

농촌용수 수질관리를 위한 비농업시설의 영향 연구

이병선^{1,3} · 임재연¹ · 김양빈¹ · 우남철² · 남경필^{3*} · 이종민⁴

¹한국농어촌공사 농어촌연구원, ²연세대학교 지구시스템학과

³서울대학교 건설환경공학부, ⁴(주) 진보이엔씨

Effect of Non-Agricultural Facilities on Water Quality and Contamination in Rural Area

Byung Sun, Lee^{1,3} · Jae Yeon, Um¹ · Yang Bin, Kim¹ · Nam C. Woo²

Kyoungphile, Nam^{3*} · Jong Min, Lee⁴

¹Rural Research Institute, Korea Rural Corporation

²Dept. of Earth System Sciences, Yonsei University

³Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University

⁴Jinbo E&C Co. Ltd.

ABSTRACT

This study was objected to identify the effect on water quality and contamination by non-agricultural facilities in 'A' reservoir watershed located in OO city, Kyounggi-do, Korea. Ground- and stream water samples showed (Na+K)-Cl, Ca-(Cl, SO₄) and Ca-Cl type in an illegally discharging area of sewage and a densely industrial area indicating water contamination. Stream water of an illegally discharging area of sewage had high COD, T-N and T-P. In this area, direct incoming of sewage into stream water was induced ground water system by well pumping, and it made a progress of ground water contaminations with those components. Groundwater of a densely industrial area showed high concentrations of T-N, NO₃-N. From a nitrogen isotope analysis, stream water of an illegally discharging area of sewage has $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ values of 0.7‰ was strongly affected by nitrogen originated from agrochemicals, and a densely industrial area of 19.7‰ from septic system. Ground- and stream water of a livestock farming area were contaminated with NH₃-N and Mn, which was affected by intensive livestock facilities. SAR-conductivity plot indicates the water does not pose either alkalinity or salinity hazard for irrigation. COD, T-N, T-P, NO₃-N, NH₃-N and Mn concentrations from contaminated areas were diminished by mixing with 'A' reservoir water. There were no water contaminations in silver towns, vacationlands around reservoir and golf links. Consequently, it should be made a plan of systematic managements for past-and-present possible contaminants and sewage systems in preventing water contamination by non-agricultural facilities.

Key words : Agricultural water resources, Non-agricultural facilities, A livestock farming area, Water contamination, Water management

요 약 문

국내 농촌지역은 국제적인 농산물 개방 여파, 대도시 인근지역 택지개발 및 산업시설 설치, 각종 레저산업의 유입 등 비농업시설이 기존 농경지를 대체·개발하면서 다각적인 발전의 활로를 모색하고 있다. 그러나 이러한 개발속도에 비해 수질관리는 상대적으로 뒤쳐지는 편이다. 이 연구는 개발이 활발한 경기도 OO시 A저수지 유역 대표적인 비농업시설을 중심으로 지하수 및 하천수 시료를 채수하여, 비농업시설 설치운영이 농촌용수 수질에 미치는 영향을 살펴 보았다. 연구지역 내 비농업시설에 의한 수질오염은 적절한 처리시설 없이 하수가 A저수지로 무단 방류되는 지역과

*Corresponding author : kpnam@snu.ac.kr

원고접수일 : 2008. 9. 12 심사일 : 2008. 9. 19 게재승인일 : 2009. 3. 2

질의 및 토의 : 2009. 6. 30 까지

공장밀집지역에서 발생했다. 배경수질 분석결과, 두 지역의 하천수 및 지하수에서 (Na+K)-Cl, Ca-(Cl, SO₄), Ca-Cl 유형 등이 나타나 외부 오염물질의 유입을 보였다. 하수 무단방류지는 면소재지 발생하수가 하천수에 유입됨에 따라 COD, T-N, T-P 오염이 심각했고, 인접한 지하수는 하천수의 유도함양 결과, 화학비료 기원의 NO₃-N 오염이 진행 중이었다. 공장밀집지는 T-N, NO₃-N 오염이 심각했고, 공장지역 정화조 액상오수의 무단방류가 NO₃-N 오염의 원인이었다. 축산시설 개발지역에서는 가축분뇨에서 기원한 유기물이 하천수 및 지하수에 유입되어 NH₃-N, Mn 오염을 보였다. 농약은 골프장을 비롯한 전체 비농업시설 지역에서 불검출 되었고, SAR(Sodium Adsorption Ratio)-전기전도도 분석 결과, 연구지역 용수를 관개용수로 사용 시 알칼리도 및 염도에 대한 위해가 없는 것으로 나타났다. 실버타운, 레저관광지, 골프장 주변 지역의 용수는 대체적으로 수질이 양호했다. 결론적으로, 연구지역 내 수질오염은 국지적인 비농업시설 설치지에서 발생하였으나, 이러한 오염수가 연구지역의 최종 집수지인 A저수지에 유입되면, 타 수계의 청정수와 혼합·희석에 의해 A저수지에서는 수질오염이 거의 나타나지 않았다. 그러나 향후 연구지역에 비농업시설이 난립할 경우 A저수지의 희석효과를 기대하기 어려우므로, 농촌개발과 병행할 수 있는 농촌용수 수질관리 계획이 수립되어 청정한 농촌용수 수질관리가 이루어질 필요가 있다.

