

## 얕은 불포화 및 포화 대수층을 모사한 SAT 토양칼럼에서의 하수처리장 방류수 처리 수질 변화

차우석<sup>1\*</sup> · 김정우<sup>2</sup> · 최희철<sup>1</sup> · 원종호<sup>2</sup> · 김인수<sup>1</sup> · 조재원<sup>1</sup>

<sup>1</sup>광주과학기술원 물 재이용 기술 센터, <sup>2</sup>광주과학기술원 환경공학과

## Water Quality Changes in Wastewater Effluent from the Unsaturated and Saturated Soil Aquifer Treatment(SAT) Columns Simulating Shallow Aquifer

Woosuk Cha<sup>1\*</sup> · Jungwoo Kim<sup>2</sup> · Heechul Choi<sup>1</sup> · Jongho Won<sup>2</sup> · In Soo Kim<sup>1</sup> · Jaeweon Cho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Water Reuse Technology Center (WRTC), Gwangju Institute of Science and Technology (GIST)

<sup>2</sup>Department of Environmental Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST)

### ABSTRACT

Water quality changes of wastewater effluent in the shallow aquifer condition was investigated using laboratory unsaturated and saturated SAT columns for over five months. Average DOC removal was 31.9% in the unsaturated SAT column whereas no removal occurred in the saturated SAT column. Under the shallow aquifer condition, nitrification was not completed in the unsaturated SAT column, releasing residual ammonium nitrogen into the saturated SAT column. Short retention time (one day) in the shallow unsaturated SAT column rendered DO of about 2 mg/L to the influent of the saturated SAT column. Phosphate was not removed at all in the unsaturated SAT column while complete removal was achieved in the saturated column. Consequently, organic and inorganic compounds were removed under the shallow aquifer condition as effectively as was in deep aquifer, except for the release of ammonium and relatively high DO into the saturated SAT column.

**Key word** : Soil aquifer treatment (SAT), Wastewater effluent, Organics, Nitrogen, Phosphate, Water reuse

### 요 약 문

본 연구에서는 얕은 불포화 및 포화 대수층을 모사한 실험실 규모의 SAT 토양 칼럼을 약 5개월간 운전하면서 얕은 대수층 조건에서 하수처리장 방류수의 처리수질 변화를 알아보려고 하였다. 유기물 (DOC)의 평균 제거율은 불포화 (unsaturated SAT) 칼럼의 경우 31.9%로 높게 나타난 반면, 포화(saturated SAT) 칼럼에서는 DOC가 거의 제거되지 않았다. 얕은 대수층 조건을 모사한 불포화 토양 칼럼에서의 질산화는 충분하지 않은 것으로 나타났으며 잔류 암모니아가 포화대수층으로 유입되었다. 또한 얕은 불포화 칼럼에서의 짧은 체류시간(1 day)으로 인해 포화 칼럼 유입수의 DO가 약 2 mg/L를 유지했다. 인 (phosphate)은 불포화 칼럼에서는 제거되지 않고 그대로 유출되는 특성을 보였고, 포화 칼럼에서는 100% 제거되는 특성을 보였다. 결론적으로, 암모니아성 질소가 포화층으로 유입되고, 포화층 유입수의 DO가 상대적으로 높다는 점을 제외하면 얕은 대수층 조건에서도 유기물 및 질소, 인의 제거가 충분하게 일어남을 알 수 있었다.

**주제어** : 토양대수층 처리 (SAT), 유기물, 질소, 인, 방류수, 재이용

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

원고접수일 : 2004. 4. 26 게재승인일 : 2005. 7. 13

질의 및 토의 : 2005. 4. 26 까지

### 1. 서 론

수자원이 부족한 지역에서 하수처리장 방류수는 대체 수자원으로 이용되고 있으며 이를 위한 재이용 기술 중에 토양 대수층 처리 (SAT, soil aquifer treatment) 기술이 있다. SAT는 주입조(recharge basin)로 유입된 방류수를 불포화 (unsaturated vadose zone) 및 포화 (saturated zone) 대수층을 통하여 처리하고 저장하고 재이용하는 자연친화적인 공정으로, 미국 등 건조기후 지역에서 실규모로 개발되고 운전되어 왔다(Idlelovitch and Michail, 1984). 이러한 지역에서는 대개 대수층의 깊이가 15-30 m에 이르는 깊은 불포화 대수층을 가지고 있어서 불포화 대수층을 활용한 처리가 활발하게 일어난다(Amy et al., 1993; Drewes and Fox, 1999a). 그러나, 한국의 경우는 불포화 대수층의 깊이가 대체적으로 얕아(1-6 m) SAT가 적용될 경우 불포화 대수층에 채류하는 시간이 짧게 되고 바로 포화 대수층으로 방류수가 유입되기 때문에 기존에 SAT가 적용된 환경에서와는 다른 제거 특성을 나타낼 수 있다.

