

부산 석대 폐기물 매립장 일대의 지하수 오염

Groundwater Contamination at the Seokdae Waste Landfill Area of Pusan City

정상용(Sang-Yong Chung)*

요약 : 매립장에서의 쓰레기는 주변 지역에 지하수오염, 악취, 유독가스 발생 등 큰 문제를 일으키고 있다. 본 연구에서는 최근에 부산시에서 만 6년 동안 사용해 왔었던 석대 폐기물 매립장 주변의 지하수 오염 실태를 파악하고, 그 오염을 최소화할 수 있는 방안 연구를 목표로 매립장 주변의 우물과 시추공 내의 지하수위, 수질, 대수층 특성 등을 조사하고, 또 주변 하천의 수질, 매립장 일대의 지하수 분포 및 유동 상태를 연구하였다. 그 결과 지하로 침투하는 순수 침출수량은 일 평균 약 520 m³로 추정되며, 침출수에 의한 지하수 오염범위가 매립장 중심에서 약 1-1.5 km 정도 까지에 이른다. 오염물질도 중금속류를 비롯한 기타 유해 성분들이 다량 존재한다. 앞으로 이 일대의 지하수를 보전 및 관리하기 위해서는 매립장과 지하수 오염물질이 확산되고 있는 곳에 감시정을 여러개 설치하여 지하수위와 수질을 주기적으로 조사하고, 채수정을 설치하여 오염된 지하수를 뽑아내어 침출수 처리장에서 처리한 후 하천에 방류하여야 한다. 아울러 지하수 오염물질이 확산되고 있는 매립장 주변 지역에 차수벽 설치가 요구된다.

Abstract : Wastes produce groundwater contamination, offensive odor, and hazardous gases. This study investigates the contamination of groundwater at the Seokdae waste landfill area and seeks the desirable ways to minimize the groundwater contamination. Groundwater levels, water chemistry and aquifer characteristics of wells were examined around the Seokdae waste landfill. The water chemistry of the Dong stream, the groundwater distribution and flow were also studied. The results of this research show that the estimated quantity of the percolation from the landfill base to the ground is 520 m³/day and the extent of groundwater contamination is about 1-1.5 km from the center of the waste landfill. The groundwater contains heavy metals and other toxic elements. The conservation and management of the groundwater of the waste landfill need several monitoring wells to check the quantity and quality of groundwater, pumping wells to extract the contaminated groundwater, and slurry walls to protect the movement of contaminated groundwater.

서 론

산업 발달과 생활 수준의 향상으로 각종 쓰레기의 발생은 계속 증가하여, 쓰레기 처리가 현대 사회의 큰 과제로 되어있다. 대형 폐기물 매립장으로는 서울의 난지도, 김포 매립장 등을 들 수 있으며, 그 밖에 중간 내지는 소규모의 폐기물 매립장이 전국 곳곳에 산재해 있다. 부산에서는 80년대에 신평동 매립지, 명지 매립지, 대저 매립지와 화명 매립지를 거쳐 1987년 6월에 부산 최초의 위생 매립을 해운대구 석대동에 시작하여 1993년 5월말까지 만 6년간 이용하여 왔다. 석대 폐기물 매립장의 매립 면적은 약 514,345 m²(155,862 평)이고, 매립량은 약 1,280만 m³(부산직할시 해운대구청, 1993)로서 그동안 많은 문제(지하수 오염, 냄새, 유독가스 발생 등)를 주변 마을에 일으켜 왔다. 폐기물 매립장에서 발생된 유독 가스(CH₄, NH₃, H₂S 등)와 악취는 아직도 매립장 전역에서 나타나고 있으며, 매립된 쓰레기

분해 및 부패로 강수(降水)가 오염되어 많은 침출수들이 발생하고 있어 지표수는 물론 인근의 지하수를 심각하게 오염시키고 있다. 본 연구의 목적은 석대동의 쓰레기 매립으로 인한 주변 마을의 지하수 오염 실태를 파악하여 앞으로 수행될 안정화 작업에 필요한 기초 자료를 제공하며 아울러 그 오염을 최소화할 수 있는 방안을 연구하는 데 있다.

지질개요

석대 폐기물 매립장은 행정구역상으로는 부산시 해운대구 석대동 산 192번지 일원에 속하며, 지리적 좌표는 대략 북위 35° 12' 58" - 35° 13' 16" 이고, 동경 129° 7' 38" - 129° 7' 58" 에 속한다. 부산 일원의 지질은 경상계 퇴적암층(이천리층)을 관입 및 분출한 중성 화산암류와 산성 화산암류, 그리고 이를 관입한 불국사 화강암류와 마산암류, 맥암류 등으로 크게 분류되며, 시대적으로는 중생대 백악기에 속한다(손치무 등, 1978). 지질구조는 북북동 방향으로 크게 발달되어 있으며, 낙동강 하류에 발달된 언양 단층, 부산의 중심부인 동래와 서면

*부산시 남구 대연동 599-1 부산수산대학교 응용지질학과(599-1, Daeyeon-dong, Nam-gu, Department of Applied Geology, National Fisheries University of Pusan)

지역을 지나가는 울산 단층, 그리고 부산 지역 동쪽의 일광에서 송정으로 발달되어 있는 일광 단층이 있다. 언양 단층은 한반도 남동부의 대규모 단층인 양산 단층의 일부이다.

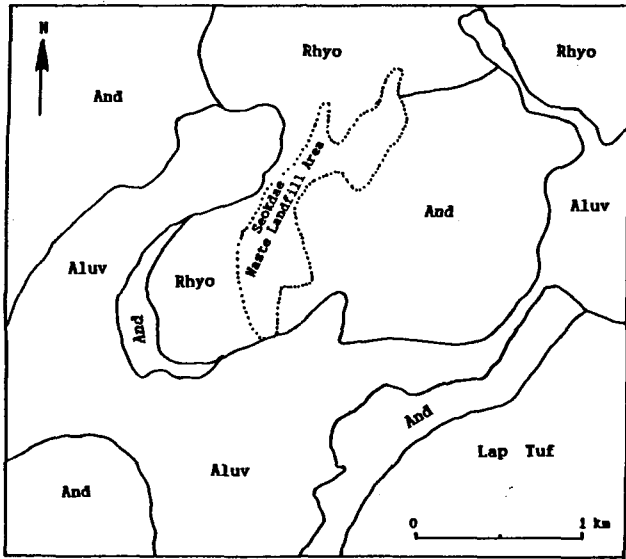


Figure 1. Geological map around the Seokdae waste landfill.
And : Andesitic Rocks, Rhyo : Rhyolitic Rocks,
Lap tuf : Lapilli Tuffs, Aluv : Alluvium.

