

대구시 퇴적암 분포 지역의 지하수에 대한 환경지화학적 특성

Environmental Characteristics of Groundwater for Sedimentary Rocks in Daegu City

이 인 호(In Ho Lee)*	한국지질자원연구원 환경지질연구부
조 병 옥(Byong Wook Cho)	한국지질자원연구원 환경지질연구부
이 병 대(Byeong Dae Lee)	한국지질자원연구원 환경지질연구부

요약 / ABSTRACT

대구시에 분포하는 함안층, 반야월층, 주산 안산암질암, 팔공산화강암 지역의 지하수는 암석의 광물 및 화학조성에 따라 지화학적 특성이 구분된다. 대부분의 용존물질 함량은 안산암과 화강암보다 함안층과 반야월층에서 높게 나타나며 특히 HCO_3^- 와 SO_4^{2-} 의 함량이 매우 높은 분포를 보여준다. 퇴적암 지대의 지하수에서 Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- 의 함량이 높다는 것은 탄산기를 포함하는 물이 방해석과 반응하거나 장석류의 풍화와 같은 화학적 반응의 결과이다. 파이퍼도에 의하면 함안층은 $\text{CaSO}_4\text{-CaCl}_2$ 형에 우세하게 점시되고 반야월층은 $\text{CaSO}_4\text{-CaCl}_2$ 형과 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형에 같이 점시된다. $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형은 주로 방해석의 용해에 의해서 형성되고, $\text{CaSO}_4\text{-CaCl}_2$ 형은 황철석의 산화에 기인하는데, 일부는 인위적인 오염원의 영향을 받기도 한다. 요인분석 결과에 의하면 3개의 요인으로 추출 및 계산된다. SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , Fe 의 규제를 받는 요인 1은 방해석, 사장석의 용해 및 황철석의 산화로 설명되고, HCO_3^- , Mg^{2+} 의 규제를 받는 요인 2는 Mg-탄산염광물의 용해와 돌로마이트화 작용을 설명한다. Cl^- , K^+ , NO_3^- 의 규제를 받는 요인 3은 공장폐수를 포함하는 인위적인 오염원의 영향으로 추측되며, 금호강 주변의 공업단지 및 주거지역은 요인 3에 대한 점수가 높은 분포를 나타낸다.

주제어 : 지하수, 환경지화학, 토지이용, 물-암석 상호반응, 요인분석

Geochemical characteristics of groundwater in the different kinds of various lithology such as Haman formation, Panyaweol formation, Jusan andesitic formation and Palgongsan granite is distinguished by mineralogical and chemical compositions. The Concentration of the majority of solutes in groundwaters of Haman and Panyaweol formation is higher than in that of andesite and granite. Higher concentration

* Corresponding author: poksiri2@hanmail.net

of HCO_3^- and SO_4^{2-} anions in the groundwater is peculiar. High concentrations of Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- in the groundwaters of the sedimentary rocks result mainly from reaction of CO_2 -charged water with calcite and weathered feldspars. With the Piper diagram, the groundwaters of Haman formations are mainly plotted in $\text{CaSO}_4\text{-CaCl}_2$ type, whereas those of Panyaweol formations are plotted in the bothside of $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ and $\text{CaSO}_4\text{-CaCl}_2$ type. Thses two different types of $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ and $\text{CaSO}_4\text{-CaCl}_2$ groundwater were originated from dissolution of calcite($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) and the oxidation of pyrite($\text{CaSO}_4\text{-CaCl}_2$), respectively. And it also is influenced by anthropogenic contamination. Three factors were extracted from the factor analysis for chemical data. Factor 1, controlled by SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} and Fe, explains the dissolution of calcite, plagioclase and oxidation of pyrite. Factor 2, controlled by HCO_3^- and Mg^{2+} , mainly explains the dissolution of Mg-carbonates and dolomitization. Factor 3, controlled by Cl^- , K^+ and NO_3^- , is subject to the influence of artificial pollution including industrial waste water disposal. In this study area, some industrial complex which is close to Keumho river show the higher score of factor 3.

Key Words : groundwater, environmental geochemistry, landuse, water-rock interaction, factor analysis

서 론

대구광역시는 급속한 도시화의 진행과 함께 1970년대부터 적극적으로 지하수가 개발되어 다양한 용도로 그 소비량이 꾸준히 증가되어 왔는데, 본 역에는 전체 3973개소(1997년)의 지하수공이 개발되고 등록되어 있으며, 이를 용도별로 살펴보면 생활용수 3179개, 공업용수 586개, 농업용수 175개 등이고 각각의 용도별 이용률은 80.0%, 14.7%, 4.4%이다(대구광역시, 1998). 이러한 대도시 지역에서 무분별한 지하수공의 개발은 관정의 부적절한 관리, 인간활동에 의한 오염, 방치된 폐공 등을 통하여 지하수 수질에 심각한 오염문제를 발생시키므로 지하수 보존이라는 환경적인 측면에서 매우 중요한 문제가 되고 있다. 따라서 지하수 자원의 오염을 방지하고 오염된 지하수를 복원하는 작업을 위해서는 오염 상태의 정량적인 파악과 그 원인을 규명하는 연구가 필요하다. 일반적으로 지하수의 수질에 영향을 미치는 요인으로는 물-암석 반응에 의한 지질학적인 요인과 지표에서 유입되는 인위적인 오염원과 같은 외부적인 요인이 있으며, 이들이 복합적으로 작용하며 지하수 중 용존물질의 함량과 지화학적 거동 특성을 결정하게 된다. 본 연구지역은 퇴적암, 화강암, 안산암 등 다양한 암질로 구성되어 있으며 기

존 연구에 의하면 각 지질별 지하수의 수질특성도 많은 차이를 보여 주는데(성익환 외, 1995; 이인호 외, 1997; 이인호, 1998), 대체로 퇴적암 지역이 오염된 지표수의 영향에 취약한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 이러한 함안층과 반야월층의 지하수에 대하여 대수층에 분포하는 방해석, 황철석 및 석고와 같은 광물들을 중심으로 이들이 용존물질의 함량에 미치는 영향에 대하여 검토하고, 수질분석자료에 대한 다변량 통계 분석을 통하여 토지이용에 따른 인위적 오염원의 영향을 정량적으로 구분하고자 하였다. 이러한 대도시 지하수의 수질 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.

지 질 개 론

연구대상 지역인 대구광역시(1993년 행정경계 기준) 일대의 지질을 생성시기별로 살펴보면, 북쪽으로는 진주층의 상한을 기점으로해서 정합적으로 놓이는 하양층군의 퇴적암류가 북서부에서 동남방향으로 칠곡층, 신라역암층, 학봉층, 함안층,

대구시 퇴적암 분포 지역의 지하수에 대한 환경지화학적 특성

반야월층의 순서로 NE 및 NW 방향의 주향과 SE 및 SW 방향의 경사를 이루고 있으며, 학봉 화산암층은 함안층 하부 현무암 및 화산원 사질암의 호층으로 산출되며 렌즈상으로 분포한다(장기홍, 1978). 남쪽으로는 백악기말의 화산활동에 의한 유천층군의 안산암질암이 이를 부정합으로 덮고 있으며, 마지막으로 불국사 화강암류에 속하는 흑운모화강암과 맥암류들이 상기 퇴적암류와 화산암류를 관입하고 있는데, 남부에서는 몬조니암이 안산암질암을 관입하고 있으며, 북동부에서는 팔공산화강암이 함안층을 관입하면서 혼펠스화된 열변성대를 형성하고 있다(Fig. 1). 본 연구 지역 일대의 지질과 층서에 대한 구체적인 내용은 장기홍(1978)에 의하여 상세히 보고된 바 있다. 한편, 본 역의 대수층은 미고결층(고기 하상 퇴적층, 홍수퇴적층, 충적층, 산록 쇄설층)과 고결층(안산암류, 화강암, 퇴적암류)으로 구분되며 연구대상 지역인 함안층과 반야월층의 퇴적암에 대

하여 과거의 자료(김영기, 1976; 윤상규 외, 1979; 이재영 외, 1992)를 요약하면 다음과 같다.

함안층은 주로 니암, 니질 셰일 및 사암으로 구성되며 전체적으로 방해석 충전물의 양이 매우 많다. 본 층에서 대부분의 장석들은 변질 및 고령토화 되어 있으며, 이 중 1.2~19.2%가 방해석으로 교대되어 있다(김종근, 1990). 일부지역은 단층파쇄대를 제외한 단열구조대에서 0.5mm~1cm의 방해석 세맥과 약간의 황철석이 관찰된다. 시민운동장 시추코아 조사에 의하면, 지하 203.1m 구간까지는 자주색 셰일이 대부분이고 그 이하는 자주색 및 회록색 계통의 사질셰일 및 사암이 발달하고 있다(성익환 외, 1995). 또한 시추공에 발달하는 절리를 따라 방해석 등이 충전되어 있으며 일부 구간에는 방해석맥이 많이 발달되어 있다.