따라서, SAT 공정을 한국의 토양/대수층 환경에 적용하기 위해서는 이러한 얕은 대수층 조건에서의 SAT에 의한 하수처리장 방류수의 처리 특성을 조사하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 얕은 대수층 조건을 모사하는 토양 칼럼을 불포화 및 포화 조건으로 제작하였으며 포화 대수층 (saturated SAT) 칼럼의 유입수를 불포화 대수층 (unsaturated SAT) 칼럼의 유출수로 사용함으로써 불포화 및 포화 칼럼이 연속적으로 연계되도록 하였다.

### 2. 실험방법

#### 2.1. 방류수

방류수는 광주하수처리장 2차 처리수를 사용하였다. 광주하수처리장은 활성슬러지공법을 사용하며 하루 60만 톤을 처리할 수 있는 설비를 갖추고 있다. 2차 침전지에서 배출되는 방류수는 평균적으로 DOC (dissolved organic carbon) 4.7 mg/L, 총질소 (total nitrogen) 24.9 mg/L, 인 (phosphate,  $PO_4^{3-}$ ) 3.7 mg/L의 수질 특성을 보였다. 방류수는 매주 1회 샘플링하여 불포화 (unsaturated SAT) 칼럼의 유입수로 사용하였다.

#### 2.2. 토양 칼럼

불포화 및 포화 대수층을 모사하기 위해 두 종류의 칼럼을 제작하였다(Fig. 1). 먼저 불포화 (unsaturated SAT) 칼럼은 길이 1.3 m(headspace 포함), 내경 11 cm의 아

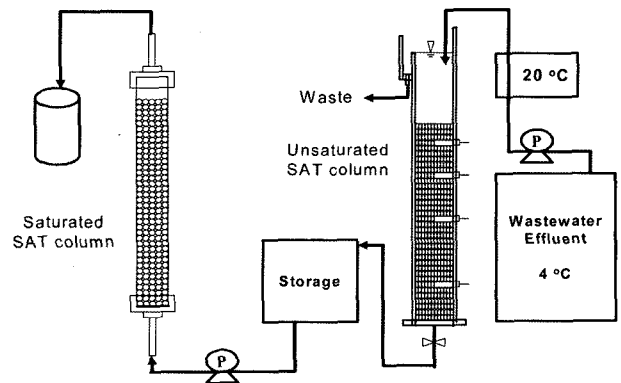


Fig. 1. Schematic diagram of unsaturated and saturated SAT columns.

Table 1. Characteristics of the column soils

Variables	Unsaturated SAT	Saturated SAT
Source	Yeongsan River, Korea	
Soil type	Sand	
Soil classification <sup>a</sup>	SP (poorly graded sand)	
Dry bulk density	1.51 g/cm <sup>3</sup>	1.08 g/cm <sup>3</sup>
Porosity	0.34	0.49
Total organic content	0.49 % (w/w)	

<sup>a</sup> Unified soil classification (ASTM-D2487)

크릴로 30 cm의 headspace를 갖도록 제작하였으며 불포화 대수층을 모사하기 위해 하향식 흐름으로 방류수를 주입하였다. 또한 불포화 칼럼은 SAT의 주입-건조 주기를 적용하여 4일 주입 후 3일 건조하는 방식으로 운전하였다. 한편, 포화 (saturated SAT) 칼럼은 길이 50 cm, 내경 5 cm인 유리칼럼으로 제작하였으며 포화 대수층을 모사하기 위해 상향식 흐름으로 유입수를 주입하였다.

토양은 영산강 하상에서 채취한 후 체로 분리한 다음 각 칼럼에 충전하였으며 불포화 (unsaturated SAT) 칼럼에는 입경 2 mm 이하의 토양을, 포화 (saturated SAT) 칼럼에는 입경이 106-300 μm인 토양을 사용하였다. 두 가지 토양 칼럼의 물리화학적 특성을 Table 1에 나타내었다. 최초 토양의 유기물 함량은 0.49% (w/w)이었다.

