[기술보고]

지구화학적 해석을 이용한 하상여과 설계인자에 대한 연구

조강희¹ · 김봉주¹ · 안중혁² · 임기성² · 최낙철³ · 박천영^{1*}

¹조선대학교 에너지자원공학과, ²다주건설(주), ³서울대학교 지역시스템공학과

[Technical Report]

Design Parameters of Riverbed Filtration Estimated from Geochemical Data

Kang-hee Cho¹, Bong-Ju Kim¹, Joong-Hyuk Ahn², Ki-Sung Rhim²,
Nag-Choul Choi³, and Cheon-Young Park^{1*}

¹Department of Energy and Resource Engineering, Chosun University, Gwang-ju, Korea

²DAJOO Construction., Ltd., 96-4, Ssangmun-dong, Dobong-gu, Seoul, Korea

³Department of Rural Systems Engineering/Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

본 연구는 하천수와 지하수에 대해 지구화학적 해석을 이용하여 하상여과의 설계인자에 대해 조사하였다. 연구지역은 충적층으로 구성되어 있으며, 지표환경의 비점오염원 영향을 쉽게 받을 뿐만 아니라, 하상여과 설계인자에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 하천흐름에 따라 하천수는 상류, 중류, 하류 3개 시료를 채취하였고, 하천으로부터 거리에 따라 지하수 9개 시료를 각각 채취하였다. 연구지역의 시료에 대한 화학분석자료를 통하여, 산업시설과 농업활동이 일차적인 오염원임을 추정하였다. 또한, 배경수질은 Ca-Na-HCO₃, Ca-Cl, Ca-HCO₃-Cl 유형을 보인다. 연구지역의 하상여과 설계인자는 K, HCO₃, NO₃ 및 Cl로 판단된다. 질소안정동위원소를 통해 연구지역은 A, B, C그룹으로 구분되며, A그룹은 하천수의 기원 및 탈질산화반응, B그룹은 지류의 유동방향에 따른 탈질산화작용, C그룹은 인위적인 오염인 자연토양, 생활하수유래의 질산성질소로 판단된다.

주요어 : 지구화학, 하상여과, 설계인자, 하천수, 지하수

This study investigates the design parameters for riverbed filtration (RBF) based on the geochemistry of river water and groundwater. The study area consists of alluvium, and the area is readily affected by non-point sources of chemical contaminants in the surface environment; this is expected to affect the design parameters for RBF. River and groundwater samples were collected at three points along the river flow and at nine points along a transect normal to the river, respectively. The geochemical data indicate that the sources of individual chemical contaminants are industrial facilities and agricultural activity near the study area. In addition, The samples are mainly Ca-Na-HCO₃, Ca-Cl, and Ca-HCO₃-Cl type waters. The design parameters of RBF in the study area should consider K, HCO₃, NO₃, and Cl. We divided the study area into three regions based on the concentrations of stable nitrogen isotopes: Region A, the origin of the river and denitrification; Region B, denitrification in the flow direction of tributaries; and Region C, the origin of natural soil, sewage, and anthropogenic pollution.

Key words : geochemistry, riverbed filtration, design parameter, river, groundwater

*Corresponding author: cybpark@chosun.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Engineering Geology

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.

서 론

급격한 도시화와 산업화로 인해 환경에 대한 인식이 낮아져 하천은 점차 치수와 이수 목적으로 획일화된 형태로 변형되었다. 특히 도시하천은 도심의 하수도 역할을 하는 단순한 배수로로 전락하게 되어 비점오염원에서의 오염물질 유입에 따른 수질오염 등으로 인해 생태기능 상실 및 생활환경에 직접적으로 영향을 미치게 되었다. 이에 따라 하천환경 개선의 필요성이 인식되어 각 지방자치단체는 매년 생태복원하천과 같은 사업을 진행하여 콘크리트를 이용한 인위적인 직선형 하천에서 각 지형에 적합한 형태 즉, 자연적인 굴곡형 물길, 수초대 및 정화 습지 등과 같은 자연정화 기능을 갖춘 하천복원사업을 활발히 진행 중이다.

