

1차원 현장 soil column 실험을 통한 SAT 반응 모델 검증

김정우, Jeongkon Kim*, 차우석, 최희철

광주과학기술원 물재이용기술센터 · *Department of Geological Sciences, The Ohio State University
e-mail: hcchoi@kjist.ac.kr

<요약문>

Soil Aquifer Treatment (SAT) is a technique in which secondary- or tertiary-treated wastewater is infiltrated through unsaturated soil and stored in the saturated zone. In SAT, contaminants are removed by physical and biochemical reactions taking place in soils. In this study, a numerical model was developed to predict changes in water quality during SAT operations. The contaminant species considered in the model were ammonium, nitrate, dissolved organic carbon, and dissolved oxygen. The model was calibrated against experimental data obtained from one dimensional soil column tests conducted for 84 days. The calibrated model will be used to find out optimum conditions for the pilot- and regional-scale SAT operations to be scheduled for the next phase of this project.

key word : Soil Aquifer Treatment, Reaction module, Modeling, Soil column test

1. 서론

토양/대수층 처리 (Soil Aquifer Treatment, SAT) 기술은 2차 또는 3차 처리 방류수를 포화 또는 불포화 대수층으로 침투시켜 대수층에서의 물리/생화학적 정화능력을 이용하여 고도 정화하는 기술로써 고갈되어가고 있는 지하수를 재충전하는 용수 재이용 기술이다. SAT 기술의 성능은 토양/대수층의 특성과 유입되는 방류수의 성분특성, 그리고 주입 및 건조 주기와 같은 운전 조건에 따라 결정된다. SAT의 현장 적용에 앞서 이러한 인자들에 의한 주변 지역의 지하수에 대한 영향을 예측하는 것은 SAT 현장 부지를 선정하는데 중요한 자료가 된다. 또한, 운전기간이 긴 SAT에 대해서 앞으로의 처리성능의 변화를 예측하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 SAT 운전에 의한 영향을 예측하고 지역적 토양 및 방류수 특성에 가장 적합한 SAT 운전 조건을 산출해 내기 위한 수치모델을 개발하였다. 실험실 규모의 1차원 불포화 칼럼 실험에서 획득한 3개월간의 데이터를 이용하여 본 모델의 반응상수를 도출하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 반응 모델

본 모델에서는 SAT에서 일어나는 주요 반응들 중 ammonium의 nitrification, nitrate의 denitrification,

그리고 dissolved organic carbon(DOC)의 oxidation이 고려하였다. 이러한 반응들은 용존산소에 의해 결정되는 미생물에 의한 생화학적 반응으로 다음과 같이 multiple Monod equation에 의해서 kinetic form으로 나타내었다.

$$\mu^p = k_{\max}^p X \left[\frac{C_1}{C_1 + K_1} \right] \left[\frac{C_2}{C_2 + K_2} \right] \dots \left[\frac{C_N}{C_N + K_N} \right] I_b^p(X) [I_{O_2}(C_{O_2}^w)]$$

여기서, μ^p 는 미생물 성장률, k_{\max}^p 는 최대 미생물 성장률이고, X는 미생물의 농도, CN은 물질 N의 농도, K_N 은 물질 N에 대한 Half-saturation constant, $I_b^p(X)$ 는 미생물에 의한 inhibition factor, 그리고 $I_{O_2}(C_{O_2}^w)$ 는 anoxic condition에 대한 용존산소의 inhibition factor이다.

2.2 칼럼 테스트

SAT 반응 모델의 검증을 위해 2차 처리된 하수처리장의 방류수를 원수로 사용하여 soil column test를 시행하였다. 칼럼 운전은 4일의 주입주기와 3일의 건조주기를 한 사이클로 하여 12사이클(84일)동안 하였다. 칼럼은 크기가 내경 11.3 cm, 길이 1 m로 불포화 대수층을 모사하였다. 원수 주입부에 head space를 둠으로써 고정수두를 유지하였다.

Fig. 1(a)는 날짜별로 원수의 성질을 나타낸 것이다. nitrate의 농도가 후반부에 많이 증가한 것을 볼 수 있다. Fig. 1(b)는 처리수의 유입율을 나타내었다. 포화대수층의 특성이 불포화대수층에서의 유입율에 미치는 영향을 고려하기 위하여, 유출부에서 약 0.43 m/day로 주기적으로 유입율을 조정하였다.

