

쓰레기 매립지에서 대기중에 유출하는 가스 분포

이해승 · 이찬기*

강원대학교 환경연구소 · *강원대학교 환경 · 생물공학부

Distribution of Gas Extruded from Sanitary Landfill

Hae-Seung Lee · Chan-Ki Lee*

Environmental Research Institute, KangWon National University

**Division of Environmental and Biological Engineering, KangWon National University*

ABSTRACT

This study presents a surveying of methane and carbon dioxide at sanitary landfills. The following results are obtained.

- (1) The majority of methane and the half of carbon dioxide pour out from vertical gas vents.
- (2) The quantity of carbon dioxide in cover soil was greater than methane.
- (3) Even though gas extrusion in side slop area was small, the quantity of gas extrusion in side slop area was much greater than in coversoil area as especially carbon dioxide rate.
- (4) As were carried raw refuse layer, methane extrusion was trace, but carbon dioxide was large.
- (5) Gas extrusion quantity were changed by the compaction of soil, and the operating area of refuse.
- (6) Carbon dioxide portioned much larger in the whole landfill, but methane portioned much larger in gas vent and cover soil.

요 약 문

본 연구는 여러 종류의 매립지에서 발생가스를 측정하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) CH₄ 가스는 대부분 수직가스포집관에서 유출되며, CO₂ 가스는 총유출량의 약 50% 정도가 수직가스포집관을 통하여 유출된다.
- (2) 매립지 표면에서는 CH₄ 가스 보다 CO₂ 가스가 많이 유출된다.
- (3) 사면 복토층은 면적비율이 작으나 가스 발생량이 많으며, 특히 CO₂ 가스의 발생율이 높다.

- (4) 새로 반입된 쓰레기층 표면에서의 CH_4 가스 발생량은 미소이므로 무시하여도 되나, CO_2 가스 유출량이 많다.
- (5) 쓰레기층 노출, 복토층 다짐정도등에 따라 가스 발생량의 변화를 보인다.
- (6) 가스포집관과 복토 표면에서의 가스 유출량은 CH_4 가스 유출이 많으나, 매립지 전체에서는 CO_2 가스 유출량이 많다.

1. 연구배경 및 목적

쓰레기 문제의 직접적인 원인은 쓰레기 매립 부지의 취득난에 있다. 이런 취득난 어려움의 이유로는 매립지에서 발생하는 침출수에 의한 주변 하천의 오염과 유출 가스에 의한 식물의 고사, 지구 온난화 등 많은 문제점을 들수 있다. 특히, 매립가스는 메탄가스·탄산가스¹⁾가 주성분으로, 메탄가스²⁾는 쓰레기 매립 작업중에 인근주민과 작업자에 위험한 가스가 되고, 매립완료 후에는 토지이용에 저해요인이 된다. 또한 탄산가스와 메탄가스는 지구 온난화의 원인물질이 되기도 한다. 한편 최종처분장에 매립된 폐기물의 분해 매카니즘은, 폐기물층내 조건에 의해 변화되나, 대체적으로 고분자화합물이 저분자화되어 당류, 유기물, 알콜 등의 중간 생성물로 변환되고, 최종적으로는 물과 기체(탄산, 메탄)등으로 전환된다. 실제 매립지 전체는 호기성 상태와 혐기성 상태가 공존함에 따라 CH_4 , NH_3 가 발생함과 동시에 미량물질인 H_2S , $(CH_3)_2S$, CH_3SH 등이 생성된다. 쓰레기 매립지에서 유출되는 전체 가스량은 대량이나 가스 포집관과 복토층을 통한 유출은 미량^{3,4)}이므로 정확한 측정은 곤란하고, 복토층에서의 유출시에는 측정 장비의 고가와 측정시간의 소요 등으로 실제 쓰레기 매립지에서의 가스 발생특성은 상세히 파악되지 않고 있다⁴⁾. 따라서 본 연구는 매립 작업중인 "실 매립지의 어떤 장소에서, 얼마만큼의 가스가 유출하는지"에 관하여 측정하여 매립지의 환경 파괴 원인물질인 매립가스의 분포특성을 제시하고자 한다.

2. 측정방법 및 분석방법

2.1 매립지의 개요

측정대상지는 준호기성 매립구조로 운영되고 있는 일본의 인구 5만인 H시와 6만인 E시 매립지로 하였으며, H시 매립지는 Fig. 1과 같이 가스포집관과 침출수 집배수관이 연결되어 있는 구조이다. 또한, H시 매립지는 3개로 구획되어 관리되며, 매립물은 Fig. 2와 같이 음식 쓰레기와 지류의 성분이 각각 약 30%로 유기물 성분이 많으며, E시 매립지는 소각재와 불연물이 주매립물이다(Table 1 참조).