주제어 : 농촌용수, 비농업시설, 축산시설, 수질오염, 수질관리

1. 서 론

WTO, FTA, DDA 등 국제적인 농산물 개방화 여파, 도시 지가 상승 및 개발규제에 따른 인근 농촌지역으로의 산업시설 이전 및 택지 개발, 시도지자체의 지역 관광산업 활성화와 이에 따른 레저산업 유입 등으로, 국내 농촌은 날이 갈수록 쌀 농업 중심의 고전적인 농촌마을 형태에서 벗어나 도농복합형, 관광레저형, 산업형 등의 다양한 주거형태로 변화를 거듭하고 있다. 이에 따라 기존의 농경지도 농업목적 외 비농업 시설용지로 전환·개발되어 다각적인 발전의 활로를 모색하고 있다. 국립농산물품질관리원(2008)의 경지면적통계에 따르면, 2007년 11월 현재 국내 전체 농지면적은 17,820 km²로서, 최근 10년간 서울시 면적의 약 2.35배에 달하는 1,420 km²의 농경지가 감소되었고, 지역별로는 경기도가 가장 많았으며(234 km²), 그 다음이 전남(209 km²), 경북(162 km²) 순이었다. 이렇게 감소된 농경지는 대부분 대규모 택지 개발, 산업단지 조성, 공공시설 전용, 도로건설 등의 비농업 시설용지로 전환되었고, 전국 농공(산업)단지의 87% 이상이 농촌지역에 위치하는 결과를 낳았다(농촌지하수넷, www.groundwater.or.kr). 그런데 이러한 비농업시설은 설치 및 운영에 따라 필연적으로 하수·산업폐수가 생성되므로 인근 농경지 오염을 야기할 수 있고, 상·하수도 보급 및 하폐수 처리시설 등이 미비한 농촌지역에는 수질오염의 원인이 될 수 있다. 농림수산식품부는 농산물 안전을 확보하기 위해 생산부터 수확 후 포장까지 농식품 위해요소를 종합적으로 관리하는 우수농산물 인증제도(GAP)를 현재 시행 중인데, 주변 비농업시설의 영향으로 인해 토양·수질이 부적합해진 농경지에서 생산된 농산물은 유통·보급에 경쟁력

을 상실하여 농가소득 저하의 원인이 될 수 있다. 일례로, 2005년에 965개 농가를 대상으로 한 GAP 시범사업 점검 결과, 토양·수질 부적합에 의한 미승인이 전체 110건으로서 전체 미승인 206건 중 53%에 달하는 것으로 나타났다(농림수산식품부, www.mifaff.go.kr). 농산물 생산의 기반인 토양·수질을 적극적으로 관리·개선하는 것이 안전농산물 생산의 기본이며, 나아가 오염된 농지에서 생산된 농산물 유통을 방지하여 우리 농산물의 국제경쟁력을 확보하고 국민건강을 도모하는 것이 미래 농업의 첫 번째 길이다. 그 동안 농촌지역 용수의 수질과 오염에 대한 연구는 수많은 연구자들에 의해 수행되어 왔지만(김경호 외, 2002; 김연태·우남칠, 2003; 김연태 외, 2005; 김형돈 외, 1998; 나춘기·손창인, 2005; 최정찬 외, 1998; Criss and Davidson, 1996; Karr et al., 2002; Negrel et al., 2003; Williamson et al, 1998), 비농업시설의 수질에 대한 영향을 직접적으로 언급하여 연구한 사례는 드문 편이다. 이 연구는 현재 비농업시설의 개발이 활발히 진행 중인 경기도 OO시 A저수지 유역을 시범연구지역으로 선정하여, 비농업시설의 설치운영이 농촌용수 수질에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

2. 연구지역

연구지역의 총면적은 94 km²이고, 약 18,000명(2007.12 현재)이 거주한다(경기도청, www.gg.go.kr). 연구지역은 국가에서 지정한 성장관리권역으로서 산업체가 계속 증설 중이고, 일부는 도시개발구역으로 설정되어 있다. 연구지역 내 비농업시설로는 공장지대, 골프장, 천주교 성지, 관광레저시설, 아파트 택지개발지 등이 있고, 178개 제조업

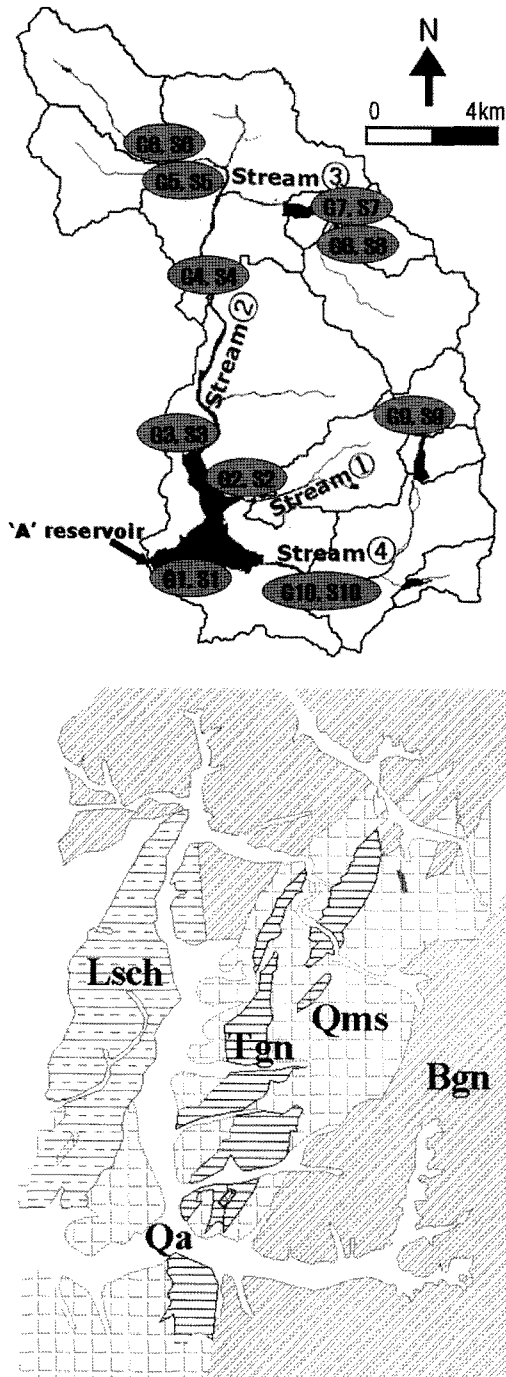


Fig. 1. Sampling locations and geologic map of study area.; (a) Sampling locations, (b) Geologic map (modified after Oh and Park, 1973), Abbreviation, G, Ground water; S, Surface water; Lsch, Leucocratic schist; Tgn, Tourmaline bearing gneiss; Qms, Quartz-mica schist; Bgn, Biotite gneiss; Qa, Quaternary alluvium.

