

# 폐기물 매립지 주변의 지하수 오염과 오염물질의 지연 특성

## Characteristics of Groundwater Pollution and Contaminant Attenuation at Waste Disposal Sites

오석영(Seok - Young Oh)\* · 전효택(Hyo - Taek Chon)\*

**요 약 :** 이 연구에서는 난지도 매립지와 화성매립지를 연구대상으로하여 주변의 지하수 오염 정도를 파악하고, 오염물질들의 지연작용을 밝히며, 최적 오염지시인자를 도출하고자 하였다. 난지도, 김포, 화성 매립지에서 채취된 침출수에 대하여 현장측정과 실내 화학분석을 실시하여 침출수의 물리화학적 수리화학적 특성들을 파악한 결과 침출수는 높은 온도(31.7-40.1°C)와 높은 전기전도도(14,650-32,800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), 약 알칼리의 pH(7.58-8.45), 낮은 Eh값(-119.4-20.4 mV)을 특징적으로 보이며, 주성분 이온들로서  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  등이, 부성분 이온들로서  $\text{Mn}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Br}^-$  등이 부화되어 있다. 일반폐기물 매립지인 난지도·김포 매립지의 침출수와 산업폐기물 매립지인 화성매립지의 침출수는  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe, 중금속 원소들의 함량으로 구분된다. 지표수와 지하수의 화학분석, Cl 표준화과정, WATEQ4F 분석 등을 종합하여 앞서 연구된 유선망 분석을 바탕으로 오염물질의 거동을 해석하였다. 또한 Contamination Factor를 통하여 최적의 오염지시인자를 도출하였다. 일반폐기물 매립지인 난지도 매립지의 경우 K, Na, Ca, Mg, B, Zn,  $\text{HCO}_3^-$ , Cl, F, Br, TOC 등이, 산업폐기물 매립지인 화성 매립지의 경우 K, Na, Ca, Mg, B,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , Cl, F, Br, TOC 등이 뚜렷한 대조를 보이는 좋은 오염지시인자이며, 해안 매립지는 TOC가 가장 적합한 오염지시인자이다.

**Abstract :** The objectives of this study are to investigate the groundwater and surface water contamination, to interpret the attenuation mechanism of contaminant transport, and to find the appropriate contamination indicator at the two big landfill sites : Nanjido Landfill and Hwasung Landfill. Leachate from the Nanjido, the Hwasung and the Kimpo waste disposal sites is characterized by high temperature (31.7-40.1°C), high electric conductivity (14,650-32,800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), somewhat higher pH(7.58-8.45) and low Eh (-119.4-20.4 mV), and is enriched in both major ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ) and minor ( $\text{Mn}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ) ions. Municipal solid waste leachate and industrial waste leachate are effectively discriminated by the content of  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe, and heavy metals. The attenuation mechanism of each component was assessed using the chemical analysis, Cl-normalizing process, WATEQ4F simulation, and preceding flownet analysis. Based on the calculation of Contamination Factor, K, Na, Ca, Mg, B, Zn,  $\text{HCO}_3^-$ , Cl, F, Br and TOC are effective contamination indicators in the Nanjido landfill site, and K, Na, Ca, Mg, B,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , Cl, F, Br and TOC in the Habsburg landfill site. Particularly, TOC is the best contamination indicator in landfill sites influenced by sea water.

### 서 론

우리사회의 산업화와 도시화로 인한 고도의 물질문명 발달과 국민생활의 향상은 각종 폐기물의 발생량을 증가시켰으며 그 처리에 대한 문제들을 던져주었다. 현재 우리 나라의 경우 폐기물의 약 89.2%가 여전히 매립에 의하여 처리되고 있고 과거에 운영되어 왔던 폐기물 매립지가 포화되어가고 있는 실정이다(이남훈과 윤석표, 1994; 김원영 등, 1994) 폐기물 매립지의 부지 선정과 위생 매립지(sanitary landfill)의 설계, 시공 및 관리의 중요 관심사항이 되었다. 또한 현재까지 우리 나라의 매립

지는 1,000평 이하의 소규모로 난순투기(open dump) 방식으로 이루어졌으며 매립 종료 후 대부분 관리되지 않은 채 방치되고 있어 지하수 및 지표수와 주변 토양오염 문제를 심각히 야기하므로 그 처분 방안은 더욱 중요한 관심사가 되고 있다. 한편, 폐기물 매립지는 대표적인 지하수계의 오염원으로서 날로 증가해 가고 있는 지하수 사용 현황에 비추어볼 때 지하수 오염 방지의 주 연구 대상이 되고 있다.

국외에서는 이미 70년대 초반부터 매립지 주변의 지하수 오염에 대한 수리지질학적·수리지구화학적 연구가 시작되었고 미국, 프랑스, 캐나다, 독일, 덴마크 등을 중심으로 70년대 후반과 80년대에 걸쳐 활발히 연구되어 왔으며, 국내에서는 최근 들어 대표적인 불량매립지인 난지도 매립지가 좋은 입지조건과 높은 토지 재활용 가치로 말미암아 주 연구 대상이 되었고 최근

\*서울대학교 자원공학과(Department of Mineral & Petroleum Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

부실 시공으로 문제가 되고 있는 김포 매립지 또한 주 연구 대상이 되고 있다. 매립지 주변의 지하수의 유동과 오염물질의 이동에 대한 연구, 주변 지하수 오염과 안정화 대책에 대한 연구가 앞서 진행되었으며(한서엔지니어링, 1994; 장연수 등, 1993; 장연수와 이광열, 1994; 최세영 등, 1992; 한 찬, 1994; 김경웅과 손호웅, 1994) 매립지나 지하수계의 점오염원에서 발생하는 오염물질의 탐지 방법과 지하수 오염수준 규명에 대한 연구 또한 활발히 진행되어 온 것이 주지의 사실이다(이철효, 1994; 이기화와 김형수, 1994; 이상규 등, 1995; 이상훈, 1995; 정상용, 1995). 또한 대부분의 식수와 생활용수를 지하수에 의존하고 있는 제주도에도 대한 지하수 오염연구가 활발히 진행되어 왔으며(김천수, 1992; 최순학, 1993; 한정상 등, 1994) 최근 들어서는 지구통계학적 접근으로의 수리지질학적 연구도 진행되고 있는 상황이다(이강근, 1994).

이 연구에서는 과거 불량 매립된 매립지 주변의 지하수 오염수준과 각 오염물질들의 이동 특성을 파악하고 최적의 오염지시인자를 산출하여 매립이 종료되었거나 매립이 진행중인 매립지 주변의 지하수 오염을 효과적으로 감시(monitoring)하고 오염물질의 거동을 예측하는데 도움을 주고자 한다.

### 연구대상지역

난지도 매립지는 서울시 마포구 상암동에 위치하고 있으며 북서쪽으로 경기도 고양군과 남서쪽으로 한강 고수부지와 맞닿아 있다. 난지도 매립지는 우리나라의 600여개의 매립지중 가장 대표적인 불량매립지로서 침출수의 차집시설 및 대수층으로의 유입을 막는 차수벽 시스템이 전혀 갖추고 있지 않다. 앞서 진행된 연구에 따르면 난지도 매립지에서 생성되어 대수층으로 유입된 침출수는 난지도 매립지를 중심으로 방사성으로 이동되어 남서쪽의 한강과 북동쪽의 샛강으로 유입되어 주변 지표수를 오염시키는 주 원인이 되고 있다(한서엔지니어링, 1994; 장연수와 이광열, 1994). 난지도 매립지의 지질은 하부로부터 변성암 복합체, 흑운모화강암, 관입된 암맥, 충적층, 폐기물과 복토재의 혼합층 등으로 구성되어 있으며 매립된 폐기물은 연탄재, 각종 플라스틱류, 비닐류, 유리편, 파손 벽돌 및 건설 폐자재, sludge, 실트질 모래와 전석의 혼합 등 대부분 일반폐기물이고 일부 산업 폐기물과 건설폐기물이 매립되어 있다. 난지도 매립지는 매립 용량의 한계로 말미암아 1978년부터 시작한 매립이 1992년 10월말로 폐쇄되고 수도권외의 폐기물은 김포 매립지에 매립하게 되었으며 폐쇄 이후 난지도 매립지는 환경오염방지과 매립지 안정화, 식물연구, 그리고 좋은 입지 조건으로 말미암은 용지 개발 등의 많은 연구 과제들을 던져 주고 있다. 난지도 매립지는 두개의 작은 동산 형태를 띠고 있으며 약 1억톤의 폐기물이 매립되어 있다고 추정된다(이철효, 1994).

화성 매립지는 경기도 화성군 우정면 주곡리에 위치하며 수도권에서 발생하는 특정유해산업폐기물을 적정하게 안정 처리한 후 생성되는 최종고형폐기물을 매립하는 대표적인 위생매립지이다. 1987년 10월부터 1991년 6월까지 1차 매립이 실시되어 총 62,063 ton이 매립되었으며 현재 2차 매립이 진행중이다. 화성 매립지에 매립되는 최종 폐기물은 sludge, 소각재 및

시멘트 고형화물이 대표적이다. 화성 매립지의 제1매립장은 높이가 8 m, 바닥면적 4,400 m<sup>2</sup>, 상단표면적 7,900 m<sup>2</sup>이며 총 62,063 ton의 폐기물 매립과 더불어 18,612 ton의 복토가 실시되었다(박정구, 1991). 지질은 하부로부터 흑운모 편마암과 편암의 변성암 복합체, 충적층, 해성 점토로 이루어져 있으며, PVC 유공관과 잡석을 하부에 설치한 침출수의 차집시설, 30 cm 두께의 점토-bentonite cap liner, 약 1.5 m 두께의 점토와 바닥 및 법면에 HDPE(High Density Polyethylene) 차수벽이 설치되어 있다(한서엔지니어링, 1993).

