

# 토양/대수층 처리(Soil Aquifer Treatment)에서 유기물과 질소화합물 제거와 이송 모델링-(II) 현장조건의 변화에 따른 모델 결과

김정우<sup>1</sup> · 김정곤<sup>2</sup> · 이영준<sup>3</sup> · 최희철<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>광주과학기술원 환경공학과, <sup>2</sup>한국수자원공사 수자원연구원, 국립환경연구원, <sup>3</sup>광주과학기술원 물 연구센터

## Modeling Fate and Transport of Organic and Nitrogen Species in Soil Aquifer Treatment-(II) Simulations Based on the Field Conditions

Jung-Woo Kim<sup>1</sup> · Jeongkon Kim<sup>2</sup> · Young Joon Lee<sup>3</sup> · Heechul Choi<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology

<sup>2</sup>Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

<sup>3</sup>National Institute of Environmental Research

<sup>4</sup>Center for Water Research, Gwangju Institute of Science and Technology

### ABSTRACT

For the SAT modeling system considering the reaction module which consists of nitrification, denitrification and organic oxidation, an imaginary cross-sectional 2-dimensional model simulation was carried out to analyze the sensitivity of the model. Four parameters, such as hydraulic conductivity, source water loading rate, ground surface pavement and operation schedule, were considered for the sensitivity analysis. Most factors considered in model development step were well reflected in the simulation results.

**Key word:** Soil aquifer treatment, DOC, Nitrogen species, Modeling, Sensitivity

### 요 약 문

암모늄의 질산화 반응, 질소산화물의 탈질 반응, 그리고 유기물의 산화반응을 고려한 SAT 모델링 시스템에 대해서, 현장조건의 변화에 따른 모델 결과를 비교하기 위해 6가지 모델 조건에 대한 가상의 수직 2차원상 모델 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션 조건에서 수리전도도, 주입수 주입율, 지표 피복 여부, 그리고 운영 계획과 같은 4가지 영향 인자들이 고려되었다. 시뮬레이션 결과, 모든 조건에서 모델 개발 과정에서 고려한 반응 영향들이 잘 묘사되었다.

**주제어 :** 토양/대수층 처리, 유기물, 질소화합물, 모델링, 민감도

### 1. 서 론

토양/대수층 처리(Soil Aquifer Treatment, SAT)는 하수처리장으로부터의 2차 또는 3차 처리수를 대수층으로 침투시켜, 토양 매질에서 일어나는 물리적/생화학적 반응에 의해 재처리하는 용수 재이용 기술이다. SAT는 자연친화적인 기술로써 운영 면에서 다른 용수 재이용

기술에 비해 경제적이고, 재처리된 물이 지하 대수층에 저장됨으로써 용수의 저장과 이송에 대해서도 장점을 가지고 있어 물 부족을 겪고 있는 여러 나라에서 연구되어 왔다(Kanarek and Michail, 1996; van Riper and Geselbracht, 1999; Nema et al., 2001; Fox et al., 2001; NCSWS, 2001). SAT 처리 효율에 영향을 주는 인자로는 1) 하수처리장 방류수의 수질 특성, 2)

\*Corresponding author : hcchoi@gist.ac.kr

원고접수일 : 2004. 2. 23 게재승인일 : 2005. 3. 9

질의 및 토의 : 2005. 10. 31 까지

토양/대수층의 수리학적 특성, 3) 주입주기와 건조주기로 이루어지는 SAT 운영 계획 등이 있다. 이러한 인자들로부터 야기되는 SAT에서의 주요 관심대상은 유기물과 질소화합물의 제거와 이동에 있다(NCSWS, 2001). Tang et al. (1996)이 이미 SAT 최적 운전조건에 관한 모델링 연구를 하였지만, 1차원에 그쳤고, 불포화 대수층과 포화 대수층의 영향을 함께 볼 수 있는 2차원 상에서의 SAT 모델링 연구는 전무한 상태다. 수직 2차원 도메인을 통하여 불포화 대수층에서의 수직 이동뿐만 아니라 포화 대수층에서의 수평 이동에의 영향을 함께 볼 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 이전 연구에서의 1차원 모델 적용을 2차원으로 확장시키면서 앞에서 언급한 영향 인자들이 SAT 모델 결과에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. 그리고, 고려된 영향 인자로, 수리전도도, 주입수 주입율, 지표 피복 여부, 그리고 주입주

기와 건조주기로 이루어지는 운영계획에 따른 민감도 분석을 하였다.

