

부산지역의 토지이용에 따른 지하수 수질 특성

함 세 영(Se-Yeong Hamm)
 김 광 성(Kwang Seong Kim)
 류 상 민(Sang Min Ryu)
 정 재 열(Jae-Yeol Cheong)
 이 병 대(Byong Dae Lee)

부산대학교 지구환경시스템과학부
 부산대학교 지질학과
 부산대학교 지질학과
 부산대학교 지질학과
 한국자원연구소 환경지질연구부

1. 서론

우리나라에서는 1990년대부터 급증하고 있는 암반지하수의 개발과 함께 도시지역의 지하수 수위하강 및 수질오염문제가 점점 심각해지고 있으며 산업시설, 생활하수, 정화조, 주유소 등 각종 오염원으로부터 유래하는 중금속 및 유기오염물에 의한 오염 취약성은 점점 더 심각해지고 있다. 특히 도시지역에서는 토지용도(공장지역, 주거 및 상업지역, 농업지역, 녹지지역)에 따라 지하수 특징적인 오염물질이 나타나고 있다. 브라질의 Natal시 주거지역에서는 지하수의 주된 오염물질이 가정 하수로부터 유래하는 질산성 질소로 보고되고 있다(Melo and Queiroz, 2001). 우리나라에서도 서울시 지하수 수질의 공간적 분포 특성 연구(유순영 외, 2001)에 의하면 질산성 질소의 함량이 주거지역과 농업지역에서 높게 나타났다. 수원지역의 플라스틱 공장, 지하저장 탱크, 금속공장 주변지역의 토양과 지하수에 대해서 수행된 NAPL 오염 연구 결과에 의하면, 아직은 지하수 오염의 영향이 작으며, 유기오염 물질이 기반암까지는 미치지 않고 있는 것으로 보고되었다(Jones et al., 1997).

본 연구는 부산지역에 대하여 토지용도에 따른 지하수 오염의 양상을 파악하는 것이다. 연구를 위하여 부산지역내 공장지역, 주거 및 상업지역, 농업지역, 녹지지역을 택하여 각각 약 20개의 지하수공에 대하여 현장 수질을 측정하고 시료를 채취하여 실내 수질분석을 실시하였다. 현장 수질 측정항목은 수온, pH, EC(전기전도도), TDS(총고용물질), 염분농도, Eh(산화-환원전위), DO(용존산소), 알칼리도였다. pH는 휴대용 pH meter(Orion Model 250A), 수온은 디지털온도계(Sato Model SM-1250MC), EC와 TDS는 휴대용 EC meter(Orion Model 115), DO는 휴대용 DO meter(Orion Model 810)를 사용하였다. 알칼리도는 메틸오렌지와 페놀프탈레인을 이용한 산-중화 적정법을 이용하여 분석하였다. 실내분석용 시료는 먼저 0.45 μ m 여과지로 여과하였으며 양이온 분석을 위한 시료는 pH를 2~3으로 유지시키기 위해서 농질산으로 산처리하였다. 그리고 시료를 실험실까지 운반할 때는 아이스박스를 사용하여 4 $^{\circ}$ C로 냉장하였다. 실내분석 중 무기성분은 한국기초과학지원연구원 부산분소에 의

회하여 양이온(K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Si^{2+})은 원자방출분광분석기(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer, 미국 Thermo Jarrell Ash사 모델 ICP-IRIS) 그리고 음이온(F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})은 IC(미국 Dinex사 DX-500)를 사용하여 분석하였다. 또한 TCE, PCE, TCA 와 농약성분인 파라티온, 말라티온, 다이아지논, 페니트로치온은 부산광역시 보건환경연구원에 의뢰하여 분석하였으며 농약 성분은 농업지역에서만 분석하였다.

분석된 시료의 정확성을 검토하기 위해서 전기적인 중성도를 계산하였다(Appelo and Postma, 1999):

$$\text{전기적인 중성도 (E. N. \%)} = (\text{양이온 총량} + \text{음이온 총량}) / (\text{양이온 총량} - \text{음이온 총량}) \times 100$$

여기서, 양이온(K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})과 음이온(HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-)은 meq/l로 나타낸다. E. N. 값이 5%이내에 들면 분석값의 신뢰성이 있는 것으로 간주된다(Appelo and Postma, 1999). 그러나, 본 연구에서는 분석값의 대부분이 E. N. 값 10%이내에는 들므로 10%를 기준으로 분석값 중에서 E. N. 값이 10%를 넘어서는 것은 자료 해석에서 제외하였다.

