

수도권 매립지에서 침출수-가스의 동시 유동 해석을 위한 전산 모델링 연구

The Numerical Modeling Study for the Simultaneous Flow of Leachate and LFG in Kimpo Landfill

성원모(Wonmo Sung)* · 박용찬(Yongchan Park)* · 이광희(Quanghee Yi)*

요 약 : 쓰레기의 단순 매립은 주변 환경에 대해 고려하지 않고 이루어지기 때문에 침출수에 의해서 지하수와 토양이 오염되고 매립가스에 의해서 악취 및 대기오염을 발생시킨다. 본 연구에서는 김포매립지의 침출수 수위저감과 매립가스의 포집 및 제어에 관한 연구를 수행하기 위해 다차원 2상 천이유동 유한차분 전산 모델을 활용하여 침출수와 매립가스의 동시 유동 해석을 시도하였다. 이 전산해석에서는 매립지 상부는 가스 생성량의 58%가 대기로 발산되며, 지하 함양율은 연평균 강수량의 12%로 가정하였다. 이외의 모든 자료들도 1995년 3단 매립 시점의 자료를 이용하였다. 전산 해석결과 매립지 중앙에 위치한 지점에서 수두의 최대값은 26 mH₂O (2.52 atm)로 나타났으며, 수평관의 설치에 매립지의 안정화 시점을 앞당기는데 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다. 수도권 매립지에서 3단 매립이란 가정과 낮은 지하 함양율을 적용하였음에도 40년이 경과되는 시점에서 침출수는 15.1×10⁶ m³, 매립가스는 5.85×10⁹ m³의 엄청난 양이 누적 생산되었다.

Abstract : Open dump of refuse causes groundwater and soil contamination by leachate and air pollution by LFG (Landfill Gas). In this paper, in order to perform a study about reduction of high leachate level and LFG collection & control, using a 3-D, 2-phase, transient FDM model, the analysis of simultaneous flow of leachate and LFG has been carried out. In present numerical analysis it is assumed that 58 percents of LFG will evaporate to the ambient air and the recharge rate of a landfill be 12 percent of the average precipitation per year. All other data were excerpted at the point of 1995 when three refuse layers had been buried. From numerical analysis we concluded that maximum head value is approximately 26 mH₂O (2.52 atm) in the center of the system and that installing venting trench plays an important role in landfill stabilization. Even with the assumption of three layers constructed and low recharge rate applied, it is found that cumulative leachate and LFG productions will be 15.1 million m³, 5.85 billion m³, respectively after 40 years.

서 론

도시에서 배출되는 쓰레기의 94% 이상이 단순매립에 의존하고 있는 처리방식 때문에 전국 각지에 산재되어 있는 매립지에는 매일 엄청난 양의 쓰레기가 반입되고 있어 지속적인 매립지의 확보 및 매립지 부지의 조기 안정화가 큰 문제로 대두되고 있는 현실이다. 특히 이러한 매립지로 인한 매립지 주변의 대기 및 수질오염과 토양의 오염은 가장 시급히 해결해야 할 도시 행정의 과제로 부각되고 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해 630만평 규모의 5개 공구로 구성된 김포 수도권 매립지를 건설하고 있고 이 면적은 여의도 면적의 약 8배에 해당하는 크기이다. 본 연구의 대상 지역인 1 공구는 천연적으로 형성된 점토층위에 123만평의 규모에 17개의 block으로 구성되어 있다¹⁾. 제 1 공구의 매립총량은 5천 5백만 ton이며 최종 8단 매립 계획 중 현재 7단 매립

중에 있다. 김포 매립지의 생성가스의 성분을 살펴보면 Table 1과 같이 난지도 매립지에 비해 메탄성분이 평균 60% 정도로 5% 이상 높다는 것을 알 수 있다²⁾.

