

Removal of Nitrate in River Water by Microorganisms in Saturated-Zone Soil: Laboratory-Scale Column Test

Jungyong Park and Yeonghee Ahn*

Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

Received April 20, 2014 / Revised May 13, 2014 / Accepted May 14, 2014

Aquifer recharge and recovery is a technology used to ensure a stable supply of clean water. During the process, river water is injected into a soil aquifer and stored. The stored water is then recovered and used to produce drinking water. It is important to understand quality improvement of the injected water while it is stored in the aquifer. In the present study, a lab-scale column reactor containing saturated-zone soil was employed to mimic an aquifer. The reactor was used to investigate microbial removal of nitrate that is a major inorganic contaminant detected in the Nakdong River. The reactor was introduced with river water that contained nitrate at concentrations (5.07, 6.81, 8.27, and 11.07 mg NO₃⁻/l) detected downstream of the Nakdong River in the past 2 years. The nitrate concentrations decreased during the introduced water is retained in the reactor. Effluent from the reactor contained 1.49 mg NO₃⁻/l or less and had an average pH of 7.98 regardless of the nitrate concentrations of the influent. However abiotic control reactor showed similar nitrate-concentrations in its influent and effluent. Considering the result of abiotic control, the decreased nitrate concentration observed in the test column suggested that microorganisms in saturated-zone soil removed nitrate in the river water introduced into the reactor. Results of this study will be used to better understand microbial improvement of water quality in aquifer recharge and recovery technology.

Key words : Aquifer recharge and recovery, indigenous microorganisms, nitrate (NO₃⁻), saturated-zone soil, the Nakdong River

서 론

부산광역시에서는 대부분의 상수를 낙동강물을 이용하여 생산한다. 부산의 상수원수 의존율은 낙동강이 94%이고, 수원지(회동과 범기)가 6%이다[2]. 이러한 높은 의존율은 낙동강의 안전한 수질과 안정적인 수량을 요구한다. 그러나 낙동강 수계에는 산업단지뿐만 아니라 군부대등이 존재하므로 오염에 대한 잠재성을 항상 내포하고 있다. 또한 갈수기에는 충분한 양의 상수원수를 공급하기 어렵다. 그러므로 다변화된 상수원수를 확보함으로써 안정적으로 안전한 상수원수를 확보하고자 하는 노력이 필요하다.

대수층 함양 및 회수(Aquifer recharge and recovery)기술은 안정적으로 안전한 상수원수를 확보하기 위해 이용되는 기술의 하나이다. 이 기술은 하천수나 하수처리장의 방류수를 대수층에 인위적으로 주입하여 저장함으로써 필요할 때 퍼 올려 상수 원수로 사용할 수 있는 기술이다[4, 7]. 또한 이 기술

은 오염 및 기후변화에 대비하여 수자원을 확보하기 위한 전략으로도 이용된다. 그래서 수자원 관리를 위해 유럽, 중동, 미국, 호주, 일본, 중국 등 전세계적으로 이 기술을 다양한 방식으로 사용하고 있다[7, 12, 22, 23]. 대수층 함양 및 회수 기술에서 핵심부분 중의 하나는 주입된 물이 저장되는 동안 자연정화가 되는 것이다. 대수층의 토착미생물에 의한 주입된 물에 존재하는 오염물의 제거는 자연정화의 주요기작으로 작용할 것으로 여겨진다. 그러나 대수층 함양 및 회수 기술에서 토양미생물에 의한 수질개선과 관련 미생물에 대한 연구는 최근에야 보고되기 시작했고[9, 23] 우리나라에서는 거의 보고되지 않았다.

낙동강의 하류와 하구에 위치한 부산은 낙동강 중, 상류에 위치한 산업단지로부터 배출되어 낙동강에 유입되어 흘러 들어온 오염물과 더불어 부산자체내의 농업 및 산업단지에서 발생된 오염물로 인한 이중오염에 대한 잠재성이 있다. 이 오염물들 중에서 특히 nitrate (NO₃⁻)는 유아청색증(Methemoglobinemia)을 초래할 뿐만 아니라 부영양화의 원인물질로서 담수나 해수에서 조류의 번식을 증가시킨다[6, 8, 19]. 조류의 과다번식은 물맛의 저하는 물론이고 어류의 치사 등 수생태계에 오염을 발생시킴으로써 환경적 문제는 물론이고 경제적 손실을 야기한다.

