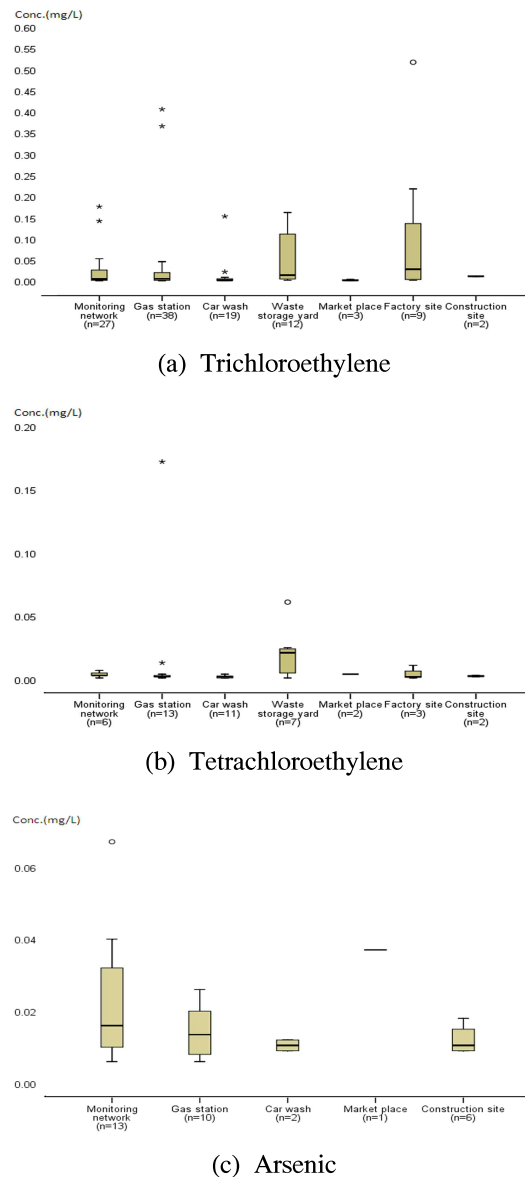


Fig. 4. Box plots of hazardous pollutants concentration in pollutant detected samples according to the land use.

Table 4. Detection rate(%) of each water quality parameter with respect to the types of land use

Types of facilities	No. of sample	TCE	PCE	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	Xylene	1,1,1-TCA	As	Cd	Phenol	CN
Monitoring well	185	14.6	3.2	0.0	1.1	0.5	0.5	2.2	7.0	0.0	0.5	0.0
Underground storage tank	219	17.4	5.9	0.9	3.7	1.4	1.8	0.5	4.6	0.0	0.9	0.0
Car wash	112	17.0	9.8	0.9	3.6	1.8	4.5	2.7	1.8	0.0	1.8	0.0
Market place	105	2.9	1.9	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0
Construction site	36	5.6	5.6	0.0	5.6	0.0	0.0	0.0	16.7	2.8	0.0	0.0
Waste storage yard	28	42.9	25.0	3.6	0.0	0.0	0.0	10.7	0.0	0.0	0.0	0.0
Factory site	23	39.1	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.4	0.0	0.0	0.0	4.3
Total	708	15.5	6.2	0.7	2.3	0.8	1.4	2.1	4.5	0.3	0.7	0.1

Table 5. Standard exceeding rate(%) of each water quality parameter with respect to the types of land use

Types of facilities	No. of sample	TCE	PCE	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	Xylene	1,1,1-TCA	As	Cd	Phenol	CN
Monitoring well	185	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0
Underground storage tank	219	3.2	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Car wash	112	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0
Market place	105	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Construction site	36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
Waste storage yard	28	7.1	14.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3
Factory site	23	17.4	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	708	2.8	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.4	0.1

비소의 경우 검출율은 건설공사장이 일반 도시 지역에 비해 2배 이상이었지만, 검출되는 농도수준은 도시 일반지역에서 더 높은 것으로 나타났다. 또한 폐기물 야적장 및 공장지역 지하수를 제외하고 대부분의 지역 지하수에서 검출이 되는 특징이 있었다.

3. 관정심도별 수질

관정심도에 따른 수질을 알아보기 위해 특정유해물질 중 검출율 또는 농도가 높았던 세가지 물질에 대해 고찰하였다. 조사대상 관정 중 지하수 수질측정망은 관정심도에 대한 정보가 없어 제외하였다. 지하수 수질측정망을 제외한 지하수 관정의 심도는 그림 5에서 보는 바와 같이 대부분의 토지이용 유형에서 150 m 이하인 것으로 나타났다. 전체적으로 관정심도의 분포는 50 m 미만이 39.9%, 50~100 m 43.7%, 101~150 m 13.0%, 151~200 m 0.6% 마지막으로 200 m를 초과하는 관정이 2.8%이었다.