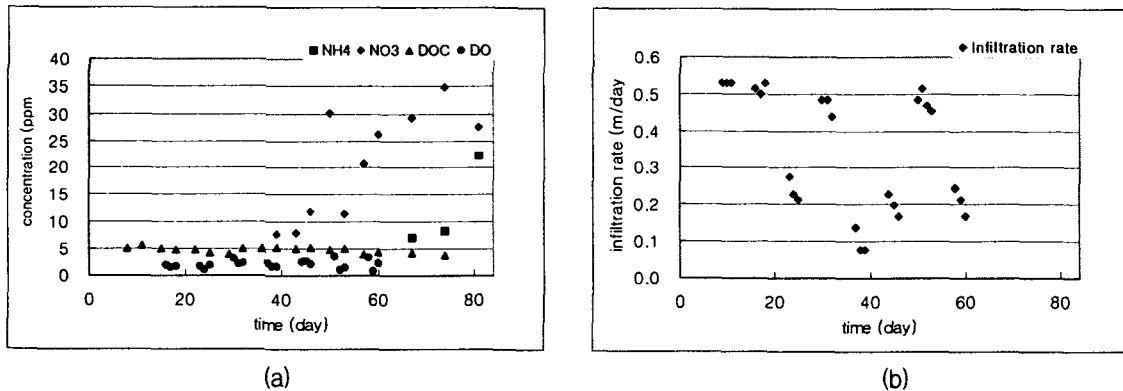


Fig. 1. (a) Characteristics and (b) infiltration rate of source water in soil column test

3. 결과

1차원 칼럼실험결과를 실험조건에 적절한 초기 및 경계조건을 적용하여 본 연구에서 개발한 모델을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 대수층의 초기조건은 전혀 오염되지 않은 상태로 포화도는 Fig. 2(a)에서 칼럼내 초기 포화도(0.234)와 첫 번째 주입 및 건조주기 말의 포화도 분포를 나타내었다. Fig. 2(b)에서는 칼럼 유입부와 유출부에서의 시간에 따른 포화도 변화를 나타내었다. Fig. 2에서 나타난 바와 같이 각 사이클마다 주입주기와 건조주기동안에 약 0.4정도의 포화도 변화가 있었다. 주입주기동안에도 칼럼이 완전히 포화되지 않은 것을 볼 수 있다.

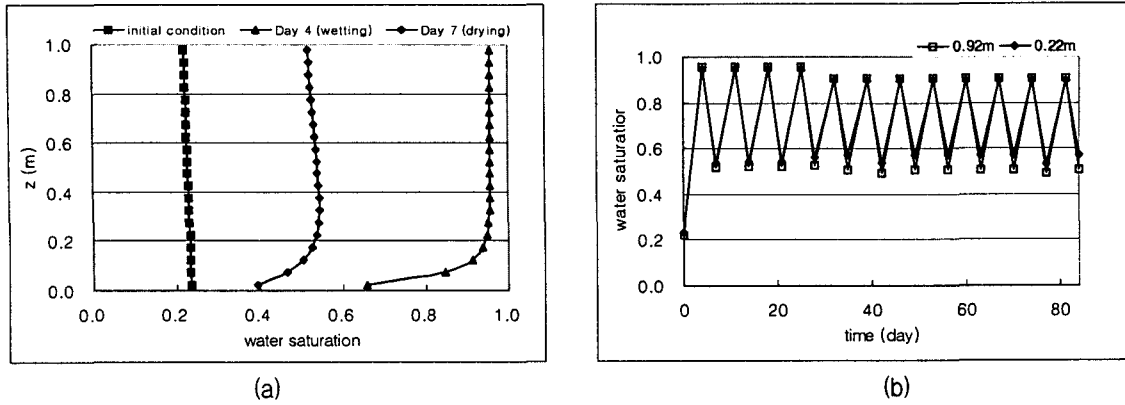


Fig. 2. Water saturation (a) profile along the column depth, and (b) time distribution at Layer 2 (0.92m from bottom) and Layer 16 (0.22m from bottom) in simulation

Fig. 3은 각 물질들의 칼럼 내 분포를 보여주고 있는데, 비교를 위하여 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 함께 나타내었다. 실험분석 오차 및 토양특성과 복잡한 생화학적 반응들을 고려할 때, 시뮬레이션결과와 실험결과가 만족할 정도로 유사한 것을 알 수 있다. 따라서 실험결과를 이용하여 결정한 본 모델 파라미터들은 현 실험조건에 적정하다고 사료된다.