수도권 매립지 보고서에 의하면, 최대 가스 발생시기는 2005년에 약 4.18×10⁶ m³/day로 예측하고 있고 침출수 발생량은 현장 실측치에 의하면 약 1,700~4,200 m³/day 정도이다^{3,4)}. 수도권 매립지에서 발생하는 가스의 연간 발생량은 약 15억 m³의 엄청난 양으로서 현재는 소각 처리되고 있다. 본 연구에서는 환경오염의 해결과 대체에너지원으로서의 가스회수 시설설계를 위한 단계로서 쓰레기가 3단 매립이 완료되었던

Table 1. Compositions of Gases Produced from Kimpo and Nanjido Landfills in Korea⁴⁾ (unit: vol. %)

	H block of Kimpo	Nanjido
CH ₄	57~62	47.1~57.92
CO ₂	36~40	37.0~50.8
O ₂	0.1~1.0	0.0~1.8
N ₂	0.6~1.1	0.43~5.8

*한양대학교 자원·환경공학과(Dept. of Natural Resources & Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea)

시기인 1995년에 산출된 자료에 기초하여 침출수위와 가스의 생산에 관한 모델링을 수행하였다. 침출수 수위 저감과 매립가스(LFG)의 포집 및 제어에 관한 연구를 수행하기 위해 김포매립지 1 공구의 H block에 대해 2 상 천이유동 해석을 시도하였다.

이론적 고찰

본 연구에 사용된 전산모델은 물, 가스의 흐름을 모델링 할 수 있는 다차원 2상 유한차분 모델⁵⁾로서 IMPES(Implicit Pressure Explicit Saturation) 방법을 사용하였다. 매립지에서 가스의 유동은 압력과 농도구배에 의해 유동하지만 본 모델은 압력구배에 의해서만 유동한다고 가정하였다. 매립지에서의 2 상 유동을 묘사하는 유동 방정식을 살펴보면 다음과 같이 물과 가스의 유동 방정식과 함께 식(3)의 포화도 식 및 식(4)의 모세관압 관계식이 사용되었으며 본 연구에서는 두 상의 압력차이는 없는 것으로 가정하였다.

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

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

$$S_w + S_g = 1 \quad (3)$$

$$p_c = p_g - p_w \quad (4)$$

본 모델에서 온도는 등온으로 가정하였으며 식(1)과 (2)를 식(3)과 (4)를 이용하여 집합한 식으로 부터 압력을 implicit한 방법으로 산출하고 여기서 계산된 압력을 식(1)에 적용하여 explicit 방법으로 포화도를 계산하였다.

상대투과도는 모델링에서 불확실성이 가장 큰 요인이지만 실제 자료가 없기 때문에 침출수와 가스에 대해 아래의 Brooks와 Corey의 경험식을 사용하여 모델링 작업을 수행하였다^{6,7,8)}.

$$k_{rw} = S_c^{(2+3\lambda)/\lambda} \quad (5)$$

$$k_{rg} = (1 - S_c)^2 (1 - S_c^{(2+\lambda)/\lambda}) \quad (6)$$

where

$$S_c = \frac{S_w - S_{wr}}{S_{w_{max}} - S_{wr}} \quad (7)$$

여기서 λ 는 공극의 크기 및 분포와 관련된 지수이다⁷⁾. 일반적으로 λ 는 비교적 균질층의 경우 2의 값을 사용하고 불균질성이 클수록 λ 는 작아지는데 매립층의 경우에는 매우 균질한 것으로 가정하였으므로 잔여 포화도가 0.064일 때 λ 는 3.7의 값을 적용하였으며 이에 의한 상대투과도는 Figure 1에 나타난 바와 같다.

위생 쓰레기 매립지에서 가스의 생성을 살펴보면 시간에 따른 메탄 가스 발생속도는 매립지내에서 혐기성 메탄 가스를 생

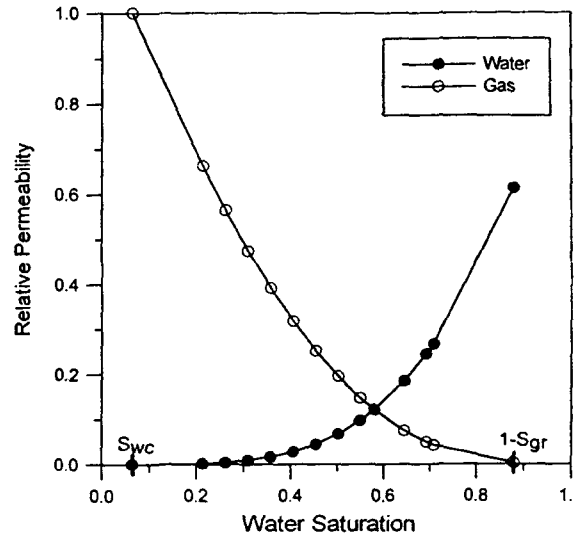


Figure 1. Water-Gas Relative Permeability Curves.

