

부산시 사상공단지역의 지하수 수질 특성

함세영^{1*} · 김광성² · 이정환¹ · 정재열¹ · 성의환³ · 장성⁴

¹부산대학교 지질학과, ²학산여자중학교, ³한국지질자원연구원 지하수지열연구부, ⁴한국농촌공사

Characteristics of Groundwater Quality in Sasang Industrial Area, Busan Metropolitan City

Se-Yeong Hamm^{1*}, Kwang Sung Kim², Jeong-Hwan Lee¹, Jae-Yeol Cheong¹, Ig Hwan Sung³ and Seong Jang⁴

¹Department of Geology, Pusan National University

²Haksan Girls' Middle School

³Groundwater & Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

⁴Korea Rural Community & Agriculture Corporation

In urban areas, groundwater pollution is heavily affected by urbanization with land use types. This study aims to characterize groundwater quality and contamination in Sasang industrial area of Busan Metropolitan City where metalworking, machinery and footwear factories are located. Busan Metropolitan City is the highest in the utilization of groundwater resources among the metropolitan cities in Korea. K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} and HCO_3^- concentrations, and electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS) and salinity are high in the areas near the Nakdong River. The results are attributed to the influence of salt water which intruded into the coastal sediments during sedimentation. In addition, the dominant chemical type of Ca-Cl indicates the influence of salt water in the geological formations as well as anthropogenic pollution. SiO_2 ion is interpreted to originate from both water-silicate mineral reactions and the decomposition of cement concretes. Trichloroethylene (TCE) was detected at 12 sites of total 18 sites. However, tetrachloroethylene (PCE) was detected at 4 sites and 1,1,1-trichloroethane (TCA) at 3 sites. According to the factor analysis, factor 1 was explained by 49.8%, factor 2 19.8%, and factor 3 11.0% with total 80.6% explanation. pH, TDS, salinity, Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Al^{3+} , As^{3+} , Cl^- and Fe^{2+} were positively highly loaded to factor 1. The chemical components loaded to factor 1 represent the chemical characteristics of both industrial pollution and influence by salt water. Based on the cluster analysis and distribution pattern of chemical components, the concentration of Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , K^+ and Mg^{2+} is high in the riverside area of the Nakdong River composed of coastal sediments that is influenced by salt water. The downstream area of the Hakjang Stream is judged to be affected by both salt water and artificial pollution. The other part of the study area is interpreted by anthropogenic pollution.

Key words : Sasang industrial area, groundwater pollution, TCE, factor analysis, cluster analysis

도시지역에서 지하수오염은 도시화에 따른 토지용도에 크게 영향을 받는다. 본 연구는 철강, 기계 및 신발공장들이 밀집되어 있는 부산 사상공단지역의 지하수 수질과 오염 특성을 규명하는데 있다. 부산시는 우리나라의 대도시 중에서 가장 높은 지하수 이용률을 보이고 있다. K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , 전기전도도(EC), 총용존물질(TDS) 그리고 염분농도는 낙동강에 가까운 지역에서 높게 나타나고 있다. 이러한 사실은 퇴적 당시 해안퇴적층에 들어온 염분의 영향이 아직까지 이 지역 지하수 수질에 미치고 있음을 지시한다. 또한 대표적인 지하수 수질형인 Ca-Cl형은 본 연구지역의 지하수가 인위적인 오염뿐만 아니라 퇴적물 속에 함유되어 있는 염분의 영향을 받고 있음을 지시한다. SiO_2 이온은 물-규산염광물 작용과 콘크리트의 분해 산물로 해석된다. TCE는 총 18개소 중 12개소에서 검출되었으며, PCE는 4개소 그리고 TCA는 3개소에서 검출되었다. 요인분석에 의하면, 요인 1의 설명율은 49.8%, 요인

*Corresponding author: hsy@pusan.ac.kr

2는 19.8% 그리고 요인 3은 11.0%이다. 요인 1에 높은 정의 적재율을 보이는 성분은 pH, TDS, 염분농도, Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Al^{3+} , As^{3+} , Cl^- , Fe^{2+} 으로서 이들은 공단의 특성과 염분의 영향을 동시에 대표하는 것으로 판단된다. 군집분석과 성분의 공간적 분포에 의하면, 낙동강변과 같이 해안퇴적층이 분포하여 염수의 영향을 받는 지역에서는 Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , K^+ , Mg^{2+} 의 농도가 높게 나타남을 알 수 있다. 그리고 학장천의 하류에서는 염수의 영향과 인위적인 오염의 영향을 동시에 받고 있으며, 그 외 지역에서는 인위적인 오염의 영향이 우세함을 알 수 있다.

주요어 : 사상공단지역, 지하수오염, 삼염화에틸렌, 요인분석, 군집분석

1. 서 론

정부의 부단한 노력에도 불구하고 우리나라 음용수 수원의 대부분을 차지하는 지표수 수질은 갈수록 악화되어 가고 있다. 이는 인구증가와 산업의 발달로 인해서 갈수록 오염원이 다양해지고 오염물질의 총량도 늘어나기 때문이다. 이와 같은 상황에서 보조수자원 특히 비상시 음용수로서의 지하수의 필요성은 더욱더 커지고 있다. 그러나 우리나라의 대도시 지역 지하수는 공장폐수, 유류저장탱크로부터 누출된 유류, 생활하수 등의 여러 가지 인위적인 오염원에 노출되어 있다. 인위적인 오염물질은 토지 용도(주거·상업지역, 공업지역, 농업지역 그리고 녹지지역)에 따라 달라진다. 즉, 공업지역의 지하수는 중금속이나 유기오염물질에 의해서, 주거·상업지역 및 농업지역은 생활하수나 비료, 축산폐수에 의해서 그리고 녹지지역은 천연광물에 의해서 오염되거나 그 수질이 결정된다. 특히, 유류 오염물질에 의한 지하수 오염 가능성은 점점 높아지고 있으며, TCE, PCE와 같은 염소계 유기오염물질이 공장지대 뿐만 아니라, 주택가에서도 검출되고 있는 실정이다. 이는 현재의 토지용도 뿐만 아니라 과거의 토지용도도 지하수오염의 중요한 변수가 된다는 것을 의미한다. 따라서 토지용도계획과 변경은 그 지역의 지하수개발과 관리를 염두에 두고 이루어져야 한다(Collin and Melloul, 2003).

부산지역의 지하수에 관해서는 다수의 논문들이 있다. 정상용 등(1997)은 부산 석대 쓰레기매립장의 침출수를 연구하였다. 김윤영 등(1997)은 석대 쓰레기매립장의 지하수 수리시스템 분석연구에서 불포화대 수리특성을 추정하였다. 성의환 등(1999)과 Cho(2001)는 부산지역 전체에 대해서 지하수 유동과 용존 무기물의 특성을 연구하였다. 함세영 등(1999)은 부산 북서부지역 화강암 지하수의 지화학적 특성 및 오염 가능성을 연구하였다. 정상용 등(2000)은 부산지역 지하수의 pH, TS(Total solids), KMnO₄ 소비량, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻N에 대한 지구통계학적 분석을 통하여, 부산시 지하수

오염이 해수, 지질 그리고 지질구조 보다는 인위적인 오염의 영향(내륙의 생활하수나 자동차 배기가스, 오염된 하천수, 공장폐수, 폐기물 매립지의 침출수 등)을 더 크게 받고 있다고 하였다. 건설교통부와 한국수자원공사(2003)는 부산지역의 지하수 기초조사를 통하여 부산광역시 전역의 수리지질, 지하수 부존특성, 지하수 수질 및 오염취약성평가, 지하수 보전·관리방안을 제시하였다.

Jeong(2001)은 대전지역 지하수 수질이 대수층의 지질보다는 토지용도와 도시화에 더 큰 영향을 받고 있음을 밝혔다. Appleyard(1995)는 서부 호주의 해안지역에서 도시화가 진행됨에 따라 지하수 함양율과 수질이 크게 달라짐을 보고하였다. Bruce *et al.*(1996)는 미국 텐버시의 천부지하수 수질과 토지 용도의 관련성을 연구에서, 토지용도에 따른 지하수 수질 차이를 제시하였다. Hong and Rosen (2001)은 뉴질랜드 오클랜드 교외지역에 대해서 홍수시 지하수 함양이 지하수 수질에 미치는 영향을 인공신경망기법을 이용하여 연구하였다.

본 연구는 2001년부터 2003년까지 3차에 걸친 지하수의 pH, Eh, EC(전기전도도), DO(용존산소), 수온, 총고용물, 알칼리도 등의 현장분석 및 실내수질분석을 바탕으로 부산광역시 사상공단지역의 지하수 수질 특성을 규명하고자 하였다. 사상공단지역은 부산광역시의 비교적 도심지 내에 위치하고 있으며 사상구 학장동과 감전동 일대의 공장 밀집 지대이다(Fig. 1), 연구지역은 학장천 서북쪽의 공장 밀집지대와 그 경계에 해당하는 동남쪽 산지대의 일부지역이다. 본 연구지역의 북쪽에는 감전2동이, 서쪽에는 감전1동이 자리 잡고 있으며 북서쪽 끝자락에는 낙동강이 흐르고 있다. 본 공단지역에는 주로 철강·금속업체, 기계장비업체 그리고 선발·고무업체들이 밀집되어 있다. 과거에는 낙동강을 따라 해수가 유입하였으나 현재는 낙동강 하구둑에 의해서 해수 유입이 차단되고 있다.

2. 지 질

연구지역의 지질은 주로 충생대 유천층군에 속하는

안산암 및 안산암질 응회암과 흑운모화강암 그리고 제4기 충적층이 분포하고 있다(김동학 등, 1998). 안산암류는 안산암질 화산쇄설암과 안산암질 용암으로 구성되며 이들이 서로 교호하여 산출된다. 이와 같이 교호를 이루는 부위의 암석은 곳에 따라 퇴적양상을 보이기도 한다. 흑운모화강암은 중립내지 조립질의 암석으로 주로 석영, 사장석, 알칼리장석, 흑운모 등으로 구

성된다. 흑운모화강암은 양산, 구포, 기장, 동래 등지에도 넓게 분포되어 있다. 모래, 자갈 혹은 점토 등으로 이루어진 제4기 충적층들은 낙동강변을 따라 발달하며 특히 김해·부산의 낙동강 하구지역에 걸쳐 충적층이 잘 발달하고 있다. 지형적으로 극히 제한된 지역에 분포하는 고기 하성층들과 계곡 충진 퇴적층들도 충적층에 포함된다.

