

지하수 종속 생태환경에서 수문-생태학적 특성 조사 및 분석

김희정* / 현윤정** / 이강근***+

Hydro-ecological characterizations in groundwater dependent ecosystem

Kim Heejeung* / Hyun Yunjung** / Lee Kang Kun***+

요약 : 자연 하천과 연계된 지하수 종속 생태환경은 지하수와 지표수의 화학적, 수리적 구배차이에 의해 혼합이 활발히 일어나는 지역이다. 지표수와 지하수 사이의 상호작용은 지하수 종속 생태 환경에서의 생지화학 과정에 중요한 역할뿐만 아니라 이 지역을 수리생태학적 열점으로 만든다. 이 연구의 목적은 질산성 질소로 오염된 자연 하천과 연계된 지하수 종속 생태환경의 특성을 수리지질학적, 화학적, 생물학적 방법을 이용하여 특성을 평가하는 것이다. 지하수 종속 생태환경에서 일어나는 지표수와 지하수 사이의 수직교환률은 현장에 다양한 깊이로 설치한 소형관정에서 측정된 수두구배를 근거하여 계산하였다. 본 연구에서는 생물학적 자연저감 퍼텐셜을 조사하기 위해 연쇄중합반응 및 클로닝 방법이 수행되었다. 연구 결과, 지하수 종속 생태환경의 혼합수 유동률은 다스 미생물의 활동, 그리고 질산성 질소의 농도에 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 또한 지표수-지하수 혼합구간의 토양에서 분리된 탈질미생물은 특정조건하에서 지하수 종속 생태환경에서의 생분해능력을 고무할 수 있다.

핵심용어 : 혼합수 수직흐름, 지하수 종속 생태환경, 수직 수리 구배

Abstract : The groundwater dependent ecosystem associated with a natural stream is the area where mixing and exchange of surface water and groundwater occurs due to large chemical and hydraulic gradients. Surface-groundwater interactions play an important role in biogeochemical processes in groundwater dependent ecosystems and make this area a hydro-ecological hot spot. The objective of this study is to characterize the groundwater dependent ecosystem in a natural stream where nitrate contamination of stream water is observed by means of hydrogeological, chemical, and biological methods. In this study, vertical flow exchange(hyporheic flow) rates between stream and groundwater were estimated based on vertical hydraulic gradients measured at mini-piezometers of various depths. To investigate the biological natural attenuation potential, biological analyses using polymerase chain reaction(PCR)-cloning methods were performed in this study. Results show that the vertical hyporheic water fluxes affect nitrate concentrations and bacterial densities in groundwater dependent ecosystems to some degree. Also, denitrifying bacteria were identified in hyporheic soils, which may support the biodegradation potential of the groundwater dependent ecosystems under certain conditions.

Keywords : vertical hyporheic water flow, groundwater dependent ecosystem, vertical hydraulic gradient

1. 서론

자연하천에서의 지하수 종속 생태환경은 하천 기저의 다공질 토양을 통하여 지하수와 지표수 사이의 혼합과정이 활발히 일어나는 생화학적 전

이지대이다(Orghidan, T., 1959). 또한 대수층과 하천 사이의 연계구간으로 서로 다른 환경적 특성에 의해 영향을 받는 구역이다(Brunke, M. and Gonser, T., 1997). 지난 수 십 년간의 지속적인 연구들은 지하수 종속 생태환경이 생물학적

