

국내 안티몬폐기물에 의한 수질화학적 오염 사례연구

정찬호*

대전대학교 지반설계정보공학과

Case Study of Hydrochemical Contamination by Antimony Waste Disposal in Korea

Chan Ho Jeong*

Department of Geotechnical Design Engineering, Daejeon University

이 연구는 충남 연기군 원성리에 소재하고 있는 안티몬공장에서 산업폐기물로 발생된 안티몬 폐기물을 매립지의 토양수, 인접하천수, 인근마을 지하수에서 안티몬을 포함한 일부 중금속에 의한 오염특성을 밝히고자 수행되었다. 하지만 현재 매립지는 수년전에 폐기물은 수거하여 다른 지역으로 옮긴 후 복토된 상태이다. 본 연구를 위하여 조사지역에서 지하수, 하천수, 토양수 총 35점을 채취하였고 대조마을에서 2점의 지하수를 채취하였다. 연구결과 매립지 농지의 토양수에는 안티몬의 농도가 대조마을 지하수보다 훨씬 높은 48.75~74.81 ppb의 범위를 보여, 이는 주요 선진국 음용수 수질 기준치를 최고 수 십 배 상회한다. 매립지와 접한 하천수 3지점, 마을지하수의 1곳, 안티몬공장내 지하수 1점에서도 안티몬의 농도가 비교적 높게 검출되었다. 철, 망간 등의 중금속이 토양수 및 하천수에서 최고 6.5 ppm, 7.3 ppm으로 매우 높은 값을 보인다. 그러나 그 외 중금속은 일부 토양수, 하천수, 지하수에서 대조마을 지하수보다 높은 값을 보이지만 수질기준치에 비해 상당히 낮은 값을 보인다. 모든 물 시료의 화학적 유형은 Ca - HCO₃ 유형에서 Ca - (Cl + SO₄ + NO₃) 유형까지 넓게 분포한다. 토양수가 Ca - SO₄의 유형을 보이는 것은 안티몬이 매립되었던 폐기물의 황산화물의 함유에 기인하는 것으로 보인다. 일부지하수는 칼륨과 질산염 성분의 높은 값을 보여 비료와 생활오염물질에 의한 오염을 보인다. 결론적으로 폐기물을 매립지의 복토층 아래 토양내 아직도 상당량의 안티몬 등 중금속이 존재하며, 이들이 인근 하천 및 지하수를 오염시키고 농작물까지 영향을 미칠 수 있으므로 적절한 방재 대책을 세워야 할 것이다. 본 연구는 국내 안티몬 폐기물에 의한 수질오염사례에 대한 최초의 연구결과로 환경부에서도 국가적 수질관리 차원에서 안티몬에 대한 대책을 세워야 할 것이다.

주요어 : 안티몬, 중금속, 매립지, 지하수, 하천수, 토양층, 복원

This study was carried out to investigate the contamination characteristics of surface water, soil water and groundwater around and in antimony waste landfill site in Wonsung-ri, Yeonki-kun, Chungnam. The waste disposed in the study was excavated and transported to the other site in several years ago. For this study, we collected 35 water samples including groundwater, soil water and surface in the study site and also collected 2 groundwater samples from a comparison site. The data of chemical analysis of soil water samples show the antimony concentration of 48.75~74.81 ppb, which is much higher than groundwater in a comparison site and is highly excess than regulation level for a drinking water of some advanced countries. A relatively high antimony concentration was detected in three stream water samples nearby landfill site and two groundwater samples. Fe and Mn contents in soil water and stream water were measured as maximum 6.5 mg/L and 7.3 mg/L, respectively. Although other heavy metals of water samples in the study site are higher concentration than water sample of comparison site, their absolute levels are lower than regulation level for a drinking water. The chemical data of water samples are plotted widely from Ca - HCO₃ type to Ca - (Cl + SO₄ + NO₃) type. Some groundwater show high contents of potassium and nitrate, which would come from fertilizer and sewage. Conclusively, some heavy metals including antimony have been still remained under the soil surface of the landfill site in the past. These metals have leaked out into

*Corresponding author: chjeong@dju.ac.kr

nearby stream and groundwater system, and threaten the ecology, crops and the health of residents in this site. Therefore, the government have to prepare the strategy to prevent the diffusion of heavy metals into aquatic environment and have to process the reclamation work for contaminated site. It is also necessary to make a regulation level of the antimony concentration for a drinking water and soil environment in Korea.

key words : heavy metal, antimony, landfill, groundwater, stream water, soil layer, reclamation

서 론

이 연구는 충남 연기군 전의면 원성리에 소재하고 있는 안티몬공장에서 산업폐기물로 발생된 안티몬 폐기물을 인근농지에 매립한 후 폐기물로 인한 인근 하천수, 토양수, 지하수의 수질에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수행되었다. 원성리에 소재하고 있는 안티몬 공장의 제련 폐기물 8만여 톤을 78년부터 98년까지 공장부지와 인근 논에 매립하였다. 현재 매립된 폐기물은 발굴하여 다른 지역으로 운송하여 산업폐기물 처리기준에 따라 매립 처분되었고, 굴착된 매립지는 다른 토양으로 객토하여 농작물을 재배하고 있는 상황이다.

안티몬(Sb)은 원자번호가 51번이고 원자량이 121.7인 무거운(비중: 6.691g/cm^3) 금속원소이며 친동원소이다. 안티몬은 3종류의 원자가(3+, 5+, 3-)가 존재하는데 Sb^{3+} 이온으로 나타나는 경우가 가장 흔하다. 안티몬은 암석내 평균함량이 0.2 ppm 정도이다.

안티몬은 전지와 자동차 배어링제조, 그리고 열전대 제조등 전자산업에 필요한 다양한 합금으로 사용된다. 안티몬은 다른 성분과 복합물로 고속컴퓨터칩제조, 의학용도, 전자현미경에 쓰이며, 그 외 불꽃탄, 탄약, 세라믹, 유리, 화염, 지연제, 고무 경화제, 약품살균제등에도 쓰인다. 지표 환경하에서 안티몬의 이동은 주로 구리와 납을 녹이는 과정, 석탄연소, 자동차배기, 하수슬러지를 통해서 일어난다(한국지질자원연구원, 2001).

안티몬은 비필수 미량원소로 분류되며, 비교적 독성이 강한 것으로 알려져 있다. 자연에서는 황이나 비소와 함께 산출되는 것이 흔하다(Merian, 1991; Reimann and Caritat, 1998). 소량의 안티몬은 식물성장에 도움을 줄 수 있지만 다량의 경우 비소(As)나 납(Pb)보다 더 유독하다. 고대로부터 안티몬을 함유한 광물을 이용하기 시작하였고, 그 중 토주석은 사람을 독살할 수 있다. 안티몬화합물을 함유한 증기는 인체에 흡입된 후 기침, 화학성 폐염, 위장소화장애, 심지어 생식기능저하와 신경계통의 질병을 유발할 수 있다(임연풍, 1996). 일반적으로 Sb^{3+} 복합물이 Sb^{5+} 복합물보다 독성이 더 강하다. 안티몬에 의한 만성중독 증상은 비소와 유사하며, 특히 심

근위축과 과량일 경우 발암작용도 있다(임연풍, 1996).

