

## 부산 석대 폐기물 매립지 일원의 수질 환경

# The Water Environment at the Seokdae Waste Landfill Area in the Pusan Metropolitan City

정상용(Sang - Yong Chung)\* · 권해우(Hae - Woo Kweon)\*\* ·

이강근(Kang - Kun Lee)\*\*\* · 김윤영(Yoon - Young Kim)\*\*\*

**요 약** : 부산 석대 생활폐기물 매립지는 1987년 6월부터 1993년 5월까지 만 6년간 사용된 중간규모의 매립장이다. 매립장에 분포하는 안산암질암과 유문암질암에는 절리와 단층이 발달되어 있다. 1996년 7월과 1997년 6월에 2차에 걸쳐 침출수, 하천수 및 지하수의 수질을 조사한 결과 침출수와 하천수의 수질은 농도가 약간 감소되었으나, 지하수 수질은 더 악화되었다. 석대매립지의 지하수 오염은 층적층에 개발된 천층지하수는 물론이고, 150 m 심도의 암반지하수들도 오염이 심화되어 있다. 침출수에 의한 지하수 오염범위는 매립장 경계에서 서쪽으로 약 500 m 정도, 남쪽으로 약 1 km 정도 까지이다. 석대 매립지 주변 수질의 오염 제어를 위해서는 매립지 일원에 감시정 및 채수정의 개발, 침출수처리장 건설, 기존의 지하 차수벽시설 보완작업 등이 필요하다.

**Abstracts** : The Seokdae Waste Landfill is a middle-sized site used from June, 1987 to May, 1993. Many joints and faults are developed in andesitic rocks and rhyolitic rocks distributed at the landfill. The chemical analyses of leachates, streams and groundwaters sampled in July, 1996 and June, 1997 show that the concentrations of leachates and streams were decreased, and that the groundwater qualities became worse. The groundwater contamination is deeply extended to not only shallow groundwater but also bedrock-groundwater around the Seokdae Waste Landfill Area. The range of groundwater contamination by the leachates is about 500 m to the west and about 1 km to the south from the boundaries of the waste landfill. The development of monitoring wells and pumping wells, the construction of a leachate-treatment facilities, and the adjustment of the existing grout curtains are necessary for the control of water pollution at the Seokdae Waste Landfill Area.

### 서 론

각종 산업의 고도화와 국민 생활수준의 향상으로 각종 폐기물은 날로 증가되고 있는 실정이며, 폐기물의 효과적인 처리가 오늘날 지역사회 중요한 문제로 대두되고 있다. 매립에 의한 폐기물 처리는 침출수를 발생시켜 매립지 일대의 지하수를 오염시키게 된다. 우리나라 대규모 생활 폐기물 매립지에는 서울의 난지도와 김포 매립지가 있으며, 기타 중간 내지는 소규모 매립지가 전국 곳곳에 산재해 있다. 부산에서 그동안 사용했었던 생활 폐기물 매립지로는 신평동 매립지, 명지 매립지, 대저 매립지, 화명 매립지, 석대 매립지와 을숙도 매립지가 있으며, 1996년도 부터는 생곡 매립지가 이용되고 있다.

부산 석대 생활 폐기물 매립지는 1987년 6월부터 폐기물 매립이 시작되어 1993년 5월말까지 만 6년간 사용되었던 중간 규모의 매립장이다. 석대 매립지는 부산에서 처음으로 위생매립

을 실시 하였으나 그 시설이 매우 미비하여 단순투기 형식의 매립장이나 다름없다. 석대 매립지의 매립면적은 약 514,345 m<sup>2</sup> (155,826평)이고 매립량은 약 1,280만m<sup>3</sup>(부산직할시 해운대구, 1993)에 이르고 악취, 유독가스(CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S 등), 침출수 등이 발생하여 주변지역에 많은 문제를 야기시켜왔다(정, 1995).

본 연구에서는 매립장에서 발생하는 침출수의 수질, 매립장 주변에 위치하는 동천과 석대천의 수질과 매립장 주변의 지하수 수질을 1996년 7월과 1997년 6월에 조사하여 생활 폐기물 매립이 끝난지 만 4년이 경과한 현재의 지하수 오염상태를 분석하고, 침출수에 의한 지하수의 오염범위와 그 정도를 파악한다. 아울러 침출수에 의한 지하수 오염제어 대책에 대해서도 논의한다.

### 지형 및 지질

본 연구 대상지역인 석대 폐기물 매립지는 부산시 해운대구 석대동 산 192번지 일원에 위치하며, 지리적 좌표는 대략 북위 35°12'58"-35°13'16"이고 동경 129°7'38"-129°7'58"에 속한다. 매립지는 계곡에 위치하며, 매립심도는 20~40 m의 범위이다.

\*부경대학교 지구환경과학부(Division of Earth Environmental Geosciences, Pukyong National University, Pusan 599-1, Korea)

\*\*대한광업진흥공사 기술사업처(Department of Geotechnical Engineering, Korea Resources Cooperation, Seoul 686-48, Korea)

\*\*\*서울대학교 지질과학과(Department of Geological Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

Figure 1에서 보면 매립장 일원의 지질은 중생대 백악기에 경상계 퇴적암층(이천리층)을 관입 및 분출한 안산암질암, 유문암질암 및 이를 덮고 있는 충적층으로 구성되어 있다(손치무 등, 1978). 안산암질암은 매립지 동쪽에 위치하며 세립질 안산암, 반상 안산암 및 각력 안산암등으로 구성되어 있다. 안산암질암에는 절리나 단층들이 발달되어 있으며, N20E 90°와 N60W 38°SW의 절리계가 우세하다.

유문암질암은 석대 매립지 서쪽에 발달되어 있고, 안산암질암을 관입 분출하며, 유동구조의 발달은 미약한 편이다. 석대 매립장 입구의 서쪽에 분포하는 유문암에는 열극이 매우 발달되어 있어서 열극 간격이 보통 수 cm이나 큰 것은 20 cm 정도인 것도 있다. 유문암질암에 발달된 절리의 주 방향은 N6E 86NW와 N87W 29SW이다. 이중 북동 방향의 절리계는 부산 일원의 대단층(연양단층, 울산단층 등)과 연관되며, 동서 방향의 절리계는 유문암질 뿐만아니라 안산암질에도 발달되어 있는

이 지역의 특징적인 구조선이다. 회동동 마을에 인접한 매립장 서쪽편의 산 능선에 나타나는 유문암에는 N82E 70SE, N34E 70W, N46W 62NE 방향의 절리들이 우세하게 나타난다.

### 우물조사

석대 폐기물 매립에 의한 주변 지역의 지하수 오염상태를 파악하기 위해 회동동 마을과 석대동, 금사동 및 반여동 일대의 가정용 소규모 우물과 시추공에 대해 1996년 7월 30일에서 7월 31일 양일간과 1997년 6월 20일에 걸쳐 온도, pH, 전기전도도 및 지하수위 등을 측정하였다. 조사지점의 위치는 Figure 1에 표시되어 있고 측정결과는 Table 1에 있다. 조사지역에 분포하는 우물의 종류는 대부분이 인력으로 개발한 수굴 정도(dug well)로서 주로 충적층에 개발된 심도가 얕은 우물이다. 이러한 수굴정도들은 폐기물 매립이 진행된 1993년 까지도 식수와 생활용수로 이용되다가, 최근에는 지하수 오염이 심각하여 생활용수로만 이용되고 있다. 암반지하수공들은 금사동 일대에서는 공장 용수(9, 10번 우물)로 사용중이고, 석대동과 반여동에서는 식수와 생활 용수(18, 20, 23, 26번 우물)로 이용되고 있다.

