

연구논문

침출수 특성 분석을 통한 사용종료 비위생매립지 안정화 평가
- 살미매립지 사례연구 -

홍상표 · 김광렬*

청주대학교 환경공학과, 충북대학교 환경공학과*

(2006년 7월 20일 접수, 2006년 9월 21일 승인)

Assessment on Stabilization of Open-dumping Landfill Based on Leachate
- A Case Study of Salmi Landfill -

Hong Sang-Pyo · Kim Kwang-Yul*

Dept. of Environmental Engineering, Cheongju University

Dept. of Environmental Engineering, Chungbuk University*

(Manuscript received 20 July 2006; accepted 21 September 2006)

Abstract

To utilize a closed municipal solid waste landfill site in environmentally secure conditions, it is necessary to verify the stabilization level of landfill leachate. To assess leachate stabilization of an open-dumping municipal solid waste landfill site (Salmi Landfill) which is located at the vicinity of Chungju Reservoir which flows into Paldang Reservoir utilized as Seoul Metropolitan water supplies, the landfill history and surrounding characteristics of the landfill site were surveyed.

In this investigation, waste, leachate, groundwater and surfacewater samples from this landfill were physically and chemically analyzed, and the analysis results were evaluated by 'The Criteria of Landfill Waste Stabilization (CLWS)', 'Discharge Criteria of Landfill Leachate', 'The Criteria of Domestic Use in Groundwater Quality', and 'The Criteria of Domestic Use in Surfacewater Quality' that promulgated by Korean Ministry of Environment.

From the analysis results on the Salmi open-dumping landfill, C/N ratio was 18.9 and BOD/COD_{Cr} ratios in leachate were higher than 1/10. Based on the CLWS, this results seemed to imply that the process of leachate stabilization at this landfill was still proceeding.

Key words : Leachate, Stabilization, Open-dumping Landfill, BOD/COD_{Cr} ratio

1. 서론

우리나라의 경우 매립이 완료된 비위생매립지가 침출수 처리시설, 최종복토, 매립지 가스 처리설비 같은 환경오염방지시설을 적합하게 갖추고 있는 곳은 드문 실정이다(한국자원재생공사, 1995). 이러한 상황은 매립지 주변의 지하수, 지표수 및 토양을 오염시킬 수 있으며, 이로 인한 문제점이 점차적으로 부각되고 있는 추세이다(Hwang *et al.*, 2002).

그리고 수리지질학적 특성을 무시한 매립지 위치선정의 경우도 많아 매립지의 침출수로 인한 지하수 오염의 가능성이 특히 우려된다(Bedient *et al.*, 1999). 사용종료된 비위생매립지의 환경오염분석에 기반한 적절한 사후관리 체계의 정립은 현재 사회적으로 만연되어 있는 환경오염 혐오시설에 대한 불신감을 완화시킬 수 있을 뿐만 아니라 매립지 인근의 지하수, 지표수 등 수자원과 토양의 오염을 최소화 할 수 있어 미래에 발생할 수도 있는 환경적, 사회적 및 경제적 손실을 저감시키는데 기여할 수 있을 것이다.

침출수는 폐기물 자체에 함유된 수분, 강수, 지표수의 침투, 지하수 유입 등으로 인하여 발생하는 것이다. 침출수는 매립지내에 있는 수용성 오염물질을 주변 환경으로 전달시킬 수 있는 매체로 볼 수 있다(Christensen *et al.*, 1994).

침출수의 성분은 매립지의 매립기간, 매립된 폐기물의 종류에 따라 달라지며, 침출수의 발생량은 강수량, 증발산량, 지표면 유출율 등에 의해 결정된다(Henry *et al.*, 1996). 침출수의 발생량은 복개물질의 투수도에도 영향을 많이 받는다(Freeman, 1989). 매립지 침출수에는 유해화학물질, 중금속 등이 고농도로 존재하여 지하수 및 지표수의 오염 원인이 될 수 있다(Bedient *et al.*, 1999). 생활쓰레기 매립지에도 건전지, 페인트, 유기용제 같은 유해성 폐기물이 혼합되어 반입될 수 있기 때문에 각종 오염물질이 존재할 수 있다(Rubin, 2001).

침출수는 BOD가 높기 때문에 지표수의 용존산소를 급속히 고갈시켜 어류를 질식사시킬 수 있으며, 매립지 바닥이 투수성이 높은 지질이면 지하수를 오염시킬 수 있다. 과거의 비위생매립지에는 가정의

생활폐기물과 산업체 유해폐기물이 혼합되어 있기 때문에 중금속 슬러지, 폐유, 농약 등이 존재할 수 있다(Pfeffer, 1992).

