

사용종료매립지에서 시간경과에 따른 침출수의 특성

김은호 · 김형석¹⁾ · 성낙창 · 허종수²⁾

동아대학교 환경공학과, ¹⁾부산여자대학교 환경학과, ²⁾경상대학교 농화학과

Characteristics of Leachate with Passed Time in Expired Landfill

Eun-Ho Kim, Hyeong-Seok Kim¹⁾, Nak-Chang Sung and Jong-Soo Heo²⁾(*Department of Environmental Engineering, Dong-A University ; ¹⁾Department of Environmental Science, Pusan Women's University ; ²⁾Department of Agricultural Chemistry, Gyeongsang National University*)

Abstract : In this study, we can be obtained the following conclusions about the characteristics of leachate with passed time in the expired landfill. Compared with the expired landfilling H. and S., pH shows a tendency to increase in E., because NH₃ is created by anaerobic degradation and dissolved in leachate. The initial BOD and COD of E. and S. are high in similar concentration but H. is low, Since the organics of waste in H. are lower than in E. and S. during landfilling. SS of E. in concentration is increased and very altered, because food of combustible in E. is higher than it in H. and S.. According to passed time, T-N is high in concentration but T-P shows a similar tendency. Heavy metals of leachate is lower than threshold concentrations. If leachate is treated biologically, microbes are not inhibitory.

서 론

현재 국내 생활계 폐기물의 약 81.1%를 매립에 의하여 처리하고 있고, 생활의 윤택함과 더불어 갈수록 그 성상의 다양성 및 양이 증가할 것으로 추정되고 있다.

생활계 폐기물의 처리방법으로서 소각에 의한 감량화 및 재활용의 방안이 실시되고 있으나, 소각의 경우에도 최종처분이 아닌 중간처리 단계이므로 소각재의 매립문제도 심각하게 대두될 것으로 생각된다.

따라서, 소위 NIMBY 현상에 의한 지역주민의 반대여론 및 과도한 재정적인 부담 등으로 인한 매립지의 확보가 곤란할 뿐 만 아니라 매립지에서 발생하는 침출수 또한 큰 문제가 아닐 수 없으며 침출수의 효율적인 관리는 무엇보다 중요하다.

침출수의 특성은 쓰레기내의 유기물 함량이나 중금속 함량, 매립후 경과시간, 수분함량, 온도, 수분저장능력, 다짐정도, 매립지의 형태, 토양의 성질, 기상조건, 시료채취 방법과 분석방법 등의 인자에 따라 각 성분의 농도변화가 심하고 다양하게 변화하므로 적정처리를 위한 처리장 용량, 처리방식의 선정 및 운전관리가 어려울 뿐만 아니라 대표적인 침출수 농도를 제시하기 어렵다¹⁾.

현재 국외에서는 시간경과에 따른 매립장 침출수의 유출 특성을 연구한 결과가 나와있으나, 국내에서는 아직 장기간에 걸친 매립장 침출수의 유출경향 또는 특성을 연구한 예가 별로 없어 구체적이고 효율적인 처리방안을 제시하지 못하고 있다.

이에 부응하기 위하여 본 연구에서는 국내 매립장의 현황에 따른 침출수 성상에 관한 조사연구의 일환으로써 대표적인 매립장을 선정하여 매립완료후 경과시간에 따른 침출수 수질의 변화를 실험적으로 고찰하고 폐기물처리의 중요한 문제점인 침출수 처리에 관한 장래의 처리계획의 기초자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

쓰레기 매립지 현황조사

부산광역시의 대표적인 사용종료매립지인 H. 매립지 북구 화명동, S. 매립지 해운대구 석대동 및 E. 매립지 사하구 하단동을 대상으로 현황조사를 행하였다.

매립지 쓰레기 성상조사

쓰레기의 성상은 크게 가연성 및 비가연성 물질로 분류된다. 가연성 성분은 종이류, 음식물류, 섬유류, 플라스틱류, 목재류, 고무·피혁류 등이며 비가연성 성분은 금속류, 유리·초자류, 기타로 세분된다²⁾.

본 연구에서는 각 매립지의 매립당시 쓰레기 성상은 전국 폐기물 발생 및 처리현황³⁾을 근거로 조사하였다.

