

# 농촌지역 지하수-지표수 혼합구간에서 수리, 지구화학 및 생물학적 기작 사이의 편상관분석

김희정\* / 이진용\*\* / 이강근\*\*\*

## Partial Correlation between Hydrological, Geochemical and Microbiological Processes in Groundwater-stream Water Mixing Zone in a Rural Area

Heejung, Kim\*\* / Jin-Yong, Lee\*\* / Kang-Kun, Lee\*\*\*

**요지** : 생물 활동이 활발한 지하수-지표수 혼합구간에서 일어나는 생지화학 기작에 대한 관심은 지대하다. 지표 수로부터 기인한 오염물질은 지하수-지표수 혼합구간을 통과할 때 이 구간의 특수한 환경 아래에서 생지화학 기작을 통해 오염물질이 제거되거나 자연저감 되기 때문이다. 본 연구의 목적은 혼합구간의 수직교환 흐름 유동률이 생지화학 과정에 미치는 영향의 상관성을 분석하는 것이다. 이를 위해 깊이별로 설치한 소형 관정을 통해 수직 수두구배를 측정하여 혼합구간의 수직 이동수의 방향을 조사하였으며, 연구지 토양시료에서 서식하는 미생물의 확인을 위해 중합효소연쇄반응 및 클로닝 방법이 수행되었다. 편상관 분석을 통해 수직 교환 흐름 유동률, 질산성 질소의 농도 그리고 미생물의 활성이 서로 영향을 주고 있음을 확인하고자 하였다. 그 결과 수직 흐름 교환 유동률이 질산성 질소의 농도 그리고 미생물의 활성 및 생지화학 기작에 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 본 연구를 통해 수직 흐름 교환 유동률, 오염물의 농도 그리고 미생물의 활성을 통해 지하수-지표수 혼합구간의 생지화학 기작을 예상할 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어** : 지하수-지표수 혼합구간, 편상관 분석, 수직유동, 질산성 질소농도, 미생물 활성

**Abstract** : Biogeochemical processes in groundwater-stream water mixing zone are recently of great interest because biodegradation and natural attenuation of aquatic contaminants may occur through the processes. The objectives of this study are to investigate the hydrologic and biogeochemical processes at the groundwater-stream water mixing zone through which surface water-driven nitrate may be naturally attenuated, and to examine the effect of the vertical flow exchange flux on biogeochemical processes using correlation analysis. To examine the direction of vertical water flow in the zone, vertical hydraulic gradients were measured at several depths using mini-piezometers. Microbial populations in soil samples of the zone were also analyzed by means of the polymerase chain reaction (PCR) and Cloning methods. In addition, partial correlations among vertical flow exchange, nitrate concentration and microbial activity was investigated to examine their mutual interaction. The results showed the significant interaction among the three parameters, resulting in natural attenuation of nitrate. This study showed an example of the biogeochemical function of groundwater-stream water mixing zone, which can be predictable from the examination of the interaction among microbial activities, concentration of contamination and vertical flow exchange flux. temperature show a significant difference in adjacent streambed, Also, the results shows that distribution of temperature was more affected by groundwater direction than intensity of flux

**keywords** : Groundwater-stream water mixing zone, partial correlation analysis, vertical water flow, nitrate concentration, microbial activity

+ Corresponding author : kkleee@snu.ac.kr

\* 정회원 · 서울대학교 지구환경과학부 박사과정

\*\* 정회원 · 강원대학교 지질학과 부교수

\*\*\* 정회원 · 서울대학교 지구환경과학부 교수

## 1. 서 론

우리나라의 농촌지역에서는 농약 및 질소질 비료 사용으로 인하여 지표수 및 지하수 오염이 진행 중(Min et al., 2003; Chae et al., 2004; Park et al., 2007; Chae et al., 2009; Choi et al., 2010; Choi et al., 2011)이며, 질산성질소로 오염된 지하수의 수질개선에 관한 많은 연구가 이루어졌다(Choi et al., 2007; Kaown et al., 2009; Choi et al., 2011). 오염된 지표수의 경우, 처리 및 관리의 측면에서 비교적 간단하지만, 오염된 지표수에 의해 유발된 지하수의 오염의 처리 및 관리는 막대한 비용 및 시간이 소요되는 작업이다(Freeze and Cherry, 1979). 하지만 막대한 비용과 시간이 투입됨에도 불구하고 그 정화 효율은 낮다. 따라서 지하수-지표수 혼합구간에서 발생하는 자연저감 기작을 유발하는 인자들에 대한 충분한 이해와 연구의 선행이 필요하다.

농촌지역 하천과 연계된 지하수-지표수 혼합구간은 공간적 특이성에 기반하여 다양한 생지화학 기작이 활발하게 일어난다(Appelo and Postma, 1994; Brunke and Gonser, 1997; Storey, 1999; Capelle, 2001; Hancock, 2002; Hyun et al., 2011). 혼합구간의 깊이에 따라 용존산소 및 산화환원 전위가 변화하며, 온도 및 전기 전도도 그리고 수소이온 농도 역시 지하수와 지표수에 영향을 받고 있다. 여기서 중요한 점은 혼합구간에 지하수 혹은 지표수가 얼마나 영향을 미치는 정도에 따라 각각의 현장 물리화학적 특성들은 이들은 반영하여 변화한다는 사실이다(Chamber, 1994; Gilliam, 1994; Kim et al., 2012). 지하수-지표수 혼합구간은 다양한 생물체들의 서식지이며, 오염물의 자연저감이 일어나는 공간으로 수리-생태학적으로 분명 중요한 구간이다. 본 연구에서는 혼합구간의 수직 교환 흐름 유동률이 생지화학 과정에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 지하수-지표수 혼합구간에서 생지화학 기작을 유발하는 인자들 사이의 관련성과 방향성 정도를 검증하기 위해 통계분석을 실시하였다. 이를 위해 두 변인

에 영향을 미치는 제 3의 변인을 통제된 상태에서 얻어진 두 변인 간의 상관관계를 알 수 있는 편상관분석을 이용하여 검증하였다.

## 2. 연구지역

연구 지역은 경기도 파주시와 양주시를 흐르는 문산천으로 한강 권역의 한강 수계에 속하며, 한강의 제 2지류이다. 문산천은 국가하천 그리고 지방하천으로 나누어져 있으며, 국가하천은 유로연장 30.14 km, 하천연장 11.6 km, 유역면적 183.88 km<sup>2</sup>, 지방하천은 유로연장 18.54 km, 하천연장 16.15 km, 유역면적 66.26 km<sup>2</sup>이다. 지방하천은 양주시, 백석읍, 영장리에서 시작하여 파주시 광탄면 창만리에서 국가하천으로 바뀌며, 이후 파주읍, 광탄면, 월롱면의 경계를 이루면서 파주시 문산읍에서 임진강과 합류한다. 이 일대는 홍수 취약 지구로 오랜 시간 동안 토사가 쌓여 썰물 때가 되어도 물이 제대로 빠져나가지 못하기 때문에 매년 홍수 때마다 수해로 피해를 입는 지역이다.