96년 7월에 조사한 지하수의 온도 분포는 15~30°C 범위의 값으로 계절적인 영향으로 약간 높게 나타났다. pH는 5.44~7.33으로 대부분 약산성에서 중성에 가깝다. 전기전도도는 6번 우물만이 85.1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 낮으며 나머지는 276~1,216  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 비교적 높은 값들을 보여준다. 4번은 회동동 마을의 일부 가정에서 공동 식수로 이용하고 있는 지표수의 집수지점으로 전기전도도가 146.4  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이다.

조사 지역의 우물이 위치하고 있는 지형적인 특성이나 수질 분석 자료 등을 검토해 볼 때 침출수에 의한 영향을 받고 있지 않는 경우에는 전기전도도가 276~345  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위이다. 따라서 이 지역에서는 대략 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 가 오염의 기준 범위로 추정되어진다. 총 25개의 우물 중에서 전기전도도가 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  이상되는 것은 14개이고, 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  이하인 우물이 11개이다. 9번과 10번 우물은 공장폐수의 영향을 많이 받고 있으며, 18번, 19번, 24번, 26번 우물은 매립장 입구에 위치하여 침출수의 영향을 많이 받고 있다. 특히 18번과 26번 우물은 150 m 심도의 암반지하수임에도 불구하고 침출수에 의한 지하수오염이 심화되어 있다. 매립장에서 1 km 정도 떨어져 있는 심도 150 m의 20번 우물에서의 전기전도도는 470  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 약간 높은 편이다. 1996년 석대동 입구에 공동급수용으로 개발된 23번 우물은 심도가 166 m이며, 이 지역에서는 유일한 피압상태의 지하수이다. 전기전도도가 316  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 낮은 값이어서 침출수에 의한 오염의 영향이 적은 것으로 보인다.

매립장 주변의 우물 중에서 충적층에 개발된 수굴정도의 지하수위는 지표면하 0.11~5.36 m 범위이다. 암반에 개발된 시추공의 경우는 지하수위 측정이 불가능하여 자료를 획득하지 못하였다. 그러나 석대동에 개발된 23번 우물은 인위적인 양수 없이도 물이 지표로 유출되는 자분정(flowing well)으로 지하수위가 지표면보다 0.89 m 위에 형성되므로 하부 암반대수층의 수량도 비교적 풍부한 것으로 추정된다.

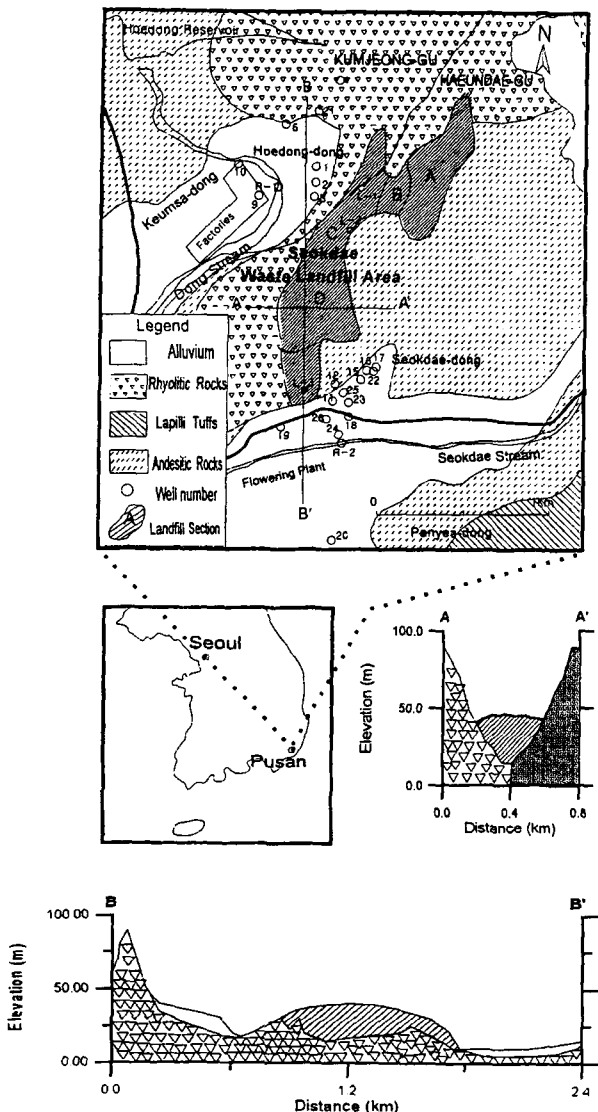


Figure 1. Location and geological map of the Seokdae Waste Landfill Area. It also shows the location of well and leachate samples.

Table 1. Well Inventories around the Seokdae Waste Landfill

Well No.	Temp (°C)	pH	EC (μS/cm)	Water Level (below surface)	Well Type	Use	Remarks
1	18.1	6.15	426	1.06	dug well	domestic	
2	15.3	6.61	562	3.76	dug well	domestic	unused
3	15.3(18.3)	6.25(5.64)	736(780)	4.66	dug well	domestic	
4	27.2	6.88	146.4			domestic	surface water
6	20.9	5.74	85.1	0.11	dug well	domestic	
9	21.1	6.25	766		bored well	fish farming	Miwha factory
10	32.1	6.90	1216		bored well	industrial	Cheongi factory
11	23.0	7.08	582	1.05	dug well	domestic	unused
12	16.7	6.14	794	5.36	dug well	domestic	
15	17.7	5.86	660	2.30	dug well	domestic	unused
16	19.4	5.44	276	0.20	dug well	domestic	
17	16.7	6.19	444	1.53	dug well	domestic	unused
18	20.6(18.0)	6.71(6.38)	964(1008)		bored well	domestic	well depth 150 m
19	30.0	6.28	914		dug well	flower farming	well depth 5 m
20	26.9(20.7)	7.13(6.94)	470(423)		bored well	domestic	well depth 150 m
21	25.1	6.76	318	0.92	dug well	domestic	unused
22	19.6	5.66	325	2.02	dug well	domestic	
23	21.6(18.0)	7.33(7.62)	316(343)	0.89(above surface)	bored well	public	well depth 166 m
24	19.5	6.63	765	2.80	dug well	Irrigation	well depth 6 m
25	(22.8)	(6.00)	(345)		dug well	domestic	
26	17.9(20.6)	6.68(6.77)	946(1036)		bored well	domestic	well depth 150 m

※ 조사자료는 1996년 7월 30일~31일 양일간에 측정되었으며, ( )안의 자료는 1997년 6월 20일에 측정 되었음.

1997년 6월에는 회동동에서 오염이 많이된 3번 우물과 석대 동에서 암반지하수들(18번, 20번, 23번, 26번)과 25번 수굴정 호에 대하여서만 조사하였다. 이때의 지하수 온도 분포는 18.0~22.8°C이고, pH는 5.64~7.62의 범위에 있다. 전기전도도는 343~1,036 μS/cm 범위로서 비교적 높은 편이며, 20번 우물을 제외하고 3번, 18번, 23번, 26번 우물은 96년에 비하여 약간씩 증가하여 수질이 점차 악화되어 가고 있다. 지하수위는 우물들이 전부 밀폐되어 있어서 측정되지 못하였다.

### 수질특성

#### 침출수의 수질 특성

1996년 여름 장마후 보름 정도 지난 7월 30일에 매립장내의 3개 지점(Figure 1의 L-1, L-2, L-3)에서 침출수를 채취하여 분석하였다. Leachate-1은 매립 C지구 집수정에 있는 농도가 아주 열은 침출수이고, Leachate-2는 석대매립장 배수로에서, Leachate-3는 석대매립장 입구의 침출수 집수장에서 각각 채취되었다. pH, EC는 현장에서 측정되었으며, Total Alkalinity와 Bicarbonate Alkalinity는 부경대학교 환경공학과에서, 그리고 양이온, 음이온 및 중금속류는 표준과학원 기초과학지원 연구소(서울분소)에서 분석되었다. 분석결과는 Table 2에 있다.