성하는 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 제시하였다³⁾.

$$\text{Stage I: } \frac{dG}{dt} = k_1 G \quad (8)$$

$$\text{Stage II: } \frac{dL}{dt} = -k_2 L \quad (9)$$

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

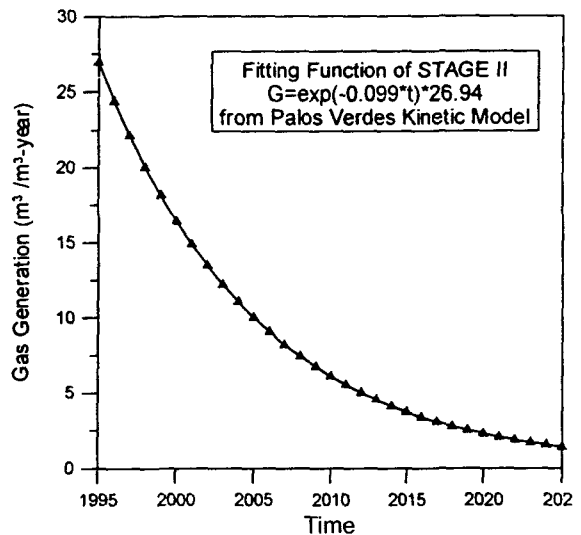


Figure 2. Gas Generation at the H-block of Kimpo Landfill.

$$\text{Stage I: } G = \frac{L_0}{2} e^{-k_1(t/2)^2} \quad (10)$$

$$\text{Stage II: } G = L_0 - L = L_0 \left[1 - \frac{1}{2} e^{-k_2(t/2)^2} \right] \quad (11)$$

여기서 k_1, k_2 는 가스 생성 속도 상수로서 실험식³⁾에 의해 구해진 $0.121, 0.099 \text{ year}^{-1}$ 를 각각 위 식에 대입하면 시간에 따른 가스 발생량을 계산할 수 있으며 단위 체적당 발생하는 가스 발생량은 Figure 2와 같다. 3단 매립시점인 1995년 현재 본 연구의 대상지역은 반감기를 지난 Stage II의 상태로 가스 발생량은 지수함수 형태로 감소하게 된다.

쓰레기를 매립하면서 침출수와 매립가스의 생성으로 인해 압력이 상승하게 되면 매립지의 안정화에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 높아진 압력을 합리적으로 낮출 수 있는 대안으로 venting trench를 고려 할 수 있다. Venting trench에 의한 침출수의 배수량은 다음 식에 의하여 표현될 수 있다⁹⁾.

$$Q_w = WI \cdot \frac{k_c k_{rw} L_p}{\mu_w} [P_{grid} - P_w] \quad (12)$$

여기서 equivalent permeability, k_c 는 다음과 같이 정의된다.

$$k_c = (k_x k_y k_z)^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

$$WI = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{r_b}{r_w}\right)} \quad (14)$$

한편 WI는 각 격자에서 venting trench에 의해 생산될 수 있는 생산성을 의미하는 식으로 격자의 크기와 venting trench의 반경의 함수이며 L_p 는 천공된 길이를 나타낸다.

수도권 매립지의 개념적 설계

수도권 매립지 1공구 지역의 단면도는 Figure 3과 같으며 이

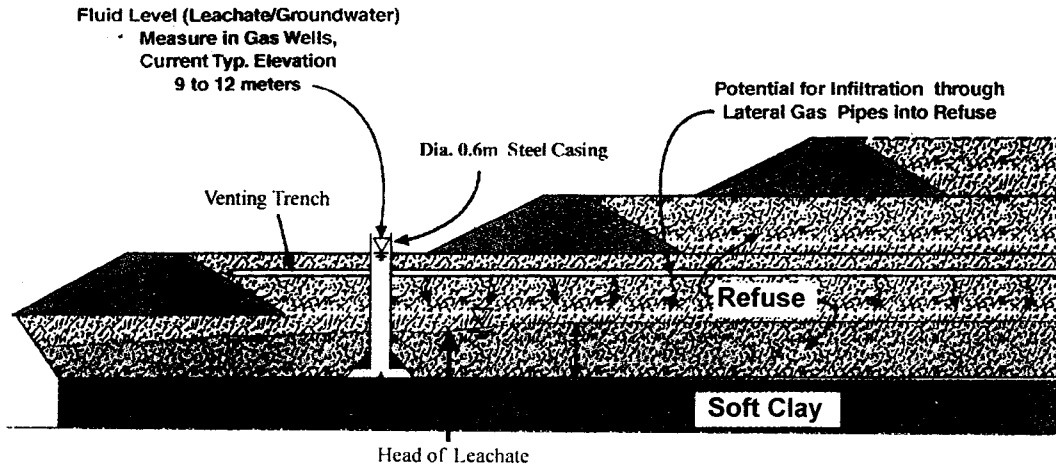


Figure 3. Cross-sectional View of Kimpo Landfill.

