

광주광역시의 지하수 중 휘발성유기화합물(VOCs)의 오염과 오염원 분석

윤 욱* · 조병욱 · 음철현 · 성익환
한국지질자원연구원

Analysis on the contamination and source of VOCs in groundwaters of Gwangju area

Uk Yun* · Byong-Wook Cho · Chul-Hun Eum · Ik-hwan Sung
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요 약

광주광역시의 하남산업단지 주변 및 도심지 광주천 일대의 37개 조사관정 중 21개 관정의 지하수에서 VOCs가 검출되었다. 염소계지방족 탄화수소는 37개 조사관정 중 18개 관정의 지하수에서 검출되었으며, 그 중 총트리할로메탄(TTHM)은 0.1~36.2 µg/L의 분포를 보이고, CFC는 2.3~190 µg/L의 범위를 보이며, PCE, TCE 및 그 분해물들은 0.1~124.2 µg/L의 농도를 보인다. 방향족탄화수소는 5개 관정의 지하수에서 10가지 성분이 검출되었으나, 0.2 µg/L 미만의 낮은 농도로 나타났다. 하남산업단지 주변에서는 염소계지방족 탄화수소 성분이 광주천 인근 지하수 보다 검출빈도와 농도가 높게 나타나며, 지하수 시료중의 VOCs 성분은 TCE를 제외하고는 미국 음용수 기준치를 초과하지 않는다. TCE의 경우 하남산업 단지에 소재하는 2개 지점의 지하수에서 먹는물 기준치(5 µg/L)를 각각 5배, 25배를 초과하는 것으로 나타났다. 하남산업단지 지하수 시료중의 TCE 오염은 H8과 H10 관정에서, CFCs는 H8과 H11관정 부근의 지하수에서 검출되었다. 하남산업단지 주변 및 광주천 일대에서 검출된 TTHM은 상수도 및 하수도의 누출로부터 기원하는 것으로 판단된다. 연구 대상지역은 일부지역을 제외하고는 호기성지대로 구성되어 대부분의 방향족탄화수소는 분해가 잘되는 환경이나 염소계지방족 탄화수소는 대부분 생분해 반응이 서서히 일어나는 환경에 해당한다.

주요어 : 지하수, 광주광역시, 휘발성유기화합물, 오염

ABSTRACT: VOCs were detected in the 21 groundwaters out of 37 groundwaters sampled from around the Hanam Industrial Complex and the Gwangju stream. Ten components of chlorinated aliphatic hydrocarbons of VOCs were detected in the 18 groundwater samples. Among them, total trihalomethanes (TTHM) concentration is in the range of 0.1~36.2 µg/L, CFCs concentration is 2.3~190 µg/L, and chlorinated solvents concentration containing PCE, TCE, etc. is 0.1~124.2 µg/L respectively. Ten components of the aromatic hydrocarbons of VOCs were detected in the 5

*Corresponding author : yunuk@kigam.re.kr

groundwater samples, but their concentration are less than 1 $\mu\text{g/L}$. Detection frequency and concentration of the chlorinated aliphatic hydrocarbons components from the groundwaters in the Hanam Industrial Complex are higher than those of nearby downtown Gwangju stream. VOCs components except for TCE are lower than the MCL of USGS drinking water standard. TCE concentration of the 2 groundwater samples is over MCL, whose concentrations are 5 and 25 times higher than MCL, respectively. TCE is detected from the H8 and H10 groundwater samples and CFCs is detected H8 and H11 groundwater samples in the Hanam Industrial Complex. TTHM in study area is estimated from leakage of the main waters or sewage waters. Because most of the studied groundwater is under an aerobic condition, aromatic hydrocarbons are well degraded. But chlorinated aliphatic hydrocarbons are degraded very slowly.

key words : Groundwater, Gwangju, VOCs, contamination

서 론

유기물질은 휘발정도에 의해 휘발성, 반휘발성, 비휘발성으로 분류된다(Clements & Lewis, 1988). 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)이란 증기압이 높아 쉽게 증발되어 대기 중에서 질소산화물 등과 광화학 스모그를 일으키는 물질을 말하며, 방향족탄화수소와 지방족탄화수소를 포함한 일반 탄화수소와 비균질탄화수소(Heterogeneous Hydrocarbon)로 구분된다. VOCs는 국가별로 정의를 달리하고 있다. 미국 EPA에서는 VOCs를 일산화탄소, 이산화탄소, 탄산, 금속성 탄산염 및 탄산 암모늄을 제외한 탄소화합물로 정의하고 있으며, 메탄, 에탄, 메틸클로라이드, 메틸클로로포름, 클로로플루오르탄소류 및 퍼플루오르탄소류 등 광화학 반응성이 낮은 화합물은 제외하고 있다(U.S. EPA, 1992a). 일본의 탄화수소류 대책 지도지침에 의하면 VOCs를 탄소화합물 중 원유, 가솔린, 나프타 및 항공터빈 연료류 4호 등 유기화합물 또는 유기화합물만으로 생성되는 혼합물질과, 이 외에 단일물질은 비점이 1기압에서 150 $^{\circ}\text{C}$ 이하인 물질, 혼합물질은 비점이 1기압에서 5% 유출점이 150 $^{\circ}\text{C}$ 이하인 물질로 정의하고 있다. 유럽 VOCs 규제위원회(Control Council Directive 94/63/EC, 1994)는 레이드 증기압(RVP)이 27.6 kPa 이상인 석유류 제품(첨가제 유무에 무관)으로 LPG는 제외시키고 있다. 국내의 경우 대기환경보전법 시행령 제39조 1항에서는

석유화학제품 유기용제 기타물질로서 환경부 장관이 관계 중앙 행정기관의 장과 협의하여 고시하는 물질로 정의하고 있다(환경부, 1999).

지하수의 VOCs 오염은 연료, 가솔린, 용매제, 세탁제, 제유제, 페인트, 잉크, 염색제, 냉매 및 살충제를 포함하는 상업 및 산업 용품과 가정용품으로부터 발생된다. VOCs를 함유한 원료 및 유기용제 등이 누출 또는 폐기될 때 상당 부분은 대기중에 증발되나 일부는 토양을 통해 지하로 스며든다. 이러한 VOCs를 함유한 유기물질들은 강우에 의해 더 깊은 지하로 운반되어 결국에는 지하수를 오염시킨다. 실제 VOCs에 의한 오염사례가 알려지고 있으며, 미국 환경보호국(EPA)은 미국 상수원중에서 7% 정도가 적어도 1성분의 VOCs를 함유하고 있을 것이라고 추정하고 있다(USGS News, 1999). 우리나라의 경우도 최근 유류저장소, 주유소, 공단지역 등에서도 지하수의 VOCs 오염이 문제가 되어 1996년부터 한국지질자원연구원에서는 국내 토양환경보전법에 의거 전국 주유소를 대상으로 BTEX(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌) 물질에 대한 주유소 토양오염도 검사를 수행해 오고 있다. 이평구 외(2001)는 서울 도심지 27개 지하수 관정을 선정하여 지하수의 VOCs 성분을 조사한 결과 17개 관정에서 염소계 포화탄화수소가 검출되었고, 방향족탄화수소는 대부분 검출한계 이하로 나타나고 있다. 광주광역시 2002 환경백서(2002)에 의하면, 126개 주유소 부근의 지하수중 27개 관정에서 VOCs가 검출되

었고, 그 중 5개 주유소의 지하수에서 음용수 수질기준을 초과한 것으로 나타났다. 검출된 VOCs의 평균농도는 자일렌이 0.825 $\mu\text{g/L}$, PCE는 0.610 $\mu\text{g/L}$, 톨루엔은 0.460 $\mu\text{g/L}$, 벤젠의 경우 0.280 $\mu\text{g/L}$ 이다. 이 외에 에틸벤젠, TCE, 사염화탄소 등이 미량 검출되었다. 이러한 사실은 국내 다른 도심지나 공단지역의 지하수에서도 VOCs 검출 가능성이 높다는 것을 지시하며, 도시 산업화에 따른 유류 및 유기용제의 사용 급증은 향후 지하수의 VOCs 오염을 증가시킬 가능성이 높으므로, 이에 따른 청정 지하수자원의 보호차원에서 지하수 환경에 따른 VOCs 실태파악 및 분산 메커니즘과 자연저감 작용 등에 대한 연구가 요구된다.