본 연구는 국가하천 문산천의 중류역과 하류역에서 실시하였으며, 이곳에는 파주시 위생처리 시설이 입지하여 인분 및 축분을 처리하여 처리수를 문산천으로 직접 방류하고 있다(그림 1). 또한 문산천을 따라 주변에 논농사 및 밭농사 지대로 토지이용을 하고 있다. 문산천의 지질은 대부분 편마암 기저층이며, 하류역에서 충적층 부정합이 나타난다. 연구지의 중류역과 하류역은 유효 토심은 깊고 배수등급은 약간 불량하며, 하상재는 중사 이하로 구성되어 있다(Hyun et al., 2011).

연구지역 기후는 우리나라 기후 특성과 유사하며, 여름철에 고온다습하고 겨울철에는 한랭 건조한 특성을 지니고 있다. 연구지역의 강수는 시간적 편차가 뚜렷하며, 연평균 강수량은 1302.9 mm이며, 2008년 7월 576.6 mm 그리고 8월 295.1 mm 로 한반도 기후의 특성을 잘 반영하고 있으며, 문산천 유역의 2008년 여름철 연평균 기온은 23℃, 겨울철 연평균 기온은 -3℃ 이다(그림 2).

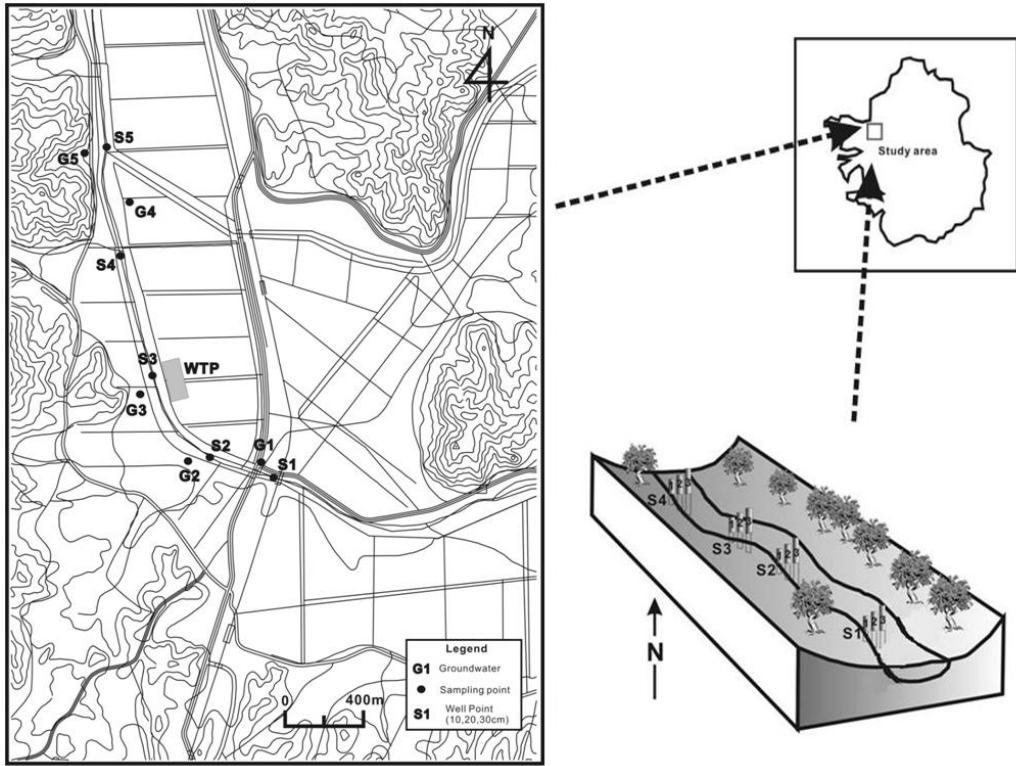


Fig. 1. The map showing location of study site (modified from Hyun et al., 2011).

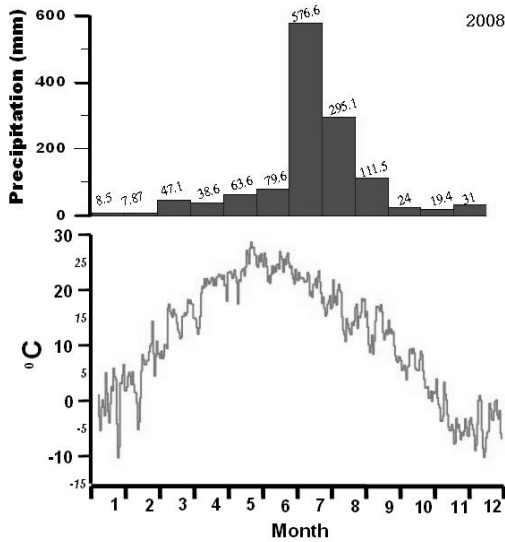


Fig. 2. Monthly precipitation and daily air temperature at the study site in 2008.

### 3. 연구방법

#### 3.1. 수리적 특성 연구방법

지하수-지표수 혼합구간의 수리적 특성을 파악하고자 연구지에 소형 관정을 0.1, 0.2, 0.3 m의 깊이로 S1, S2, S3, S4, S5 다섯 지점에 15개를, 그리고 2008년 8월, 9월 그리고 11월 세 차례에 걸쳐 총 45의 소형관정을 설치하였다(그림 3).

소형관정을 현장에 설치함으로써 지하수-지표수 혼합구간에서의 혼합수의 수직 이동률 및 지하수의 유출 및 지표수의 유입의 방향성을 확인하고자 하였다(Hyun et al., 2011; Kim et al., 2012). 설치한 관정에서 측정된 값을 이용하여 하천바닥에서 0.1, 0.2, 0.3 m의 깊이별 수직 수두구배  $\nabla H_z$ 를 (1)의 식을 이용하여 계산하였다.

