

연구논문

## 사용종료된 비위생매립지의 매립가스 안정화 평가 - 살미매립지 사례연구 -

홍상표 · 김광렬\*

청주대학교 환경공학과 · 충북대학교 환경공학과\*  
(2005년 8월 16일 접수, 2005년 12월 13일 승인)

### Assessment on Stabilization of Open-dumping Landfill Gas - 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 16 August 2005; accepted 13 December 2005)

### Abstract

For managing and utilizing a closed municipal solid waste landfill site in environmentally secure conditions, it is necessary to verify the stabilization level of landfill gas(LFG) and waste. For assessing LFG and waste stabilization of an open-dumping municipal solid waste landfill (Salmi Landfill) which is located at the vicinity of Chungju Reservoir which flows into Paldang Reservoir that has been used for Seoul Metropolitan water supplies, the history and the surrounding characteristics of the landfill site were surveyed.

In this study, waste and LFG samples obtained from landfill site were physically and chemically analyzed, and then the analysis results were evaluated on the basis of 'The Criteria of Landfill Waste Stabilization(CLWS)' that were promulgated by Korean Ministry of Environment.

Based on LFG composition of Salmi landfill, CH<sub>4</sub> was as high as 68%. In CLWS regulation, the stabilization criteria of CH<sub>4</sub> should be lower than 5%, and the criteria of C/N ratio should also be lower than 1/10. The result showed that C/N ratio of landfilled waste ranged 17.4~24.7. From this results, it was concluded that the LFG and C/N ratio stabilization level of this landfill based on the CLWS were still actively proceeding

Key Words: LFG, Stabilization, Open-dumping Landfill, C/N ratio

## I. 서론

폐기물의 재이용, 재활용, 열에너지 회수 등이 잘 이루어져도 일부분의 고형폐기물은 매립될 수 밖에 없다(Vesilind et al., 2002). 우리나라는 1990년대 중반부터 노천투기(open-dumping) 방식의 비위생 매립을 금지시켰으나, 그 이전에 매립이 시작된 비위생매립지는 수리지질학적 특성에 대한 고려가 거의 없고, 그리고 침출수 처리시설, 최종복토 및 매립지 가스 처리설비 같은 환경오염방지시설을 적합하게 갖추고 있는 곳은 거의 없는 실정이다(한국자원재생공사, 1995 ; 홍상표, 2003 ; 홍상표, 2004). 이러한 상황은 매립지 주변의 지하수, 지표수 및 공기를 오염시킬 수 있다.

사용종료된 비위생매립지의 환경오염분석에 기반한 적절한 사후관리(post-closure management) 체계의 정립은 현재 사회적으로 만연되어 있는 환경오염 혐오시설에 대한 불신감을 완화시킬 수 있을 뿐만 아니라, 침출수로 인한 매립지 인근의 지하수 자원의 오염과 메탄가스 등에 의한 지구온난화 같은 대기 오염을 최소화 할 수 있어 미래에 발생할 수도 있는 환경적, 사회적 및 경제적 손실을 저감시키는데 기여할 수 있을 것이다.

매립된 고형폐기물은 물리적, 화학적 및 생물학적 작용, 매립된 폐기물의 특성 및 매립기간, 그리고 매립지 특유의 현장 조건이 결합되어 안정화된다(Shah, 2000 ; Sleats, 2000). 매립지는 생화학적 반응조(biochemical reactor)로서 폐수처리시설의 혐기성 소화조(anaerobic digester)와 유사하다(Reinhart et al., 2002).

본 연구에서는 남한강 수계에 위치한 충주호에 직접적 영향을 미칠 수 있는 비위생매립지로 충주시 살미 매립지를 선정하였다(충북지역환경기술개발센터, 2005). 살미 매립지의 기초자료 수집 및 현장조사를 통하여 매립지의 일반적 특성을 파악하고, 매립폐기물의 물리적 조성, 매립가스(landfill gas)의 화학적 조성을 분석하여 매립지 안정화 정도를 매립가스의

측면에서 평가하여 주변환경에 악영향을 미치는 비위생매립지의 정비(remediation) 및 적절한 토지이용 방안을 포함한 사후관리체계(post-closure management)를 확립하는데 기여하고자 했다.

## II. 연구방법

### 1. 연구대상 매립지의 특성

충북지역에 위치한 비위생 매립지중에서 충주호에 가장 인접한 매립지로 환경오염에 대한 가능성이 매우 높은 충주시 살미면 무릉리의 비위생매립지를 연구대상으로 선정하였다. 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 12,500m<sup>2</sup>이고 총 매립량은 100,500m<sup>3</sup>이며, 1996년 10월부터 생활폐기물을 매립하기 시작하여 1999년 10월경 매립이 종료된 매립지이다. 살미면 무릉리 매립지의 지형도를 그림 1에 나타내었다.