2. 토지용도별 수질

2.1 공업지역

부산광역시의 공업지역인 사상구 학장동 및 감전동지역의 심도 10~200m의 19개의 지하수공(SS1, SS3, SS20, SS21, SS23, SS24, SS25, SS27, SS28, SS29, SS30, SS31, SS34, SS35, SS41, SS43, SS45, SS46, SS51)에 대하여 현장 수질을 측정하고 시료를 채취하여 실내 수질분석을 실시하였다. 지하수 조사기간은 2001년 9월 26일부터 2001년 10월 18일까지이다. 현장 수질 측정항목은 수온, pH, EC, TDS, 염분농도, Eh, DO, 알칼리도였다. 그리고 양이온(K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Si^{2+}), 음이온(F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}), TCE, PCE, TCA는 실험실에서 분석하였다.

실내 수질분석 결과, SS45와 SS46은 전기적인 중성도 10%를 벗어나므로 제외하고 나머지 17개 시료를 이용하여 통계분석을 실시하였다. pH는 6.06~7.71이며 평균값은 6.81로서 약 산성을 나타내고 있다. 따라서, 모든 시료가 먹는 물 수질기준 (pH 5.8~8.5)에 속한다. EC는 225~19800 μ S/cm 이며, 평균값은 1869 μ S/cm로서 일반적인 지하수보다 높으며, 이는 이 지역이 낙동강 하구에 인접하여 있어서 해수의 영향을 간접적으로 받고 있기 때문으로 판단된다. 지하수의 온도는 17.0 $^{\circ}$ C~21.4 $^{\circ}$ C의 범위(평균 18.11 $^{\circ}$ C)로서 기온의 영향을 일부 받고 있는 것으로 보인다.

Ca²⁺ 이온의 농도는 26.07~479.9mg/ℓ (평균 184.3mg/ℓ)로서 인위적인 오염의 가능성을 암시한다. Mg²⁺ 이온의 함량은 6.31~293.9mg/ℓ (평균 54.65mg/ℓ)로서, 높은 농도를 보이는 SS1, SS51과 같은 시료는 해수 또는 염수와 관련성을 가지는 것으로 추정된다. Na⁺ 이온의 농도는 13.39~2866mg/ℓ (평균 452.8mg/ℓ)로서 역시 Mg⁺ 이온과 마찬가지로 SS1, SS51과 같은 일부 시료는 해수 또는 염수와 관련성을 가지는 것으로 추정된다. K⁺ 이온의 농도는 1.34~76.73mg/ℓ (평균 17.15mg/ℓ)로서 높은 농도를 나타내는 SS1, SS51은 해수 또는 염수와 관련성을 가지는 것으로 추정된다.

HCO₃⁻ 함량은 81.46~652.91mg/ℓ (평균 278.3mg/ℓ)로서 다른 지역(농업지역, 주거·상업지역, 녹지지역)에 비해서 높다. Cl⁻ 이온의 함량은 15.3~6654mg/ℓ (평균 1050.7mg/ℓ)의 범위로서 지점에 따라서는 높은 값을 보인다. 이는 이 지역이 현재 바다와 인접하고 있으며 과거 바다였던 지역을 매립한 지역이기 때문으로 판단된다. SO₄²⁻ 이온 함량은 16.0~354.0mg/ℓ (평균 106.1mg/ℓ)이며, SS1에서만 먹는물 기준치(200mg/ℓ 이하)를 초과하고 있다. F⁻의 농도는 0~1.2mg/ℓ (평균값 0.19mg/ℓ)로서 모든 시료가 먹는물 기준치(1.5mg/ℓ 이하)이내에 있다.

인위적인 오염의 지시자로 널리 쓰이는 NO₃⁻의 농도 범위는 0.1~58.3mg/ℓ (평균 5.15mg/ℓ)로서 대부분의 지점에서는 1mg/ℓ로 낮게 나왔으나, SS28 한 지점에서만 먹는물 기준치(44.26mg/ℓ 이하, 질산성 질소로 환산하면 10mg/ℓ 이하)를 초과하는 58.3mg/ℓ가 검출되었다. 일반적으로 NO₃⁻는 공장배출수, 생활하수, 동물 배설물, 축산 폐수, 비료 등에서 유래되며, 이 지역은 농촌지역이 아니므로 주변의 생활하수 또는 공장배출수로부터 유래하는 것으로 판단된다.

