

광주광역시 운정동위생매립장 주변 지하수와 하천수의 환경지구화학적 오염특성

오근창^{1*} · 윤정한¹ · 김경웅² · 박천영³ · 김정민⁴ · 양동운⁵ · 김주용⁵ · 이광래⁶

¹전남대학교 자원공학과, ²광주과학기술원 환경공학과, ³조선대학교 자원공학과,
⁴서울대학교 지구환경과학부, ⁵한국지질자원연구원 지질연구부, ⁶동아토건(주)

Characteristics of Environmental Contamination for the Groundwater and Stream Water in the Vicinity of the Woonjeongdong Sanitary Landfill Area in Kwangju-city, Korea

Keun-Chang Oh^{1*}, Chung-Han Yoon¹, Kyoung-Woong Kim², Cheon-Young Park³, Cheong-Bin Kim⁴, Dong-Yoon Yang⁵ and Ju-Yong Kim⁵, Kwang-Rae Lee⁶

¹Dept. of Mineral and Energy Engineering, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

²Dept. of Environmental Science & Engineering, K-JIST, Kwangju 506-712, Korea

³Dept. of Resources Eng. Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

⁴School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

⁵Dept. of Geology Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Taejon 305-350, Korea

⁶Dong-A Togun Corporation Kwangju city Book-gu Dooamdong 851-10, Korea

The physical properties of pH, turbidity, TDS and salt contents in the stream water near the entrance of Woonjeongdong sanitary landfill area with a drainage pipe are higher than those in neighbored drainage system, but DO is lower than that in neighbored drainage system due to the eutrophication. In the ground water, pH, turbidity, TDS and salt contents at (A), (F) and (C) where may be under effect of the Woonjeongdong sanitary landfill area, are also shown higher values in contrast to other groundwater site, like (B), (D), and (E). Particularly, the groundwater in (A), (F) and (C) are plotted in Na-Cl type of the piper diagram, which is an another important proof of the contamination by the leachate and washing water from the Woonjeongdong sanitary landfill area. Some elements and physical properties of the waters in rainy season are displayed a clear characteristics of contamination, compared to the those of winter in this study. Elements such as Ca, Mg, Na, K, Cl⁻, SO₄²⁻ and F⁻ are accompanied well with each other by the result of factor analysis. Therefore the elements and physical properties may be used good indicators for the contamination of waters in the vicinity of landfill area.

Key words : Na-Cl type, leachate, washing water, factor analysis, indicators

운정동위생매립장 입구부근의 잡용수가 유입되는 지점의 하천수는 주변 하천수에 비하여 pH, EC, turbidity, TDS, NaCl(%) 등이 높게 나타나고 있으며, 유기물의 부화로 인한 낮은 DO가 관측되어 매립장의 잡용수에 의한 오염을 시사하고 있다. 잡용수가 함유한 하천에 인접한 (C)지점의 지하수에서 EC, TDS, NaCl(%) 등이 높게 나타나고 있으며, (A)와 (F)지점의 지하수에서도 (B), (D), 그리고 (E)지점의 지하수에 비하여 이러한 특성들이 높게 나타나는 특징을 보인다. 특히 이들 지하수는 piper diagram에서도 공통적으로 Na-Cl형으로 분류되어 운정동위생매립장의 침출수와 잡용수에 의한 오염을 강력하게 지시하고 있다. 연구지역의 지하수와 하천수 오염특성은 건기인 겨울철시료에 비하여 우기인 여름철시료에서 더 높게 나타나고 있음을 확인하였다. 지하수와 하천수에 대한 요인분석결과, 침출수중의 함량이 높게 나타나는 원소들(Ca, Mg, Na, K, Cl⁻, SO₄²⁻, F⁻)의 명료한 수반관계를 확인하였으며 이들을 매립장 주변 수계의 오염지시자로 활용할 수 있을 것이다.

주요어 : Na-Cl형, 침출수, 잡용수, 요인분석, 오염지시자

*Corresponding author: scorpioh@hanmail.net

1. 서 론

98년말 현재 전국에 운영중인 생활폐기물 매립시설은 442개소이며, 이중 75.6%인 334개소가 5년 이내에 사용종료 될 예정이다. 또한, 과거 적정한 침출수 차단 시설과 처리시설 없이 매립한 비위생매립지가 1,072개소에 달하여 이로 인한 2차 환경오염 및 토지이용 피해 등이 우려되는 상황이다(환경부, 2000). 매립장 침출수는 오염농도가 높아 수자원의 중요 오염원이 되므로 일찍부터 관련법규정에 의하여 처리, 방류, 관리되고 있으며, 관련기관에 의하여 측정망이 운영, 관리되고 있다.

국외에서는 폐기물매립장과 관련되어 침출수 집수시설이 취약하거나 특별한 차수시설이 없는 불량매립지에 대하여 매립지하부로 유출되는 침출수로 인한 주변 토양, 지표수 및 지하수의 오염에 대한 연구(Wadleigh, 1968), 폐기물 매립지역 지하수에서의 오염체 이동에 관한 연구(Kerndroff *et al.*, 1992; Nicholson *et al.*, 1983), 그리고 토양입자의 크기에 따라서 매립장하부의 대수층에 대한 중금속오염물질의 이동능력을 실험하고, 침투깊이를 계산한 연구(Sergeev *et al.*, 1996) 등이 수행되어 왔다.

국내의 경우에는 폐기물처분장 주변에서의 지하수유동 및 오염물질이동 특성에 관한 연구(김계남, 1996), 공주시 폐기물 매립지 부근의 침출수 유동과 토양오염에 관한 지구물리·화학적 연구(최영국, 1994), 대전시

신대동 폐기물매립지 주변지역에서의 지하수 및 토양의 중금속 오염(김경웅과 손호웅, 1994), 폐기물 매립지 주변의 지하수 오염과 오염물질의 지연 특성(오석영과 전효택, 1996) 등의 많은 연구가 수행되어 왔으며, 최근에는 본 논문의 연구지역에 근접한 일곡동 매립장에 대하여 차종문 등(1999)에 의한 광주지역 폐기물 매립지 주변에서의 하천수, 지하수 그리고 토양을 대상으로 한 연구가 수행된 바 있다. 본 연구는 1999년 여름철 우기에 운정동위생매립장 진입로변 하천에서 심한 악취로 인한 민원이 발생한 사실에 주목하여 운정동위생매립장과 악취발생과의 관련유무를 확인하기 위하여 운정동위생매립장주변 지하수와 하천수의 오염도와 그 특징을 규명하는데 목적이 있다.

1.2. 위치 및 지질

본 연구지역인 운정동위생매립장은 광주광역시의 위생매립시설로서 위도와 경도는 각각 35°12'44"~35°13'52"와 126°55'46"~126°56'52"에 위치하고 있으며, 행정구역으로는 광주광역시 북구 운정동 산 104번지에 위치하는 조성계획면적 279,208 m²(84,460평)에 매립계획량 4,369 m²(순수 쓰레기 매립량 3,739천 m²)인 광주광역시의 위생매립시설이다(Fig. 1).

본 연구지역을 중심으로 한 광역적인 지질은 선캄브리아기의 편마암을 기반암으로 하고 있으며 이들을 관입한 시대미상의 오강리화강암, 주라기 흑운모화강암, 불국사화강암 등으로 구성되어 있으나(홍승욱과 윤 욱,

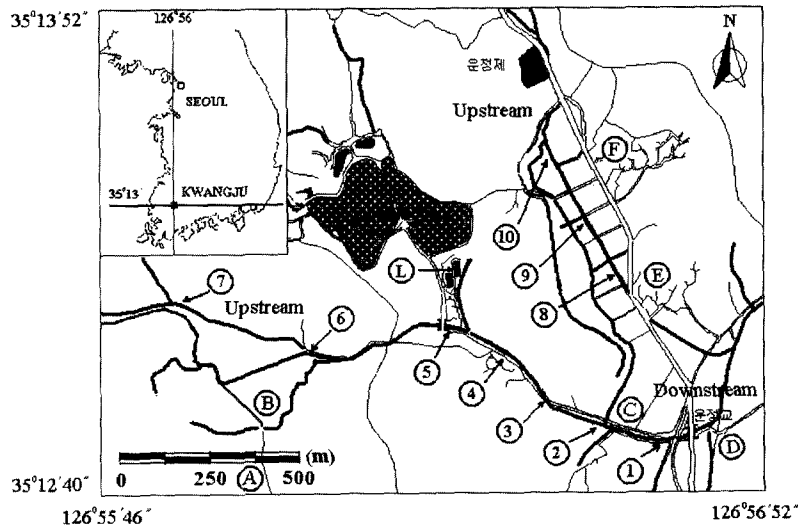


Fig. 1. Map of sampling site from the Woonjeongdong sanitary landfill area, Kwangju-city. L : leachate, A~F : groundwater, ①~⑩: stream water, ≡ : main road, ~ : stream

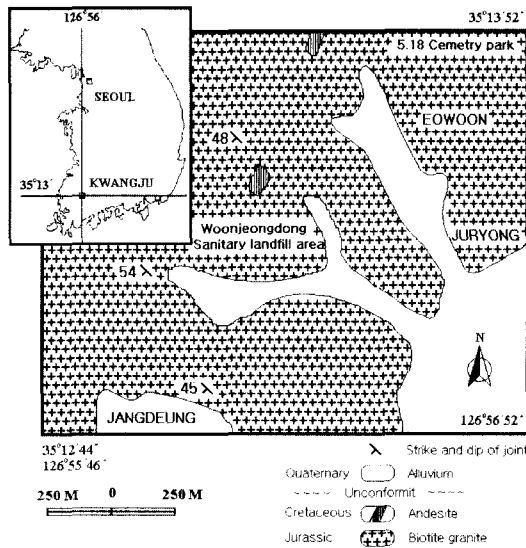


Fig. 2. Map of topography and geology of the Woonjeongdong sanitary landfill area.