이와 같은 독성으로 외국에서는 안티몬에 대한 먹는 물 수질기준치가 설정하여 국민들의 건강을 보호하고 있다. 국가별로 보면 우선 세계보건기구(WHO)에서는 2004년 3판의 “Guidelines for drinking water quality”에서 0.02 mg/L 이하로 권고하고 있다. 미국 환경보호청(EPA)에서는 먹는물 수질기준으로 최대목표농도(MCLG)와 최대허용기준(MCL)에서 모두 0.006 mg/L 이하로 수질기준을 설정하고 있다. 일본은 2003년 먹는물 수질기준으로 안티몬 및 그 화합물의 농도를 0.015 mg/L 이하로 규정하고 있다. 호주의 경우 “Australian drinking water guidelines”의 2004년 6판에 건강상기준치로 0.003 mg/L 이하로 규정하고 있다. 그리고 캐나다에서는 먹는물 수질기준 2006년 6판에 건강상기준치로 0.006 mg/L 이하로 규정하고 있다.

그러나 국내의 수질기준은 하천수와 호수수에 대해서 사람의 건강보호기준으로 0.02 mg/L 이하로 기준하고 있을 뿐 먹는물 수질기준에는 기준치도 설정되어 있지 않다. 아울러 안티몬폐기물의 배출현황과 그로 인한 환경오염과 인체에 미치는 영향에 대한 연구가 전무한 실정이다. 따라서 이 연구는 국내 최초로 안티몬폐기물로 인한 수질환경오염에 관한 연구가 수행되었다는 측면에서 큰 의미가 있을 것이며, 향후 안티몬 연구의 기반이 될 것이다.

연구지역의 지질은 선캄브리아기의 호상흑운모편마암으로 구성되며, 조사지역의 대부분은 충적층으로 피복되어 있다. 연구지역의 위치는 Fig. 1과 같다.

연구방법

시료채취 및 현장수질 측정

원성리지역 지하수, 하천수, 토양수내 안티몬 등 중금속의 농도와 수질화학특성을 분석하기 위하여 하천수 4점(SW1..4), 토양수 2점(SS1, 2), 지하수 25점(G1-1...12, G2-1...10, G3-1..3) 대조마을 지하수 4점(GC1..4)을 시료 채취하였다. 시료채취는 2007년 2월과 6월 두 차례에 나누어 진행되었고, 시료채취지점은 Fig. 1과 같다.

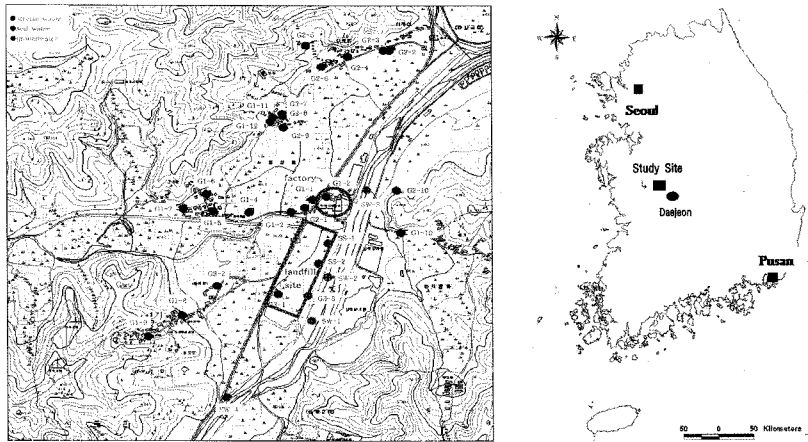


Fig. 1. Location map including the sampling points of surface water, soil water, groundwater in study area.

토양수 2점은 과거에 안티몬공장서 폐기물을 매립한 매립지에서 채취되었고, 하천수 4점은 매립지 우측을 따라 흐르는 소하천에서 채취되었다. 지하수는 사사마을에서 5점, 삼성마을 7점, 고성마을 5점, 죽근마을 5점에서 안티몬공장내 지하수 1점, 소하천 우측마을에서 2점을 채취하였다. 채취된 지하수 시료는 대부분 농업용수, 생활용수 및 음용수로 이용되고 있으며, 대부분 심도가 수 m에서 수십m 정도의 얇은 층적층 혹은 천부형 지하수이다. 대조군 마을은 원성리에서 약 10 km 남서방향의 금사리, 다방 2리의 농촌지역을 선정하였다. 각 대조군 마을에서 지하수 2점을 채취하였다.

채취된 시료는 화학성분 분석을 위하여 현장에서 간이 진공펌프를 이용하여 0.45 μm 셀룰로스 질산염막필터를 통과시켜 부유 물질 등 이물질 제거하였다. 중금속 등 양이온 분석용 시료에 대해서는 유기 작용과 금속 이온들의 침전 및 용기내 흡착 등의 변질을 막기 위해 농질산을 첨가하여 pH를 2 이하로 유지하였다. 중금속 등 양이온성분과 음이온성분 분석용 시료는 60 mL 폴리에틸렌용기에 채취한 후 지퍼 팩으로 밀봉한 후 냉장 보관하여 실험실로 옮겨졌다.

물 시료의 수질화학 특성자료인 온도, 수소이온농도(pH), 산화-환원전위(Eh), 전기전도도, 용존산소 등 시간과 외부조건에 따라 영향을 많이 받는 수질항목은 현장에서 측정되었다. pH는 Orion 290A모델의 휴대용 pH 측정기로 측정하였으며, Eh는 동종의 기기로 백금전극을 이용하여 측정하였다. 온도와 전기전도도는 Orion Model 142의 전기전도도 측정기로 측정하였다. 용존산소 함량은 Orion Model 835 용존 산소 측정기를 사용

하여 측정하였다. 중탄산(HCO₃⁻)의 농도는 0.05 N 농도의 HCl를 사용하여 산중화적정법으로 현장에서 구하였다.

화학성분 분석

물 시료에 대한 주요 양이온 성분은 한국기초과학지원 연구원의 원자흡광분광분석기(Unicam model 989, AAS), 유도결합쌍 프라즈마 원자방출분광분석기(Shimadzu model ICPS-1000III, ICP-AES)로 분석하였고, 중금속 등 미량원소는 유도결합쌍 프라즈마 질량분석기(Fison model PQ III, ICP-MS)로 분석하였다. 중금속 등 미량원소는 ppb단위로 정밀하게 측정되었다. 음이온 성분은 대전대학교에서 Dionex 120모델의 이온크로마토그래피를 이용하여 분석하였으며, 분석된 값은 당량(meq/L)으로 환산한 후, 이온들의 전기적 균형을 계산하여 분석의 신뢰도를 확인하였다.

수질화학 성분 특성

현장수질측정결과

원성리지역에서 채취된 물 시료에 대한 수온, pH, 산화-환원전위(Eh), 전기전도도, 용존산소량 등의 현장 수질측정결과는 Table 1에 제시되어 있다.

