대한위생학회지. 제13권 제3호(1998)
Korean J. Sanitation. Vol. 13, No. 3, pp43~51(1998)

쓰레기 매립지에서 가스유출 계산에 관한 연구

이 해 승
강원대학교 환경연구소

A Study on Numerical Calculation of Gas Migration from the Sanitary Landfill

Hae-Seung Lee
Environmental Research Institute, KangWon National University

Abstract

This study presents a numerical method for calculating gas flow around a sanitary landfill gas vent, when gas flows by pressure. The method described is a three-dimensional compartmental model and includes methods to determine the dimensions for the model. Using the numerical method, controll of press and gases flowing out to the air through final cover soil, and degine of sanitary landfill gas vents.

Key words : sanitary landfill, gas vent, numerical calculation, gas migration

Ⅰ. 서 론

쓰레기 매립지에 투입된 유기물이 미생물에 의해 분해되어 발생하는 메탄가스[1]는 매립지와 주변에 화재, 식물의 고사 등의 문제와 더불어, 탄산가스 등과 함께 지구온난화의 원인이 되고 있으며, 매립가스[2,3]는 가스 포집관과 최종복토층을 통하여 유출된다. 따라서, 탄산가스와 메탄가스, 악취물질 등은 제어되어야 하므로 집가스설비를 위한 계산식이 확립되어야 효율적인 설비가 될것이다.

한편, 매립지 내의 가스흐름에 관한 기존의 연구를 요약하면, Tanaka 등[4]은 매립지 내의 가스와 가스성분 이동방적식에 관하여 기존의 연구를 정리하고, 쓰레기층 내에서의 발생가스에 의한 압력구배을 근거로 가스유동은 Darcy식을 인용하여도 무방하다는 것을 제시하였으며, Young[5]은 매립지내의 가스압력은 대기압에 0.5%를 넘지 않으며, 0.5% 이하인 경우에는 쓰레기층 내의 가스를 비압축성으로 가정하고 3차원 Darcy식에서 투기계수 tensor를 대각성분으로 표현하였다. 또한 Hanasima 등[6]은 가스포집관 주위의 가스흐름을 Darcy식을 이용하여 2차원 원통 모델로 제시하고, 가스포집관에 포집되는 가스량을 다양한 조건으로 해석하여 제시하였다. Nisita 등[7]은 Hanasima식을 기초로 쓰레기 매립장 내의 가스를 강제 배기하기 위한 영향요인을 검토하였으며, Moore 등[8]은 매립지내의 메탄가스 이동을 억제하기 위한 트레치 효과를 해석하였다.

따라서 본 연구에서는 쓰레기 매립장에서의 가스포집관을 등간격으로 Fig. 1.과 같이 통상 설치되는 것을 바탕으로 가정하고, 매립지를 3차원 직각좌표 box 모델로 분할하고 수치계산하는 방법

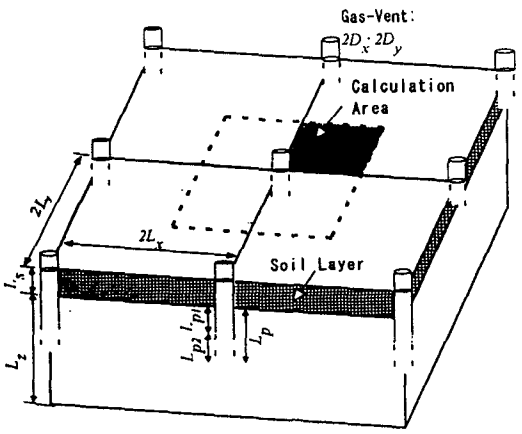

Fig. 1. Schematic diagram of landfill-gas vent arrangement

을 개발하였다. 또한 쓰레기층 내의 불균일층이 있을 경우에도 box층별로 불균일성이 계산되도록 하고 쓰레기층별 압력 분포, 가스유속, 가스포집에서의 포집율 등을 구하도록 수치계산법을 제시하였다.

II. 매립지 내의 가스유동 및 포집가스에 관한 계산법

1. 쓰레기층 내의 가스유동식과 식 중의 변수

쓰레기층 내의 가스흐름은 다음과 같이 Darcy 식으로 표현된다.

$$\vec{V} = -(K/\mu) \cdot \text{grad}\, P \qquad \text{(E-1)}$$

여기서, $\vec{V}$는 Darcy의 속도벡터(v_x, v_y, v_z)이고, P는 전압, K는 투기계수 tensor, μ는 점성계수이다. 한편 μ는 온도 30 ℃, CH_4와 CO_2의 가스조성은 1:1의 경우의 점성계수[9] $\mu = 13.31 \times 10^{-6}$ Pa · s로, 쓰레기층 내 투기계수[4]는 $10^{-9} \sim 10^{-12}$ m^{2}를 인용하였다. 쓰레기층 내는 중간복토, 매일복토와 같이 수평면 및 수직면이 있다고 가정하면, tensor K는 대각성분 K_x, K_y, K_z만 표현되고 x, y, z 방향의 Darcy 속도성분은 식(E-2a, b, c)와 같이 도출된다(가정 1).

$$v_x = -(K_x/\mu) \cdot \partial P/\partial x \qquad \text{(E-2a)}$$

$$v_y = -(K_y/\mu) \cdot \partial P/\partial y \qquad \text{(E-2b)}$$

$$v_z = -(K_z/\mu) \cdot \partial P/\partial z \qquad \text{(E-2c)}$$

또한, 가스흐름은 정상으로(가정 2), 쓰레기층 내 가스밀도는 일률적으로 일정하게 가정하면(가정 3), 식 (E-3)과 같이 물질수지식이 성립된다.