연구의 정밀조사 범위 및 분석항목은 사용종료매립지 정비지침(환경부, 2001)에 의한 매립지 안정화 평가 방법에 근거하여 수행하였다. 그리고 폐기물 매

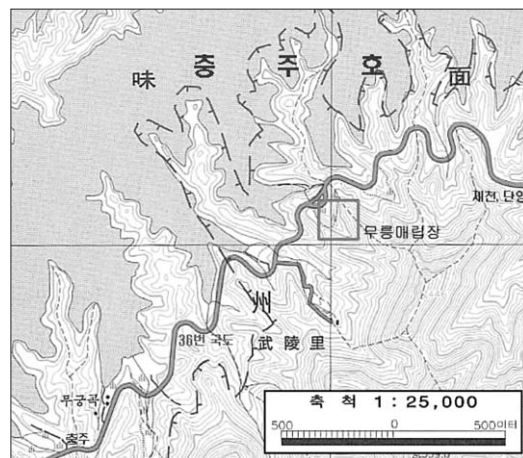


그림 1. 충주시 살미면 무릉리 매립장 지형도

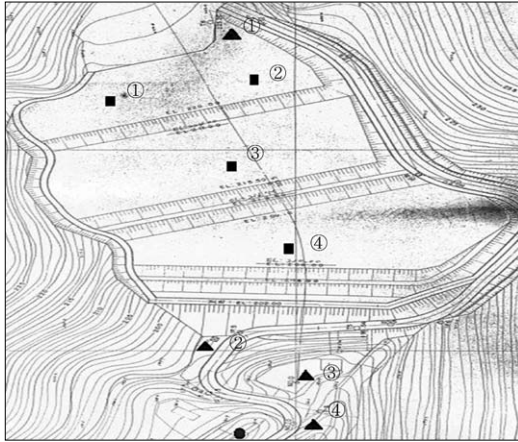


그림 2. 매립지 시료채취지점 (■ : 매립가스 ● : 침출수 ▲ : 지하수)

립지역을 4개 지점으로 나누어 폐기물 시료 및 매립 가스 채취지점으로 선정하여 분석하였다. 각각의 시료 채취지점을 그림 2에 나타내었다.

## 2. 매립지 가스의 안정화

비위생매립지의 안정화는 자연적으로 진행될 수 있는데, 자연상태로 관리되는 매립지도 생화학적 반응조(biochemical reactor)로서 폐기물의 분해를 상당히 촉진시킬 수 있다(Reinhart et al., 2002). 매립지 안정화 과정에서 발생하는 매립지 가스(landfill gas)는 보통 30년 정도의 장기간에 걸쳐 지속된다. 매립지 안정화 기간은 매립지에 높은 수분함량이 유지되면 단축되고, 매립쓰레기의 건조상태가 지속되면 연장된다. 매립지에서 발생하는 가스는 주변 자연환경 및 지역사회에 부정적인 영향을 미치게 된다. 매립지 가스는 대체로 건강에 해로운 유해한 화학물질을 함유하고 있으며, 특히 메탄가스는 매립지 외부로 멀리 퍼져나가서 건물 지하실에서 폭발할 위험성도 있으며, 지구 온난화에도 영향이 크다(Henry et al., 1996).

매립지 쓰레기의 안정화는 매립된 유기성폐기물이 분해되어 매립가스 및 침출수로 전환되는 과정이다. 매립지 쓰레기의 안정화에는 폐기물의 조성, 압축 정도, 수분 함량, 분해 저해물질, 물의 이동 정도, 온도 등이 영향을 미친다. 매립지 쓰레기의 안정화에는 물

리적, 화학적 및 생물학적 현상이 있는데 생물학적 현상이 가장 중요하다. 적절한 수분의 존재는 미생물의 활동을 촉진하기 때문에 매립지 가스 생성에 필수적이다. 수용성의 영양분도 박테리아의 신진대사에 필수적이기 때문에 매립지 가스 생성에 중요하다. 미국에서는 박테리아에게 영양을 공급해 주기 위하여 탈수된 하수슬러지를 매립지에 살포하기도 한다(Pfeffer, 1992.). 그리고 pH 및 온도도 박테리아의 활동에 큰 영향을 미치며, 폐기물 입자의 크기 및 폐기물 밀도도 가스 생성량에 중요한 영향을 미친다.

물리적 분해에는 수분과 쓰레기가 접촉하면서 생기는 세척, 물리적 이동 등이 있다. 화학적 분해에는 산화, 환원, pH 변동, 용해, 침전, 착화합물화 등으로 생기는 화학적 변화가 있다. 물리적 및 화학적 분해는 물의 양과 속도에 크게 의존하게 된다. 그리고 화학적 분해는 침투수 및 쓰레기의 화학적 성분에 영향을 받게 된다(Oweis, 1998.).

