

지리정보시스템을 이용한 지하수 오염 평가

Assessment of Groundwater Contamination Using Geographic Information System

전효택(Hyo-Taek Chon) · 안홍일(Hong-Il Ahn)

요약 : 이 연구는 오염원이 산재해 있는 농촌지역으로 아산지역을, 그리고 공업단지와 주거지역이 위치한 공단지역으로 구로구지역을 연구대상지역으로 선정하여 공단지역과 농촌지역 지하수의 물리·화학적 특성과 오염 양상을 조사하였다. 또한 지하수의 효율적인 이용과 적절한 관리를 위해 지리정보시스템을 구축하고 이를 이용하여 지하수오염과 잠재점오염원의 공간적인 관련성을 규명하였다. 아산지역 지하수는 Ca-HCO₃ 유형의 지하수이며 SiO₂와 HCO₃ 함량비가 높은 특징을 보여 물-암석 반응이 지하수 성분을 지배하는 가장 큰 요인임을 보여준다. 구로구지역 지하수는 Ca-HCO₃ 유형의 지하수이며 Cl, NO₃ 및 SO₄ 등 오염물질이 부화되고 SiO₂에 비해 Ca 함량비가 더 높게 나타나는 등 다양한 오염원에 의한 영향을 반영하고 있다. 아산지역에서는 37.5%(총 40개 중 15개)의 지하수 시료에서 NO₃, SO₄ 및 Zn의 함량이 먹는 물 수질 기준을 초과하는 오염현상이 조사되었으며, 대부분이 NO₃의 오염이었다. 축산농가 및 공장에 대해 오염영향범위를 조사하기 위해 버퍼링 분석을 실시한 결과 100 m 거리에 걸쳐 오염의 영향이 미치고 있어 공장 및 축산농가가 지하수 오염의 직접적인 원인임을 확인하였다. 구로구지역에서는 64.7%(총 51개 중 33개)의 지하수 시료에서 NO₃, Cl, SO₄, Fe 및 Zn의 함량이 음용수 수질기준을 초과하는 오염현상이 확인되었다. NO₃ 오염은 50 m 이상의 심부지하수에서도 관찰되어 이미 심각한 오염현상이 진행되었음을 보여주었다. Cl 오염은 구로동 지역의 50 m 이하 천부지하수에서 관찰되었으나 구로동의 구로공단지역에서는 먹는 물 수질기준 이하의 낮은 함량을 보였다. 구로동지역은 70%, 고척동지역은 42%, 궁동지역은 14%의 지하수 시료에서 오염물질이 먹는 물 수질기준을 초과하는 오염현상이 조사되었다.

Abstract : In this study two sites were selected to investigate groundwater contamination and spatial relationship between pollution level and its source. One is the Asan area, agricultural district where pollution sources are scattered. The other is the Gurogu area of Seoul city, industrial district where industrial complex and residential areas are located. Groundwater samples collected from these districts were analyzed for chemical constituents. The attribute value files of the chemical constituents of groundwater and the spatial layers have been constructed and the pollution properties have been investigated to find out spatial relationships between the groundwater constituents and pollution sources using GIS. Relatively high contents of Si and HCO₃ in groundwater from the Asan area reflect the effect of water-rock interaction, whereas high contents of Cl, NO₃, SO₄ and Ca in groundwater from the Gurogu area are due to the pollution of various sources. Pollution over the critical level of Korean Drinking Water Standard has been investigated from 15 sampling sites out of 40 in the Asan area, and 33 sampling sites out of 51 in the Gurogu area. There is pollution of NO₃, Cl, Fe, Mn, SO₄ and Zn in groundwater from the Gurogu area, and that of NO₃, SO₄ and Zn in groundwater from the Asan area. Principal pollution in both areas is NO₃ contamination. Deep groundwater from the Asan area is not contaminated with NO₃ except for one site and most of shallow groundwater near the potential point sources such as factory and stock farm is contaminated seriously. Groundwater from the Gurogu area has been already polluted seriously considering the fact of contamination of deep groundwater. This study reports a spatial relationship between the pollution level and pollution source using GIS.

서론

급격한 인구증가와 산업화가 진행되면서 물의 수요가 꾸준히

증가하고 있으나, 지표수는 한정되어 지하수에 대한 의존도가 점차 높아지고 있다. 그러나 생활 및 산업폐수 등의 각종 오염물질이 지하수로 유입되면서 지하수질이 악화되어 지하수 보전의 중요성이 대두되고 있다(건설교통부, 1995). 지하수가 오염된 후에는 오염물질이 대수층에 반영구적으로 잔존하여 오염의 복구에 많은 경비와 시간이 소모되고 완전한 복구가 불가능하

*서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부(School of Civil, Urban, and Geosystem Engineering, College of Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

므로 오염되기 전에 이를 미연에 방지하는 것이 최선의 방법이다. 지하수 자원을 효율적으로 관리하기 위해서는 체계적인 지하수자원 조사를 실시하고 이들 조사의 결과로 얻은 여러 지하수 관련 정보들을 지리정보시스템(Geographic Information System: GIS)으로 구축하여야 한다. 지리정보시스템은 이렇게 구축된 다양한 지하수 관련 자료들을 신속하고 효율적으로 조합, 입력, 분석 및 출력하여 효과적인 지하수 오염 관리가 가능하며(Aronoff, 1993), 오염물질의 거동 예측에 이용되기도 한다(Goodchild *et al.*, 1993).

국내의 체계적인 지하수 조사 사례는 대구지역과 서울지역의 지하수 오염방지 및 음용화 기술 연구(과학기술처, 1995, 1997), 서울지역 지하수 관련 기초 자료 조사(한규인, 1997) 등이 있다. 또한 용수 전량을 지하수에만 의존하는 제주도 지역에서는 지하수 자원의 최적개발 가능량 조사 연구(한정상 등, 1994), 지하수 자원의 보호에 관한 연구(한정상, 1994) 및 지하수 오염원에 관한 연구(오윤근과 현익현, 1997) 등이 활발하게 진행되었으며 지하수위, 수온, 전기전도도 등을 자동 관측할 수 있는 장기 관측시스템을 설치 운영하고 있다(진성원, 1997). 그러나 서울특별시 등 일부 대도시와 제주도를 제외하고는 이러한 지하수 관련 기초 조사가 효율적으로 수행되지 않고 있는 실정이며 수자원의 종합 관리 차원에서 수계별 유역 단위로 국가 지하수 관측망을 구축하여 운영하고 있으나 실질적인 지하수 관측을 위해서는 매우 부족한 실정이다(건설교통부, 1996). 또한 전국의 지하수 관리 업무는 지하수 담당 부서의 분산과 지하수 조사·개발 자료의 비효율적인 관리로 인해 효율성이 저하되고 있으며, 각 기관 및 부서간의 자료 공유와 표준화 등의 체계적인 지하수 관리를 위해 국내 지하수 관련 자료를 데이터베이스화하여 지하수 정보 관리 시스템을 구축하는 국가적인 차원의 사업이 추진되고 있다(건설교통부, 1997).

이 연구에서는 오염원이 산재해 있는 농촌지역과 공단지역에서 건기와 우기 후 2차례에 걸쳐 지하수를 채취하여 지하수 성분 특성 및 오염 양상을 조사하였다. 또한 지하수 오염과 대상지역의 잠재 점오염원들과의 공간적인 상관성을 지리정보시스템을 이용하여 규명하고 오염으로부터 지하수를 보전하기 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

연구대상지역

연구대상지역으로는 잠재 점오염원이 존재하는 농촌지역으로 충남 아산시 신창면 일대를, 공단지역으로 구로공단이 위치한 서울특별시 구로구 일대를 선정하여 두 지역의 지하수를 채취하고 지하수 오염현황을 비교 조사하였다.

충남 아산시 신창면 일대는 논, 밭, 과수원, 민가, 축산농가 그리고 소규모 공장들이 산재해 있는 전형적인 농촌지역이며, 현재는 약 20여개의 아파트단지(198세대~1,440세대)가 계획, 시공 혹은 입주완료되었다. 연구지역 남단에는 약 10년의 역사를 가진 특산농공단지가 가장 큰 오염원으로 자리잡고 있다. 북동쪽 및 북서쪽 일부를 제외한 대부분의 지역이 상수도가 개발되지 않아 생활 및 공업용수로 지하수를 사용하고 있다. 아파트단지와 공장 등은 깊은 개발심도의 지하수를 개발하여 사용하

고 있으나, 대부분의 민가들은 얇은 개발심도의 지하수를 이용하고 있어 지하수 오염이 진행될 경우 주민들의 건강에 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 이 지역의 지형은 소규모 산지가 단독으로 남아 잔구를 이루는 노년기 지형에 해당하며 주변 산의 계곡에서 흘러나오는 소규모 계류들이 새터저수지로 합류하여 북쪽의 오목천에 유입되고 곡교천을 거쳐 아산만으로 유입되는 수계망을 보인다. 지질특성은 중생대 백악기의 조립질 혹은 모화강암과 이를 관입한 미문상화강암이 기반암을 형성하며 동시대의 맥암류와 이들을 부정합으로 피복하고 있는 신생대 제4기의 충적층으로 구성되어 있다(김서운과 김명환, 1969). 특히 풍화작용에 약한 화강암류는 저지대를 형성하는 반면 미문상화강암은 고지대를 이루고 있다(Figure 1).