매립지 일원의 지질은 안산암질암, 유문암질암 및 이를 덮고 있는 충적층으로 구성되어 있다(Figure 1). 안산암질암은 매립지 동쪽에 위치하며 세립질 안산암, 반상 안산암 및 각력 안산암 등으로 구성되어 있다. 안산암질암에는 절리나 단층들이 발달되어 있으며, N20E 90°와 N60W 38 SW의 절리계가 우세하다. 유문암질암은 석대 매립지의 서쪽에 위치하고, 안산암질암을 관입 분출하며, 유동구조의 발달이 미약하다. 폐기물 매립장 입구의 서쪽에 분포하는 유문암에는 열극이 매우 많이 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(언양 단층, 울산 단층 등)과 연관되며, 동서 방향의 절리계는 유문암질 암석 뿐만 아니라, 안산암질 암석에도 발달되어 있어 이 지역에서 국부적으로 우세하게 나타나는 구조선이다.

우물현황

석대 폐기물 매립에 의한 주변지역의 지하수 오염 상태를 파악하기 위해 회동동, 석대동, 금사동 및 반여동 일대의 가정용 우물과 시추공에 대해 93년 봄과 가을에 2회에 걸쳐 온도, ph, 전기전도도, 지하수위 등을 현장에서 측정하였다. Figure 2에 조사 우물 및 시추공이 표시되어 있으며, Table 1에 온도, ph, 전기전도도,

Table 1. Well inventories at the Seokdae waste landfill area.

NO.	Temp(°C)	pH	EC(μS/cm)	Water Level (below surface)	Well Type	Use	Remarks
1	15	6.40 (6.15)	182 (354)	1.62	dug well	domestic	
2					dug well	domestic	
3	15	6.02	458	3.97	dug well	domestic	
4	16	7.36	122			domestic	surface water
5	13	5.92	211	1.52	dug well	domestic	
6	13	6.28 (6.05)	85 (110)		dug well	domestic	
7	19	6.70 (7.35)	741 (717)	3.34	dug well	unused	
8	16	6.69 (7.36)	1005 (585)	3.43	bored well	bus terminal	well depth 25 m
9	13	6.36	573		bored well		Miwha factory
10	15	6.56 (6.80)	922 (910)		bored well	fish farming	Cheongi factory
11		6.70	444	1.2	dug well	industrial	
12		6.72	442		dug well		
13	19.1	5.82	273	1.5	dug well	domestic	
14		5.33	204	1.0	dug well	domestic	
15	18.4	6.10	252		dug well	domestic	
16	17.0	5.51	171		dug well	domestic	
17	17.3	5.76	321		dug well	domestic	
18		6.40	651		bored well	domestic	well depth 150 m
19	22.4	6.43	633		dug well	domestic	well depth 5 m
20	18.3	6.80	363		bored well	domestic	well depth 150 m

* 1번에서 10번 우물까지는 93년 4월말과 9월말(괄호안의 숫자)에 조사. 11번에서 18번까지는 93년 9월말에 조사. 19번과 20번 우물은 94년 8월 초에 조사.

Table 2. Estimated quantity of gases at the Seokdae waste landfill(unit, m³):

Gas	CH ₄	CO ₂	NH ₃	H ₂ S	TOTAL
Quantity(m ³)	1.1 × 10 ⁹	9.6 × 10 ⁸	9.0 × 10 ⁷	5.1 × 10 ⁶	2.1551 × 10 ⁹
Ratio(%)	51.04	44.54	4.18	0.24	100

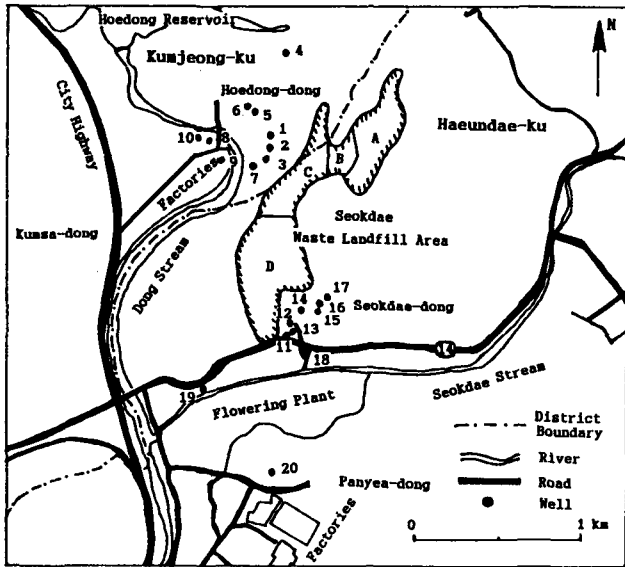


Figure 2. Location map of wells around the Seokdae waste landfill.

지하수위, 우물형태 및 용도 등이 기재되어 있다. 조사 우물의 온도 분포는 13°-22.4°C 범위의 값으로 보통 지하수의 온도분포이며, pH는 5.31-7.36 으로 대부분 약산성에서 중성에 가깝다. 전기 전도도는 85-1005 μS/cm로서 침출수와 오염된 하천수가 유입되는 곳에서는 전기전도도가 높게 나타난다. 지하 수위는 지표면하 1.0-3.97 m 범위로서 조사 지역에서는 지하수면이 지표 가까이 위치하여 지하수의 수량이 풍부한 것으로 추정된다.