매립지 쓰레기는 분해의 I단계에서는 호기적 상태이기 때문에 고농도의  $\text{CO}_2$ , 온도의 급격한 상승, pH의 저하, 고농도의 BOD 및 COD, 높은 전기전도도를 갖는다. 호기성 상태에서 분해성 쓰레기는  $\text{CO}_2$ , 물, 미생물, 부분적으로 분해된 유기물(acetic acid 같은 유기산)로 전환된다. II단계에서는 상당량의 유기물이 침투수에 용해되면서 침출수의 BOD 및 COD가 높아지게 된다. 유기산과 용해된  $\text{CO}_2$ 는 pH를 5~6 정도로 낮추어서 화학적으로 반응성이 큰 침출수를 만들어 쓰레기에 있는 중금속 등의 무기물을 용해시키게 된다. 높은 무기물 농도는 큰 전기전도도를 갖게 한다. 혐기성 및 혐의성 미생물은 셀룰로오스와 기타의 부패성 물질을 가수분해 및 발효시켜 휘발성 지방산 같은 수용성 화합물 및 암모니아 등을 생성시킨다. 분해의 III 단계에서, 메탄생성균은 유기산과 수소를  $\text{CH}_4$ 와  $\text{CO}_2$ 로 전환시켜 pH를 7~8 사이로 높여 침출수의 화학적 반응능력은 감소하게 되고 pH 의존적인 무기물의 농도도 저하하게 된다(McBean et al., 1995).

I단계의 호기성 상태는 몇 주 정도로 끝나지만 3m

이하의 얇은 매립층에서는 공기의 침투가 쉬워 상당 기간 동안에 걸쳐 CO<sub>2</sub>를 생성하게 된다. II단계의 혐기성 상태의 분해는 몇 년에서 수십년까지 걸릴 수 있으며 BOD가 일반적으로 10,000ppm을 초과하고 BOD/COD 비율이 0.7을 초과하게 되며 수용성 유기물질의 비율이 높은 상태이다. 또한 강한 악취, 고농도의 암모니아(500~1,000ppm 정도)가 특성이다. 이 상태의 침출수는 폐기물의 다른 성분을 용해시켜 Fe, Mn, Zn, Ca, Mg의 농도가 높아지게 된다. 발생가스는 주로 CO<sub>2</sub>이며, CH<sub>4</sub> 및 H<sub>2</sub>는 소량이다. III 단계로 전환되는 데는 수십년이 걸릴 수도 있으며 혐기성 미생물이 수용성 유기화합물을 CO<sub>2</sub> 및 CH<sub>4</sub>를 생산한다. III단계에서는 생물학적으로는 매립지가 가장 왕성하게 활동할 때이다. 초산 및 메탄 생성 세균간에 평형이 이루어져 폐기물의 활발한 분해가 이루어지는 시기이다. 이렇게 활발한 가스 생산은 수년간 지속될 수 있다. III단계에서 생성된 침출수는 BOD 값이 낮고 BOD/COD 비율도 낮지만 침출수내의 암모니아성 질소 농도는 높은 편이다(McBean et al., 1995).

매립지 가스 성분에 영향을 주는 요소로는 폐기물 성분, 매립년수, 매립지 운영형태, 기후, 매립지 주변의 수리지질학적 특성, 수분, 온도, pH, 미생물 활동도 같은 매립지 내부의 조건 등이 있다. 이러한 요소들은 매립지마다 다르기 때문에 매립지 가스 성분의 변동은 클 수밖에 없다(Shah, 2000).

매립지 생활폐기물의 생물학적 분해에 따른 가스 발생은 이론적으로 442m<sup>3</sup>/톤으로 CH<sub>4</sub>가 55%이나, 실제적으로는 수분의 부족, 생물학적으로 분해 불가능한 플라스틱 등에 의해 CH<sub>4</sub>의 평균 발생량은 100m<sup>3</sup>/톤 정도이다(Vesilind, et al., 2002). 매립지 가스는 압력 차이 또는 농도 구배에 의해 토양을 통해 수직적으로 또는 수평적으로 이동할 수 있다(Freeman, 1989).

### 3. 매립지가스 안정화 분석 방법

본 연구는 '사용종료 매립지 정비지침(환경부, 2001)'에 의하여 기초조사, 정밀조사의 단계로 나누

어 진행하였다. 먼저 대상 매립시설의 기초자료 및 현장조사를 통하여 주변환경에의 영향정도를 파악하였고, 매립폐기물의 종류 및 성상, 매립기간, 매립량, 매립고, 면적, 복토 실태 등에 대한 매립지의 일반 현황과 주변지역의 토지이용 현황 및 향후 토지이용계획 등을 조사하였다.