본 연구에서는 대수층 인공함양기술에서 미생물에 의한 수질개선을 이해하기 위해 실험실 규모의 반응기를 이용하여

*Corresponding author

Tel : +82-51-200-7677, Fax : +82-51-200-7683

E-mail : yahn@dau.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

대수층을 모사한 포화층토양에 하천수를 주입하고 주입한 하천수에 존재하는 NO₃⁻이 포화층의 토착미생물에 의해 제거가 되는지를 확인하고 그 특성을 조사하였다.

재료 및 방법

본 연구에 사용된 ammonium nitrate (NH₄NO₃; 순도 ≥ 99%)와 sodium azide (NaN₃; 순도 98%)는 ACROS Organics (New Jersey, USA)와 Junsei Chemical Co., Ltd. (Tokyo, Japan)에서 각각 구입하였다. 하천수의 총생균수 조사에는 R2A배지(Becton Dickinson & Co.; NJ, USA)를 사용하였다. 그 외 시약들은 모두 Sigma-Aldrich Chemical Company, Inc. (St. Louis, MO, USA)로 부터 구입하였으며 가장 순도(순도 > 99%)가 높은 것이었다.

유입수와 토양

본 연구에서 사용한 실험실 규모 반응기에 유입된 하천수와 충전된 토양은 낙동강 하류 지점의 낙동강물과 인근 토양을 각각 사용하였다. 하천수는 부산광역시 사상구에 위치한 삼락공원지역에서 채취하였으며, 한편 토양시료는 물 시료를 채취한 지점 근처(물과 토양 경계지점에서 1 m 떨어진 곳)의 표토를 채취하여 실험실규모 반응기에 충전하였다. 본 연구에서 사용한 표토는 지표에서 30 cm 밑 지점에서 채취하였다. 물과 토양 시료의 채취는 각각 수질오염공정시험기준[14]와 토양오염공정시험기준[15]에 준하여 실시하였다. 채취한 시료들은 ice box에 담아 당일 동아대학교 토양환경연구실의 실험실로 운반하였다. 채취한 하천수는 GFC filter (Whatman, Ltd., Maidstone, UK)로 여과하여 부유물질을 제거하여 성분분석 및 반응기 실험에 사용하였다. 여과된 하천수는 사용 전까지 냉장(4°C) 보관하였다.

실험실 규모 포화층 토양 컬럼 실험

토양의 포화층을 모사하기 위해 SpectraChrom HPLC glass column (Spectrum Chromatography; TX, USA)을 실험실 규모(2.5 cm I.D. X 20 cm length)의 토양 반응기로 사용하였다(Fig. 1). 채취한 토양은 2 가지 체(0.85 mm sieve와 2 mm sieve)를 사용하여 사질 토양만을 선별하여 토양반응기내에 균일하고 조밀하게 16 cm 높이로 채워 넣었다. 연동펌프 (Masterflex C/L Dual-Channel Variable-Speed Tubing Pump; Cole-Parmer, IL USA)를 사용하여 토양 반응기에 낙동강 하류에서 채취한 하천수를 상향류 방식으로 주입하여 물로 포화된 포화층 토양을 형성하였다. 유입수의 반응기내 체류시간(hydraulic retention time, HRT)을 12시간으로 조정하여 본 연구기간 동안 계속 유지하였다. 초기 운전기간 동안 토양반응기에 채취한 하천수를 8일간 주입하여 발생하는 유출수의 화학적 성상을 안정화한 후 NO₃⁻ 제거 실험을 실시하였다.

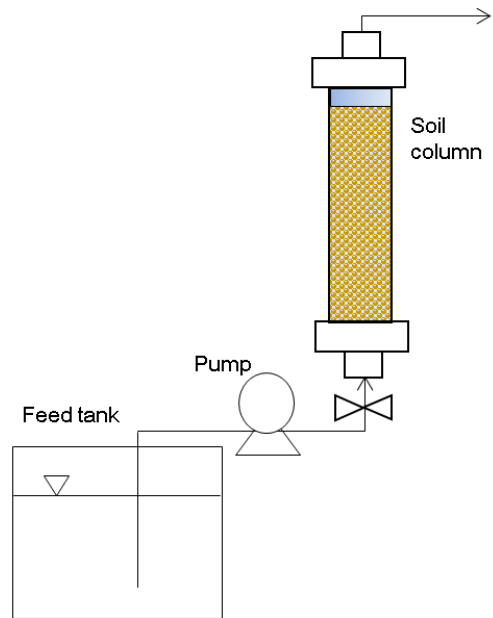


Fig. 1. Schematic diagram of the soil column reactor used in this study. The Nakdong River water was introduced into the column.