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} - G = 0 \qquad \text{(E-3)}$$

여기서, G는 가스발생속도 [m^3-gas/(s · m^3-refuse layer)] 이고, 쓰레기 분해에 따른 가스발생속도(pilot실험과 실제 매립지에서의 가스 회수량의 데이타)는 池口[1]의 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ (m^3/s · m^3)을 인용하였다.

식(E-2a, b, c)을 식(E-3)에 대입하고, 거리 x, y, z을 매립깊이 L_z로 무차원화하고, 압력 P을 기준대기압 P_0와의 차압 ΔP로 치환하여 무차원화하면 식(E-4)가 유도된다.

$$\frac{\partial^2 \overline{\Delta P}}{\partial \chi^2} + \frac{K_y}{K_x}\frac{\partial^2 \overline{\Delta P}}{\partial \phi^2} + \frac{K_z}{K_x}\frac{\partial^2 \overline{\Delta P}}{\partial \omega^2} + 1 = 0 \qquad \text{(E-4)}$$

여기서, 무차원거리 $\chi \equiv x/L_z$, $\phi \equiv y/L_z$, $\omega \equiv z/L_z$, 무차원 차압 $\overline{\Delta P} \equiv (P - P_0)/\Delta P^*$, 가스발생압 $\Delta P^* \equiv \mu G (L_z)^2/K_x$ 이다. 또 G, K 및 μ는 장소에 관계없이 일정하다고 가정하였다(가정 4).

쓰레기층 깊이 L_z, 복토층 깊이 L_s의 매립지에서 x, y방향에 $2L_x$, $2L_y$ 간격으로 단면형상 $2D_x \times 2D_y$, 복토층 밑에서의 길이 L_p의 가스포집관을 매설하고 가스포집관에는 다공관이 관밑에 길이 L_{p2}로 설치되는 것으로 가정한다(Fig. 1. 참조, 가정 5). 또한 각 가스포집관은 같은 기능이므로 계산영역을 Fig. 2.와 같이 하나의 가스포집관의 1/4로 설정하면(Fig. 2. 참조, 가정 6), 계산영

역의 경계(ABFE면, BCGF면, CDHG면, DAEH면), 저부(EFGH면)와 가스포집관의 다공성이 없는 면에 수직한 부분에서의 가스흐름은 제로이다. 또 가스흐름의 복토경계(E-5)와 관의 가스유출부에서는 식 (E-6a, b)의 경계조건이다.

$$v_z(x, y, L_s = -(K_s/\mu)\cdot \Delta P(x, y, L_s)/L_s = (K_z/\mu)\cdot \partial \Delta P(x, y, L_s)/\partial z \qquad \text{(E-5)}$$

$$\Delta P(D_x, y, z) = 0$$
$$(L_p + L_s - L_{pc} \le z \le L_p + L_s,\ 0 \le y \le D_y) \qquad \text{(E-6a)}$$

$$\Delta P(x, D_y, z) = 0$$
$$(L_p + L_s - L_{pc} \le z \le L_p + L_s,\ 0 \le x \le D_x) \qquad \text{(E-6a)}$$

여기서, P_0는 복토층 위(z=o)에 설정된 표준대기압이고, 식(E-5)에서 복토층 투기계수 K_s는 쓰레기층 투기계수 K_x, K_y, K_z과 비교하면 작고, 복토층 내의 수평방향의 흐름은 무시되도록하고, 식(E-6a, b)에서 가스흐름에 의한 압력손실과 다공성 가스 포집관에의 다공의 관내저항과 은 무시하도록 가정하였다(가정 7).

경계조건 식 (E-5), (E-6a,b)를 무차원화하면 식(E-7), (E-8a, b)과 같이 된다.

$$-\frac{K_s}{K_x}\cdot\frac{L_z}{L_s}\,\overline{\Delta P}(\chi, \phi, L_s/L_z) = -\frac{\partial\ \overline{\Delta P}(\chi, \phi, L_s/L_z)}{\partial \omega} \qquad \text{(E-7)}$$

$$\overline{\Delta P}(D_x/L_x, \phi, \omega) = 0$$
$$(L_p + L_s - L_{pc})/L_z \le \omega \le (L_p + L_s)/L_z,\quad 0 \le \phi \le D_y/L_y \qquad \text{(E-8a)}$$

$$\overline{\Delta P}(\chi, D_y/L_y, \omega) = 0$$
$$(L_p + L_s - L_{pc})/L_z \le \omega \le (L_p + L_s)/L_z,\quad 0 \le \chi \le D_x/L_x \qquad \text{(E-8b)}$$