본 연구에서는 광주광역시의 하남산업단지과 도심지 광주천인근 지역 37개 지하수 관정을 선정하여 미국지질조사소(USGS)의 국립수질평가(NAWQA) 프로그램(Bender외, 1999)에서 선정한 지하수내 62종의 VOCs 성분에 대한 실태를 조사하였다. 그리고 유기오염 분산 범위와 VOCs의 자연저감 진행정도를 고찰하였으며, VOCs 성분과 주요 양이온 및 음이온 농도의 상관성을 검토하였다.

시료채취 및 분석

1. 시료채취

산업용 유기용매를 많이 사용하는 하남산업단지과 생활하수 등에 의한 수질오염의 영향이 큰 도심지 광주천 인근지역을 대상으로 2002년 12월에 총 37개 지하수 관정으로부터 지하수 시료를 채취하였다(Fig.1). 시료는 수질안정을 위해 10~20분 동안 양수공 체적의 약 3~5배의 지하수를 양수한 후 채취되었다(Barcelona 외, 1985). 주요 양이온 및 음이온 분석용 시료들은 여과(0.45 μm) 후 각 1 L씩 채취하였으며, 양이온 시료의 경우는 농질산(65%)을 1mL을 첨가하였다. VOCs 분석용 시료는 Colorado 주에서 정한 시료채취법에 따라 할로젠탄화수소 분석용 시료는 산처리하지 않고 바이알(vial)병에 담은후 즉시 뒤집어 기포유무를 확인한 후 냉장보관 하였고, 방향족탄화수소 분석용 시료는 진한 염산(1+1)으로 pH 2 이하를 유지한 후 즉시 4°C 이하로 냉장보관 하였다. 시료는 채취후 14일 이내에 분석하였다. VOCs가 검출된 21개의 관정의 심도와 토지 용도 등은 Table 1과 같다.

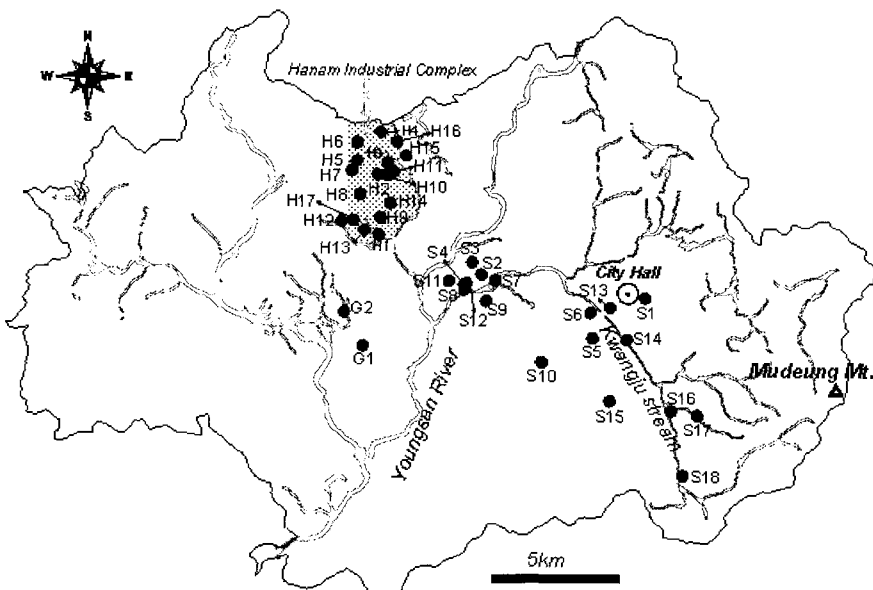


Fig. 1. Sampling sites for the chemical analysis in the study area

Table 1. Details of the 21 boreholes detected VOCs

Area	Sample No.	Well Depth (meter)	Water Use	Land Use
Hanam Industrial Complex	H1	20	Domestic	Residential
	H2	30	Domestic	Residential
	H3	30	Industrial	Factory
	H4	50	Domestic	Gas Station
	H5	40	Domestic	Garage
	H6	40	Domestic	Residential
	H7	40	Domestic	Residential
	H8	100	Industrial	Electronic Factory
	H9	100	Industrial	Electric Cell Factory
	H10	100	Industrial	Electronic Factory
	H11	100	Industrial	Electronic Factory
Gwangju Stream	S1	53	Life	School
	S2	40	Irrigation	Agriculture
	S3	15	Irrigation	Agriculture
	S4	20	Irrigation	Agriculture
	S5	80	Life	School
	S6	100	Life	School
	S7	80	Life	School
	S8	80	Industrial	Waste Treatment Plant
	S9	150	Drink	Business
	S10	110	Life	Business

2. 실험 및 분석

현장측정

수온, pH, Eh, EC 값은 휴대용 측정기 (SK1250MC, HM-12P TOA, CM-14P TOA)를 이용하여 현장에서 측정하였다. 알칼리도는 메틸 오렌지와 메틸렌오드 지시약을 이용하여 0.05 N의 염산으로 현장에서 직접 적정하였다(Manahan, 1979; 송덕영 외, 1995).

양이온 및 음이온

수질분석은 12개의 주요 성분(K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe, Mn, F^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , SiO_2)을 대상으로 수행되었다. 양이온중 Na, K, Fe,

Mn은 원자흡수분광광도계(AAS)를 이용하여 분석하였으며, 기기분석한계는 0.005 ppm이고, Ca, Mg, SiO_2 는 유도결합플라즈마 원자방출분광광도계(ICP-AES)를 이용하여 분석하였으며, 기기분석한계는 0.002, 0.002, 0.012ppm이다. 음이온의 경우 이온크로마토그래피(Dionex 300)에 의해 분석되었으며, 기기분석한계는 0.05ppm이다.