분석결과에 의하면 Leachate-1의 pH는 약산성이지만 농도가 짙은 Leachate-2와 Leachate-3는 약알칼리성이다. EC(전기전도도)는 Leachate-1이 850 μS/cm로서 매우 낮으며, Leachate-2와 Leachate-3는 각각 19,900 μS/cm와 15,550 μS/cm로써 상당히 크다. 국내 최대의 생활폐기물 매립지이었고, 1978년부터 1993년까지 약 15년 동안 서울에서 발생하는 모든 생활폐기

물과 산업폐기물 일부를 매립해왔던 난지도에 발생된 침출수의 전기전도도는 1994년 3월에 2,730~43,400 μS/cm이었다(이철호 등, 1996). Total Alkalinity는 234~896 mg/l로 상당히 높고, Bicarbonate Alkalinity의 함량도 176~672 mg/l로 침출수의 주성분을 이룬다. 정(1995)에 의하면 석대매립장에서 발생하는 가스 중에서 CO<sub>2</sub>가 44.54%를 차지한다. CO<sub>2</sub>가스는 물과 반응해서 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>이온을 형성하게 되므로 침출수에는 다량의 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>이온을 함유하게 된다.

Leachate-1은 지표면에 고여있어서 총고용물질의 함량은 작지만, SO<sub>4</sub>가 125.03 mg/l으로 Leachate-2와 Leachate-3의 3배 이상이다. SO<sub>4</sub>의 함량이 높은 이유는 H<sub>2</sub>S 가스가 아직도 매립장에서 상당량 방출되고 있어서 배수로와 집수로에 이동되어 있는 침출수보다도 지표면에 고여 있는 침출수에 H<sub>2</sub>S 가스가 많이 용해되어 있기 때문이다. SO<sub>4</sub>는 물에 용해되어 있는 H<sub>2</sub>S 가스의 산화작용에 의해서 형성되어진다(Freeze & Cherry, 1979; Devanny *et al.*, 1990). 비반응성 용질 Cl은 Leachate-1에서는 작지만 Leachate-2와 Leachate-3에서는 각각 1,758.94 mg/l, 1,266.29 mg/l로서 상당히 높게 나타난다. 따라서 매립이 끝난지 3년이 경과했지만 아직도 폐기물의 생분해가 활발히 진행되고 있다는 것을 알 수 있다. NO<sub>3</sub>는 Leachate-2에서 251.28 mg/l으로 다량 나타나며, NO<sub>2</sub>는 Leachate-2와 Leachate-3에서 264.40 mg/l과 231.97 mg/l로 다량 나타난다. 일반적으로 NO<sub>2</sub>는 오염이 안된 물에서는 거의 검출이 되지 않는다. F는 Leachate-2와 Leachate-3에서 각각 11.34 mg/l와 7.35 mg/l로 음용수 기준치 1.5 mg/l보다 5~8배 정도 검출되었다.

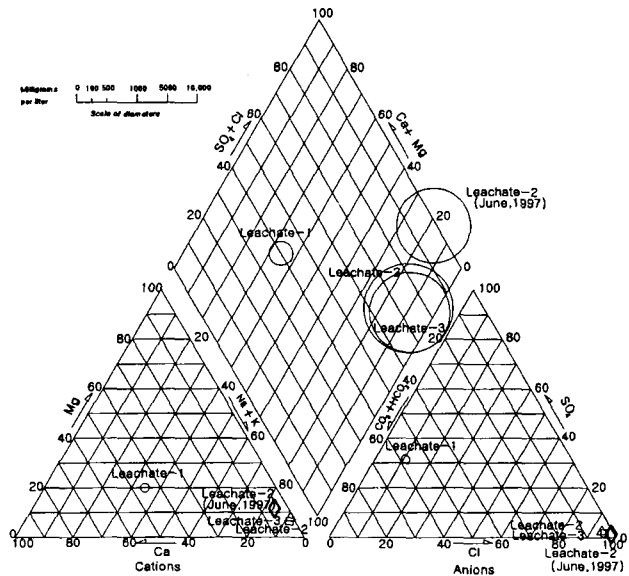
중금속류에서는 Cr은 Cr<sup>3+</sup>과 Cr<sup>6+</sup>의 총합량이며, 18.45~

**Table 2.** Chemical Analysis of Leachate in the Seokdae Waste Landfill

Component	Leachate-1		Leachate-2		Leachate-3	
	July, 96	July, 96	June, 97	July, 96	July, 96	July, 96
pH	6.64	7.82	8.06	8.25		
EC (μS/cm)	850	19,900	14,780	15,550		
Total Alkalinity (mg/l)	234	896	-	684		
Bicarbonate Alkalinity ( " )	176	672	-	518		
Na ( " )	38.81	1818.58	782.1	1293.14		
Mg ( " )	13.69	89.63	63.35	75.49		
K ( " )	11.16	1007.09	76.92	723.70		
Ca ( " )	52.72	41.22	62.85	18.38		
Cl ( " )	31.07	1758.94	1832.72	1266.29		
NO <sub>3</sub> ( " )	10.46	251.28	16.06	22.01		
NO <sub>2</sub> ( " )	< 0.1	264.40	8.68	231.97		
SO <sub>4</sub> ( " )	125.03	38.40	34.94	42.39		
F ( " )	< 0.1	11.34	1.88	7.35		
PO <sub>4</sub> ( " )	< 0.1	40.89	35.99	< 0.1		
Br ( " )	< 0.1	< 0.1	17.79	< 0.1		
Cr (μg/l)	18.45	473.40	255.80	296.81		
Mn ( " )	3675.57	376.83	-	371.80		
Co ( " )	5.83	49.77	49.60	35.24		
Ni ( " )	9.25	233.42	206.02	156.81		
Cu ( " )	13.02	21.64	35.90	17.68		
Zn ( " )	33.89	124.18	76.57	80.51		
Cd ( " )	2.40	2.69	0.54	2.79		
Pb ( " )	10.61	11.90	9.21	5.89		
Al ( " )	109.09	396.36	424	395.44		
Ba ( " )	41.67	252.84	213.31	211.12		
U ( " )	< 1.00	< 1.00	0.80	< 1.00		

473.40 μg/l로서 다량 나타나고 있다. Cr<sup>6+</sup>은 발암성물질로 음용수 기준치는 50 μg/l이다. Mn은 371.8~3,675.57 μg/l로서 음용수 기준치 300 μg/l를 크게 초과 한다. Al은 109.09~396.36 μg/l의 범위로서 음용수 기준치 200 μg/l보다 높게 나타났다. Cu, Zn, Cd, Pb들은 음용수 기준치 범위 내에 있지만, 이 성분들은 미물질에 흡착되는 성질이 크기 때문에 시료 채취나 보관 시 또는 분석시 여과에 의해 농도가 낮아졌을 가능성이 있다. 오와 전(1996)은 그 이유를 생분해와 희석, 침전, 흡착등의 지연작용에 원인이 있는 것으로 보았다. 침출수 수질을 Piper의 삼각다이아그램(Figure 2)에 표시한 결과 석대 침출수는 Na-Cl형에 속한다.

1997년 6월에는 C지구의 배수로에서만 침출수를 채취하여 분석하였다. pH는 8.06으로 약알칼리성이며, EC는 14,780 μS/cm로 1996년 7월에 비하여 낮은 값을 나타냈다. 양이온류, 음이온류, 중금속류 등 모든 성분들의 농도가 1996년 7월에 비하여 약해졌다. 그 원인은 아직 장마가 시작되기 전이어서 폐기물 내의 생분해작용이 덜 촉진되었던 것과, 또한 쓰레기 매립장은 일정한데 1년이 지난 후이어서 폐기물에서 발생하는 오염물질의 농도가 점점 감소하는데도 기인하는 것으로 판단된다. Figure 2의 삼각다이아그램에 의하면 1997년 6월에 채취된 침출수의 수질유형은 역시 Na-Cl형이다.