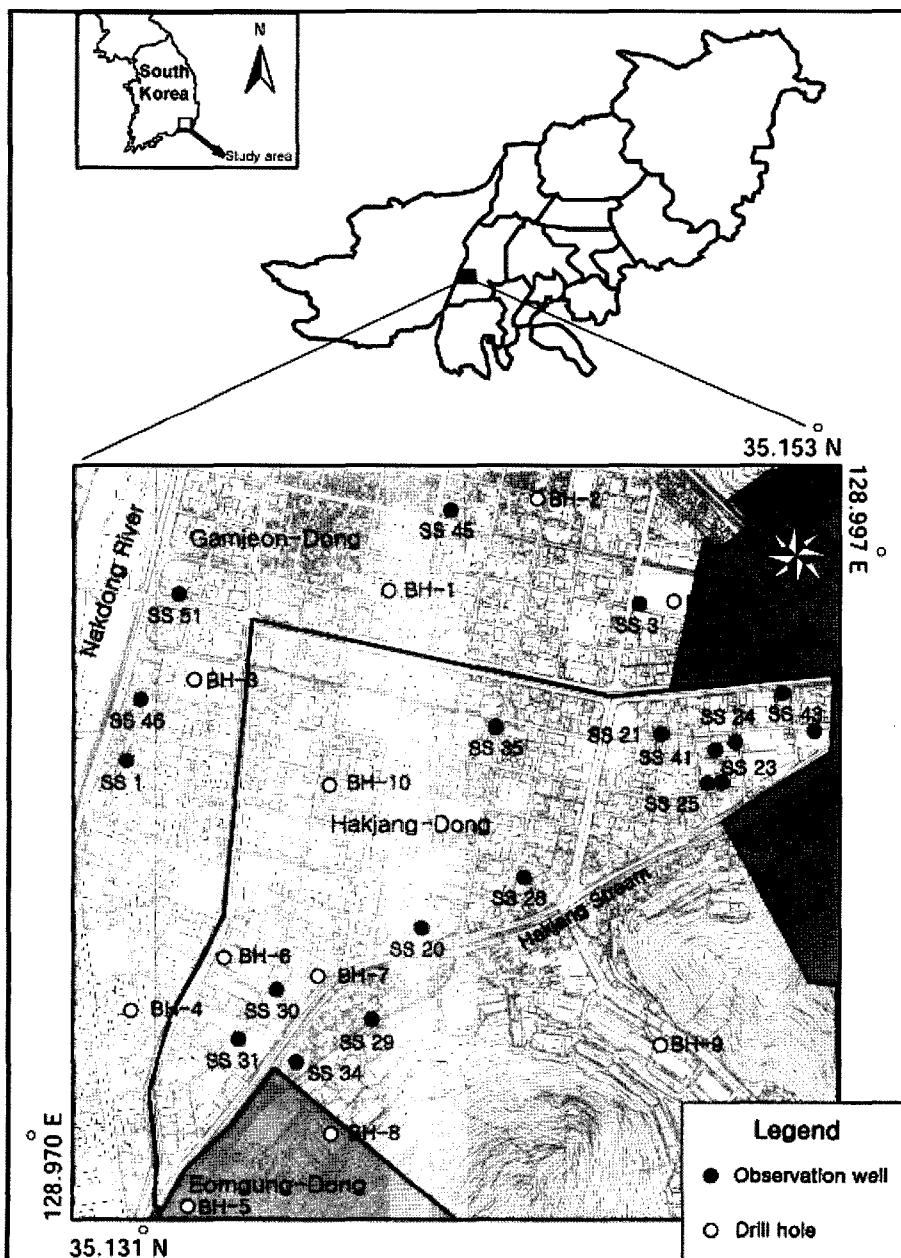


Fig. 1. Location of observation wells and drill holes in the study area.

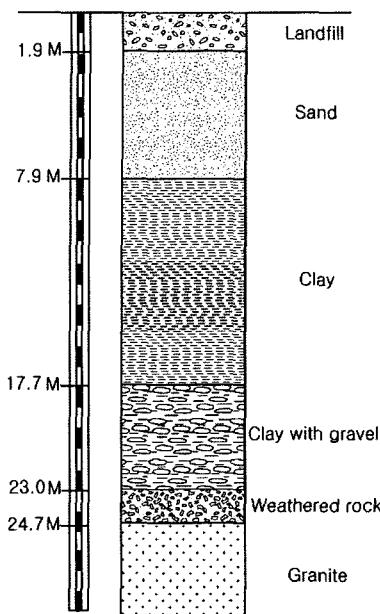


Fig. 2. Average thickness of geological layers.

시추자료가 부족하고, 도심지 지역으로 지표면이 아스팔트나 시멘트로 포장되어 있어서 연구지역의 정확한 지하지질을 파악할 수는 없으나, 세창지질콘설판트(주)의 지질조사보고서(1990)의 11개 시추공 자료(Table 1, Fig. 1)를 기초로 하여 연구지역의 지하지질을概적으로 파악하였다. 지하지질은 지표로부터 매립층, 세립질 모래층, 점토층, 자갈섞인 점토층, 풍화암 그리고 신선한 화강암의 순으로 나타난다. 그리고 지하지질 양상이 특이한 (BH-5, BH-8, BH-9)을 제외한 나머지 8개의 시추공의 평균 지층 두께를 보면, 매립층, 세립질 모래층, 점토층, 자갈섞인 점토층의 두께가 각각 1.9 m, 6.0 m, 9.8 m, 5.4 m로서 미고결층의 총 두께가 23.0 m에 이른다(Fig. 2).

3. 연구방법

사상공단지역 지하수의 물리·화학적 성질을 연구

하고 지하수 오염을 평가하기 위하여 3차례 걸쳐서 심도 10~200 m의 19개 지하수공(SS1, SS3, SS20, SS21, SS23, SS24, SS25, SS27, SS28, SS29, SS30, SS31, SS34, SS35, SS41, SS43, SS45, SS46, SS51)에 대해서 수질조사를 실시하였다. 수질조사는 1차조사(2001년 9월 26일~2001년 10월 18일), 2차조사(2002년 7월 23일~7월 27일), 3차조사(2003년 8월 12일~8월 13일)로 실시하였다. 1차조사와는 달리 2차조사시에는 SS3, SS25가, 3차조사시에는 SS28, SS30, SS45, SS51이 폐워졌기 때문에 조사를 수행하지 못하였다. 지하수 시료 번호는 사상구의 머리글자 SS와 일련번호로 기재하였다.

현장수질분석 항목은 수온, pH, EC(전기전도도), TDS(총고용물질), 염분농도, Eh(산화-환원전위), DO(용존산소), 알칼리도이다. 수온은 디지털온도계(Sato Model SM-1250MC), pH는 휴대용 pH미터(Orion Model 250A), EC와 TDS 그리고 염분농도는 휴대용 EC 미터(Orion Model 115), DO는 휴대용 DO 미터(Orion Model 810)를 사용하였고 Eh는 pH미터에 Orion사의 산화-환원 전극을 부착하여 측정하였다. 그리고 알칼리도(HCO_3^- , CO_3^{2-})는 메틸오렌지와 페놀프탈레인을 이용한 산-중화 적정법으로 측정하였다.

K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Si^{4+} , Al^{3+} 등의 양이온과 F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 등의 음이온에 대해서는 실내수질분석을 실시하였다. 실내수질분석을 위해서는 수온의 변화가 없어질 때까지 양수하여 수질이 안정화된 후에 시료 채수를 실시하였다. 채취된 시료는 0.45 μm 미세공극 여과지로 부유물을 완전히 여과처리하여 분석하고자 하는 목적에 따라 2가지 종류로 나누었다. 즉, 음이온분석용 시료는 여과처리만을 그리고 양이온분석용 시료는 여과처리와 산처리를 동시에 하였다. 산처리는 0.05N의 농도 질산을 사용하여 시료의 pH를 2~3사이로 유지하도록 하였다. 그리고 각각의 시료를 100 mL의 무균 채수병에 담아 4°C 이하로 냉장·운반하여 실험실에서 분석하였다. 실내

Table 1. Subsurface geology at drill holes.

	BH-1	BH-2	BH-3	BH-4	BH-5	BH-6	BH-7	BH-8	BH-9	BH-10	BH-11	Ave. thickness	Ave. depth from ground surface
Landfill	1.6	3.0	3.7	2.2	8.5	1.5	2.5	0.0	0.0	0.9	0.0	1.9	1.9
Sand	4.5	4.0	14.0	0.0	0.0	13.5	7.0	0.0	0.0	1.3	3.7	6.0	7.9
Clay	5.8	24.5	16.3	22.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	8.0	9.8	17.7
Clay with gravel	0.9	2.0	12.6	1.0	0.0	1.5	14.5	3.5	9.0	9.5	0.8	5.4	23.0
Weathered rock	6.1	0.7	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	5.2	8.3	0.0	6.2	1.6	24.7

분석 성분 중 양이온(K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Si^{2+} , Al^{3+})은 원자방출분광분석기(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer, 미국 Thermo Jarrell Ash사 모델 ICP-IRIS), 또는 Fe^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Si^{2+} , Al^{3+} 는 원자흡광분석기(Atomic Absorption Spectrophotometer, 미국 Thermo Jarrell Ash사 모델 AA SCAND)로 사용하였고, 음이온(F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})은 이온크로마토그래피(미국 Dinxex사 DX-500)를 사용하였으며 한국기초과학지원연구원 부산분소에 분석을 의뢰하였다. 유기염소화합물인 TCE, PCE, TCA(1,1,1-Trichloroethane)는 부산광역시 보건환경연구원에 의뢰하여 분석하였다.

3. 무기성분의 특성

3.1. 무기성분의 농도

1, 2, 3차 조사시 지하수의 온도는 각각 $17.0\sim21.4^\circ C$, $17.3\sim25.0^\circ C$, $16.4\sim18.9^\circ C$ 이고, 중앙값은 각각 $17.8^\circ C$, $18.4^\circ C$, $17.5^\circ C$ 이다(Table 2). 그리고 평균수온은 각각 $18.1^\circ C$, $18.8^\circ C$, $17.7^\circ C$ 이다. 1차, 2차, 3차 조사시간의 부산광역시의 월평균 기온은 각각 $22.7^\circ C$, $24.0^\circ C$, $24.1^\circ C$ 이다. 따라서, 지하수의 온도는 기온의 영향을 크게 받지 않는 것으로 보인다. 그러나 일부에서는 지하수공 부근에 위치하는 금속업체나 주강업체 등에서 사용하는 기계의 열로 인한 영향을 일부 받고 있는 것으로 보인다.

1, 2, 3차 조사시 pH의 범위는 각각 $6.06\sim7.71$, $5.89\sim7.16$ 그리고 $6.09\sim7.32$ 이다(Table 2). 중앙값은 각각 6.76, 6.73, 6.82이고 평균값은 각각 6.81, 6.69, 6.80으로서 약산성을 나타내고 있다. 따라서, 모든 시료가 먹는물 수질기준 ($pH 5.8\sim8.5$)에 속한다.

전기전도도(EC)는 1차, 2차, 3차 조사에서 각각 $225\sim19,800 \mu S/cm$, $259\sim25,500 \mu S/cm$, $136\sim12,670 \mu S/cm$ 의 범위를 보인다. 중앙값은 각각 $1,220 \mu S/cm$, $2,350 \mu S/cm$, $1,075 \mu S/cm$ 이고, 평균값은 각각 3,466 $\mu S/cm$, 6,255 $\mu S/cm$, 3,035 $\mu S/cm$ 로서 일반적인 지하수보다 훨씬 높게 나타난다. EC는 온도, 염의 종류 그리고 농도에 따라서 달라진다. 따라서 연구지역에서 EC값은 염수와 온도의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. 허석된 수용액의 경우, 온도가 $1^\circ C$ 증가하면 EC는 약 2% 증가하는 것으로 보고된다(한정상, 1998). 특히 2차조사는 7월말에 실시되었으므로 기온의 영향을 더 크게 받은 것으로 판단된다. 그리고 EC가 $10,000 \mu S/cm$ 를 초과하는 SS1, SS46, SS51은 낙동강

하구에 인접하여 있어서 염수의 영향을 상대적으로 많이 받는 것으로 판단된다.

EH는 1차, 2차, 3차 조사에서 각각 $-71.0\sim284.8 mV$, $-123.5\sim259.5 mV$, $-115.2\sim267.1 mV$ 이며 중앙값은 각각 $142.3 mV$, $80.9 mV$, $3.8 mV$ 이고, 평균값은 각각 $143.1 mV$, $72.2 mV$, $20.3 mV$ 이다. SS1, SS21, SS30, SS35, SS45, SS46, SS51의 경우는 환원상태를 나타낸다. 이 지점들에서는 철 농도도 높게 나타난다.

1, 2, 3차 조사에서 총용존물질(TDS)은 각각 $107\sim11,300 mg/l$, $124\sim14,500 mg/l$, $65\sim7,690 mg/l$ 을 보이며, 중앙값은 각각 $592 mg/l$, $1,170 mg/l$, $487 mg/l$, 평균값은 각각 $1,869 mg/l$, $3,434 mg/l$, $1,638 mg/l$ 이다. 1차조사의 경우는 조사지점 중 10곳(SS20, SS21, SS23, SS24, SS25, SS28, SS29, SS34, SS35, SS41)이 담수(TDS $1,000 mg/l$ 이하)에 속하고, 반염수(TDS $1,000\sim10,000 mg/l$)에 속하는 지점은 6곳(SS3, SS27, SS30, SS31, SS34, SS51), 염수(TDS $10,000\sim10,0000 mg/l$)에 속하는 지점은 1곳(SS1)이다. 2차조사시에는 7곳(SS21, SS23, SS24, SS28, SS29, SS41, SS43)이 담수에 속하고, 9곳(SS20, SS27, SS30, SS31, SS34, SS35, SS45, SS46, SS51)이 반염수, 3개 지점(SS1, SS46, SS51)이 염수에 속한다. 3차조사의 경우에는, 조사지점 중 5곳(SS21, SS29, SS34, SS41, SS43)이 담수에 속하고, 반염수에 속하는 지점은 6개 지점(SS20, SS23, SS24, SS27, SS31, SS35), 염수에 속하는 지점은 2개 지점(SS1, SS46)이다. 반염수나 염수에 속하는 지역은 해안퇴적층내에 함유되어 있는 염분의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. 실제로 SS3에서는 사상구청 공사현장의 시추공으로서 지하 약 9m 지점에서 길이 약 20cm 가량의 조개껍질이 출토되기도 했다.

