



ORIGINAL PAPER

원저

## 공기주입방식을 통한 쓰레기 안정화의 현장적용에 관한 연구

이환, 이채영, 전연호, 김경, 김두일, 이철호\*

삼성물산(주) 건설부분 기술연구소, (주)오이코스 기술연구소\*  
(2000년 10월 24일 접수, 2000년 11월 29일 채택)

## A Study on Stabilization of Landfill by Air Ventilation in Field

Hwan Lee, Chae-young Lee, Yeon-ho Jeon, Kyung Kim, Doo-il Kim, Cheol-hyo Lee\*

Institute of Technology, Engineering and Construction Group, Samsung Corporation  
R & D Center, Oikos Co., Ltd\*

### ABSTRACT

Landfill and lysimeter experiments were conducted to estimate the optimum air injection method for the degradation of waste in landfill and the pre-stabilization. Continuous injection with low pressure and quantity can be effective for pre-stabilization of old landfill due to the lower contents of volatile solids in landfill. Air injection and landfill gas (LFG) extraction showed that the SVE (Soil Vapor Extraction) effect by air ventilation was more significant than the biodegradation of organics. These results suggested that they could accelerate the biological stabilization of organic waste in landfills. It is also expected that they would reduce the problems including gas emission during the landfill mining, separation and/or transportation to such levels that might be discharged directly to the atmosphere or with minimal treatment, if required.

Key Words : Landfill, Air injection, Landfill gas extraction, Lysimeter, Pre-stabilization

### 초록

본 연구에서는 매립 폐기물 분해와 사전안정화를 위한 최적 산소 전달 방식을 평가하기 위하여 대상 매립지와 모형매립조 실험을 수행하였다. 매립년한이 오래된 매립지의 경우 낮은 유기물 함량으로 인해 저압/저유량의 연속 공기 주입방식이 효과적인 것으로 나타났다. 또한, 공기 주입 및 매립가스 추출은 유기물의 생분해 보다 매립지 내부의 공기 치환에 의한 SVE (Soil Vapor Extraction) 효과가 보다 큰 것으로 나타났다. 따라서, 매립지의 공기 주입 방식은 매립지의 조기안정화뿐만 아니라 매립지 굴착, 선별 및 이송시 발생될 수 있는 가스 문제를 사전에 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어: 매립지, 공기 주입, 매립가스 추출, 모형매립조, 사전안정화

### 1. 서론

환경부 자료에 의하면 '97년 2월 현재 종로 매립지는 898개소, 7,655천m<sup>2</sup>으로 매립된 폐기물양은 177,033 천톤에 달하는 것으로 보고되고 있다(환경부, 1997). '98 현재, 이들 매립지의 대부분은 차수시설 또는 침출수 처리시설이 미비한 매립지로서 시급히 정비해야 할 것으로 추정되며, 매립된 쓰레기는 완전 분해되어 안정화되기까지는 일반적으로 보통 20~30년이 소요되는 것으로 알려지고 있다(농어촌진흥공사, 1998). 따라서, 종로 매립지로 인한 이차오염 방지와 토지의 효율적 이용을 위해서는 적극적인 정화방법의 도입이 필요한 실정이다. 종로 매립지에서 발생하는 오염물질의 주변 토양과 생태계의 확산 방지와 효율적인 분해를 위해 최근에는 사전 안정화 공법이 적용되고 있다(농어촌진흥공사, 1998). 사전 안정화 공법은 매립지내 공기를 주입하여 호기성 미생물이 유기물의 분해를 촉진시켜 매립가스의 발생량 억제, 침출수 수질 개선 및 쓰레기층의 부피 감소를 유도할 수 있다.

본 연구에서는 대상 매립지의 공기주입 및 매립가스 추출방식과 모형 매립조의 공기주입방식에 따른 매립가스농도 변화, 침출수 수질, 침하량 및 온도 등의 운전인자의 도출을 통해 쓰레기 분해능 평가와 사전 안정화를 위한 산소전달 방식을 결정하고자 하였다. 또한, 휘발성 유기물질에 오염된 토양을 정화시키는데 이용되는 SVE (Soil Vapor Extraction) 기술을 매립지에 도입하여 유기물 분해와 매립지 굴착, 선별, 이송시 발생될 수 있는 가스의 문제를 사전에 저감시키고자 하였다.