+ Corresponding author : kkleee@snu.ac.kr

* 정희원 · 서울대학교 지구환경과학부 석사

** 정희원 · 서울대학교 지구환경과학사업단 BK21 계약조교수 · 공학박사

*** 정희원 · 서울대학교 지구환경과학부 교수 · 이학박사

다양성이 풍부할 뿐만 아니라, 인간에 의해 인위적으로 발생된 오염 물질이 혼합구간에 서식하는 토착 미생물의 생물학적 여과 작용이 일어남을 확인하였다(Storey, R.G., 1999). 하지만 지하수 중속 생태환경에서 지하수와 오염된 지표수의 혼합의 정도는 오염 취약성이 큰 지하수에 부정적인 영향을 미치는 것 역시 확인할 수 있었다(Hancock, P.J., 2002). 지하수 중속 생태환경의 지하수와 지표수의 혼합 정도와 영양물질, 유기물질은 다양한 하천 기저의 지형과 공극률에 영향을 받는다(Boulton, A.J., 1998). 하천 바닥의 공극률이 크게 되면 혼합구간은 공간적으로 확장이 되며(Fuss, C.L. and Smock, L.A., 1996), 질산성질소로 오염된 지표수는 확장된 혼합구간을 이동하는 과정에 의해 저감됨을 확인하였다(Gilliam, J.W., 1994). 하천 기저 토양의 물리적 특성에 따라 혼합구간의 깊이가 달라질 수 있으며 이러한 요인들은 기본적으로 지하수 중속 생태계의 생지화학적 구조와 기능에 변화를 일으킨다(Chamber, P.A., 1994).

본 연구에서는 질산성 질소로 오염된 하천의 지하수 중속생태 환경의 수문 - 생태학적 특성을 조사, 분석하였다. 질산성 질소로 오염된 지표수에 의해 진행되는 지하수 중속 생태환경의 수문학적 특성을 파악하기 위해 연구지에 소형 관정을 설치하여 지하수 유출 및 지표수의 유입 상황을 측정하였고, 지표수와 깊이별 혼합수의 질산성 질소 농도 그리고 산화환원 전위차를 비교 분석하였으며, 마지막으로 지하수 중속 생태 구간의 토양을 깊이별로 채취하여 서식하는 토착 미생물의 밀도를 측정하고, PCR - Cloning 방법(Mclaren, A., 2000)을 통해 토착 미생물을 확인하였다.

2. 연구지역

연구지역은 경기도 파주시에 위치한 문산천으로 문산읍, 광탄면, 월릉면, 도내리, 백석리, 덕을리를 포함하는 유역면적 184km²의 국가하천이다(그림1). 문산천은 경기도 북부에 위치하고 있어

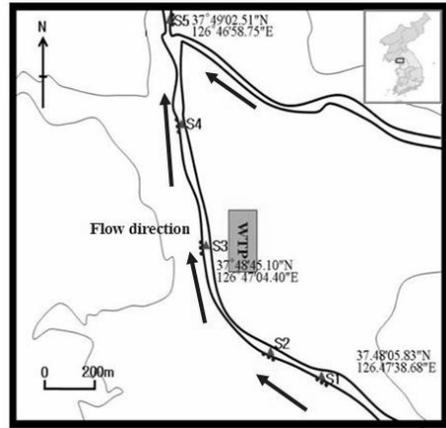


그림 1. 연구지역 및 시료채취 지점

타 유역에 비하여 비교적 유역의 개발이 덜 되었기 때문에 자연하천의 특성을 잘 나타내고 있을 것으로 판단되었으며, 자연하천에서의 지하수 중속 생태환경의 특성을 파악하기에 적합한 하천이다. 문산천 유역은 겨울철은 대륙성 기후특성을 나타내고 여름철은 해양성 기후특성을 나타낸다.

문산천 유역의 대부분은 호상편마암으로 기저층을 이루고 있으며, 본류 하류구간 일부에 층적층 부정합이 나타나고, 이러한 암반층은 풍화에 약한 편이어서 낮고 평탄한 지형을 이루고 있다. 표고별 면적분포를 살펴보면, 표고 100m 이상이 40%이고, 표고 100m 이하가 60%이다. 그리고 문산천 하구지점에서의 평균고도는 102.2m이며, 유역평균경사는 24.3%로 다소 경사가 급한 편이다. 전체적으로 볼 때 하상경사는 상류에서 매우 급한 경사를 보이며, 중류지역은 하상경사가 복잡적으로 나타났으며, 하류는 완만한 경사를 나타낸다. 또한 문산천은 중규모의 하천으로 상류, 중류, 하류의 특성이 모두 한 하천에서 나타나고 있는 하천이다. 하천의 상류, 중류, 하류는 하상재료를 비롯해 하도특성이 다르다. 상류역의 하상재료는 자갈을 포함한 굵은 모래 하상재, 중류역은 굵은 모래 하상재, 하류역은 중사 이하의 하상재료 구성되어 있다. 본 연구는 문산천의 중류역과 하류역에서 이루어 졌으며, 특히 중류역에는 파주시 위생처리시설이 위치하여 축산폐수 및 인분을 처