Table 1. The Outline of Sanitary Landfill

	H시			E시
	제 I 기	제 II 기	제 III 기	
매립물	혼합 쓰레기	혼합 쓰레기	혼합 쓰레기	소각재, 불연물
매립상황	매립 종료 후 12년	매립 종료 후 4년	매립 중	매립 중
가스 포집관	유 (3)	유 (14)	유 (23)	무
침출수 집수관	유	유	유	유
매립 면적 [㎡]	7,007	27,205	26,900	17,370

2.2 측정방법

측정대상은 가스포집관과 매립지 표면으로, 가스포집관은 전지점, 매립지 표면은 상부, 중앙부, 하류부 각각 5지점을 선정하였다. 측정항목은, (1) 수직가스포집관(내경 200 mm)과 사면가스포집관(내경 100 mm)내의 가스농도, 온도, 유속을 관측구부터 0.5 m씩의 간격으로, (2) 포집관 이

외는 복토층의 표면(CS), 복토층의 사면(IS), 쓰레기층의 표면(WS) 및 복토와 차수막의 접촉면(IB)등에서의 CO₂ flux, CH₄ flux, (3) 모니터 지점(MP)의 복토층내 가스조성 분포 및 온도 분포, 복토층의 투기계수 등을 측정하였다. 측정기간은 1994년 3월~1995년 11월에 걸쳐 약 2년간 행하였다.

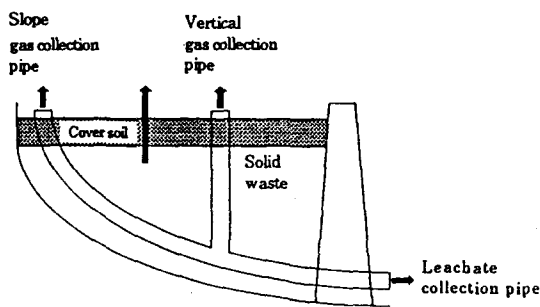


Fig. 1. Release Paths of Landfill Gas to the Environment in Semi-aerobic Landfill

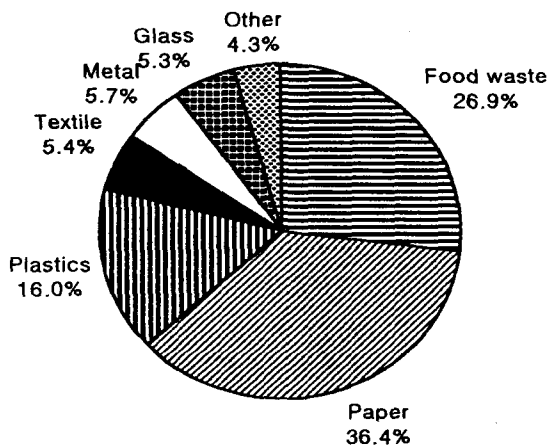


Fig. 2. Waste Composition in H Landfill (on Wet Base)

2.3 분석방법

가스조성(CO₂, CH₄, H₂, O₂)은 휴대용 GC(일본Tairun-M200)를 이용하여 분석하고, 일부는 샘플링하여 실험실에서 TCD GC로 분석하였다. flux 측정은 Fig. 3와 같이 직사광선을 피하고 교

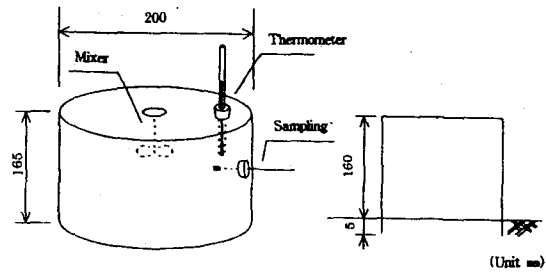


Fig. 3. A Shape of Closed Chamber

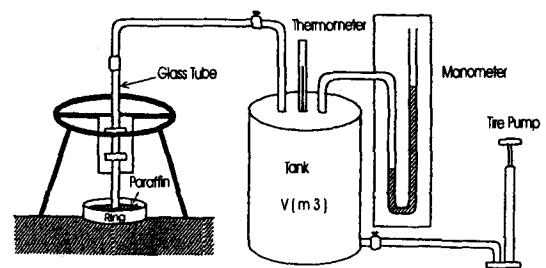


Fig. 4. A Shape of Permeability Equipment

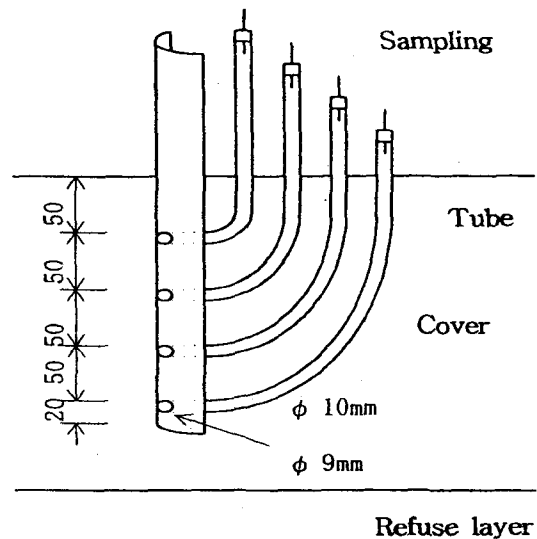


Fig. 5. A Shape of Gas Monitor in Cover Soil

반을 행할수 있는 내경 200 mm, 높이 165 mm의 원통형 closed chamber^{5,6)}를 이용하여, chamber내의 가스 5 mL을 설치직후 0분부터 25분까지 5분간격으로 채취하여 분석하였으며,

경과속도로 부터 가스의 flux를 계산하였다. 가스포집관내의 유속은 열선식 풍속계(Kanomax Anemomaster Model 6071)로 측정하고, 온도는 수은 온도계 및 열전대식 온도계(자작, Yokogawa 디지털)를 이용하여 측정하였다. 또한, 투기계수는 Fig. 4와 같은 Evans & Kilkham^{7,8)}이 제시한 방법으로, 복토층내의 가스조성과 온도분포를 파악하기 위한 모니터관은 Fig. 5과 같이 설치하여 5cm간격으로 3회 측정하였다.