### 2. 실험재료 및 방법

#### 2.1 시료채취 및 성상분석

본 연구에서는 종료되지 약 8년이 경과된 매립지의 일부를 대상으로 실험을 수행하였다. 대상지역의 매립용량은 24,300m<sup>3</sup> (45×60×9m)에 해당하며 공기주입 및 매립가스 추출을 위해 15m 간격으로 12개의 주입정과 격자방식으로 9개의 추출정을 quick coupling 배관을 이용하여 설치하였다.

대상 폐기물의 가연분 함량은 18.7%로 매립연한의 경과에 따른 유기물 분해가 상당히 진행된 상태였다.

#### 2.2 모형매립조의 실험장치

본 연구에서는 [Fig. 1]과 같이 3개의 모형매립조를 설치하여 운전하였다. 모형매립지조의 경우 2개의 시료 채취구를 설치하여 심도별 가스농도 및 온도의 변화를 측정하였으며, 인공공구의 주입을 위해 모형 매립지의 최상부에 water spray를 설치하였다. 반응기 전체 부피는 244.3L 중 자갈과 복토를 제외한 쓰레기 충전부피는 197.9L이며 쓰레기 충전밀도는 습윤기준으로 약 0.65mg/cm<sup>3</sup>이며, 대상 폐기물의 함수율은 약 31%이다.

공기주입 라인은 하부에서 55cm에서 떨어진 지점에 설치하여 침출수 유입에 의한 공기유로 방해를 사전에 저감하였다.

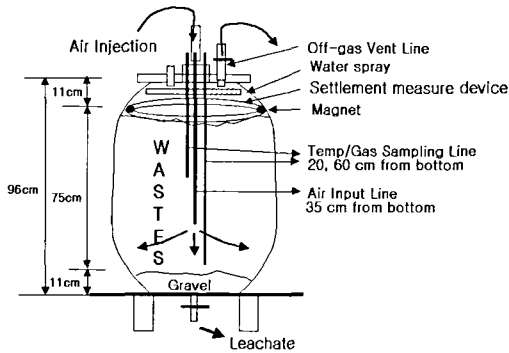
#### 2.3 운전방법

대상 매립지의 공기주입 및 매립가스 추출방식과 3개의 모형매립조의 연속식, 고압 간헐식의 공기주입 방식에 따른 쓰레기 안정화 정도를 평가하기 위해 [Table 1]과 같이 운전을 수행하였다. 모형 매립지의

[Table 1] Operation conditions of lysimeter and field

Item	Lysimeter 1	Lysimeter 2	Lysimeter 3	Field
Capacity	221.4L	221.4L	221.4L	24,300m <sup>3</sup>
Air injection method	Control	Continuous	High pressure intermittent	Continuous injection and extraction
Air injection quantity	-	35mL/min	2L/172min (injection pressure : 2bar)	230m <sup>3</sup> /hr
Gas extraction quantity	-	-	-	230m <sup>3</sup> /hr
Rainfall injection quantity	280mL/day	280mL/day	280mL/day	-

\* 2 bar and 2 L air injection is applicable to 6 L air injection quantity in atmosphere pressure



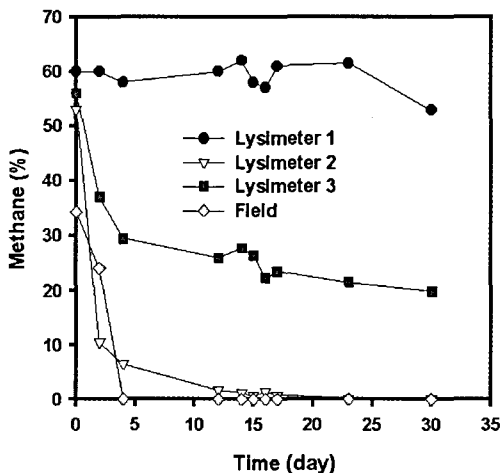
(Fig. 1) Schematic diagram of lysimeter

인공 강우주입은 연간 강우량을 1,200mm, 이중 30%가 침투된다고 가정하고 60cm의 반응기의 직경을 고려하여 매일 280mL씩 주입하였으며, 공기는 모형매립조의 침출수가 발생지점인 강우 주입 38일(10.9L의 강우주입량)후 주입하였다.