Fe²⁺의 농도(0~5.127mg/ℓ, 평균 0.45mg/ℓ)는 대부분이 먹는물 기준치인 0.3mg/ℓ 이하로 나타나지만, SS35와 SS51에서 먹는물 기준치를 10배 정도 초과하고 있다. Zn²⁺의 경우에는 0.01~1.45mg/ℓ (평균 0.21mg/ℓ)로서 SS28의 1.45mg/ℓ를 제외하고는 먹는물 기준치(1mg/ℓ 이하)이내에 있다. 한편, Cu²⁺의 농도범위는 0~0.013mg/ℓ (평균 0.006mg/ℓ)로서 먹는물 기준치(1mg/ℓ 이하)이내에 있다.

TCE는 대부분의 시료에서 검출되었으며, PCE와 TCA는 일부 시료에서 검출되었다. TCA의 경우는 먹는물 기준치인 0.1mg/ℓ를 초과하는 시료가 없었다(Table 1). 그러나, TCE의 경우에는 검출된 대부분의 시료에서 먹는물 기준치인 0.03mg/ℓ를 초과하고 있다. 따라서, 이 지역은 TCE에 의해서 비교적 오염되어 있으며, 세심한 감시가 필요하다는 것을 지시한다.

2.2 농업지역

부산광역시 농업지역은 낙동강 좌측의 강서구와 북부에 위치하는 기장군 지역이다. 본

연구에서는 기장군 일광면 칠암리, 문중리, 문동리 일대의 경작지에 관개용으로 개발된 지하수공 중에서 18개공(GJ1~GJ18)에 대하여 현장조사를 실시하였다. 현장 수질 측정항목은 공장지역의 경우와 같고, 그 외 양이온, 음이온, TCE, PCE, TCA와 농약 성분인 파라티온, 말라티온, 다이아지논, 페니트로치온은 실내분석하였다. 지하수 조사기간은 2001년 8월 28일부터 9월 1일까지이다.

실내 수질분석 결과, GJ1, GJ12, GJ13은 전기적 중성도 5%를 벗어나므로 제외하고 나머지 15개 시료를 이용하여 통계분석을 실시하였다. pH의 범위는 5.7~6.82(평균값 6.25)이다. 먹는 물 수질기준 (pH 5.8~8.5)과 비교하면, GJ16만이 5.7로서 기준치보다 낮게 나타난다. EC의 범위는 240~1059 μ S/cm(평균 712 μ S/cm)로서 비교적 지하수 오염도가 높다는 것을 간접적으로 지시하고 있다.

Ca²⁺이온(농도 27.14~132.6mg/l, 평균 77.54mg/l)과 Mg²⁺이온(농도 5.4~24.05mg/l, 평균 15.94mg/l)은 비료에 의한 오염을 암시한다. Na⁺이온의 농도는 13.79~66.23mg/l(평균 35.35mg/l)로서 비료 등에 의한 오염의 영향을 받았음을 암시한다. K⁺이온의 농도는 0.61~3.84mg/l(평균 1.74mg/l)로 다른 주요 양이온보다 낮다.

HCO₃⁻ 농도는 43.32~234.9mg/l(평균 102.5mg/l)로서 공업지역인 사상구보다 낮다. Cl⁻의 농도는 15.2~132.1mg/l(평균 45.63mg/l)의 범위를 보이고 있으며, 이 지역이 바다에서 불과 150~200m 정도밖에 떨어져 있지 않으나 해수의 영향을 받고 있지 않는 것으로 판단된다. 농업지역에서 Cl⁻이온의 인위적인 오염원은 생활하수, 축산폐수, 동물의 배설물 등으로 만약 Cl⁻이온이 오염원으로부터 유래한다면 이들로부터 유래할 것이다. SO₄²⁻이온 함량은 6.55~56.7mg/l(평균 29.51mg/l)이며, 모든 시료가 먹는물 기준치(200mg/l) 이내에 있다. F⁻의 농도는 0.03~0.31mg/l(평균값 0.10mg/l)로서 모든 시료가 먹는물 기준치(1.5mg/l 이하) 이내에 있다.

