

질산성 질소로 오염된 소유역 하천 수질의 계절 변화

김연태¹ · 우남철^{1*} · 이광식² · 송윤구¹

¹연세대학교 지구시스템과학과, ²한국기초과학지원연구원

Seasonal Variation of Surface Water Quality in a Catchment Contaminated by NO₃-N

Youn-Tae Kim¹ · Nam-Chil Woo^{1*} · Kwang-Sik Lee² · Yungoo Song¹

¹Department of Earth System Science, Yonsei University

²Korea Basic Science Institute

ABSTRACT

The seasonal variation of water quality was studied in the Hwabongcheon. It runs though a small catchment where shallow groundwater was contaminated with NO₃-N by intensive livestock facilities. A direct inflow of animal waste and incoming of contaminated groundwater affected its water quality. In the dry season, an important factor of water quality in the Hwabongcheon was direct inflow of animal waste. In the wet season, concentrations of NO₃-N in the Hwabongcheon were elevated in spite of being diluted by precipitation. It could be explained by the effect of increased incoming of contaminated groundwater and showed by oxygen and hydrogen isotope values. NO₃-N concentration in the Cheongmicheon was lower than that in the Hwabongcheon, so it increased next a junction. This effect was intense in wet season because NO₃-N concentration in the Hwabongcheon was high.

Key words : Goundwater-surface water interaction, Surface water quality, NO₃-N, Oxygen-hydrogen isotope, The South Han river

요 약 문

밀집된 축사의 영향으로 충적층 지하수가 질산성 질소로 심하게 오염되어 있는 소유역을 흐르는 화봉천 수질의 계절 변화를 연구하였다. 이 하천에서 축산폐수의 직접 유입이 확인되었으며, 오염된 지하수 유입으로 인한 수질 변화가 나타났다. 건기에는 축산폐수의 직접 유입이 하천수질에 큰 영향을 미치고 있다. 우기에는 강수에 의한 희석효과에도 불구하고 지표수의 질산성 질소 농도가 오히려 증가하였으며, 질산성 질소로 오염된 지하수 유입량 증가가 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 지하수의 하천 유출은 산소, 수소 동위원소 조성을 이용하여 증명하였다. 질산성 질소 농도는 화봉천이 청미천보다 상대적으로 높으므로, 화봉천 유입에 의해 청미천의 질산성 질소 농도가 증가되고 있으며, 하천수의 질산성 질소 농도가 높아지는 우기에 이러한 수질 영향이 더욱 커졌다.

주제어 : 지하수-지표수 영향, 하천수질, 질산성 질소, 산소-수소 동위원소, 남한강 수계

1. 서 론

우리나라 광역 또는 지역상수도의 대부분은 지표수를 처리하여 사용하고 있다. 오염에 민감한 상수원의 보호를

위해 상수원 보호구역을 설정하고, 이 구역 내에서 농축 산업 제한, 건물 신증축 제한, 폐수방류 등의 오염 유발 행위를 제한하고 순찰, 지도·점검, 관리상태 평가 등 다양한 노력이 이루어지고 있다(환경부, 1998). 그러나, 이

*Corresponding author : ncwoo@ysgeo.yonsei.ac.kr

원고접수일 : 2004. 9. 15 게재승인일 : 2005. 3. 11

질의 및 토의 : 2005. 6. 30 까지

러한 노력의 대부분이 상수원으로 직접 유입되는 오염물질에 대해 초점이 맞추어져 있다. ‘4대강 비점오염원관리 종합대책’(국무총리 수질개선 기획단, 2004)을 통해 토양에 축적된 오염원 유출에 대한 관리를 시작하고 있으나, 간접적으로 상수원 수질에 영향을 미칠 수 있는 지천 및 천부지하수의 오염에 대한 관리는 아직 부족한 상황이다.

상수원으로 유입되는 지천의 오염은 오염물질의 직접 유입에 의해서만 이루어지는 것이 아니다. 하천유량이 주로 지하수의 지표 유출로 이루어짐은 이미 널리 알려진 사실이며(Fetter, 1994), 축사 또는 과도한 비료 사용 등 지표 오염원의 영향으로 지하수가 오염되고 있음도 역시 잘 알려져 있다(Canter, 1996). 따라서, 오염된 지하수는 지표수질에 영향을 미칠 수 있다는 결론에 도달하게 되며, 이러한 지표수-지하수 간 상호작용은 많이 연구되어 왔다(Criss and Davisson, 1996; Négre et al., 2003). 북한강 수계의 총적층 지하수질에 대한 연구(Choi et al., 2002)에서 지하수의 질산성 질소 농도가 먹는물 수질기준을 초과하는 지점이 건기보다 우기에 더욱 증가하는 것으로 나타났다. 남한강 수계의 경우, 축산계에 의한 오염 부하량이 큰 것으로 알려져 있다(이재관 외, 2001). 그러므로, 상수원 확보를 위한 효과적인 수질 관리를 위해서는 축사와 같은 오염원에서 배출하는 폐수의 수거 및 처리뿐만 아니라, 오염물질의 지하 유입에 의한 지하수 오염에 대해서도 체계적인 관측과 관리가 필요하다. 또한, 지하수 이동속도는 지표수에 비하여 매우 느리므로, 오염된 지하수 유출에 의한 지표수 오염은 오염물질이 직접 유입

된 경우보다 오랫동안 문제를 발생시키며, 지표 오염원을 제거하여도 당장에 수질이 개선되지 않는다. 따라서, 상수원 보호를 위해서는 장기간에 걸친 지표 오염원에 대한 관리방안이 마련되어야 한다.

