

HYLGS 모델을 활용한 수도권 매립지에서의 침출수-가스의 동시유동 해석에 관한 연구

이광희, 박용찬, 성원모

한양대학교 자원·환경공학과

ABSTRACT

Open dump causes groundwater and soil contamination by leachate, air pollution by LFG (Landfill Gas). In this paper, in order to improve landfill researches which have been done about reduction of high leachate level and LFG collection in the Kimpo landfill separately, the effect of simultaneous flowing of leachate and LFG has been studied. The HYLGS (Hanyang Leachate Gas Simulator) used in this study is a 3D, 2-phase, transient FDM model which can be applied to venting trenches in a landfill. From present numerical analysis it can be concluded that all the pressures of the Kimpo landfill grid system are almost the same and their maximum value in the center grid block of the system is approximately 26 m H₂O (2.52 atm), that because the pressures of venting trench layer situated in the middle of the landfill have the lowest values and equal with air pressure, the venting trenches play an important role in landfill stabilization, that the flow of gas will be more difficult as time goes by owing to the increase of LGR(Leachate and gas ratio).

Key Words : Kimpo Landfill, simultaneous flowing of Leachate and LFG

I. 서론

1970년대 이후에 급속한 경제발전에 의한 도시 쓰레기의 배출량은 천문학적인 수치를 기록하고 있으며 이 도시 쓰레기의 90 % 이상을 단순 투기 매립에 의존하고 있다. 현재 600여 개의 비위생 매립지가 존재하고 있으며 단순 투기 매립은 환경에 대한 심각한 오염문제를 발생시켰다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 630 만평 규모의 5개의 공구로 구성된 수도권 매립지를 건설하고 있고 이 면적은 여의도 면적에 8배에 해당하는 크기이다. 본 연구의 대상 지역인 1 공구는 천연적으로 형성된 점토층위에 존재하며 123 만평의 규모에 17개의 block으로 구성되어 있다. 1 공구의 매립총량은 55 백만 ton이며 최종 8단 매립 계획에 현재 7단 매립중에 있다. 수도권 매립지 보고서에 의하면 최대 가스 발생시기는 2005

년에 약 $4.18 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 예측하고 있고 침출수 발생량은 현장 실측치에 의하면 약 1,700~4,200 m^3/day 정도이다. 수도권 매립지에서 발생하는 가스는 메탄 성분이 60 % 이상이며 연간 발생량은 약 538억 ft^3 로 실로 엄청난 양이며 경남지역에서 4년 반정도 사용할 수 있는 양이다. 비용면으로 보면 300억 원 정도이며 현재 소각 처리되고 있다. 본 연구에서는 쓰레기 3단 매립이 완료되었던 시기인 1995년에 산출된 자료에 기초하여 모델링을 수행하였으며 과거의 침출수 수위 저감 방안 연구와 매립가스 (LFG)의 포집에 관한 연구가 각각 별개로 수행되어 왔던 점을 개선하기 위하여 침출수와 매립가스의 동시 유동에 의한 상호작용을 연구했고 이것을 향후 가스 포집관 설계 시 기초자료로 활용할 수 있도록 시도하였다.

II. 이론적 고찰

본 연구에 사용된 HYLGS는 물, 가스의 흐름을 모델링 할 수 있는 다차원 2상 유동모델로서 IMPES (Implicit Pressure Explicit Saturation) 방법을 사용하였다. 매립지에서 가스의 유동은 압력과 농도구배에 의해 유동하지만 본 모델은 압력구배에 의해서만 유동한다고 가정하였고 매립지에서의 2상 유동을 묘사하는 편미분 방정식을 살펴보면 다음과 같다.¹⁾

$$\text{Water} : \frac{\partial}{\partial t} (\phi S_w / B_w) = \nabla \cdot \left[\frac{kk_{rw}}{\mu_w B_w} \nabla \Phi_w \right] + Q_w \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Gas} : \frac{\partial}{\partial t} [\phi (S_g / B_g + R_{gw} S_w / B_w)] = \nabla \cdot \left[\frac{kk_{rg}}{\mu_g B_g} \nabla \Phi_g \right] + \\ \nabla \cdot \left[\frac{kk_{rw} R_{gw}}{\mu_w B_w} \nabla \Phi_w \right] + Q_g + R_{gw} Q_w \end{aligned} \quad (2)$$

본 모델에서 침출수와 가스에 대해 사용된 상대투과도는 아래의 Brooks와 Corey의 식을 사용하였다.^{2), 3)}

$$k_{rw} = S_e^{(2+3\lambda)/\lambda}, \quad k_{rg} = (1 - S_e)^2 (1 - S_e^{(2+\lambda)/\lambda}) \quad (3)$$

where

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{S_m - S_r} \quad (4)$$

여기서 λ 는 공극의 크기 및 분포와 관련된 지수이다. 위 식을 이용하여 S_r 이 0.064, λ 가 3.7일 때 상대투과도 값을 구하면 Fig. 1과 같이 나타난다.