리하여 연구지로 직접방류하고 있으며 축산시설과 논, 밭이 하천을 따라 위치하고 있다. 연구지역은 위생처리시설에서 방류하는 방출수, 인근 축산시설의 축분 및 농업지역의 과다한 질소질 비료 사용으로 인한 지표수오염 및 지하수 오염이 동시에 진행되고 있다.

3. 연구방법

3.1 수리지질학적 조사방법

지하수 종속 생태환경의 수리지질학적 특성을 파악하기 위해 S1~S5, 다섯 지점에서 지름 2.54cm의 PVC관을 사용, 소형 관정을 설치하였다(그림1). 관측지점에 10cm, 20cm, 30cm의 깊이 별로 2008년 8월, 9월, 11월 3차례에 걸쳐 지하수위를 측정하였다(그림2).

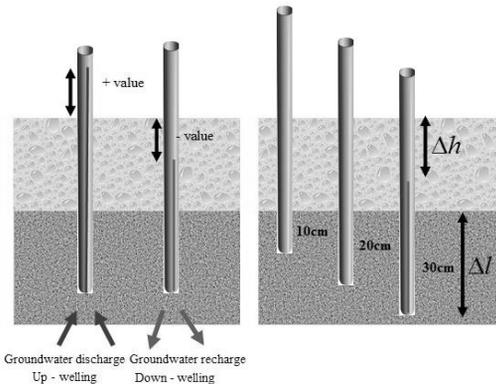


그림 2. 소형 관정 설치

측정값을 이용하여 하천 바닥에서의 깊이별 수직적 수두구배, ∇H_z 를 식(1)을 이용하여 계산하였다. 이 값을 통해 지하수의 유출 및 지표수의 유입의 방향성을 확인하였다.

$$\nabla H_z = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (1)$$

여기에서, Δh 는 하천과 지하수의 수위차이고, Δl 은 하천 바닥과 소형 관정이 설치된 지점의

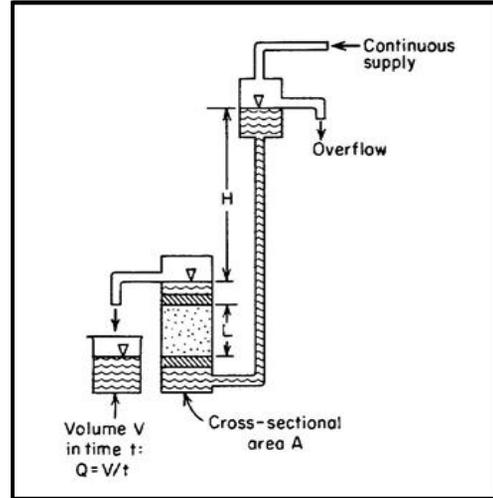


그림 3. 정수위 시험법 (KS F 2322)

고도차를 나타낸다. 혼합수 유동률(hyporheic water flux)은 Darcy의 법칙을 이용하여 정량적으로 추정할 수 있다.

$$\text{Hyporheic water flux} = K \nabla H_z \quad (2)$$

K는 수리전도도로서, 본 연구에서는 하상 퇴적물의 토양을 채취하여 수리전도도 측정 실험 및 Hazen 경험식을 이용하여 그 값을 추정하였다(표2).