이번 연구를 통해 지표의 잠재 오염원 분포와 천부지하수질 변화가 지표수질에 미치는 영향을 살펴보고, 지천이 큰 하천으로 유입되면서 일으키는 수질 변화를 관측하였다. 또한, 우기와 건기에 지표수질을 비교하여 지하수 유입의 영향을 살펴보았다.

2. 연구 지역 및 실험 방법

2.1. 연구 지역

연구지역은 경기도 안성시 일죽면 일대의 축사가 밀집된 농촌 지역으로, 지방2급 하천인 화봉천 유역(유역면적 8.14 km²)이다(건설교통부·한국수자원공사, 2005). 남쪽에 위치하는 산을 경계로 한강수계와 금강수계가 구분되며, 화봉천은 북쪽으로 흘러 청미천으로 유입된다. 청미천은 남한강으로 유입된다(Fig. 1). 이 지역의 총적층 지하수질을 연구한 결과(김연태·우남철, 2003), 먹는물 및 생활용수로 사용되는 천부 지하수 중 32~42%가 먹는물 수질기준 이상의 질산성 질소 농도를 나타내었으며, 주 오염 원인은 밀집된 축사로 밝혀졌다. 우기인 2003년 9월에 동일 지점에서 채취한 지하수 시료에서는 질산성 질소 농도가 먹는물 수질기준을 초과한 지점이 50%로 증가하였다(서울대학교, 2004).

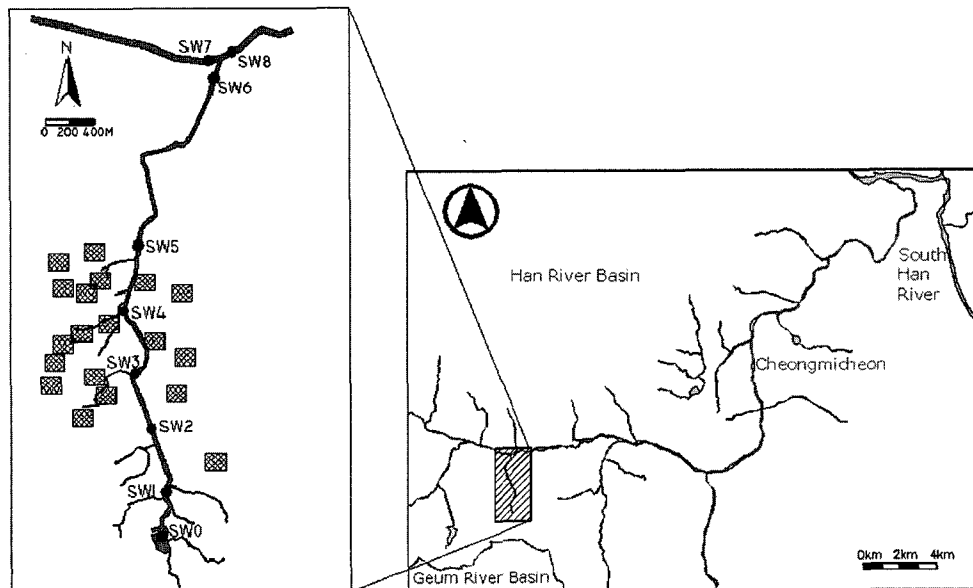


Fig. 1. The map of the South Han River basin, showing the study area and location of sampling points and livestock facilities (⊠).

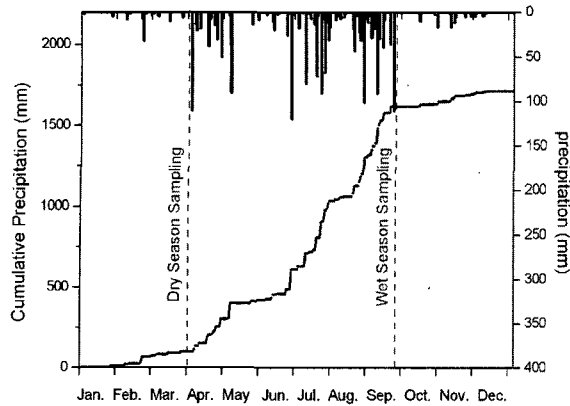


Fig. 2. Daily and cumulative precipitation in 2003 and period of sampling.