시설에 약 4,600여명의 근로자가 종사하고 있다(2006.12 현재). 수문 현황으로는 소규모 농업용 저수지 3개(각 저수량 1,003천 m³, 1,698천 m³, 228천 m³)와 4개 주 유입

하천(①~④ 하천)의 하천수가 A 저수지(저수량 17,200천 m³; 시료명 G1, S1)로 최종 집중되고 있다(Fig. 1). ① 하천 유역에는 13개 중대형 축산시설(닭 150,000, 시슴 200, 돼지 3,000, 소 150, 양 560 마리)이 운영 중이다(G2, S2). ② 하천 하류 지역은 아직 하수처리장이 건설되지 않은 면소재지(인구 약 2,200명)가 위치하며, 발생하는수는 별도의 처리없이 수로 및 관거를 통하여 A저수지로 직접 방류되고 있다(G3, S3). ② 하천 중류 지역은 전형적인 농업지역이다(G4, S4). ② 하천 상류지역은 연구지역 전체 폐수배출업소의 약 50%가 위치하는 공장밀집지역(G5, S5)이고 2007년 현재 하수관이 설치 공사 중이며, 인근지역에는 개인주택 마당 주변에 자급용 발작물이 재배 중이다(G6, S6). ③ 하천 지역에는 농업용 저수지 주변 관광레저시설(G7, S7)과 1개 골프장(폐수배출량 29 만톤/일)(G8, S8)이 있다. ④ 하천 유역은 인근 도시지역의 수자원 공급을 위해 상수원 보호구역으로 지정되어 있지만, 상류 지역에 천주교 성지(유동인구 30~60 만명/년), 실버타운 등이 설치되어 있다(G9, S9). ④ 하천 나머지 지역은 상수원 보호 관계로 비농업시설이 거의 없으며 논의 비율이 다른 지역에 비해 높다(G10, S10). 연구지역의 지질은 선캠브리아기 변성암류가 대부분을 차지한다(오인석·박석환, 1973). 이들은 기원암의 성분과 구조, 변성과 정 중에 받은 차이에 따라 흑운모편마암(Bgn), 함전기석편마암(Tgn) 등의 편마암류와 우백색 편암(Lsch), 석영-운모편암(Qms)의 편암류로 구분된다. 그리고 이들 변성암류를 제4기 충적층(Qa)이 부정합으로 덮여있다(Fig. 1).

3. 연구방법

2007년 5월, 7월, 11월, 12월과 2008년 5월에 지하수 및 하천수 시료를 총 5회 채수하였다(Fig. 1). 하천수 시료는 4개 하천 주변 비농업시설 인근에서 9개를, A저수지에서 1개를 채수하였다. 지하수 시료는 별도의 관측정을 설치할 수 없었기 때문에, 하천수 채수 지점 인근 직선거리 50 m 내외의 가정용 천부 지하수 관정(굴착 깊이 20 m 이내)에서 고인물의 4~5배를 양수하고 수온이 일정해진 후 채수하였다. 2007년(4회)에는 양이온, 음이온, 미량 금속, T-N, T-P, COD를, 2008년(1회)에는 농약성분을 분석하였다. 채수한 물시료에 대해 지하수는 G로, 하천수는 S로 명명하였다. 수소이온농도(이하 pH), 수온, 산화/환원전위(이하 ORP), 용존산소(이하 DO) 및 전기전도도(이하 EC) 등 수리물리특성 자료는 채수 즉시 Orion사의 휴대용 pH/수온 측정기(Thermo Orion 290A, USA),

휴대용 ORP 측정기 및 DO 측정기(Thermo Orion Star series, USA), TOA 사의 휴대용 EC 측정기(TOA, CM-14P, Japan)를 이용하여 측정하였다. 양이온(Na, K, Ca, Mg, Si, NH₄), 미량 금속(Mn, Fe), 음이온(Cl, SO₄, NO₃, PO₄) 분석을 위한 시료는 0.45 μm 여과지를 이용하여 부유물질을 제거한 후, 양이온 시료는 농축질산을 이용하여 pH 2 이하로, 음이온 시료는 4°C 이하로 냉장하여 폴리에틸렌 채수병에 보관하였다. 질소동위원소 분석을 위한 시료는 염화수은(HgCl₂)을 첨가하여 0.001 M 이상으로 유지시켜 미생물을 치사시켰다. T-N, T-P, COD 시료는 무균채수병으로 채수 후 농축황산을 이용하여 pH 2 이하, 4°C 이하로 냉장 보관하였다. 농약성분(카바릴, 다이아지논, 말라티온, 파라티온, 페니트로티온) 분석을 위한 시료는 500 mL 유리병에 채수하여, 카바릴 분석을 위한 시료는 황산(50%) 및 Na₂SO₄를 이용하고, 나머지 성분 분석을 위한 시료는 염산(1+1), NaCl을 이용하여 pH 3-4로 보관하였다. 실내 분석은 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 실시하였다. 음이온은 Metrohm사의 이온크로마토그래피(IC, 모델명 761 compact, Switzerland)를 이용하여, 양이온 및 미량금속은 Jobin-Yvon사의 유도결합플라즈마 방출분광분석기(ICP-AES, 모델명 Ultima 2, France)를 이용하여 분석하였다. 알칼리도는 0.01 N 염산을 이용한 적정법으로 측정하였고, COD는 0.025 N 과망간산칼륨용액을 이용하여 측정하였으며, T-N, T-P는 Bran-Luebbe사의 자동분석기(모델명 Autoanalyzer 3, Germany)를 이용하여 분석하였다. 농약성분은 디클로로메탄-hexan 추출법으로 농축하여 Agilent사의 가스크로마토그래피(GC, 모델명 6890, USA)를 이용하여 분석하였다. 질소동위원소는 서울대학교 농생명과학공동기기원에 의뢰하여 연속 흐름타입으로 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 지하수 및 하천수의 반응

용존이온 중의 중탄산이온(HCO₃)과 규산(SiO₂)의 함량 비로부터 지하수에서 주로 일어나는 대체적인 반응을 추정할 수 있다(Hounslow, 1995). 분석 결과, ② 하천 주변 지하수 시료 대부분은 함량비가 5 이하, ③ 하천 주변 지하수 시료들은 5~10, ① 하천과 ④ 하천 주변 지하수 시료들은 10 이상으로 나타나 뚜렷한 차이를 보였다(Fig. 2). 따라서 연구지역 지하수의 용존이온을 생성하고 배경 수질을 결정하는 주된 물-지질매체 간의 반응은, ② 하천 지하수 수질은 주로 규산염광물의 풍화작용, ③ 하천 주변