반야월층은 석회질 함량이 많은 불연속성의 렌즈상으로 분포한 니회암층으로서 층후는 10~30m이며, 니암 또는 셰일층과 호층을 이루고 있다. 수

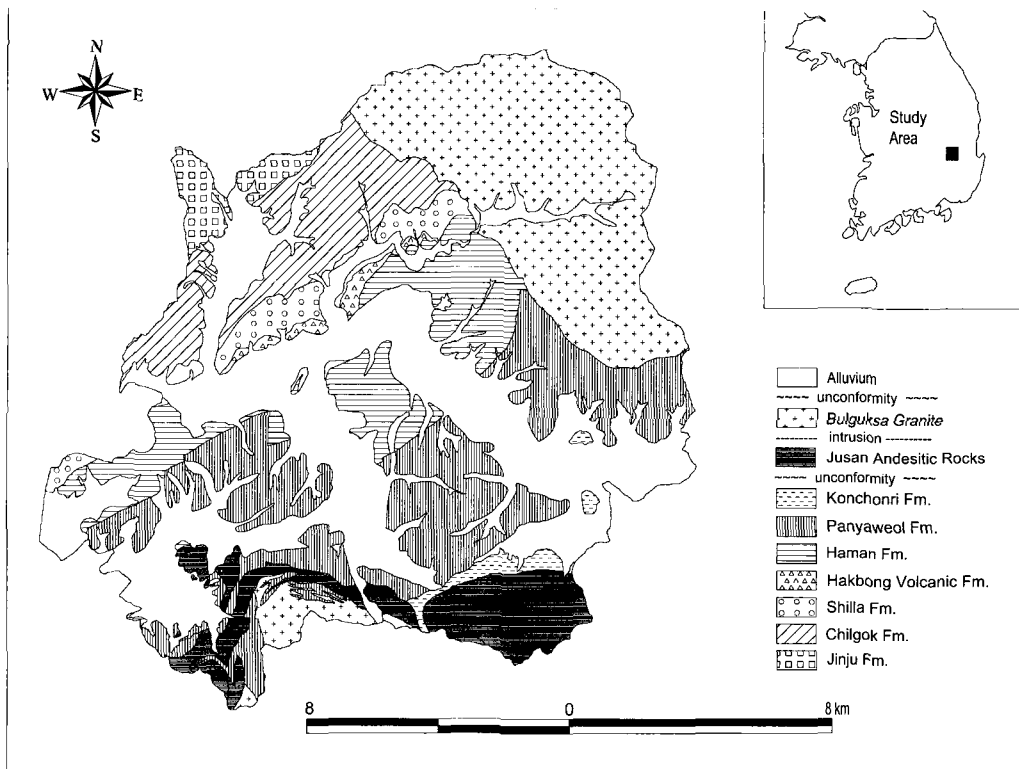


Fig. 1. Geologic map of the study area.

성구 신천 고수부지 내 관측공의 시추코아 조사 결과에 의하면, 전 구간이 대체로 암회색 계통의 세일이 주를 이루고 있으며, 125.0~130.0m 심도에서는 약 5m 두께의 중립질 함역사암이 협재되어 있다. 거의 모든 구간에서 1~2mm의 방해석 세맥이 관찰되는데, 특히 일부 구간에서는 황철석이 방해석 중에 산점되어 있고, 104~105m구간 등에서는 방해석의 용해로 형성된 공동이 관찰된다(성익환 외, 1995).

연구 방법

시료채취 및 현장수질 측정

본 연구에서는 대구광역시에 분포하는 3973개 지하수공 중에서 퇴적암 지역에 분포하는 채수 가능한 비상급수용 민방위공을 대상으로 하여 현장조사 및 시료채취가 1998년 2월 중 수행되었으며, 연구에 이용된 33개 지하수 시료의 채취 지점은 Fig. 2에 나타내었다. 본 역에 분포하는 지하수공의 심도는 대부분 100~150m 사이이며, 물 시료의 채취는 현장측정과 함께 실시되었다. 지하수 시료에 대한 현장측정은 수온, 수소이온농도(pH), 산화환원전위(Eh), 전기전도도(EC) 등에 대하여

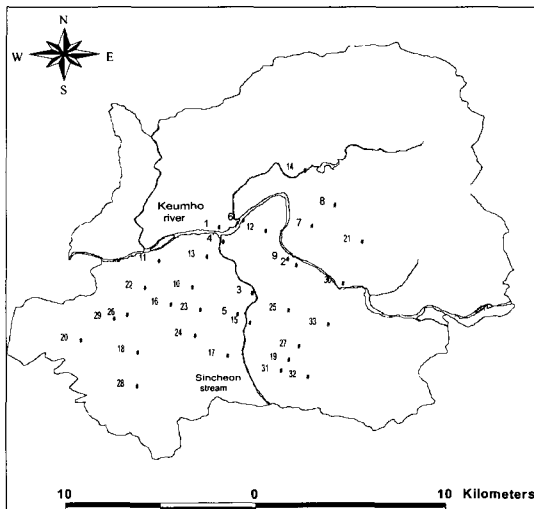


Fig. 2. Map showing the sampling locations in the study area.

이루어졌으며, pH, Eh 및 온도는 휴대용 Ion meter(Orion, 290A)로, EC 및 DO는 휴대용 측정기(Orion 120, 830)를 이용하였다. 중탄산이온(HCO_3^-)의 함량은 메틸오렌지 지시약을 이용한 산-중화적정법을 이용하여 pH 4.3에서의 알칼리도를 측정하여 현장에서 정량하였으며 0.05N의 HCl이 적정용액으로 이용되었다(Manahan, 1979). 지하수시료의 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 20ml를 취하여 진공시험관에 담아서 4°C이하에서 냉장보관을 하였다. 양이온 분석용 시료는 여과한 시료 중 500ml를 취하여 폴리에틸렌 용기에 채집한 후 용존 원소들이 시료 병에 흡착되거나 침전되는 것을 막기 위하여 65% 농질산으로 처리하여 pH 2 이하의 환경에서 보관하였다.

화학 분석

지하수시료의 용존성분에 대한 정량분석은 경북대학교 공동기기센터와 기초과학지원센터 대구 분소에서 수행되었으며, 음이온(F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})은 이온크로마토그래피(IC, 삼성전관 Model SLC-600)를 이용하였고, 양이온은 원자흡광분석기(AAS, Varian Model AA800)와 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, VG Elemental Model PlasmaQuad 3)를 이용하여 분석이 수행되었다. 양이온 중 이온화에너지가 낮은 K, Na, Ca, Mg와 같은 알칼리 및 알칼리토금속은 원자흡광분석기가 사용되었고, Al, Li, Fe, Mn, Sr, Zn 등의 미량 성분은 ICP-MS를 이용했는데 대부분의 미량 금속 이온에 대한 ICP의 검출한계는 0.1 $\mu\text{g/L}$ 정도이다. ICP 분석에서 각 원소의 정량은 다원소 동시분석을 실시하였고, 감도가 나쁜 일부 원소는 단파장 분석을 실시하여 보정하였다. 한편, 분석된 결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 이온 간의 전하균형을 계산하였으며 전체 33개 지하수 시료 중 대부분은 전하균형(Charge balance)의 오차가 5% 이내(31개)이며 나머지 2개는 10%이내이다.

