

광주광역시 지하수의 수리지화학적 특성 연구

이인호^{1*} · 조병욱¹ · 이병대¹ · 성익환¹ · 임용수²

¹한국지질자원연구원 환경지질연구부, ²한국원자력안전기술원

Hydrogeochemical Characteristics of Groundwater in Kwangju City

In-Ho Lee^{1*} · Byung-Wook Cho¹ · Byeong-Dae Lee¹ · Ig-Hwan Sung¹ · Yong-Su Lim²

¹Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Environmental Geology Division

²Korea Institute of Nuclear Safety

ABSTRACT

To distinguish the anthropogenic inputs from the chemical weathering with water-rock interaction on the chemical compositions of groundwater in Kwangju city, four different water groups were established based on the landuse type, lithology and topology. The sample from greenbelt area belongs to Group I, whereas those from green buffer zone, urban area and industrial area belong to Group II, Group III and Group IV, respectively. The geology of this city mainly consists of biotite granite and granitic gneiss. The concentration of main cations is subject to the behavior of feldspars, micas and carbonate minerals. Cl^- and NO_3^- are supplied by anthropogenic inputs such as domestic sewage whose concentration of these anions is highest in the Group III samples. With the Piper diagram, the groundwaters of Group III are mainly plotted in $\text{CaSO}_4\text{-CaCl}_2$ type, whereas those of other groups are plotted in $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ type. The calculation for the activities of ions and saturation indices of some minerals shows that most of the minerals are undersaturated and plotted in the area of equilibrium with kaolinite. Three factors were extracted from the factor analysis for chemical data. Factor 1, controlled by

* Corresponding author : ihlee@kis.kigam.re.kr

원고접수일 : 2002. 2.25 게재승인일 : 2002. 7. 5

HCO_3^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Mg^{2+} and Na^+ , explains the dissolution of carbonate minerals, mica and plagioclase. Factor 2, controlled by Cl^- and NO_3^- , explains the influence of artificial pollution. Factor 3, controlled by Mn, Fe and Zn is subject to the industrial waste water, but the evidence is not clear. Factor 1 is dominant in the Group I and II, indicating that those samples are subjected to natural chemical weathering. The higher scores of factor 2 in the Group III samples indicate the potential artificial pollution.

Key Words : Groundwater, urban area, landuse, water-rock interaction, factor analysis

요 약 문

광주광역시에 분포하는 지하수의 수질을 인위적인 오염과 물-암석 반응에 의한 화학적 풍화의 결과로 구분하기 위하여, 토지이용현황, 지형 및 지질을 참고하여 본 역을 4개의 Group으로 구분하였다. Group I은 개발제한구역, Group II는 완충녹지, Group III는 기존시가지, Group IV은 공단지역을 포함한다. 연구지역의 본 역의 지질은 주로 흑운모화강암과 화강편마암으로 이루어져 있으며, 지하수 중 주 양이온 함량은 장석류, 운모류, 탄산염 광물의 지화학적 거동에 의해 결정된다. Cl^- 와 NO_3^- 은 인위적인 오염원에 의해 공급되며 Group III에서 가장 높게 나타난다. Piper diagram에 의하면 Group III은 CaSO_4 - CaCl_2 형에 우세하게 점시되고 나머지는 대부분 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형으로 나타난다. WATEQ4F를 이용하여 계산한 활동도와 광물의 포화지수에 의하면 광물들 대부분이 불포화 상태이며 상안정다이아그램에 의하면 모두 캐올리나이트 안정 영역에 점시된다. 요인분석 결과에 의하면 3개의 요인으로 추출 및 계산된다. HCO_3^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Na^+ 의 규제를 받는 요인 1은 탄산염 광물, 운모, 사장석의 용해로 설명되고, Cl^- , NO_3^- 의 규제를 받는 요인 2는 생활하수의 유입을 설명한다. Mn, Fe, Zn의 규제를 받는 요인 3은 공장폐수의 영향으로 추측된다. 요인 1은 Group I과 Group II에서 우세하므로 화학적 풍화의 영향을 받으며, Group III에서 높은 점수를 보이는 요인 2는 인위적인 오염원의 가능성을 지시한다.

주제어 : 지하수, 도시지역, 토지이용, 물-암석 반응, 요인분석

1. 서 언

최근 우리나라의 급속한 산업화에 따른 지표수의 오염 문제와 환경에 대한 대중들의 관심은 국내에 분포하는 지하수에 대한 관심을 증가시켰으며 대체 용수원으로서의 중요성도 지속적으로 부각되었다. 우리나라의 연간 지하수 이용 현황에 의하면 신고된 지하수공을 기준으로 97만 개소에 37.1억 톤을 상회하고 있으며, 매년 평균 3만2천여 개의 관정이 새로이 개발되고 있는 실정이다¹⁾. 이러한 무분별한 지하수공의 개발은

폐공의 방치, 관정의 부적절한 관리, 인간활동에 의한 오염 등을 통하여 지하수 수질에 심각한 오염문제를 발생시키며 지하수 보존 측면에서 중요한 환경적 문제가 되고 있다. 특히 대도시 지역에서의 지하수 오염 실태는 최근의 종합적인 연구·조사에서 밝혀진 바와 같이 여러 가지 오염원에 대하여 매우 취약한 상태인 것으로 나타났다^{2), 3)}. 현재 주암댐을 주 상수원으로 하고 있는 광주광역시도 도시화가 급속하게 진행되면서 생활용수 및 기타 용수의 수요가 급증하여 지하수에 대한 소비량도 증가하고 있다. 광주지역의 지하수 개발공 7369개소(1995년)를 용도별로 살펴보면 생활용

수 4944개, 공업용수 121개, 농업용수 2290개 등이며, 용도별 이용률은 각각 61%, 12%, 26%이다⁴⁾. 보건환경연구원의 자료에 의하면 일부 관정은 Cl^- , NO_3^- 함량과 경도가 음용수 기준치를 초과하여 수질에 문제가 있는 것으로 보고된 바 있다⁵⁾.

본 연구에서는 광주광역시에 분포하는 지하수의 수질에 영향을 미치는 지질학 및 인위적인 요인에 대하여 전반적인 조사를 수행하였으며, 특히 오염원의 분포와 밀접한 관계가 있는 토지이용 유형에 따라 연구지역을 4개 Group으로 구분하고, 각 Group별 수질 특성의 차이를 규명하고자 하였다. 이러한 대도시 지하수의 수질 및 오염 특성에 대한 지화학적 연구 및 결과는 향후 도시 지역에서 발생할 수 있는 수질 문제에 대비하여 합리적인 보전 대책의 수립에 필요한 기초 자료를 제공해 줄 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 지역

2.1 지형 및 지질

본 연구의 대상지역은 행정구역상 광주광역시 전체

를 포함하며 좌표상의 지도경계는 동경 $126^{\circ} 38' 58'' \sim 127^{\circ} 01' 19''$ 와 북위 $35^{\circ} 02' 46'' \sim 35^{\circ} 15' 36''$ 이다 (Fig. 1). 광주광역시는 지형적으로 서부와 중부 그리고 동부의 세 지역으로 구분되는데, 중앙부의 주라기 화강암으로 구성된 지역인 영산강 유역이 저지대로 분류되고, 이들 화강암에 비해 상대적으로 풍화에 강한 선캠브리아 화강편마암을 포함하는 서부 지역과 무등산(1187m)이 위치한 동부의 백악기 화산암류가 이루는 지역이 상대적으로 높은 지형을 형성하고 있다. 본역에 분포하는 주요 수계로는 도시의 가운데를 흐르는 영산강, 그 상류인 황룡강과 기존시가지를 흐르는 광주천 등이 있다.

본 역의 지질은 최하부를 구성하는 선캠브리아 편마암복합체, 이를 관입하는 주라기 화강암류, 백악기 퇴적암류의 퇴적, 백악기 화산암류의 분출과 관입, 백악기 화강암류와 반암의 관입, 그리고 이를 부정합으로 덮는 제 4기퇴적층의 순서로 요약된다(Fig. 1). 이러한 지질분포는 지질구조와 밀접한 관계가 있으며 본역은 구조적으로 남동부~북동·남서 방향의 순창 전단대와 북서부~북동·남서 방향의 광주 단층 사이에

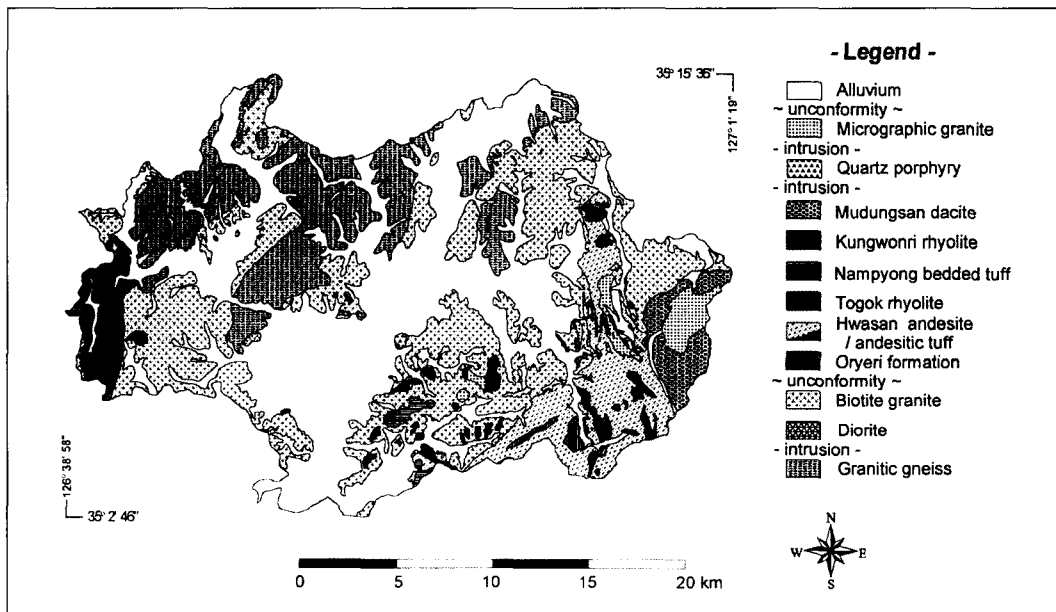


Fig. 1. Geologic map of the study area (Choi. et. al., 1990; Hong. et. al., 1986; Hong. et. al., 1990; Kim. et. al., 1986).

