

충청남도 지역의 VOCs를 중심으로 한 지하수오염 실태

A Study on The Groundwater Contamination Focused on VOCs in Chung-Nam Area

이창균(Chang-Gyun Lee)* · 장순웅(Soon-Woong Chang)**
유지택(Jee-Taek Yoo)* · 임봉수(Bong-Soo Lim)***

요 약 : 본 연구는 충청남도 지역의 휘발성 유기화합물질(VOCs)에 의한 지하수 오염실태를 1996년 5월부터 1998년 5월까지 2년여에 걸쳐 조사하였다. 지역별 VOCs 검출률은 공업지역 >농공단지 >주유소 >주변 가정 지하수 >도심 지역 순으로 높았고, 초과율은 공업지역 >주유소 >농공단지 >주변 가정 지하수 >도심지역 순으로 높았다. 천안공업지역 지하수인 경우 benzene, TCE만이 음용수 수질기준을 초과하는 오염도를 보여주고 있다. 그리고 농공단지 지하수에서는 TCE가 최고 48.152 mg/L의 농도로 검출되는 등 평균적으로 3.107 mg/L로 국내 음용수 수질기준을 100여배 초과하는 높은 오염도를 보여주고 있으며 전반적으로 다른 VOCs의 농도도 높아 매우 우려할 만한 지하수 수질상태를 보여주고 있다. 그러나 주변 가정 지하수나 도심지역 지하수에서는 음용수 수질기준을 초과하는 항목이 없어 아직까지 지하수오염이 우려할만한 수준은 아니지만, 공업지역 및 농공단지 지하수 오염실태를 볼 때 지하수오염은 계속적으로 진행될 것이고 오염된 지역은 적절한 복원작업이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

Abstract : This research was investigated to examine the status of groundwater contamination in Chung-Nam area over 2 years from 1996 May to 1998 May. The results show that the overall detection rates of VOCs (volatile organic compounds) by region were as followed: industrial region > agricultural & industrial complex region > gas station region > around industrial region > downtown region, and excess rates of those were as followed: industrial region > gas station region > agricultural & industrial region > around industrial region > downtown region. Benzene and TCE of VOCs examined in Chon-An industrial region exceeded drinking water standard. At the agricultural & industrial complex region, the observed mean concentration of TCE was 3.107 mg/L and TCE was also detected at 48.152 mg/L which is 100 times higher than drinking water standard, and other VOCs were also observed at higher concentrations as well. Based on our studies, It is concluded that appropriate remedial action should be performed to protect further groundwater contamination and to restore groundwater quality in Chung-Nam area.

서 론

최근 산업활동의 급성장에 따라 상당량의 유해오염물질들이 자연환경으로 유출되고 있는데 이중에서도 유기용매제인 Tetrachloroethylene(PCE), Trichloroethylene(TCE) 등을 포함한 VOCs(volatile organic compounds)도 광범위한 사용으로 인해 관심의 대상이 되고 있다.

Volatile Organic Compounds(VOCs)는 대부분 난분해성 유기물질로 상온, 상압하에서 휘발성 액체로 용제, 그리스 제거제 및 합성화학물질 제조원료로 사용되는 벤젠류, 알켄류, 염화알켄류 및 염화벤젠류 등 비교적 휘발성이 큰 유기화학물질을 총칭한다(Collahan, 1979). 이들 VOCs에 의한 오염은 지표수원, 지하수원, 처리식수 등 공공 식수계 전반에 걸쳐 광범위하게 발견되고 있으며 대부분의 VOCs는 발암을 유발하는 유독성

유기화학물질로 판명되고 있어 전세계적으로 음용수의 휘발성 유기물질 규제지침 및 법령제정이 강화되고 있는 추세이다.

최근들어 국내에서도 폐광산, 유류 및 유해물질 저장시설, 공장·산업시설, 비위생적 매립시설 등지에서 토양 및 지하수 오염문제가 우려되고 있는데, 지하수법(93.12)과 토양환경보전법(96. 1)을 제정·시행함으로써 더욱 더 관심을 모으고 있다. 환경부가 밝힌 국내 VOCs 배출실태(97)에 따르면 우리나라 VOCs 배출총량중 페인트, 합성도료등을 포함한 도장산업의 배출량이 46.2%로 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 자동차 관련부분 34.5%, 주유소 및 유류저장시설 10.6%, 인쇄소 3.3%, 세탁소 2.1% 순으로 다양한 오염원이 있는 것으로 보고된 바 있다.