쓰레기 매립지의 침출수 특성조사

부산광역시의 대표적인 사용종료 생활 쓰레기 매립지 3개 지점(H. 매립지, S. 매립지 및 E. 매립지)을 선정하여 각 매립지의 매립 초기(H. 매립지 : 1985년 6월, S. 매립지 :

1987년 8월, E. 매립지 : 1993년 6월)부터 1995년 11월까지 매립지 침출수를 대개 월 1회씩 pH, SS, COD_{Cr}, BOD, T-N, T-P, NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N 및 중금속 등을 조사하였으며 각 항목의 분석은 환경오염공정시험법⁴⁾ 및 APHA의 Standard Methods⁵⁾에 준하여 분석하였다.

결과 및 고찰

쓰레기 매립지 현황

부산광역시는 날로 증가하고 있는 쓰레기의 원활한 수거 처리를 위하여 장비의 현대화 및 수거업무의 민간위탁을 점차로 확대하여 가고 있으나, 대부분의 쓰레기를 매립에만 의존하고 있어 장래 매립지 확보 등의 많은 문제점이 발생될 것으로 예상되고 있다.

한편, 부산광역시의 쓰레기 매립지 현황은 Table 1에 나타난 바와 같다.

H. 매립지의 경우 평균매립고는 5.0m에 바닥은 점토질의 모래로 조성되어 있고 비교적 지하수위가 높아 매립지 저면에서 약 -1.0m 아래에 위치하고 있으나 침출수내 지하수 혼입은 기층토사의 성질이 투수계수가 작아 비교적 적을 것으로 판단된다⁶⁾.

있다⁶⁾.

S. 매립지의 경우 부산광역시에서 계곡매립을 최초로 시도한 지역으로 우수의 혼입을 방지하기 위한 우수차집관로를 설치하고 Cell 방식을 채택하고 있어 외부 우수의 혼입은 거의 없을 것으로 판단되며 동시에 이 지역은 지하수위가 낮아 지하수의 침출수 침투는 거의 없을 것으로 판단된다⁷⁾.

S. 매립지 침출수 처리장 시스템은 AB - Process(The adsorption bioaerated treatment process)이며 효율을 증대시키기 위하여 폭기조에 유동성 Media를 첨가한 것이 특징이지만 쓰레기 매립지 아래에 위치한 처리장은 '87년 6월 19일 부터 가동하였으나 '88년 6월 이후 매립지에서 집수 후에 S. 하수종말처리장으로 전량 이송처리하고 있다⁷⁾.

E. 매립지의 경우 낙동강 하류지역으로써 바다와 접하고 있고, 지표면하 0.3~0.5m 범위에서 지하수가 형성되어 있으며, 또한 낙동강 수위의 영향을 받아 다소 차이가 있을 것으로 판단된다⁸⁾.

E. 매립지는 일반적인 매립지와 달리 매립하기 전에 감광화를 위하여 일정한 덩어리 형태(Bale)로 압축하여 매립하는 사전압축매립방법과 Cell 방식을 채택하고 있다⁸⁾.

E. 매립지의 침출수 처리는 집수정에 유입된 침출수를 1차 약품 응집침전시킨 후에 처리수를 J. 하수처리장에 유입·처리하고 있다⁸⁾.

Table 1. The present conditions of each landfill.

Sections	H. landfill	S. landfill	E. landfill
Sites	Hwamyong-dong	Seokdae-dong	Hadan-dong
Area(m ²)	514,345	612,888	315,474
Average landfill height (m)	5.0	16.0	10.8
Total landfill amount(m ³)	2,127,000	7,985,000	3,171,467
Landfill period	'85.5~'87.6	'87.6~'93.5	'93.6~'95.6
Cover soil(cm)	Intermediate 30 Final 60	Intermediate 30 Final 60	Over daily minimum 15 Intermediate 30/3.0m 30 Final 90
Liner system	t=0.3mm PE Film 2 Sheet	t=0.3mm PE Film 2 Sheet	t=1.5mm HDPE Sheet
Storm treatment	Seperately collective treatment		
Water collection system	φ 200mm pipe	φ 300mm pipe	φ 250mm pipe
Leachate volume(m ³ /d)	250	400	1,000
Method of leachate treatment	Physical · chemical · biological		Chemical
Landfill method	Sanitary	Sanitary	Compacted

H. 매립지의 침출수처리 시스템은 1차 생물학적 처리 + 2차 약품처리 + 활성탄 · 제오라이트 여과방식을 채택하고

매립 쓰레기의 성상

매립 쓰레기의 성상파악은 쓰레기 처리의 장비선택, 처리계통설정 및 관리계획 등을 위한 중요한 일이다.