살미매립지의 현황과 매립폐기물의 특성, 매립상태, 매립가스 채취 및 폐기물 성상 등을 조사 분석하기 위해 매립지내 4개 지점을 선정하여 굴착기를 이용하여 매립지 바닥까지 7~8m 정도 굴착하였다. 매립폐기물은 폐기물 공정시험법에 따라서 화학분석하였으며, 물리적 성상분석은 굴착된 매립폐기물을 대상으로 육안 관찰에 의해 종류별로 선별한 후 각각의 무게를 측정함으로써 물리적 조성을 분석하였다.

굴착시 파낸 매립폐기물을 원추4분법으로 3회에 걸쳐 분할하여 이중 100kg을 분석용 시료로 하였으며 TS(고형물), VS(휘발성 고형물), FS(강열잔류 고형물), 수분함량, C/N비를 분석하였다. 살미매립지에서의 매립가스 채취는 4곳의 굴착지점에서 강제 배출방식으로 하였으며 매립가스 포집을 위해 지름 10cm, 길이 9m의 매립가스 포집관을 PVC로 제작하여 그림 3과 같이 설치하였고, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>,

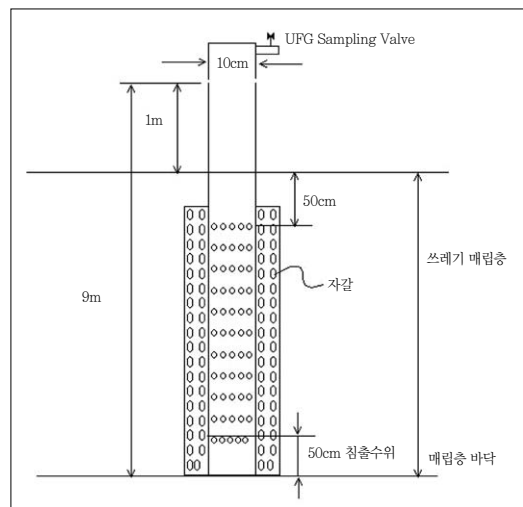


그림 3. 가스포집관 설치 단면도

H<sub>2</sub>S는 가스 분석기를 사용하여 현장에서 분석하였고, NH<sub>3</sub>는 습식방법에 의해 흡수액에 흡수시켜 대기 오염공정시험법에 따라 실험실에서 분석하였다.

### III. 연구결과

#### 1. 매립폐기물

살미매립지는 1996년 10월부터 생활폐기물을 매립하기 시작하여 1999년 10월경 매립이 종료된 지역이다. 따라서 본 매립지는 매립종료 후에 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 있으며, 그 밖에 플라스틱, 섬유류, 병, 금속, 폐지류 등의 조성을 가지고 있다. 생분해도(biodegradable)가 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 흙으로 최종 복토(final soil-cover)된 형태이다.

매립된 폐기물의 물리적 성상 분석을 위해 폐기물

공정시험법에 의거하여 매립폐기물의 성분별 조성을 구분하였다. 성분별 구분은 육안으로 판별하였으며 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 총고형물(TS : Total Solids) 분석을 하였다. 수분은 105±5℃에서 함량이 될 때까지의 무게감량으로 하였고 수분을 제외한 나머지를 고형물로 하였다. 휘발성 고형물(VS : Volatile Solids)와 강열잔류 고형물(FS : Fixed Solids)의 분석 역시 폐기물 공정시험법에 따라 하였으며 600±25℃에서 함량이 될 때까지의 무게감량을 VS로 잔류량 무게를 FS로 하였다. C/N비는 시료중 가연성 물질에 대해 전처리하여 원소분석(CE Instruments사, EA1110)을 실시하여 산출하였다.

매립된 폐기물 물리적 성상 중 섬유류, 비닐, 플라스틱, 목재류, 고무, 피혁류 등 가연성 미분해 물질은 24.63~49.00%이었고, 이중 비닐·플라스틱류는 평균 26.46%로 가연성의 미분해성분의 대부분을 차지하고 있었으며 그 밖에 섬유류, 고무·피혁류, 종이류, 목재류 순으로 나타났다. 표 1에서와 같이 생분해성 유기물질인 음식물류는 이미 모두 분해 되었거나

표 1. 매립 폐기물의 물리적 성상 조사 결과

(단위 : wt.%)

성분	1지점	2지점	3지점	4지점	평균	범위	
음식물류	-	-	-	-	-	-	
가연성물질	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
소계	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
	소계	75.37	55.91	64.17	51.00	61.61	51.00-75.38
총계	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00		

분해중인 음식물류가 토사류와 구분이 어려워 나타나지 않았으며, 매립폐기물로 잔류된 대부분의 폐기물들이 난분해성 물질임에 따라 장기간에 걸친 완만한 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 측정하