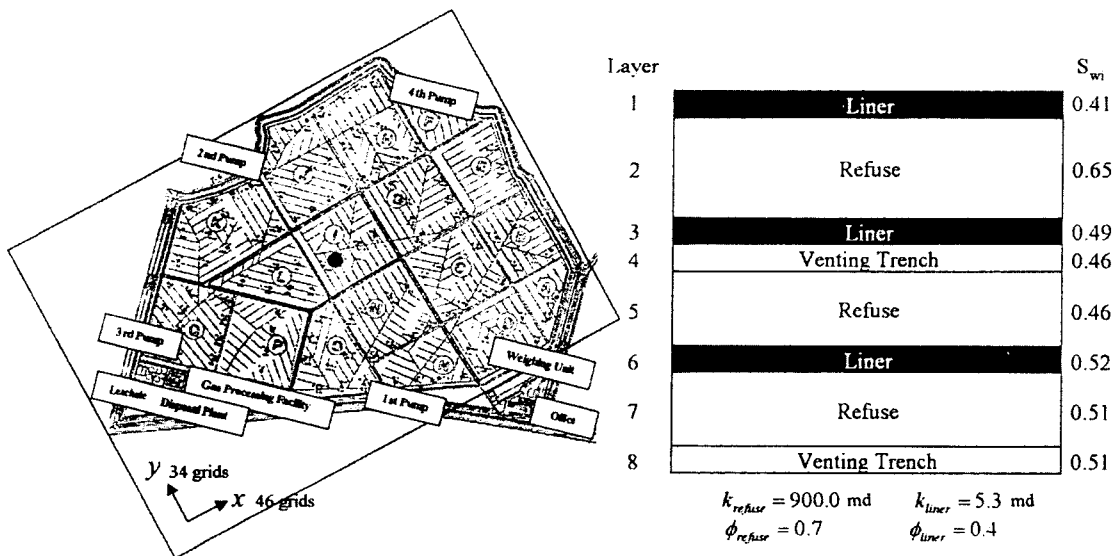


Figure 4. Pictorial View of Venting Trench and Layered System.

를 모델링하기 위한 전산모델의 구성은 Figure 4에 나타내었다. 묘사된 바와 같이 3단 쓰레기 매립지로서 각각의 쓰레기 매립층 사이는 50 cm의 복토층으로 구분된다. 또한 두 번째 쓰레기 층의 상부와 세 번째 쓰레기 층의 하부에 venting trench가 포함된 배수층이 존재한다. 수도권 매립지의 바닥은 수리상수가 아주 작은 점토로 구성되어 있기 때문에 하부경계 조건은 유체 유동이 전혀 없다고 설정하였으며 매립지와 주변지역의 경계지역에 점토로 차단벽을 설치하였으므로 옆 방향으로 침출수의 유동이 없는 것으로 가정하였다. 보고서¹⁾에 의하면 매립지 상부에서는 가스 생성량의 58%는 대기로 발산되며, 매립지에서 강수에 의한 지하함양율(Recharge Rate)은 연평균 강수량의 약 12%를 적용한다고 보고되어 있으므로 본 연구에서는 이들을 입력자료로 활용하여 최상부 층을 통해 강수량의 12%가 유입되는 시스템을 설정하였다.

김포 매립지에서의 수두 자료는 매우 분산되어 있어서 시추공의 자료를 이용하여 Kriging 방법에 의해 각 grid의 수두분

포를 산출하여 이를 초기 값으로 입력하였다(Figure 5 참조). 복토층과 쓰레기층의 공극율은 실험에 의해 산출된 값을 전 block에 동일하게 적용하였다²⁾. 투과도는 x축 및 y축 방향은 동일한 이방성으로 가정하여 쓰레기층에는 900 md, 복토층에는 5.3 md를 적용하였으며 수직 방향 투과도는 수평 방향 투과도의 0.1배로 설정하였다. 한편 초기 침출수 포화도는 수도권 매립지 1공구의 H block에서 측정된 3개 well의 깊이에 따른 함수비 자료를 활용하여 다음의 식에 의해 환산한 후 Figure 4와 같이 각 층에 동일하게 적용하였다.