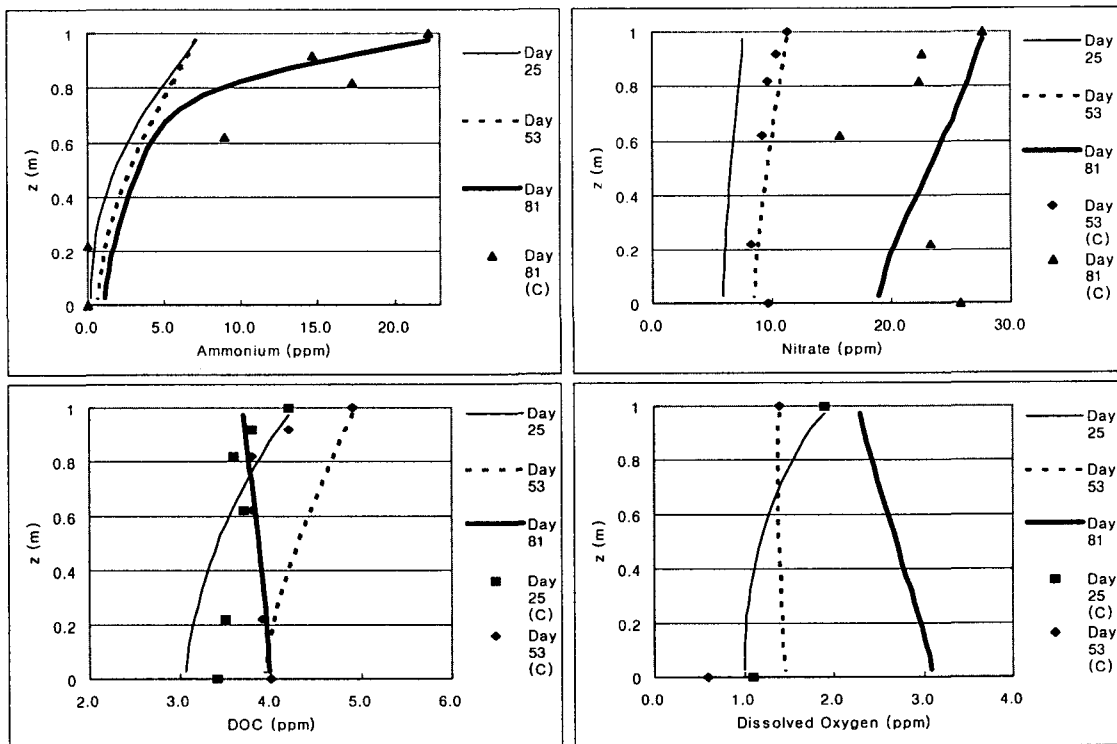


Fig. 3. Experimental concentration profiles (dots) for ammonium, nitrate, DOC, and dissolved oxygen comparing with simulation results (lines)

4. 결론

본 연구에서 개발한 모델에서는 SAT 운전에서 예측되는 주요 물질인 ammonium, nitrate, DOC, 그리고 용존산소의 거동에 반응을 multiple Monod equation에 의해서 나타내었다. 1차원 불포화 칼럼실험결

과를 이용하여 본 모델의 파라미터들을 결정하였다. 실험결과와 시뮬레이션한 결과의 유사성을 볼 때 본 연구에서 개발한 모델은 본 실험조건과 유사한 조건에서 시행될 예정인 파일럿 규모 및 실제 현장 규모의 최적 SAT 운전조건을 도출하는데 유용하게 사용되리라 예측된다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 '수자원의 지속적 확보기술개발 사업단'의 연구비 지원 (4-1-1)에 의해 수행되었습니다.

5. 참고문헌

1. Arizona State University; CSDLAC; University of Arizona; University of Colorado at Boulder; Stanford University, Investigation on Soil-Aquifer Treatment for sustainable water reuse, 2001 National Center for Sustainable Water Supply (NCSWS)
2. Kerry T.B. MacQuarrie Edward A. Sudicky, Multicomponent simulation of wastewater-derived nitrogen and carbon in shallow unconfined aquifers I. Model formulation and performance, Journal of Contaminant Hydrology, 47, 53-84 (2001)
3. M. Th. van Genuchten, A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898 (1980)