3. 측정결과 및 고찰

3.1 가스 유출특성

3.1.1 가스 포집관

수직가스포집관의 형태는 Fig. 6과 같이 돌망태로 가스 포집관을 지지하고 있으므로, 복토층위의 노출부에서는 바람의 영향으로 돌망태 틈으로 가스가 유출되거나, 외부공기가 관내에 침입한다. 따라서 바람의 영향 유무를 파악하기 위해 보호대 주위를 비닐 카바를 설치한 경

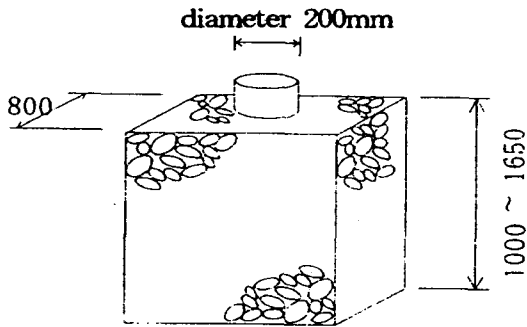


Fig. 6. A Shape of Gas Vent

우와 설치하지 않은 경우에 대해 측정한 결과, Fig. 7과 같이 바람의 영향을 제어하는 측정장치(비닐카바)가 고려되는 것이 타당할 것으로 판단되었다. 또한, 비닐 카바한 경우의 농도 분포는 출구부로 부터 0.5 m 지점까지는 일정한 조성을 나타내므로, 이 측정값(0.5 m 지점)의

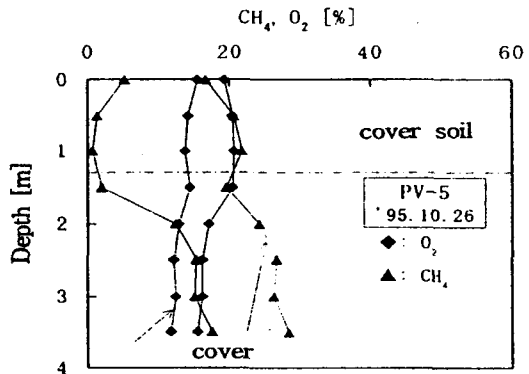
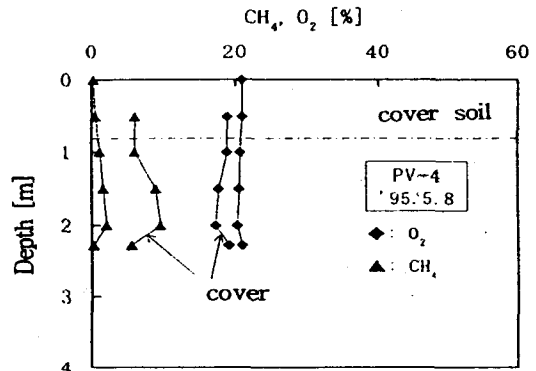
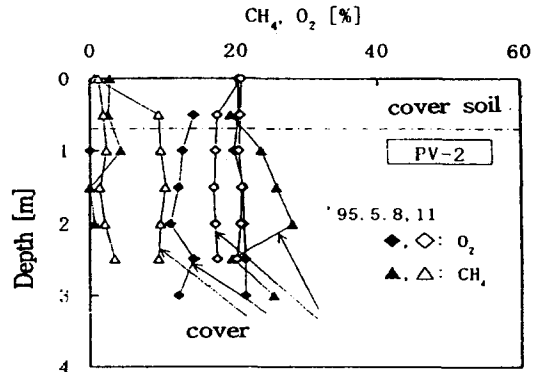


Fig. 7. Influence of Wind in Surveying Gas

가스 조성은 Fig. 8 및 Fig. 9과 같이 $CH_4/CO_2 = 1.5 \sim 2.0$, $O_2/N_2 = 0.24$ 로 조사되었다. 따라서 Fig. 10에서와 같이 매립지 내의 가스 포집관별 가스 유출량은 장소에 따라 약 4배의 차이가 나므로, 매립지의 가스 포집관에서 가스

