

일반폐기물 매립장의 침출수에 의한 하부토양의 오염과 해안점토층을 이용한 폐기물 매립장의 건설 가능성

이 병 호 · 전 옥 수
울산대학교 토목환경공학부
(1997년 3월 10일 접수)

Pollution Characteristics of Leachate and Underground Soil of the Landfill Site and Possibilities of Landfill Site using Clay Layer of the Sea Shore

Byoung-Ho Lee and Ok-Soo Jun
Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan
(Manuscript received 10 March 1997)

Pollution characteristics of leachate and underground soil of the two landfill sites were investigated. Domestic wastes were dumped in the two adjacent landfill sites. Only small portion of S landfill site was filled with domestic wastes at the first stage of dumping, and most portion of the site was filled with construction wastes. However Y landfill site was filled with mostly domestic wastes.

Higher concentrations of organic pollutants including VOCs were measured in Y landfill site leachate than in S landfill site.

Underground soils of the two landfill sites were analyzed by the two kinds of leaching methods, KEP (Korean Extraction process) and Acid Digestion. Underground soils of the both landfill sites were not polluted by leachates. Underground soils of the two were composed of fine silty material. Thus it is found that fine silty soil layer of the sea shore may be used as a landfill site.

Key words : leachate, Underground soil, landfill, domestic waste, VOC

1. 서 론

폐기물 매립장은 완벽한 차수막과 침출수의 처리시설을 갖추어야 한다. 그러나 폐기물 매립에 대한 법규의 시행이 강화되기 전에는 공터를 이용하여 폐기물을 단순투기하는게 일반적이었다.

Naresht 등은 해양으로 방류되는 폐수속에 함유된 금속들의 일부만 침전되게 되고 대부분 바닷물속으로 용출된다고 했다. 이처럼 해안에 위치한 폐기물매립장으로부터 침출수에 의하여 바닷물속으로 중금속이 용출될 수 있다. 또한 침출수는 하부토양과 지하수를 오염시킬 수 있으며 Schnitzer는 토양내에서 유기물질과 무기물질의 상호작용을 연구하여 중금속의 움직임에 대한 연구를 하였다. 박등은 토양에서 중금속의 이동현상을 연구하기 위하여 하수슬러지를 토양내에 투입하고 중금속의 이동현상을 관찰하였다. Henry 등은 2개의 폐기물매립장에서 채취한 침출수로부터 수산화철과 망간산화물을 이용한 중금속의 제거 방안을 제시했다. Iwami 등은 유동상을 이용하여 미생물을 활성화시킨 활성탄을 이용하여 침출수를 처리하는 방안이 효과적인 처리가 될 수

있다고 했다. 폐기물매립장의 침출수와 하부토양오염은 매우 밀접한 관계가 있으며 위생매립을 하지 않고 지층위에 단순투기형식으로 매립된 곳은 침출수에 의한 토양의 오염가능성이 높다. 그리하여 많은 학자들에 의하여 침출수 처리에 대한 방안들이 제시되고 있다.

연구대상 폐기물 매립지는 1981년 12월 단순투기형식으로 매립을 시작하기 전에는 EL(-)1.3~0.0m 정도의 해안저습지였다. 이곳에 12년여동안 U에서 발생된 약 4,000,000톤을 매립하였고 94년 3월말 매립을 완료하였다. 폐기물 매립장은 S매립지인 제1매립지와 Y매립지인 제2매립지로 형성되었으며 S매립지 주변으로 소하천이 흐르고 있다. S매립장은 초기에 도시의 일반폐기물이 일부 매립되었고 대부분은 건설폐기물, 건설잔토, 준설토들이 반입되어 Y매립장이 대부분 일반폐기물로 매립된 것과는 대조적이다.

본 논문에서는 성분이 다른 폐기물이 매립된 두개의 대상지역에서 발생하는 침출수의 특성과 침출수에 의한 하부토양의 오염형태에 대한 연구를 하였다. 특히 매립장 하부는 해안점토층으로 이루어져 있기 때문에 점토

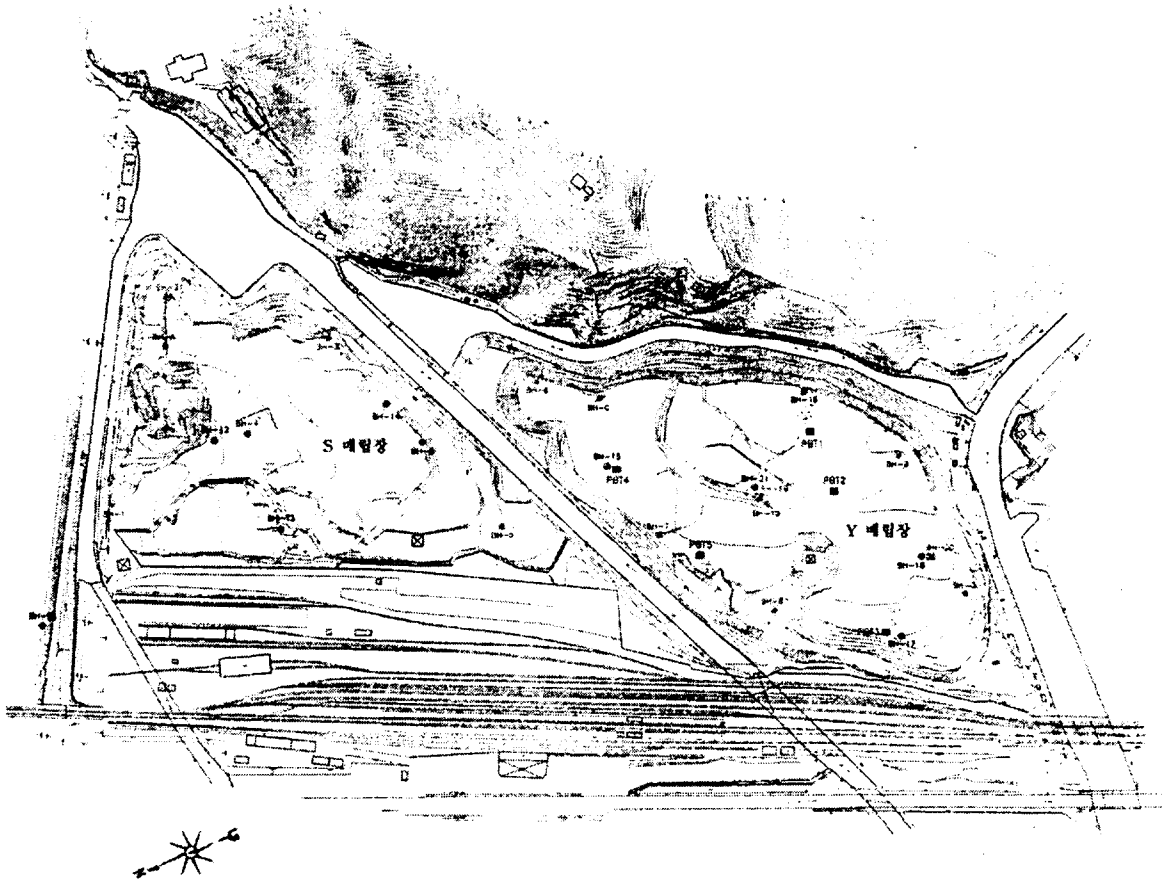


Fig. 1. 조사위치도.