염분농도는 1차조사시에는 $0.1\sim11.7\%$ 이고, 2차조사에는 $0.1\sim15.5\%$ 그리고 3차 조사에는 $0.1\sim7.8\%$ 이다. 1차, 2차, 3차 조사에서 중앙값은 각각 0.6% , 1.2% , 0.5% 이고, 평균값은 각각 1.92% , 3.61% , 1.67% 이다. 염분농도가 높게 나타나는 지점(SS1, SS46, SS51)은 낙동강변으로서 염수의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

용존산소(DO)는 1, 2, 3차 조사에서 각각 $2.37\sim16.3 mg/l$, $6.29\sim17.1 mg/l$, $1.09\sim5.48 mg/l$ 의 범위를 보이며, 중앙값은 각각 $7.23 mg/l$, $10.58 mg/l$, $2.92 mg/l$ 를 보인다. 그리고 평균값은 $8.73 mg/l$, $10.57 mg/l$, $2.85 mg/l$ 이다. 1차, 2차조사에서는 DO 평균값이 하천 및 호수 수질 환경기준 중 상수원수 1급수의 수질기준

Table 2. General statistics of inorganic components from the 1st, 2nd and 3rd surveys.

	Temp (°C)	pH	Eh (mV)	EC (µS/cm)	TDS (mg/l)	Sal (‰)	DO (mg/l)	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cu ²⁺	Zn ²⁺	Fe ²⁺	SiO ₂	Al ³⁺	As ³⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	
Mn.	1st	17.00	6.06	-71.00	225	107	0.1	2.37	26.07	1.34	6.31	13.39	0.000	0.01	0.00	4.06	-	-	15.30	16.00	81.46	0.10	0.00
	2nd	17.30	5.89	-123.50	259	124	0.10	6.29	17.32	3.50	3.85	13.96	0.00	0.01	0.00	8.69	-	-	14.87	13.66	66.78	0.12	0.03
	3rd	16.40	6.09	-115.20	136	65	0.1	1.09	17.92	1.17	8.50	14.98	0.00	0.02	0.00	0.04	N.D	10.20	27.81	20.49	70.48	0.00	0.01
Max.	1st	21.40	7.71	284.80	19800	11300	11.7	16.3	479.90	76.73	293.90	2866.00	0.013	1.45	3.60	64.35	-	-	6654.00	354.00	652.91	58.3	1.20
	2nd	25.00	7.16	259.50	25500	14500	15.50	17.10	604.70	61.40	173.70	802.80	0.01	0.51	3.36	52.24	-	-	7066.00	319.00	693.80	55.35	3.28
	3rd	18.90	7.32	267.10	12670	7690	7.8	5.48	284.92	56.98	342.45	3051.53	0.04	0.52	4.74	0.23	0.020	59.94	7635.90	379.07	475.96	15.08	0.63
Range	1st	4.40	1.65	355.80	19575	11193	11.6	13.93	453.83	75.39	287.59	2852.61	0.013	1.44	3.60	60.29	-	-	6638.70	338.00	571.45	58.20	1.20
	2nd	7.70	1.27	383.00	25241	14376	15.40	10.81	587.38	57.90	169.85	788.84	0.01	0.50	3.36	43.55	-	-	7051.13	305.34	627.02	55.23	3.25
	3rd	2.50	1.23	382.30	12534	7625	7.7	4.39	267.00	55.81	333.95	3036.55	0.04	0.50	4.74	0.19	0.020	49.74	7608.09	358.58	405.48	15.08	0.62
Mean	1st	18.10	6.81	143.11	3466.30	1869.00	1.924	8.73	184.28	17.15	54.65	452.76	0.006	0.21	0.45	37.06	-	-	1050.66	106.12	278.32	5.10	0.19
	2nd	18.81	6.69	72.18	6255.00	3434.29	3.61	10.57	151.77	18.26	50.67	228.55	0.00	0.07	0.54	32.49	-	-	1512.28	115.88	321.29	9.58	0.37
	3rd	17.68	6.80	20.32	3035.00	1637.77	1.67	2.85	94.93	6.06	27.16	86.85	0.00	0.05	0.07	0.11	0.002	41.00	1372.01	116.43	289.73	2.69	0.16
Median	1st	17.80	6.76	142.30	1220.00	592.00	0.6	7.23	115.90	6.95	24.64	95.10	0.005	0.09	0.01	38.72	-	-	268.30	89.50	235.84	0.70	0.10
	2nd	18.40	6.73	80.90	2350.00	1170.00	1.20	10.58	109.60	9.38	27.26	134.80	0.00	0.03	0.03	34.27	-	-	311.80	91.50	350.25	1.87	0.14
	3rd	17.50	6.82	3.80	1075.00	487.00	0.5	2.92	123.97	12.87	75.22	563.62	0.00	0.10	0.66	0.12	0.000	40.37	210.09	107.75	311.81	0.50	0.09
STD	1st	1.10	0.42	100.74	5417.70	3104.00	3.2	4.24	151.00	23.50	80.78	815.53	0.004	0.34	1.14	15.43	-	-	1868.80	83.37	158.37	13.90	0.28
	2nd	1.85	0.38	135.05	8328.53	4889.13	5.21	2.54	141.29	19.11	51.64	239.24	0.00	0.12	0.98	13.50	-	-	243.0.12	93.13	174.14	14.79	0.76
	3rd	0.64	0.31	111.30	4335.14	2564.69	2.61	1.32	92.34	16.14	114.92	1065.19	0.01	0.13	1.28	0.06	0.006	12.81	2607.64	103.02	131.26	4.28	0.19
Skew.	1st	2.12	0.26	-0.46	2.53	2.58	0.38	0.89	2.04	2.50	2.49	0.215	3.28	2.60	-0.51	-	-	2.51	1.69	0.97	3.90	3.15	
	2nd	2.56	-0.98	-0.01	1.73	1.76	1.77	0.79	2.20	1.45	1.36	1.23	1.87	3.33	2.07	-0.21	-	-	1.69	0.89	0.31	2.15	3.87
	3rd	0.11	-0.76	0.86	1.80	1.92	1.92	0.62	0.61	2.05	2.06	2.12	3.61	3.10	3.08	0.59	3.606	-0.91	2.12	1.48	-0.41	2.34	1.71
Kurt.	1st	5.15	0.00	-0.25	5.76	5.96	6.07	-0.77	-0.51	3.23	5.48	5.43	-0.54	11.99	5.45	0.23	-	-	5.63	4.02	0.53	15.70	10.89
	2nd	7.96	0.43	-1.61	1.57	1.67	1.69	1.48	6.28	0.75	0.66	1.67	12.07	3.70	-1.20	-	-	1.47	-0.27	-0.39	5.09	15.48	
	3rd	0.55	1.58	0.47	1.97	2.44	2.45	-0.17	-0.96	4.22	2.93	3.09	13.00	10.11	10.22	-0.12	13.00	1.75	3.15	2.48	-1.07	6.01	2.37

인 7.5 mg/l 이상에 적합한 것으로 나타났으나, 3차에서는 공업용수 2급수와 공업용수 3급수의 수질기준 (2 mg/l 이상)에 적합한 정도로 DO가 감소하였다.

Ca^{2+} 농도는 1, 2, 3차 조사에서 각각 $26.07\sim479.9 \text{ mg/l}$, $17.32\sim604.7 \text{ mg/l}$, $17.92\sim284.92 \text{ mg/l}$ 이며, 중앙값은 각각 115.9 mg/l , 109.6 mg/l , 123.97 mg/l , 평균값은 각각 184.3 mg/l , 151.77 mg/l , 94.93 mg/l 이다. 따라서, 1차, 2차, 3차로 갈수록 평균값이 낮아진다.

자연 상태에서 Ca^{2+} 이온은 탄산을 함유하는 물에서 방해석의 조화용해(congruent dissolution)로 형성되며, 사장석의 비조화용해(incongruent dissolution)에서도 유래한다(Appelo and Postma, 1999). 조화용해는 고체가 용해할 때, 2차적인 고상(固相)을 전혀 남기지 않는 것을 말한다(Saether and De Caritat, 1997, p. 4). Ca^{2+} 이온은 생활하수, 염수, 제설제로 뿐만 아니라 염화칼슘(CaCl_2) 등의 인위적인 오염원에서도 유래할 수 있다. 본 연구지역은 겨울철에 눈이 거의 내리지 않는 지역이므로, Ca^{2+} 이온이 제설제로부터 유래하지는 않는다. 따라서, 자연적인 기원이 아닌 Ca^{2+} 이온은 주로 생활하수나 염수로부터 유래하는 것으로 판단된다.

Mg^{2+} 농도는 1, 2, 3차 조사에서 각각 $6.31\sim293.9 \text{ mg/l}$ 과 $3.85\sim173.7 \text{ mg/l}$, $8.50\sim342.45 \text{ mg/l}$ 이다. 그리고 중앙값은 각각 24.64 mg/l , 27.26 mg/l , 75.22 mg/l 이다. 평균값은 1차, 2차, 3차로 갈수록 낮아지면서, 각각 54.65 mg/l , 50.67 mg/l , 27.16 mg/l 를 보인다. 자연 상태에서 Mg^{2+} 이온은 백운석, Mg를 포함한 방해석, 흑운모, 각섬석, 휘석, 감람석, 녹니석, 사문석의 용해로부터 유래한다(Hem, 1985). 또한 해안가에서는 Mg^{2+} 이온이 염수로부터 유래할 수 있다. 본 연구지역에서 높은 Mg^{2+} 농도를 보이는 지점들은 염수의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

Na^+ 의 농도는 1, 2, 3차 조사에서 각각 $13.39\sim2,866 \text{ mg/l}$, $13.96\sim802.8 \text{ mg/l}$, $14.98\sim3,051.53 \text{ mg/l}$ 이고, 중앙값은 각각 95.1 mg/l , 134.8 mg/l , 563.62 mg/l 이다. 평균값은 각각 452.76 mg/l , 228.55 mg/l , 86.85 mg/l 로서 갈수록 낮아진다. Na^+ 는 가장 풍부한 알칼리 원소로서 광물질이나 염화나트륨의 형태로 존재한다. 자연 상태에서 Na^+ 이온은 비조화용해에 의해서 알바이트가 깁사이트나 카올리나이트로 변질되면서 형성된다(Saether and De Caritat, 1997, p.6). 규산의 활동도가 높고 pH가 비교적 높을 때는 알바이트의 비조화용해에 의해서 스黠타이트가 생성될 수 있다. Na^+ 이온은 제설제로부터 유래할 수도 있으나, 본 연구지역

에서는 제설제의 살포가 없다. 그러나, 염수에 의해서 Na^+ 농도가 증가할 수 있다. 해수에 용해되어 있는 Na^+ 의 농도는 $10,560 \text{ mg/l}$ 이고(van der Leeden et al., 1990), 일반적인 지하수의 경우는 200 mg/l 이하(Todd and Mays, 2005)를 보인다. 본 연구지역에서는 지점에 따라서는 일반적인 지하수보다 훨씬 높은 Na^+ 농도를 보이고 있어서 염수의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. 실제로 SS1, SS3, SS27, SS30, SS31, SS34, SS35, SS45, SS46, SS51 지점은 반염수와 염수 영역에 속한다.