또한 대상 매립지의 주입 공기량은 영향반경실험 결과를 토대로, 230m<sup>3</sup>/hr으로 선정하여 공기주입 및 매립가스 추출 운전을 수행했으며, 모형매립조의 주입 공기량은 221.4L의 충전부피를 고려하여 35mL/min로 산정하였다.

### 2.4 분석항목 및 분석방법

가스상 시료는 모형매립조의 시료 채취구에서



(Fig. 2) Variation of methane content with air injection

LMSx의 portable 장비를 이용하여 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> 및 O<sub>2</sub>를 측정하였고 침출수의 BOD<sub>5</sub> 및 COD<sub>Mn</sub>는 수질오염 공정시험법에 준하여 측정하였다. 또한, 온도 probe를 이용하여 모형매립조의 시료채취구에서 온도를 측정하였고, 침하량은 침하판을 이용하여 측정하였다.

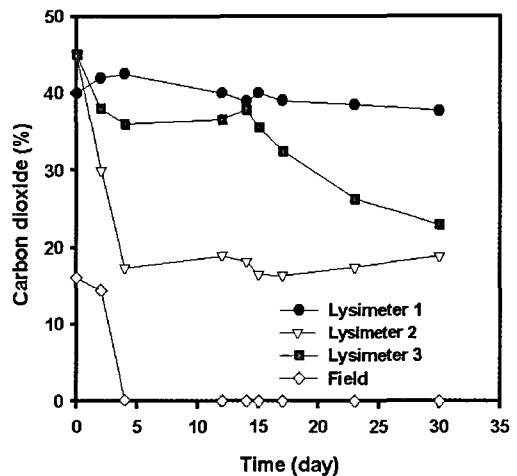
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 모형매립조와 대상 매립지의 매립가스 조성변화

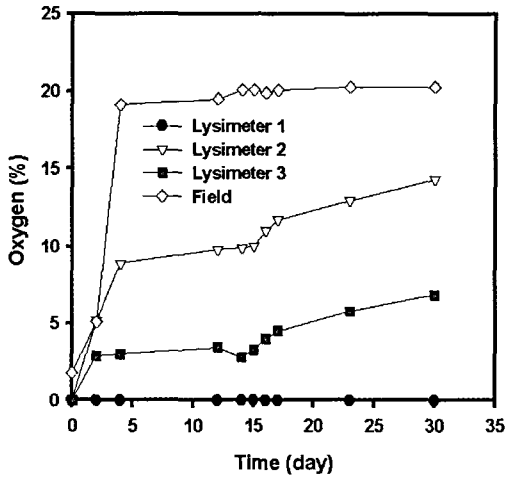
##### 3.1.1 기주입 운전 중 모형매립조와 대상 매립지의 매립가스 농도변화

(Fig. 2)와 (Fig. 3)에 제시된 것과 같이 초기 메탄 농도는 이산화탄소 농도 보다 높았으나 공기주입 후 이산화탄소농도가 메탄농도 보다 높게 나타났다. 모형매립조의 연속주입방식의 경우 운전초기에 급격한 메탄농도의 감소를 보였으며 이산화탄소와 산소농도는 각각 13~19%와 9~14 %를 유지하였다. 이와 같은 결과는 공기주입시 절대혐기성 미생물인 메탄균의 산소에 의한 저해효과와 매립지 내부 가스의 공기에 의한 치환 효과에 기인하는 것으로 판단된다.