이 연구에서는 일반폐기물 매립지이며 불량매립지인 난지도 매립지를 연구 대상으로 설정하여 매립지 주변의 오염 수준과 오염물질들의 거동을 파악하였으며 침출수 비교대상지역으로 산업폐기물 매립지이며 위생매립지인 화성 매립지를 설정하였고 침출수의 정량적인 분석과 비교를 위하여 김포 매립지의 침출수를 채취 분석하였다.

### 시료채취 및 처리

난지도 매립지 주변의 지하수 오염을 파악하기 위하여 건기인 3월말과 우기인 8월초 등 2회에 걸쳐 침출수, 지하수, 지표수 등 총 30개 시료를 채취하였으며 관측정에서는 bailer를 이용하여 purging한 후 시료를 채취하였다. 1차 시료채취에서는 매립지 측면으로 용출되는 침출수 3개 시료(L)를 채취하였으며 매립지 상부의 5개 관측정 중 일부가 건기인 관계로 채취가 제한되어 시료 채취가 가능한 관측정에서 침출수(W-1)를 채취하였다. 앞선 연구에서 난지도 매립지의 침출수 산출특성에 따라 응축 침출수, 부유 침출수, 침출수 용천, 기저침출수 등으로 구분했는데(한서엔지니어링, 1994) 이에 따르면 L-1, L-2, L-3은 침출수 용천이며 W-1은 부유/응축 침출수로 판단된다. 지하수의 경우 앞서 연구된 유선망분석을 바탕으로 오염되지 않았다고 판단되는 지하수 2개 시료(UP), 매립지 측면 하부의 지하수와 침출수가 섞여 오염되어 있는 지하수 7개 시료(BM, PT-1, W-2)를 채취하였다. 또한 침출수 유동 방향을 고려하여 한강의 지표수 3개 시료(HR), 샛강의 지표수 1개 시료(SR)를 채취하였다. 우기의 2차 시료채취에서는 삼풍백화점 붕괴 잔해가 난지도 매립지에 가매립되어 있는 관계로 시료 채취가 제한되어 침출수 2개 시료(L-1, L-3), 지하수 8개 시료(UP, BM, PT-1), 샛강의 지표수 3개 시료(SR, SR-1, SR-2)를 채취하였다(Figure 1).

침출수 비교 대상 지역인 화성 매립지에서는 침출수 차집시설을 이용하여 2개 시료(HSL), 오염되지 않은 지하수 1개 시료(HSUC-1)와 매립지 주변에 설치된 관측정에서 2개 시료(HSB, HSE), 그리고 차집된 침출수를 처리하여 방류하는 처리수(HSTR) 등 건기와 우기에 걸쳐 총 11개 시료를 채취하였다(Figure 2). 김포 매립지에서는 건기인 1차 채취 때 침출수 1개 시료(KPL)를 채취하였다.

채취된 시료는 현장에서 pH, Eh, 전기전도도(electric conductivity), 온도를 Orion사의 SA720 pH meter와 Orion사의 conductivity-TDS meter model 124를 이용하여 측정하였으며 이온분석을 위하여 0.45 μm membrane filter로 부유물질을 제거하고 특히 양이온 분석을 위한 시료는 농질산을 이용하여 pH 2

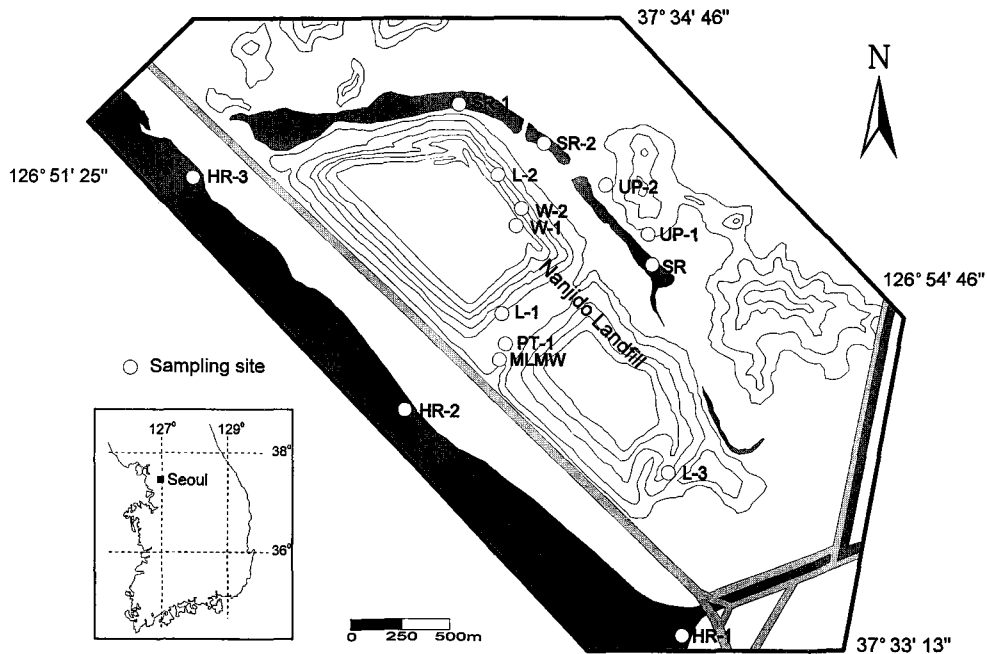


Figure 1. Water sampling location map in the vicinity of the Nanjido landfill site.

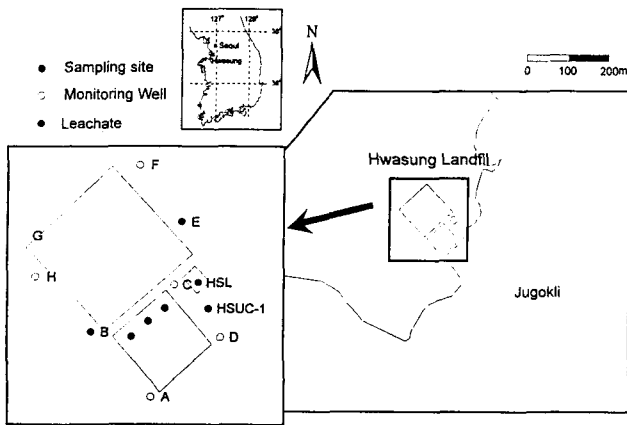


Figure 2. Water sampling location map in the vicinity of the Hwasung Landfill site.

이하 처리한 후 냉장 보관하였다(Barcelona et al., 1985; Parr et al, 1992). Shimadzu사의 ICPQ-1000를 이용하여 Al, B, Ba, Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, Si, Sr을, Perkin-Elmer사의 AAS 3100을 이용하여 Cd, Co, Cr, K, Li, Na, Ni, Pb, Zn 등의 양이온을 분석하였다. 그리고 Dionex사의 IC(Ion Chromatography) model 4550i를 이용하여 Br, Cl, F, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, SO<sub>4</sub> 등의 음이온을 분석하였고 페놀프탈레인 용액과 메틸레드-브롬크레졸그린 혼합용액을 이용한 적정법(titration method)으로 HCO<sub>3</sub>를 분석하였으며 TOC(Total Organic Carbon)는 Shimadzu사의 TOC-5000으로 분석하였다

### 침출수 및 지하수의 물리화학적 특성

1차 및 2차의 현장 측정을 통한 침출수와 지하수의 물리적

성질은 Table 1과 같다. 1,2차 현장측정결과 침출수의 경우 앞선 연구와 같이 일치하게 pH는 7 이상의 중성 및 약알칼리를 보이고 있으며(Baedecker and Cozzarelli, 1992; Ehrig, 1989) 산업폐기물 침출수인 화성 매립지의 침출수가 일반폐기물 침출수인 난지도 매립지나 김포 매립지의 침출수보다 낮은 pH 값을 보이고 있다. 이는 일반폐기물에서 보다 활발히 진행되는 생분해에서 발생하는 HCO<sub>3</sub>에서 기인하는 것이다. 대부분의 지하수 시료는 pH 6-8의 범위를 보이며 침출수의 성분들이 희석되어 전기전도도가 낮아질수록 pH가 낮아지는 경향을 보인다. Eh의 경우 1차 현장 측정에서 대부분의 시료에서 음의 값을 보여 환원환경이었음을 관찰할 수 있었으며 특히 침출수는 -100 mV, 난지도 매립지의 오염된 지하수 또한 -50 mV 전후의 환원환경을 나타낸다. 이런 사실은 매립지는 폐기물이 생분해에 필요한 혐기환경을 이루게 된다는 문헌상의 결과와 일치한다(Christensen et al., 1989). 난지도 매립지 주변의 지표수 또한 음의 값의 환원환경을 나타내는데 이는 침출수의 유입과 부유생물이나 하저생물의 신진대사에서 기인되었다고 판단된다. 2차 현장 측정에서는 대부분의 Eh가 1차 현장 측정 때보다 상승되었으나 역시 침출수와 오염된 지하수에서는 음의 값 전후의 환원 환경을 특징적으로 보였다. 화성 매립지 침출수의 경우 2차 현장 측정에서는 100 mV의 약 산화환경을 보이는데 이는 침출수 저장시설에 장기간 보관되었기 때문이다 (Table 1, Figure 3).

