

수자원의 수질과 오염에 대한 기반암의 영향 연구 : 통계학적 접근

이병선¹ · 우남칠^{2*}

¹서울시정개발연구원, ²연세대학교 지구시스템과학과

The Effects of Bed-rock Formations on Water Quality and Contamination : Statistical Approaches

Byung Sun Lee¹ and Nam Chil Woo^{2*}

¹Seoul Development Institute, Seoul 137-071, Korea

²Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

This study was objected to identify the difference of water quality and the characteristics of water contamination in adjacent bed-rock areas of Upper Hwajeonni and Guryongsan Formations in Miwon, Choongchungbuk-do, Korea. Water samples showed mainly (Ca, Mg)-HCO₃ type in Upper Hawjeonni Formation and (Ca, Mg)-SO₄ and (Ca, Mg)-HCO₃ types in Guryongsan Formation indicating the enrichment of SO₄ in major compositions. Groundwater quality could be divided into two groups based on the major weathering processes, implied by the ratio of bicarbonate to silica. Carbonate-silicate weathering predominates in Upper Hwajeonni Formation, and silicate weathering in Guryongsan Formation. Stream-water quality also appeared to be controlled by water-rock interaction. Cluster analysis identified three groups of groundwater and four groups of stream-water with distinctive geochemical characteristics. The results of factor analysis indicated that the levels of each chemical constituent in water samples derived from both natural weathering reactions and anthropogenic contamination sources. To delineate the pollution potential of water resources, Modified Pollution Index(M.P.I.) was developed. M.P.I. scores of water samples ranged from -0.08 to 0.18, with mostly positive along the rock quarry in Guryongsan Formation areas. M.P.I. scores appeared to be a useful predictor of metal contamination of water resources.

Key words : Water-rock interaction, Water classification, Cluster analysis, Factor analysis, Modified Pollution Index

이 연구는 충북 미원면 일대 옥천대 흑색세일 분포지의 상부 화전리층과 구룡산층 지역에서 기반암의 종류에 따른 수질과 오염특성의 변화를 규명하려는 목적으로 수행되었다. 배경수질은 상부 화전리층 지역 시료에서는 주로 (Ca, Mg)-HCO₃ 유형이, 구룡산층 지역 시료에서는 SO₄의 상대적인 부화로 인하여, 주로 (Ca, Mg)-SO₄, (Ca, Mg)-HCO₃ 유형이 나타났다. 지하수 시료의 경우, 상부 화전리층 시료에서는 탄산염 및 규산염 광물의 풍화가, 구룡산층 시료에서는 규산염 광물의 풍화가 주를 이루고 있다. 하천수 시료의 경우도 대부분 물-암석 반응의 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 군집분석의 결과, 지하수 시료는 크게 3그룹으로, 하천수 시료는 크게 4그룹으로 분류된다. 요인분석의 결과, 물 시료내의 각각의 화학원소의 함량은 주로 자연적인 풍화의 요인과 일부 인위적인 오염의 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 변형된 오염지수(M.P.I.)를 사용하여 연 구지역의 수질오염을 살펴본 결과 -0.08~0.18 사이로 나타나며, 주로 구룡산층 채석장 지역 시료에서 0이상을 나타내었다. 이 연구에서 도입된 변형된 오염지수는 앞으로 수질 오염 예측 및 관리자를 위한 유용한 도구로 사용될 수 있을 것이다.

주요어 : 물-암석 반응, 수질특성 구분, 군집분석, 요인분석, 변형 오염지수

1. 서 언

충부 옥천대 흑색세일층은 지질매체 내에 유독성 중

금속 물질들이 부화되어 있는 자연발생적 오염원 분포 지역으로, 국내에서는 최근 10여년간 다양한 환경지질 학적인 연구가 진행되어 왔다(전효택과 정명채, 1991;