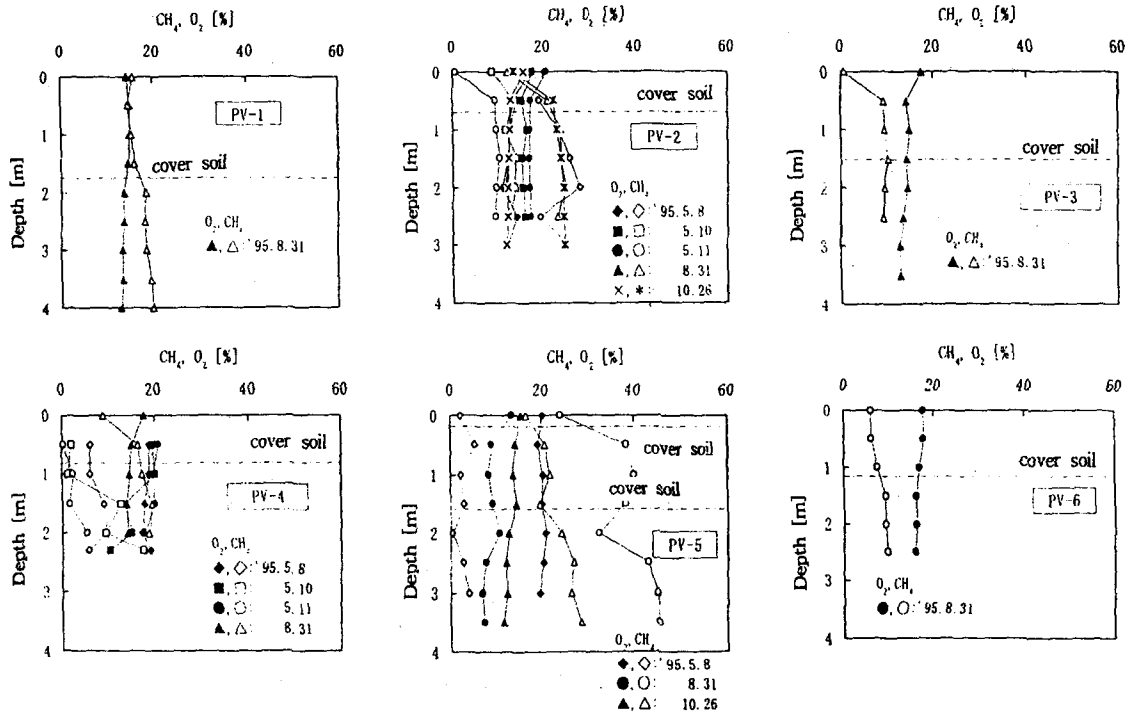


Fig. 8. Gas Composition in the Gas Vent

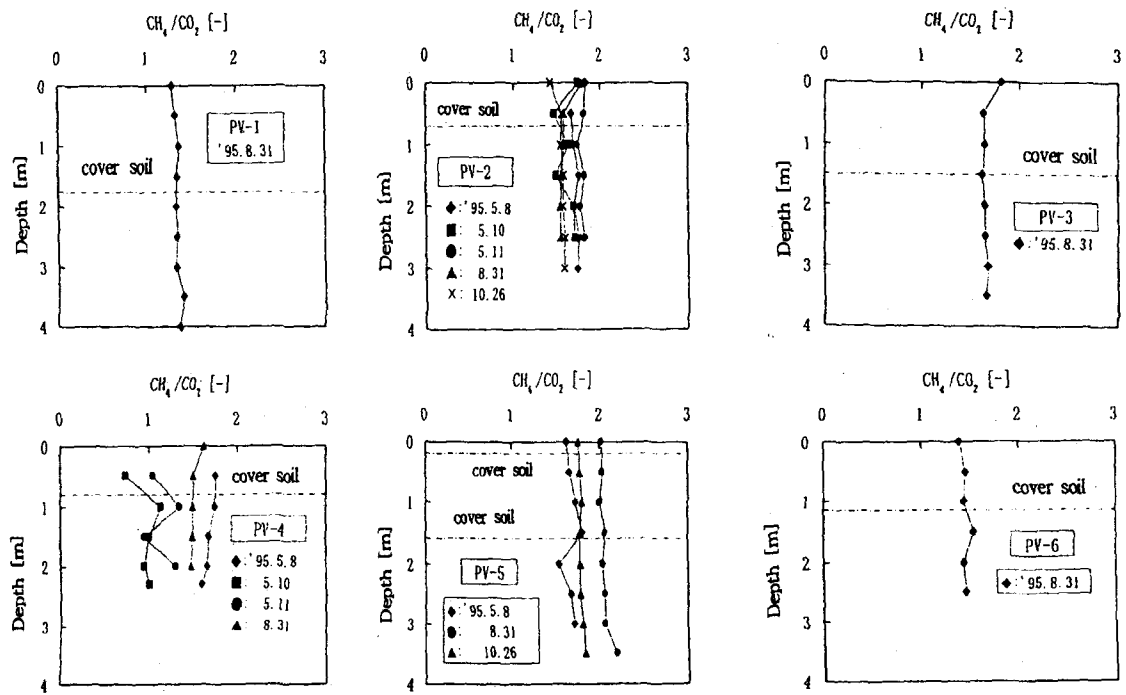


Fig. 9. Distribution of CH₄/CO₂ in the Vertical Gas Vent

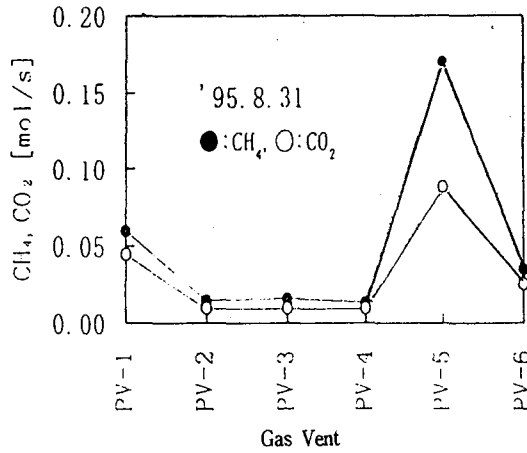


Fig. 10. Distribution of Gas Extrusion Quantity in the Gas Vent

유출량을 계산할 때는 전지점을 측정하는 것이 측정결과의 신뢰도를 향상시킬수 있는 것으로 판단된다.