따라서, 식(E-4), (E-7), (E-8)에서와 같이 쓰레기층 내의 무차원 전압분포, $\overline{\Delta P}$는 거리변수(L_x: L_y: L_z: L_s), 가스포집관 특성변수(L_p: L_{pl}: L_z, D_x: L_x, D_y: L_y), 투기계수(K_x: K_y: K_z: K_s)로 결정되는 것을 알 수 있다. 또한, 쓰레기층 투기계수 K_x, K_y, K_z는 일률적으로 등질하다고 가정하고, x, y도 같은 특성이라고 가정하면(가정 8),

$$(L_x = L_y,\ K_x = K_y,\ D_x = D_y) \qquad \text{(E-9)}$$

$\overline{\Delta P}$는 L_x/L_z, L_s/L_z, L_p/L_z, L_{pc}/L_z, D_x/L_x, K_x/K_z, K_s/K_z로 결정된다. 또 가스포집을 극대화하려면 $L_p = L_{pc} = L_z$, 가스포집관의 크기는 제한이 있으므로 D_x/L_x, D_y/L_y, L_s/L_z의 영향을 최소화하면 최종적으로는 3개의 영향요인인 L_x/L_z, K_x/K_z, K_s/K_z이 주영향요인이다.

가스포집관에 포집되는 가스량 즉 집가스량 η는 식(E-9)와 같이 계산된다(분모는 쓰레기층의 체적적분, 분모는 면적분).

$$1-\eta \equiv \frac{\int\int(-v_z)dxdy}{\int\int Gdxdydz} \qquad \text{(E-10)}$$

여기서 가정 4를 사용하여 식(E-5)에 대입하고 무차원화하면,

$$1-\eta = \frac{[K_s/(\mu L_s)]L_z^2[\mu G L_z^2/K_z]\int\int \overline{\Delta P}\,dxd\phi}{G L_x L_y L_z} = (K_s/K_x)(L_x/L_z)^{-1}(L_y/L_z)^{-1}(L_s/L_z)^{-1}\int\int \overline{\Delta P}\,dxd\phi \qquad \text{(E-11)}$$

로 되고, 식(E-11)의 2중적분은 G에 무관하므로 η는 G가 무영향요인임을 알 수 있다. 따라서, 최종적으로는 3개의 영향요인 L_x/L_z, K_x/K_z, K_s/K_z이 주영향 요인임을 다시 도출된다.

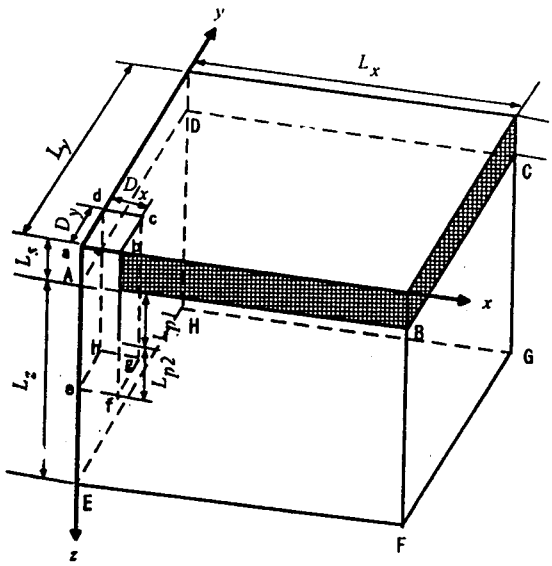

Fig. 2. Calculation area and notation

2. 수치계산식의 도출과 계산법의 제안

식(4-2), (4-3)을 식(4-5), (4-6)의 경계조건을 이용하여 수치적으로 해석하기 위하여서는 compartment (box)모델을 사용하여 연립방정식으로 변환한다. 더불어 가정조건 1, 2, 5, 6은 성립되어 있으므로 가스발생과 투기계수의 분포가 차이나는 경우에는 box를 설정하고, 가스포집관의 형상에도 대응 가능하도록 계산식을 일반화하였다.

Box는 Fig. 3.과 같이 x,y,z 방향에 임의의 크기 $\Delta x^{i,j,k}$, $\Delta y^{i,j,k}$, $\Delta z^{i,j,k}$에 분할하도록 하고, 식(E-2)를 이용하여 box별로 $v_x^{i,j,k}$, $v_y^{i,j,k}$, $v_z^{i,j,k}$ 식(E-12, 13, 14, 15)와 같이 차분화한다.