온도는 침출수와 오염된 지하수를 나타내는 중요한 특성이며 일반폐기물 매립지의 경우 평균 45-50°C의 온도 특성을 보인다고 한다(이철효, 1994). 매립된 폐기물의 생분해 과정은 발열반응으로서 생분해가 진행됨에 따라 침출수의 온도는 상승되고, 이러한 침출수가 대수층내 지하수로 유입됨으로 말미암아 지하수의 온도를 상승시키게 되는 것이다. 난지도 매립지

**Table 1.** Physical properties of leachates and groundwaters sampled in the vicinity of studied landfill sites

Landfill	Sampling site	pH	Eh(mV)	Conductivity( $\mu$ S/cm)	Temp.( $^{\circ}$ C)	Head(m)	Characteristic
Nanjido	UP-1	6.38	-32.2	396	16.9	*	uncontaminated groundwater
	UP-2	6.54	42.9	455	10.6	*	
	L-1	8.16	-97.8	17260	37.1	*	leachate
	L-2	8.21	-119.4	28600	31.7	*	
	L-3	8.40	-106.4	15640	11.2	*	
	W-1	8.45	-72.8	32800	39.0	-15.96	
	W-2	6.48	-7.6	1092	25.2	-19.25	
	BM-1	6.92	38.3	2820	19.5	-16.19	
	BM-2	7.24	-49.5	8050	20.4	-14.71	
	BM-3	7.22	-71.0	8580	21.6	-15.33	leachate + groundwater
	BM-4	7.19	-54.6	8620	21.1	-16.00	
	BM-5	7.27	28.3	7300	20.5	-16.18	
	PT-1	7.15	-46.9	12120	23.3	-17.90	
	HR-1	8.20	-83.8	314	11.7	*	contaminated surface water
	HR-2	7.27	-85.1	309	12.1	*	
HR-3	7.61	-97.7	312	11.8	*		
SR	7.65	2.3	657	9.2	*		
Kimpo	KPL	7.61	-129.3	19630	17.0	*	leachate
Hwasung	HSUC-1	7.19	-118.4	265	13.2	*	uncontaminated groundwater
	HSL-1	7.02	-118.9	25800	17.7	*	leachate
	HSL-2	7.02	-118.9	25800	17.7	*	
	HSE	6.68	-130.2	6030	9.1	*	groundwater in monitoring well
	HSB	8.32	-81.9	767	9.8	*	
	HSTR	6.87	-133.0	4820	22.8	*	treated leachate

Nanjido landfill : 1995. 3. 31

Kimpo landfill : 1995. 4. 4

Hwasung landfill : 1995. 4. 7

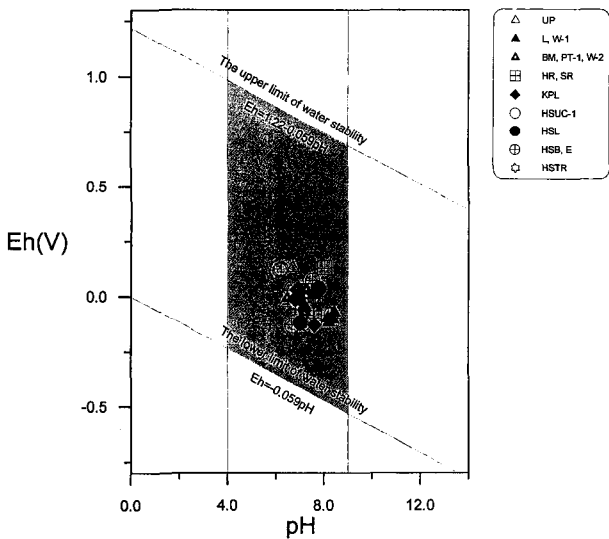
**Table 1.** continued

Landfill	Sampling site	pH	Eh(mV)	Conductivity( $\mu$ S/cm)	Temp.( $^{\circ}$ C)	Characteristic
Nanjido	UP-1	6.29	127.8	402	21.1	uncontaminated groundwater
	UP-2	6.71	129.1	448	22.6	
	L-1	7.58	20.4	14650	40.1	leachate
	L-3	7.63	7.4	22900	29.1	
	BM-1	6.86	29.9	4420	28.8	leachate + groundwater
	BM-2	6.83	-16.1	7550	27.2	
	BM-3	6.88	-6.3	7850	27.7	
	BM-4	6.98	-8.9	8180	25.6	
	BM-5	6.77	-12.0	6550	25.0	
	PT-1	6.94	37.5	8300	26.5	
	SR-1	7.19	27.5	865	30.0	contaminated surface water
	SR-2	7.06	23.8	1210	31.6	
	SR	8.03	130.4	531	31.1	
	Hwasung	HSUC-1	6.16	119.9	451	16.8
HSL-1		7.79	36.9	17150	28	leachate
HSL-2		7.79	36.9	17150	28	
HSB		6.22	125.4	1277	21.4	groundwater in monitoring well
HSE		7.54	73.2	4380	22.9	

Nanjido landfill : 1995. 7. 26

Hwasung landfill : 1995. 8. 7

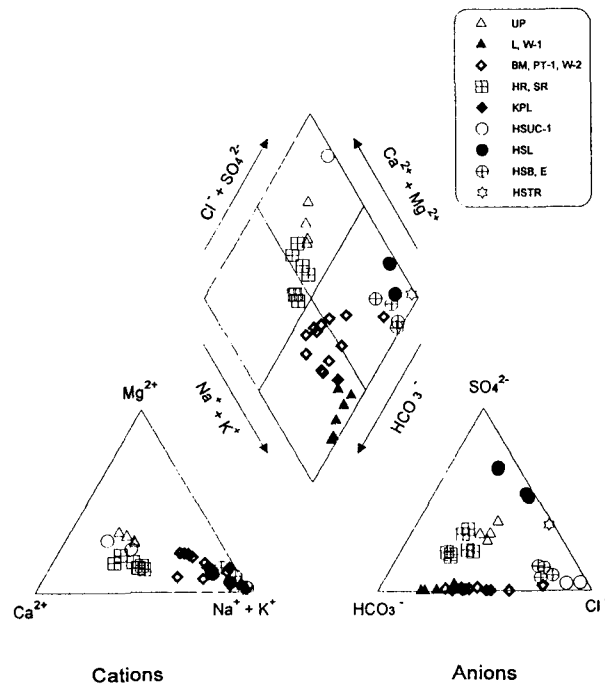
의 침출수의 경우, 용출되어 오랜 시간이 지난 L-3을 제외하고는 31.7-39.0°C(1차), 40.1°C(2차)의 높은 온도를 특징적으로 나타낸다(Table 1). 오염된 지하수도 19.5-25.2°C(1차), 25.0-28.8°C(2차)의 상대적으로 높은 온도를 보였으며, 이에 반하여 오염되지 않은 지하수나 지표수의 경우 측정 당시의 상온과 비슷한 온도를 보이기 때문에 온도는 매립지 침출수에 의한 지하수 오염을 직접적으로 보여주는 좋은 물리적 특성이다. 또한 침출수와 침출수에 의해 오염된 지하수의 중요한 특징은 전기전도도이다. 전기전도도는 지하수에 용해되어 있는 전해질의 양과 비례하며 중요한 오염지시인자인 TDS와 선형비례관계에 있다고 알려져 있는데 일반적으로 오염되지 않은 경우에는 TDS(ppm)는 전기전도도( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )와 약 0.7의 기울기를 갖고 있으며(Freeze and Cherry, 1979), 오염된 지하수나 침출수의 경우에는 약 0.4의 기울기를 보인다(이철효, 1994). 침출수의 경우 용해된 전해질 이외에 유기물질과의 착화합물 형성, 부유상태의 오염물질들의 존재 등 다양한 원인으로 전기전도도를 증가시키기 때문에 온도와 더불어 중요한 오염지시인자이다. 1차 현장측정의 경우 침출수는 17,260-32,800( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )의 높은 전기전도도를 보였고 오염된 지하수에서는 1,092-8,620( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )로서 침출수보다는 낮아졌지만 여전히 매우 높은 값을 보인다(Table 1). 오염된 지표수(셋강)의 경우 657( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )의 값을 보이며 이는 오염되지 않은 배경 지하수의 396-455( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )보다 높은 전기전도도를 보임으로써 난지도 매립지의 침출수의 유입과 주변 가정용 폐수의 직접적인 영향이 있다고 판단된다. 2차 현장측정 또한 1차와 비슷한 경향을 보이며 오염된 지표수(셋강)의 경우 531-1,210( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )의 높은 전기전도도를 보임으로써 셋강쪽 지표수의 오염이 심화되고 있음을 알려준다. 화성 매립지와 김포 매립지의 침출수의 경우도 각각 25,800, 19,630( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )의 높은 전기전도도를 가지며 침출수의 일반적인 특징을 잘 보여준다.



**Figure 3.** Eh-pH relationship between leachates and groundwaters sampled in the vicinity of landfill sites (Shaded area represents the limit of pH-Eh in surficial environments).