## 2. 실험방법 (시뮬레이션 조건)

개발된 SAT 반응 모델의 민감도 분석을 위해서, Fig. 1과 같은 가상의 수직 2차원(가로 50 m×세로 10 m) 도메인 상에서 모델 시뮬레이션이 이루어졌다. 도메인은 가로축으로 기본적으로 1 m씩 격자화 하였는데, 주요 관심 지역이라고 할 수 있는, 도메인상 왼쪽으로부터 13.5 m 떨어져 있는 원수의 주입지역에서는 격자를 0.25~0.75 m로 세분화 하였다. 세로축으로는 기본적으로 0.5 m로 격자화 하였는데 대부분의 주요반응들이 일어나는 지표로부터 1 m 이내 부분은 0.1~0.4 m로 세분화 하였다. 지하수면의 위치는 평균적으로 도메인 아래로부터 5.0 m에 위치하였고, 경사도는 4%를 주어 도메인 왼쪽으로부터 오른쪽으로 지하수 흐름을 유도하였다. 경계조건 (boundary condition)으로 도메인 좌, 우측으로는 고정수두(constant head)로 가정하여 정상상태의 지하수 흐름을 유지하였다. 도메인 하단부는 투수계수가 무시할 만큼 작은 암반층이라는 가정하에 no-flow로 가정하였고, 도메인의 상단부는 대기층과 연결된 지표면으로 recharge조건을 부여하였으며, 지표면이 불투수층인 경우에는 recharge = 0으로 나타내었다. 시뮬레이션 초기조건과 주입수의 특성은 Table 1에 나타내었다.

여러 가지 시뮬레이션 조건에 대한 본 모델의 민감도를 분석하기 위해서 Table 2와 같이 6가지의 서로 다른 시뮬레이션 조건에 대해서 결과를 비교하였다. Case I을 기준으로 하여 Case II와 III에서는 수리전도도의 영향을, Case IV에서는 주입수 주입률의 영향을, 그리고 Case VI에서는 주입/건조 주기의 변화에 의한 영향을 보고자 하였다. 특히, Case V에서는 실제 현장 운영에서 SAT basin 주변에 있을 수 있는 아스팔트와 같은 지표 피복의 영향을 고려한 조건이다. 피복이 있을 때와 없을 때, 두 가지로 구분하여, 피복이 없을 때는 basin의 조건과 동일

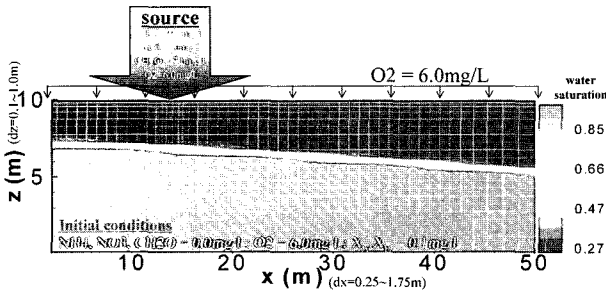


Fig. 1. An imaginary cross-sectional two-dimensional domain grid for SAT model simulation.