흙의 투수계수를 구하는 방법은 실내투수시험법과 현장투수시험법으로 구분할 수 있다. 실내투수시험 중 수위를 주는 방법에 따라 정수위 투수시험(constant head permeameter)과 변수위 투수시험(falling head permeameter)이 있는데, 일반적으로 토양의 특성에 따라 위의 표준시험법을 선택적으로 이용한다. 연구지 토양의 수리전도도는 정수위 시험방법(KS F 2322)을 사용하여 구하였다(그림3). 정수위 투수시험에 대한 계산식은 식(3)과 같다.

$$K = - \frac{Q \cdot L}{H \cdot A} = - \frac{Q}{i \cdot A} \quad (3)$$

여기서, Q는 유량을 의미하며, 유입유량(Q_{in}) 유

표 1. Hazen 경험식의 상수 C 값 (Fetter, C.W., 2001)

| Mean Grain Size | Sorting | C (dimensionless) |
|------------------------|-----------------------------|-------------------|
| very fine to fine sand | poorly to moderately sorted | 40 ~ 80 |
| medium sand | well sorted | 80 ~ 120 |
| coarse sand | poorly sorted | 80 ~ 120 |
| coarse sand | well sorted | 120 ~ 150 |

표 2. 수리전도도

| Point | 수리전도도 (cm/s) | |
|---------|--------------|-----------|
| | 수리전도도 측정 실험 | Hazen 경험식 |
| S1-10cm | 0.64 | 1.47~1.84 |
| S1-20cm | 0.65 | |
| S1-30cm | 0.64 | |
| S2-10cm | 0.23 | 4.32~5.40 |
| S2-20cm | 0.23 | |
| S2-30cm | 0.22 | |
| S3-10cm | 0.84 | 2.54~3.17 |
| S3-20cm | 0.81 | |
| S3-30cm | 0.82 | |
| S4-10cm | 0.76 | 1.47~1.84 |
| S4-20cm | 0.76 | |
| S4-30cm | 0.75 | |
| S5-10cm | 0.68 | 0.77~1.15 |
| S5-20cm | 0.81 | |
| S5-30cm | 0.79 | |

출유량(Qout)의 평균을 사용하였다. Hazen 경험식은 기질의 입도 분포와 분급 특징과 관계있는 상수계수를 이용하여 수리전도도를 추정하는 방법이다. Hazen 추정방법(Hazen, A., 1892)은 식(4)와 같다.

$$K = C(d_{10})^2 \quad (4)$$

여기서, C는 입자 분급과 관계가 있는 상수(표1)

이며, d_{10} 은 Hazen의 유효입경(mm), 특히 누적 입도 분포곡선에서 10%일 때의 입경을 의미한다.

3.2 화학분석

지표수 및 인근지하수 그리고 지하수 종속 생태 환경의 깊이 별 화학분석을 위하여 1000ml 폴리프로필렌 재질의 채수병을 이용하여 시료를 채취했으며, 채취된 시료는 TOC, T-N, T-P, Na, Mg, Al, K, Ca, Mn, Fe, Cl, F, NO₃-N, PO₄, SO₄, HCO₃를 측정 하였다. 질산성 질소의 측정을 위해 FIAstar5000 및 이온전극을 이용하였으며, ORP, pH, 온도, EC는 휴대용 YSI556을 이용하여 측정하였다.

3.3 생물학적 방법

지하수 종속 생태 환경 구간에 서식하는 토착 미생물 확인을 위하여 현장의 토양을 깊이 별로 채취하여 실험실에서 PCR-Cloning 방법을 이용, 자동 DNA 서열분석기(ABI 3730 XL)를 사용하여 채취한 토양에 서식하는 토착 미생물의 DNA의 서열을 분석하였다. 분석된 서열로부터 NCBI database를 이용하여 미생물을 찾았다. 또한 UV-VIS Spectrophotometer(AS)을 이용하여 시료의 미생물 세포 밀도를 측정하였다.