NO₃⁻ 제거 실험에는 채취한 하천수에 인위적으로 NO₃⁻를 용해한 유입수를 사용하였다. 유입수의 NO₃⁻ 농도는 최근 2년간(2011-2012년) 낙동강 하류인 물금지역에서 관찰된 낙동강 수질에 대한 통계[2]를 바탕으로 하였다. 반응기의 유출수 시료는 주기적으로 채취하여 NO₃⁻ 농도를 측정하였다. 한편 abiotic control 반응기에는 0.04% (w/v) NaN₃를 유입수에 첨가해서 유입수와 토양의 미생물 활성을 억제시킨 후 동일하게 실험하였다. 본 연구기간 동안 모든 반응기는 어두운 항온기 (25°C)내에 설치하여 운전하였다.

미생물 분석방법

반응기에 사용한 하천수와 토양의 총생균수 분석은 시료채취 당일 실험실에서 실시하였다. 시료는 적절히 희석하여 phosphate-buffered saline (pH 7.4)으로 적절히 연속희석하여 배지에 평판도말 하였다. 하천수의 총생균수 농도분석에는 문헌[13, 17]에 따라 물에 존재하는 세균계수에 흔히 사용되는 R2A 배지를 사용하였고, 한편 토양의 총생균수분석에는 문헌[1]에 기술된 것과 같이 YEPG배지를 사용하였다. 도말된 각 배지를 25°C에서 3일간 배양 한 후 자란 콜로니를 계수하여 총생균수를 결정하였다. 토양은 문헌[1]에 기술된 것과 같이 0.1% (w/v) sodium pyrophosphate buffer (pH 7.2)에서 1분간 강하게 vortex 하여 토양입자로부터 미생물을 유리시킨 후 연속희석 하였다.

물리화학적 분석방법

토양 시료의 수분함량 측정은 채취 당일 실시하였고, 시료

는 냉장 보관하여 일주일 내에 그 외의 분석항목은 측정하는 데 사용하였다. 토양은 실온에서 3일간 풍건한 후 pH, 토양유기오염물(soil organic matter, SOM), 그리고 밀도를 측정하였다. 한편 물 시료는 Multimeter (Model 915PDC; ISTEK, Inc., Korea)를 사용하여 온도, DO, pH, 그리고 전기 전도도(conductivity)를 측정하였다. 한편 용존유기탄소(DOC)와 용해된 무기원소는 TOC analyzer (Sievers InnovOx TOC; GE analytical instruments, Boulder, CO, USA)와 ICP-AES (Activa; JY Horiva, Japan)를 각각 사용하여 측정하였다. 토양의 수분함량과 pH는 토양오염공정시험기준[15]에 의해 측정하였고, SOM의 농도와 토양밀도는 문헌[21]에 기술된 것과 같이 실시하였다.

물시료의 음이온 농도는 농도는 ion chromatography (IC)를 사용하여 분석하였다. 반응기의 유입수와 유출수는 주기적으로 채취하여 NO₃⁻ 농도와 pH를 분석하였다. 채취한 시료는 syringe filter (pore size, 0.22 μm)로 여과 후 필요에 따라서는 적당히 희석하여 IC (Dionex ICS-1100; Dionex, Sunnyvale, CA, USA) 분석에 사용하였다. IC를 사용한 NO₃⁻의 분석은 수질오염공정시험기준[14]에 따라 실시하였다. Analytical column AS16 (Dionex)과 guard column AG16 (Dionex)이 장착된 IC를 사용하여 NO₃⁻ 농도를 분석하였으며 검출한계는 68 μg NO₃⁻/l이었다(Table 1). IC 분석에 사용한 표준시약은 AccuStandard Inc. (New Haven, CT, USA)에서