2.2. 실험 방법

건기인 2003년 4월 초와 우기인 2003년 9월 말 두 차례에 걸쳐, 화봉천 최상류에 위치한 화봉저수지(SW0), 화봉천 6지점(SW1~6), 청미천에서 화봉천 유입 전 후의 두 지점(SW7, 8)을 포함한 총 9지점에서 지표수 시료를 채취하였다. 연구지역에는 다양한 규모의 축사가 존재하는데, 주로 화봉천 중류 인근에 밀집되어 있다. 중상류 지역은 주로 농경지 및 주거지로 이용되며, 개별 관정을 이용해 생활용수 및 농업용수를 공급하고 있다. 화봉천 하류는 주거 밀집지역 및 상업지역으로 지역상수도 사용하고 있다. 시료채취 지점 및 축사 분포도는 Fig. 1과 같으며, 시료채취 시기와 강수량은 Fig. 2와 같다.

pH, 전기전도도를 현장에서 측정하였으며, 모든 시료는 0.45 μm 멤브레인 여과지로 여과한 후 음이온 및 알칼리도 분석을 위한 시료는 4°C 이하로 냉장보존 하였고, 양이온 분석을 위한 시료는 질산처리 하여 pH 2 이하로 보존하였다. 알칼리도는 0.01N-HCl로 적정하여 측정하였으며, 음이온(F, Cl, NO₂, NO₃, PO₄, SO₄)은 2주 내에 연세대학교에서 이온 크로마토그래피(Dionex-80)를 이용하여, 양이온 및 금속(Ca, Na, K, Mg, Si, Mn, Fe)은 한국기초과학지원연구원의 서울분소에서 ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry)로 분석하였고, 암모니아성 질소는 냉장보존 하여 2일 이내에 연세대학교에서 HACH DR/4000을 이용하여 분석하였다. 산소·수소 동위원소 분석은 한국기초과학지원연구원에서 실시되었다.

3. 결과 및 고찰

연구지역에서 2002년에 수행된 천부지하수 수질에 대

한 연구(김연태·우남철, 2003)에서 32~42%의 시료가 질산성 질소 먹는물 수질기준인 10 mg/L를 초과한 것으로 나타났으며, 77%의 시료가 자연 상태의 천부지하수가 가질 수 있는 질산성 질소 농도인 2~3 mg/L 이상을 나타내, 인위적 오염물질 유입이 예상된다(Mueller and Helsel, 1996). 질산성 질소의 동위원소 분석과 오염원의 공간적 분포에 대한 연구 결과, 천부지하수의 질산성 질소 주 오염원인은 밀집된 축사로 밝혀졌다. 축산 폐수는 Ca, Na, K, NH₃-N, Cl, PO₄, SO₄ 등의 성분이 매우 높은 농도로 함유되어 있으나, 지하 또는 하천으로 유입되었을 때, 토양에 잘 흡착되거나, 생물에 의한 활용도가 높은 K, NH₃-N, PO₄ 성분은 빠르게 제거된다. 특히, 암모니아성 질소는 빠른 속도로 산화되어 아질산성 질소를 거쳐 질산성 질소의 형태로 변화된다. 축사가 밀집된 화봉천 중류 지역에서 천부지하수 내 질산성 질소 농도가 전반적으로 높게 나타났으며, 남쪽에는 폐축사의 영향으로 지하수 내 질산성 질소의 농도가 높게 나타나는 지점이 존재한다. 연구 지역 천부지하수의 질산성 질소 오염 특성은 2년 동안의 연구에서 지속적으로 나타났다(김연태, 2003).

3.1. 지표수질의 계절적·공간적 변화

건기와 우기의 하천수질을 비교해보면, 대부분의 용존이온 농도는 건기보다 우기에 더 낮게 나타난다(Table 1). 특히, 토양 내에서 반응성이 작아 이동속도가 빠른 Na, Cl 성분에서 이러한 경향이 두드러지게 나타난다. t-test 결과(Table 2), Na, Ca, Mg, Si, NO₃, HCO₃, SO₄ 성분 농도가 우기와 건기에 서로 다르다는 것이 신뢰도 95%로 입증되었다. 우기 시료는 채취 3일 전에 36 mm의 강수가 있었으며, 2일 전에 0.5 mm의 강수가 있었다(기상청, 2003).

화봉천은 하류인 북쪽으로 갈수록 전기전도도가 증가하여 오염 물질 유입량이 증가하고 있음을 보여준다(Fig. 3 (a)). 그러나, 시료채취 지점에 따른 농도 증가 추세에서 우기와 건기가 차이를 나타낸다. 건기에는 SW1 지점이 저수지(SW0)보다 Na, Cl 등의 용존이온 농도가 약간 낮으며, SW3 까지는 변화가 거의 없다. 그러나, 축사가 밀집된 지역을 지나는 SW4 지점부터 농도가 뚜렷하게 증가하는 경향을 나타낸다. 반면에, 우기에는 이온농도가 하류로 가면서 지속적인 증가 추세를 나타낸다(Fig. 3(b)). 이 지역은 가정용 관정을 이용한 천부지하수가 주된 용수 공급원이므로, 지하수가 생활하수 또는 농업용수의 형태로 하천으로 직접 유입될 수 있다. 또한, 수두차이에 의해 지하수

