

지하수 흐름장에서 biofilm 메카니즘에 관한 연구

○김문주*, 서일원**, 선우중호***

1. 서론

석유, 가스 등의 탄화수소 에너지를 저장하는 방식에는 지상의 저장 탱크를 이용하는 방법과 지하의 저장소를 이용하는 두 가지로 분류된다. 일반적으로 지하에 저장하는 방식이 공사비의 절감, 운영 및 유지비의 절감, 안전성 확보, 환경보전 및 전략적인 장점 등의 이유로 더욱 보편적으로 이용되고 있다. LPG를 지하에 저장하는 방법은 상압저온 저장방식과 고압상온 저장방식의 두 가지가 있다. 상압저온식 저장은 운영비가 많이 들기 때문에 날씨가 추운 지역을 제외하고는 잘 사용되지 않는다. 고압상온식 저장은 LPG의 증기압보다 높은 압력을 가하여 액화 저장하는 방식인데 이에 상응하는 압력을 얻기 위해 보통 지하수면에서 100 m 이하의 깊은 곳에 공동을 건설하게 된다.

고압상온식 저장방식의 기밀성 유지를 위한 인위적 가압 방법의 하나로 저장공동 상부 구간에 수장막(water curtain)을 설치한다. 지하수는 수장막 시스템으로부터 암반 열극(fracture)이나 공극을 통하여 저장 공동으로 유입되어 수압을 미치게 된다. 공극내에 박테리아 같은 미생물이 성장하게 되면 biofilm을 형성하게 되고, 이렇게 되면 투수성을 저하시켜 유량이 감소되며 수장막의 효율성을 낮추는 결과를 초래하게 된다. 이의 대책으로 수장막 시스템내로 세정 용액을 주입시켜 박테리아를 살균함으로써 미생물의 발생으로 인한 공극 폐쇄(clogging) 현상을 제거하거나 예방할 수 있다. 이러한 세정 작업의 효율적 수행을 위해서는 미생물에 의한 투수계수의 감소 관계를 밝혀 내는 것이 중요하다.

본 연구에서는 공극내에서 미생물의 성장 및 이동을 규명하고, biofilm 메카니즘과 투수계수와 의 관계를 규명하였다.

* 서울대학교 대학원 토목공학과 석사과정

** 서울대학교 토목공학과 부교수

*** 서울대학교 총장

2. 수학적 모형

2.1 기본 가정

일반적으로 물로 포화된 다공성 매질의 경우는 고체와 물로 이루어져 있다고 볼 수 있다. 물 속에서 부유중인 박테리아는 박테리아 세포 하나가 떠 다니는 경우보다는 박테리아끼리 서로 뭉쳐서 떠 다니는 경우가 많다. 이런 박테리아 덩어리가 고체표면에 달라붙어서 성장, 분열을 통해 고체표면에 엉겨서 막을 형성하는 데, 이 막을 **biofilm** 이라고 부른다. 일반적으로 **biofilm** 은 불투수성이다. **Biofilm** 이 성장하게 되면 공극의 전체 부피는 감소하고 평균 크기도 작아진다. 그리고 공극이 감소할수록 투수계수도 감소한다. 암반이나 가는 모래와 같이 작은 투수계수를 가지는 매질의 경우 투수계수의 저하에 상당한 영향을 주게 된다.

Biofilm 메카니즘을 표현하는 수학적 모형을 유도하는 데 도입하는 기본적인 가정은 다음과 같다. 첫째, 다공성 매질은 물로 포화되어 있다. 둘째, 다공성 매질은 물, 고체, **biofilm** 의 세가지 위상으로 되어있다. 셋째, Darcy 의 법칙이 성립한다. 넷째, **biofilm** 은 불투수성이다. 다섯째, 기질의 흡착은 일어나지 않는다. 여섯째, 박테리아의 성장에 따라 발생하는 물과 기체는 무시한다.