소하천수(SW1...4)의 pH는 6.95~8.18의 범위를 보여 중성내지는 약알칼리성의 특성을 보인다. 토양수(SS1, 2)는 중성내지는 약산성을 보인다. 지하수의 pH는 5.36~8.36의 범위를 보이고 대부분은 7이하의 약산성을 보인다. pH는 산화환원전위(Eh)와 더불어 물속에 용존된 중금속의 화학적 거동에 매우 중요한 요소로 작용한다(정찬호와 정기영, 2000; 정찬호와 김수진, 2002). 모든 물

Table 1. Chemical composition of water samples in the study area.

sample No.	Temp (°C)	pH	Eh (mV)	EC (ms/cm)	DO (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Fe (mg/L)	Sr (mg/L)	Si (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	EN(%)
SW1	8.3	7.18	235	178	12.0	9.97	3.14	17.0	5.45	0.10	0.13	3.52	51.9	24.7	15.2	3.24	0.23	-1.18
SW2	9.0	8.18	253	196	13.6	10.3	3.72	20.0	5.71	6.21	0.15	4.62	59.5	22.0	15.3	9.32	0.44	-0.64
SW3	9.1	7.50	182	197	12.4	10.2	3.42	18.7	5.53	0.39	0.13	3.23	58.0	24.2	15.9	8.72	0.39	-3.61
SW4	16.5	6.95	242	188	12.8	9.06	4.64	18.2	5.14	0.83	0.14	5.74	51.1	21.6	14.3	7.53	0.61	0.05
SS1	17.2	6.45	45	249	6.30	15.7	12.5	33.4	11.2	6.51	0.26	4.25	33.6	127	24.9	6.97	0.44	-2.13
SS2	16.9	6.88	19	277	5.91	12.8	10.3	22.0	7.66	0.70	0.19	1.50	11.2	99	21.2	0.39	0.62	-4.27
G1-1	8.3	8.36	351	256	1.56	15.6	1.92	24.5	6.74	0.01	0.23	7.04	101	12.7	18.4	19.2	0.10	-4.60
G1-2	7.4	5.36	340	524	2.50	16.5	3.51	21.9	6.68	0.03	0.16	5.97	80.9	13.5	20.8	25.2	0.19	-3.13
G1-3	9.1	5.73	284	238	2.22	16.7	3.14	21.3	7.01	0.05	0.16	6.08	70.2	12.6	19.5	21.8	0.23	1.73
G1-4	13.2	6.40	139	236	1.86	12.1	1.10	27.5	7.75	0.33	0.20	13.8	111	6.61	19.4	1.48	0.04	0.58
G1-5	13.9	5.79	288	463	3.80	32.6	2.11	36.7	13.3	0.05	0.38	13.8	54.9	32.9	69.2	95.9	0.06	-3.99
G1-6	7.0	6.23	166	193	3.83	13.2	1.05	14.7	4.40	0.07	0.14	14.4	36.6	14.4	14.8	16.3	0.04	3.52
G1-7	14.4	7.66	200	161	4.03	8.18	1.66	21.1	3.77	0.03	0.18	11.5	82.4	4.53	5.4	3.25	0.19	3.11
G1-8	13.8	6.69	218	224	4.42	13.8	3.55	18.8	7.73	0.03	0.23	13.2	73.2	10.4	22.4	14.9	0.18	-0.59
G1-9	10.8	6.71	48	188	3.08	9.88	1.45	19.7	5.11	0.16	0.14	15.3	83.9	4.78	10.8	2.63	0.10	1.17
G1-10	11.5	6.70	114	150	4.66	10.9	1.69	12.0	5.57	0.04	0.11	14.6	64.1	5.76	10.7	4.96	0.17	0.61
G1-11	11.3	6.27	122	198	4.88	24.3	8.85	19.1	6.86	0.09	0.25	11.4	33.6	18.1	43.0	27.1	0.09	4.15
G1-12	12.5	6.17	131	224	4.15	20.1	8.65	16.5	6.70	0.05	0.18	11.4	27.5	18.5	43.1	27.3	0.15	-0.48
G2-1	12.8	6.59	125	241	4.80	16.9	3.92	25.0	7.17	0.02	0.16	5.51	104	8.22	11.7	16.3	0.83	3.24
G2-2	12.2	6.27	176	243	5.30	19.8	8.82	17.5	6.85	0.59	0.19	11.5	39.7	18.2	46.7	25.7	0.53	-4.98
G2-3	11.8	5.87	145	228	3.90	13.5	1.78	24.7	9.80	0.14	0.21	7.99	76.3	33.2	27.0	5.24	0.04	-2.08
G2-4	14.2	6.12	116	270	4.00	19.8	16.7	20.8	7.14	0.06	0.16	13.3	73.2	24.1	24.4	32.8	0.24	-0.31
G2-5	8.9	5.40	114	242	2.91	17.4	5.96	27.0	8.99	0.08	0.20	10.7	85.4	24.0	28.7	11.4	0.42	1.39
G2-6	11.0	6.27	136	178	6.10	13.1	10.9	20.4	5.64	0.04	0.13	11.0	79.3	15.5	12.2	9.32	0.61	4.12
G2-7	12.2	6.51	128	163	6.10	10.3	1.92	19.0	5.59	0.03	0.26	12.5	62.5	11.6	13.9	18.9	0.16	-1.64
G2-8	14.3	6.02	155	351	4.30	22.8	17.5	26.3	10.8	0.05	0.21	12.0	83.9	35.7	44.2	33.4	0.06	-3.54
G2-9	11.6	6.97	134	202	5.50	13.3	9.85	17.4	6.71	0.02	0.14	11.5	64.1	25.0	19.0	18.9	0.26	-3.68
G2-10	9.9	6.43	130	69	5.90	6.60	1.45	6.69	3.54	0.02	0.07	12.6	45.8	2.97	4.2	1.67	0.27	-1.10
G3-1	14.5	6.28	228	184	3.80	8.54	2.85	21.6	6.39	0.23	0.19	5.57	45.8	25.7	18.3	22.4	0.54	-3.29
G3-2	15.2	5.99	175	196	4.92	9.60	3.07	22.7	7.94	0.03	0.20	15.0	57.9	20.4	15.7	34.6	0.53	-2.51
G3-3	15.7	6.02	213	504	6.87	11.8	5.71	81.0	11.7	0.35	0.90	5.44	15.3	20.0	15.6	313	0.06	-4.03
GC1	12.1	6.56	204	319	4.40	21.6	0.98	26.9	9.83	0.01	0.28	12.0	114	13.5	12.6	24.9	0.02	3.46
GC2	11.2	6.90	261	151	5.70	7.69	2.66	14.2	4.78	0.03	0.13	8.85	61.0	5.06	14.6	4.86	0.07	-2.93
GC3	14.1	6.22	261	253	9.25	13.3	2.00	30.7	7.98	0.12	0.28	11.2	22.9	2.39	30.2	83.2	0.51	3.26
GC4	12.9	5.90	241	239	6.50	19.3	2.93	15.2	5.85	0.04	0.23	10.5	21.4	13.6	33.2	50.1	0.03	-4.79

시료의 Eh는 +19~+351 mV 범위의 산화환경을 보인다.

물속에 용존된 이온성분들의 대략적인 농도를 지시하는 전기전도도는 지표수의 경우 178~197 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위를 보이고, 토양수는 249~277 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 하천수보다 높은 값을 보인다. 지하수는 69~524 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 넓은 범위를 보인다.

하천수의 용존 산소는 12.0~13.6 mg/L 범위로 용존 산소량만을 볼 때에는 하천수는 1급수 기준인 10 mg/L 기준을 만족한다. 토양수내에는 5.91~6.30 mg/L 범위로 하천수보다 낮은 값을 보이며, 지하수에서는 더욱 낮아져 1.56~6.87 mg/L의 범위를 보이고, 대조마을 지하수에서는 최대 9.25 mg/L의 용존산소 함량을 보인다.

용존화학적성분

물 시료에 대한 주요 양이온 및 음이온 성분은 Table 1에 제시되어 있다. 양이온과 음이온의 전기적 균형은 모든 시료에서 $\pm 5\%$ 이내로 확인되어 분석자료의 신뢰도는 높은 것으로 확인되었다.

주요 양이온

물에 용존된 주요 양이온중 Na은 하천수에서 9.06~10.3 mg/L의 범위를 토양수에는 12.8~15.6 mg/L, 지하

수에는 6.6~32.6 mg/L의 농도범위를 보인다. 물속에 Na성분은 엘바이트와 같은 사장석의 불합치용해 (incongruent dissolution)로부터 주로 기원되나 생활하수 등과 관련하여 오염물질에서 기원할 수 있다.