*Corresponding author: ncwoo@ysgeo.yonsei.ac.kr

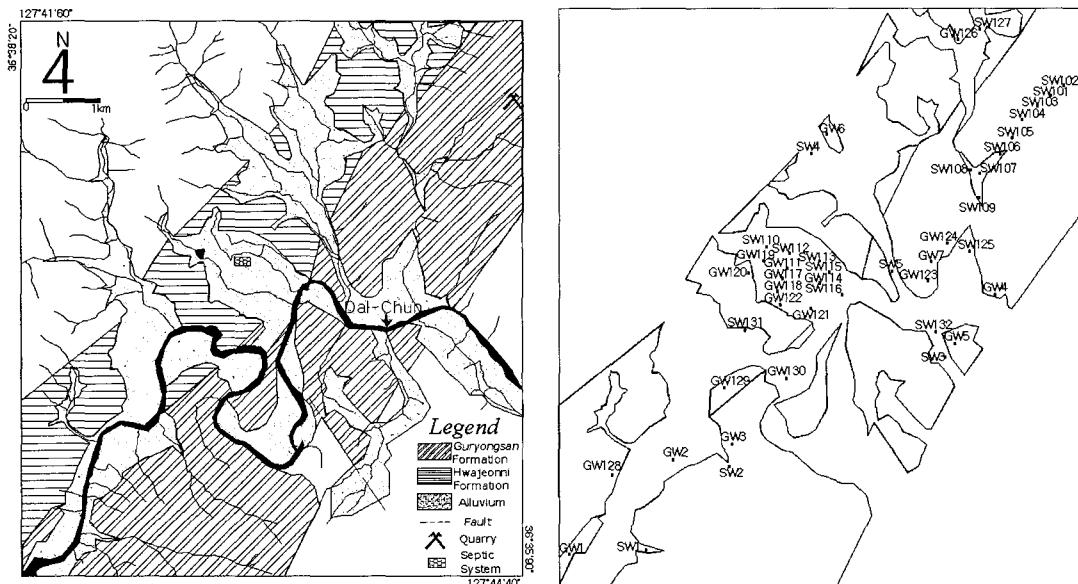
이진수 등, 1996, 1997, 1998; 한정희와 박계현, 1996; 김종신과 전효택, 1997; 이현구와 이찬희, 1997; 전철민 등, 1997; 김형돈 등, 1998; Chon *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 1998a, 1998b; Chon and Oh, 2000; Woo and Choi, 2001; Woo *et al.*, 2002). 이들 연구에서는 옥천대 흑색세일 분포지의 지질매체에 자연적으로 함유되어 있는 방사성 원소 내지 중금속 원소 등이 자연적으로 용출되거나, 폐광산 지역에서의 광산배수 등이 중금속 원소를 함유한 채 방출되는 과정 및 그 메커니즘 규명 등에 대하여 주로 언급하였다. 그러나 그 동안 국내외적으로 군집분석 및 요인분석 등의 통계 기법을 이용한 수리화학 자료의 해석이 꾸준히 보고되어 왔음에도 불구하고(유재영 등, 1994; 전효택 등, 1997; 한석종 등, 1999; 오근창 등, 2001; 한원식 등, 2002; 이봉주 등, 2002; 이인호 등, 2002, 2003; Usunoff and Guzman-Guzman, 1989; Colby, 1993; Ritzi *et al.*, 1993; Reeve *et al.*, 1996; Woo and Choi, 1998; Suk and Lee, 1999; Stetzenbach *et al.*, 2001; Swanson *et al.*, 2001) 동일한 유역내에서 발생할 수 있는 수질의 차이, 특히 교과서에서 당연한 논리로 설명되고 있는 기반암의 특성에 따른 수질변화에 대해서는 연구가 미약한 편이다. 따라서 중부 옥천대처럼 지질매체 내에 오염유발 성분이 자연적으로 부화된 지역에서 각각의 기반암의 종류에 따른 지하수-하천수의 수질 특성 구분이 이루어진다면, 수자원의 관리자와 사용자에게 수자원 개발·이용 및 연계관리 측

면에서 적극적인 편의를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 Nimick and Moore(1991)에 의해 제시된 오염지수(Pollution Index)를, 인간의 건강에 대한 지하수 및 하천수 수질의 위해성 여부를 지시할 수 있도록 알맞게 변형하여 수질 평가에 도입한다면, 지시인자로서의 역할을 충분히 해낼 것으로 기대되어, 이 역시 편의를 도모할 수 있으리라 판단된다. 따라서 이 연구는 충북 청원군 미원면 금관-월릉-옥화리 일대를 따라 발달된 중부 옥천대 상부 화전리층과 구룡산층을 대상으로 기반암의 종류에 따른 지하수 및 하천수 수질의 차이를 규명하고, 또한 변형된 오염지수를 이용하여 지하수-하천수 수질의 오염 가능성 정도를 평가해 보고자 수행되었다.