$$S_w = \frac{\theta_w}{\phi} \quad (14)$$

결과 및 분석

전산해석은 46×34×8의 격자 시스템을 이용하였으며 이를 간략히 나타내면 Figure 4와 같다. 본 연구에서는 전산모델링은 40년의 기간에 걸쳐 수행하였으며, 그 결과 수도권 매립지에서 압력 분포의 양상이 위치에 따라 큰 차이가 없는 것으로 나타났기 때문에 본 연구에서는 대표적으로 매립지의 중심에 위치한 격자(Figure 4의 검은색 지점에서 시간에 따른 층별 수두 변화와 침출수 포화도의 변화 양상을 분석하였고 매립지에서의 총 침출수와 LFG 생산량의 시간에 따른 변화 양상을 분석하였다. 분석을 위해 3개의 쓰레기 층을 대표할 수 있도록 2, 4, 8번 층의 값을 그림에 도시하였다.

먼저 각 층에 따른 압력 변화를 살펴 보면 Figure 6에서 보는 바와 같이 초기 압력의 경우 아래 층으로 갈수록 높았지만 전산모델링 결과 2번째 층의 압력이 최고 26 mH₂O까지 올라가는 것을 알 수 있다. 배수층인 4번과 8번 층은 초기에 약간 상승하다 매우 빠르게 안정화 되는 결과를 보였으나 2번 층의 수두 분포를 살펴보면 Figure 6에 나타나 있는 것처럼 모델링 초기인 1년 후의 압력이 매우 높은 상태임을 유지하고 있으며



Figure 5. Initial Head Distribution.

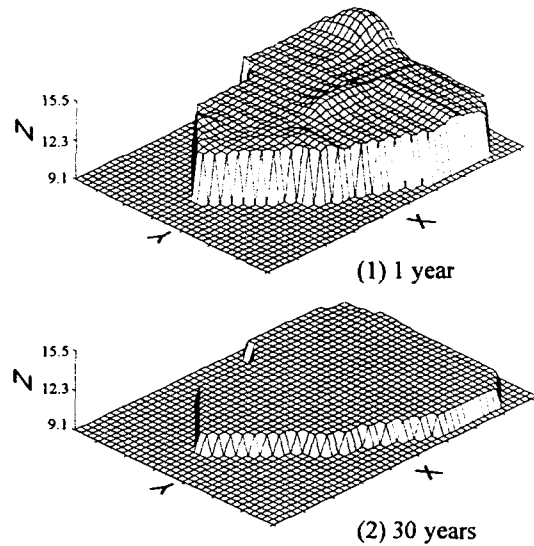
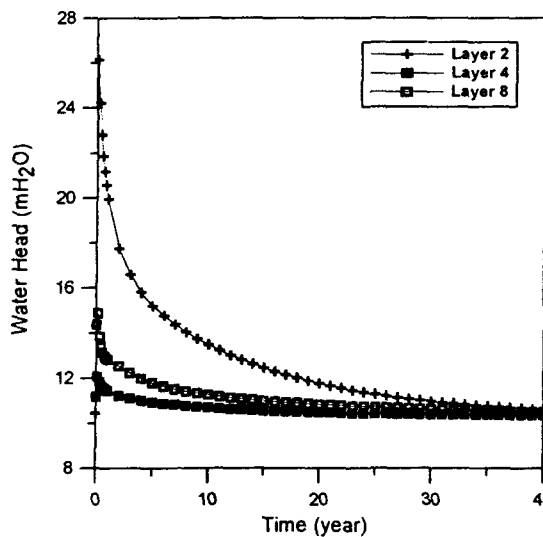


Figure 6. Head Performances with time at the Center and Head Distributions over the whole system at Layer 2.