불포화 (unsaturated SAT) 칼럼의 유입수는 광주하수처리장 2차 침전지의 방류수를 사용하였으며 불포화 칼럼을 통과하여 유출된 처리수를 포화 (saturated SAT) 칼럼의 유입수로 사용하였다. 불포화 칼럼에서는 3 mL/min의 유속으로 방류수가 주입되었고 포화 칼럼에서는 8 mL/hr의 유속으로 불포화 칼럼 처리수가 주입되었다. 각 칼럼에서의 수리학적 특성은 실제 현장에서의 조건에 가깝게 설정하였으며 이를 Table 2에 정리하였다.

**Table 2.** Hydraulic properties of unsaturated and saturated SAT columns

Columns	Volumetric discharge, Q (cm <sup>3</sup> /d)	Effective porosity, n <sub>e</sub> <sup>1)</sup>	Hydraulic gradient, dh/dl	Cross-sectional area, A(cm <sup>2</sup> )	Hydraulic conductivity, K(cm/d) <sup>2)</sup>	Average linear velocity, v(cm/d) <sup>3)</sup>	Retention time(day) <sup>4)</sup>
Unsaturated SAT	4,320	0.34	1.3	95.0	35.0	133.8	1.0
Saturated SAT	192	0.49	1.0	19.6	9.8	20.0	2.5

<sup>1)</sup> assumed n<sub>e</sub> = n, <sup>2)</sup> calculated using Darcy's law:  $Q = -KA dh/dl$

<sup>3)</sup> calculated from advection flow equation:  $v = (K/n_e)(dh/dl)$

<sup>4)</sup> calculated from linear velocity and column height (including headspace)

### 2.3. 분석방법

모든 샘플은 초순수로 미리 세척한 0.45 μm필터로 부유 물질을 분리한 후에 측정하였다. UVA(ultra-violet absorbance)는 Shimadzu UV mini 1240 UV-VIS spectrometer를 이용하여 254 nm 파장에서 측정하였다. DOC는 PPM LabTOC를 이용하여 분석하였으며 ammonium, nitrite, nitrate, phosphate 등은 Dionex DX-500 Ion Chromatography를 이용하여 분석하였다.

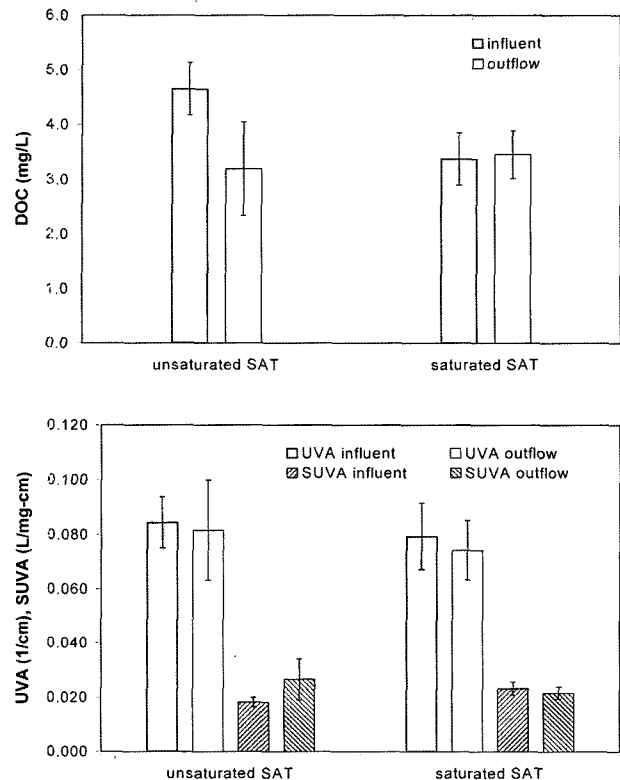
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 유기화합물

#### 3.1.1. DOC (dissolved organic carbon)

두개의 칼럼을 실험실에서 5개월 이상 운전하여 얇은 대수층 조건을 갖는 불포화 및 포화 칼럼에서의 DOC의 장기적인 변화를 관찰하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 유기물 (DOC)의 평균 제거율은 불포화 (unsaturated SAT) 칼럼의 경우 31.9%로 나타났는데 이는 얇은 불포화 대수층 깊이에서도 깊은 불포화 대수층에서와 유사한 유기물 제거율을 얻을 수 있음을 보여준다. 그러나 불포화 칼럼에서와는 달리, 포화 (saturated SAT) 칼럼에서는 DOC의 제거가 거의 일어나지 않았는데 이는 불포화 (unsaturated SAT) 칼럼의 유출수를 포화 (saturated SAT) 칼럼의 유입수로 사용한 것에 기인하는 것으로 보인다. 다시 말해, 불포화 칼럼에서 대부분의 분해성 유기물이 제거된 후에 잔류한 난분해성 유기물이 포화 (saturated SAT) 칼럼의 유입수로 사용되면서 나타나는 현상으로 보인다.