K^+ 이온의 농도는 1, 2, 3차 조사에서 각각 $1.34\sim76.73 \text{ mg/l}$, $3.50\sim61.40 \text{ mg/l}$, $1.17\sim56.98 \text{ mg/l}$ 의 범위를 보인다. 중앙값은 각각 6.95 mg/l , 9.38 mg/l , 12.87 mg/l 이며, 평균값은 각각 17.15 mg/l , 18.26 mg/l , 6.06 mg/l 이다. 자연적인 기원의 K^+ 이온은 비조화용해에 의해서 정장석, 미사장석이 카올리나이트로 변질되면서 형성된다. K^+ 이온은 또한 흑운모($\text{K}(\text{Mg}_{1.5}\text{Fe}_{1.5})(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)가 베미클라이트로 변질되면서 형성되기도 한다(Saether, and De Caritat, 1997). 화성암에서는 K^+ 가 Na^+ 보다 약간 낮은 함량비를 보이나, 퇴적암에서는 Na^+ 보다 풍부하다. K^+ 은 동식물의 필수원소 중의 하나이므로 경작지에 뿐만 아니라 카리비료(KCl 또는 K_2SO_4)가 지하수를 오염시킬 수 있다. 또한 K^+ 은 생활하수나 해안지역의 염수로부터 유래할 수 있다. K^+ 이온 농도가 높게 나타나는 지점들은 염수의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

HCO_3^- 이온 농도는 1차, 2차, 3차 조사에서 각각 $81.46\sim652.91 \text{ mg/l}$, $66.78\sim693.80 \text{ mg/l}$, $70.48\sim475.96 \text{ mg/l}$ 의 범위를 보인다. 중앙값은 각각 235.84 mg/l , 350.25 mg/l , 311.81 mg/l 이며, 평균값은 각각 278.32 mg/l , 321.29 mg/l , 289.73 mg/l 이다. 자연 상태에서는 탄산염 광물의 용해나 대기 및 토양 CO_2 가스의 용해로 인해서 HCO_3^- 이온이 형성될 수 있다. 도시지역에서는 유기오염물질로부터 유래하는 CO_2 가스에 의해서도 HCO_3^- 이온이 생성될 수 있다(Clark and Fritz, 1997; McCall et al., 1996). 해수에는 142 mg/l 의 HCO_3^- 이온이 용해되어 있다(van der Leeden et al., 1990). 본 연구지역에서는 탄산염광물, 대기 및 토양 CO_2 가스, 유기오염물질로부터 유래하는 CO_2 가스 또는 염수로부터 HCO_3^- 이온이 유래하는 것으로 판단된다.

Cl^- 이온의 농도는 1, 2, 3차 조사에서 각각 $15.3\sim6,654 \text{ mg/l}$, $14.87\sim7,066 \text{ mg/l}$, $27.81\sim7,635.90 \text{ mg/l}$ 의 범위를 보이고 있다. 중앙값은 각각 268.3 mg/l , 311.8 mg/l , 210.09 mg/l 이며, 평균값은 각각

1,050.66 mg/l, 1,512.28 mg/l, 1,372.01 mg/l로서 2차조사에서 농도가 가장 높다. 연구지역에서는 1차조사와 2차조사에서는 과반수의 시료가 국내 먹는물 기준치 (250 mg/l 이하)를 초과하는 Cl⁻ 이온 농도를 보이고 있다. 일반적인 습윤지역 지하수의 염소이온 농도는 10 mg/l이다(Todd and Mays, 2005). Cl⁻ 이온은 염수, 규산염 광물(흑운모 및 각섬석 등)의 수화반응, 유체포 유물로부터의 유출 등으로부터 유래하며(Nordstrom *et al.*, 1989), 심부 지하수에서 높게 나타난다. 또한 생활하수, 산업 폐수, 농약, 축산폐수, 동물의 배설물, 제설제 등 각종 오염원으로부터 지하수에 유입되기도 한다. Cl⁻은 산업용제나 농약 제조용 할로겐 유기화합물의 성분으로 사용된다. 따라서 Cl⁻은 해안퇴적층의 염수와 공단지역의 산업 폐수로부터 유래하는 것으로 판단된다.

SO₄²⁻ 이온의 농도는 1, 2, 3차 조사에서 각각 16.0 ~ 354.0 mg/l, 13.66 ~ 319.00 mg/l, 20.49 ~ 379.07 mg/l이며, 중앙값은 각각 89.5 mg/l, 91.5 mg/l, 107.75 mg/l이다. 평균값은 각각 106.1 mg/l, 115.88 mg/l mg/l, 116.43 mg/l로서 2차와 3차조사시 농도가 거의 같다. 일반적인 지하수의 SO₄²⁻ 이온 농도는 300 mg/l 이하이다(Todd and Mays, 2005). 자연적인 기원의 SO₄²⁻ 이온은 석고, 경석고 등의 황산염광물(sulphate)에서 유래한다. 또한 황철석, 자류철석, 황동석 등의 황화광물(sulfide)의 산화작용에서 형성되거나, 유기물이 미생물에 의해서 분해되는 과정에서도 형성된다(Eby, 2004). 또한 황산염은 대기 중에서 SO₂로부터 유래하거나 (Keller, 2000), SO₂이 황산(H₂SO₄)을 형성하기도 한다. SO₄²⁻의 주요 생성원인은 화석연료의 연소(주로 화력발전소의 석탄의 연소), 정유과정, 종이, 시멘트, 알루미늄의 제조과정, 자동차 배기ガ스 등이다. 또한 해안지역에서는 황산염이 해수에서 유래하여 담수지하수에 용해될 수 있다. 화성암이나 변성암에서의 SO₄²⁻ 이온 농도는 100 mg/l보다 낮다(Davis and DeWiest, 1991). 그러나, 본 연구지역에서는 평균 100 mg/l을 초과하고 있으며, SS1, SS30, SS46에서 먹는물 기준치(200 mg/l 이하)를 초과하고 있다. 따라서 본 연구지역의 SO₄²⁻ 이온 농도는 자연적인 기원보다는 공장 폐수, 자동차 배기ガ스, 대기 오염 등의 인위적인 오염원과 염수의 영향을 더 크게 받는 것으로 판단된다.

NO₃⁻ 이온의 농도는 1, 2, 3차 조사에서 각각 0.1 ~ 58.3 mg/l, 0.12 ~ 55.35 mg/l, 0 ~ 15.08 mg/l이며, 중앙값은 각각 0.7 mg/l, 1.87 mg/l, 0.50 mg/l이다. 평균값은 각각 5.1 mg/l, 9.58 mg/l, 2.69 mg/l로서 2차조사시 농도가 가장 높게 나타난다. NO₃⁻는 인위적 오염의

지시자로 널리 쓰이고 있으며, 생활하수, 축산 폐수, 동물의 배설물, 유기물의 분해, 비료 등에서 유래한다. 본 연구지역에서 NO₃⁻ 농도의 평균값과 중앙값은 먹는물 기준치(NO₃⁻ 농도로 44.26 mg/l) 이내에 있다. 그러나 쓰레기운반용 트럭 주차장에 위치하는 SS28에서는 1차, 2차조사에서 먹는물 기준치를 초과하는 각각 58.3 mg/l, 55.35 mg/l가 검출되었다. 이는 쓰레기 운반 차의 세차에서 유래하는 것으로 판단된다.

SiO₂의 농도는 1, 2, 3차 조사에서 각각 4.06 ~ 64.35 mg/l, 8.69 ~ 52.24 mg/l, 10.20 ~ 59.94 mg/l이고, 중앙값은 각각 38.72 mg/l, 34.27 mg/l, 40.37 mg/l이다. 평균값은 각각 37.06 mg/l, 32.49 mg/l, 41.00 mg/l로서 3차조사시 농도가 가장 높다. 일반적인 지하수에서 SiO₂ 농도는 1 ~ 20 mg/l 정도이다(Todd and Mays, 2005). 자연 상태에서 SiO₂는 규산염광물(사장석, 정장석 등)의 용해에 의하여 지하수로 유입된다. SiO₂는 물 속에서는 부유입자, 콜로이드, 또는 중합체, 규산(H₄SiO₄) 또는 규산이온의 형태로 존재한다(Greenberg *et al.*, 1992). 인위적인 요인으로는 SiO₂는 콘크리트의 분해로부터 생성될 수도 있다(Jeong, 2001; 이효민 등, 2003). 본 연구지역은 공업지역이므로 규산염광물의 용해뿐만 아니라 콘크리트의 용해에 의해서 일부 SiO₂가 유래하는 것으로 판단된다.

F 농도는 1, 2, 3차 조사에서 각각 0 ~ 1.2 mg/l, 0.03 ~ 3.28 mg/l, 0.01 ~ 0.63 mg/l이며, 중앙값은 각각 0.1 mg/l, 0.14 mg/l, 0.09 mg/l, 평균값은 각각 0.19 mg/l, 0.37 mg/l, 0.16 mg/l이다. 지질학적으로 F-이온은 형석, 인회석, 흑운모, 각섬석에서 유래할 수 있다. 또한 불소는 화산 가스에서 흔히 수반된다(Hem, 1985). F-이온은 화강암, 편암, 편마암 지대의 심부 지하수에서 높은 농도를 보이는 것으로 알려져 있다. 인위적인 요인으로는 알루미늄 제조, 인산비료 제조, 유리, 연화, 타일 공업, 도자기 제조, 합성수지 제조, 냉매 제조, 살충제 등의 농약 제조 등에서 유래한다(박석기 등, 1996). F-이온은 2차조사시 SS51(3.28 mg/l)를 제외한 모든 시료에서 먹는물 기준치(1.5 mg/l 이하) 이내에 있다. 본 연구지역에서는 F-이온이 흑운모, 각섬석 등에서 유래하거나 인위적인 오염원에서 유래하는 것으로 판단된다.

Fe²⁺ 농도는 1차, 2차, 3차 조사에서 각각 불검출 ~ 3.60 mg/l, 불검출 ~ 3.36 mg/l, 불검출 ~ 4.74 mg/l이고, 중앙값은 각각 0.01 mg/l, 0.03 mg/l, 0.66 mg/l, 평균값은 각각 0.45 mg/l, 0.54 mg/l, 0.07 mg/l이다. 화성암에서 유래된 철은 대부분 미량 존재한다. 하지만 철의

농도가 미량일지라도 용수사용에 심각한 영향을 미친다. 1차 조사시에는 대부분의 시료에서 먹는물 기준치인 0.3 mg/l 하로 나타나지만, SS35와 SS51에서 먹는물 기준치를 10배 정도 초과하고 있고, 2차조사시에는 SS41을 제외한 철이 검출된 모든 지점에서 먹는물 기준치를 초과하고 있으며, 3차조사에서는 5군데(SS1, SS21, SS27, SS43, SS46)에서 먹는물 기준치를 초과하고 있다. 본 연구지역과 같은 해안에 가까운 환원환경의 퇴적층에는 Fe 성분이 농집되는 것으로 알려져 있으며(Boggs, 2001), 아울러서 공단지역에서도 Fe 성분이 유래함으로써, 지하수에서 Fe^{2+} 이온의 농도가 높게 나타나는 것으로 해석된다.

Zn^{2+} 의 농도는 1, 2, 3차 조사에서 각각 $0.01\sim1.45 \text{ mg/l}$, $0.01\sim0.51 \text{ mg/l}$, $0.02\sim0.52 \text{ mg/l}$ 의 범위를 보이고 있다. 중앙값은 각각 0.09 mg/l , 0.03 mg/l , 0.10 mg/l 이며 평균값은 각각 0.21 mg/l , 0.07 mg/l , 0.05 mg/l 이다. SS28의 1.45 mg/l 를 제외하고는 먹는물 기준치(1 mg/l) 이내에 있다.

Cu^{2+} 의 농도는 1, 2, 3차조사시 각각 불검출~ 0.013 mg/l , 불검출~ 0.01 mg/l , 불검출~ 0.04 mg/l 로서 모든 시료가 먹는물 기준치(1 mg/l 이하)이내에 있다.

Al^{3+} 은 1, 2차조사에서는 분석하지 않았고, 3차조사

에서는 $0.04\sim0.23 \text{ mg/l}$ 를 나타내며, 중앙값은 0.12 mg/l , 평균값은 0.11 mg/l 이다. 따라서 Al 은 SS1을 제외한 모든 지점에서 먹는물 기준치(0.2 mg/l) 이내에 있다.