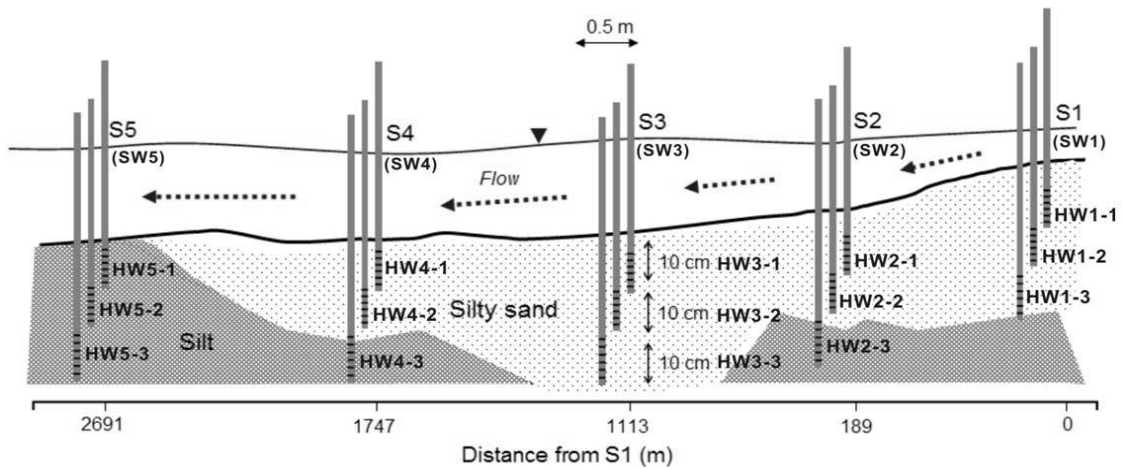


Fig. 3. Spatial and vertical distribution of the monitoring points (modified from Kim et al., 2012).

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

여기서,  $\Delta h$ 는 하천과 지하수 사이의 수위차이며,  $\Delta l$ 은 하천바닥에서 관정이 설치된 지점의 고도차이다. 혼합구간의 혼합수 유동률은 Darcy 법칙을 이용하여 정량적으로 추정하였다.

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

K값은 현장에서 채취한 하상 퇴적도양의 수리전도도이며 실험실에서 수리전도도 측정 실험 및 Hazen 경험식을 이용하여 그 값을 추정하였다. 흙의 투수성을 구하는 방법에는 실내 투수시험법과 현장 투수시험법이 있다. 투수시험에는 수위의 주어진 방법에 따라 정수위 투수시험 및 변수위 투수시험이 있다. 이 연구에서 이용한 수리전도도 측정 실험은 정수위 투수시험을 통해 추정하였다. 정수위 투수시험은 흙의 수리전도도를 결정하는데 쓰이는데, 일정한 지름과 길이를 가진 시료를 일정한 시간 내 침투되는 수량을 측정하여 수리전도도를 추정하는 방법이다. 모정수위 투수시험은 수리전도도가 큰 흙에 이용되는 방법으로, 하상에서 채취한 모래질의 시료의 수리전도도 추정 방법으로 적합하다.

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

Hazen 추정방법(Hazen, 1892)은 다음과 같다.

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

식(4)에서 C는 입자 분급과 관계가 있는 상수이며,  $d_{10}$ 은 Hazen의 유효입경 (mm)을 의미한다.

또한 채취한 시료의 토양중량 및 공극률을 추정하기 위하여 자연시료 중량의 측정, 건조, 중량 재측정 과정을 거쳐, 건조 이전의 토양시료의 중량과 건조 이후 토양 중량의 비율을 통해 토양 중량을 측정하였다.

### 3.2. 지구화학적 연구방법

지하수-지표수 혼합구간의 깊이별(0.1, 0.2, 0.3 m)로 채취한 간극수의 화학분석을 위하여 250 ml PVC재질의 채수병을 이용하여 시료를 채취하였다. 현장에서는 온도(Temperature), 산화환원전위(ORP), 전기전도도(EC), 용존산소(DO) 그리고 수소이온농도(pH)를 다용도 측정기(YSI556, USA)를 이용하여 측정하였다.

Table 1. Hydro-geochemical measurements and their applications

Parameters	Aspects of study
NO <sub>3</sub>	Indication of water contamination
pH, Temperature	Definition of controlling mineral equilibria
ORP, dissolved O <sub>2</sub>	Redox system, oxic and anoxic state

수소이온농도는 대수층 광물과 물 사이의 평형 상태를, 산화환원전위와 용존산소는 연구지가 산화 환경인지 환원환경인지를 알려주는 인자이다(표 2). 질산성질소(NO<sub>3</sub>) 분석용 시료는 현장에서 필터링을 후 채수병에 채취하여 실내 분석 전까지 4℃를 유지하여 실험실로 운반하였다. 그 후 이온크로마토그래피(IC)를 이용하여 분석을 시행하였다.

### 3.3 미생물학적 연구방법

깊이별로 채취한 혼합구간의 토양 시료는 FastDNA SPIN kit (Qbiogene, Carlsbad, CA, USA)를 이용하여 추출하였다. 또한 혼합구간의 자연적인 미생물의 토착 상태를 확인해보고자 주사현미경을 이용하여 토양 시료 사진을 찍어 보았다. 추출한 DNA를 주형으로 하여 증폭하기 위한 PCR(Polymerase Chain Reaction)을 수행하였다. 16S rDNA를 증폭하기 위해 사용된 프라이머는 27F(5'-GAGTTTGATCCTGGCTCAG-3')(Lane, 1991), 338F(5'-CTCCTACGGGAGGGAGGCAGCAGT-3')(Muyzer et al., 1993), 518R(5'-GTATTA CCGCGGCTGCTG-3')(Muyzer et al., 1993), 1492R(5'-AAGGAGGGGATCCAGCC-3')(Muyzer et al., 1993), 1522R(5'-AAGGAGGTGATCC ANCCRCA-3')(Field et al., 1997), T7(5'-TAA TACGACTCACTATAGGG-3')(Promega), SP6(5'-ATTTAGGTGACACTATAGAA-3')(Promega) 이다.

PCR 반응 조건은 첫 번째 반응에서 94℃에서 8분, 그 다음 단계에서는 94℃ 30초, 60℃에서 30초, 72℃에서 30초 동안 16S rDNA를 증폭하는 반응을 25번 반복하고, 마지막으로 72℃에서

8분동안 16S rDNA를 증폭한 후, 반응물을 4℃에서 보관하였다. PCR 증폭 산물은 QIA quick PCR Purification Kit (Quiagen, German)를 이용하여 정제하였다. Gene cloning 을 위해, T7과 SP6프라이머를 가지고 16S rDNA를 증폭하여 염기서열을 분석하였다. 16S rDNA의 염기서열은 BLAST와 FASTA 프로그램으로 GenBank에 있는 염기서열정보와 비교하였다.

### 3.4. 통계분석

상관분석은 두 변수 간에 얼마나 밀접한 선형관계를 가지고 있는가를 분석하는 통계기법이다. 여기에서 두 변수간의 상관관계의 강도를 상관관계라 한다. 상관관계의 분석방법에는 단순히 X와 Y 두 개의 변수가 어느 정도 강한 관계에 있는가를 측정하는 단순상관분석(simple correlation)과 3개 이상의 변수들 간의 관계에 대한 강도를 측정하는 다중상관분석(multiple correlation)이 있다.