층의 특성과 점토층에 의해 침출수가 차수될 수 있는지에 대하여 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 시료채취

대상 폐기물 매립장은 S매립장과 Y매립장의 두 부분으로 나누어져 있으며 Fig.1에 나타내었다. Fig.1에서 BH는 Boring Hole을 나타내며 시료채취 지점이다. 두 매립지 하부토양의 오염정도를 비교하기 위하여 매립장 밖의 BH-11에서 비교시료를 채취하였으며 S매립장에서 BH-1, BH-3, BH-13, BH-14 그리고 Y매립장에서 BH-7, BH-8, BH-15, BH-16, BH-17, BH-19, BH-20의 시료를 연구대상으로 하였다. 토양시료가 채취된 곳으로부터 침출수를 채취하였다. 본 연구에 사용된 시료는 모두 매립지의 원지반으로부터 하부로 굴착한 토양을 채취하여 사용하였다. 원지반으로부터 하부토양의 굴착깊이를 Table 1의 depth에 표시하였다.

2.2 토양시료와 침출수 분석

매립장 하부토양에 대한 특성을 파악하기 위하여 수분, 가연분, 회분의 3가지 성분에 대하여 분석하였다. 또한 이들을 깊이별로 채취하여 원소분석과 화학적조성식에 대한 조사도 하였다. 원소분석은 EA 1108 Ele-

mental Analyzer를 이용하여 분석하였다. 토양시료를 채취하여 생긴 공간에 침출된 물을 시료로 채취하여 VOCs는 HP 5890인 GC/MSD, 금속항목들은 AutomscanTM 25 Spectrometer인 ICP를 이용하여 분석하였으며 Hg와 As는 AA-680을 이용하여 분석하였다.

2.3 용출실험

2.3.1 KEP법 (Korean Extraction Process)

토양시료 100g정도를 달아 시료와 순수의 비가 1 : 10 (W/V) 되게 순수 1l를 넣었다. HCl을 첨가하여 pH를 5.8~6.3으로 맞춘후 진폭이 4~5cm 정도의 진탕기를 사용하여 6시간 진탕한 다음 진공펌프로 여과하여 여과액을 측정시료로 사용하였다. VOCs의 휘발을 막기 위하여 parapin으로 비이커의 입구를 막고 Head space가 최소가 되도록 하였다.

2.3.2 전량분해실험 (Acid Digestion)

전량분해실험을 위하여 매립장 하부토양 2g에 증류수 100ml을 넣어 토양 : 순수를 1 : 50 (W/V)로 하여 비이커에 넣은 후에 conc HNO₃ 5ml을 끓임쪽과 함께 넣어 증발시켰다. 증발 후 농축액의 양이 약 10~20ml정도 남으면 GF/C여지로 여과하였다. 여과된 시료에 순수를 넣어 총액의 양을 100ml로 하여 분석하였다.

Table 1. Characteristics of underground soil of the landfill site (unit : %)

Landfill Site	Sampling Hole	Depth (m)	moisture content	ash content (a)	combustable content (b)	$\frac{b}{a+b} \times 100$ (C)	ave (C)	
Outside Landfills	BH-11	24-25	34.10	57.86	8.04	12.20	10.56	
		29.3	33.30	60.76	5.94	8.91		
		18.5	23.84	68.99	7.17	9.41		
	BH-12	26	21.72	72.32	5.97	7.62	9.04	
		30	33.34	59.94	6.72	10.08		
		18-19	29.41	61.94	8.65	12.25		
	S Landfill Site	BH-13	26-27	26.48	64.74	8.78	11.94	12.10
			15	25.82	68.43	5.74	7.74	
		BH-14	24	26.63	68.85	4.52	6.16	
			31	37.66	56.40	5.93	9.52	
		max	37.66	72.32	8.78	12.25	12.10	
		min	21.72	56.40	4.52	6.16	7.81	
		ave	28.11	65.20	6.69	9.34	9.65	
Y Landfill Site	BH-15	20	16.61	77.55	5.84	7.01	7.29	
		30	28.20	66.37	5.43	7.57		
	BH-16	25	33.76	52.83	13.41	20.25	15.57	
		30	27.79	64.35	7.86	10.88		
	BH-17	30	40.66	50.56	8.78	14.80	14.80	
		21	20.40	76.66	2.94	3.70		
	BH-18	30	37.05	48.95	14.01	22.25	12.98	
			max	40.66	77.55	14.01		22.25
			min	16.61	48.95	2.94	3.70	7.29
			ave	29.21	62.47	8.32	12.35	12.66

* Depth : depth from the original surface before landfill

3. 결과 및 고찰

3.1 토양특성

토양의 기본적인 특성을 파악하기 위하여 토양시료 BH-12(26.0~27.5m)를 환경오염공정시험법에 따라 시료 10g을 50ml의 비이커에 취하여 증류수 25ml를 넣어 교반하여 30분 이상 방치한 다음 이 현탁액을 검액으로 하여 측정된 결과 pH 8.04이었다. 또한 BH-13(18~18.8m)에서 채취한 시료와 BH-13(28m)에서 채취한 시료의 공극비를 구한 결과 각각 1.104와 1.102였다. 공극비가 매우 큰 것은 바닷물의 이온들과 민물의 미립자들이 만나 응집되어 퇴적되었으나 미생물의 작용으로 유기물은 분해되고 리그닌등 난분해성 물질만 남아 영성한 구조를 이룬 것으로 분석된다.

두 매립지 하부 토양의 삼성분에 대하여 Table 1에 정리하였다.