Table 1. Chemical properties of stream samples in the study area: (a) dry season, (b) wet season (unit : mg/L)

(a)	GW _{ave}	SW0	SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SW6	SW7	SW8
pH	-	9.3	6.9	6.9	7.0	7.4	7.1	7.9	8.5	7.2
EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	-	151	149	159	175	197	233	254	219	227
NH ₃ -N	-	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	1.3	0.6	0.8	0.9
NO ₂ -N	-	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.11	0.21	0.18
NO ₃ -N	8.27	1.36	1.93	1.46	2.28	2.13	2.61	3.09	2.12	2.17
F	0.11	0.18	0.14	0.15	0.14	0.12	0.12	0.11	0.18	0.15
Cl	18.1	19.3	18.1	18.4	18.5	21.0	22.6	27.8	22.9	23.8
PO ₄	-	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.22	0.21	<0.1	<0.1
SO ₄	12.3	8.8	8.7	8.8	9.1	11.4	12.7	13.8	14.8	14.1
HCO ₃	59	45	45	57	66	76	86	84	73	81
Ca	22.6	14.6	16.7	17.7	19.7	23.9	24.5	24.8	19.6	21.2
Na	13.4	11.9	11.0	11.3	11.7	13.3	14.1	17.7	15.9	17.4
K	1.63	1.95	2.03	2.11	2.26	2.55	3.73	4.15	5.69	5.47
Mg	5.53	2.49	2.7	3.31	3.91	4.35	4.72	5.17	4.33	4.81
Si	13.79	4.21	4.59	4.63	5.01	5.16	5.34	5.29	3.88	4.19
Mn	-	<0.01	0.019	0.098	0.079	0.064	0.094	0.056	0.318	0.346
Fe	-	0.015	0.023	0.117	0.047	0.031	0.049	0.024	0.051	0.035
(b)	GW _{ave}	SW0	SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SW6	SW7	SW8
pH	-	7.2	6.9	7.1	7.4	7.2	6.9	7.0	7.1	7.1
EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	-	94	109	122	142	153	189	230	185	192
NH ₃ -N	-	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	0.2	<0.1	0.3
NO ₂ -N	-	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
NO ₃ -N	8.75	1.92	2.26	2.24	2.67	2.68	3.68	4.69	3.31	3.75
F	0.18	0.14	0.14	0.12	0.12	0.11	0.10	0.11	0.10	0.10
Cl	17.0	3.9	5.0	5.6	6.8	7.4	9.0	13.2	8.6	9.9
PO ₄	-	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	0.3	0.2	0.4	0.4
SO ₄	11.8	6.8	7.0	7.0	7.4	8.2	10.6	12.0	10.2	10.6
HCO ₃	60	27	31	39	46	49	58	67	52	57
Ca	23.7	8.6	9.7	11.5	13.6	15.0	17.8	21.3	15.3	16.7
Na	14.0	6.4	7.1	7.7	8.2	8.7	9.8	12.4	9.6	10.2
K	1.63	1.38	1.77	1.90	2.09	2.50	3.45	4.25	4.72	4.63
Mg	5.92	1.38	1.70	2.14	2.60	2.91	3.70	4.53	3.37	3.65
Si	13.45	6.26	6.71	7.14	7.33	7.42	7.77	8.68	7.19	7.56
Mn	-	<0.01	0.013	0.050	0.053	0.049	0.065	0.041	0.037	0.033
Fe	-	0.013	0.019	0.080	0.092	0.075	0.094	0.036	0.031	0.032

*'GWave' is the average concentration of groundwater samples.

가 하천으로 유출될 수 있다. 따라서, 화봉천의 수질 특성을 설명하기 위해서는 지하수의 영향을 고려하여야 한다.

2003년 4월에 지표수 시료와 같은 시기에 채취한 지하수 시료 중 점오염원의 영향을 받은 시료를 제외한 나머지 20지점의 평균 농도를 Table 1에 나타내었다(김연태, 2003). 지하수 평균값과 상류의 하천수 용존이온 농도와 큰 차이를 나타내지 않으므로, 건기에는 용존 이온 농도를 이용해 지하수의 영향을 파악하는 것이 힘들다. 그러

나, 측사가 밀집된 지역을 지나는 SW4 지점부터는 Na, Cl 농도가 크게 증가하므로, 외부 오염물질이 하천으로 유입되었음을 알 수 있다. 경작지와 주거지 분포는 화봉천 중·상류에서 크게 차이하지 않으므로, 가능성 있는 외부 오염물질 유입 경로는 축산폐수 직접유입과 측사의 영향으로 오염된 지하수의 유입이 있다. 따라서, 건기에는 측사로부터 직, 간접적으로 유입되는 용존 물질이 하천의 수질을 결정짓는 가장 큰 요소라 할 수 있다. 실제로, 2002