기 위해 4개 굴착지점에서 채취한 시료의 분석 결과는 표 2~표 6과 같다. 살미매립지의 폐기물에 대한 수분량은 전체 지점에서 8.79~37.53%의 범위를 보였으며, 섬유류, 종이류, 목재류가 각각 평균 30.10%, 29.75%, 28.24%의 함수율을 보여 가연성 물질 중 가장 많은 수분을 함유하고 있었다. 수분은 매립폐기물의 분해와 매립지가스 생성에 있어 가장

표 2. 매립폐기물 중 가연성 성분 분석 결과(지점1)

성분	물리적 조성 비율	수분(%)	TS(%)	계(%)	TS(총고형물)에 대한 비율(%)		C/N비
					VS(휘발성고형물)	FS(강열잔류고형물)	
음식물류	-	-	-	-	-	-	17.4
종이류	1.76	34.46	65.54	100	80.13	19.87	
섬유류	1.52	23.51	76.49	100	65.38	34.62	
비닐·플라스틱류	18.06	11.87	88.13	100	79.42	20.58	
목재류	2.29	33.13	66.87	100	67.95	32.05	
고무·피혁류	1.00	9.89	90.11	100	79.1	20.9	
총계	24.63						

표 3. 매립폐기물 중 가연성 성분 분석 결과(지점2)

성분	물리적 조성 비율	수분(%)	TS(%)	계(%)	TS(총고형물)에 대한 비율(%)		C/N비
					VS(휘발성고형물)	FS(강열잔류고형물)	
음식물류	-	-	-	-	-	-	24.7
종이류	1.27	25.55	74.45	100	77.91	22.09	
섬유류	7.61	31.41	68.59	100	64.28	35.72	
비닐·플라스틱류	32.96	9.98	90.02	100	74.30	25.7	
목재류	1.27	30.74	69.26	100	66.74	33.26	
고무·피혁류	0.99	12.08	87.92	100	58.86	41.14	
총계	44.10						

표 4. 매립폐기물 중 가연성 성분 분석 결과(지점 3)

성분	물리적 조성 비율	수분(%)	TS(%)	계(%)	TS(총고형물)에 대한 비율(%)		C/N비
					VS(휘발성고형물)	FS(강열잔류고형물)	
음식물류	-	-	-	-	-	-	22.1
종이류	1.91	23.51	76.49	100	70.56	29.44	
섬유류	5.08	28.17	71.83	100	55.47	44.53	
비닐·플라스틱류	25.30	17.72	82.28	100	65.28	34.72	
목재류	2.75	19.48	80.52	100	69.12	30.88	
고무·피혁류	0.79	14.44	85.56	100	75.69	24.31	
총계	35.83						

표 5. 매립폐기물 중 가연성 성분 분석 결과(지점4)

성분	물리적 조성 비율	수분(%)	TS(%)	계(%)	TS(총고형물)에 대한 비율(%)		C/N비
					VS(휘발성고형물)	FS(강열잔류고형물)	
음식물류	-	-	-	-	-	-	11.2
종이류	4.26	35.49	64.51	100	75.75	24.25	
섬유류	9.10	37.53	62.47	100	69.87	30.13	
비닐·플라스틱류	29.53	18.58	81.42	100	73.80	26.20	
목재류	3.42	29.64	70.36	100	64.33	35.67	
고무·피혁류	2.69	8.79	91.21	100	79.99	20.01	
총계	49.00						

표 6. 매립폐기물 중 가연성 성분 분석 결과(평균)

성분	물리적 조성 비율	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	
총계	38.39						

중요한 요소이다(McBean et al.,1995).

TS는 64.51~91.21%의 범위를 보였으며 고무·피혁류는 평균 88.70%로 가장 높았다. 생분해성 유기물의 분해로 매립폐기물 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 종이류가 76.09%로 가장 높은 비율을 차지하였다. FS는 전체 범위 19.87~44.53%이었으며 섬유류가 36.25%로 가장 높은 비율을 나타내었다. 매립폐기물의 C/N비는 17.4~24.7의 범위로 나타났는데, 표8에 의하면 C/N비가 10 이하일 때에 안정화된 것으로 평가되기 때문에 살미매립지가 안정화되기까지 좀더 시간이 필요할 것으로 예측된다.

## 2. 매립가스 분석

매립폐기물에 포함된 유기물의 대부분은 침출수,

매립가스 및 무기물로 분해될 수 있다는 것은 중요한 특성이다(Oweis et al., 1998). 쉽게 분해되는 유기성분이 많을수록 매립가스의 생성량은 많아진다. 메탄(CH<sub>4</sub>) 생성박테리아는 최적의 pH 및 온도 조건에서 메탄 생산량을 최대로 늘릴 수 있다. 미생물 활동이 왕성한 매립지의 매립가스는 부피로 CH<sub>4</sub> 45~60%, CO<sub>2</sub> 40~60%에 이른다(Vesilind et al., 2002).