인위적인 오염의 지시자로 널리 쓰이는 NO₃⁻의 농도 범위는 9.03~360.9mg/l(평균 178.2mg/l)로서 대부분의 지점에서 먹는물 기준치(44.26mg/l 이하, 질산성 질소는 10mg/l 이하)를 초과하여 검출되었다. 이 지역은 농촌지역이므로 생활하수, 동물 배설물, 축산 폐수, 비료 등으로부터 NO₃⁻가 유래하는 것으로 판단된다.

Fe²⁺, Zn²⁺은 어떤 시료에서도 검출되지 않았으며, Cu²⁺의 농도범위는 0~0.035mg/l(평균 0.004mg/l)로서 모든 시료에서 먹는물 기준치(1mg/l 이하)이내에 있다.

성분에 따라 양의 왜도와 음의 왜도를 보이고, 첨도는 과반수 이상의 성분이 음의 값을 보인다. 음의 첨도는 정규분포보다 완만함을 나타낸다. 성분들 중에서 비교적 정규분포에 가까운 것은 Na⁺이다. 따라서, 기장군 농업지역 시료의 성분은 대체로 정규분포와는 다른 분포 양상을 보인다.

본 농업지역에서는 농약성분인 다이아지논, 파라티온, 말라티온, 페니트로치온을 포함시켜

분석하였으나, 한군데에서도 검출되지 않았다. TCE와 PCE는 GJ14에서만 각각 0.006mg/ℓ와 0.002mg/ℓ가 검출되었고 나머지 시료에서는 TCE, PCE, TCA가 전혀 검출되지 않았다.

2.3 주거·상업지역

부산광역시 중에서 주거·상업지역으로서 금정구 부곡동, 장전동, 동래구 온천동에 대해서 이들 지역에 분포하는 지하수공 중에서 16개공(KD5, 6, 7, 9, 76, 77, 79, 80, 94, 96, 97, 112, 117, 125, 128, 135)에 대해 현장 수질분석과 실내분석용 시료를 채취하였다. 지하수 조사는 2001년 10월 25일부터 11월 7일까지 실시하였다. 지하수의 시료 번호는 금정구의 머리글자 KD와 일련번호로서 기재하였다. 주거지역과 상업지역을 따로 구분하지 않은 이유는 이들 지역이 대부분 공존하고 있으며, 배출되는 오염물질도 큰 차이가 없다고 판단하였기 때문이다.

실내 수질분석 결과, KD6와 KD94는 전기적인 중성도 10%를 벗어나므로 제외하고 나머지 14개 시료를 이용하여 통계분석을 실시하였다. pH의 범위는 5.05~6.50(평균 5.89)로서 KD5, KD79, KD125, KD128에서 먹는물 수질기준(pH 5.8~8.5)보다 낮게 나타나며, 이 지역의 지하수가 상당히 산성화되어 있음을 지시한다. EC의 범위는 114~716 μ S/cm(평균 210 μ S/cm)로서 비교적 지하수 오염도가 높다는 것을 간접적으로 지시하고 있다.

Ca²⁺이온의 함량은 7.42~66.20mg/ℓ(평균 40.99mg/ℓ)로서 물-광물 반응과 인위적인 오염을 암시한다. Mg²⁺이온의 함량은 1.12~18.01mg/ℓ(평균 9.72mg/ℓ)이다. Na⁺이온의 농도는 12.54~46.70mg/ℓ(평균 24.60mg/ℓ)이다. K⁺이온의 농도는 0.92~3.13mg/ℓ(평균 1.86mg/ℓ)로 다른 주요 양이온보다 낮다.

HCO₃⁻ 농도는 60.71~162.0mg/ℓ(평균 110.1mg/ℓ)이다. Cl⁻의 농도는 5.83~76.7mg/ℓ(평균 47.22mg/ℓ)의 범위를 보이고 있으며, 먹는물 기준치(150mg/l)와 비교할 때 인위적인 오염은 크지 않은 것으로 추정된다. SO₄²⁻ 이온의 농도는 1.5~115.5mg/ℓ(평균 41.26mg/ℓ)이며, 모든 시료가 먹는물 기준치(200mg/ℓ) 이내에 있다. F⁻의 농도는 0.01~0.86mg/ℓ(평균값 0.20mg/ℓ)으로서 역시 모든 시료가 먹는물 기준치(1.5mg/ℓ 이하) 이내에 있다.