**Figure 2.** Trilinear diagram for the chemical data of leachates.

**하천수의 수질 특성**

하천은 수리지질학적 측면에서 이득천(gaining stream)과 손실천(losing stream)으로 크게 구분되며 주변 지하수계와 끊임없이 작용한다. 따라서 하천수가 오염되면 그 지역의 지하수계도 오염되어 오염 범위를 확장시키게 된다. 석대 매립장의 서쪽 편에 위치하는 동천은 회동 수원지에서 발원되어 수영천에 합류되며, 매립장의 남쪽 편에 위치하는 석대천은 운봉산에서 발원되어 동천과 합류된다. 동천은 주변 공장지대에서 방출되는 폐수와 석대 매립장의 침출수, 기타 생활 오수에 의해 오염 되어 있으며, 석대 천도 석대매립장의 침출수와 생활 오수에 의해 오염되어 있다.

하천수의 채취시기 및 분석방법은 침출수와 같다. 동천과 석대천의 수질분석 결과는 Table 3에 있다. 두 하천의 수질은 대체로 양호한 편인데, 그 이유는 시료 채취 시기가 장마가 끝난 지 얼마되지 않아서 하천수의 수질이 많이 정화되었기 때문이다. 하천수의 pH는 모두 알칼리성이고 EC는 석대천이 513 μS/cm로서 동천의 2배에 가깝다. 정(1995)에 의하면 1993년 4월말과 9월말에 동천에서 측정된 전기전도도는 각각 1,980 μS/cm와 1,712 μS/cm이었다. Alkalinity, 양이온, 음이온 모두 석대천에서 높게 나타난다. 비반응성 용질인 Cl은 석대천이 65.87 mg/l로서 동천의 2배 이상이고, SO<sub>4</sub>도 석대천이 66.3 mg/l로서 동천의 2배가 넘는다. 중금속류에서는 Mn의 함량이 동천과 석대천에서 비슷하고, Zn을 제외한 다른 성분은 모두 석대천에서 많이 나타난다. 따라서 석대천이 동천에 비해 더 많이 오염되어 있다는 것을 알 수 있다. 석대천의 상류부근에는 주거지역이 형성되어 있고, 하류지역에는 석대매립장이 석대천의 상부에 위치한다. 따라서, 석대천은 동천과 달리 공장 폐수의 유입이 없고 대부분 생활오수 및 석대매립장의 침출수에 의해 오염되어 있다. 권(1966)에 의하면 석대매립장에서 발생하는 침출수의 주 유동방향이 매립장 서쪽보다는 매립장 남쪽의 석대천 및 화훼단지 방향이어서 석대매립장이 석대천의 주요오염원이 되고 있다.

Table 3. Chemical Analysis of the Dong Stream and the Seokdae Stream

Component	Dong Stream	Seokdae Stream
pH	8.5	8.7
EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	265	513
Total Alkalinity (mg/l)	64	102
Bicarbonate Alkalinity ( " )	48	76
Na ( " )	7.68	37.66
Mg ( " )	1.85	5.13
K ( " )	1.79	8.45
Ca ( " )	11.29	25.64
Cl ( " )	25.91	65.87
NO <sub>3</sub> ( " )	8.45	1.53
SO <sub>4</sub> ( " )	31.34	66.33
F ( " )	<0.1	<0.1
NO <sub>2</sub> ( " )	<0.1	13.68
PO <sub>4</sub> ( " )	<0.1	<0.1
Br ( " )	<0.1	<0.1
Cr ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	1.21	2.08
Mn ( " )	143.68	142.83
Co ( " )	< 1.00	1.09
Ni ( " )	1.59	21.47
Cu ( " )	3.97	15.34
Zn ( " )	62.79	18.34
Cd ( " )	< 1.00	< 1.00
Pb ( " )	1.55	3.60
Al ( " )	42.63	129.60
Ba ( " )	12.93	21.56
U ( " )	< 1.00	< 1.00

두 하천수 수질을 삼각다이아그램(Figure 3)에 표시한 결과, 두 하천의 수질은 Ca-Cl<sub>2</sub>형에 속한다.

지하수의 수질 특성

석대 매립장에서 발생되고 있는 침출수는 주변 지하수계와 연관되어 있으므로 침출수가 이동하면서 오염물질이 확산되어 주변 지역의 지하수를 오염시키고 있다. 폐기물 매립이 끝나고 3년이 지난 1996년 7월말에 지하수 오염정도 및 범위를 파악하기 위하여 매립장 주변지역인 회동동, 금사동, 석대동 및 반여동 일대의 지하수를 채취하여 수질분석을 실시하였고 그 결과는 Table 4에 있다. 분석시기와 방법은 침출수 및 하천수와 동일하다.

pH는 5.44~7.33으로 약산성에서 약알칼리성이다. EC(전기전도도)는 6번 지하수만이 85.1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 낮으며, 다른 지하수들은 276~1,216  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이다. 4번은 지표수이며, 회동동마을의 일부 주민들이 식수로 이용하고 있다. EC가 높은 9번과 10번 지하수는 금사동의 공단 내에 개발되어 있어서 공장에서 발생하는 유독성 폐기물들에 의하여 오염되어 있다. 또한, 정(1995)에 의하면 이 지하수들은 오염된 동천에 의해서도 영향을 받고 있다. 18번은 150 m 지하의 암반 지하수이지만 매립장 입구에 가까이 위치하여 침출수에 의해 많이 오염되어 있다. 19번은 화쇄단지 용수로 쓰기 위해 5 m 정도의 깊이에 개발된 지하수로서 역시 침출수에 의해 상당히 오염되어 있다.

Total Alkalinity와 Bicarbonate Alkalinity도 10번 지하수가 236

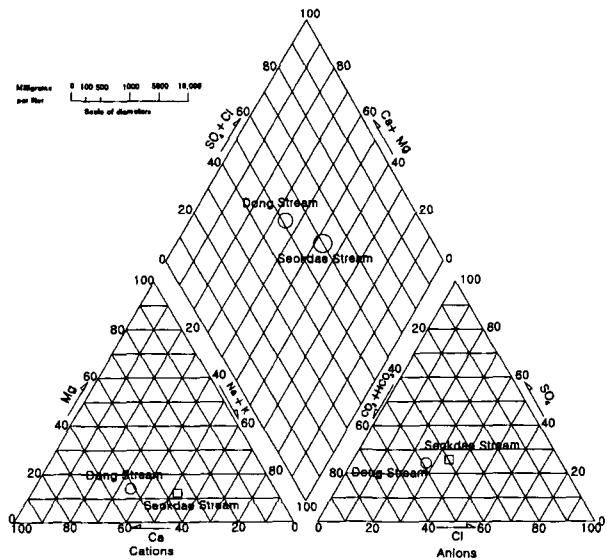


Figure 3. Trilinear diagram for the chemical data of streams.

mg/l과 180 mg/l으로 가장 높다. 양이온 중에서 Na는 5.25~77.72 mg/l의 범위인데, 6번 지하수가 가장 낮고 10번 지하수가 가장 높다. Mg와 K는 0.26~17.93 mg/l의 범위로서 19번 지하수가 가장 높지만, 전체적으로 20 mg/l 미만의 낮은 함량이다. Ca는 1.90~103.72 mg/l으로 역시 6번 지하수가 가장 낮고, 150 m 심도의 18번 지하수가 가장 높다. 음이온 중에서 비반응성 물질인 Cl은 5.28~207.92 mg/l인데, 10번 지하수가 가장 높고 18번과 19번 지하수가 다음으로 높다. 모두 음용수 기준치 150 mg/l를 초과하거나 근접해 있다. SO<sub>4</sub>는 1.10~102.22 mg/l인데 18번 지하수가 가장 높고, 10번과 19번 지하수가 그 다음으로 높다.