하천수내 K의 함량은 3.14~4.64 mg/L의 범위를 보이고, 토양수내에는 10.3~12.5 mg/L의 농도로 하천수보다 높은 값을 보인다. 원성리 마을 지하수내의 K의 함량은 1.10~17.5 mg/L의 범위를 보여, 대조마을 지하수의 0.98~2.95 mg/L의 농도보다 훨씬 높은 값을 보여주는 지하수가 많이 확인된다. G1-11, G1-12, G2-2, G2-4, G2-8, G2-9의 시료는 8.65~17.5 mg/L의 높은 농도를 보인다. 지하수와 토양수내 K의 기원은 흑운모, 백운모와 같은 광물의 용해작용으로 물속에 용해될 수 있으나, 물-암석반응에 의한 지하수내 K의 함량은 2 mg/L 이하가 대부분이다. 원성리 마을의 토양수와 지하수내 K의 농도가 대조마을 지하수나 오염되지 않은 다른 지역의 지하수보다 높은 함량을 보이는 것은 이 지역에서 농업 활동과 관련하여 사용되는 칼륨비료의 영향으로 추정된다. 하지만 안티몬폐기물과의 상관성도 완전히 배제할 수 없다. 향후 안티몬 폐기물의 K함량에 대한 추적이 필요할 것이다. Fig. 2(a)에서 하천수(토양수), 원성리지하수, 대조군 지하수의 칼륨(K) 농도에 대한 박스-휘스

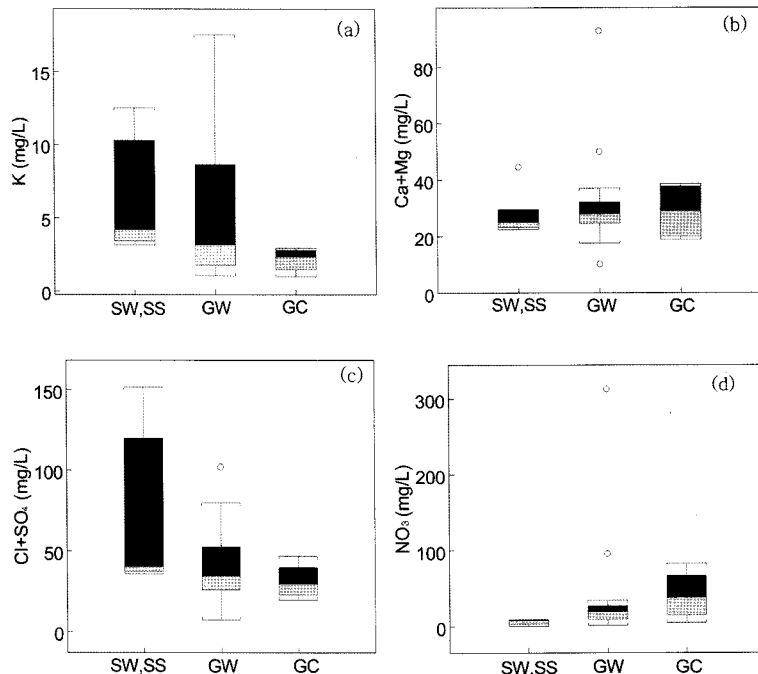


Fig. 2. Box-Whisker diagram of the concentration of major ions of water samples in the study area.

커 비교 다이어그램이 제시되었다.

자연수중에 풍부한 이온 성분중 하나인 Ca함량은 하천수에서 3.14~4.64 mg/L의 농도 범위를 보이며, 토양수에서는 22.0~33.4 mg/L의 범위로 하천수보다 높은 값을 보인다. 지하수에서는 12~81 mg/L 농도 범위를 보이며, G3-3 지하수 시료에서 Ca의 농도가 81 mg/L로 가장 높은 값을 보인다. 자연수내 Ca의 공급은 사장석이나 탄산염광물의 용해가 주요 요인이며 일부 인위적 활동에 의해 물속에 용해될 수 있다. Mg의 함량은 지표수, 토양수, 지하수에서 뚜렷한 큰 차이를 보이지 않으며, 농도범위는 3.77~13.3 mg/L이다. 물 시료의 Ca+Mg 농도에 대한 박스-휘스커 비교 다이어그램은 Fig. 2(b)와 같으며, 원성리 지하수의 1~2개를 제외하고는 하천수(토양수), 원성리 지하수 및 대조마을 지하수 사이에 뚜렷한 차이를 보이지 않는다.

주요 음이온

물 시료에서 가장 풍부한 음이온인 중탄산(HCO_3^-)의 함량은 11.2~114 mg/L의 범위를 보인다. 중탄산은 대기 중의 CO_2 가스, 토양내 식물의 뿌리의 호흡과 유기물 분해시 발생하는 CO_2 가스가 물속에 용해되어 탄산(H_2CO_3)을 형성하고 탄산은 물의 pH 조건에 따라서 H_2CO_3^0 , HCO_3^- , CO_3^{2-} 의 형태로 존재하며, 원성리지역 물 시료의 pH 조건이 5.36~8.36 범위이므로 탄산은 대부분 중탄산(HCO_3^-)의 형태로 존재한다. 현재 지표수, 토양수, 지하수의 중탄산 농도가 대조군지하수와 비교할 때 특이한 값을 보이지 않으므로 안티몬공장의 대기오염 혹은 폐기물 매립과 관련한 특성은 보이지 않는다.

하천수내 Cl 함량은 15.2~15.9 mg/L 함량범위를 보이고, 토양수에서는 21.2~24.9 mg/L의 농도로 약간 높은 값을 보인다. 지하수에서는 Cl의 함량은 4.2~69.2 mg/L 범위로 일부지하수에서는 40.0 mg/L 이상 높은 값을 보인다. 대조군 지하수에서는 12.6~33.2 mg/L의 범위를 보인다. 일부 지하수에서 높은 Cl의 함량을 보이는 것은 생활오염물질이나, 퇴비 등의 사용에 의한 것으로 추정된다. 이를 뒷받침할 근거로 후술될 오염물질에서 기원하는 NO_3^- 의 농도와와의 상관성에서 알아볼 수 있다. 다만 토양수에서 약간 높은 농도를 보이는 것이 폐기물 매립과 직접적인 관계가 있는지는 불확실하다.

황산염(SO_4)의 함량은 하천수에서 24.7~21.6 mg/L의 범위를 보이고, 토양수에서는 99~127 mg/L로 훨씬 높은 농도 값을 보인다. 원성리마을 지하수에서는 6.61~35.7 mg/L의 범위를 보이고 대조마을 지하수에서는 2.39

~13.6 mg/L의 범위로 낮은 값을 보인다. 토양수에서 높은 황산염의 농도를 보이는 것은 안티몬폐기물과 직접적인 영양이 있을 것으로 추정된다. 일반적으로 자연수내 SO_4 성분은 주로 황화광물, 황산염광물 또는 H_2S 가스의 산화 및 용해에 의해 기원될 수 있다. 그러나 황산염의 지하수내 농도는 온천지역 혹은 특수한 지질 조건을 제외하면 대조마을 지하수에서 보여주는 황산염의 농도이상은 벗어나지 않는다.

물 시료의 $\text{Cl} + \text{SO}_4$ 농도에 대한 박스-휘스커 비교 다이어그램은 Fig. 2(c)와 같으며, 토양수와 하천수에서의 이들의 농도가 지하수보다 훨씬 높은 값을 보여준다.