1986; 손치무와 김수진, 1966) 매립장 주변은 주라기의 흑운모화강암과 백악기의 안산암 및 제4기의 충적층으로 구성되어 있다(Fig. 2). 주라기 흑운모화강암에는 절리 등의 파쇄대가 발달되어 있는데 이들 틈을 백악기의 안산암이 충전하고 있다.

1.3. 시료채취 및 분석방법

본 연구는 운정동매립장 진입로변 하천의 악취발생과 운정동매립장과의 관련성에 주목하여 건기와 우기의 특성을 잘 나타내는 계절시료를 2000년 2월 20일, 8월 22일, 그리고 11월 12일에 각각 채수하였다. 시간의 경과와 시료구분의 편의를 위하여 2000년 2월 20일에 채수한 건기시료를 1999년 겨울시료, 8월 22일에 채수한 장마철의 우기시료를 2000년 여름시료, 그리고 11월 12일에 채수한 건기시료를 2000년 겨울시료로 표기하였다. 지하수시료는 상시 채수가 가능한 매립지로부터 약 1 km범위내에 위치하는 지하수를 대상으로 하였으며(A~E, Table 1, Fig. 1), 이 중 3곳은 영산강 환경관리청에 의하여 수질 측정망으로 운영되는 지점들이다(A, F, E, Fig. 1). 시료는 5분정도 물을 퍼낸 다음 100 ml용량의 용기에 양이온과 음이온 분석용 시료를 각각 채수하였으며, 양이온 분석용 시료는 이온이 용기벽면에 흡착하는 것을 방지하기 위하여 묽은 염산을 2~3방울 첨가하여 4°C이하로 냉장보관하였다. 하천수시료는 매립장입구의 배수구를 통하여 유

Table 1. Sample inventories in the vicinity of Woonjeongdong sanitary landfill area, Kwangju-city.

Sample	Well type	Use	Well depth(m)
A	bored well	domestic	about 18
B	dug well	farming	3~4
C	dug well	farming	4~5
D	bored well	domestic	about 15
E	bored well	domestic	about 15
F	bored well	domestic	about 15

출되는 지점을 기준으로 하여 그 전후의 채수거리를 정하여 하루에서 상류로 거슬러 올라가면서 채수하였으며(①~⑦, Fig. 1), 매립장 배후의 농수로 시료(⑧~⑩, Fig. 1), 그리고 침출수집수조의 침출원수(⑪, Fig. 1)를 채수하여 비교하였다. 시료의 채수시 수압펌프를 부착한 0.45 μm의 millipore 여과장치를 이용하여 이 물질을 거른 후 100 ml용량의 용기에 양이온과 음이온 분석용 시료를 각각 채수하였다. 지하수 및 하천수의 pH, Eh, Temp.(°C), EC, DO, turbidity 및 NaCl (%) 등의 간이 수질측정은 HORIBA社의 water checker u-10기기를 사용하여 현장 측정하였으며, pH 측정시 test paper로 동시 측정하여 측정값의 신뢰성을 확인하였다. 그 외에 Myron L사의 DS meter로 TDS를 측정하였으며, 수질오염공정시험방법에 규정된 혼합지시액에 0.01N HNO₃을 가하여 중탄산염(HCO₃⁻)을 적정하였다. 양이온 분석용 시료에 대하여는 ICP-MS와 ICP-AES로 중금속원소분석을 실시하였고, 음이온원소분석은 IC를 이용하였다.

2. 결과 및 고찰

2.1. 지하수의 물리적 특성

천연수의 pH는 보통 6.5~8.5(임연풍, 1996)로 알려져 있으며 pH가 5보다 작거나 10보다 큰 물은 비교적 적다. Bass-Becking etc.(1960)은 지하수는 pH 5~9, 오염되지 않은 지표수와 호소수는 pH 4~10의 영역에 있는 것으로 보고한 바 있다. 대부분의 중금속 원소들은 강한 산성환경에서는 이온상태로 존재하여 이동성이 활발한 반면 알카리환경에서는 화합물이 형성되어 이동성이 감소한다. 따라서 pH는 중금속원소들이 철이나 망간 산화물에 흡착되는 능력에 영향을 미치거나 중금속원소들의 용해도와 이동도에 영향을 미침으로서 궁극적으로 식물이 중금속 원소들을 흡수하는 능력에도 영향을 미치게 된다(Fortescue, 1980). 연구지

Table 2. Chemical constituents of the groundwater in summer, 2000.

Component	Sample	A	B	C	D	E	F
Temp.(°C)		18.8	15.2	17.4	22.3	16.5	22.0
pH		6.20	6.50	6.84	6.60	6.85	6.18
Eh (mV)		1	-8	-44	-5	-34	2
DO (mg/l)		3.76	1.75	1.30	2.65	4.10	3.67
EC (μs/cm)		300	110	20,760	220	220	450
turbidity		0	8	2	0	8	0
TDS (mg/l)		145	64	400	122	122	244
NaCl (%)		0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01
As (μg/l)		0.76	<0.10	0.33	<0.10	0.23	0.82
Ba (μg/l)		117.17	9.43	112.53	6.10	1.73	30.30
Ca (mg/l)		44.00	6.77	20.50	19.80	23.37	46.80
Cr (μg/l)		2.19	29.26	13.70	1.63	0.84	1.86
Cu (μg/l)		7.65	3.18	8.74	11.15	5.44	6.51
Fe (mg/l)		0.21	0.21	0.22	0.10	0.11	0.21
K (mg/l)		1.23	1.05	10.06	0.82	0.50	1.53
Li (μg/l)		14.55	10.00	9.45	4.20	4.45	5.46
Mg (mg/l)		7.86	1.46	8.08	5.39	5.04	11.06
Mn (μg/l)		0.55	2.27	817.77	2.28	0.76	2.15
Na (mg/l)		36.04	14.21	37.31	16.61	14.91	42.30
Ni (μg/l)		0.63	0.45	1.55	0.79	0.57	0.51
Rb (μg/l)		0.47	0.24	8.14	0.27	0.03	0.06
Si (mg/l)		19.53	16.00	7.25	15.50	19.09	18.27
Sr (μg/l)		220.00	58.85	215.92	156.81	174.00	756.00
U (μg/l)		1.02	0.31	0.16	0.10	0.06	0.11
Zn (μg/l)		9.72	25.69	19.73	33.41	34.54	46.14
Br ⁻ (μg/l)		107.00	109.00	123.00	25.00	28.00	111.00
Cl ⁻ (mg/l)		72.07	7.70	73.59	18.80	25.09	70.47
F ⁻ (mg/l)		0.14	<0.10	<0.10	<0.10	0.19	0.24
HCO ₃ ⁻ (mg/l)		33.56	35.79	66.81	42.95	48.81	61.13
I ⁻ (μg/l)		6.01	3.33	5.88	1.69	1.38	3.81
NO ₃ ⁻ (mg/l)		13.33	8.23	13.00	22.76	12.21	18.13
SO ₄ ²⁻ (mg/l)		4.83	1.51	9.62	9.96	7.70	8.67
P.I.		1.10	0.47	1.44	0.77	0.84	1.39

$$P.I.=\Sigma[(Ca/\bar{Ca})+(K/\bar{K})+(Mg/\bar{Mg})+(Na/\bar{Na})+(Si/\bar{Si})+(Cl/\bar{Cl})+(F/\bar{F})+(HCO_3^-/\bar{HCO}_3^-)+(SO_4^{2-}/\bar{SO}_4^{2-})]/\text{Number of elements}$$

역 지하수의 pH범위는 우기인 여름시료에서는 최저 6.18에서 최고 6.85인 약산성에서 중성영역에 분포하며, 건기인 겨울시료에서는 최저 6.51에서 최고 7.02의 영역에 분포하고 있다(Table 2, 3, Fig. 3). 이는 Bass-Backing etc.(1960)에 의한 지하수의 영역인 pH 5~9의 영역내에 분포하며, pH-Eh diagram상으로도 bog water쪽으로 약간 치우치고 있으나 일반적인 groundwater 영역에 도시되고 있다(Fig. 4). 오석영과 전효택(1996)에 의하면 불량매립지인 난지도매립지와 위생매립지인 화성매립지 주변 대부분의 지하수시료가 pH는 6~8사이에서 분포하며, Eh는 음의 값을 갖는 환

원환경임을 보고한 바 있다. 본 연구지역 지하수의 산화환원전위도 대부분이 환원환경으로 나타나고 있다.