4. 자료해석

4.1 지하수 종속 생태환경의 깊이에 따른 수직 흐름 변화양상 및 혼합수 유동률

지하수 종속 생태환경에서의 지하수의 이동방향을 통해 지하수유출과 유입의 상태를 확인할 수 있었다(표3). 수직 수두구배는 하천바닥 10cm 깊이가 지점에서 20cm, 30cm 깊이에 비해 상대적으로 크게 계산되었는데, 이는 하상재료가 수직방향으로 다양하게 분포하고 있기 때문이다. 또한 혼합수 유동률은 9월, 11월의 유동률에 비하여 8월에 전반적으로 크게 나타났다. 이는 여름철에 강수량이 집중하는 우리나라 기후의 특성이 하천의 유량에 영향을 미치고 있기 때문이며, 동시에 문

산천의 종류와 하류에서 다르게 나타나는 하상경사 및 하상재료의 영향으로 해석할 수 있다. 특히 지하수 종속 생태환경에서의 혼합수 유동률은 하천의 지형적인 특징인 하상경사 및 하상재료에 크게 영향을 받는데, 지하수의 유출이 일어나는 하천 종류의 연구지점 S1과 S2의 경우, 하상경사 및 하상재료가 자연하천과 연계된 지하수 종속 생태환경을 통하여 지하수의 함양이 일어나는 연구지점 S3, S4, S5 지점과는 다른 하도특성을 나타내기 때문에 판단된다.

표 3. 수직적 수두구배 (∇H_z)

| Point \ Depth | 10 cm | | | 20 cm | | | 30 cm | | |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Aug. 10.2008 | Sep. 10.2008 | Nov. 23.2008 | Aug. 10.2008 | Sep. 10.2008 | Nov. 23.2008 | Aug. 10.2008 | Sep. 10.2008 | Nov. 23.2008 |
| S1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.35 | 0.25 | 0.1 | 0.06 | 0.03 | 0.03 |
| S2 | 0.2 | 0.1 | 0.3 | 0.2 | 0.05 | 0.05 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| S3 | -0.1 | -0.1 | -0.1 | -0.05 | -0.05 | -0.05 | -0.06 | -0.03 | -0.03 |
| S4 | -0.1 | -0.1 | -0.1 | -0.1 | -0.05 | -0.05 | -0.13 | -0.06 | -0.03 |
| S5 | -0.5 | -0.1 | -0.1 | -0.5 | -0.06 | -0.05 | -0.4 | -0.03 | -0.03 |