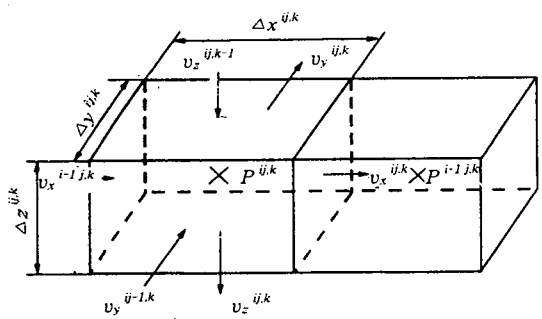

Fig. 3. Box Dimension and notation of compartment Model

$$v_x^{i,j,k} = -\frac{P^{i+1,j,k} - P^{i,j,k}}{\left(\frac{\mu^{i+1,j,k}}{K_x^{i+1,j,k}} \cdot \frac{\Delta x^{i+1,j,k}}{2} + \frac{\mu^{i,j,k}}{K_x^{i,j,k}} \cdot \frac{\Delta x^{i,j,k}}{2}\right)}$$

$$= -\frac{\Delta P^{i+1,j,k} - \Delta P^{i,j,k}}{\left(\frac{\mu^{i+1,j,k}}{K_x^{i+1,j,k}} \cdot \frac{\Delta x^{i,j,k}}{2} + \frac{\mu^{i,j,k}}{K_x^{i,j,k}} \cdot \frac{\Delta x^{i,j,k}}{2}\right)} \qquad \text{(E-12)}$$

여기서, $K_x^{i,j,k}$는 box(i, j, k)에서의 x 방향의 투기계수이다.

또한, $v_z^{i,j,k}$는 다음과 같이 유도되며, box의 압력으로 전압 (ΔP)을 이용할때에는 정압 (ΔP_s)을 쓰는 경우와 표현이 다르므로 양식을 제시하였다.

$$v_z^{i,j,k} = -\frac{\Delta P^{i,j,k+1} - \Delta P^{i,j,k}}{\left(\frac{\mu^{i,j,k}}{K_z^{i,j,k}} \cdot \frac{\Delta z^{i,j,k}}{2} + \frac{\mu^{i,j,k+1}}{K_z^{i,j,k+1}} \cdot \frac{\Delta z^{i,j,k+1}}{2}\right)}$$

$$= \frac{\Delta P_s^{i,j,k+1} - \Delta P_s^{i,j,k} - \rho \cdot g\left(\frac{\Delta z^{i,j,k}}{2} + \frac{\Delta z^{i,j,k+1}}{2}\right)}{\left(\frac{\mu^{i,j,k}}{K_z^{i,j,k}} \cdot \frac{\Delta z^{i,j,k}}{2} + \frac{\mu^{i,j,k+1}}{K_z^{i,j,k+1}} \cdot \frac{\Delta z^{i,j,k+1}}{2}\right)} \qquad \text{(E-13)}$$

다음으로, 식(E-3)을 차분화하면 식(E-14)가 유도된다.

$$\frac{v_x^{i-1,j,k} - v_x^{i,j,k}}{\Delta x^{i,j,k}} + \frac{v_y^{i,j-1,k} - v_y^{i,j,k}}{\Delta y^{i,j,k}} + \frac{v_z^{i,j,k-1} - v_z^{i,j,k}}{\Delta z^{i,j,k}} + G^{i,j,k} = 0 \qquad \text{(E-14)}$$

식(E-12)을 [식(E-14)의 제1항]× Δx^i을 계산하면, 식(E-15)와 같이 도출된다.

$$\frac{\Delta P^{i-1,j,k}}{\frac{\mu^{i-1,j,k}}{K_x^{i-1,j,k}} \cdot \frac{\Delta x^{i-1,j,k}}{2+} \frac{\mu^{i,j,k}}{K_x^{i,j,k}} \cdot \frac{\Delta x^{i,j,k}}{2}}$$

$$- \frac{\Delta P^{i,j,k}}{\frac{\mu^{i-1,j,k}}{K_x^{i-1,j,k}} \cdot \frac{\Delta x^{i-1,j,k}}{2+} \frac{\mu^{i,j,k}}{K_x^{i,j,k}} \cdot \frac{\Delta x^{i,j,k}}{2}}$$

$$- \frac{\Delta P^{i,j,k}}{\frac{\mu^{i,j,k}}{K_x^{i,j,k}} \cdot \frac{\Delta x^{i,j,k}}{2+} \frac{\mu^{i+1,j,k}}{K_x^{i+1,j,k}} \cdot \frac{\Delta x^{i+1,j,k}}{2}}$$

$$+ \frac{\Delta P^{i+1,j,k}}{\frac{\mu^{i,j,k}}{K_x^{i,j,k}} \cdot \frac{\Delta x^{i,j,k}}{2+} \frac{\mu^{i+1,j,k}}{K_x^{i+1,j,k}} \cdot \frac{\Delta x^{i+1,j,k}}{2}} \qquad \text{(E-15)}$$

[식(E-14)의 제2항]× Δy^j도 같은 형태로 도출되며, 식(E-13)을 이용하여 [식(E-14)의 제3항] × Δz^k 계산하면, 식(E-16)와 같이 도출된다.

