

쓰레기 매립지 가스포집관에서 유출가스 계측에 관한 연구(1)
- 유량계 계측오차의 최소화를 위한 해석 -

이해승 · 이찬기 *

강원대학교 환경연구소 · 강원대학교 공과대학 환경 · 생물공학부*

**A Study on the Measurement of Gas Discharge from the
Gas Vent of Sanitary Landfill(1)**

- analysis for minimizing the measurement error of flow meter -

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 relationship between gas quantity and measurement resistance using the bubble meter, the water head indicator and the roter meter from the gas vent sanitary landfill. From the one-dimensional analyses and experiments, the below results have been obtained. The gas volume sourcing from the gas vent depends on the permeability of final cover soil, its cover depth and distance between the gas vents. The total gas volume producing in the interested domain may be accurately measured by the bubble meter, the water head indicator and the roter meter if the clay is used for the final cover soil. The required times approaching to the steady-state are different with respect to the flow meters, one day is for the bubble meter and the water head indicator and one hour for the roter meter.

Key word : sanitary landfill, gas vent, one - dimensiona analyses, gas quantity, measurement resistance

요 약 문

본 연구는 가스 포집관을 설치한 쓰레기 매립지에서의 가스 유동에 따른 모델 해석으로 부터 다음의

결과를 얻었다.

1) 저항이 없는 유량 계측기의 오차는, 투기계수 10^{-14}m^2 (실트 ; 포화투수계수 10^{-7}m/s)보다 작은 복토를 쓰고 가스 발생량을 계측한다면, ① 직경 10m 내에서는 0.5 mL/s 이상, ② 직경 20m 내에서는 2 mL/s 이상, ③ 직경 50m 내에서는 10 mL/s 이상의 유량범위에서, 정확한 계측치를 얻을 수 있다.

2) 복토층의 ① 투기계수가 10^{-16}m^2 (점토 ; 포화투수계수 10^{-9}m/s)에서는, 3종(bubblemeter, water head indicator and roter meter)의 유량 계측기 모두 50m까지 유효한 계측이 가능하다. ② 투기계수가 10^{-14}m^2 에서는, bubble meter and water head indicator는 5m 이하, roter meter는 15m 내의 범위에서 유효한 계측이 가능하다. ③ 투기계수가 10^{-12}m^2 에서는 가스 포집관의 2m 범위 이내에서만 유효히 계측된다.

3) 가스 포집관에 유량 계측기를 설치하면, 계측조건의 변화로 정상조건까지의 도달시간은 bubble meter와 water head indicator는 약 1일, roter meter는 약 1시간 정도가 소요된다.

주제어 : 쓰레기 매립지, 가스포집관, 일차원 모델해석, 가스량, 측정저항

1. 서 론

쓰레기 매립지에 투입된 유기물이 미생물에 의해 분해되어 발생하는 메탄가스¹⁾는 매립지와 주변에 화재, 식물의 고사 등의 문제와 더불어, 탄산가스 등과 함께 지구온난화의 원인이 되고 있으므로, 이러한 매립가스의 대기방출량을 제어하여야한다. 쓰레기 매립지에서 발생하는 매립가스는 가스 포집관과 최종복토층을 통하여 유출²⁾되며, 가스 포집관을 통해 유출되는 유출 가스량의 계측³⁾은 계측 저항이 있는 비누방울계측기(bubble meter), 수상치환기(the water head indicator), 로타미터기(roter meter)등을 이용하여 계측하고 있으며, 이들 유량계를 이용하여 가스포집관에서 가스량을 계측할때에는 가스포집관에서 계측기의 저항으로 인해 매립가스가 복토층으로 유출되어 정확한 계측에 어려움이 발생한다.

따라서 본 연구에서는 쓰레기 매립지의 가스포집관에서 계측저항이 있는 유량계측기의 저항계측과 계측에서 얻어진 실험결과에 대한 가스유동 해석이론을 수행하여 정확한 계측을 위한 영

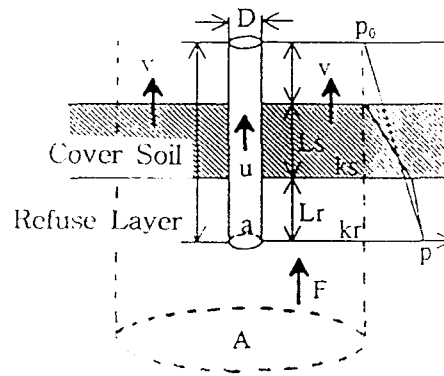


Fig. 1 Schematic Diagram for Gas Flux in Steady-State

향요소를 제시하였다.