이러한 성상은 그 지역의 생활양식, 소득정도, 문화수준, 생활습관에 따라 아주 상이하게 나타난다.

일반적으로 가연성 물질의 증가는 GNP 성장에 거의 비례적으로 증가하게 된다.

과거에는 연탄재가 차지하는 비율이 외국과는 달리 높은 것이 특징이었으나, 도시지역의 취사, 난방의 연료가 점점 도시가스와 석유 등으로 대체되고 있어 연탄사용의 감소추세가 가속화됨에 따라 상대적으로 가연성 물질의 조성비율이 계속 높아질 것으로 예상된다.

매립지내 분해속도는 매립쓰레기의 성분에 따라 다르며, 분해용이성 성분은 풀, 잡초류 등이 있고 중위급 분해성 성분은 종이류, 목재류 섬유류 등이며, 플라스틱, 고무류 등은 난분해성 성분에 속한다^{9,10)}.

특히, 쓰레기 중 지방이나 단백질 또는 탄수화물을 함유하고 있는 주방쓰레기가 많이 포함되면 분해용이성 성분의 함유율이 높아져 쓰레기 분해속도가 빠르게 된다¹⁰⁾.

Table 2는 부산광역시의 각 매립지의 매립당시 폐기물 성상을 나타내고 있는데, 각 매립지의 성분비를 비교해 보면 음식물류 및 연탄재는 다른 성분에 비하여 월등히 높았다.

최근에 매립이 종료된 E. 매립지의 경우 음식물류가 차지하는 비율이 45.7%로 높은 반면에 연탄재는 15.7%를 차지하고 있다.

매립이 가장 오래된 H. 매립지의 경우 음식물류가 25.7%로 낮은 반면에 연탄재가 차지하는 비율이 51.34%로 높게 나타났다.

이는 E. 매립지와 대조적인 양상을 보이고 있는데, H. 매립지 조성 당시 연탄재가 차지하는 비중이 높은 반면에 상대적으로 음식물류가 차지하는 비율이 낮기 때문이다.

Table 2. Compositons of waste in each landfill (Unit : %)

Sections	Combustible				Non - combustible			
	Food	Paper	Wood	Subtotal	Briquette ash	Glass	Other	Subtotal
E. landfill	45.7	17.0	6.9	69.6	15.7	5.2	9.5	30.4
S. landfill	36.6	11.95	5.13	53.68	33.6	4.2	8.52	46.32
H. landfill	25.7	5.3	4.86	35.86	51.34	2.57	10.23	64.14

또한, S. 매립지의 경우 음식물류 36.6% 및 연탄재 33.6%로써 비슷한 비율은 차지하고 있다.

쓰레기 매립지의 침출수 특성

pH 변화

Fig. 1은 부산광역시 각 매립지 침출수의 pH 변화를 나타낸 것이다.

혐기성 개량형 위생매립(사전압축매립방식)을 채택한 E. 매립지의 경우 pH는 6.9~9.6범위에서 변화하고 있는 반면에 혐기성 위생매립인 H.와 S. 매립지에서는 매립초기에는 E. 매립지보다 낮은 약산성을 띄다가 점점 중성 부근을 유지하는 경향을 보이고 있다.

매립경과시간에 따라 pH가 차이를 보이고 있는데, 특히 최근에 사용종료된 E. 매립지 의 경우 H.와 S. 매립지에 비하여 pH가 아주 급격하게 증가하는 추세를 나타내고 있다.

이는 혐기성 분해작용으로 인하여 생성된 NH₃의 용해와 NO₃의 탈질과정으로 pH가 상승하는 것으로 추정된다.