Table 1. The initial conditions and source water characteristics

Species	Initial value	Source value
$NH_4^+$	0.0 mg/L	10.0 mg/L
$NO_3^-$	0.0 mg/L	1.0 mg/L
$CH_2O$	0.0 mg/L	17.0 mg/L
$O_2$	6.0 mg/L	6.0 mg/L
$X_A$	0.1 mg/L	-
$X_H$	0.1 mg/L	-

Table 2. The conditions of each 6 different cases for sensitivity analysis based on the 4 parameters

	$K_h$	Recharge rate	Ground condition	Operation schedule
Case I	5.0 m/day	1.0 m/day	no coverage	7 days wetting / 7 days drying
Case II	10.0 m/day	1.0 m/day	no coverage	7 days wetting / 7 days drying
Case III	1.08 m/day	1.0 m/day	no coverage	7 days wetting / 7 days drying
Case IV	5.0 m/day	2.0 m/day	no coverage	7 days wetting / 7 days drying
Case V	5.0 m/day	1.0 m/day	coverage	7 days wetting / 7 days drying
Case VI	5.0 m/day	1.0 m/day	no coverage	3 days wetting / 7 days drying

하게 지속적인 산소의 공급이 이루어진다고 가정하였고, 피복이 있을 때는 산소의 공급이 완전히 차단된다고 가정하였다.

토양 특성으로는 van Genuchten(1980)의 Hygiene sandstone의 토양 특성이 사용되었다. 지하수 이송과 반응에 대한 상수는 MacQuarrie and Sudicky(2001)가 사용한 상수들을 인용하였다. 모델 운영 계획으로 주입주기와 뒤따르는 건조주기를 하나의 싸이클로 하였는데, 이를 고려하기 위하여 대수층 조건을 가변 포화 대수층으로 가정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

6가지의 각 시뮬레이션 조건에 대해서 주입주기와 건조

주기를 포함하여 총 140일간의 모델 시뮬레이션을 하였다. 이에 대한 50일째와 140일째의 결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 나타내었다.

#### 3.1. Case I (control 조건)

Case I은 다른 시뮬레이션 조건의 결과와 비교하기 위한 대조표준(control) 조건으로 하였다. 포화도 분포에서, 지하수위가 모세관 현상(capillarity)으로 인해 약 1 m 상승되었다. 포화도 분포가 건조주기 초기(50일째)와 건조주기 말기(140일째)를 잘 반영하고 있다. 50일째, 주입 지역 바로 아래 지역에서 약간의 암모늄 농도가 나타나는데, 이는 그 지역에서 질산화 반응과 유기물 산화반응에 의한 용존산소의 결핍에 의해 암모늄의 질산화 반응이 완전히 일어나지 못했음을 의미한다. 또한, 용존산소의 결핍으로 인

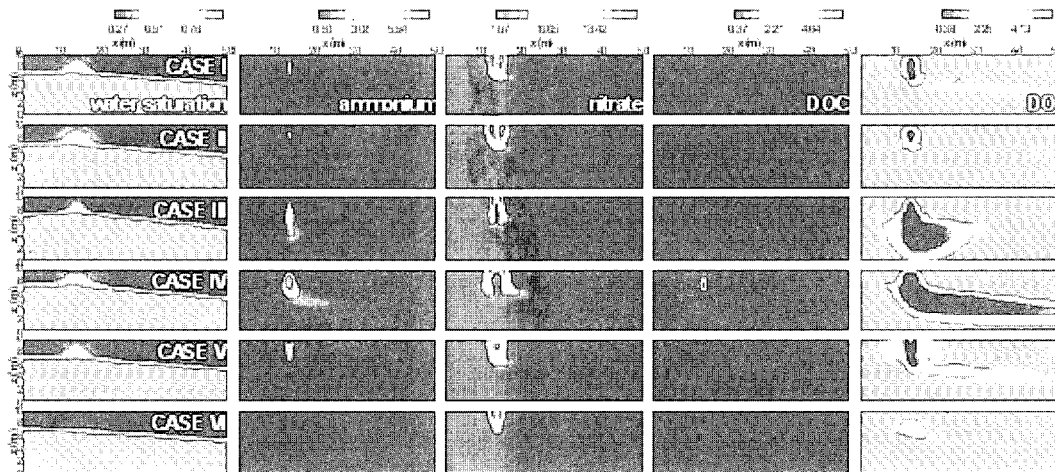


Fig. 2. Distributions of water saturation and ammonium, nitrate, DOC and DO concentrations at 50th day for each simulation conditions.