본 연구에서는 남한강 수계에 위치한 충주호에 직접적 영향을 미칠 수 있는 충북지역의 비위생매립지로 충주시 살미 매립지를 선정하였다(충북지역환경기술개발센터, 2005). 살미 매립지의 기초자료 수집 및 현장조사를 통하여 매립지의 일반적 특성 및 매립지에서 발생하는 침출수의 수질을 분석하고, 매립지 주변의 지하수 수질분석으로 침출수에 의한 오염 가능성을 평가했다. 그리고 매립폐기물의 물리적 성상 및 화학적 조성을 분석하여 매립지 안정화 정도를 평가하여 지표수에 영향을 미치는 비위생매립지의 적절한 사후관리체계를 확립하는데 기여하고자 했다.

사용종료된 비위생매립지 정비(remediation)를 실시하기 이전 단계로 대상매립시설에 대한 기초조사 결과로 주변 환경오염에 대한 개연성을 평가한 후에 폐기물의 안정화 정도를 조사하였다. 침출수, 매립폐기물, 주변 지하수, 지표수에 대해 조사 분석하여 매립지의 안정화 정도를 파악하고 정비 사업을 수행하는데 있어 기초적인 내용을 제공하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 연구대상 매립지의 특성

충북지역에 위치한 비위생 매립지중에서 충주호 상수원에 가장 인접한 매립지로 오염에 대한 영향을 미칠 수 있는 곳을 조사한 결과 충주시 살미면 무릉리의 비위생매립지가 선정되었다(그림 1). 연구대상 매립지인 살미면 무릉리 매립지는 계곡형 매립지로서 측면으로 작은 도랑을 갖춘 수문학적 특성을 가지고 있으며, 북으로 1km 이내에 충주호와 인접하는 지형적 특성을 지니고 있다. 매립 면적이 약 12,500m²이고 총 매립량은 100,500m³이며, 1996년 10월부터 생활폐기물을 매립하기 시작하여 1999년 10월경 매립이 종료된 지역이다.

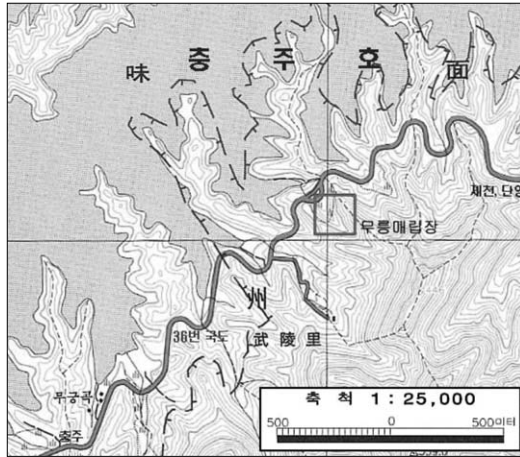


그림 1. 충주시 살미면 무릉리 매립장 지형도

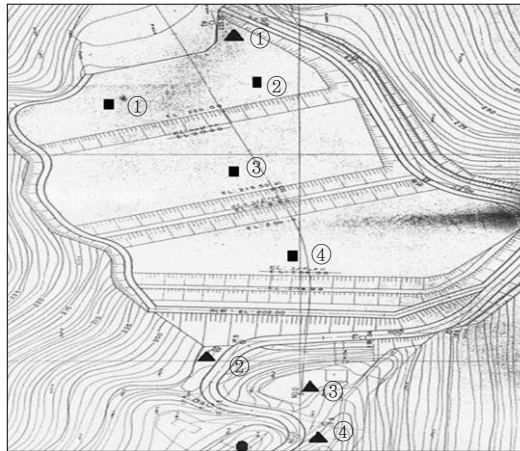


그림 2. 매립지 시료채취지점(■: 매립가스 ●: 침출수 ▲: 지하수)

연구의 정밀조사범위 및 분석항목은 사용종료매립지 정비지침(환경부, 2001)에 의한 매립지 안정화 평가 방법에 근거하여 수행하였다.

폐기물 매립지역을 4개 지점으로 나누어 매립폐기물을 굴착하여 폐기물 시료 및 매립가스 채취지점으로 이용하였고, 침출수 집수조 1개 지점, 지표수 채취 1개 지점, 지하수 감시정(monoring well) 4개 지점을 선정하여 분석하였다. 각각의 시료 채취 지점은 그림 2에 나타내었다.

2. 분석 방법

본 연구는 환경부에서 규정한 '사용종료 매립지

정비지침'에 의하여 기초조사, 정밀조사의 단계로 나누어 추진하였다. 먼저 대상 매립시설의 기초자료 및 현장조사를 통하여 주변환경의 영향정도를 평가하여 침출수로 인한 지하수 및 지표수 등의 오염의 개연성 여부를 평가하고, 매립폐기물의 종류 및 성상, 매립기간, 매립량, 매립고, 면적, 복토 실태 등에 대한 매립지의 일반 현황과 주변지역의 토지이용 현황 및 향후 토지이용계획 등을 조사하고, 매립시설 현황에 대해 기초조사를 하였다. 대상매립시설의 설치 장소 및 사후관리 상태를 조사하고, 매립지 및 주변 지역의 지형, 지리, 침출수 누출 흔적 등 주변 환경오염도를 조사하였다.