As^{3+} 은 1, 2차조사에서는 분석하지 않았고, 3차조사에서는 불검출~ 0.02 mg/l 이다. 따라서 비소는 모든 지점에서 먹는물 기준치(0.05 mg/l) 이내에 있다.

3.2. 수질 유형

지하수의 주요 이온의 밀리당량비를 Piper diagram에 도시하여 수질 유형을 살펴보면, 1차조사에서는 $\text{Ca}-\text{Cl}$ 형이 우세하고, $\text{Na}-\text{Cl}$ 형이 일부 나타난다(Fig. 3). 2차조사, 3차조사에에서도 역시 $\text{Ca}-\text{Cl}$ 형이 우세하게 나타난다.

자연적인 지하수 유형은 $\text{Ca}-\text{HCO}_3$ 형과 $\text{Na}-\text{HCO}_3$ 형에 속하는 경우가 많다. 그러나, 지하수가 해수 또는 염수의 영향을 받거나, 인위적인 오염의 영향을 받고 있을 때는 $\text{Ca}-\text{Cl}$ 형을 보인다. 본 연구지역에서는 저지대의 대부분이 과거 해안 퇴적층이 분포하고 있던 지역이므로 퇴적층내에 포함되어 있는 염분이 서서히 지하수로 유입되고 있는 것으로 판단된다. 염수와 퇴적물의 양이온교환반응에 의하여 퇴적층 속에 들어있던 Ca^{2+} 이온이 Na^{+} 이온과 치환됨으로서 지하수의 수질형

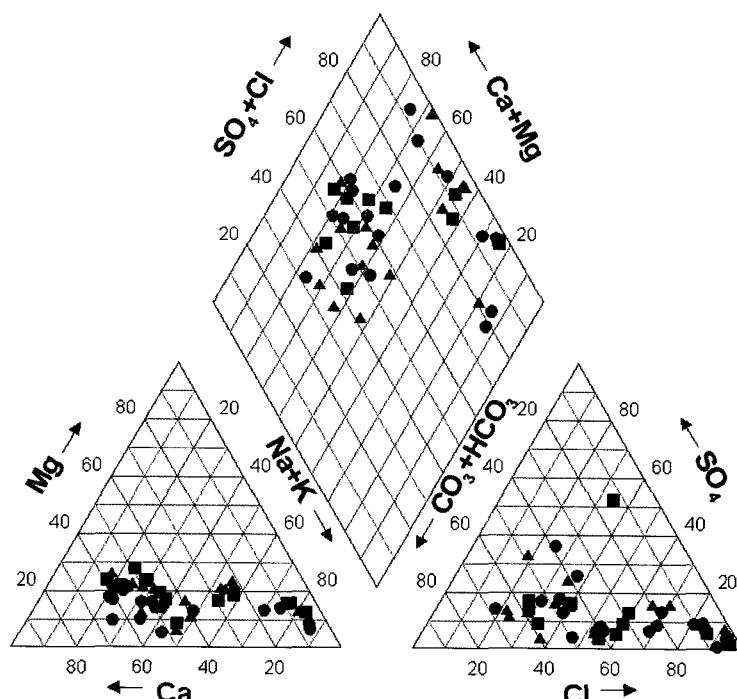


Fig. 3. Piper diagram of groundwater samples from the 1st, 2nd and 3rd investigations.

Table 3. Concentrations of TCE, PCE and TCA.

Sample no.	TCA			PCE			TCE				Mean
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd		
SS1	N.D										
SS3	N.D	-	-	N.D	-	-	N.D	-	-	N.D	
SS20	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.214	0.151	0.335	0.163	
SS21	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.036	0.011	0.016	0.021	
SS23	0.018	0.001	0.005	N.D	N.D	N.D	0.432	0.274	0.744	0.483	
SS24	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.002	N.D	0.004	0.014	0.006	
SS25	0.001	-	-	N.D	-	-	0.040	-	-	0.040	
SS27	N.D	N.D	N.D	0.042	0.011	0.042	0.067	0.034	0.074	0.583	
SS28	N.D	N.D	-	N.D	N.D	-	0.033	0.016	-	0.025	
SS29	N.D	N.D	N.D	0.001	N.D	N.D	0.144	0.123	0.034	0.100	
SS30	N.D	N.D	-	N.D	N.D	-	N.D	0.002	-	0.001	
SS31	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.491	0.428	1.088	0.669	
SS34	N.D	0.001	0.002	0.001							
SS35	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.001	0.010	0.001	0.004	
SS41	N.D										
SS43	0.013	0.01	0.016	0.006	0.02	0.004	0.027	0.020	0.024	0.024	
SS45	N.D	N.D	-	N.D	N.D	-	N.D	N.D	-	N.D	
SS46	N.D										
SS51	N.D	N.D	-	N.D	N.D	-	N.D	N.D	-	N.D	

*N.D means not detected.

이 $\text{Ca}-\text{Cl}$ 형으로 변하게 된 것으로 해석된다(Appelo and Postma, 1999). 그리고 Ca^{2+} 이온은 해안퇴적물에 들어있는 굴껍질이나 조개껍질 등에서 유래하는 것으로 판단된다. Fig. 3에서도 이와 같은 Ca^{2+} 이온과 Na^+ 이온의 교환반응을 잘 보여주고 있다.

4. 유기오염물질의 농도

지하수 내 독성 유기오염물질의 농도는 $\mu\text{g/l}$ 단위의 낮은 농도일지라도 수생계의 생물이나 포유동물에게 심각한 악영향을 미치게 된다. 산업발달과 더불어 유류를 비롯한 유기독성물질의 사용량이 증가함에 따라 지하수환경에서 흔히 독성 및 발암성 유기물질들이 발견되고 있다. 공단지역에서 흔히 검출되는 유기오염물질 중 TCE(Trichloroethylene), PCE(Tetrachloroethylene), TCA(1,1,1-Trichloroethane)를 분석하였다(Table 4). TCE, PCE, TCA는 DNAPLs(고밀도 난용성 액체, dense non-aqueous phase liquid)이다. TCE, PCE, TCA의 용도는 주로 드라이크리닝 용제, 향제(지금은 쓰이지 않음), 정화조 청소제, 염소소독제, 공업물질의 용제, 금속부품의 탈지세정제, 페인트 제거제, 산업용 세척제, 농약, 탈지제(degreaser), 접착제, 섬유공업 재료 등이다.

TCE는 과반수의 시료에서 검출되었으며, 검출된 대부분의 시료에서 먹는물 기준치(0.03 mg/l)를 초과하였다(Table 3). 먹는물 수질 기준치를 초과하는 지점들 (SS20, SS21, SS23, SS27, SS28, SS29, SS31, SS43)은 주형, 금형이나 기계부속품, 비철금속주조의 제조업체 3곳(SS20, SS23, SS31), 세차장 2곳(SS21, SS27), 운수업체 1곳(SS43), 음식점 1곳(SS29), 쓰레기 처리업체 1곳(SS28)이다. TCE가 가장 높게 검출된 지점(SS31)은 공업부품제조업체로서 1999년까지는 전자제품을 생산하였으나 그 이후에는 자동차 콤프레셔, 펌프 및 모터 부품을 생산하고 있는 업체이다. SS31에서 TCE의 농도는 1차에서 0.491 mg/l , 2차에서 0.428 mg/l , 3차에서 1.088 mg/l 로서 먹는물 기준치보다 14배 내지 36배나 더 높게 검출되었다. 이는 전자부품의 세척제에 사용되는 TCE로부터 유래하는 것으로 판단된다. 음식점(SS29)에서는 TCE를 사용하지 않으나 음식점에 인접한 상류 쪽에 위치했던 자동차 수리센터로부터 유래했을 가능성이 높다. TCE 검출지점의 평균 농도는 3차조사시 가장 높게 나타난다(Fig. 4).

PCE는 3곳(SS27, SS29, SS43)에서 검출되었다. SS27에서는 1차(0.042 mg/l), 2차(0.011 mg/l), 3차(0.042 mg/l) 모두 PCE가 먹는물 기준치(0.01 mg/l)를 초과하여 검출되었다. SS27은 세차장이므로 세차 시에

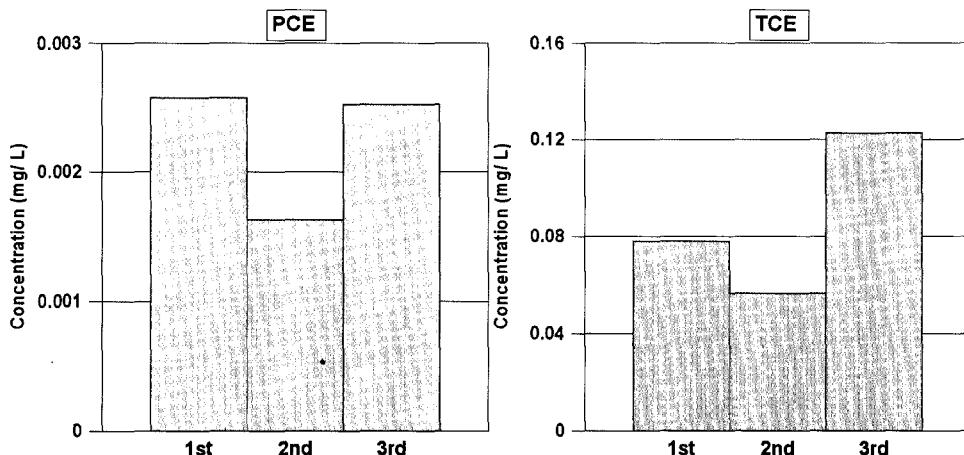


Fig. 4. Bar charts of average concentration of chemical components from the 1st, 2nd and 3rd investigations.

사용되는 광택제 등에서 PCE가 유래하는 것으로 판단된다. SS43에서는 1차, 2차, 3차 조사에서 각각 0.006 mg/l, 0.02 mg/l, 0.004 mg/l로 검출되었으나, 2차 조사에서만 먹는물 기준치(0.01 mg/l)를 초과하였다. SS43호공은 운수회사에서 자동차 세척에서 PCE가 유래하는 것으로 판단된다. PCE 검출지점의 평균 농도는 1, 3차조사시 농도는 서로 비슷하고, 2차조사에서는 감소하였다(Fig. 4).

TCA는 SS23, SS25, SS43에서만 검출되었으며, 먹는물 기준치(0.1 mg/l)를 초과하지는 않았다.

3차에 걸친 TCE, PCE, TCA의 분석결과를 보면, 분석 대상 과반수의 지점에서 TCE가 검출되어 공업지역에서 많이 사용되는 TCE가 오염원을 중심으로 지층의 발달상태와 관련하여 지하수를 광범위하게 오염시킬 수 있음을 지시한다.

5. 성분들간의 상관성

1차, 2차, 3차조사의 성분 농도의 평균값으로부터 성분들간의 상관성을 분석하였다. EC, TDS, 염분농도 간에는 상관계수 0.99 이상의 높은 상관성을 보인다 (Table 4). 염분농도와 Cl⁻, K⁺ 사이의 상관계수는 0.87 이상으로 높게 나타나고 있으며, 염분농도와 Na⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻ 간에도 상관계수 0.6 이상의 비교적 높은 상관성을 나타내고 있다. 또한 염분농도와 Ca²⁺ 간의 상관계수는 0.5 정도로 나타난다. 이는 주요 용존이온들이 염수의 영향을 받고 있음을 지시하는 것이다.

NO₃⁻와 주요 이온들(Na⁺, Cl⁻, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻) 간에는 거의 상관성이 없거나 음의 상관

성을 보여주고 있다. 이는 생활하수에 의한 영향은 미미하다는 것을 의미한다. SiO₂와 주요 이온들(Na⁺, Cl⁻, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻)간에는 모두 음의 상관성을 보이고 있다. Na⁺가 풍부한 규산염광물을 함유하고 있는 암석이 분포하는 지역의 지하수에서는 높은 SiO₂ 농도와 높은 SiO₂/Na⁺ 몰비 그리고 높은 SiO₂/HCO₃⁻ 몰비를 보인다 (Hem, 1985). 본 연구지역은 안산암질 암석이 분포하고 있는 지역이지만 SiO₂와 Na⁺ 그리고 SiO₂와 HCO₃⁻간에 음의 상관성을 보이는 것으로 보아 지하수 수질이 물-광물 반응보다는 염수의 영향이나 기타 인위적인 오염의 영향을 더 크게 받고 있음을 지시한다. 또한 이 지역에서는 일부 SiO₂가 콘크리트의 부식에서 유래하는 것으로 사료된다.