대구시 북쪽암반부 지역의 지하수에 대한 환경지화학적 특성

Table 1. Results of the descriptive statistics of physical and chemical analysis for the groundwater samples in the study area (unit = mg/L)

Sample No.	Hamnan Fm.													Panyaeool Fm.					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Geol.	Hamnan Fm.													Panyaeool Fm.					
Landuse	Indust ¹⁾	Resi ²⁾	Resi	Resi	Resi	Indust	Resi	Resi	Resi	Resi	Busi ³⁾	Indust	Resi	Resi	Resi	Resi	Resi	Resi	GB ⁴⁾
Depth (m)	280	100	100	120	120	100	80	-	120	120	-	110	-	100	120	100	120	120	110
Temp.(°C)	19.4	16.5	17.7	17.6	18.5	19.9	16.6	18.6	16.6	17.2	21.3	16.2	15.3	15.9	18.1	16.6	17.6	18.8	19.9
pH	6.5	7.7	7.0	6.6	7.4	7.2	7.5	7.4	7.1	7.2	8.3	7.5	8.2	7.4	6.9	7.2	7.2	7.2	7.3
Eh (mV)	213.0	246.2	187.9	209.1	37.6	100.0	187.3	200.0	14.4	87.8	160.0	237.8	131.5	113.9	84.6	84.2	380.2	136.0	220.0
DO (mg/L)	5.2	6.2	2.6	2.0	2.4	7.2	1.9	5.1	1.5	4.4	10.1	4.6	6.7	1.5	2.5	2.7	3.7	6.9	9.8
EC (µS/cm)	724	1253	595	885	590	1097	502	650	1584	997	802	627	818	622	613	937	688	867	663
K ⁺	9.8	2.4	7.3	17.6	1.1	2.7	1.8	11.4	1.9	2.1	13.2	1.6	1.8	2.4	3.9	3.0	1.7	2.0	0.9
Na ⁺	30.5	68.2	61.4	77.0	28.2	61.4	17.7	28.4	105.4	48.5	28.3	31.9	38.6	21.1	33.1	35.0	22.5	33.8	21.4
Ca ²⁺	74.3	141.1	43.6	75.9	62.4	101.0	58.8	85.5	174.4	101.7	86.5	55.1	80.3	67.5	59.2	92.5	80.6	74.9	53.9
Mg ²⁺	22.5	38.7	11.3	19.3	19.1	33.0	16.7	15.6	41.5	43.3	20.5	27.9	39.1	22.2	16.0	39.4	14.6	39.2	23.8
SiO ₂	17.2	11.1	9.3	18.5	21.9	18.8	21.5	14.8	18.6	23.2	19.0	16.6	20.0	16.5	14.1	13.0	19.2	30.2	23.5
HCO ₃ ⁻	110.0	259.3	127.3	222.7	186.1	97.0	164.8	185.0	203.8	283.7	175.0	247.1	234.9	228.8	136.7	283.7	170.2	250.0	178.0
F ⁻	0.10	0.12	0.12	0.05	0.10	0.35	0.09	0.15	0.11	0.05	0.15	0.13	0.03	0.09	0.04	0.05	0.05	0.15	0.15
Cl ⁻	60.20	43.01	42.50	73.31	63.54	115.00	23.70	62.30	43.57	70.29	113.00	35.59	70.27	39.30	72.90	80.96	52.50	97.10	15.20
NO ₃ ⁻	85.70	23.10	42.26	70.32	0.10	34.90	24.90	15.20	1.10	1.20	3.59	11.24	73.86	37.38	27.85	51.47	16.95	3.07	1.21
SO ₄ ²⁻	92.10	325.60	86.02	96.05	52.85	197.00	65.53	61.30	683.33	220.31	63.90	53.55	98.63	57.04	52.14	54.86	90.68	33.80	82.10
Al	N.D.	0.187	0.054	0.057	0.051	N.D.	0.056	0.500	0.075	0.091	N.D.	0.080	0.102	0.092	0.069	0.076	0.107	0.100	N.D.
Li	0.960	0.270	0.119	N.D.	0.008	0.040	0.009	0.010	0.152	0.036	0.030	0.017	N.D.	0.010	0.017	0.053	0.010	0.050	0.060
Fe	0.370	2.164	0.301	1.001	1.066	0.490	0.635	0.390	3.783	1.680	0.410	0.685	1.175	0.910	1.157	1.661	1.141	0.420	0.310
Mn	N.D.	0.019	N.D.	N.D.	0.017	N.D.	N.D.	0.500	0.067	0.027	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.259	0.041	N.D.	0.200	N.D.
Sr	0.300	7.265	2.313	1.664	9.545	5.700	0.599	0.600	9.200	9.424	2.500	2.477	1.727	0.568	1.297	1.285	0.432	1.700	4.700
Zn	0.010	N.D.	N.D.	0.921	0.626	0.120	0.124	0.090	0.624	0.289	0.010	0.316	N.D.	0.333	1.412	0.782	0.297	0.910	0.010

1) Industrial area
 2) Residential area
 3) Business section
 4) Greenbelt
 5) Green zone

Table 1. Continued (unit = mg/L)

Sample No.	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Panyaweol Fm.														
Geol.														
Landuse	Indust	GB	Resi	Resi	Resi	Resi	Resi	GB	Resi	Resi	Resi	Resi	Resi	Green ⁵⁾
Depth (m)	100	150	100	120	130	100	-	120	120	-	-	180	-	100
Temp.(°C)	16.5	12.2	14.6	17.7	16.6	15.1	16.7	15.4	16.3	13.9	17.6	18.8	16.5	16.7
pH	6.8	7.5	8.0	7.2	7.9	7.7	7.7	7.3	7.4	8.1	6.8	7.7	8.3	7.3
Eh (mV)	160.0	224.0	166.3	140.8	188.0	212.2	181.0	133.8	124.7	156.5	237.8	219.4	-21.2	319.7
DO (mg/L)	4.0	7.0	7.6	1.0	8.8	6.3	10.7	4.4	3.8	6.7	2.3	3.8	5.3	2.2
EC (µS/cm)	742	531	1030	1069	858	611	769	733	656	937	661	605	644	714
K ⁺	2.50	1.6	1.9	2.0	1.4	1.7	1.9	1.8	3.0	1.9	4.8	1.8	2.0	1.6
Na ⁺	25.90	18.2	31.1	50.1	25.4	27.7	19.6	34.7	55.8	36.8	38.2	31.7	21.3	28.3
Ca ²⁺	89.10	68.1	118.4	102.3	98.1	61.4	91.9	76.3	52.8	88.3	59.0	64.6	70.9	67.0
Mg ²⁺	27.30	16.2	50.8	45.0	40.2	19.5	34.8	33.8	15.8	49.5	14.9	13.9	25.3	32.3
SiO ₂	16.6	19.8	14.2	12.7	18.1	14.0	18.2	16.8	13.7	12.0	13.4	16.8	13.4	11.1
HCO ₃ ⁻	160.50	177.3	314.3	283.7	261.0	204.4	298.0	352.7	228.8	320.4	183.1	192.2	213.6	329.5
F ⁻	0.01	0.63	0.05	0.06	0.10	0.09	0.10	0.06	0.24	0.04	0.05	0.18	0.09	0.06
Cl ⁻	39.59	26.15	73.65	97.03	90.80	40.67	60.40	57.78	70.51	58.22	47.18	47.87	23.69	52.19
NO ₃ ⁻	8.99	21.35	18.66	38.56	5.51	29.73	37.40	0.82	4.66	5.22	52.84	5.05	0.00	3.82
SO ₄ ²⁻	129.17	68.34	196.62	142.77	71.00	38.79	48.80	70.41	48.99	166.18	73.64	82.39	123.97	54.81
Al	N.D.	0.690	0.149	0.155	N.D.	0.118	N.D.	0.193	0.129	0.121	0.172	0.067	1.283	0.209
Li	0.060	0.070	0.032	0.029	0.010	0.013	0.070	0.042	0.041	0.024	0.021	0.023	N.D.	0.022
Fe	0.400	N.D.	2.041	1.782	0.520	0.732	0.500	1.158	0.638	1.492	0.844	0.781	3.027	0.893
Mn	N.D.	N.D.	N.D.	0.016	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.066	N.D.	N.D.	N.D.	0.256	0.034
Sr	N.D.	N.D.	9.315	7.475	N.D.	0.468	N.D.	12.483	1.442	3.643	2.226	2.817	1.978	5.525
Zn	0.350	0.360	0.439	0.777	N.D.	N.D.	0.010	0.232	0.424	N.D.	1.464	N.D.	0.117	N.D.

유인하
환경부
수질조사
결과표

결과 및 토의

대구지역 함안층 및 반야월층에 분포하는 지하수 시료에 대한 수온, pH, Eh, 전기전도도, 용존 산소, 용존 주원소 그리고 미량 중금속 이온에 대한 분석 결과는 Table 1에 요약하였다.