매립가스 중 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, 의 분석은 매립가스 포집관 설치 15일후 Multifunction Gas Analyser (Model LMSxi) 이용하여 4개 지점에 대하여 각각 2회씩 실시하여 평균값을 취했으며 분석 결과를 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, 는 %로 H<sub>2</sub>S는 ppm단위로 측정 하였다. 매립가스 중 NH<sub>3</sub>는 air sampler로 매립가스를 흡수액에 포집하여 분석하였다. 매립가스 포집속도는 1l/min, 포집시간 20min으로 흡인 흡수시킨 후 대기오염 공정시험법에 따라 분석하였다.

매립가스의 분석 결과는 표 7과 같으며 각 지점별

표 7. 매립가스 분석 결과

측정날짜	항 목	1지점	2지점	3지점	4지점
6월11일	CH <sub>4</sub> (%)	28.0	62.0	63.0	7.5
	CO <sub>2</sub> (%)	33.5	34.0	29.5	15.0
	O <sub>2</sub> (%)	0.0	0.0	0.0	1.0
	N <sub>2</sub> (%)	37.5	3.0	6.5	75.5
	H <sub>2</sub> S(ppm)	7.7	13.6	14.9	0.7
	NH <sub>3</sub> (ppm)	18.8	10.6	12.7	10.9
8월10일	CH <sub>4</sub> (%)	60.5	62	68	-
	CO <sub>2</sub> (%)	35	32.5	25	-
	O <sub>2</sub> (%)	0.1	0.0	0.0	-
	N <sub>2</sub> (%)	4.3	5.4	6.9	-
	H <sub>2</sub> S(ppm)	14.9	10.6	10.8	-
	NH <sub>3</sub> (ppm)	20.4	15.8	19.8	-
10월13일	CH <sub>4</sub> (%)	51.5	64.0	67.0	-
	CO <sub>2</sub> (%)	28.5	30.0	26.5	-
	O <sub>2</sub> (%)	0.0	0.0	0.0	-
	N <sub>2</sub> (%)	19.9	5.9	6.4	-
	H <sub>2</sub> S(ppm)	11.4	17.8	28.0	-
	NH <sub>3</sub> (ppm)	16.4	15.3	19.8	-
12월6일	CH <sub>4</sub> (%)	32.5	68.0	48.3	-
	CO <sub>2</sub> (%)	27.0	32.0	27.0	-
	O <sub>2</sub> (%)	0.1	0.0	0.0	-
	N <sub>2</sub> (%)	39.9	0.0	24.6	-
	H <sub>2</sub> S(ppm)	0.0	10.5	3.5	-
	NH <sub>3</sub> (ppm)	14.2	16.8	15.7	-

로 2회씩 측정하여 평균값으로 하였으며, 2004년에 분기별로 측정하였다. 4지점의 경우 다량의 강우 영향에 의하여 매립가스 포집관에 우수 및 침출수의 혼입으로 8월 이후부터 측정이 불가능 하였다.

매립이 진행중인 매립지에서 발생하는 매립가스의 주성분은 메탄가스인데, 메탄가스는 이산화탄소보다 20배 이상의 온실효과(green house effect)가 있어, 2005년 2월부터 발효된 교토 의정서(Kyoto Protocol)에서 감축을 하도록 하고 있다. 매립가스를 연료 및 에너지로 활용하는 것은 온실 가스를 줄여 환경보전에도 기여하면서, 교토 의정서 내용의 하나인 청정개발체제(CDM: clean development mechanism)사업으로 추진할 경우에 국가적으로 큰 이익을 얻을 수 있다. CDM은 A라는 선진국이 B라는 개발도상국에 온실가스 저감사업에 투자하여 얻

은 온실가스 감축량을 A라는 선진국의 감축량으로 인정하는 제도이다(에너지경제연구원, 2003).

CH<sub>4</sub>는 매립된 폐기물 중 생분해성 유기성분들이 혐기성 상태에서 발생하는 가스로 폭발 및 인화성이 매우 높은 특성을 가지고 있다(남궁완 외, 1998). 살미매립지에 대해 살펴보면 CH<sub>4</sub>의 농도는 28~68%로 각 지점마다 그리고 시간의 경과에 따라 큰 차이를 보여주고 있다. 각 지점별로 살펴보면 2지점의 경우 62~68% 대부분 높게 나타났으며, 1지점은 28~61%로 농도의 변화 폭이 컸다.

이와 같이 CH<sub>4</sub>의 발생농도의 편차가 큰 것은 계속형 매립지 특성상 매립지내 수분분포의 불균형으로 분해속도차가 크기 때문인 것으로 해석될 수 있다. 일반적인 도시폐기물 매립가스 건용적 기준농도 45~60%과 비교해 볼 때 현재 혐기성 분해가 일어나고 있는 전형적인 메탄가스 발생단계로서 완전한 안정화까지는 상당한 시간이 소요될 것으로 판단된다.

CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>는 매립폐기물 중의 생분해성 유기물질들이 호기성 또는 준호기성 상태에서 생물학적 분해시 발생 된다. 본 매립지에서의 CO<sub>2</sub> 농도는 25~35%로 나타났다. 1지점, 2지점의 경우 27~35%, 30~34%로 대부분 30% 이상의 농도를 나타냈으나, 3지점의 경우 CO<sub>2</sub>의 농도는 25~30%로 30%이하의 낮은 농도를 보였다.

매립 후 3.5~4년(42~48개월) 경과시 CO<sub>2</sub>의 평균 농도는 51.0%로 나타나는데(남궁완 외, 1998) 5년이 경과된 본 매립지의 경우에는 폐기물의 성상과 매립 지점에 따라 약간의 차이를 보일 수 있으나 CH<sub>4</sub> 분석 결과와 연관지어 볼 때, 혐기성분해가 어느 정도 진행되었으나 아직 안정화까지는 시간이 필요할 것으로 사료된다. 또한 시간 경과에 따른 농도 변화를 보면 1지점, 2지점의 경우 대체로 감소하였으며 3지점의 경우 8월 이후부터 약간 증가하는 경향을 보였다.

O<sub>2</sub>는 1, 2, 3지점에서 나타나지 않았으나 4지점의 경우에서 1.0%로 비교적 낮은 값을 나타내었다. 이것은 4지점의 경우 강우시 상시 물이 채워져 있어 타 지점에 비해 공기의 유입에 의한 영향을 상대적으로



많이 받는 것으로 분석되며, 4지점의 경우에 질소의 함량이 75.5%에 이르는 것도 공기의 영향으로 판단된다.

H<sub>2</sub>S의 분석결과 0.7~28ppm을 나타내었다. 2지점, 3지점의 경우 각각 17.8ppm, 28ppm로 10월에 높게 나타났으나 1지점의 경우는 8월에 14.9ppm으로 높게 나타났다. 또한 12월에 모든 지점에서 0~10.5ppm으로 비교적 낮은 농도를 나타냈는데 이는 유기성 폐기물의 분해에 있어 중요한 인자인 온도의 영향이라 판단된다.

H<sub>2</sub>S는 매립지에서 발생하는 전형적인 성분으로 후각에 의해 냄새를 감지할 수 있는 하한농도인 TLV 값이 0.025~0.1ppm이며 TLV-TWA(Threshold Limit Value-Time Weighted Average)값은 10ppm으로 본 매립가스 중 H<sub>2</sub>S의 농도 대부분이 TWA값을 초과했으나 그 차이는 크지 않았다.

NH<sub>3</sub>는 특유의 자극성 냄새를 갖는 무색 기체로서 냄새를 감지 할 수 있는 하한농도인 TLV는 1~50 ppm이며, 본 매립지의 NH<sub>3</sub>의 농도는 10.9~20.4 ppm으로 냄새감지 농도 범위임에 따라 매립지에서 발생되었던 악취의 원인물질임을 알 수 있다. 그러나 TWA 기준치인 25ppm과 비교해 볼 때 낮은 농도를 나타내었다.

매립지에서 발생하는 매립가스 중 H<sub>2</sub>S와 NH<sub>3</sub>의

배출농도에 대한 환경보전법상의 규정은 마련되어 있지 않으나, 작업환경 기준으로 의미를 갖는다. 분석결과에 나타나듯이 H<sub>2</sub>S의 경우 TWA 기준농도를 초과하나 그 차이는 크지 않고 NH<sub>3</sub>의 경우는 TWA 값을 초과하지 않아 인체에 대한 환경적 피해는 없을 것으로 판단된다.

### 3. 매립지 안정화 평가

사용종료 매립지의 안정화 평가는 적절한 토지이용 방안을 결정하기 위한 환경관리 의사결정 과정에 필수적인 과정이다(홍상표 외, 2005). 매립지의 수명에 따라 진행되는 안정화 정도를 평가하기 위하여 환경부(2001)에서 마련한 사용종료매립지 정비지침에 의한 매립지 안정화 평가기준인 표8에 따르면 메탄가스의 농도가 5% 이하일 때에 안정화 된 것으로 규정되어 있는데, 살미매립지의 경우에는 높은 곳은 68%에 이르고 있어 매립폐기물은 메탄가스 발효단계로 안정화가 진행중에 있는 것으로 판단된다. 매립폐기물의 C/N비는 17.4~24.7의 범위로 나타났는데, 표8에 의하면 C/N비가 10 이하일 때에 안정화된 것으로 평가되기 때문에 살미매립지가 안정화되기까지 좀더 시간이 필요할 것으로 예측된다. 그리고 매립이 계속형 매립으로 이루어짐에 따라 매립층내 수분의 분포가 불균일하여 균일한 안정화를 기대하기 어려