살미매립지의 현황과 매립폐기물의 특성, 매립폐기물의 분해 상태, 매립가스 등을 조사 분석하기 위해 매립지내 4개 지점을 선정하여 굴착기를 이용하여 매립지 바닥까지 7~8m 정도 굴착하였다. 매립폐기물은 폐기물 공정시험법에 따라서 화학분석 하였으며, 물리적 성상분석은 굴착된 매립폐기물을 대상으로 육안 관찰에 의해 종류별로 선별한 후 각각의 무게를 측정함으로써 물리적 조성을 조사 하였다(충북지역환경기술개발센터, 2005). 매립된 폐기물의 물리적 성상 분석을 위해 폐기물 공정시험법에 의거하여 매립폐기물 각 성분별 조성을 구하였다. 대표적 조성은 육안으로 판별하였으며 구분은 음식물쓰레기, 종이, 섬유, 비닐 및 플라스틱, 목재, 고무 및 피혁, 유리 및 도자기, 금속, 토사 및 기타 등 9가지로 나누었다. 이렇게 분류된 폐기물은 총중량에 대한 백분율로서 조성별 함량을 나타내었다.

물리적 성상 분류가 끝난 시료는 곧바로 3성분 분석을 실시하였다. 분석은 폐기물 공정시험법에 따라 수분과 고형물(TS), 휘발성 고형물(VS)와 강열잔류 고형물(FS)분석을 하였다. C/N비는 시료중 가연성 물질에 대해 전처리하여 원소분석(CE Instruments 사, EA1110)을 실시하여 산출하였다.

살미매립지 수질분석을 위해 침출수 집수조 1개소, 지하수 감시정 4개소, 지표수 1개소에서 시료를 채취하여 각각의 수질기준에 대해 수질오염공정시험법(환경부 고시 제2001-53호)에 의하여 분석하였다.

III. 연구결과

1. 매립폐기물

살미매립지는 1996년 10월부터 충주 지역의 생활 폐기물을 매립하기 시작하여 1999년 10월경 매립이 종료된 곳으로 매립종료 후 약 5년이 경과된 지역으로 생분해성 폐기물은 거의 확인되지 않았지만 아직 완전 분해가 이루어지지 않았기 때문에 굴착시에 악취가 심하였다.

매립된 폐기물은 생활폐기물로 외관상으로 비닐이 가장 많은 양을 차지하고 있었으며, 그 밖에 플라스틱, 섬유류, 병, 철, 폐지류 등의 조성을 가지고 있었다. 생분해도가 높은 음식물쓰레기와 같은 유기성 폐기물은 모두 분해가 완료되어 안정기에 있으나 비닐 등 난분해성 물질들은 매립 당시의 형태를 나타내고 있었다. 시료 채취와 매립가스 포집관 설치를 위해 폐기물 매립지를 굴착한 결과 폐기물 매립깊이는 7~8m이었으며, 표토층은 0.5~1m 정도의 흙으

로 복토된 형태이다.

매립된 폐기물의 물리적 성상 중 섬유류, 비닐, 플라스틱, 목재류, 고무, 피혁류 등 가연성 미분해 물질은 24.63~49.00% 수준이었다. 이중 비닐·플라스틱류는 평균 26.46%로 가연성 미분해 성분의 대부분을 차지하고 있었으며, 그 밖에 섬유류, 고무·피혁류, 종이류, 목재류 순으로 나타났다. 표 1에서와 같이 생분해성 유기물질인 음식물류는 이미 모두 분해 되어 구분이 어려웠다. 매립지내 대부분의 폐기물이 난분해성 물질임에 따라 장기간에 걸쳐 느린 분해가 예상된다. 불연성 물질은 51.00~75.38%로 평균 61.61%이었고, 이중 토사류 및 기타가 평균 55.97%로 불연성 물질의 대부분을 차지하고 있었다.