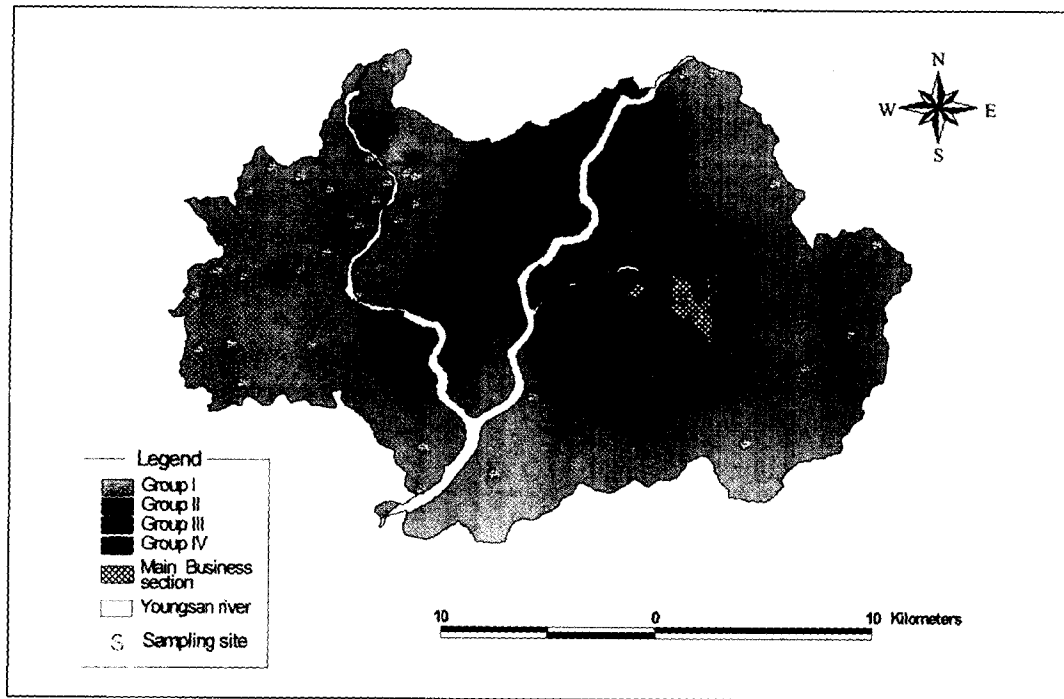


Fig. 2. Map showing the sampling locations and four types of landuse in the study area.

위치한다. Fig. 1의 지질도는 1:50,000 광주·나주·송정·영광 4개 지질 도폭의 자료를 재구성하여 편집하였다^{6), 7), 8), 9)}.

편마암 복합체는 본 역에서 최고기의 암체로서 유라기 화강암류의 관입에 의해 대부분 중립~조립 등립질의 화강암질편마암으로 변해있다⁶⁾. 본 암석의 주 조성 광물은 담회색 사장석, 미사장석과 석영 그리고 흑운모와 백운모이고 부 조성광물은 저어콘, 인회석 및 불투명광물로 구성되어 있으며, 모드분석결과는 화강암 영역에 속한다¹⁰⁾.

백악기 퇴적암은 본 역의 서단부에 남-북방향으로 소규모로 분포하며 주로 녹색~저색의 사암과 셰일로 구성되고 흑색 셰일과 역암도 일부 관찰할 수 있다. 본 역의 퇴적암류는 주로 화산쇄설물로 구성되며 화산암류와 밀접한 관련이 있다⁶⁾.

흑운모화강암은 본 역의 광주화강암체 중 하나로서 각섬석흑운모화강섬록암과 함께 광주시 중심부에 가장 광범위하게 분포하고 있으며 그 연장이 나주 남부까지 연결된다. 본 암의 주 조성광물은 석영, 사장석, 흑운

모 및 미사장석이고 부 조성광물은 견운모, 녹염석, 스펀, 불투명광물, 저어콘 및 인회석이다¹¹⁾.

광주지역의 동남부에는 백악기의 유천층군에 해당하는 화산암류가 주로 분포한다. 이들은 백악기 퇴적암과 마찬가지로 대부분 북동-남서방향의 광주단층계를 따라서 형성된 퇴적분지의 쇄설성 퇴적암을 정합적으로 덮거나 교호하는 상태로 산출하며 대부분 응회암질 화산암으로 구성된다.

2.2 도시계획구역 및 토지이용현황

도시계획구역은 결정된 도시계획이 실시될 구역을 의미하며 기존의 시가지나 향후 시가지 예정 지역에 대하여 도시적 토지이용으로 계획하고 규제하는 것이다. 광주광역시 경우는 1970년대 이후 527.73km²에 해당하는 개발제한구역이 도시외곽에 지정되면서 도시계획구역의 면적이 대폭 확장되었으며 현재는 경계가 행정구역보다 넓은 이른바 확대된(overbounded) 도시계획구역을 형성하고 있다. 본 연구에서는 행정구역

상 광주광역시에 포함되는 지역에 한하여 1995년 3월에 확정된 도시계획구역을 적용하였다.

광주의 토지이용 패턴은 몇가지 특징이 있는데, 우선, 자연발생적인 성격이 강하여 계획적인 요소가 적으며, 둘째, 주택지, 공장, 상가 등이 혼재되어 있으므로 토지이용의 혼합성이 강하고 단위토지가 다목적으로 이용되는 경우가 많다. 셋째, 획지가 소규모이므로 시설규모가 작고 단위시설수가 많으며, 넷째, 취락이나 상가의 형성이 도로변을 따라서 이루어지는 경우가 대부분이다¹²⁾.

광주광역시의 용도별 토지이용은 크게 시가화 구역과 비시가화 구역으로 구분되며 도시의 기능별 용도에 근거해서 주거용지, 상업용지, 공업용지, 녹지용지 등으로 구분된다. 시가화 구역에는 주거용지, 산업용지, 공업용지가 포함되며 비시가화 구역에는 공원, 생산녹지, 자연녹지, 개발제한구역이 해당한다. 1999년 현재 용도별 지역 지정 현황은 녹지지역이 도시계획구역의 대부분인 88.4%를 차지하고 있으며, 주거지역이 7.8%, 공업지역이 2.7%, 상업지역이 1.1%순으로 되어있다. 또한 용도지역 지정은 다른 대도시와 마찬가지로 녹지계 지역이 축소되고 주거계와 상업계 지역이 확대되는 시가화 경향이 계속되고 있다¹³⁾.

개발제한구역을 제외한 광주광역시 지목별 토지이용 현황을 보면 대지 25.5%, 밭 13.3%, 논 40.6% 등으로서 농경지가 53.9%를 점하고 있으며, 대지의 대부분은 용도별 구분에서 주거용지와 상업용지에 해당한다. 개발제한구역의 경우는 전체 527.73km² 중 임야 52.3%, 논 30.3%, 밭 12.1% 등으로서 대부분 산과 농경지로 이용되고 있으며 중앙의 시가화 지역을 환상형 분지 형태로 둘러싸고 있다.

2.3 연구 지역의 유형별 구분

지하수의 수질은 일차적으로 지질학적인 요인의 영향을 받으며 그 중에서도 광물학적 요인에 의해 용존 물질의 분포 특성이 결정된다. 하지만 본 역과 같은 대도시 지역에서는 인간활동에 의하여 물 순환계로 유입되는 다양한 오염 물질의 영향이 더 중요한 변수가 될 수 있으며, 이러한 오염원의 공간적인 분포 특성은

Table 1. Number and percentage of groundwater samples with landuse and rock types in the study area

lithology	Group I	Group II	Group III	Group IV
and ¹⁾	11.4 (4)5)	—	4.4 (2)	—
ggn ²⁾	34.3 (12)	35.7 (10)	6.7 (3)	36.4 (4)
bgr ³⁾	37.1 (14)	64.3 (18)	88.9 (40)	63.6 (7)
sed ⁴⁾	14.3 (5)	—	—	—

- 1) Andesitic rocks,
- 2) Granitic gneiss,
- 3) Biotite granite,
- 4) Sedimentary rocks and Tuff
- 5) Percentage

도시계획구역 및 토지이용현황과 밀접한 관계가 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 도시계획구역(1995년)과 토지이용현황(1999년)을 기준으로 해서 광주광역시의 공간적 특성을 4개 유형의 Group으로 편집하였으며, 해당 지역의 지형 및 지질의 특성이 충분히 반영될 수 있도록 조정하였다(Fig. 2). 본 역의 지질은 4개의 암질로 요약되며 각 Group에서의 해당 암종의 갯수는 Table 1과 같다.

Group I은 도시계획구역 중 개발제한구역(Greenbelt)에 해당하며 용도별 토지이용 구분에서는 대지 형태로서 비시가화 지역에 포함된다. 광주광역시의 비시가화 구역의 용도별 구성비는 공원(5.8%), 생산녹지(4.9%), 자연녹지(1.7%), 개발제한구역(70.9%)으로서 개발제한구역이 대부분을 차지하고 있다. 도시계획구역상 공원으로 구분되는 무등산국립공원 등 비시가화 구역의 공원지역도 Group I에 포함시켰다. 본 Group의 지질에는 선캠브리아 편마암복합체(서부지역)와 백악기 화산암류(동부 고지대)가 포함되며 주 대수층의 암질은 흑운모화강암과 화강편마암이다(Table 1).

Group II는 개발제한구역(Group I), 기존시가지(Group III), 공단지역(Group IV)를 제외한 나머지 지역으로서 대부분 광산구에 위치하며 기존시가지(Group III) 주변의 완충녹지와 공원지역도 일부 포함한다. 특히 광산구 일대는 최근 도시화가 진행되면서

국지적으로 오염된 지하수의 특성을 보여주지만 Group III에 비해 낮은 수준을 유지한다. 본 Group의 28개 관정 중 대수층의 암질이 흑운모화강암인 곳은 18개소이며 나머지는 모두 화강편마암이다.

Group III는 영산강 동쪽에 위치한 구도심지와 중심상가지역을 중심으로 분포하는 주거지역과 상업지역에 해당하며 대수층의 암질은 대부분 흑운모화강암이다. 이 지역은 도시기능이 혼재되어 주거지역의 인구 밀도가 높고 근처에 중심상권이 집중되어있다. 또한 기존 시설의 노후화와 하수도 보급율이 저조하여 주거 환경이 악화되어 있으므로 본 역에서 인간활동에 의한 수질오염이 가장 심각한 지역이다.