불소(F)는 화강암 및 편암암 지역에서 물-암석 반응이 상당히 진행된 심부지하수에서 높은 함량을 보이는 것으로 알려져 있다. 특정폐기물 등에서 기원하지 않는다면 불소의 기원은 형석의 용해, 화강암질암의 조암광물인 흑운모, 각섬석, 인회석의 OH를 치환한 F와 광물 용해로부터 기원할 수 있다(Savage *et al.*, 1987; Nordstrom *et al.*, 1989). 원성리 및 대조마을 모든 물 시료에서 음용수기준 1.5 mg/L를 초과하지 않는다.

오염물질로부터 기원하는 것으로 알려진 질산염(NO_3^-) 성분은 유기물의 부식, 생활하수, 퇴비, 분뇨, 질소비료, 축산폐기물 등의 인위적 오염에 의하여 물속에 용존하게 된다. 음용수 수질기준은 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$)기준으로 10 mg/L 이하이며, 이를 질산염으로 환산하면, 약 44.5 mg/L의 값에 해당된다. 질산염의 농도는 하천수에서 3.24~9.32 mg/L 농도를 토양수에서 0.39~6.97 mg/L의 농도범위로 크게 높은 값을 보이지 않는다. 그러나 원성리 지하수에서는 1.48~313 mg/L의 농도범위로 지하수공에 따라서 큰 농도차이를 보인다. 특히 G1-5, G3-3 지하수에서는 음용수기준을 2~6배 이상 초과하는 높은 값을 보인다. 질산성질소에 오염된 물을 장기간 음용할 경우 유아들에게는 청색증(Blue baby)을 유발하여 호흡곤란으로 사망에 이르게 한다. 아울러 질산성질소는 발암물질로도 알려져 있다.

Fig. 2(d)에서는 하천수(토양수), 원성리 지하수 및 대조군 지하수 사이에 질산염이온 함량에 대한 박스-휘스커 비교 다이어그램이 제시되어 있다. 원성리 지하수중 특이하게 높은 오염도를 보여주는 2개 시료를 제외하면 대조군 마을 지하수와 비슷한 농촌마을 지하수의 오염 특성을 보여준다.

중금속등 미량원소

안티몬(Sb)을 포함한 중금속과 중요 미량성분에 대한

농도자료는 Table 2에 제시되어 있다. 본 연구에서 가장 핵심적인 중금속인 안티몬(Sb)는 하천수에서 0.4~

53.4 ppb의 농도 값을 보이며, 안티몬 폐기물매립지 상류의 SW4 하천수를 제외한 하천수에서는 10 ppb 이상의

Table 2. Concentration of trace elements including heavy metals of water samples if the study area (unit : ppb).

sample No.	Li	B	Al	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Sb	Ba	Pb	U
SW1	0.26	11.85	152.3	0.86	19.3	0.89	2.58	11.7	45.6	3.12	0.04	53.40	125.1	1.84	0.28
SW2	0.37	9.78	266.8	0.46	<2	0.27	1.70	6.3	31.8	1.87	0.03	10.17	309.0	0.62	0.28
SW3	0.40	10.91	162.5	0.75	453	0.35	1.63	11.4	28.1	1.82	0.04	14.00	732.9	1.06	0.30
SW4	0.40	25.6	460.6	3.37	753	3.10	5.02	17.8	69.6	2.35	0.21	0.40	69.1	1.60	0.23
SS1	0.45	96.9	379.5	1.41	7314	41.88	10.80	12.7	36.6	7.07	0.04	48.75	317.5	2.14	0.10
SS2	0.50	92.0	336.8	1.88	2512	12.85	5.73	9.8	26.4	3.34	0.07	74.81	226.9	1.73	0.06
G1-1	1.03	7.20	27.0	0.90	42.1	0.19	1.53	6.6	21.5	<5	<0.02	0.34	70.6	0.38	0.11
G1-2	0.08	8.61	36.0	0.76	<2	0.16	1.31	5.2	12.1	<5	<0.02	0.69	65.3	0.79	0.06
G1-3	0.16	8.62	17.4	0.90	<2	0.15	1.31	4.7	12.8	<5	<0.02	2.32	43.2	0.72	0.04
G1-4	4.08	4.20	108.3	1.54	6.4	0.14	1.78	7.7	36.7	<5	<0.02	1.01	39.3	1.33	0.53
G1-5	6.48	10.04	37.2	1.81	<2	0.23	5.55	25.3	115.0	<5	0.04	1.01	57.2	3.15	0.10
G1-6	6.21	4.55	96.0	1.02	10.6	0.17	3.15	43.6	110.1	<5	0.03	0.40	47.0	0.94	0.19
G1-7	5.66	3.5	91.6	1.21	<2	0.14	2.47	10.8	57.3	1.14	0.03	0.21	42.2	0.86	2.91
G1-8	1.56	5.02	63.5	1.13	<2	0.12	1.40	8.2	75.5	<5	0.03	0.26	90.3	1.19	0.30
G1-9	1.39	2.58	21.6	1.63	<2	0.09	2.83	3.9	8.1	<5	<0.02	0.10	68.2	0.55	0.34
G1-10	2.15	5.22	72.5	1.92	<2	0.07	1.96	7.1	193.8	<5	0.03	0.21	51.0	1.37	0.14
G1-11	3.71	17.56	8.4	0.84	<2	0.12	2.17	138.8	67.8	<5	0.03	0.11	574.5	1.00	0.03
G1-12	2.75	17.56	4.1	0.93	<2	0.11	1.30	137.4	65.4	<5	0.03	0.10	60.7	0.84	0.01
G2-1	0.64	8.49	67.2	0.78	<2	0.19	1.97	44.3	152.2	<5	0.03	5.23	107.7	1.13	0.11
G2-2	2.96	17.50	65.7	1.11	<2	0.14	2.11	176.4	416.3	7.94	0.07	0.12	96.9	3.28	1.16
G2-3	0.56	18.61	140.0	1.04	<2	0.55	4.79	10.5	22.6	<5	0.09	0.10	108.7	0.45	0.23
G2-4	2.60	15.20	30.2	1.26	5.4	0.16	2.45	20.1	12.6	<5	0.03	0.39	244.3	0.57	0.14
G2-5	0.63	16.90	8.3	1.12	<2	0.19	2.37	4.9	5.2	<5	<0.02	0.88	68.6	0.14	0.08
G2-6	0.71	16.27	17.6	1.36	<2	0.17	3.59	12.7	45.7	1.07	0.03	0.62	91.3	1.22	0.19
G2-7	3.00	4.97	20.7	0.89	<2	0.11	1.43	6.5	18.8	<5	<0.02	0.07	165.3	0.51	0.08
G2-8	1.01	28.83	74.9	0.98	<2	0.27	3.81	11.0	15.2	<5	0.03	0.26	187.5	0.57	0.07
G2-9	0.60	19.09	2.6	1.12	<2	0.45	3.85	7.0	14.0	<5	0.05	0.24	130.1	0.66	0.09
G2-10	1.82	2.63	19.3	3.71	<2	0.04	1.53	15.1	26.9	<5	<0.02	0.05	69.7	1.17	0.05
G3-1	<0.1	14.5	25.0	15.72	4.0	0.44	0.94	7.1	39.7	<5	<0.02	<0.1	77.4	0.44	0.21
G3-2	0.95	9.2	6.4	1.14	1.8	0.11	1.32	16.9	72.0	<5	<0.02	0.17	65.4	1.16	0.03
G3-3	<0.1	18.4	3.8	1.61	42	0.68	1.11	7.1	46.3	0.71	<0.02	0.20	136.9	0.48	0.03
GC1	6.21	9.55	17.2	0.51	45.8	0.15	1.76	8.5	79.9	<5	<0.02	0.20	43.1	0.54	0.35
GC2	2.15	4.19	23.2	0.56	49	0.08	1.78	7.6	38.1	<5	<0.02	0.09	147.8	0.54	0.64
GC3	2.57	3.89	53.0	0.82	<2	0.15	2.81	29.5	75.3	<5	0.03	0.11	79.8	1.50	0.17
GC4	0.89	4.29	25.7	0.51	<2	0.12	1.49	19.7	99.9	<5	0.04	0.13	59.0	1.55	0.02