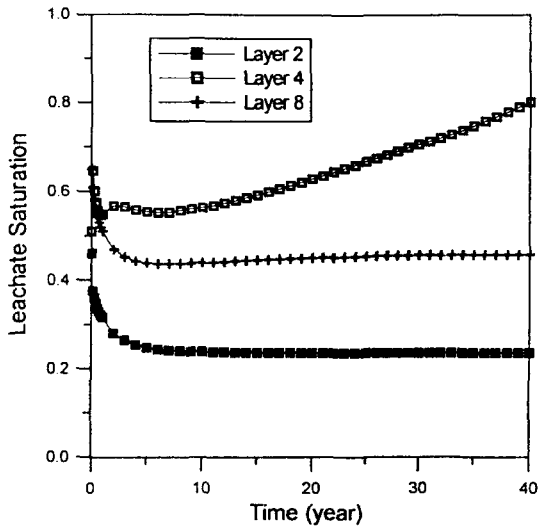


Figure 7. Leachate Saturation at the Center of the System.

8번 층과 비교하면 11.5 mH₂O 정도에 도달하는 시점이 약 20년 정도 늦는다는 것을 알 수 있다. 이것은 수평가스 포집관이 매립지 안정화에 상당히 큰 영향을 미침을 보여주는 것이다.

침출수의 포화도의 경우 Figure 7에서 보는 바와 같이 맨 하부층인 8번째 층의 포화도가 초기에는 수평관의 영향으로 급격하게 감소하지만 시간이 지남에 따라 점차 증가하는 양상을 보였다. 이는 가스의 생성이 줄어들고 venting trench에서 생산이 됨에 따라 전체 시스템내의 가스 포화도가 감소되며 상부층에서 하부층으로 침출수가 중력배수 되기 때문으로서 2번의 쓰레기 층과 4번의 배수층의 포화도는 초기부터 감소하여 안정화된 값을 보여주고 최 하부층인 8번 층의 포화도는 시간에 따라 증가되는 현상을 보인 것이다.

Figure 8에서 매립가스 일일 생산량은 매립가스 발생량이 줄어들음에 따라 비슷한 양상으로 감소 됨을 확인할 수 있었으며 최고 약 1.8×10^6 m³/day 정도가 생산되는 것으로 나타났다. 침출수와 가스의 비(LGR)는 Figure 8에서 볼 수 있듯이 약간

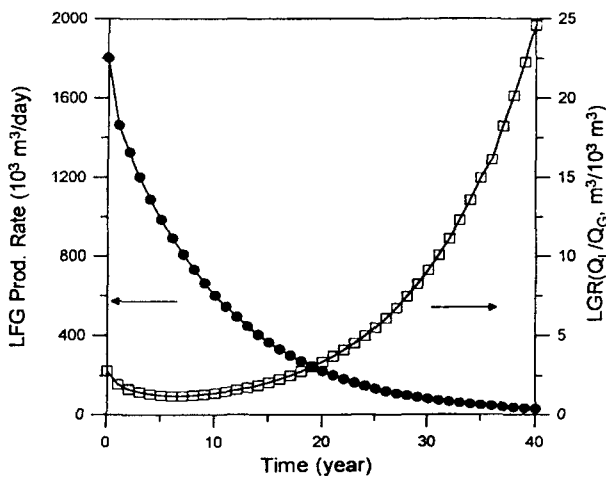


Figure 8. LFG Production Rate and LGR of the System.

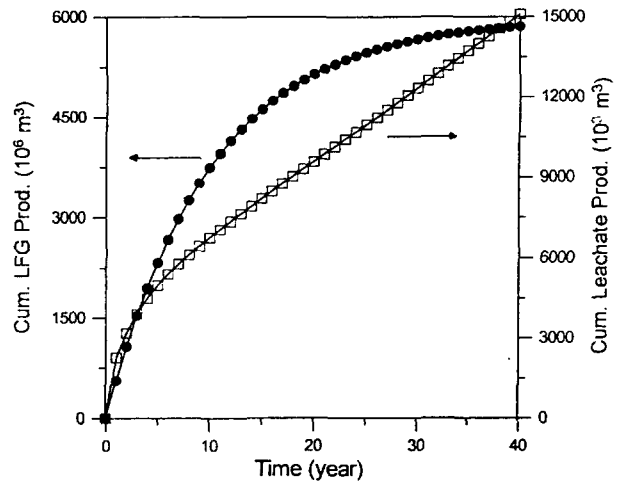


Figure 9. Cumulative Leachate and LFG Productions of the System.

의 감소양상을 보였다가 지수함수 형태로 증가되는 것을 알 수 있는데 이는 가스의 생성이 시간에 따라 감소되고 침출수의 생산비중이 점차 커진다는 것을 보여주는 것이다.