DO는 수중생물의 생육과 밀접한 관계가 있으며, BOD증가로 급속하게 감소하기도 한다. BOD가 높으면 수중 유기물이 많은 것이며, BOD가 과도하게 높으면 DO가 감소하고 혐기성 생성물인 CH₄, NH₃, H₂S 등이 생성되어 악취가 난다(장준영, 1993). 낮은 DO포화도는 유기물질이나 분뇨등에 의한 부영양화로 인하여 물속의 용존산소가 다른 지점에 비하여 상대적으로 부족함을 의미하며, 오염의 지시인자로 활용할 수 있다. 연구지역의 지하수 중 매립장으로부터 가장 근접

Table 3. Chemical constituents of the groundwater in winter, 2000.

Elements	Sample A	B	C	D	E	F
Temp.(°C)	13.9	14.5	14.3	14.7	14.1	14.5
pH	6.71	6.51	6.82	6.58	6.78	7.02
Eh (mV)	-40	-8	-43	-4	-11	-45
DO (mg/l)	>20	13.30	0.43	0.98	1.05	1.04
EC (µs/cm)	290	90	760	210	210	500
turbidity	0	0	0	0	0	0
TDS (mg/l)	173	60	410	140	130	280
NaCl (%)	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02
As (µg/l)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
Ca (mg/l)	10.90	4.43	12.10	9.45	9.68	11.60
Cr (µg/l)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cu (µg/l)	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	2.00
Fe (mg/l)	0.02	0.02	0.08	0.03	0.22	0.09
K (mg/l)	1.46	0.94	16.60	1.05	0.71	3.10
Mg (mg/l)	4.81	1.71	9.28	4.11	4.67	7.64
Mn (µg/l)	6.00	0.00	6.00	0.00	7.00	5.00
Na (mg/l)	25.30	11.80	69.80	15.40	12.40	41.60
Si (mg/l)	13.50	13.80	4.95	12.90	12.70	13.10
Zn (µg/l)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2.00
Cl ⁻ (mg/l)	35.77	9.98	142.00	19.76	19.49	98.00
F ⁻ (mg/l)	0.10	0.05	0.21	0.06	0.18	0.08
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	32.33	33.92	67.43	45.78	53.07	64.04
NO ₃ ⁻ (mg/l)	7.49	0.82	1.08	5.57	9.18	12.45
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	3.32	4.75	10.11	9.88	6.13	6.43
P.I.	1.10	0.47	1.44	0.77	0.84	1.39

$$P.I. = \frac{\Sigma[(Ca/Ca) + (K/K) + (Mg/Mg) + (Na/Na) + (Si/Si) + (Cl/Cl) + (F/F) + (HCO_3^-/HCO_3^-) + (SO_4^{2-}/SO_4^{2-})]}{\text{Number of elements}}$$

한 지점에 위치하는 농업용 소형관정인 ㉔지점은 겨울철 시료와 여름철 시료 모두에서 가장 낮은 DO포화도를 나타내며(Table 2, 3, Fig. 3), 운정동위생매립장의 침출 원수 중 DO함량이 1.01 mg/l로 낮게 나타나는 특징과 비교한다면 오염의 관련성이 매우 높은 것으로 사료된다.

EC는 지하수에 용해되어 있는 전해질의 양과 비례하며 중요한 오염지시자인 TDS와 선형비례관계에 있다고 알려져 있다. 일반적으로 오염되지 않은 경우의 TDS는 EC와 약 0.7의 기울기를 가지며(Freeze and Cherry, 1979), 오염된 지하수나 침출수의 경우에는 약 0.4의 기울기를 보인다고 이철효(1994)는 보고한 바 있다. 본 연구에서는 ㉔지점의 지하수를 제외한 여름철 지하수에서는 EC와 TDS간의 기울기가 0.5735로 나타나고, 겨울철 시료에서는 0.5594로 나타나 이철효(1994)가 보고한 내용에 의하면 오염된 지하수의 특성을 보이는 것으로 판정할 수 있다(Fig. 5). 운정동위생매립장의 침출수(㉔) 중 EC값은 28.40 ms/cm로 측정

되었으며, 이는 오석영과 전효택(1996)이 보고한 매립지 침출수중의 EC값인 17,260~32,800 µs/cm와 대체적으로 비슷한 값이다. 연구지역의 지하수 중 가장 높은 EC값은 여름철에 ㉔지점의 지하수에서 측정된 20,760 µs/cm로 이는 오석영과 전효택(1996)이 오염된 지하수로 판정한 1,090~8,620 µs/cm를 훨씬 초과하고 있다. ㉔지점의 지하수는 매립장의 방류수가 합류된 하천의 직접적인 영향을 받는 하천에 근접하고 있으며, 또한 그 개발심도가 불과 4~5 m에 불과한 충적대수층에 위치하는 지하수이기 때문에 강우 또는 주변 수계에 의한 영향을 쉽게 받은 결과로 해석된다(Table 1, Fig. 1). ㉔와 ㉔지점의 지하수에서도 EC값이 주변의 비오염 지하수에 비하여 높게 나타나는 경향을 보이고 있다(Table 2, 3, Fig. 3).

수중의 부유물질을 여과지로 여과시 여과에 의해 분리되는 0.1 µm이상의 유기 또는 무기물의 고형물 입자를 현탁물질이라 하며, 이는 turbidity를 유발한다(장준영, 1993). 연구지역에서는 생활용수로 개발된 ㉔지

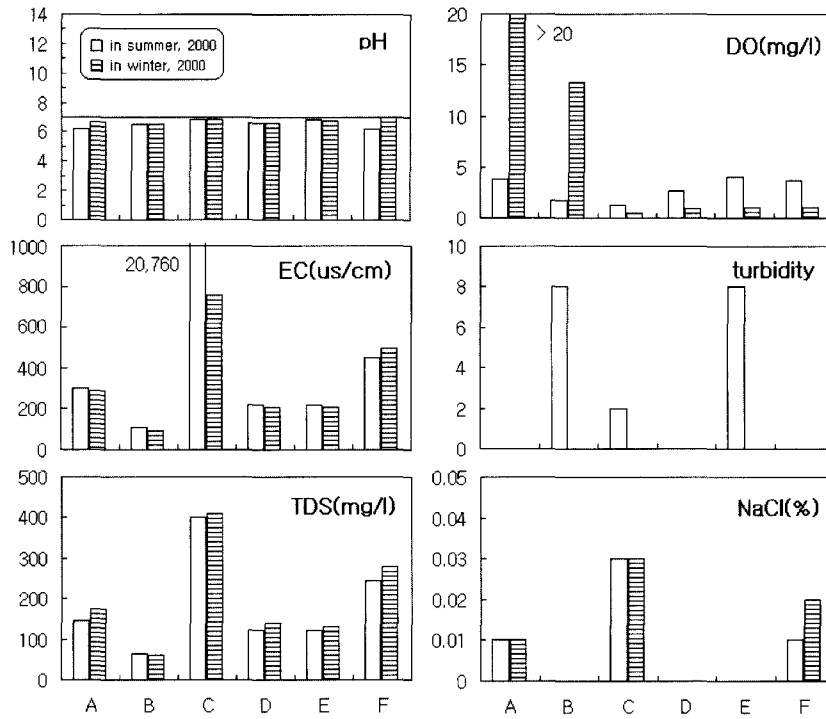


Fig. 3. Physical properties of the groundwater in the vicinity of the Woonjeongdong sanitary landfill area.

점의 지하수에서 여름철에 높은 turbidity를 보였으며, 농업용수로서 상대적으로 개발심도가 깊지 않은 ②와 ③지점에서도 여름철에 turbidity가 높게 나타났다. 그러나 겨울철에는 연구지역내의 모든 지하수의 turbidity가 0으로 나타나고 있다(Table 1, Fig. 2, 3). turbidity는 강우량과 개발심도에 의해 영향을 받는 것으로 사료되며, 침출 원수(㉠) 중 turbidity는 827로 높게 나타나는 특징을 가지고 있다.

생활용수로 사용중인 중형관정 ①와 ⑥지점의 지하수에서 TDS함량이 약간 높게 나타나고 있으며, 농업용수로 사용중인 소형관정 ③지점에서는 여름철 우기와 겨울철 건기의 측정에서 각각 400 mg/l와 410 mg/l로 연구지역의 지하수 중 가장 높은 TDS함량을 나타내고 있다. 특히 ③지점은 하천으로부터 5 m 이내에 위치하고 개발심도도 4~5 m로 오염된 하천의 영향을 쉽게 받을 수 있는 지하수로 운동동위생태립장의 영향에 매우 민감한 지점이다(Table 2, 3, Fig. 3). 침출수 중 TDS함량도 5,000 mg/l 이상으로 높게 부화하는 특징을 나타낸다.