2.2 물속에 부유하는 박테리아의 이동방정식

물속에 부유하는 박테리아에 관한 이동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(n^w C_b^w) = \nabla \cdot (n^w D \nabla C_b^w) - \nabla \cdot (V C_b^w) + R_c \quad (1)$$

여기서 n^w 는 전체 부피 중 물이 차지하는 부피, C_b^w 는 물 속에 부유하는 박테리아의 농도이다. R_c 는 다음 식으로 정의된다.

$$R_c = \left\{ \begin{array}{l} \text{박테리아의} \\ \text{증가율} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{박테리아의} \\ \text{순증가율} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Biofilm에서 물로 이동한} \\ \text{박테리아의 비율} \end{array} \right\} \quad (2)$$

박테리아의 증가는 Monod 운동 방정식을 따르고, 박테리아의 감소는 일차 선형방정식을 따른다고 가정한다. **Biofilm** 에서 물로 이동한 박테리아의 비율은 $(R_i - R_d)$ 와 같이 표현할 수 있다. 여기서, R_i 은 탈착과 분리에 의한 손실항이고, R_d 는 흡착과 부착 및 여과를 포함한 축적항이다. 따라서, 식 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(n^w C_b^w) = \nabla \cdot (n^w D \nabla C_b^w) - \nabla \cdot (V C_b^w) + \left(\frac{\gamma K_s C_s^w}{K_s + C_s^w} \right) n^w C_b^w - b n^w C_b^w + R_i - R_d \quad (3)$$

여기서 C_s^w 는 물 속에 있는 기질의 농도이고, K_s 는 Monod 중간속도계수이고, K_s 는 최대기질 섭취계수이고, γ 는 유출계수이고, b 는 무기호흡계수이다.

박테리아의 손실항을 다음과 같이 표현할 수 있다(Deb, 1969).

$$R_d = (c_1 n^f + c_2) n^w C_b^w \quad (4)$$

여기서 c_1 과 c_2 는 상수이다.

전단응력에 의한 손실항은 다음과 같은 식을 사용한다(Speitel & DiGiano, 1987).

$$R_l = b_s n^f \rho^f + b_s' \left(\frac{Y \eta k_s C_s^w}{K_s + C_s^w} \right) M L_f \rho^f \quad (5)$$

여기서 b_s 는 전단응력에 관한 함수이고, b_s' 는 무차원 지수이다.

2.3 Biofilm 내에서의 연속방정식

$$\left\{ \text{biofilm의} \right\} \left\{ \text{집적 비율} \right\} = \left\{ \text{biofilm의} \right\} \left\{ \text{순 증가율} \right\} + \left\{ \text{물에서 biofilm으로 이동한} \right\} \left\{ \text{박테리아의 비율} \right\} \quad (6)$$

여기서도 biofilm 내의 박테리아의 증가는 Monod 운동방정식을 따르고, 박테리아의 감소는 일차 선형방정식을 따른다고 가정한다. 그러면 biofilm의 순증가율은 다음과 같이 표현된다.

$$\left(\frac{Y \eta k_s C_s^w}{K_s + C_s^w} \right) M L_f \rho^f - b n^f \rho^f \quad (7)$$

여기서 M 은 biofilm의 비면적이고, L_f 는 biofilm의 종단면 두께이다. Biofilm에서 물로 이동한 박테리아의 비율은 $-(R_l - R_d)$ 와 같이 표현되므로 식(6)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (n^f \rho^f) = \left(\frac{Y \eta k_s C_s^w}{K_s + C_s^w} \right) M L_f \rho^f - b n^f \rho^f - R_l + R_d \quad (8)$$

2.4 물 속에 있는 기질의 이동방정식

물속에 부유하는 기질의 농도에 관한 이동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (n^w C_s^w) = \nabla \cdot (n^w D \nabla C_s^w) - \nabla (V C_s^w) + R_s \quad (9)$$

$$R_s = \left\{ \text{물속의 박테리아의 증가로 인한} \right\} \left\{ \text{기질의 감소비율} \right\} + \left\{ \text{Biofilm의 성장으로 인한} \right\} \left\{ \text{기질의 감소비율} \right\} \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (n^w C_s^w) = \nabla \cdot (n^w D \nabla C_s^w) - \nabla (V C_s^w) - \left(\frac{k_s C_s^w}{K_s + C_s^w} \right) n^w C_b^w - \left(\frac{\eta k_s C_s^w}{K_s + C_s^w} \right) M L_f \rho^f \quad (11)$$