일반적으로 시간에 따른 메탄 가스 발생속도는 매립지내에서 혐기성 메탄 가스를 생성하는 미생물과 관련이 있으며 혐기성 미생물의 유기물 소비 속도는 Monod 식으로 나타낼 수 있다. 이 식에 기초하여 Palos Verdes 매립지의 연구에서 가스 생성의 kinetics를 나타내는 다음과 같은 수학적 모델을 제시하였다.⁴⁾

$$\text{Stage I} : \frac{dG}{dt} = k_1 G \quad (5)$$

$$\text{Stage II : } \frac{dL}{dt} = -k_2 L \quad (6)$$

Stage I에서는 가스의 생성속도가 시간에 따라 지수 함수적으로 증가하고 Stage II에서는 역 지수 함수형태로 감소한다. 여기서 최대 가스 생성속도는 (Stage I에서 Stage II로의 전이) 가스 발생량이 총 발생량의 0.5 배가 되는 반감기 시점에 도달한다고 가정하면 최종적으로 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\text{Stage I : } G = \frac{L_0}{2} e^{-k_1(t_{1/2}-t)} \quad (7)$$

$$\text{Stage II : } G = L_0 - L = L_0[1 - \frac{1}{2} e^{-k_2(t-t_{1/2})}] \quad (8)$$

여기서 k_1 , k_2 값을 실험식에 의해 구해진 0.121, 0.099를 각각 위 식에 대입하면 시간에 따른 가스 발생량을 계산할 수 있으며 단위 체적당 발생하는 가스 발생량은 Fig. 2와 같다.⁴⁾

수도권 매립지의 개념적 설계

수도권 매립지 1공구 지역의 격자망은 46×34×8로 구성하였다. 본 매립지의 단면도는 Fig. 3과 같으며 이를 모델링 하기 위한 층의 구성은 Fig. 4와 같다. 이 그림에서 보는 바와 같이 복토층은 50 cm, 쓰레기층은 450 cm이며 배수층은 현장여건을 고려하여 50 cm로 설정하였으며 배수층의 특성치는 폐기물층과 동일한 것으로 가정하였다. 수도권 매립지의 바닥은 수리상수가 아주 작은 점토로 구성되어 있기 때문에 하부경계 조건은 유체 유동이 전혀 없다 (No Flow)고 설정하였으며 매립지와 주변지역의 경계지역에 점토로 차단벽을 설치하였으므로 옆 방향으로도 유동이 없다고 설정하였다. 보고서에 의하면 일반적으로 매립지 상부에서는 가스 생성량의 58%는 대기로 발산하며, 매립지에서 강수에 의한 지하함양율 (Recharge Rate)은 연평균 강수량의 약 12%를 적용한다고 보고되어 있으므로 본 연구에서는 이들을 input data로 활용하였다.⁵⁾

김포 매립지에서의 수두 자료는 매우 분산되어 있으므로 Kriging Method에 의해 각 grid의 수두분포를 산출하여 이를 초기 압력으로 환산하였다. 복토층과 쓰레기층의 공극율은 실험에 의해 산출된 값을 전 block에 동일하게 적용하였다.⁶⁾ 투수계수는 x축 및 y축 방향은 동일하며 수직 방향 투수계수는 수평 방향 투수계수의 0.1 배로 하였으며 기타 복토층과 쓰레기층의 입력자료는 Table 1에 정리하였다. 한편 초기 포화도는 수도권 매립지 H block에서 3개의 well에 대한 깊이에 따른 함수비 자료뿐이므로 이를 활용하여 다음의 식에 의해 환산한 후 전 grid에 동일하게 적용하였다.

$$\theta_w = \phi S_u \quad (9)$$

III. 결과 및 분석

수도권 매립지에서 압력 분포의 양상이 격자별로 큰 차이가 없기 때문에 본 연구에서는 대표적으로 중심에 위치한 grid block에서 층별 압력과 침출수 포화도의 시간에 따른 변화 양상을 분석하였고 매립지에서의 총 침출수와 LFG (Landfill Gas) 생산량의 시간에 따른 변화 양상을 분석하였다. 본 모델링의 grid system은 Fig. 5와 같으며 검은색으로 채워진 사

각형은 층에 따른 압력과 포화도를 분석한 grid를 표시하고 있다.