3.1.2 표면flux

Chamber를 이용하여 같은 날, 같은 장소에서 flux를 측정한 결과 Fig. 11과 같이 변화폭이 크므로, Yamata⁴⁾, Peter²⁾도 보고하였듯이 대기압의 영향을 받는 것으로 판단된다. 또한 한 지점을 중심으로 반경 1 m 떨어진 지점의 flux 측정값도 Fig. 12와 같이 10 배 정도의 차가 있어, 시간

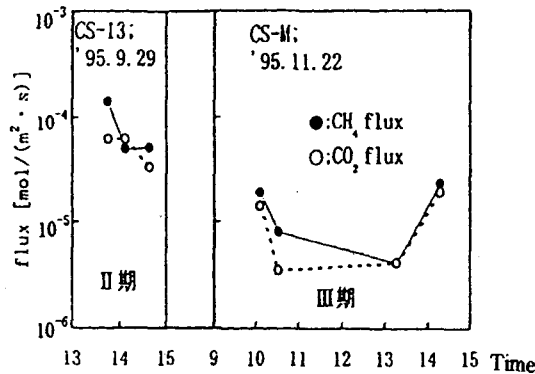


Fig. 11. Variation of Flux as Time Changes at the Same Place

과 장소에 따라 유출 변동이 큼을 알수 있다. 한편 매립지 표면에서는 Fig. 13과 같이 CH₄ flux는 10⁻⁹~10⁻⁴ mol/m²·s, CO₂ flux는 10⁻⁷~10⁻⁴ mol/m²·s 정도로, 가스 flux가 큰 지점에서는 CH₄ flux ≃ CO₂ flux, 가스 flux가 작은 지점에서는 CH₄ flux < CO₂ flux로 유출되었다. 북토와 차수막 접촉면의 flux는 북토표면의 flux와 큰 차를 나타내지 않았으나, 사면북토의 flux는 북토표면과 비교하여 대체적으로 높은 것으로 조사되었다. 또한 매립중인 쓰레기층 표면에서는 반입후 공기가 포함된 호기성 상태이므로 대부분 CO₂ 가스가 유출되었다.

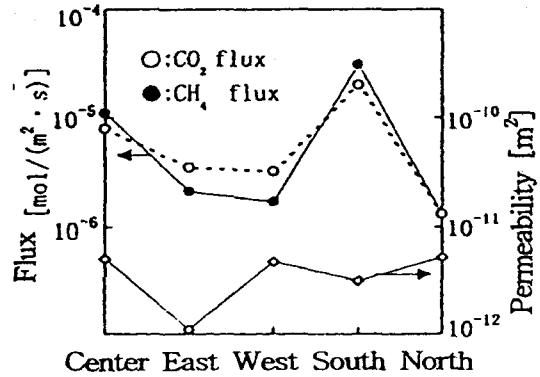


Fig. 12. Variation of Flux at Five Different Places ; at the Center, 1m from the Center to East, West, South and North

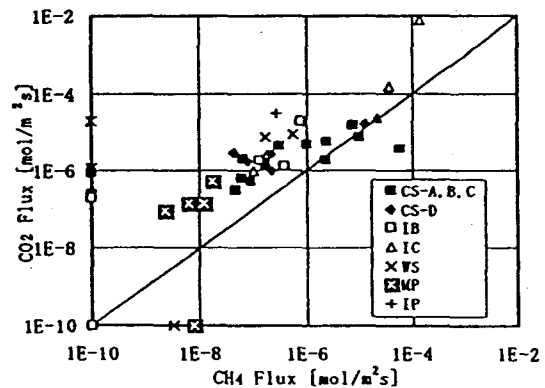


Fig. 13. Result of Flux Survey in Cover Soil

3.1.3 가스 포집관과 복토층 이외의 지역

H시 제 I 기 침출수 집배수관 출구에서는 가스 유출이 감지되었으나 유출량이 1개의 가스 포집관 유출량의 1/10정도로 미미한 수준이었고, E 시 소각재 매립지의 저부 침출수 집배수관과 연결되어 있는 들망테에서는 검출되지 않았다. 또한 H시 제 II 기 매립지 5개의 오수 맨홀에서도 가스 유출이 감지되었으나 유출량이 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s}$ 정도로 1개의 가스 포집관 유출량의 1/1000 정도로 미미한 수준이었다.

3.1.4 복토층의 투기계수

투기계수는 복토완료일부터 시간이 경과할수록 작은 것으로 측정되었으며, 또한 쓰레기 작업차가 지나가는 지점, 수분 함량이 큰 지점등에서 복토층의 다짐과 함수비의 증가로 인해 투기계수가 작은 것으로 나타났다.

3.2 가스 유출량의 계절변화

3.2.1 가스 포집관

H시 제 I, II 기 매립지 가스 포집관(Fig. 14a)에서 가스 유출량을 합계하여 계절별로 비교한 결과, 가을이 여름에 비하여 제 I 기에서는 1/3, 제 II 기에서는 1/2 정도로 유출량이 감소하였는데 이는 기온의 저하로 인해 가스 생성량이 저하된 것으로 유추된다. 또한 H시 제 III 기(Fig. 14b)

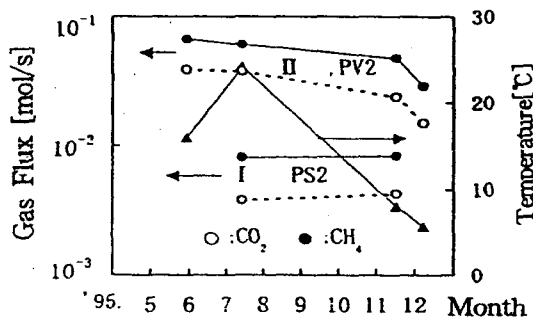


Fig. 14a. Variation of Gas Flux as Season Changes at a Gas Vent ; (First and Second Landfills)

에서의 12, 3, 5, 8월의 유출량을 비교하면 3월 > 8월 > 5, 12월의 순으로 유출량이 감소하는데, 3월의 측정시에는 매립지 전체가 눈으로 덮여 있어 가스 포집관을 통해 유출되는 것으로 추측된다.