현장측정자료

본 역의 퇴적암에 분포하는 지하수 중 전기전도도의 평균값은 754 μ S/cm(반야월층) 및 839 μ S/cm(함안층)으로서 함안층에 분포하는 지하수가 다소 높은 경향을 보이는데 주변에 분포하는 팔공산 화강암(평균 304 μ S/cm)이나 안산암질암(평균 458.0 μ S/cm) 지역에 비해 매우 높은 값이다. 지하수 시료의 pH는 6.8~8.3(반야월층), 6.5~8.3(함안층)으로서 중성~약알칼리성을 나타낸다. 대구광역시와 같은 대도시 지역에는 산성우의 영향을 받지만(권세목 외, 1993), 지하로 함양된 낮은 pH의 경우는 퇴적암 중 방해석과 석회질 성분에 의해 주로 수소가 소모되면서 지하수의 pH는 중성~약알칼리성을 띄게 된다. 연구지역 지하수의 Eh 평균값은 반야월층(176.2mV)과 함안층

(151.9mV)이 유사한 분포를 보이지만, 본 역의 남동부에 분포하는 안산암질암(75.3mV)(이인호, 1998)에 비하면 높은 값이다. 현장에서 측정된 Eh 값을 pH에 대하여 도시해 보면, 대부분 전이환경(Transitional environment) 영역에 접시되며 지표수와 유사한 특성을 보이는데, 본 역의 지하수공의 심도는 대체로 100~150m으로서 중간심도로 분류되지만, 지하수공의 케이싱 불량 등으로 인하여 주변의 지표수가 쉽게 유입되는 것으로 판단된다(Fig. 3).

용존이온성분 및 이차광물

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. 이들 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 용존성분의 함량에 반영된다. 함안층과 반야월층의 지하수 중 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 의 평균함량은 각각 5.5mg/L, 46.2mg/L, 86.3mg/L, 26.5mg/L 및 2.2mg/L, 31.1mg/L, 77.3mg/L, 29.1mg/L으로서 함안층에서 다소 높게 나타나며, Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+ 의 함량 순서를 보여준다. 한편, 지하수 중 용존성분 간의 관련성 여부와 그 크기를 파악하기 위하여 화학분석 결과에 대한 산포도를 이용하여 피어슨 상관계수를 계산하였다(Table 2). 여기서 투입된 변수는 대수변환을 하였으며 상관계수에 대한 통계적 유의성은 양측검정(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 보여준다. 이는 $-\Delta F$ 값을 갖는 사장석($\Delta F_{Ab} = -2.67\text{kcal}$, $\Delta F_{An} = -24.92\text{kcal}$)은 풍화를 받게 되면 쉽게 분해가 되지만 양의 값을 갖는 K-장석($\Delta F = 7.65\text{kcal}$)은 분해가 어렵고, K-장석의 용해도($\log K = -5.61$)도 사장석($K_{An} = 18.27$, $K_{Ab} = 1.96$)에 비해 매우 낮으므로 초기 퇴적변질작용의 산물인 일라이트와 카올리나이트에 쉽게 흡착될 수 있기 때문이다(Rose et al., 1979). 이러한 현상은 함안층과

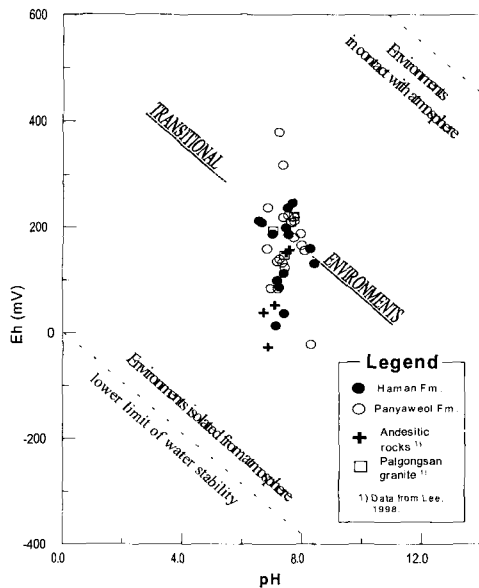


Fig. 3. Eh-pH plots of groundwater in the study area.

Table 2. Matrix of correlation coefficients for the chemical components in the groundwaters of the study area. The data values are expressed as logarithms of each variable

	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SiO ₂	HCO ₃ ⁻	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Fe	Mn
K ⁺	1.000											
Na ⁺	0.312*	1.000										
Ca ²⁺	-0.049	0.379**	1.000									
Mg ²⁺	-0.363**	0.213	0.705**	1.000								
SiO ₂	-0.219	-0.247*	0.051	0.069	1.000							
HCO ₃ ⁻	-0.362**	-0.009	0.612*	0.642**	-0.121	1.000						
F ⁻	-0.020	-0.018	-0.148	-0.279*	0.188	-0.260*	1.000					
Cl ⁻	0.340**	0.387**	0.366**	0.324**	0.017	0.118	-0.102	1.000				
NO ₃ ⁻	0.376**	0.126	-0.005	-0.109	-0.197	-0.197	-0.092	0.541**	1.000			
SO ₄ ²⁻	-0.046	0.480**	0.531**	0.448**	-0.121	0.002	-0.137	-0.014	-0.110	1.000		
Fe	-0.018	0.371**	0.306*	0.366**	-0.223	0.299*	-0.332*	0.252*	-0.199	0.416**	1.000	
Mn	0.041	0.224	0.165	0.102	-0.107	0.143	0.047	0.161	-0.395**	0.034	0.269*	1.000

* p < 0.05 , ** p < 0.01

Table 3. Feldspar and calcite in sedimentary formations in the study area (from data of Kim, 1990)

mineral formation		feldspar (%)			calcite(%)		pyrite
		total	plagioclase	K-feldspar	replaced	pore-filled	disseminated
Haman Fm.	range	23.6~48.6	9.0~29	0.4~23.4	0.4~19.2	0.2~8.4	minor
	avg.	39.2	15	7.5	8.5	5.1	
Panyawoel Fm.	range	18.6~33.8	3.2~12.0	0.0~20.0	1.8~10.2	1.6~4.0	minor
	avg.	24.2	6.9	5.9	5.3	2.7	

반야월층이 속하는 하양층군의 하부 층군인 신동층군의 낙동층, 하산동층, 진주층 지역의 지하수에서도 관찰된다(이인호 외, 1997). 본 역의 지하수 중 K⁺의 함량은 함안층(1.1~17.6mg/L)이 반야월층(0.9~4.8mg/L)에 비해 다소 높은 분포를 보여 주는데 이는 정상석의 분포와 관련이 있는 것으로 사료되며, 기존 자료에 의하면 함안층 중 정상석의 함량(평균 7.5%)이 반야월층(평균 5.9%)에 비해 높은 것으로 조사된 바 있다(Table 3).

일반적으로 퇴적암이 풍화되는 과정에서 사장석이 물과 반응하여 캐올리나이트로 변질되며

Ca²⁺ 등을 용출하게 되지만, 천부 환경에서는 용해도가 높은 탄산염 광물의 용해 및 탄산기의 해리 반응이 보다 중요한 역할을 한다. 본 역에서 방해석은 주로 퇴적암 중의 공극을 채운 세맥상으로 산출되는데(김종근, 1990; 고인석 외, 1994), 그 함량(함안층 13.6%, 반야월층 9%)은 장석류의 함량(함안층 39.2%, 반야월층, 24.2%)에 비하면 적지만 낮은 pH에서 쉽게 분해되므로 Ca²⁺와 HCO₃⁻의 주요 공급원이 된다. 따라서 본 역에 분포하는 지하수 시료들의 Ca²⁺에 대한 HCO₃⁻의 몰 비를 전기전도도에 대하여 도시해 보면, 많은

시료들이 대체로 2의 값을 보여준다(Fig. 4). 하지만 일부 시료들은 상이한 분포를 보여주는데, 이는 본 역 지하수 중 Ca^{2+} 의 기원이 방해석의 용해에 국한되지 않고 사장석, 석고의 용해 및 생활하수 등을 통해서도 국지적으로 공급되는 것으로 사료된다. 특히, 함안층의 HCO_3^-/Ca^{2+} 몰 비는 반야월층에 비하여 대체로 낮은 분포를 보이는데 이는 함안층의 사장석 함량(평균 15%)이 반야월층(평균 6.9%)에 비해 높으므로 지하수 중으로 공급되는 Ca^{2+} , Na^+ 의 함량도 다소 높을 것으로 사료된다(Table 3). 또한 인위적인 오염원의 주요 공급원인 주거, 상업 및 공업지역이 함안층 지역에 광범위하게 분포하는 것도 관련이 있는 것으로 생각된다.