모형매립조의 고압 간헐주입식은 공기주입 4일 후, 메탄은 20~30%, 이산화탄소는 26~36%의 농도를 보였으며 이는 메탄균이 완전히 소멸되지 않고 호기성 미생물과의 상호작용으로 인해 미세 혐기성 영역을 유지하고 있는 것으로 보인다. 기존 연구결과에 의하면 호기성 또는 임의성 미생물은 미량의 산소 유입



(Fig. 3) Variation of carbon dioxide content with air injection



[Fig. 4] Variation of oxygen content with air injection

시 산소를 소모하여 내부에 존재하는 메탄균의 저해 효과를 어느 정도 방지할 수 있다고 보고되었다(Kato et al, 1998; Fetzer et al., 1993).

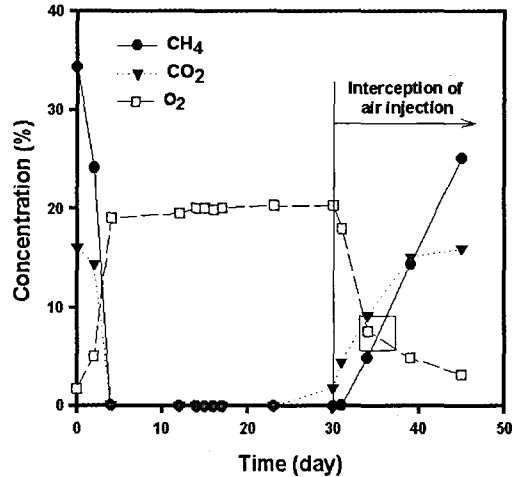
대상 매립지의 초기 메탄과 이산화탄소의 농도는 매립지 쓰레기의 불균질성과 밀도의 차이로 모형매립조의 충전시료가 매립지 전체를 대표하지 못했기 때문에 모형매립조와 비교해서 낮게 나타났다.

[Fig. 5]에 나타난 것과 같이 대상 매립지의 가스농도 변화는 공기주입 및 매립가스 추출운전을 개시한 지 약 2일 후에 내부환경이 호기성으로 전환되었으며 운전을 정지한 후 15일까지 호기성 환경을 유지하다가 급격한 산소 농도의 감소와 메탄 농도의 증가를 보였다. 또한, 대상 매립지에서는 운전초기 급격한 메탄 농도의 감소에도 불구하고 오히려 이산화탄소 농도의 감소를 보였는데 이는 매립폐기물의 비교적 낮은 가연분 함량으로 유기물의 생분해 보다는 매립지 내부의 공기치환에 의한 SVE 효과가 크게 나타났기 때문으로 판단된다.

### 3.1.2 대상 매립지의 공기주입 및 매립가스추출운전 정지 후 매립가스 회복농도

[Fig. 6]은 대상 매립지의 초기 메탄 농도와 공기주입 및 매립가스 추출운전 정지후 3일, 8일, 14일 경과한 메탄 농도의 분포변화를 나타내었다.

대상 매립지의 중심부에서 좌측의 9m 지점과 좌측 하단부의 7.5m 지점의 약 40 %의 메탄농도는 운전



[Fig. 5] Variation of gas composition in landfill

후 수 일 안에 호기성으로 전환되어 급격히 감소하였다.