중금속류중에서는 Mn의 함량이 가장 높고 1.56~6,078.95  $\mu\text{g}/\text{l}$ 의 범위이다. 10번 지하수가 Mn의 함량이 가장 높고 19번과 18번 지하수가 그 다음으로 높다. 10번과 19번 지하수의 Mn 함량은 각각 음용수 기준치 300  $\mu\text{g}/\text{l}$ 의 20배와 11배 이상이다. 그 다음으로 함량이 많은 중금속은 Zn으로서 7.84~2,019.05  $\mu\text{g}/\text{l}$ 의 범위이다. 9번 지하수가 가장 높고, 그 다음 10번과 15번 지하수가 100  $\mu\text{g}/\text{l}$  이상으로 높다. 9번 지하수의 Zn함량은 음용수 기준치 1,000  $\mu\text{g}/\text{l}$ 의 2배 이상이다. Cr, Cu, Cd, Pb, Al 등의 유해중금속은 높게 나타나지 않았다.

이상의 분석결과를 검토해 보면 10번, 18번, 19번 우물이 가장 많이 오염되어 있다. 10번 우물은 오염된 동천의 영향으로 주로 오염되어 있지만, 18번과 19번 우물은 석대매립지에 발생하는 침출수에 의해 오염되어 있다. 19번 우물은 충적층에 개발된 천층지하수이지만 18번 우물은 심도가 150 m 정도인 암반 지하수를 형성하고 있다.

매립장에서 1 km 정도 떨어진 20번 우물(심도 150 m)의 수질을 검토하면 pH는 중성에 가까우나 EC는 470  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 일반 지하수보다 높은 편이며, Total Alkalinity가 124 mg/l, Bicarbonate Alkalinity가 94 mg/l으로 높고, 양이온 중에서 Ca가 54.53 mg/l으로 높은 편이다. 음이온 중에서 비반응성 용질인

Table 4. Inorganic Chemical Analysis of Groundwater (July, 1996)

Component	1	2	3	4	6	9	10	11	12	15	16	18	19	20	21	22	23
pH	6.15	6.61	6.25	6.68	5.74	6.25	6.9	7.08	6.14	5.86	5.44	6.71	6.28	7.13	6.76	5.66	7.33
EC (µS/cm)	426	562	736	146.4	85.1	766	1216	582	794	660	276	964	914	470	318	325	316
Total Alkalinity (mg/l)	42	32	66	22	12	48	236	22	36	32	24	156	160	124	120	140	106
Bicarbonate Alkalinity ( " )	28	16	48	14	4	32	180	14	24	14	8.0	116	116	94	59	62	78
Na ( " )	14.96	5.84	31.78	5.71	5.25	13.65	77.72	12.05	34.46	28.16	16.35	55.88	65.67	17.24	18.13	23.70	13.91
Mg ( " )	8.16	2.09	6.91	3.88	1.06	8.22	11.72	2.73	6.34	6.82	3.69	16.31	17.93	9.24	4.015	4.01	2.30
K ( " )	1.69	3.57	4.76	0.54	0.96	2.35	8.61	4.45	6.55	5.62	3.02	5.99	10.90	1.56	5.331	4.39	0.26
Ca ( " )	21.86	14.71	31.71	12.18	1.90	24.74	82.72	17.00	31.32	28.93	15.59	103.72	62.04	54.53	24.95	15.15	31.38
Cl ( " )	58.17	7.00	92.86	5.28	9.06	109.96	207.92	14.44	57.21	43.42	24.46	156.74	149.26	39.89	24.46	39.13	18.08
NO <sub>3</sub> ( " )	71.15	22.28	88.98	5.13	6.90	103.66	1.55	12.55	94.87	121.15	75.06	19.95	49.88	16.28	42.89	56.23	n.d.
SO <sub>4</sub> ( " )	13.19	20.92	11.84	1.10	8.83	73.33	101.82	38.45	32.92	13.18	4.02	102.22	76.39	45.58	24.37	8.65	15.71
F ( " )	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
NO <sub>2</sub> ( " )	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
PO <sub>4</sub> ( " )	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Br ( " )	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.43	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Cr (µg/l)	1.00	1.56	1.25	1.85	<1.00	<1.00	1.53	1.59	2.25	1.52	1.29	2.53	2.70	1.97	6.91	1.82	1.70
Mn ( " )	1.83	4.10	40.97	2.06	4.44	10.18	6078.95	2.44	1.56	2.87	34.08	246.19	3506.59	4.36	12.91	6.23	42.86
Co ( " )	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	1.73	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00
Ni ( " )	2.99	1.82	3.31	<1.00	<1.00	2.18	6.43	1.38	<1.00	1.75	1.65	2.23	2.62	1.58	2.31	1.02	1.45
Cu ( " )	4.68	3.12	108.26	8.50	16.72	3.62	7.84	3.14	7.30	4.26	3.75	3.14	4.13	8.96	4.74	10.76	1.81
Zn ( " )	18.18	45.41	101.16	22.91	36.59	2019.05	136.83	7.84	23.01	104.64	11.42	25.44	15.53	13.32	19.72	14.29	23.20
Cd ( " )	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	1.52	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00
Pb ( " )	1.64	<1.00	4.44	2.24	1.56	<1.00	<1.00	1.68	5.62	1.07	1.79	1.76	<1.00	1.40	1.02	1.02	<1.00
Al ( " )	5.96	24.48	11.42	8.22	22.99	8.82	17.54	22.71	10.40	12.46	32.74	15.57	11.76	14.21	57.41	17.95	12.05
Ba ( " )	15.10	71.05	176.81	2.42	28.03	36.19	135.73	15.64	13.60	30.07	85.14	75.95	139.26	1.77	65.67	106.76	1.30
U ( " )	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00

Cl의 함량이 39.89 mg/l, SO<sub>4</sub>가 45.58 mg/l으로 매립장 주변의 오염되지 않은 6번, 16번, 21번, 22번, 23번 우물의 지하수와 비교해 보면 매우 높은 편이다. 중금속류는 6번 지하수와 별 차이가 없다. 정(1995)에 의하면 1994년 8월의 20번 지하수 분석결과는 Total Alkalinity가 110 mg/l, Ca가 39.94 mg/l, Cl이 40.20 mg/l, SO<sub>4</sub>가 29.99 mg/l이다. 2년 전의 분석결과와 비교해 볼 때 큰 차이는 없으나 SO<sub>4</sub>가 많이 높아졌다. 이것은 매립장에서 발생하는 H<sub>2</sub>S가스의 증가로 침출수에 SO<sub>4</sub> 농도가 높아지고 있는데 원인이 있는 것으로 사료된다. Cl이온은 지하의 매질과 반응하지 않아서 오염의 척도가 되며, 폐기물 매립장에서 발생하는 가스 중에서 공기보다 무거운 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>S는 물과 반응해서 HCO<sub>3</sub>와 SO<sub>4</sub>이온을 증가시킨다. 20번 지하수는 일반 지하수보다도 이러한 성분들을 많이 함유하고 있어서, 매립장에서 발생하는 침출수에 의해 오염되어가고 있다는 개연성이 높아지고 있다.