음용수에서의 유독성 유기오염물질의 측정과 인체영향에 대한 안전성평가는 선진국에서 큰 관심과 연구의 대상이 되어 왔으며 1974년 미국은 전국 유기물질 측정조사를 실시하여 120여종의 유해성 오염물질을 확인하였다. 이들 VOCs의 음용수 수질기준은 1987년 미국환경보호청(USEPA)에서 VOCs에 대해 최대오염허용기준치(Maximum Contaminant Level: MCL)와 최대오염허용기준치목표(Maximum Contaminant Level Goal:

* 충청남도 보건환경연구원(Institute of Health and Environmental Research, Taejon, Korea)
** 경기대학교 환경공학과(Department of Environmental Engineering, Kyonggi University, Suwon, Korea)
*** 대전대학교 환경공학과(Department of Environmental Engineering, Taejon University, Taejon, Korea)

MCLG)를 제정하여 규제하고 있으며 세계보건기구(WHO)에서도 VOCs에 대한 지침서를 설정하고 있다(USEPA, 1984; WHO, 1984).

Table 1에서는 VOCs에 대한 선진국과 국내의 음용수 수질기준을 보여주고 있다. 그러나 국내의 음용수 수질기준은 WHO의 기준을 참고로 작성한 것으로 몇몇 항목은 미국환경청(USEPA)에서 정하고 있는 음용수 수질기준보다는 다소 높다. 특히 최근에 지하수 오염원으로 많은 연구가 진행된 염소계 유기용매제인 경우를 보면 알 수 있다. 예를 들어 TCE의 경우 국내 음용수 수질기준은 0.03 mg/L로 규제하고 있으나 미국은 0.005 mg/L로 정하고 있으며 최근에는 TCE의 유해성으로 인해 0.001 mg/L까지 낮춰야 한다는 의견도 제시되고 있다.

최근까지도 국내에서도 지하수오염에 관심을 가지고 있으나 유기화합물에 의한 지하수 오염실태에 대한 조사 및 처리방안에 관한 연구가 상당히 미미한 실정이다.

본 논문에서는 충청남도 지역에서 휘발성 유기화합물질에 의한 지하수오염 실태를 조사하고 지하수의 효율적인 관리 및 정화방안을 제시하고자 한다.

조사대상 지역의 특성

본 연구의 대상지역인 충청남도의 지질은 대규모로 볼 때 선캄브리아기에 속하는 결정질 편암계 및 화강편암암의 분포가 총 50%, 중생대 화강암류 및 퇴적암류가 40%를 차지하고 그

상부에는 제4기 충적층이 얇게 피복되어 있다. 청양군 남쪽 부근, 공주군 중심부 및 아산군에는 호상 편마암이 폭넓게 분포하고 있으며, 청양군, 공주군 북쪽부근, 예산군, 연기군 등에는 화강암질 편마암이 분포하고 있다. 서산과 태안군 지역에선 주로 편암이 많이 분포하나 매우 복잡한 암상의 변화를 보여주고 있다. 논산군, 금산군 및 대전 일대에는 저변성 퇴적암인 옥천계가 분포하고 있다. 보령군과 서천군 및 천안군 일대에 분포하는 중생대 남포층은 역암이나 사암 혹은 셰일로 구성되어 있으며 그 외 신생대 제4기 충적층은 전 지역에 산발적으로 분포하고 있다(송무영, 신은영, 1994).

충청남도 전 지역에는 1984년부터 1992년까지 지하수 개발 및 지하수 수질 관측의 목적으로 350여개 이상의 지하수 관정이 개발되었으며 지역에 따라 다소 다르지만 충적관정의 경우 심도는 약 9 m 내외이고, 개발된 관정의 대부분을 차지하는 암반관정의 경우는 80 m까지 분포되고 있다.

충청남도에 조성된 농공단지는 기계·금속, 화학, 전기·전자, 잡화, 식품 등의 업종을 포함한 약 560여개 업체가 있다. 특히 충청남도내에서도 공단이 밀집되어 있는 천안시 공업지역 중 백석농공단지와 두정공업지역을 선정하여 백석과 두정공업지역내에 설치된 지하수 59정, 공업지역 주변 가정지하수(공업지역과 100-200 m 이내) 31정, 천안 시내 도심지역 60정, 각 시·군의 농공단지를 대상으로 한 15개 농공단지내의 지하수 65정, 그리고 도내 주요도로를 중심으로 지하수를 사용하고 있는 주유소내에 설치된 지하수 383정 등, 총 598건의 지하수를 '96년 5월부터 '98년 5월에 걸쳐 채수하여 휘발성 유기화합물질 10항목(Dichloromethane, Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene, PCE, TCE, 1,1,1-trichloroethane, 1,2-dichloroethane, Carbon Tetrachloride)을 분석하였다.