서울특별시 구로구 일대는 공단이 밀집되어 있고 공업활동의 역사가 오래되었으며, 생활 및 산업폐수, 주유소 그리고 하수관로의 누수 등 다양한 오염원이 존재한다. 구로구지역 중 구로동 지역, 고척동지역, 궁동지역 등 3개 동 지역에서 시료를 채취하였다(Figure 2). 구로동 지역은 안양천과 도림천이 둘러싸고 있으며, 구로공단이 위치한 지역으로 구로동, 신도림동, 가리봉1동을 포함하는 지역이다. 고척동 지역은 대부분이 오래된 주택가로 이루어져 있으며, 근린공원이 북쪽에 위치하고 있다. 궁동 지역은 대부분이 임야 및 농경지로 이루어져 있으며 남쪽으로 신흥주택단지가 조성되어있는 오염의 영향이 가장 적을 것으로 예상되는 지역이다. 구로구 지역은 대부분이 상수도를 이용하고 있으며 궁동지역 일부를 제외하고는 음용수로 사용하지 않고 있다. 이 지역은 만장년기에 속하는 지형으로 수지상 모양으로 발달한 수계는 개화천과 도림천이 안양천에 합류되어 북쪽의 한강으로 유입된다. 주변 지질특성은 선캄브리아기의 변성암류(경기편마암복합체), 중생대의 화성암류, 그리고 이들을 모두 부정합으로 덮고 있는 제4기 충적층으로 구성되어 있으며 특히 구로구 지역은 주로 선캄브리아기의 호상혹운모편마암과 제4기 충적층으로 구성되어 있다(김남장과 홍승호, 1975; 홍승호 등, 1982). 호상혹운모편마암은 지형적으로 저지대를 이루고 있다(Figure 2).

시료채취 및 화학분석

시료채취는 지하수를 개발하여 현재 사용하고 있는 개인 및 공공 시추정에서 건기와 우기 후 두 차례에 걸쳐 총 156개의 지하수 시료를 채취하였다. 1차 시료채취는 전형적인 건기인 1997년 4월과 5월 초에 총 86개 지점에서 시료를 채취하였으며, 2차 시료채취는 장마기를 지난 1997년 11월에 1차 시료채취지점 66지점 등 총 70개 지점에서 시료를 채취하였다. 농촌지역인 아산시 신창면 일대에서는 공장, 민가, 아파트, 식당, 과수원 등에서 35개의 1차 시료와 34개의 2차시료를 채취하였다(Figure 1). 공단지역인 구로구 일대에서는 공장, 주택, 식당, 학교, 운수회사, 사우나, 주차장, 교회 등에서 51개의 1차 시료와 36개의 2차 시료를 채취하였다(Figure 2). 지하수의 개발심도별 특성을 조사하기 위해 개발심도가 50m인 경우를 기준으로 천부지하수(50m 이하 심도)와 심부지하수(50m 이상 심도)로 구분하였다. 50m를 기준으로 사용한 것은 아산지역의 농가에

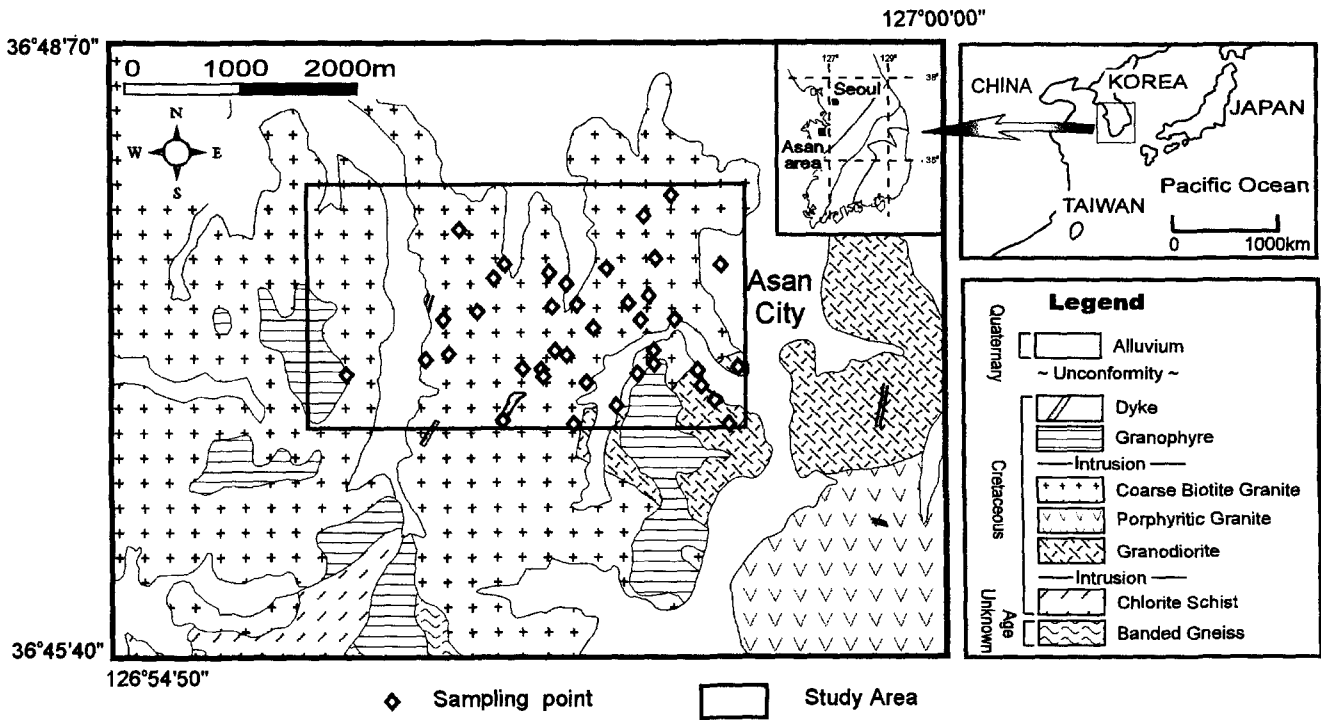


Figure 1. Geologic map with sampling sites around the Asan area (Kim *et al.*, 1969).

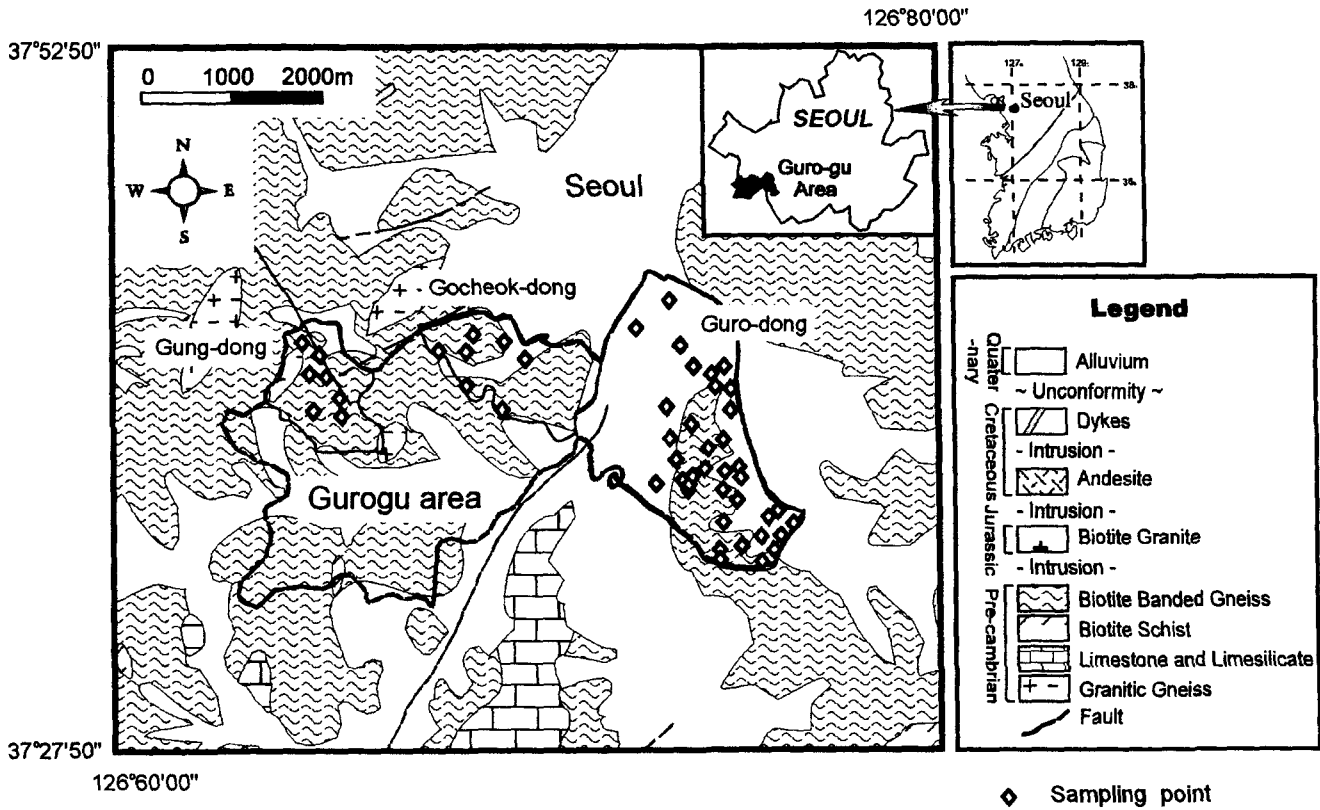


Figure 2. Geologic map with sampling sites around the Gurogu area in Seoul City (Kim *et al.*, 1975; Hong *et al.*, 1982).

서 개발하여 사용하는 지하수는 50 m 이하의 개발심도를 갖는 경우가 대부분이고 구로구지역에서는 20~30 m 개발심도를 갖는 경우가 대부분이므로 50 m를 기준으로 천부지하수와 심부지하수를 구분하였다. 아산지역 40개 시료채취지점 중 천부지

하수가 21개 지점, 심부지하수는 15개 지점, 그리고 개발심도를 알 수 없었던 경우가 4개 지점이었으며 구로구지역 51개 시료채취지점 중 천부지하수가 41개 지점 그리고 심부지하수가 10개 지점이었다.