Table 1. Analysis condition for IC

Analysis condition	
Sample loop	
Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻	25 μl
Eluent	
Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻	22 mM NaOH
Eluent flow	
Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻	1 ml/min
Columns	Dionex AG16, 4 × 50 mm / AS16, 4 × 250 mm
Suppressor	ASRS ULTRA II
Detector	Suppressed Conductivity Detector, Dionex CD20
Current	
Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻	70 mA
Temperature	30°C
Detection time	
Cl ⁻	3.7 min
SO ₄ ²⁻	5.6 min
NO ₃ ⁻	4.7 min
Detection limit	
Cl ⁻	30 μg/l
SO ₄ ²⁻	55 μg/l
NO ₃ ⁻	68 μg/l

구매하였다.

결과 및 고찰

유입수와 토양의 성상

본 연구에서 실험실 규모의 반응기에 유입수로 사용한 하천수의 성상은 Table 2와 같다. 유입수의 pH는 8.2이었고 DOC와 NO₃⁻는 각각 3.17 mg/l 와 3.56 mg/l 이었다. 최근 2년간(2011-2012년) 낙동강 하류에 해당하는 물금 취수장에서 측정된 낙동강물의 평균 pH는 각각 7.8과 8.3이었고, NO₃⁻ 평균 농도는 각각 9.7과 8.4 mg/l 로 보고되었다[2]. 한편 2012년도의 최고 및 최저 NO₃⁻ 농도는 각각 15.9과 3.5 mg/l 이었다. 부산광역시 상수도사업본부 수질연구소조사[5]에 의하면 최근 16년간(1997-2012년) 물금취수장에서 측정된 낙동강물의 DOC 농도는 2.60-3.58 mg/l 범위를 나타냈으며 평균 2.82 mg DOC /l 이었다. 월별로는 3월에 가장 농도가 높았고 10월에 가장 농도가 낮았다. 한편 본 연구에서 유입수로 사용한 하천수의 초기 총생균수 농도는 25°C에서 697 CFU/ml로 관찰되었다.

모사반응기내의 포화층 토양을 구축하는데 사용된 사질토양의 성상은 Table 3과 같다. 토양의 pH는 7.53이었고 SOM과 공극율은 각각 4.75%와 39.10% 이었다. 한편 토양의 총생균수는 1.7×10⁶ CFU/g soil로 나타났다. 본 연구에서 사용한 방법에 의해 계산된 물과 토양의 총생균수는 배양 가능한 호기성 종속영양 세균의 총 수이다.

Table 2. Characteristics of the Nakdong River water used in this study

Parameters	Value
pH	8.20
Temperature (°C) [*]	16.50
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	13.38
DOC (mg/l)	3.17
Cl ⁻ (mg/l)	58.41
NO ₃ ⁻ (mg/l)	3.56
TDS (mg/l)	179.50
Turbidity (NTU)	1.83
Conductivity (μS/cm)	259.30
Na (mg/l)	21.80
K (mg/l)	4.08
Mg (mg/l)	5.16
Ca (mg/l)	22.17
Mn (mg/l)	0.02
Dissolved oxygen (mg/l)	9.14
Total viable heterotrophic cell (CFU/ml)	6.97E+2 ± 0.64E+2 (n=3)

*Water temperature measured at sampling time in the Nakdong River.

Table 3. Characteristics of soil used in this study

Parameters	Value
pH	7.53
Soil texture	Sand
SOM (% w/w)	4.75±0.02 (n=3)
Moisture content (%)	13.46±1 (n=3)
Total heterotrophic cell (CFU/g soil)	1.70E+6±1.40E+5 (n=3)
Porosity (%)	39.10