Table 2. The result of t-test ($t_{0.025}(16) = 2.120$)

	dry season (n=9)		wet season (n=9)		t-value
	AVE	STDEV	AVE	STDEV	
EC	196	39.3	157	44.9	1.941
NO ₃ -N	2.1	0.53	3.0	0.90	-2.569
Cl	21.4	3.22	7.7	2.84	9.540
SO ₄	11.3	2.57	8.9	1.98	2.297
HCO ₃	68	16.0	47	12.9	3.049
Ca	20.3	3.62	14.4	4.02	3.272
Na	13.8	2.62	8.9	1.83	4.618
K	3.3	1.49	3.0	1.31	0.545
Mg	4.0	0.95	2.9	1.03	2.333
Si	4.7	0.53	7.3	0.68	-9.210

년 4월에 채취한 시료에서 질산성 질소 동위원소 비를 분석한 결과(김연태, 2003), SW1~3 지점은 δ¹⁵N이 -5.0~8.0 ‰로 분뇨의 영향이 크게 나타나지 않으나, SW4, 5 지점에서는 10.9, 19.6‰로 분뇨의 영향이 매우 큰 것으로 나타났다.

우기에는 강수에 의한 희석효과로 지표수의 용존이온 농도는 낮아지지만, 지하수는 계절에 따른 농도변화가 크게 나타나지 않으므로 지하수 유입에 의한 지표수질 변화가 더욱 잘 드러난다. 우기에 화봉천의 Na, Cl 농도는

하류로 가면서 지속적으로 증가한다. 즉, 하천에 전체적으로 용존 물질이 공급되고 있는 것이다. 오염원은 주로 하류지역에 위치하고 있으므로, 지하수 유입을 가장 가능성이 있는 원인으로 볼 수 있다.

질산성 질소의 경우, 우기에 대부분의 용존 이온에서 나타났던 희석효과가 나타나지 않고 오히려 농도가 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 일차적으로는, 강수로 인하여 토양과 지표에 집적되어 있던 질소 성분이 저수지(SW0)로 유입되어 하천수의 질산성 질소 농도가 전체적으로 증가된 것으로 판단된다.

화봉천은 하류로 갈수록 질산성 질소의 농도가 증가하는 경향을 나타낸다(Fig. 3(c), (d)). 그러나, 질산성 질소 오염원의 분포특성에 따라 다른 용존 이온들과는 약간 다른 농도 변화를 나타낸다. 하천의 질산성 질소 농도 증가에 기여하는 분뇨기원 질소의 유입경로로 다음 두 가지를 생각할 수 있다. 지천으로 직접 유입된 요소 및 암모니아성 질소가 산화되어 질산성 질소가 생성된 경우와 질산성 질소 농도가 높은 지하수가 하천으로 유입된 경우이다. 이 지역의 주된 오염원으로 알려진 축산 폐수가 하천에 유입되면, K, PO₄ 성분 등은 빠르게 제거되며, 요소 및 암모니아성 질소는 빠른 속도로 산화되어 아질산성 질소를 거쳐 안정한 질산성 질소의 형태로 변화된다. 따라서, 암모

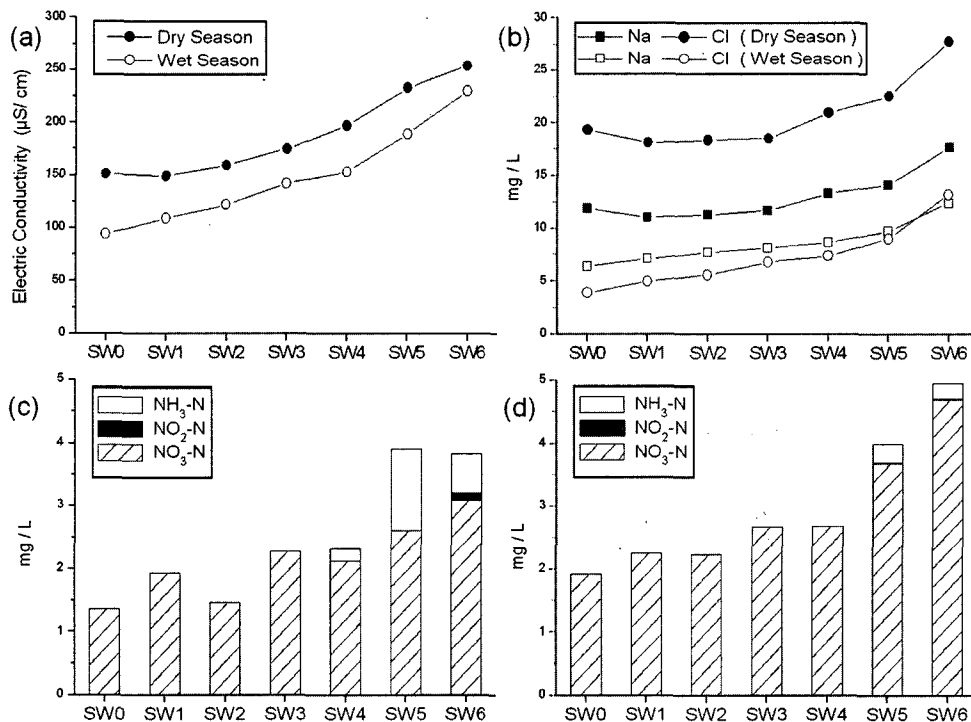


Fig. 3. Chemical characteristics in the Hwabongcheon. a) electric conductivity, b) Na, Cl concentrations, c) concentrations of nitrogen species in the dry season, d) concentrations of nitrogen species in the wet season.