본 연구에 사용된 시료는 BH-11 ~ BH-18까지 8개의 하부토양 15~30m사이의 토양을 채취하여 수분, 가연분, 회분의 함량을 %로 분류하였다. 고형물중에 있는 유기물의 함량을 조사하기 위하여 가연분이 고형물중에서 몇 %를 점유하는지를 조사하였다. Table 1에서 볼수 있는 것과 같이 전체 무게에 비하여 수분함량은 16.61 ~ 40.66% 정도로 비교적 작았다. 전체 무게에 비한 가연분의 양은 2.94 ~ 14.01% 정도로 매우 적은 것을 볼 수 있다. 고형물에 비교한 가연분의 양은 3.70 ~ 22.25% 사이였다. 이는 하부토양이 대부분 무기성 물질로 이루어진 것으로 볼 수 있다. 일부 가연성 유기물

도 산화말기의 물질들로 판단할 수 있다. 이 지역이 원래는 바다물이 유입되는 갯벌 지역이었기 때문에 하부 토양은 미세한 모래성분과 산화말기의 유기물질 일부가 섞여 형성되었다.

토양의 특성중에서 원소의 구성성분과 화학적 조성, 그리고 이론적인 발열량을 구하여 Table 2에 정리하였다. 대부분의 시료에서 유기물인 C는 적고 O는 매우 큰 것을 볼 수 있어 대부분 무기물이며 산화말기의 유기물로 형성되어 있는 것으로 분석된다.

3.2 침출수(Leachate)

매립장 하부에서 미량의 휘발성 유기오염물질들이 검출되었다. Y매립장내에 있는 BH-15에서 1,2-dichloroethane이 102.8µg/l, BH-19에서 Benzene 8µg/l과 Toluene 45µg/l로 약간 높게 검출되었다. 검출된 휘발성 유기오염 물질은 불규칙하고 농도는 다양한 것을 볼 수 있다. BH-1, BH-3, BH-13, BH-14는 S매립장의 샘플이고 BH-7, BH-8 그리고 BH-15~BH-20까지는 Y매립장 샘플을 나타낸다.

S 매립장의 침출수에서 휘발성 유기오염 물질의 농도가 Y매립장에 비하여 훨씬 낮게 나타나고 있다. S매립장에서는 Chloroform만 2.0~4.2µg/l 측정되었을 뿐 다른 VOCs는 거의 측정되지 않았다. Y매립장은 상대적으로 S매립장 보다 휘발성 유기오염물질들이 다양하게 높은 농도로 검출되는 것을 볼 수 있다. 즉 한 시료당 4 ~ 5 가지의 VOCs가 측정 되었으며 1.

Table 2. Element Analysis of underground soil of the landfill site (unit : %)

Landfill Site	Sampling Hole(depth, m)	C	H	O	N	S	Lower Heat emission (Kcal/kg)	Chemical compositon
Outside Landfills	Surface	0.947	0.259	2.242	0.082	0.955	7.733	C ₁₂ H ₃ O ₂₇ NS ₁₂
	BH-11(16-17)	2.271	0.548	4.968	0.090	1.105	15.518	C ₂₅ H ₆ O ₅₅ NS ₁₂
	BH-11(29-30)	1.020	0.539	4.352	0.055	1.194	8.186	C ₁₉ H ₁₀ O ₇₉ NS ₂₂
	BH-12(18.5)	2.849	0.605	4.382	0.258	1.231	24.690	C ₁₁ H ₂ O ₁₇ NS ₅
	BH-12(30)	1.933	0.539	4.177	0.045	1.043	15.730	C ₄₃ H ₁₂ O ₉₃ NS ₂₃
	BH-13(18-19)	2.384	0.571	5.448	0.076	1.213	15.346	C ₃₁ H ₈ O ₇₂ NS ₁₆
	BH-13(26)	1.601	0.567	5.118	0.026	1.492	11.007	C ₆₂ H ₂₂ O ₁₉₇ NS ₅₇
	BH-14(15)	1.722	0.247	2.381	0.056	0.162	11.141	C ₃₁ H ₄ O ₄₃ NS ₃
	BH-14(24)	2.584	0.510	4.746	0.077	0.753	17.078	C ₃₄ H ₇ O ₆₂ NS ₁₀
	BH-14(31)	2.298	0.645	5.692	0.078	1.235	15.729	C ₂₉ H ₈ O ₇₃ NS ₁₆
S Landfill Site	max	2.849	0.645	5.692	0.258	1.492	24.690	C ₄₃ H ₁₂ O ₉₃ NS ₂₃
	min	1.601	0.247	2.381	0.026	0.162	11.007	C ₁₁ H ₂ O ₁₇ NS ₅
	ave	2.196	0.526	4.563	0.088	1.018	15.817	C ₃₄ H ₉ O ₇₉ NS ₁₉
Y Landfill Site	BH-15(20)	0.740	0.213	2.112	0	0.442	4.119	CO ₃ S
	BH-15(30)	2.621	0.671	5.677	0.102	1.336	19.465	C ₂₆ H ₇ O ₅₆ NS ₁₃
	BH-16(25)	3.412	0.689	6.591	0.111	1.734	23.462	C ₃₁ H ₆ O ₅₉ NS ₁₆
	BH-16(30)	2.927	0.676	6.309	0.108	1.460	19.711	C ₂₇ H ₆ O ₅₈ NS ₁₄
	BH-17(26)	3.078	0.698	5.983	0.139	1.740	23.571	C ₂₂ H ₅ O ₄₃ NS ₁₃
	BH-18(21)	0.764	0.208	5.931	0	0.361	-12.287	C ₄ HO ₂₉ S ₂
	BH-18(30)	3.506	0.805	2.252	0.167	1.764	46.039	C ₂₁ H ₅ O ₁₃ NS ₁₁
	max	3.506	0.805	6.591	0.167	1.764	46.039	C ₂₇ H ₆ O ₅₈ NS ₁₄
	min	0.740	0.208	2.112	0	0.361	-12.287	CO ₃ S
ave	2.435	0.566	4.979	0.090	1.262	17.726	C ₁₉ H ₄ O ₃₇ NS ₁₀	

<Dulong equation>

$$\text{고위 발열량} = 8100 \times C + 34000 \left[H - \frac{O}{8} \right] + 2500 \times S \quad (1)$$

$$\text{저위 발열량} = \text{고위 발열량} - 600 \times (9H + W) \quad (2)$$

unit : Kcal/kg. W = moisture content (%)