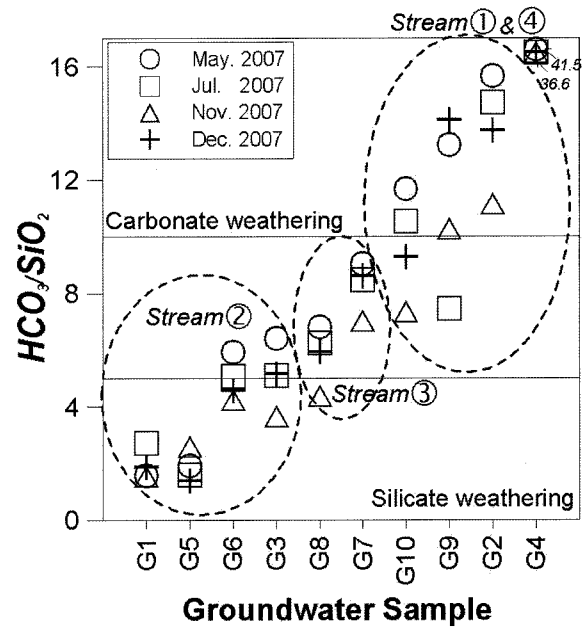


Fig. 2. Groups of ground water samples compared to the ratio of HCO₃ to SiO₂ and stream numbers.

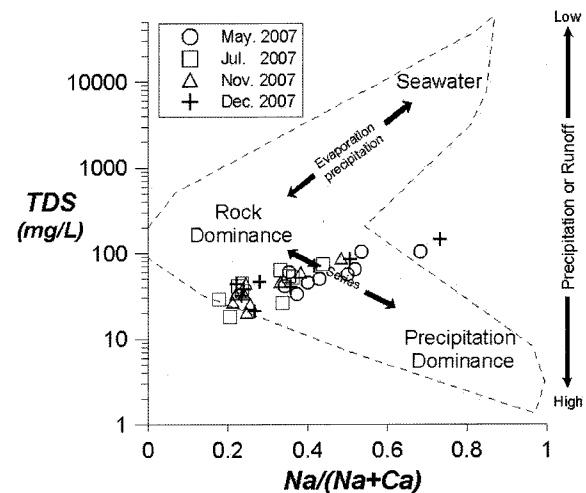


Fig. 3. Chemical composition of stream-water samples plotted on the Gibbs diagram.

지하수 수질은 탄산염광물 및 규산염광물의 공통적인 풍화작용, 그리고 ① 하천과 ④ 하천은 탄산염광물의 풍화작용임을 보였다. 연구지역의 지질은 편암-편마암 계열로서 수질시료 채수 지점 간 기반암의 차이는 크게 나타나지 않는다. 따라서, 수계에 따른 지하수-지질매체 간 반응은 주로 탄산염 및 규산염광물의 상대적인 함량 및 풍화의 차이에 기인하는 것으로 생각된다. 하천수 시료의 경우, 용존 이온들의 기원을 유추하기 위하여 Gibbs(1970)의 방법에 따라 도시해 보았다(Fig. 3). 수중 TDS(mg/L)의 양은 분석한 모든 이온의 농도의 총합으로 구하였다.

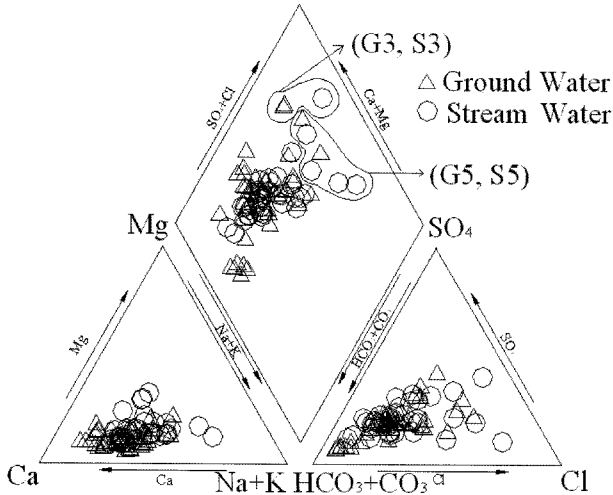


Fig. 4. Piper diagram showing the distribution of major cations and anions in water samples.

이 결과, 대부분의 하천수 시료의 화학조성은 지질매체의 반응과 관련 있었다.

4.2. 배경수질 변화

실내에서 분석한 수질자료를 Piper diagram으로 나타낸 결과, 시료 대부분은 계절에 관계없이 지하수 및 하천수 공통적으로 Ca-HCO₃ 유형을 보였다(Fig. 4). 그러나 하수무단 방류지(G3, S3), 공장밀집지(G5, S5)에서는 (Na+K)-Cl, Ca-(Cl, SO₄), Ca-Cl 등 다양한 수질유형이 나타난다. 하수무단 방류지(G3, S3)와 공장밀집지(G5, S5) 시료는 ① 하천 주변 시료로서 규산염광물의 풍화가 배경수질에 영향을 미치는 지역이므로, 양이온 중, Na, K 등이 우세하게 검출되는 것은 인위적인 오염원인 뿐 아니라 자연적인 원인으로도 생각될 수 있다. 그러나, 하수무단 방류지(G3, S3)와 공장밀집지(G5, S5) 시료는 Na, Cl 농도가 상대적으로 우세하므로, 외부 오염물질이 하천수 및 지하수로 유입되었을 가능성이 높다(김연태 외, 2005). 따라서, 계절에 관계없이 꾸준히 우세하게 나타나는 Na, Cl 등은 하수 무단방류 및 공장시설에서 기인하는 산업폐수 및 생활하수의 영향인 것으로 생각된다. 상기 두 지점을 제외한 나머지 비농업시설 설치 지역(골프장, 천주교 성지, 저수지 수변 관광레저시설, 실버타운 등) 및 전형적인 농업지역에서는 연간 배경수질의 변화가 거의 없었다.