포화층 토양미생물에 의한 NO₃⁻ 제거

모사 반응기를 이용하여 포화층 토양 미생물에 의한 낙동강 물의 대표적인 무기오염 물질인 NO₃⁻ 제거 실험을 수행하였다. 낙동강 하류에서 최근 2년간 측정된 NO₃⁻ 농도 범위를 고려해서 4가지 초기 농도(5.07, 6.81, 8.27, 그리고 11.07 mg NO₃⁻/l)를 각각 모사 반응기에 도입함으로써 포화층 토양미생물에 의한 NO₃⁻ 제거를 조사하였다. 본 연구에서 사용한 NO₃⁻의 다양한 초기농도에 상관없이 반응기에 유입된 하천수에 포함된 NO₃⁻는 반응기에 체류하는 동안 농도가 감소되는 것이 관찰되었다(Fig. 2). 반응기 운전 7일과 19일째에 새 batch의 유입수를 각각 주입하고 1일 후 관찰된 유출수의 NO₃⁻ 농도가 다른 때보다 비교적 높게 나온 것을 제외하고는 본 실험기간 동안 유출수는 1.49 mg NO₃⁻/l 이하를 유지하였다. 본 연구에서 관찰된 유출수의 이 NO₃⁻농도는 상수원수를 취수하는 물금 취수장에서 측정된 낙동강물의 최근 2년의 평균 농도(2011년, 9.7 mg NO₃⁻/l; 2012년, 8.4 mg NO₃⁻/l)보다 낮으며, 2012년도 최저 농도(3.5 mg NO₃⁻/l)보다도 낮다. 한편 NO₃⁻ (또는 NO₃-N) 농도에 대한 상수원수의 수질기준은 정해지지 않았다. 유입수의 NO₃⁻ 농도는 시간이 지남에 약간씩 감소하는 것으로 관찰되었다(Fig. 2). 이는 유입수 자체에 있는 미생물(Table 2)의 작용에 의한 것으로 여겨진다.

한편 NaN₃를 처리한 abiotic control에서는 유입수에 포함

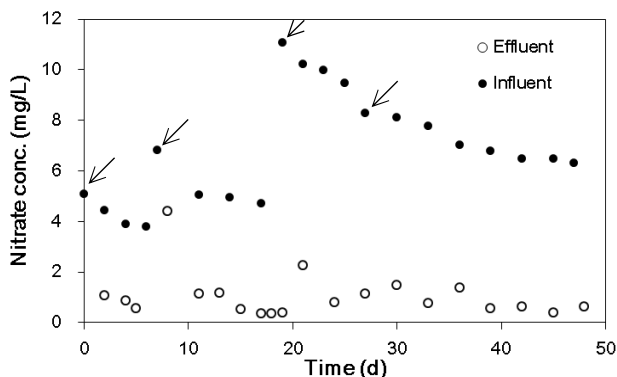


Fig. 2. NO₃⁻ concentrations detected in influent and effluent of the soil column. Arrows indicate times to start introducing a new batch of influent.

된 NO₃⁻ 농도와 유출수의 NO₃⁻ 농도는 거의 차이가 없었다(데이터 제시 안됨). 그래서 본 연구를 통해 본 실험조건하에서 포화층의 토착 미생물에 의해 인공함양된 하천수에 존재하는 NO₃⁻이 제거됨을 알 수 있었다. NaN₃는 미생물활성을 억제하므로 control 실험에 첨가하여 물이나 토양에서 미생물에 의한 오염물질 제거를 연구하는데 사용되었다[3, 11, 18, 20]. NaN₃는 cytochrome oxidase의 heme cofactor에 비가역적으로 결합하여 이 효소의 활성을 저해함으로써 정균제(bacteriostatic agent) 활성을 발휘하는 것으로 알려졌다[10].

탈질(denitrifying)세균이 지표 밑 토양에 널리 존재하므로 지하수 환경에서 NO₃⁻ 제거는 주로 탈질반응에 의해 일어난다고 알려졌다[19]. 탈질반응에는 산화환원전위(redox potential)와 전자공여체의 농도가 중요한 것으로 보고되었다. 전자공여체로는 유기탄소화합물과 환원된 형태의 철과 황과 같은 무기물이 알려졌다. 모사반응기에 도입된 유입수에 존재하는 DOC와 반응기내 포화층 토양의 SOM은 본 연구에서 관찰된 NO₃⁻ 제거반응에서 전자공여체로 작용했을 수 있다.

본 연구에서는 대수층토양을 모사하기 위해 인위적으로 형성시킨 포화층토양을 이용하여 실험하였다. 실제 대수층에서 채취한 토양을 사용하면 대수층의 생물학적 수질개선을 이해하는데 더 도움을 줄 것으로 여겨진다.