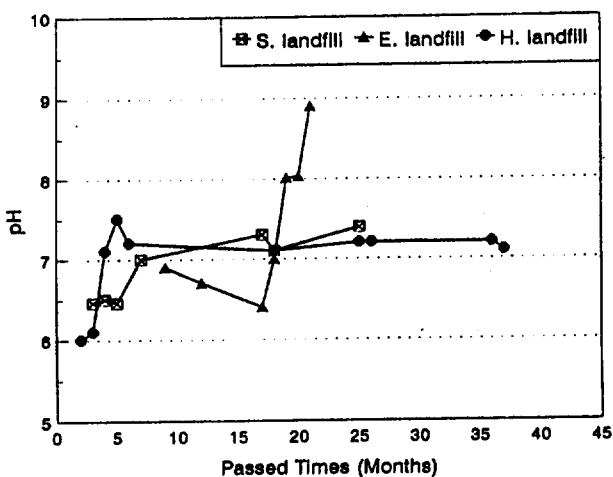


Fig. 1. pH variatigns of leachate to with passed time in each landfill.

BOD 및 COD_{Cr} 변화

Fig. 2~Fig. 3은 부산광역시 각 매립지에서 발생된 침출수중 매립경과시간에 따른 BOD와 COD_{Cr}의 변화를 나타내고 있으며 전반적으로 부산광역시 각 매립지에서 발생된 침출수 원수의 특성은 유기물 변동이 매우 크다.

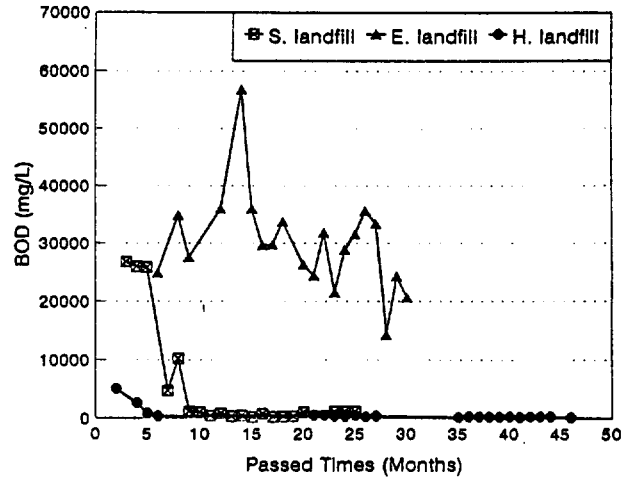


Fig. 2. BOD variations of leachate with passed time in each landfill.

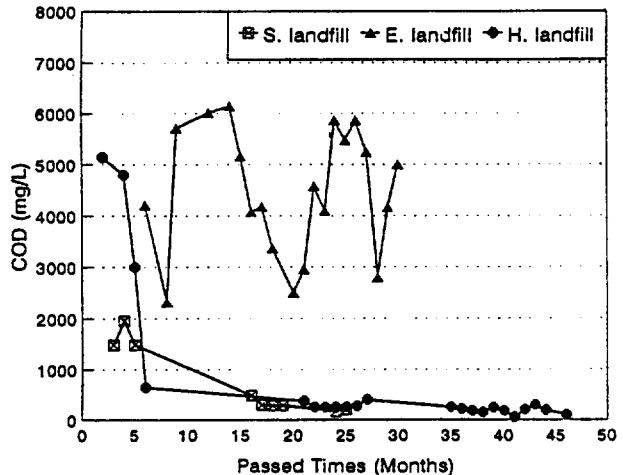


Fig. 3. COD_{Cr} variations of leachate with passed time in each landfill.

E.와 S. 매립지의 경우 매립초기에는 비슷한 농도로 높은 반면에 H. 매립지의 초기농도는 낮다.

이는 매립당시 쓰레기의 성상이 다른 매립지에 비하여 유기성 물질의 농도가 낮기 때문으로 판단된다.

또한, 가연성 쓰레기 중 음식물류의 비율이 약 69.6%를 차지하고 있는 E. 매립지의 경우 BOD와 COD_{Cr} 농도는 각각 최대 56,763mg/l와 6,146mg/l까지 상승하며 시간경과에 따라 급속한 감소현상을 나타내고 있다.