4.3. 축산시설 지역의 수질오염

비농업시설에 의한 수질오염을 살펴보기 전에, 농가수입증대를 위해 쌀농업에서 중대형 축산시설로 전환한 지역(G2, S2)의 수질오염을 살펴보았다. 중대형 축산시설 인

근(G2, S2)의 경우, Mn과 NH₃-N 오염이 나타났다(Fig. 5). NH₃-N는 G2, S2에서 0.2~0.7 mg/L, 0.01~2.3 mg/L였고, 이 중 38%의 시료가 먹는물 수질기준(0.5 mg/L)을 초과하였다. G2, S2의 T-N은 0.5~3.7 mg/L, 1.5~4.2 mg/L였고, 75%의 시료가 호소의 농업용수 수질기준(1.0 mg/L)을 초과하였으며, NH₃-N이 T-N에서 차지하는 비율은 G2, S2 각기 13~52%, 1~55%였다. G2, S2의 DO는 1.8~6.0 mg/L, 7.6~8.0 mg/L의 호기성 상태였고, 따라서 질산화가 잘 일어날 수 있는 환경이다. 그러나 T-N 중 NH₃-N의 높은 비율은 산화조건일 때 근거리에서 질산성질소 오염원이 직접 유입됨을 지시한다(김연태 외, 2005). 또한, 한국농촌공사(2007)는 동일지점의 하천수에서 분원성 대장균이 2마리/100 mL, 총대장균이 평균 2,420마리/100 mL가 검출되어 하천의 1급 공업용수 수질기준만 만족하는 것으로 보고한 바 있다. 따라서 가축분뇨 등에 기원한 질소 오염원이 지하수 및 하천수 수질에 직접적인 영향을 주는 것으로 보인다. Mn은, G2, S2 각기 0.3~1.2 mg/L, 0.02~0.3 mg/L로서, G2, S2 이 외의 지하수 및 하천수 시료의 ~0.1 mg/L, ~0.2 mg/L보다 높게 검출 되었고, 50%의 시료가 먹는물 수질기준(0.3 mg/L)을 초과하였다. 그런데, G2, S2의 NH₃-N, Mn은 뚜렷한 상관관계(G2, R²=0.98; S2, R²=0.96)를 보였다(Fig. 6). G2의 산화환원전위(ORP)는 평균 271 mV이었고, 지하수 시료 평균(352 mV)보다 상대적으로 환원환경이었다. 가축분뇨 등이 포함된 유기물이 지표에서 직접유입, 하천수의 유도함양 등에 의해 지하수 대수층에 유입되어 분해되면 산소를 소비시키고 혐기성 환경을 만들게 된다. 이 혐기성 환경으로 인하여 대수층의 자갈과 모래가 형성되어 있는 망간산화물로부터 Mn²⁺가 용해되어 나오기 때문에 지하수 중에 Mn 함량이 높게 나온 것으로 생각된다(김영인, 2007).

4.4. 비농업시설에 의한 수질오염

비농업시설에 의한 수질오염은 주로 하수무단 방류지(G3, S3), 공장밀집지(G5, S5) 에서 발생하였다. 하수 무단방류지(G3, S3)는 하천수(S3)에서 COD, T-N, T-P 오염이 심각했다(Fig. 5). 면소재지에서 발생한 하수가 하천수에 무단방류 됨에 따라, COD는 호소의 농업용수 수질기준(8 mg/L)을 훨씬 초과하는 20~56 mg/L 로 검출되었다. 마찬가지로 T-N은 5~30 mg/L, T-P는 0.6~2.8 mg/L로서 각기 호소의 농업용수 수질기준 1 mg/L, 0.1 mg/L를 초과하였다. 지하수(G3)의 NO₃-N의 경우, 먹는물 수질기준을 초과하는 시료는 없었지만, 2007년 11월에 채수한

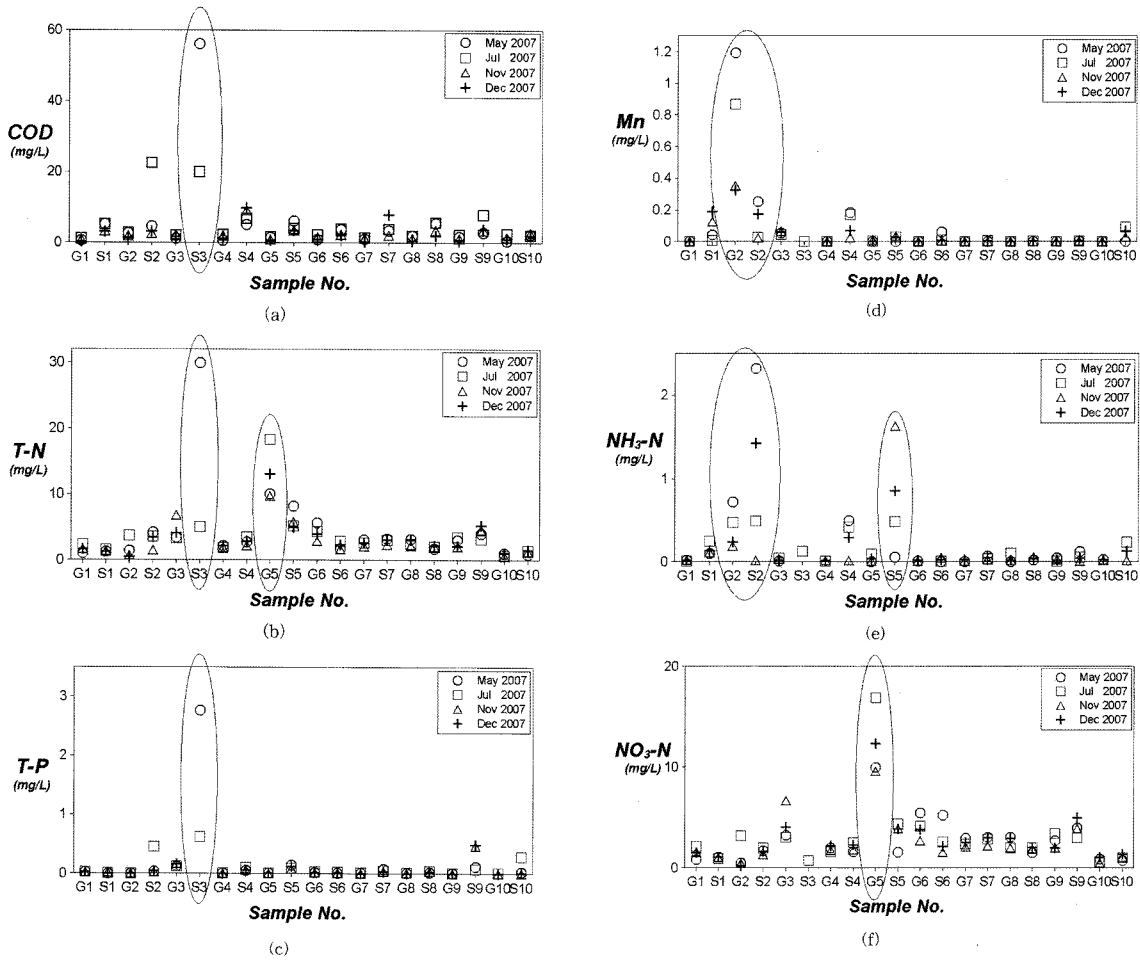


Fig. 5. Concentrations of (a) COD, (b) T-N, (c) T-P, (d) Mn, (e) NH₃-N and NO₃-N.