2. 매립지에서 가스포집관을 설치한 경우의 가스유동 해석이론

2.1 계산의 전제조건

매립지의 가스포집관을 설치한 경우의 해석 전제조건으로는, ① 매립장내 가스 흐름은 매립장층에서 대기로의 1차원 흐름, ② 매립가스는 등온, ③ 가스의 상태는 비압축성, ④ 가스 포집관

출입구에서의 유동저항은 없고, ⑤ 가스발생 속도는 $F_0[mol/(s \cdot m^2)]$ 으로, Fig. 1과 같은 상황으로 가정한다.

따라서, 가스 포집관에 유량계측기를 설치하지 않는 경우의 유량과 압력과의 관계는 다음의 식으로 유도된다^{4,5,6}.

$$P = P_0 + \rho(u^2/2\alpha) + \rho(u^2/2)4f(L/D) + \zeta + \rho gL \quad (E-1)$$

여기서, $P[Pa]$: 가스 포집관 말단부의 정압
 $P_0[Pa]$: 대기압 (0.1013 MPa 로 가정)
 $\rho[kg/m^3]$: 가스의 밀도 (20 °C, 1 atm)
 $u[m/s]$: 가스 포집관내의 가스 속도
 ($\pi D \sup 2/4 \cdot u = q$)
 $L[m]$: 가스 포집관의 길이 (2.5 m)
 $D[m]$: 가스 포집관의 직경 (0.05 m)
 $f[-]$: 관마찰 손실계수
 (층류: 0.5, 난류: 1.0)
 $\zeta[-]$: 관내 삽입물 저항계수

폐기물층과 복토층을 통한 가스흐름법

$$P = P_0 + \rho_0 g(L - L_s - L_r) + (\mu k_r) v L_r + (\mu k_s) v L_s + \rho g(L_r + L_s) \quad (E-2)$$

여기서, $\mu[Pa \cdot s]$: 혼합 매립가스의 점도
 $\rho_0[kg/m^3]$: 대기의 밀도
 (20 °C, 1 atm, 1.206)
 $k_r[m^2]$: 폐기물의 고유투기계수
 (10-11 m²)
 $k_s[m^2]$: 복토의 고유투기계수
 (10⁻¹² (모래) 10⁻¹⁶ m² (점토))
 $v[m/s]$: 공탐속도(복토층의 가스속도)
 $L_r[m]$: 폐기물층의 매립고 (1 m)
 $L_s[m]$: 복토층의 매립고 (1 m)

물질수지 방정식

$$(F \cdot R \cdot T/P) \cdot A = q + v \cdot (A - (\pi/4)D^2)$$

$$(F \cdot R \cdot T/P) \cdot A = u \cdot a/A + v \cdot (1 - a/A) \quad (E-3)$$

여기서, $T[K]$: 가스의 온도
 $P[Pa]$: 가스 포집관 입구부의 압력
 $F[mol/(sm^2)]$: 가스발생속도(10⁻³~10⁻⁶)
 $A[m^2]$: 가스발생 단면적 (가스 포집관 1개당 영향범위)
 $a[m^2]$: 가스 포집관의 단면적

또, 유출가스의 조성을 CH₄ = 20 %, CO₂ = 50 %, N₂ = 30 %, 온도 20 °C, 1 atm에, 밀도 $\rho = 1.4 kg/m^3$, 매립가스의 점도는 Wilke⁷의 방법(Appendix 참조)에 의해 $\mu = 13.6 \times 10^{-6} Pa \cdot s$ 로 가정하여, 가스발생속도 F를 파라메타로 하고, u, v, P를 계산한다.

또한, 유량계측기의 저항 ΔP 는 유량 계측치 q의 관계가 있으므로 식(E-4)와 같이 도출된다.

$$\Delta P = func. (q) \quad (E-4)$$

따라서, 식(E-1,2)로 부터

$$P = P_0 + \rho(u^2/2\alpha) + \rho(u^2/2)$$

$$4f(L/D) + \zeta + \rho gL + func. (q)$$

$$= P_0 + \rho_0 g(L - L_s - L_r) + (\mu k_r) v L_r + (\mu k_s) v L_s + \rho g(L_r + L_s) \quad (E-5)$$

로 유도된다.

2.2 계산결과와 평가

매립지의 전체 가스발생량중 가스포집관에서의 가스포집에는 최종복토층의 재질과 두께, 가스포집관의 직경, 가스포집관의 설치간격등이 영향을 미치는 것으로 판단할수 있다. 따라서 매립지의 최종복토층 재질과 가스 포집관의 설치간격 변화에 따라 계측오차와의 계산결과를 Fig. 2a에 제시하였다. 또한 쓰레기층내 가스발생 flux의 변화에 따른 계산결과는 Fig. 2b에, 가스

Table 1 Range of Available Measurement due to the Final Cover Soil and Distance between Two Gas Vents

	직경 10 m이내	직경 20 m이내	직경 50 m이내
10-12 m2 (가는모래 : 포화투기계수 10-5 m/s)	50 mL/s	200 mL/s	-
10-13 m2 (가는모래~실트 : 10-6 m/s)	5 mL/s	20 mL/s	100 mL/s
10-14 m2 (실트 : 10-7 m/s)	0.5 mL/s	2 mL/s	10 mL/s

포집관의 직경변화에 변화에 따른 계산결과는 Fig. 2c에 제시하였으며, 이를 요약하면 Table 1과 같다.