1996년 7월말에 조사된 지하수의 수질을 삼각다이아그램(Figure 4)에 표시한 결과 양이온에서는 Ca, 음이온에서는 HCO<sub>3</sub>와 Cl이 우세하다. 따라서 매립지 주변의 지하수 유형은 Ca-HCO<sub>3</sub>형과 Ca-Cl<sub>2</sub>형으로 분류된다.

폐기물 매립이 끝나고 4년이 지난 1997년 6월 중순에 회동동 마을의 3번 우물과 석대동에 개발된 소형 수조정호 25번과 압반 관정들(18번, 20번, 23번, 26번)에 대해서 수질의 변화를 파악하기 위하여 무기물과 유기물의 수질분석을 실시하였다. 25번과 26번 우물의 지하수는 1997년에 처음으로 분석되었다. 25번 우물은 가정의 생활용수로 이용되며, 26번 우물은 식당의 생활용수로 이용되고 있다. 무기물과 유기물의 분석결과는 Table 5와 Table 6에 각각 있다. pH는 5.64~7.62, EC는 343~1,036 μS/cm, TDS는 292~677 mg/l의 범위에 있다. pH는 3번 지하수가 음용수 기준치를 벗어나고, TDS는 3번, 18번, 26번 지하수가 음용수 기준치를 상회한다. Total Alkalinity는 54.0

Table 5. Inorganic Chemical Analysis of Groundwater(June, 1997)

Component	Drinking Standard	3	18	20	23	25	26
온도 (°C)		18.3	18.0	20.7	18.0	22.6	20.6
Ph	5.8-8.5	5.64	6.38	6.94	7.62	6.00	6.77
EC (μS/cm)		780	1008	423	343	345	1036
Total Alkalinity (mg/l)		78	152	156	126	54	178
Bicarbonate Alkalinity ( " )		56	120	114	94	36	136
TDS (mg/l)	500	638	664	292	-	-	677
NH <sub>4</sub> -N ( " )	0.5	n.d.	n.d.	n.d.	-	-	7.8
NO <sub>3</sub> -N ( " )	10	25.7	8.1	5.0	-	-	3.5
Na ( " )		88.14	71.12	85.56	54.06	43.18	78.29
Mg ( " )		69.04	55.71	58.13	27.81	31.08	61.33
K ( " )		85.75	69.58	25.23	8.35	42.24	76.60
Ca ( " )		164.80	203.90	158.	125.00	46.99	247.90
Cl ( " )	150	177.45	194.69	30	29.48	37.00	161.02
NO <sub>3</sub> ( " )		111.75	30.85	33.10	n.d.	68.25	12.85
SO <sub>4</sub> ( " )	200	5.31	122.92	12.56	22.78	25.08	66.43
F ( " )	1.5	0.18	0.22	41.97	n.d.	n.d.	0.23
NO <sub>2</sub> ( " )		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
PO <sub>4</sub> ( " )		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Br ( " )		1.48	1.55	n.d.	n.d.	n.d.	1.34
As ( " )	0.05	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.011
Se ( " )	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Fe ( " )	0.3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cr (μg/l)	50	10.60	20.10	n.d.	21.10	3.13	38.30
Mn ( " )	300	201.00	13.30	22.50	187.00	23.20	1237.00
Co ( " )		1.14	1.60	19.80	1.41	0.76	2.57
Ni ( " )		14.80	15.80	1.34	15.40	8.99	34.20
Cu ( " )	1000	20.60	4.79	17.70	2.34	5.00	11.40
Zn ( " )	1000	715.00	42.80	7.35	103.00	493.00	1576.00
Cd ( " )	10	6.24	0.32	31.0	0.52	0.23	0.34
Al ( " )	200	40	37	0.34	46	32	48
B ( " )		285.00	242.00	40	2.46	29.00	98.70
Pb ( " )	50	5.67	<0.10	4.76	0.16	0.21	0.71
U ( " )		<0.10	<0.10	<0.10	0.12	<0.10	0.18

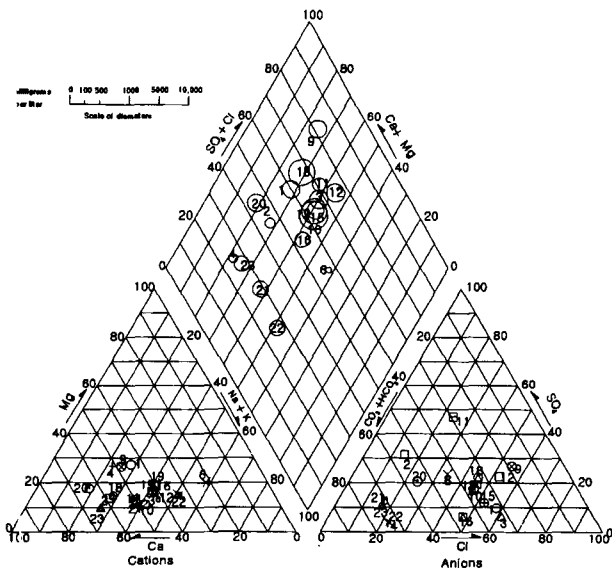


Figure 4. Trilinear diagram for the chemical data of groundwaters sampled in July, 1996.

~178.0 mg/l, Bicarbonate Alkalinity는 36.0~120.0 mg/l의 범위에 있으며, 1996년 7월의 분석 결과와 별 차이가 없다. 3번, 18번, 20번, 23번 우물에서 양이온 Na, Mg, K, Ca들도 1996년 분석치와 큰 차이가 없다. 그러나, 1997년에 처음 분석된 26번 우물에서 양이온들의 함량이 높게 나타나고 있다.

음이온에서 Cl의 함량은 29.48~194.69 mg/l의 범위에 있다. 1996년도에 비하여 대체로 함량이 증가하였다. 특히 3번 우물은 2배정도 증가하여, 회동동 쪽으로 침출수에 의한 지하수 오염이 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 석대동에서는 18번 우물의 Cl 농도가 전년도에 비하여 크게 증가하였고, 26번 우물 역시 음용수 기준치를 초과 하고 있다.

NO<sub>3</sub>이온은 12.56~111.75 mg/l의 범위에 있으며 1996년도에 비하여 대체로 증가하고 있다. NO<sub>3</sub>-N의 함량에서는 3번 우물이 음용수 기준치의 2.5배이고, NH<sub>4</sub>-N의 함량은 26번 우물이 음용수 기준치의 15배 이상이다. SO<sub>4</sub>이온의 함량은 5.31~122.92 mg/l인데, 18번, 23번 우물에서 약간 증가되었으나,

**Table 6.** Organic chemical analysis of groundwater (June, 1997)

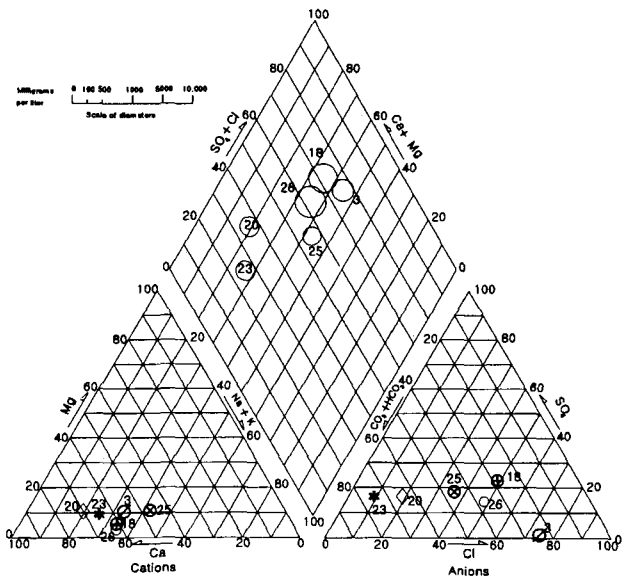
Component (mg/l)	Drinking Standard	3	18	20	26
Phenols	0.005	ND	ND	ND	ND
1-1-1-Trichloroethane	0.1	ND	ND	ND	0.003
Tetrachloroethylene (PCE)	0.01	ND	ND	ND	ND
Trichloroethylene (TCE)	0.03	0.047	ND	0.016	ND
Dichloromethane	0.02	ND	ND	ND	ND
Benzene	0.01	ND	ND	ND	ND
Toluene	0.7	ND	ND	ND	ND
Ethylbenzene	0.3	ND	ND	ND	ND
Xylene	0.5	ND	ND	ND	ND
1,1 Dichloroethylene	0.03	ND	ND	ND	ND
CCl <sub>4</sub>	0.002	ND	ND	ND	ND

3번, 20번에서는 약간 감소하였다. F는 3번, 18번, 26번 우물에서 약간씩 검출되며, 전년도에 비하여 많이 증가하였다.