시료는 배관의 지하수를 충분히 배출시킨 후에 필터로 부유 물질을 제거한 후 무균용기에 채수하고 이동시에는 아이스박스를, 보관시에는 냉장고를 이용하여 저온상태를 유지하여 화학 조성의 변화를 최소화하였다. 수소이온농도(pH), 산화환원전위(Eh), 수온 및 전기전도도 등 지하수의 물리적 특성은 현장에서 채수 즉시 측정하였고, 지하수의 화학성분 중 B, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Si, Sr, Zn, Al, Li의 17개 양이온은 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrophotometry)로, K, Na는 AAS(Atomic Absorption Spectrophotometry)로, F, Cl, NO₂, Br, NO₃, PO₄, SO₄의 7개 음이온은 IC(Ion Chromatography)로 그리고 HCO₃는 적정법으로 측정하였다.

지하수의 물리화학적 특성

지하수시료의 화학분석값에 대한 양·음이온 함량의 charge balance 결과는 92%의 시료가 10% 이내의 오차한계 이내로 나타나고 있어 화학분석 결과는 큰 오류가 없는 것으로 판단되며, 지하수 시료의 현장측정값과 주성분 원소들의 평균, 중앙값, 표준편차, 최대값 및 최소값을 Table 1에 나타내었다.

지하수시료의 pH는 아산지역과 구로구지역의 중앙값이 각각 6.8과 6.3으로 중성 혹은 약산성의 특징을 보인다. 두 지역 지하수시료에서 pH는 5.6~8.0, Eh는 0.12~0.29 V 범위의 전이환경 혹은 대기접촉환경임을 알 수 있었다. 두 연구지역 지하수의 화학분석 결과 TDS가 높은 시료에서 오염물질을 다량 함유하고 있으므로 총용존물질(TDS)는 오염의 직접적인 지표가 되었다. 자연수 중의 총용존물질과 전기전도도는 높은 상관성을 보이며 회귀분석 결과 두 요소의 비례상수는 아산지역과 구로구지역이 각각 0.59와 0.63으로 통상적으로 알려져 있는 0.7

(Freeze and Cherry, 1979)보다 낮은 값을 보였다. 현장에서 측정된 전기전도도는 아산지역(중앙값 270 $\mu\text{S}/\text{cm}$)이 구로구지역(중앙값 585 $\mu\text{S}/\text{cm}$)에 비해 매우 낮은 값을 갖는다.

NO₃는 생활하수나 축산폐수 등 오염물질의 유입으로 지하수에 부화되는 전형적인 오염물질이며(Freeze and Cherry, 1979; Ford and Tellam, 1994) 아산지역(중앙값 22.0 mg/l)과 구로구지역(중앙값 42.8 mg/l) 모두 높은 함량과 큰 분산범위를 가지며 특히 높은 함량값을 보이는 구로구지역 지하수는 전반적으로 오염의 영향을 많이 받고 있음을 반영한다. Cl 함량은 아산지역에서 중앙값 17.6 mg/l, 구로구지역에서 중앙값 78.6 mg/l로 우리나라 화강암질암과 변성퇴적암류내에 위치한 오염되지 않은 천부 지하수(300 m 이하 개발심도) 중 함량이 2.0~10.0 mg/l 수준인 점(이종운, 1997)을 고려할 때 물-암석반응으로 부화되는 수준 이상의 매우 높은 함량임을 알 수 있으며 이는 오염물질의 지하수내 유입에 기인함을 의미한다. 두 연구지역 지하수 중의 양이온의 중앙값을 비교하면 Na(아산지역: 15.8 mg/l; 구로구지역: 23.8 mg/l), Mg(아산지역: 6.1 mg/l; 구로구지역: 19.0 mg/l), Ca(아산지역: 30.0 mg/l; 구로구지역: 51.5 mg/l) 등은 구로구지역 지하수에서 높게 나타나고 있으며 Si(아산지역: 19.8 mg/l; 구로구지역: 14.4 mg/l) 함량만 아산지역 지하수에서 높은 값을 보였다. 구로구지역 지하수 중의 Mg(중앙값 19.0 mg/l), Ca(중앙값 51.5 mg/l), Na(중앙값 23.8 mg/l) 함량은 변성퇴적암류내의 오염되지 않은 지하수 중의 함량(Mg: 3.0~5.0 mg/l; Ca: 20~30 mg/l; Na: 5.0~7.0 mg/l; 이종운, 1997)보다 높은 함량을 보여 이들 양이온들은 오염물질의 유입으로 부화되었음을 알 수 있었다.

아산지역 및 구로구지역 지하수의 화학적 특징을 살펴보기 위해 각 원소의 함량을 TDS로 나누어준 후 백분율로 표시하여 상대적 함량을 비교하였다(Figure 3). TDS로 표준화한 것은 지하수 시료 채취 시기가 다르므로 절대함량보다는 상대함량을 비교하는 것이 더 타당하기 때문이다. 아산지역 지하수의 양이온 함량비는 SiO₂(19.3%)>Ca(13.3%)>Na(7.7%)>Mg(2.6%)>K(0.8%)이며 음이온 함량비는 HCO₃(28.6%)>NO₃(12.8%)>Cl

Table 1. Results of descriptive statistics of physical properties and major ion contents for the groundwater samples

	Asan area (69 ¹⁾)					Gurogu area (87 ¹⁾)				
	Mean	Median	Std.dev. ²⁾	Min.	Max.	Mean	Median	Std.dev. ²⁾	Min.	Max.
pH	6.7	6.8	0.4	5.8	8.0	6.4	6.3	0.3	5.6	7.5
Eh (mV)	227	228	29	158	293	211	205	42	120	295
Temp. (°C) ³⁾	14.9	14.7	1.7	12.0	21.8	15.6	15.6	1.6	9.4	20.0
conduc. ⁴⁾ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	333	270	216	112	996	576	585	248	142	1170
TDS (mg/l)	260	219	128	128	675	393	388	176	119	1206
Cl(mg/l)	31.3	17.6	30.9	5.4	135.0	81.8	78.6	55.1	7.4	325.9
NO ₃ (mg/l)	36.6	22.0	39.4	1.7	183.0	54.7	42.8	50.4	n.d. ⁵⁾	196.7
SO ₄ (mg/l)	16.3	4.4	35.5	n.d.	222.1	34.0	25.6	34.1	1.0	267.1
HCO ₃ (mg/l)	66.4	58.6	28.9	25.6	173.3	87.7	64.7	57.5	17.1	281.9
K (mg/l)	1.8	1.6	0.8	0.6	4.9	3.9	3.1	3.6	1.2	26.7
Na (mg/l)	20.3	15.8	12.2	9.3	74.5	29.4	23.8	23.7	8.4	194.8
Mg (mg/l)	7.3	6.1	4.9	1.5	25.0	19.0	19.0	10.3	2.3	46.5
Ca (mg/l)	36.7	30.0	24.1	11.5	119.3	51.2	51.5	21.2	13.8	94.9
Si (mg/l)	19.7	19.8	3.3	9.9	26.8	13.6	14.4	4.3	0.1	24.3

¹⁾Number of samples, ²⁾std.dev.: standard deviation, ³⁾Temp.: Temperature, ⁴⁾conduc.: conductivity, ⁵⁾n.d.: Not determined.

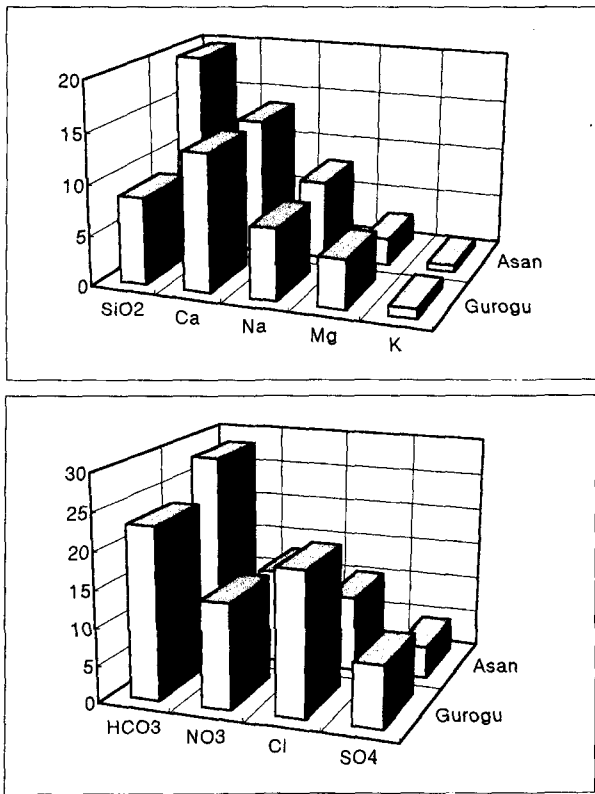


Figure 3. Major ion contents normalized by TDS in the groundwater samples from the Asan area and the Gurogu area.

(10.4%)>SO₄(4.1%)이다. 구로구 지하수의 양이온 함량비는 Ca(13.2%)>SiO₂(8.2%)>Na(7.3%)>Mg(4.7%)>K(1.1%)이며 음이온 함량비는 HCO₃(22.7%)>Cl(19.1%)>NO₃(14.5%)>SO₄(8.7%)이다. 아산지역 지하수의 양이온에서 SiO₂의 함량비가 가장 높은 것은 구로구지역에 비해 오염의 영향이 아직 적으며 오염보다는 지하수와 암석의 반응이 지하수 주성분원소의 함량을 지배하는 가장 중요한 요인임을 보여주고 있다. 아산지역 지하수의 음이온에서는 HCO₃가 음이온 중 가장 높은 비율로 존재하며 HCO₃의 높은 함량비값은 암석이나 토양과의 반응 결과라고 생각할 수 있다. 구로구지역 지하수의 음이온 중 HCO₃의 함량비가 아산지역 지하수에 비해 낮은 특징을 보이며 오염에 의해 부화되는 Cl, NO₃, SO₄가 부화되는 등 다양한 오염원에 의한 오염현상을 반영하고 있다. 구로구지역 지하수의 양이온은 물-암석반응으로 용출되는 SiO₂보다 Ca 함량비가 더 높게 나타났다. 이는 구로구지역 지하수중에 오염과 관련된 음이온이 부화되는 점과 비교할 때 오염에 의해 Ca도 부화되었음을 보여주는 것이다.