Table 1. VOCs standard in drinking water (Unit : mg/L)

Item	Nation				
	한국	WHO	미국	일본	호주
계	10	18	20	10	6
(Chlorinated Alkanes)					
1. Carbon tetrachloride	0.002	0.002	0.005	0.002	0.003
2. Dichloromethane	0.02	0.02	0.005	0.02	-
3. 1,2-Dichloroethane	-	0.03	0.005	0.004	0.01
4. 1,1,1-Trichloroethane	0.1	2	0.2	0.3	-
5. 1,1,2-Trichloroethane	-	-	0.1	-	-
(Chlorinated Ethenes)					
6. Vinyl chloride	-	0.005	0.002	-	-
7. 1,1-Dichloroethene	0.03	0.03	0.007	0.02	0.0003
8. 1,2-Dichloroethene	-	0.05	0.07	0.04	-
9. Trichloroethene	0.03	0.07	0.005	0.03	0.03
10. Tetra dichloroethene	0.01	0.04	0.005	0.01	-
(Aromatic Hydrocarbons)					
11. Benzene	0.01	0.01	0.005	0.01	0.01
12. Toluene	0.7	0.7	1	-	-
13. Xylenes	0.5	0.5	10	-	-
14. Ethylbenzene	0.3	0.3	0.7	-	-
15. Styrene	-	0.02	0.1	-	-
16. Benzo[a]pyrene	-	-	-	-	0.00001
(Chlorinated Benzene)					
17. Monochlorobenzene	-	0.3	0.1	-	-
18. 1,2-Dichlorobenzene	-	1	0.6(ortho)	-	-
19. 1,4-Dichlorobenzene	-	0.3	-	-	-
20. Trichlorobenzenes(total)	-	0.02	0.07(1,2,4)	-	-

시료채취 및 분석 방법

시료채수는 3-4분 동안 지하수를 배출시킨 후 시료병(amber screw bottle)에 가득 채워 teflon-lined septa로 막고 스크류 마개로 밀봉한 다음 얼음으로 차게 보관하여 실험실로 운반한 후에 24시간 이내에 분석하였다. 분석방법은 먹는물 수질공정시험법(환경부, 1997)에 준하여 휘발성 유기화합물질 10항목중 5항목(CCl₄, 1,2-Dichloroethane, 1,1,1-Trichloroethane, TCE, PCE)은 용매추출법(Solvent extraction method)으로 추출하였다. 시료 40 mL에 n-hexane 10 mL로 2분여간 shaker로 흔들어 추출한 후, 2 μL를 Ni-63 전자포획검출기(ECD)가 부착된 Varian 3700 Gas Chromatography에 주입하여 분석하였으며 칼럼은 packed column을 이용하였다. 사용되어진 carrier gas는 N₂ 가스로 flow rate은 50 mL/min이었다. 90°C에서 isothermal하게 운전하였고 injector와 detector의 온도는 각각 150°C, 280°C였다.

다른 5항목(Dichloromethane, Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene)은 Purge & Trap(Tekmar 3000) 장치를 이용하여 불꽃이온화 검출기(FID)가 부착된 Perkin-Elmer GC를 사용하였고 칼럼은 Vocol capillary column(30 m×0.53 mm I.D., 3 μm film)을 이용하였다. Oven 온도는 40°C에서 150°C로 점차적으로 높여주었고 injector와 detector의 온도는 각각 220°C,

250°C로 운전하였다.

결과 및 고찰

지역별 지하수중의 VOCs 오염현황

음용수중의 휘발성 유기화합물질에 의한 오염현황과 관리실태를 조사하고 지하수의 효율적인 보전 및 관리를 도모하기 위해 충청남도를 중심으로 한 공업지역과 농공단지 및 주유소 근처 지하수, 그리고 주변 가정 지하수와 천안 도심지역중의 지하수를 채수하여 휘발성 유기화합물질을 분석하였다.

천안공업지역내 지하수와 그 주변 가정 지하수 그리고 천안 도심지역 등에서 검출된 VOCs의 항목별 농도와 검출비율은 각각 Table 2~4에 요약되어 있고 Figure 1에서는 지역별 검출된 VOCs 분포를 보여주고 있다. 전반적인 VOCs의 분포를 살펴보면 천안공업지역의 지하수인 경우 TCE가 검출된 VOCs 중의 40.0%를 차지하고 그 다음은 benzene 32.0%, 1,1,1-TCA 21.3% 순이었다. 농공단지 지하수 역시 TCE가 검출된 VOCs의 38.5%를 점유하고 있어 가장 높은 비율을 보이고 있고, 1,2-DCE 26.8%, 1,1,1-TCA 11.5% 순이었다. 주유소 지하수인 경우 천안공업지역과 농공단지 지하수와는 달리 dichloromethane 41.8%, benzene 27.0%, xylene 23.3%순의 비율을 나타냈다.