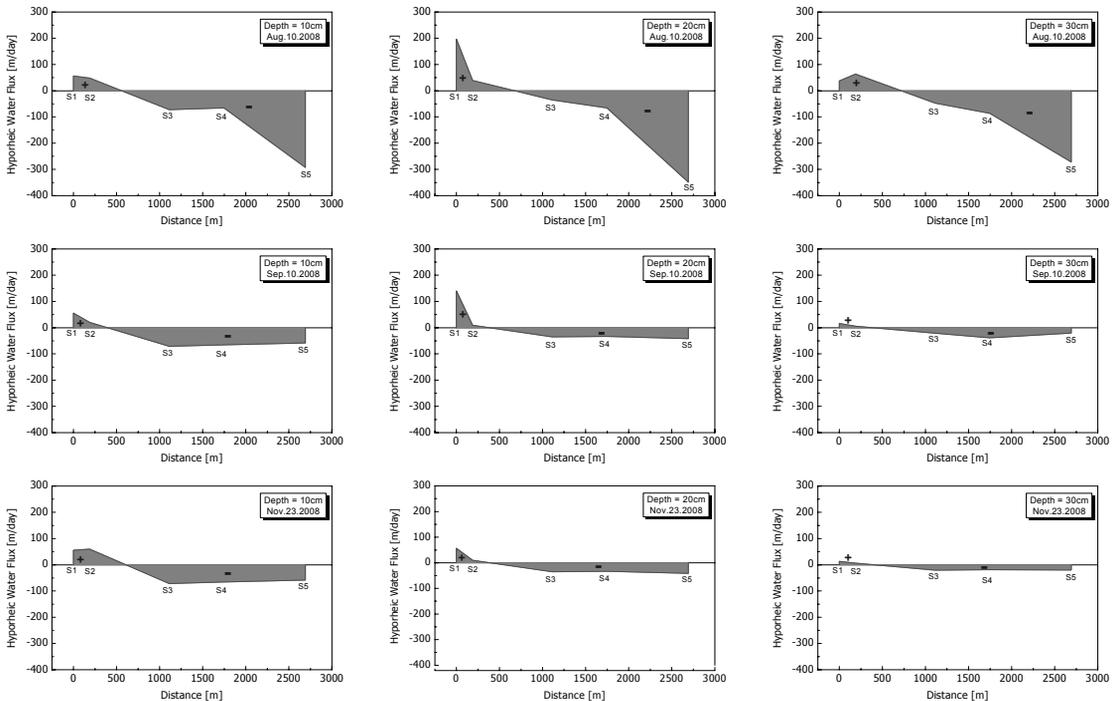


그림 4. 지하수 종속 생태환경의 혼합수 이동 양상 및 유동률

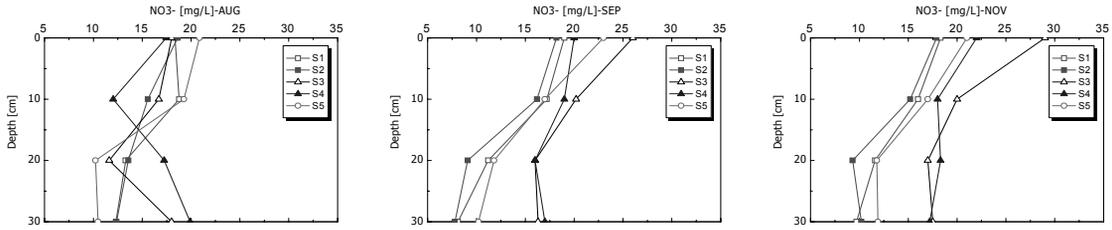


그림 5. 지하수 중속 생태환경의 깊이별 질산성 질소의 농도

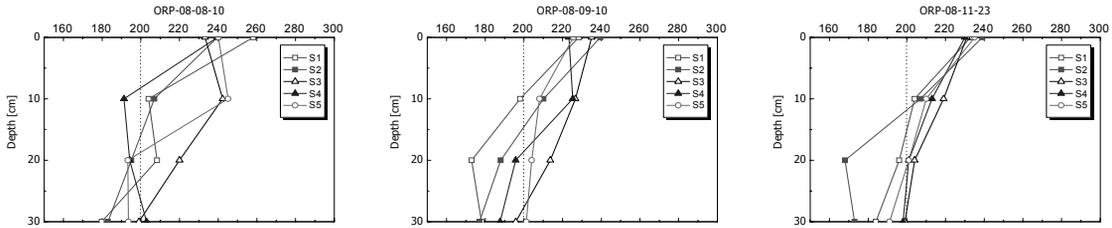


그림 6. 지하수 중속 생태환경의 깊이별 산화환원 전위차

하지만 하천바닥에서 10cm 깊이 지점의 혼합수 유동률은 계절에 상관없이 크게 측정되었는데 (그림4), 이는, 하천의 종류에서 하류를 횡 방향 (하도경사) 및 종 방향(하도재료)으로 연구한 결과, 종 방향 인자가 자연하천과 연계된 지하수 중속 생태환경의 혼합수 유동률에 미치는 영향이 지대함을 확인할 수 있다.

4.2 지하수 중속생태구간 혼합수의 화학적 특성

연구지의 지하수 중속 생태 환경의 깊이별 계절에 따른 혼합수의 화학분석 결과, 기타 항목에서 특이성을 발견하기 어려웠으나, 질산성 질소의 측정 농도 결과, 9월과 11월의 경우 지하수가 유출되고 있는 S1, S2의 지점의 경우 질산성 질소의 농도가 지표수가 유입되고 있는 S3, S4, S5의 지점 보다 낮게 나타났다. 또한 혼합수의 유동률이 상대적으로 큰 값을 나타내는 8월의 질산성 질소농도는 연계구간을 따라 오염물질의 농도가 비슷한 반면, 혼합수의 유동률이 작은 9월 11월의 질산성 질소는 연계구간의 깊이가 깊어짐에 따라, 오염물의 농도가 감소되는 경향을 보였다.