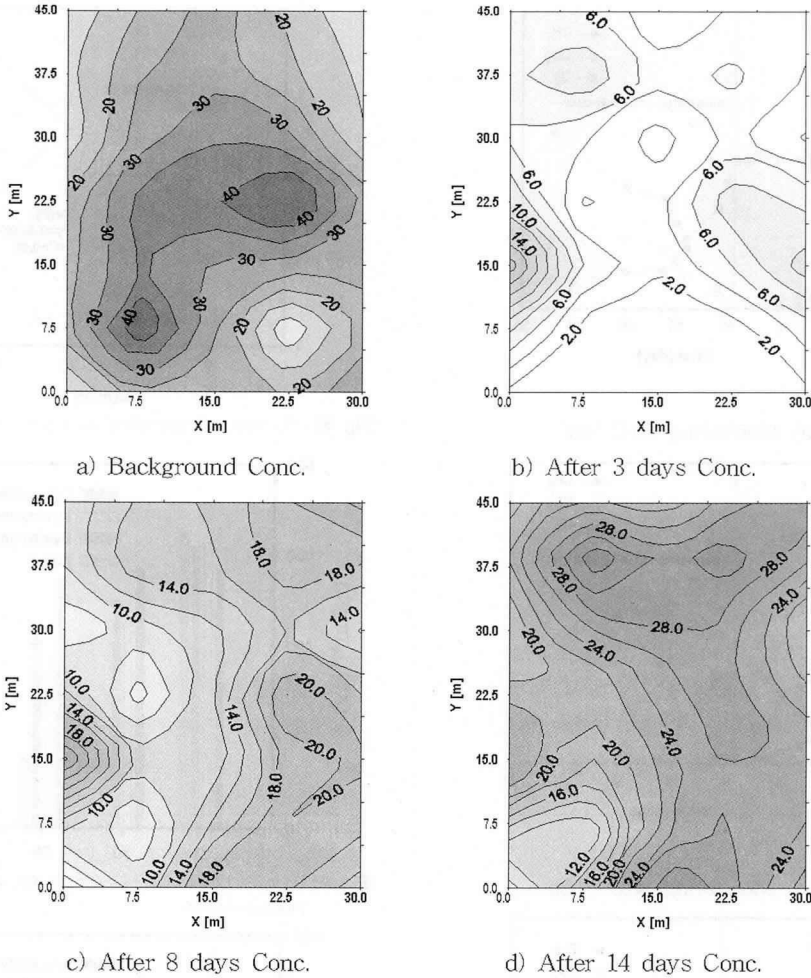
공기주입 및 매립가스 추출운전 정지 후 메탄농도는 매립지 내부의 공기치환에 의한 감소와 호기성 및 혐기성 미생물에 의해 산소가 소모되어 내부 환경이 점차적으로 혐기성상태로 전환되어 증가되었다. 메탄은 운전중지 3일 후, 대상 매립지의 좌 우측 지점에서 2~12%와 운전정지 8일 후, 대상 매립지의 전 지점에서 10~18%의 회복 농도를 보였으나 14일 후에도 계속적으로 호기성 상태를 유지되었다.

### 3.1.3 연속 공기주입 운전/정지 후 대상 매립지의 거리 별 매립가스 조성변화

[Fig. 7]은 90m<sup>3</sup>/hr의 공기량으로 1개의 주입정에서 7일간 연속주입 후, 4m, 7.5m 및 10.5m에 위치한 관측정에서의 매립가스 농도의 변화를 나타내었다.

매립가스의 농도 변화는 관측정의 위치에 관계없이 유사하게 나타났으며, 특히, 주입정에서 가까운 4m 지점의 관측정에서 운전초기에 급격한 메탄과 이산화탄소 농도의 감소를 보였고 운전정지 후 초기농도로 회복하는데 20일 이상이 소요되었다.

10.5m에 위치한 관측정에서는 운전주입 후 10 %의 낮은 산소농도에서 운전초기의 매립가스 농도로 회복하는데 많은 시간이 소요되었다.



[Fig. 6] Variation of methane content of landfill before and after stop of air injection

[Fig. 8]은 40, 60 및 90 m<sup>3</sup>/hr의 공기량으로 1개의 주입점에서 연속주입 후 거리별 산소농도와 압력의 변화를 측정하여 영향반경을 나타내었다. 산소농도와 압력에 의한 영향반경은 커다란 차이는 보이지 않았으며, 이는 쓰레기 매립층내의 통기성이 좋아 압력손실이 상대적으로 작고 호기성 미생물에 의한 유기물의 생분해가 적었기 때문이라 추정된다.

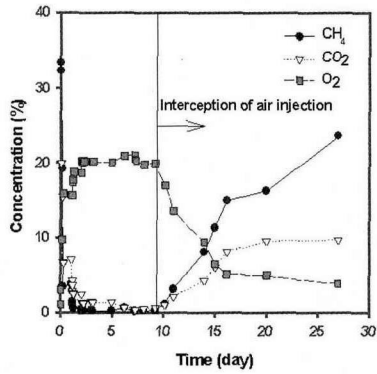
### 3.2 공기주입방식에 따른 침출수 수질 변화

30 일간 운전 후 모형매립조의 침출수 COD 제거율은 Control과 고압 간헐주입 방식에서 각각 40.1와 49.1%를 보인 반면 연속주입 방식에서는 70.6%를 나타내고 있다. 특히, 대상 매립지의 연속 공기주입 및 매립가스 추출방식에서는 79.1%의 COD 제거율을 보