지하수 오염 특징

오염현황

지하수시료의 용존이온 함량이 먹는 물 수질 기준을 초과하는 지하수를 오염지하수로 분류하였으며 Cl(먹는 물 수질기준: 150 mg/l), NO₃(먹는 물 수질기준: 44.3 mg/l), SO₄(먹는 물

수질기준: 200 mg/l), Fe(먹는 물 수질기준: 0.3 mg/l), Mn(먹는 물 수질기준: 0.3 mg/l) 및 Zn(먹는 물 수질기준: 1 mg/l)의 함량이 먹는 물 수질기준을 초과하는 경우가 조사되었다. 아산지역 지하수에서는 37.5%(총 40지점 중 15지점)의 지하수가, 그리고 구로구지역 지하수에서는 전체 중 2/3 수준인 64.7%(총 51지점 중 33지점)의 지하수가 먹는 물 수질 기준 이상의 오염물질을 함유하는 오염지하수로 조사되었다. 아산지역 및 구로구지역 지하수를 비오염지하수와 오염지하수로 구분하여 현장측정값 및 주성분 이온들의 평균값, 중앙값 및 표준편차를 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

아산지역 지하수에서 NO₃(10지점), SO₄(1지점) 그리고 Zn(4지점)의 함량이 먹는 물 수질 기준을 초과하는 오염지하수(40지점 중 15지점)로 조사되었다. 오염지하수의 NO₃ 함량은 평균값이 69.5 mg/l, 중앙값이 56.4 mg/l이며 최고 183.0 mg/l의

Table 2. Results of descriptive statistics of physical and chemical analyses for contaminated and uncontaminated groundwater samples from the Asan area

	uncontaminated groundwater samples			contaminated groundwater samples		
	Mean	Median	Std.dev. ¹⁾	Mean	Median	Std.dev.
pH	6.8	6.8	0.4	6.4	6.3	0.4
Eh (mV)	208	204	21	212	210	18
TDS (mg/l)	206	199	61	367	348	157
Cl(mg/l)	16.7	16.2	6.9	57.9	51.6	37.3
NO ₃ (mg/l)	18.8	19.3	7.2	69.5	56.4	53.1
SO ₄ (mg/l)	6.5	4.4	10.3	37.5	22.4	60.7
HCO ₃ (mg/l)	71.7	62.2	31.5	54.4	51.9	23.8
K (mg/l)	1.4	1.2	0.5	2.2	2.2	0.9
Na (mg/l)	15.3	15.0	4.0	30.4	28.1	13.4
Mg (mg/l)	5.5	5.0	2.7	10.8	11.1	6.1
Ca (mg/l)	28.1	25.5	13.5	56.3	49.6	32.1
Si (mg/l)	19.5	19.9	3.1	21.9	21.6	2.9

¹⁾std.dev.: standard deviation.

Table 3. Results of descriptive statistics of physical and chemical analyses for contaminated and uncontaminated groundwater samples from the Gurogu area

	uncontaminated groundwater samples			contaminated groundwater samples		
	Mean	Median	Std.dev. ¹⁾	Mean	Median	Std.dev.
pH	6.6	6.5	0.4	6.4	6.5	0.3
Eh (mV)	204	204	29	205	198	36
TDS (mg/l)	335	343	147	455	452	119
Cl(mg/l)	58.5	52.5	39.8	102.0	92.0	47.1
NO ₃ (mg/l)	23.0	18.3	22.7	79.2	69.6	53.6
SO ₄ (mg/l)	29.0	30.5	14.6	34.8	24.1	30
HCO ₃ (mg/l)	106.2	89.1	68.9	83.3	64.7	48.4
K (mg/l)	2.6	2.2	1.2	4.2	3.4	4.0
Na (mg/l)	22.5	18.1	12.3	32.8	28.7	17.5
Mg (mg/l)	16.9	17.1	10.7	22.4	22.3	8.3
Ca (mg/l)	45.9	46.8	20	61.0	58.0	18.9
Si (mg/l)	13.8	13.8	2.5	14.5	15.0	3.5

¹⁾std.dev.: standard deviation.

높은 함량을 보였으며 전체의 25%(40개 지점 중 10지점)의 지하수에서 NO₃의 농도가 먹는 물 수질 기준을 초과하는 값을 보였다. 이는 NO₃의 오염이 이 지역 지하수에서 가장 광범위하게 진행되는 오염현상을 보여준다. 생활용수기준(88.6 mg/l)을 초과하는 지하수의 경우도 10%(40개 지점 중 4지점)였으며 공업용수기준(177.2 mg/l)을 초과하는 경우는 1개 지점에서 조사되었다. 심도에 따른 오염양상은 천부지하수(심도 50 m 이하)에서는 43%(21개 지점 중 9지점)의 지하수시료가 질산성 질소의 오염을 보여주고 있으며 심부지하수(심도 50 m 이상)는 15지점 중 1지점만 오염현상이 조사되어 아직은 질산성 질소의 오염이 천부의 지하수에 국한되고 있음을 알 수 있었다. 그러나 이 지역 상수도 보급률은 1995년 현재 10.4%(아산시, 1996)로써 대부분의 주민들이 천부지하수를 생활용수 및 식수로 사용하고 있다는 점을 감안할 때 질산성 질소의 오염을 계속 방지할 경우 이를 장기간 식수로 사용하는 주민들에게 심각한 장애를 일으킬 수 있음을 알 수 있다. 아산지역 지하수에서 오염지하수의 SO₄ 함량은 평균값이 37.5 mg/l, 중앙값이 22.4 mg/l이며 최고 222.1 mg/l의 높은 함량을 보였다. 특히 222.1 mg/l의 함량을 갖는 시료의 경우는 인간활동에 의한 오염 현상에 의해 부화되었음을 알 수 있었다. 중금속인 Zn가 먹는 물 수질기준(1 mg/l) 이상으로 오염된 경우는 4개 지점에서 조사되었으며 이중 3지점은 최근에 아파트단지를 시공하면서 개발한 100 m 이상의 개발심도를 가진 지하수로서 최근에 취수정을 개발하면서 일시적으로 나타난 오염현상인지 아니면 실제로 대수층이 오염되어 나타나는 결과인지는 지속적인 조사를 하여야 정확히 알 수 있을 것이다. Cl는 먹는 물 수질기준 이상으로 오염된 경우는 조사되지 않았다. 그러나 오염지하수의 Cl 함량이 평균값 57.9 mg/l, 중앙값이 51.6 mg/l으로 전체 아산지역 지하수 시료의 함량에 비해 월등히 높은 점은 Cl의 부화가 자연적인 현상보다는 생활하수나 축사폐수 등의 인위적인 원인에 기인한다는 것을 보여준다.

구로구지역에서 먹는 물 수질 기준을 초과하는 오염지하수(51지점 중 33지점은 NO₃(25지점), Cl(6지점), Fe(7지점), Mn(4지점), Zn(2지점) 그리고 SO₄(1지점)의 경우가 조사되었으며 농촌지역인 아산지역에 비해 다양한 오염물질의 오염현상을 보이고 있다. 개발심도 50 m 이하의 천부지하수는 63%(총 41개 지점 중 26지점) 그리고 50 m 이상의 심부지하수는 50%(총 10개 지점 중 5개)의 시료가 오염물질이 먹는 물 수질기준을 초과하는 오염지하수 조사되었다. 50 m 이상의 개발심도를 갖는 심부지하수 중 50%의 시료가 오염현상을 보이고 있으며 이는 이미 구로구지역 지하수의 오염이 심각하게 진행되었으며 현재도 지속적인 지하수 오염이 진행되고 있다는 것을 보여준다. 오염지하수에서 NO₃는 평균값 79.2 mg/l, 중앙값 69.6 mg/l의 함량특징을 보이고 있으며 49%(51개 지점 중 25지점)의 지하수에서 NO₃의 농도가 먹는 물 수질 기준을 초과하여 가장 광범위하게 진행되는 오염물질임을 알 수 있다. 생활용수기준(88.6 mg/l)을 초과하는 지하수의 경우도 20%(51개 지점 중 10지점)였으며 공업용수기준(177.2 mg/l)을 초과하는 경우도 1개 지점 조사되었다. 심도에 따른 NO₃의 오염양상은 천부지하수(심도 50 m 이하)에서는 43%(41개 지점 중 17지점)의 지하수시료가 질산성 질소의 오염을 보여주고 있으며 10개의 심부

지하수(심도 50 m 이상) 중 5개 지점에서 오염이 조사되어 NO₃의 오염이 다른 오염물질보다 좀더 광범위하고 깊은 심도에까지 진행되었다는 것을 알 수 있다. SO₄ 함량은 평균값 34.0 mg/l, 중앙값 25.6 mg/l, 표준편차 34.1 mg/l을 보였으며 특히 최고 267.1 mg/l의 함량을 갖는 경우도 조사되었다. 오염지하수의 SO₄ 함량은 평균값이 34.8 mg/l, 중앙값이 24.1 mg/l으로 전체 구로구지역 지하수의 함량특징과 큰 차이를 보이지 않았다. 오염지하수 중의 Cl함량은 평균값이 81.8 mg/l, 중앙값이 78.6 mg/l이며 Cl 함량이 먹는 물 수질기준 이상으로 오염된 경우는 15%(51개 지점 중 6개 지점)에서 조사되었으며 이들은 모두 개발심도 50 m 이하의 천부 지하수에서 조사되었다. 심부지하수에서 먹는 물 수질기준 이상으로 오염된 경우는 조사되지 않았으나 100 mg/l 이상의 비교적 높은 함량을 갖는 경우도 조사되어 심부 지하수도 Cl 오염의 영향을 받고 있으며 짧은 기간내에 먹는 물 수질기준 이상의 오염현상이 나타날 수도 있음을 보여주고 있다. 그 외 Fe 7개 지점, Mn 4개 지점, Zn 2개 지점에서 먹는 물 수질 기준 이상의 오염현상이 조사되었으며 이들 오염 현상은 모두 천부지하수에서 조사되었다.