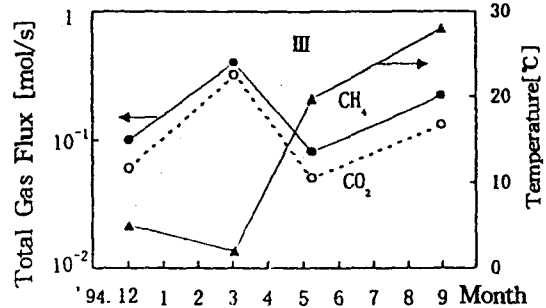


Fig. 14b. Variation of Gas Flux as Season Changes at a Gas Vent ; (Third Landfills)

3.2.2 표면 flux

H시 제 I, II 기 매립지의 같은 장소에서 측정 시기를 변화하여 측정한 결과, 제 I, II 기(Fig. 15)에서는 여름이 가을의 1~2개소 지점을 제외하고는 가스가 10배 정도 많이 유출하는 것으로 나타났다. 또한 측정 flux가 $10^5 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s}$ 정도에서는 계절에 의한 유출 변화가 크고, $10^4 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s}$ 정도에서는 계절에 의한 유출 변화가 작은 것으로 유추된다. 이는 매립지 내부에서 분해가 활발하면 외부 기온의 영향이 적어 유출량의

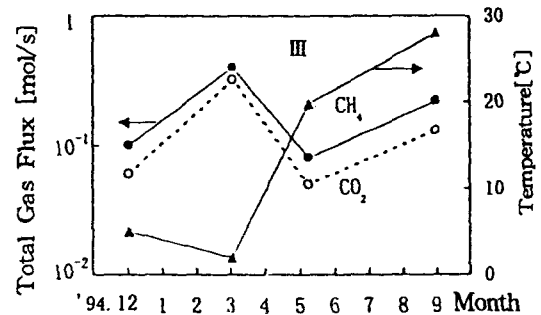


Fig. 15. Variation of Total Gas Flux as Season Changes (First and Second Landfills)

변화가 적으나, 분해가 거의 종료되면 외부 기온이 매립장내에 영향을 주어 유출량의 변화가 클 것으로 추측된다²⁾.

3.3 복토층내 가스분포

매립지부터 가스유량, 복토층내 농도분포, 쓰레기층내 압력, 농도, 온도 등을 파악하기 위하여 모니터장치를 설치하였다. monitor관의 가스유량 측정시에는 비누방울측정기(soap film)과 열선식 풍속계를 이용하여 측정한 가스 유량은, 비누방울측정기의 측정 저항과 열선식 풍속계의 가스조성에 의해 오차⁶⁾가 나타났다. 복토층내의 CH₄ 농도, CO₂농도는 Fig. 16과 같이 복토표면으로부터 깊이 10 cm까지는 농도가 감소하나, 10 cm부터는 쓰레기층과 같은 농도치를 보였다. 단, 11월 21일의 복토층내 CH₄, CO₂는 장치 매립후 1시간의 측정값이므로 농도가 낮았다. 또한 복토층내 5 cm 까지는 CO₄/CO₂비가 일정하므로 메탄산화반응(CH₄+2O₂→CO₂+2H₂O (L))에 의해 소비가 일어나지 않았다. 이는 경계층을 고려한 가스의 이류·확산모델에 의해 설명될수 있다고 판단된다(부록 1 참조). 매립지내 온도는 외기온도의 영향이 적고, 매립지내일수록 높은 것으로 나타났다(Fig. 15 참조). 또한 H시의 혼합 쓰레기 매립지에서는 매립종료 년수가 길수록 가스 유출이 약하게 유출되었다. 소각재 주체

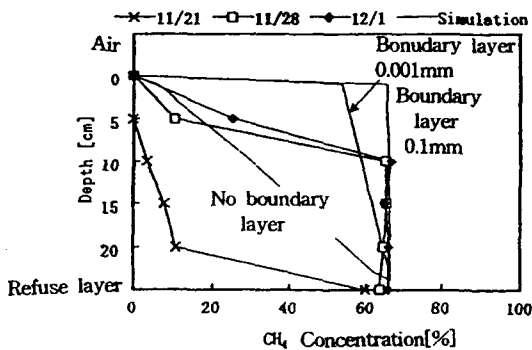


Fig. 16. Distribution of Gas Composition in Cover Soil

의 E시 매립지에서는 CH₄, CO₂의 유출이 약하여 깊이 90 cm 까지는 공기(산소)가 침투하며, CH₄에 비하여 CO₂의 농도가 높게 측정되었다.