NaCl(%)은 생활용수인 ①와 ⑥지점에서 각각 0.01%로 측정되었으며, 하천으로부터 쉽게 영향을 받

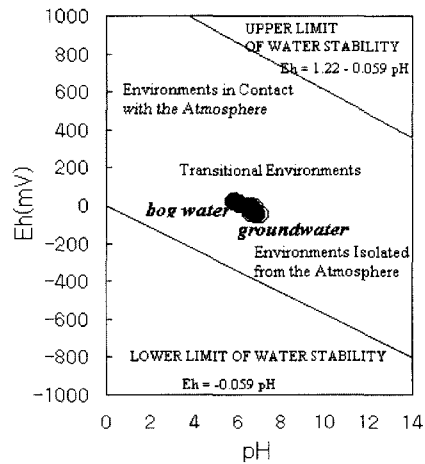


Fig. 4. pH-Eh diagram for the groundwater(After Garrels and Christ, 1965). ○ : in winter, 2000, ● : in summer, 2000

는 ③지점에서는 0.03%로 가장 높은 측정값을 보였다 (Table 2, 3, Fig. 3).

연구지역의 지하수 중 여름철과 겨울철에 측정된 자료에 의하면 ①지점, ③지점, 그리고 ⑥지점의 지하수

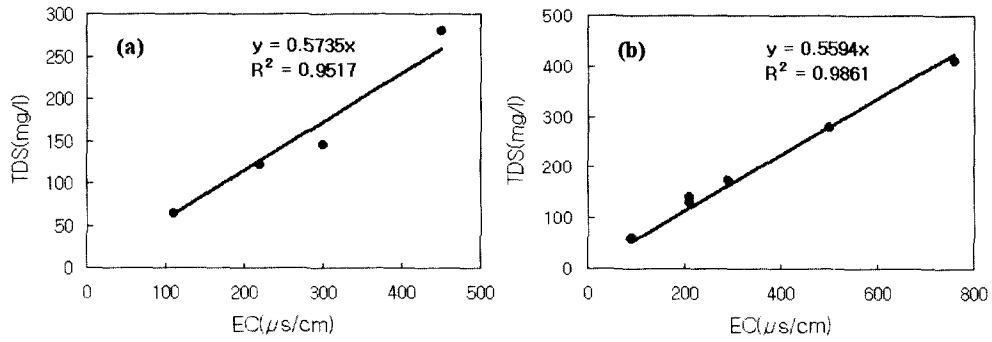


Fig. 5. Correlation coefficients and regressive equation between EC and TDS to the groundwater. (a) in summer, 2000, (b) in winter, 2000.

Table 4. Chemical constituents of the stream water in winter, 1999.

Elements	Sample 1	3	5	6	8	9
Temp.(°C)	9.5	10.1	10.6	8.6	9.3	9.3
pH	8.40	8.41	8.39	7.33	7.36	7.12
Eh (mV)	-98	-102	-99	-54	-38	20
DO (mg/l)	7.13	7.25	8.52	10.22	5.93	9.58
EC (µs/cm)	1,470	2,030	1,520	80	300	200
turbidity	33	>1,000	>1,000	10	45	25
TDS (mg/l)	920	1,210	940	49	178	120
NaCl (%)	0.06	0.09	0.06	0.00	0.01	0.00
As (µg/l)	4.55	4.85	4.54	0.43	0.64	0.75
Ba (µg/l)	122.00	116.00	107.00	11.00	35.00	43.00
Ca (mg/l)	59.30	54.60	54.80	4.40	18.60	20.20
Cr (µg/l)	11.00	9.90	10.00	6.60	4.10	4.20
Cu (µg/l)	3.70	1.40	1.20	0.50	1.10	2.30
Fe (mg/l)	1.19	1.57	1.65	0.92	0.21	0.22
K (mg/l)	50.60	51.80	51.40	1.04	2.15	2.60
Li (µg/l)	11.00	12.00	12.00	1.00	1.00	1.00
Mg (mg/l)	21.50	20.90	21.40	1.29	4.36	4.47
Mn (µg/l)	2130.00	2,380.00	2,480.00	203.00	81.00	59.00
Na (mg/l)	120.00	119.00	112.00	8.08	10.20	10.50
Ni (µg/l)	6.44	6.51	6.91	0.22	0.14	0.99
Rb (µg/l)	29.33	29.78	29.59	0.97	1.34	1.77
Si (mg/l)	7.84	9.09	9.30	5.69	5.86	5.57
Sr (µg/l)	480.00	455.00	441.00	30.00	145.00	155.00
U (µg/l)	1.26	1.22	1.12	0.10	0.53	0.60
Zn (µg/l)	12.00	5.00	3.80	3.00	5.90	7.20
Br ⁻ (µg/l)	876.00	838.00	812.00	55.00	49.00	100.00
Cl ⁻ (mg/l)	47.25	64.81	66.46	4.97	5.21	5.14
F ⁻ (mg/l)	0.08	0.10	0.11	0.90	0.10	0.09
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	378.26	463.67	524.68	33.55	70.16	70.16
I ⁻ (µg/l)	126.00	116.00	109.00	5.00	9.10	12.00
NO ₃ ⁻ (mg/l)	1.23	1.21	1.21	0.93	0.92	0.96
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	7.02	5.69	5.68	4.86	7.98	8.15
P.I.	1.41	1.49	1.52	0.68	0.45	0.45

$$P.I. = \frac{\sum [Ca/Ca + (K/K) + (Mg/Mg) + (Na/Na) + (Si/Si) + (Cl/Cl) + (F/F) + (HCO_3/HCO_3) + (SO_4^2-/SO_4^2-)]}{\text{Number of elements}}$$

Table 5. Chemical constituents of the stream water in summer, 2000.

Elements	Sample 1	3	5	6	8	9
Temp. (°C)	27.3	27.5	24.5	23.3	25.9	25.6
pH	8.31	8.30	8.42	5.87	6.84	8.73
Eh (mV)	-93	-91	-119	19	-33	-136
DO (mg/l)	7.13	0.41	2.09	3.27	4.29	6.64
EC (µs/cm)	1,470	2,630	3,960	100	160	150
turbidity	33	137	137	6	26	8
TDS (mg/l)	920	1,750	2,800	60	90	80
NaCl (%)	0.06	0.12	0.20	0.00	0.00	0.00
As (µg/l)	1.84	1.76	1.71	0.28	0.42	0.45
Ba (µg/l)	44.24	33.20	31.46	10.21	27.55	29.39
Ca (mg/l)	12.71	13.65	13.77	3.21	9.49	10.69
Cr (µg/l)	3.56	1.80	1.83	<0.50	0.50	0.50
Cu (µg/l)	8.29	9.42	9.15	0.76	0.80	1.18
Fe (mg/l)	0.30	0.23	0.24	0.05	0.07	0.07
K (mg/l)	7.79	8.10	8.06	0.95	1.85	2.31
Li (µg/l)	1.39	1.77	1.80	1.00	1.00	1.00
Mg (mg/l)	3.73	3.96	4.05	1.09	2.32	2.41
Mn (µg/l)	368.66	247.50	268.42	0.28	1.23	0.94
Na (mg/l)	26.68	29.36	29.28	7.42	8.10	8.10
Ni (µg/l)	23.41	1.84	1.93	0.40	0.11	0.27
Rb (µg/l)	5.38	5.55	5.54	1.17	2.33	2.50
Si (mg/l)	8.56	8.01	8.06	6.88	6.78	6.56
Sr (µg/l)	113.00	140.00	136.00	19.00	97.00	100.00
U (µg/l)	0.20	0.23	0.22	0.04	0.05	0.07
Zn (µg/l)	14,815.53	430.55	380.65	1.71	2.26	2.85
Br ⁻ (µg/l)	105.00	128.00	123.00	8.00	6.00	13.00
Cl ⁻ (mg/l)	44.14	44.78	46.99	5.65	6.86	6.73
F ⁻ (mg/l)	0.10	0.10	0.12	0.10	0.11	0.11
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	352.46	554.62	1,000.56	32.34	54.99	54.91
I ⁻ (µg/l)	8.81	15.12	14.33	1.98	4.01	4.08
NO ₃ ⁻ (mg/l)	2.44	2.33	2.36	2.04	2.06	1.97
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	6.85	6.28	6.26	4.68	10.37	11.00
P.I.	1.25	1.35	1.53	0.45	0.69	0.73

$$P.I. = \frac{\Sigma[(Ca/\bar{Ca}) + (K/\bar{K}) + (Mg/\bar{Mg}) + (Na/\bar{Na}) + (Si/\bar{Si}) + (Cl/\bar{Cl}) + (F/\bar{F}) + (HCO_3/\bar{HCO}_3) + (SO_4^{2-}/\bar{SO}_4^{2-})]}{\text{Number of elements}}$$

에서 운정동위생매립장의 침출수 중 높은 값으로 존재하는 EC값, TDS함량, 그리고 NaCl함량이 각각 높게 나타내고 있다(Table 2, 3, Fig. 3). 이는 운정동위생매립장 주변 지하수의 오염요인이 침출수와 밀접한 관련이 있음을 의미한다. ㉠지점은 지형적으로 측정대상 지하수 중 위생매립장의 영향을 가장 받기 쉬운 곳에 위치하며, 오염이 부과된 하천에 의해서 2차적인 오염을 받은 것으로 분류할 수 있다. 특히 NaCl 함량이 높게 나타나는 것은 운반차량에 의해 반입되어 매립된 음식물 중 염분함량과 관련이 있는 것으로 사료된다.