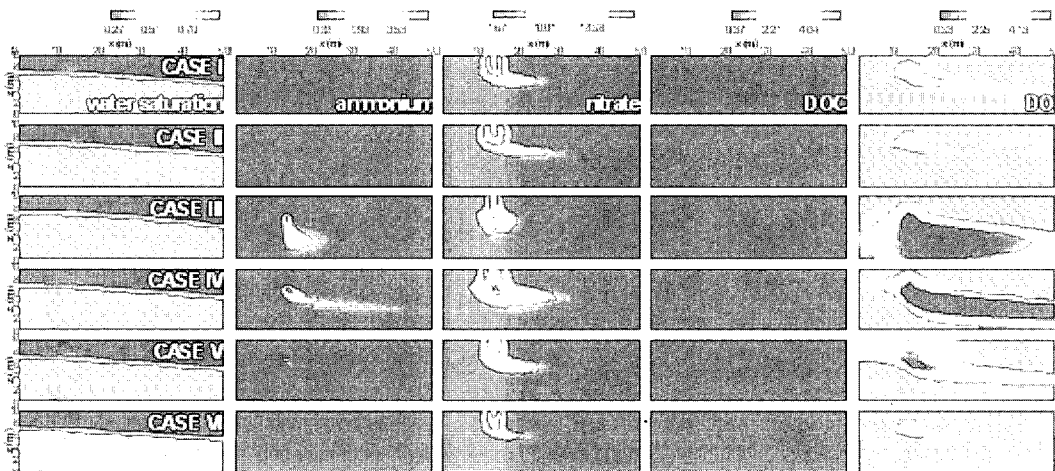


Fig. 3. Distributions of water saturation and ammonium, nitrate, DOC and DO concentrations at 140th day for each simulation conditions.

한 질산화 반응의 제약과 DOC가 용존산소 대신에 질소 산화물을 전자수용체로 사용하는 탈질화 반응의 증가는 주입 지역 바로 아래 지역에서 상대적으로 질소 산화물의 농도를 감소시키는 원인이다. 이로 인해 질산화 반응에 의해 생성되는 질소 산화물 분포의 가운데 부분에서 그 농도가 상대적으로 적게 나타났다. DOC는 호기성 상태에서 용존산소가 전자수용체 역할을 하는 산화반응을, 무산소 상태에서는 질소 산화물이 전자수용체 역할을 하는 탈질화반응을 통해서 거의 완전히 제거가 되었다. 용존산소의 결핍이 주입지역 아래에서 나타났고, 아래의 지하수 흐름과 만나면서 그 영향이 지하수 흐름 방향으로 전달되고 있음을 볼 수 있다. 140일째에서, 암모늄은 건조주기 동안 추가되는 산소에 의해서 거의 완전히 제거가 되었다. 이는 용존산소의 농도가 7일의 건조주기 동안 완전히 회복되지는 않았지만, 지표로부터 차츰 증가하고 있는 것으로부터 알 수 있다. 이러한 상대적인 산소농도의 증가와 DOC의 결핍은 더 이상의 질소산화물의 제거를 나타내지 않았다.

### 3.2. 조건별 비교

50일째의 포화도 분포에서 수리전도도가 증가했을 때와 주입수의 주입율이 증가했을 때 포화도 분포가 넓게 나타났다. 토양의 피복상태는 포화도 분포에 영향을 주지 못했다. Case VI의 경우는 50일째가 건조주기의 말기이므로 결과가 140일째의 그것과 일치한다.