특히 두 변수의 관계의 정도를 파악하고자 하는데 제 3의 변수가 이 두 변수 모두에 영향을 미치고 있을 때 이를 통제한 후 분석하는 방법을 편상관(partial correlation)분석이라 한다. 본 연구에서는 편상관 분석 방법을 이용하여 지하수-지표수의 수직교환 이동률이 오염물질의 농도와 토착미생물의 활성에 미치는 영향에 대해 분석하고자 하였다.

## 4. 결 과

### 4.1 수리지질학적 결과

표 1과 그림 4는 현장에서 얻은 자료와 실험실

에서 실험한 자료들을 위의 식들을 이용하여 얻은 결과를 보여주며, 아울러 현장의 수리적 특성을 반

영하는 채취 토양의 자연 상태를 고려하여 건조중량 및 공극률 역시 계산하여 얻은 결과이다.

Table 2. Hydraulic conductivity from two different methods and hydraulic properties.

Sampling point depth	Permeameter test (mean)	Hazen's empirical formula	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity
S1-10 cm	0.64	1.47~1.84	1.53	0.32
S1-20 cm	0.65		1.52	0.33
S1-30 cm	0.63		1.55	0.32
S2-10 cm	0.23	4.32~5.40	1.40	0.32
S2-20 cm	0.22		1.41	0.32
S2-30 cm	0.22		1.44	0.32
S3-10 cm	0.83	2.54~3.17	1.43	0.32
S3-20 cm	0.81		1.55	0.32
S3-30 cm	0.82		1.42	0.32
S4-10 cm	0.76	1.47~1.84	1.39	0.32
S4-20 cm	0.76		1.35	0.33
S4-30 cm	0.75		1.39	0.32
S5-10 cm	0.67	0.77~1.15	1.49	0.32
S5-20 cm	0.80		1.45	0.32
S5-30 cm	0.79		1.48	0.32

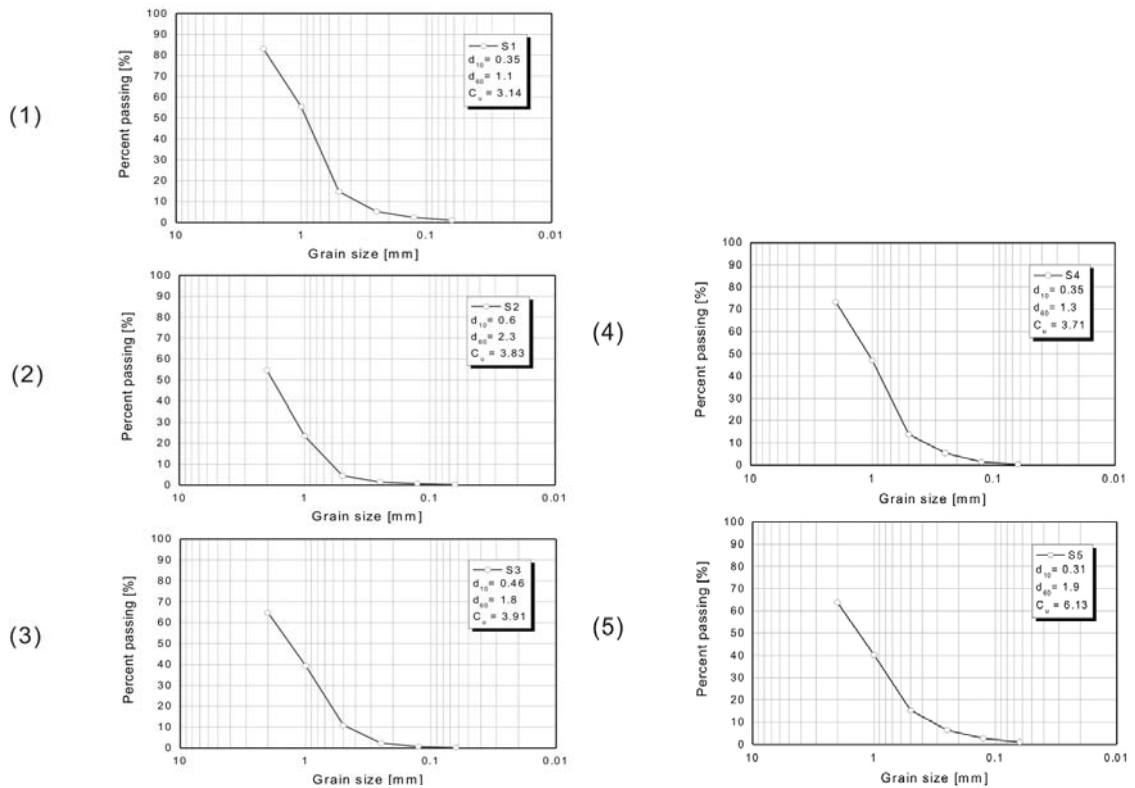


Fig. 4. Soil size distribution at S1-S5 points (1~4: well sorted, 5: poorly sorted).

혼합구간의 간극수 유동을 통해 지하수와 지표수의 이동 방향성을 확인할 수 있으며(그림 5), 2008년 8월 S5 지점에서는 다른 지점과 달리 하천 바닥으로부터 0.1, 0.2, 0.3 m 깊이에서 계절에 상관없이 지하수로의 지표수의 유입이 지속적으로 발생하고 있음을 알 수 있다.

S1 지점의 0.1 m 깊이의 8월 혼합구간의 유동률은 55.7 m/day이고, 9월 11월 측정값은 55.3 m/day 그리고 55.3 m/day 계산되었으며, 계절에 따른 유동률의 표준편차는 0.23 이다. S2 지점의 8월 9월 11월 유동률의 표준편차는 20.44, S3은 0.53, S4은 0.07 그리고 S5 지점은 135.5 이다.

시간에 따른 유동률의 변화가 가장 두드러진 지점은 S5와 S2지점이며, S4 지점의 유동률은 시간에 따른 변화가 나타나지 않았다. 8월 각 지점에서 계산된 유동률은 최대 384.2, 최소 37.3 m/day, 9월 최대 140.4, 최소 5.7 m/day, 11월 최대 71.7, 최소 6.0 m/day 이다. 이러한 유동률의 차이는 7월과 8월의 여름철 강수량에 영향을 받은 것이라 생각된다.

또한 S3 및 S4 그리고 S5 지점은 지표수가 혼합구간을 통해 지하수로 유입이 되는 지점이며, S1과 S2지점은 지하수가 혼합구간을 통해 지표수로 유출되는 지점으로 나타났다.