하천아래 하상퇴적층의 적당한 깊이에 수평으로 한 개 혹은 여러 개의 집수관을 설치하고 이들을 집수정에 연결하여 이로부터 여과수를 확보하는 하상여과공법은 하천복원사업 중 수질개선, 취수량 증대 및 하천의 건천화 방지 효과를 얻기 위해 국내 지방자치단체(대전 갑천, 서울 홍제천 및 울산 태화강 등)에서 이용되고 있으며, 이를 통해 긍정적인 효과를 얻고 있다(Kim, 2007). 하상여과시설 시공을 위한 설계는 하천현황, 지반조사 등을 통해서 기본적인 현장자료를 획득하게 되고, 이를 바탕으로 수리학적 수치해석모델링을 통하여 목표취수량을 산정하게 된다. 하상여과시설의 취수량은 집수정의 개수, 길이, 방향 및 수평 집수관의 위치 등과 같은 설계인자에 따른 영향과 미립토사의 유입, 유기물의 축적에 따른 투수성 저하 및 주변지하수의 수위 등과 같은 시공지역의 환경에 따른 영향을 받게 된다(Sung et al., 2003). 이와 같은 하상여과의 설계인자를 파악하기 위해 Sohn et al. (2011)은 모델링 및 수치해석을 이용하여 하상여과용 인공하천 설계연구를 통해 인공하천의 길이가 길어질수록 폐색방지에 유리하나, 빠른 하천유속을 발생시켜 하상의 폐색을 방지하는 방법은 효율이 떨어진다고 보고하였고, Ahn et al. (2005)은 모형 집수관 실험을 통해 집수관의 길이와 직경이 증가하면 산출유량은 증가하지만, 한계생산성은 감소한다고 보고하였다. 이외에도 하천과 지하수를 대상으로 수질특성 및 지구화학적 해석을 이용하여 주요 성분의 지화학적인 거동(Kim and Nam, 2009), 오염원의 기원 해석(Yun et al., 2003), 오염원 및 유해성 평가(Na and Son, 2005) 등과 같은 연구가 다양하게 진행 중이나, 하상여과 시설에 미치는 설계인자 해석은 부족한 실

정이다. 이에 따라서, 본 연구는 현재 하상여과공법을 이용하여 시공 중인 충남 아산시 곡교천을 연구대상지역으로 선정하여 하천과 주변지하수의 이화학원소 함량과 안정동위원소 함량비 등과 같은 현장자료를 통해서 지구화학적 해석을 이용한 하상여과 설계인자에 미치는 영향인자를 파악하고, 기초자료 및 가능성을 제시하고자 한다.

연구방법

시료채취 및 분석방법

연구대상지역에 대하여 하상여과에 미치는 설계인자를 파악하고자 하천수와 주변지하수에 대하여 시료를 채취하여 분석을 실시하였다. 하천수는 하천흐름방향에 따라 상류, 중류, 하류에서 각각 채취하였으며, 주변 지하수는 하천으로부터 거리에 따른 영향을 고려하여 9개의 지하수 관정에서 멸균시료용기를 이용하여 2L 이상 채수하였다(Fig. 1). 주요 양이온, 음이온 및 안정동위원소 시료에 대하여 $0.45\ \mu\text{m}$ 여과지를 이용하여 부유물질을 제거하였다. 양이온시료는 시료용기 벽면에 양이온이 흡착되는 것을 방지하기 위해 농질산을 첨가하여 pH를 2 이하로 조절하였으며, 시료채수 이후 분석까지 모든 운반 및 저장은 아이스박스 및 냉장고를 이용하여 4°C 이하로 유지하였다.

온도, pH, Eh, DO, EC, TDS와 같은 물리적 특성은 현장에서 채수 즉시 다항목 수질측정기(U-5000, HORIBA)를 사용하여 현장에서 측정하였고, 중탄산 이온함량은 적정법을 이용하여 현장에서 pH meter(D-51, HORIBA)를 이용하여 직접 측정하였다. 양이온(Ca, Fe, K, Mg, Na, Si 등)의 함량은 유도결합플라즈마(ICP1000-III, SHIMADZ), 음이온(F, Cl, NO_2 , Br, NO_3 , PO_4 , SO_4)의 함량은 이온크로마토그래피(883 Basic IC Plus, metrohm)를 이용하여 분석하였다. 안정동위원소인 질소안정동위원소($\delta^{15}\text{N}$)는 가스-질량분석기(FIAstar 5000, Foss Tecator)를 이용하여 분석하였다. 채취된 하천수 및 주변 지하수 시료내 미생물의 존재 유·무에 따른 탈질산화반응의 영향을 조사하기 위해 이들 시료는 $0.2\ \mu\text{m}$ 여과지를 이용하여, 글루타르알데히드(glutaraldehyde)와 에틸 알콜(ethyl alcohol, 75, 85, 95 및 100%)을 각각 이용하여 고정 및 단계별 탈수를 실시한 후, SEM(Hitachi, S4800)을 이용하여 관찰하였다.