오염 및 비오염 지하수 비교

아산지역 및 구로구지역의 비오염지하수 및 오염지하수에 대해 TDS로 표준화한 주성분 양이온 및 음이온의 상대적 함량을 비교하였다(Figure 4). 비오염지하수의 경우 아산지역에서는 양

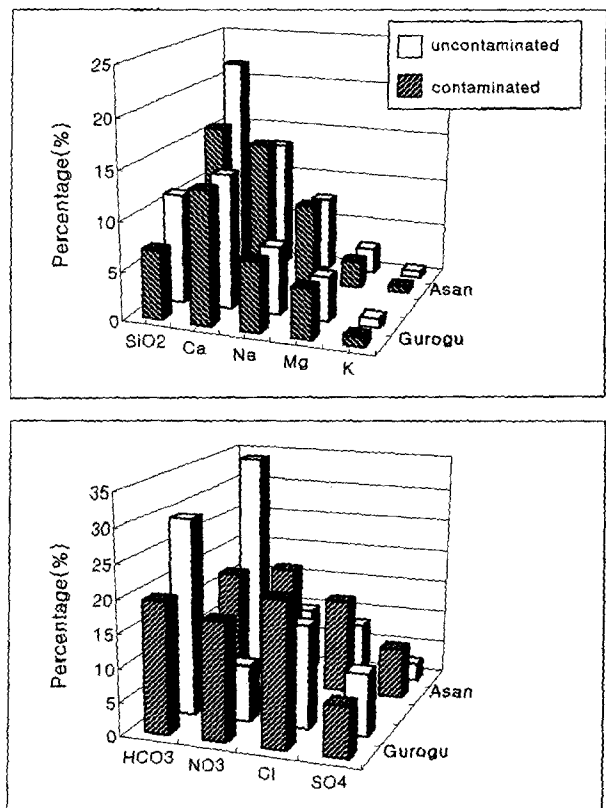


Figure 4. Major ion contents normalized by TDS in contaminated and uncontaminated groundwater samples from the Asan area and the Gurogu area.

이온의 상대함량이 $SiO_2 > Ca > Na > Mg > K$ 의 함량특성을 그리고 음이온은 $HCO_3 > NO_3 > Cl > SO_4$ 의 함량특성을 보이고 있다. 구로구지역 비오염지하수는 양이온이 $Ca > SiO_2 > Na > Mg > K$ 의 함량을 그리고 음이온은 $HCO_3 > Cl > SO_4 > NO_3$ 의 함량특성을 보였다. 이들 결과는 두 지역의 비오염지하수는 모두 $Ca-HCO_3$ 유형의 지하수임을 나타내고 있다. 아산지역 오염지하수의 양이온 함량은 $SiO_2 > Ca > Na > Mg > K$ 로 비오염지하수와 같은 함량순서를 보이고 있으나 SiO_2 함량값이 감소하고 Ca, Na 및 Mg 는 증가하는 특징을 보이고 있다. 이는 지하수 중의 SiO_2 함량은 큰 변화가 없으나 오염이 진행되면서 TDS값이 증가하고 Ca, Na, Mg 등의 절대함량이 오염의 영향으로 증가하였기 때문이다. 아산지역의 오염지하수내의 음이온 함량은 $NO_3 > HCO_3 > Cl > SO_4$ 로 NO_3 의 함량이 가장 높았으며 Cl 와 SO_4 도 증가하였다. 구로구지역의 오염지하수내의 양이온 함량은 $Ca > SiO_2 = Na > Mg > K$ 의 순서로 존재하며, SiO_2 함량값이 감소한 반면 Ca, Na, Mg 는 약간 증가하였다. 구로구지역의 오염지하수내의 음이온 함량은 $Cl > HCO_3 > NO_3 > SO_4$ 로 비오염지하수와 비교하여 Cl 함량은 높으나 HCO_3 의 함량은 낮은 특징을 보이고 있다.

아산지역 및 구로구지역 지하수를 오염 및 비오염 지하수로 구분하여 지하수 시료의 함량을 당량으로 환산하여 Piper's diagram에 도시하였다(Figure 5). 아산지역 및 구로구지역 비오염지하수는 $Cl+SO_4$ 의 함량이 적고 HCO_3 의 함량이 상대적으로 높은 영역에 도시되며 오염지하수는 Cl, SO_4 가 높고 HCO_3 가 상대적으로 낮은 지점에 도시된다. 또한 음이온의 경우 오염지하수에서는 Cl 의 영역에 도시되는 반면에 비오염 지하수는

HCO_3 의 영역에 도시되고 있다. 그러나 오염 및 비오염 지하수는 SO_4 의 함량이 상대적으로 낮은 특징을 보이고 있다. 양이온의 경우는 Ca, Mg, Na 및 K 에 의해 오염 및 비오염 지하수가 구분되지 않고 중복되어 나타나고 있다.

지리정보시스템의 이용

지리정보시스템(GIS: Geographic information system)은 공간상 위치를 점유하는 공간정보(Spatial data)와 이와 관련된 속성자료(Attribute data)를 통합하여 처리하는 정보시스템으로 다양하고 방대한 지리정보를 효율적으로 수집, 저장, 갱신, 처리, 분석 및 출력하기 위해 이용되는 하드웨어, 소프트웨어, 지리자료 및 인적자원의 총체적 조직체라고 정의할 수 있다(시스템공학연구소, 1996; 유근배, 1993; Harris et al., 1997). 두 연구 지역에 대해서는 공장, 하수관망도, 축산농가, 폐수배출시설 등의 잠재점오염원, 지질도, 도로망, 수계, 등고선 및 시료채취 위치도 등의 공간정보들과 지하수 심도와 지하수의 화학분석 결과에 대한 속성자료들을 지리정보시스템으로 구축하였으며 각종 오염원에 대해 버퍼링(Buffering)을 실시하여 오염원과 지하수오염의 공간적인 상관성을 조사하였다. 연구대상지역의 기본도는 1:5,000 축척의 지형도를 이용하였으며, 모든 좌표값은 TM투영법에 따른 평면직각좌표계로 변화하였으며 미터단위를 사용하였다.

아산지역

아산지역 지하수에서 37.5%(총 40지점 중 15지점)가 오염지하수로 조사되었으며 이 지역의 잠재 점오염원으로는 소규모 공장, 특산농공단지, 축산농가 및 거주지역이 산재되어 있다. 이 지역에서는 NO_3, SO_4, Zn 의 오염이 관찰되었으며 가장 광범위하게 나타나고 있는 오염은 NO_3 에 의한 오염으로 대부분 천부지하수에서 관찰되었고(21개 지점 중 9지점) 심부지하수에서는 1개 지점에서 NO_3 의 오염이 관찰되었다.

잠재점오염원에서의 오염 영향 범위를 조사하기 위해 축산농가와 공장에 대해 50 m~300 m의 범위에 대해 버퍼링(buffering) 분석을 하였으며, 오염 영향 범위의 설명에 유용한 50 m, 100 m, 그리고 150 m 거리의 버퍼링(buffering)을 작성하고 NO_3 의 오염현상이 관찰되는 지하수를 함께 도시하였다(Figure 6). 오염 지하수가 50 m 버퍼링 안에 위치하는 경우는 20%(10개 중 2개)였으며 100 m 버퍼링 안에 위치하는 경우는 90%(10개 중 9개)로 대부분의 오염지하수는 100 m 버퍼링 안에 존재하고 있다. 또한 150 m 버퍼링의 경우도 100 m 버퍼링과의 경우와 마찬가지로 90%였다. 이는 100 m 버퍼링이 아산지역의 지하수 오염 영향 범위와 가장 잘 일치됨을 보여주는 것이다. 오염특성과 잠재점오염원의 공간적인 관계를 조사하기 위해 잠재점오염원인 축산농가와 공장에 대해 오염영향영역(Influential area)을 작성하였다. 오염원이 위치한 지점의 경사가 5° 이하인 경우에는 집수구역의 영향이 없는 것으로 가정하여 100 m 버퍼링만을 오염영향영역으로 설정하였으며 경사가 5° 이상인 경우에는 100 m 버퍼링과 오염원의 집수구역(watershed)을 중첩하여 오염영향영역을 설정하였다(Figure 7).

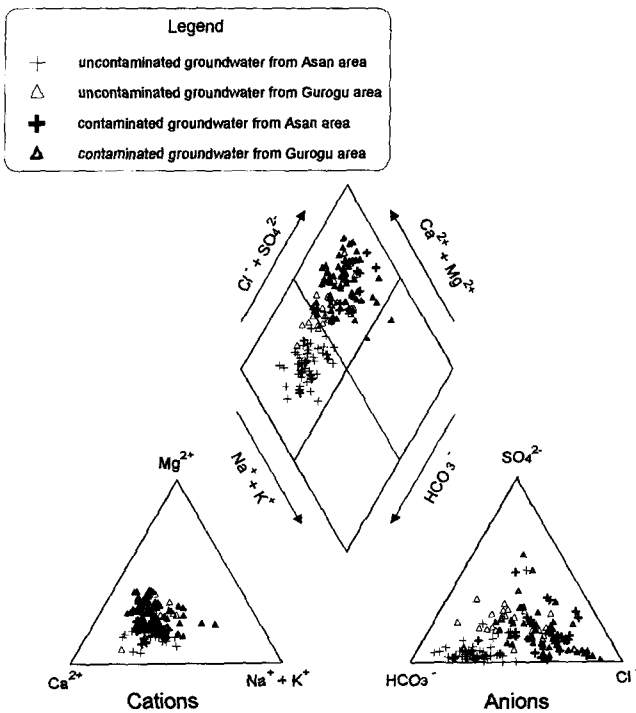


Figure 5. Chemical analysis studied groundwaters represented as percentages of total equivalents per liter plotted on the Piper's diagram.