포화 (saturated SAT) 칼럼에서의 이러한 유기물 제거 특성은 Drewes and Fox(1999a)의 연구 결과와 상충하는 것처럼 보인다. 그러나 본 실험이 불포화 (unsaturated SAT) 칼럼의 처리수를 포화(saturated SAT) 칼럼의 유입수로 사용한 반면, Drewes and Fox(1999a)는 하수처리장의 3차 처리수를 직접 무산소 포화 SAT 칼럼으로 주입한 점에 차이가 있다. 또한, 체류시간에 있어서도 본 실험



**Fig. 2.** Changes in organic characteristics in unsaturated and saturated SAT columns.

이 50 cm의 칼럼에서 2.5일의 체류시간을 갖는 반면 Drewes and Fox(1999a)의 실험에서는 총 4 m의 칼럼에서 21일의 체류시간을 적용하였음을 고려하여야 한다. 한편, Drewes and Fox(1999a)의 연구에서 나타난 현장 실험 결과들은 깊이 20 m의 포화 대수층에서 유기물의 제거가 거의 일어나지 않은 것을 보여주는데, 이는 본 실험의 포화 (saturated SAT) 칼럼에서의 유기물 제거 특성과 부합하는 결과이며, 또한 얇은 포화 대수층과 깊은 포화 대수층 모두에서 유기물의 제거가 잘 일어나지 않음을 보여주는 것이다.

따라서, 얇은 대수층 조건을 갖는 불포화 및 포화 칼럼에서의 이러한 유기물의 제거특성은, 얇은 대수층 조건에

서도 불포화 대수층을 통한 유기물의 활발한 제거가 일어날 수 있으며, 포화 대수층에서는 포화 대수층의 깊이와 상관없이 유기물의 제거가 거의 일어나지 않음을 보여준다.

3.1.2. UVA (UV absorbance)

UVA-254는 254 nm 파장에서의 UV absorbance 값으로, 유기물의 방향성(aromaticity)을 나타내며 일반적으로 소수성이고 생물학적으로 분해되기 어려운 물질로 알려져 있다(Drewes and Fox, 1999a; Quanrud et al., 1996). 본 실험에서 UVA-254의 제거는, 불포화 (unsaturated SAT) 칼럼에서 2.4%, 포화 (saturated SAT) 칼럼에서 6.8%의 평균 제거율을 보였다(Fig. 2). 이는 불포화 칼럼에서의 평균 DOC 제거율에 비해 매우 낮은 제거율이며, 반면 포화 칼럼의 DOC 제거율에 비해서는 높은 제거율이다. DOC의 제거가 거의 일어나지 않은 포화 (saturated SAT) 칼럼에서 상대적으로 높은 UVA-254 제거 특성이 나타난 것은, 방류수가 불포화 및 포화 칼럼을 통과하면서 발생하는 유기물의 특성 변화에 기인하는 것으로 보인다.

Fig. 3은 하수처리장 방류수와 불포화 및 포화 칼럼 처리수에서의 DOC와 UVA-254의 상관관계를 나타낸 것이다. 비록 각각의 상관도 (R<sup>2</sup>)가 낮기는 하지만 불포화 및 포화 칼럼을 통과하면서 유기물의 특성이 어떻게 변해가는지를 볼 수 있다. 여기서, 하수처리장 방류수가 불포화 (unsaturated SAT) 칼럼을 통과하면서 같은 양의 DOC 농도당 UVA-254가 높아지는 것을 알 수 있는데, 이는 약 30%의 DOC 제거에도 UVA-254는 거의 제거되지 않은 Fig. 2의 결과와 관련이 있으며 불포화 칼럼을 통해 난분해성 방향성 유기물의 비율이 증가하고 있음을 보여준다. 한편, 포화(saturated SAT) 칼럼을 통과하면서 DOC 농도당 UVA-254가 낮아지는 특성을 보이는데 이는