2. 지질환경

충북 청원군 미원면 일대에 위치한 연구지역은, 자원개발연구소(이종혁 등, 1980)의 미원도록을 인용하면, 월릉리와 옥화리를 포함하는 서쪽 지역은 옥천대 상부 화전리층, 금관리를 주로 포함하는 동쪽 지역은 옥천대 구룡산층이 발달하고 있으며, 서쪽에서 동쪽방향으로 한강의 지류천인 달천이 흐르고 있다(Fig. 1). 연구지역의 중앙부인 상부 화전리층 충적층에는 집단정화시설이 설치되어 있으며, 북동부 구룡산층에는 흑색 슬레이트~천대암을 채취하기 위한 채석장이 위치하고 있다.

이종혁 등(1980)에 따르면, 연구지역 내 상부 화전리



충은 월릉리 구간에서 가장 두터우며, 동시에 분포도 넓다. 이 구간에서는 상하부에 2조의 석회암대가 분포되는데 하부의 것은 심히 변형되어 역전습곡을 형성하고 층간에 많은 예인 소습곡을 관찰할 수 있다. 상부의 석회암은 판상이며 부분적으로 분급층리를 이루며, 하부석회암은 이질부가 증가하여 표면에서는 충식상을 띠기도 한다. 상부 화전리층은 주로 석회암과 석회질 세일이 우세하며, 흑색 슬레이트, 세립사질 세일 혹은 천매암 등 이질원암이 일부 포함된다. 주구성광물은 흑운모, 백운모, 석영, 방해석 그리고 탄질물이며, 여기에 녹나석과 불투명 광물이 수반된다. 그러나 곳에 따라서는 흑운모와 방해석으로만 이루어지는 부분도 있다. 구룡산층은 옥천계를 구성하는 층 가운데 가장 대표적인 이질원암이라고 할 수 있으며, 탄질물 및 함탄층이 발달되어져 있다. 이 연구지역에서는 정합으로 화전리 층을 덮고 있다. 구성암은 주로 천매암, 운모편암, 흑색 슬레이트, 함탄저변성세일등으로 구성되어 있고, 이 가운데 흑색슬레이트~천매암질암이 가장 우세하다. 층 내에는 박층의 암회색 석회암이 협재하기도 하며, 흑색 슬레이트와 암회색 천매암을 주로 하여 유화물에 광염된 세립질 사암이 협재되기도 한다. 주구성암인 흑색 슬레이트나 천매암의 주구성광물은 석영, 백운모, 흑운모이며 그 밖에 녹나석, 점토광물 및 탄질물 등이 소량 함유된다. 석영은 대부분 재결정되어 있는 것이 많으며, 백운모와 흑운모는 섬유상 내지 침상으로 쉽게 왜곡되어 있다.

3. 연구방법

3.1. 시료채취 및 시료분석

2002년 4월 24일~26일 3일간에 걸쳐, 1:50,000 지질도(미원도폭-이종혁 등, 1980)를 기초로 하여, 충북 청원군 미원면 월릉리, 옥화리, 금관리에 배태된 중부 옥천대 내 상부 화전리층과 구룡산층 지역에서, 기반암의 종류에 따른 수질분석을 위해 지하수 및 하천수 시료를 채취하였다.

지하수 시료는 별도의 관측정을 설치할 수 없었기 때문에, 가정용 관정에서 5~10분 정도 양수 후 수온이 일정해진 후에 21개를 채취하였다. 이 가운데 GW2, GW130은 농업용 관정으로서, 100m 이상의 심도의 관정에서 채취되었으므로 기반암을 대표하는 지하수로 판단하여 채취하였다. 그러나 대부분의 시료가 20~30 m 내외 심도에서 채취되었으므로, 염밀한 의미에서 기반암을 대표하는 심부 지하수와 차이가 있을 수 있다.

그러나 현장조사 과정에서, 주변에 노두가 관찰되며 풍화가 비교적 될 되어 있는 기반암 인근 가정에서 시료를 채취하였고, 또한 이 연구지역이 지형적으로 한강의 최상류 힘양지역에 해당되므로 외부 유역으로부터 지하수의 유입이 잘 발생되지 않을 것이라는 판단에 따라, 채취된 지하수 시료를 기반암을 대표하는 지하수로 설정하였다. 하천수 시료는 마을에서 배출되는 오폐수의 영향이 없을 것으로 추정되는 소하천에서 21개를, 그리고 달천 시료를 상부 화전리층 및 구룡산층 지역에서 각각 1개씩 채취하였다(Fig. 1). 채취된 물시료의 시료명은 지하수의 경우 GW로, 소하천 및 달천 시료를 포함한 하천수의 경우 SW로 명명하였다.