$$\frac{\Delta P^{i,j,k-1}}{\frac{\mu^{i,j,k-1}}{K_z^{i,j,k-1}}\cdot\frac{\Delta z^{i,j,k-1}}{2}+\frac{\mu^{i,j,k}}{K_z^{i,j,k}}\cdot\frac{\Delta z^{i,j,k}}{2}}$$

$$-\frac{\Delta P^{i,j,k}}{\frac{\mu^{i,j,k-1}}{K_z^{i,j,k-1}}\cdot\frac{\Delta z^{i,j,k-1}}{2}+\frac{\mu^{i,j,k}}{K_z^{i,j,k}}\cdot\frac{\Delta z^{i,j,k}}{2}}$$

$$-\frac{\Delta P^{i,j,k}}{\frac{\mu^{i,j,k}}{K_z^{i,j,k}}\cdot\frac{\Delta z^{i,j,k}}{2}+\frac{\mu^{i,j,k+1}}{K_z^{i,j,k+1}}\cdot\frac{\Delta z^{i,j,k+1}}{2}}$$

$$+\frac{\Delta P^{i,j,k+1}}{\frac{\mu^{i,j,k}}{K_z^{i,j,k}}\cdot\frac{\Delta z^{i,j,k}}{2}+\frac{\mu^{i,j,k+1}}{K_z^{i,j,k+1}}\cdot\frac{\Delta z^{i,j,k+1}}{2}}$$

$$-\rho g\cdot\left(\frac{\frac{\Delta z^{i,j,k-1}}{2}+\frac{\Delta z^{i,j,k}}{2}}{\frac{\mu^{i,j,k-1}}{K_z^{i,j,k-1}}\cdot\frac{\Delta z^{i,j,k-1}}{2}+\frac{\mu^{i,j,k}}{K_z^{i,j,k}}\cdot\frac{\Delta z^{i,j,k}}{2}}\right.$$

$$\left.-\frac{\frac{\Delta z^{i,j,k}}{2}+\frac{\Delta z^{i,j,k+1}}{2}}{\frac{\mu^{i,j,k}}{K_z^{i,j,k}}\cdot\frac{\Delta z^{i,j,k}}{2}+\frac{\mu^{i,j,k+1}}{K_z^{i,j,k+1}}\cdot\frac{\Delta z^{i,j,k+1}}{2}}\right) \quad \text{(E-16)}$$

이상과 같이 box수 $N_x\times N_y\times N_z$개의 연립방정식이 성립되므로, 위의 계산식을 이용하여 컴퓨터로 계산해 구할 수 있다.

Ⅲ. 컴퓨터 계산 program 개발

1. 계산 program

Box수 $N_x\times N_y\times N_z$의 미지수 $\Delta P^{i,j,k}$에 관한 선형방정식이 성립되므로 Gauss-Seidel[10]법에 의해 수치적으로 계산되나, 계산식의 다수배열이 많으므로 계수배열의 기억용량을 감소시키기 위하여서는 계산식을 Fig. 4.와 같이 4단계로 나누어 계산하였다.

2. box의 분할수 N_x, N_y, N_z에 관한 고찰

전절에서 제안한 수치계산을 하기 위하여 box 분할을 어떤 정도로 분할해야 계산오차가 없을까?를 규명하여야한다. 따라서, 쓰레기층 내 투기계수가 같은 경우 ($K_x = K_y = K_z$)에 관하여, 다음과 같은 3개의 가스포집관의 경우를 검토하였다.

(1) 쓰레기층 밑바닥까지 가스포집관을 설치
($L_p/L_z=1$; case 1)

(2) 쓰레기층 중간까지 가스포집관을 설치
($L_p/L_z=0.5$; case 2)

(3) 가스포집관을 최종복토부분만 설치
($L_p/L_z=0$; case 3)

2절에서 가정한 모든 조건과 $K_x(=K_y=K_z)$ 조건을 기본으로 ΔP와 η는 L_x/L_z, L_s/L_z, L_p/L_z, D_x/L_x, K_s/K_x, $\mu G(L_z)^2/K_x$로