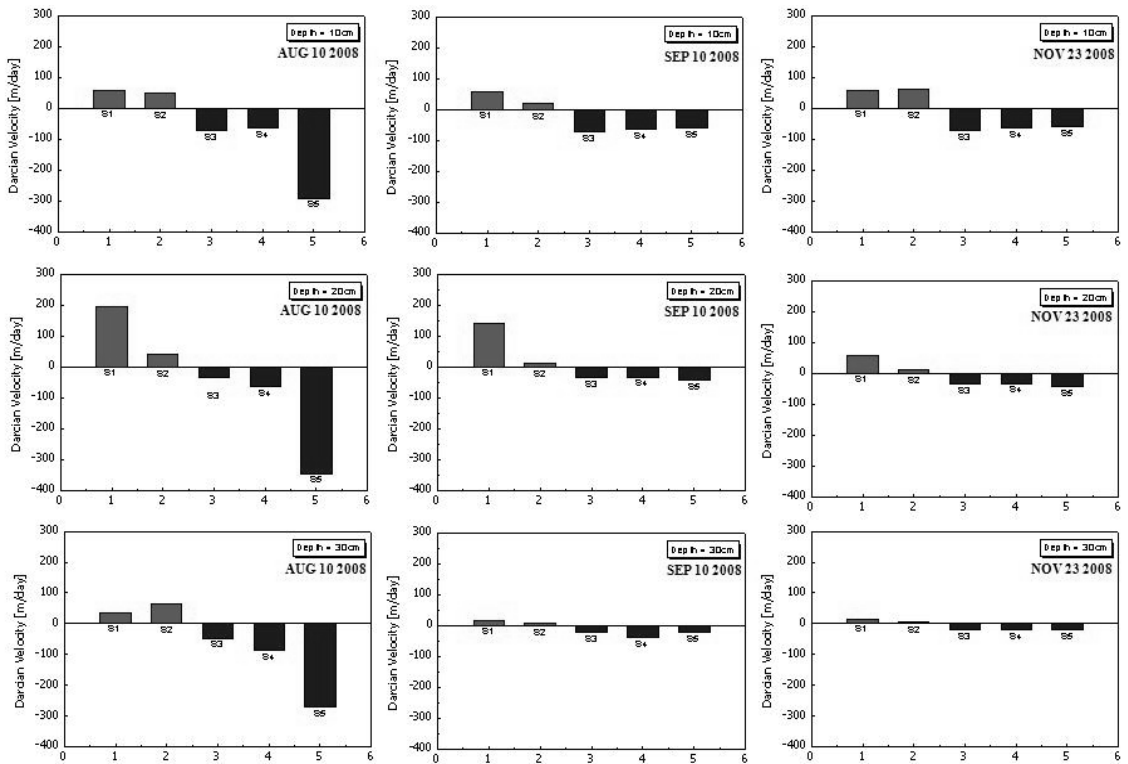


Fig. 5. Calculated Darcian velocity of different points with season.

#### 4.2. 지구화학적 결과

관측된 수소이온농도는 계절에 따라 변함없이 일정한 농도의 값(표준편차 8월 0.6, 9월 0.7, 11

월 0.6)을 나타냈다. 현장에서 측정된 용존산소는 비교적 높은 값을 나타내었는데, 이는 본 연구에서 측정된 혼합구간의 깊이가 0.1, 0.2, 0.3 m로 비교적 하천 바닥에서 깊지 않아 지표수 내의 용

존산소가 대부분 토양층 내에서 소모되지 않았기 때문에 해석한다. 용존산소는 온도와 밀접한 관계를 가진다. 용존산소의 경우 수온이 낮을수록 높아진다. 따라서 여름철 보다 겨울철의 용존산소가 높다. 하지만 본 연구에서 관측된 결과는 오히려 여름철인 8월과 9월이 겨울철인 11월에 비하

여 높은 용존산소 값을 나타냈다. 이는 여름철 집중하는 강수의 영향으로 해석한다. 혼합구간의 산화환원전위를 살펴보면, 8월 평균 204 mV, 9월 평균 206 mV 그리고 11월 평균 195 mV 로 나타났다(표 3).

Table 3. Physico-chemical parameters.

	T	EC	pH	DO	ORP	NO <sub>3</sub>
2008	℃	μS/cm		mg/L	mV	mg/L
August (n=25)						
Mean	23.2	355	7.2	6.5	204	22.2
Max	27.9	572	8.1	11.5	245	73.6
Min	14.2	222	6.2	2.7	150	0.7
Standard deviation	4.4	119	0.6	2.5	25.7	15.2
Coefficient of variation	0.2	0	0.1	0.4	0.1	0.7
September (n=25)						
Mean	22.1	367	7.2	8.5	206	15.5
Max	26.3	679	8.9	13.2	255	20.9
Min	14.5	143	6.3	2.9	123	9.9
Standard deviation	4.1	162	0.7	3.4	32.6	3.3
Coefficient of variation	0.2	0	0.1	0.4	0.2	0.2
November (n=25)						
Mean	12.3	405	7.0	5.3	195	13.2
Max	15.0	802	8.1	8.7	219	62.7
Min	10.4	254	6.1	3.0	121	2.9
Standard deviation	1.6	184	0.6	1.8	28.7	17.0
Coefficient of variation	0.1	0.5	0.1	0.3	0.1	1.3

혼합수의 화학적 유형을 파악하기 위하여 파이퍼 다이어그램을 도시하였다(그림 6). 그 결과 8월의 혼합구간의 화학적 유형은 Ca-HCO<sub>3</sub>로 나타났다. 이와 같은 유형은 일반적으로 오염의 영향을 덜 받은 천부 지하수의 수질 유형이며, 혼합구간에서 발생하는 수리적 유동 과정에서 탄산염

광물의 용해 작용을 거친 자연적인 지하수의 수질을 지시한다. 반면, 연구지의 9월과 11월에 우세한 유형은 Ca-Cl(SO<sub>4</sub>)형으로 나타났다. 이는 인위적인 오염물질로 인하여 혼합구간의 간극수가 농업활동에 의한 오염의 영향을 받은 것으로 간주된다.