높은 값을 보인다. 특히 과거 매립지 바로 인근의 하천수인 SW1에서는 53.4 ppb의 매우 높은 농도 값을 보인다. 과거 매립지의 토양수에서는 48.75~74.81 ppb의 농도로 상당히 높은 값을 보인다. 원성리지역 지하수에서는 0.1~5.23 ppb의 범위로 G2-1 지하수에서 가장 높은 값을 보이고, G1-3, G1-4, G1-5 지하수에서 1 ppb이상의 농도를 보인다. 대조군마을 지하수에서는 0.08~0.20 ppb의 농도로 매우 낮은 값을 보인다. 토양수, 하천수의 안티몬의 농도는 WHO, 미국 EPA, 일본, 캐나다, 호주 등 주요 선진국 음용수 수질기준치를 최고 수 십배 상회한다. 안티몬의 유동성은 산화환경에서 낮으며, 특히 환원성 환경에서는 더 낮다(Reimann and Caritat, 1998).

비소(As)의 경우 하천수에서 1.82~3.12 ppb의 농도범위를 보이고, 토양수에서는 3.34~7.07 ppb의 농도를 보인다. 원성리 마을 지하수에서는 0.5~7.94 ppb의 범위로 G2-2 지하수에서 가장 높은 값을 보이고, 대부분에서는 낮은 값을 보인다. 비록 모든 물 시료에서 음용수 수질기준인 50 ppb 이하의 값을 보이지만, 대조군 지하수보다 원성리의 하천수, 토양수, 일부지하수에서 높은 비소의 함량을 보여 폐기물매립의 영향이 아직도 남아 있는 것으로 판단된다.

납(Pb)은 하천수에서 0.62~1.84 ppb의 농도를 보이고, 토양수에서는 1.73~2.14의 범위를 보인다. 원성리 마을 지하수내 납의 농도는 0.14~3.28ppb의 범위를 보이고 대조마을 지하수는 0.54~1.55 ppb의 농도를 보인다. 전반적으로 납 성분의 농도는 높지 않은 특성을 보인다.

물속에 망간(Mn)의 농도는 하천수에서 2~753 ppb의 농도로 SW3, SW4에서 높은 값을 보인다. 토양수에서는 2,512~7,314 ppb의 농도로 음용수 수질기준 300 ppb를 훨씬 초과한다. 원성리 마을 지하수에는 2~42.1 ppb의 농도범위를 보이고, 대조군 마을에는 2~49 ppb 범위의 농도 값을 보인다. 원성리마을 지하수중 G1-1, G3-3에서 음용수 수질기준을 초과하는 망간의 농도 값을 보인다. 특히 매립지 토양수에서 높은 망간의 농도를 보이는 것은 안티몬폐기물의 영향으로 보인다.

크롬(Cr)은 하천수에서 0.46~3.37 ppb의 농도를 보이고, 토양수에서는 1.41~1.88 ppb의 농도범위를 보인다. 원성리 지하수에서는 0.76~15.72 ppb의 농도범위를 보인다. 특히 G3-1 지하수에서 15.72 ppb의 높은 농도를 보인다. 비록 Cr⁶⁺의 음용수 수질기준인 50 ppb 보다 낮은 농도이지만 대조마을 지하수의 1 ppb이하를 고려하면 원성리지역 일부 지하수와 하천수에서 다소 높은 값을 보인다.

구리(Cu)는 하천수에서 6.3~17.8 ppb의 농도범위를 토양수에서는 9.8~12.7 ppb의 농도값을 각각 보인다. 원성리지역 지하수에서는 3.9~176.4 ppb의 농도값을 보이며, 일부지하수 G1-11, G1-12, G2-2에서는 100 ppb이상의 농도를 보인다. 비록 원성리지역 모든 물 시료에서 구리의 농도가 음용수 수질기준인 1 mg/L 이하이지만 대조마을 지하수 7.6-29.5 ppb와 비교하면 일부지하수에서 높은 값을 보여준다.

아연(Zn)은 음용수 수질기준이 1 mg/L 이하이다. 원성리지역 하천수에서 아연의 농도는 28.1~69.6 ppb 범위를 그리고 토양수에서는 26.4~36.6 ppb의 농도를 보인다. 원성리 지하수에서는 5.2~416 ppb의 넓은 농도값을 보인다. 특히 G2-2 지하수에서는 비소, 구리와 함께 높은 값을 보이는 것으로 보아 안티몬 폐기물과의 관련성을 배제할 수 없다. 대조마을 지하수에서는 38.1~99.9 ppb의 범위를 보인다.

코발트(Co)는 토양수에서 12.85~41.88 ppb의 농도를 보이고 하천수 SW4에서 3.1 ppb 농도를 제외하고는 다른 하천수와 원성리지하수와 대조마을 지하수에서 1 ppb 이하의 낮은 농도를 보인다. 토양수에서 높은 코발트의 농도를 보이는 것은 안티몬 폐기물과의 관련성을 시사한다. 비록 코발트가 음용수 수질기준 항목으로 설정되지 않았지만 0.3 mg 이상 과량섭취시 중독반응을 일으킬 수 있는 것으로 알려져 있다.

카드뮴(Cd)은 모든 물 시료에서 1 ppb 이하의 매우 낮은 함량을 보여주며, 화강암 지역의 지하수에서 높은 농도를 보여줄 수 있는 우라늄(U) 함량도 모든 물 시료에서 2.9 ppb 이하로 낮은 값을 보여주어 위해성은 없는 것으로 평가된다.

Fe 성분의 경우 지표수 SW2, 토양수 SS1에서 6.21 mg/L와 6.51 mg/L의 농도를 각각 보여 나머지 물 시료에서는 1 mg/L 이하의 낮은 농도보다 높은 값을 보인다. 이와 같은 Fe성분의 높은 농도는 과거 매립된 안티몬폐기물과의 상관성이 높은 것으로 보인다. Sr의 농도도 모든 물 시료에서 1 mg/L 이하의 낮은 농도를 보인다. Si 함량은 1.50~15.3 mg/L의 범위를 보이며, 지표수, 토양수, 지하수사이에 뚜렷한 차이를 보이지는 않는다.