3. 가스포집관에 가스계측 장치를 설치한 경우의 가스유동 해석이론

3.1 유량계측기의 유동저항 계측실험

기존 또는 신규 쓰레기 매립지에 설치된 가스 포집관에서 유출 가스량을 계측할때에는 계측기 설치에 따른 유동저항이 발생한다. 그리고 계측기를 설치하지 않을때와 비교하면 적은량이 유출함을 판단할 수 있다(가스 포집관의 유동저항으로 인해 복토층을 통하여 유출량이 증가). 따라서 유량계측기의 유동저항을 계측하기 위하여 Fig. 3a ~ c와 같이 각종 유량계측기의 유량과 압력손실의 관계를 파악하기 위한 실험장치를 제작하였다. 실험을 위한 유량 계측장치는 Table 2에 제시된 제품을 이용하였다.

Table 2 Specification of Measurement Equipment

bubble Meter	flow table second (HITACHI)
water head indicator	자체제작 (2 L)
roter Meter	KG-4809 (草野科學器械)

실험방법은 내경 50 mm, 길이 300 mm의 원통형 아크릴관내에 공기를 통과시켜 압력손실을

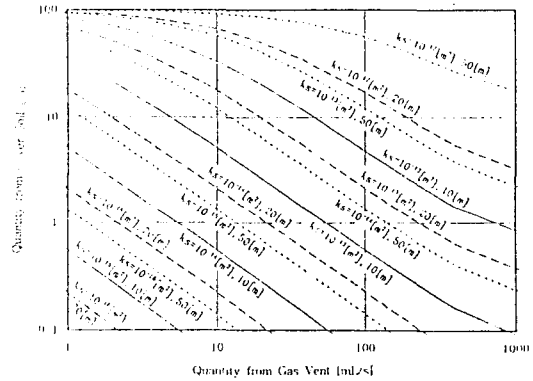


Fig. 2a Flow Rate of Cover Soil by the Distance of Gas Vent(without flow meter)

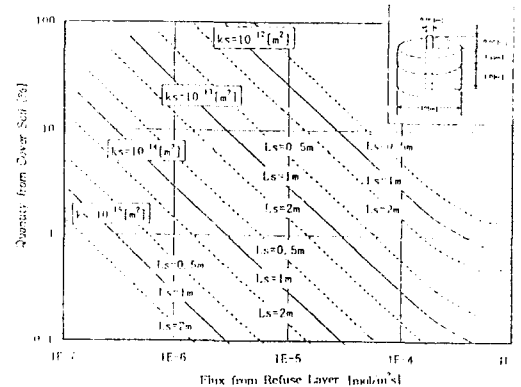


Fig. 2b Flow Rate of Cover Soil by the Depth of Final Cover Soil(without flow meter)

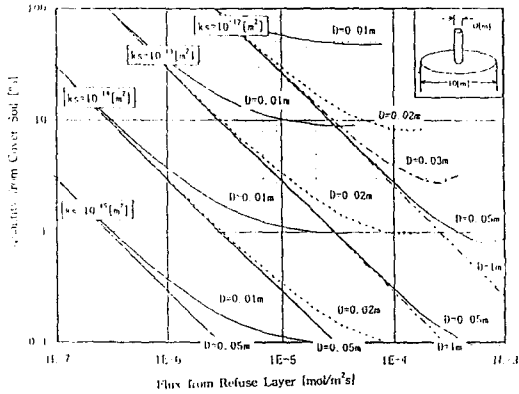


Fig. 2c Flow Rate of Cover Soil by the Diameter of Gas Vent(without flow meter)

때 통과 공기량은 변화시켜 유량계의 유동저항 ΔP 와 유량 Q 의 관계를 구한다.

유량계의 유동저항 ΔP 와 유량 Q 관계를 계측실험한 결과, Fig. 4a ~ c에서와 같이

$$\text{Bubble Meter ; } \Delta P = 7.11 \times Q \quad (E-6)$$

Water Head Indicator ;

$$\Delta P = 0.021 \times Q^2 + 2.819 \times Q + 67.00 \quad (E-7)$$

$$\text{Roter Meter ; } \Delta P = 0.0376 \times Q + 165.35 \quad (E-8)$$

의 결과를 얻었다.

3.2 계산조건

3.2.1 계산의 전제조건

2장에서 평가한 계측오차는 유출가스가 정상인 경우를 평가한 것이다. 일반적으로, 가스 포집관에 유량계측기를 설치한 경우는 가스 포집관 출구에 저항이 발생하므로, 가스가 안정한 상태로 도달할 때 까지 어느정도 시간이 소요된다. 따라서, 안정되기 전에 계측하면 낮은 계측치를 얻을 수 있으므로 얼마만큼의 시간이 소요될 것인가를 평가하여야 한다.