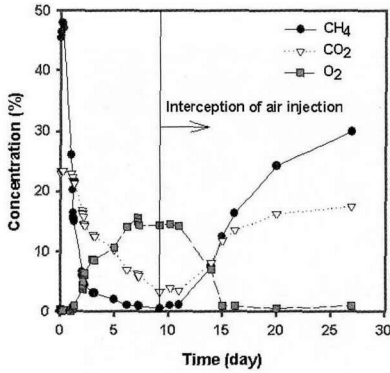
였다.

대상 매립지의 초기 BOD는 27mg/L의 낮은 농도를 보였으며 이때 BOD/CODMn의 비가 0.04로 낮게 나타났다. 일반적으로 매립초기에는 혐기성 분해시 생성된 휘발성 지방산에 의해 유기 및 무기물질의 용해가 촉진되지만 매립경과에 따른 유기물질의 생분해에 의해 BOD는 감소되고 난분해성 물질을 함유한 COD는 축적되어 BOD/COD의 비가 감소된다(Christensen et al., 1989).

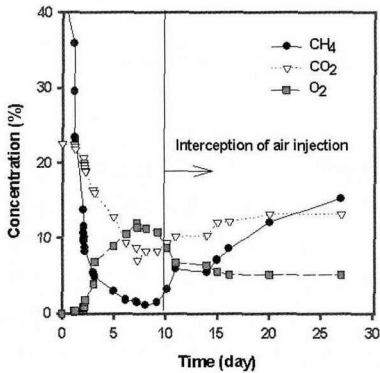
반면에 대상 매립지와 비교하여 모형매립조의 초기 BOD는 높게 나타났는데 이는 모형 매립조의 매립쓰레기 충전시 비닐쓰레기에 쌓인 음식쓰레기를 개폐하여 충전했기 때문이라 추정된다.



a) Monitoring well (4m)



b) Monitoring well (7.5m)

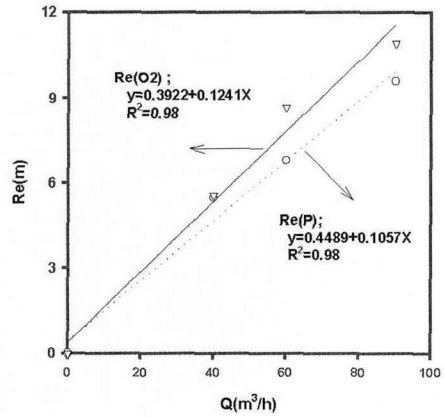


c) Monitoring well (10.5m)

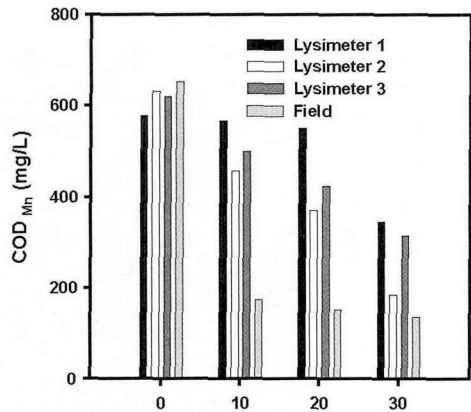
[Fig. 7] Gas composition of monitoring well

### 3.3 공기주입방식에 따른 모형매립조의 침하량 비교

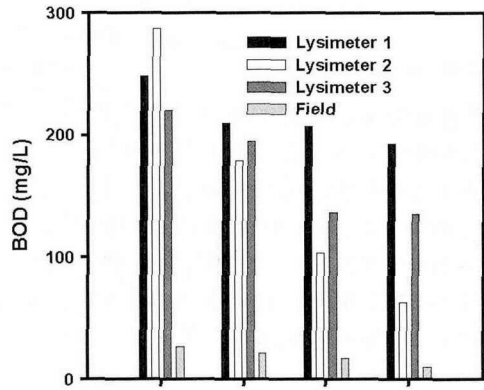
공기주입전 초기 침하량은 14~11mm로 측정되었으며 이는 모형매립조에 충전된 시료의 압축에 의한