매립지 가스

부산시 해운대 구청의 보고서(1993)에 의하면 석대 매립지로부터 발생 가능한 가스 양은 약 2.1551 × 10⁹ m³로 추산되며 이중 CH₄는 1.1 × 10⁹ m³이고 CO₂는 9.6 × 10⁸ m³이다. 전체적인 가스 추정 발생량은 Table 2에 있다. 가스 발생량 중 CH₄와 CO₂가 95%이상으로서 도시 고체 폐기물 매립지의 발생 가스 구성비와 일치하지만, NH₃는 4.18%로서 보통의 폐기물 매립장에서의 비율(0.1-1.0%)보다 높다. 그 이유는 N₂, O₂ 등의 가스 분석이 이루어지지 않은 것으로 보아 NH₃에 N₂와 O₂가 포함되어 있기 때문인 것 같다. 보통 도시 고체 폐기물 매립지에서 N₂는 2-5%, O₂는 0.1-1.0%의 구성비율을 차지한다(Tchobanoglous, 1993). 석대 매립지에서 H₂S 가스는 0.24%로서 보통의 매립장 수준(0-1.0%)을 점유하고 있다. 쓰레기 매립장에서 발생하는 가스 중에서 메탄과 암모니아 가스는 악취를 발생시키며, 황화수소 가스는 유독성 냄새를 발생시킨다. 매립지에서 발생하는 가스중에서

Table 3. Chemical analysis of contaminated seepage water in the Seokdae waste landfill.

Component	1	2
BOD(ppm)	1049.7	
COD(ppm)	1971.8	
pH	8.38	
EC(μS/cm)	11270	
NH ₄ -N(ppm)	686.648	
NO ₃ -N(ppm)	31.210	
NO ₂ -N(ppm)	0.266	
PO ₄ -P(ppm)	10.028	
Total(ppm)	690	
Alkalinity		1357.42
Na(ppm)	2844.27	230.08
Mg(ppm)	184.36	715.72
K(ppm)	1578.79	43.17
Ca(ppm)	23.90	3838.3
Cl(ppm)	2,076.5	42.6
NO ₃ (ppm)	8.2	101.3
SO ₄ (ppm)	108.1	205.7
Cr(ppb)	401.3	1648.7
Mn(ppb)	639.3	56.8
Co(ppb)	48.0	99.3
Ni(ppb)	214.1	65.8
Cu(ppb)	38.7	252.9
Zn(ppb)	437.7	1.5
Cd(ppb)	1.6	17.8
Pb(ppb)	24.0	

CO₂와 H₂S의 비중은 공기보다 커서(Perry et al., 1984) 대기중으로 빨리 확산되지 못하고 지하수와 반응해서 CO₂ 가스는 HCO₃⁻¹ 이온을, H₂S 가스는 SO₄⁻² 이온을 증가시키게 된다. 따라서 침출수에는 HCO₃⁻¹와 SO₄⁻²의 농도가 크게 나타난다.

침출수 수질

폐기물 매립장내의 침출수의 성분조사를 2개 지점에 대해서 실시하였다. 시료의 채취시기는 93년 9월 25일로서 가을철이고, 시료채취의 어려움으로 비교적 농도가 옅은 침출수를 배수로에서 채취하여 분석하였다. 분석 결과는 Table 3에 있다. BOD, COD는 1,000 ppm이상이고, 전기전도도는 10,000 μS/cm이상이다. 암모니아성 질소와 total alkalinity가 600 ppm이상이다. 양이온 중에서 Na⁺¹가 1357.42-2844.27 ppm, K⁺가 715.72-1578.79 ppm, Mg⁺²가 184.36-230.08 ppm으로서 함량이 상당히 많다. 그러나 Ca⁺²는 23.90-43.17 ppm으로 함량이 적다.

Table 4. Chemical analysis of the Dong stream.

Component	1	2
BOD (ppm)	110.44	12.11
COD (ppm)	72.41	39.87
pH	7.03	6.88
EC (μS/cm)	1980	1712
NH ₄ -N (ppm)	19.13	18.32
NO ₃ -N (ppm)	113.49	6.46
NO ₂ -N (ppm)	11.10	0.14
PO ₄ -P (ppm)	0.13	0.04
HCO ₃ (ppm)	108	-
Total (ppm)	157	104
Alkal.		
Na (ppm)	373.95	158.57
Mg (ppm)	26.67	25.22
K (ppm)	14.30	27.05
Ca (ppm)	78.52	73.31
Cl (ppm)	510	214.1
NO ₃ (ppm)	257.3	17.3
SO ₄ (ppm)	887	199.8
Cr (ppb)	2439	218.7
Mn (ppb)	4032	488.5
Co (ppb)	14	23.1
Ni (ppb)	25	65.4
Cu (ppb)	308	93.3
Zn (ppb)	19788	209863.5
Cd (ppb)	103	214.1
Pb (ppb)	746	162.0
Rb (ppb)	18	-
Sr (ppb)	472	-
Ba (ppb)	96	-
Fe (ppb)	0.62	-

음이온에서는 Cl⁻이 2076.5 - 3838.3 ppm 으로 가장 많으며, SO₄²⁻는 101.3 - 108.1 ppm이다. 중금속류중에서는 Cr이 205.7 - 401.3 ppb, Mn이 639.3 - 1648.7 ppb, Ni이 99.3 - 214.1 ppb, Zn이 252.9 - 437.7 ppb이고 Co, Cu, Pb 등은 수십 ppb이다. Cd은 수 ppb로서 극미량이고, Mn의 함량이 중금속 중에서 가장 높다.