VOCs 분석

37개 지하수 시료에 대한 VOCs 성분 분석은 미국지질조사소(USGS)의 국립수질평가(NAWQA) 프로그램에서 선정한 총 62개의 VOCs항목(할로젠지방족탄화수소 36종과 방향족 탄화수소 25종, 메틸테르부틸에테르(MTBE 1종)을 대상으로 하

광주광역시의 지하수 중 휘발성유기화합물(VOCs)의 오염과 오염원 분석

였다. VOCs 성분 분석은 한국지질자원연구원에서 수행하였으며, 분석방법은 퍼지엔트랩(purge and trap)과 기체크로마토그래피/질량분석법(GC/MS)을 이용하여 물의 VOCs를 동시에 분석할 수 있는 미국 EPA 524.2 방법에 따랐다(U.S. EPA, 1992b).

mV(평균: 143 mV)로 대부분 관정에서는 산화환경을 보이거나, 일부에서는 환원환경을 나타내고 있다. DO는 0.4~8.8 mg/L(평균: 4.4 mg/L)로 시료별 큰 차이를 보인다

분석 결과

1. 현장 측정 항목

VOCs가 검출된 21개 시료 중에서 18개 지하수 시료에 대한 현장 측정 항목은 Table 2와 같다. 수온은 11.4~17.6 °C(평균: 15.8 °C)의 범위를 나타내어 관정별로 약 6 °C 차이를 보인다. pH는 5.7~7.1(평균: 6.4)로 약산성 내지 중성을 보인다. EC 는 74~854 µS/cm(평균: 390 µS/cm)로 시료 간의 차이가 큰 것으로 나타난다. Eh는 -60~225

2. 양이온 및 음이온

VOCs가 검출된 지하수중 18개 지하수 시료에 대한 양이온 및 음이온의 농도는 Table 3과 같다. Cl⁻농도는 6.4~111.0 mg/L(평균: 46.9 mg/L), NO₃⁻ 농도는 0~136.0 mg/L(평균: 39.8 mg/L), SO₄²⁻ 농도는 0.1~62.4 mg/L(평균: 18.0 mg/L), HCO₃⁻ 농도는 18.0~317.2 mg/L (평균: 106.5 mg/L)의 범위를 보인다. Fe, Mn은 3개의 시료에서 검출되고 있으며, Fe 농도는 0~25.0 mg/L(평균: 2.5 mg/L)의 범위를 보이며, Mn 농도는 0~6.0 mg/L(평균: 1.1 mg/L)의 범위를 보인다.

Table 2. Physical properties for the 18 groundwater samples containing organic hydrocarbons

Sample	T(°C)	pH	Eh (mV)	EC (µS/cm)	DO (mg/L)
H4	15.2	7.1	184	165	4.1
H5	14.7	6.6	211	112	4.6
H6	15.2	6.3	222	278	3.0
H7	15.1	6.0	200	74	6.6
H8	17.1	5.7	199	211	8.4
H9	16.6	6.1	192	215	6.5
H10	16.2	5.8	191	133	7.7
H11	16.8	6.0	185	145	5.4
S1	15.6	6.6	219	854	5.0
S2	11.4	6.5	43	505	0.4
S3	15.2	6.6	67	454	4.8
S4	16.2	6.5	-38	457	1.5
S5	16.7	6.1	104	687	4.6
S6	16.2	6.7	219	817	6.4
S7	17.1	6.6	133	372	1.8
S8	17.6	6.8	-60	770	2.1
S9	15.2	6.3	73	541	2.4
S10	15.9	6.4	225	233	4.8

Table 3. Chemical data for the 18 groundwater samples containing organic hydrocarbons

(unit : mg/L)												
Samples	K	Na	Ca	Mg	F	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	SiO ₂	Fe	Mn
H4	1.6	19.8	34.0	7.4	0.1	58.2	6.2	60.1	30.0	46.0	BDL	BDL
H5	3.1	17.5	17.4	2.7	BLD	18.2	0.1	24.0	69.2	29.7	BDL	BDL
H6	2.9	15.4	22.8	13.2	BLD	51.0	0.1	18.0	82.5	30.4	BDL	BDL
H7	1.5	9.5	5.0	0.9	BLD	6.4	0.5	33.1	1.9	32.1	BDL	BDL
H8	1.4	14.8	18.7	3.9	0.2	26.5	3.1	79.3	1.6	30.2	BDL	BDL
H9	2.0	15.0	16.6	4.9	0.1	17.8	12.2	64.0	29.3	30.6	BDL	BDL
H10	1.2	15.0	9.5	2.0	0.1	13.5	2.2	42.7	17.9	28.7	BDL	BDL
H11	1.0	11.1	11.7	1.5	0.4	12.4	3.0	45.8	22.7	30.0	BDL	BDL
S1	4.1	35.4	91.9	23.4	0.1	111.0	27.8	125.9	136.0	35.7	BDL	BDL
S2	2.0	40.9	33.3	14.0	0.1	54.3	28.2	204.3	0.1	30.2	25.0	4.2
S3	2.1	27.8	48.6	11.0	0.2	63.0	29.4	178.6	0.2	47.3	0.1	6.0
S4	1.7	30.7	40.1	12.0	0.2	48.0	62.4	155.2	0.1	49.8	14.9	3.7
S5	3.6	23.0	94.0	24.1	0.1	96.2	36.2	130.3	84.0	32.1	BDL	BDL
S6	1.6	25.0	93.4	23.6	0.1	101.0	29.4	123.7	127.0	31.9	BDL	BDL
S7	1.7	20.0	35.6	8.2	0.4	31.0	27.8	123.0	10.1	31.4	BDL	0.1
S8	1.6	60.0	58.4	12.4	0.2	59.8	37.4	317.2	BLD	35.7	3.0	5.3
S9	1.1	18.5	65.1	18.4	0.1	57.3	29.9	179.0	5.2	32.0	3.0	5.3
S10	2.5	14.3	24.8	9.2	0.1	29.3	0.51	85.4	63.7	31.7	BDL	BDL

BDL : Below Detection Limit

3. 휘발성유기화합물

21개 지하수 시료에서 검출된 VOCs 성분 수는 62개 분석항목 중에서 총 20개 성분이 확인되었으며, 그 중에 염소계지방족탄화수소(Chlorinated Aliphatic Hydrocarbons)가 10개 성분, 방향족탄화수소(Aromatic hydrocarbon)가 10개 성분이다 (Table 4, Table 5). 하남산업단지의 지하수에서 검출되는 VOCs 성분은 광주천 인근지역의 지하수와 다소 차이점을 보인다. 염소계지방족 탄화수소 성분이 방향족탄화수소보다 검출빈도와 농도 하남산업단지에서 광주천 인근 지하수 보다 비교적 높은 농도를 보인다. 방향족탄화수소는 검출빈도와 농도가 두 지역이 서로 유사하며, 가장 높은 농도는 0.2 µg/L 이다.

3.1. 하남산업단지

하남산업단지내 11개 지점의 지하수에서 검출되는 VOCs는 염소계지방족탄화수소 9개 성분과 방향족탄화수소 7개 성분으로 나타났다.