인위적인 오염의 지시자로 널리 쓰이는 NO₃⁻의 농도 범위는 2.5~94.83mg/ℓ(평균 29.62mg/ℓ)로서 4군데(KD5, 9, 97, 112)에서 먹는물 기준치를 초과하여 검출되었다. 이 지역은 주거·상업지역이므로 주로 생활하수로부터 NO₃⁻가 유래하는 것으로 판단된다.

Fe²⁺은 어떤 시료에서도 검출되지 않았으며, Zn²⁺의 농도범위는 0.009~0.621mg/ℓ(평균 0.110mg/ℓ), Cu²⁺의 농도범위는 0~0.013mg/ℓ(평균 0.006mg/ℓ)로서 모든 시료가 먹는물 기준치(1mg/ℓ 이하) 이내에 있다.

TCE, PCE, TCA는 모든 시료에서 불검출되었다. 이는 이 지역이 현재까지는 유기오염 물질에 의해서 거의 오염되지 않았음을 지시한다.

2.4 녹지지역

본 연구에서는 인위적인 오염의 영향을 비교적 덜 받고, 자연 상태의 지질학적 환경을 대표할 수 있다고 판단되는 금정산, 백양산일대를 녹지지역으로 선정하였으며, 이들 지역에 분포하는 용천수 22개소(S1, S5, S9, S10, S14, S17, S23, S24, S27, S28, S32, S34, S36, S37, S44, S50, S52, S57, S61, S63, S65, S68)에서 현장 수질분석과 실내분석용 시료를 채취하였다. 조사는 2001년 4월 11일부터 5월 13일까지 실시하였다. 용천수의 시료 번호는 Spring 머리글자 S와 일련번호로서 기재하였다.

실내수질분석은 공업지역, 농업지역, 주거·상업지역과는 달리 TCE, PCE, TCA는 분석하지 않았다. 그 이유는 녹지지역에는 유기오염물질을 발생시킬 수 있는 분포하지 않기 때문이다. 실내 수질분석 결과, S9, S17, S23, S57, S65는 E. N. 10%를 벗어나므로 제외하고 나머지 17개 시료를 이용하여 통계분석을 실시하였다.

본 연구지역 용천수의 pH는 5.59~7.05(평균 6.41)로서 대부분 산성을 나타내고 있다. 그러나, S68을 제외하고는 먹는물 수질기준 (pH 5.8~8.5)에 적합하다. EC는 40.02~197.2 μ S/cm이다. EC는 지하수의 유동경로 및 지하 체류시간이 길어질수록 커진다. 용천수의 온도는 9.2~15.6 $^{\circ}$ C의 범위를 보이며 이는 기온의 영향을 받고 있는 것으로 보인다.

Ca²⁺이온함량은 0.01~13.18mg/l(평균 5.21mg/l)로서 물-광물 반응이 많이 진행되지 않았음을 암시한다. Mg²⁺이온의 함량은 0.41~5.46mg/l(평균 1.96mg/l)이다. 이렇듯 본 지역에서는 Mg²⁺이온의 함량이 대부분 낮으며, 이는 본 지역의 화강암을 구성하는 광물에서 유래한 것으로 보인다. Na⁺이온의 농도는 3.41~15.68mg/l로서 전기전도도나 염분의 함량이 일반적인 지하수의 수준을 보이므로 역시 물-광물반응으로부터 유래하는 것으로 판단된다. K⁺이온의 농도는 0.17~1.12mg/l로 다른 주요 양이온보다 낮다. 본 연구지역은 녹지지역이므로 인위적인 오염의 영향은 받지 않은 것으로 보이며 물-광물반응으로부터 유래하는 것으로 보인다.

본 지역내 용천수의 Cl⁻함량은 1.13~3.0mg/l(평균 1.82mg/l)로서 물-광물반응의 결과일 가능성이 크다. HCO₃⁻함량은 12.2~76.28mg/l(평균 38.39mg/l)이다. SO₄²⁻이온의 함량은 0.46~5.12mg/l로서 주로 조암광물의 용해로부터 유래하며, 인위적인 오염의 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

일반적으로 오염원의 지시자인 NO₃⁻ 농도는 0.04~18.52mg/l(평균 3.10mg/l)로서, 모든 시료에서 먹는물 기준치이내에 있다. 따라서, 녹지지역인 금정산, 백양산일대는 현재까지는 인위적인 오염에 대한 노출 정도가 낮다고 판단된다.