Fig. 1. River and groundwater sampling sites.

결과 및 토의

연구지역의 지질 및 지역적 현황

연구지역인 충남 아산시 곡교천의 지질은 선캄브리아기의 호상편마암이 기반암으로 분포하고 있고, 중생대의 쥬라기 화강암류인 각섬석화강암, 흑운모화강암, 반상화강암과 백악기의 흑운모화강암이 관입하였으며, 이들 모든 지층을 관입한 백악기의 산성, 염기성 맥암류 및 제4기 충적층으로 구성되어 나타난다(Kim et al., 1979). Kim et al. (1979)에 의하면 호상편마암은 아산시 전역에 걸쳐 넓은 분포를 보이며, 크게 북측과 남측으로 나누어 암상의 차이를 보인다. 북측은 온양편마암인 호상편마암이 광역변성작용으로 인해 전반적으로 화강암질화되어 산출되며, 남측은 호상편마암이 넓은 분포를 보이고 있다.

본 연구지역은 곡교천 하류지역을 중심으로 주변 논, 밭, 과수원 등의 농업활동이 활발하며, 축산농가 등의 비점오염원이 산재되어 있다. 또한 대상 지역의 남쪽으로는 아산시청이 위치해 있으며, 이로 인한 아파트 등의 주거 밀집지역이 존재한다. 대상하천 남쪽으로 약 500 m 거리 내에 대형 제지 공장과 수 개의 주유소 등이 위치하고 있다(Fig. 1). Chon and Ahn (1998)은 대상 연구지역에 대하여 GIS를 이용한 지하수 오염 평가에 관한 연구를 수행한 결과, 대상 지역에 대하여 기존 공장에서 사용되고 있는 지하수는 주변 민가에서 사용하고 있는 개발심도보다 깊어, 지하수오염이 진행될 경우

주민들의 건강에 심각한 문제를 야기할 수 있음을 제시하였다.

일반적으로 지하수는 주변의 암석과 계속 반응하므로 대수층의 지질에 따라 수리지구화학적 특성에 차이가 발생된다. 이러한 현상은 대수층의 지하수뿐만 아니라 지표수도 기반암 종류에 따라 지구화학적 특성이 다르게 나타난다. 연구지역에서 시료채취가 이루어진 지하수공에 대한 지질을 지질도를 통해 확인한 결과 하천에 의해 형성된 충적층으로 나타났다. 국가지하수정보센터에서 아산시 지하수 정보신청을 통해 심도 자료를 확인한 결과 시료를 채취한 관정의 심도는 10~100 m 범위로 나타났다. 이들 지역은 분급이 양호하여 투수성이 높아 지하수 산출성이 좋으나, 미고결 퇴적물로 이루어진 충적층에서의 지하수 수위는 지표면에 가깝게 상승되어 있어 지표수가 지하로 침투되어 자체정화 시간이 짧아 지하수의 수질은 지표수 오염원의 영향을 받기 쉽고, 하상여과 설계인자에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

연구지역의 지화학적 특성

하천수와 하천 인근지역의 관정에서 채취된 지하수 시료에 대한 물리적 특성은 Table 1에 나타났다. 수온의 경우 하천수 17.96~18.42°C, 지하수 14.42~21°C 범위를 나타내고 있다. pH는 하천수 7.11~11.53, 지하수 6.54~8.43 범위로 나타난다. 하천 종류(OR-2)의 경우 pH가 11.53으로 높게 나타난다. 하천수의 높은 pH는 오염물질의 유입에 의해서 나타날 수 있으나, 대부분의 지

Table 1. Summary of the physical properties of the study area.

Sample	River			Groundwater								
	OR-1	OR-2	OR-3	OG-1	OG-2	OG-3	OG-4	OG-5	OG-6	OG-7	OG-8	OG-9
T (°C)	17.96	18.42	18.38	18.26	18.36	20.8	21	18.2	18.3	16.93	14.42	17.5
pH	7.11	11.53	8.39	7.11	6.79	8.29	7.33	8.39	7.11	6.77	6.54	8.43
Eh (mV)	228	96	156	87	199	204	167	174	253	248	187	58
EC (mS/m)	81.8	40.5	47.4	78.7	63.2	0.1	6.4	64.2	71.1	51	32.3	25.3
DO (mg/L)	6.36	11.12	10.75	5.03	5.53	5.29	6.64	8.26	5.47	7.05	10.38	4.62
TDS (mg/L)	523	242	287	504	405	1	42	411	455	326	21	165

Table 2. Summary of water chemistry (cations) in the study area.