### 일반폐기물 매립지와 산업 폐기물 매립지의 침출수 특성 비교

매립지의 침출수는 매립된 폐기물에 직접적인 영향을 받으므로 일반폐기물 매립지의 침출수와 산업폐기물 매립지의 침출수는 성분에서 차이가 생긴다. 일반폐기물 매립지인 난지도 매립지의 침출수, 김포 매립지의 침출수와 산업폐기물 매립지인 화성 매립지 침출수들의 분석결과중 주성분 이온들을 당량비로 환산하여 Piper diagram에 도시하였다(Figure 4). 두 침출수 모두 양이온은 Na, K이 우세하며 음이온은 일반폐기물 매립지 침출수의 경우  $\text{HCO}_3^-$ 가, 산업폐기물 매립지 침출수의 경우  $\text{SO}_4^{2-}$ 가 우세한 특징을 보이며 잘 구분된다. 이는 산업폐기물 매립지에서 실시되는 고형화 안정처리에서 기인한  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 부화, 일반폐기물 매립지에서 보다 활발히 일어나는 생분해 과정과  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 환원에서 기인한다. 또한 분석결과를 종합한 Table 2를 보면 Ca, Mg, Na, Sr, Br 등은 산업폐기물 침출수에서 높은 함량을 보이는데 고형화 처리과정에서 기인하거나 화성 매립지의 입지조건상 해수의 영향을 받았기 때문이며, K, Cl는 두 침출수 모두 비슷한 함량을 보인다. TOC와  $\text{HCO}_3^-$ 는 두 침출수 모두 부화되어 있으나 일반폐기물 매립지에서 보다 높은 함량을 보이는데 이는 일반폐기물 매립지가 유기물질의 함량이 상대적으로 높고 생분해가 활발히 일어나기 때문이다. 또한 건설폐기물이 일부 매립된 난지도 매립지 침출수에서 Fe의 함량이 높고 특정유해폐기물이 매립된 화성 매립지에서는 Ni, Cu, Pb, Co, Cd 등의 중금속 원소들이 상대적으로 높은 함량을 보이는데 이 또한 매립된 폐기물의 특성을 직접적으로 반영하는 것이다.



**Figure 4.** Chemical analyses of studied leachates and groundwaters represented as percentages of total equivalents per liter on the Piper diagram.

오염물질별 수평적 거동

앞서 연구된 유선망분석을 채택하여 난지도 매립지의 침출수

**Table 2.** TOC and ion concentration of leachates in MSW landfill site and IW waste landfill site (unit : mg/l)

Landfill season	Municipal solid waste (MSW)		Industrial waste (IW)	
	spring	summer	spring	summer
Ca	15.6-102.3	40.6-77.9	405.409.9	471.1-475.1
Mg	39.7-285.9	40.2-47.0	192.6-194.4	219.8
Na	1760-2910	890-1665	5780-5920	3085-3200
K	1059-1555	470-870	855-877	358-375
Mn	n.d.-2.43	0.02-0.11	14.4	3.03-4.14
Fe	0.56-4.50	1.53-2.81	0.06	0.07
Li	0.55-14.5	0.77-9.9	0.48	0.16
Ba	0.13-0.41	0.16-0.82	0.04	0.08
Sr	0.14-0.86	0.37-0.40	1.54	1.59
Si	8.79-16.33	15.75-19.10	13.36	6.43
Al	0.79-5.37	3.43-6.40	10.25	15.14
B	1.71-2.80	2.12-3.27	4.57	6.13
Cd	n.d.-0.02	n.d.	0.04	0.06
Co	0.07-0.11	n.d.-0.05	1.15	0.37
Cr	n.d.-2.18	n.d.-0.38	0.31	0.06
Cu	n.d.-0.03	n.d.	0.21	2.53-3.39
Ni	0.23-0.45	n.d.	23-28	8.8-11.0
Pb	n.d.	n.d.-0.22	0.27-0.38	0.38-0.45
Zn	0.12-4.48	0.08	3.54	0.16-0.19
Cl	1474-2821	1801-3102	1978-2202	2904-3112
SO <sub>4</sub>	3.2-130.1	42.1-225.7	7630-8814	4716-4839
HCO <sub>3</sub>	6715-13058	5695-7526	1485-1545	44.5
NO <sub>3</sub>	1.3-271.0	1.6-2.4	25.3-27.4	46.4-50.5
NO <sub>2</sub>	n.d.-73.9	n.d.	n.d.	n.d.
F	3.75-10.98	8.91-16.21	6.65-8.26	12.34-12.91
Br	9.49-2347	7.21-10.94	44.8-52.9	26.9-28.7
PO <sub>4</sub>	0.84-16.49	n.d.	n.d.	n.d.
TOC	206-777	*	173	*

MSW : Nanjido, Kimpo landfill leachates

IW : Hwasung landfill leachate

가 '침출수 → 침출수 + 지하수 → 오염된 지표수'로 이동된다고 가정하고 오염되지 않은 지하수를 배경 수질로 하여 오염물질별 거동을 해석하였다. Piper diagram에 주성분 이온들의 당량비를 도시해본 결과 매립지내의 침출수는 회석작용과 지연작용으로 말미암아 매립지에서 이동될수록 Na, K, HCO<sub>3</sub>의 함량비가 감소되고 Ca, Mg의 함량비가 증가하며 특히 일반폐기물 매립지인 난지도 매립지의 경우에는 SO<sub>4</sub>의 함량비가 오염되지 않은 지하수로 진화할수록 증가하는 특징을 보여준다(Figure 4). Na, K의 경우 침출수가 이동될수록 함량이 감소하며, Ca, Mg의 경우 침출수가 이동함에 따라 증가하는 경향을 보이다가 감소한다. 이는 Dance와 Reardon(1983)이 Na, K, Ca, Mg 등 4개 원소로 현장 tracer test를 실시하여 지연 정도의 순서가 K>Mg>Na·Ca로 나타나며 Ca-halo가 형성된다는 연구 결과와 일치하며, Ca, Mg이 착화합물을 형성하여 지질매체와의 반응을 통한 지연작용이 감소되었기 때문이다(Nicholson *et al.*, 1983; Figure 5). Ca과 Sr, K과 Li은 침출수가 이동함에 따라 비슷한 거동 양상을 보이는데 이는 지구화학적 수반관계에서 기인한다. Fe, Mn은 매립지의 환원 상태에서 황환원대에서 침전하거나 Fe-Mn 환원대를 형성하여 생분해를 촉진하는 것으로 알려져 있는데, 난지도 매립지의 경우 Fe는 매립지에서 멀어질수록 그 농도가 감소하여 지표수에서는 거의 발견되지 않는 것으로 보아 대부분 환원되어 2가의 양이온으로 존재하며, Mn은 오염된 지표수인 샛강이 오히려 부화된 것으로 나타나 샛강의 Mn은 매립지 침출수뿐만 아니라 주변의 생활 폐수의 영향 또한 받은 것으로 판단된다. 또한 전자를 띠지 않고 지하수에 존재하는 B, Al, Si의 경우도 침출수와 오염된 지하수에서 높은 함량을 나타내는데, B의 경우는 침출수가 매립지에서 이동될수록 점차적으로 감소하는 경향을 뚜렷이 보이거나 Al, Si의 경우에는 지질매체의 주성분 원소이기 때문에 그 감소 경향이 대수층으로 유입된 침출수+지하수 단계에서는 뚜렷이 발견되지 못했으며 오염된 지표수인 샛강의 경우 오히려 배경 수질보다 낮은 함량을 나타냈다(Figure 5).

음이온의 경우 생분해에 의해 형성된 HCO<sub>3</sub>와 염의 용해에

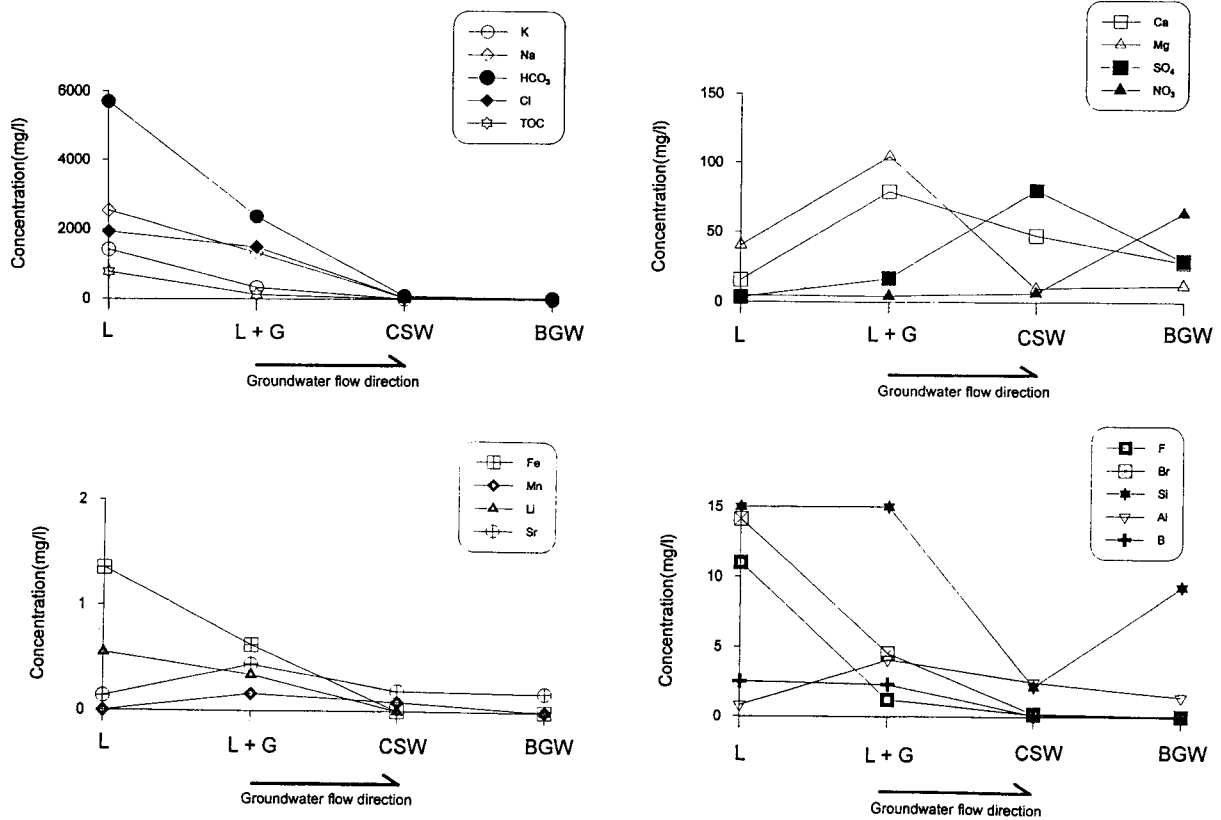
**Table 3.** TOC and heavy metal concentrations of leachates and water samples in the Nanjido landfill site (unit : mg/l)