Group IV는 토지이용상 공업지역에 해당하는 곳이며, 본 역에서는 하남산업단지를 중심으로 하여 소촌농공단지, 평동산업단지, 송암산업단지, 본촌공단, 첨단산업단지 등이 완충녹지(Group II)를 경계로 개발제한구역(Group I) 및주거지역(Group III)과 접하고 있다.

3. 연구 방법

3.1 시료채취 및 현장수질 측정

본 연구에서는 광주광역시에 분포하는 7540개 지하수공¹⁾ 중에서 비교적 관리 체계가 잘 되어 있고 채수가 가능한 비상급수용 민방위공을 대상으로 하여 현장조사 및 시료채취가 2000년 9월 중 수행되었으며, 연구에 이용된 119개 지하수 시료의 채취 지점은 Fig. 2에 나타내었다. 본 역에 분포하는 지하수공의 심도는 대부분 50~120m 사이이며, 물 시료의 채취는 현장측정과 함께 실시되었다.

지하수 시료에 대한 현장측정은 수온, 수소이온농도(pH), 산화환원전위(Eh), 전기전도도(EC) 등에 대하여 이루어졌으며 수온을 제외하고는 모두 TOA사의 휴대용 측정기(HM-12P, CM-14P, RM-12P)가 사용되었다. 중탄산이온(HCO_3^-)의 함량은 메틸오렌지 지시약을 이용한 산-중화적정법을 이용하여 pH 4.3에서의 알칼리도를 측정하여 현장에서 정량하였으며 0.05N의 HCl이 적정용액으로 이용되었다^{14), 15)}. 지하

수시료의 채취는 공 심도를 고려하여 수온의 변화가 없을 때까지 약 20분 정도 양수하여 안정화시킨 후에 실시하였으며 채취된 지하수시료는 현장에서 핸드형 진공펌프와 0.45 μm 셀룰로즈 멤브레인 필터를 이용하여 시료 중의 부유물질을 제거하였다. 음이온 분석을 위한 지하수 시료는 이 중 100ml를 취하여 Polyethylene 재질의 용기에 담아서 4 $^{\circ}\text{C}$ 이하에서 냉장보관을 하였다. 양이온 분석용 시료는 용존 원소들이 시료병에 흡착되거나 침전되는 것을 막기 위하여 일단 1l 무균채수병에 채집한 후 65% 농질산으로 처리하여 pH 2 이하의 환경에서 보관하였다¹⁶⁾.

3.2 화학 분석

지하수시료의 용존성분에 대한 정량분석은 한국지질자원연구원에서 수행되었으며, 음이온(F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})은 이온크로마토그래피(IC, Dionex Model 120)를 이용하였고, 양이온은 원자흡광분석기(AAS, Perkin-Elmer Model 5100)와 유도결합플라즈마 방출분광분석기(ICP-AES, Jobin-Yvon Model JBY-70 plus)를 이용하여 분석이 수행되었다. 양이온 중 이온화에너지가 낮은 K, Na, Ca, Mg와 같은 알칼리 및 알칼리토금속은 원자흡광분석기가 사용되었고, Fe, Mn, Cu, Ni, Zn 등의 미량 성분은 ICP-AES에 Ultrasonic nebulizer(Cetac, U-5000AT+)를 추가하여 금속이온의 경우 검출한계를 0.1 $\mu\text{g/L}$ 정도로 낮추었다. ICP 분석에서 각 원소의 정량은 다원소 동시 분석을 실시하였고, 감도가 나쁜 As 등은 단파장 분석을 실시하여 보정하였다. 또한 분석시에는 시료에 용해되어 있는 다른 원소에 의한 간섭현상을 최소화하기 위해서 각 채널마다 배경치 강도(background intensity)를 보정하였으며 감도가 낮은 경우에는 간섭현상이 적은 파장을 선택하여 최대 감도를 유지하도록 노력하였다.

4. 연구 결과

본 역에서 채취된 지하수시료에 대한 분석 결과는 전술한 4개 Group으로 구분하였으며 각 시료의 물리

Table 2. Results of the descriptive statistics of physical and chemical analysis for the groundwater samples in the study area

Group (No. of Samples)		Temp. (°C)	pH	Eh (mV)	Cond. (μ S/cm)	DO (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	F (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)
Group I (35)	Mean	16.2	6.7	188.6	268	5.67	1.3	18.1	30.8	4.8	107.2	24.6	8.3	0.2	13.4	26.3
	Std. Dev.	0.9	0.5	62.6	116	2.00	0.9	10.4	18.8	5.0	59.2	18.8	7.2	0.3	17.3	8.2
Group II (28)	Mean	16.3	6.6	188.9	276	6.19	1.2	19.3	29.2	5.1	102.6	25.1	8.2	0.2	15.0	31.6
	Std. Dev.	0.5	0.4	74.6	130	1.94	0.6	10.8	19.8	3.2	74.0	15.2	9.8	0.2	15.1	5.3
Group III (45)	Mean	16.6	6.6	194.1	499	5.14	1.6	22.9	55.9	13.4	146.0	61.3	23.9	0.1	35.4	34.9
	Std. Dev.	1.4	0.3	70.2	169	2.39	1.3	11.8	23.4	7.1	68.0	35.2	16.8	0.1	35.8	5.9
Group IV (11)	Mean	16.4	6.4	150.9	297	6.58	1.1	19.3	31.6	6.3	111.2	29.1	9.7	0.2	16.9	35.6
	Std. Dev.	0.7	0.3	99.4	144	2.02	0.3	4.6	19.3	4.0	72.5	18.8	11.2	0.3	12.2	5.2
Total (119)	Mean	16.4	6.6	187.3	360	5.67	1.4	20.3	40.0	8.3	121.1	39.0	14.3	0.2	22.4	31.7
	Std. Dev.	1.0	0.5	72.3	179	2.18	1.0	10.8	24.2	6.7	69.4	30.9	14.4	0.2	27.1	7.4

Group (No. of Samples)		Fe (μ g/L)	Mn (μ g/L)	Sr (μ g/L)	Al (μ g/L)	As (μ g/L)	Ba (μ g/L)	Cd (μ g/L)	Cr (μ g/L)	Cu (μ g/L)	Ni (μ g/L)	Pb (μ g/L)	Zn (μ g/L)
Group I (35)	Mean	50.7	48.0	591.2	1.0	18.6	111.7	1.4	0.2	4.2	11.6	1.2	185.0
	Std. Dev.	172.5	164.2	805.7	2.1	17.0	220.2	1.0	0.6	6.4	7.5	1.7	415.4
Group II (28)	Mean	42.3	39.2	396.0	1.5	10.1	135.0	1.6	0.2	4.1	11.5	1.6	409.0
	Std. Dev.	92.0	130.6	669.1	4.7	14.3	571.7	2.2	0.3	7.5	3.8	2.0	604.5
Group III (45)	Mean	27.2	11.2	465.7	2.4	10.1	30.5	4.4	0.4	9.4	16.5	1.4	103.1
	Std. Dev.	72.9	44.4	237.6	12.0	18.4	36.2	7.7	0.7	27.0	11.9	2.6	181.8
Group IV (11)	Mean	379.2	7.7	336.1	0.8	8.8	42.1	3.5	0.4	2.9	14.4	2.3	606.2
	Std. Dev.	686.1	7.5	153.3	1.5	12.1	36.9	5.5	0.5	4.0	3.9	2.6	1030.3
Total (119)	Mean	68.2	28.3	474.2	1.6	12.5	80.0	2.8	0.3	6.0	13.7	1.5	248.0
	Std. Dev.	242.6	112.9	565.6	7.8	16.9	302.4	5.3	0.6	17.4	8.9	2.3	515.9

적 특성 및 용존이온의 함량에 대한 평균값, 중간값, 최소·최대값, 표준편차를 계산하고 Table 2에 요약하였다. 분석된 결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 이온간의 전하균형을 계산하였는데, 본 연구에 이용된 119개 지하수 시료의 대부분은 전하균형 (Charge balance)의 오차가 10% 이내(107개)이며 시료채취 지점의 공간적인 대표성을 확보하기 위하여 전하균형이 10%를 초과하는 일부 시료를 포함시켰다. 참고로 전하균형이 5%미만인 시료는 66개였으며, 허용오차는 최대 30% 이내로 제한하였다¹⁷⁾.

전기전도도는 총고용물질의 함량과 주변 오염원의 영향에 의해 분포 특성이 변화하는데, 본 역의 지하수 중 전기전도도 평균값은 Group I < Group II <

Group IV < Group III의 순서로 나타났으며 Group III (평균 499 μ S/cm)의 경우 개발제한구역인 Group I (평균 268 μ S/cm)보다 2배 정도 높게 나타난다(Table 2). 본 역에 분포하는 지하수의 pH는 5.7~7.7 이며 Group I 의 안산암질암 지역은 다소 높은 분포를 보여주는 반면 공단지역에 해당하는 Group IV는 평균 6.4로서 전체 평균 6.6에 비해 조금 낮게 나타난다. pH의 음용수 수질기준에 부적합한 시료는 전체 119개 시료 중 4개이며 모두 5.8 이하이다. 연구지역 지하수의 Eh 값은 Group간의 차이는 없지만 Group IV에서 -59.0~247.0mV(평균 150.9mV)로서 다소 낮은 분포를, Group III은 평균 194.1mV로서 비교적 높은 값을 보여준다. 현장에서 측정된 Eh값을 pH에 대하

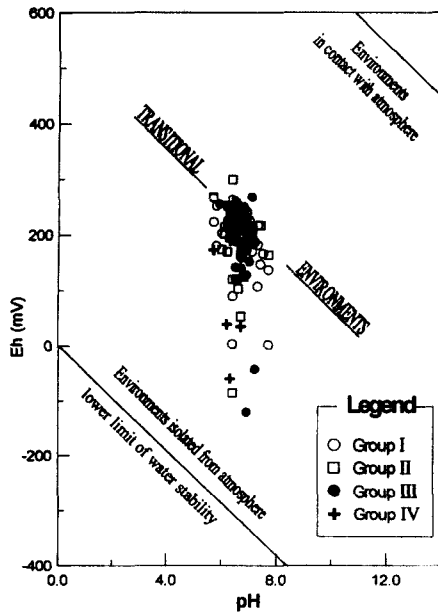


Fig. 3. Eh-pH plots of groundwater in the study area.

여 도시해 보면, 모두 전이환경(Transitional environment) 영역에 점사되는데(Fig. 3), 이는 기존의 조사 결과와 잘 일치하고 있다¹⁸⁾.