Sample	Ca (mg/L)	Fe (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	Si (mg/L)	Sr (mg/L)
OR-1	20.08	0.06	4.40	2.55	47.69	0.38	0.07
OR-2	18.83	0.10	3.92	2.47	43.07	0.65	0.07
OR-3	11.66	0.06	2.35	1.57	27.69	0.35	0.04
OG-1	26.80	0.32	1.23	7.09	28.63	4.20	0.26
OG-2	26.65	0.02	0.50	7.57	9.76	4.32	0.24
OG-3	27.82	0.01	0.21	2.08	21.91	3.18	0.92
OG-4	9.53	0.02	1.13	2.00	5.71	1.02	0.06
OG-5	16.05	0.10	0.44	5.66	8.24	4.31	0.17
OG-6	32.55	0.03	0.88	8.66	18.55	9.13	0.31
OG-7	23.38	0.02	0.46	6.27	9.39	6.07	0.22
OG-8	12.37	0.09	0.50	3.36	10.17	8.70	0.19
OG-9	11.48	0.01	0.37	3.02	5.37	3.44	0.13

표수는 대기와 충분히 접하고 있으므로 CO₂의 용해에 의한 탄산의 형성으로 실제 그와 같이 높은 pH가 나타나기 어렵지만(Kim and Nam, 2009), NO₃함량 및 영양염류가 과다하게 녹아있을 경우 하천에 존재하는 조류의 광합성 작용에 의해 CO₂가 소비되어 pH가 증가될 수 있다(Kim et al., 2002). 본 연구지역 하천 중류의 pH는 암상의 변화보다는 시료 채취 시 녹조 등의 조류가 하천 표면에 형성된 것으로 보아 생물학적 요인이 더 크게 작용한 것으로 판단된다. 지하수 pH는 평균 7.41로 중성 및 약산성의 특징을 보인다. 하천수와 지하수의 Eh는 각각 평균 160.00, 175.22 mV로 전이환경으로 나타난다. EC는 하천수 40.5~81.8 mS/m (평균: 56.5 mS/cm), 지하수 0.1~78.7 mS/m (평균: 43.5 mS/m) 범위로 나타난다. Lee and Woo (2002)에 의하면 오염되지 않은 일반수(원수)의 전기전도도는 5~50 mS/m 범위로 나타나며 국지적인 매질의 차이, 매립물질의 차이

및 지표환경의 차이에 의해 수질변화가 일어난다고 보고하였다. 본 연구지역 중 하천 하류(OR-1)는 하상여과 시공으로 인해 곡교천 하류지역을 차단하여 국지적으로 물이 순환되지 못하여 하천 상류, 중류보다 높게 나타나며, 지하수의 경우 주유소, 제지공장 등과 같은 지표환경의 영향으로 인해 전기전도도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

하천수와 지하수시료에 대한 양·음이온의 주성분 원소들의 함량을 Table 2, 3에 나타냈다. 이 중, Freeze and Cherry (1979)는 NO₃를 생활하수, 축산폐수 등과 같은 오염물질의 유입으로 지하수를 부화시키는 전형적인 오염물질로 규정하였다. 이러한 NO₃를 분석한 결과, 하천수와 지하수함량은 각각 9.03~15.59 mg/L, 0.38~173.95 mg/L로 나타났다. 하천수의 경우 주변의 특정 오염원의 존재보다는 하상여과 시공으로 인하여 하천 바닥에 축적되었던 유기물들이 하천으로 유입된 결과로 사

Table 3. Summary of water chemistry (anions) in the study area.

Sample	F (mg/L)	Cl (mg/L)	NO ₂ (mg/L)	Br (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	PO ₄ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)
OR-1	0.62	89.64	0.98	0.42	9.03	0.53	76.97	382.31
OR-2	0.62	149.32	1.4	0.58	14.76	0.61	123.89	354.73
OR-3	0.64	148.3	1.39	0.62	15.59	0.64	126.05	356.83
OG-1	0.31	151.32	N.D	0.76	0.38	N.D	91.01	40.27
OG-2	0.25	141.79	N.D	0.23	2.03	N.D	74.61	36.61
OG-3	0.36	84.7	N.D	0.44	0.38	N.D	123.43	29.89
OG-4	0.24	12.22	N.D	0.14	7.27	N.D	11.97	14.64
OG-5	0.27	63.15	N.D	0.3	54.77	N.D	80.77	32.34
OG-6	0.2	107.64	N.D	0.14	96.77	N.D	56.12	31.72
OG-7	N.D	45.43	N.D	0	173.95	N.D	5.37	18.91
OG-8	0.23	40.8	N.D	0.12	33.01	N.D	20.58	14.64
OG-9	0.23	58.15	N.D	0.22	15.22	N.D	25.08	31.11