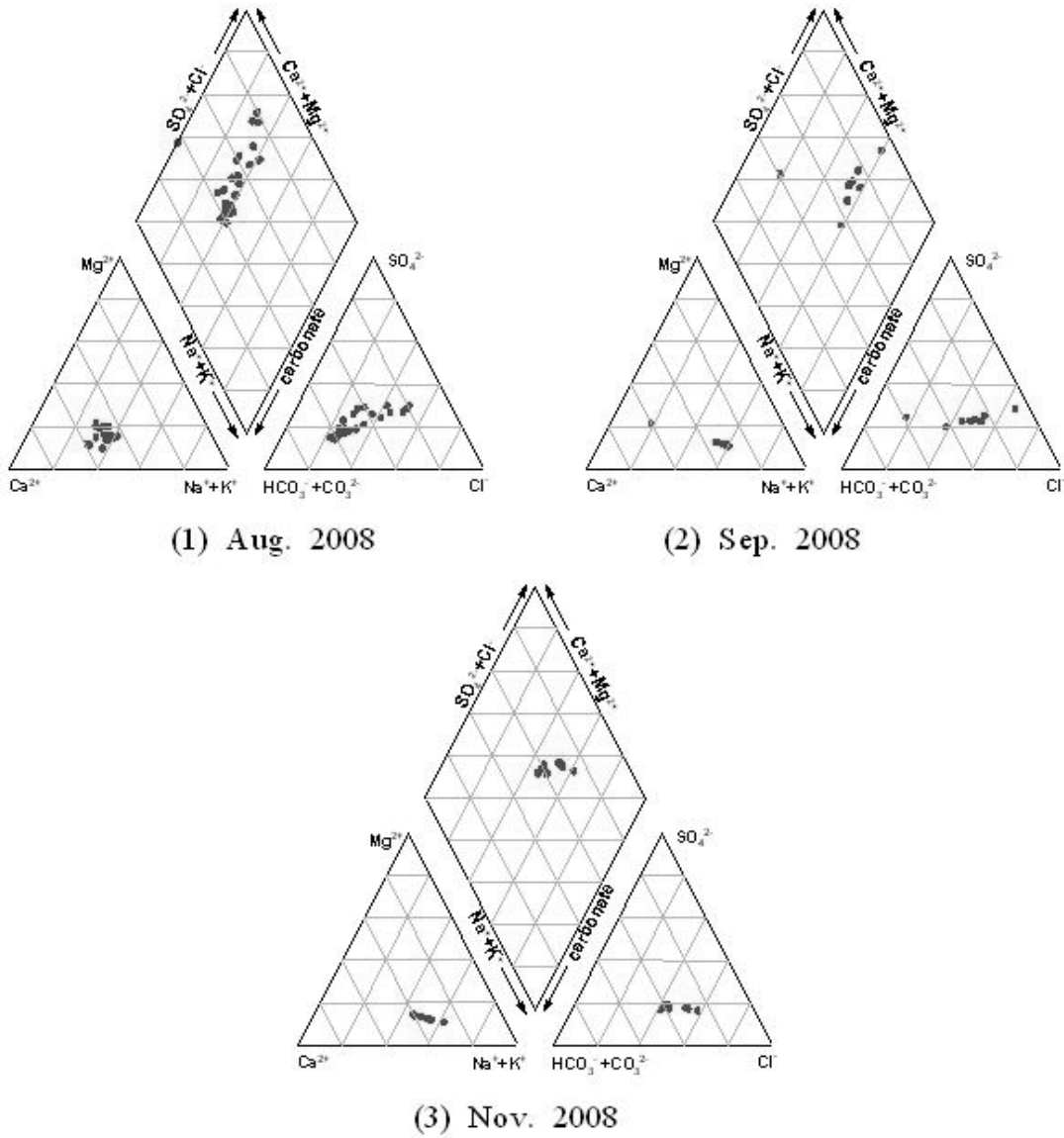


Fig. 6. Piper diagram of groundwater–stream water mixing area water of the sampling points.

질산성 질소 농도 측정 결과, 혼합구간의 0.1, 0.2, 0.3 m 깊이에 따라 감소하는 경향을 보이며, 특히 9월과 11월에 이런 경향성이 두드러진다. 하지만 혼합구간의 혼합수의 유동률이 상대적으로 크게 나타나는 8월에 이러한 경향성이 나타나지 않았다(그림 7). 이와 같이 8월의 혼합구간 깊이

별 질산성농도 그래프를 살펴보면 경향성을 살펴 보기 힘든 이유는 계절적으로 9월과 11월의 유동률을 비교하여 볼 때 8월의 유동률이 상대적으로 큰 값을 나타내며, 이러한 요인이 지하수-지표수 혼합구간에서 오염물질의 혼합을 야기하는 주요한 요인이라 생각한다.

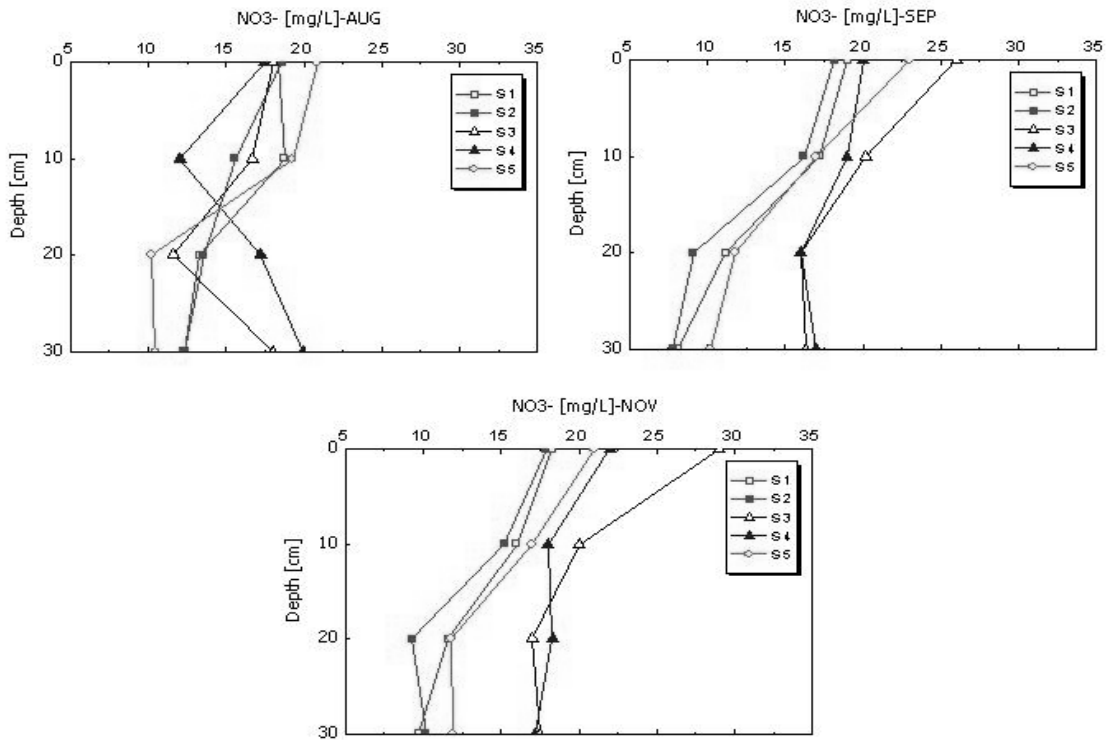
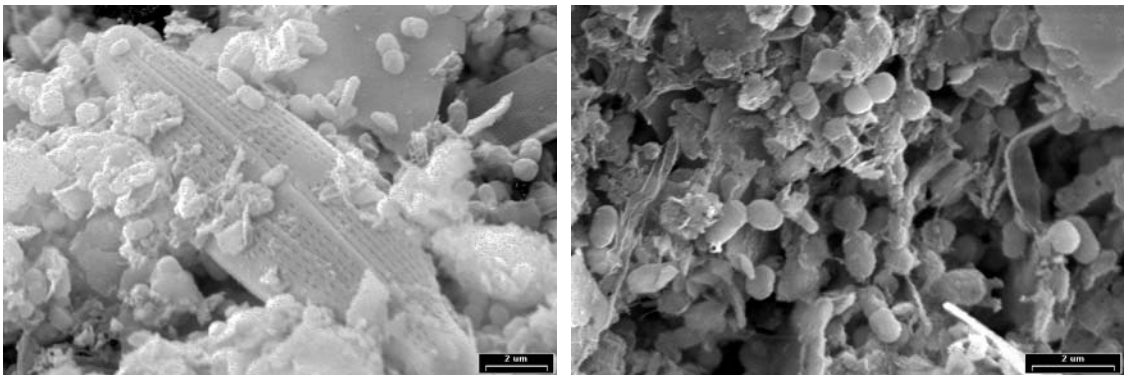