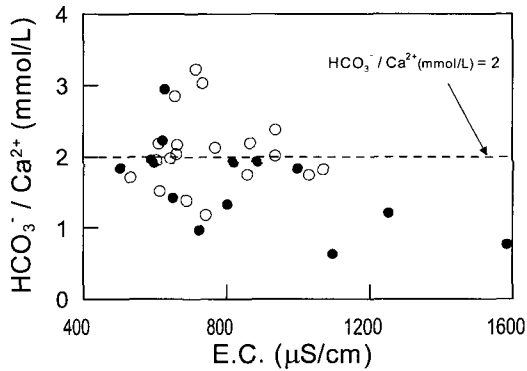
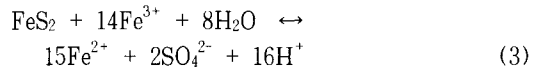
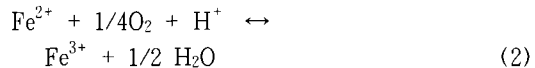
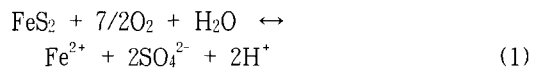


Fig. 4. Relationship between bicarbonate / Ca^{2+} (mmol/L) ratio and electrical conductivity (Symbols are the same as in Fig. 3).

Mg^{2+} 는 규산염 광물 중 각섬석과 흑운모의 용해에 의해 케올리나이트, 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 평균 함량은 함안층(26.5mg/L), 반야월층(29.1mg/L)으로서 주변의 화강암(평균 6.4mg/L)이나 안산암질암(13.8mg/L)(이인호, 1998)에 비하여 매우 높은 분포를 나타낸다. Hsü(1967)에 의하면 $K = [Mg^{2+}]/[Ca^{2+}] > 0.67$ 이면 방해석은 Mg^{2+} 으로 교대되어 돌로마이트화 될 수 있는데, 함안층과 반야월층 지하수의 평균 K 는 각각 0.52, 0.61으로서

교대작용의 가능성을 추정할 수 있다.

일반적으로 지하수 중 SO_4^{2-} 의 기원은 대기 중으로 방출된 연소생성물, 배기가스 등과 같은 외부적 요인에 의한 것으로 연구되어 있는데(Pacheco et al., 1996), 본 역에서는 이러한 인위적인 오염원 외에도 황화광물의 분해와 같은 지질학적인 요인의 규제를 많이 받는 것으로 판단된다. 연구지역 지하수의 SO_4^{2-} 함량의 중간값은 함안층(89.6mg/L)이 반야월층(71.0mg/L)에 비해 다소 높은 경향을 보이는데 이는 주변의 안산암질암(25.0mg/L) 및 팔공산화강암(16.5mg/L) 지역과 비교하면 매우 높은 수치이다(이인호, 1998). 본 역의 SO_4^{2-} 함량 분포와 관련되는 대표적인 지질학적 공급원으로는 황철석과 석고가 있는데, 특히 황철석은 본 연구지역에서 광범위하게 산점상으로 존재하며 파쇄대를 통하여 유입된 용존산소에 의하여 산화되면서 지하수 중에 SO_4^{2-} 가 존재하는 것으로 판단된다(Eq. 1). 따라서 지하수 중 SO_4^{2-} 함량은 $Fe(r=0.416)$ 에 대하여 높은 상관관계를 보여준다. 또한 Fe^{2+} 는 Fe^{3+} 로 산화되고(Eq. 2), Fe^{3+} 는 황철석과 계속 반응하여 낮은 pH를 유지하면서 주변의 광물성분들을 지속적으로 분해하고 지하수의 용존물질의 함량에 영향을 준다(Eq. 3). 이러한 일련의 반응을 거치면서 암석 중 세맥상으로 분포하는 탄산염 광물은 용탈되어 공동이 형성되기도 한다(성익환 외, 1995).



석고는 높은 용해도($K=10^{-4.6}$) 때문에 지표상에서 그 존재를 확인하기는 어렵지만, Ca^{2+} 와의 높은 상관관계($r=0.531$)로 미루어 볼 때 본 역의 지하수 중 SO_4^{2-} 의 높은 함량은 석고의 용해에 의해서도 공급되는 것으로 생각된다. 또한 본 역에서 함안층 지하수 중 SO_4^{2-} 함량이 반야월층에 비하

여 높게 나타나는 것은 함안층의 $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ 몰비가 상대적으로 낮은 분포를 보이는 것과 관련이 있는 것으로 사료된다(Fig. 4).

지하수의 화학적 유형 및 물-암석 반응

본 역의 지하수 시료에 대한 화학분석 결과를 파이퍼 다이어그램(Piper, 1944)에 도시해 보면, 대수층의 주요 구성광물인 사장석과 방해석의 거동에 의해 규제되는 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형과 생활하수와 같은 오염된 지표수의 영향을 받았을 것으로 생각되는 $\text{CaSO}_4\text{-CaCl}_2$ 형의 지하수가 동시에 발달하고 있다(Fig. 5). 토지이용 형태와 관련하여 살펴보면, 금호강 주변의 대규모 공업단지를 포함하는 함안층의 경우는 $\text{CaSO}_4\text{-CaCl}_2$ 형이 우세한 편이며, 상대적으로 녹지공간의 면적이 넓은 반야월층은 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형이 다소 우세하다(Fig. 5). 따라서 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형 지하수에서는 HCO_3^- 의 함량과 높은 상관관계를 보이는 Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 의 대부분이 탄산염광물의 용해 결과로 해석되며 $\text{CaSO}_4\text{-CaCl}_2$ 형에 점시되는 함안층의 지하수 중 특히 Cl^- 의 함량이 높은 시료는 지표 오염원의 영향을 받는 것으로 보이는데, 생활하수의 유입과 같은 외부적인 요인이 우세하게 작용하는 것으로 판단된다. 한편, 천부에서 시작된 방해석의 용해는 심도가 증가할수록 포화지수가 양의 값을 보이며 침전하기 시작하고 사장석의 용해로 인하여 지하 심부에서는 Na^+ 함량이 증가하게 되는데, 이러한 수질 형의

변화는 Piper diagram에서 $\text{CaSO}_4\text{-CaCl}_2$ 형 또는 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형에서 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형과 NaHCO_3 형으로 진화하는 과정을 설명해 준다(이종운 외, 1997). 본 역 주변에 분포하는 팔공산화강암과 안산암질암 지역은 상대적으로 지형고도가 높으며, 주로 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형이 발달하고 있으며(홍영국 외, 1993; 이인호, 1998). 여기서 함양된 지하수가 퇴적암 지역으로 이동한다고 가정하면, 일반적으로 Ca^{2+} 를 소모하는 진화과정을 거치며 지하수의 수질은 NaHCO_3 형으로 변화하겠지만, 본 역과 같이 인구가 밀집한 주거지역에서는 오염된 지표수의 유입을 통하여 Cl^- 와 SO_4^{2-} , Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 이 계속 공급되므로 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 형 지하수는 $\text{CaSO}_4\text{-CaCl}_2$ 형으로 변화하게 된다.

광물 성분 중 사장석, K-장석, 흑운모, 백운모, 녹리석 등과 같은 규산염광물은 물-암석 상호반응 과정에서 수소이온을 소모하면서 pH가 증가하고 지하수에 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 를 공급하면서 캐올리나이트와 같은 이차광물을 생성시킨다(Drever, 1988). 본 연구지역에서 주대수층인 사암의 공극을 충전하고 있는 광물은 캐올리나이트, 방해석, 황철석 등이며, 광물의 분해과정에서 pH가 조절되므로 물-암석 상호반응 경로 모델링에서 pH는 중요한 기준이 된다. Fig. 6은 지하수시료의 pH에 대한 각 광물상의 포화상태를 도시한 것이다. 각 시료의 광물상에 대한 포화지수(saturation index)는 열역학 speciation 프로그램인 WATEQ4F에서 제공하는 열역학 자료를 이용하여 계산하였다. 그 결과, 본 연구지역에 분포하는 지하수 중 Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 의 주요 공급원인 방해석과 돌로마이트는 함안층에서는 대부분 용해성 조건에 있으며 반야월층에서는 과포화 상태에서 침전되는 경향을 보여주고 있는데, 두 광물 공허 pH가 증가함에 따라 포화조건에 근접하고 있다(Fig. 6a, 6b). 본 연구지역 대수층의 대표적인 점토광물인 캐올리나이트는 pH가 감소하면서 침전의 가능성도 높을 것으로 추정되며 대부분 안정된 광물상(mineral phase)을 형성하고 있는 것으로 사료되는데(Fig. 6c). 이는 기존의 X선 회절분석 결과와도 잘 일치하고있다(김종근, 1990). 사장석은 캐올리나이트화 되는 과정에서 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} 은 용탈되고 캐올리나이트는 안정한 광물상

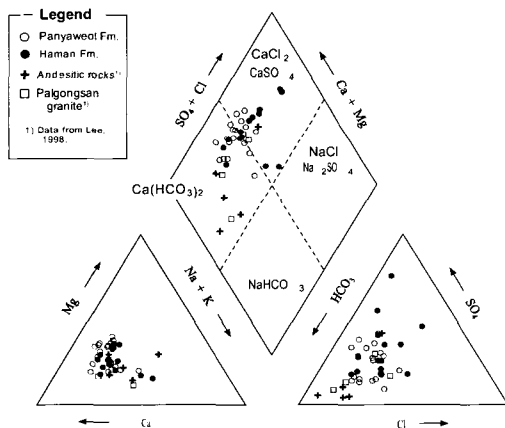


Fig. 5. Piper diagram for groundwaters in the study area.