매립지에서 쓰레기의 분해정도를 추정할 수 있는 방법으로 침출수중 BOD/COD의 비로 평가하는데²⁾, BOD/COD 비가 낮을 수록 안정화가 잘 되고 있음을 나타낸다.

E. 매립지의 경우 BOD/COD 비가 매립초기 8개월째에

Table 3. Concentrations of T-N and T-P of leachate with passed time in each landfill. (Unit : mg/ℓ)

Passed times(day)	H. landfill		S. landfill		E. landfill	
	T-N	T-P	T-N	T-P	T-N	T-P
60	436.2	-				
75	322.0	19.8				
90	2884.8	16.5				
120	271.9	13.2				
121			1565.4	22.0		
127			2383.8	31.0		
135	429.1	19.8	2722.1	41.2		
142			1513.2	31.3		
150	510.3	-				
165	248.0	-				
196					1059.5	10.7
246					2354.0	1.07
548	248.2	-				
552			1803.5	40.1		
565			1854.2	38.4		
591					3239.8	12.7
615					3063.1	25.8
629					2134.3	32.3
654					1214.9	80.9
660					1618.9	36.5
662					2240.0	43.7
663					2399.2	38.6
703					2900.2	30.0
709					2805.1	38.9
718					2736.0	36.0
733	663.6	21.3				
741	584.0	22.0				
777					1027.7	26.0
790					3169.9	38.4
809					2448.0	36.0
817					3419.0	36.1
824					3368.2	35.8
890			2312.2	40.1		
944			2413.7	20.1		
1092	535.8	23.1				
1107	588.4	24.4				
1135			3317.8	48.4		
1393	3011.6	32.0				

15.0이며 30개월쯤에 4.1로써 활발한 분해상태에서 안정화 단계로 진행되고 있음을 알 수 있다.

S. 매립지 또한 매립초기 3개월째에 18.0이며 25개월쯤에 0.3로써 활발한 분해상태에서 거의 안정화가 완료된 것으로 추정된다.

상대적으로 매립이 가장 오랜된 H. 매립지의 경우 매립 초기 2개월째에 1.0이며 46개월쯤에 0.4로써 매립초기부터 BOD/COD 비가 낮게 나타났으며 현재 거의 안정화가 완료된 것으로 사료된다.

SS 변화

Fig. 4에서 보는 바와 같이 가연성 물질중 음식물류가 차지하는 비율이 높은 E. 매립지의 경우 H.와 S. 매립지에 비하여 초기부터 전반적으로 고농도의 SS를 유지하고 있으며, 상당히 심하게 농도가 변화하는 것을 알 수 있다.

또한, E. 매립지의 경우 오랜기간동안 고농도로 유지하는데, 이는 다른 매립지에 비하여 가연성 물질의 양이 높기 때문으로 여겨진다.

H.와 S. 매립지의 경우 매립초기에는 높은 농도를 보이다가 급격한 감소현상을 나타내고 있는데, pH가 E. 매립지에 비해 낮아 상대적으로 용출율이 높아서 나타난 결과로 사료된다.

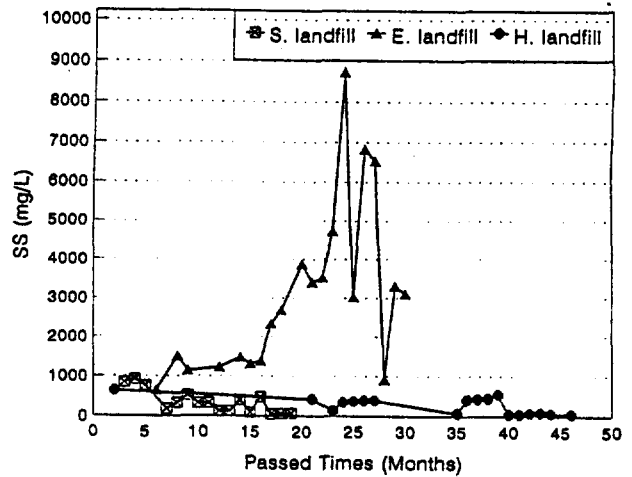


Fig. 4. SS variations of leachate with passed time in each landfill.