낮은 심도에서는 토양오염의 영향을 상대적으로 크게 받을 수 있고, 심도가 얇은 경우 천층 지하수의 영향을 받을 수 있기 때문에, 오염물질로 토양이 오염되었을 경우 낮은 심도의 지하수에서 오염물질 검출빈도와 농도가 더 높을 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 김 등(12)은 부산시 민방위비상급수로 이용되는 지하수를 대상으로 증발잔류물, 경도, 질산성 질소 등의 오염물질이 천부지하수에서 지표 오염원의 영향을 더 받는 것으로 조사한 바 있다.

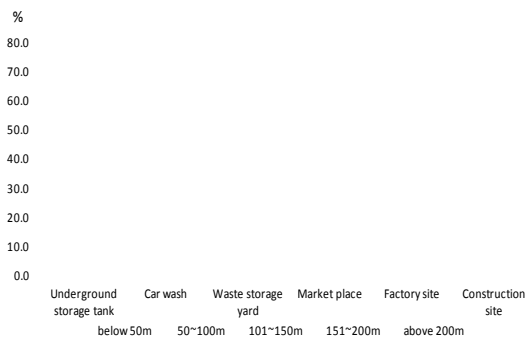
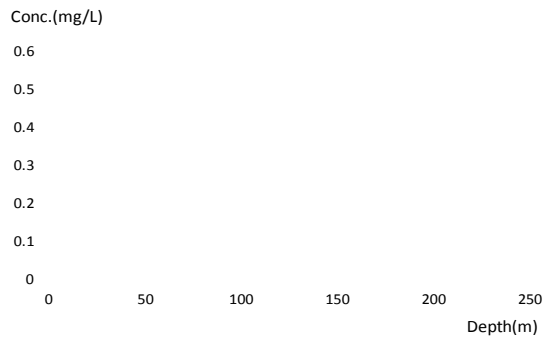
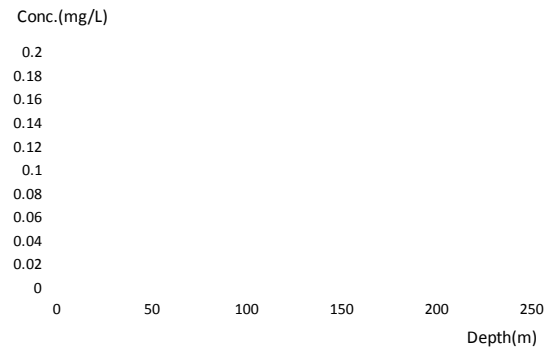


Fig. 5. Rate of groundwater well depth in each land use in this study.

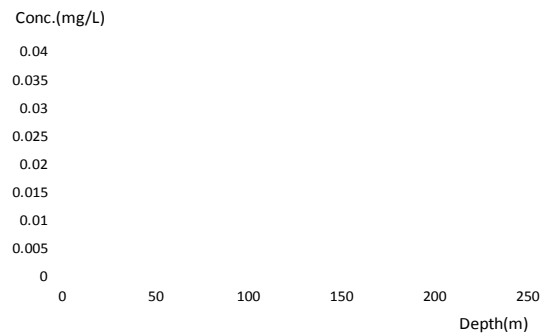
그림 6은 특정유해물질 중 검출빈도가 가장 높았던 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌, 비소의 관정심도에 따른 농도분포를 보여준다. 대상 관정 중 150 m를 이상의 관정이 거의 없어 주로 그 이하의 깊이에서 농도가 나타나고 있다.



(a) TCE



(b) PCE



(c) AS

Fig. 6. Distribution of hazardous pollutants concentrations according to the well depth.

두 종류의 염소계 유기용제는 100 m 이하의 관정에서 대부분 검출되고 있었다. 트리클로로에틸렌의 경우 50m 이하의 관정에서 검출되는 비율이 높았고, 고농도 검출시료도 다수 존재하였다. 테트라클로로에틸렌 역시 50m 이하 관정에서 검출되는 사례가 많았다. 그러나 고농도 검출은 50 ~ 100 m 깊이에서 더 많이 발견할 수 있었다. 따라서 두 물질의 고농도 검출시료는 대부분 100 m 이하 깊이에서 나타나고 있음을 볼 수 있다.