염소계지방족탄화수소: 총트리할로메탄(TTHM)은 브롬화클로로메탄, 브롬화디클로로메탄, 트리클로로메탄의 3개 성분이 검출된다. 디브롬화클로로메탄과 브롬화디클로로메탄은 단 1개의 지하수(H1)에서만 확인되며, 각 농도는 3.1 µg/L과 12.4 µg/L 이다. 트리클로로메탄은 6개 지점의 지하수에서 검출되며, 0.1~20.7 µg/L의 농도를 나타낸다. 프레온은 CFC-113과 CFC-11의 2개 성분이 검출된다. CFC-113은 2지점의 지하수에서 검출되고, H8(전자회사) 지점의 지하수에서 190 µg/L의 농도로 검출되어 VOCs 성분 중 가장 높은 값을 보인다. CFC-11은 H11(전자회사 소재) 지점의 지하수에서 17.5 µg/L의 농도로 검출된다. 염화용제(chlorinated solvents)로 사용되는 물질로는 5개 성분이 검출된다. 그 중에서 TCE는 4개 지점의 지하수에서 검출되고, 농도는 0.5~123 µg/L의 범위를 보이며, H8과 H10(전자회사 소재) 지점의 지하수에서는 미국 음용수 기준치(5 µg/L)를 각각 5배, 25배를 초과한다. PCE는 3개

광주광역시의 지하수 중 휘발성유기화합물(VOCs)의 오염과 오염원 분석

Table 4. VOCs data of the 11 groundwater samples in the Hanam Industrial Complex

Component (IUPAC Name)	Molecular Formula	Remark	Concentration at each sample (µg/L)											MCL*			
			H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11				
<i>Chlorinated Aliphatic Hydrocarbon</i>																	
Dibromochloromethane	CHBr ₂ Cl	THM	3.1														
Bromodichloromethane	CHBrCl ₂	THM	12.4														Total THM (100)
Trichloromethane	CHCl ₃	THM	20.7	1.3	0.3	0.1		3.7				0.2					
Trichlorofluoromethane	CFCl ₃	CFC-11												17.5			150
trichlorotrifluoroethane	C ₂ F ₃ Cl ₃	CFC-113	2.3							190							NA**
Dichloromethane	CH ₂ Cl ₂	DCM								3.7							5
1,1,1-Trichloroethane	C ₂ H ₃ Cl ₃	1,1,1-TCA								15.0							200
Tetrachloroethene	C ₂ Cl ₄	PCE								2.8	0.2	1.2					5
Trichloroethene	C ₂ HCl ₃	TCE								27.1	0.5	123	1.2				5
cis-1,2-Dichloroethene	C ₂ H ₂ Cl ₂	cis-DCE															6
<i>Aromatic Hydrocarbons</i>																	
Benzene	C ₆ H ₆	BTEX															1
Methylbenzene	C ₆ H ₅ CH ₃	BTEX							0.1								150
Ethylbenzene	C ₆ H ₄ C ₂ H ₅	BTEX							0.1								700
1,3-Dimethylbenzene	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	BTEX							0.2								
1,4-Dimethylbenzene	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	BTEX							0.1								Total 1750
1,2,4-Trimethylbenzene	C ₆ H ₃ (CH ₃) ₃																NA
1,3,5-Trimethylbenzene	C ₆ H ₃ (CH ₃) ₃								0.1								NA
Chlorobenzene	C ₆ H ₅ Cl	CB															70
4-Chlorotoluene	C ₆ H ₅ CH ₃ Cl									0.1							NA
Naphthalene	C ₁₀ H ₁₀									0.1							NA

*MCL : Maximum contaminant Level

**NA : Not Applicable

Blank : Not Detected

Table 5. VOCs data of the 10 groundwater samples around the Gwangju stream

Component (IUPAC Name)	Molecular Formula	Remark	Concentration at each sample (µg/L)										MCL*		
			S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10			
<i>Chlorinated Aliphatic Hydrocarbon</i>															
Dibromochloromethane	CHBr ₂ Cl	THM													Total
Bromodichloromethane	CHBrCl ₂	THM													THM
Trichloromethane	CHCl ₃	THM	0.5					1.2	0.3	0.2		0.3			(100)
Trichlorofluoromethane	CFCl ₃	CFC-11													150
trichlorotrifluoroethane	C ₂ F ₃ Cl ₃	CFC-113													NA**
Dichloromethane	CH ₂ Cl ₂	DCM		0.4	0.4	0.3									5
1,1,1-Trichloroethane	C ₂ H ₃ Cl ₃	1,1,1-TCA				0.1									200
Tetrachloroethene	C ₂ Cl ₄	PCE						0.1				1.5			5
Trichloroethene	C ₂ HCl ₃	TCE	0.1									0.4			5
cis-1,2-Dichloroethene	C ₂ H ₂ Cl ₂	cis-DCE	0.1									0.1			6
<i>Aromatic Hydrocarbons</i>															
Benzene	C ₆ H ₆	BTEX			0.1										1
Methylbenzene	C ₆ H ₅ CH ₃	BTEX											0.2		150
Ethylbenzene	C ₆ H ₄ C ₂ H ₅	BTEX													700
1,3-Dimethylbenzene	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	BTEX													Total
1,4-Dimethylbenzene	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	BTEX													1750
1,2,4-Trimethylbenzene	C ₆ H ₃ (CH ₃) ₃												0.2		NA
1,3,5-Trimethylbenzene	C ₆ H ₃ (CH ₃) ₃												0.1		NA
Chlorobenzene	C ₆ H ₅ Cl	CB										0.2			70
4-Chlorotoluene	C ₆ H ₅ CH ₃ Cl														NA
Naphthalene	C ₁₀ H ₁₀												0.1		NA

*MCL : Maximum contaminant Level

**NA : Not Applicable

Blank : Not Detected

광주광역시 지역의 지하수 중 휘발성유기화합물(VOCs)의 오염과 오염원 분석

지점의 지하수에서 확인되고 0.2~2.8 µg/L의 값을 나타낸다. 1,1,1-TCA와 DCM은 H8 지하수에서 검출되는데 각 15.0 µg/L와 3.7 µg/L의 농도를 보인다.

방향족 탄화수소: 7개 성분(나프탈렌, 메틸벤젠, 에틸벤젠, 1,3- 및 1,4-디메틸벤젠, 1,3,5-트리메틸벤젠, 4-클로로톨루엔)이 2개 지점의 지하수에 국한되어 검출되며, 0.2 µg/L 이하의 농도로 미량 검출된다. H6(식당) 지점의 지하수에서 에틸벤젠과 1,3- 및 1,4-디메틸벤젠, 1,3,5-트리메틸벤젠의 4개 성분이 검출되며, 그 외 3개 성분은 H7(주택) 지점의 지하수에서 확인된다. 하남산업단지의 지하수에서는 염소계지방족 탄화수소 성분이 주로 전자회사에 위치한 지하수에서 검출되고 있으며, 방향족 탄화수소는 주택 및 식당의 천부 지하수에서 나타나는 경향을 보인다.

3.2. 광주천 인근지역

도심지 광주천 인근지역 10개 관정의 지하수에서 검출된 VOCs는 11개 성분이며, 최대 1.5 µg/L 농도가 검출되었다. 그리고 하남산업단지의 지하수 분석결과와 마찬가지로 주로 염소계지방족탄화수소가 우세하게 나타난다.

염소계지방족탄화수소 : 6 종류(트리클로로메탄, 디클로로메탄, 1,1,1-트리클로로에탄, PCE, TCE, cis-1,2-DCE)의 성분이 검출되었고 이 중에서 가장 검출빈도가 높은 트리클로로메탄은 5개 관정의 지하수에서 0.2~1.2 µg/L의 농도로 나타났다. S9 지점의 지하수에서 시료중 가장 많은 4가지 성분(트리클로로메탄, PCE, TCE, cis-1,2-DCE)이 확인되었고, 이들 성분의 농도는 1.5 µg/L 이하이다. 광주천 인근지역 10개 관정의 지하수에서 검출된 VOCs 농도는 모두 미국 음용수 기준치 이하로 확인되었다.