그 외 미량원소로 Li, B, Al, Ni, Ba 등이 검출되는데 붕소(B)의 경우 토양수에서 92.0~96.9 ppb의 농도로 하천수 9.78~25.6 ppb, 지하수 2.58~28.83 ppb보다 높은 값을 보인다. 또한 대조군 마을지하수에서도 10 ppb 이하의 농도를 보인다. 따라서 토양수내 상대적으로 높은 붕소의 농도는 안티몬폐기물 매립과의 관련성을 고려할 수

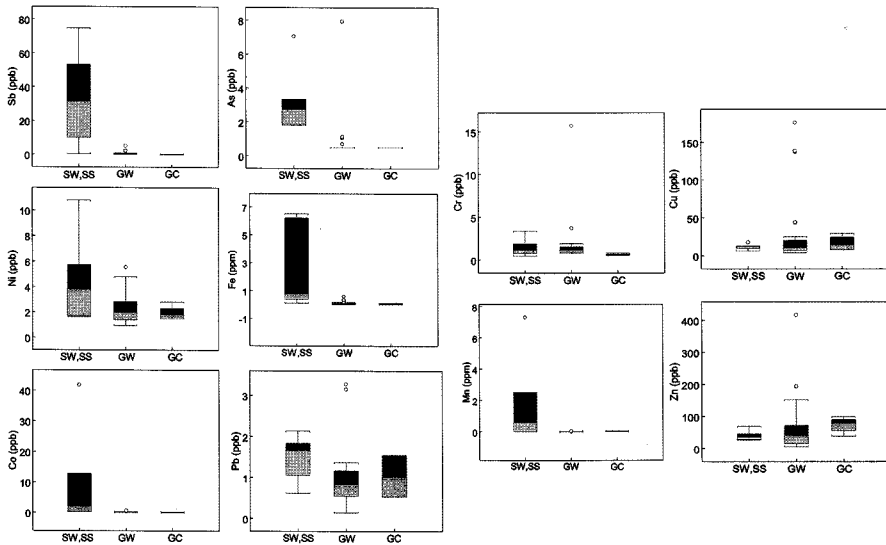


Fig. 3. Box-Whisker diagram of the concentration of heavy metals of water samples in the study area.

있으나 자세한 기원은 향후 추적해야할 필요가 있을 것으로 보인다. 그리고 적당량의 붕소는 식물성장을 촉진시키지만 과량일 경우에는 중독을 일으킬 수 있다.

니켈(Ni)은 토양수에서 5.73~10.8 ppb의 농도이며, 하천수에서 1.63~5.02 ppb의 농도를 보이고 지하수에서는 0.94~5.55 ppb의 농도범위를 보인다. 따라서 토양수내 니켈의 함량이 상대적으로 높은 값을 보인다. Ba는 토양수와 하천수에서 69.1~732.9 ppb의 농도범위를 보이고 지하수에서는 39.3~574.5 ppb의 농도를 보인다. 전반적으로 지하수보다 토양수와 하천수에서 상대적으로 높은 값을 보인다.

알루미늄(Al)의 경우 하천수에서 152.3~360.6 ppb, 토양수에서 336.8~379.5 ppb의 농도를 보인다. 지하수에서는 2.6~140 ppb의 농도를 보여 하천수와 토양수에서 알루미늄의 농도가 높은 값을 보인다. 그 외 리튬(Li)은 모든 물 시료에서 10 ppb 이하의 낮은 농도를 보인다.

안티몬 등 중금속의 농도에 대한 박스플롯 다이어그램은 Fig. 3에서 하천수(토양수), 원성리 지하수, 대조군 지하수로 비교되어 제시되어 있다. Fig. 3에서와 같이 안티몬을 포함한 대부분의 중금속의 평균농도가 지하수보다 하천수와 토양수에서 높은 값을 보인다. 다만 원성리 마을의 일부 지하수에서 납, 구리, 아연, 크롬 중금속의 농도가 높은 값을 보여준다.

따라서 과거에 안티몬폐기물을 매립하였던 농지에 아직도 안티몬 등의 중금속이 상당히 잔류되어 있으며, 강

우가 농지로 침투하여 안티몬 등의 중금속을 용출하여 인근하천으로 유입되는 것으로 판단되고, 일부 지하수에서도 영향을 미치는 것으로 해석된다.

수리화학적 유형

채취한 4개의 하천수, 2개의 토양수, 25개의 지하수, 대조마을 지하수 4개의 주요 이온성분의 화학적 특성을 상호비교하기 위하여 파이퍼(Piper)도(Piper, 1994)에 도시하였다(Fig. 4). 파이퍼(Piper)도상에서 하천수는 Ca-HCO₃(Cl+SO₄) 영역의 화학적 유형으로 분류된다. 토양수의 경우에는 높은 SO₄의 함량으로 Ca-SO₄형으로 분류된다. 원성리 지하수는 Ca-HCO₃ 유형의 영역에서 Ca-(Cl+SO₄+NO₃) 유형까지 넓은 유형으로 분포한다. 이와 같이 지하수의 수질화학적 영역이 넓은 것은 비교적 오염되지 않은 Ca-HCO₃ 유형의 지하수와 농업활동과 생활오염물질로 인하여 질산염과 염소 등에 의해 오염된 Ca-(Cl+SO₄+NO₃) 지하수가 공존하기 때문이다. 대조군 마을 지하수 화학성분도 원성리 마을 지하수와 같이 똑 같은 화학적 유형으로 구분된다.

파이퍼(Piper)도상에서 볼 때 토양수의 화학성분의 유형이 하천수와 지하수와 차별을 보이는 것은 폐기물내 황산화물 등의 영향인 것으로 추정된다.

중금속 농도확산 등치선도

원성리지역에서 채취된 하천수, 토양수, 지하수내 용

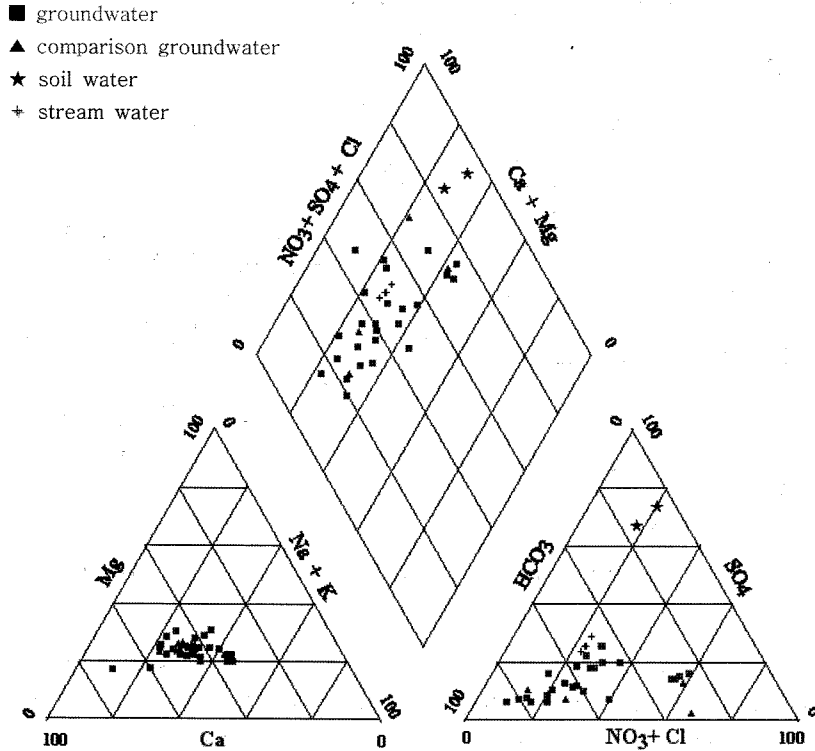


Fig. 4. Trilinear plot showing the chemical composition of groundwater, comparison groundwater, soil water, and stream water samples collected in the study area.