영양염류의 변화

Table 3은 각 매립지에서의 매립경과시간에 따른 침출수 중 T-N 및 T-P 농도변화를 나타낸 것인데, 이에 의하면 매립시간이 경과할수록 T-N의 농도가 증가하는 현상을 보이지만 T-P는 비슷한 양상을 나타내고 있다.

Table 4는 각 매립지에서의 NH₃-N, NO₂-N 및 NO₃-N의 농도를 나타낸 것으로써 Table 3의 T-N 농도와 비교하여 보면 영양염류 중에 T-N 성분은 NH₃-N가 대부분을 차지하고 있어 그 농도가 높게 나타났으며 질산성 질소는 거의 미량으로 존재하는 것으로 나타났다.

Table 4. Concentrations of NH₃-N, NO₂-N, and NO₃-N of leachate with passed time in each landfill. (Unit : mg/ℓ)

Passed times (day)	H. landfill			S. landfill			E. landfill		
	NH ₃ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	NH ₃ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	NH ₃ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N
733	660.0	1.14	2.45						
741	580.0	1.2	2.84						
809							1006.5	5.13	4.24
874							2662.0	0.72	17.7
885							2264.0	1.36	23.3
890				2300.0	2.1	10.1			
892							2310.0		
944				2400.0	2.3	11.4			
1092	530.0	0.84	5.0						
1107	580.0	1.9	6.5						
1135				3275.0	7.66	35.14			

H. 매립지의 경우 E.와 S. 매립지에 비하여 NH₃-N의 농도가 아주 낮게 나타났는데, 이는 Table 2에서와 같이 가연성 물질이 차지하는 비율이 상대적으로 낮기 때문이다.

일반적으로 생활쓰레기의 질소 함유량은 약 0.81% 정도이며, 암모니아는 쓰레기 매립지에서 분해의 최종 생성물이다. 이렇게 생성된 과도한 암모니아는 생물학적 처리시 BOD : N : P 비율을 파괴하여 처리효율을 저하시키거나 심각한 악취를 유발하게 된다.

또한, 고농도의 NH₃-N은 생물학적 처리시 암모니아 독성을 야기하므로 충분한 폭기로 질산화 처리하지 않고 방류할 경우 배출수계에 산소가 다량 소비되는 수질오염상의 문제를 일으킬 수 있을 것이다.

H.와 S. 매립지의 침출수의 특성을 보면 매립초기에는 침출수 중에 질소성분은 충분하지만 인성분이 절대적으로 부족하여 생물학적 처리시 BOD : T-P가 100 : 1이 되도록 인을 인위적으로 첨가해야 할 것이며 매립시간이 경과함에 따라 유기물 농도는 감소하는 반면에 T-N 농도의 증가현상을 보이고 있어 물리·화학적 처리가 효율적일 수도 있다.

중금속 농도

생물학적 처리는 생물의 대사기능을 이용한 처리공정으로 침출수내 미생물의 호흡계를 저해하는 중금속류를 포함하지 않는 것이 전제조건이다.

이들이 포함되어 있을 경우 미생물의 유기성 분해와 합성기능을 현저히 감소하게 된다. 일반적으로 생활계 폐기물 매립지로 부터 발생하는 침출수는 미량의 중금속을 함유하고 있어 생물학적 처리에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다.

이는 혐기성 처리의 경우 중금속이 황화물 형태로 침전

되며, 호기성 처리의 경우 수산화물 형태로 침전되기 때문이다.

또한, 일반적으로 pH가 높을 경우 중금속의 용해도 감소로 인하여 침출수 중에 중금속 농도가 낮음을 알 수 있다.

Table 5는 생물학적 처리에 악영향을 미칠 수 있는 중금속의 한계농도를 나타낸 것이며¹¹⁾, Table 6은 부산광역시 각 매립지에서의 침출수 중 대표적인 중금속 농도로써 Table 5와 비교해보면 대부분이 중금속의 한계농도 보다 낮은 농도를 보이며 생물학적 처리시 미생물에 그다지 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

만약, 특정한 중금속이 고농도로 존재할 경우에 생물학적 처리에 방해인자로 작용하므로 화학적 침전등의 방법으로 사전에 처리하여야 할 것이다.

Table 5. Threshold concentrations of heavy metals in biological treatment.