하천수 수질

조사지역의 서쪽편에 동천(東川)이 회동수원지에서 발생되어 수영천에 합류되어 진다. 하천수 수질분석은 93년 4월말(시료 1) 갈수기 때와 9월말(시료 2)의 2회에 걸쳐 실시하였다. 그 분석 결과는 Table 4에 있다. BOD는 12.11 - 110.44 ppm, COD는 39.87 - 72.41 ppm, EC는 1712 - 1980 μS/cm, total alkalinity는 104 - 157 ppm, Cl⁻이 214.1 - 510 ppm, SO₄²⁻가 199.8 - 887 ppm, Cr이 218.7 - 2499 ppb, Mn이 488.5 - 4032 ppb, Zn이 19.78 - 209.86 ppm, Cd이 103 - 214.1 ppb, Pb이 162 - 746 ppb 등으로 동천이 특히 중금속에 의해 많이 오염되어 있으며, 오염의 주 요인은 주변 공장으로로부터 무단 방출되는 폐수이지만

Table 5. Chemical analysis of groundwater.

Component	1	4	6	7	8	9	10
BOD (ppm)	1.95	7.60	ND	2.34	-	1.99	10.83
COD (ppm)	2.68	3.21	0.835	12.06	-	5.41	26.52
pH	6.40	7.36	6.28	6.70	6.69	6.36	6.56
EC (μS/cm)	238	122	85	741	1005	573	922
NH ₄ -N (ppm)	ND	ND	ND	1.68	-	-	2.61
NO ₃ -N (ppm)	9.66	3.77	1.52	31.10	7.66	7.31	7.97
NO ₂ -N (ppm)	ND	ND	ND	5.22	0.01	-	0.0185
PO ₄ -P (ppm)	0.034	0.053	0.038	0.038	0.014	0.012	0.025
HCO ₃ (ppm)	29	39	12	78	124	48	166
Total (ppm)	51	62	32	110	158	72	198
Alkalinity							
Na (ppm)	19.76	8.61	11.82	78.24	86.47	35.26	125.33
Mg (ppm)	10.76	5.51	2.19	11.41	28.97	30.41	15.68
K (ppm)	2.19	0.49	1.62	74.53	17.08	3.92	10.46
Ca (ppm)	36.87	18.87	<5	39.38	169.54	76.03	99.72
Cl (ppm)	44	6	14	167	446	172	254
NO ₃ (ppm)	50.5	5.5	5.1	113.0	27.5	44.9	11.7
SO ₄ (ppm)	23	2	15	52	181	110	179
Fe (ppm)	ND	0.01	0.01	0.78	0.02	0.02	0.18
F (ppm)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Al (ppb)	13.5	27.9	25.7	37.5	151	1.5	1.6
Cr (ppb)	<0.5	0.7	<0.5	<0.5	146	<0.5	1.4
Mn (ppb)	11.1	11.1	11.1	61.4	4537	31.9	3517.7
Co (ppb)	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	2	<0.5	1.8
Ni (ppb)	0.4	0.4	0.6	1.5	9	0.6	0.8
Cu (ppb)	0.8	0.2	1.1	2.3	22	1.1	11.0
Zn (ppb)	2.6	0.3	6.0	15.1	21186	195.7	94.1
Rb (ppb)	1.3	0.2	2.2	2.7	8	5.2	2.5
Sr (ppb)	281.8	91.0	68.2	432.2	890	599.6	672.7
Cd (ppb)	0.2	<0.1	0.2	1.1	163	1.1	0.9
Ba (ppb)	18.7	1.0	32.9	136.9	249	33.5	233.1
Pb (ppb)	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	9	<0.2	0.3

폐기물 매립장에서 발생하는 침출수들도 하천의 오염을 증가시키고 있다. 오염된 하천수들은 주변의 지하수들을 오염시켜서 버스터미널, 미화섬유 공장과 천기물산 공장등에 개발되어 있는 지하수들이 이 하천수에 의해 오염되어 있다.

지하수 수질

석대 폐기물 매립장에서 발생하는 침출수들이 지하로 이동하면서 각종 유해 물질들이 함께 이동 및 확산을 하게 되어 매립장 주변의 지하수들을 오염시키게 된다. 따라서 그 오염 정도 및 범위를 파악하기 위해 매립장 주변의 지하수에 대한 정밀 수질분석을 실시하였다. 수질 분석을 위한 시료채취는 모두 3번 이루어졌다. 1차 시료 채취는 1993년 4월 25일에서 5월 7일 사이에 이루어 졌으며, 분석 결과는 Table 5에 있다. 이 시기는 부산 지방에 비가 오지 않아 갈수기 때였다.

석대 매립장에서 발생하는 침출수의 침입으로 고통을 받고 있던 회동동 마을의 가정용 소규모 우물(1번, 6번, 7번)의 수질 분석 결과에 의하면, 1번 우물은 보통의 지하수와 큰 차이는 없으나 Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ 등이 약간 높은 편이다. 그러나 이 우물은

Table 6. Chemical analysis of groundwater.