N.D: not detected

료된다. 지하수는 큰 분산범위를 보이며, 하천주변(OG-1, OG-2, OG-3, OG-4)과 도심지역(OG-5, OG-6, OG-7, OG-8, OG-9)에 따라서 NO₃의 함량이 크게 차이가 나타나는데 도심지역 지하수의 경우 주변의 산업시설, 농업활동 및 거주시설에 따른 영향으로 판단되며, 특히, OG-7의 경우 농업활동이 진행 중인 과수원 하부 지하수공으로 비료사용으로 인해 높게 나타난 것으로 해석된다. SO₄분석결과, 하천수와 지하수는 각각 76.97~126.05 mg/L (평균: 108.97 mg/L), 5.37~123.43 mg/L (평균: 54.33 mg/L) 범위로 높은 함량을 보인다. 일반적으로 SO₄ 함량이 높은 지역은 광산지역의 황철석과 같은 황화광물의 산화작용(Park and Cho, 2010), 증발암 용해, 강수, 섬유산업과 펄프제조 공정에서의 공장폐수 및 비료에서 공급 된다(Cortecchi et al., 2002). 연구지역 지하수의 SO₄ 함량은 하천인근 지하수(평균: 75.25 mg/L)와 도심지 지하수(평균: 37.58 mg/L)간에 차이가 나타난다. 하천인근 지하수의 경우 물-암석반응보다는 하천수의 혼합, 인간 활동에 의한 부화 및 지구화학적인 변화보다는 하상여과공사에 따른 오염물질의 유입과 하상퇴적물의 용존 이온흡착, 포화에 의한 용출작용(Kim and Nam, 2009)으로 생각된다. 하천수와 주변지하수의 물리·화학적 특성을 이용한 하상여과에 미치는 설계인자(산화-환원 전위의 차이, EC의 변화 및 상대적 변화량 등을 파악하기 위해서는 상대적 거리에 따른 시료채취와 강수기록 등 집중적이고 체계적인 자료가 요구될 것으로 판단된다.

Fig. 2. Piper diagram showing the distribution of major cations and anions in the study area.

수리 화학적 특성

연구지역의 하천수와 주변 지하수에 대한 수질특성을 파악하기 위해 분석된 수질자료를 이용하여 Piper diagram에 도시한 결과, 양이온은 Ca 우세형, 음이온은 Cl 우세형을 보인다. 양이온은 밀집형태를 음이온은 분산형태로 나타난다. 수질의 유형비는 Ca-Na-HCO₃, Ca-Cl, Ca-HCO₃-Cl 유형을 보이고 있다(Fig. 2). 지하수의 Ca, Cl, HCO₃ 및 Na 농도분포를 비교한 결과, Cl을 제외한 나머지 원소는 크게 차이가 나타나지 않는다. Cl의 경우, 하천 인근지하수는 도심지역(평균, Cl < 63 mg/

Fig. 3. Schoeller diagram showing the distribution of major cations and anions in the study area, for: (a) river water, (b) Riverside groundwater, and (c) urban groundwater.

L)보다 비교적 높게 분포되며, 하천 인근지하수는 120 mg/L 이상인 이상분포대가 형성된다.

배경수질의 차이를 구분하는 주된 원소를 확인하기 위해 Scholler diagram을 이용하여 주성분 이온함량을 도시해 본 결과(Fig. 3), 하천수와 지하수의 차이는 K, HCO₃, 지하수(하천 인근, 도심지역)에서는 NO₃가 구별되는 것으로 나타난다. 하천수의 HCO₃는 지하수에 비해 암석, 토양 및 유기물기원과의 반응에 따른 결과로

Fig. 4. Relative micromol ratios of sodium and chloride in the river water, groundwater, and urban groundwater samples. The fitted lines show the expected relative concentrations of species assuming aerosol or host rock.

생각되며, K는 하천수의 경우 지표의 오염물질, 지하수는 자연적인 지질매체와의 반응으로 판단된다.