매립폐기물의 수분, TS, VS, FS, C/N비를 측정하기 위해 4개 굴착지점에서 채취한 시료의 분석결과는 표 2와 같다. 살미매립지의 폐기물에 대한 수분량은 전체 지점에서 8.79~37.53%의 범위를 보였으며, 섬유류, 종이류, 목재류가 각각 평균 30.10%, 29.75%,

표 1. 매립 폐기물의 물리적 성상 조사 결과

(단위: wt.%)

성분	시료	1지점	2지점	3지점	4지점	평균	범위
가연성물질	음식물류	-	-	-	-	-	-
	종이류	1.76	1.27	1.91	4.26	2.30	1.27- 4.26
	섬유류	1.52	7.61	5.08	9.10	5.83	1.52- 9.10
	비닐·플라스틱류	18.06	32.95	25.30	29.53	26.46	18.06-32.95
	목재류	2.29	1.27	2.75	3.42	2.43	1.27- 3.42
	고무·피혁류	1.00	0.99	0.79	2.69	1.37	0.79- 2.69
	소 계	24.63	44.09	35.83	49.00	38.39	24.63-49.00
불연성물질	유리·도자기	2.29	3.17	2.77	8.12	4.09	2.29- 8.12
	금속류	1.64	2.03	1.53	1.01	1.55	1.01- 2.03
	토사류 및 기타	71.44	50.71	59.87	41.87	55.97	41.87-71.44
	소 계	75.37	55.91	64.17	51.00	61.61	51.00-75.38
총 계		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	-

표 2. 매립폐기물 중 가연성 성분 분석 결과(평균)

성분	시료	물리적 조성비율	수분 (%)	TS (%)	계 (%)	TS(총고형물)에 대한 비율(%)		C/N비
						VS(휘발성고형물)	FS(강열잔류고형물)	
음식물류	-	-	-	-	-	-	-	18.9
종이류	2.30	29.75	70.25	100	76.09	23.91		
섬유류	5.83	30.10	69.84	100	63.75	36.25		
비닐·플라스틱류	26.46	14.54	85.46	100	73.2	26.80		
목재류	2.43	28.24	71.75	100	67.04	32.97		
고무·피혁류	1.37	11.30	88.70	100	73.41	26.59		
총 계	38.39							

28.24%의 함수율을 보여 가연성 물질 중 가장 많은 수분을 함유하고 있음을 확인할 수 있었다. TS(총고형물)는 전체 64.51~91.21%의 범위를 보였으며, 고무·피혁류에서 평균 88.70%로 가장 높았다. 또한 생분해성 유기물의 분해로 폐기물 중에 잔류하는 분해 생성물 및 기타 유기물의 함량을 조사하기 위해 VS, FS를 분석하였다. 그 결과 VS는 전체 55.47~80.13% 범위로 평균 70.70%이었으며 종이류에서 가장 높았다. FS는 전체 범위 19.87~44.53%이었으며 섬유류가 평균 36.25%로 가장 높은 비율을 나타내었다. 매립폐기물의 C/N비는 18.9로 나타났는데 표7에 의하면 살미매립지가 안정화되기까지 좀더 시간이 필요할 것으로 예측된다.

2. 침출수, 지하수 및 지표수 분석

일반적으로 매립된 생활폐기물의 75~80% 정도는 유기물로 구성되어 있고, 이 유기물의 2/3 정도는 생분해가능하지만 1/3은 난분해성이다(Oweis *et al.*, 1998). 물은 폐기물 분해에 필수적인 것으로 폐기물 자체 체적의 10~20% 정도 함유되어 있다. 물의 침투량이 총증발량과 폐기물의 수분 보유량(retention capacity)을 초과하게 되면, 물은 폐기물을 통과하며 생화학적으로 분해된 용존물질과 부유물질을 이동시키게 된다(Oweis *et al.*, 1990).

물이 폐기물층을 통과하게 되면 오염물질이 폐기물로부터 침출되어 나온다. 폐기물의 조성, 강수량 및 강수빈도, 수문학적 특성, 폐기물의 압축 정도, 매립지 표면의 상태, 매립폐기물의 매립년수, 침출수의 주변환경과의 상호반응, 매립지의 설계 및 운영 등의 다양한 특성에 따라 침출수의 성질은 매우 달라진다(Vesilind *et al.*, 2002).

매립지 침출수의 발생원은 쓰레기 자체에 함유된 수분과 외부에서 공급되는 수분이다. 매립지 외부로부터 공급되는 수분은 상부에서 스며드는 강수, 측면에서 흘러드는 지표수, 하부에서 솟아오르는 지하수가 있다. 습윤한 지역에서는 쓰레기 자체의 수분은 외부로부터 공급되는 수분에 비해 무시할 정도이다. 따라서 외부 공급 수분이 장기적인 침출수 발생

요인이 된다.