지하수 중속 생태환경을 통하여 지하수의 유출

이 일어나는 S1, S2 지점의 경우 혼합구간의 깊이가 깊어질수록(그림6) 산화환원 전위차가 작아지는 경향을 보이고 있으며, 질산성 질소의 농도 (그림5) 역시 산화환원 전위차 경향성을 따르고 있음을 보여준다(Stolp, 1993). 또한 8월의 경우 지하수 중속 생태환경을 통과하는 이동수의 유동률이 9월, 11월의 경우 보다 크게 조사되었는데, 지하수 중속 생태환경에서 특히 지하수의 특성이 우세한 S1, S2 에서 높은 산화환원 상태가 연계구간 깊이 20cm에서도 나타났다. 이는 이동수의 유동률이 지하수 중속 생태환경의 산화환원 전위차에 영향을 미치고 있음을 유추할 수 있다.

4.3 지하수 중속 생태환경의 깊이별 미생물의 밀도 변화

연구지 토양 시료에 서식하는 세포를 분리한 후 US-VIS Spectrophotometer(AS)을 이용하여 시료의 밀도를 측정하였다. 결과, 지하수가 지하수 중속 생태환경을 통과하여 유출되는 S1, S2의 지점의 경우 8월, 9월, 11월 측정 결과 계절에 따른 세포 밀도의 변화가 미비하지만 지표수가 지하수 중속 생태환경을 따라 유입되는 S3, S4, S5 지점의 경우 S1, S2 지점에 비해 추출된 세포의

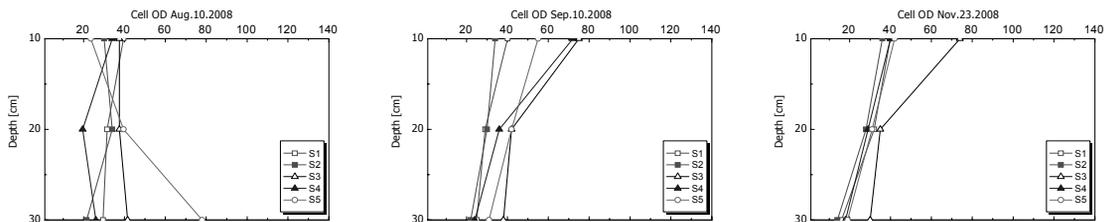


그림 7. 지하수 중속 생태환경의 깊이별 토양에서 추출한 미생물의 밀도

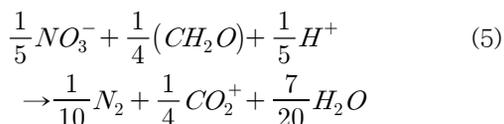
표 4. 채취한 토양에서 분리한 주요 탈질 미생물

| Point | Identified by 16SrDNA | Homology (%) |
|-------|-------------------------------------|--------------|
| S1 | Bacillus cereus | 98 |
| S2 | Pseudoxanthomonos sp. M 1-7 | 100 |
| S3 | Pseudomonas mephitica | 99 |
| S4 | Bacllus sp. GD 1505 | 97 |
| S5 | Pseudomonas marginalis strain JH 13 | 99 |

양이 변이하는 경향이 나타났다(그림7). 그리고 추출된 미생물 세포의 밀도를 통해 지하수유출과 지표수의 유입이 많은 8월의 경우 지하수 중속 생태환경의 깊이가 깊어질수록 추출 밀도가 늘어나는 것을 확인하였는데, 이런 결과는 지하수 중속 생태환경을 통과하는 지하수의 유출 및 지표수의 유입의 양이 적었던 9월과 11월과는 대조적임을 알 수 있었다.

4.4 현장 토양에서 분리된 주요한 탈질 미생물

탈질산화는 질산염의 환원에 중요하고도 특별한 경우로서, 대개 질소 가스를 생성하고 pH 7에서 전자 1몰에 대한 반응은 다음과 같다.