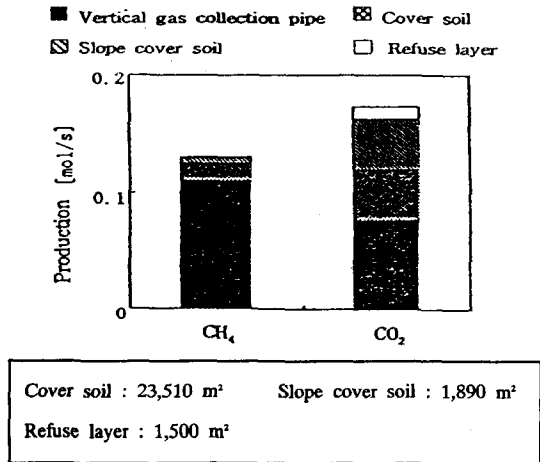


Fig. 17. Gas Extrusion Quantity of Sanitary Landfill

4. 결 론

3장의 측정결과로 쓰레기 매립지에서의 가스 유출량을 계산하였다. 계산방법은 복토(수평)표면, 법면복토, 쓰레기층면으로 각각의 면적을구해, flux는 측정치의 대수평균치로 각각의 가스 유출량을 구했다. 또한, 가스포집관에서의 가스량은 가스 포집관내 각각의 평균유속을 계산하여, 관출구 5 cm 지점의 가스조성 평균치를 곱하여 다음의 결과를 얻었다.

- (a) CH₄ 가스는 대부분 수직가스포집관에서 유출되며, CO₂ 가스는 총유출량의 약 50% 정도가 수직가스포집관을 통하여 유출된다.
- (b) 매립지 표면에서는 CH₄ 가스 보다 CO₂ 가스가 많이 유출된다.
- (c) 법면 복토층은 면적비율이 작으나 가스 발생량이 많으며, 특히 CO₂ 가스의 발생율이 높다.
- (d) 새로 반입된 쓰레기층 표면에서의 CH₄ 가스 발생량은 미소이므로 무시하여도 되나, CO₂

가스 유출량이 많다.

- (e) 쓰레기층 노출, 복토층 다짐정도등에 따라 발생량의 변화를 보인다.
- (f) 가스포집관과 복토 표면을 포함한 가스 유출량은 CH₄ 가스 유출이 많으나, 전체로는 CO₂ 가스 유출량이 많다.

부록1) 압력차와 농도차를 고려한 복토층 부터의 가스 flux 계산

1.1 가정과 기본식

- 가스 성분은 4 성분(가정 1)
CH₄; m, CO₂; c, O₂; o, N₂; n
- 대기에서의 CH₄, CO₂, O₂ 와 N₂의 농도는 기존의 대기농도를 사용(가정 2)

$$z = \Delta z \text{로, } x_o^A = 0.21, x_n^A = 0.79, \\ x_m^A = 0.0, x_c^A = 0.003 \quad (\text{부1-1})$$

단, chamber를 덮는 경우에는 변동한다.

- 복토내에서는 메탄산화반응(CH₄+2O₂ → CO₂+2H₂O)을 가정하고, 반응속도는 식(부1-2)와 같이 설정한다.(가정 3)

$$R_{CH_4} = -R_{\max} \cdot x_o \cdot x_m \quad (\text{부1-2})$$

여기서, R_{max}는 반응속도정수 [mol/(m³ · s)]로 가정한다.

- 복토층내 가스 밀도는 일정하고, 압력은 대기압을 사용한다.(가정 4)

$$\rho = \frac{P_0}{RT} \quad [\text{mol/m}^3] \quad (\text{부1-3})$$

- 복토층내의 가스물성은 가스조성이 일정하게 계산한다.(가정 5)
- 쓰레기층으로 부터 가스 발생량은 일정하고, 메탄가스 flux $x_m^R \cdot F$, 탄산가스 flux $x_c^R \cdot F$ 가 쓰레기층으로 부터 공급된다.(가정 6)
- 정상상태로 가정한다.(가정 7)
- Stefan-Maxwell의 확산식으로 부터

$$-\frac{P_0}{RT} \cdot \frac{\partial x_m}{\partial z} = \left(\frac{N_m^D \cdot x_c - N_c^D \cdot x_m}{D_{mc}^0} + \frac{N_m^D \cdot x_o - N_o^D \cdot x_m}{D_{mo}^0} + \frac{N_m^D \cdot x_n - N_n^D \cdot x_m}{D_{mn}^0} \right) \cdot \frac{\xi}{\varepsilon} \quad (\text{부1-4a})$$

$$-\frac{P_0}{RT} \cdot \frac{\partial x_c}{\partial z} = \left(\frac{N_c^D \cdot x_m - N_m^D \cdot x_c}{D_{mc}^0} + \frac{N_c^D \cdot x_o - N_o^D \cdot x_c}{D_{co}^0} + \frac{N_c^D \cdot x_n - N_n^D \cdot x_c}{D_{cn}^0} \right) \cdot \frac{\xi}{\varepsilon} \quad (\text{부1-4b})$$

$$-\frac{P_0}{RT} \cdot \frac{\partial x_o}{\partial z} = \left(\frac{N_o^D \cdot x_m - N_m^D \cdot x_o}{D_{mo}^0} + \frac{N_o^D \cdot x_c - N_c^D \cdot x_o}{D_{co}^0} + \frac{N_o^D \cdot x_n - N_n^D \cdot x_o}{D_{on}^0} \right) \cdot \frac{\xi}{\varepsilon} \quad (\text{부1-4c})$$

$$-\frac{P_0}{RT} \cdot \frac{\partial x_n}{\partial z} = \left(\frac{N_n^D \cdot x_m - N_m^D \cdot x_n}{D_{mn}^0} + \frac{N_n^D \cdot x_c - N_c^D \cdot x_n}{D_{cn}^0} + \frac{N_n^D \cdot x_o - N_o^D \cdot x_n}{D_{on}^0} \right) \cdot \frac{\xi}{\varepsilon} \quad (\text{부1-4d})$$

상기의 식중 3개의 식만이 유효한 식으로 성립된다.