2.2. 하천수의 물리적 특성

일반적으로 강물의 pH는 겨울에 비교적 낮고 여름에 높게 나타나는데 이것은 강물의 온도가 올라감에 따라서 수중에서의 CO₂용해량이 내려가기 때문이다(임연풍, 1996). 연구지역 하천수의 pH범위는 겨울철시료는 최저 7.12에서 최고 8.41이고, 여름철시료는 최저 5.87에서 최고 8.73으로 약산성에서 약알칼리성영역에 분포하며, 여름철 하천수의 pH가 겨울철 하천수의 pH보다 변화범위가 더 넓은 특징을 보인다(Table 4, 5, Fig. 6). 이는 Bass-Backing(1960)이 제시한 하천수의 영역인 pH 4~10의 영역내에 분포하고 있으며, 일반적

Table 6. Chemical constituents of the stream water in winter, 2000.

Element	Sample L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temp. (°C)	24.3	9.9	9.9	13.5	12.8	11.0	10.5	11.6	12.2	14.8	13.8
pH	7.85	8.69	8.62	8.73	8.74	8.72	8.08	7.80	8.19	9.27	8.34
Eh (mV)	-87	-133	-130	-136	-137	-136	-92	-66	-108	-155	-95
DO (mg/l)	1.01	1.64	1.74	1.56	1.50	>20	>20	6.64	1.30	1.73	1.75
EC (μs/cm)	28,400	1,700	1,690	1,280	1,200	90	80	80	230	160	160
turbidity	827	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0
TDS (mg/l)	>5,000	1,000	990	716	650	430	60	48	130	95	130
NaCl (%)	1.76	0.07	0.07	0.05	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
As (μg/l)	0.00	3.00	6.00	0.00	0.00	1.00	2.00	5.00	0.00	1.00	1.00
Ca (mg/l)	335.00	13.10	13.9	12.70	12.60	11.50	5.90	4.93	8.41	9.35	9.24
Cr (μg/l)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cu (μg/l)	1.00	3.00	3.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	2.00
Fe (mg/l)	0.05	0.06	0.05	0.02	0.07	0.03	0.01	0.02	0.06	0.06	0.04
K (mg/l)	1,450.00	38.50	37.00	30.40	28.40	24.60	1.78	1.50	5.06	2.47	2.55
Mg (mg/l)	174.00	10.70	10.50	9.50	9.24	7.47	1.63	1.36	3.21	3.32	3.30
Mn (mg/l)	2.00	1.00	10.00	1.00	6.00	4.00	1.00	3.00	6.00	4.00	3.00
Na (mg/l)	2,600.00	123.00	120.00	94.4	88.50	74.2	8.17	7.69	17.2	9.44	9.38
Si (mg/l)	19.40	7.33	7.01	7.03	7.45	7.68	6.86	6.58	5.40	5.87	5.69
Zn (mg/l)	2.00	4.00	5.00	1.00	1.00	2.00	1.00	1.00	2.00	2.00	2.00
Cl ⁻ (mg/l)	3,289.70	227.00	231.00	170.00	156.00	126.00	8.34	8.41	17.90	8.55	10.13
F ⁻ (mg/l)	196.50	0.10	0.12	0.09	0.11	0.11	0.02	0.17	0.08	0.09	0.13
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	1,616.77	276.50	276.50	274.77	266.84	233.27	72.08	74.68	70.16	70.16	70.16
NO ₃ ⁻ (mg/l)	0.58	1.50	1.32	0.78	0.77	0.73	0.96	1.09	0.63	0.36	0.57
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	176.80	4.05	3.98	4.74	5.26	3.67	3.29	3.37	8.74	5.61	6.80
P.I.	-	1.79	1.80	1.56	1.54	1.33	0.41	0.56	0.71	0.61	0.68

$$P.I. = \frac{\sum[(Ca/Ca) + (K/K) + (Mg/Mg) + (Na/Na) + (Si/Si) + (Cl/Cl) + (F/F) + (HCO_3^-/HCO_3^-) + (SO_4^{2-}/SO_4^{2-})]}{\text{Number of elements}}$$

인 지하수 영역에 비하여는 pH의 폭이 넓게 도시되고 있다(Fig. 7). 또한, 매립장의 잡용수가 유입되는 지점에서는 주변 하천수에 비하여 높은 약알카리성의 pH 영역을 보이는 특징이 있다.

하천수 중 DO는 동일한 지점에서 강우량에 의한 변동폭이 지하수에 비하여 심하며 여름철 시료 중 매립장의 잡용수가 합류하는 ⑤와 ③사이에서 심한 용존산소 부족현상을 보인다(Table 4, 5, 6, Fig. 6). 민원이 원인이 된 악취는 바로 이 하천수 중 DO의 결핍에 의해 생성된 악취유발물질인 CH₄, NH₃, H₂S 등의 혐기성물질에 의한 것으로 사료된다.

EC와 TDS사이의 기울기는 겨울철 하천수에서는 0.6094, 여름철 하천수에서는 0.688로 나타나 지하수에 비하여 오히려 오염의 정도가 미약한 특성을 보이고 있다(Fig. 8). 그러나 매립장의 잡용수가 합류하는 ⑤지점부터 ①지점까지 EC값은 주위의 다른 지점에 비하여 뚜렷하게 높은 값을 보이고 있으며, 특히 여름철의 EC값은 매립장의 잡용수가 합류하는 지점에서 3,960

μs/cm으로 최고값을 나타냈고 하류로 내려갈수록 3,960→2,630→1,470 μs/cm로 낮아지는 경향을 보이고 있다. 특히 매립장의 잡용수가 유입되는 지점의 3,960 μs/cm값은 주변 하천의 다른 지점에 비하여 약 10배 정도로 높은 값이다(Table 4, 5, 6, Fig. 6).

turbidity는 매립장의 잡용수가 합류되는 지점인 ⑤지점과 ③지점에서 겨울철과 여름철에 각각 >1000, 137로 연구지역 하천수 중 가장 높은 값을 나타냈으며, 하류인 ①지점에서는 주변 하천의 turbidity와 비슷한 값을 보이는 것으로 나타나 매립장 입구 세류장의 잡용수가 하천수의 turbidity에 영향을 주지만 1km범위내에서 안정화되는 것으로 나타났다(Table 4, 5, 6, Fig. 6).

TDS값은 지하수에 비하여 보다 뚜렷하게 위생매립장에 의한 영향을 나타내 보여준다. 겨울시료와 여름시료의 측정값이 모두 매립장의 잡용수가 합류되는 지점에서부터 높게 나타나고 있으며, 여름철에 측정된 자료에서는 잡용수가 합류된 지점에서 하류로 갈수록 비례

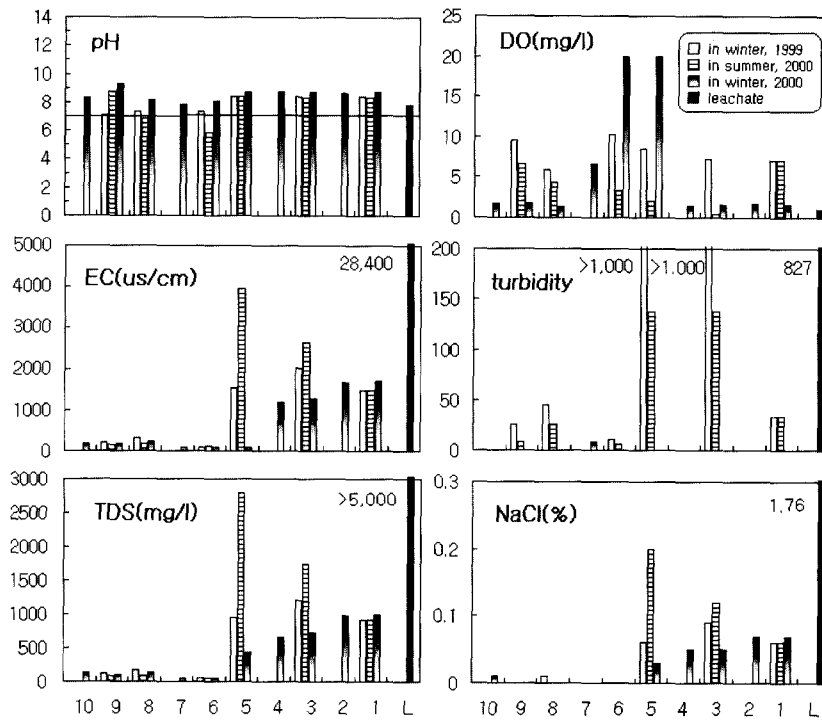


Fig. 6. Physical properties of the stream water and leachate in the vicinity of the Woonjeongdong sanitary landfill area.