Case II에서, 상대적으로 높은 수리전도도에 의한 영향으로 주입지역 아래에서 주입수의 분포가 더 넓게 나타났다. 주입수의 낮은 분포로 암모늄의 농도가 줄었고, 이는 높은 질소산화물의 농도를 초래했다. DOC 농도는 Case I과 같이 모두 제거되었다. 상대적으로 높은 수리전도도는 포화 대수층에서 용존산소의 결핍 지역을 빠르게 회복시켰다. 140일째에서는, Case I과 같이 암모늄과 DOC 모두 완전한 제거를 보여주었다. 7일의 건조주기동안 암모늄과 DOC의 결핍으로 질소산화물의 농도 변화가 거의 일어나지 않았다. 용존산소의 경우, 133일째의 결과와 마찬가지로, 높은 수리전도도에 의한 포화 대수층에서의 빠른 지하수 흐름이 새로운 용존산소를 빠르게 공급함으로써 용존산소 결핍지역의 빠른 회복을 초래했다. 하지만, 지하수 흐름이 없는 불포화 대수층에서는 그 결과가 Case I의 결과와 비슷하다.

Case III의 상대적으로 낮은 수리전도도는 주입수의 포화도 분포가 넓게 퍼지지 않고, 좁게 집중되도록 하였다. 이는 주입되는 암모늄의 분포를 좁게 하여 주변의 용존산

소와 산화반응을 일으킬 기회를 작게 한다. 이로 인해 암모늄은 불포화대수층에서 완전히 제거되지 않고 포화대수층까지 농도가 나타났고, Case I에서는 나타나지 않았던 DOC 농도가 주입지역 아래에서 나타났다. 용존산소의 부족은 질산화반응과 DOC 산화반응을 감소시키고, 탈질화반응을 증가시킴으로써 질소산화물의 농도는 Case I에 비해서 감소하였고 그 분포는 더 넓어졌다. 포화대수층에서의 낮은 수리전도도는 용존산소의 분포에서 용존산소의 소모가 기존 지하수 흐름으로부터의 새로운 용존산소의 공급보다 우세하여 용존산소의 결핍지역이 지하수 흐름의 역방향으로까지 넓게 분포되었다. 건조주기 말기인 140일째에서도 포화대수층에서는 용존산소의 회복이 크게 나타나지 않았고, 단지 불포화대수층인 주입지역 아래 지역에서 부분적으로 회복이 이루어졌다. 이러한 결과는 불포화대수층에서의 암모늄 농도가 용존산소의 결핍이 회복되지 않은 포화대수층까지 전달되도록 하였다.

Case IV에서는 높은 주입율로 인해 불포화대수층에서 주입수의 포화도 분포가 더 높고, 넓게 나타났다. 주입지역 아래의 포화대수층의 지하수위도 Case I과 비교하여 올라갔다. 높은 주입율로 인해 암모늄과 DOC의 완전한 제거는 이루어지지 않았다. 이러한 DOC의 존재는 용존산소와 질소산화물의 완전한 소모로 인한 것이라 할 수 있다. 이는 암모늄과 DOC의 농도가 나타난 부분이 질소산화물과 용존산소 농도가 나타나지 않은 부분과 일치하는 것에서 알 수 있다. 질소산화물은 Case I과 비교하여 농도는 낮아졌지만 분포는 넓어졌다. 암모늄과 DOC의 증가는 많은 양의 용존산소 소모를 초래하였고, 이는 포화대수층에서도 쉽게 회복되지 않았다. 건조주기 말기에 불포화대수층의 암모늄은 제거가 되거나 포화대수층으로 전달이 되었지만 포화대수층에서는 용존산소 결핍지역의 회복이 크게 일어나지 않아 암모늄의 농도가 나타나는 것을 볼 수 있다.