Items(mg/ℓ)	Aerobic treatment	Anaerobic treatment
Fe	1,000	5.0
Cu	1.0	1.0~10.0
Zn	0.08~10.0	5.0~20.0
Cd	10.0~100	0.02
CN	0.1~5.0	4.0
Pb	5.0	-
Cr ⁺⁶	1.0~10.0	5.0~50.0
As	0.7	1.6
Hg	0.1~5.0	1,365
Cr	50.0	50.0~500

Table 6. Concentrations of heavy metals in leachate.

Items(mg/ℓ)	H. landfill	S. landfill	E. landfill
Fe	-	-	7.74~249.4
Cu	0.02~0.1	ND~0.02	ND~2.2
Zn	0.08~3.92	0.09~2.04	1.43~5.2
Cd	0.01~0.04	0.01~0.04	ND~0.13
CN	-	-	ND~0.03
Pb	0.1~0.45	0.19~0.5	0.13~3.6
Cr ⁺⁶	-	-	ND~0.4
As	-	-	ND~0.03
Hg	-	-	ND~0.01
Cr	0.1~0.8	ND~0.25	0.16~0.93

요 약

부산광역시의 대표적인 사용종료 쓰레기매립지인 H. 매립지, S. 매립지와 E. 매립지의 시간에 따른 침출수의 특성을 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 최근에 사용종료된 E. 매립지의 경우 H.와 S. 매립지에 비하여 pH 변화특성이 아주 급격하게 증가하는 추세를 나타내고 있는데, 이는 혐기성 분해작용으로 인하여 생성된 NH₃의 용해와 NO₃의 탈질과정으로 pH가 상승하는 것으로 추정된다.

2. BOD와 COD_{Cr}의 변화는 아주 크며, E.와 S. 매립지의 경우 매립초기에는 비슷한 농도로 높음 반면에 H. 매립지의 초기농도는 낮게 보이고 있는데, 이는 매립당시 쓰레기의 성상이 다른 매립지에 비하여 유기성 물질의 농도가 낮기 때문으로 판단된다.
3. 가연성 물질 중 음식물류가 차지하는 비율이 높은 E. 매립지의 경우 H.와 S. 매립지에 비하여 초기부터 전반적으로 고농도의 SS를 유지하고 있으며, 상당히 심하게 농도가 변화하는 것을 알 수 있다.
4. 매립시간이 경과할수록 T-N의 농도가 증가하는 현상을 보이지만 T-P는 비슷한 양상을 나타내고 있으며 T-N 성분은 NH₃-N가 대부분을 차지하고 있고 질산성 질소는 거의 미량으로 존재하는 것으로 나타났다.
5. 침출수 중 대표적인 중금속은 대부분이 한계농도 보다 낮은 농도를 보이며 생물학적 처리시 미생물에 그다지 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 신항식(1993). 침출수처리, 한국과학기술원 토목공학과 제 8차 환경공학분야 산학협동공개강의, 231~267.
2. 정대순(1996). 부산시 공동주택 폐기물의 발생특성 및 비용분석, 부산대학교 환경대학원.
3. 환경처(1994). 전국 폐기물 발생 및 처리현황.
4. 김종택(1992). 환경오염공정시험법해설(수질분야), 형설출판사.
5. APHA(1987). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 17th edition, Washington, D.C..
6. 김은호(1993). HELP Model을 이용한 매립지에서의 물수지 수치해석, 동아대학교 대학원.
7. 이종근(1988). 도시쓰레기 매립장에서 유출되는 침출수의 처리에 관한 연구, 부산대학교 환경문제연구소보, 6 : 15~28.
8. 부산직할시(1994). 을숙도 매립장조성 2차 기본계획 및 실시설계 보고서.
9. 성낙창(1991). 도시폐기물 매립지에서의 생물학적 안정화에 관한 기초연구, 동아대학교 환경문제연구소보, 14(1) : 5~25.
10. 이승무(1993). 매립지 가스추출과 이용기술, 한국과학기술원 토목공학과 제 8차 환경공학분야 산학협동공개강의, 205~227.
11. J.K. Park. Industrial Wastewater Toxicity Reduction, Dep. of Civil & Environmental Engineering.