4.1 수질에 미치는 지질학적 요인

일반적으로 자연 상태의 지하수의 용존성분 중 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- 등과 같은 주원소의 함량은 대수층을 구성하는 광물의 용해도와 성분비 및 거동특성에 의해 조절된다. 이 중 Ca^{2+} , Na^+ , K^+ 는 주로 사장석과 K-장석에, Mg^{2+} 는 각섬석과 흑운모 등에 관련되며, 각 광물의 풍화에 의한 용해도 차이에 따라서 상이한 비율로 용존 성분의 함량에 반영된다. 본 역에서 흑운모화강암은 광주광역시 전역에 걸쳐 광범위하게 분포하는데, 119개 관정 중 79개소의 대수층이 여기에 해당한다. 따라서 광주광역시에 분포하는 지하수의 수질 특성은 흑운모화강암을 구성하는 광물들의 지화학적 거동에 의해 주로 영향을 받게 된다. 그리고 선캠브리아기 화강편마암이 Group I의 북서부에 분포하면서 두 번째로 넓은 면적을 차지하고 있

는데, 흑운모화강암과 암석화학적 특징이 매우 유사하다¹⁰⁾. 본 역에서 두 암종 간의 수질 특성은 구별이 어려우며, 먹는샘물 지하수와 같이 오염원의 영향이 배제된 지역에서는 두 가지 암질에 따른 주원소의 함량 분포가 차이를 보이지 않는다^{19), 20)}. 국내 먹는샘물 지하수 중 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 의 기반암에 따른 평균 함량은 대보화강암의 경우, 각각 0.9mg/L, 8.9mg/L, 16.6mg/L, 2.6mg/L이고, 화강편마암의 경우는 각각 1.1mg/L, 7.2mg/L, 14.1mg/L, 2.0mg/L으로서 공히 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 의 순서를 보여준다. 본 역의 지하수도 동일한 순서를 보이지만, K^+ 를 제외한 Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} 의 함량 자체는 이들과 비교해서 매우 높은 수준이다. 한편, 지하수 중 용존성분 간의 관련성 여부와 그 크기를 파악하기 위하여 화학분석 결과에 대한 산포도를 이용하여 피어슨 상관계수를 계산하였다(Table 3). 여기서 투입된 변수는 대수변환을 하였으며 상관계수에 대한 통계적 유의성은 양측검증(two-tailed test)을 해서 표시하였다.

자연수 중 K^+ 의 기원은 주로 K-장석, 운모류의 용해를 통해서 지하수 중으로 공급되며, Na^+ 와 Ca^{2+} 에 비하여 현저히 낮은 농도를 보이는데 이는 정장석의 양이 사장석에 비해 소량이며 풍화에 강하고 또한 점토광물 등에 의해 쉽게 흡착되기 때문이다. 본 역에의 K^+ 함량의 평균값은 1.4mg/L이며, Group III(평균 1.6mg/L)에서 다소 높은 경향을, Group IV(평균 1.1mg/L)에서 조금 낮은 분포를 보여주는데, 뚜렷한 차이를 발견하기는 힘들다(Table 2). 한편, K^+ 가 Cl^- 와도 높은 상관관계($r = 0.368$)를 보이는 것은 일부는 비료와 같은 인위적인 오염원의 영향을 받고 있음을 의미한다.

Na^+ 는 주로 풍화에 약한 사장석의 비조화용해(incongruent solution)에 의해 지하수에 공급되고 점토광물에 쉽게 흡착되지 않으므로 지하수에 많이 존재하며 도시 지역에서는 생활하수의 유입을 통하여 공급되기도 한다. 본 역의 지하수 중 Na^+ 함량은 4.5~87.0mg/L(평균 20.3mg/L)의 분포를 보이므로 국내 화강암 지역의 평균값(0~100m 심도,

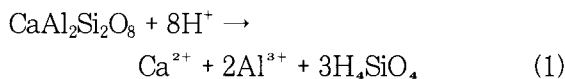
Table 3. Correlation matrix for the chemical components in groundwaters of the study area

	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SiO ₂	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Fe	Mn	Zn
K ⁺	1.000												
Na ⁺	0.173	1.000											
Ca ²⁺	0.238**	0.398**	1.000										
Mg ²⁺	0.354**	0.259**	0.834**	1.000									
SiO ₂	0.061	0.236**	0.147	0.363**	1.000								
HCO ₃ ⁻	0.079	0.451**	0.851**	0.608**	-0.015	1.000							
SO ₄ ²⁻	0.110	0.342**	0.488**	0.318**	-0.130	0.440**	1.000						
Cl ⁻	0.368**	0.539**	0.731**	0.773**	0.435**	0.481**	0.325**	1.000					
NO ₃ ⁻	0.104	-0.104	0.046	0.195*	0.346**	-0.257**	0.004	0.628*	1.000				
F ⁻	-0.355**	-0.143	-0.355**	-0.493**	-0.233*	-0.146	-0.104	-0.466**	-0.367**	1.000			
Fe	0.153	0.155	0.079	0.145	0.072	0.158	0.018	0.126	-0.395**	0.070	1.000		
Mn	0.028	0.224*	0.098	0.041	-0.119	0.272**	0.060	0.078	-0.592**	0.286**	0.679**	1.000	
Zn	-0.097	-0.064	-0.177	-0.148	0.170	-0.108	-0.340**	-0.080	-0.135	0.153	0.288**	0.350**	1.000

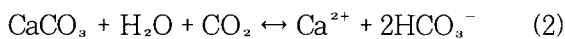
* p < 0.05, ** p < 0.01

6.29mg/L)²¹⁾에 비해 높은 수준이며 Cl⁻와의 상관관계 (r=0.539)가 높은 편이므로 본 역에 광범위하게 분포하는 비점오염원이 복합적으로 수질에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

일반적으로 화강암 지역에서는 사장석이 물과 반응하여 캐올리나이트로 풍화하면서 Ca²⁺ 등을 용출하게 되지만(Eq. 1), 천부에서는 용해도가 높은 탄산염 광물의 용해 및 탄산기의 해리 반응이 더욱 중요한 역할을 한다.



본 역의 지하수 중 Ca²⁺은 Mg²⁺, HCO₃⁻와 각각 0.834, 0.857의 높은 상관계수를 나타내며, 특히 화강암의 열극에 충진된 풍부한 방해석은 지하수 중 Ca²⁺의 거동을 조절하는 주요 원인이 된다. 따라서 Group III의 일부 지하수를 제외한 대부분의 시료들은 전기전도도와 관계없이 Ca²⁺에 대한 HCO₃⁻의 몰비가 약 2의 값을 나타낸다(Eq. 2, Fig. 4).



한편, 국내 화강암 지역에 분포하는 비오염 특성을 보이는 천부 지하수(0~100m) 중 Ca²⁺의 평균함량은 13.6mg/L이며²¹⁾, 대보화강암 지역의 먹는샘물 지하수 중 평균함량은 16.6mg/L이다²⁰⁾. 본 역의 지하수 중 Ca²⁺의 평균함량(40.0mg/L)을 이들과 비교해 보면 매우 높은 수치이며, 도시지역의 생활하수와 관련있는 Cl⁻와도 높은 상관계수(0.731)를 보여준다(Table 3). 따라서 이러한 대도시에 분포하는 지하수 중 Ca²⁺의

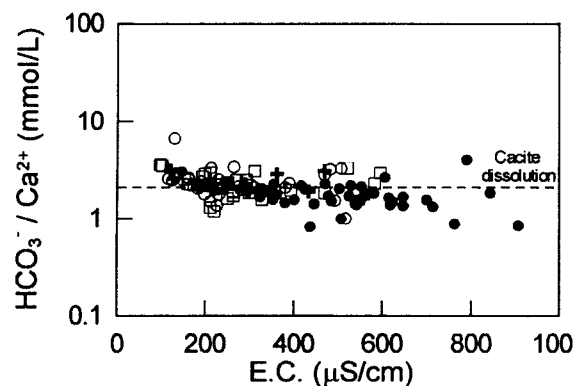


Fig. 4. Relationship between bicarbonate / Ca²⁺ (mmol/L) ratio and electrical conductivity (Symbols are the same as in Fig. 3).

공급원은 물-암석반응에 의한 지질학적 요인과 더불어 지표에서 유입되는 생활하수도 국지적으로 영향을 미치는 것으로 사료된다. 본 역에서 Ca^{2+} 의 Group별 평균함량을 살펴보면, Group III (55.9mg/L), Group I (30.8mg/L), Group II (29.2mg/L), Group IV (31.6mg/L)으로서, Group III에서 가장 높은 분포 (5.1~115.0mg/L)를 보여준다.

Mg^{2+} 는 본 역의 중앙에 위치한 화강암을 구성하는 규산염 광물 중 각섬석과 흑운모의 용해에 의해 캐올리나이트, 녹리석 등으로 풍화되거나 Mg-탄산염 광물의 용해에 의해 지하수 중으로 공급되므로 Ca^{2+} 와 HCO_3^- 에 대하여 높은 상관관계를 보여준다. 본 역의 지하수 중 Mg^{2+} 의 평균함량은 Group I (4.8mg/L), Group II (5.1mg/L)의 경우, 국내 화강암 지역에 분포하는 천부~중간 심도의 지하수(4.24mg/L)²⁰⁾와 유사한 분포를 보여주지만, Group III에서는 높은 함량 (평균 13.4mg/L)을 나타낸다.

HCO_3^- 의 함량은 3.6~405.7mg/L(평균 121.1mg/L)의 다양한 분포를 보이는데(Table 2), 주로 탄산염광물의 용해에 의해 지하수 중으로 공급되므로 Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 함량과 각각 0.851, 0.608의 높은 상관계수를 보여준다(Table 3). 따라서 HCO_3^- 의 함량을 Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 함량에 대하여 몰 비로 나타내 보면 Group III을 제외한 나머지 Group의 지하수시료는 대체로 좋은 비례관계를 보이지만($r^2 = 0.7352$), 기존 시가지에서 유입되는 오염물질의 영향을 받는 Group III은 상대적으로 낮은 수준의 비례관계($r^2 = 0.3587$)을 보여준다(Fig. 5). 이처럼 Group III에서 Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 함량이 증가함에도 HCO_3^- 의 함량변화가 작은 것은 HCO_3^- 의 기원을 지질매체와의 반응으로 제한하였을 때 일부 시료의 Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 의 기원이 단순한 물-암석 반응으로 국한되지 않음을 의미한다.