Case V의 지표 피복은 대기로부터의 산소공급을 차단하였기 때문에 용존산소 결핍지역의 분포가 불포화대수층에서 매우 넓게 분포됐다. 따라서 암모늄의 제거가 상대적으로 잘 일어나지 않았고, 질소산화물의 농도가 상대적으로 줄었다. 또한, 질소산화물의 농도 저하는 DOC의 완전한 제거가 용존산소에 의한 산화반응에 의한 것이라기보다 질소산화물에 의한 탈질화반응에 의한 것임을 보여준다.

Case VI의 주입주기의 감소는 용존산소 결핍지역과 암모늄 분포가 넓게 나타나지 않게 했다. 이로 인해 질소산화물의 농도는 좁은 지역에서 높게 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 개발된 SAT 반응모델에 대한 2차원 시뮬레이션을 통해 현장조건의 변화에 따른 결과를 비교 하였다. 이를 위해, 수리전도도, 주입수 주입율, 지표 피복 여부, 그리고 운영 계획을 비교 요소로 하여 총 6가지의 시뮬레이션 조건에 대해서 그 결과를 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 모든 조건에서 모델 개발 과정에서 고려한 반응 영향들이 잘 묘사되었다. 수리전도도의 변화는 특히 포화대수층에서 새로운 용존산소 공급을 조절하므로써 다른 물질들의 분포에 변화를 주었다. 주입수 주입율의 증가는 넓은 용존산소 결핍지역을 유발하였고, 상대적으로 암모늄과 DOC 농도를 높게 하였다. 지표를 피복시킨 조건은 불포화대수층에서 용존산소의 분포에 큰 영향을 주었다. 주입주기를 3일로 줄인 조건에서는 변화가 상대적으로 크게 나타나지 않았다. 전체적으로 수리전도도가 낮은 경우와 주입수 주입율이 높은 경우를 제외하고는 모든 경우에서 암모늄과 DOC의 제거가 완전히 일어났다. 하지만 질소화합물은 분포는 다르지만 모든 경우에서 높게 나타나 포화대수층까지 영향을 미쳤다. 이는 SAT 운전에서 질소화합물 제거를 위한 후처리의 필요성을 야기한다. 본 연구의 SAT 운전조건의 변화에 대한 민감도 분석을 통해, 앞으로 시행될 파일럿 규모 및 실제 현장 규모의 최적 SAT 운전조건을 도출할 수 있으리라 예측된다.

#### 사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술사업단의 지원(과제번호 4-1-1)을 받는 광주

과학기술원 물 연구센터 연구비에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- Fox, P., Narayanaswamy, K., Genz, A., and Drewes, J.E., 2001, Water quality transformation during Soil Aquifer Treatment at the Mesa Northwest Water Reclamation Plant, USA, *Water Sci. Technol.*, **43**(10), 343-350.
- Kanarek, A. and Michail, M., 1996, Groundwater recharge with municipal effluent: Dan region reclamation project, Israel, *Water Sci. Technol.*, **34**(11), 227-233.
- MacQuarrie, K.T.B. and Sudicky, E.A., 2001, Multicomponent simulation of wastewater-derived nitrogen and carbon in shallow unconfined aquifers I. Model formulation and performance, *J. Contam. Hydrol.*, **47**, 53-84.
- National Center for Sustainable Water Supply (NCSWS), 2001, Investigation on Soil-Aquifer Treatment for sustainable water reuse, Arizona State University, Tempe, Arizona, U.S.A.. [Research Project Summary]
- Nema, P., Ojha, C.S.P., Kumar, A., and Khanna, P., 2001, Techno-economic evaluation of soil-aquifer treatment using primary effluent at Ahmedabad, India, *Water Res.*, **35**(9), 2179-2190.
- Tang, Z., Li, G., Mays, L.W., and Fox, P., 1996, Development of methodology for the optimal operation of soil aquifer treatment systems, *Water Sci. Technol.*, **33**(10-11), 433-442.
- van Genuchten, M.Th., 1980, A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, 892-898.
- van Riper, C. and Geselbracht, J., 1999, Water reclamation and reuse, *Water Environ. Res.*, **71**(5), 720-728.