방향족 탄화수소: 6 종류(벤젠, 나프탈렌, 메틸벤젠, 1,2,4-트리메틸벤젠, 1,3,5-트리메틸벤젠, 클로로벤젠)의 성분이 검출되었으나, 0.2 µg/L 이하의 매우 낮은 농도를 보인다. 10개 관정의 지하수 중 3개 지점에서 방향족 탄화수소 성분이 검출되

는데, S10 지점의 지하수에서는 4가지 성분(메틸벤젠, 1,2,4-트리메틸벤젠, 1,3,5-트리메틸벤

젠, 나프탈렌)이 확인되었고, S3과 S8 지점의 지하수에서는 벤젠(0.1 µg/L)과 클로로벤젠(0.2 µg/L) 한 성분씩만 검출되었다.

본 연구에서 VOCs가 검출된 21개의 지하수 관정에서는 20개 VOCs 성분이 확인되었으나, 하남산업단지의 H8과 H10 지점의 지하수 두 곳을 제외하면 모두 미국 음용수 기준치 이하의 농도를 보여준다. 도심지 생활하수에 의하여 오염된 광주천의 영향을 받는 인근지역 지하수의 경우 하남산업단지내 지하수 보다 VOCs 오염도가 더 낮게 나타나고 있다. 그러나 연구대상지역에서 지하수내 VOCs의 일부 성분(TCE 등)이 기준치를 초과하는 사례가 밝혀지고 있어, 추후 지속적인 유류 및 유기용제 오염에 대한 지하수 수질의 감시 및 관리가 요구된다.

토 의

1. 지하수의 VOCs 와 물리·화학적 특성과의 상관성

지하수내 VOCs의 화학적 거동을 파악하기 위하여 용존 성분과 물리적 특성 사이의 상관성을 통계분석에 의해 검토하였다. 19개 지하수 시료에 대한 VOCs 농도와 주요성분 및 물리적 특성(Temp, pH, Eh, EC)과의 상관계수를 Table 6에 수록하였다. VOCs의 경우는 오염원별로 총트리할로메탄(TTHM), 염화용제(chlorinated solvent)로 분류하여 통계분석에 사용하였다. CFCs와 방향족탄화수소는 검출시료의 수가 작거나, 농도가 매우 낮아 통계분석에서 제외되었다. VOCs는 지하수의 물리적 특성 및 주요 성분들과 비교적 낮은 상관성을 나타내고 있다. TTHM은 모든 변수들과 0.25의 낮은 상관계수를 나타내고 있으며, 염화용제의 경우는 용존산소(DO)와 0.511, pH와 -0.536의 상관성을 나타내고 있다. 이러한 상관분석 결과는 연구대상지역에서 지하수내 VOCs의

Table 6. Correlation matrix of the 21 groundwater samples

	TTHM	CS	Ca	Na	Cl	HCO ₃	NO ₃	SO ₄	Tem	pH	Eh	EC	DO
TTHM*	1												
CS**	-0.091	1											
Ca	-0.061	-0.315	1										
Na	-0.257	-0.215	0.494	1									
Cl	-0.112	-0.321	0.948	0.520	1								
HCO ₃	-0.230	-0.244	0.536	0.881	0.469	1							
NO ₃	-0.030	-0.186	0.551	-0.046	0.602	-0.256	1						
SO ₄	-0.156	-0.295	0.644	0.653	0.573	0.751	-0.075	1					
Tem	-0.071	0.161	0.104	-0.089	-0.056	-0.003	0.039	0.068	1				
pH	-0.240	-0.532	0.428	0.544	0.504	0.426	0.207	0.377	-0.208	1			
EH	0.171	0.180	-0.242	-0.724	-0.182	-0.840	0.542	-0.792	0.024	-0.284	1		
EC	-0.145	-0.301	0.929	0.722	0.890	0.731	0.414	0.737	0.065	0.427	-0.425	1	
DO	0.253	0.509	-0.207	-0.549	-0.235	-0.565	0.204	-0.568	0.370	-0.565	0.667	-0.343	1

*TTHM: total trihalomethane(dibromochloromethane+bromodichloromethane+trichloromethane)

**CS: chlorinated solvents(dichloromethane+chloroethane+1,1,1-TCA+PCE+TCE+cis-DCE)

농도가 주요 용존 성분들에 의해 규제받지 않고 있음을 지시해주고, 염화용제의 농도는 지하수 환경에 따른 용존산소와 pH에 따라 다소 영향을 받는 것으로 나타나고 있다.

Table 7은 19개 지하수의 성분함량에 대한 R-모드 요인분석 결과이며, Varimax 법에 의거 회전 후 13개 변수를 독자적인 요인으로 구분한 아이젠 값(Eigen value)과 적재량을 나타내고 있다. 4개의 요인이 설명해 주는 분산은 84.2%이며, 그 중에 요인 1과 요인 2가 차지하는 분산은 64.2%이고, 요인 1에 적재량이 0.770 이상 높은 변수는 Eh, HCO₃, SO₄, Na이며, 요인 2에는 Ca, Cl, EC, NO₃가 0.810 이상의 높은 적재량을 보인다. 요인 3에는 염화용제와 수온, 용존산소, pH의 적재량이 0.641 이상을 보인다. 요인 4는 유일하게 TTHM이 0.956의 높은 적재량을 나타내고 있다.

요인 1로 분류되는 Eh, HCO₃, SO₄는 지하수의 산화-환원 환경에 민감한 변수들로서 대수층의 미생물 활동에 의해 규제받으며, 도심지 하천수나 생활하수 유입에 의한 유기물의 오염과 관련되는 변수로 사료된다. 요인 2에 적재량이 높은 Cl와 NO₃는 주로 생활하수 오염의 지시성분으로서 EC 값과 동질성을 보이는 것은 도심지 생활하수와

지하수의 혼합작용을 나타낸다. VOCs 성분들은 지하수의 용존 성분들과 독립적 환경 하에서 농집 및 분산된 것으로 나타나고 있다. 요인 3에 0.704의 높은 적재량을 보이는 염화용제는 지하수의 물리적특성인 수온, 용존산소, pH와 동질성의 집단으로 구분되고 있다.

본 연구지역 지하수에서는 디클로로메탄, 1,1,1-TCA, PCE, TCE, cis-DCE 등 5종의 염화용제가 검출되고 있다. 염화용제 물질 중에 가장 용도가 큰 TCE 및 PCE는 냉매용 CFC 원료로 가장 많이 사용되며, 그 외에 주로 기름제거 용제(금속세정제, 세탁용제, 페인트제거제 등)로 이용된다. 이러한 유기용제의 오염 가능성은 산업단지에서 가장 높다. 따라서 연구지역 지하수에서 검출되는 염화용제는 주요 용존 성분들의 오염과는 무관하게 공단지역에서 유기용제의 누출로 인한 오염과 관련이 있는 것으로 판단된다. 요인 4는 TTHM이 유일하게 적재량(0.957)이 높은 것으로 나타나며, 연구지역에서 오염 및 토지용도와 무관하게 전반적으로 검출되고 있다.