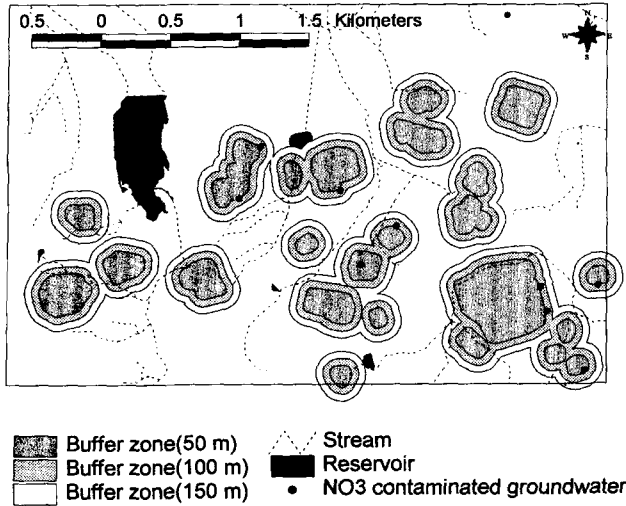


Figure 6. 50, 100 and 150 m Buffer zones from factory and stockfarm with NO₃ contaminated groundwaters from the Asan area.

아산지역 천부지하수의 NO₃ 함량은 축산농가의 오염영향영역 안에 위치하는 지하수(평균값 91.1 mg/l, 중앙값 79.6 mg/l)에서 높은 함량특징을 보이며 83%(6개 지점 중 5개 지점)가 먹는 물 수질 기준 이상의 오염지하수로 조사되었다. 공장의 오염영향영역 안에 위치한 천부지하수(평균값 46.3 mg/l, 중앙값 51.5 mg/l)에서도 비교적 높은 값을 보이며 60%(5개 지점 중 3개 지점)가 오염지하수로 조사되었다(Figure 7). 그러나 공장과 축산농가의 오염영향영역 밖에 위치한 천부지하수에서는 평균값 22.7 mg/l 및 중앙값 21.5 mg/l의 비교적 낮은 함량분포를 보이며 10%(10개 지점 중 1개 지점)만 오염지하수로 조사

되었다. 이러한 결과는 천부지하수의 NO₃ 오염은 축산농가와 공장의 오염영향영역 안에 위치한 지역에서 현저한 오염현상이 일어나고 있음을 보여주고 있다. 심부지하수에서의 NO₃ 함량은 축산농가의 오염영향영역 안에 위치한 지하수(평균값 15.3 mg/l, 중앙값 17.7 mg/l)와 축산농가 및 공장의 오염영향영역 밖에 위치한 지하수(평균값 17.7 mg/l, 중앙값 19.9 mg/l)에서는 비교적 낮은 함량특징을 보이며 오염현상을 관찰할 수 없었으나 공장지역의 오염영향영역 안에 위치한 심부지하수(평균값 23.6 mg/l, 중앙값 20.9 mg/l)에서는 앞의 두 경우에 비해 비교적 높은 함량특징을 보이며 9개 지점 중 1개 지점에서 먹는 물 수질기준 이상의 오염지하수가 관찰되었다. 이를 종합해 볼 때 아산지역의 NO₃의 오염은 공장지역과 축산농가가 중요한 오염원이 되고 있으며 축산농가 주변에서 천부지하수의 오염현상은 현저하게 관찰되었으나 심부지하수까지의 오염은 관찰되지 않았다. 그러나 공장지역 주변의 지하수에서는 천부지하수 뿐만 아니라 심부지하수까지도 오염의 영향이 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

아산지역 지하수에서 Cl는 먹는 물 수질 기준 이상의 함량을 보이는 지하수가 관찰되지는 않았으나 천부지하수의 경우 축산농가의 오염영향영역 안에 위치한 지하수(평균값 55.9 mg/l, 중앙값 49.7 mg/l)와 공장의 오염영향영역 안에 위치한 지하수(평균값 52.2 mg/l, 중앙값 52.0 mg/l)는 이들 오염원의 오염영향영역 밖에 존재하는 지하수(평균값 22.2 mg/l, 중앙값 21.4 mg/l)에 비해 월등히 높은 함량특징을 보이고 있어 먹는 물 수질기준 이상으로 오염된 경우는 없으나 이들 오염원에 의한 영향을 확인할 수 있었다(Figure 8). 반면에 심부지하수에서의 Cl 함량은 축산농가의 오염영향영역 안에 위치한 지하수(평균

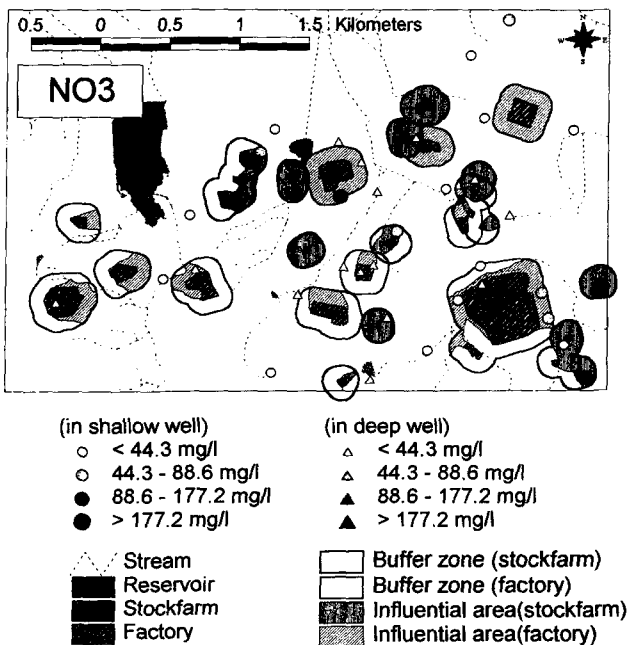


Figure 7. NO₃ content in deep (>50 m depth) and shallow (<50 m depth) wells with influential area from factory and stockfarm in the Asan area.

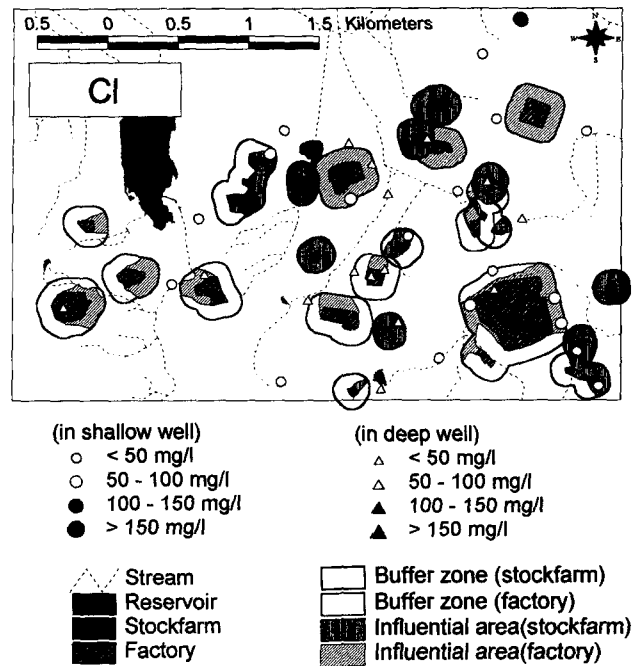


Figure 8. Cl content in deep (>50 m depth) and shallow (<50 m depth) wells with influential area from factory and stockfarm in the Asan area.

값 15.0 mg/l, 중앙값 15.6 mg/l)와 공장의 오염영향영역 안에 위치한 지하수(평균값 20.8 mg/l, 중앙값 18.4 mg/l)의 경우 이들 오염원의 오염영향영역 밖에 존재하는 지하수(평균값 14.0 mg/l, 중앙값 15.0 mg/l)와 유의한 차이를 보이지 않고 있다.

아산지역 지하수에서 SO₄는 천부지하수의 경우 축산농가의 오염영향영역 안에 위치한 지하수(평균값 26.1 mg/l, 중앙값 19.9 mg/l)와 공장의 오염영향영역 안에 위치한 지하수(평균값 57.7 mg/l, 중앙값 24.9 mg/l)는 이들 오염원의 오염영향영역 밖에 존재하는 지하수(평균값 4.7 mg/l, 중앙값 3.0 mg/l)에 비해 월등히 높은 함량특징을 보이고 있으며 득산농공단지외의 오염영향영역 안에 위치한 지하수 1개 지점에서 먹는 물 수질 기준 이상의 오염된 지하수가 관찰되는 등 인간활동에 의한 오염현상을 확인할 수 있었다(Figure 9). 반면에 심부지하수에서의 SO₄ 함량은 축산농가의 오염영향영역 안에 위치한 지하수(평균값 2.3 mg/l, 중앙값 1.7 mg/l)와 축산농가 및 공장의 오염영향영역 밖에 존재하는 지하수(평균값 3.4 mg/l, 중앙값 2.0 mg/l)는 유의한 차이를 보이지 않고 낮은 함량특징을 보이지만 공장의 오염영향영역 안에 위치한 지하수(평균값 11.0 mg/l, 중앙값 6.9 mg/l)는 다소 부화된 함량특징을 보이고 있다. 공장이나 축산농가의 오염영향영역 안에 위치한 지하수의 80% 이상이 NO₃, SO₄ 등의 오염물질로 오염되었다는 점은 공장시설과 축산농가가 지하수오염의 직접적인 원인이 되고 있음을 보여주고 있다.