HCO₃⁻와 다른 주요 이온(Na⁺, Cl⁻, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻) 간의 상관성이 모두 양으로 나타난다. 또한 HCO₃⁻와 K⁺ 간의 상관계수가 0.57 정도로 비교적 높게 나타난다. 이는 HCO₃⁻와 K⁺가 미고결층이나 토양층에서 유래함을 지시한다.

6. 요인분석

요인분석(Lawrence and Upchurch, 1982; Sulk and Lee, 1999; 심형수 등, 2000; 함세영 등, 1999, 2000; Jeong, 2001; 이병선과 우남칠, 2003)은 지하수 수질(변수)을 거의 유사하게 설명할 수 있는 적은 수의 변수(요인)로 묶어주는 다변수 자료 축소법(multivariate data reduction method)의 일종이다. 일반적으로 오염되지 않은 지하수의 화학적 특징은 주로 지질에 의해 좌우되므로 요인분석에 의해서 암석의 종류에 따른

Table 4. Matrix of correlation coefficients among physicochemical components.

	Temp	pH	Eh	EC	TDS	Sal	DO	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cu ²⁺	Zn ²⁺	Fe ²⁺	SiO ₂	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻
Temp	1.000	0.022	0.132	-0.029	-0.033	-0.030	0.183	-0.019	-0.027	-0.136	-0.124	0.109	-0.072	-0.010	-0.506	-0.083	-0.078	-0.137	0.038	0.251
pH	0.022	1.000	-0.077	0.139	0.139	0.135	0.139	0.106	0.198	0.161	0.217	-0.093	-0.229	0.123	-0.236	0.167	0.145	-0.310	0.228	
Eh	0.132	-0.077	1.000	-0.453	-0.450	-0.447	0.244	-0.177	-0.507	-0.447	-0.367	0.061	0.160	-0.513	0.050	-0.426	-0.215	-0.764	0.161	-0.251
EC	-0.029	0.139	-0.453	1.000	0.999	0.999	0.289	0.549	0.878	0.774	0.647	0.021	-0.139	0.416	-0.486	0.934	0.618	0.489	0.124	0.394
TDS	-0.033	0.139	-0.450	0.999	1.000	1.000	0.285	0.544	0.879	0.781	0.655	0.019	-0.137	0.425	-0.487	0.940	0.612	0.484	0.127	0.386
Sal	-0.030	0.135	-0.447	0.999	1.000	1.000	0.285	0.536	0.873	0.770	0.641	0.015	-0.136	0.419	-0.488	0.935	0.607	0.484	0.134	0.390
DO	0.183	0.139	0.244	0.289	0.285	0.285	1.000	0.251	0.244	0.038	0.030	-0.076	-0.190	0.060	-0.276	0.161	0.000	-0.016	0.007	0.122
Ca ²⁺	-0.019	0.106	-0.177	0.549	0.544	0.536	0.251	1.000	0.441	0.610	0.522	0.170	0.026	0.315	-0.208	0.599	0.589	0.238	-0.063	0.037
K ⁺	-0.027	0.198	-0.507	0.878	0.879	0.873	0.244	0.441	1.000	0.808	0.784	0.002	-0.121	0.542	-0.524	0.866	0.567	0.569	0.025	0.379
Mg ²⁺	-0.136	0.161	-0.447	0.774	0.781	0.770	0.038	0.610	0.808	1.000	0.963	0.295	-0.066	0.534	-0.318	0.928	0.689	0.394	-0.023	0.177
Na ⁺	-0.124	0.217	-0.367	0.647	0.655	0.641	0.030	0.522	0.784	0.963	1.000	0.322	-0.076	0.510	-0.329	0.840	0.637	0.337	-0.119	0.158
Cu ²⁺	0.109	-0.093	0.061	0.021	0.019	0.015	-0.076	0.170	0.002	0.295	0.322	1.000	0.146	-0.086	-0.042	0.175	0.364	-0.122	0.018	0.036
Zn ²⁺	-0.072	-0.229	0.160	-0.139	-0.137	-0.136	-0.190	0.026	-0.121	-0.066	-0.076	0.146	1.000	-0.181	0.131	-0.127	0.030	-0.158	0.719	-0.142
Fe ²⁺	-0.010	0.123	-0.513	0.416	0.425	0.419	0.060	0.315	0.542	0.534	0.510	-0.086	-0.181	1.000	-0.306	0.503	0.101	0.596	-0.095	0.242
SiO ₂	-0.506	-0.236	0.050	-0.486	-0.487	-0.488	-0.276	-0.208	-0.524	-0.318	-0.329	-0.042	0.131	-0.306	1.000	-0.450	-0.429	-0.121	-0.017	-0.349
Cl ⁻	-0.083	0.167	-0.426	0.934	0.940	0.935	0.161	0.599	0.866	0.928	0.840	0.175	-0.127	0.503	-0.450	1.000	0.691	0.422	0.047	0.318
SO ₄ ²⁻	-0.078	0.167	-0.215	0.618	0.612	0.607	0.000	0.589	0.567	0.689	0.637	0.364	0.030	0.101	-0.429	0.691	1.000	0.115	0.025	0.154
HCO ₃ ⁻	-0.137	0.145	-0.764	0.489	0.484	0.484	-0.016	0.238	0.569	0.394	0.337	-0.122	-0.158	0.596	-0.121	0.422	0.115	1.000	-0.061	0.409
NO ₃ ⁻	0.038	-0.310	0.161	0.124	0.127	0.134	0.007	-0.063	0.025	-0.023	-0.119	0.018	0.719	-0.095	-0.017	0.047	0.025	-0.061	1.000	-0.022
F ⁻	0.251	0.228	-0.251	0.394	0.386	0.390	0.122	0.037	0.379	0.177	0.158	0.036	-0.142	0.242	-0.349	0.318	0.154	0.409	-0.022	1.000

지하수의 화학조성의 차이를 해석할 수 있다. 또한 요인분석에 의해서 지하수가 인위적인 오염의 영향을 받고 있는지를 평가할 수 있다.

요인분석에서는 1차, 2차, 3차 조사에서 얻어진 물리적, 화학적 성분(수온, pH, Eh, EC, TDS, 염분농도, DO, SiO_2 , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Al^{3+} , As^{3+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+})을 독립변수로 설정하였다. 각 요인들은 주성분분석법(principal component analysis)으로 구하였으며, 인수 결정은 1 이상의 고유값(eigenvalue)을 택하는 것으로 하였으며, varimax 직각회전 방식을 택하였다(Davis, 2002). varimax 직각회전방식은 각 요인에 대한 요인적재(factor loading)의 분산을 최대화하도록 요인들을 직교 변환하는 것이다(Jöreskog *et al.*, 1976). 요인분석을 위하여 windows용 통계프로그램 SAS ver. 9.1(SAS Institute Inc. 1995)을 사용하였다.

요인분석 결과, 전체 자료에 대한 각 요인의 분산 설명율을 보면, 요인 1이 49.8%, 요인 2가 19.8% 그

리고 요인 3이 11.0%로서 전체 설명율은 80.6%이다. 세 요인에 의해서 변수(화학성분)들의 분산도를 설명할 수 있는 공통분산인자(communality)는 pH, DO, SiO_2 , F를 제외하고는 0.7 이상의 높은 값을 보인다.

요인 1에 높은 양(positive)의 적재율을 보이는 성분은 pH, TDS, 염분농도, Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Al^{3+} , As^{3+} , Cl^- , Fe^{2+} 이다(Fig. 5). 본 연구지역은 공업지역으로서 해안에 비교적 가깝게 위치하므로 해안퇴적층에서 유래하는 염분의 영향을 받고 있으므로 요인 1에 높은 적재율을 보이는 성분들은 염수의 영향을 받고 있는 것으로 설명된다. 다른 성분과는 달리 DO는 음의 적재율을 보이므로 염수의 영향과는 다른 영향을 반영하는 것으로 보인다.

요인 2에 높은 양(positive)의 적재율을 보이는 수온, EC, SiO_2 , HCO_3^- 는 자연적인 영향과 인위적인 영향을 동시에 내포하고 있는 것으로 보인다. 즉, SiO_2 는 물-광물반응과 관련되지만, 일부는 콘크리트의 부식과도 관련되는 것으로 판단된다. 한편 HCO_3^- 는 토양층에서

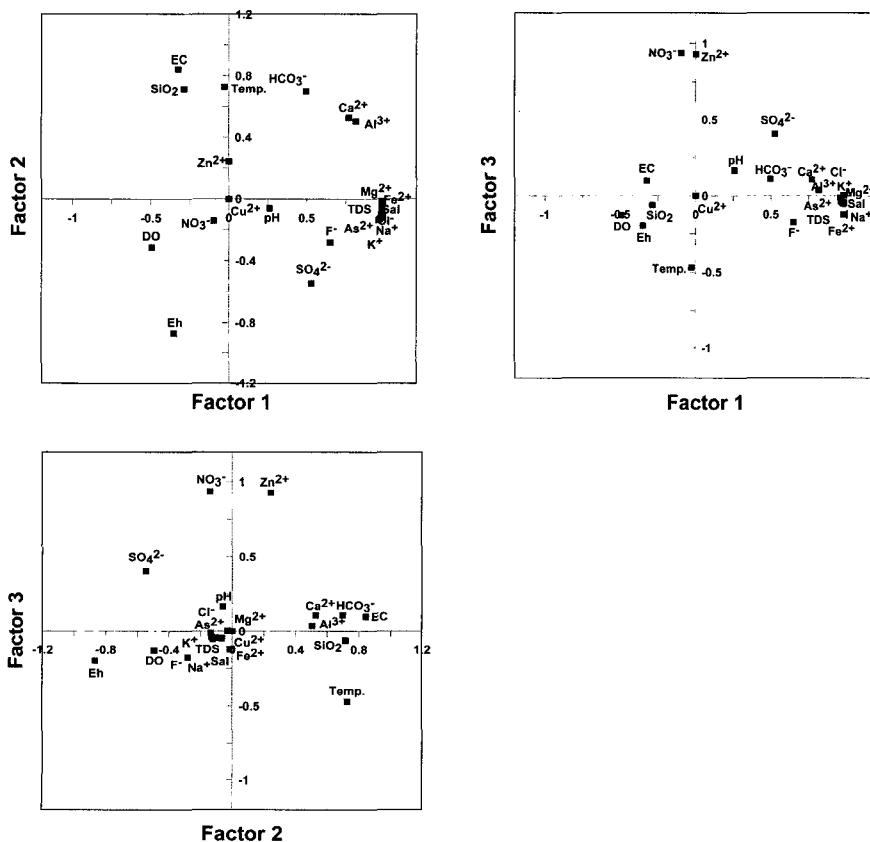


Fig. 5. Plot of factors for groundwaters.

유래하며 자연적인 영향과 인위적인 오염의 영향을 함께 받는 것으로 해석된다. SO_4^{2-} 는 요인 2에 비교적 높은 음의 적재율을 보이며, 요인 1에도 비교적 높은 양의 적재율을 보이므로, SiO_2 와 HCO_3^- 와는 달리 인위적인 영향과 염수의 영향을 동시에 받고 있는 것으로 설명할 수 있다. 한편 공업지역에서 HCO_3^- 이온은 탄산염광물, 대기 및 토양 CO_2 가스, 유기오염물로부터 유래하는 CO_2 가스, 염수 등에서도 유래하는 것으로 판단된다. 지하수 수온은 지하 종온율이나 기온의 영향을 받기 보다는 오히려 대부분의 시료채취 지점에 위치하는 금속업체나 주강업체 등에서 사용하는 기계의 열로 인한 인위적인 영향으로 사료된다.