Yun et al. (2003)은 Na와 Cl의 상대적인 농도는 이들 성분의 기원을 규명하는데 유용한 매개변수로 이용된다고 보고하였다. 대수층의 Na-장석류(NaAlSi₃O₈)가 풍화작용에 의해 Na가 공급되는 경우, Cl/Na의 몰농도 비는 약 0.5로 감소하게 되며, 해무기원인 연무질 암염이 용해되는 경우는 Cl/Na의 몰농도 비가 1에 근접한 값을 나타낸다. 연구 지역 하천수와 지하수의 Na와 Cl 몰농도 비를 도시한 결과(Fig. 4) Cl의 성분이 Na에 비해 높은 몰농도 비를 나타내며, 도심 지하수의 경우 해수의 혼합에 따른 영향보다는 주변 산업시설 및 거주시설에 따른 인위적 오염영향으로 판단되며, 하천수와 하천 인근지하수는 염분이 해무기원인 연무질 암염의 용해와 수암 반응에 의해 복합적으로 공급된 것으로 사료된다.

대수층의 수문구조에 따라 수질특성에 차이가 나타나며 이를 기반으로 하천수의 지하유입 혹은 지하수의 하천유입을 판단한다(Simpson and Herczeg, 1991; Lamontagne et al., 2002). 본 연구지역의 수리 화학적 특성 중 K, HCO₃, NO₃ 및 Cl 원소가 하상여과 설계 인자에 영향을 줄 것으로 판단된다.

질소안정동위원소

하천수와 지하수에 대하여 δ¹⁵N (‰)를 분석한 결과 +2.94 ~ +14.87‰ 범위를 보이며, 하천수 평균 11.88‰, 지하수 평균 9.06‰로 나타난다(Table 4). 지하수는 하천 주변지하수 +3.95 ~ +12.35‰ (평균: 8.04‰), 도심

Table 4. Nitrogen isotope data.

Sample	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	Sample	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)
OR - 1	12.71	OG - 4	10.21
OR - 2	10.95	OG - 5	2.94
OR - 3	11.99	OG - 6	10.7
OG - 1	12.35	OG - 7	8.68
OG - 2	3.95	OG - 8	9.31
OG - 3	5.67	OG - 9	14.87

지하수 +2.94 ~ +14.87‰ (평균: 9.30‰) 범위를 보인다. 질소안정동위원소는 자연 존재비($\delta^{15}\text{N}$) 값을 이용한 유래추정, $\delta^{15}\text{N}$ 값을 이용한 질산성질소의 기원별 구성비의 추정 등과 같은 방법을 이용하여 질산염의 기원을 추적하는데 많이 이용된다(David, 2001; Mayer et al., 2002). 또한, 지하수내 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 지하수가 이동하는 과정에서 암모니아 휘발반응, 질산화작용, 탈질산화작용, 이온교환반응 및 식물신진대사 등의 여러 가지 반응에 의해 변화하기 때문에 질소동위원소를 이용하여 정량적인 오염원을 파악하는데 이용된다(Hauck et al., 1972).

연구지역의 NO_3 의 농도에 대한 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 도시하여 보았을 때 NO_3 의 농도, 시료채취거리, 주변 지류의 영

Fig. 5. Relationship between NO_3 (mg/L) and $\delta^{15}\text{N}$ (‰) at each sampling site.

향 및 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 차이에 따라 A, B, C그룹으로 구분된다(Fig. 5). B그룹은 특징적으로 다른 두 그룹보다 $\delta^{15}\text{N}$ - NO_3 의 값이 낮게 도시된다. B그룹의 경우 지류주변의 지하수관정으로 지류의 유동방향에 따라 NO_3 의 농도가 감소하고, 하천 및 지류의 유입에 따른 희석작용을 통해서 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 증가된 것으로 판단되며, 이는 탈질산화작용에 의한 질소동위원소의 분별작용으로 해석된다. C그룹은 농업활동 및 거주시설 증가로 인해 NO_3 의 증

Fig. 6. SEM images of bacteria in the river at the following sites: (a) upstream (OR-3), (b, c) midstream (OR-2) and (d) downstream (OR-1).