As는 26번 우물을 제외하고는 검출되지 않았다. Se, Fe는 전부 검출되지 않았다. Al은 모두 음용수 기준치 이하이지만 1996년에 비하여 모두 증가하였다. Cr도 모두 기준치 이하이지만, 1996년에 비하여 모두 증가하였다. Mn은 그 함량이 음용수 기준치 이내이지만 3번 우물에서 5배 정도, 23번 우물에서는 4배 정도 증가하였고 18번 우물에서는 18배 정도 감소하였다. 그러나, 식당의 생활용수로 이용하고 있는 26번 우물에서는 기준치의 4배 이상이 검출되었다. Cu는 1996년에 비하여 감소되었으며, 특히 3번 우물에서는 5배 정도 감소하였다. Zn은 모두 증가하였다. 특히 3번 우물에서는 7배, 23번 우물에서는 5배 정도 증가하였다. 26번 우물의 Zn함량은 음용수 기준치의 1.5배 이상이다. Cd는 3번 우물에서 6배 이상 증가하였으나, 전체적으로 감소하였다. Pb는 대체로 감소하였다.

1996년과 1997년의 수질분석 결과를 검토해 볼 때, 회동동에 위치한 3번 우물의 수질은 더 악화되었다. 부산시에서는 1993년과 1994년에 매립장과 회동동 마을의 경계부분에 그라우팅을 이용한 차수벽 공사를 실시하였으나, 금번 조사결과 그 실효성이 의문시 되고 있다. 석대동에 위치한 18번 우물은 150 m 심도의 암반 지하수이지만 그 수질이 더 악화되어 가고 있다. 20번 우물도 150 m 심도의 암반 지하수로서 매립장에서 약 1 km 정도 떨어져 있는데, 수질이 전년도와 큰 차이가 없게 나타났다. 23번 우물은 석대동 주민들이 공동식수로 이용하고 있는 166 m 심도의 암반 지하수 인데, 전년도에 비하여 수질이 악화되어졌다. 즉 양이온, 음이온, 중금속등 모든 성분들이 증가하였다. 26번 우물도 150 m 심도의 암반 지하수로서, 석대동에 위치한 우물 중에서 가장 오염이 심하다. 특히 NH<sub>4</sub>-N, Cl, Mn, Zn 등의 오염이 심하게 나타나고 있다. 1997년 지하수 수질을 삼각다이아그램(Figure 5)에 도시한 결과 수질유형은 1996년 7월의 수질과 같이 Ca-HCO<sub>3</sub>과 Ca-Cl<sub>2</sub>형에 속한다.

Table 6의 유해 유기물 분석치에 의하면 1-1-1-트리클로로에탄이 26번 우물에서 미량 검출되고, 발암물질인 TCE가 3번과 20번 우물에서 검출된다. 특히 3번 우물에서의 함량은 기준치 0.03 mg/l를 초과하고 있다. TCE는 휘발성 유기염소 화합물로서 세정물이나 반도체 공장 등에서 주로 유래되는 물질(김



**Figure 5.** Trilinear diagram for the chemical data of groundwater sampled in June, 1997.

등, 1996)인데, 3번 우물이 위치하는 지역에는 이러한 시설들이 존재하지 않는다. 따라서 이 TCE는 매립장에 매립되었던 산업폐기물에서 유래된 것으로 사료된다. 벤젠 등의 탄화수소 유기화합물들은 모두 검출되지 않았다.

1996년과 1997년에 조사된 석대매립지 부근의 지하수 수질을 검토해 보면, 충적층에 개발된 천층지하수는 물론이고 150 m 심도의 암반지하수들도 매립장에서 발생하는 침출수에 의하여 오염되어 있으며, 그 오염 정도는 매년 증가되어진다. 특히 매립장에서 1 km 정도 떨어진 곳의 암반지하수도 오염이 되어 있다. 이러한 암반지하수의 오염 원인은 이 지역의 지질구조와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 즉 이 지역의 주 대수층을 이루는 안산암질과 유문암질암에는 절리와 단층이 발달되어 있어서 매립장의 기반암과 매립장 주변의 암반대수층과는 서로 지질 구조적으로 연관성을 갖고 있는 것으로 보인다. 1996년에 비하여 1997년에 침출수의 농도가 약간 감소하였음에도 지하수 오염물질의 농도는 증가되고 있다. 그 이유는 지하매질 내에서 오염물질의 확산속도가 매우 느리기 때문에, 매립지 침출수의 농도 감소 효과가 지하매질에 나타나는 데는 상당한 시간이 필요하기 때문이다.

### 오염제어 대책

석대매립장에서 발생하는 침출수에 의한 주변지역의 지하수나 하천수의 오염을 제어하기 위해서는 첫째, 침출수의 주 유동 방향에 감시정(monitoring well)을 여러개(매립장 4개, 회동동 1개, 석대동 1개, 화훼단지 2개, 반여동 1개) 개발하여, 수위와 수질(온도, pH, EC 등)을 자동으로 관측해야 한다. 둘째는, 오염된 지하수를 처리하기 위하여 채수정(pumping well)을 여러개 개발하고, 감시정의 자동 관측자료를 검토하여 수시로 오수를 뽑아내어 처리하여야 한다. 정(1995)에 의하면 매립지내의



침출수는 약 920 m<sup>3</sup>/일 발생되고, 그 중에서 약 520 m<sup>3</sup>/일의 침출수가 매립장과 그 주변의 지하로 침투하여 지하수를 오염시키고 있다. 셋째는, 석대매립장내에 침출수 처리장을 건설하여, 매립장에서 발생되고 있는 침출수들을 처리하여야 한다. 석대매립장에는 현재 침출수 처리장이 없고, 인근에 위치한 수영하수처리장에서 생활하수들과 함께 처리하고 있다. 그러나 수영하수처리장의 처리 방법이나 능력이 부족하여, 석대매립장에서 발생하는 침출수들은 완벽하게 처리할 수 없다. 더욱이 봄, 가을의 우기나 여름의 장마철에는 많은 침출수들이 발생되어 하수처리장으로 이송되기 이전에 상당량의 침출수들이 매립장 주변의 지하로 침투되고 있는 실정이다. 넷째는 현재 지하에 설치된 차수벽들의 실효성을 전면 재검토하여야 한다. 부산 시에서는 회동동 마을에 침출수 유입을 차단하기 위하여 매립장과 회동동 마을의 경계 부근에 1993년과 1994년 2회에 걸쳐 차수벽 공사를 실시하였고, 석대동 마을로의 침출수 유입을 차단하기 위하여 매립장 입구에 길이 580 m, 깊이 최대 40 m(경암하 1 m 심도) 규모의 SGR Grouting 차수벽 공사를 1997년에 실시하였다(1997, 부산해운대구청). 그러나 금번 조사 결과 회동동 마을과 석대동 마을의 지하수들은 아직도 침출수에 의해 오염이 되어가고 있다. 다섯째는 위의 사항들을 경제적이고 효과적으로 수행하기 위하여는 석대매립지 일대의 지질 및 지질구조, 침출수 및 지하수의 분포와 유동상태, 오염물질의 확산 범위와 정도 등의 파악을 위한 정밀 조사가 선행되어야 한다.