SiO₂농도 범위는 9.03~32.67mg/l로서 물-암석 반응으로부터 유래하는 것으로 판단된다. F⁻의 농도는 0~0.26mg/l(평균 0.05mg/l)로서 모든 시료가 먹는물 기준치(1.5mg/l 이하)이내에 있다.

중금속 이온(Fe^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+})은 거의 검출되지 않았으며, 모든 시료가 먹는물 기준치(Fe^{2+} 는 $0.3\text{mg}/\ell$, Zn^{2+} 와 Cu^{2+} 는 $1\text{mg}/\ell$)에 적합하다.

3. 토지용도별 수질 특성 비교

공업지역, 농업지역, 주거·상업지역, 녹지지역들 간의 수질 특성을 서로 비교하기 위하여, 각 성분들의 최대값, 최소값, 중앙값, 1사분위값, 3사분위값을 Box-Whisker Plot를 도시하였다(Fig. 1). 가장 위와 아래선은 각각 최대값과 최소값이고, 사각형의 윗변과 아랫변은 각각 3사분위값과 1사분위값을 나타낸다. 그리고, 사각형의 내부에 있는 선은 중앙값을 표시하고 있다. Ca, Mg, Na은 공업지역, 농업지역, 주거·상업지역, 녹지지역의 순으로 감소하는 경향성을 보이고 있다. 따라서, 이들 성분의 일부분은 공장 배출수, 비료 등의 오염에서 유래하는 것으로 볼 수 있다.

한편, K, Cl, HCO_3 , SO_4 , Cu는 공업지역, 주거·상업지역, 농업지역, 녹지지역의 순으로 감소하고 있다. 따라서, 이들 성분이 오염에서 유래한다면, 그 오염원이 Ca, Mg, Na와는 다를 수 있다는 것을 암시한다. 그러나, F와 SiO_2 는 주거·상업지역이 가장 높고, 공업지역, 농업지역, 녹지지역의 순으로 감소한다.

마지막으로, NO_3 는 농업지역이 가장 높고, 주거·상업지역, 공업지역, 녹지지역의 순으로 감소한다. 이는 비료의 영향이 가장 크고, 생활하수, 축산폐수 등의 영향이 그 다음으로 크다는 것을 지시한다.

토지용도별 수질형을 비교하기 위하여 Piper 다이어그램에 시료를 도시하여 보았다(Fig. 2). 먼저 사상구 공업지역을 보면, Ca- Cl_2 형이 우세하다. 한편, 기장군 농업지역에서는 Ca- Cl_2 형과 Ca- HCO_3 형이 거의 절반씩을 차지하고 있다. 금정구, 동래구의 주거·상업지역에서도 Ca- Cl_2 형과 Ca- HCO_3 형이 거의 절반씩을 차지하고 있다. 따라서, 주거·상업지역과 농업지역은 주요성분의 수질형은 서로 비슷한 양상을 보인다. 마지막으로, 금정산, 백양산의 녹지지역에서는 Ca- HCO_3 형과 Na- HCO_3 형이 서로 비슷하게 나타나고 있다. 이것은 녹지지역이 오염의 영향을 비교적 덜 받으므로 자연상태의 수질을 보이는 것을 지시하는 것이다.