존된 중금속의 농도를 바탕으로 전체지역 물 순환 과정상의 중금속 농도분포에 대한 등치선도를 작성하였다. 중금속별 등치선도는 Fig. 5에서 보여준다. 안티몬(Sb)은 공장주변에서 높은 농도분포를 보이고 사사마을, 고성마을, 죽근마을일대까지는 확산되지 않은 분포도를 보인다. 철 및 망간의 농도분포도 안티몬공장과 매립지 주변에서만 높은 농도분포를 보인다. 코발트(Co) 역시 매립지와 안티몬공장주변에서 높은 값을 보인다. 안티몬을 포함한 주요 중금속의 농도가 매립지와 안티몬 공장을 주변에서 높은 값을 보여 상당한 량의 중금속이 아직도 매립지에 잔류하여 이들이 인근하천이나 지하수계로 확산되는 것으로 보여진다. 그러나 아직까지 안티몬 등 중금속 오염의 확산이 광범위하게 진행되지 않은 것으로 보인다.

결 론

지금까지의 연구결과를 결론적으로 요약하면 다음과 같다.
 (1) 폐기물매립지 농지의 토양수와 인근 하천수, 그리

고 일부 마을 지하수에서 안티몬을 포함한 일부 중금속의 농도가 상당히 높은 값을 보이고 있다. 특히 매립지 농지의 토양수에는 48.75~74.81 ppb의 농도를 보인다. 이는 WHO, 미국 EPA, 일본, 캐나다, 호주등 주요 선진국 음용수 수질기준치를 최고 수 십배 상회한다. 매립지인접 하천수 3지점에서 안티몬의 농도가 10.17~53.4 ppb 범위로 높은 값을 보인다. 마을지하수의 1곳과 안티몬공장내 지하수에서도 5.23 ppb와 2.32 ppb를 각각 보여 높은 값을 보인다.

(2) 다른 중금속중 철, 망간이 토양수 및 하천수에서 최고 6.5 ppm, 7.3 ppm으로 매우 높은 값을 보인다. 그러나 납, 카드뮴, 비소, 크롬 등의 중금속은 일부 토양수, 하천수, 지하수에서 대조마을 지하수보다 높은 값을 보이지만 수질기준치에 비해 상당히 낮은 값을 보인다.

(3) 모든 물 시료의 화학적 유형은 Ca-HCO₃ 유형, Ca-(Cl+SO₄+NO₃) 유형으로 넓게 분류된다. 토양수가 Ca-SO₄의 유형을 보이는 것은 안티몬이 매립되었던 폐기물의 황산화물의 함유에 기인하는 것으로 보인다.

(4) 일부지하수는 칼륨과 질산염 성분의 높은 값을 보

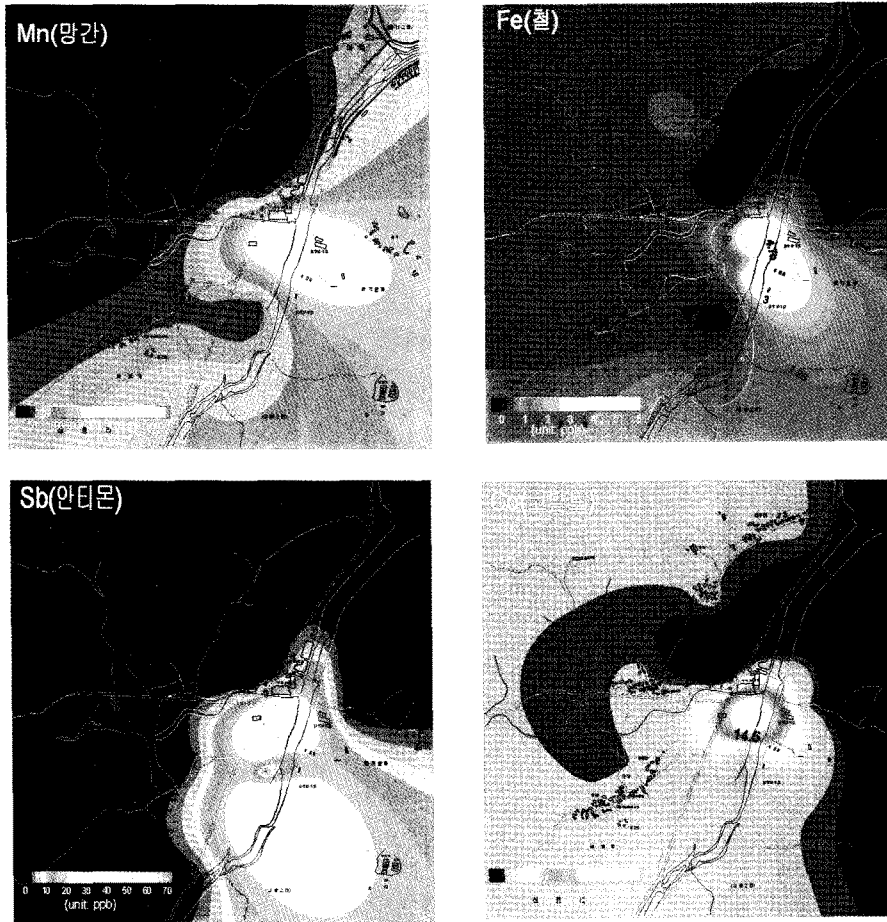


Fig. 5. Level contour of heavy metals of water samples in the study area.

여 비료와 생활오염물질에 의한 오염을 보인다. 특히 토양수에서 10 ppm 이상의 높은 칼륨의 농도를 보이는 것은 폐기물매립의 영향을 배제할 수 없다.

(5) 중금속의 농도에 대한 박스플롯 통계 다이어그램과 등치선도등을 종합적으로 볼 때 매립지를 복토한 흙속에 아직도 상당량의 안티몬 등 중금속이 존재하며, 강수의 침투에 의해 이들 중금속이 용출되어 인근하천으로 흘러 들어가며, 일부지하수에 까지 오염시킨 것으로 해석된다.

(6) 향후 안티몬의 오염확산에 대한 모니터링과 오염정화 작업등의 조치가 필요하다. 환경부에서는 국내에서 배출되는 안티몬폐기물의 현황을 파악하고, 안티몬에 의한 수질 및 토양오염에 대한 체계적인 조사가 진행되어야 할 것이다. 아울러 안티몬을 먹는물 수질기준 항목으로 추가하기위한 필요성을 검토해야할 것이다.

사 사

이 연구는 충청남도 도청의 연구조사비 지원으로 수행되었다. 현장시료채취 및 자료정리에 수고한 대전대학교 지반설계정보공학과 지반환경공학실 대학원 및 학부생에게 감사한다.

참 고 문 헌

- 임연풍, 1996, 의학환경지구화학, 한국학술진흥재단번역총서 201, 434p.
- 정찬호, 김수진, 2002, 벤토나이트의 중금속 흡착에 대한 통계모델의 적용 및 열역학적 해석, 지질공학회지, 12(2), 203-214.
- 정찬호, 정기영, 2000, 벤토나이트의 중금속 흡착제거에 대한 pH와 지하수 음이온의 영향, 자원환경지질학회지, 33(1), 31-40.

- 한국지질자원연구원, 2001, 한국지구화학지도책(1:700,000), 제3집, 충청남도 지구 화학지도책, 79p.
- Merian, E. 1991, Metals and their compounds ion the environment, occurrence, analysis and biological relevance, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, Germany, 1438p.
- Piper, A. M., 1994, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Transactions of American Geophysical Union, 29, 413-421.
- Reimann, C. and Caritat, P. de, 1998, Chemical elements in environment: Spring-Verlag, 398p.

정찬호

대전대학교 지반설계정보공학과
300-716 대전광역시 동구 용운동 96-3
Tel: 042-280-2573
Fax: 042-280-2570
E-mail: chjeong@dju.ac.kr

2008년 10월 30일 원고접수, 2008년 12월 11일 게재승인