Component	1	6	7	8	10	11	12	13	16	18	19	20
BOD (ppm)	2.81	3.98	1.54	3.88	4.69	1.88	1.32	1.29	3.62	1.47	2.35	0.96
COD (ppm)	5.61	8.23	3.56	5.51	14.66	6.15	3.38	2.15	5.43	4.10	9.53	4.01
pH	6.15	6.05	7.35	7.36	6.80	6.7	6.72	5.82	5.51	6.40	6.43	6.80
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	354	110	717	585	910	444	442	273	171	652	633	363
$\text{NH}_4\text{-N}$ (ppm)	0.026	0.044	0.172	0.317	1.695	0.604	0.049	0.033	0.027	0.030	0.365	0.144
$\text{NO}_3\text{-N}$ (ppm)	20.288	3.141	18.589	20.677	1.523	18.297	14.454	17.907	11.119	3.706	5.086	0.443
$\text{NO}_2\text{-N}$ (ppm)	0.002	0.001	0.315	0.011	0.002	0.006	0.006	0.006	0.001	0.002		
$\text{PO}_4\text{-P}$ (ppm)	0.031	0.018	0.007	0.011	0.009	0.729	0.047	0.057	0.018	0.011	0.006	0.036
Total alkalinity	56	40	92	42	198	106	76	40	42	118	109	110
Na (ppm)	9.72	13.01	76.40	35.38	64.85	40.89	57.95	29.00	9.25	48.48	44.55	11.87
Mg (ppm)	6.60	2.02	6.92	19.61	6.39	2.67	6.47	3.24	1.57	11.69	12.36	7.04
K (ppm)	0.23	3.62	70.22	5.64	7.49	23.55	16.31	9.29	1.92	5.31	6.59	1.49
Ca (ppm)	20.03	7.55	14.49	50.73	54.41	23.07	49.08	15.84	1.80	67.47	46.80	39.94
Cl (ppm)	32.7	6.9	63.1	39.3	59.7	309.8	251.1	78.0	66.4	281.8	131.84	40.20
NO_3 (ppm)	92.9	4.9	78.9	50.1	43.0	67.3	73.0	41.1	14.6	28.98	16.46	
SO_4 (ppm)	182.6	14.9	56.5	84.4	98.1	104.7	65.5	25.7	2.6	10.3	82.01	29.99
F (ppm)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cr (ppb)	0.9	1.4	1.4	1.1	59.7	1.2	1.0	0.7	0.6	1.1	9.23	3.34
Mn (ppb)	1.0	3.2	26.2	3.9	18640.4						2682.90	147.67
Co (ppb)	0.1	0.4	0.3	0.2	9.2						3.10	0.48
Ni (ppb)	1.6	1.5	10.7	3.6	47.8	1.4	0.7	0.7	0.9	4.1	3.30	64.51
Cu (ppb)	3.3	6.0	80.7	9.7	28.2	2.9	4.0	3.5	1.1	2.9	9.06	2.21
Zn (ppb)	37.6	56.2	113.3	326.7	41.6	22.8	19.2	8.2	3.0	27.7	52.06	54.65
Cd (ppb)	0.1	0.5	0.5	0.2	0.7	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	2.13	0.22
Pb (ppb)	0.9	1.5	0.7	1.7	1.1	0.4	0.5	0.6	0.4	0.6	0.43	0.20

심도가 깊지 않고, 또 시기적으로 갈수기 때 이므로 침출수는 천층부에 존재치 않고, 지하 심부에 위치하기 때문에 보통의 지하수들이 갖는 수질을 보여 주었다. 6번 우물은 깊이가 5 m 내외이고 지형적으로 볼 때 폐기물 매립장으로 부터의 영향을 거의 받지 않는다. 따라서 그 수질 분석 결과는 침출수에 의한 오염 흔적이 전혀 없다. 7번 우물은 다른 우물들과 같이 심도가 5 m 내외인데도 침출수에 의해 지하수가 많이 오염되어 있다. 분석 결과에 의하면 EC가 741 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Cl 이 167 ppm, NO_3^{2-} 가 113.0 ppm, SO_4^{2-} 가 52 ppm이며, 기타 중금속류도 함량이 높게 나타난다. 특히 COD, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 등은 음용수 기준치를 벗어나고 있다. 회동동 마을 일대에 공동 급수로 이용되고 있는 지표수(시료 4)는 BOD와 COD가 약간 높은 편이지만, 기타 다른 성분들은 낮은 값을 보여주고 있어 식수로 이용하는 데 큰 문제는 없는 것으로 보인다.

동천의 건너편에 위치하고 있는 99번 부산 시내버스 터미널(시료 8), 미화섬유(시료 9), 천기물산(시료 10)등 공장지대에서의 지하수 수질 분석결과를 보면 오염이 많이 된 것을 알 수 있다. EC는 573 - 1005 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이며, HCO_3^- 가 48 - 166 ppm, total alkalinity가 72 - 198 ppm, Na^+ 가 35.26 - 125.33 ppm, Ca^{+2} 가 76.03 - 169.54 ppm, SO_4^{2-} 가 110 - 181 ppm이다. 중금속류에서는 Mn이 31.9 - 4,537 ppb, Zn이 94.1 - 21,186 ppb, Sr이 599.6 - 890 ppb, Cd이 0.9 - 163 ppb, Ba가 33.5 - 249 ppb에 이른다. 우리나라의 중금속에 대한 음용수 허용 기준과 비교해보면 미화섬유에서 이용하고 있는 지하수는 문제가 없으나, 버스터미

널의 지하수는 기준치에서 많이 벗어나 있으며, 천기물산에서 이용하고 있는 지하수도 Mn이 기준치(300 ppb)의 10배 이상이나 된다. 이곳의 지하수들이 이렇게 오염이 많이 되어 있는 이유는 석대 폐기물 매립장에서 발생한 침출수에 그 원인이 있을 뿐만 아니라, 이 일대 유독성 물질을 배출하는 영세한 공장들에서 폐수를 동천에 무단 방출하여 오염된 하천수가 다시 이곳의 지하수를 오염시키게 된 것이 주 원인으로 사료된다.

2차 시료 채취는 1993년 9월말 경으로서 여름에 상당량의 강수량(7월 252.4 mm, 8월 630.3 mm, 9월 44.8 mm)이 발생한 이후였다. 2차 수질 분석에서는 1차 때 분석한 시료중에서 5개 지점(번호 1, 6, 7, 8, 10)에 대하여 계절적 변화를 보기위해 다시 채취하여 동일 기관에서 분석하였다. 분석 결과(Table 6)를 보면 1번과 7번 우물은 봄보다 많이 오염되어 있다. 6번 우물은 심도가 얇고 지형적으로 볼때 침출수 유입이 없는 곳이어서 1차 수질분석 때와 마찬가지로 침출수에 의한 영향을 받고 있지 않다. 8번과 10번 우물은 1차때보다는 약간 덜 오염되어 있다. 그 이유는 강수량이 상당량 있었기 때문이다. 2차때 처음 실시한 석대동 우물(시료 11, 12, 13, 16, 18)의 수질 분석 결과를 보면 우물심도가 5 m 내외이면서도 16번 우물을 제외하고는 침출수에 의해 오염이 많이 되어있다. EC는 273 - 652 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이고, 비반응 물질인 Cl-은 78.0 - 309.8 ppm, NO_3^{2-} 는 14.6 - 73.0 ppm, SO_4^{2-} 는 10.3 - 104.7 ppm에 이른다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 11.119 - 18.297 ppm으로 음용수 기준치(10 ppm)를 초과하고 있다. 16번 우물은 지형적인 여건상 오염이 덜 되어 있다. 94년 8월에 실

Table 7. Average hydraulic conductivities of geological materials at the Seokdae waste landfill.