따라서, Fig. 5은 해석을 위한 개념도이며 가정 조건은 2장에서의 가정

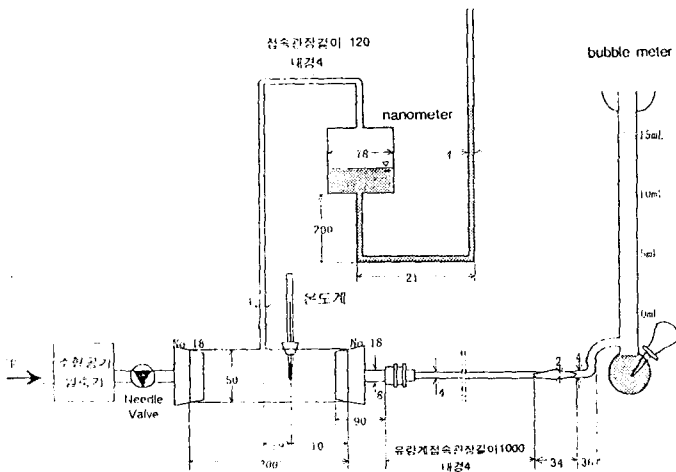


Fig. 3a Measurement Device for Resistance to Gas Flow using Bubble Meter

계측한다. 원통형 아크릴관에는 물 액주계(manometer)와 온도계를 설치하고, 관의 출구에는 유효한 계측범위의 유량계(비누방울계측기($Q = 1 \sim 20 \text{ mL}$), 수상치환기($Q = 10 \sim 150 \text{ mL}$), 로타미터법($Q = 50 \sim 500 \text{ mL}$))를 접속하기 위해 접속관을 설치하였다. 따라서, 소형 공기압축 유량 조절 펌프로 부터 공기를 통과시켜 관내의 압력, 온도 및 유량계에서의 계측유량을 계측하며, 이

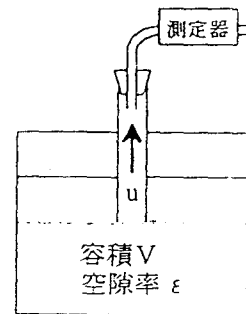


Fig. 5 Schematic Diagram for Gas Flux in Unsteady-State

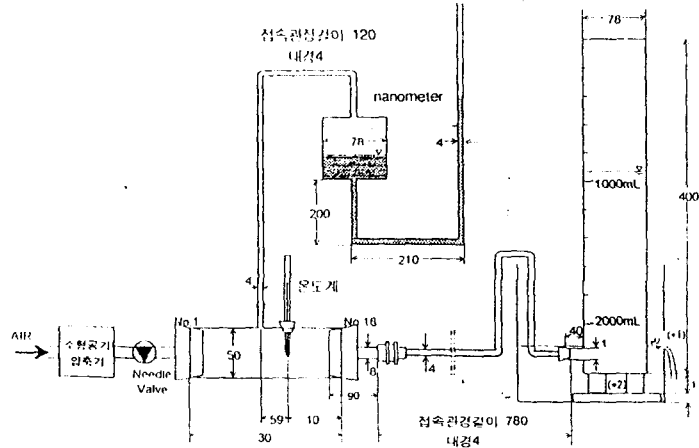


Fig. 3b Measurement Device for Resistance to Gas Flow using Water Head Indicator

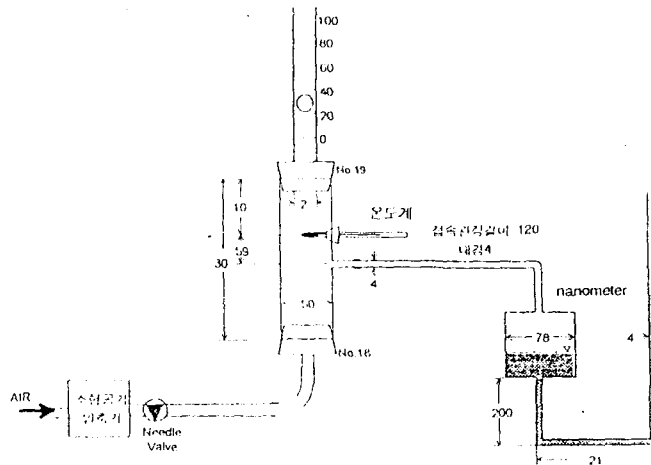


Fig. 3c Measurement Device for Resistance to Gas Flow using Rotameter

외에 ① 쓰레기층의 가스 발생 압력은 같고, ② 복토층의 가스 흐름은 순간적으로 한다. 또한, ③ 가스의 압력 변화는 가스 흐름에 의해 생기므로 계산 응답에 신속이 대응한다.