2.5 다공성 매질 특성의 변화

Biofilm 의 증가에 따른 공극의 감소는 다음식으로 표현된다(Brooks & Corey, 1969).

$$n^w = \beta \left(\frac{L_f}{R}\right)^\lambda \left[I_2 \left(\frac{R}{L_f} - 1, \lambda\right) - I_2 \left(\frac{r_0}{L_f} - 1, \lambda\right) \right] \quad (12)$$

$$I_n(u, \lambda) = \int_0^u \frac{x^n}{(x+1)^{3-\lambda}} dx \quad (13)$$

여기서 λ 는 공극 크기 분포지수로서 0 에서 무한대까지의 값을 가지며 값이 클수록 균등함을 의미한다. β 는 λ 에 따라 좌우된다. R 은 최대 공극 반지름을 의미한다. r_0 는 최소 공극 반지름을 의미한다.

공극과 투수계수에 관한 식(Mualem, 1976)을 사용한다.

$$k = \frac{\kappa \sqrt{n^w} \beta^2 L_f^2}{8} \left(\frac{L_f}{R}\right)^{2\lambda} \left[I_3 \left(\frac{R}{L_f} - 1, \lambda\right) - I_3 \left(\frac{r_0}{L_f} - 1, \lambda\right) \right] \quad (14)$$

여기서 κ 는 상수이다.

공극과 비면적에 관한 식(Brooks & Corey, 1969)을 사용한다.

$$M = \frac{2\beta}{L_f} \left(\frac{L_f}{R}\right)^\lambda \left[I_1 \left(\frac{R}{L_f} - 1, \lambda\right) - I_1 \left(\frac{r_0}{L_f}, \lambda\right) \right] \quad (15)$$

2.6 경계 및 초기 조건

본 연구에서 사용한 초기 조건은 다음과 같다.

$$C_b^w(x, 0) = 0 \quad (16a)$$

$$L_f(x, 0) = 0 \quad (16b)$$

$$C_s^w(x, 0) = S_0 \quad (16c)$$

경계 조건은 다음과 같다.

$$C_b^w(0, t) = B_0 \quad (17a)$$

$$\frac{\partial C_b^w}{\partial x}(L, t) = 0 \quad (17b)$$

$$C_s^w(0, t) = S_0 \quad (17c)$$

$$\frac{\partial C_s^w}{\partial x}(L, t) = 0 \quad (17d)$$

여기서 L 은 구간 길이이고, B_0, S_0 는 박테리아 및 기질의 주입 농도이다.

3. 수치모의 및 결과 분석

본 연구에서 수치해석 기법은 Crank-Nikolson 방법을 사용하였고, 시간간격과 공간간격은 각각 5.4 초, 1.5cm 를 사용하였다. 수치모형의 입력자료 중 중요한 계수 및 초기치의 값은 다음과 같다.

$$V = 355 \text{ cm/day}, B_0 = 1.0 \text{ mg/L}, S_0 = 5.99 \text{ mg/L}, n^w = 0.347, k = 2.93 \times 10^{-6} \text{ cm}^2, \\ D = 146.88 \text{ cm}^2/\text{day}, M = 48.5 \text{ cm}^{-1}, K_s = 0.799 \text{ mg/L}, k_s = 7.70 \text{ day}^{-1},$$

물속에 부유하는 박테리아의 농도와 biofilm 의 두께의 변화를 그림 1 과 그림 2 에 도시하였다. 그림에서 박테리아와 biofilm 모두 주입부에 가까운 지점에서 최대값을 보이다가 주입부에서 멀어질수록 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한, 시간의 경과에 따라서 점차 증가하다가 어느 시점을 지나면 다시 완만하게 감소하고 있다. 그림 3 은 시간에 따른 투수계수의 변화를 도시한 것이다. 시간의 경과에 따라 투수계수의 감소가 중대되며, 감소율의 최대치는 0.73 정도이다.