구로구지역

구로구지역에서는 도로망, 수계, 저수지, 시료채취위치, 지질도, 토지이용도에 대한 주제도를 작성하였으며 주요 오염원인

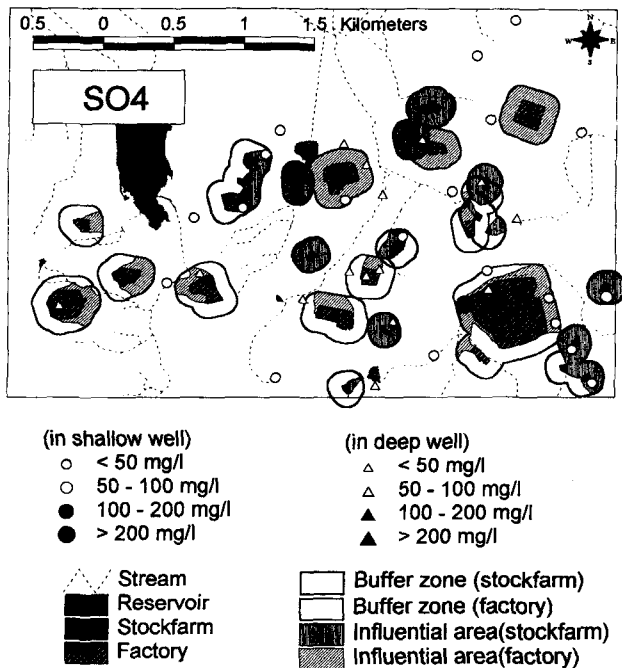


Figure 9. SO₄ content in deep (>50 m depth) and shallow (<50 m depth) wells with influential area from factory and stockfarm in the Asan area.

폐수배출시설과 하수관망도(Figure 10)를 작성하여 오염원에 대한 주제도를 작성하였다. 폐수배출시설로는 주유소, 공장, 세차장, 정비소, 운수회사, 인쇄소 및 사진인화시설 등이 조사되었다.

잠재점오염원에서의 오염 영향 범위를 조사하기 위해 폐수배출시설에 대해 100 m, 200 m, 그리고 300 m 거리의 버퍼링(buffering)을 작성하고 NO₃ 오염현상이 관찰되는 지하수를 함께 도시하였다(Figure 11). 오염 지하수가 100 m 버퍼링 안에 위치하는 경우는 전체의 48%(23개 중 11개)였으며 200 m 버퍼링 안에 위치하는 경우는 87%(23개 중 20개)로 대부분의 오염지하수는 200 m 버퍼링 안에 존재하고 있었다. 또한 300 m 버퍼링의 경우는 200 m 버퍼링의 경우와 비슷한 91% 수준이었다. 이는 200 m 버퍼링이 구로구지역 폐수배출시설의 오염 영향 범위에 잘 부합됨을 보여주는 것이다. 오염현상과 오염원의 공간적인 관련성을 조사하기 위해 폐수배출시설의 200 m 버퍼링과 하수관망의 100 m 버퍼링을 작성하고 이들 오염원의 오염영향영역(Influential area)을 설정하였다.

NO₃는 구로구의 25개 시료(49%)에서 먹는 물 수질기준을 초과하여 가장 높은 빈도를 보이는 오염물질임을 알 수 있었다(Figure 12). 천부지하수(41개 지점, 56.7 mg/l, 중앙값 42.6 mg/l)는 51%(21개 지점), 심부지하수(10개 지점, 평균값 45.3 mg/l, 중앙값 43.3 mg/l)는 40%(4개 지점)의 시료가 먹는 물 수질기준을 초과하였다. 천부지하수 뿐만 아니라 심부지하수에서도 NO₃의 함량이 높고 오염현상이 관찰되어 광범위한 NO₃의 오염을 확인할 수 있었다. NO₃의 오염현상은 폐수배출시설의 오염영향영역 밖의 위치에서도 두 지점(고척동지역 1개 지점과 궁동지역 1개 지점)이 관찰되었으며(Figure 12), 두 지점은 주요 폐기물 배출시설이 없는 주택지역 내에 위치하였다. NO₃ 오염과 하수관 분포와의 관련성을 조사하기 위해 직경 0.8 m 이상의 하수관에 대해 하수관망도를 작성하고 이들 하수관망

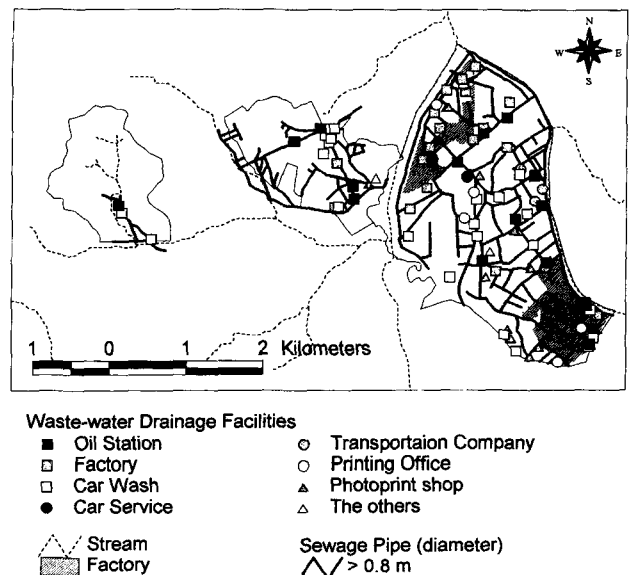


Figure 10. The location map of waste-water drainage facilities and sewage pipe line in the Gurogu area.

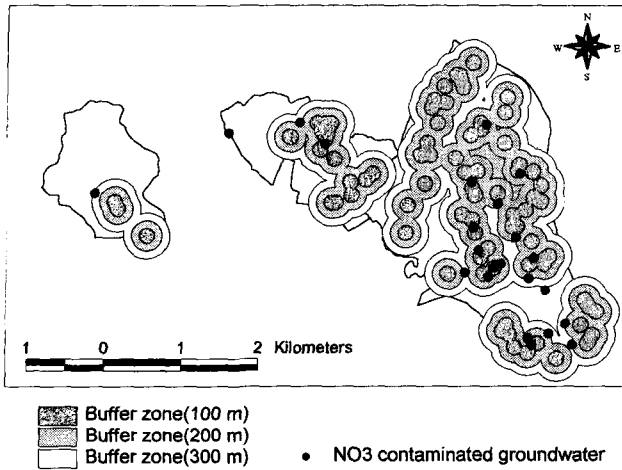


Figure 11. 100, 200 and 300 m Buffer zones from waste-water drainage facilities with NO₃ contaminated groundwaters from the Gurogu area.

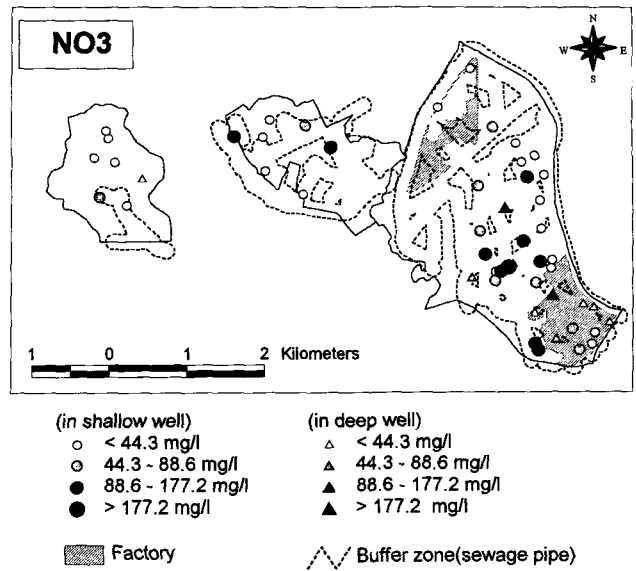


Figure 13. NO₃ content in deep (>50 m depth) and shallow (<50 m depth) wells with buffer zones within 100 m distance from sewage pipe line in the Gurogu area.

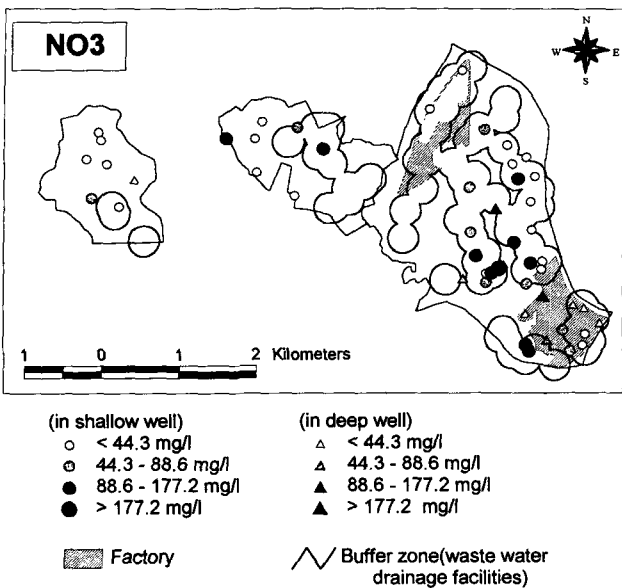


Figure 12. NO₃ content in deep (>50 m depth) and shallow (<50 m depth) wells with buffer zones within 200 m distance from waste-water drainage facilities in the Gurogu area.

에 대해 100 m 버퍼링을 작성하였다(Figure 13). 이때 고척동과 궁동지역은 하수관망도 버퍼링 안의 지역을 오염영향영역(Influential area)으로 설정하였으며 구로동지역은 전 영역에 걸쳐 하수관망이 발달하여 전 영역을 오염영향영역으로 설정하였다. NO₃가 먹는 물 수질 기준 이상으로 오염된 경우는 모두 하수관망의 오염영향영역 안에서 관찰되어 하수관의 파손에 의해 유입된 하수가 NO₃ 오염의 주요 원인이 될 수 있음을 암시하고 있다. 그러나 이는 NO₃의 오염과 하수관망의 공간적인 관계만 비교한 것으로 정확한 확인을 위해서는 하수관의 오염물질 함량과 누수되는 지점에서의 오염실태를 직접 확인하는 작업 등이 뒤따라야 할 것이다. NO₃의 오염현황은 지역별로는 구로구

지역 중 공장지역과 거주지역이 위치하는 구로동지역이 51% (37지점 중 19지점)의 높은 오염비율을 보이고 있으며, 오래된 주택가인 고척동지역은 43%(7지점 중 3지점)에서 오염현상이 관찰되었다. 임야와 농경지로 이루어진 궁동지역에서는 14% (7지점 중 1지점)로 낮은 오염비율을 보이고 있다.