지질	심도 (m)	수리전도도 (cm/sec)
표토-풍화암상부	0 - 5	5×10^{-2}
풍화암하부-연암	5 - 20	5×10^{-3}
경암	20 - 40	5×10^{-5}

시한 3차 수질 분석에서는 폐기물 매립장에서 발생하는 침출수에 의한 지하수 오염범위를 파악하기 위해 석대전 건너편에 위치하고 있는 석대 화쇄단지 일대와 반여동의 지하수를 조사하였다. 반여동의 일반 가정집에서는 대부분 상수도를 이용하고 있으며, 지하수는 화쇄단지에서 화초 재배를 위해 또 풍산금속에서 식수를 위해 이용되고 있었다. 화쇄단지에 이용되고 있는 19번 지하수는 심도가 5m 내외로서 천층 지하수이며, 침출수에 상당히 오염되어 있다. EC는 633 $\mu\text{S}/\text{cm}$, total alkalinity 109 ppm, Cl^- 131.84 ppm, NO_3^- 28.98 ppm, SO_4 82.01 ppm이다. 중금속류 중에서 Mn의 함량이 무려 13,682.90 ppb인데 이는 우리나라 음용수의 기준치보다 45배이상 높은 값이다. 풍산금속에서 개발한 20번 지하수는 심도가 약 150m 정도이며, 현재 풍산금속과 그 주변의 주민들이 식수로 이용하고 있다. EC는 363 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이며, total alkalinity는 110 ppm, Cl^- 40.20 ppm, NO_3^- 16.46 ppm, SO_4^{2-} 29.99 ppm으로서 석대 폐기물 매립장과 약 1 Km정도 떨어져 있으나 침출수에 의해 어느정도 오염이 되어 있다는 것을 알 수 있다. Cl^- 이온은 지하의 매질과 반응하지 않아서 오염의 척도가 되며, 폐기물 매립장에서 발생하는 가스 중에서 공기보다 무거운 CO_2 와 H_2S 는 물과 반응해서 HCO_3^- 와 SO_4^{2-} 이온을 증가시킨다. 20번 지하수는 일반 지하수보다도 이러한 성분들을 많이 함유하고 있다. 오염이 안된 6번 지하수의 Cl^- , HCO_3^- 및 SO_4^{2-} 는 각각 20 ppm 내외이다.

지하수 유동속도

부산직할시 해운대 구청(1992, 1993)에서 수행한 2건의 학술용역 보고서에 의하면, 매립장내의 지질은 표토가 대략 3m 내외이고 풍화대가 약 5m 내외이며 그 하부에는 무문암질암 또는 안산암질암이 나타난다. 매립장내의 기반암들은 대부분 열극과 절리가 발달되어 있으며, 특히 매립 C 지구의 서쪽편과 회동동 마을 인접부근의 시추자료에 의하면 R.Q.D.(Rock Quality Designation)가 0 에 가까운 구간도 있어 파쇄대가 크게 발달되어 있는 것 같다. 또한 암석 코어의 절리면에는 침출수에 오염되어 색깔이 변하고 악취가 나며 유독가스 냄새도 난다. 이러한 사실들로 미루어 볼 때 매립장내의 침출수들은 암석에 발달된 균열을 따라 활발하게 유동되고 있는 것으로 추정된다. 매립 C 지구의 서쪽편과 회동동 마을 인접부근의 시추공 내에서 실시한 packer test(부산직할시 해운대구청, 1992)에 의한 개략적인 평균 수리전도도가 Table 7에 있다.

이곳에서 측정된 지하수위는 지표면하 4.5 m 정도이다. 1993년까지만 해도 산사면 아래 회동동 마을쪽으로 상당량의 침출수가 용출되어 민원이 제기되어서, 1994년 상반기에 부산시에서 침출수 유입 방지를 위한 차수벽 공사를 실시하였다. 그

러나 침출수 유출이 완전히 억제되지 못하고 아직도 우기에는 침출수들이 일부 유출되고 있어서 완벽한 차수 여부를 파악하기 위해서는 최소한 1년 정도의 관찰이 필요하다. 1993년에 산사면으로 유출되는 침출수로부터 이곳의 지하수 유동 속도를 추정해보면 다음과 같다:

C 지구 서쪽편에서의 평균 지하수위 : 40.5 m(평균해수면 기준)
 산사면 침출수 용출 지점의 고도 : 25 m(평균해수면 기준)
 용출지점까지의 거리 : 100 m
 풍화암하부 - 경암의 평균 수리전도도 K : 2.5×10^{-3} cm/sec
 수리경사 J : $(40.5 - 25) / 100$
 $= 0.155$

열극이 발달된 결정질 암석의 평균 공극율(n_e) 0 - 10% (Davis, 1969)를 이용하여 이곳 지하수의 평균선형속도(v_a , average linear velocity)를 구하면

$$v_a = \frac{KJ}{n_e} = 3.88 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$$

$$\approx 3.4 \text{ m/day}$$

따라서 C 지구 서쪽편 지점에서 100 m 떨어진 하부 용출지점까지 지하수가 도달하는데 걸리는 시간은 약 30일로서 우기에는 다량의 침출수가 짧은 시간내에 용출하였다. 지형적으로 매립장은 깊은 계곡에 위치하여 주변의 산 능선쪽에서 많은 지하수가 유입된다. 유입된 지하수는 침출수에 오염되면서 매립장 남쪽 입구의 넓은 화쇄단지로 유동하여, 이곳의 지하수를 오염시키고 있다. 현재 확인된 지하수 오염 범위는 우물번호 20번까지이다. 매립 C 지구 서쪽편의 부산시 시추자료와 석대동 일대의 우물조사에서 얻어진 자료를 이용하여 매립장 내의 지하수 유동속도를 추정하면 다음과 같다.