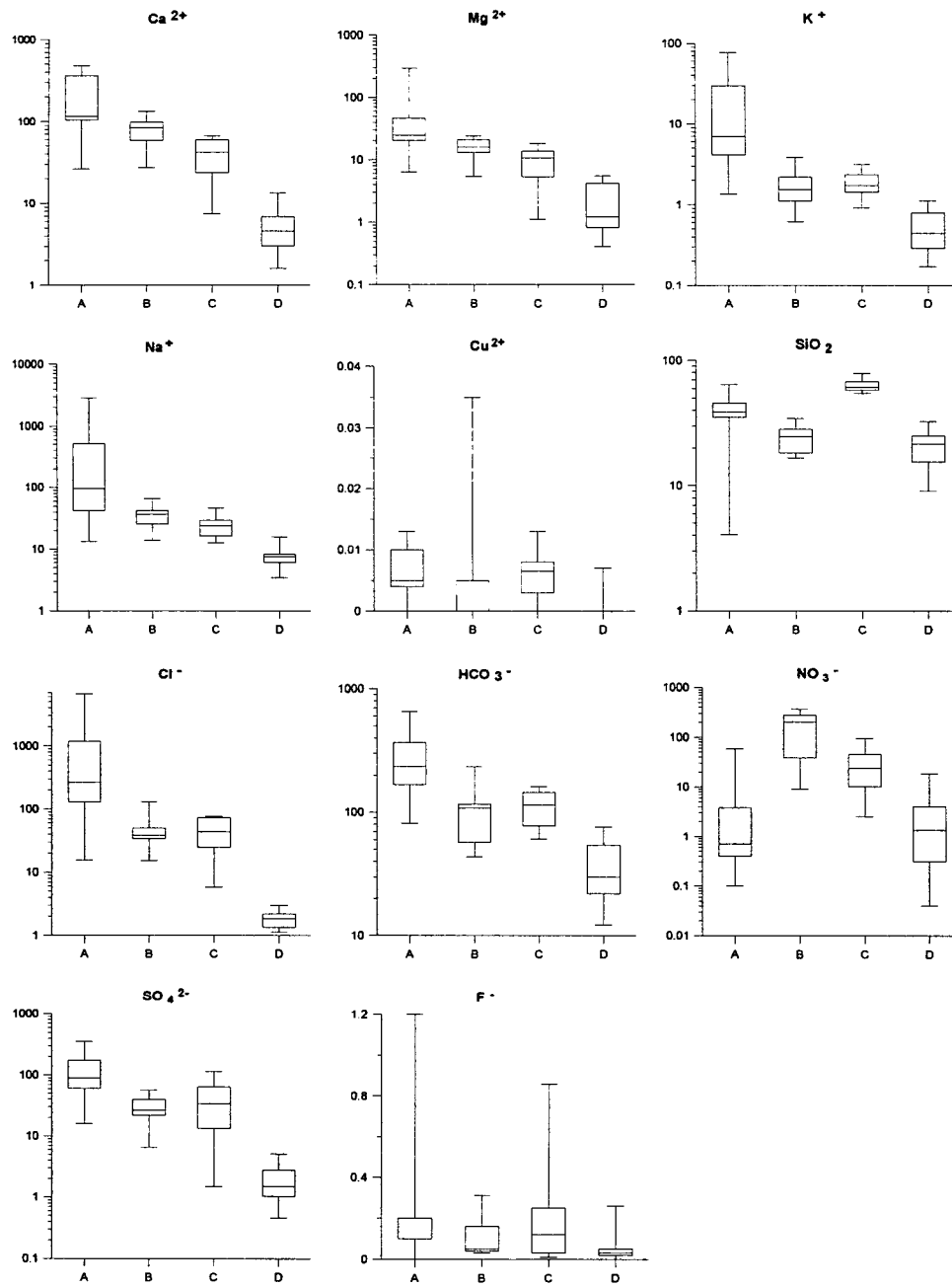


Fig. 1. Box-Whisker Plots from data (A: industrial area; B: agricultural area; C: residential/commercial area; D: green area).

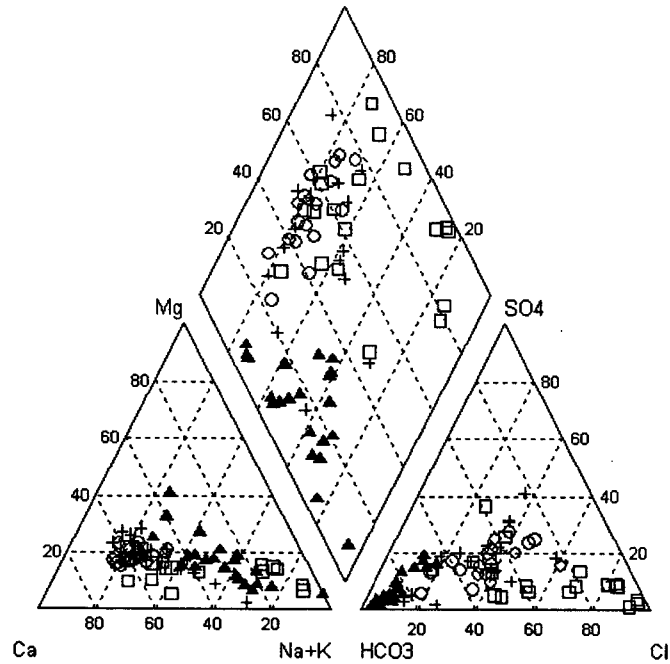


Fig. 2. Piper diagram of data (\square : industrial area, Sasang-Gu; \circ : agricultural area, Gijang-Gun; $+$: residential/commercial area, Geumjeong and Dongrae-Gu; \blacktriangle : green area, Geumjeong and Baekyang Mts.).