## 결 론

부산 석대 폐기물 매립지 일원의 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 석대매립지 일원의 지질은 중생대 백악기에 경상계 퇴적암층을 관입 및 분출한 안산암질암, 유문암질암 및 이를 덮고 있는 충적층으로 구성되어 있다. 안산암질암에는 N20E 90°와 N60W 38° SW의 절리계가 우세하고, 유문암질암에는 N6E 86° NW와 N87W 29° SW의 절리계가 발달되어 있다.

2. 석대매립지 주변의 지하수면은 지표면하 0.11~5.36 m의 범위이고, 166 m 심도에 개발된 피압지하수도 존재하여, 이곳의 지하수 부존량은 비교적 풍부한 것으로 추정되어 진다.

3. 매립장에서 발생하는 침출수의 pH는 7.82~8.25의 범위이고 EC는 14,780~19,900 μS/cm이다. 양이온에서는 Na와 K가 각각 최대 1,818.58 mg/l과 1,007.09 mg/l이며, 음이온에서는 Cl과 HCO<sub>3</sub>가 각각 최대 1,832.72 mg/l과 672 mg/l이다. 중금속에서는 Mn이 최대 3,675.57 μg/l이고, Cr이 최대 473.40 μg/l이다. Piper의 삼각다이아그램에 나타난 침출수의 수질유형은 Na-Cl형이다.

4. 동천과 석대천의 pH는 8.5~8.7, EC는 265~513 μS/cm로서 계절적인 영향으로 오염의 정도가 약하게 나타났다. 양이온에서는 Na와 Ca가 각각 최대 37.66 mg/l과 25.64 mg/l이고, 음이온에서는 SO<sub>4</sub>와 HCO<sub>3</sub>가 각각 최대 66.33 mg/l과 76 mg/l로 나타났다. 중금속에서는 Mn이 최대 143.68 mg/l, Al의 최대 129.60 mg/l로서 모두 음용수 기준치 이하이다. 삼각다이아그램에 의한 하천수의 수질유형은 Ca-Cl<sub>2</sub>형이다.

5. 1996년 7월에 조사된 지하수의 pH는 5.44~7.33로 약산성에서 약알칼리성이고, EC는 85.1~1,216 μS/cm로서 변화의 폭이 크다. 양이온에서는 Na와 Ca가 Mg나 K에 비하여 다량 검출된다. Na의 최대 함량은 10번 지하수에서 77.72 mg/l, Ca의 최대 함량은 18번 지하수에서 103.72 mg/l이다. 음이온에서는 Cl, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> 순서로 최소 불검출에서 최대 207.92 mg/l까지 나타난다. 음이온들은 모두 침출수에 의한 지하수오염의 평가에 이용되며, 그 중에서도 Cl과 SO<sub>4</sub>는 폐기물 매립에 의한 지하수오염의 척도 역할을 한다. 유해 중금속 중에서는 Mn의 함량이 가장 높는데, 10번 우물에서 6,078.95 μg/l, 19번 우물에서 3,506.59 μg/l이다. 이것은 음용수 기준치를 각각 20배와 10배 이상 초과하는 것이다. 다음은 Zn의 함량이 높는데, 9번 우물에서 2,019.05 mg/l로서 최대이다. 삼각다이아그램에 의한 수질유형은 Ca-HCO<sub>3</sub>형과 Ca-Cl<sub>2</sub>형으로 분류된다.

6. 1997년 6월에 조사된 지하수의 pH는 5.64~7.62, EC는 343~1,036 μS/cm이다. 양이온에서는 역시 Na와 Ca가 Mg나 K보다 다량 나타난다. 그러나 Mg와 K의 함량은 전년도에 비하여 많이 증가하였다. 음이온에서도 역시 Cl, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> 순서로 최소 불검출에서 최대 194.69 mg/l까지 나타난다. 유해 중금속 중에서는 Zn의 함량이 가장 높는데, 26번 우물에서 1,576.00 mg/l이다. 그 다음은 Mn의 함량이 높는데, 역시 26번 우물에서 1,237.00 mg/l로 다량 검출된다. Zn과 Mn의 함량은 모두 음용수 기준치를 각각 1.5배와 4배 초과한다. 유기물에 대한 분석결과는 TCE가 3번 우물에서 음용수 기준치 이상 검출되고, 20번 우물에서도 음용수 기준치의 반 정도가 검출되었다. 삼각다이아그램에 나타난 수질유형은 전년도와 동일하다.

7. 1996년과 1997년 2개년에 걸친 지하수 수질조사 결과 석대매립장 서쪽의 회동동에 위치하는 3번 우물이 침출수에 의해 많이 오염되어 있으며, 매립장 남쪽의 석대동에 위치하는 150 m 심도의 18번과 26번 지하수도 심하게 오염되어 있다. 최근에 석대동의 공동식수로 개발된 23번 우물도 침출수에 의한 오염이 점점 증가되고 있다. 석대매립장에서 1 km 정도 떨어져 있고 지하수유동의 하류구배에 위치하는 20번 우물도 침출수에 의한 영향을 받고 있다.

8. 석대매립지 주변 수질오염의 제어를 위하여 9개소 이상의 감시정설치, 10개소 이상의 채수정 개발, 침출수 처리장건설, 기존에 설치된 차수벽시설 보완 등의 작업이 필요하다. 이러한 일들을 경제적이고도 효과적으로 수행하기 위하여는 석대매립지 일원의 지질구조, 침출수 및 지하수의 유동상태, 오염물질의 확산 범위와 정도 등의 파악을 위한 세부적인 수리지질조사가 필요하다.

## 사 사

본 연구는 1996년도 교육부 기초과학연구소 학술연구조성비(과제번호: BSRI-96-5407)의 지원에 의하여 이루어졌다. 연구비를 지원해준 교육부에 감사한다. 아울러 본 연구에 필요한 수질분석을 수행한 한국표준과학연구원 기초과학지원 연구소(서울분소), 부산보건환경연구원과 부경대학교 환경공학과에 감사한다.

### 참고문헌

- 권해우, 1997, 부산 석대 폐기물 매립장 지역의 지하수 오염특성, 부경대학교 이학석사 학위 논문, 67pp.
- 김학명, 이상호, 탁성제, 한재석 공역, 1996, 지하수오염론, 동화기술, 346pp.
- 부산직할시 해운대구청, 1993, 석대 쓰레기 매립장 안전 진단 및 사후 환경관리 방안 연구.
- 부산직할시 해운대구청, 1997, 석대 폐기물 매립장 현장 사무소 상 황실 자료.
- 오석영, 전효택, 1966, 폐기물 매립지 주변의 지하수 오염과 오염물질의 지연 특성, 지하수환경, 3(1), p. 37-49.
- 이철효,한정상, 1996, 난지도 매립지 주변 지하수환경의 오염특성에 관한 연구, 지하수환경, 3(1), p. 27-36.
- 정상용, 1995, 부산 석대 폐기물 매립장 일대의 지하수 오염, 지하수환경, 2(1), p. 1-8.
- 손치무, 이상만, 김상욱, 김형식, 1978, 동래 월내 지질도, 한국자원연구소.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A., 1979, Groundwater, Prentice-Hall, Inc., 604pp.
- Devinny, J. S., Everett, L. G., Lu, J. C. S. and Stollar, R. L., 1990, Subsurface migration of hazardous wastes, Van Nostrand Reinhold, New York, 387pp.