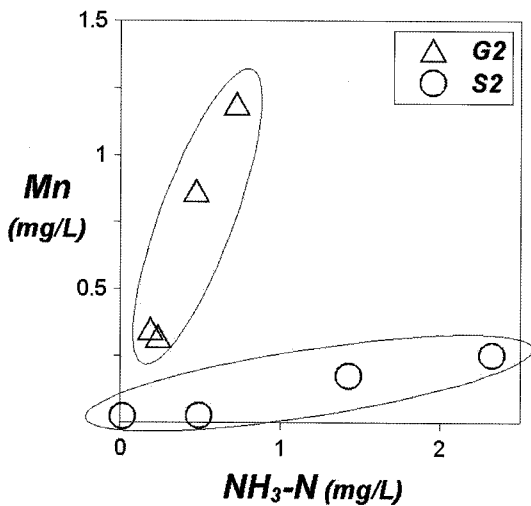


Fig. 6. Correlations between Mn and NH₃-N dissolved in G2 and S2 water samples.

시료에 대해 질소동위원소($\delta^{15}\text{N-NO}_3$)를 분석한 결과, 0.7%로서 화학비료 기원 쪽에 도시되었다(Fig. 7). 이는 지

하수 시료를 가정용 관정에서 채수하였으므로, 개인가정의 생활하수 유입영향일 수 있다. 반면, 하천에 인접한 지하수 관정은 양수에 의한 하천수의 유도함양(induced recharge)이 발생할 수 있으므로, 지하수질에 영향을 줄 수 있는 질산염 배출원은 인근 무단방류 하천수의 유도함양일 수도 있다. 따라서 지하수(G3)의 NO₃-N에 영향력을 갖는 요인은 무단방류수일 가능성이 있다.

공장밀집지(G5, S5)는 T-N, NO₃-N 및 NH₃-N의 오염이 나타났다(Fig. 5). T-N은 지하수(G5)에서 9.7~18.4 mg/L, 하천수(S5)에서 5.0~8.2 mg/L로 검출되어, 모든 시료가 호소의 농업용수 수질기준(1 mg/L)을 초과하였다. NO₃-N는 지하수(G5)에서 9.6~16.9 mg/L로 검출되어, 75%의 시료가 먹는물 수질기준(10 mg/L)을 초과하였고, NO₃-N이 T-N에서 차지하는 비율은 92~99%였다. 2007년 11월에 채수한 지하수 시료(G5)에 대해 질소동위원소($\delta^{15}\text{N-NO}_3$)를 분석한 결과, 19.7%로서 분뇨기원 쪽에 도시되었다(Fig. 7). 분뇨 기원의 질산염 오염원으로는 유기

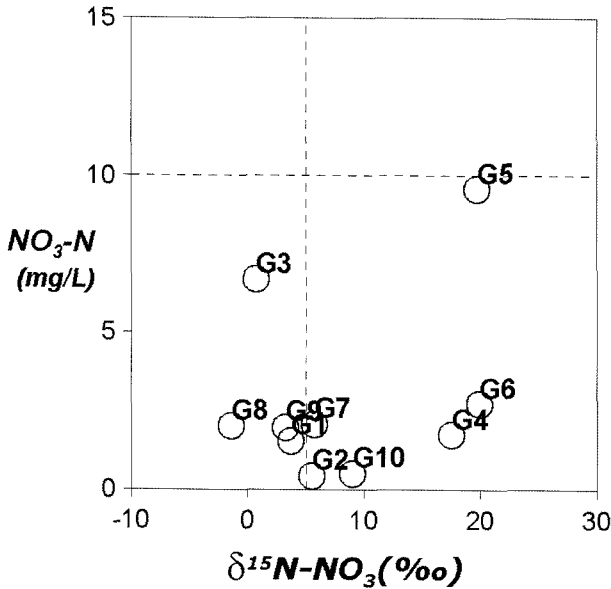


Fig. 7. Plots of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration versus $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ in ground water samples collected on November, 2007.

비료, 축산폐수, 정화조 등이 있고, 하천수의 높은 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도(0.1~1.6 mg/L)는 근거리에서 질소오염원이 방류됨을 시사한다. 따라서, 농업활동이 거의 중단되었고, 하수처리 시설이 설치 중인 공장밀집지의 질소오염물질은 공장 정화조 시설의 분변에서 기원한 액상오수의 무단방류일 가능성이 있다. 이렇게 무단 방류된 질소오염원은 상대적으로 산화환경인(평균 359 mV) 대수층에 유입되어 지하수(G5)의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도를 높인 것으로 생각된다. 따라서 지하수(G5)의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 영향력을 갖는 요인은 공장 정화조 기원 무단방류수일 가능성이 있다. 이에 대해서는, 향후 하수관 설치가 완료되어 공장하수 배출이 제어된 뒤, 주기적으로 수질시료 채수를 하여 이러한 가능성을 재확인할 필요가 있다. 나아가, 이 연구에서 수행하지 않은, 공장기동에 필수적인 유류에 의한 오염에 대해서도 조사·연구하여 비농업시설에 대한 연구를 심화할 필요가 있다.