요인 3에 높은 양의 적재율을 보이는 성분은 NO_3^- 와 Zn^{2+} 이다. NO_3^- 는 주로 생활하수 등에서 유래한다. 그러나 녹지지역에서는 NO_3^- 이온이 요인 1에 적재되는 것과 달리 공업지역에서는 NO_3^- 이온이 요인 3에 적재되는 것으로 보아 인위적인 영향 중에서 생활하수의 영향이 상대적으로 낮음을 암시한다. 그리고 본 공업지역에서는 NO_3^- 를 제외한 화학성분들은 광물의 용해 또는 공장 폐수 등의 오염원의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. Zn^{2+} 은 NO_3^- 와 같이 요인 3에 높은 적재율을 보이고 있으나, 생활하수보다는 지하수공의

백관으로 된 케이싱이나 압상파이프의 부식에서 유래하는 것으로 보인다.

7. 수질의 공간적 분포 특성

본 연구 지역의 19개 지하수공에 대해 수질의 공간적 분포특성을 파악하기 위하여 군집분석을 실시하였다. 군집분석을 위해서는 SAS 9.1(SAS Institute Inc., 1995)을 이용하였다. 군집분석(cluster analysis)은 어떤 개체나 대상을 밀접한 상사성(similarity) 또는 거리(distance)에 의하여 유사한 특성을 지닌 개체들을 몇 개의 군집으로 집단화하는 다변량기법이다. Colby (1993)은 유사한 수리화학·수리물리적 특성을 가지는 분포지역을 인지하기 위해서 많은 수의 물리화학적 변수를 객관적으로 분석하는 수단으로 군집분석을 실시하였다. 본 연구에서는 가장 널리 사용되고 있는 병합적 방법을 적용하였고, 유사성 측정방법은 유clidean 제곱거리(squared Euclidean distance) 방식을 그리고 군집화 방식은 평균 연결(average linkage) 방식을 택하였다(김남진 등, 2001). 앞의 요인분석에서 얻어진 3 개의 요인은 지하수 수질 특성을 설명할 수가 있다. 그 중에서도 요인 1에 높은 양(positive)의 적재율을

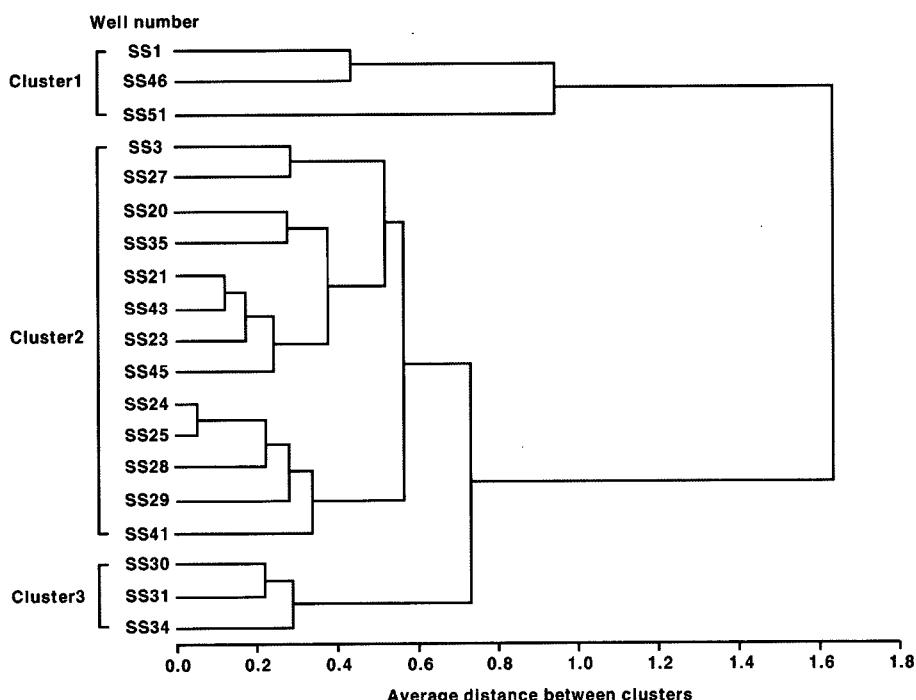


Fig. 6. Dendrogram using average linkage for well waters in the study area.

보이는 수질 성분을 변수로 지정하여 군집분석을 실시하였다. 군집분석에는 $\text{SiO}_{2(\text{aq})}$, Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- 의 농도를 표준화하여 적용하였다. 이는 원래 농도를 적용할 경우에 농도가 높은 자료들끼리 묶이는 것을 방지하기 위한 것이다.

군집분석 결과, 총 3개의 군집으로 나뉘어졌다(Fig. 6). 군집 1은 SS1, SS46, SS51을 포함한다. 군집 1은 이온 농도가 가장 높으며 지하수 유형은 Na-Cl형에 속한다. 또한 군집 1은 군집 2 및 군집 3과 직접적인 유사성을 보이지 않기 때문에 인위적인 오염의 영향은 상대적으로 낮은 것으로 사료된다. 대부분의 지하수공이 과거 해안 퇴적층에 위치하고 연안에 근접하기 때문에 염수의 영향이 크게 미치는 지역으로 사료된다. 군집 2는 다양한 인위적인 오염의 영향을 받는 그룹이다. 그룹 3은 SS30, SS31, SS34를 포함한다. 이들은 학장천 주변지역 그리고 군집 1과 군집 2 사이 지역에 위치한다. 군집 3에서는 과거 해안 퇴적층에 유입된 염분이 서서히 지하수에 용해되고 있으며 동시에 인위적인 오염의 영향을 받고 있는 것으로 판단되며 지하수 유형은 Ca-Cl형에 속한다.

1, 2, 3차 조사에서 얻어진 수질의 평균농도의 공간적 분포를 살펴보면(Fig. 7), Ca^{2+} 이온, Na^+ 이온, Cl^- 이온은 낙동강변(SS1, SS46, SS51)과 학장천 하류(SS31, SS34, SS36)에서 높게 나타난다. 낙동강변에서는 Ca^{2+} , Na^+ 이온 뿐만 아니라 EC도 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 를 초과하는 높은 값을 보인다. K^+ 이온, Mg^{2+} 이온의 농

도도 낙동강변(SS1, SS46, SS51)에서 높게 나타난다. 이러한 현상은 1, 2, 3차 조사에서도 비슷한 농도 경향성을 보인다. 낙동강과 학장천 하류에서 Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- 이온이 높은 농도를 보이는 것은 염수의 영향으로 판단된다. 한편 SO_4^{2-} 의 농도는 SS51을 제외한 SS1, SS46, SS31, SS34, SS36에서 높게 나타난다. 이는 SO_4^{2-} 가 염수의 영향을 받고 있음을 지시한다. 그러나 학장천 상류인 SS22에서 높게 나타나는 SO_4^{2-} 농도는 인위적인 오염의 영향으로 해석된다.

대표적인 오염의 지시자 역할을 하는 NO_3^- 이온은 낙동강변(SS1, SS46, SS51)과 학장천 주변(SS20, SS28, SS29)에서 높게 나타나고 있으며, 이는 오염물질이 배출되는 지역에서 NO_3^- 농도가 높게 나타남을 지시한다. 쓰레기운반용 트럭 주차장에 위치하는 SS28에서는 먹는 물 기준치(44.26 mg/l)를 초과하는 높은 농도(1차, 2차 평균값 56.8 mg/l)를 보인다.

SiO_2 는 주로 학장천을 따라서 높게 나타나고 있으며, 물-광물반응이나 인위적인 오염(특히, 콘크리트 분해)의 영향으로 해석된다.

PCE는 SS27에서는 1차 0.042 mg/l, 2차 0.011 mg/l, 3차 0.042 mg/l로서 가장 높게 검출되었다. SS27은 세 차장이므로 광택제 등에서 PCE가 유래하는 것으로 판단된다. 한편 TCE는 공업부품제조업체가 위치하는 SS31에서 가장 높은 농도(1차에서 0.491 mg/l, 2차에서 0.428 mg/l, 3차에서 1.088 mg/l)가 검출되었다. 또한 이는 전자부품의 세척제 사용되는 TCE로부터 유래하

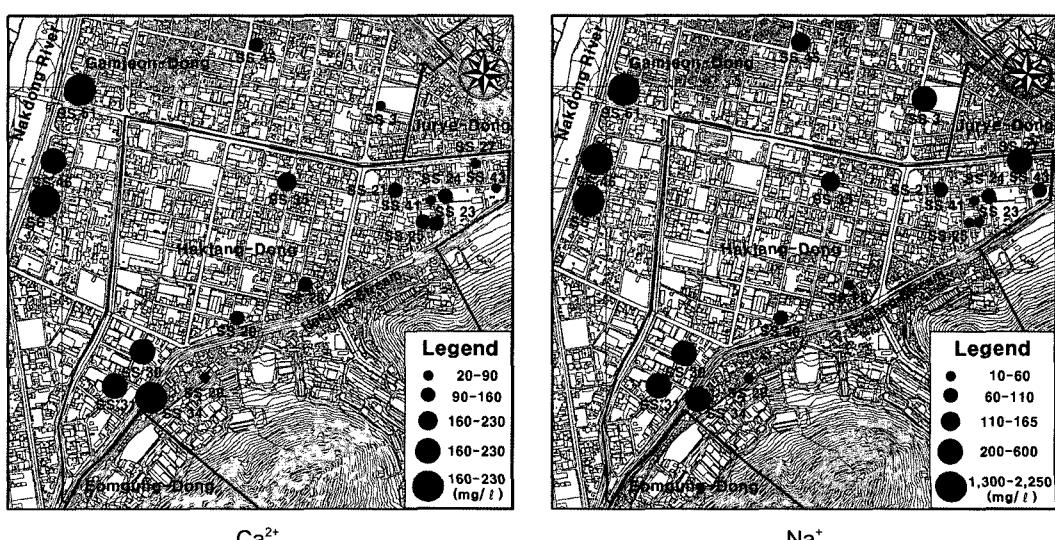


Fig. 7. Spacial distribution of Ca^{2+} , Na^+ , SiO_2 , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , PCE and TCE concentrations.

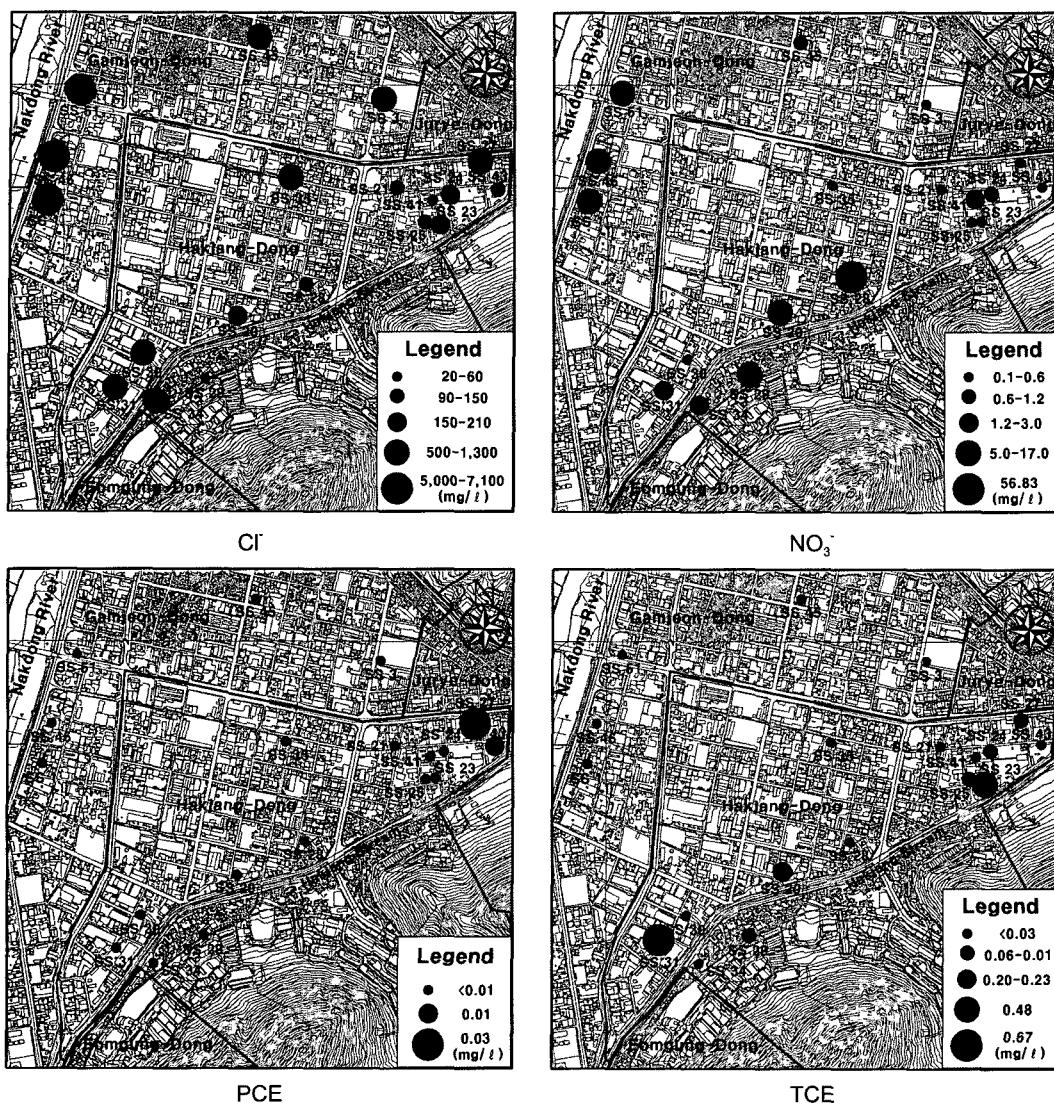


Fig. 7. Continued.