Fig. 6을 보면 2번째 층의 압력이 가장 높고 그 최대값이 26 m H₂O 정도임을 알 수 있었다. 또한 배수층인 4번째 층의 압력이 가장 낮게 나왔으며 이것은 수평가스 포집관이 매립지 안정화에 상당히 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 침출수의 포화도의 경우 8번째 층의 포화도가 초기에는 수평관의 영향으로 급격하게 감소하지만 시간이 지남에 따라 하부의 점토층이 침출수의 유동을 차단하고 상부로부터 침출수가 유입되기 때문에 증가한다. 배수층 위에 있는 층들은 배수층의 영향으로 초기에 포화도가 급격히 감소하다가 시간이 지나면 일정한 값을 가짐을 알 수 있다.

Fig. 8을 보면 매립가스의 생산량의 시간적인 변화는 매립가스의 발생량의 시간적인 변화 양상과 비슷함을 알 수 있고 최고 약 2.25 MMM m³/day 정도가 생산됨을 알 수 있다. 침출수와 가스의 비(LGR)는 초기에 급격히 감소하고 그 이후 지수함수 형태로 증가하고 있다. 따라서 가스를 생산할수록 침출수의 비중이 커짐을 알 수 있다. Fig. 9는 침출수와 매립가스의 누적생산량의 시간적인 변화 양상을 보여주고 있으며 40년 경과 후 침출수와 가스의 누적생산량은 각각 15.1 MM m³, 7.3 MMMM m³이 됨을 알 수 있었다. 침출수의 누적 배출량은 그림에서 보는 바와 같이 시간에 따라 직선의 형태로 증가함을 알 수 있고 이와 달리 가스의 누적 생산량은 곡선의 형태로 증가하고 20년 이후에는 수평선에 가까워짐을 알 수 있다. 이것은 20년 이후에는 쓰레기 분해가 완료되어 더 이상의 가스가 발생하지 않아 이 같은 결과가 나온 것으로 사료된다.

IV. 결론

수도권 매립지 1공구에 대해 침출수-가스의 동시 유동을 묘사할 수 있는 HYLGS 전산 모델을 활용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초기에는 매립가스의 생성으로 인해 압력이 가장 많이 상승되고 그 최대값은 약 26 m H₂O (2.52 atm) 정도이다.
2. 배수층의 venting trench 설치로 이 층의 압력이 대기압과 별 차이 없이 나타나므로 venting trench를 설치하는 것이 매립지의 안정화 시점을 앞당기는데 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다.
3. 침출수와 가스의 누적생산량은 40년 경과 후 각각 15.1×10^6 m³, 7.3×10^{12} m³로서 상당한 양의 가스와 침출수가 생산됨을 알 수 있었다.
4. 침출수와 LFG의 비(LGR) 값이 초기에 급격히 감소하지만 그 후에는 지수적으로 증가됨을 알 수 있다. 즉 침출수 생산량의 비중이 시간이 지남에 따라 증가함으로 매립가스는 시간이 지남에 따라 보다 유동하기 어려울 것으로 판단된다.

부호

B = Formation volume factor

G = Volume of gas produced prior to time t

k = Absolute permeability

L = Volume of gas remaining to be produced after time t

P = Pressure

Q = Source or sink
 R_{sw} = Solution gas-water ratio
 S = Saturation
 t = Time
 θ = Water content
 λ = Mobility
 Φ = Flow potential
 ϕ = Porosity
 $M = 1000$ and MM or $M^2 = 1,000,000$

첨자

e = Effective
 g = Gas
 m = Maximum
 r = Residual, relative
 w = Water

참 고 문 헌

- 1) H. B. Crichlow: MODERN RESERVOIR ENGINEERING-A Simulation Approach, Prentice-Hall, 1977
- 2) B. H. Keuper, and E. O. Frind: Two-Phase Flow in Heterogeneous Porous Media
2. Model Application, Water Resources Research, Vol. 27, No. 6, pp. 1059-1070, June 1991
- 3) A. H. Demond, and P. V. Roberts: Effects of Interfacial Forces on Two-Phase Capillary Pressure-Saturation Relationships, Water Resources Research, Vol. 27, No. 3, pp. 423-437, March 1991
- 4) 매립가스 처리시설 설치효율 분석조사 연구용역보고서, 수도권 매립지 운영관리조합, 1997. 12
- 5) 수도권 매립지 (1공구) 기반시설 보완 학술 용역; 수리지질 조사 및 지하수 오염 (유기물분야) 평가 분야, 수도권 매립지 운영관리 조합, 1995. 8
- 6) 쓰레기 매립작업 개선방안 연구용역보고서, 수도권 매립지 운영관리조합, 1997. 12