[Fig. 8] Influence radii according to oxygen and pressure

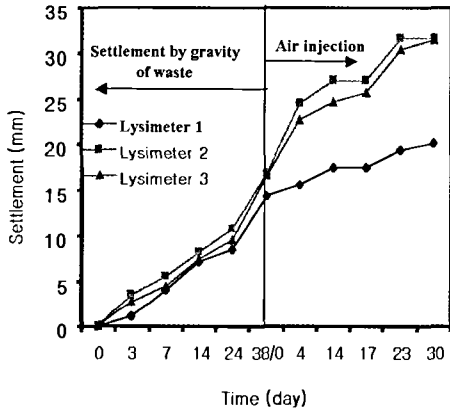


[Fig. 9] Variation of COD<sub>Mn</sub> in leachate with various air injection mode



[Fig. 10] Variation of BOD in leachate with various air injection mode

자중침하 현상으로 이는 전체 침하량 중 약 55%를 차지한다. 공기주입 운전한 모형매립조는 유기물의 생분해와 폐기물의 공극을 증가에 의한 압축으로 Control 과 비교해 침하량은 현저한 차이를 보였으며, 연속주입



(Fig. 11) Variation of settlement in each lysimeters

식은 고압간헐주입식과 비교하여 대체로 침하량이 약간 크게 나타났으나 30일 경과 후 침하량은 각각 31~32mm의 비슷한 침하량을 보였다.

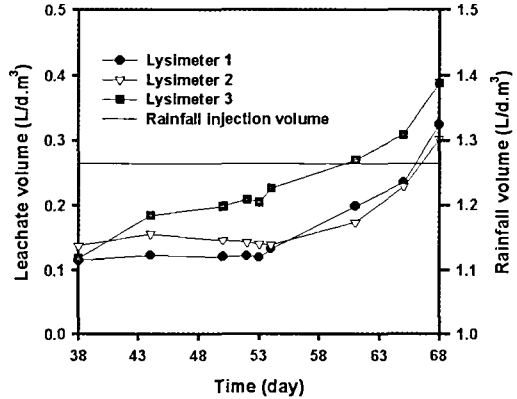
일반적으로 가연성 폐기물의 경우는 매립초기에 압축에 의한 침하가 주로 발생하며 상당시간 경과 후 매립지 내부의 미생물 활동이 활발해지면 부식에 의한 침하가 발생한다. 또한, 불연성 폐기물이나 대형폐기물의 경우에는 압축침하와 파괴침하가 주요인으로 작용한다(삼성물산(주), 1994).

### 3.4 공기주입방식에 따른 모형매립조의 침출수 배출량 비교

공기주입 30일 후, 19.3L의 총 강우주입량 중 Control은 4.9L, 연속주입식은 4.6L, 고압간헐주입식은 5.8L의 누적 침출수 배출량을 보였으며 이는 모형매립조의 총진용적당 일일 침출수 배출량으로 환산하면 각각 0.33, 0.30, 0.39L/d · m<sup>3</sup>에 해당된다.

연속주입방식은 압축에 의한 쓰레기층 밀도의 증가에도 불구하고 미생물의 활성화에 온도상승과 증발산으로 현저한 침출수량의 증가는 보이지 않은 반면, 고압 간헐주입식은 고압주입에 의한 미세분열과 channelling 현상으로 많은 침출수 배출량을 나타냈다.