본 역에서의 SO_4^{2-} 의 함량은 Group III(평균 23.9mg/L)를 제외한 나머지 Group에서 10mg/L 이하의 분포를 보이는데, 이는 화강암 및 화강편마암 지역의 오염되지 않은 지하수의 평균함량과 비교해서 비슷한 수준이다^{19), 20)}. 따라서 SO_4^{2-} 의 주 공급원은 대부분 지질학적인 요인에 의해서 규제되는 것으로 판단되

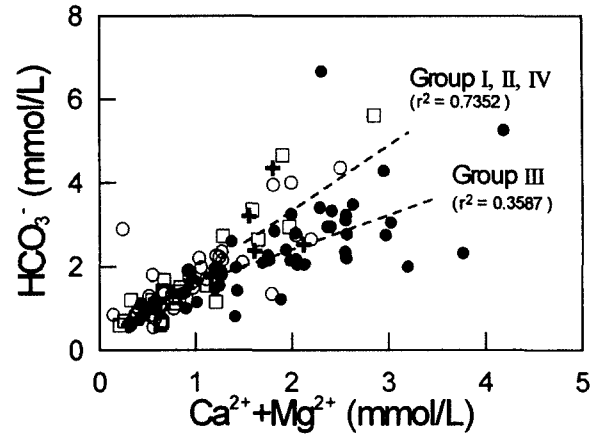
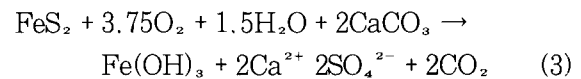


Fig. 5. Relationship between bicarbonate and the sum of Ca^{2+} and Mg^{2+} concentration (Symbols are the same as in Fig. 3)

며, Ca^{2+} ($r = 0.488$)와 HCO_3^- ($r = 0.440$)에 대하여 상대적으로 높은 상관관계를 보여준다. 암석 중 황화광물의 산화작용 및 용해에 의해 지하수 중에 존재할 것으로 사료된다(Eq. 3),



Ca^{2+} 와의 상관관계가 높은 편이므로 석고(Gypsum)의 존재도 생각할 수 있으나, 석고는 용해도($K=10^{-46}$)가 매우 높으므로 지표에서 2차 광물로 침전하기 어려우며, 전술한 바와 같이 HCO_3^- 와 Ca^{2+} 의 몰비가 거의 2의 값을 보이므로 대부분의 Ca^{2+} 는 방해석이 용해되면서 용출된 것으로 사료된다. 한편, Group III에서는 다른 Group에 비해 높은 함량(평균 23.9mg/L) 분포를 보이는데, 인위적으로 대기에 방출된 연소생성물, 배기가스 등이 기존시가지에 영향을 주는 것으로 사료된다. 또한, 지하수 중의 SO_4^{2-} 의 또 다른 기원으로서 호기성 환경에서 황 박테리아(tiobacillus)의 작용으로 pH가 감소하며 SO_4^{2-} 함량이 증가하는 경우가 있으나^{20), 21)}, 본 연구에서는 과정을 설명할 수 있는 충분한 자료가 확보되지 않았으므로 언급을 배제하고자 한다.

4.2 인위적인 오염원의 영향

해수의 영향을 고려하지 않는 화강암 지역의 지하수 중 Cl^- 는 규산염광물(흑운모, 각섬석 등)의 수화반응 및 유체포유물에서 유출됨으로써 부화된다²⁰. 하지만 국내 화강암 지하수 중에서 이러한 내부적 기원의 부화를 통해 높은 염도를 갖게 되는 지하수는 드물며, 특히 대도시 지역 지하수 중 Cl^- 의 함량이 높은 분포를 보이는 것은 주변에서 공급되는 인위적인 오염원의 영향 때문이다. 본 역에서의 Cl^- 의 함량은 기존시가지의 중심상권을 포함하는 Group III(평균함량 61.3mg/L)를 제외한 다른 Group의 평균값이 30mg/L 이하로 나타났고 전체 지하수시료 중 음용기준치(250mg/L)를 초과하는 것은 하나도 없었다. 하지만 지하수공의 심도를 고려할 때 국내 화강암 지역의 비오염 지하수(평균 <10mg/L)²⁰와 비교해 보면 함량 분포가 매우 높으며, 인위적인 오염의 지시자인 NO_3^- 와의 상관관계수(0.628)만 높게 나타난다. 따라서 Cl^- 이 비반응성 성분이고 본 역에 분포하는 지하수공들이 케이싱 불량 등의 원인으로 인하여 외부 오염원에 대하여 매우 취약한 상태임을 고려하면 지하수 시료에서 검출되는 대부분의 Cl^- 은 생활하수 등이 혼합된 지표수가 함양된 결과일 것이다.

지하수내 NO_3^- 성분은 동식물의 단백질이 분해되어 생성되는 NH_3 의 가수분해작용과 산화반응을 거치면서 수소이온을 방출하고 생성된다²⁰. 따라서 NO_3^- 는 대부분 분뇨와 같은 생활하수, 농업활동에 의한 축산폐수, 질소비료 등의 오염물질에서 유래하며 본 역에서는 Group III의 기존시가지에서 평균함량 35.4mg/L으로서 가장 높은 분포를 보여준다. NO_3^- 성분의 음용수 허용기준은 44.3mg/L이며 Group III에서 14개 시료가 이를 초과하고 있고 Group II와 Group I에서는 각각 1개 및 2개의 시료가 기준에 부적합하다. 한편, NO_3^- 와 Cl^- 함량의 Group별 분포 특성을 살펴보면, Group I, II, IV의 지하수 시료는 대부분 $NO_3^- = 40mg/L$ 이하에 점사되며 뚜렷한 특징을 보이지 않는 반면, Group III에서는 비례관계($r^2 = 0.6229$)를 보여준다(Fig 6a).

또한, Cl^- 와 NO_3^- 의 총량을 전기전도도에 대하여

나타내 보면 Group I, II, IV는 전체적으로 낮은 수준의 비례관계($r^2 = 0.2282$)을 보이는 반면, Group III는 전기전도도의 증가에 따른 두 음이온의 함량 변화가 상대적으로 높은 비례관계($r^2 = 0.5046$)를 나타낸다(Fig. 6b). 이처럼 전체 용존 물질 중 Cl^- 와 NO_3^- 의 거동이 차이를 보이며 Group III에서 높은 분포를 나타내는 것은 생활하수의 유입과 오수관의 누수 등이 다른 Group들에 비하여 심각함을 의미한다. 실제로 Group III가 분포하는 기존시가지에서는 인구밀도가 매우 높고(400인/ha 이상) 주거, 상업 및 공업지역이 무질서하게 공존하면서 광주광역시의 모든 행정업무와 상가기능이 집중되어 있다. 또한 이 곳은 하수 설비의 부족과 노후화 등으로 인하여 주변 하천과 지하수의 수질오염이 심각한 상태이다. 한편 광주광역시의 통계

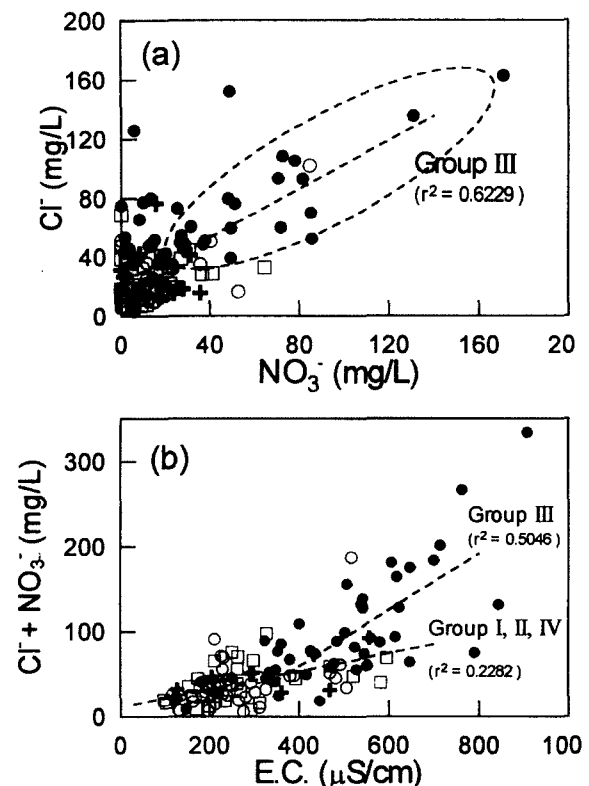


Fig. 6. Relationship between (a) Cl^- and NO_3^- concentration and (b) electrical conductivity and the sum of Cl^- and NO_3^- concentration (Symbols are the same as in Fig. 3).

연보에 의하면 쓰레기와 분뇨의 배출량은 지속적으로 증가했음에도 분뇨수거율은 오히려 감소한 것으로 보고된 바 있다²⁶⁾. 본 역에서 HCO₃⁻를 제외한 주요 음이온의 평균함량 분포는 Cl⁻(39.0mg/L) > NO₃⁻(22.4mg/L) > SO₄²⁻(14.3mg/L)의 순서를 보이는 데, 일반적인 화강암 지역의 함량분포(SO₄²⁻ > Cl⁻ > NO₃⁻)²¹⁾와 비교해 보면, SO₄²⁻의 함량이 차이를 보이지 않는 반면 Cl⁻과 NO₃⁻의 함량은 매우 높게 나타난다.

본 역과 같은 대도시 지역에 분포하는 지하수에 대한 주요 중금속 오염원으로는 대기침전물, 자동차 배기가스, 타이어 마모, 공단지역의 산업활동 등이 있다²⁷⁾. 본 역에는 하남공업단지를 비롯하여 6개의 공업단지가 Group IV를 중심으로 분포하고 있으며, 주요 업종으로는 조립금속, 기계장비, 목재·가구, 섬유산업 등이 있다²⁸⁾. 이러한 업종의 공장폐수에서 검출되는 주요 미량금속이온에는 As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, V, Zn 등이 있으며, Mn은 비료공장과 관련이 있다²⁹⁾. 본 역에서 Group IV의 지하수 중 주원소 함량의 분포는 Group I, Group II와 유사하나, 미량 중금속이온 중 Fe, Ni, Pb, Zn, Cd, Cu의 함량은 Group I, Group II에 비해 다소 높은 분포를 보이는데, Cd, Cu의 함량은 Group III에서도 다소 높은 경향을 나타낸다(Table 2). 또한, Group IV의 Fe(평균 379.2µg/L) 함량은 전체 평균 68.2µg/L에 비해 매우 높은 분포를 보이는데, 이는 공단지역 지하수의 상대적으로 낮은 pH와 Eh값과 관련이 있을 것으로 사료된다. 하지만, Fe, Mn, Ni를 제외한 대부분의 미량 중금속이온은 평균값이 10µg/L 미만이므로, 자료의 편차가 극심하며 대수변환을 하더라도 정확한 분산 및 특성을 파악하기 힘들다. 본 역의 공업단지는 대체로 70년대 후반~80년대 초에 조성이 되었으므로 배수시스템과 관련된 시설이 많이 노후되어 있으며 이로 인하여 토양과 대수층으로 공장폐수와 관련한 오염물질의 국지적인 공급이 이루어지는 것으로 추측된다.