본 연구에서는 폐기물매립지 침출수로 인한 주변 환경의 오염방지를 위해 폐기물관리법시행규칙 별표 8에서 정한 매립시설 침출수 배출허용기준, 침출수로 인한 지하수와 지표수 오염을 감시하기 위하여 지하수의 수질보전등에 관한 규칙(환경부령 제140호), 하천수 수질기준에 의해서 본 매립지의 침출수 및 지하수, 지표수 오염정도를 평가하였다

표 3은 2004년 6월 11일 채취하여 분석한 살미매립지 침출수와 지하수, 지표수의 수질분석결과이다. 감시정에서 채수한 지하수의 분석결과 전체 시료 중 매립지 하단에 위치한 지하수 3지점은 대부분의 분석 항목이 다른 지점보다 다량 검출되었고 특히, 대장균 군수의 경우 지하수 생활용수 기준인 5000이하(MPN/100ml)를 훨씬 초과하여 생활용수기준치의 36배를 초과하고 있어 지하수 오염의 우려가 높은 것으로 나타났다. 매립지 하단에 바로 위치한 지하수 2지점과 매립지 하단에서 가장 멀리 떨어진 4지점은 COD(화학적 산소요구량), 지하수 3번관정은 COD와 질산성질소가 기준치를 초과하였다.

침출수 분석 결과는 BOD, COD, 암모니아성 질소, 총인 등이 청정지역 침출수 배출허용기준에 부적합한 것으로 분석되었다. 침출수의 생분해성 성분의 변화는 시간에 따라 달라지며, BOD/COD_{Cr}비로 나타낼 수 있다. 매립 초기에는 이 비율은 0.5이상이 되는데, 이 것은 침출수내에 생물학적으로 분해가능한 유기물이 많이 있음을 나타낸다. 숙성단계에 있는 매립지에서는 BOD₅/COD_{Cr}의 비가 보통 0.05~0.2 정도이다. 살미 매립지의 경우 BOD₅/COD_{Cr}와의 비가 0.1로 메탄발효단계로 볼 수 있다. 생물학적으로 분해가 어려운 humin산 및 fulvic산을 함유하는 숙성단계 매립지의 침출수는 그 비율이 더욱 낮아진다(McBean *et al.*, 1995).

지표수를 분석한 결과는 하천수 수질기준과 비교하여 상수원수 3급에 해당하는 수질로 나타났으며, 중금속류 및 다른 항목은 기준치 이하로 검출된 것을 확인할 수 있었다. 이상의 결과에서 매립지 침출수가 주변 지표수 및 지하수 오염에 영향을 준 것

표 3. 수질 1차 시료 분석 결과(2004년 6월 11일 채취)

항 목	지하수 1	지하수 2	지하수 3	지하수 4	침출수	지표수
지하수 심도(m)	7.5	8.2	7.0	8.5	-	-
pH	7.8	8	6.7	7	7.9	7.2
SS(mg/l)	-	-	-	-	21.4	2.8
COD _{Mn} (mg/l)	4.2	11	24.3	8.8	116.7	7.3
COD _{Cr} (mg/l)	-	-	-	-	964.8	-
BOD(mg/l)	-	-	-	-	96.9	5.8
DO(mg/l)	-	-	-	-	-	5.6
T-P(mg/l)	-	-	-	-	4.752	0.168
T-N(mg/l)	-	-	-	-	1,668.2	21,696
질산성질소(mg/l)	0.5	0.6	92.2	1.2	147.5	-
암모니아성 질소(mg/l)	-	-	-	-	1,319.6	-
대장균군수	670	40	180,000	50	-	4600
클로로필a	-	-	-	-	-	0.95684
Cl ⁻	12.78	99.46	103.01	167.8	1,089.78	-
CN	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-
Cd	불검출	불검출	불검출	불검출	-	불검출
As	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-
Hg	-	-	-	-	-	불검출
유기인	-	-	-	-	-	-
페놀	-	-	-	-	-	-
Pb	-	-	-	-	-	-
Cr ⁶⁺	-	-	-	-	-	불검출
TPH	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-
TCE	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-
PCE	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-

로 판단된다.

표 4는 2004년 8월 11일 채취하여 분석한 살미매립지 침출수와 지하수, 지표수의 수질분석결과이다. 지하수수질의 분석결과 전체 시료 중 지하수 2지점의 화학적산소요구량이 농업용수기준(8이하)를 초과하였고, 공업용수기준(10이하)으로도 3번관정은 2.2배 초과하였다. 또한 대장균군수의 경우 지하수 생활용수 기준인 5000이하(MPN/100ml)를 훨씬 초과하여 생활용수기준치를 각각 7.4배와 19.5배를 초과하고 있으며, 나머지 측정항목들은 기준치에 적합한 것으로 분석되었다. 침출수 분석 결과는 BOD, COD, 암모니아성질소 등이 청정지역 침출수 배출 허용기준에 부적합한 것으로 분석되었다. 침출수의 생분해 정도인 BOD₅/COD_{Cr}와의 비가 0.12로 메탄발효단계로 볼 수 있다. 지표수를 분석한 결과는 하천수 수질기준과 비교하여 BOD 기준으로는 공업용수 2급과 농업용수에 해당하는 수질로 나타났다.