는 것으로 판단된다. 따라서 유기오염물질인 PCE와 TCE는 그 오염원이 발생하는 지역에서 국지적으로 나타남을 알 수 있다. 이에 비하여 무기오염물은 그 오염범위가 비교적 광범위하다.

군집분석과 성분의 공간적 분포로 볼 때, 낙동강변과 같이 해안퇴적층 분포 지역에서 염수의 영향을 받은 지역에서는 Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , K^+ , Mg^{2+} 의 농도가 높게 나타남을 알 수 있다. 그리고 학장천의 하류에서는 염수의 영향과 인위적인 오염의 영향을 동시에 받고 있으며, 그 외 지역에서는 인위적인 오염의 영향이 우세함을 알 수 있다.

8. 결 론

부산광역시 사상공단의 19개의 지하수공에 대하여 2001년 9월부터 2003년 8월까지 3차례 결친 수질분석에 의하면, 이 지역 지하수는 염수의 영향을 받고 있는 것으로 나타난다. 이는 본 연구지역이 해안퇴적층 분포지역이므로 퇴적층 내의 염분이 서서히 지하수에 용해되고 있기 때문으로 해석된다. SiO_2 는 일반적으로 물-광물반응에서 유래하지만, 본 공업지역에서는 상당 량이 콘크리트의 부식에서도 유래하는 것으로 사료된다. 지하수 수질유형은 Ca-Cl형이 우세하고, Na-Cl형이

일부 나타난다. Ca-Cl형은 염수와 퇴적층의 양이온교환반응과 아울러서 해안퇴적층에서 유래하는 굴껍질과 조개껍질 등의 영향을 반영한다.

유기오염물질인 PCA, TCE, PCE의 분석결과, 18개 조사공 중 12곳에서 TCE가 검출되고 있으며, 그 중 2/3이 먹는물 기준치를 초과하고 있다. 그러나, PCE는 3곳에서만 검출되었으며 먹는물 기준치(0.01 mg/l)이하였다. TCA는 3곳에서만 검출되었으며 역시 먹는물 기준치(0.1 mg/l)이하였다. 따라서 사상공단과 같은 공업 지역에서 TCE의 오염원을 중심으로 지층의 발달상태에 따라서는 지하수를 광범위하게 오염시킬 수 있음을 알 수 있다.

염분농도와 Cl^- , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} 간의 상관성은 비교적 높으며, 이는 이들 이온들이 염수의 영향을 받고 있음을 지시한다. NO_3^- 와 Na^+ , Cl^- , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} 간에는 거의 상관성이 없거나 음의 상관성을 보여주고 있다. 이는 생활하수에 의한 영향은 미미하다는 것을 의미한다.

요인분석에 의하면, 요인 1에 높은 양(positive)의 적재율을 보이는 pH, TDS, 염분농도, Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Al^{3+} , As^{3+} , Cl^- , Fe^{2+} 는 염수의 영향을 대변하는 것으로 설명된다. 요인 2에 높은 양의 적재율을 보이는 수온, EC, SiO_2 , HCO_3^- 는 자연적인 영향과 인위적인 영향을 동시에 내포하고 있는 것으로 해석된다. 요인 2에 음의 적재율을 보이는 SO_4^{2-} 는 염수의 영향과 인위적인 영향을 동시에 받고 있는 것으로 설명할 수 있다. 요인 3에 높은 양의 적재율을 보이는 성분은 NO_3^- 와 Zn^{2+} 로서 NO_3^- 는 주로 생활하수 등에서 유래하고, Zn^{2+} 은 지하수공의 케이싱이나 압상파이프의 부식에서 유래하는 것으로 보인다.

군집분석과 성분의 공간적 분포로 볼 때, 낙동강변과 같이 해안퇴적층 분포 지역에서 염수의 영향을 받은 지역에서는 Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , K^+ , Mg^{2+} 의 농도가 높게 나타난다. 그리고 학장천의 하류에서는 염수의 영향과 인위적인 오염의 영향을 동시에 받고 있으며, 그 외 지역에서는 인위적인 오염의 영향이 우세함을 알 수 있다.

사 사

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드린다.

참고문헌

- 건설교통부, 한국수자원공사 (2003) 부산지역 지하수 기초 조사. p. 10-23.
- 김남진, 윤성택, 김형수, 정경문, 김규범 (2001) 지구통계 기법을 활용한 울진 지역 천부 지하수의 수질 및 수리 지구화학 특성 해석. 자원환경지질, 34(2), p. 175-192.
- 김동학, 황제하, 박기화, 송교영 (1998) 부산 지질도록 설명서. 과학기술부, 62p.
- 김윤영, 이강근, 정상용, 권해우 (1997) 부산 석대 폐기물 매립지 및 그 주변의 지하수 수리시스템 분석. 지하수 환경, 4(4), p. 191-198.
- 박석기, 안승구, 임석원 (1996) 해설 먹는물의 수질관리- 약수, 생수, 먹는물 및 먹는샘물. 도서출판 동화기술, 228p.
- 성익환, 조병욱, 이병대, 지세정, 류충렬, 김통권, 윤숙, 이봉주, 임현철, 이종철, 이병태, 김경구, 성기성, 이인호, 추창오, 김정숙, 김문수, 최경국, 함세영, 최광선, 김인수, 조명희, 심형수, 원지훈, 정상용, 박희영, 강동환, 심병완, 김병우 (1999) 지하수 오염방지 및 음용화 기술 연구(부산지역). 한국자원연구소, 541p.
- 세창지질콘설판트 (1990) 지질조사보고서.
- 심형수, 함세영, 성익환, 이병대, 조병욱, 황진연 (2000) 부산 해운대지역 지하수와 지열수의 수리화학적 특성. 한국환경과학회지, 9권, p. 241-252.
- 이병선, 우남칠 (2003) 수자원의 수질과 오염에 대한 기반 암의 영향 연구: 통계학적 접근. 자원환경지질, 36권, p. 415-429.
- 이효민, 황진연, 진치섭 (2003) 해안지역 콘크리트의 성능 저하 현상과 이에 수반되는 이차광물의 형성 특징. 자원환경지질, 36권, p. 365-374.
- 정상용, 강동환, 박희영, 심병완 (2000) 부산지역 지하수 오염현황 분석을 위한 지구통계 기법의 응용. 지질공학, 10권, p. 247-261.
- 정상용, 권해우, 이강근, 김윤영 (1997) 부산 석대 폐기물 매립지 일원의 수질 환경. 지하수환경, 4권, p. 175-184.
- 한정상 (1998) 지하수환경과 오염. 박영사, 1071p.
- 함세영, 조명희, 성익환, 김정숙, 이병대, 조병욱, 한석종 (1999) 부산 북서부 화강암지역 지하수의 화학적 특성. 수처리기술, 7권, p. 57-68.
- 함세영, 조명희, 황진연, 진치섭, 성익환, 이병대 (2000) 부산 금정산-백양산 일대 용천수, 지하수 및 지열수의 지화학적 특성. 한국환경과학회지, 9권, p. 229-239.
- Appelo, C.A.J. and Postma, D. (1999) Geochemistry, groundwater and pollution. A.A. Balkema, Rotterdam, 535p.
- Appleyard, S. (1995) The impact of urban development on recharge and groundwater quality in a coastal aquifer near Perth, Western Australia. Hydrogeology J., v. 3, p. 65-75.
- Boggs, S., Jr. (2001) Principles of sedimentology and stratigraphy. 3rd ed., Prentice Hall, 726p.
- Bruce, B.W. and McMahon, P.B. (1996) Shallow groundwater quality beneath a major urban center: Denver, Colorado, USA. J. Hydrology, v. 186, p. 129-151.
- Cho, B.-W. (2001) Hydrogeological Characteristics of the Groundwater Resources in the Busan Area, Korea. Thesis of Ph.D., Kyungbook National University, 164p.
- Clark, I. and Fritz, P. (1997) Environmental isotopes in hydrology. Lewis Publishers, 328p.

- Colby, N.D. (1993) The use of 2-way cluster analysis as a tool for delineating trends in hydrogeologic units and development of a conceptual model. In International Ground Water Modeling Center (IGWMC), Proceedings of the 1993 Ground Water Modeling Conference, Golden, Colorado, p. 91-100.
- Collin, M.L. and Melloul, A.J. (2003) Assessing groundwater vulnerability to pollution to promote sustainable urban and rural development. *J. Cleaner Production*, v. 11, p. 727-736.
- Davis, J.C. (2002) Statistics and data analysis in geology. 3rd ed., John Wiley & Sons, 638p.
- Davis, S.N. and DeWiest, R.J.M. (1991) Hydrogeology. 2nd ed., Krieger Publishing Co., 476p.
- Eby, G.N. (2004) Principles of environmental chemistry. Brooks/Cole-Thomson Learning, Pacific Grove, CA, 514p.
- Greenberg, A.E, Clesceri, L.S., and Eaton, A.D. (1992) Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th ed., American Public Health Association, 1010p.
- Hem, J.D. (1985) Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. U.S. Geological Survey water-supply paper 2254, 263p.
- Hong, Y.-S. and Rosen, M.R. (2001) Intelligent characterisation and diagnosis of the groundwater quality in an urban fractured-rock aquifer using an artificial neural network. *Urban Water*. v. 3, p. 193-204.
- Jeong, C.H. (2001) Effect of land use and urbanization on hydrochemistry and contamination of groundwater from Taejon area, Korea. *J. Hydrology*, v. 253, p. 194-210.
- Jöreskog, K.G., Klovan, J.E., and Reymert, R.A. (1976) Geological factor analysis. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. Oxford, New York, 178p.
- Keller, E.A. (2000) Environmental geology. 8th ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 562p.
- Lawrence, F.W. and Upchurch, S.B. (1982) Identification of recharge area using geochemical factor analysis. *Ground Water*, v. 20, p. 680-687.
- McCall, G.J.H., Mulder, E.F.J., and Marker, B.R. (1996) Urban geoscience. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 273p.
- Nordstrom, D.K., Ball, J.W., Donahoe, R.J., and Whittemore, D. (1989) Groundwater chemistry and water-rock interactions at Stripa. *Geochim. Cosmochim. Acta*. v. 53, p. 1727-1740.
- Saether, O.M. and De Caritat, P. (1997) Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 400p.
- SAS (1995) Version 9.1, SAS Institute Inc., Cary, North Carolina.
- Suk, H. and Lee, K.-K. (1999) Characterization of a ground water hydrochemical system through multivariate analysis: clustering into ground water zones. *Ground Water*, v. 37, p. 358-366.
- Todd, D.K. and Mays, L.W. (2005) Groundwater hydrology. 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., 636p.
- van der Leeden, F., Troise, F.L., and Todd, D.K. (1990) The water encyclopedia. 2nd ed., Lewis Publishers, 808p.

2006년 7월 7일 원고접수, 2006년 11월 7일 게재승인.