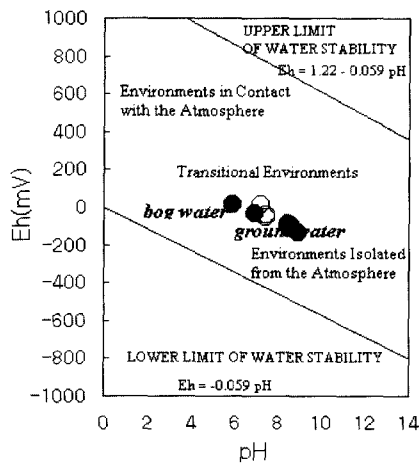


Fig. 7. pH-Eh diagram for the stream water.(After Garrels and Christ, 1965). ○ : in winter, 1999, ● : in summer, 2000

적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 하류인 ①지점에 이르러서도 TDS값은 여전히 주변의 TDS값에 비하여 약 10배 이상의 높은 값을 보이는 것으로 보아 특히 여름철에 위생매립장의 잡용수에 대한 주의

깊은 관리가 요구된다(Table 4, 5, 6, Fig. 6).

NaCl(%)함량은 매립장의 잡용수가 함유되는 ⑤지점과 ③지점, 그리고 하류인 ①지점에서 겨울철과 여름철에 공통적으로 높게 측정되었으며, 특히 여름철에 측정된 자료는 거리에 따른 비례적인 함량변화를 보이고 있다(Table 4, 5, 6, Fig. 6). 이러한 경향은 지하수에서와 마찬가지로 매립장이 주변 수계에 대하여 오염부과요인으로 작용한 증거가 된다. 침출수는 약알칼리성의 pH, 낮은 DO함량, 높은 EC, turbidity, TDS, NaCl 함량의 물리적 특성을 나타낸다(Table 6, Fig. 6). 연구지역의 하천수는 매립장의 잡용수가 함유되는 지점에서 pH를 비롯한 기타 물리적 특성값들이 이러한 침출수의 물리적 특성과 유사한 경향을 보이고 있다. 특히 NaCl(%)은 여름철에 특히 증가하는 음식물쓰레기에 의하여 매립장의 침출수와 더불어 쓰레기운반차량의 세륜과정에서 음식물중의 염분이 운전동매립장 진입로변 하천수계에 배출되어 더 높게 나타나는 것으로 사료된다.

우기 시료인 2000년 여름시료의 결과와 상이한 결과를 보이는 건기 시료인 2000년 겨울시료 중 EC, TDS값은 운전동위생매립장의 방류수가 함유되는 지점

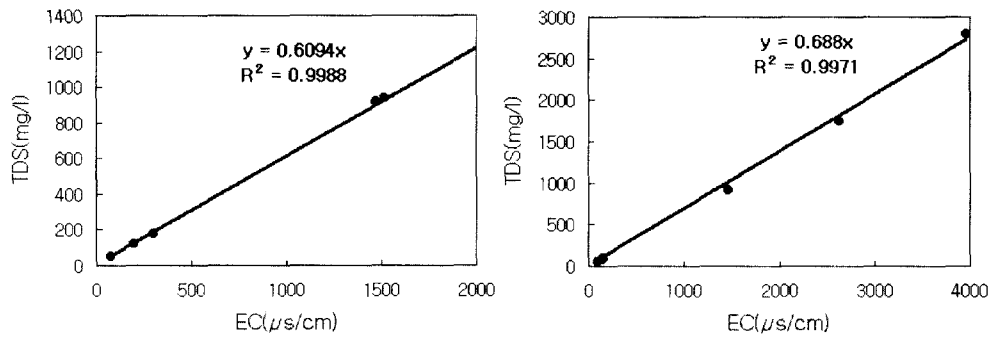


Fig. 8. Correlation coefficients and regressive equation between EC and TDS to the stream water. (a) in winter, 1999, (b) in summer, 2000

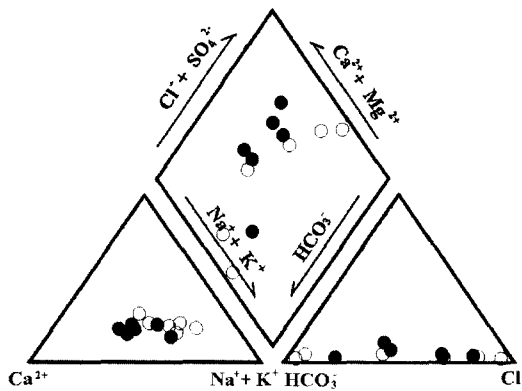


Fig. 9. Piper diagram of the groundwater (Piper, 1944). ● : in summer, 2000, ○ : in winter, 2000

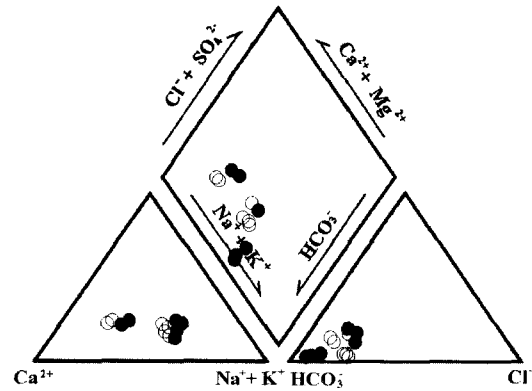


Fig. 10. Piper diagram of the stream water (Piper, 1944). ○ : in winter, 1999, ● : in summer, 2000

부터 하류로 갈수록 오히려 증가하고 있으며, turbidity 값은 모두 0으로 나타난다. 이러한 이유는 채취한 시료가 물의 이동이 거의 없을 만큼 하천의 바닥이 마른 상태인 건기였기 때문이다.

2.3. 수질특성

지하수분석 결과, 4가지 물의 유형분류(Hounslow, 1995)에 의한 수질 특성은 여름철시료 중 ㉠, 겨울철시료 중 ㉡, ㉢지점에서 염수영역인 Na-Cl형에 도시되고 있으며, 여름철시료 중 ㉣, 겨울철시료 중 ㉤, ㉥지점에서는 Na-HCO₃형으로 분류되고 있다. 그 외의 지하수들은 Ca-Cl₂형의 일반적인 수질특성을 갖는 것으로 도시되고 있다(Fig. 9). Ca성분은 주로 CaCO₃와 CaAl₂Si₂O₈으로부터 유래되는 것으로 알려져 있으며, 본 연구지역에서는 흑운모화강암 중 주요성분인 사장석(CaAl₂Si₂O₈)의 풍화에서 유래한다. Na-Cl형은 기반암에 의한 영향보다는 매립장에 근접한 지하수 및 하천수 중 NaCl(%)과 관련이 있으며

따라서 이는 매립장에 의한 영향에 기인한 것으로 사료된다.

연구지역 하천수의 분석 결과, 위생매립장의 북동방향의 하천수가 일시적 경수영역에 도시되고 수질유형은 Ca-HCO₃형으로 분류되며, 위생매립장 입구쪽의 하천수는 일시적 경수와 알카리 탄산염의 중간영역에 도시되고 수질유형은 Na-HCO₃형으로 도시되고 있다(Fig. 10). 운정동위생매립장 입구쪽에 흐르는 하천수의 경우, 차종문 등(1999)에 의한 광주지역 일곡 매립지 주변의 수질유형과 서로 유사한 유형을 보였으며, 오석영과 전효택(1996)에 의한 난지도와 김포 매립지 침출수 중 Na, K함량이 우세하였다는 내용과도 일치하는 결과를 보이고 있다.

2.4. CaCO₃ 포화지수

수중의 이온용해도의 정도를 0을 기준으로 구분한 포화지수(saturation index)는 0이상일 때는 이온이 과포화 상태에 있게 되어 이온의 침전반응이 일어나고,

0이하일 때는 이온이 평형상태에 도달하기 위하여 용해반응이 활발하게 일어나는 불포화 상태를 나타낸다. CaCO₃에 의하여 물이 scale-forming(encrusive)상태에 있는지 또는 corrosive상태에 있는지를 판정하는 데 사용되는 것이 Langelier index(LI)와 Ryznar index(RI)이다(Tchobanoglous & Schroeder, 1985; Hounslow, 1995).

분석된 Langelier index(LI)는 여름철 시료에서는 연구지역의 모든 지하수중의 탄산칼슘이 불포화상태임을 의미하는 0이하의 값을 나타냈으며, Ryznar index(RI)는 8.5이상의 지수를 갖는 것으로 분석되어 탄산칼슘이 불포화상태임을 나타내고 있다. 그러나, 겨울철 시료에서는 모든 지하수에서 Langelier index(LI) 값이 0이상으로 나타나고 있으며, Ryznar index(RI)는 B시료를 제외하고는 5.5이하로 탄산칼슘이 과포화상태에 있음을 확인하였다(Table 7, Fig. 11).