유출수의 pH

본 실험기간 동안 모사반응기로부터 발생한 유출수는 평균 pH 7.98을 유지하였다(Fig. 3). 유입수와 유출수의 pH는 큰 차이는 없었으나, 유출수의 pH가 평균 0.29 정도 낮은 것으로 나타났다. 유출수의 최대 pH는 8.12이었고 최소 pH는 7.77이었다. 환경정책기본법 시행령 제2조[16]에서 정한 상수원수의 수질기준이 pH 6.5 - 8.5임을 고려하면 본 연구기간 동안 생산된 모사반응기의 유출수는 이 pH기준을 만족한다. 최근 2년간 물금지역에서 관찰된 낙동강물의 평균 pH는 2011년에 7.8이었고, 2012년에 8.3이었다[2]. 한편 2012년에 측정된 낙동강물의 최고 pH는 9.9이었고 최저 pH는 6.7이었다.

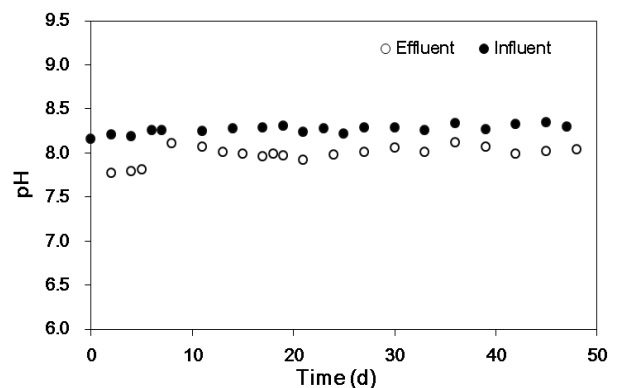


Fig. 3. pH change of influent and effluent of the soil column.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구개발사업의 연구비지원 (과제번호 13AWMP-B066761-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn, Y., Jung, H., Tatavarty, R., Choi, H., Yang, J.-W. and Kim, I. S. 2005. Monitoring of petroleum hydrocarbon degradative potential of indigenous microorganisms in ozonated soil. *Biodegradation* **16**, 45-56.
- Busan Water Authority. 2013. *2013 Drinking water statistics annual report*. Busan Water Authority, Busan, Korea.
- Cartwright, C. D., Owen, S. A., Thompson, I. P. and Burns, R. G. 2000. Biodegradation of diethyl phthalate in soil by a novel pathway. *FEMS Microbiol Lett* **186**, 27-34.
- Dillon, P. 2005. Future management of aquifer recharge. *Hydrogeol J* **13**, 313-316.
- Kim, I., Whang, Y., Jung, M., Lee, Hwa., Kang, H., Lee, S., Ryu, D. and Kwon, K. 2013. Water quality of downstream of the Nakdong River: Moulgeum, Maeri, and Samryangjin. *The Report of Water Quality Inst* **13**, 337-393.
- Kim, M. S., Chung, Y. R., Suh, E. H. and Song, W. S. 2002. Eutrophication of Nakdong River and statistical analysis of environmental factors. *Algae* **17**, 105-115.
- Kim, Y. and Kim, Y. 2010. A review on the state of the art in the management of aquifer recharge. *J Geol Soc Kor* **46**, 521-533.
- Kross, B. C., Ayebo, A. D. and Fuortes, L. J. 1992. Methemoglobinemia: nitrate toxicity in rural America. *Am Fam Physician* **46**, 183-188.
- Li, D., Alidina, M., Ouf, M., Sharp, J. O., Saikaly, P. and Drewes, J. E. 2013. Microbial community evolution during simulated managed aquifer recharge in response to different biodegradable dissolved organic carbon (BDOC) concentrations. *Water Res* **47**, 2421-2430.
- Lichstein, H. C. and Soule, M. H. 1944. Studies of the effect of sodium azide on microbic growth and respiration: I. The action of sodium azide on microbic growth. *J Bacteriol* **3**, 221-230.
- Maagd, P. G. de Sinnige, T. L., Schrap, S. M., Opperhuizen, A. and Sum, D. T. H. M. 1998. Sorption coefficients of polycyclic aromatic hydrocarbons for two lake sediments: influence of the bactericide sodium azide. *Environ Toxicol Chem* **17**, 1899-1907.
- Maliva, R. G., Missimer, T. M., Winslow, F. P. and Herrmann, R. 2011. Aquifer storage and recovery of treated sewage effluent in the Middle East. *Arab J Sci Eng* **36**, 63-74.
- Massa, S., Caruso, M., Trovatielli, F. and Tosques, M. 1998. Comparison of plate count agar and R2A medium for enumeration of heterotrophic bacteria in natural mineral water. *World J Microbiol Biotechnol* **14**, 727-730.
- Ministry of Environment. 2008. *Standard methods for analysis of water contamination*. Ministry of Environment, Gyeonggi-do, Korea.
- Ministry of Environment. 2009. *Standard methods for analysis of soil contamination*. Ministry of Environment, Gyeonggi-do, Korea.
- Ministry of Environment. 2009. Article 2, Environmental Standards. In: *Enforcement Decree of the Framework Act on Environmental Policy*. Ministry of Environment, Gyeonggi-do, Korea.
- Ministry of Environment. 2011. *Standard methods for analysis of drinking water*. Ministry of Environment, Gyeonggi-do, Korea.
- Phelps, T. J., Niedzielski, J. J., Schram, R. M., Herbes, S. E. and White, D. C. 1990. Biodegradation of trichloroethylene in continuous-recycle expanded-bed bioreactors. *Appl Environ Microbiol* **56**, 1702-1709.
- Rivetta, M. O., Bussb, S. R., Morgan, P., J. Smith, J. W. N. and Bemment, C. D. 2008. Nitrate attenuation in groundwater: a review of biogeochemical controlling processes. *Water Res* **42**, 4215-4232.
- Seligman, P. F., Valkirs, A. O. and Lee, R. F. 1986. Degradation of tributyltin in San Diego bay, California, waters. *Environ Sci Technol* **20**, 1229-1235.
- Soil Science Society of America. 1986. Part 1, physical and mineralogical methods. In: Klute, A. (ed.), *Methods of Soil Analysis* (2nd ed.). Soil Science Society of America, Inc. Publisher: Madison, Wisconsin.
- Thomas, B., Steidl, J., Dietrich, O. and Lischeid, G. 2011. Measures to sustain seasonal minimum runoff in small catchments in the mid-latitudes: A review. *J Hydrol* **408**, 296-307.
- Zhang, X., Zhao, X. and Zhang, M. 2012. Functional diversity changes of microbial communities along a soil aquifer for reclaimed water recharge. *FEMS Microbiol Ecol* **80**, 9-18.