그러나 하수무단 방류지(G3, S3)와 공장밀집지(G5, S5)를 제외한 다른 비농업시설 설치 지역(저수지 수변 관광레저시설, 골프장, 천주교 성지 및 실버타운)에서는 수질오염이 크지 않았다. 저수지 수변 관광레저시설(G7, S7) 인근 지하수(G7)의 COD는 1.0~1.4 mg/L 범위, T-N은 2.1~2.6 mg/L, T-P는 ~0.02 mg/L, $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 2.0~3.0 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 은 ~0.01 mg/L로 검출되었고, 하천수(S7)의 COD는 2.0~7.8 mg/L, T-N은 2.3~3.2 mg/L, T-P는 ~0.1 mg/L, $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 2.2~3.1 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 은 ~0.07 mg/L로 검출되었다. 골프장(G8, S8) 인근 지하수(G8)의 COD는 1.2~1.8 mg/L 범위, T-N은 2.1~3.2 mg/L, T-P는 ~0.01

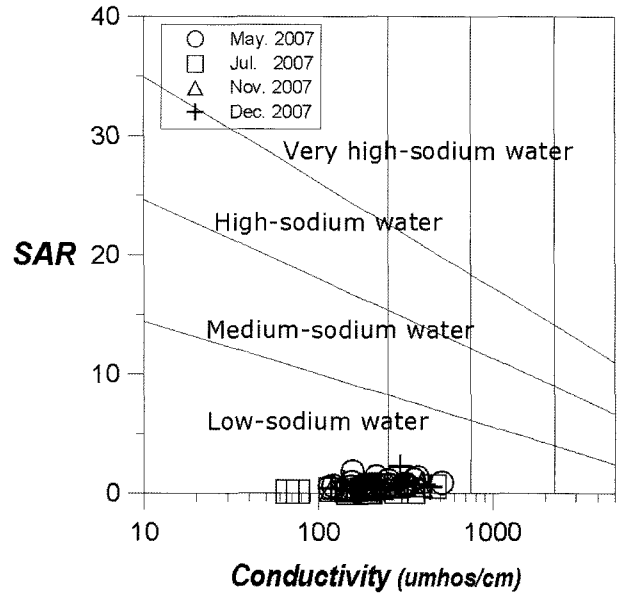


Fig. 8. SAR-conductivity plots of the water samples.

mg/L, $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 2.0~3.0 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 은 ~0.1 mg/L로 검출되었고, 하천수(S8)의 COD는 3.4~5.6 mg/L, T-N은 1.7~2.1 mg/L, T-P는 ~0.05 mg/L, $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 1.5~2.0 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 은 ~0.07 mg/L로 검출되었다. 그리고 천주교 성지 및 실버타운(G9, S9) 인근 지하수(G9)의 COD는 1.2~2.2 mg/L 범위, T-N은 2.0~3.5 mg/L, T-P는 ~0.01 mg/L, $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 2.0~3.4 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 은 ~0.04 mg/L로 검출되었고, 하천수(S9)의 COD는 2.8~7.9 mg/L, T-N은 3.2~4.5 mg/L, T-P는 0.1~0.5 mg/L, $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 3.0~4.0 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 은 ~0.1 mg/L로 검출되었다. 종합하면, 이들 3지역에서는 T-N이 전반적으로 호소의 농업용수 수질기준인 1 mg/L를 초과하였으나, 이를 제외한 COD, T-P의 경우 호소의 농업용수 수질기준인 각 8 mg/L, 1 mg/L를 초과하지 않았고, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 은 먹는물 수질기준인 각 10 mg/L, 0.5 mg/L를 초과하지 않았다. 따라서, 현재까지는 수질오염에 대한 시설관리가 대체적으로 잘 이루어지고 있음을 보였다.

농약성분 분석결과, 제조목적으로 농약을 사용하는 골프장을 비롯한 모든 지역에서 불검출로 나타나 수질관리가 잘 이루어짐을 보였다. 그리고, 연구지역의 농촌용수를 관개용수로 사용했을 때 토양구조에 위해성을 가할 수 있는지를 평가하고자, SAR(Sodium Adsorption ratio)-전기전도도 분석을 실시한 결과(Richards, 1969), 대부분의 시료는 낮은 염도(salinity)와 낮은 SAR 영역에 도시되었다. 따라서, 현재까지는 농업용 관개용수로 사용할 때, 알칼리도와 염도 위해가 없는 것으로 나타났다(Fig. 8).

4.5. 비농업시설과 수질오염의 관련성

농촌지역 주민들의 주 상수원인 지하수와 하천수의 오염은 상수원 환경개선의 관점을 넘어 삶의 기본인 물 문제, 나아가 삶의 근거를 좌우하는 문제이다. 그리고 농업용 관개용수의 대부분을 차지하는 저수지의 오염은 안전농산물 생산에 타격을 줄 수 있는 중요한 문제이다. 따라서 농촌지역 비농업시설의 설치·운영 시 가장 우선적으로 고려해야 할 점은, 비농업시설에 의해 발생 가능한 산업폐수·하수 등에 의한 농촌용수(지하수, 하천수, 저수지) 수질오염을 사전에 예방하는 것이다. 이러한 오염예방은 농촌용수 수질보전을 가능케 하여 안전한 상수원 공급 및 지속적인 청정농산물 생산에 기여할 수 있고, 친환경적 비농업시설 설치·운영을 가능케 하여 비농업시설에 운영에 따른 지자체 발전에 기여할 수 있다. 본 연구지역에는 천주교 성지, 골프장, 저수지 수변 관광레저시설 등 수질오염관리가 잘 이루어지고 있는 비농업시설이 있는가 하면, 하수 무단방류지, 공장밀집지처럼 관리가 소홀하여 수질오염이 심각한 지역도 있었다. 하수 무단방류지 및 공장밀집지 주변의 수질오염은 농촌지역 주민의 상수원 수질악화, 주변 농경지의 오염, 농산물 품질저하의 원인이 될 수 있고, 지자체 발전에 악영향을 끼칠 수 있는 저해요소로 작용할 수 있다. 따라서, 하수무단 방류지 및 공장밀집지에는 하수관거를 시급히 정비·설치하고 하수고도 처리 시설을 도입하여, 환경친화적인 비농업시설의 지속적인 운영과 수질오염예방을 함께 도모해야 할 것이다. 최종집수지인 A저수지에서는 하수 무단방류지, 공장밀집지 등 비농업시설에서 발생한 오수가 유입될지라도, 현재까지는 기타 수계의 청정수와 혼합, 희석에 의해 수질오염은 아직 나타나지 않았다. 그러나 앞으로 다른 여러 구역에서 수질대책이 마련되지 않은 비농업시설이 설치될 경우에는 A저수지의 희석효과를 기대하기가 점점 더 어려워질 것이고 이에 따라 농업용 관개용수의 수질이 악화될 가능성이 있으므로, 향후 비농업시설 설치·운영 시 수질오염 방지에 대하여 주의를 기울일 필요가 있다. 나아가, 이러한 비농업시설의 설치·운영에 따른 문제는 비단 본 연구지역에만 국한된 문제는 아닐 것이므로, 비농업시설이 설치되어 있는 국내 농촌 전반에 대해서도 다각적인 연구·조사가 필요할 것이다.