하천수의 Langelier index(LI)는 겨울철 시료와 여름철 시료에서 비교적 비슷한 양상을 갖는 것으로 나

타나고 있으며, 지점별로는 매립장의 침출수가 합류하는 수계에서 CaCO₃가 약간의 과포화상태에 있음을 나타내고 있다. Ryznar index(RI)는 매립장의 침출수가 합류하는 수계에서 corrosive 상태를 보이고 있으며, 그 외의 주변 수계에서는 very corrosive 상태를 나타내고 있다(Table 8, Fig. 12).

2.5. 수계지구화학

수계환경중의 원소의 거동에 따른 함량의 분포를 매립장의 침출수에 대한 화학분석자료와 비교하여 상호간의 연관성을 파악하였다. 7종의 음이온 원소를 포함한 총 71종의 원소에 대하여 분석한 결과를 토대로 원소함량이 부화하거나 변화의 양상이 뚜렷한 As을 포함한 24개 양이온과 음이온을 선정하였으며, 이들 원소들간의 자료를 비교하여 수계의 이상유무를 분석하였다. 또한 침출수 중 함량이 높게 나타난 원소들을 대상으로 오염지수(P. I.; Pollution Index)를 구하여 각 지점별 오염정도를 파악하였다.

Table 7. Saturation index of CaCO₃ of the groundwater from the studied area.

		Langelier index	Ryznar index
SUMMER/2000	A	-2.32	10.84
	B	-2.69	11.88
	C	-1.86	10.56
	D	-2.10	10.80
	E	-1.85	10.55
	F	-2.04	10.26
WINTER/2000	A	1.08	4.55
	B	0.11	6.29
	C	1.94	2.94
	D	0.99	4.60
	E	1.26	4.26
	F	1.95	3.12

Table 8. Saturation index of CaCO₃ of the stream water from the studied area.

		Langelier index	Ryznar index
WINTER/1999	1	0.55	7.30
	3	0.59	7.23
	5	0.65	7.09
	6	-2.44	12.21
	8	-1.64	10.64
	9	-1.88	10.88
SUMMER/2000	1	0.26	7.79
	3	0.34	7.62
	5	0.65	7.12
	6	-3.58	13.03
	8	-2.16	11.16
	9	-0.27	9.27

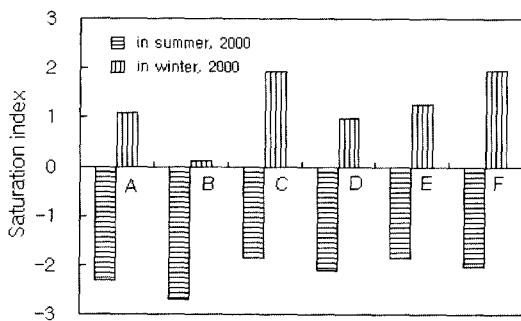


Fig. 11. Saturation index of CaCO₃ of the groundwater from the studied area.

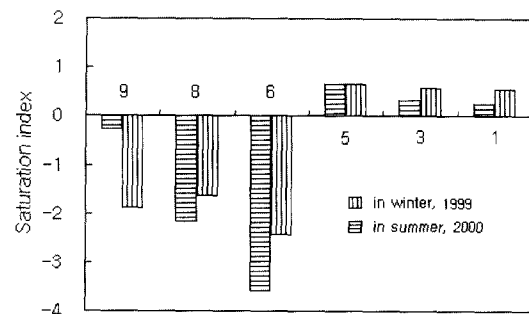


Fig. 12. Saturation index of CaCO₃ of the stream water from the studied area.

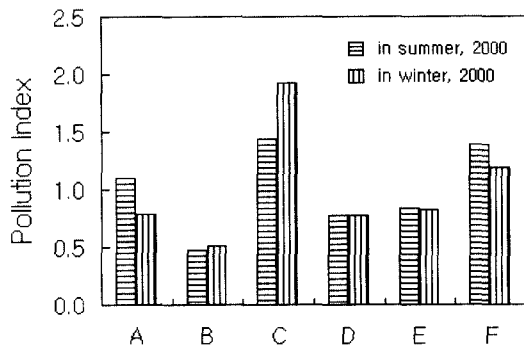


Fig. 13. Pollution Index for the groundwater in the vicinity of the Woonjeongdong sanitary landfill area.

연구지역의 지하수는 ①, ③, 그리고 ⑥지점에서 각각 높은 분석원소함량을 보이고 있다(Table 2, 3, Fig. 13). 이들 지점 중 ①과 ⑥지점은 매립장의 침출수에 의한 영향으로 사료되며, ③지점은 매립장에서 배출된 잡용수로 인하여 오염을 받은 하천수에 의해 2차적인 오염을 받은 것으로 판단된다.

하천수 중 원소함량은 겨울철시료에서 As, Ba, Br, Ca, Cl, Cr, Fe, I, K, Li, Mg, Mn, Na, Rb, Sr,

U등의 원소함량이 더 높게 나타나는 경향을 보이고 있다. 우기인 여름철에 비하여 건기인 겨울철시료 중의 수량이 적어서 이들 원소들이 상대적으로 높은 함량을 보인 것으로 사료된다.

지하수의 경우와 마찬가지로 침출수 중 함량이 높게 나타난 원소들을 대상으로 오염지수(P. I.; Pollution Index)를 구하여 특정원소의 오염도를 비교한 결과, 매립장의 배출수가 합류된 지점의 수계로부터 오염지수가 높게 나타나고 있음을 확인하였다. 이는 매립시설이 주변 수계에 대하여 오염부과요인으로 작용하였음을 나타낸다.

운정동위생매립장의 침출수는 Ca, K, Mg, Na, Si, HCO₃⁻, Cl⁻, F⁻, SO₄²⁻등의 원소함량은 높게 나타나지만 기타 미량성분 원소함량은 주변의 하천수에 비하여 높지 않은 특성을 보이고 있다. 침출수 중 함량이 높은 원소들을 대상으로 오염지수(PI; Pollution Index)를 구하여 특정원소의 오염도를 비교한 결과, 매립장의 배출수가 합류된 지점의 수계로부터 오염지수가 높게 나타나고 있음을 확인하였으며, 이는 운정동위생매립장이 주변 수계에 대하여 오염부과요인으로 작용하였음을 나타낸다(Table 4, 5, 6, Fig. 14).

Table 9. R-mode factor analysis for the groundwater.

Principal Components	Elements of positive factor loading	Eigen value	Proportion (%)
Factor 1	Ca-NO ₃ -Zn-Si-Pb-As-(SO ₄ ²⁻)	5.28	33.01
Factor 2	K-Mg-F-Na-Cl-Si-Mn-(SO ₄ ²⁻)	3.93	24.61
Factor 3	Fe-Al-Cu-(Pb)-(Zn)	3.49	21.85
Factor 4	F-Mn-(As)	2.48	15.54

Principal Components	Elements of positive factor loading	Eigen value	Proportion (%)
Factor 1	Mg-Na-Ca-As-Zn-NO ₃	4.41	33.01
Factor 2	Pb-Cl-Zn-Si-(SO ₄ ²⁻)	3.91	24.61
Factor 3	Cu-Si-NO ₃ -(K)-(F)	3.71	21.85
Factor 4	Fe-Al-F-Mn	3.15	15.54

Table 10. R-mode factor analysis for the stream water.

Principal Components	Elements of positive factor loading	Eigen value	Proportion (%)
Factor 1	Zn-Cu-Fe-Mn-Cl-Pb-(Na)-(K)-(Mg)-(Ca)	6.05	37.87
Factor 2	Na-K-Mg-Ca-Si-NO ₃ ⁻ -Pb-(Cl)	4.56	28.52
Factor 3	SO ₄ ²⁻ -(NO ₃ ⁻)	2.20	13.80
Factor 4	As-F-(Si)-(Al)	1.70	10.67

Varimax	Elements of positive factor loading	Eigen value	Proportion (%)
Factor 1	Mn-Fe-Cu-Pb-Zn-F	5.13	37.87
Factor 2	Mg-K-Na-Ca-(Cl)	4.79	28.52
Factor 3	Si-NO ₃ ⁻ -(SO ₄ ²⁻)	2.72	13.80
Factor 4	As-(Al)	1.87	10.67

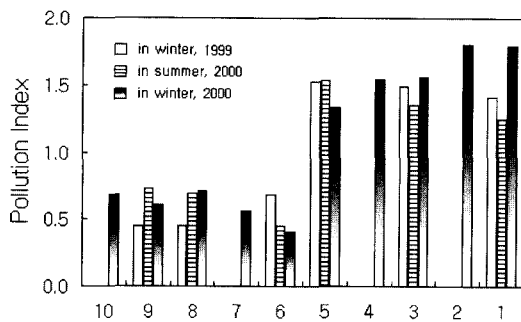


Fig. 14. Pollution Index for the stream water in the vicinity of the Woonjeongdong sanitary landfill area.