Constituent season	TOC		Cd		Co		Cr	
	spring	summer	spring	summer	spring	summer	spring	summer
Leachate	388-777	*	n.d.-0.02	n.d.	0.07-0.11	n.d.-0.05	n.d.-2.18	n.d.-0.38
Leachate + groundwater	12-172	*	n.d.-0.01	n.d.-0.02	n.d.	n.d.-0.11	n.d.-0.28	0.04-0.10
Contaminated surfacewater	8.1	*	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.-0.05
Uncontaminated groundwater	n.d.-1.2	*	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.-0.05
Constituent season	Cu		Ni		Pb		Zn	
	spring	summer	spring	summer	spring	summer	spring	summer
Leachate	n.d.-0.03	n.d.	0.23-0.38	n.d.	n.d.	n.d.-0.22	0.12-4.48	0.06
Leachate + groundwater	n.d.	n.d.	0.09-0.21	n.d.	n.d.	n.d.-0.26	0.97-12	0.12-1.38
Contaminated surfacewater	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.-0.28	0.08	n.d.-0.06
Uncontaminated groundwater	n.d.-tr.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.-0.23	0.08-0.13	n.d.-0.31

n.d. : not detected

\* : not analyzed

tr. : trace



**Figure 5.** Horizontal variations of TOC and ion concentrations at the Nanjido landfill site (data from 1st analysis except HCO<sub>3</sub>). (L : Leachate(W-1), L+G : Leachate+Groundwater(PT-1), CSW : Contaminated Surface Water(SR), BGW : Background Groundwater(UP-1))

의해 형성된 Cl가 침출수 성분의 대부분을 차지하는데, Cl는 비반응 물질이므로 침출수가 이동할수록 회석에 의한 지연이 일어나며 앞서 연구된 자료와 거의 일치하였다(최세영 등, 1992; 한서엔지니어링, 1994). HCO<sub>3</sub>의 경우 Cl의 농도 감소보다 현저히 감소하여 회석작용 이외의 지연작용이 예상되는데 WATEQ4F 분석 결과 침전작용에 의한 지연작용이라고 생각된다. 산화환원전위의 영향을 받는 SO<sub>4</sub>는 일부 용출되어 산화된 침출수를 제외하면 매립지 주변에서 멀어질수록 증가되는 경향을 보임으로써 매립지 주변에 황환원대가 존재하고 있다고 판단되며, NO<sub>3</sub>는 매립지의 환원환경으로 말미암아 침출수에서 침출수 + 지하수 단계로 이동될수록 감소되다가 지표환경으로 이동되면서 NH<sub>4</sub>의 산화에 의하여 함량이 증가되는 것이 관찰되는데 이는 매립지 주변에 NO<sub>3</sub>환원대가 존재하고 있다는 증거이다. 또한 F, Br는 농도는 Cl보다 낮지만 그 변화의 경향이 거의 일치하였다(Figure 5).

침출수에서 중금속 원소들의 함량은 Zn가 가장 높으며 Cr, Ni, Cd의 함량이 일부 침출수 시료에서 발견된다. 침출수에 용해되어 있는 대부분의 중금속은 매립지 주변에 형성된 황환원대에서 황화합물로 침전되거나 Fe-Mn환원대에서 침전되거나 지질매체의 흡착에 의하여 지연되는 것으로 사료되며 오염된 지표수인 냇강에서는 대부분의 중금속이 검출되지 않았다. TOC는 COD와 함께 유기오염물질의 거동을 대표할 수 있는 성분으로서 침출수에서 388-777(mg/l)의 높은 함량을 보이다

가 침출수+지하수 단계에서 12.1-172.4(mg/l)로 급격히 감소하는 경향을 보이는 것으로 보아 매립지와 매립지 하부의 대수층에서 대부분의 생분해가 일어나 유기물질의 지연이 일어나는 것으로 판단된다(Table 3, Figure 5).

### 오염물질별 수직적 거동

MLMW(Multi-Level Monitoring Well)에서 심도별로 채취된 오염된 지하수의 수직적인 변화양상을 알아보기 위하여 MLMW 상부에서 용출되는 침출수(L-2)가 MLMW까지의 농도변화가 없다고 가정하고 각 주요 성분들을 수직적으로 도시해보았다(Figure 6). Na, K은 비반응물질인 Cl 보다 -17.5 m 상부에서 급격히 감소하는 것으로 보아 지질매체로의 흡착에 의해서 상부에서 감소된 후 하부로 갈수록 그 지연이 Cl와 같이 회석에 의해서 이루어짐이 관찰되며 BM-4(-22.0 m)에서 BM-2(-34.5 m) 부근에 오염운이 형성되어 있었다. Ca, Mg은 침출수에서보다 BM-4, BM-3(-28.5 m)에서 오히려 증가되고 있는데 이는 착화합물의 형성을 통한 지연작용의 감소와 지질매체와의 이온교환작용을 통한 용해의 결과로 생각되며 Na, K과 마찬가지로 BM-4에서 BM-2 부근에 오염운이 형성되어 있었다. TOC, HCO<sub>3</sub>는 BM-5(-17.5 m)전에 급격히 감소하는 것으로 보아 유기물의 생분해와 침전작용이 -17.5 m 상부에서 활발히 진행되고 있었으며, 역시 BM-4에서 BM-2 부근에 오염운이 형