Table 3. VOCs(Volatile Organic Compounds) concentrations of the leachate (unit : µg/l)

Landfill Site	Sampling Site	1,2-dichloro ethane	Chloro-form	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	Phenol	Xylene	PCE	TCE
S Landfill Site	BH- 1	-	4.16	-	-	-	-	-	-	-
	BH- 3	-	2.35	-	-	-	-	-	-	-
	BH-13	-	2.20	-	-	-	-	-	-	-
	BH-14	-	2.00	-	0.45	-	-	-	-	-
	max	-	4.16	-	0.45	-	-	-	-	-
	min	-	2.00	-	-	-	-	-	-	-
ave	-	2.68	-	0.11	-	-	-	-	-	
Y Landfill Site	BH- 7	4.76	-	0.17	25.64	42.99	-	-	-	-
	BH- 8	0.32	2.59	2.63	1.29	-	-	-	-	-
	BH-15	102.83	2.36	1.57	1.96	-	-	-	-	-
	BH-16	2.63	4.10	2.48	28.69	7.84	-	-	-	-
	BH-17	4.44	2.73	1.39	7.78	3.67	-	-	-	-
	BH-19	4.36	2.78	8.00	44.75	9.45	-	-	-	-
	BH-20	15.67	2.50	1.82	6.50	-	-	-	-	-
	max	102.83	4.10	8.00	44.75	42.99	-	-	-	-
	min	0.32	0	0.17	1.29	-	-	-	-	-
ave	19.29	2.44	2.58	16.66	9.14	-	-	-	-	

Table 4. Metal concentrations of leachate of the landfill site (unit : mg/l)

Landfill Site	Sampling Site	Cr	Cd	Mg	Pb	K	Ca	Fe	Na	Hg ($\mu\text{g}/\ell$)	As ($\mu\text{g}/\ell$)	Cu
S Landfill Site	BH- 1	0.001	ND	26	ND	66	140	0.70	128	5.88	ND	0.015
	BH- 3	0.005	0.0020	558	0.015	210	95	0.76	4,371	ND	0.85	0.0001
	BH-13	0.008	0.0030	1,179	0.022	416	208	0.15	8,900	ND	1.59	0.004
	BH-14	0.006	0.0014	739	0.003	294	194	0.07	7,230	ND	ND	0.005
	max	0.008	0.003	1,179	0.022	416	208	0.76	8,900	5.88	1.59	0.015
	min	0.001	0	26	0	66	95	0.07	128	0	0	0.0001
	ave	0.005	0.0016	626	0.01	247	159	0.42	5,157	1.47	0.61	0.006
Y Landfill Site	BH- 7	0.676	0.0020	122	0.017	1,405	48.72	7.53	2,505	ND	1.59	0.070
	BH- 8	0.077	0.0005	116	0.0085	598	39.72	4.11	1,413	ND	30.3	0.025
	BH-15	0.065	0.0004	70	ND	733	33.12	4.25	995	ND	ND	0.024
	BH-16	0.164	0.0011	59	0.007	1,143	14.76	1.76	1,946	ND	ND	0.063
	BH-17	0.091	0.0001	200	0.006	890	52.12	2.34	1,590	ND	0.59	0.087
	BH-19	0.310	0.0016	99	0.029	952	58.69	7.84	2,028	ND	ND	0.307
	BH-20	0.138	0.0020	203	0.002	1,344	47.02	3.25	3,140	ND	1.93	0.006
	max	0.676	0.002	203	0.029	1,405	58.69	7.84	3,140	0	30.3	0.307
	min	0.065	0.0001	70	0	598	14.76	1.76	995	0	0	0.006
	ave	0.217	0.0011	124	0.01	1,009	42.02	4.44	1,945	0	4.92	0.083

Table 5. Leachate characteristic parameters of the landfill site (unit : mg/l)

Landfill Site	Sampling Site	pH	TDS	EC(mS)	Total Alkalinity	SS raw sample	SS one hour settled sample
S Landfill Site	BH-1	7.26	772	1.2	4,084	14,785	765
	BH-3	8.11	12,198	16.3	1,765	18,930	466
	BH-13	8.24	24,090	36.3	6,421	16,665	324
	BH-14	7.81	18,956	28.6	1,183		
	max	8.24	24,090	36.3	6,421	18,930	765
	min	7.26	772	1.2	1,183	14,785	324
	ave	7.86	14,004	20.6	3,363	16,793	518
Y Landfill Site	BH- 7	8.60	9,826	24.4	11,718	1,135	265
	BH- 8	8.67	4,832	11.0	7,353	1,975	490
	BH-15	8.22	4,156	13.0	7,411	870	163
	BH-16	8.74	7,358	16.1	6,839	280	124
	BH-17	8.41	6,190	16.3	5,471	650	182
	BH-19	8.89	7,314	16.5	6,829	1,565	267
	BH-20	8.69	10,652	13.9	4,511	595	123
	max	8.89	10,652	24.4	11,718	1,975	490
	min	8.22	4,156	11.0	4,511	280	123
	ave	8.60	7,190	15.9	7,162	1,010	231

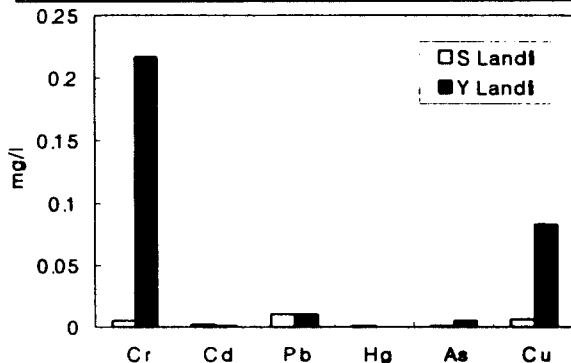


Fig. 2. Comparisons of metal concentrations of the two landfill sites leachate.

2dichloroethane은 102.8 $\mu\text{g}/\ell$, Toluene 은 44 $\mu\text{g}/\ell$ 까지 검출되었다. 이런 결과는 S매립장은 매립 초기에는 생활폐기물을 매립하였으나 나머지 대부분은 건축 폐기물이나 건설공사시 남는 흙의 투기장소로 사용되어 유기물의 용출이 작기 때문으로 분석된다. 반면 Y매립장의 경우 대부분 생활폐기물이 매립되어 상대적으로 VOCs들이 좀 더 다양하고 높은 농도로 검출되었다.