가 및 탈질산화작용에 따른 $\delta^{15}\text{N}$ 의 값이 증가되는 것으로 판단된다. C그룹은 인위적인 오염에 의해 NO_3 가 높게 나타나며, $\delta^{15}\text{N}$ 값은 8.69, 10.7‰로 자연토양, 생활하수 유래 등과 같은 유기질 질소의 영향으로 추정된다. A그룹은 하천수와 하천주변지하수로 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 높고 NO_3 값은 낮게 나타난다. Mariotti et al. (1988)에 의하면, 질산염의 농도가 감소하고 반대로 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 증가하는 요인은 탈질산화작용, 지하수의 희석작용, 식물의 동화작용 및 미생물의 고정화에 의한 것으로 해석하였다. 연구지역 A그룹의 하천수의 경우 SEM을 통해서 하천수내 미생물의 존재를 파악한 결과 Fig. 6과 같이 하천수 상류(OR-3), 중류(OR-2), 하류(OR-1)에서 각각 미생물이 관찰되었다. 이들 미생물들은 탈질산화작용을 일으키는 미생물로 판단되며, 반응성이 큰 NO_2 를 분석한 결과 평균 1.26 mg/L로 나타난 것으로 보아, 탈질산화반응에 의한 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 증가로 판단된다.

서로 다른 기원의 질산염들은 특징적인 질소동위원소 조성을 보이기 때문에 동위원소는 여러 경우에서 질산염 오염원의 직접적인 파악의 수단을 제공하며, 이러한 특징을 이용하여 하상여과에 미치는 영향인자로 사용하였으나, 질소변환반응에는 암모니아화작용, 질산화작용, 탈질산화작용 및 동화작용 등 다양한 반응에 의해 변하기 때문에 정량적인 해석을 위해 추가적으로 산소, 탄소 동위원소 자료 및 주변 환경조사가 동시에 이루어진다면, 하상여과에 미치는 설계인자 해석에 정확성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

결 론

연구지역 지질은 충적층으로 이루어져 분급이 양호하며 투수성이 높아 지하수 산출성이 좋으나, 미고결 퇴적물로 이루어진 충적층에서의 지하수 수위는 지표면에 가깝게 상승되어 있어 지표수 오염원의 영향을 받기 쉽고, 하상여과 취수량에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 수리화학적 특성은 배경수질의 차이를 구분한 결과 하천수와 지하수의 차이는 K , HCO_3 가 지하수에서는 Cl , NO_3 로 하천인근 지하수와 도심지 지하수로 구분되며, 하천 인근지하수 Cl 원소가 이상분포대를 형성되었다. 연구지역은 NO_3 의 농도에 대한 $\delta^{15}\text{N}$ 값에 따라 A, B, C그룹으로 구분되며, A그룹은 하천수의 기원 및 탈질산화반응, B그룹은 지류의 유동방향에 따른 탈질산화작용에 의한 분별작용, C그룹은 인위적인 오염과 자연토양, 생활하수 유래의 질산성질소로 판단된다. 기존의 하상여

과에 미치는 설계인자를 파악하기 위해 대부분 수치해석 및 모델링을 통한 실내조사가 진행되었으나, 하상여과 시공지역의 하천수와 주변 지하수를 대상으로 지구화학적 해석 및 주변 환경조사 등과 같은 현장조사를 통해서도 하상여과에 미치는 설계인자 파악이 가능한 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 Eco-STAR project (수생태복원 사업단, 과제번호 : EW21-07-10)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Ahn, K. H., Moon, H. J., Kim, K. S., and Kim, S. H., 2005, An experimental study on the distributions of residual head and discharge rate along collector well laterals of a model riverbed filtration, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 27(12), 1305-1310. (in Korean with English abstract)
- Chon, H. T. and Ahn, H. I., 1998, Assessment of groundwater contamination using geographic information system, *Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 5(3), 129-140. (in Korean with English abstract)
- Cortecchi, G., Dinelli, E., Adorni-Braccesi, A., and La Ruffa, G., 2002, Natural and anthropogenic SO_4 sources in the Arno river catchment, northern Tuscany, Italy: a chemical and isotopic reconnaissance, *Applied Geochemistry*, 17, 79-92.
- David, R., 2001, $\delta^{15}\text{N}$ as integrator of the nitrogen cycle, *Trends in Ecology & Evolution*, 16(3), 153-162.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A., 1979, *Groundwater*, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 604.
- Hauck, R. D., Bartholomew, W. V., and Bremner, J. M., 1972, Use of variations in natural nitrogen isotope abundance for environmental studies: a questionable approach, *Science*, 177, 453-454.
- Kim, D. H., Choi, W. C., and O, I. S., 1979, Explanatory Text of the Geological Map of the ASAN Sheet, Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 1-33 (in Korean with English abstract).
- Kim, K. J., Lee, J. S., Oh, C. W., Hwang, G. S., Kim, J. S., Yeo, S. K., Kim, Y. K., and Park, S. M., 2002, Inorganic chemicals in an effluent-dominated stream as indicators for chemical reactions and stream flows, *Journal of Hydrology*, 264(1), 147-156.
- Kim, S. H., 2007, Comparison of riverbank and riverbed filtration in Korea, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 29(10), 1154-1162 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y. K. and Nam, E. K., 2009, Geochemical and isotopic study of the Kumho River, *Journal of Korean*