표 5는 2004년 10월 11일 채취하여 분석한 살미매립지 침출수와 지하수, 지표수의 수질분석결과이다. 지하수수질의 분석결과 전체 시료 중 지하수 3지점과 4지점에서의 화학적산소요구량이 공업용수기준(10이하)를 초과하였을 뿐이고 나머지 항목들은 6월과 8월에 측정된 결과와 비교했을 때 강수량 등 계절적인 영향으로 양호한 수질이 형성되었음을 알 수 있다. 침출수분석 결과는 BOD, COD, T-N, T-P, 암모니아성질소 등이 침출수 배출허용기준에 부적합한 것으로 분석되었다. 침출수의 생분해성 변화인 BOD₅/COD_{Cr}와의 비가 0.12로 메탄발효단계로 볼 수 있다. 지표수를 분석한 결과는 하천수 수질기준과 비교하여 부유물질량을 기준으로 공업용수2급과 농업용수에 해당하는 수질로 나타났다.

표 6은 2004년 12월 10일 채취하여 분석한 살미매립지 침출수와 지하수, 지표수의 수질분석결과이다. 지하수수질의 분석결과 전체 시료 중 지하수 3

표 4. 수질 2차 시료 분석 결과(2004년 8월 11일 채취)

항 목	지하수 1	지하수 2	지하수 3	지하수 4	침출수	지표수
pH	7.7	7.5	6.5	7.2	7.9	7.5
SS(mg/l)	-	-	-	-	16	3.5
COD _{Mn} (mg/l)	3.2	9.2	22	3.2	189.4	8.0
COD _{Cr} (mg/l)	-	-	-	-	1,032.8	-
BOD(mg/l)	-	-	-	-	127.2	7.0
DO(mg/l)	-	-	-	-	-	5.3
T-P(mg/l)	-	-	-	-	3.489	0.155
T-N(mg/l)	-	-	-	-	1,527.1	23.565
질산성질소(mg/l)	1.8	1.9	89.4	2.1	110.6	-
암모니아성 질소(mg/l)	-	-	-	-	1,235.4	-
대장균군수	180	37,000	96,000	17	-	5500
클로로필a	-	-	-	-	-	0.96521
Cl ⁻	5.7	23.4	22.7	84.5	1,138.4	-
CN	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-
Cd	불검출	불검출	불검출	불검출	-	불검출
As	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-
Hg	-	-	-	-	-	불검출
유기인	-	-	-	-	-	-
페놀	-	-	-	-	-	-
Pb	-	-	-	-	-	-
Cr ⁶⁺	-	-	-	-	-	불검출
TPH	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-
TCE	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-
PCE	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-

표 5. 수질 3차 시료 분석 결과(2004년 10월 11일 채취)

항 목	지하수 1지점	지하수 2지점	지하수 3지점	지하수 4지점	침출수	지표수
pH	7.7	7.4	6.8	7.2	8.1	8.3
SS(mg/l)	-	-	-	-	16.4	57.8
COD _{Mn} (mg/l)	3.6	9.5	28.2	14.5	316.4	4.6
COD _{Cr} (mg/l)	-	-	-	-	660.8	-
BOD(mg/l)	-	-	-	-	80.6	1.6
DO(mg/l)	-	-	-	-	-	5.5
T-P(mg/l)	-	-	-	-	9.912	0.154
T-N(mg/l)	-	-	-	-	1210	24.936
질산성질소(mg/l)	1.39	1.51	26.92	0.68	5.9	-
암모니아성 질소(mg/l)	-	-	-	-	730	-
대장균군수	150	1,500	3,200	360	-	6
클로로필a	-	-	-	-	-	0.95521
Cl ⁻	5.68	24.23	144.21	111.54	927.1	-
CN	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-
Cd	불검출	불검출	불검출	불검출	-	불검출
As	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-
Hg	-	-	-	-	-	불검출
유기인	-	-	-	-	-	-
페놀	-	-	-	-	-	-
Pb	-	-	-	-	-	-
Cr ⁶⁺	-	-	-	-	-	불검출
TPH	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-
TCE	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-
PCE	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-

표 6. 수질 4차 시료 분석 결과(2004년 12월 10일 채취)