니아성 질소, 아질산성 질소는 산화조건일 때, 근거리에서 축산 폐수가 직접 유입되고 있음을 지시하는 인자로 사용될 수 있다.

건기인 4월에 채취한 시료에서, 질산성 질소는 SW1 지점에서 상대적으로 높은 값을 나타내었다. 이 지점에서 상류로 약 50 m 지점에 소 10~20여 마리를 2002년 가을까지 사육했던 폐축사가 존재한다. 가까운 거리에도 불구하고 하천수에서 암모니아성 질소나 PO₄ 성분이 검출되지 않았다. 따라서, 축산폐수의 직접 유입은 없다고 할 수 있다. 결국, 이 지점의 질산성 질소 성분은 예전의 축산활동에 의해 배출된 질소가 하천으로 유입되어 수질에 영향을 미치고 있는 것으로 파악되며, 건기이므로 강수에 의한 배수보다는 국지적으로 오염된 지하수의 유입의 영향으로 유추된다. 우기인 9월에 채취한 시료에서도 이러한 경향성이 나타나지만, 건기보다는 차이가 적게 나타난다. 이는 우기에 하천유량 증가로 인하여 하천수의 흐름속도가 빨라져 하천수질의 변화를 완만하게 만들었기 때문으로 해석된다.

축사가 밀집된 지역을 통과하면서 지표수에서 아질산성 질소, 질산성 질소, PO₄ 성분이 검출되므로 축산폐수가 지천을 통해 직접 유입되고 있음을 알 수 있으며, 건기에 축산폐수 직접유입에 의해 하천수질이 크게 영향 받고 있음을 알 수 있다. 우기에는 축산 폐수의 직접 유입에 의한 영향은 크게 나타나지 않지만, 질산성 질소의 농도가 이 지점들에서 매우 크게 증가하였다. 이는 1) 축산폐수 직접유입량의 절대적 감소 또는 유량증가에 의한 상대적 감소와 2) 산화속도 증가에 의해 발생할 수 있다. 첫 번째의 경우에는 하천의 질산성 질소 농도 증가를 지하수 유입량 증가에 의한 결과로 설명할 수 있다. 실제로, 하천에 인접한 지하수 관정에서 우기에 질산성 질소 농도가 눈에 띄게 증가하였다(서울대학교, 2004).

3.2. 산소 수소 동위원소 특성

우리나라 강수의 동위원소 조성은 건기에 무겁고, 우기에 가벼운 계절적 특성을 갖는다(이광식 · 이창복, 1999; 이광식 외, 2002). 강수에서 보여지는 이러한 동위원소 특성은 하천수에 영향을 미치게 된다. 강수가 하천수의 흐르는 양을 좌우하는 강에서는 계절변화가 잘 관찰될 수 있지만, 지하수가 주된 영향을 줄 때는 계절 변화가 별로 관찰되지 않을 수 있다. 또한 하천의 크기가 작을수록 이러한 영향은 더 크게 나타나게 된다(이광식 · 이창복, 1999). 따라서, 화봉천과 같이 규모가 작은 경우에는 동위원소 값이 계절에 따라 큰 차이를 나타내는 강수에 큰

Table 3. Oxygen and hydrogen isotope ratios in samples: (a) dry season for April, 2002 (Y.-T. Kim, 2003), (b) wet season for September, 2003

(a)	δ ¹⁸ O	δD
SW1	-8.5	-60
SW2	-8.1	-54
SW3	-7.9	-56
SW4	-7.9	-57
SW5	-7.9	-57
GWave	-8.7	-59
(b)	δ ¹⁸ O	δD
SW 0	-9.8	-68
SW 1	-9.7	-66
SW 2	-9.5	-66
SW 3	-9.4	-65
SW 4	-9.3	-65
SW 5	-9.1	-62
SW 6	-8.9	-65
SW 7	-9.0	-63
SW 8	-9.0	-65
GW _{ave}	-8.8	-62

*'GW_{ave}' is the average value of groundwater samples.

영향을 받게 된다. 그러나 하천 상류에 저수지가 존재하므로, 이러한 영향은 완화될 수 있다.