또한, 유량 계측기를 접속하지 않는 경우의 복토층이 충분히 밀착되면 다음의 식이 도출된다.

복토층의 흐름

$$v = 0 \tag{E-9}$$

가스 포집관의 흐름

$$q = u \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{F \cdot R \cdot T}{P_0} = \frac{G \cdot V \cdot R \cdot T}{P_0} \tag{E-10}$$

쓰레기층내 압력

$$P = P_0 + \rho \cdot g \cdot L \tag{E-11}$$

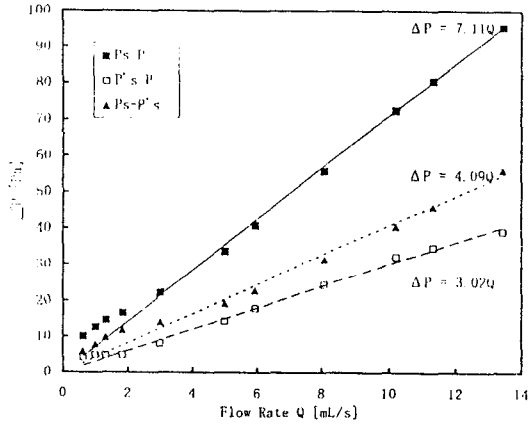


Fig. 4a Gas Resistance(ΔP) and Flow Rate(Q) in Bubble Meter System (Ps-P; total press loss, Ps-P; press loss in pipe, Ps-Ps; press loss in others)

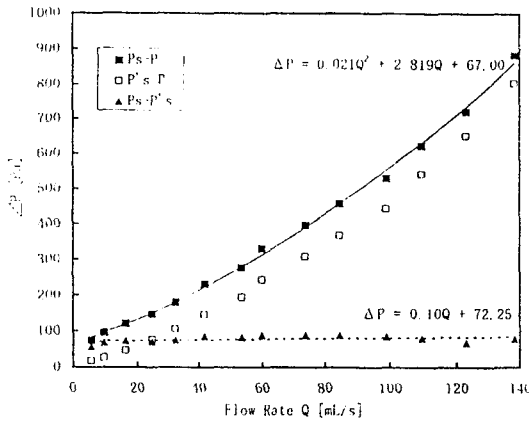


Fig. 4b Gas Resistance(ΔP) and Flow Rate(Q) in Water Head Indicator (Ps-P; total press loss, Ps-P; press loss in pipe, Ps-Ps; press loss in others)

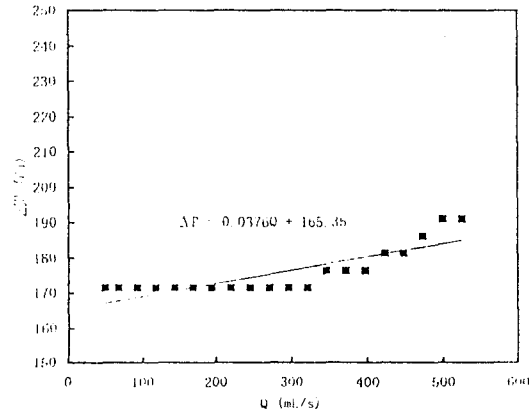


Fig. 4c Gas Resistance(ΔP) and Flow Rate(Q) in Roter Meter (Ps-P; total press loss, Ps-P; press loss in pipe, Ps-Ps; press loss in others)

여기서, G 는 가스 발생속도[mol/m³], V 는 가스 발생층 용적[m³] (가스포집관 하부 쓰레기층의 전용적)으로 표시된다.

또한, 유량계측기를 가스 포집관에 접속하는 경우는 다음의 결과가 도출된다.

$$P = P_0 + \rho \cdot \frac{u^2}{2} \left\{ 4f \cdot \frac{L}{D} + \zeta \right\} + \rho \cdot g \cdot L + \text{func.}(q)$$

$$= P_0 + \rho_0 \cdot g \cdot (L - L_s - L_r) + \frac{\mu}{k_r} \cdot v \cdot L_r + \frac{\mu}{k_s} \cdot v \cdot L_s + \rho_0 \cdot g \cdot (L_r + L_s) \quad (E-12)$$

$$\rho \cdot \frac{u^2}{2} \left\{ \frac{1}{a} + 4f \cdot \frac{L}{D} + \zeta \right\} + (\rho - \rho_0) \cdot g \cdot (L - L_s - L_r) + \text{func.}(q)$$

$$\frac{\frac{\mu}{k_r} \cdot L_r + \frac{\mu}{k_s} \cdot L_s}{c + d \cdot u} \cong k + \lambda \cdot u \quad (E-13)$$