TTHM은 염소가 소독 등으로 물속에 용해될 때 방향족 탄화수소인 전구물질(휴믹산, 펠릭산 등)과 결합되어 디브롬화클로로메탄, 브롬화디클

광주광역시의 지하수 중 휘발성유기화합물(VOCs)의 오염과 오염원 분석

Table 7. The Eigen values and factor loadings of elements and physical components for groundwater samples.

Factors	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Eigen Values	5.86	2.48	1.55	1.05
C.P.T.V(%)	45.1	64.2	76.1	84.2
Factor Loadings				
Eh	-0.97194	0.08985	0.10892	0.03374
HCO ₃	0.90728	0.26024	-0.08951	-0.11154
SO ₄ ²⁻	0.81536	0.39644	-0.06953	0.01372
Na	0.77042	0.33564	-0.18293	-0.22449
Ca	0.32694	0.92082	-0.01935	0.03502
Cl	0.24313	0.91892	-0.14767	-0.05095
EC	0.52915	0.82402	-0.02957	-0.04107
NO ₃	-0.50806	0.81058	-0.06559	-0.08797
Tem	0.06682	0.14735	0.71788	-0.02776
CS	-0.13807	-0.29677	0.70418	-0.20458
DO	-0.59667	0.00785	0.66895	0.18737
PH	0.2567	0.38984	-0.64143	-0.30103
TTHM	-0.13919	-0.0358	-0.02648	0.95681

로로메탄, 트리클로로메탄 등의 THM 물질을 생성시킨다. 그 중에서 가장 우세하게 나타나는 성분은 트리클로로메탄으로서 주로 상·하수도의 누수에서 기원되는 것으로 알려져 있다. 연구지역 지하수에서 검출되는 TTHM 성분은 상·하수도의 누수 및 유입과 관련이 있는 것으로 추측된다. 실제로 영국의 Coventry 지역의 경우 염소소독으로 상수도에서 트리클로로메탄이 평균 60 µg/L, 하수도에서 18 µg/L, 심부지하수에서 2.1 µg/L가 검출되어 보고된 바 있다(Burston 외, 1993). 또한 THMs는 영국 Nottingham 지역 도시 지하수 충전 기원을 구별하는 표시자로 이용되기도 하였다(Barrett 외, 1999).

2. 지하수의 VOCs 분포 및 오염실태

본 연구지역 37개 관정의 지하수에서 검출된 VOCs를 오염원별로 TTHM, 염화용제, CFCs, 방향족탄화수소로 구분하여 농도분포 및 오염실태

를 Fig. 2에 도시하였다.

염화용제는 하남산업단지외 광주천 인근 지역의 일부 관정에서 검출된다. 하남산업단지에서는 최고 124.2 µg/L의 농도 값이 중앙부에 나타나고 있으며, 광주천 인근지역에서는 주로 광주천과 영산강이 합류하는 지역의 층적층 지하수에서 2 µg/L 이하의 값이 분포된다. 연구지역에서 염화용제(Fig. 2A)의 농도가 가장 높게 나타나는 곳은 전자회사로서 오염원이 뚜렷하게 확인되나, 광주천 인근 지역에서는 음용수 기준치 보다 낮은 농도로 넓게 분산 분포되어 있으며, 오염원 규명이 어렵다.

CFC는 37개 관정 시료 중 3개 관정에서만 확인되며, 이들 모두 하남산업단지에 국한된다. 이 3개의 지하수관정은 산업단지 중앙부에 위치하고 190 µg/L, 17 µg/L, 3 µg/L의 농도 값이 집중분포하며, 주변의 지하수에서는 검출되지 않는다(Fig. 2B). 이러한 사실은 프레온 오염이 전자제품회사 인근에 제한되어 이 곳이 오염의 발원지로 추정

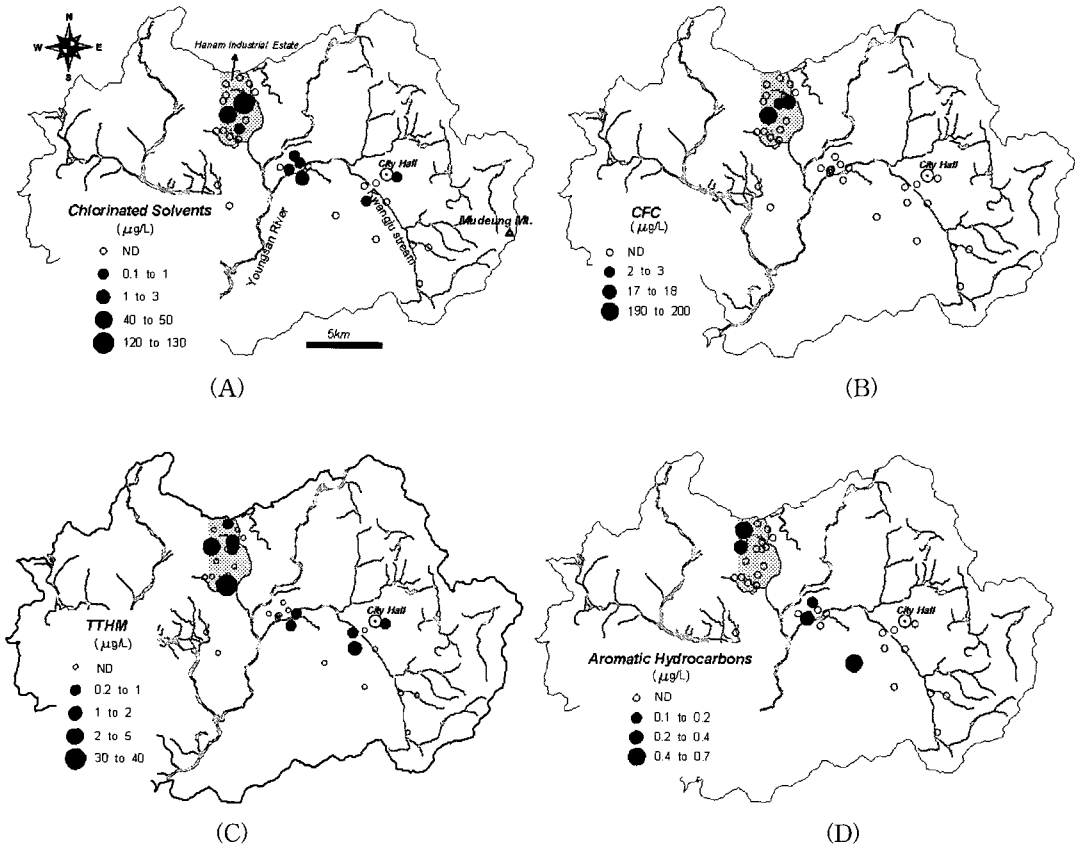


Fig. 2. VOCs concentrations in groundwaters sampled from the Hanam Industrial Complex and around the Gwangju stream. (A), chlorinated solvents; (B), CFCs; (C), total trihalomethanes; (D), aromatic hydrocarbons.

되며, 과거 냉각시설의 냉매 누출로 인하여 오염된 것으로 유추된다. 미국 EPA의 먹는물 기준치(MCL)는 CFC-113과 CFC-11의 경우는 정해져 있지 않으나, 캘리포니아주에서는 CFC-11의 기준치를 150 µg/L으로 정하여져 있다. 본 연구지역 지하수의 CFC-11함량은 17.5 µg/L로 기준치 이하이다.