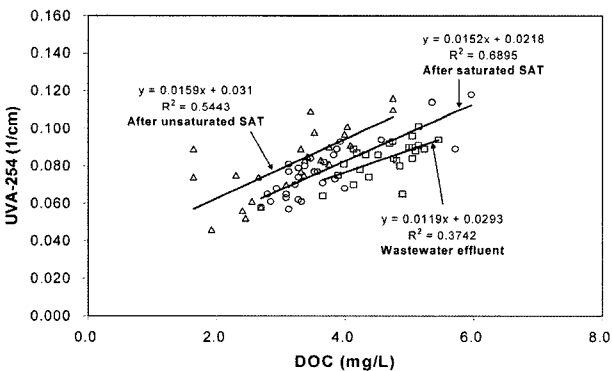


Fig. 3. Relations between UVA-254 and DOC through the unsaturated and saturated SAT columns.

포화 칼럼에서의 좀 더 긴 체류시간에 의한 것으로 보인다(Table 2).

3.1.3. SUVA (Specific UV absorbance)

SUVA(specific UV absorbance)는 DOC에 대한 UVA-254의 비(UVA-254/DOC)로 계산한다(Drewes and Fox, 1999b). SAT 공정의 초기에 유기물(DOC)은 주로 미생물 분해에 의해 제거되는데 이때 주로 생분해가 쉬운 부분이 우선적으로 분해되고 상대적으로 난분해성인 UVA-254는 적게 분해되어 SUVA 값이 증가하는 특성을 보이는데 이 때문에 SUVA는 생분해정도를 나타내는 인자로 사용된다(Drewes and Jekel, 1998).

Fig. 2에 나타난 바와 같이 불포화(unsaturated SAT) 칼럼을 통과하면서 SUVA가 50% 증가하였는데 이는 불포화 칼럼에서 유기물의 생물학적 분해가 활발하게 일어나고 있음을 간접적으로 보여주는 것이다. 한편, 포화 (saturated SAT) 칼럼에서는 SUVA가 오히려 4% 감소하는 특성을 보였다. 이러한 SUVA의 감소에 대한 이유는 유입수의 수질 특성에서 찾을 수 있다.(Drewes and Jekel, 1998)의 연구에서와는 달리 본 연구에서는 포화 칼럼의 유입수로 불포화 칼럼의 유출수를 사용하였다. 따라서 유입수의 DOC에는 생분해 가능한 유기물의 비율이 적게 되고 UVA-254 물질의 제거가 일어날 가능성은 더욱 커지게 되어 SUVA의 감소를 가져오게 된다. 그리고 이러한 SUVA의 감소는, 불포화 대수층과 포화 대수층이 연계되어 있는 실규모 SAT 공정의 포화 대수층에서 보다 더 쉽게 나타날 것으로 보인다.

얕은 대수층 조건을 모사한 실험에서 나타난 유기물 제거 특성은 깊은 대수층 조건을 갖는 현장 규모의 SAT 공정에서의 처리 특성과 유사한 것으로 확인되었으며 이는 토양 상층부 20-30 cm에서 유기물의 활발한 생물학적 분해 특성에 관계된 것으로 보인다(Fox et al., 2001). 따라서 얕은 대수층 조건에서도 SAT 공정을 활용한 유기물의 제거는 충분히 가능함을 알 수 있다.

3.2. 무기화합물

3.2.1. 질소화합물

Fig. 4는 불포화 및 포화 칼럼에서의 질소화합물들의 농도 변화를 보여준다. 각 칼럼의 유입수의 특성을 보면, 불포화 (unsaturated SAT) 칼럼의 유입수인 하수처리장 방류수의 55%는 ammonium이었으며, 포화 (saturated SAT) 칼럼의 유입수의 85.4%는 질산성 질소 (nitrate)인 것을 알 수 있다. 이러한 각 유입수의 서로 다른 수질 특성은