천안공업지역의 지하수 분석결과를 자세하게 살펴보면, benzene, 1,1,1-TCA와 TCE가 검출된 VOCs의 대부분을 차지하고 있는데, benzene의 경우 평균농도 0.118 mg/L(0.014~0.339 mg/L)으로 음용수 수질기준을 10배 이상 초과하고 있었고 1,1,1-TCA도 평균 0.045 mg/L 정도로 검출되었다. TCE는 평균 0.13 mg/L(0.002~1.675 mg/L)로 음용수 수질기준인 0.03 mg/L보다는 4배 이상의 높은 농도였고 조사지역에서 50.8%의 검출률을

Table 4. Detection and excess rate of VOCs in sampled groundwater by region.

Classification Region	No. of Well	No. of detection (%)	No. of excess (%)	
				Baikseog
Industrial region	Dujeong	38	22 (57.9)	16 (42.1)
	Total	59	38 (64.4)	30 (50.8)
Around industrial region		31	8 (25.8)	4 (12.9)
Downtown region		60	7 (11.7)	2 (3.3)
Agricultural & industrial complex region		65	28 (43.1)	11 (16.9)
Gas station region		383	144 (37.6)	65 (17.0)
Sum		598	225 (37.6)	112 (18.7)

보였고 16.9%가 음용수 수질기준을 초과하는 것으로 나타났다.

천안공업지역중에서도 백석공업단지의 경우, 특히 TCE는 평균농도가 0.059 mg/L로 66.7%의 검출률과 19.0%의 음용수 수질기준 초과율을 보였으며, 두정공업지역에서는 평균 0.191 mg/L로 42.1%의 검출률과 15.8%의 초과율을 보여주고 있다(Table 3).

농공단지 지하수인 경우 오염정도가 가장 심해 대부분의 VOCs 들이 음용수 수질기준을 초과하는 것으로 조사되었다. TCE가 평균 3.107 mg/L(0.007~48.152 mg/L)로 음용수 수질기준을 100 배 이상 초과하는 높은 오염도를 보여주고 있으며 다른 VOCs 에 비해서도 상대적으로 높은 농도를 보이고 있다. 이는 두정 공업지역과 백석농공단지에 입주해 있는 업체들이 식품, 세척 시설 등과 관련된 업종으로서 이들 용매를 자주 사용하고 있기 때문으로 사료된다. 위의 결과는 타지역에서 조사된 TCE 오염정도와 비교해 볼 때 강릉시에서 0.47 µg/L(ND~3.0 µg/L)

Table 2. The average concentration and range of detected VOCs by investigated region (Unit : mg/L)

항목	지역 천안공업지역 지하수		농공단지 지하수		주유소 지하수		주변가정 지하수		도심지역 지하수	
	평균	범위	평균	범위	평균	범위	평균	범위	평균	범위
Benzene (0.01)	0.118	0.014-0.339	0.014	0.014	0.012	0.0010-0.1304	0.033	0.013-0.070	0.042	0.007-0.067
Toluene (0.7)	ND	ND	0.028	0.001-0.077	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Xylene (0.5)	ND	ND	0.005	0.001-0.015	0.0205	0.0006-0.1710	ND	ND	ND	ND
Ethylben-zene (0.3)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
PCE (0.01)	ND	ND	0.020	0.002-0.030	ND	ND	ND	ND	0.008	ND-0.008
TCE (0.03)	0.130	0.002-1.675	3.107	0.007-48.152	ND	ND	0.005	0.004-0.006	0.024	0.016-0.028
1,1,1-TCA (0.1)	0.045	0.002-0.343	0.371	0.001-1.169	ND	ND	0.005	0.002-0.008	ND	ND
1,2-Dichloroethane (0.03)	ND	ND	0.036	0.001-0.256	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Dichlorome-thane (0.02)	ND	ND	0.037	0.0030-0.105	0.0747	0.004-1.5520	ND	ND	ND	ND
CCl ₄ (0.002)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Sample No. (598)		59		65		383		31		60

Table 3. The concentration of detected VOCs in industrial, around industrial and downtown region (unit : mg/L)

Region	Benzene	PCE	TCE	1,1,1-TCA	1,2-DCE	CCl ₄	Remarks
Industrial region	Baikseog 0.157 (ND-0.339)	ND	0.059 (ND-0.510)	0.003 (0.002-0.343)	ND	0.004 (ND-0.004)	Sample: 16
	Dujeong 0.080 (ND-0.161)	0.002 (ND-0.002)	0.191 (ND-0.737)	0.014 (0.002-0.039)	0.028 (ND-0.028)	ND	22
Around Industrial region	0.033 (ND-0.070)	ND	0.005 (ND-0.006)	0.005 (ND-0.008)	0.037 (ND-0.037)	ND	8
Downtown	0.042 (ND-0.067)	0.008 (ND-0.008)	0.024 (ND-0.067)	ND	ND	ND	7