여기서, $\text{func.}(q) = c + d \cdot u$ 로 가정하면,

$$P = P_0 + \rho_0 \cdot g \cdot (L - L_s - L_r) + \frac{\mu}{k_r} \cdot v \cdot L_r + \frac{\mu}{k_s} \cdot v \cdot L_s + \rho_0 \cdot g \cdot (L_r + L_s)$$

$$\cong P_0 + \rho_0 \cdot g \cdot L + \left\{ \frac{\mu}{k_r} \cdot L_r + \frac{\mu}{k_s} \cdot L_s \right\} \cdot v$$

$$\cong v + \psi v \quad (E-14)$$

$$P = P_0 + \rho_0 \cdot g \cdot L + c + d \cdot u$$

$$\cong P_0 + \rho_0 \cdot g \cdot L + c + d \cdot u \quad (E-15)$$

유량 물질수지로 부터,

$$\frac{\epsilon \cdot V}{R \cdot T} \cdot \frac{dp}{dt}$$

$$= -(A-a) \cdot v + a \cdot u \cdot \frac{P}{R \cdot T} + G \cdot V \quad (E-16)$$

$$L_0 \cdot \epsilon \cdot \frac{dp}{dt} = \left\{ \left(1 - \frac{a}{A}\right) \cdot v + \frac{a}{A} \cdot u \right\}$$

$$\begin{aligned}
 & \cdot P + G \cdot R \cdot T \cdot L_0 \\
 = & -H_1^2 \cdot P + H_2 \cdot P + G \cdot R \cdot T \cdot L_0 \quad (E-17)
 \end{aligned}$$

$$\frac{dp}{dt} = -\sigma(p-N) \cdot (P-\omega) \quad (E-18)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 H_1 & \equiv \frac{\left\{ \left(1 - \frac{a}{A}\right) + \frac{a}{\lambda \cdot A} \right\}}{\psi} \\
 & \cong \frac{a}{d \cdot A} \quad (E-19)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_2 & \equiv \left\{ \left(1 - \frac{a}{A}\right) + \frac{a}{\lambda \cdot A} \right\} \\
 & \cdot \frac{\gamma + \frac{KAPPA}{\lambda} \cdot \frac{a}{A}}{\psi} \\
 & \cong -H_1 \cdot (P_0 + \rho_0 \cdot g \cdot L + c) \quad (E-20)
 \end{aligned}$$

$$G \cdot R \cdot T \cdot L_0 = \frac{q \cdot P_0}{A} \quad (E-21)$$

$$\omega = \frac{H_1}{L_0 \cdot \epsilonpsilon} \quad (E-22)$$

$$\omega = \frac{\left(\frac{H_2}{H_1} + \sqrt{\left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2 + \frac{4 \cdot G \cdot R \cdot T \cdot L_0}{H_1}} \right)}{2} < 0 \quad (E-23)$$

$$\omega = \frac{\left(\frac{H_2}{H_1} - \sqrt{\left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2 + \frac{4 \cdot G \cdot R \cdot T \cdot L_0}{H_1}} \right)}{2} < 0 \quad (E-24)$$

따라서, 해는

$$\frac{P-\chi}{P-\omega} = \frac{P_0-\chi}{P_0-\omega} \cdot \exp(-\sigma \cdot (\omega-\chi) \cdot t) \quad (E-25)$$

$$P-\omega \cong (P_0-\omega) \cdot \exp(-\sigma \cdot (\omega-\chi) \cdot t) \quad (E-26)$$

또한, 시간 정수

$$\begin{aligned}
 T_c & = \sigma \cdot (\omega-1)^{-1} \\
 & \cong \frac{L_0 \cdot \epsilonpsilon \cdot d}{(P_0 + \rho_0 g \cdot L + c + d \cdot q)} \cdot \frac{A}{a} \quad (E-27)
 \end{aligned}$$

유량계측기 저항 $\Delta P_{[Pa]} = c + d \cdot q$ sub [mL/s]

$$= c + d \cdot u_{[m/s]}, L_0 = 10m, \epsilon = 0.5, \frac{A}{a} = (100.05)^2$$

로 계산하면 Table 3과 같다.

Table 3 Parameter of Calculation for Unsteady-State

	c	d	d,	q	Tc	Td
	[Pa]	[Pa · s/m]	[Pa/(mL/s)]	[mL/s]	[min]	[min]
bubble meter	0	13960	7.11	5	459	459
water head indicator	6.16	11231	5.72	50	368	377
roter meter	165	73.8	0.0376	500	2.4	24

또한, 가스 계측 유량계를 설치하지 않으면 $P \cong P_0 + \rho_0 \cdot g \cdot L$ 의 압력으로 유출하고, 유량계를 설치하면 최종의 유량 q는 압력 $P = P_0 + \rho_0 \cdot g \cdot L + c + d \cdot q$ 가 도달하기 전에 정확한 유량의 계측이 되지 않는다. 더불어, 쓰레기층의 압력이 클 경우에는 쓰레기층내의 가스 발생이 필요하다(실제로는 가스의 유출이 있으므로 장시간이 필요하다). 즉, 소요시간 T_d 는 가스의 유출이 없다고 가정하면

$$T_d = \frac{(c + d \cdot q) \cdot A \cdot L_0 \cdot \epsilonpsilon}{(P_0 + \rho_0 \cdot g \cdot L) \cdot q} \times 10^{-6} \quad (E-28)$$