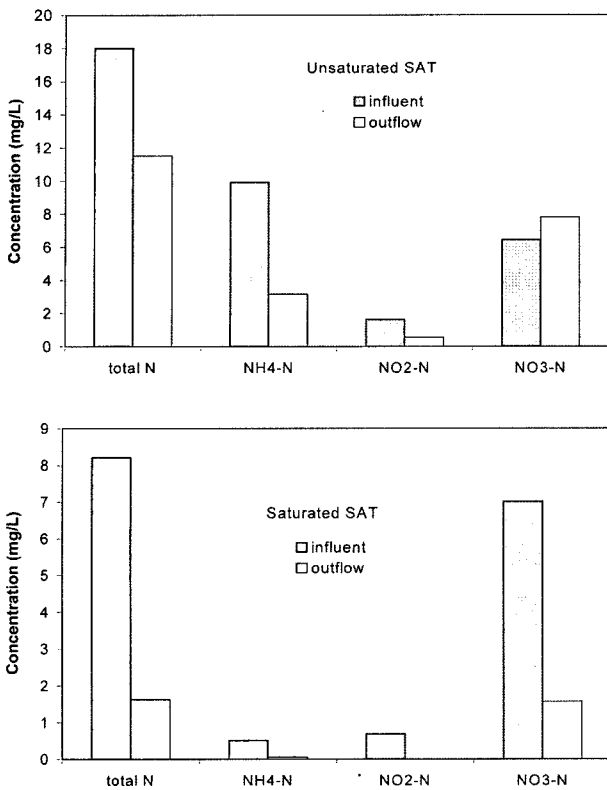


Fig. 4. Removal of nitrogen compounds in the unsaturated and saturated SAT columns.

본 실험에서 불포화 칼럼의 유출수를 포화 칼럼의 유입수로 사용함에 기인하며, 대부분의 ammonium 이온이 불포화 칼럼을 통과하면서 질산화 (nitrification) 되었기 때문이다. 그러나 불포화 칼럼의 유출수에서 암모니아성 질소가 상당한 양(3.2 mg N/L)으로 존재하는 것을 볼 수 있는데 이는 얇은 대수층 특성으로 인해 질산화가 충분히 일어나지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

암모니아성 질소 (NH<sub>4</sub>-N), 아질산성 질소 (NO<sub>2</sub>-N), 질산성 질소 (NO<sub>3</sub>-N)의 총합을 총질소(TN, total nitrogen) 이라고 할때, 총질소 제거율은 불포화 칼럼에서 36.1%, 포화 칼럼에서 80.3%로 나타났으며, 불포화 칼럼에서는 대부분 암모니아성 질소의 제거의 의해, 포화 칼럼에서는 대부분 질산성 질소의 제거에 의해 일어났다.

질산성질소는 토양 내에서 안정적(conservative)이고 물에 대한 용해도가 높아 잘 흡착되지 않는 것으로 알려져 있다(Johnson et al., 1999; Fryar et al., 2000). 따라서 포화(saturated SAT) 칼럼에서 나타난 질산성 질소의 제거는 assimilatory nitrate reduction 또는 무산소 상태에서 dissimilatory nitrate reduction (denitrification, 탈질에 의한 것으로 생각할 수 있다(Fig. 5)). 그러나, 포화 칼럼 유

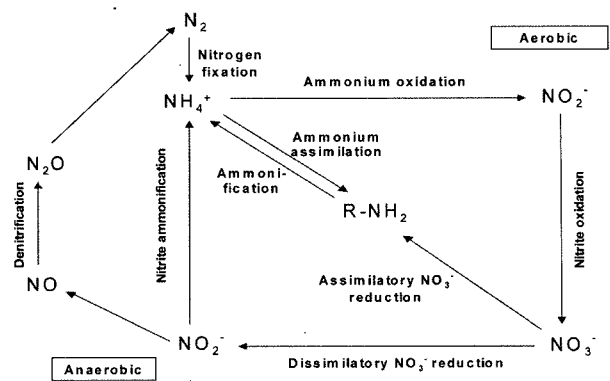


Fig. 5. Nitrogen transformations in the environment(Atlas and Bartha, 1998).

입수의 DO(dissolved oxygen) 농도가 약 2 mg/L로 탈질(dissimilatory nitrate reduction)이 일어나기는 어려운 조건으로 보인다. 또한 탈질에 관여하는 미생물의 성장을 위해서는 탄소원 (carbon source)이 필요한데, Bouwer 등 (1974)에 의하면 1 mg의 NO<sub>3</sub>-N을 제거하기 위해서는 약 1 mg의 유기탄소(organic carbon)가 필요하다고 알려져 있다. Fig. 2에서 나타난 바와 같이 본 실험의 포화 칼럼에서의 DOC의 소모가 거의 일어나지 않아 탈질에 의한 질소화합물의 제거가 일어나지 않음을 간접적으로 보여준다. 따라서 이러한 결과는 질소화합물의 제거가 assimilatory nitrate reduction에 의해 일어난다는 가능성을 높여주지만 이를 명확하게 보여주기 위해서는 정확한 반응 경로에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