Table 4에서와 같이 침출수의 여러 가지 금속에 대한 농도는 S매립장에서 Cr은 0.001~0.008mg/l, Cd은 0~0.003mg/l, Pb은 0~0.02mg/l, Hg은 0~5.9 $\mu\text{g}/\ell$, As는 0~1.6 $\mu\text{g}/\ell$, Cu는 0.0001~0.015mg/l이며 Y매립장에서 Cr은 0.065~0.68mg/l, Cd은 0.0001~0.002mg/l, Pb은 0~0.03mg/l,

Table 6. Leachate quality parameters of the S and Y landfill site (unit : mg/l)

Landfill Site	Sampling Site	BOD	COD	Cl	NO ₃ -N	NH ₄ ⁺ -N	SO ₄ ²⁻	CN
S Landfill Site	BH- 1	41	1,874	70	10.28	183	275	0.026
	BH- 3	43	1,574	7,419	2.99	230	68	0.220
	BH-13	57	1,576	13,486	3.13	720	98	0.018
	BH-14	92	846	12,388	1.94	120		
	max	92	1,874	13,486	10.28	720	275	0.220
	min	41	846	70	1.94	120	68	0.018
	ave	58	1,468	8,341	4.59	313	147	0.088
Y Landfill Site	BH- 7	462	3,252	9,695		2,822	103	0.006
	BH- 8	198	1,152	5,435	0.44	635	34	0.010
	BH-15	203	1,772	3,954	1.57	1,625	88	0.082
	BH-16	553	5,912	7,668	1.55	2,409	516	0.388
	BH-17	193	1,158	6,966	2.10	1,225	103	0.013
	BH-19	197	1,700	7,527		1,077	130	0.119
	BH-20	183	1,162	5,888	2.42	938	95	0.055
	max	553	5,912	9,695	2.42	2,822	516	0.388
	min	183	1,152	3,954	0.44	635	34	0.006
ave	284	2,301	6,733	1.62	1,533	153	0.096	

Hg은 0pg/l, As는 0~30.3µg/l, Cu는 0.006~0.307mg/l로 비슷하였다. Table 4에서 유해중금속의 농도만 분리하여 Fig. 2에 S매립장과 Y매립장의 농도에 대한 비교를 하였다. 두 매립장 중에서 Y매립장 침출수의 중금속 농도가 Cr과 Cu가 약간 높기는 하나 다른 중금속들도 더 높다는 근거가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 침출수가 폐기물의 용출에 의한 결과는 미미하며 하부토양이 바닷물에 의해 포화되었던 금속들이 용출된 영향을 훨씬 크게 받았기 때문으로 생각된다. 바닷물의 영향을 주로 받는 K, Mg, Ca, Na를 제외하고는 유해 중금속인 Cr, Cd, Pb, Hg, As, Cu는 침출수에서 낮은 농도로 검출되었다. 매립장 자체로부터 침출수로의 유해중금속 용출은 매우 적은 것으로 분석된다. BH-1~BH-20까지 유해 중금속들의 농도는 산발적으로 높게 나오는 곳들이 있으나 절대농도 자체는 매우 낮다.

S매립지와 Y매립지로부터 용출되는 중금속중에서 일반금속인 K, Mg, Ca, Na등은 매립지가 개별인 관계로 바닷물에 의한 영향을 받아 농도도 매우 높았다. 유해중금속들인 Cr, Cd, Pb, Hg, As, Cu, Fe 등은 매립지로부터 약간씩 용출되고 있는 것으로 조사되었으나 절대농도는 낮았다.

S매립지와 Y매립지의 침출수의 일반적인 수질항목에 대한 특성을 조사하여 Table 5에 나타내었다. 침출수의 pH는 7 ~ 8.9 까지 분포하나 주로 8.0이상이었다. TDS(Total Dissolved Solids)도 매우 다양하여 772 ~ 24,000 mg/l 까지 검출되었다. TDS는 S 매립장과 Y 매립장에서 특별한 특징없이 샘플링 홀마다 다양한 농도로 검출되었다.

전기전도도인 EC(Electrolytic Conductivity)는 BH-1에서 1.2ms로 측정된 반면 그 외의 매립장 침출수에서는 BH-1에서 보다 약 10~30배 정도 높게 측정되었다. 이는 민물이 주변하천으로부터 BH-1으로 유입되는 것으로 분석된다.

Total Alkalinity는 매우 높아서 약 1,200 ~ 12,000mg/l (as CaCO₃) 까지 분포되고 있다. 이는 일반적으로 나타나는 Alkalinity보다는 매우 높은 수치다. Carbonate System에 의한 Alkalinity 뿐만 아니라 하구언의 퇴적토의 특성에 따라 borates, phosphates, silicates와 그외의 물질들에 의하여 Alkalinity의 값이 높아진 것으로 생각된다.

침출수의 부유물질(SS)에 대한 특성을 파악하기 위하여 원 시료를 흔들여 균일한 시료를 취하여 1시간 동안 침전시킨후 상등액을 취하여 측정된 부유물질의 농도(one hour settled sample)를 정리하였다. 침출수의 부유물질은 1시간 후 BH-3에서는 1%이하까지 떨어지는 특성을 보였다. 이는 침출수내에 밀도가 매우 높은 부유물질들이 다량 함유되어 있기 때문이다.

BOD와 COD 그리고 이온성 물질들에 대한 결과를 Table 6에 정리하였다. S매립지의 침출수 BOD농도는 BH-13, BH-14에서 40 ~ 90 mg/l 정도로 측정되었으나 Y매립지의 침출수 BOD는 180 ~ 550 mg/l로 현저한 차이를 보이고 있다. COD의 농도도 S매립지보다는 Y매립지의 농도가 높게 나타나 COD농도는 BH-16에서 5,900 mg/l에 달하고 있다. 암모니아성질소의 농도가 S매립지에서 120 ~ 720 mg/l로 측정된 반면 Y매립지에서 635 ~ 2,800 mg/l 까지 검출되었다.

Cl이온은 바닷물의 유입정도를 극명하게 나타내 주고 있다. 염소이온은 S매립지와 Y매립지에서 차이를 보이지 않는다. 이는 매립장 하부토양이 비슷한 정도로 바닷물이 유입되고 있는 것을 말하며 4,000 ~ 12,000 mg/l 까지 다양하다. NO₃-N농도는 매립장 침출수에서 매우 적은 농도인 것을 볼 수 있는데 매립장하의 침출수가 혐기성 상태인 것을 나타낸다.