수리경사(hydraulic gradient):

매립 C 지구 시추공내의 지하수위 : 40.5 m(평균 해수면 기준)
 석대동 입구 11번 우물에서 지하수위 : 8.8 m(평균 해수면 기준)
 시추공과 우물과의 거리 : 약 1,050 m

$$\text{수리경사 } J = \frac{(40.5 - 8.8)}{1,050} = 0.0302$$

표토에서 풍화대 상부구간의 지하수 유동속도(심도 0 ~ 5 m) :
 평균 수리전도도 K = 10^{-2} cm/sec
 유효공극율 $n_e = 0.25$
 평균선형속도 $V_a = 1.2 \times 10^{-3}$ cm/sec
 $\approx 1.04 \text{ m/day}$

풍화대 하부에서 연암구간의 지하수 유동속도(심도 5 ~ 20 m) :
 평균 수리전도도 K = 2.53×10^{-3} cm/sec
 유효공극율 $n_e = 0.15$
 평균선형속도 $V_a = 5.1 \times 10^{-4}$ cm/sec
 $\approx 44 \text{ cm/day}$

연암에서 경암구간의 지하수 유동속도(심도 20 ~ 40 m) :

평균 수리전도도 $K = 2.75 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$
 유효공극률 $n_e = 0.05$
 평균선형속도 $V_a = 1.7 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$
 $\approx 1.5 \text{ cm/day}$

이상의 추정된 지하수 유동속도들은 매립장내의 정확한 지하수 유동속도라고 할 수는 없지만, 현재 이 일대의 지하수 오염 상태를 보면 어느 정도의 합리성을 갖고 있다. 지하수 수질조사에 의하면 침출수에 의한 지하수 오염범위는 매립장 중심에서 1-1.5 km 정도에 까지 이르고 있다.

물수지 분석

폐기물 매립장에서 발생하는 침출수량을 산출하기 위해 이 지역의 물 수지분석을 실시하였다. 1987년 부터 1993년 까지의 부산지방의 월별 강수량, 월별 평균기온과 월별 수평면 일사량등의 자료를 가지고 미국 환경처(U.S.EPA, 1984)에서 개발한 HELP(Hydraulic Evaluation of Landfill Performance) Version 1 프로그램을 이용하였다. 석대폐기물 매립장은 쓰레기가 단순 매립된 후 건설사토 및 일반토사로 덮여있는 상태이다. 따라서 전산분석에서는 식물이 덮여있지 않는 복토층과 쓰레기층의 two layer system을 이용하였다. 각 층의 물리적 성질들은 HELP 모델에서 지정된 값들을 이용하였으며 Table 8에 있다. HELP 프로그램을 이용한 1987년 부터 1993년 까지의 전산분석 결과가 Table 9에 있다. 매립장 면적을 고려하여 지하로 침투하는 총 침출수량은 연간 $336,196 \text{ m}^3/\text{yr}$ 로 추정되어진다. 이것을 일평균으로 환산하면 약 $920 \text{ m}^3/\text{day}$ 이다. 일평균 발생 침출수중에서 매립장의 배수시설로 흘러나가는 양은 부산시 자

Table 8. Physical properties of two layers in the Seokdae waste landfill.

	Layer 1 (vertical percolation layer)	Layer 2 (waste layer)
Thickness	1.5 m	20 m
Evaporation coefficient	1.82 mm/day	1.82 mm/day
Porosity	0.389	0.52
Field capacity	0.199	0.32
Wilting point	0.066	0.19
Effective hydraulic conductivity	$4.67 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$	$2.0 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$

Table 9. Average annual totals of hydrologic data for 1987 through 1993.

	quantity(mm)	quantity(m^3)	ratio(%)
Precipitation	1,487	764,302	100.00
Runoff	637	327,743	42.88
Evapotranspiration	195	100,363	13.13
Percolation from base of landfill	655	336,196	43.99
Drainage from base	0.0	0.0	0.00

료에 의하면 약 $400 \text{ m}^3/\text{day}$ 이다. 따라서 순수하게 지하로 침투하는 침출수의 양은 약 $520 \text{ m}^3/\text{day}$ 에 해당된다.

오염방지 대책

폐기물 매립장에서 발생하는 침출수에 의한 더 이상의 지하수 오염을 막기 위해서는 매립장 내외 지하수 오염물질이 확산되고 있는 주변지역에 여러개의 관측정(monoring well)을 설치하여(매립장 4개, 회동동마을 1개, 석대동마을 1개, 화훼단지 2개, 반여동 1개) 지하수위와 수질을 주기적으로 조사하여야 한다. 또 침출수 채수정(pumping well)을 여러개 개발하여 오염이 심한 시기에는 오염된 지하수를 채수하여 정수 처리한 후 하천에 방류하여야 한다. 현재 매립장 입구에 있는 침출수 처리장은 오래전에 폐쇄되어 사용이 불가능하므로 보완하거나 새로운 침출수 처리장을 만들어야 될 것이다. 아울러 매립장 주변의 지하수 오염이 확산되고 있는 곳(회동동, 석대동, 화훼단지)에 차수벽 설치가 필요하다. 앞으로 관측정및 채수정의 수량과 위치, 차수벽의 위치와 규모등을 정확히 산출하기 위해서는 폐기물 매립장 일대의 지하수 유동및 오염물질의 확산 상태가 좀 더 정밀하게 조사되어야 한다.