Fig. 7. Nitrate concentration profiles of different depths and seasons.(Kim *et al.*, 2009)

#### 4.3. 미생물학적 결과



(a) × 3,500

(b) × 10,000

Fig. 8. SEM photographs of the groundwater-stream water mixing zone soil.

주사현미경 촬영 결과 구균과 간균 및 조류의 모습을 볼 수 있다(그림 8). 또한 분자생물학적 방법을 이용하여 분리 동정된 미생물은 최소 15

종으로 확인되었다(표 4). 여기서 중요한 점은 지하수-지표수 혼합구간의 토양에서 분리 동정한 미생물의 대부분이 질산화 작용에 관여하는 미생

물과 탈질 작용에 관여하는 미생물 두 종류가 동시에 분리 동정되었다는 점이다.

산화환원전은 미생물의 성장 및 오염물질 저감에 영향을 미치는 주요한 인자이다 (Lee and Oleszkiewicz, 2003). 호기성균인 *Pseudomonas*

*fluorescens*가 활발한 성장으로 보이는 산화환원전위의 범위는 +500 ~ +100 mV 이며, 통성혐기성균인 *Staphylococcus aureus*는 +180 ~ -230 mV, 마지막으로 혐기성균인 *Clostridium*은 -30 ~ -550 mV 이다(McKane and Kandel, 1996). 이 연구에서 현장의 산화환원전위는 8월 평균 204 mV, 9월 평균 206 mV 그리고 11월 평균 195 mV 였다. 이와 같은 범위 값의 산화환원전위에 의하면 혐기성세균에 의한 탈질소 반응이 일어나기는 힘들다. 그럼에도 불구하고 분리 동정된 미생물에 다수 혐기성미생물이 포함되어있다. 상이한 환경조건에서 서식이 가능한 미생물이 동시에 분리 동정된 것은, 앞서 언급한 지하수-지표수 혼합구간의 공간적 특이성에 기인하여 나타난 결과로 해석된다.

Table 4. Isolation of dominant bacteria.

Isolate	Identified by 16SrDNA	Homology (%)
S1-A	<i>Bacillus sp.</i> MSB 2029	99
S1-B	<i>Acinetobacter sp.</i> BSA 35	98
S1-C	<i>Bacillus cereus</i>	98
S2-A	<i>Acinetibacter Iwoffii</i>	99
S2-B	<i>nitrogen-fixing bacterium</i> COL	99
S2-C	<i>Pseudoxanthomonos sp.</i> M1-7	100
S3-A	<i>Denitrifying Fe(II)-oxidizing bacterium</i>	100
S3-B	<i>Paucimonas lemoignei</i>	99
S3-C	<i>Pseudomonas mephitica</i>	99
S4-A	<i>Xylella fastidiosa</i> M23	99
S4-B	<i>Exiguobacterium sibiricum</i> 255-15	99
S4-C	<i>Bacillus sp.</i> GD1505	97
S5-A	<i>Alcaligenes faecalis</i>	98
S5-B	<i>Acidovorax sp.</i> R-24667	98
S5-C	<i>Pseudomonas marginalis</i> strain JH13	99

#### 4.4. 상관 분석 결과

편상관 분석 결과, 혼합구간의 수직 이동률을 통제 변수로 사용하지 않은 원래의 상관계수를 비교하여 보면, 현장의 질산성 질소의 농도와 분리 동정한 미생물 15종의 상관계수는 0.698(유의도 0.000)으로 상관관계가 높은 것으로 분석되나 혼합구간 수직 이동률을 통제변수로 설정한 편상관계수는 0.252(유의도 0.384)로 다소 약한 상관관계로 해석되었다. 이는 현장의 질산성질소의 농도와 분리 동정된 질산화 미생물의 상관관계는 혼합구간의 수직 이동률과 결합되어 해석될 때 보다 높은 상관관계를 가짐을 보여준다.

Table 5. Partial correlations and associated statistics between Flux, Isolated bacteria and nitrate concentrations.

Control variables		Nitrate	Isolated bacteria	Flux	
None	Nitrate	Correlation	1.000	0.698	0.793
		Significance(2-tailed)		0.000	0.000
		df	0	13	13
Isolated bacteria	Isolated bacteria	Correlation	0.698	1.000	0.656
		Significance(2-tailed)	0.000		0.00
		df	13	0	13

Table 5. Partial correlations and associated statistics between Flux, Isolated bacteria and nitrate concentrations. (continued)

Control variables		Nitrate	Isolated bacteria	Flux
Flux	Correlation	0.793	0.656	1.000
	Significance(2-tailed)	0.000	0.000	
	df	13	13	0
Flux Nitrate	Correlation	1.000	0.252	
	Significance(2-tailed)		0.384	
	df	0	12	
Isolated bacteria	Correlation	0.252	1.000	
	Significance(2-tailed)	0.384		
	df	12	0	

## 5. 결 론

농촌지역 하천 지하수-지표수 혼합구간의 수리, 지구화학 및 생물학적 기작 사이의 상관관계를 알아보려고 수리, 지구화학적, 생물학적 접근 방법을 이용하여 분석하였다. 주요 연구결과는 다음과 같다.

첫째, 수리적 방법을 이용하여 연구지의 혼합구간의 혼합수의 수직 이동방향성을 살펴본 결과, 연구 지점에 따라 다르게 나타나며, 그 유동률에도 계절적으로 상당한 차이가 있음을 확인하였다. 두 번째로 지구화학적 연구방법을 통해 혼합구간은 환원환경이라기 보다는 산화 환경에 노출되어 있었다. 마지막으로 생물학적 연구방법을 사용하여 혼합구간의 토착 미생물의 종류를 분석하여 본 결과, 연구지의 토양에는 질산화에 도움을 주는 미생물과 탈질에 도움을 주는 미생물이 동시에 발견되었다. 혼합구간의 역동적인 수리적 특성에 기반하여 혼합구간의 빠른 유동률이 토착미생물의 구성에도 영향을 끼치는 것으로 생각된다. 이 모든 결과를 이용하여 편상관 분석한 결과, 혼합구간의 유동률은 오염물질의 농도 및 분리 동정된 미생물과 높은 상관성을 나타내었다.