비소의 경우에는 약간 다른 양상을 보이고 있는데, 150 m 이상 깊이의 관정수의 수가 절대적으로 적음에도 불구하고, 150 m 이상의 관정에서도 검출율이 다른 물질에 비해 상대적으로 높았다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 비소가 자연적으로 지하수에 용해되는 것과 관련이 있을 것으로 판단된다.

결 론

2013년 연구원으로 의뢰된 지하수 수질측정망 시료 및 오염유리시설 중 중점관리관정 지하수 시료의 분석을 통해 토지이용 유형에 따른 서울시 지하수 수질오염 특성을 고찰하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 검출되는 빈도와 농도를 고려하였을 때 서울시 지하수 관리에 있어 더욱 관심을 가져야할 유해물질은 염소계 유기용제 중 트리클로로에틸렌과 테트라클로로에틸렌, 그리고 중금속 중 비소인 것으로 나타났다. 그 중 트리클로로에틸렌은 전체 시료 중 15.5%가 검출되었고, 생활용수 기준 초과비율도 2.8%로 가장 높았다.
2. 트리클로로에틸렌과 테트라클로로에틸렌의 경우 본 연구의 모든 토지이용 유형의 지하수에서 가장 높은 검출율을 보였고, 특히 공장지역 및 폐기물야적장 지역의 지하수에서 검출율과 농도수준이 높아 국지적인 오염원의 영향이 지하수 농도에 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단된다.
3. 유류계 오염물질 지표인 BTEX의 검출율은 오

염개연성이 가장 높은 주유소 및 세차장 지하수에서도 5% 미만이었으며, 농도 수준도 기준에 비해 매우 낮아 유류관련 토지이용으로 인한 지하수의 오염 징후는 거의 없는 것으로 나타났다.

4. 조사대상 지하수 관정의 심도는 대부분 150 m 이내였고, 전체적으로 검출율이 가장 높은 트리클로로에틸렌과 테트라클로로에틸렌의 경우 100 m 이내의 관정심도에서 검출빈도와 농도가 높아 토양오염 및 천층 지하수 유입에 의한 영향을 받는 것으로 보인다.
5. 조사대상 중금속 중 비소는 폐기물야적장과 공장지역 지하수를 제외한 모든 토지이용 형태의 지하수에서 가장 흔하게 나타났고, 다른 특정 유해물질과 달리 대부분의 관정깊이에서 검출되고 있어, 지질 및 암반 등 자연적 기원의 영향이 있는 것으로 판단된다.

이상의 고찰들로부터 서울시 지하수를 효과적으로 관리하기 위해 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌 그리고 비소항목에 대해 지속적인 관심이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 염소계 유기용제가 토양 및 지하수 중에서 분해되어 생성되는 비닐클로라이드와 디클로로에틸렌은 수질기준에 설정되어 있지 않은 항목이지만, 이 물질들의 독성을 고려하여 모니터링 항목에 추가할 필요가 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 환경부 : 환경백서, 2012.
2. 한국지하수토양환경학회 : 토양환경공학. 향문사, 2001.
3. 환경부 : 지하수수질측정망 설치 및 수질오염 실태 측정계획, 2012.
4. 함세영, 김광성, 이정환, 정재열, 성익환, 장성 : 부산시 사상공단지역의 지하수 수질 특성. 자원환경지질, 39(6):753~770, 2006.
5. Smedley, PL and Kinniburgh, DG : A

- review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Appl. Geochem.*, 17:517~568, 2002.
6. 안주성, 고경석, 전철민 : 국내 지하수의 비소 산출양상. *한국지하수토양환경학회지*, 12(5): 64~72, 2007.
 7. 서울특별시보건환경연구원 : 보건환경백서. 2011.
 8. Hem JD : Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. US Government printing office, Washington, 4:263, 1992.
 9. 김규범, 최두형, 윤필선, 김기영 : 국내 오염 우려지역의 지하수 수질 추세 특성. *한국지반환경공학회*, 11(3):5~16, 2010.
 10. Lenczewski, M, Jardine, P, Mckay, L and Layton, A : Natural attenuation of trichloroethylene in fractured shale bedrock. *Journal of Contaminant Hydrology*, 64:151~168.
 11. Semprini, L, Kitanidis, P, Kampbell, D and Wilson, J : Anaerobic transformation of chlorinated aliphatic hydrocarbons in a sand aquifer based on spatial chemical distribution. *Water Resour.*, 31:1051~1062.
 12. 김민경, 최성화, 정재은, 윤나나, 한상민, 이경심 : 부산 지역 지하수 수질의 통계적 분석. *부산광역시보건환경연구원보*, 19(1):142~153, 2009.