결 론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 석대 폐기물 매립지 일원의 지질은 중생대 백악기에 관입 및 분출한 안산암 질암, 유문암질암과 층적층으로 구성되어 있다. 부산 일원에는 언양단층, 울산단층과 일광단층 등 대규모 단층들이 발달되어 있으며, 석대 매립지는 울산단층과 일광단층 사이에 위치한다. 안산암질암에는 절리나 단층이 발달되어 있으며 N20W 90° 와 N60W 38SW의 절리계가 우세하다. 유문암에는 열극이 많이 발달되어 있으며, 절리의 주방향은 N6E 86NW 와 N87W 29SW이다.
2. 석대 매립지 주변의 우물조사 결과에 의하면 온도분포는 13-20°C 범위로 보통 지하수의 온도분포이며, pH는 5.31-7.36으로 대부분 약산성에서 약알칼리성으로 중성에 가깝다. 그러나 전기전도도는 100-1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 조사지역 대부분의 우물들이 침출수에 오염되어 있고, 심도가 깊은 우물이 얇은 우물에 비해 오염정도가 높다. 지하수위는 지표면하 1.0-3.97 m로서 지하수량이 비교적 풍부한 것으로 추정된다.
3. 석대 매립지에서 발생하는 가스는 CH_4 와 CO_2 가 거의 대부분(95%)이며 NH_3 와 H_2S 가스가 미량(5%미만) 나타난다. 이 가스중 CH_4 , NH_3 , H_2S 들은 악취와 유독성 냄새를 발생한다. 그리고 CO_2 와 H_2S 는 침출수에 HCO_3^- 와 SO_4^{2-} 이온들을 증가시킨다.
4. 침출수의 화학성분은 BOD와 COD가 1,000 ppm 이상이고 전기전도도는 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상이다. Na^+ , K^+ 는 1,000 ppm이상이고, Mg는 수백 ppm이며 Cl^- 은 2,000 ppm이상이고 SO_4^{2-} 는 100 ppm이상이다. 중금속류중에서 Cr, Mn, Ni, Zn이 수백 ppb이상이며, 특히 Mn 은 639.3-1,648.7 ppb로서

중금속류중에서 가장 많은 양을 차지한다.

5. 회동동 마을의 서쪽에 위치하는 동천은 주변의 공장지대에서 방출되는 폐수와 석대 쓰레기 매립지에서 발생하는 침출수에 의해 오염이 가속화 되고 있다. 이 오염된 하천수는 주변 지역의 지하수들을 다시 오염시키고 있다.

6. 지하수 수질분석 결과에 의하면 매립지 서쪽편에 위치하는 회동동 마을과 매립지 남단에 위치하는 석대동 마을의 지하수들은 쓰레기 매립장에서 발생하는 침출수에 의해 많이 오염이 되어 있다. 동천의 건너편 금사동 공장지대의 지하수들은 오염된 하천수와 쓰레기 매립장에서 발생한 침출수에 의해 오염이 가속화되고 있다. 석대동 화훼단지과 반여동 일대의 지하수들도 쓰레기 매립장의 침출수에 의해 오염되어 있어 total alkalinity가 높고 Cl^- , SO_4^{2-} 등의 음이온과 중금속류중 Mn, Zn, Ba, Sr, Al 등의 함량이 높다.

7. 매립장내의 암반은 유문암질과 안산암질 암석인데 열극과 절리가 많이 발달되어 있으며, 회동동 마을 인접 부근에서는 R. Q. D.가 0에 가까운 구간도 있어 파쇄대가 크게 발달되어 있다. 이 곳 암반에서의 평균 지하수 유동속도는 3.4 m/day로 추정된다. 현재 이곳은 부산시에서 차수벽공사를 완료하여 회동동 마을로 침출수의 유입을 막고 있으나, 우기에는 아직도 침출수들이 유출되고 있다.

8. 매립장은 깊은 계곡에 위치하여 주변에서 많은 지하수가 유입되어 침출수와 함께 매립장 남쪽 입구의 넓은 개활지로 유동한다. 현재 화훼단지에 이용되고 있는 이 개활지의 지하수들은 대부분 침출수에 오염되어 있으며, 현재 확인된 오염거리는 쓰레기 매립장 중심에서 약 1 - 1.5 km정도 까지이다. 매립장에서의 지하수 유동속도는 표토와 풍화대 상부구간(심도 0 ~ 5 m)에서 약 1.04 m/day, 풍화대 하부와 연암구간(심도 5 ~ 20 m)에서 약 44 cm/day, 연암과 경암구간(심도 20 ~ 40 m)에서는 1.5 cm/day로 추정된다.

9. 1987년 부터 1993년 까지의 6년 동안 석대 매립지의 평균 침출수 발생량은 총 강수량의 43.99% 로서 일평균 약 920 m^3 이다. 이 발생된 침출수중에서 약 400 m^3 가 매립지내의 배수

시설로 흘러나가고, 순수하게 지하로 침투되는 침출수량은 일평균 약 520 m^3 로 추정된다.

10. 석대 매립장 주변의 지하수 오염방지 대책으로는 감시정 및 채수정의 개발, 차수벽 설치, 기존 침출수 처리장의 보완내지는 새로운 침출수 처리장의 설치가 필요하다.

사 사

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비와 동원학술재단 연구비에 의하여 연구되었으며, 연구비를 지원해 준 한국학술진흥재단과 동원학술재단에 감사한다. 또한 수질분석을 수행한 표준과학원 기초과학지원센터와 부산수산대학교 환경공학과에 감사한다.

참고문헌

- 부산직할시 해운대구청, 1992, 부산직할시 석대동 쓰레기 매립장 침출수 누출 방지 학술연구(연구수행기관 : 자연사 환경학회).
- 부산직할시 해운대구청, 1993, 석대 쓰레기 매립장 안전 진단 및 사후 환경관리 방안연구(연구수행기관 : 동아대학교 환경문제 연구소).
- 손치무, 이상만, 김상욱, 김형식, 1978, 동래 월내 지질도, 한국자원 연구소.
- Davis, S.N., 1969, Porosity and permeability of natural materials, in Dewiest, R.J.M., Ed., Flow through porous materials, ed. R. J.M. Dewiest, New York, Academic Press, p.54-89.
- Perry, R.H., Green, D.W., and Maloney, J.O., 1984, Chemical engineers handbook, 6th ed., McGraw-Hill, New York.
- Tchobanoglous, G., Hilary Theisen, and Samuel Vigil, 1993, Intergrated solid waste management, McGraw-Hill, Inc., 978p.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1984, The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) MODEL, developed by P.R. Schroeder, J.M. Morgan, T.M. Walski and A.C. Gibson.