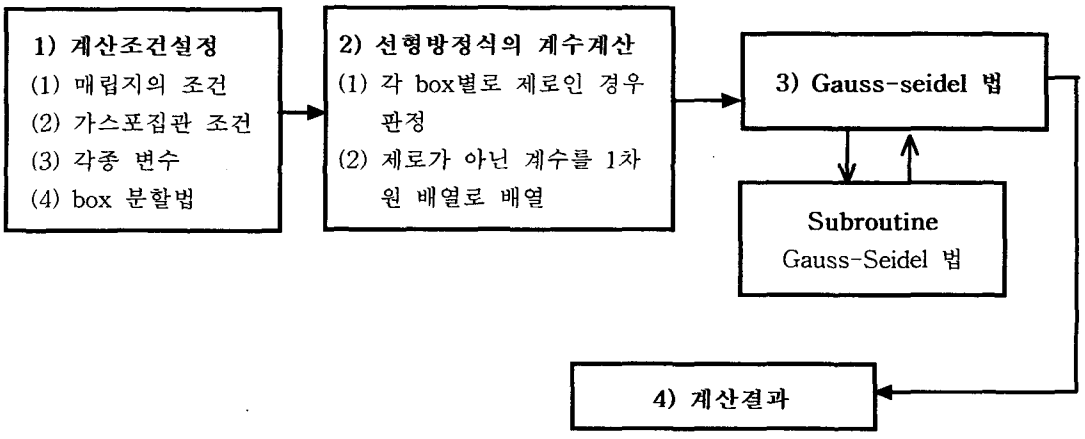

Fig. 4. Composition of compartment model

영향요인이다. 계산조건으로는 매립지 형태 등의 조건(Table 1.)는 가스포집관을 설치함에 따라 복토층 밑의 압력은 수천 Pa 이하로 제어하는 것을 전제로 1000 Pa 정도가 되도록 결정하였다. 집가스율 η는 50~90% 정도 되도록 검토하고, η가 미세하게 변화하지 않는 것을 간단히 확인하였다. 또한, 매립지의 가스 발생속도 G, L_x/L_z, 등이 변화하여도 분할 수에 영향을 주지않는 것을 확인하였다.

검토한 분할방법과 분할수 등은 Table 1.에 제시하였다. 분할방법(식(E-17, 18, 19 참조)은 등간격(equal), 2승간격(square), 3승간격(cubic)로 $N_x = N_y$, N_z을 순차로 변화하면서 검토하였다. case 2에서는 가스포집관선단면의 상면에는 z방향의 분할수 $N_z=1$로 고정하고, 가스포집관선단면의 하부에서 분할법과 분할 수를 변화시키면서 검토하였다.

검토결과를 case 1, 2, 3에 대하여 Fig. 5a, b, c에 분할수와 $1-\eta$의 관계를 나타내었다. Fig. 5a, b, c와 같이 등간격에서의 계산오차는 크고, 3승간격에서는 작은분할 수에도 계산오차가 적으나 계산시간이 대단히 오래 소요된다. 즉 분할 수가 적게되면 Gauss-Seidel[10]법에서의 반복회수가 많이 되어 계산시간이 오래 소요된다. 따라서 $N_x = N_y$에서는 2승분할법이 좋고, N_z에서는 Fig. 6a, b, c에 제시된 것과 같이 z방향의 압력분포가 가스포집관 설치부까지 거의 일정하므로 $N_z=1$이면 충분한 것이 도출된다. 한편, x, y방향의 압력분포는 관근처에서 급격히 변화하므로 관근처를 세밀히 분할할 필요가 있다.

따라서, 이상의 결과로부터 다음과 같이 분할하여 계산하는 것이 계산오차를 감소시킬 수 있다.

1) 3종의 case에 관하여 x, y 방향의 분할은 2승분할이 좋으며, $N_x = N_y$는 8정도가 좋고 식(E-17, 18)이 설정된다. 즉 $D_x = 0.1$ m, $L_x = 20$m 일 경우에는 $\Delta x^1 = 0.1$m, $\Delta x^2 = (20-0.1)\times 12/(1+4+9\cdots+49) = 0.142$ m, $\cdots \Delta x^8 = 6.965$ m로 분할된다.

$$\Delta x^1 = D_x, \quad \Delta x^i = (L_x - D_x) \times (i-1)^2 \Big/ \sum_{i=2}^{N_x} (i-1)^2 \quad (i = 2,3,\cdots,N_x) \qquad \text{(E-17)}$$

$$\Delta y^1 = D_y, \quad \Delta y^j = (L_y - D_y) \times (j-1)^2 \Big/ \sum_{j=2}^{N_y} (j-1)^2 \quad (j = 2,3,\cdots,N_y) \qquad \text{(E-18)}$$