또 가스 성분은 4성분으로 구성되므로

$$x_m + x_c + x_o + x_n = 1.0 \quad (\text{부1-5})$$

자유확산식으로 부터

$$N_m^D \cdot \sqrt{M_m} + N_c^D \cdot \sqrt{M_c} + N_o^D \cdot \sqrt{M_o} = 0 \quad (\text{부1-6})$$

물질 수지식은 $\frac{\varepsilon}{RT} \cdot \frac{\partial P_i}{\partial t} = -\frac{\partial N_i^t}{\partial z} + R_i$ 이므로

$$0 = -\frac{\partial N_m^t}{\partial z} - R_{\max} \cdot x_m \cdot x_o \quad (\text{부1-7a})$$

$$0 = -\frac{\partial N_c^t}{\partial z} - R_{\max} \cdot x_m \cdot x_o \quad (\text{부1-7b})$$

$$0 = -\frac{\partial N_o^t}{\partial z} - 2R_{\max} \cdot x_m \cdot x_o \quad (\text{부1-7c})$$

$$0 = -\frac{\partial N_n^t}{\partial z} \quad (\text{부1-7d})$$

따라서 Fig. 18과 같이 복토층을 $\Delta z/N$ 과 같은 폭으로 box로 분할하여 계산한다.

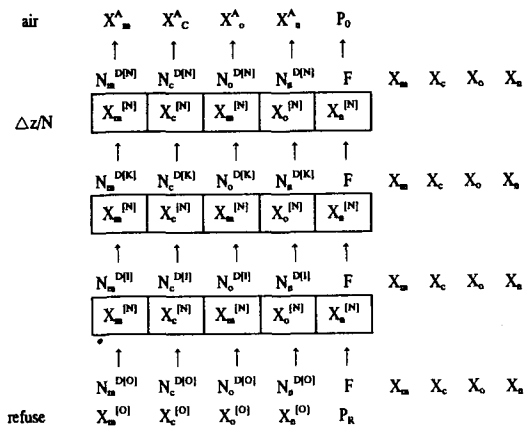


Fig. 18. Compaction Model of Calculation for Flux in Cover Soil

계산에서는 P_0 hPa, $T=293$ K로, 2성분 확산계수는 Table 2와 같이 구하여 고정시킨다.

Table 2. 확산계수 D^{ij} [m^2/s] 계산결과($20^\circ C$, 101.3 kPa)

	Air	O ₂	N ₂	CO ₂
CH ₄	2.130×10^{-5}	2.130×10^{-5}	2.125×10^{-5}	1.615×10^{-5}
CO ₂	1.498×10^{-5}	1.476×10^{-5}	1.503×10^{-5}	
N ₂	1.973×10^{-5}	1.984×10^{-5}		
O ₂	1.987×10^{-5}			

따라서, 가정 6으로 부터

$$N_m^0 + x_m^0 \cdot F = x_m^R \cdot F \quad (\text{부1-8a})$$

$$N_c^0 + x_c^0 \cdot F = x_c^R \cdot F \quad (\text{부1-8b})$$

$$N_o^0 + x_o^0 \cdot F = 0 \quad (\text{부1-8c})$$

$$N_n^0 + x_n^0 \cdot F = 0 \quad (\text{부1-8d})$$

이상의 식을 이용하여 모델링하면 복토층 내 가스 성분과 CH₄ flux, CO₂ flux가 계산될 수 있다.

참고문헌

1. 池口 孝 ; 埋立地における發生ガスの挙動(3), 日本都市清掃, 第36卷, 第134, pp.74~78(1983).
2. Peter Kjeldsen and Erling V. Fisher ; Landfill Gas Migration Field Investigation at Skellingsted Landfill Denmark, Waste Management & Research, 13, pp.467~484(1985).
3. 山田正人ら ; 最終處分場からのメタンガス放出, 第7回日本廢棄物學會研究發表會講演論文集, pp.725~727(1996).
4. 細見正明ら ; 最終覆土表面からのメタン及び二酸化炭素の放出, 第4回日本廢棄物學會研究發表會講演論文集, pp.441~444(1993).
5. 井上君夫 ; チャンバ法による土壤面CO₂フラックスの測定, 日本農業氣象, Vol.42, No.3, pp.225~230(1986).
6. 李海承 ; ごみ埋立地から發生する地球温暖化ガスの制御に関する基礎的研究, p.25, 博士學位論文(1996.12).
7. M. O. Andreae, D. S. Schimel : Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and Atmosphere, in Chamber and Isotope Techniques, John Wiley & Sons Ltd, pp.175~187(1989).
8. M. O. Andreae, D. S. Schimel : Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and Atmosphere, in Methane Flux Measurements : Methods and Results, John Wiley & Sons Ltd, pp.209~228(1989).