- Society of Economic and Environmental Geology, 42(6), 527-539 (in Korean with English abstract).
- Lamontagne, S., Leaney, F., and Herczeg, A., 2002, Stream-Groundwater Interaction : The River Murray at Hattah-kulkyne Park, Victori : Summary of Results, CSIRO Land and Water, Technical Report, 27, 1-59.
- Lee, B. S. and Woo, N. C., 2002, Groundwater Quality and Contamination in the 'A'section of Seoul Metropolitan Subway, The Journal of Engineering Geology, 12(4), 379-394. (in Korean with English abstract)
- Lee, J. U., Chon, H. T., and John, Y. W., 1997, Geochemical Characteristics of Groundwater in Korea with Different Aquifer Geology and Temperature-Comparative Study with Granitic Groundwater, Journal of the Korean Society of Groundwater Environment, 4(4), 212-222 (in Korean with English abstract).
- Mariotti, A., Landreau, A., and Simon, B., 1988, ^{15}N isotope biogeochemistry and natural denitrification process in groundwater: Application to the chalk aquifer of northern France, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(7), 1869-1878.
- Mayer, B., Boyer, E. W., Goodal, C., Jaworski, N. A., Van Breemen, N., Howarth, R. W., Seitzinger, S., Billen, G., Lajtha, K., can Dam, D., Hetling, L. J., Nosal, M., and Paustian, K. 2002, Sources of nitrate in rivers draining sixteen watersheds in the north-eastern U.S: Isotopic constraints, *Biochemistry*, 57(58), 171-197.
- Na, C. K. and Son, C. I., 2005, Groundwater quality and pollution characteristics at Seomjin river basin: pollution source and risk assessment, *Journal of Korean Society of Economic and Environmental Geology*, 38(3), 261-272 (in Korean with English abstract).
- Park, C. Y. and Cho, K. H., 2010, Bioaccumulation of arsenic on the sheathed-filament and twisted-stalk structures from the microbial Origin in the Hwasun Abandoned Coal Mine Drainage, Korea, *Journal of Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 47(3), 369-382. (in Korean with English abstract)
- Simpson, H. J. and Herczeg, A. L., 1991, Salinity and evaporation in the River Murray basin, Australia, *Journal of Hydrology*, 124(1-2), 1-27.
- Sohn, D. H., Park, J. Y., and Kim, S. H., 2011, A study on the design of artificial stream for riverbed filtration in multi-purpose filtration pond, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 33(7), 536-543 (in Korean with English abstract).
- Sung, C. D., Ahn, K. H., Lee, Y. H., Kong, I. C., and Kim, S. H., 2003, A study on the water quality improvement through riverbed filtration-model analysis and model verification, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 25(5), 580-587. (in Korean with English abstract)
- Yun, U., Chi, S. J., and SO, C. S., 2003, The hydrochemical and stable isotope characteristics of shallow groundwater near the Gwangju stream, *Journal of Korean Society of Economic and Environmental Geology*, 35(6), 441-455. (in Korean with English abstract)

원고접수일: 2013년 8월 5일

수정본채택: 2013년 10월 31일

게재확정일: 2013년 11월 3일

조강희

501-759 광주광역시 동구 서석동 375
조선대학교 에너지 · 자원공학과
Tel: 062-230-7878
E-mail: kanghee1226@hanmail.net

김봉주

501-759 광주광역시 동구 서석동 375
조선대학교 에너지 · 자원공학과
Tel: 062-230-7878
E-mail: nega6495@hanmail.net

안중혁

서울시 도봉구 쌍문동 96-4 원형빌딩 3층 306호
다주건설(주)
Tel: 02-908-0140
E-mail: ahn1894@hanmail.net

임기성

서울시 도봉구 쌍문동 96-4 원형빌딩 3층 306호
다주건설(주)
Tel: 02-908-0140
E-mail: ksrhim@dreamwiz.com

최낙철

151-921 서울시 관악구 대학동 농업생명과학대학
3217호
서울대학교 지역시스템공학과
Tel: 02-880-4595
E-mail: nagchoul@empas.com

박천영

501-759 광주광역시 동구 서석동 375
조선대학교 에너지 · 자원공학과
Tel: 062-230-7119
E-mail: cybpark@chosun.ac.kr