탈질산화는 자연에서 일어나는 주요한 과정이며, 이것은 고정된 질소가 다시 대기로 돌아가는 메커니즘이다. 이는 박테리아의 작용에 의해 질산

염과 아질산염이 N2O와 NO를 생성하면서 이루어진다. 탈질산화 과정은 잘 알려진 대로 혐기성 박테리아에 의해 이루어지는 대사 과정이지만 산소가 있으면 산소를 사용하고 산소가 없을시 산화제로 대체물질을 이용하는 조건적 박테리아에 의해 정도의 차이가 있지만 탈질산화가 일어난다. 현장 토양에서 분리한 여러 미생물 중에는 탈질산화가 가능한 조건적 박테리아가 존재하였으며, 모든 토양 채취 지점에서 조건적 탈질미생물이 발견되었다(표4).

5. 결 론

본 연구에서는 지하수 중속 생태환경에서 수문-생태학적 특성조사 및 분석을 위하여, 수리지질학적 방법 및 생화학적 분석에 근거하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 지하수 중속 생태환경에서 수직 혼합수의 유동률은 계절에 따라 달라지며, 혼합수의 유동률이 클수록 지하수 중속 생태환경의 산화환원 전위 차이에 영향을 미친다.
2. 지하수 중속 생태환경에서 깊이별 산화환원

전위 차이는 질산성질소의 농도의 변화와 유사한 경향성을 나타냈다.

3. 수직 이동 지하수의 방향성은 토착 미생물의 밀도에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.
4. 이상의 연구 결과 지하수 중속 생태환경에서 서식하는 토착 미생물 밀도와 오염물질의 농도변화는 지하수 중속 생태환경의 수리 지질학적 특성인 수직적 지하수 흐름 방향 및 혼합수 유동률에 영향을 받고 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 토양 지하수오염 방지 기술 개발 사업인 GAIA 과제의 지원과 2006년(교육인적자원부) 학술진흥재단의 지원(KRF-2006-532-C0014)을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

Boulton, J.B. (1998) The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers, *Annu.Rev.Ecol.Syst.*, Vol. 2, pp. 59-81.

Brunke, M. and Gonser, T. (1997) The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater, *Freshwater Biology*, Vol. 37, pp. 1-33.

Chamber, P.A. (1994) Nutrient dynamics in riverbeds-the impact of sewage effluent and aquatic macrophytes, *Water Res.*, Vol. 28, pp. 453-464.

Fetter, C.W. (2001) *Applied hydrogeology*,

Prentice Hall, New jersey. USA

Fuss, C.L. and Smocke, L.A. (1996) Spatial and temporal variation in microbial respiration rates in blackwater stream, *Freshwater Biology*, Vol. 36, pp. 339-349.

Gilliam, J.W. (1994) Riparian wetlands and water quality, *Journal of Environmental quality*, Vol. 23, pp. 896-900.

Hancock, P.J. (2002) Human impacts on the stream-groundwater exchange zone, *Environmental Management*, Vol. 6, pp. 763-781.

Hazen, A. (1892) Some physical properties of sand and gravel, with special reference to their use in filtration, In *Massachusetts State Board of Health, 24th Annual Report*, Boston, Mass., pp. 539-556.

Mclaren, A. (2000) Cloning: Pathways to pluripotent future, *Science*, Vol. 288, pp. 1775-1780.

Orghidan, T. (1959) Ein neuer lebenstraum des unterirdischen wassers, der hyporheische biotop, *ArchivfurHydrobiologi.*, Vol. 55, pp. 392-414.

Stolp, H. (1993) *Microbial Ecology; Organisms, Habitats, Activities*, Cambridge University Press, Cambridge.

Storey, R.G. (1999) Perspectives and predictions on the microbial ecology of the hyporheic zone, *Fresh water Biology*, Vol. 41, pp. 119-130.

- 논문접수일 : 09년 08월 05일
- 심사의뢰일 : 09년 08월 10일
- 심사완료일 : 09년 10월 20일