충청남도 지역의 VOCs를 중심으로 한 지하수오염 실태

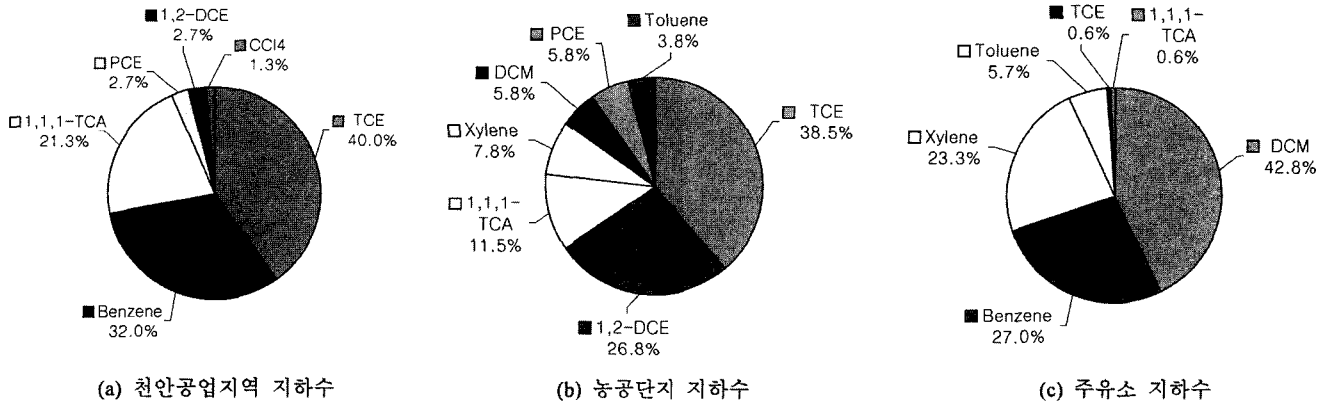


Figure 1. VOCs detection percentage by region.

(이주광 등, 1996), 대구시 3.8 µg/L(이선영, 박갑성, 1991), 서울시 0~1.74 µg/L(이상호,김영란, 1994)에 비해서 매우 높은 농도분포를 보이고 있어 농공단지 지하수 수질은 매우 우려할 만한 수준으로 판단된다. 미국 EPA인 경우는 TCE의 인체에 대한 유해성으로 인해 TCE의 음용수 수질기준을 WHO보다 낮은 0.005 mg/L로 정하고 있는 것을 볼 때 적절한 대책이 요구되어진다. 그러나 주변가정 지하수나 도심지역 지하수에서는 평균 0.005 mg/L 이하로 검출되어 국내 음용수 수질기준을 밑도는 농도로 조사되었다.

1,1,1-TCA 또한 농공단지 지하수중에서 평균 0.371 mg/L (0.001~1.169 mg/L)로 음용수 수질기준보다 4배 정도 초과하는 것으로 나타났는데 백석농공단지의 경우 0.002~0.343 mg/L의 범위로 42.9%의 검출률과 9.5%의 초과율을, 두정공업지역의 경우에는 0.002~0.039 mg/L의 농도로 18.4%의 검출률을 보였으나 음용수 수질기준을 초과하는 곳은 없었다. 그러나 주변 가정지하수에서는 19.4%의 검출률을 보였으나 평균 0.005 mg/L로 정량한계 수준에 불과한 농도였다. 이러한 결과는 조사대상 지역별에 입주해 있는 업종의 차이와 사용 유기용매의 종류에 그 원인이 있는 것으로 여겨지며 주유소내 지하수 중에서 1,1,1-TCA가 검출되지 않은 점이 이를 뒷받침해주고 있다.

Benzene은 공업지역 지하수중에서 특히 백석농공단지에서는 평균 0.157 mg/L로 57.1%의 검출율을, 두정공업지역에서는 평균 0.08 mg/L로 40.7%의 검출률을 보였으며 검출된 지하수는 모두 음용수 수질기준(0.01 mg/L)을 평균적으로 백석농공단지에서는 15배, 두정공업단지에서는 8배 이상 초과하는 높은 농도였다. 반면 백석농공단지 주변 가정 지하수 11정중 3정에서는 0.013~0.070 mg/L와 두정공업지역 주변 가정 지하수정에서는 0.013 mg/L 정도인 낮은 농도로 검출된 점은 benzene이 공단 입주업체에서 주로 사용되는 유기용매임을 반증하는 결과라 할 수 있다.