3.2.2 계산결과와 평가

유량 계측기를 가스 포집관에 설치하는 경우의 계산결과는 Fig. 6a~c에 제시하였다. 계산결과로부터 복토층의 투기계수^{5,7)}가 10^{-16} m^2 (점토; 포화 투수계수 10^{-9} m/s 정도)에서는 어떤 유량 계측기도 유효범위(가스 포집관 설치간격) 50 m 이내에서는 유효한 계측이 가능하다. 그러나, 투기계수가 10^{-14} m^2 (실트; 포화 투수계수 10^{-7} m/s 정도)에서는, 비누방울계측법과 수상치환법은 5 m 이하, 로타미터법은 15 m 이하의 범위이나, 투기계수가 10^{-12} m^2 (가는 모래; 포화 투수계수 10^{-5} m/s 정도)에서는 가스포집관으로

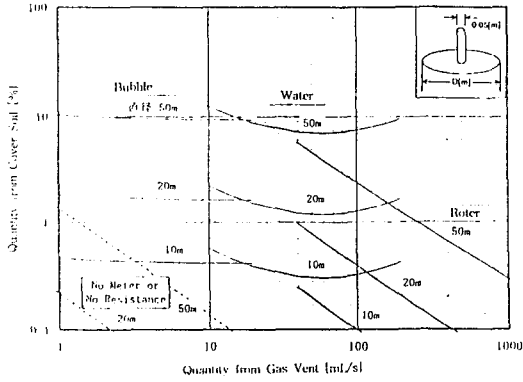


Fig. 6a Flow Rate of Cover Soil by the Distance of Gas Vent(with flow meter, $K_s = 10-16$)

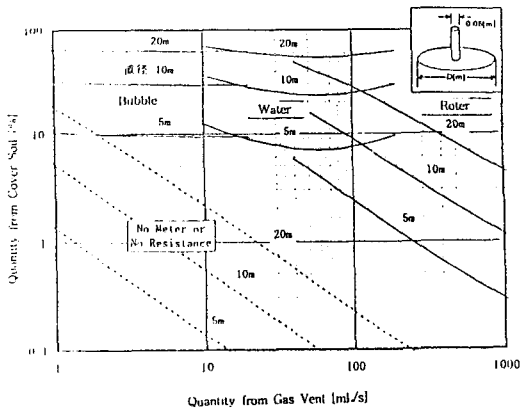


Fig. 6b Flow Rate of Cover Soil by the Distance of Gas Vent(with flow meter, $K_s = 10-14$)

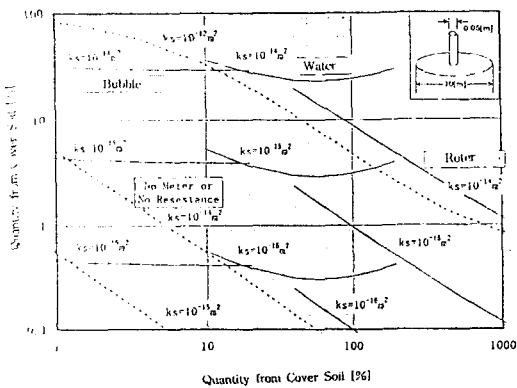


Fig. 6c Flow Rate of Cover Soil by the Material of Cover Soil($D = 10\text{ m}$)

부터 1 ~ 2 m 범위 이내만 전체 가스량 계측이 가능하다.

또한, 유량 계측기를 가스 포집관에 설치하여 정상조건에의 도달시간은, 비누방울 계측법과 수상치환법은 1 일 정도, 로타미터는 1 시간 정도의 방치시간이 소요된다. 소요시간의 차는 쓰레기층내의 가스 발생속도가 주요인으로 계측치가 클수록 신속히 안정한 상태이나, 계측 유량이 적을수록 정상조건에의 도달시간은 소요된다. 또한, 계측기의 저항이 클수록 정상조건에의 도달시간에 영향이 크다.

4. 결 론

가스 포집관을 설치한 쓰레기 매립지에서의 가스 유동에 따른 모델 해석으로부터 다음의 결과를 얻었다.

1) 저항이 없는 유량 계측기의 오차는, 투기계수 10^{-14} m^2 (실트 ; 포화투수계수 10^{-7} m/s)보다 작은 복토를 쓰고 가스 발생량을 계측한다면, ① 직경 10 m 내에서는 0.5 mL/s 이상, ② 직경 20 m 내에서는 2 mL/s 이상, ③ 직경 50 m 내에서는 10 mL/s 이상의 유량범위에서, 정확한 계측치를 얻을 수 있다.