항 목	지하수 1지점	지하수 2지점	지하수 3지점	지하수 4지점	침출수	지표수
pH	7.6	7.7	6.8	7.2	8.2	7.2
SS(mg/l)	-	-	-	-	16	23.6
COD _{Mn} (mg/l)	3	8.1	40.3	15.4	320.4	3.5
COD _{Cr} (mg/l)	-	-	-	-	592.2	-
BOD(mg/l)	-	-	-	-	60.6	2.0
DO(mg/l)	-	-	-	-	-	5.1
T-P(mg/l)	-	-	-	-	9.384	0.115
T-N(mg/l)	-	-	-	-	1,105	13.435
질산성질소(mg/l)	2.31	2.06	27.48	1.14	5.8	-
암모니아성 질소(mg/l)	-	-	-	-	770	-
대장균군수	95	98	590	38	-	5
클로로필a	-	-	-	-	-	0.94255
Cl ⁻	4.26	64.65	134.27	131.43	944.88	-
CN	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-
Cd	불검출	불검출	불검출	불검출	-	불검출
As	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-
Hg	-	-	-	-	-	불검출
유기인	-	-	-	-	-	-
페놀	-	-	-	-	-	-
Pb	-	-	-	-	-	-
Cr ⁶⁺	-	-	-	-	-	불검출
TPH	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-
TCE	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-
PCE	불검출	불검출	불검출	불검출	-	-

지점과 4지점에서의 화학적산소요구량이 공업용수 기준(10이하)을 각각 4배, 1.5배초과 하였고 나머지 측정항목들은 기준치에 적합하였으며 대장균군수를 볼 때 모든 지하수관정이 대장균군수의 현격한 감소를 보이고 있다. 침출수 분석 결과는 BOD, COD, T-P, 암모니아성질소 등이 청정지역 침출수 배출 허용기준에 부적합한 것으로 분석되었다. 침출수의 생분해성 변화인 BOD₅/COD_{Cr}와의 비가 0.1로 메탄발효단계로 볼 수 있다. 지표수를 분석한 결과는 하천수 수질기준과 비교하여 BOD 기준으로 상수원수 2급에 적합한 수질로 나타났다.

3. 안정화 평가

비위생매립지의 안정화는 자연적으로 진행될 수 있는데, 자연상태로 관리되는 매립지도 생화학적 반응조(biochemical reactor)로서 폐기물의 분해를 상당히 촉진시킬 수 있다(Reinhart *et al.*, 2002).

매립지의 수렁에 따라 진행되는 안정화 정도를

평가하기 위하여 환경부(2001)에서 마련한 사용종료매립지 정비지침에 의한 매립지 안정화 평가기준인 표 7에 따랐다. 매립폐기물의 C/N비는 18.9로 나타났는데, 이 것은 살미매립지가 안정화되기까지 좀더 시간이 필요함을 의미한다. 침출수는 1차시료에서는 BOD/COD_{Cr}이 0.10이고, 2차시료 0.12, 3차시료 0.12, 그리고 4차시료에서는 0.10을 나타내는 것으로 분석되었다. BOD₅가 60.6~127.2사이로 매립지 침출수로서 완속기를 나타내고 있어 안정화가 진행중인 것으로 판단된다(Pohlands *et al.*, 1976).

살미 매립지에서 채취한 침출수 및 지하수의 오염물질을 4차에 걸쳐 분석한 결과에 의하면 침출수 배출허용기준 및 지하수 수질기준에, 대장균, COD, BOD, SS, 총인, 암모니아성 질소 등이 청정지역 기준에 부적합했다. 따라서 충주지역 생활쓰레기 매립지인 살미매립지는(충북지역환경기술개발센터, 2005) 토양미생물 등에 의한 생분해, 매립폐기물 및

표 7. 매립지 안정화 평가항목

구 분	평 가 항 목
침출수 및 지하수	1. 침출수의 수질이 2년연속 배출허용기준에 적합하고, BOD/COD _{Cr} 이 0.1이하 일 것 2. 단, 침출수 발생이 없을 경우에는 1항목은 제외 3. 지하수의 수질 조사 결과 지하수질기준을 초과하지 아니하거나, 매립지로 인한 오염징후가 나타나지 아니할 것
매립가스	1. 매립가스 발생량이 2년연속 증가하지 않을 것 2. 매립가스 중 CH ₄ 농도가 5%이하 일 것
매립폐기물	1. 매립폐기물 토사성분 중의 가연물함량이 5%미만이거나 C/N가 10 이하일 것 2. 폐기물의 용출시험 기준항목을 만족할 것
기 타	1. 매립지 내부온도가 주변 지중온도와 유사할 것 2. 기타 악취, 구조물 및 지반의 안정도 조사, 지표수의 수질 조사, 토양 조사 결과 매립지로 인한 주변환경 영향이 인정되지 아니할 것

자료: 환경부, 2001, 사용종료매립지 정비지침.

토사에 의한 화학적 흡착, 그리고 산화-환원 반응 등에 의한 매립지 자체의 생화학적 반응조 기능에 따른 자연적 정화가 충분히 이루어지지 못하였다. 따라서, 매립지 안정화가 진행중인 과정으로 추정되기 때문에 살미매립지에는 매립지에서 발생하는 침출수 등 오염물질을 처리하기 위한 특별한 정비조치가 필요하다고 판단된다.