으로 잔존되며 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 로 용탈된 Ca^{2+} 은 환경 조건에 따라 방해석으로 침전될 수 있다. 실제로 대부분의 사장석은 5.3~16.5% 정도 방해석으로 교대되어 있고 알바이트화 되어 있다(이재영 외, 2000).

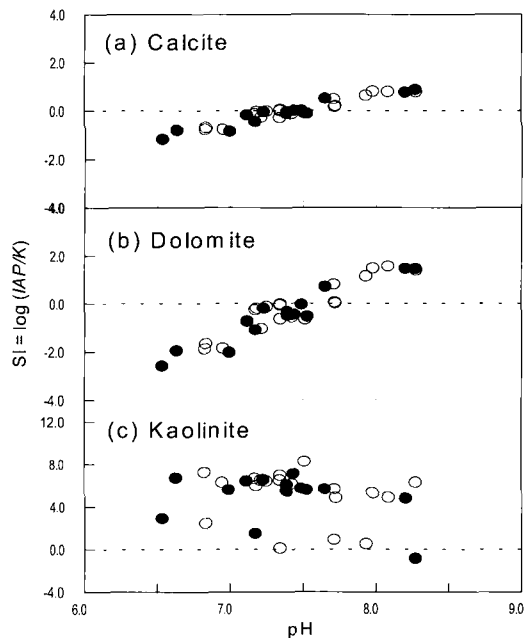


Fig. 6. Saturation indices (S.I.) of calcite, dolomite and kaolinite versus pH of the sampled groundwater in the study area (Symbols are the same as in Fig. 3).

요인분석

전술한 바와 같이 지하수 중 대부분의 용존 성분들의 거동은 대수층을 구성하는 암석의 광물조성에 의해 주로 규제되지만, Cl^- 와 NO_3^- 와 같은 일부 음이온과 중금속은 대기나 오염기원으로 간주되며, 특히 함안층의 일부 지하수공은 지표에서 유입되는 오염원의 영향을 더 많이 받는 것으로 추정된다. 따라서 본 연구에서는 지하수 수질에 영향을 미치는 이러한 요인들과 변수들의 상관성 여부를 보다 정량적으로 검토하기 위하여 분석자료에 대한 R형 요인분석(Factor analysis)을 실시하였다. 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 Fe을 선택하였으며, 각각의 변수가 정규분포를 이루게 하기 위하여 대수변환을 해서 분석에 이용하였다. 분석결과, KMO(Kaiser-Meyer-Oklín Measure)측도는 0.695로서 변수들의 상관관계에 대한 설명 정도가 적당한 것으로 나타났으며, 구상검정치(Test of sphericity)는 133.06으로서 유의수준 5%내에서 요인분석 모형이 적합한 것으로 판단된다. Table 4는 본 역의 지하수시료의 화학조성에 대한 요인분석 결과로 얻어진 주 요인들의 고유벡터와 고유치를 행렬로 표시한 것이다. 여기서 요인분석의 추출모델은 PCA(Principal Component Analysis)방식을, 공통요인의 결정은 1 이상의 고유치를 택하였으며, Varimax법을 이용하여 직교회전(Orthogonal rotation)을 하였다. 회전된 인자적재값(Factor loading)은 적어도 0.3 이상인 경우에 한하여 유의한 수준으로 받아들인다(최종성, 2000). 또한 요인분석의 목적에는 변수들을 요약하고 설명하는 것 이외에도 회귀분석 등에 이용할 적절한 변수를 선정하고 요인점수

Table 4. Factor matrix for the compositional variables of the groundwater samples collected from the study area.

Variable	Factor			Communality
	1	2	3	
$\log \text{SO}_4^{2-}$	0.942	-0.003	0.307	0.926
$\log \text{Na}^+$	0.760	-0.039	0.367	0.714
$\log \text{Ca}^{2+}$	0.738	0.549	0.060	0.750
$\log \text{Fe}$	0.463	0.392	0.032	0.369
$\log \text{HCO}_3^-$	0.524	0.863	-0.144	0.785
$\log \text{Mg}^{2+}$	0.428	0.808	-0.079	0.842
$\log \text{Cl}^-$	0.176	0.422	0.758	0.783
$\log \text{K}^+$	0.119	-0.420	0.733	0.728
$\log \text{NO}_3^-$	-0.094	-0.136	0.691	0.505
Eigenvalue	2.563	2.227	1.794	
% of Variance	28.4	24.6	19.9	
Cumulative %	28.4	53.0	72.9	

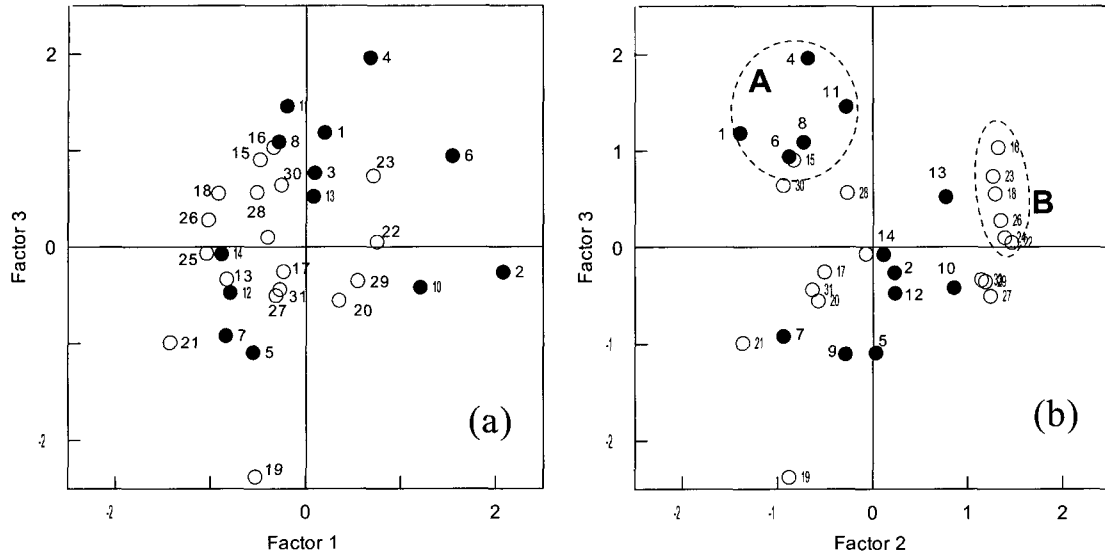


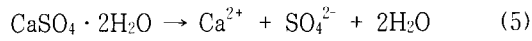
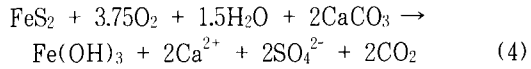
Fig. 7. Plot of factor scores for the groundwater in the study area(Symbols are the same as in Fig. 3).

(Factor score)를 계산하는 것도 포함되는데, 본 연구에서는 타당성이 가장 높은 회귀방식으로 계산된 각 시료의 요인점수를 Group별로 구분하여 요인공간에 도시하였다(Fig. 7).

요인분석 결과에 의하면 3개의 요인이 추출되었으며, 요인 1은 SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Na^+ , Fe 함량으로, 요인 2는 HCO_3^- , Mg^{2+} 함량으로, 그리고 요인 3은 Cl^- , K^+ , NO_3^- 의 함량으로 규제된다(Table 4). 3개 요인의 전체자료 분산에 대한 기여율(% of Variance)은 각각 28.4%(요인 1), 24.6%(요인 2) 및 19.9%(요인 3)으로서 전체 자료에 대하여 72.9%의 설명이 가능하다. 한편, 요인 행렬에서 각 행의 제곱의 합은 communality로서 해당 변수가 요인에 의해 대변되는 분산의 비율을 나타내는데, 변수에 내재된 정보가 3개의 요인들에 의해 설명되는 정도를 나타내므로 일반적으로 요인의 수가 늘어나면 communality도 증가한다(허명희, 2001). 계산 결과에 의하면 SO_4^{2-} , Ca^{2+} , HCO_3^- , Mg^{2+} 의 communality는 각각 0.926, 0.750, 0.785, 0.842로서 추출된 3개의 요인에 의해 각각 92.6%, 75.0%, 78.5%, 84.2% 정도 설명이 가능한데, 이는 연구지역에서 탄산염 광물 및 황철석과 같은 이차광물의 용해 및 침전 반응이 전체 용존성분의 거동에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 의미한다.