2) 복토층의 ① 투기계수가 10^{-16} m^2 (점토 ; 포화투수계수 10^{-9} m/s)에서는, 3 중(bubble meter, water head indicator and roter meter)의 유량 계측기 모두 50 m까지 유효한 계측이 가능하다. ② 투기계수가 10^{-14} m^2 에서는, bubble meter and water head indicator는 5 m 이 하, roter meter는 15 m 내의 범위에서 유효한 계측이 가능하다. ③ 투기계수가 10^{-12} m^2 에서는 가스 포집관의 2 m 범위 이내에서만 유효히 계측된다.

3) 가스 포집관에 유량 계측기를 설치하면, 계측조건이 변화로 정상조건까지의 도달시간은 bubble meter와 water head indicator는 약 1 일.

roter meter는 약 1시간 정도가 소요된다.

Appendix 1)

기체의 점도(점성계수) η_{mix} 의 추산방법⁸⁾

저밀도 기체(압력 10~300 kPa) 점도는 압력에 무관계이고, 온도 $T_0[K]$ 의 점도 $\eta_0[Pa \cdot s]$ 을 알고 있을 시, 온도 $T[K]$ 의 점도 $\eta[Pa \cdot s]$ 는 식(EA-1)으로 계산한다.

$$\eta = \eta_0 \left(\frac{T_0 + c}{T + c} \right) \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \quad [EA-1]$$

$\eta[Pa \cdot s]$; 온도 $T[K]$ 의 점도

$\eta_0[Pa \cdot s]$; 온도 $T_0[K]$ 의 점도

$c[-]$; Sutherland 정수

n 성분 혼합기체의 점도 η_{mix} 는 온도 T , 각 기체의 점도 η , 몰분율 y 로 부터, 식(EA-2)의 Sutherland식으로 부터 구한다.

$$\eta_{mix} = \sum \left[\frac{y_i \cdot \eta_i}{\sum y_j \cdot \eta_j} \right] \quad [EA-2]$$

Φ_{ij} 는 Wilke의 근이식으로 부터

$$\Phi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\eta_i}{\eta_j} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2}{\left[8 \cdot \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right) \right]^{1/2}} \quad [EA-3]$$

$y[-]$; 몰분율

$M[kg/mol]$; 분자량

Appendix 2)

기체의 밀도 σ_{mix} 추산방법⁸⁾

온도 $T[K]$ 에서 n 성분의 혼합기체의 밀도는 온도 $T_0[K]$ 에서의 각 기체의 밀도 $\sigma = [kg/m^3]$ 을 기초로 하여 다음의 식을 이용한다.

$$\sigma_{mix} = \frac{T_0}{T} \cdot \sum y_i \cdot \sigma_i \quad [EA-4]$$

$\sigma_{mix}[kg/m^3]$; n 성분 혼합기체의 밀도

$\sigma[kg/m^3]$; 온도 $T_0[K]$ 에서 각 기체의 밀도

참고 문헌

- 1) Peter Kjeldsen and Erling V. Fischer, "Landfill Gas Migration Field Investigation at Skellingsted Landfill Denmark, Waste Management & Research", 13, pp. 467~484(1995)
- 2) Hae-Seung Lee, Nobutoshi TANAKA, Toshihiko MATSUTO, "ON-SITE SURVEY of METHANE and CARBON DIOXIDE FLUX from MSW LANDFILL in JAPAN", Sixth International Landfill Symposium 1977(Italy)
- 3) 日本厚生省生活衛生局水道環境部, "廢棄物處分場における溫暖化ガスの處理及び地盤の安定化技術開發調査", p.28, p.47 (平成6.3)
- 4) 龜井三郎, "新版 · 化學機械の理論と計算", 産業圖書, pp. 27~72(1959)
- 5) Nobutoshi TANAKA, Keiichi KOYAMA, "Gas and Gas Components Migration in Sanitary Landfill Sites - A Set of Basic Equations on Gaseous Flow and Diffusion through Refuse and Soil Layers -", The Japan Society of Waste Management Experts, Vol.2, No. 1, pp.46~58 (1991)
- 6) Charles A. Moore, Iqbal S. Rai, and John Lynch, "Computer Design of Landfill Methane Migration Control", ASCE, Vol. 108, No. EEL, pp.89~108(1982)
- 7) Hae-Seung Lee, Nobutoshi Tanaka, "Theoretical Study on Design of Sanitary Landfill Gas Vents - Proposal of a method for numerical calculation and discussion about influential parameters for gas vent design -", The Japan Society of Waste Management Experts, Vol.8, No. 1, pp.31~40 (1997)
- 8) 片山俊ら, "化學工學便覽", 丸善株式會社, pp. 3~106 (平成3)