CN의 농도는 BH-3, BH-16, BH-19에서 0.12 ~ 0.39 mg/l로 비교적 높게 측정되었으나 그 외의 지역에서는 비교적 농도가 낮아 ppb수준으로 검출되었다.

일반폐기물 매립장의 침출수에 의한 하부토양의 오염과 해안점토층을 이용한 폐기물 매립장의 건설 가능성

Table 7. Concentrations of metals in landfill underground soil (unit : $\mu\text{g}/\text{kg}$)

Landfill Site	Metals		Cr	Cd	Mg	Pb	K	Ca	Fe	Na	Hg	As	Cu	
	Sample	(m)												
Outside Landfill Site	BH-11	24-25	0.94	0.015	352	2.23	550	124	445	5,197	0.010	0.029	0.850	
		18.5	0.25	0.012	250	0.93	340	73	168	5,160	ND	0.019	0.417	
	BH-12	30	0.49	0.029	366	1.57	489	105	234	5,569	0.007	0.035	0.700	
		18-19	0.61	0.014	273	0.99	489	109	259	5,084	0.031	0.040	0.807	
	BH-13	26-27	0.27	ND	301	0.73	397	160	97	4,418	0.014	0.013	0.381	
		15	0.11	0.013	184	0.01	386	163	10	1,950	0.025	0.025	0.132	
	BH-14	24	0.33	ND	168	0.53	266	59	138	4,424	0.025	0.025	0.346	
		31	0.27	0.014	314	0.62	338	184	81	4,088	ND	0.001	0.172	
		max		0.61	0.029	366	1.57	489	184	259	5,569	0.031	0.040	0.807
		min		0.11	0	168	0.01	266	73	10	1,950	0	0.001	0.132
	ave		0.33	0.012	265	0.77	386	122	141	4,385	0.015	0.023	0.422	
Y Landfill Site	BH-15	20	0.09	ND	273	0.38	232	192	44	2,869	0.017	0.069	0.146	
		30	0.22	0.038	278	0.83	406	87	113	4,673	ND	0.001	0.316	
	BH-16	25	0.24	0.015	307	0.73	425	172	110	5,211	0.026	0.022	0.211	
		29	0.22	0.014	276	0.55	342	167	68	3,930	0.012	0.017	0.152	
	BH-18	19	0.025	0.013	61	ND	189	387	3.7	1,373	ND	0.006	0.113	
		max		0.24	0.038	307	0.83	425	387	113	5,211	0.026	0.069	0.316
		min		0.025	0	61	0	189	87	3.7	1,373	0	0.001	0.113
		ave		0.16	0.016	239	0.50	319	201	68	3,611	0.011	0.023	0.188

Table 8. Extracted VOC concentrations of the landfill underground soil (unit : $\mu\text{g}/\text{l}$)

Landfill Site	Item		Trichlorofluoro-m ethane	Dichloro-methane	Chloroform	Toluene	Tetrachloro-ethane	Phenol	Ethylbenzene, Benzene, Xylene	
	Sampling Site									
Outside Landfill Site	Surface		-	-	4.37	0.60	-	-	-	
	BH-11	16-17	-	-	8.02	0.43	-	-	-	
		29-30	-	-	5.45	0.13	-	-	-	
	BH-12	18.5	-	-	5.45	0.49	-	-	-	
		30	-	-	4.12	0.99	-	-	-	
	BH-13	18-19	-	-	3.91	0.82	-	-	-	
		26	-	-	6.59	-	-	-	-	
	BH-14	15	-	-	5.53	0.50	-	-	-	
		24	2.43	-	4.98	2.57	1.47	-	-	
		31	-	-	4.40	1.69	1.18	-	-	
	max		2.43	0	6.59	2.57	1.47	0	0	
	min		0	0	3.91	0	0	0	0	
	ave		0.35	0	5.00	1.01	0.38	0	0	
Y Landfill Site	BH-15	20	-	-	7.42	-	-	-	-	
		30	-	-	3.16	1.05	-	-	-	
	BH-16	25	-	-	7.54	0.41	-	-	-	
		30	-	-	4.69	-	-	-	-	
	BH-17	26	-	-	4.91	-	-	-	-	
		21	2.34	0.24	7.97	2.54	1.46	-	-	
	BH-18	30	1.96	-	2.21	4.69	2.70	-	-	
		max		2.34	0.24	7.97	4.69	2.70	0	0
		min		0	0	2.21	0	0	0	0
		ave		0.61	0.034	5.41	1.24	0.59	0	0

3.3 토양시료의 용출

S매립지와 Y매립지 하부토양의 오염정도를 파악하기 위하여 하부토양을 원지반으로부터 30m까지 채취하였다. 채취된 시료를 KEP(Korean Extraction Process)법과 산에 의한 추출법(Acid Digestion Method)에 의하여 매립장으로부터 유출된 오염물질이 하부토양에 미친 영

향의 정도를 조사하였다.

3.3.1 KEP법에 의한 용출

S와 Y매립지의 BH-11 ~ BH-18에 대하여 표면인 원지반과 원지반으로부터 15m~31m 깊이까지 하부를 보링하여 용출실험을 실시하여 결과를 Table 7에 나

Table 9. Metal concentrations of the underground soil of the landfill site by Acid Digestion (unit : mg/kg)