5. 결 론

연구지역 내 일부 비농업시설 및 축산시설 전환지역의 하천수 및 지하수에서 수질오염이 발생되었다. 비농업시

설에 의한 수질오염은 주로 비농업시설의 관리가 소홀한 하수 무단방류지 및 공장밀집지에서 나타났다. 하수 무단방류지 하천수의 COD, T-N, T-P는 면소재지에서 발생한 생활하수가 하천수에 무단방류 됨에 따라, 각기 호소의 농업용수 수질기준의 최대 약 7배, 30배, 3배로 검출되었다. 그리고 하수가 지하수로 유도함양 됨에 따라 인근 가정용 지하수에 NO₃-N 오염을 진행시켰다. 공장밀집지 지하수와 하천수의 T-N은 각기 호소의 농업용수 수질기준의 최대 약 18배, 약 8배로 검출되었다. 공장밀집지 지하수의 NO₃-N는 75%의 시료에서 먹는 물 수질기준을 초과하였고, 정화조 시설의 분변에서 기원한 액상오수의 무단방류에 기인하는 것으로 나타났다. 축산시설 전환지역 지하수와 하천수의 NH₃-N는 가축분뇨 등에 기원한 질소오염원에 기인하여 각기 먹는물 수질기준의 최대 약 1.5배, 약 5배로 검출되었고, T-N은 공통적으로 최대 약 4배로 검출되었으며, Mn은 지하수에서 먹는물 수질기준의 약 4배로 검출되었다. 이를 제외한 나머지 비농업시설 설치 지역(골프장, 천주교 성지, 저수지 수변 관광레저시설 등)에서는 대체적으로 양호했다. 연구지역의 최종집수지인 A 저수지에는 상기한 오염수가 직접 유입되지만, 타수계의 청정수와 혼합, 희석에 의해 수질오염이 나타나지 않았다. 그러나, 향후 수질오염 예방시설이 마련되지 않은 비농업시설이 난립한다면 A저수지의 희석효과를 기대하기가 점점 더 어려워지므로 A저수지의 오염가능성이 높아진다. 따라서 현재 오염이 진행 중인 비농업시설 주변에는 즉각적인 하수처리시설 설치 등이 시급히 시행되어 수질오염 확산을 방지할 필요가 있다. 그리고 향후 개발 예정지에는 사전 수질오염 방지대책 및 하수처리 계획 수립 등이 선행되어, 농촌개발과 병행할 수 있는 청정한 농촌용수 수질관리가 이루어져야 할 것이다.

사 사

이 연구는 농림수산식품부 농림기술개발과제(과제번호 106103-3) 및 한국농어촌공사 자재자금 연구비의 일부 지원으로 이루어졌다.

참 고 문 헌

경기도청, www.gg.go.kr

국립농산물품질관리원, 2008, 2007 경지면적통계, p. 19.

김경호, 윤성택, 채기탁, 최병영, 김순오, 김강주, 김형수, 이철우, 2002, 금강 권역 총적층 지하수의 질산염 오염: 질산성 질소의 기

- 원과 거동 고찰 및 안전한 용수 공급을 위한 제언, *지질공학*, **12**(4), 471-484.
- 김연태, 우남철, 2003, 축사가 밀집된 농촌지역 천부지하수의 질산염 오염특성, *지하수토양환경*, **8**(1), 57-67.
- 김연태, 우남철, 이광식, 송윤구, 2005, 질산성질소로 오염된 소유역 하천 수질의 계절 변화, *지하수토양환경*, **10**(2), 20-27.
- 김영인, 2007, 담양지역 음용지하수 중에 함유되어 있는 Mn 함량의 계절적 변화와 지구화학, *조선대학교 석사학위 논문집*, p. 72.
- 김형돈, 우남철, 최미정, 1998, 충북 괴산군 덕평리 일대의 지하수 수질과 오염, *지하수환경*, **5**(3), 141-148.
- 농림수산식품부, www.mifaff.go.kr
- 농촌지하수넷, www.groundwater.or.kr
- 나춘기, 손창인, 2005, 섬진강 주변 지하수의 수질 및 오염특성: 오염원 및 유해성 평가, *자원환경지질*, **38**(3), 261-272.
- 오인석, 박석환, 1973, 오산 지질도폭 설명서, *국립지질광물연구소*, p. 21.
- 최정찬, 황정, 박충화, 1998, 공주시 유구읍 명곡리지역 천부 및 심부지하수의 지화학적 수질특성과 오염, *자원환경지질*, **31**(6), 485-498.
- 한국농촌공사, 2007, *농촌용수 종합시험지구 운영(수질)*, 한국농촌공사, p. 137.
- Ball, J.W. and Nordstrom, D.K., 1991, WATEQ4F-User's manual with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace and redox element in natural waters. U.S.G.S Open-File Report 90-129, p. 185.
- Criss, R.E. and Davidson, M.L., 1996, Isotopic imaging of surface water/groundwater interactions, Sacramento Valley, California, *J. Hydrol.*, **178**, 205-222
- Gibbs, R.J., 1970, Mechanism controlling world water chemistry. *Science*, **170**, 135-137.
- Hem, J.D., 1992, Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. USGS Water-supply paper 2254, 3rd(ed), p. 263.
- Hounslow, A.W., 1995, Water quality data-analysis and interpretation. Lewis Publishers, New York, p. 397.
- Karr, J.D., Showers, W.J. and Hinsor, T.H., 2002, Nitrate source identification using $d^{15}N$ in a ground water plume near an intensive swind operation, *Ground Water Monit. R.* **22**(2), 68-75.
- Negrel, 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.
- Richards, L.A., 1969, Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, U.S. salinity laboratory staff, Agriculture handbook no.60, U.S. government printing office, Washington, D.C.
- Williamson, A.K., Munn, M.D., Ryker, S.J., Wagner, R.J., Ebbert, J.C., and Vanderpool, A.M., 1998, Water quality in the central Columbia plateau, Washington and Idaho, 1992-95. U.S. Geological Survey Circular 1144.