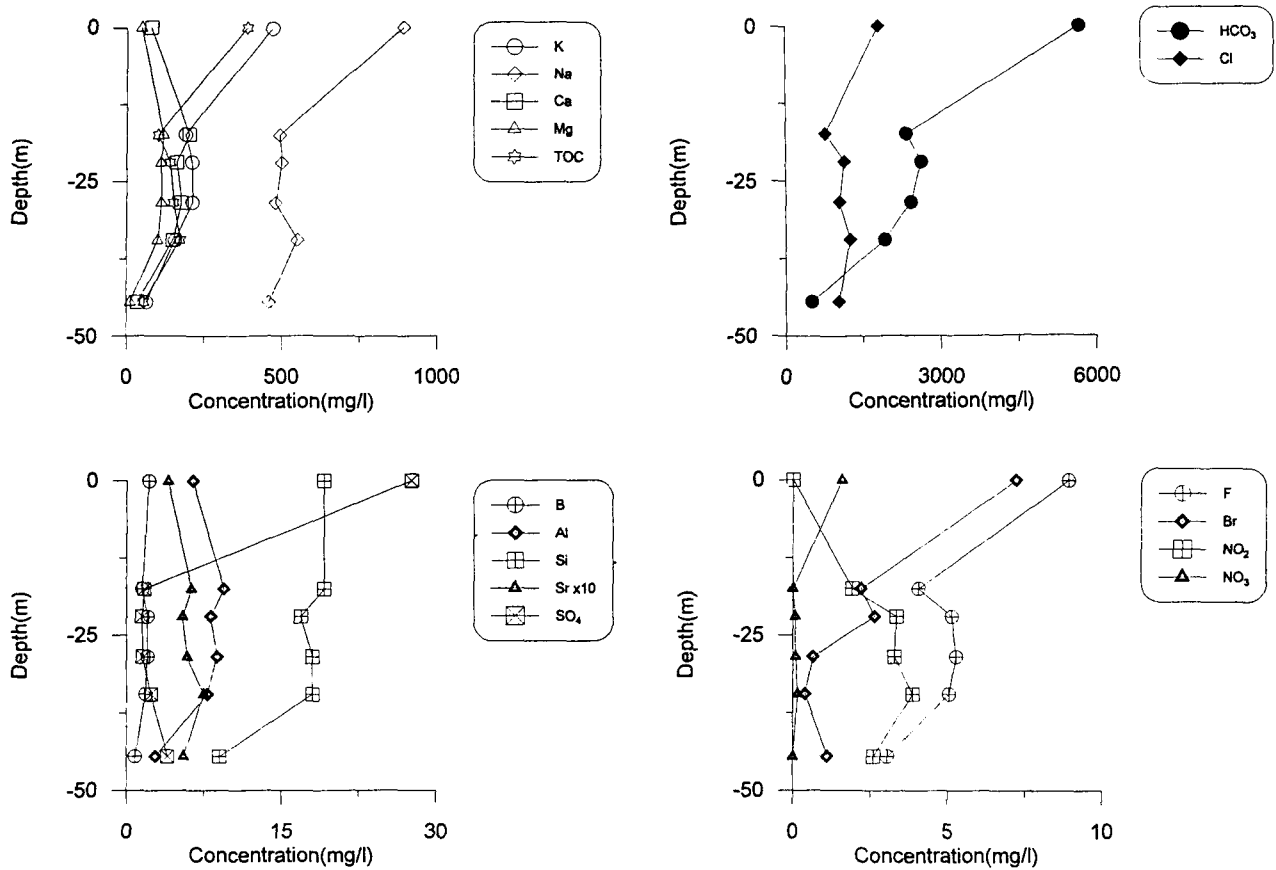


Figure 6. Vertical variations of TOC and ion concentrations in MLMW (Multi-Level Monitoring Well) at the nanjido landfill site (data from 2nd analysis except SO<sub>4</sub>).

성되어 있었다. B, Al, Si, F, Br도 주성분 양이온 원소들과 같이 BM-4와 BM-2 사이에 오염원이 형성되어 있었으며 Sr 또한 Ca과 같은 경향을 보인다.

NO<sub>2</sub>는 BM-5에서부터 하부로 갈수록 증가하고 NO<sub>3</sub>는 감소하는 것이 관찰되는데 이는 NO<sub>3</sub>의 환원에 의한 생분해가 촉진되는 NO<sub>3</sub>-환원대가 매립지 하부에 존재하기 때문이며, SO<sub>4</sub>의 경우 BM-5(-17.5 m)상부에서 급격히 감소하는 것으로 보아 NO<sub>3</sub>-환원대 상부에 황환원대가 형성되어 있다고 볼 수 있다.

### WATEQ4F 분석을 통한 무기물들의 존재형태와 포화지수(S.I.)

현장에서 측정한 물리적 특성과 실내 화학 분석된 값을 WATEQ4F에 입력하여 열역학적 평형을 가정한 상태에서 양이온들의 화학종을 예상하였다(Table 4). Ca, Mg은 난지도 매립지 침출수의 경우 HCO<sub>3</sub>와 착화합물을 주로 형성하며 오염되지 않은 지하수로 진화할수록 2가의 양이온으로 존재하는 비가 높아진다. 화성 매립지 침출수의 경우에는 2가의 양이온으로 존재하는 비가 난지도 매립지 침출수보다 높으며 주로 SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>와 착화합물을 형성한다. 이러한 양이온들의 착화합물 형성은 지질매체와의 반응이나 침전에 의한 희석작용 능력을 저

하시키는 주요한 원인이 된다(Yong et al.,1992). Na, K의 경우에는 착화합물을 형성하지 않고 1가의 양이온으로 대부분 존재하는데 지질매체와의 반응에 의한 지연이 2가의 양이온들보다 낮지만 흡착에 의한 지연이 일어날 확률이 침출수에서 상대적으로 높아질 것이다. B, Si, Al은 약산의 형태나 수산화물 형태로 전자가 없거나 음의 전자를 갖는다. 지질매체에 높은 함량을 보이지 않는 B의 경우 좋은 오염지시인자 역할을 할 수 있을 것이다. Fe, Mn의 경우도 대부분 2가의 양이온보다는 착화합물을 형성하고 있으며 중금속원소의 대표적인 예인 Zn는 침출수가 이동될수록 양이온의 함량비가 높아지는 것이 관찰됨으로써 중금속원소들의 흡착능력의 저하가 예상된다. 이와 같은 무기물들의 착화합물의 형성은 현장 수리분산실험의 중요성을 제기한다.

Nicholson 등(1983)이 제시했던 탄산염 화합물의 침전을 알아보기 위하여 WATEQ4F를 통하여 탄산염 화합물중 반응이 빨리 진행되는 calcite(CaCO<sub>3</sub>)의 포화지수(S.I. : Saturation Index) 변화를 살펴보았다. WATEQ4F로 예측된 포화지수는 침출수(W-1) : 1.477, 침출수 + 지하수(PT-1) : 0.734, 오염된 지표수(SR) : -0.233, 배경 지하수(UP-1) : -2.024 등으로 나타나 매립지에서의 Ca의 공급과 생분해에 의한 CO<sub>3</sub>의 공급이 계속되면서 높은 pH값이 유지된다면 매립지 하부에서는 탄산염 형태의 침전에 의한 지연이 일어날 것이다.



Table 4. Percentage of ion species to the total concentration calculated by WATEQ4F

Element	Species	Leachate (IW) (HSL-1)	Leachate (MSW) (W-1)	Leachate + groundwater (PT-1)	Contaminated surfacewater (SR)	Uncontaminated groundwater (UP-1)
Ca	Ca <sup>2+</sup>	56.23	29.50	75.25	92.58	96.64
	CaHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	3.83	24.57	22.97	1.36	0.62
	CaCO <sub>3</sub>	0.14	45.49	1.47	0.26	0.00
	CaSO <sub>4</sub>	39.79	0.01	0.03	5.80	2.73
	others	0.01	0.43	0.01	0.00	0.01
Mg	Mg <sup>2+</sup>	53.18	38.13	76.07	92.92	96.54
	MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	4.02	28.83	22.58	1.69	0.64
	MgCO <sub>3</sub>	0.09	31.66	0.89	0.15	0.00
	MgSO <sub>4</sub>	42.64	0.03	0.36	5.22	2.80
	others	0.07	1.35	0.10	0.02	0.02
Na	Na <sup>+</sup>	93.27	88.23	97.87	99.66	99.87
	NaHCO <sub>3</sub>	0.55	4.63	2.05	0.11	0.03
	NaCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.00	7.12	0.05	0.00	0.00
	NaSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	6.17	0.01	0.03	0.23	0.10
	others	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
K	K <sup>+</sup>	92.58	99.99	99.97	99.73	99.88
	KSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	7.42	0.00	0.00	0.00	0.00
	others	0.00	0.01	0.03	0.27	0.12
B	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	99.24	77.65	98.98	98.04	99.87
	H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.76	22.35	1.02	1.96	0.13
Si	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	99.83	91.57	99.75	99.61	99.97
	H <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.17	8.43	0.25	0.39	0.03
Al	Al(OH) <sub>3</sub>	2.36	0.10	2.76	1.22	8.08
	Al(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup>	62.15	99.89	93.29	98.00	35.91
	others	35.49	0.01	3.95	0.78	56.01
Fe	Fe <sup>2+</sup>	44.45	4.56	27.58		
	FeHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	27.24	24.51	64.66		
	FeCO <sub>3</sub>	0.00	69.24	7.62	n.d.	n.d.
	FeSO <sub>4</sub>	26.39	0.00	0.09		
	others	1.92	1.69	0.05		
Mn	Mn <sup>2+</sup>	42.75		24.55	73.65	
	MnHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	23.34		51.31	10.48	
	MnCO <sub>3</sub>	5.95	n.d.	22.46	12.11	n.d.
	MnSO <sub>4</sub>	25.23		0.08	3.46	
	others	2.73		1.60	0.30	
Zn	Zn <sup>2+</sup>	28.11	0.00	9.60	56.90	89.39
	ZnHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	21.68	0.01	28.34	11.44	6.50
	ZnCO <sub>3</sub>	9.84	0.60	22.06	23.51	0.90
	Zn(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> <sup>2-</sup>	4.95	99.39	39.43	2.12	0.00
	ZnSO <sub>4</sub>	23.82	0.00	0.04	4.26	2.98
	others	11.60	0.00	0.53	1.77	0.23

n.d. : not detected

### 오염지시인자와 오염기준에의 접근

Kerndorff(1992)에 의해 제시된 Contaminaion Factor를 주변 오염되지 않은 지하수를 배경값으로하여 각 성분들에 대하여 계산하였다(Table 5). Contamination Factor는 오염된 물의 원소 함량값을 오염되지 않은 주변 배경값으로 나뉜 것으로 1보다 클 경우 지질매체와의 반응이 아닌 특정 오염원에 의해

오염된 것을 의미한다. Contamination Factor를 계산할 때 배경수질에서 함량값이 나타나지 않은 원소인 Cd, Pb, Co, Ni, Cu, 등은 제외시켰으며 이 원소들 또한 직접적으로 오염원에 의해 오염된 지하수를 나타내는 지시인자이다. 계산 결과 일반 폐기물 매립지인 난지도 매립지의 경우 K, Na, Ca, Mg, B, Zn, HCO<sub>3</sub>, Cl, F, Br, TOC 등이 매우 뚜렷한 대조를 보이고 산업 폐기물 매립지인 화성 매립지 경우에는 침출수를 대상으로 살

펴보면 K, Na, Ca, Mg, B, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, Cl, F, Br, TOC 등이 뚜렷한 대조를 보이고 있음으로써 오염지시인자로서의 좋은 조건을 갖추고 있다. 특히 화성매립지의 경우 주변 관측정인 HSE에서도 K, Na, Ca, Mg, B, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, Cl, F, Br 등이 높은 값을 보이지만 매립지 유기물의 유출을 직접적으로 반영하는 TOC가 나타나지 않았는데 이는 침출수의 유출이라기보다는 매립지 공사 중에 고립된 해수의 영향 때문이다. 결국 무기물들을 오염지시인자로 사용할 경우에는 해수의 영향을 고려하여야 하며 화성매립지와 같은 해변에 위치하는 매립지의 경우 TOC가 좋은 오염지시인자가 될 것이다.