4.3 지하수의 화학적 유형 및 물-암석 반응

본 역의 지하수시료에 대한 화학분석결과를 Piper

diagram³⁰⁾에 도시해 보면 Group I, Group II, Group IV의 지하수는 대체로 Ca(HCO₃)₂형으로 나타나며 화강암 지역의 천부~중간심도의 지하수²¹⁾와 비슷한 수질 특성을 보여준다. 한편, Group III의 지하수시료는 Ca(HCO₃)₂형과 CaSO₄-CaCl₂형의 영역에 걸쳐서 점시되며(영역 C), 특히, 광주천 주변의 기준시가지와 중심상가지역(Fig. 2)에서는 Ca²⁺와 Mg²⁺ 함량의 증가로 경도가 높고 Cl⁻ 함량의 증가로 인하여 CaSO₄-CaCl₂형에 치우치는 경향을 보인다(Fig. 7). Ca(HCO₃)₂형 지하수에서는 HCO₃⁻의 함량과 높은 상관관계를 보이는 Ca²⁺와 Mg²⁺의 대부분이 탄산염 광물의 용해 결과로 해석되며, CaSO₄-CaCl₂형에 점시되는 Group III의 지하수 중 특히 Cl⁻ 함량이 높은 일부 시료는 천부지하수의 특성을 보이는데, 생활하수의 유입과 같은 외부적인 요인이 우세하게 작용하는 것으로 판단된다.

화강암 대수층에서는 심부로 갈수록 물-암석 반응이 많이 진행된 물이 존재하며 천부에서 시작된 방해석의 용해가 중간심도에 이르러 포화상태에 도달하면 광물상으로 침전하게 되고 심부에서는 사장석의 용해가 주된 반응으로 작용하며 Mg²⁺와 K⁺가 결핍되는 현상을 보여준다¹⁹⁾. 이러한 화강암 지역 지하수의 화학적 조성

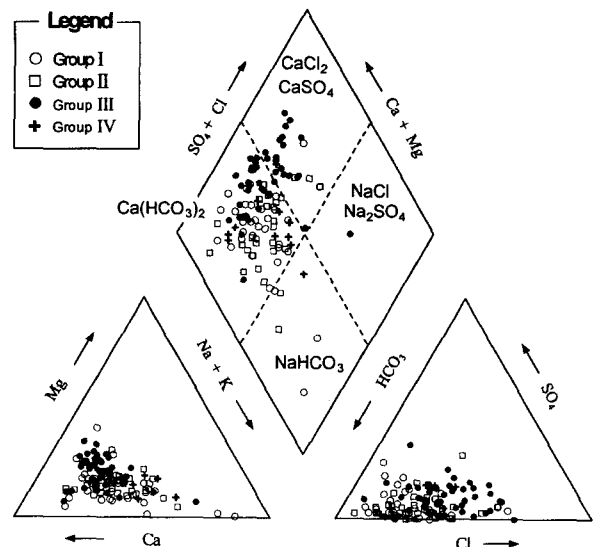


Fig. 7. Piper diagram for groundwaters in the study area.

의 변화를 Piper diagram에 적용시켜보면, 심도에 따른 수질의 변화가 CaSO_4 - CaCl_2 형 또는 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형에서 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형과 NaHCO_3 형으로 진화하는 경향을 설명할 수 있다. 본 역의 전체적인 지형은 분지 형태로서 Group I에서 화강편마암이 분포하는 북서방향과 안산암질암이 분포하는 동쪽방향이 상대적으로 지형고도가 높다. 따라서 영산강을 경계로 서쪽에 위치하는 광산구에서는 강수나 지표수가 함양되어 형성된 Group I의 지하수가 상대적으로 지형이 낮은 Group II 지역으로 유동하면서 Ca^{2+} 를 소모하고 사장석의 용해가 진행되는 진화과정을 거친다. 이 과정에서 주변 오염원의 영향을 받지 않고 계속 진화한다면 지하수의 수질은 NaHCO_3 유형 영역에 점사되겠지만, Group III의 지하수처럼 오염된 지표수의 유입에 의해 Cl^- 와 SO_4^{2-} , Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 이 계속 공급된다면 초기의 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 유형의 지하수는 CaSO_4 - CaCl_2 형으로 변하게 된다.

광물 성분 중 사장석, K-장석, 흑운모, 백운모, 녹리석 등과 같은 규산염광물은 물-암석 상호반응 과정에서 수소이온을 소모하면서 pH가 증가하고 지하수에 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 를 공급하면서 캐올리나이트와

같은 이차광물을 생성시킨다³¹⁾. 따라서 물-암석 상호반응 경로 모델링에서 pH를 지하수의 지화학적 진화과정에 대한 기준으로 가정할 수 있으며 Fig. 8은 지하수시료의 pH에 대한 각 광물상의 포화상태를 도시한 것이다. 각 시료의 광물상에 대한 포화지수 (saturation index)는 열역학 speciation 프로그램인 WATEQ4F³²⁾에서 제공하는 열역학 자료를 이용하여 각 용존성분의 이온강도(ionic strength), 활동도(activity) 등을 구하여 계산하였다. 그 결과 본 역에 분포하는 지하수시료의 Ca^{2+} 의 주요 공급원인 방해석은 모두 용해성 조건에 있으며 pH가 증가함에 따라 포화조건에 근접하고 있음을 보여준다(Fig. 8a). 화강암 지역에서 형성되는 대표적인 이차광물인 캐올리나이트는 Group II의 일부 시료를 제외하고는 모두 침전하여 안정된 광물상(mineral phase)을 형성하고 있다(Fig. 8b). Na^+ 의 주요 공급원인 알바이트는 pH의 증가에 따른 경향성은 뚜렷하지 않으며 $\text{SiO}_2(\text{a})$ 의 포화지수와 마찬가지로 모든 지하수시료에 대하여 불포화 상태이다(Fig. 8c, Fig. 8d).

Fig. 9은 WATEQ4F에 의해 계산된 용존성분의 활동도에 따른 광물의 안정영역을 표시하고 그 위에

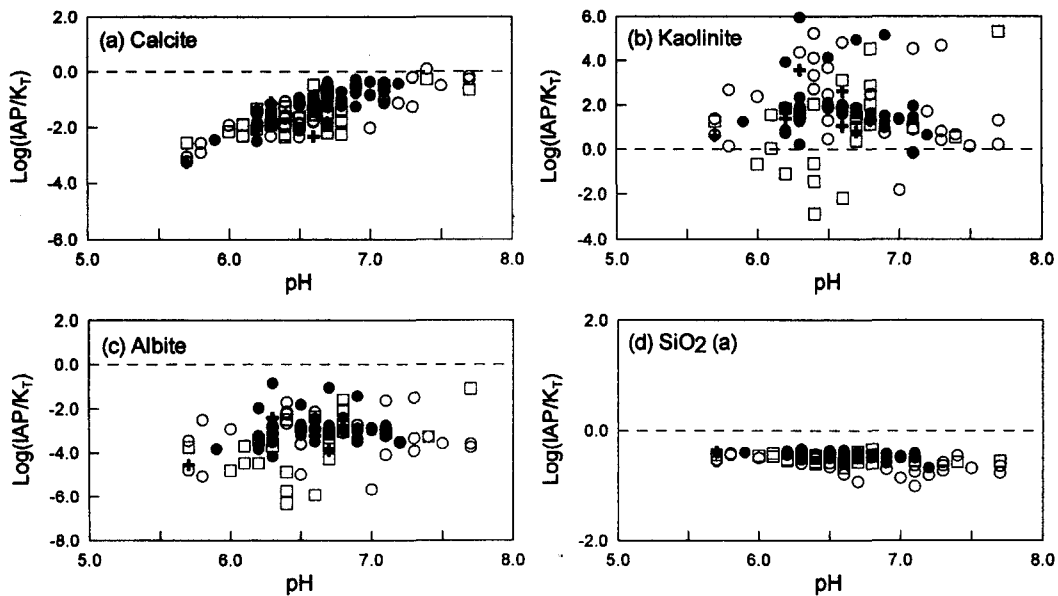


Fig. 8. Saturation indices (S.I.) of calcite, kaolinite, albite and amorphous silica versus pH of the sampled groundwater in the study area (Symbols are the same as in Fig. 3).

본 역의 지하수시료의 화학조성을 도시한 것이다. 안정 영역 계산에 사용된 광물의 깁스 자유에너지는 Faure(1991)의 자료에서 인용하였다³³⁾. Fig. 9(a)는 $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 계에서 존재하는 광물들의 상평형 관계를 나타내며 모두 캐올리나이트 안정영역에 놓여 있음을 보여준다. 본 역의 지하수는 알바이트와 반응하면서 초기의 깁사이트 형성단계를 거쳐 캐올리나이트와 평형상태를 이루고 있지만 Na^+ 의 활동도가 비교적 낮으므로 향후 알바이트의 용해에 의한 추가적인 Na^+ 의 공급이 예상된다. $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 계에서도 모든 Group의 지하수시료는 캐올리나이트의 안정영역에 접시되며 대부분 calcite에 대하여 불포화 상태에 놓인다.