총트리할로메탄(TTHM)의 농도도 염화용제와 유사한 분포양상을 보이며, 하남산업단지내 특히 공장 밀집지역 외곽인 북부와 남부지역에서 주로 검출된다. 가장 높은 농도 값(36.2 µg/L)은 남부지역에 분포되며, 북부 외곽지역에서는 3.7 µg/L 이하의 값을 보인다(Fig. 2C). 광주천 인근지역에

서는 2 µg/L이하의 값이 넓게 분산 분포된다. 본 연구에서 검출된 총트리할로메탄은 미국 EPA의 음용수 기준치(100 µg/L) 보다 낮은 농도를 나타내고 있다. 총트리할로메탄은 조사지역 전역에 걸쳐 분산되어 산업단지, 하천 주변, 도심지 등의 토지용도와 무관하게 도처에서 검출되는 특징을 보여준다. 방향족탄화수소의 농도는 하남산업단지와 도심지 광주천 인근 지역에 걸쳐 넓게 분포되며 모두 0.6 µg/L 이하의 값을 보인다(Fig. 2D). 본 연구에서 검출된 방향족탄화수소는 미국 EPA의 음용수 기준치 이하의 낮은 농도를 나타내고 있다.

연구지역 지하수에 오염원별 VOCs 농도의 분

포양상을 고찰한 결과 CFC를 제외한 염화용제, 총트리할로메탄, 방향족탄화수소 성분들은 산업단지 및 광주천 인근 지역에 걸쳐 넓게 검출되어 토지용도와 무관한 것을 지시해주고 있으나 농도는 산업단지의 지하수에서 높게 나타난다. 특히 염화용제는 음용수 기준을 훨씬 초과하고 있음이 밝혀졌다. CFC 성분은 산업단지에 국한되어 검출되는 양상을 나타내고 있다.

Fig. 3은 하남산업단지의 17개 관정에서 채취된 지하수 시료에 대한 VOCs의 농도 분포도이며, 0~238.6 µg/L의 범위를 나타낸다. VOCs에 의하여 오염된 지하수는 비교적 공장 밀집지역에 분포되어 있는 것이 확인되었으며, 그 주변 지역에서는 VOCs 성분이 전혀 검출되지 않고 있어 오염지하수의 분산이 미비한 것으로 확인되고 있다. 그 외에 공장 밀집지역의 외곽인 북부지역에서 미량의 VOCs가 검출되기도 한다.

3. 지하수중의 VOCs의 자연저감화

지하수 대수층에서 염소계지방족탄화수소와 방향족탄화수소 자연 저감화 현상이 일어나는데, 생분해(biodegradation) 및 가수분해(hydrolysis) 작용에 의한 파괴적 분해와 흡착(sorption), 분산(dispersion), 희석(dilution), 휘발(volatilization)작용에 의한 비파괴 분해로 구분된다(Strauss, 1998). 지하수환경에서 가장 활발히 일어나는 생분해 작용은 미생물이 호기성과 혐기성 환경에서 VOCs 물질을 독성이 없는 물질로 분해하는 과정이며, 다음과 같은 세 과정으로 구분된다. 1) 호기성 환경에서 미생물이 오염물질을 먹이원으로 사용할 경우, 주로 방향족탄화수소가 분해 된다. 2) 혐기성 환경에서 미생물 호흡시 오염물질을 이용하는 과정으로서 주로 염소계지방족탄화수소가 분해 된다. 이 분해과정 중 환원성 탈염소화작용(reductive dechlorination)이 가장 활발하게 일어나고, 분해물질에 따라 Table 8과 같이 다양한 분해과정을 보이며 그 중에 대표적인 분해과정은 $PCE \rightarrow TCE \rightarrow DCE \rightarrow VC \rightarrow$ 에텐 $\rightarrow CO_2 + H_2O$ 이다(Hunkeler 외, 1999; Sherwood-Lollar 외, 1999; Bloom 외, 2000). 3) 오염물질과 기타 반응에서 생성된 효소가 반응하여 호기성 환경에서 일어나

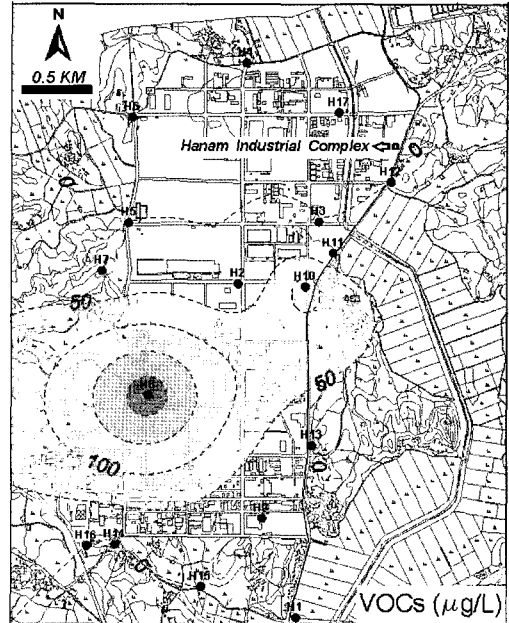


Fig. 3. Groundwater contamination plume(VOCs) in the Hanam Industrial Complex.

는 신진대사(cometabolism) 과정이다. 염화용제가 완전 분해 되려면 보통 3가지 과정 모두가 필요하다.

연구지역 하남산업단지의 4개 관정(H8, H9, H10, H11)과 광주천 인근의 1개 관정(S5) 지하수에서 염화용제인 PCE(0.2~2.8 µg/L)와 TCE(0.1~123 µg/L)가 검출되어 자연 저감화작용에 대한 고찰이 가능하다. 만약 이들 성분이 생분해에 의해 자연 저감화 되려면 혐기성환경 하에서 상기 2) 항의 분해과정이 필요하다. 그러나 분해 산물인 DCE, VC 성분이 검출되지 않아 자연 저감화작용이 진행 안 된 것으로 나타나고 있다. 이는 지하수의 산화-환원 환경차이에 기인되는 것으로 사료되며, 이들 지하수 시료의 pH, 용존산소, Eh 및 NO₃ 값은 대수층이 호기성환경에 속하고 있음을 보여준다.

Chapelle(1997)은 PCE, TCE가 DCE로 변형되는 탈염소화 작용은 NO₃⁻나 Fe(III)가 환원되는 환경에 유리하나, DCE가 VC로 또는 VC가 에틸렌으로 변형되는 것은 메탄이 발생하는 강력한 환원환경이 요한다고 하였다. Ellis(1997)는 지하

Table 8. Common degradation pathways for chlorinated hydrocarbons

Degradation Compounds	Pathways	Process
Chlorinated Methanes	CT(CCl ₄)→CF(CHCl ₃)→DCM(CH ₂ Cl ₂)→CM(CH ₃ Cl)→Methan(CH ₄)→CO ₂	Reductive Dechlorination
Chlorinated Ethanes	1,1,1-TCA(C ₂ H ₃ Cl ₃)→1,1-DCA(C ₂ H ₄ Cl ₂)→CA(C ₂ H ₅ Cl) →Ethanol(C ₂ H ₅ OH) or Acetate→CO ₂	Reductive Dechlorination
	1,1,1-TCA(C ₂ H ₃ Cl ₃)→1,1-DCE(C ₂ H ₂ Cl ₂)	Hydrolysis
Chlorinated Ethenes	PCE(C ₂ Cl ₄)→TCE(C ₂ HCl ₃)→1,2-DCE(C ₂ H ₂ Cl ₂)→VC(C ₂ H ₃ Cl) →Ethene(C ₂ H ₄)→CO ₂ +H ₂ O	Reductive Dechlorination
	PCE(C ₂ Cl ₄)→TCE(C ₂ HCl ₃)→CO ₂ +H ₂ O	Aerobic Cometabolism