2.6. 요인분석

운정동 위생매립장 인근 하천수와 지하수시료 중 분석된 금속원소들의 원소상호간 관계와 시료들사이의 관계를 고찰하기 위하여 주성분분석(Principal Component Analysis)방법에 의하여 요인을 추출하였고 적절한 요인적재값을 추출하기 위해 eigenvalue 1이상인 값을 선택하였다. 요인과 변수간의 해석을 쉽게 하기 위하여 Verimax 회전법을 이용하여 eigenvalue를 계산하였으며, 요인별로 양(positive)의 요인적재값(회전전과 회전후)을 갖는 원소들을 분류하였다.

지하수에 대한 요인분석 결과, 요인 1의 적재값 분포는 대체로 산점상의 분포를 보이며, 요인적재값이 0.5이상인 원소들은 Ca-NO₃⁻-Zn-Si-Pb-As-(SO₄²⁻)로 33.01%의 설명력을 갖는다. 요인 2는 주로 침출수중의 함량이 높게 나타나는 원소들(Ca, Mg, Na, K, Cl⁻, SO₄²⁻, F⁻)의 수반관계를 지시하고 있으며 24.61%의 설명력을 갖는다. 요인 3에서는 미량 금속원소인 Fe-Al-Cu-(Pb)-(Zn)의 수반관계를 나타낸다. 이들은 0.5이상의 요인적재값을 가지며 요인의 값이 클수록 Pb와 Zn의 함량은 낮게 나타난다. 회전 전 요인 4에서는 F-Mn-(As)의 수반관계를 지시하고 있으며, 회전 후에는 Fe-Al-F-Mn으로 분류되고 있다(Table 9).

하천수에 대한 요인분석 결과, 요인 1의 0.5이상값을 갖는 원소들은 회전 전 요인 1의 값이 클수록 금속 미량성분 원소들의 함량은 증가하고 반대로 주성분 원소인 Na, K, Mg, Ca의 함량은 감소한다. 회전 후 요인 1은 Mn, Fe, Cu, Pb, Zn등이 거의 같은 공간에 분포하는 양호한 수반관계를 가지며 이와는 조금 거리를 두고 F가 한데 묶이고 있다. 요인 2는 회전 전, 주성분 원소를 포함한 NO₃⁻, Pb 등이 높은 함량분포를 보이며, Cl⁻는 낮은 함량을 보이는 수반관계를 보인다. 그러나 회전 후에는 주성분 원소인 Mg-K-Na-Ca와

이와 쉽게 결합할 수 있는 Cl⁻의 비교적 명료한 수반관계를 나타냈으며, 이는 침출수 중 함량이 높은 원소 그룹(Ca, Mg, Na, K, Cl⁻, SO₄²⁻, F⁻)과 거의 일치하고 있다. 요인 3은 회전 전, 요인 3의 값이 클수록 높은 함량을 보이는 SO₄²⁻와 반대로 낮은 함량을 보이는 NO₃⁻이 수반되는 특징을 보인다. 이는 두 성분의 침출수 중 함량분포와 동일한 경향을 나타낸다. 회전 후, 이 같은 관계는 역전되어 정반대의 결과를 보이고 있다. 요인 4는 회전 전, As-F-(Si)-(Al)의 수반관계를 보이며, 회전 후에는 As-(Al)의 수반 특성을 보인다(Table 10).

결론

1. 매립장의 잡용수가 유입되는 지점의 하천수는 주변 하천수에 비하여 약알칼리성의 pH, 낮은 DO포화도, 그리고 높은 EC, turbidity, TDS, NaCl(%)을 나타내는 특성을 보인다. 민원으로 분제가 된 운정동위생매립장 진입로변 악취의 주 원인은 바로 DO의 결핍으로 인한 악취유발물질인 CH₄, NH₃, H₂S등의 혐기성물질의 생성때문인 것으로 사료된다.

2. 잡용수가 함유한 하천에 인접한 ㉔지점의 지하수에서 EC, TDS, NaCl(%) 등이 높게 나타나고 있으며, ㉑와 ㉒지점의 지하수에서도 이러한 특성값들이 높게 나타나는 특징을 보이고 있다.

3. ㉑, ㉒, ㉓의 지하수는 매립장의 침출수와 잡용수에 의한 오염을 나타내는 Na-Cl형으로 분류되며, ㉔지점의 지하수는 Na-HCO₃형, 그리고 그 외의 지하수들은 일반적인 수질특성을 갖는 Ca-Cl₂형으로 분류된다. 하천수의 수질유형은 운정동위생매립장의 북동방향의 농업용수는 Ca-HCO₃형으로, 운정동위생매립장 앞으로 흐르는 하천수는 Na-HCO₃형으로 분류된다.

4. 요인분석결과, 침출수중의 함량이 높게 나타나는 원소들(Ca, Mg, Na, K, Cl⁻, SO₄²⁻, F⁻)의 명료한 수반관계를 확인하였으며, 이들을 매립장 주변 수계의 오염지시자로 활용할 수 있을 것이다.

5. 운정동위생매립장에서 배출되는 잡용수에 의하여 진입로변 하천과 주변 지하수에 오염부과요인이 있는 것으로 확인하였다. 현재 관할구청에서는 매립장주변 하천을 시멘트수로화하는 작업을 통하여 악취의 발생을 억제하는데 주력하고 있다. 그러나 근본적인 해결을 위하여는 매립장에서 발생하는 잡용수를 수로에 방류하지 않고 침전조로 보내 침출수와 함께 하수종말처리장으로 압송시켜야 할 것으로 사료된다. 또한, 매립

장으로부터 비교적 먼 곳에 위치한 지하수의 오염은 우수집배관 및 매립장 차수재의 파손 등으로 인한 침출수의 유출 등이 의심된다. 그러나 정확한 유출경로 파악을 위해서는 보다 정밀한 조사가 필요하다.

참고문헌

- 김경웅, 손호웅 (1994) 대전시 신대동 폐기물매립지 주변 지역에서의 지하수 및 토양의 지하수 오염. 지하수환경, 1권, 2호, p. 85-89.
- 김계남 (1996) 폐기물처분장 주변에서의 지하수유동 및 오염물질이동 특성에 관한 연구. 한국과학기술원 박사학위논문, 178p.
- 손치무, 김수진 (1966) 창평지질도폭 설명서, 1:50,000. 상공부 국립지질조사소, 30p.
- 오석영, 전효택 (1996) 폐기물 매립지 주변의 지하수 오염과 점토 차수벽에 관한 연구. 한국자원공학회, 제66회 학술발표회논문집, p. 55-60.
- 이철호 (1994) 난지도 매립지 침출수에 의한 지하수오염 특성 분석. 서울대학교 환경대학원 석사학위논문, 94p.
- 林年豊 (1996) 의학환경지구화학. 도서출판 춘광, 434p.
- 장준영 (1993) 수질환경기사. 성안당, p. 1-33-1-44.
- 차종분, 김주용, 이병태, 김경웅 (1999) 광주지역 일곡 매립지 주변에서의 하천수 및 지하수 오염 모니터링. 대한자원환경지질학회지, 32권, p. 485-493.
- 최영국 (1994) 공주시 폐기물 매립지 부근의 침출수 유동과 토양오염에 관한 지구물리·화학적 연구. 공주대학교 대학원 석사학위논문, 46p.
- 홍승욱, 윤 욱, 1986, 송정도폭 지질보고서(1:50,000). 한국동력자원연구소, 23p.
- 환경부 (2000) <http://www.me.go.kr>
- Baas-Becking, L.G.M., Kaplan, I.R. and Moore, O. (1960) Limits of the natural environment in terms of pH and oxidation-reduction potentials. J. Geol., v. 68, p. 243-284.
- Fortescue, J.A.C.F. (1980) Environmental Chemistry. Springer-Verlag, New York, 347p.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. (1979) Groundwater. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 604p.
- Garrels, R.M., Christ. C.L. (1965) Solutions, Minerals, and Equilibria. Freeman-Cooper, San Francisco, 381p.
- Hounslow, A.W. (1995) Water quality data. Lewis Publishers, New York, 397p.
- Kerndorff, H., Schieyer, R. and Milde. G. (1992) Geochemistry of groundwater pollutants at German waste disposal sites. In S. Lesage and R.E. Jackson(ed.) Groundwater Contamination and Analysis at Hazardous Waste Sites, Marcel-Dekker Inc., p. 245-271.
- Nicholson, R.V., Cherry, J.A. and Readon, E.J. (1983) Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study; 6. Hydrochemistry, J. of Hydrol., v. 63, p. 131-176.
- Piper, A.M. (1944) A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. Am. Geophys. Union Trans., v. 25, p. 914-923.
- Sergeev, V.I., Shimko, T.G., Kuleshova, M.L., Masimovich, N.G. (1996) Groundwater protection against pollution by heavy metals at waste disposal Sites. Wat. Sci. Tech., v. 34, n. 7-8, p. 383-387.
- Tchobanoglous, G., Schroeder, E.D. (1985) Water quality. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 768p.
- Wadleigh, C.H. (1968) Waste in relation to agriculture and forestry. Misc. Pub. No. 1065., U.S. Dept. Agr., p. 112.

2001년 8월 28일 원고접수, 2001년 12월 19일 게재승인.