4. 결론

부산지역의 공업지역(사상구 확장동 및 감전동지역), 농업지역(기장군 일광면 칠암리, 문중리, 문동리 일대), 주거·상업지역(금정구 부곡동, 장전동, 동래구 온천동), 녹지지역(금정산, 백양산 일대)의 총 60개 시료에 대해서 현장 및 실내분석을 실시하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 공업지역에서는 일부 지역에서 Na, K, Mg는 해수와 연관성을 가지는 것으로 보인다. NO_3 은 한 지점을 제외하고는 먹는물 기준치 이하로 검출되었다. 한편, TCE는 대부분의 시료에서 검출되었으며, PCE와 TCA는 일부 시료에서 검출되었다.

2) 농업지역에서는 Ca, Mg, Na의 상당량이 비료로부터 유래함을 암시하고 있다. 또한, NO_3 은 대부분의 지점에서 먹는물 기준치를 초과하고 있다. TCE와 PCE는 한 지점에서만 먹는물 기준치이내로 검출되었으며, 농약성분인 다이아지논, 파라티온, 말라티온, 페니트로치온은 전혀 검출되지 않았다.

3) 주거·상업지역에서는 대부분의 지점에서 양이온과 음이온이 특별히 높은 농도를 보이지 않으며, 중금속의 농도도 높지 않다. TCE, PCE, TCA도 모든 시료에서 불검출되었다. 그러나, NO_3 은 모든 시료에서 검출되었으며, 4군데에서는 먹는물 기준치를 초과하였다.

4) 녹지지역에서는 양이온, 음이온의 농도가 모두 높지 않았으며, 중금속도 거의 검출되지 않았다. 한편, NO₃도 모든 시료에서 먹는물 기준치 이내로 검출되었다.

5) 토지용도에 따른 수질 특성을 비교하면, Ca, Mg, Na은 공업지역, 농업지역, 주거·상업지역, 녹지지역의 순으로 감소하는 경향성을 보이고 있다. 한편, K, Cl, HCO₃, SO₄, Cu는 공업지역, 주거·상업지역, 농업지역, 녹지지역의 순으로 감소하고 있다. 그러나, NO₃는 농업지역이 가장 높고, 주거·상업지역, 공업지역, 녹지지역의 순으로 감소한다.

6) 수질형을 보면, 공업지역은 Ca-Cl₂형이 우세하고, 농업지역과 주거·상업지역에서는 Ca-Cl₂형과 Ca-HCO₃형이 거의 절반씩을 차지하고 있다. 그러나, 녹지지역에서는 Ca-HCO₃형과 Na-HCO₃형이 거의 비슷하게 나타나고 있다.

사사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호:R02-2001-00249)지원으로 수행되었으며, 연구를 지원해주신 한국과학재단에 감사드립니다.

참고문헌

- 유순영, 윤성택, 소철섭, 채기탁, 이평구, 2001, 서울 대도시 지하수 수질의 공간적 변화 특성, 2001년 (사)한국지하수토양환경학회 추계학술발표회, 139-142.
- Appelo, C. A. J. and Postma, D., 1999, Geochemistry, groundwater and pollution, A.A. Balkema, Rotterdam, 535p.
- Jones, M. A., Puri, S., Kang, S. and Lee, S. H., 1997, Contamination in two urban industrial areas in South Korea, In Chilton, J. (ed.), Groundwater in the urban environment, Proceedings of the XXVII IAH congress on groundwater in the urban environment, Nottingham, UK, 21-27 September 1997.
- Melo, J. G. and Queiroz, M. A., 2001, The effects of urban development on the groundwater recharge and its quality in Natal, RN, Brazil, Proceedings of the XXXI International Association of Hydrogeologists Congress, Munich, Germany, 10-14 September 2001, 1233-1236.