Landfill Site	Metals		Cr	Cd	Mg	Pb	K	Ca	Fe	Na	Hg	As	Cu	
	Sample(m)													
Outside Landfill	BH-11	24-25	31.50	0.67	10.143	49.23	3.979	7.567	28.953	6.078	1.03	0.35	20.03	
S Landfill Site	BH-12	18.5	24.88	0.52	8.179	37.11	2.827	6.798	24.396	6.556	1.58	0.68	15.56	
		30	27.40	1.08	9.465	53.95	3.317	4.680	26.868	6.976	1.49	1.18	19.31	
	BH-13	18-19	23.15	0.85	8.775	38.17	3.166	47.674	21.997	6.585	54.24	1.21	13.84	
		26-27	27.05	0.60	8.543	39.00	3.196	2.652	26.064	3.755	67.11	1.12	17.52	
	BH-14	15	6.04	0.70	866	25.75	2.678	4.559	6.810	2.454	4.49	1.83	22.45	
		24	22.63	0.72	8.178	40.48	2.635	6.558	23.757	6.295	1.08	1.07	17.44	
		31	31.77	0.70	11.105	50.37	4.216	26.549	30.005	7.804	45.95	1.44	22.78	
		max		31.77	1.08	11.105	53.95	4.216	47.673	30.005	7.804	67.11	1.83	22.78
	min		6.04	0.52	8.178	25.75	2.635	2.652	6.810	2.454	1.08	0.68	13.84	
	ave		23.27	0.74	7.873	40.69	3.148	14.210	22.842	5.775	25.13	1.22	18.41	
Y Landfill Site	BH-15	20	12.94	0.26	4.729	23.19	1.339	9.129	13.873	3.634	0.61	0.91	7.13	
		30	27.73	0.65	9.050	46.06	3.370	8.363	27.104	7.787	1.20	1.50	17.94	
	BH-16	25	29.71	2.21	9.348	43.91	3.119	13.787	28.987	7.528	0.89	1.57	26.47	
		29	28.55	2.81	8.838	39.26	3.072	14.763	27.664	6.530	1.17	0.91	17.31	
	BH-18	19	22.19	2.89	2.485	102.81	1.629	21.477	27.330	3.557	2.98	0.94	78.27	
		max		29.71	2.89	9.348	102.81	3.370	21.477	28.987	7.786	2.98	1.57	78.27
		min		12.94	0.26	2.485	23.19	1.339	8.363	13.873	3.557	0.61	0.91	7.13
	ave		24.22	1.76	6.890	51.05	2.506	13.504	24.992	5.807	1.37	1.17	29.42	

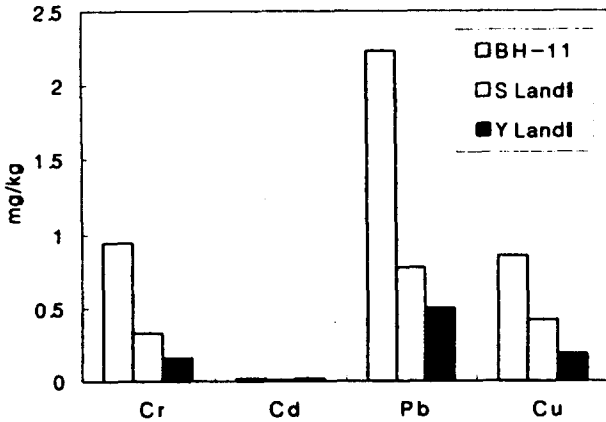


Fig. 3. Comparisons of metal concentrations of the two landfill underground soils leached by KEP method.

타내었다. BH-11이 비교시료로 채취되어 분석된 값이다. 유해중금속인 Cr, Cd, Pb, Hg, As, Cu에 의한 하부토양의 오염은 거의 없는 것으로 조사되었다. 이는 폐기물 자체에 유해 중금속의 함유량이 매우 적으며 하부토양의 투수계수가 매우 적기 때문에 침출수가 15 ~ 30 m까지 침투하지 못하기 때문으로 분석된다.

Table 7에서와 같이 Na, K, Mg, Ca 등은 바닷물의 특성을 나타내고 있으며 Na의 농도가 1,400 ~ 5,600 mg/kg까지 높아 하부토양이 바닷물에 잠겨있는 것으로 볼 수 있다. 그리고 BH-11의 비교시료에서 용출된 값과 두 매립지 하부토양시료에서 용출된 금속이온들의 농도에 뚜렷한 차이가 없다. 이는 원지반에서도 중금속이 거의 나타나고 있지 않기 때문에 폐기물로부터 용출된 양

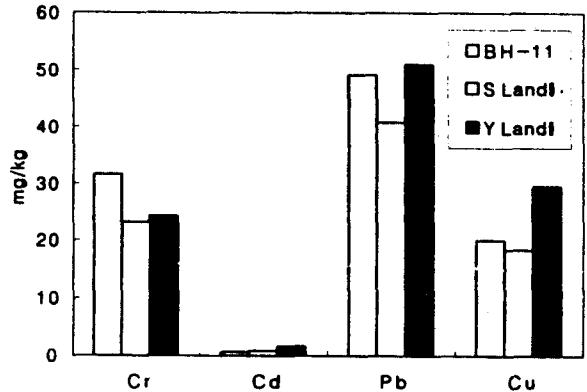


Fig. 4. Comparisons of metal concentrations of the two landfill underground soils leached by Acid Digestion method.

이 적은 것으로 분석된다. 또한 Table 7에 나타난 불규칙한 농도분포는 여러성분이 퇴적 당시 환경에 따라 차이가 생긴 것이며 폐기물 매립장에 의한 침출수에 의해 오염된 것이 아닌 것으로 판단된다.

측정된 VOCs값들을 Table 8에 나타내었다. 휘발성 유기오염물질들 중에는 분해가 잘 되지 않는 chloroform(CH₃Cl)이 ppb 수준의 낮은 농도로 검출되었다. trichlorofluoromethane과 tetrachloroethane이 일부 검출되었고 그외의 항목은 거의 검출되지 않았다. 용출된 시료는 미세한 부유물질들로 인하여 filtering을 하기가 어려웠으며 진공펌프를 이용하여 filtering을 하는 과정에서 일부 휘발되었을 것으로 판단된다. 용출되었던 VOCs조차도 부유물질에 재흡착되어 제거되었을 가능성도 매우 높을 것으로 판단된다. 이와같이 실험과

정에서 부득이하게 발생했던 어려운 과정들에서 많은 VOCs가 손실된 것으로 판단되어 무게 비에 대한 농도는 생략하였다. Table 8에 나타난 시료의 농도차이도 어느 정도의 측정오차가 포함되어 있으며 비교시료와 매립장 하부토양의 VOCs농도에 뚜렷한 차이가 나타나지 않았기 때문에 폐기물로부터 용출된 침출수에 의하여 오염되었다는 증거를 찾을 수가 없다.

3.2.2 전량분해에 의한 용출(Acid Digestion)

Acid digestion에 의하여 용출시킨 시료는 중금속류에 대해서만 분석하였다. 일반 유기물질이나 휘발성 유기물질들은 산으로 소화(digestion)시키는 과정에서 분해되고 휘발되기 때문에 용출 후에 얻은 값이 큰 의미를 갖지 못한다. 금속이온들에 대한 분석결과를 Table 9에 정리하였다.