천안의 백석과 두정공업지역내의 지하수와 그 주변 가정 지하수 및 도심지역의 지하수 수질을 비교해보면 입주 업체수와 업종이 유사함에도 불구하고 백석농공단지 지하수중의 VOCs 검출률과 초과율이 각각 76.2%와 66.7%이었고 그 주변 가정 지하수에서는 검출률 54.5%와 초과율이 27.3%인 반면, 두정공업지역에서는 VOCs 검출률과 초과율이 각각 57.9%와 42.1%

이었고, 주변 가정지하수에서는 검출률 10.0%와 초과율 5.0%를 나타내었다(Table 4). 따라서 전체적으로 백석농공단지 지하수질이 두정공업지역에 비해 오염이 더 진행되었다고 볼 수 있다. 이는 백석농공단지에서 사용되는 유기용매 관리상태에 기인할 뿐만 아니라 백석농공단지 주변 주거지역이 공단과 일정간격(100~200 m)으로 평행한 형태로 위치하고 있어 지하수 흐름방향에 의해 일정지역에 집중분포되어 있는 것으로 추정되며 두정공업지역의 경우는 공단주변 주택들이 공단을 기점으로 분산되어 있기 때문으로 사료된다. 또한 백석농공단지 주변은 천안시 쓰레기 위생매립장이 공사중이며 천안 제3공단 조성사업이 진행중에 있어 향후 오염유발 요인이 더욱 증가되고 있는 실정이다. 그리고 천안시내 도심지역 지하수에서의 VOCs 검출률과 초과율은 각각 11.7%와 3.3%로 이는 인근에 위치한 세탁소와 세차장등에 의해 오염된 것으로 판단된다.

전체 598개 시료중에서 본 연구에서 분석한 휘발성 유기화합물질 10항목중 1개 이상이 검출된 전체 VOCs 검출률은 37.6%이었고 초과율은 18.7%로 나타났다. 이를 지역별로 정리하면 Table 4와 같다. 지역별 VOCs 검출률은 공업지역 > 농공단지 > 주유소 > 주변 가정 지하수 > 도심지역 순으로 높았고, 초과율은 공업지역 > 주유소 > 농공단지 > 주변 가정 지하수 > 도심지역 순으로 높았다.

지역(시·군)별 주유소 지하수중의 VOCs에 의한 오염현황

각 시·군의 주유소 근처 지하수 수질분석 결과, 휘발성 유기화학물질의 검출률과 현행 음용수 수질초과율은 Table 5에 요약되어 있는데, VOCs 검출률이 가장 높은 지역은 보령지역으로 76.5%이었으며, 공주 65.9%, 금산 42.9% 순이었다. 음용수 수질기준을 초과한 지역은 아산군이 30.8%로 타 시·군 지역에 비해 높은 비율을 보여주고 있으며, 그 다음으로는 연기 18.8%, 당진 22.0% 순이었다.

Figure 2에서는 각 시·군별 검출된 VOCs의 항목별 농도분포를 보여주고 있다. Dichloromethane(DCM)의 경우 대부분의 지역에서 국내 음용수 수질 기준 0.02 mg/L를 초과하는 오염정도를 보여주고 있는데 특히 천안, 예산, 금산에서는 최고 1 mg/L 이상의 농도로 검출된 곳도 있어 음용수 수질기준을 50배 이상 초과하는 것으로 조사되었다. 그러나 주유소 인근 가

Table 5. VOCs detection and excess rate for the groundwater in gas station by region (Unit : No., %)

Region	VOCs		DCM		Benzene		Toluene		Xylene		
	No.	D	E	D	E	D	E	D	E	D	E
Chonan	22	8(36.4)	4(18.2)	36.4	18.2	18.2	-	-	-	4.5	-
Kongju	44	29(65.9)	8(18.2)	38.6	4.5	27.3	13.6	13.6	-	27.3	-
Poryong	17	13(76.5)	1(5.9)	52.9	-	35.3	5.9	-	-	23.5	-
Nonsan	43	14(32.6)	7(16.3)	16.3	11.6	27.9	7.0	2.3	-	2.3	-
Sosan	36	15(41.7)	6(16.7)	38.9	8.3	16.7	11.1	8.3	-	38.9	-
Asan	26	8(30.8)	8(30.8)	30.8	23.1	19.2	3.8	-	-	-	-
Yongi	32	11(34.4)	6(18.8)	21.9	12.5	9.4	3.1	3.1	-	12.5	-
Kumsan	14	6(42.9)	2(14.3)	42.9	14.3	35.7	-	-	-	28.6	-
Hongsong	28	8(28.6)	5(17.9)	28.6	14.3	3.6	3.6	10.7	-	17.9	-
Chonyang	20	7(35.0)	2(10.0)	30.0	10.0	25.0	-	-	-	10.0	-
Yesan	22	8(36.4)	4(18.2)	27.3	9.1	3.8	13.6	4.5	-	31.8	-
Tangjin	50	12(24.0)	11(22.0)	11.1	-	-	-	-	-	11.1	-
Sochon	11	3(27.3)	1(9.1)	18.2	9.1	-	-	-	-	27.3	-
Puyo	18	2(11.1)	-	24.0	12.0	10.0	2.0	-	-	4.0	-
Total	383	144(37.6)	65(17.0)	29.2	11.7	18.5	5.5	3.9	-	15.9	-