그러므로 선행 연구에서 매립지 주변 관측정에서의 적정 감시 인자로 제시되었던 Cl, NH<sub>4</sub>, Mn, Na, Ca, COD, 전기전도도, TDS(Kjeldsen and Christensen, 1984) 등과 더불어 K, Mg, B, Zn, F, Br, TOC 또한 좋은 지시인자가 될 것이며, 오염지시인자는 매립지의 성격과 현장특성, 분석방법의 용이성과 경제성 등을 고려하여 결정되어야 한다.

또한, 인간의 건강에 직접적인 영향을 주는 주요 법적 규제 원소들을 음용수 기준(보건사회부령 제 871 호)에서 접근해보면 난지도 매립지에서는 침출수(L, W)와 오염된 지하수(BM)에서 Cl, F, Fe, Mn 등이 기준을 넘고 있으나, Cd, Cu, Zn, Pb 등

**Table 5.** Contamination Factor of inorganic contaminants and TOC

a) Nanjido Landfill (1995. 3. 31)

Sampling site	K	Na	Ca	Ma	Al	B	Sr	Zn	Si
W-2	15.9	3.5	1.6	0.6	1.6	3.0	0.9	15.2	0.4
BM-1	16.3	9.7	2.0	1.1	2.1	10.4	1.8	114.3	0.5
BM-2	100.6	34.5	4.6	7.1	3.2	41.3	4.1	9.9	1.5
BM-3	139.4	32.4	5.4	8.2	3.6	46.2	3.4	22.4	1.5
BM-4	135.9	33.8	5.1	8.0	3.4	44.6	3.3	9.2	1.4
BM-5	105.4	28.7	4.9	8.8	3.3	41.0	4.4	9.2	1.3
PT-1	138.5	48.0	2.6	8.4	2.6	67.0	2.5	25.8	1.7
HR-1	2.2	0.8	0.8	0.3	0.8	1.7	0.4	0.0	0.0
HR-2	2.1	0.9	0.8	0.3	0.8	0.8	0.4	0.0	0.0
HR-3	2.1	0.8	0.8	0.3	0.8	0.5	0.4	0.8	0.0
SR	7.1	1.6	1.5	0.8	1.6	2.9	1.1	0.8	0.2
	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	F	Br	PO <sub>4</sub>	NO <sub>2</sub>	TOC
W-2	5.3	0.1	2.5	0.1	5.0	12.3	0.5	0.0	10.3
BM-1	13.2	0.0	9.3	0.1	16.1	37.9	0.0	0.0	47.4
BM-2	34.3	0.0	36.5	0.1	17.5	75.0	0.0	0.0	147.4
BM-3	52.1	0.3	28.7	0.0	31.0	58.4	0.0	0.0	129.5
BM-4	55.4	0.0	30.7	0.0	30.7	55.7	0.0	0.0	120.2
BM-5	43.2	0.0	71.1	0.0	21.3	64.9	0.0	0.0	86.2
PT-1	68.6	0.1	46.4	0.5	29.0	73.0	0.0	2.3	106.4
HR-1	1.5	0.2	0.7	0.7	3.0	16.3	2.3	2.4	5.0
HR-2	1.7	0.2	0.8	0.7	3.8	13.4	2.5	2.3	1.5
HR-3	1.5	0.1	0.6	0.7	3.6	13.6	0.0	0.8	4.3
SR	2.6	0.1	1.5	2.2	3.7	3.3	0.0		6.9

b) Hwasung Landfill (1995. 4. 7)

Sampling site	K	Na	Ca	Mg	Al	Sr	B	Li	Ba	Zn
HSL-1	628.7	365.8	21.4	31.0	10.4	9.2	97.6	5.4	1.2	4.3
HSL-2	644.9	374.7	21.6	31.3	10.5	9.2	97.7	5.3	1.2	4.4
HSB	4.6	9.8	0.0	0.3	0.0	0.0	2.6	0.0	0.8	0.1
HSE	51.3	82.3	1.5	10.9	1.5	1.7	22.2	0.7	1.1	0.0
HSTR	76.5	63.9	1.1	1.7	1.1	0.3	99.5	1.4	0.0	0.0
	Cr	Si	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	F	Br	PO <sub>4</sub>	TOC
HSL-1	1.5	1.1	152.1	4.2	40.1	2451.1	38.1	214.4	0.0	73.7
HSL-2	1.0	1.1	158.3	4.6	44.6	2832.8	47.4	181.6	0.0	73.3
HSB	0.0	0.4	5.5	0.1	2.4	9.9	1.7	2.4	0.0	4.7
HSE	0.0	0.6	44.5	0.1	28.0	63.9	11.9	29.3	0.1	0.0
HSTR	0.0	0.0	5.5	8.8	19.2	236.8	0.7	39.5	0.5	4.0

(Contamination Factor = conc. contaminated/conc. uncontaminated : Kerndorff et al, 1992)

Table 5. continued

c) Nanjido Landfill (1995. 7. 26)

Sampling site	K	Na	Ca	Mg	Al	B	Sr	Ba	Si
BM-1	30.92	27.00	1.12	0.80	1.13	49.23	2.97	4.97	0.83
BM-2	75.36	32.35	4.82	7.25	3.17	108.16	4.02	2.60	1.66
BM-3	102.90	28.24	5.74	8.15	3.54	119.32	3.14	16.22	1.66
BM-4	101.93	29.41	5.24	8.05	3.30	121.92	2.91	12.78	1.55
BM-5	91.30	29.00	6.51	8.56	3.81	90.88	3.38	15.74	1.76
PT-1	93.24	32.06	5.43	8.14	3.37	153.78	2.66	22.59	1.88
SR-1	6.18	3.07	2.06	1.01	2.13	11.24	1.19	3.88	0.67
SR-2	7.73	3.09	2.94	1.63	3.05	18.67	1.84	6.55	0.62
SR	3.62	1.58	1.67	0.67	1.73	2.31	0.92	1.58	0.68
	Cr	Zn	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	F	Br	
BM-1	1.00	1.06	9.36	0.00	28.29	1.29	29.83	22.15	
BM-2	0.80	1.42	35.61	0.00	34.14	0.06	49.36	7.99	
BM-3	1.60	3.23	45.07	0.00	28.60	0.85	51.56	13.06	
BM-4	1.60	2.13	48.86	0.00	31.14	0.60	50.15	53.22	
BM-5	1.60	0.39	43.56	0.00	21.16	1.13	39.65	44.52	
PT-1	2.00	4.45	43.94	0.01	32.61	1.43	50.63	44.49	
SR-1	0.00	0.19	3.39	0.08	2.20	1.64	28.16	5.85	
SR-2	0.60	0.00	4.89	0.10	2.77	2.37	10.75	10.56	
SR	1.00	0.00	1.75	0.43	0.93	1.47	2.22	1.79	

d) Hwasung Landfill (1995. 8. 7)

Sampling site	K	Na	Ca	Mg	Al	Sr	Ba	Si
HSL-1	295.3	205.1	12.4	17.5	4.9	5.1	1.9	0.6
HSL-2	281.9	197.8	12.5	17.6	4.9	5.1	1.9	0.6
HSB	3.2	8.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.7	0.5
HSE	35.9	30.4	0.9	2.5	0.9	0.8	0.4	0.7
	Zn	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	CL	SO <sub>4</sub>	F	Br	
HSL-1	1.9	61.3	56.3	25.3	597.1	81.9	76.6	
HSL-2	1.6	61.3	61.3	23.6	612.7	85.7	81.6	
HSB	0.1	8.7	0.2	1.3	4.9	0.7	1.9	
HSE	0.0	65.2	0.2	8.0	16.9	21.1	10.0	

Table 6. Water samples of exceeding drinking water quality standard

Element	standard* (mg/l)	Nanjido landfill		Hwasung landfill	
		spring	summer	spring	summer
Cd	0.01	L-3	BM-5	HSL	HSL
Cu	1	-	-	-	HSL
Fe	0.3	L-1, L-2, L-3, W-1, W-2, BM-3, PT-1	L-1, L-3, BM-4, PT-1	-	-
Mn	0.3	BM-3	BM-2, BM-3, PT-1, SR-1, SR-2	HSL	HSL
Pb	0.1	-	UP-1, L-1, BM-3, BM-4, BM-5, SR-1, SR-2	HSL	-
Zn	1	W-1, W-2, BM-1, BM-2, BM-3	PT-1	HSL	-
Cl	150	L-1, L-2, L-3, W-1, BM-1, BM-2, BM-3, BM-4, BM-5, PT-1	L-1, L-3, BM-1, BM-2, BM-3, BM-4, BM-5	HSL, HSE	HSL, HSE
F	1	L-1, L-2, L-3, W-1, BM-3, BM-4, PT-1	L-1, L-3, BM-1, BM-2, BM-3, BM-4, BM-5, SR-1, SR-2, PT-1	HSL, HSE	HSL, HSE
NO <sub>3</sub> -N	10	UP-1, UP-2, L-1, L-3	UP-1, UP-2	-	HSL
SO <sub>4</sub>	200	-	L-1	HSL	HSL