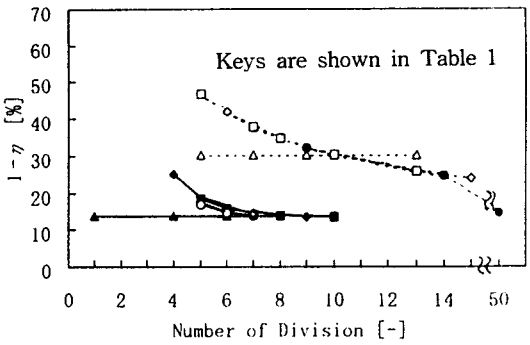

Fig. 5a. Relationship between number of division and colletion rate for case 1

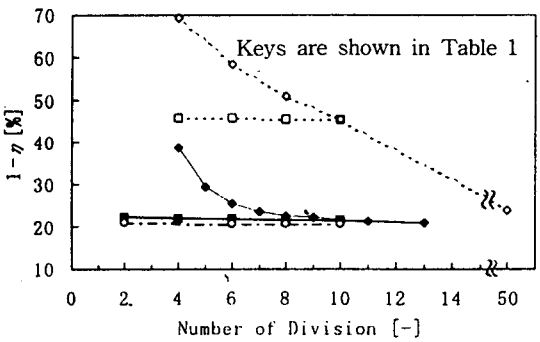

Fig. 5b. Relationship between number of division and colletion rate for case 2

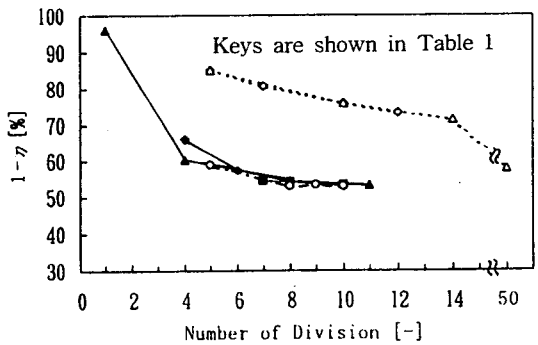

Fig. 5c. Relationship between number of division and colletion rate for case 3

Table 1. Calculation conditions of division method

Calculation Conditions	Division Method	Number of Division $N_x=N_y$	Number of Division N_z	Key
Case(1) : $\triangle P \fallingdotseq 1000Pa$	Equal (等間隔)	6, 8, 10, 15		◇
$L_p/L_z = 1$		5, 6, 7, 8, 10, 13	10(fix)	□
$L_x = L_y = (3/2)L_z$, $L_s/L_z = 1/20$		10(fix)	5, 7, 9, 10, 13	△
$K_x = K_y = K_z = 10^3 K_s$		9, 14, 50	1(fix)	●
$D_x/L_x = D_y/L_y = 0.003$	Square (2乘間隔)	4, 5, 7, 9, 10		■
$\triangle P^* = \mu G(L_z)^2/K_x = 13328Pa$		5, 6, 8, 10	8(fix)	◆
		8(fix)	1, 4, 6, 8, 10	▲
	Cubic (3乘間隔)	5, 6, 7		○
Case(2) : $\triangle P \fallingdotseq 1500Pa$	Equal (等間隔)	4, 6, 8, 10, 50		◇
$L_p/L_z = 0.5$, $K_x = K_y = K_z = 10^3 K_s$		4, 6, 8, 10	10(fix)	□
$L_x = L_y = (3/2)L_z$, $L_s/L_z = 1/20$	Square (2乘間隔)	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10		◆
$D_x/L_x = D_y/L_y = 0.003$		8(fix)	2, 4, 6, 8, 10	■
$\triangle P^* = \mu G(L_z)^2/K_x = 13328Pa$	Cuboc (3乘間隔)	20(fix)	2, 6, 8, 10	○
Case(3) : $\triangle P \fallingdotseq 1000Pa$	Equal (等間隔)	5, 7, 10, 12	5(fix)	◇
$L_p/L_z = 0$, $K_x = K_y = K_z = 10^3 K_s$		10(fix)	5, 10, 15, 20	△
$L_x = L_y = 2L_z$, $L_s/L_z = 1/5$	Square (2乘間隔)	4, 6, 8, 10		◆
$D_x/L_x = D_y/L_y = 0.01$		7, 8, 9	8(fix)	■
$\triangle P^* = \mu G(L_z)^2/K_x = 830Pa$		8(fix)	1, 4, 8, 11	▲
	Cuboc (3乘間隔)	5, 8, 9, 10		○

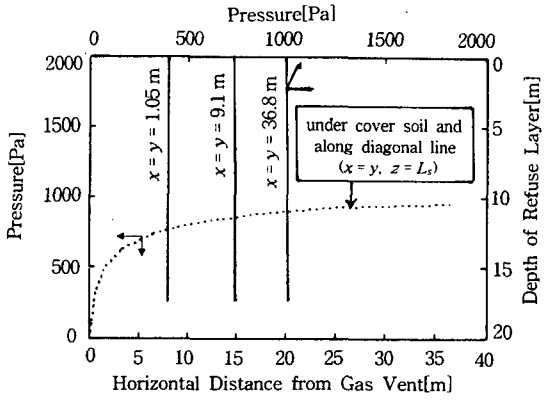

Fig. 6a. Pressure distribution in refuse layers for case 1
(L_x=L_y=30 m, L_z=20m, K_x=K_y=K_z=$10^{-9}m^{-2}$, K_s=$10^{-12}m^{-2}$, G=$10^{-3}s^{-1}$)

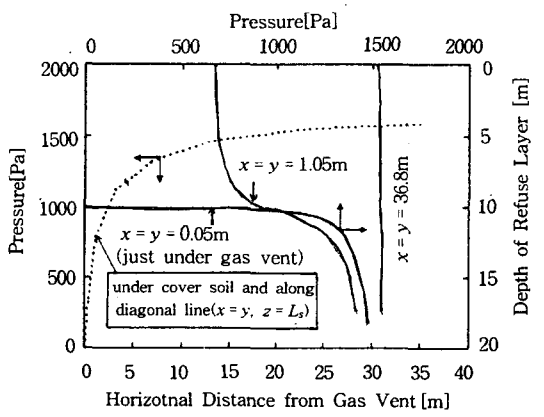

Fig. 6b. Pressure distribution in refuse layers for case 2
(L_x=L_y=30 m, L_z=20m, K_x=K_y=K_z=$10^{-9}m^{-2}$, K_s=$10^{-12}m^{-2}$, G=$10^{-3}s^{-1}$)