4.4 요인분석

다변량 통계분석(Multivariate Statistical Analysis)은 최소한의 정보손실을 유지하면서 변수와 케이스의 차원(dimension)을 줄이는 통계분석 체계이다. 여기에는 회귀분석, 분산분석, 요인분석, 군집분석, 판별분석 등이 속하며 본 연구에서는 다양한 변수들 속에 내재된 일련의 인자들을 찾아내는 R형 요인분

석(Factor analysis)을 통하여 광주 광역시에 분포하는 지하수의 수질이 어떠한 요인에 의하여 영향을 받는 지 살펴보았다. 분석에 이용된 설명변수는 지하수 시료의 용존 성분 중 주성분인 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- 와 미량금속이온 중에서 Fe, Mn, Zn을 선택하였으며, 각각의 변수가 정규분포를 이루게 하기 위하여 대수변환(Log tranform)을 해서 분석에 이용하였다. 전체적인 분석 과정을 살펴보면, 우선 지하수 중 용존성분 변수간의 관련성 여부와 그 크기를 파악하기 위하여 화학분석 결과에 대한 산포도를 이용하여 상관관계(Correlation)분석을 하고, 역상관관계 행렬 및 공분산 행렬을 구한 다음 샘플링 적합도에 대한 KMO측도(Kaiser-Meyer-Oklun Measure) 및 Bartlett의 구상 검정치(Test of sphericity)를 구했다. KMO측도는 0.704로서 변수들의 상관관계에 대한 설명 정도가 적당한 것으로 나타났다. 구형성 검정치는 510.18로서 유의수준 5% 내에서 요인분석 모형이 적합한 것으로 판단된다. Table 5는 본 역의 지하수시료의 화학조성에 대한 요인분석 결과로 얻어진 주 요인들의 고유벡터와 고유치(Eigen value)를 행렬로 표시한 것이다. 여기서 요인

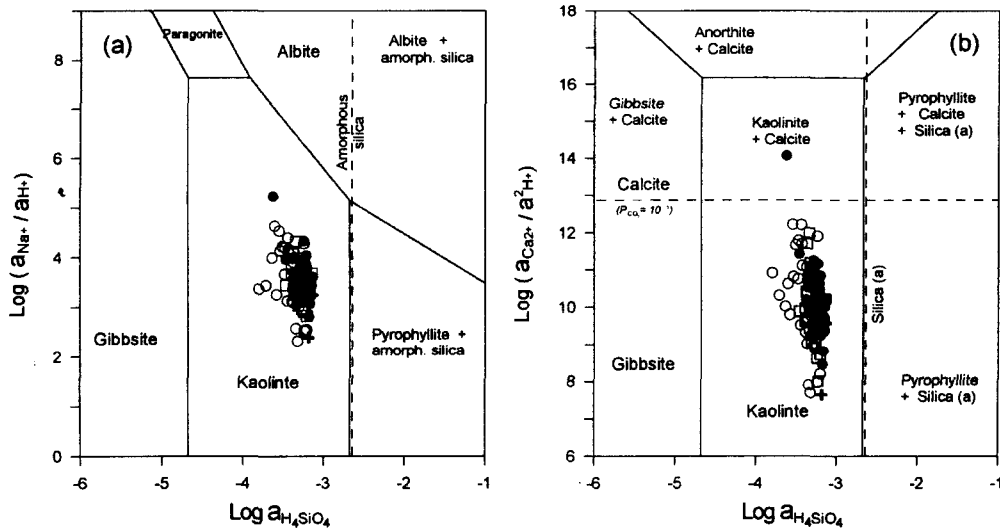


Fig. 9. Stability diagram of some minerals (Thermodynamic data are from Faure, 1991) in the system (a) $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ and (b) $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ at 25° C and 1 atm pressure. Symbols are the same as in Fig. 3.

분석의 추출모델은 PCA(Principal Component Analysis)방식을, 공통요인의 결정은 1 이상의 고유치(Eigen value)를 택하였으며, 초기의 요인 행렬(Factor matrix)의 불확실성을 줄이고 자료의 분산을 보다 잘 설명하기 위하여 Varimax법을 이용하여 직교회전(Orthogonal rotation)을 하였다. 회전된 인자 적재값(Factor loading)은 적어도 0.3 이상인 경우에만 하여 유의한 수준으로 받아들인다(34). 또한 요인분석의 목적에는 변수들을 요약하고 설명하는 것 이외에도 회귀분석 등에 이용할 적절한 변수를 선정하고 요인점수(Factor score)를 계산하는 것도 포함되는데, 본 연구에서는 타당성이 가장 높은 회귀방식으로 계산된 각 시료의 요인점수를 Group별로 구분하여 요인공간에 도시하였다(Fig. 10).

요인분석 결과에 의하면 3개의 요인이 추출되었으며 요인 1은 HCO_3^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Na^+ 함량으로, 요인 2는 K^+ , Cl^- , NO_3^- 함량으로, 그리고 요인 3은 Mn , Fe , Zn 의 함량으로 규제된다(Table 4). 4개 요인의 전체자료 분산에 대한 기여율(% of Variance)은 각각 32.07%(요인 1), 19.81%(요인 2) 및 18.25%(요인 3)으로서 전체 자료에 대하여 70.13%의 설명이 가능하다.

일반적으로 화강암 지역에서는 사장석이 물과 반응

Table 4. Factor matrix for the compositional variables of the groundwater samples

Variable	Factor			Communality
	1	2	3	
log HCO_3^-	0.920	-0.021	0.045	0.850
log Ca^{2+}	0.861	0.384	-0.067	0.893
log SO_4^{2-}	0.717	0.032	-0.099	0.526
log Mg^{2+}	0.629	0.619	-0.058	0.783
log Na^+	0.476	0.367	0.127	0.363
log K^+	0.265	0.704	0.057	0.569
log Cl^-	0.545	0.708	0.008	0.798
log NO_3^-	-0.123	0.690	-0.464	0.706
log Mn	0.156	-0.220	0.835	0.770
log Fe	0.038	0.181	0.809	0.688
log Zn	-0.291	0.118	0.635	0.502
Eigenvalue	3.418	2.169	2.008	
% of Variance	32.07	19.81	18.25	
Cumulative %	32.07	51.88	70.13	

하여 캐올리나이트로 풍화하면서 Ca^{2+} , HCO_3^- 등을 용출하는 것 이외에도 미량이지만 용해도가 높은 탄산염광물의 용해에 의해 Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-}

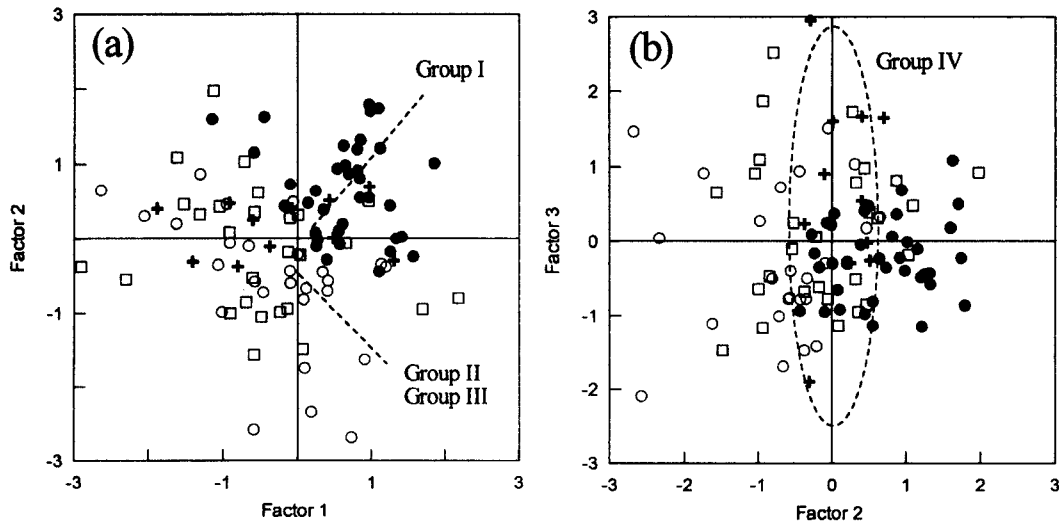


Fig. 10. Plot of factor scores for the groundwater in the study area (Symbols are the same as in Fig. 3).

는 높은 상관관계를 나타낸다. 따라서 요인 1에 속하는 성분은 사장석, 탄산염 광물 및 운모류의 용해, 캐올리나이트의 형성과 같은 지질매체와 물의 반응으로 설명이 된다. 요인 1의 고유치는 약 3.418로서 3개 요인 중 가장 큰 비중을 차지하며 전체 분산에 대한 해석에 있어서 중요한 변수이다. 한편, Mg^{2+} 은 요인 2에 대한 적재값이 0.619로서 통계적 유의성이 있으며, 요인 2를 규제하는 설명변수들에 대한 상관계수도 높게 나타나므로(Table 3), 지표에서 유입되는 생활하수의 영향도 함께 고려되어야 할 것이다. 또한 Na^+ 도 사장석의 용해를 의미하지만, 요인 1의 적재값이 0.576으로서 낮은 편이고 communality가 0.379에 불과하므로, 추출된 3가지 요인의 적재값만으로는 용존성분의 기원에 대한 구체적인 설명이 힘들다.

요인 2는 인위적인 오염원의 영향을 설명하고 있으며 기존시가지에서 유출되는 생활하수와 분뇨 등에 의한 오염을 의미한다. 특히 Group III의 광주천 주변의 중심상가 지역은 주거와 상업지역이 혼재 되어 있고, 인구밀도가 높은 반면 하수도 보급률이 저조하고 배관 시설의 노후로 인하여 인간 활동에 의한 수질오염이 가장 심각한 지역이다. 한편, 지하수 시료의 요인 1과 요인 2에 대한 각각의 요인점수에 대하여 요인공간에 도시해 보면, 요인 1을 설명하는 변수 중 일부가 인위적인 영향을 복합적으로 받으므로, 요인 축을 따라서 평행하게 정렬되는 경향은 나타나지 않는다(Fig. 10a). 하지만 요인점수의 분포는 Group에 따라서 차이를 보이는데, Group I, II에서는 요인 2의 점수가 대체로 음의 값에 점시되며 요인 1에 대하여 역비례 관계를 보이는 반면, Group III에서는 요인 1과 요인 2의 점수가 대부분 양의 값에 점시되면서 비례적으로 증가하는 경향을 보여주므로 기존시가지에서는 물-암석 반응에 의한 지질학적인 기원보다는 인위적인 오염의 기여도가 상대적으로 높음을 지시한다. 한편, Group IV에서는 요인 1의 축을 따라서 정렬되고 있으며 요인 2의 점수 분포가 매우 제한적인데, 이는 요인 2로 설명되는 기존시가지에서 도시화에 따른 오염의 영향과는 다른 기원임을 의미한다. 또한, 요인공간에서 Group IV의 시료 중 상당수가 Group II와 동일

한 영역에 점시되는 것은 본 역에 분포하는 공업단지의 대부분이 시 외곽지역에 위치하고 있으며, 완충녹지를 경계로 주거지역 및 개발제한구역과 접하고 있기 때문인 것으로 사료된다.