## 감사의 글

본 연구는 두뇌한국(BK21) 서울대학교 지구환경과학사업단과 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업(2011-0001120)의 결과이며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

Appelo, C.A.J., Postma, D., 1994, *Geochemistry, groundwater and pollution*. Balkema, Rotterdam.

Chae, G.T., Yun, S.T., Kim, K.H., Kim, S.O., Choi, B.Y., Kim, H.S., Rhee, C.W., 2004, Hydrogeochemistry of alluvial groundwaters in an agricultural area: an implication for groundwater contamination susceptibility. *Chemosphere*. 55, 369-378.

Chae, G.T., Yun, S.T., Mayer, B., Choi, B.Y., Kwon, J.S., Yu, S.Y., 2009, Hydrochemical and stable isotopic assessment for nitrate contamination in an alluvial aquifer underneath a riverside agricultural field. *Agricultural Water Management*.96, 1819-

- 1827.
- Capelle, F.H., 2001, Ground-water Microbiology and Geochemistry. Wiley, NewYork.
- Choi, B.Y., Yun, S.T., Mayer, B., Chae, G.T., Kim, K.H., Kim, K., Koh, Y.K., 2010, Identification of groundwater recharge pathways and processes in a heterogeneous alluvial aquifer: results from multi-level monitoring of hydrochemistry and environmental isotopes in a riverside agricultural area in Korea. *Hydrological Processes*, 24, 317-330.
- Choi, W.J., Han, G.H., Lee, S.M., Lee, G.T., Yoon, K.S., Choi, S.M., Ro, H.M., 2007, Impact of land-use types on nitrate concentration and  $\delta^{15}\text{N}$  in unconfined groundwater in rural areas of Korea. *Agricultural Ecosystem and Environment*, 120, 259-268.
- Brunke, M. and Gonser, T., 1997, The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater, *Freshwater Biology*, 37, 1-33.
- Chamber, P.A., 1994, Nutrient dynamics in riverbeds the impact of sewage effluent and aquatic macrophytes, *Water Research*. 28, 453-434.
- Cleary, R.W., Rorech, G.J., McCreddie, H., 2001, Introduction to monitored natural attenuation [MoNA], Natural Attenuation, Risk Assessment, and Risk-Based Corrective Action. NGWA's Short Course Material, Westerville, Ohio.
- Field, K. G., Gordon, D., Wright, T., Rappe, M., Urbach, E. and Vergin, K., 1997, Diversity and depth-specific distribution of SAR11 cluster rRNA genes from marine planktonic Bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 63(1), 63-70.
- Gilliam, J.W., 1994, Riparian wetlands and water quality, *Journal of Environmental Quality*, 23, 896-900.
- Hancock, P.J., 2002, Human impacts on the stream-groundwater exchange zone. *Environmental Management*, 29, 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, 24 th Annual Report, Boston, Mass., pp. 539-556.
- Hyun, Y., Kim, H., Lee, S.S., Lee, K.K., 2011, Characterizing streambed water fluxes using temperature and head data on multiple spatial scales in Munsan stream, South Korea. *Journal of Hydrology* (in press).
- Joseph, A., Claude, B., Rene, M., Nicolas, B. and Alain H., 1994, Combined organic carbon and complete nitrogen removal using anaerobic and aerobic upflow filters. *Water Science and Technology*, 30(12), 297-306.
- Joo, S.H., Kim, D.J., Yoo, I.K., Park, K. and Cha, G.C, 2000, Partial nitrification in an upflow biological aerated filter by O<sub>2</sub> limitation. *Biotechnology Letter*, 22, 937
- Kaown, D., Koh, D.S., Mayer, B., Lee, K.K., 2009, Identification of nitrate and sulfate sources in groundwater using dual stable isotope approaches for an agricultural area with different land use (Chuncheon, mid-east Korea). *Agricultural Ecosystem and Environment*, 132, 223-231.
- Kim, K.H., Yun, S.T., Choi, B.Y., Chae, G.T., Joo, Y., Kim, K., Kim, H.S., 2009, Hydrochemical and multivariate statistical interpretations of spatial controls of nitrate concentrations in a shallow alluvial

- aquifer around oxbow lakes (Osong area, central Korea). *Journal of contaminant hydrology*, 107, 114-127.
- Kim, H., Lee, J.Y., Hyun, Y., Lee, K.K., 2012, Groundwater and stream water exchange revealed by water chemistry data in a hyporheic zone. *Hydrological Sciences Journal* (submitted).
- Kuschik, P., WieBner, A. and Stottmeister, U., 1999, Biological processes in wetland systems for wastewater treatment. In: Rehm, H.J., Reed, J.(Eds.), *Biotechnology*. VCH-Wiley, Weinheim, Germany, pp. 242-252.
- Lane, D.J., 1991, 16S/23SrRNA sequencong, pp. 115-148, In E. Stackebrandt and M. Goodfellow (Eds.), *Nucleic acid techniques in bacterial systematics*. John Wiley and Sons, Chichester, England.
- Lee, Y., Oleszkiewicz, J.A., 2003, Effects of predation and ORP conditions on the performance of nitrifiers in activated sludge systems. *Water Research*, 37, 4202-4210.
- McKane, L., Kandel, J., 1996, *Microbiology*. McGraw-Hill, New York.
- Min, J.H., Yun, S.T., Kim, K., Kim, H.S., Kim, D.J., 2003, Geologic controls on the chemical behavior of nitrate in riverside alluvial aquifers, Korea. *Hydrological Processes*, 17, 1197-1211.
- Muyzer, G., Teske, A., Wiesen, C.O. and Tannasch, H.W., 1993, Profiling of complex microbial ecology populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction amplified genes coding for 16S rRNA, *Applied and Environmental Microbiology*, 59, 695-700.
- Ryhiner, G., Sorensen, G., Birou, B. and Gros, H., 1994, Biofilm reactors configuration for advanced nutrient removal. *Water Science and Technology*, 29(10-11), 111-117.
- Storey, R.G., 1999, Perspectives and predictions on the micronial ecology of the hyporheic zone. *Freshwater Biology*, 41, 119-130.
- Villaverde, S., Garcia-Encin, P., Turk, O. and Mavinic, D, 1989, Influence of pH over nitrifying biofilm activity in submerged biofilters. *Water Research*, 23, 1383
- 논문접수일 : 2012년 05월 24일  
○ 심사의뢰일 : 2012년 06월 04일  
○ 심사완료일 : 2012년 10월 14일