Figure 9는 침출수와 매립가스의 누적생산량에 대한 시간적인 변화 양상을 보여주고 있으며, 40년 경과 후 침출수와 가스의 총 누적생산량이 각각 15.1×10^6 m³, 5.85×10^9 m³이 됨을 알 수 있다. 침출수의 누적 배출량은 이 그림에서 보는 바와 같이 40년이 지난 후에도 계속적으로 증가되는 추세인 반면 가스의 누적 생산량은 20년 이후에는 안정화 되어감을 알 수 있다. 이는 20년 이후에는 쓰레기 분해가 거의 완료되어 가스의 발생량이 작아 이 같은 결과가 산출 됨을 알 수 있다.

결 론

본 연구에서는 침출수와 매립가스의 동시 유동을 해석할 수 있는 3차원 2상 천이유동 유한차분 모델을 활용하여 김포지역의 수도권 매립지 1 공구에 대해 2상 유동분석을 시도한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 가스 생성 모델을 사용한 결과 최대 연간 단위부피(1 m³) 당 27 m³ 정도가 생성되는 것으로 계산되었으며 이를 모델에 적용한 결과 매립지의 수두(압력)는 배수층이 없는 2번째 층에서 약 26 mH₂O(2.52 atm) 까지 상승하는 것으로 나타났다.
2. 배수층이 존재하는 2단 및 3단 쓰레기층의 압력이 배수층이 없는 1번 쓰레기 층에 비해 압력이 빠르게 낮아지는 현상을 볼 수 있는데 이는 venting trench가 매립지의 안정화를 앞 당기는데에 매우 중요한 역할을 한다는 것을 나타내는 것이다.
3. 전산모델링 결과 침출수와 가스의 비(LGR)는 초기에 약간의 감소를 보이다가 지수함수 형태로 증가되는 것을 알 수 있는데, 이는 가스의 생성이 시간에 따라 감소되면서 가스의 생산이 줄어들고 침출수의 생산량은 매립지내로 유입되는 강수량에 의해 계속적으로 유지되기 때문이다.
4. 침출수와 매립가스의 누적생산량은 40년 기간에 걸쳐 각각 15.1×10^6 m³, 5.85×10^9 m³에 이를 정도의 방대한 양이므로 이의 처리 및 자원화에 대한 연구가 요구된다.

사용기호

- B = Formation volume factor
- G = Volume of gas produced prior to time t
- k = Absolute permeability
- k_r = Relative permeability
- L = Volume of gas remaining to be produced after time t
- L_p = Perforated interval
- P = Pressure
- Q = Source or sink
- r_b = effective radius of grid block
- r_w = radius of venting trench
- R_{gw} = Solution gas-water ratio
- S = Saturation
- t = Time
- θ = Water content
- μ = Viscosity
- Φ = Flow potential
- ϕ = Porosity

첨자

- e = Effective
- g = Gas
- w = Water

참고문헌

1. 수도권 매립지(1공구) 기반시설 보완 학술 용역; 수리지질 조사 및 지하수 오염(유기물분야) 평가 분야, 수도권 매립지 운영관리 조합, 1995. 8.
2. 수도권 매립지 매립가스 추출 및 발산특성 연구조사, 동아건설 산업주식회사, 1997. 10.
3. 매립가스 처리시설 설치효율 분석조사 연구용역보고서, 수도권 매립지 운영관리조합, 1997. 12.
4. 쓰레기 매립작업 개선방안 연구용역보고서, 수도권 매립지 운영관리조합, 1997. 12.
5. 박용찬, 지역적 격자 세분화 기법이 적용된 HYBOS 모델을 활용한 와다구조의 최적생산방안 도출에 관한 연구, 한양대학교 석사학위 논문, 1995. 6.
6. David B. McWhorter and Daniel K. Sunada, Exact Integral Solutions for Two-Phase Flow, Water Resources Research, Vol. 26, No. 3, pp. 399-413, March 1990.
7. Keuper, B. H. and Frind, E. O., Two-Phase Flow in Heterogeneous Porous Media 2. Model Application, Water Resources Research, Vol. 27, No. 6, pp. 1059-1070, June 1991.
8. Demond, A. H. and Roberts, P. V., Effects of Interfacial Forces on Two-Phase Capillary Pressure-Saturation Relationships, Water Resources Research, Vol. 27, No. 3, pp. 423-437, March 1991.
9. 이광희, 매립지의 침출수-가스의 동시유동 해석을 위한 전산모델 연구, 한양대학교 석사학위논문, 1998. 12.