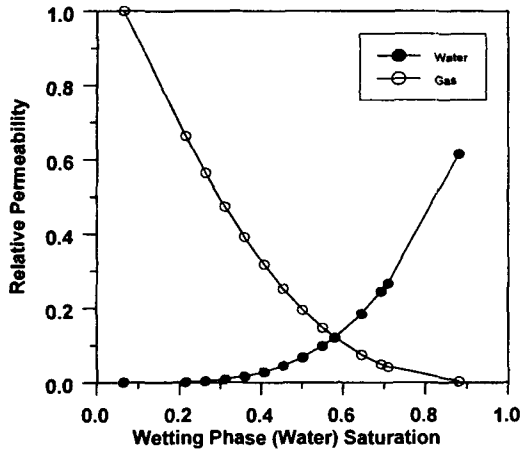


Fig. 1. Water-Gas Relative Permeability Curves

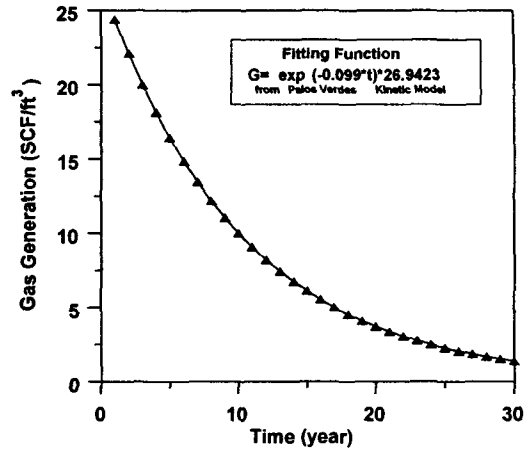


Fig. 2. Yearly Gas Generation Per Unit Volume in the Kimpo Landfill

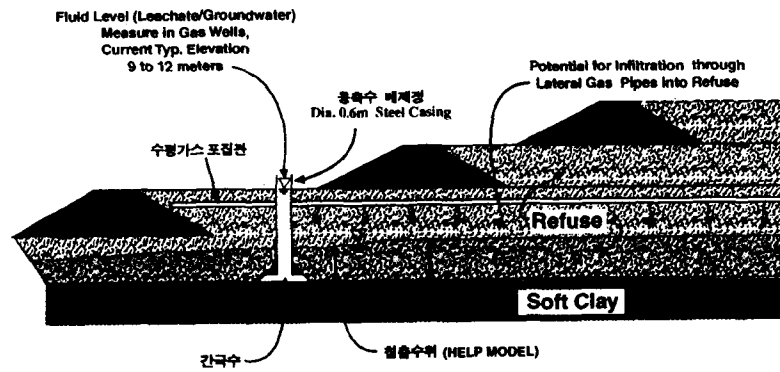


Fig. 3. Cross-sectional View of the Kimpo Landfill

Table 1. Landfill Properties

Layer #	Material	Thickness	S_{wi}
1	벽토층 (Wall Soil Layer)	50 cm	41%
2	쓰레기층 (Trash Layer)	450 cm	65%
3	벽토층 (Wall Soil Layer)	50 cm	49%
4	흙수층 (Soil Layer)	50 cm	46%
5	쓰레기층 (Trash Layer)	400 cm	46%
6	벽토층 (Wall Soil Layer)	50 cm	52%
7	쓰레기층 (Trash Layer)	400 cm	51%
8	흙수층 (Soil Layer)	50 cm	51%

Properties	Liner	Refuse Layer
Porosity	0.4	0.7
Permeability	5.3 m	900 m
Thickness	50 cm	450 cm