표 8. 매립지 안정화 평가항목

구 분	평 가 항 목
침출수 및 지하수	1. 침출수의 수질이 2년 연속 배출허용기준에 적합하고, BOD/CODcr이 0.1 이하 일 것 2. 단, 침출수 발생이 없을 경우에는 1항목은 제외 3. 지하수의 수질 조사 결과 지하수질기준을 초과하지 아니하거나, 매립지로 인한 오염 징후가 나타나지 아니할 것
매립가스	1. 매립가스 발생량이 2년 연속 증가하지 않을 것 2. 매립가스 중 CH <sub>4</sub> 농도가 5%이하 일 것
매립폐기물	1. 매립폐기물 토사성분중의 가연물함량이 5%미만이거나 C/N가 10 이하 일 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 주변 환경영향이 인정되지 아니할 것

자료 : 환경부, 2001, 사용종료매립지 정비지침.

울 것으로 예측된다.

생활쓰레기 매립지인 살미매립지(충북지역환경기술개발센터, 2005)는 토양미생물 등에 의한 생분해, 매립폐기물 및 토사에 의한 화학적 흡착, 그리고 산화-환원 반응 등에 의한 매립지 자체의 생화학적 반응조(biochemical reactor) 기능에 따른 자연적 정화(natural attenuation) 작용에 의해 안정화가 진행중인 사용종료된 매립지이다. 향후에 지속적으로 살미매립지에서 발생하는 지구온난화를 일으키는 메탄가스, 그리고 악취를 일으키는 암모니아 및 유화수소 등 오염물질을 처리하기 위한 flare stack 같은 특별한 정비(remediation)조치가 필요한 것으로 판단된다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 충주호에 인접한 살미매립지의 매립폐기물 및 매립지 가스를 분석하고 안정화 정도를 평가하였다. 매립지의 다양한 조건에 따라 진행되는 안정화 정도를 평가하기 위하여 환경부에서 작성한 사용종료매립지 정비지침에 의한 매립지 안정화 평가기준에 따랐다. 메탄가스의 농도가 5% 이하일 때에 안정화 된 것으로 규정되어 있는데, 살미매립지의 경우에는 높은 곳은 68%에 이르고 있어 매립폐기물은 메탄가스 발효단계로 안정화가 진행중에 있는 것으로 판단된다. 매립폐기물의 C/N비는 17.4~24.7의 범위로 나타났는데, C/N비가 10 이하일 때에 안정화 된 것으로 평가되기 때문에 살미매립지는 사용종료된 지 5년이 경과된 매립지이지만 안정화되기까지 좀 더 시간이 필요할 것으로 예측된다.

그리고 매립이 계곡형 매립으로 이루어짐에 따라 매립층내 수분의 분포가 불균일하여 균일한 안정화를 기대하기 어려울 것으로 예측된다. 살미매립지에서 발생하는 지구온난화를 일으키는 메탄가스, 그리고 악취를 일으키는 암모니아 및 유화수소 등 오염물질을 처리하기 위한 flare stack 같은 특별한 정비(remediation)조치가 필요한 것으로 판단된다

#### 사 사

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구 지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

#### 참고문헌

- 남궁완 외, 1998, 폐기물처리공학, 동화기술.  
 에너지경제연구원, 2003, 발전부문 CDM 프로젝트의 온실가스 Baseline 연구.  
 충북지역환경기술개발센터, 비위생매립지 안정화 및 개선방안에 관한 연구, 2005.  
 한국자원재생공사, 1995, 사용종료매립지의 적정사후관리방안, 56-59.  
 홍상표, 2003, 대청호 상류유역 매립지의 침출수 분석 및 평가, 환경영향평가학회지, 12(3), 161-170.  
 홍상표, 2004, 비위생매립지 침출수의 안정화 평가, 환경영향평가학회지, 13(3), 115-124.  
 홍상표, 김광렬, 2005, Assessment of Stabilization of An Open-dumping Landfill, 환경영향평가학회지, 14(2), 47-53  
 환경부, 2001, 사용종료매립지 정비지침.  
 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.  
 McBean, E.A., Rovers, F.A., and Farquhar, G.J., 1995, Solid Waste Landfill Engineering and Design, Prentice Hall, 59-99.  
 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.

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.

Shah, K.L., 2000, Basics of Solid and Hazardous Waste Management Technology, Prentice Hall 332-335.

Sleats, R., 1989, Activities and Distribution of Key Microbial Groups in Landfills, In

Sanitary Landfilling : Process, Technology and Environmental Impact, Academic Press

Vesilind, P.A., Worrell, W., and Reinhart, D., 2002, Solid Waste Engineering, Brooks/Cole, 118-131.

최종원고채택 05. 12. 15