초록 : 포화층 토양미생물에 의한 하천수의 nitrate 제거: 실험실규모 컬럼 실험

박정용 · 안영희*

(동아대학교 환경공학과)

대수층 함양 및 회수(Aquifer recharge and recovery)기술은 안정적으로 안전한 상수원수를 확보하기 위해 이용되는 기술의 하나이다. 이 기술을 통해 대수층에 하천수를 인위적으로 주입하여 저장하고 필요할 때 퍼 올려 상수 원수로 사용할 수 있다. 이 기술에서 주입된 물이 저장되는 동안 대수층의 토착미생물에 의해 수질이 개선되는 것을 이해하는 것은 중요하다. 그래서 본 연구에서는 실험실규모의 컬럼 반응기를 이용하여 대수층을 모사한 포화층 토양에 존재하는 미생물에 의한 NO_3^- 제거를 조사하였다. NO_3^- 는 낙동강의 대표적인 무기 오염물 중의 하나이다. 낙동강 하류에서 최근 2년간 측정된 NO_3^- 농도 범위를 고려해서 NO_3^- 농도를 달리한 하천수를 반응기에 주입하였다: 5.07, 6.81, 8.27, 그리고 11.07 mg NO_3^-/l . 본 연구에서 사용한 다양한 NO_3^- 농도에 상관없이 유입수가 반응기에 체류하는 동안 NO_3^- 는 농도가 감소되어 유출수는 1.49 mg NO_3^-/l 이하로 측정되었으며 본 실험기간 동안 평균 pH 7.98을 유지하였다. 한편 abiotic control 반응기에서는 유입수에 포함된 NO_3^- 농도와 유출수의 NO_3^- 농도는 거의 차이가 없었다. 그래서 본 실험조건하에서 반응기로 도입된 하천수의 NO_3^- 이 포화층의 미생물에 의해 제거됨을 알 수 있었다. 본 연구에서 도출된 결과는 대수층 함양 및 회수기술에서 대수층의 미생물에 의해 수질이 개선되는 것을 이해하는 데 도움을 줄 것이다.