또한 살미매립지는 계곡형 매립으로 이루어짐에 따라 매립층내 수분의 분포가 불균일하여 균일한 안정화를 기대하기 어려울 것으로 예측된다. 따라서 현 매립지의 균일한 안정화와 안정화 속도를 촉진하기 위해서는 매립지역에 대한 정밀조사를 토대로 침출수의 일부를 매립지내에 살포하여 재순환함으로써 침출수의 효율적인 처리와 매립지내 폐기물의 분해속도를 균일하게 유지하는 방안의 수립도 검토할 필요가 있다(McBean *et al.*, 1995).

IV. 결론

본 연구에서는 충주호에 인접한 비위생매립지인 살미매립지의 매립폐기물, 침출수, 지하수 및 지표수를 분석하고 매립폐기물 및 침출수의 안정화 정도를 평가하였다.

매립지의 수령에 따라 진행되는 안정화 정도를 평가하기 위하여 환경부에서 작성한 사용종료매립지 정비지침에 의한 매립지 안정화 평가기준에 따르면, 매립폐기물 및 침출수는 안정화가 진행중인 것

으로 판단된다. 살미 매립지에서 채취한 매립폐기물의 C/N비는 18.9로 안정화되기까지 좀더 시간이 필요하다. 침출수는 BOD/COD_{Cr}이 0.10~0.12를 나타내어 안정화가 진행중인 것으로 분석되었다. 그리고 BOD₅가 60.6 ~ 127.2사이로 매립지 침출수로서 완속기를 나타내고 있어 안정화가 진행중이었다. 침출수 및 지하수의 오염물질을 4차에 걸쳐 분석한 결과에 의하면 침출수 배출허용기준 및 지하수 수질기준에 대장균, COD, BOD, SS, 총인, 암모니아성 질소 등이 청정지역 기준에 부적합했다.

따라서 충주지역 생활쓰레기 매립지인 살미매립지는 토양미생물 등에 의한 생분해, 매립폐기물 및 토사에 의한 화학적 흡착, 그리고 산화-환원 반응 등에 의한 매립지 자체의 생화학적 반응조 기능에 따른 자연적 정화(natural attenuation)가 아직은 충분히 이루어지지 못하여 매립지 안정화가 진행중인 과정으로 추정된다. 그러므로 살미매립지에는 매립지에서 발생하는 침출수 등 오염물질을 처리하기 위한 침출수의 이송처리, 재순환(recirculation) 또는 매립폐기물 굴착처리 같은 정비(remediation) 조치가 충주호의 수질 보호를 위해서 필요하다고 판단된다.

참고문헌

충북지역환경기술개발센터, 2005, 비위생매립지 안정화 및 개선방안에 관한 연구.

- 한국자원재생공사, 1995, 사용종료매립지의 적정사후관리방안, 56-59.
- 환경부, 2001, 사용종료매립지 정비지침.
- Bedient, P. B., Rifai, H. S., and Newell, C. J., 1999, Groundwater Contamination, Prentice-Hall, 85.
- Christensen, T. H., Cossu, R., and Stegmann, R., 1994, Landfilling of Waste: Barriers, E&FN SPON, 3.
- Freeman, H. M., 1989, Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal, 10.9.
- Henry, J. G. and Heinke, G. W., 1996, Environmental Science and Engineering, Prentice-Hall, 596-607.
- Hwang Soon-Hong, Shin Chan-Ki, Kwon Myung-Hee, Lee Kil-Chul, and Chung Il-Rok, 2002, The Variation of Water Quality of Leachate and Neighboring Streamwater According to the Time After Closure and Landfill Amount, APLAS Seoul 2002, 790-794.
- McBean, E. A., Rovers, F. A., and Farquhar, G. J., 1995, Solid Waste Landfill Engineering and Design, Prentice Hall, 59-70.
- Oweis, I. S. and Khera, R. P., 1998, Geotechnology of Waste Management, PWS Publishing, 295-299.
- Pfeffer, J. T., 1992, Solid Waste Management Engineering, 21-26.
- Pohlads, F. G. and Englebrech, R., 1976, Impact of Sanitary Landfills, N.Y.: Report Prepared for the American Paper Institute.
- Reinhart, D. R., McCreannor, P. T., and Townsend, T., 2002, The Bioreactor Landfill: It's Status and Future, Waste Management and Research, 20, 172-186.
- Rubin, E. S., 2001, Introduction to Engineering & the Environment, McGraw-Hill, 61.
- Vesilind, P. A., Worrell, W., and Reinhart, D., 2002, Solid Waste Engineering, Brooks/Cole, 118-131.