매립지 폐기물의 수분량은 고형쓰레기의 가수분해 및 생물학적 분해, 강우의 침투에 의해 생성되며, 침출수의 배출이 일어나기 전에 쓰레기층 내에 흡수된다. 그러나 매립년수가 경과됨에 따라 쓰레기내 수분 보유 능력이 지배하는 유기물질의 감소, 압축에 의한 쓰레기 밀도의 증가, field capacity의 감소 등에 의해 침



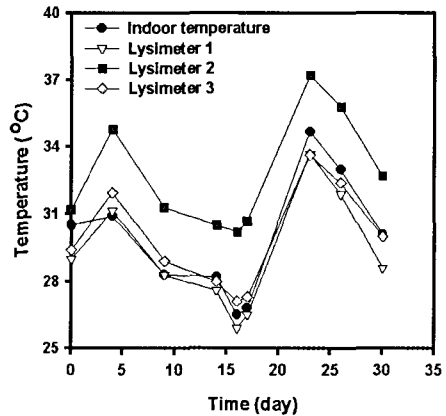
(Fig. 12) Variation of leachate volume in each lysimeters

출수량의 증가를 가져온다. Christensen 등(1989)의 연구결과에 의하면 폐기물의 분해와 압축과정에 의해 매립지의 field capacity는 초기 쓰레기 80%에서 4년 이상이 경과된 쓰레기는 63~74%로 감소되어 침출수량의 증가를 가져온다고 알려져 있다.

### 3.5 모형매립조의 공기주입방식에 따른 온도 변화

매립지의 경우 폐기물층에 의한 단열 효과에 의해 혐기성 분해시 발생하는 열이 매립층 내부의 온도를 증가시키며 일반적으로 30~45℃의 온도를 유지하게 된다(Rees, 1980).

모형매립조의 온도는 실내온도에 민감한 영향을 보였으며 공기주입중 평균 온도는 Control, 고압간헐주입식 및 연속주입식은 각각 29℃, 30℃, 33℃를 보였다. 연속주입방식은 고압간헐주입식 보다 유기물 생분해에 따른 미생물 활성화로 약간의 온도 상승을 가져



(Fig. 13) Variation of temperature in each lysimeters

왔다.

그러나 일반적인 호기성으로 전환시 발생하는 온도 상승에 비교하여 전반적으로 온도가 낮게 나타났는데 이는 충전쓰레기의 낮은 유기물 함량, 과도한 공기주입으로 인한 열손실이 일어났기 때문으로 사료된다.

#### 4. 결론

- 1) 대상 매립지의 공기주입과 매립가스 추출운전 결과는 유기물의 생분해 보다는 매립지 내부의 공기치환에 의한 SVE 효과가 크게 나타났으며, 매립종료 약 8년 이상이 경과하고 가연분 함량이 적은 종료매립지의 경우는 사전 안정화를 위한 산소전달 방식으로 저압, 저유량의 연속 공기주입운전이 바람직한 것으로 사료된다.
- 2) 매립지의 공기주입 및 매립가스 추출기술은 매립지의 내부환경을 수일 내로 호기성 상태로 전환되고 운전정지 14일 후에도 호기성상태를 유지하므로 매립지 굴착, 선별, 이송시 이기술의 도입은 발생될 수 있는 가스문제를 사전에 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 공기주입 및 매립가스 추출운전과 연속 공기주입운전은 매립가스의 발생량 억제, 침출수수질 개선 및 조기침하에 의한 쓰레기층의 부피 감소를 유도할 수 있어 종료 매립지로 인한 이차오염 방지할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. Christensen, T. H., Cossu, R., and Stegmann, R.(1989) Landfilling of Waste: Leachate, published by E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, London.
2. Fetzer, S. F., and Conrad, R.(1993) Sensitivity of Methanogenic Bacteria from Paddy Soil to Oxygen and Desiccation, FEMS Microbiology Ecology, 12, 107-115
3. Kato, M. T., Field, J. A., and Lettinga, G.(1993) Methanogenesis of Granular Sludge Exposed to Oxygen, FEMS Microbiology Letters, 66, 87-94
4. Rees, J. F.(1980) Fate of Carbon Compounds in the Landfill Disposal of Organic
5. Matter, Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 30, 458-465
6. 농어촌진흥공사(1998) 농어촌지역 소규모 쓰레기매립지 계획설계 기법개발 연구, 92-93
7. 삼성물산(주)(1994) 모형 매립지를 이용한 폐기물 매립지 안정화 연구, 22, 61-62
8. 환경부(1997) 사용종료 매립지 실태조사결과 및 지하수 오염방지 대책 ㉔