결론적으로, 얇은 대수층 조건을 모사한 불포화 토양 칼럼에서의 질산화는 충분하지 않은 것으로 나타났으며 잔류 암모니아가 포화대수층으로 유입되는 것을 알 수 있었다. 또한 얇은 불포화층에서의 짧은 체류시간(1 day)으로 인해 포화 칼럼 유입수의 DO가 높게 나타났고 이러한 DO 특성에 의해, 깊은 대수층의 무산소 조건에서 일반적으로 일어나는 탈질 (dissimilatory nitrate reduction) 보다 assimilatory reduction에 의한 질산성 질소의 제거 가능성이 높은 것으로 판단되었다. 하지만, 실제 현장에서는 유입수가 포화층을 따라 계속 이동할 경우 더 깊은 포화층에서 무산소 조건에 도달하게 될 것이고 따라서 탈질에 의한 질산성 질소의 제거가 충분히 일어나게 될 것이다.

3.2.2. 인의 제거

토양 내에서 인의 제거는 칼슘과 마그네슘에 의한 화학적 침전 (precipitation) 또는 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)와 철에 의한 고정 (fixation)에 의해 일어나는 것으로 알려져 있다 (Idelovitch et al., 1980). 한편, 본 실험에 사용된 토양의

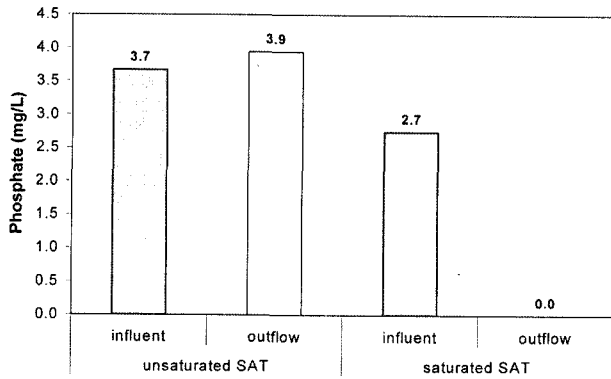


Fig. 6. Removal of phosphate in unsaturated and saturated SAT columns.

성분은 대부분 SiO<sub>2</sub>(82.7 wt%)로 구성되어 있으며, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 각각 9.0, 1.1 wt%, 칼슘과 마그네슘은 각각 0.8, 0.2 wt% 포함되어 있어 인을 제거할 수 있는 조건을 가지고 있다고 판단된다.

그러나, 인 (phosphate) 농도가 약 3.7 mg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/L인 광주하수처리장 방류수는 불포화 (unsaturated SAT) 칼럼에서는 제거되지 않고 그대로 유출되는 특성을 보였고, 포화 (saturated SAT) 칼럼에서는 100% 제거되는 특성을 보였다(Fig. 6). 같은 성분의 토양을 사용한 포화 및 불포화 칼럼에서의 이러한 큰 차이는 토양의 성분이 아니라 두 칼럼의 수리화학적 특성에 기인하는 것으로 보인다. Bouwer 등(1974)은 용적부하 (hydraulic loading)가 인의 제거에 영향을 미침을 보여주었다. 따라서 용적부하가 큰 불포화 (unsaturated SAT) 칼럼에서는 인의 제거가 제한된 반면, 상대적으로 적은 용적부하로 운전된 포화 (saturated SAT) 칼럼에서는 인의 제거가 효과적으로 일어나는 것으로 판단된다. 불포화 칼럼에서의 용적부하는 약 30.3 ml/cm<sup>2</sup>-day이었으며 포화 칼럼에서는 약 9.8 ml/cm<sup>2</sup>-day 이었다.

따라서, 인의 제거는 대수층의 깊이에 좌우되지 않고 불포화 및 포화 대수층에서의 수리학적 용적부하에 좌우되므로 얕은 대수층 조건에서도 인의 제거는 효율적으로 일어난다고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

약 5개월간 얕은 대수층 (shallow aquifer)을 모사한 불포화 (unsaturated SAT) 및 포화 (saturated SAT) 토양 칼럼을 이용하여 얕은 대수층 조건에서의 하수처리장 방류수의 처리 수질 변화를 알아보았다.

유기물(DOC)의 평균 제거율은 불포화 (unsaturated

SAT) 칼럼의 경우 31.9%로 높게 나타난 반면, 포화 (saturated SAT) 칼럼에서는 DOC의 제거가 거의 일어나지 않았다. 이러한 유기물의 제거특성은 얕은 대수층 조건에서도 깊은 대수층 조건에서와 유사한 유기물 제거율을 얻을 수 있음을 보여준다.