*D : detection rate, E : excess rate

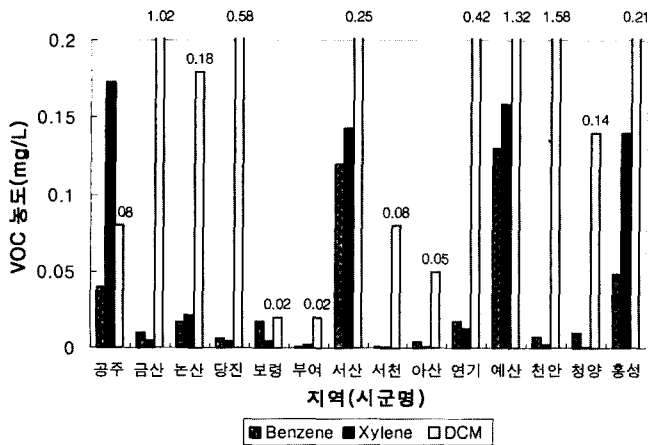


Figure 2. The VOCs distribution of groundwater in gas station by region.

정 지하수에서는 전혀 검출되지 않아 주유소에서의 유류저장 및 관리실태의 부실함으로 인한 요인으로 추측된다. 그리고 benzene 및 xylene은 DCM에 비해서 오염농도는 낮지만 예산, 서산, 공주, 홍성 등지에서는 우려할 만한 농도로 검출되었다.

오염된 지하수 정화방안

본 연구의 조사결과 충청남도 천안공업지역 및 농공단지 주변 지하수에서는 음용수 수질기준을 훨씬 초과하는 오염농도를 보여주고 있어 유해오염물질에 의한 지하수 오염문제가 더 이상 간과하기 어려운 정도이며 충남 천안의 지하수 수질분석 결과를 볼 때 공단이 밀집해 있거나 주유소 등이 있는 지역에서는 지하수오염이 계속적으로 진행되고 있으리라 추측된다.

그리고 충남지역의 지하수 오염농도 및 분포를 볼 때 이미 불포화층(Vadose zone)에도 상당히 오염이 진행된 것으로 추정된다. 특히 대표적인 유기용매제인 TCE는 농공단지 주변 지하수에서는 평균적으로 3 mg/L 이상의 오염농도를 보여주고 있

고 최고 48.152 mg/L까지 검출된 결과를 볼 때 적절한 정화방안이 고려되어야 한다고 판단된다. 그리고 오염지역에 맞는 정화방안을 제시하기 위해서는 그 지역의 수리경사, 지층의 투수성, 지하수류의 방향등을 포함한 수리학적인 요인과 오염물질의 분포확산과 그 농도 및 오염장소등의 특성등에 대한 사전조사가 요구되어진다고 할 수 있다.

오염된 지하수를 정화하기 위한 복원기술로는 물리·화학적 공정 및 생물학적인 공정등이 있다. 그러나 본 조사결과를 바탕으로 할 때 가장 오염정도가 심한 농공단지 및 공업지역에서 유기용매제인 TCE가 가장 큰 부분을 차지하였고 그 외에 benzene, 1,2-DCE 등이 주요 오염물질로서 최근까지의 연구결과를 볼 때 생물학적 처리공정을 적용하는 것이 경제적인 측면에서 효율적인 복원방법이라 판단된다. 이러한 결론을 유도할 수 있는 근거로는 TCE를 제외하고는 다른 VOCs의 오염농도가 그리 높지 않고 오염물질의 분포로 보아 대부분의 오염물질들 즉, Benzene, Toluene, Dichloromethane 등은 생물학적으로 분해가 가능하기 때문이다.

결론적으로 충청남도 지역의 지하수 오염현황은 국내 다른 지역에서의 휘발성 유기화합물에 지하수 오염의 가능성을 예측해하고 있다. 그리고 타지역에서도 지하수 오염에 대한 기초조사가 실행되어야 한다고 판단되고 그 지역에 맞는 적절한 관리방안 및 이미 지하수 오염이 발견된 지역에서는 복원작업이 진행되어야 할 것이다.

결 론

충청남도 지역의 VOCs에 의한 지하수 오염현황을 조사하기 위해서 천안을 중심으로 한 공업단지, 농공단지, 주유소 및 도심지역 등에서의 지하수를 주기적으로 분석하였고, 그 결론은 다음과 같다.