2002년 4월에 동일 지역에서 채취한 지표수 시료에 대한 동위원소 값(김연태, 2003)과 2003년 9월에 채취한 시료를 비교해 보았다(Table 3). 건기에 채취한 시료의 산소 동위원소 조성이 우기보다 무거워 계절적 특성을 나타낸다. 실제로, 2002년 4월에 연구지역에 내린 강우는 δ¹⁸O = -2.9‰, δD = -7‰이다. 공간적 특성을 살펴보면, 우기에는 하류로 갈수록 산소 동위원소 조성이 무거워지는 경향이 뚜렷이 나타난다(Fig. 4). 연구지역 지하수의 동위원소 조성 평균값이 2002년 4월에 δ¹⁸O = -8.7‰, δD = -59‰이고, 2003년 9월에 δ¹⁸O = -8.8‰, δD = -62‰으로 서로 유사하다. 연구지역에서 우기에는 하류로 갈수록 하천수의 동위원소 조성이 지하수의 평균 동위원소 조성과 가까워지고 있다. 따라서, 하류로 갈수록 전체 하천 유량 중 지하수가 차지하는 비율이 커지고 있음을 알 수 있다. 우기에는 지하수의 농업용수 사용량이 거의 없으며, 생활하수 발생량은 수질에 큰 변화를 발생시킬 만큼 계절적 차이를 발생시키지 않는다. 따라서 우기 하천수의 동위원소 조성이 하류로 갈수록 지하수의 조성 유사해지는 것은 지하수 유출에 의한 영향이 커져서 나타나

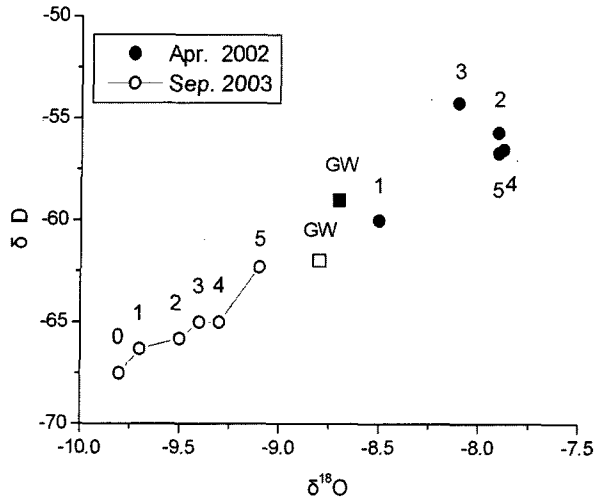


Fig. 4. Plot of oxygen and hydrogen isotope values for surface water samples in April, 2002 (●) and in September, 2003 (○) and average values of groundwater in April, 2002 (■) and in September, 2003 (□).

는 현상이라 판단된다. SW6 지점은 변화기이고 지방상수도를 사용하고 있기 때문에, 생활하수 유입에 의하여 지표수의 영향을 더 크게 받아 다른 특성을 나타낸 것으로 판단된다.

반면에 건기인 2002년 4월의 동위원소 자료에서는 지표수의 동위원소 값이 지하수에 비해 전반적으로 높게 나타나는데, 이는 봄철에 강수의 산소동위원소 조성이 무거워지는 것과 관련이 있다. 이 지역에서는 고도가 높아질수록 산소동위원소 조성이 크게 가벼워지는 특성을 나타내었으므로, SW1 지점은 고도가 높은 지역 지하수의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. SW2 시료부터는 동위원소 조성이 크게 부화된 특징을 보인다. 이는 증발에 의한 효과와 주변지역에서 조성이 다른 물의 유입으로 발생할 수 있다. 그러나, 건기시료 채취 당시는 연구지역 농경지에 물대기를 하기 이전이었으므로, 농업용수 유입 가능성은 매우 희박하다.

3.3. 화분천 유입에 따른 청미천의 수질 변화

화분천 유입이 청미천의 수질에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위하여, 청미천에서 합류지점으로부터 약 100 m 전, 후 지점과 화분천에서 합류지점 약 50 m 전 지점에서 시료를 채취하였다. 화분천의 하류인 SW6 지점의 질산성 질소 농도는 청미천보다 높으며, 건기에는 3.09 mg/L, 우기에는 4.69 mg/L를 나타내어 축사가 밀집된 지역을 흐르는 동안 최상류인 SW0 지점보다 약 2배 정도 높아졌다(Table 1). 이러한 지천이 청미천에 유입되면서, 유입

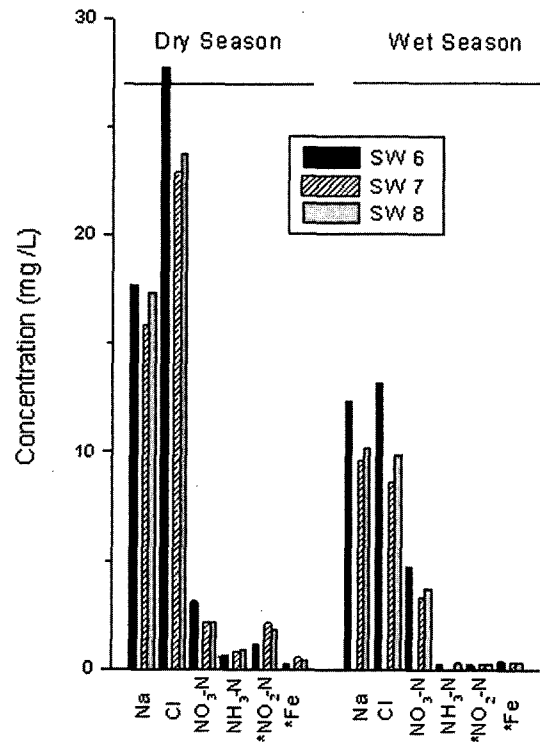


Fig. 5. Comparison of ion concentrations in the Cheongmicheon before and after joining the Hwabongcheon. The values of components with '*' were amplified of 10 times.