Acid digestion에 의하여 용출시킨 용액을 진공펌프를 이용하여 GF/C여지로 여과하여 ICP로 분석하였다. Acid digestion에 의하여 용출된 금속들의 양이 KEP법에 의하여 용출된 양보다 많았다. 이는 금속성분들이 흡과의 물리화학적 흡착성이 강해서 일반적인 자연환경적인 조건에서는 용출이 잘 되지 않았으나 acid에 의하여 용출시켰을 때 훨씬 많은 양이 용출되었다. KEP법에 의하여 용출된 양과 Acid digestion에 의하여 용출시킨 중금속류의 일부에 대한 비를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3에서 S매립장과 Y매립장으로부터 채취한 시료에서 용출된 중금속 농도가 매립장밖의 BH-11에서 채취한 시료에서 용출된 농도와 비교하였다. 여기서 Cr, Pb, Cu의 농도도 매립장밖에서 가장 높고 S매립장에서 다음 높고 Y매립장에서 가장 낮게 측정되었다. 그러나 Acid Digestion 방법에 의한 용출에서는 세 지역의 샘플에 뚜렷한 경향이 없고 농도도 비슷하여 KEP법에 의한 농도차이는 우연한 것으로 분석된다. 왜냐하면 KEP법에 의한 용출에서 매립장 밖의 시료에서 중금속의 농도가 가장 높고 폐기물이 덜 분헌 S매립장에서 많이 분헌 Y매립장 보다 높은 것은 논리상 맞지 않기 때문이다.

이처럼 KEP법에 의한 용출보다 Acid digestion에 의한 용출에서 현저하게 많이 용출이 된 이유는 KEP법에서 단지 약간의 산성에서 shaking하여 용출을 시킨 반면 Acid digestion법에서는 강산을 섞어 고온으로 가열하여 용출시켰기 때문이다. 금속의 이온들은 강산성에서 용출되어 물에 녹는 반면 중성근처에서는 수산화물을 만드는 등 토양과의 흡착성질과 침전효과에 의하여 용출되는 양이 현저히 줄어든다. 토양에 많은 양의 중금속이나 금속들이 함유되었다 하더라도 일반 자연환경에서 자연계의 물속으로 많이 용출되지 않는 이유이다.

두 방법 중에서 KEP법은 비교적 자연상태의 환경에서 토양으로부터 용출될 수 있는 오염물질을 추정할 수 있는 방법이 될 수 있고 Acid digestion법은 토양중에 실제로 함유된 전체의 오염물질을 추정하는데 사용될 수 있다.

3.3 고 찰

초기에 일부 일반폐기물이 매립되고 건설폐기물과 건설잔토, 준설토 등이 주로 매립된 S매립장 보다 일반폐기물만 매립된 Y매립장의 침출수에서 유기물질과 VOCs의 농도가 대부분 높았다. 특히 절대농도는 ppb 수준으로 낮았으나 VOCs의 농도에서 뚜렷한 차이를 보였다.

유해중금속의 농도도 Y매립장의 침출수에서 더 높게 나타났다. 매립된 일반폐기물의 양이 많을수록 침출수 속의 VOCs와 중금속들이 많이 용출되는 것으로 나타나으나 절대농도는 높지 않음이 밝혀졌다.

매립장 하부토양은 침출수의 영향을 받지 않았다. 하부토양이 해안 점토층으로 이루어져 침출수가 점토층을 침투하지 못한 것으로 분석된다. 이는 하부토양의 중금속 농도가 비교시료보다 높지 않았고 토양 용출에서 유해 유기물의 농도가 매우 낮거나 거의 검출되지 않은 것으로 판단할 수 있다.

일반적으로 폐기물매립장을 건설할 때 인공적인 하부 차수막을 새지 않게 건설하기가 쉽지 않은 것을 감안할 때 매립장 가장자리에 대한 차수벽을 효과적으로 건설하면 해안 점토층을 이용한 폐기물매립장의 건설은 타당한 방법이 될 수 있는 것으로 분석된다.

4. 결 론

S매립지와 Y매립지로부터 용출되는 침출수 대부분의 중금속과 휘발성유기오염물질들의 수질인자에서 Y매립지의 농도가 높았다.

토양은 미세한 무기성 입자와 산화말기의 유기물질 일부로 구성되어 있었다.

하부토양은 KEP법으로 용출했을 때 보다 Acid Digestion법에 의하여 용출한 결과가 훨씬 높은 금속이온들이 용출되었다. 그러나 두 방법에서 모두 비교시료보다 하부토양의 오염인자들의 농도가 높지 않았기 때문에 두 매립장 하부토양은 침출수의 오염 정도에 관계 없이 오염이 되지 않은 것으로 분석되었다. 매립장 하부는 바닥물이 유입되어 포화되어 있는 상태였으므로 Ca, Mg, K, Na, Cl 등이 매우 높은 농도였다.

해안의 점토층을 이용한 두개의 폐기물 매립장에서 하부토양으로 유출되는 침출수의 차수가 가능하였다. 따라서 매립장 주위의 차수를 철저히 할 경우 토양 및 지하수 오염측면에서 본 부지와 유사한 지반특성을 갖는 해안의 점토층을 이용한 폐기물 매립장의 건설은 타당한 것으로 밝혀졌다.

참 고 문 헌

- 박순원, 최의소. 하수슬러지 주입토양에서 오염물질의 이동에 관한 연구. 대한토목학회논문집. 제14권 제5호, 1994년 9월.
- 사단법인 한국폐기물학회. 폐기물처리기술과 재활용. 동화기술. 1995.
- 환경처. 폐기물 공정시험법. 1995
- APHA, AWWA, WPCF. "Standard Method for the Examination of Water and Wastewater". 18th edition. 1992.

- Henry V. Mott, Kenneth E. Hartz, and David R. Yonge. "Metal Precipitation in Two Landfill Leachates". ASCE. Jour. of Environmental Engineering. Vol. 113, No. 3, June 1987.
- Naresh K. Rohatgi and Kenneth Y.Chen. "Fate of Metals in Wastewater Discharge to Ocean". ASCE. Jour. of Environmental Engineering. Vol. 102, No 148, June 1976.
- P. M. Huang, J. Brethelin, J. -M. Bollag, W. B. McGill, and A. L. Page. "Environmental Impact of Soil Component Interactions". CRC Press Inc.,1995.
- N. Iwami, A. Imal, Y.Inamori, and R. Sado. "Treatment of a Landfill Leachate Containing Refractory Organics and Ammonium Nitrogen By the Microorganism - Attached Activated Carbon Fluidized Bed Process". Wat. Sci. Tech. Vol. 26, No. 9~11,1992.
- Vernon L. Snoeyink and David Jenkins. "Water Chemistry". John Wiley & Sons, Inc. 1980.