\* : Guideline for drinking water in KOREA

의 중금속 원소들은 일부 침출수와 오염된 지하수를 제외하고는 예상과는 달리 음용수 기준을 대체로 넘지 않는다(Table 6). 특히 유선망분석을 통해 난지도 매립지의 침출수 영향을 받은 것으로 알려진 셋강의 SR-1, SR-2에서는 Mn과 F가 수질기준을 넘고 있었을 뿐 중금속 원소들에 대한 오염은 그리 진행되지 않은 것으로 나타났다. 이는 난지도 침출수의 중금속 함량이 매우 높지 않고 또한 유기물의 생분해와 회석, 침전, 흡착 등의 지연작용으로 말미암아 매립지에서의 이동이 제한된 것에서 기인하는 것이다. 한가지 주목해야할 점은 주변 배경수질로 채택한 현재 식수와 생활용수로 사용되고 있는 오염되지 않은 지하수인 UP-1과 UP-2는 질산성 질소가, UP-1에서는 Pb가 수질기준을 넘고 있다는 점이며 보다 정밀한 조사와 원인 규명이 요구된다.

## 결 론

1. 폐기물 매립지에서 발생하는 침출수는 매립지내의 유기물의 생분해와 무기물의 용해에 의해 높은 온도, 높은 전기전도도, 중성 및 알칼리의 pH를 나타내며 환원환경으로 존재하고 있고, 주성분원소로 Na, K, Ca, Mg, HCO<sub>3</sub>, Cl 등이, 부성분원소로 Mn, Sr, Ba, Li, F, Br 등이 부화되어 있고, 일반폐기물 매립지의 경우 Fe가, 산업폐기물 매립지인 경우에는 SO<sub>4</sub>가 특징적으로 부화되어 있다.

2. 화학분석, Cl 표준화과정, WATEQ4F 분석 결과, 매립지에서 침출수가 이동하여 진화해 갈수록 K, Na, Li 등의 양이온은 회석작용과 흡착을 통하여 지연되고, HCO<sub>3</sub>의 경우 회석작용과 침전에 의해서, Cl, F, Br 등은 회석작용에 의해 지연되며, Ca, Mg, Sr 등은 지질매체와의 이온교환작용으로 매립지 주변에서 증가하다가 회석과 침전을 통하여 지연되는 등 각각 비슷한 오염운을 형성하며 거동한다.

3. 유기물질을 대표하는 TOC는 매립지 주변을 벗어나면서 급격히 감소하고 있는 것으로 보아 유기물질의 생분해는 매립지 내부와 근접 주변에서 일어나며, 중금속 원소는 매립지 주변의 황환원대와 Fe-Mn 환원대에서 대부분 침전되어 지연되는 것으로 판단된다.

4. Contamination Factor를 통한 오염지시인자의 도출 결과 일반폐기물 매립지인 난지도 매립지의 경우 K, Na, Ca, Mg, B, Zn, HCO<sub>3</sub>, Cl, F, Br, TOC 등이, 산업폐기물 매립지인 화성 매립지의 경우 K, Na, Ca, Mg, B, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, Cl, F, Br, TOC 등이 뚜렷한 대조를 보이며 좋은 지시인자의 역할을 하고, 해수의 영향을 받는 지역에서는 TOC가 좋은 지시인자이다.

## 사 사

이 연구는 한국과학재단지정 전략광물자원연구센터의 지원으로 수행되었다.

## 참고문헌

김경웅, 손호웅, 1994, 대전시 신대동 폐기물매립지 주변 지역에서  
의 지하수 및 토양의 지하수 오염, 지하수환경, 1, p.80-84.

김원영, 정교철, 김윤중, 1994, 국토 이용을 위한 환경지질의 역할;  
2000년대 자원과 환경지질, 대한자원환경지질학회·대한지질학  
회 제10회 공동학술강연회 발표논문집, p.44-67.

김천수, 1992, 제주도 지하수환경의 오염취약성; 지하수 자원의 활  
용과 보존, 대한자원환경지질학회·대한지질학회 제8회 공동학  
술강연회 발표논문집, p.13-28.

박정구, 1991, 특정유해산업폐기물 처리장의 침출수 성분변화 및  
그 처리효율에 관한 연구, 한양대학교 대학원 석사학위논문,  
34p.

이기화, 김형수, 1994, 제주도 해안지역의 전기비저항 탐사, 지하수  
환경, 1, p.51-58.

이남훈, 윤석표, 1994, 폐기물 매립지에서의 자원회수 방안;  
2000년대 자원과 환경지질, 대한자원환경지질학회·대한지질학  
회 제10회 공동학술강연회 발표논문집, p.88-105.

이강근, 1994, 불균질 지층내 지하수 유동의 확률론적 분석 : 무작  
위성 분포 재생을 통한 가상적 수리시험, 지하수환경, 1, p.90-  
99.

이상규, 이희순, 이태섭, 정호준, 1995, 누출 폐유로 인한 지하 오염  
영역 탐지, 대한자원환경지질학회 제28차 학술발표회 발표논문  
요약집, 대한자원환경지질학회, p.65-66.

이상훈, 1995, Natural weathering of pulverised fuel ash and its in-  
fluence on groundwater composition, 대한자원환경지질학회 제  
28차 학술발표회 발표논문 요약집, 대한자원환경지질학회, p.67.

이철효, 1994, 난지도 매립지 침출수에 의한 지하수오염 특성 분석,  
서울대학교 환경대학원 석사학위논문, 94p.

장연수, 이광열, 1994, 난지도 매립장 지반을 통한 오염이동특성과  
제어, 지하수환경, 1, p.1-5.

장연수, 정하익, 이광열, 1993, 폐기물 매립장의 현황과 침출수의  
이동성 분석; 지하수와 환경 Workshop, 서울대학교 자연과학대  
학 부설 광물연구소·대한지질공학회, p.101-131.

정상용, 1995, 부산 석대 폐기물 매립장 일대의 지하수 오염, 지하  
수환경, 2, p.1-8.

최세영, 구자공, 박중현, 1992, 쓰레기 매립지 침출수에 의한 오염  
물질 이동에 관한 연구; 지하수 자원의 활용과 보존, 대한자원환  
경지질학회·대한지질학회 제8회 공동학술강연회 발표논문집,  
p.29-42.

최순학, 1993, 한국의 지하수 산상과 제주도 지하수의 수리지질학  
적 특성; 지하수와 환경 Workshop, 서울대학교 자연과학대학 부  
설 광물연구소·대한지질공학회, p.27-74.

한정상, 한규상, 김창길, 김남중, 한 찬, 1994, 제주도 지하수자원의  
최적 개발가능량, 지하수환경, 1, p.33-50.

한서엔지니어링, 1993, 화성사업소 기존 매립장 안전성 조사 용역  
보고서, 167p.

한서엔지니어링, 1994, 난지도 매립지 안정화 기본설계 수리지질  
연구조사 보고서, 498p.

한 찬, 1994, 산업 폐기물 매립지에서의 침출수 거동에 관한 수리지  
구화학적 연구, 서울대학교 대학원 석사학위논문, 86p.

Baedecker, M.J. and Cozzarelli, I.M., 1992, The determination  
and fate of unstable constituents of contaminated groundwater.  
In : S. Lesage and R.E. Jackson ed., Groundwater contamina-  
tion and analysis at hazardous waste sites, Marcel-Dekker Inc.,  
p.425-461.

Barcelona, M.J., Gibb, J.P., Helfrich, J.A. and Garske, E.E., 1985,

- Practical guide for ground-water sampling, EPA/600/2-85/104, 169p.
- Christensen, T.H., Cossu, R. and Stegman, R. ed., 1989, Sanitary landfilling: process, technology and environmental impact, Academic Press, 592p.
- Dance, J.T. and Reardon, E.J., 1983, Migration of contaminants in groundwater at landfill : a case study; 5. Cation migration in the dispersion test, *J. of Hydrol.*, 63, p.109-130.
- Ehrig, H., 1989, Leachate quality. In : T.H. Christensen et al. ed., Sanitary landfilling: process, technology and environmental impact, Academic Press, p.213-229.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*, Prentice-Hall Inc., 604p.
- Kerndorff, H., Schleyer, 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.
- Kjedsen, P. and Christensen, T.H., 1984, Soil Attenuation of acid land leachates, *Waste Management and Research*, 2, p.247-263.
- Nicholson, R.V., Cherry, J.A. and Reardon, E.J., 1983, Migration of contaminants in groundwater at a landfill : A case study; 6. *Hydrogeochemistry, J. of Hydrol.*, 63, p.131-176.
- Parr, J.L., Ward, G.K. and Walters, G., 1992, Establishing an analytical protocol for measurement of EPA's appendix IV list of compounds. In : S. Lesage and R.E. Jackson ed., *Groundwater contamination and analysis at hazardous waste sites*, Marcel-Dekker Inc., p.53-72.
- Yong, R.N., Mohamed, A.M.O. and Warkentin, B.P., 1992, *Principles of contaminant transport in soils*, Elsevier, 327p.