후 지점(SW8)의 질산성 질소 농도가 유입 전(SW7)보다 높아졌다(Fig. 5). 특히, 우기에는 질산성 질소 농도가 건기보다 높아져 화분천이 청미천 수질에 미치는 영향이 크게 나타났다. 이 지역 지하수질에 문제가 되는 성분인 질산성 질소 뿐만 아니라 대부분의 성분이 화분천 하류수질의 영향을 받는 것으로 나타났다.

청미천은 수도권의 상수원으로 유입되는 하천이므로 수질관리가 매우 중요하다. 이번 연구의 화학분석 결과, 청미천은 아질산성 질소, 암모니아성 질소가 검출되어 환원성 환경이 조성되고 있으며, 자연정화로 제거될 수 있는 양 이상의 유기물질 및 환원성 물질이 유입되고 있음이 나타났다.

4. 결 론

1. 화분천은 하류로 갈수록 용존이온 농도가 증가하는 경향을 나타낸다. 특히, 폐축사 인근이나 축사가 밀집된 지역을 지나면서 용존이온 농도가 크게 증가하여, 오염된 지하수 유출에 의한 수질영향이 나타났으며, 축산폐수 직접 유입의 영향도 나타났다.
2. 강수량 증가에 의해 저수지에서 회석효과가 나타나

는 우기에는, 하천수에서 다른 용존 이온들의 농도는 감소하지만, 질산성 질소의 농도는 오히려 증가하는 경향을 나타내었다. 우기에 지표수의 산소·수소 동위원소 조성은 하류로 갈수록 지하수와 비슷해지므로, 지하수가 하천으로 유출되고 있음을 증명한다.

3. 건기에는 축산폐수의 직접유입이 하천수질에 가장 큰 영향을 미치며, 우기에는 지하수 유입에 의한 영향이 가장 큰 것으로 판단된다.

4. 화봉천은 상수원으로 흘러드는 청미천의 수질에 영향을 미치며, 질산성 질소의 농도가 높아진 우기에 화봉천 유입에 의한 영향이 크게 나타났다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발단의 연구비 지원(과제번호 3-5-1)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 국무총리 수질개선기획단, 2004, 비점오염원관리 종합대책.
- 건설교통부, 한국수자원공사, 2005, 수자원종합정보, www.wamis.go.kr.
- 기상청, 2003, 이천 기상관측자료, www.kma.go.kr.
- 김연태, 2003, 경기 일죽 지역의 소유역에 대한 천부지하수의 수질 특성 연구, 연세대학교 석사학위논문.
- 김연태, 우남철, 2003, 축사가 밀집된 농촌지역 천부지하수의 질산염 오염특성, 한국지하수토양환경, 8(1), 57-67.
- 서울대학교, 2004, 21세기 프론티어연구 개발사업 수자원의 지속적 확보기술개발사업 지하수 활용을 위한 오염예방 및 저감기술 개발, 과학기술부, p. 33-78.
- 이광식, 이창복, 1999, 남한 강수와 하천수의 산소와 수소 동위원소 조성, 지질학회지, 35(1), 73-84.
- 이광식, 고동찬, 이대하, 박원배, 2002, 제주도 강수의 동위원소 조성의 시공간적 분포: 지하수 함양에의 응용, 지질학회지, 38(2), 151-161.
- 이재관, 신동석, 김태훈, 정동일, 이덕길, 2001, 전국 오염원 현황조사, 국립연구원보 제 23호, p. 279-293.
- 환경부, 1998, 상수원 관리규칙 (환경부령 제 40호)
- Canter, L.W., 1996, Nitrates in Groundwater, CRC Press LLC, New York, p. 1-18
- Choi, W.-J., Han, G.-H., Ro, H.-M., Yoo, S.-H., and Lee, S.-M., 2002, Evaluation of nitrate contamination sources of unconfined groundwater in the North Han River basin of Korea using nitrogen isotope ratios, *Geosciences Journal*, 6(1), 47-55.
- Criss, R.E. and Davisson, M.L., 1996, Isotopic imaging of surface water/groundwater interactions, Sacramento Valley, California, *J. Hydrol.*, 178, 205-222
- Fetter, C.W., 1994, Applied Hydrogeology, 3rd Edition, Prentice Hall, New Jersey, p. 47-76.
- Mueller, D.K. and Helsel, D.R., 1996, Nutrients in the nation's water-Too much of a good thing?, U.S. Geological Survey Circular 1136.
- Négrel, Ph., Petelet-Giraud, E., Barbier, J., and Gautier, E., 2003, Surface water-groundwater interactions in an alluvial plain: Chemical and isotopic systematics, *J. Hydrol.*, 277, 248-267.