4. 결론

모의 결과를 분석하여 볼 때 biofilm 은 초기에 아주 빠른 성장을 보이나, 시간이 갈수록 완만한 성장을 나타내며 일정 시간 후 안정상태로 접어들음을 알 수 있었다. Biofilm 의 성장에 따른 투수계수의 감소도 무시할 수 없는 정도로 나타났다.

5. 참고 문헌

1. Deb, A. K., "Theory of Sand Filtration", *J. Sanit. Eng. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 95(SA3), 399-422, 1969.
2. Speitel, G. E. and DiGiano, F. A., "Biofilm Shearing Under Dynamic Conditions", *J. Environ. Eng., Am. Soc. Civ. Eng.*, 113(3),464-475,1987.
3. Brooks, R. H. and Corey, A. T., "Hydraulic Properties of Porous Media", *Hydrol. Pap. 3, Colo. State Univ., Fort Collins*, 1964
4. Mualem, Y., "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media", *Water Resour. Res.*, 12(3), 513-522, 1976.

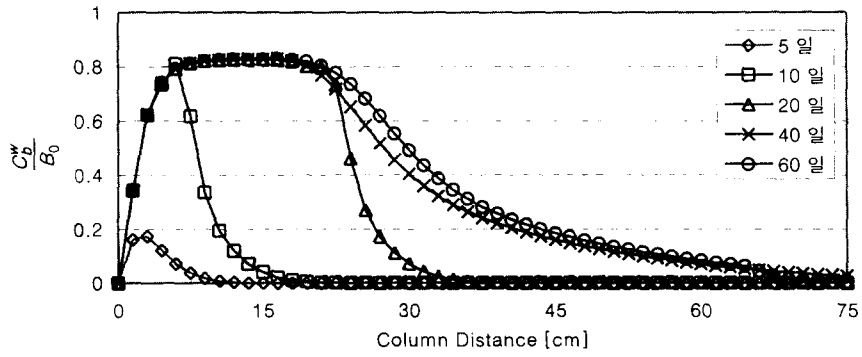


그림 1. 박테리아의 농도

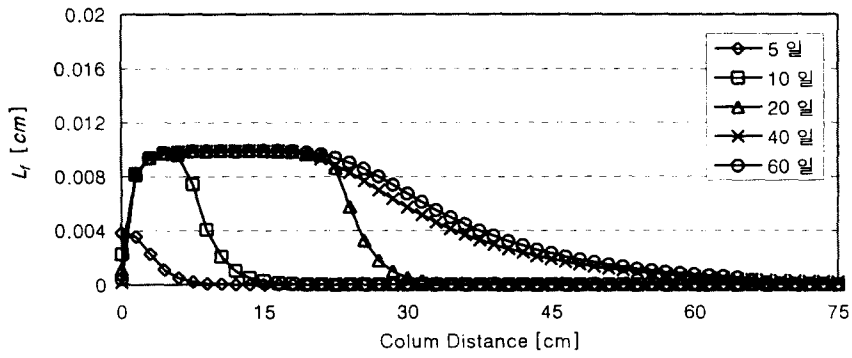


그림 2. biofilm 의 두께

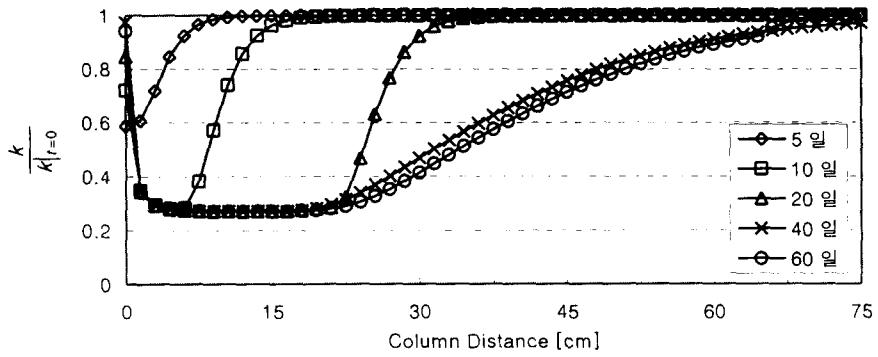


그림 3. 투수계수의 감소비