하수처리장 방류수가 불포화(unsaturated SAT) 칼럼을 통과하면서 같은 양의 DOC 농도당 UVA-254가 높아지는데, 이는 불포화 칼럼을 통해 난분해성 방향성 유기물의 비율이 증가하고 있음을 보여준다. 한편, 포화 (saturated SAT) 칼럼에서는 SUVA가 오히려 4% 감소하는 특성을 보였는데 이는 불포화 칼럼의 유출수를 포화 칼럼의 유입수로 사용한 것에 기인한다.

얕은 대수층 조건을 모사한 불포화 토양 칼럼에서의 질산화는 충분하지 않은 것으로 나타났으며 잔류 암모니아가 포화대수층으로 유입되는 것을 알 수 있었다. 또한 얕은 불포화 칼럼에서의 짧은 체류시간(1 day)으로 인해 포화 칼럼 유입수의 DO가 약 2 mg/L를 유지했으며 이는 질산성 질소의 제거 메커니즘에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

인 (phosphate)은 불포화 (unsaturated SAT) 칼럼에서는 제거되지 않고 그대로 유출되는 특성을 보였고, 포화 (saturated SAT) 칼럼에서는 100% 제거되는 특성을 보였는데 이러한 큰 차이는 토양의 성분이 아니라 두 칼럼의 수리화학적 특성에 기인한 것이다.

결론적으로, 불포화층에서의 짧은 체류시간으로 인해 암모니아성 질소가 포화층으로 유입되고, 포화층 유입수의 DO가 상대적으로 높다는 차이점이 발견되었지만 얕은 대수층 조건에서도 유기물 및 질소 및 인의 제거가 충분히 일어남을 알 수 있었다.

#### 사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 4-1-2)을 통한 광주과학기술원 물 재이용 기술센터 지원금에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

Amy, G., Wilson, G., Conroy, A., Chahbandour, J., Zhai, W., and Siddiqui, M., 1993, Fate of chlorination by-product and nitrogen species during effluent recharge and soil aquifer treatment (SAT), *Water Environ. Res.*, **65**(6), 726-734.

- Atlas, R. M. and Bartha, R., 1998, *Microbial ecology*, 4th ed., Benjamin/Cummings Science Publishing, Menlo Park, CA, p. 414.
- Bouwer, H., Lance, J. C., and Riggs, M. S., 1974, High rate land treatment II : water quality and economic aspects of the Flushing Meadows project, *J. WPCF*, **46**(5), 844-859.
- Drewes, J. E. and Fox, P., 1999a, Behavior and characterization of residual organic compounds in wastewater used for indirect potable reuse, *Water Sci. Technol.*, **40**(4-5), 391-398.
- Drewes, J. E. and Fox, P., 1999, Fate of natural organic matter (NOM) during groundwater recharge using reclaimed water, *Water Sci. Technol.*, **40**(9), 241-248.
- Drewes, J. E. and Jekel, M., 1998b, Behavior of DOC and AOX using advanced treated wastewater for groundwater recharge, *Water Res.*, **32**(10), 125-3133.
- Fox, P., Narayanaswamy, K., Genz, A. and Drewes, J., 2001, Water quality transformations during soil aquifer treatment at the Mesa Northwest Water Reclamation Plant, USA, *Water Sci. Technol.*, **43**(10), 343-350.
- Fryar, A. E., Macko, S. A., Mullican III, W. F., Romannak, K. D., and Bennet, P. C., 2000, Nitrate reduction during groundwater recharge, Southern High Plain, Texas, *J. Contam. Hydrol.*, **40**, 335-363.
- Idelovitch, E. and Michail, M., 1984, Soil-aquifer treatment-a new approach to an old method of wastewater reuse, *J. WPCF*, **56**(8), 936-943.
- Idelovitch, E., Terkeltoub, R., and Michail, M., 1980, The role of groundwater recharge in wastewater reuse: Israel's Dan region project, *J. AWWA*, **72**, 391-400.
- Johnson, J., Barker, L., and Fox, P., 1999, Geochemical transformations during artificial groundwater recharge: soil-water interactions of inorganic constituents, *Water Res.*, **33**(1), 196-206.
- Quanrud, D. M., Arnold, R. G., Wilson, L. G., Gordon, H. J., Graham, D. W., and Amy, G. L., 1996, Fate of organics during column studies of soil aquifer treatment, *J. Environ. Eng.*, **122**(4), 314-321.