2) z방향의 분할에서는, case 1에서 N_z=1, case 2에서는 가스포집관 하단부에서 상층부와 하층부를 각각 1분할하는 것이 좋다(N_z=2). 또한 case 3에서는 2승 간격으로 N_z=8로 식(E-19)와

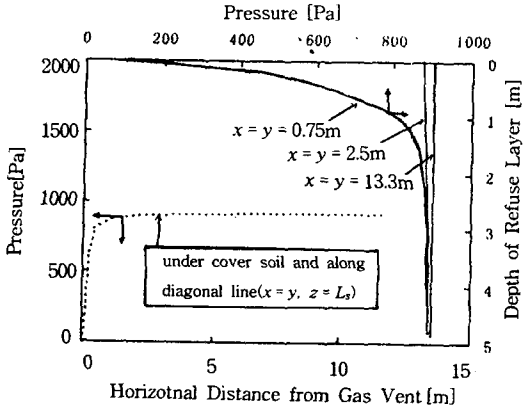

Fig. 6c. Pressure distribution in refuse layers for case 3
(L_x=L_y=30 m, L_z=20m, K_x=K_y=K_z=$10^{-9}m^{-2}$, K_s=$10^{-12}m^{-2}$, G=$10^{-3}s^{-1}$)

같이 분할하는 것이 무난하다.

$$\Delta z^k = L_z \times k^2 / \sum_{k=2}^{N_z} k^2 \qquad (i = 1,2,\cdots,N_z) \qquad \text{(E-19)}$$

Ⅳ. 결 론

본 연구는 쓰레기 매립지에서 쓰레기 분해로 인해 발생하는 매립가스의 압력과 유속을 계산하는 compartment(box) model 계산법을 제시하고, compartment(box)의 크기 설정방법을 제시하였다. 본 모델의 완성으로 가스 포집을 위한 가스포집관의 설치가격과 매립장내 압력관리, 복토층에서의 누출flux량 등을 파악하기위한 계산에 사용이 될 것이다.

Appendix 1)

기체의 점도(점성계수) η_{mix}의 추산방법[9)]

저밀도 기체(압력 10~300 kPa) 점도는 압력에 무관계이고, 온도 T_0 [K]의 점도 η_0 [Pa·s]을 알고 있을 시, 온도 T [K]의 점도 η [Pa·s]는 식(EA-1)으로 계산한다.

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

η [Pa·s] ; 온도 T [K]의 점도
η_0 [Pa·s] ; 온도 T_0 [K]의 점도
c [-] ; Sutherland 정수

n성분 혼합기체의 점도 η_{mix}는 온도 T, 각 기체의 점도 η, 몰분율y로부터, 식(EA-2)의 Sutherland 식으로부터 구한다.

$$\eta_{mix} = \sum \left[\frac{y_i \cdot \eta_i}{\sum y_j \cdot \Phi_{ij}}\right] \qquad \text{[EA-2]}$$

Φ_{ij}는 Wilke의 근이식으로 부터

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

y [-] ; 몰분율
M [kg/mol] ; 분자량

Appendix 2)

기체의 밀도 σ_{mix} 추산방법[9)]

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

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

σ_{mix}[kg/m^3] ; n 성분 혼합기체의 밀도
σ[kg/m^3] ; 온도 T_0[K]에서 각 기체의 밀도

참 고 문 헌

1. 池口 孝 : 埋立地における發生ガスの擧動(3), 日本都市淸掃, 第36卷, 第134号, 74-78, 1983.
2. 이해승 · 이찬기 : 쓰레기 매립지에서 대기중에 유출하는 가스 분포, 한국토양환경학회지, Vol.2, No.1. 63-72, 1997.
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, 725-727, 1996.
4. 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, 46-58, 1991.

5. Alan Young : Mathematical Modeling of Landfill Gas Extraction, Journal of the Environmental Engineering Division of the Ame-rican Society of Civil Engineers, 115(6), 1073-1087, 1989.
6. 花嶋正孝 山崎推義 : 埋立地からのガス發生とその對策, 廢棄物處理對策全國協議會第30回 全國大會講演集, 91-95, 1979.
7. 西田耕之組 外4人 : 廢棄物埋立地におけるガス抜きモデルに關する研究, 環境技術, Vol. 20, No. 7, 21～28, 1991.
8. Charles A. Moore, Iqbal S. Rai, and John Lynch : Computer Design of Landfill Methane Migration Control, ASCE, Vol. 108, No. EEl, 89～108, 1982.
9. 片山俊ら : 化學工學便覽, 丸善株式會社, 3～106(平成3)
10. 川崎晴久 : C&FORTRANによる數値解析の基礎, 共立出版株式會社, 46-50 66-101, 1995.