구로구지역에서 CI가 먹는 물 수질기준(150 mg/l)을 초과한 경우는 6곳(18%)이며 모두 천부지하수에서 관찰되었으며 심부지하수에서는 오염현상이 관찰되지 않았다(Figure 14). 그리고

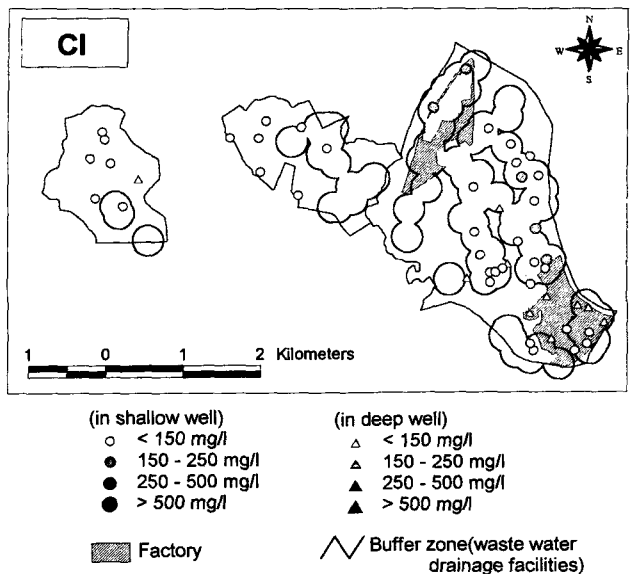


Figure 14. Cl content in deep (>50 m depth) and shallow (<50 m depth) wells with buffer zones within 200 m distance from waste-water drainage facilities in the Gurogu area.

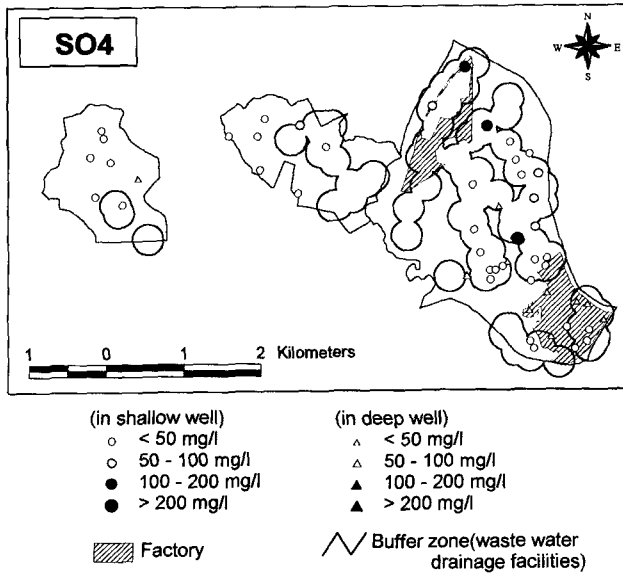


Figure 15. SO₄ content in deep (>50 m depth) and shallow (<50 m depth) wells with buffer zones within 200 m distance from waste-water drainage facilities in the Guro-gu area.

Cl 함량이 먹는 물 수질기준 이상으로 오염된 경우가 모두 구로동지역에서 관찰되고 있다. 특히 구로동 지역 중 구로공단지역에서는 낮은 함량을 보였다. 이는 공단지역에서 발생한 폐수는 하수관이 아니라 종말처리장에서 직접 처리하기 때문에 주변 지하수를 오염시키지 않기 때문이다. 반면에 소규모의 영세한 공장들이 모여있는 신도림동 공장지대는 Cl의 함량이 먹는 물 수질기준을 초과하는 오염지하수가 조사되었다.

SO₄는 천부지하수(평균값 33.4 mg/l, 중앙값 24.7 mg/l)와 심부지하수(평균값 37.0 mg/l, 중앙값 36.9 mg/l) 간의 큰 차이가 보이지 않으며 먹는 물 수질 기준(200 mg/l)에 비해 매우 낮은 함량을 보이고 있다(Figure 15). 그러나 신도림동의 소규모 공장지대의 천부지하수 1곳에서 먹는 물 수질기준(200 mg/l) 이상의 오염현상이 관찰되어 공업활동으로 야기된 SO₄ 오염현상을 확인할 수 있었다. 구로공단지역의 경우 폐수를 직접 종말처리장으로 처리하므로 Cl와 마찬가지로 SO₄의 함량이 매우 낮았다.

결론

1) 아산지역 지하수는 음이온이 HCO₃ > NO₃ > Cl > SO₄, 양이온이 SiO₂ > Ca > Na > Mg > K의 함량특징을 보이는 Ca-HCO₃ 유형의 지하수이며, SiO₂와 HCO₃ 함량비가 높은 특징을 보여 물-암석 반응이 지하수 성분을 지배하는 가장 중요한 요인임을 보여준다. 반면에 구로구지역 지하수는 음이온이 HCO₃ > Cl > NO₃ > SO₄, 양이온은 Ca > SiO₂ > Na > Mg > K의 함량특징을 보이는 Ca-HCO₃ 유형의 지하수이며, Cl, NO₃ 및 SO₄ 등의 오염물질이 부화되고 Si보다 Ca 함량비가 더 높게 나타나는 등 다양한 오염원에 의한 영향을 반영하고 있다.

2) 아산지역 지하수시료 중 37.5%(40개 지점 중 15개), 그리고

구로구지역 지하수시료 중 64.7%(51개 지점 중 33개)가 오염물질이 먹는 물 수질 기준을 초과하는 오염지하수로 조사되었다. 아산지역 지하수시료는 NO₃(10개), SO₄(1개) 및 Zn(4개)가, 그리고 구로구지역 지하수시료는 NO₃(25개), Cl(6개), Fe(7개), Mn(4개), Zn(2개) 및 SO₄(1개)가 먹는 물 수질 기준을 초과하는 함이 조사되었으며 두 지역 모두 NO₃ 오염이 가장 많았다.

3) 아산지역에서 NO₃ 오염은 축산농가와 공장의 오염영향영역안에 위치한 천부지하수에서 조사되었으나 심부지하수에서는 오염현상이 관찰되지 않았다. Cl는 먹는 물 수질기준을 초과하는 오염현상이 관찰되지 않았으나 축산농가 및 공장의 오염영향영역 안에 위치한 천부지하수에서 높은 함량특징을 보이고 있어 이들 오염원의 영향을 확인할 수 있었다.

4) 구로구지역에서 NO₃ 오염은 50 m 이상의 심부지하수에서도 관찰되어 이미 심각한 오염현상이 진행되었음을 보여주었다. Cl 오염은 구로동 지역의 50 m 이하 천부지하수에서 관찰되었으나 구로동의 구로공단지역에서는 먹는 물 수질기준 이하의 낮은 함량을 보였다. 구로동지역은 70%, 고척동지역은 42%, 그리고 궁동지역은 14%의 지하수 시료에서 먹는 물 수질기준 이상의 오염현상이 조사되었다.

사사

이 연구는 1997학년도 서울대학교 발전기금 포철학술연구비 지원에 의해 수행되었으며, 화학분석에 협조하여준 전략광물자원연구센터에 감사드립니다.

참고문헌

건설교통부, 한국수자원공사, 1995, 지하수자원 기본조사, 대체용수원 선정조사, 212p.
 건설교통부, 1996, 지하수조사연보, 건설교통부, 355p.
 건설교통부, 1997, 지하수 정보관리 시스템 보고서, 건설교통부, 서울, 204p.
 과학기술처, 1995, 대구지역 지하수 오염방지 및 음용화 기술 연구, 과학기술처, 서울, 457p.
 과학기술처, 1997, 지하수 오염방지 및 음용화 기술 연구 (서울지역), 과학기술처, 서울, 347p.
 김남장, 홍승호, 1975, 한국지질도(1:50,000) 안양도폭, 국립지질광물연구소, 20p.
 김서운, 김명환, 1969, 한국지질도(1:50,000) 예산도폭, 국립지질조사소, 20p.
 시스템공학연구소, 1996, GIS 관리자과정 교재.
 아산시, 1996, 제2회 아산시통계연보, 아산시, p. 135-136.
 오윤근, 현익현, 1997, 델타 15N값을 이용한 제주도 지하수중의 질산성질소 오염원 추정에 관한 연구, 지하수환경, v.4, p. 1-4.
 유근배, 1993, 지리정보론, 상조사, 서울, 352p.
 이종운, 1997, 방사성폐기물의 지하심부 처분을 위한 국내 심부지하수의 수리지구화학적 특성 연구, 서울대학교 박사학위논문, 247p.
 진성원, 1997, 제주도의 지하수개발 현황, 한국자원공학회 특별심

- 포지움, 한국자원공학회, pp.95-115.
- 한규언, 1997, 서울지역 지하수 환경 기초조사, 21세기 지하수 자원의 관리·이용에 관한 국제학술심포지움 논문집, 대한지하수 환경학회, pp. 105-125.
- 한정상, 1994, 제주도 지하수 자원의 보호전략에 관한 연구, 지질학회지, v.30, pp.325-342.
- 한정상, 한규상, 김창길, 김남중, 한찬, 1994, 제주도 지하수 자원의 최적개발 가능량, 지하수환경, 1, p. 33-50.
- 홍승호, 이병주, 황상기, 1982, 한국지질도(1:50,000) 서울도폭, 한국동력자원연구소, 19p.
- Aronoff, Stan, 1993, Geographic Information Systems: A Management Perspective, WDL Publications, Ottawa, 294p.
- Ford, M., and Tellam, J.H., 1994, Source, type and extent of inorganic contamination within the Birmingham urban aquifer system, UK, J. of Hydrology, 156, p. 101-135.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A., 1979, Groundwater, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 604p.
- Goodchild, M. F., Parks, B. O. and Steyaert, L. T., 1993, Environmental Modeling With GIS, Oxford Univ. Press, Oxford, p. 147-195.
- Harris, R. R., Hopkinson, P., McCaffrey, S., and Huntsinger, L., 1997, Comparison of a geographical information system versus manual techniques for land cover analysis in a riparian restoration project, J. of soil and water conservation, 52, p. 112-117.