요인 3은 본 역의 오염원 중 공단지역에서 배출되는 폐수와 관련된 것으로 추정되며 요인 3에 의해 규제되는 설명변수들은 요인 1과 요인 2에 대한 적재값이 모두 0.3 미만이므로 통계적으로 유의하지 못하다. 이는 요인 3을 설명하는 변수들이 지질학적인 기원이나 인위적인 오염원의 영향을 받지 않고 고유한 거동을 하는 것을 의미한다. 또한 각 시료의 요인 3의 점수를 요인 2의 점수에 대하여 요인공간에 도시해 보면(Fig. 10b), 공업지역(Group IV)에서는 요인 3 축을 따라서 정렬되는 경향을 보이지만 요인 2에 대한 점수는 대체로 0에 가까우며 분산이 미약하므로 다른 Group들과는 구분이 된다. 따라서 Group IV에서는 지표에서 유입되는 Cl^- 와 NO_3^- 의 함량이 극히 제한적이며 이러한 차이가 수질에 반영되는 것으로 추정된다.

한편, 요인 행렬에서 각 행의 제곱의 합은 communality로서 해당 변수가 요인에 의해 대변되는 분산의 비율을 나타내는데, 변수에 내재된 정보가 3개의 요인들에 의해 설명되는 정도를 나타내며, 일반적으로 요인의 수가 늘어나면 communality도 증가한다³⁴⁾. 계산 결과에 의하면 HCO_3^- 와 Ca^{2+} 의 communality는 각각 0.850과 0.893으로서 추출된 3개의 요인에 의해 85.6% 및 89.3% 정도 설명이 가능한데, 이는 연구지역에서 탄산염 광물의 용해가 전체 용존성분의 거동에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 의미한다. 마찬가지로 Cl^- 와 NO_3^- 의 함량의 communality는 각각 0.798, 0.702로서 추출된 3개의 요인에 의해 오염원과 밀접한 관계가 있는 두 성분의 거동이 70% 이상 조절되는 것으로 판단된다.

5. 결 론

1. 광주광역시에 분포하는 지하수의 수질에 미치는 요인 중 인위적인 오염원의 분포를 고려하여 본 역의 토지이용현황을 중심으로 4개의 Group을

설정하였다. Group I은 개발제한구역, Group II는 완충녹지와 광산구 신시가지, Group III는 기존시가지, 그리고 Group IV는 공단지역을 대표한다.

2. 연구지역 지하수의 용존성분 중 Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- 의 함량이 높은 분포를 보이는 것은 화강암 중 세맥상으로 분포하는 탄산염 광물의 용해 때문이며, Group III에서 Ca^{2+} , Mg^{2+} 의 함량이 특히 높은 것은 생활하수의 유입이 함께 영향을 미치는 것으로 사료된다.
3. 연구지역에서 음이온의 함량은 $HCO_3^- > Cl^- > NO_3^- > SO_4^{2-}$ 의 순서를 보이므로, 비오염지역의 지하수에 비해 Cl^- , NO_3^- 함량이 매우 높은 오염 특성을 보여준다.
4. Piper diagram에 의하면 연구지역의 지하수는 대체로 $Ca(HCO_3)_2$ 유형으로 나타나지만, Group III의 지하수는 $CaSO_4-CaCl_2$ 형에 우세하게 점사된다. Group III의 일부 지하수공은 생활하수와 같은 외부적 요인에 의하여 천부지하수의 특성을 보여준다.
5. WATEQ4F를 이용하여 광물의 포화지수와 활동도를 계산한 결과, 연구지역의 지하수는 엘바이트, 방해석, $SiO_2(a)$ 를 포함하는 대부분의 광물상은 불포화 상태이며, 용존성분의 활동도를 각 광물의 안정영역에 도시해 보면 지하수 중 이차 광물은 캐올리나이트로서 안정한 것으로 나타난다.
6. 요인분석 결과에 의하면, 지질학적인 조건의 영향을 받는 요인 1과 인위적인 오염원의 유입에 기인하는 요인 2, 그리고 공업지역에서 유출되는 폐수의 영향으로 추측되는 요인 3으로 나타났으며, 전체 자료에 대하여 70%정도 설명이 가능하다. 분석 결과에 의하면 Group I과 II는 요인 1의 영향을, Group III은 요인 2의 영향을, 그리고 Group IV는 공업폐수의 영향을 주로 받는 것으로 사료된다.
7. 연구지역의 지하수는 Group III에서 용존물질의 함량을 비롯한 오염 특성이 가장 높게 나타나며,

나머지 Group에서는 뚜렷한 차이를 보여주지 않는다. 한편, Group IV의 지하수는 일부 미량 중금속 이온의 함량을 제외하고는 Group II와 유사한 분포를 보이는데, 이는 본 역의 공단지역이 실제로는 녹지지역 내에 위치하기 때문인 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 1999년 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 지원을 받은 바를 밝히며, 원고를 읽고 건설적인 비평과 미비한 점에 대하여 많은 조언을 해주신 두 분의 심사위원께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 건설교통부, 지하수조사연보, (2000).
- 2) 이재영, 이인호, 김통권, 대구시 지하수의 수질에 대한 지화학적 연구, 자원환경지질, 30(4), pp327-340(1997).
- 3) Cho, B. W., Hydrogeological characteristics of the groundwater resources in the Busan area, Korea. Ph.D. thesis, Kyungpook National University, pp127-132(2001).
- 4) 이정선, 광주직할시 지하수의 효율적인 관리 방안, 시정연구논총, 광주광역시, pp449-474(1994).
- 5) 이정환, 광주시내 지하수 수질에 관한 조사연구, 광주광역시 지방공무원교육원 우수논문집, 행정간행물등록번호, 64200-12130-76-9, (1997).
- 6) 김규봉, 이병주, 황상구, 1:50,000 영광도폭 지질도폭 및 설명서, 한국동력자원연구소, (1986).
- 7) 홍승호, 최범영, 1:50,000 송정도폭 지질도폭 및 설명서, 한국동력자원연구소, (1986).
- 8) 홍승호, 윤욱, 1:50,000 광주도폭 지질도폭 및 설명서, 한국동력자원연구소, (1990).
- 9) 최위찬, 황상구, 김영범, 1:50,000 나주도폭 지질도폭 및 설명서, 한국동력자원연구소, (1990).
- 10) 김용준, 오민수, 박재봉, 광주화강암체에 대한 암

- 석화학적 연구, 자원 환경지질, 26(1), pp83-96(1993).
- 11) 이병주, 김정찬, 김유봉, 조동룡, 최현일, 전희영, 김복철, 1:250,000 광주 지질도폭과 설명서. 한국 자원연구소, KR-97(S)-1, 1-82, (1997).
 - 12) 이정배, 주택지 개발에 있어서 도시계획규제의 문제점, 전남대학교 석사 학위 논문, (1995).
 - 13) 1999년 도시계획현황, 건설교통부, pp739-768(2000).
 - 14) Manahan, S. E., Environmental Chemistry, Willard Grand Press, pp23-25(1979).
 - 15) 송덕영, 박진태, 김상연, 현장수질분석 시스템개선 및 체계화 연구, 과학기술처, KR-95(B)-14, 15p(1995).
 - 16) Greenberg, A. E., Clesceri, L. S. and Eaton, A. D., Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th Ed., American Public Health Association, Washington DC, 1010p(1992).
 - 17) Nordstrom, D. K., Puigdom, N. I. and McNutt, R. H., 1990, Geochemical modeling of water-rock interactions at the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro analogue study sites, Po os de Caldas, Brazil, SKB Technical Report 90-23, 33p(1990).
 - 18) 박천영, 신인현, 안건상, 이창신, 정연중, 최낙철, 광주광역시 지하수에 대한 환경오염실태와 지구화학적 특성 연구, 한국지구과학회지, 20(3), pp266-276(1999).
 - 19) 성익환, 추창오, 조병욱, 이병대, 김통권, 이인호, 선캠브리아기 변성암지역에 분포하는 먹는샘물 지하수의 수리화학적 특성, 지하수환경, 5(4), pp203-209(1998).
 - 20) 조병욱, 성익환, 추창오, 이병대, 김통권, 대보화강암과 불국사화강암 지역 먹는샘물의 수리화학적 특성, 지질공학, 8(3), pp247-259(1998).
 - 21) 이종운, 전효택, 전용원, 국내화강암질암내 심부 지하수의 지구화학적 특성. 지하수환경, 4(4), pp199-211(1997).
 - 22) Mitchell, R., Sulfer, chap. 10 (nutrient cycle), In: Introduction to environmental microbiology, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, (1974).
 - 23) Orr, W., Biogeochemistry, chap. 16 (Sulfer), In: Handbook of geochemistry vol. II/2, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, (1978).
 - 24) Nordstrom, D. K., Ball, J. W., Donahoe, R. J. and Whittemore, D., Groundwater chemistry and water-rock interactions at Stripa, Geochimica. Cosmochim. Acta, 53, pp1727-1740(1989).
 - 25) 최석원, 김억수, 의학환경지구화학, 춘광, 434p(1996).
 - 26) 광주광역시, 광주광역시 통계연보, (1993).
 - 27) Lee, P. K. and Touray, J.C., Characteristics of polluted artificial soil localized on a motorway border and effects of acidification on the leaching behavior of heavy metals, Water Research, v. 32, No. 11, pp3425-3435(1998).
 - 28) 광주광역시, 광주광역시 시정백서, pp321-329(1998).
 - 29) Calra W. Montgomery, chap. 17 (water pollution), In: Environmental geology, Wm. C. Brown Publishers., 367p(1989).
 - 30) Piper, A. M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis, Transactions of American Geophysical Union, V. 25. pp914-923(1944).
 - 31) Drever, J. I., The geochemistry of natural waters, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 437p(1988).
 - 32) Ball, J.W. and Nordstrom, J.K., User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of minor, tracer and redox elements in natural waters, U.S., Geol. Surv., Open File Rep. 91-183, 189p(1992).
 - 33) Faure, G., Principles and applications of inorganic geochemistry. MacMillan Publishing Co., New York, pp250-260(1991).
 - 34) 최종성, SPSS를 이용한 현대통계분석, 북두출판사, pp211-222(2000).