전술한 바와 같이 본 역에서는 사장석이 풍화·변질되는 것 이외에 미량이지만 이차광물로 형성되는 탄산염광물, 황철석 등에 의해 Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} 이 지하수 중으로 용출되며 상기 이온들은 높은 상관관계를 보여준다(Table 2). 따라서 요인 1과 요인 2는 지질매체와 물의 반응이 주된 메커니즘이며, 사장석, 탄산염 광물 및 운모류의 용해, 캐올리나이트의 형성과 같은 지질매체와 물의 반응으로 설명이 된다. 요인 1은 사장석의 용해, 황철석의 산화 및 탄산염 광물과의 반응, 탄산염 광물의 용해 및 석고의 용해 등을 규제하는 것으로 판단되며, 특히 본 역의 퇴적암에 분포하는 지하수는 SO_4^{2-} 의 함량이 매우 높은 분포를 보이며 Ca^{2+} ($r=0.531$), Fe($r=0.416$) 등에 대하여 높은 상관관계를 나타낸다. 이는 본 역의 함안층과 반야월층의 대수층의 사암 등에서 흔히 관찰되는 황철석의 존재와 관계되는 것으로 추정되며, 주로 황철석이 산화하면서 주변의 방해석과 반응하는 과정을 통하여 지하수 중에 존재하게 된다(4 식). 또한 지표에서 확인은 어려우나, 일부는 석고의 용해를 통해서도 지하수 중으로 용출되는 것으로 사료된다(5 식).

대구시 퇴적암 분포 지역의 지하수에 대한 환경지화학적 특성



따라서, 본 역의 지하수 중 SO_4^{2-} 의 주 공급원은 요인1과 요인2와 같은 지질학적인 요인에 의해서 주로 규제되는 것으로 판단되며, 전체 지하수 시료 중 요인분석으로 설명이 가능한 72.9%에 대하여 53.0% 정도가 이러한 반응의 지배를 받는 것으로 추정된다. 또한, 요인3 적재값이 0.307로서 요인1과 요인2로 규제되는 다른 변수들에 비하여 높게 나타나므로 인위적인 오염원의 영향도 고려되어야 하며, 이는 주로 대기 중의 SO_2 와 오염된 지표수의 유입 등을 통하여 공급되는데 본 연구 지역에서는 전체 메커니즘에 대하여 20% 정도의 기여율을 갖는 것으로 사료된다.

요인 2는 탄산염광물의 용해를 주로 설명하고 있으며 일부는 전술한 바와 같이 Ca^{2+} 가 Mg^{2+} 로 교대되는 돌로마이트화(dolomitization)의 가능성

도 있다. 요인 2의 두 설명변수는 요인 1에 대해서도 각각 높은 적재값($\text{HCO}_3^- = 0.524$, $\text{Mg}^{2+} = 0.428$)을 보이며 전체 요인에 의한 communality도 각각 0.785(HCO_3^-), 0.842(Mg^{2+})이므로 여러 설명변수 중 Ca^{2+} , Fe와 함께 가장 높은 수준이다. 따라서 요인 2는 탄산염 광물의 용탈 메커니즘을 가장 명확하게 설명하는 요인으로 판단된다.

요인 3은 인위적인 오염원의 유입을 의미하며, 대단위 주거단지에서 배출되는 생활하수와 분뇨, 생산농지에서의 비료의 영향 그리고 공업지역에서 배출되는 폐수 등이 지표에서 유입되는 작용을 설명한다. 본 연구에서는 함안층과 반야월층에서의 오염원의 공간적인 분포를 구분하기 위하여 두 퇴적암 지역의 토지이용 유형(박지상, 1996)을 5가지로 단순화하여 재분류하였다(Fig. 8). 대구시에는 모두 6개의 주요 공업단지(industrial complex)가 있는데 이 중 4개가 함안층에 위치하고 있으며 함안층 전체 면적 대비 공업단지의 면적은 11.6%에 이른다. 또한 함안층 지하수 시료 14개 중 4개는 공업지역(industrial area)에서 채

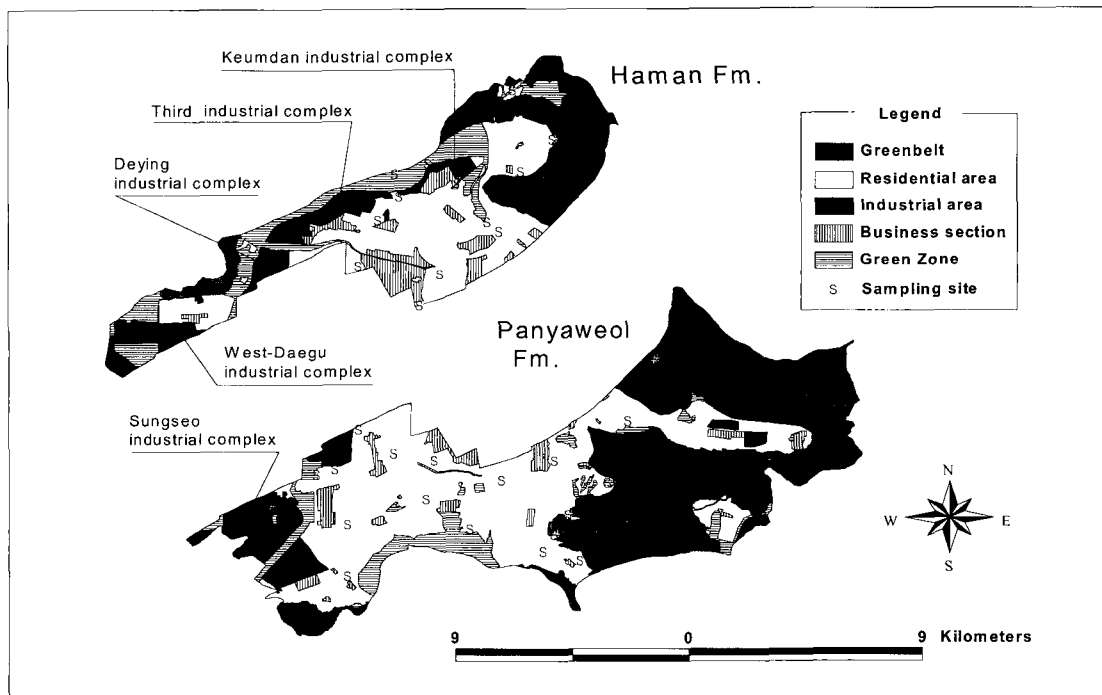


Fig. 8. Landuse map showing the main industrial complex in the study area.

취된 것이며 나머지는 주거지역(residential area)에서 채취를 했지만, 수질 분석결과에 의하면 공업단지 주변의 녹지지역(green zone), 주거지역의 지하수는 공단지역의 시료와 유사한 분포를 보여준다(Table 1). 특히 금호강 주변에 위치하는 검단공단, 3공단, 염색공단에서는 1996년 현재 전체 공업용수 중 7.6%에 해당하는 $10.291\text{m}^3/\text{day}$ 의 지하수를 이용하고 있으며, 전용 면적은 다른 공단에 비하여 적은 편이나 공장에서 발생하는 폐수 발생량($108,879\text{m}^3/\text{day}$)과 폐수방류량($100,524\text{m}^3/\text{day}$)은 본 역에 분포하는 전체 공업지역에서 배출되는 폐수발생량($175,494\text{m}^3/\text{day}$)과 폐수방류량($163,219\text{m}^3/\text{day}$)의 절반 이상을 차지하고 있다(대구광역시, 1998).