Fig. 4. Simulational Layer System

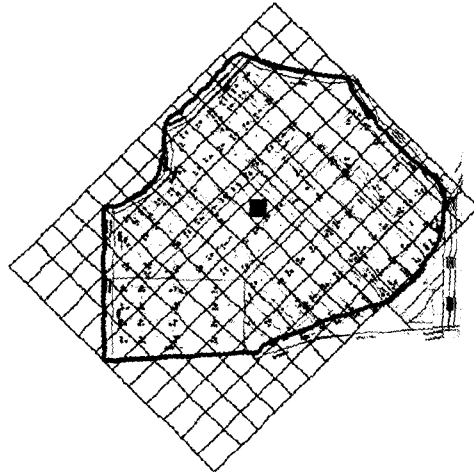


Fig. 5. Grid System

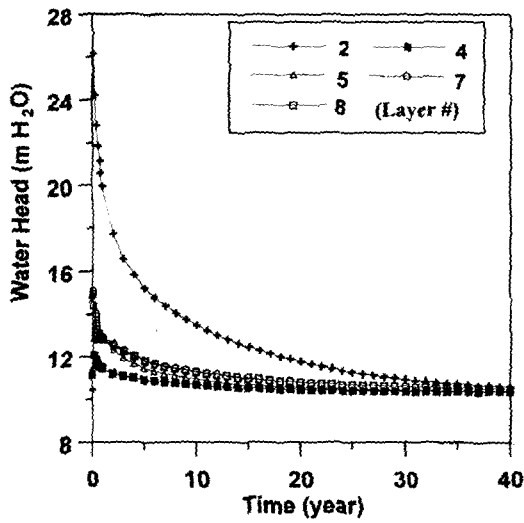


Fig. 6. Head Performances at the Center of the System

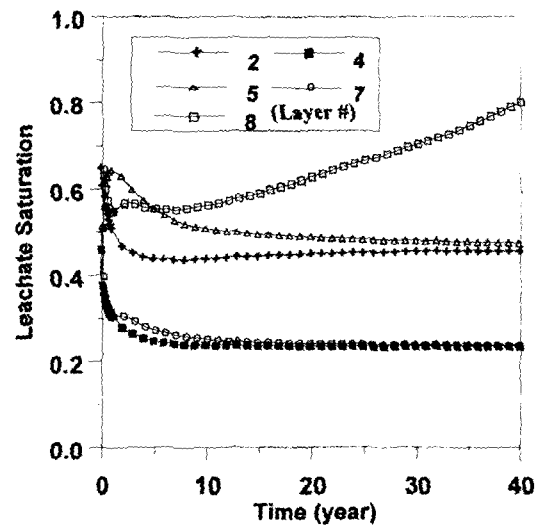


Fig. 7. Leachate Saturation at the Center of the System

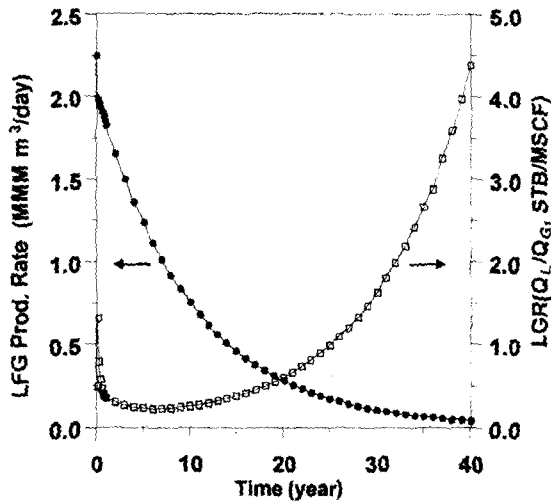


Fig. 8. LFG Production Rate and LGR of the System

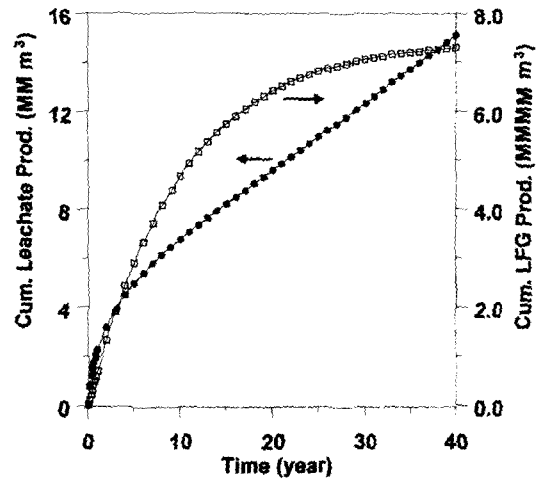


Fig. 9. Cumulative Leachate & LFG Productions of the System