수중에 존재하는 DCE 대부분이 cis-1,2-DCE라면 TCE의 생물학적인 분해의 결정적인 증거라고 하였다. 광주천 인근지하수의 S9 관정의 지하수는 PCE(1.5 µg/L), TCE(0.4 µg/L) 성분과 생분해 산물인 cis-DCE(0.1µg/L)가 검출되며, 낮은 NO₃ (5.2mg/L) 농도와 Eh(73mV) 값을 보이며, 높은 Fe(3.0mg/L) 및 Mn(5.3mg/L) 농도를보여, PCE, TCE가 DCE로 변형되기에 좋은 NO₃나 Fe(III) 환원환경에 속한다. 또한 DCE는 cis-1,2-DCE만 검출되어 TCE나 DCE가 생물학적으로 분해되었을 것이라 추측된다. 반면 S1 관정에서는 지하수의 TCE와 cis-DCE가 각각 0.1 µg/L 농도로 미량 검출되어 자연 저감화작용이 진행된 것으로 보이나, 지하수의 물리화학적 특성은 대수층이 호기성 환경임을 나타내어 해석에 어려움이 있다.

에 걸쳐 넓게 검출되어 토지용도와 무관한 것을 지시해주고 있으나, 농도는 산업단지의 지하수에서 높게 나타난다. CFC성분은 산업단지에 국한되어 검출되는 양상을 보이고, 염소계지방족 탄화수소 성분은 광주천 인근 지하수 보다 하남산업단지에서 검출빈도와 농도가 높게 나타난다.

3. 연구 대상지역 지하수 시료의 VOCs 성분은 TCE를 제외하고는 미국 음용수 기준치를 초과하지 않는다. TCE의 경우 하남산업단지에 소재하는 2개의 지하수관정에서 음용수 기준치(5 µg/L)를 각각 5배, 25배 초과하는 것으로 나타났다.

4. 방향족 탄화수소의 생분해는 활발할 것으로 판단되나, 염화용제(TCE, PCE등)의 자연저감화는 하남산업단지에서는 분해산물의 미발생으로 보아 거의 일어나지 않는 것으로 판단되며, 광주천 인근지하수의 S9 관정의 지하수는 생분해가 발생하고 있는 것으로 추정된다.

결 론

1. 하남산업단지와 광주천 인근 37개 지하수 관정중 21개 관정에서 VOCs가 검출되었으며, 10가지 성분의 염소계지방족탄화수소와 10가지 성분의 방향족탄화수소가 확인되었다.
2. 오염원별 VOCs 농도 분포양상에 의하면 CFC를 제외한 염화용제, 총트리할로메탄, 방향족 탄화수소 성분들은 산업단지와 광주천 인근 지역

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 (과제명 : 도시 지역 지하수 오염저감기술연구, 과제번호 : 5AA-2002-002)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 광주광역시, 2002, 환경백서, 1-316.
- 송덕영, 박진태, 김상연, 현장수질분석 시스템개선 및 체계화 연구, 1995, 과학기술처, KR-95(B)-14, 15.
- 이평구, 박성원, 전치완, 신성천, 2001, 서울시 도로변 빗물과 지하수의 VOCs오염, 한국지하수토양환경학회, 6권 3호, 73-91.
- 환경부, 1999, 대기환경보존법 시행령.
- Barcelona, M.J., Gibb, J.P., Helfrich, J.A., and Garske, E.E., 1985, Practical guide for groundwater sampling, SWS Contract Report 374, 94.
- Barrertt, M.H., Hiscock, K.M., Pedley, S., Lerner, D.N., Tellam, J.H., and French, M.J., 1999, Marker species for identifying urban groundwater recharge sources: A review and case study in Nottingham, UK, *Wat. Res.* v. 33, 3083-3097.
- Bender, D.A., Zogorski, T.S., Halde, M.J. and Rowe, B.L., 1999, Selection Procedure and Salient Information for Volatile Organic Compounds Emphasized in the National Water-Quality Assessment Program, U.S.G.S. Open-File Report 99-182, 32.
- Bloom, Y., Aravena, R., Hunkeler, D., Edwards, E., and Frape, S.K., 2000, *Environ. Sci. Technol.*, v. 34, 2768-2772.
- Burston, M.W., Nazari, M.M., Bishop, P.K., and Lerner, D.N., 1993, Pollution of groundwater in the Coventry region (UK) by chlorinated hydrocarbon solvents, *J. Hydro.* v. 149., 137-161.
- Chapelle, F. H., 1997, Identifying redox conditions that favor the natural attenuation of chlorinated ethenes in contaminated ground-water systems, *Proceedings of the symposium on natural attenuation of chlorinated organics in ground water*, 19-22.
- Clements, J.B., Lewis, R.G., 1988, Sampling for Organic Compounds, Chapter 20 in *Principles of Environmental Sampling*, L. H. Keith, ed., American Chemical Society, Washington, DC, 1988, 287-296.
- Ellis, D.E., 1997, Intrinsic remediation in the Industrial Marketplace, *Proceedings of the symposium on natural attenuation of chlorinated organics in ground water*, 129-132.
- EU Legislation in Force., 1994, Directives, relevant for EIAs concerning Air Pollution Control Council Directive 94/63/EC.
- Hunkeler, D., Aravena, R., and Butler, B., 1999, *Environ. Sci. Technol.*, v. 33, 2733-2739.
- Manahan, S.E., 1979, *Environmental Chemistry*, Willard Grand Press, 23-25.
- Sherwood-Lollar, B., Slater, B., Ahad, G.F., Sleep, B., Spivack, J., Brennan, M., and MacKenzie, P., 1999, *Org. Geochem.* v. 30, 813-820.
- Strauss, P., 1998, Natural attenuation of organic compounds, <http://www.org/pubs/fsna2o.html>.
- U.S. EPA, 1992, 40 CFR 51.100, Federal Register: Control of Air Pollution.
- U.S. EPA, 1992, Method 524.2 revision 4.0, Methods for the determination of Organic Compounds in Drinking Water.
- USGS News, 1999, VOC Levels in U.S. Groundwater are often low. <http://twri.tamu.edu/watertalk/archive/1999-Nov/Nov-1.3.html>.

투 고 일	2003년 9월 9일
심 사 일	2003년 9월 10일
심사완료일	2003년 10월 6일

윤옥, 조병옥, 음철현, 성익환

윤옥

한국지질자원연구원 지하수지열연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel: 042-868-3118
E-mail: yunuk@kigam.re.kr

조병옥

한국지질자원연구원 지하수지열연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel: 042-868-3083
E-mail: cbw@kigam.re.kr

음철현

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel: 042-868-3675
E-mail: cheum@kigam.re.kr

성익환

한국지질자원연구원 지하수지열연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel: 042-868-3082
E-mail: sih@kigam.re.kr