한편, 반야월층의 경우는 개발제한구역(43.3%)이 함안층 전체 면적의 절반 정도를 차지하고 있으며, 19개 시료 중 13개소가 대단위아파트 단지과 같은 주거지역에 위치하고 있으며, 공업지역의 면적은 단지 6.4%에 불과하다. 따라서 본 연구지역에서 인위적인 오염원에 대하여 가장 취약할 것으로 추정되는 공간은, 지질학적으로 함안층 하부에 해당하고 토지이용 형태로는 금호강을 따라서 분포하는 공업지역과 근처에 분포하는 주거지역, 상업지역 및 녹지지역(완충녹지)이다. 전술한 세 가지 요인들의 상호 관련성과 기여도를 파악하기 위하여 각 시료의 요인점수를 요인공간에 도시해 보면(Fig. 7), 요인 3에 대한 요인 1의 상관관계는 반야월층의 경우, 뚜렷한 경향을 보이지 않으므로 지질학적 요인과 인위적인 오염의 영향을 구분하기 힘들다(Fig. 7a). 함안층도 요인 축을 따라서 평행하게 정렬되는 경향을 보이지는 않지만, 대체로 요인 3의 점수가 상대적으로 높은 분포를 보이며 요인 1의 점수와 비례하는 경향을 보인다. 따라서 함안층에서는 대수층 사암의 풍화 정도가 심해질수록 지표에서 유입되는 오염원의 영향도 증가하는 것으로 사료된다. 요인 2와 요인 3의 점수를 비교해보면(Fig. 7b), 인위적 오염의 영향을 받는 것으로 추정되는 함안층과 반야월층의 시료들은 상이한 분포 경향을 보인다. 함안층의 경우, 요인 3의 점수가 양의 영역에 점사되는 1, 4, 6, 8, 11번 시료(A)는 주변의 생활하수, 공업 폐수 등의 영향을 주로 받는 것으로 추정되는데,

공간적으로 금호강변의 대규모 공업단지와 그 주변에 위치하는 주거지역 또는 녹지공간에 위치하는 아파트단지와 학교 등이 포함된다(Fig. 8). 마찬가지로 반야월층의 지하수 시료 중 요인 2의 점수가 가장 높은 16, 18, 22, 23, 24, 26번 지하수 시료(B)는 요인 3의 점수가 모두 양의 값을 보이는데, 공간적으로 신천을 경계로 해서 왼쪽에 분포하는 주거지역에 해당하며 대부분 남구 및 중구 지역의 대규모 아파트 단지에 해당한다. 따라서 상기 시료들은 비록 요인 2의 점수가 높은 분포를 보이지만 암석과의 반응보다는 생활하수 등의 유입으로 인하여 용존물질의 함량이 증가하는 것으로 판단된다.

결론

1. 본 연구지역은 경상계 하양층군에 해당하는 곳으로서 암석 중에 탄산염 및 황화광물 등이 다량 포함되어 있으므로 이를 대수층으로 하는 지하수 중 Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- 와 SO_4^{2-} 함량이 높은 분포를 나타낸다. 특히 SO_4^{2-} 의 함량 분포가 매우 높은데, 방해석, 황철석, 석고 등의 용해가 이의 주된 지질학적인 공급원이며, 요인분석에 의하면 배기가스와 같은 인위적인 오염원의 영향도 일부 받는 것으로 판단된다. 함안층 지하수의 $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ 몰비가 반야월층에 비하여 다소 낮은 분포를 보이는 것은 탄산염 광물의 용해 외에도 석고의 용해 및 지표 오염원의 공급 등에 의해서도 규제됨을 의미한다.

2. Piper diagram의 수질 유형에 의하면 본 역의 지하수는 대체로 $\text{CaSO}_4\text{-CaCl}_2$ 형에 점사되므로 지표에 분포하는 오염원의 영향을 많이 받는 것으로 사료되며, 특히 주거지역, 상업지역 및 공업지역이 광범위하게 분포하는 함안층에서는 녹지지역이 많은 반야월층에 비하여 Cl^- , NO_3^- 의 함량이 높은 분포를 보여준다.

3. 열역학 자료를 이용하여 광물의 포화지수와 활동도를 계산해 보면 대부분의 이차광물은 캐올리나이트로서 안정하게 존재하는 것으로 나타나며 이를 제외한 대부분의 장석류, 탄산염 광물 등은 용해성 조건에 놓여있으므로 포화상태에 도달

할 때까지 계속 증가할 것으로 예상된다.

4. 요인분석으로 추출된 요인 1과 요인 2는 탄산염광물의 용해 및 황화광물의 산화 등과 관련되고, 요인 3은 인위적인 오염에 의해 규제된다. 요인 1과 2는 본 연구지역에서 발생하는 수질변화에 대하여 53% 정도 설명이 가능하므로 가장 중요한 요인으로 간주된다. 요인점수 간의 상관성을 검토해 보면, 함안층에서 금호강에 인접해 있는 공업단지 및 공단 주변의 지하수 시료의 오염 정도가 가장 심각한 것으로 나타난다. 최근 대구시의 환경친화 정책 및 폐수 처리시설의 증설로 공업단지 자체에서 발생하는 폐수의 수질은 개선되고 있지만 주변 주거지역 및 녹지지역의 지하수는 여전히 오염의 영향을 받고 있는 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 고인석, 이용태, 김종근, 1994. 경상분지 백악기 상부경상누층군 사암의 퇴적변질, 석유지질학회, 2권, 1호, 19-31.
- 권세목, 박희욱, 정철수 외, 1993. 이온 크로마토그래피법에 의한 빗물중의 이온물질연구, 대구보건환경연구원, 보건환경, 5권, 312-331.
- 김영기, 1976. 반야월층의 지하수 운동에 관한 연구, 광산지질, 9권, 4호, 225-240.
- 김종근, 1990. 대구-건천지역 상부 경상층군 사암의 퇴적변질, 경북대 교육대학원 교육학석사논문, 54p.
- 대구광역시, 1998. 1997년 환경백서, 90-99.
- 박지상, 1996. 지속가능한 도시발전을 위한 개발제한구역의 토지이용성 분석, 경북대학교 석사학위 논문, p.50-58.
- 성익환, 조병욱, 이봉주, 김석중, 김통권, 김원영, 이병대, 황상기, 1995. 지하수 오염방지 및 응용화 기술 연구, 과학기술처 KR-95(S)-2, 459p.
- 윤상규, 김영기, 이동영, 1979. 대구지역 수리지질 조사, 자원개발연구소 조사연구보고, 6권, 165-196.
- 이인호, 1998. 대구지역 지하수에 대한 지화학적 연구, 경북대학교 박사학위 논문, 23-34.
- 이인호, 이재영, 김통권, 1997. 대구시 지하수의 수질에 대한 지화학적 연구, 자원환경지질, 30권, 4호, 327-340.
- 이재영, 김영기, 이진국, 서정율, 1992. 대구시 지하수의 금속 오염에 대한 지화학적 연구, 지질공학, 2권, 2호, 173-200.
- 이재영, 이인호, 김은지, 2000. 대구지역 대수층 사암의 광물상 안정 및 지하수의 화학적 조성과의 관계, 경북대학교 과학교육연구소 논문집, 24, 51-66.
- 이종운, 전호택, 전용원, 1997. 국내화강암질암내 심부지하수의 지구화학적 특성. 지하수환경, 4권, 4호, 199-211.
- 장기홍, 1978. 경상분지의 층서, 퇴적 및 지구조, 지질학회지, 14, 120-135.
- 최종성, 2000. SPSS를 이용한 현대통계분석, 복두출판사, 211-222.
- 허명희, 양경숙, 2001. SPSS 다변량 자료분석, SPSS아카데미, 47-54.
- 홍영국, 박중권, 전호택, 문치성, 김성제, 지세정, 성익환, 김통권, 박희열, 1993. 지질환경에서 유해원소들의 지화학적 분산연구(I). 과학기술처, KR-93(T)-10, 464p.
- Drever, J.I., 1988. The geochemistry of natural waters, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 437p.
- Hsu, K.J., 1967. Chemistry of dolomitic formation. In: Carbonate rocks(Ed. by G.V. Chilingar, H. J. Bissel and R. W. Fairbridge), Elsevier Amsterdam, 169-191.
- Manahan, S.E., 1979. Environmental Chemistry, Willard Grand Press, 23-25.
- Pacheco, F. and Weijden, C. H., 1996. Contributions of water-rock interactions to the composition of groundwater in area with a sizable anthropogenic input: A case study of the waters of the Fundao area, central Portugal. Water Resources Research, v. 32, 914-923.
- Piper, A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis, Transactions of American

이인호, 조병욱, 이병대

Geophysical Union, v. 25, 914-923.

Rose, A.W., Hawkes, H. E. and Webb, J.S., 1979.
Adsorption and ion exchange on colloidal
particles, chap. 8, In: Geochemistry in
mineral exproation, 2nd ed., Academic
Press. 195-205.

투 고 일	2002년 12월 6일
심 사 일	2002년 12월 7일
심사완료일	2003년 2월 3일

이인호

한국지질자원연구원 환경지질연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 산 30번지
Tel: 042-868-3083
e-mail: poksiri2@hanmail.net

조병욱

한국지질자원연구원 환경지질연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 산 30번지
Tel: 042-868-3083
e-mail: cbw@kigam.re.kr

이병대

한국지질자원연구원 환경지질연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 산 30번지
Tel: 042-868-3088
e-mail: blee@kigam.re.kr