1. 지역별 오염현황 실태를 살펴보면 농공단지 지하수의 오

염실태가 우려할 만한 수준으로 조사되었고 그 다음으로는 천안공업지역, 주유소 순이었다. 그러나 공단주변 가정 지하수나 도심지역 지하수에는 아직까지 오염수준이 미미한 것으로 조사되었다.

2. 천안공업지역 지하수에서는 주로 Benzene, 1,1,1-TCA, TCE등이 검출되었는데, TCE, benzene인 경우는 음용수 수질기준을 평균적으로 4~12배 정도 초과하였다. 천안공업지역에서 검출된 VOCs 비율을 보면, TCE 40%, benzene 32%, 1,1,1-TCA 21.3% 순이었다.

3. 농공단지 지하수인 경우에는 VOCs에 의한 오염이 가장 심했고, TCE인 경우 평균 3.1 mg/L로 국내 음용수 수질기준인 0.03 mg/L에 100여배, 그리고 미국 EPA 기준인 0.005 mg/L에는 600여배 이상 높은 농도였다. 그리고 검출된 최고 농도는 48.152 mg/L이나 되었다. 그리고 benzene, PCE, 1,1,1-TCA, 1,2-dichloroethane, dichloromethane 등이 음용수 수질기준을 초과하는 것으로 조사되었다. 농공단지에서의 검출된 VOCs 비율은 TCE 38.5%, 1,2-DCE 26.8%, 1,1,1-TCA 11.5% 순이었다.

4. 주유소 지하수의 오염현황은 천안공업지역 및 농공단지 지하수 오염현황에 비해서는 우려할 만한 수준은 아니었다. 그러나 dichloromethane인 경우 평균 농도 0.0747 mg/L로 국내 음용수 수질기준을 5배 초과하는 오염도를 보여주고 있다. 주유소지역에서 검출된 VOCs 비율은 dichloromethane 42.8%, benzene 27.0%, xylene 23.3% 순이었다.

5. 충청남도 지역별(시·군) 주유소 주변 지하수 오염현황을 살펴보면 천안을 포함한 14개 시·군 모든지역에서 benzene, xylene, dichloromethane 등이 검출되었으며, 특히 dichloromethane인 경우 천안, 예산, 금산에서는 최고 1.55 mg/L, 1.32 mg/L, 1.02 mg/L로 검출되는 등 국내 음용수 수질기준인 0.02 mg/L와 비교할때 기준치를 상당히 초과하는 오염도를 보여주고 있다. 보령, 공주에서는 VOCs 검출율이 76.5%, 65.9%로 매

우 높은 비율을 보이고 있고, 아산에서는 음용수 수질기준 초과율이 30.8%나 되었다.

6. 충청남도 지역의 전반적인 지하수 오염실태를 고려할 때 산업체 및 주유소 등지에서 유기화합물에 의한 오염방지 대책이 미흡했다고 판단되며 지하수를 공업용수 또는 음용수로 이용하기 위해서는 적절한 정화방안이 요구되어진다. 그리고 오염물질의 분포를 볼 때 천안공업지역 및 공단지역 지하수 오염성상에서 위험할 수준의 오염농도를 보이고 있는 TCE를 비롯한 다른 VOCs로 오염된 지역을 복원하기 위한 방안이 강구되어야 할 것이다.

참고문헌

- Collahan, M., 1979, Water-related Environmental Fate of 129 Priority Pollutants, EPA-440/479-029, U.S. EPA, Washington, D.C.
- U.S.Environmental Protection Agency, 1984, National Primary Drinking Water Regulations Volatile Synthetic Organic Chemicals: Proposed Rulemaking, Fed. Reg., 49, p.24330-24355.
- WHO, 1984, Guidelines for Drinking Water Quality, 1, 58-60.
- 환경부, 먹는물 수질공정시험법, 1997.
- 건설교통부, 지하수법, 1994.
- 환경부, 토양환경보전법, 1996.
- 환경부, 환경백서, 1998.
- 송무영, 신은영, 1994, 한반도 중부권 지각물질의 구조와 물성연구 (4):충남도 지하수 개발 현황과 지질특성, The Journal of Engineering Geology, 4(2), p.153-168.
- 이주광, 이승목, 윤이용, 1996, 강릉시 식수계층 유기화합물질(VOCs)의 분포, 한국수질보전학회지, 12(3), p.237-243.
- 이선영, 박갑성, 1991, 대구지역 식수의 휘발성 유기화합물질(VOCs) 오염, 한국수질보전학회지, 7(3), p.145-151.
- 이상호, 김영란, 1994, 지하수 VOCs 오염 및 처리대책에 관한 연구, 서울시정연구, 2(2), p.100-119.