각각의 시료는 다중측정센서가 부착된 Hydrolab Minisonde 및 Orion 290A, Orion 115A를 이용하여 현장에서 수온, pH, EC, Eh 등을 측정하였다. 양이온과 음이온 분석을 위한 시료는 0.45 μm Membrane filter를 이용하여 부유물질을 제거한 후, 양이온 시료는 농축질산을 이용하여 pH 2 이하로 보관하였고, 음이온 시료는 4°C 이하로 냉장 보관하였다. 실내 화학분석항목은 음이온($\text{F}, \text{Cl}, \text{SO}_4, \text{NO}_3, \text{PO}_4, \text{NO}_2$)과 양이온($\text{Na}, \text{K}, \text{Ca}, \text{Mg}, \text{Si}, \text{NH}_4$), 그리고 미량 중금속($\text{Li}, \text{Al}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Zn}, \text{Cr}, \text{Cu}, \text{Cd}, \text{Pb}, \text{V}, \text{Ni}, \text{Mo}$)이었다. 음이온은 연세대학교 지구시스템과학과의 IC(DIONEX, DX-80)를 이용하여, 양이온은 전북대학교 지구환경과학과의 IC(DIONEX, DX-500)을 이용하여, 그리고 미량 중금속들은 전북대학교 지구환경과학과의 ICP-AES(SPECTRO Co. Ltd., Spectro Flame Module)를 이용하여 분석하였다. 각 분석항목은 RSD(Relative Standard Deviation)값을 5% 이내로 하여 분석하였고, 표준시료의 분석오차를 5% 이내로 설정하여 분석하였다. 알칼리도는 0.01N-HCl을 이용한 적정법으로 측정하였다(Fishman, 1993). 분석된 시료들의 전하평형도를 살펴보면, 대부분의 시료가 5%내외의 분석오차를 보이나, 일부 시료에서는 10~27% 정도의 분석오차를 보인다(Table 1). 이는 분석되지 않은 무기/유기 이온의 영향 및 저동도 시료에서의 원소간 상대적인 함량의 차이 때문인 것으로 추정된다.

4. 결과 및 토의

4.1. 배경수질의 특성

전반적인 지하수와 하천수 시료의 현장 수질요소들은 Table 1과 같다. 온도는 구룡산층과 상부 화전리층의 지하수 및 하천수 시료 모두 채취기간에 따른 영향

Table 1. On-site properties of water samples in the study area.

| Upper Hwajeonni Formation | | | | | | | Guryongsan Formation | | | | | | |
|---------------------------|-----------|------|------------|---------|------------|-------------|----------------------|-----------|-------|------------|---------|------------|-------------|
| Sample No. | Temp (°C) | pH | EC (µS/cm) | Eh (mV) | Charge (%) | Balance (%) | Sample No. | Temp (°C) | pH | EC (µS/cm) | Eh (mV) | Charge (%) | Balance (%) |
| GW6 | 13.3 | 6.91 | 366.0 | 357 | 11.8 | GW1 | 15.5 | 6.99 | 358.0 | 352 | 2.0 | | |
| GW111 | 13.1 | 6.54 | 270.0 | 267 | 3.6 | GW2 | 13.2 | 7.61 | 120.8 | 79 | 0.8 | | |
| GW114 | 13.4 | 7.25 | 343.0 | - | 9.1 | GW3 | 14.6 | 7.46 | 171.0 | 314 | 0.8 | | |
| GW117 | 13.9 | 6.94 | 422.0 | - | 10.1 | GW4 | 11.1 | 5.96 | 212.0 | 370 | 4.4 | | |
| GW118 | 13.5 | 6.41 | 254.0 | - | 7.0 | GW5 | 9.9 | 5.89 | 144.0 | 367 | 1.1 | | |
| GW119 | 13.8 | 6.60 | 270.0 | - | 8.8 | GW7 | 13.7 | 6.41 | 320.0 | 381 | 2.1 | | |
| GW120 | 13.4 | 7.53 | 372.0 | - | 1.2 | GW123 | 14.0 | 5.38 | 165.3 | 383 | 7.6 | | |
| GW121 | 13.3 | 6.02 | 48.2 | - | 3.8 | GW124 | 13.2 | 6.37 | 294.0 | 365 | 7.4 | | |
| GW122 | 14.1 | 6.70 | 505.0 | - | 5.3 | GW130 | 14.7 | 7.59 | 174.2 | 306 | 6.4 | | |
| GW126 | 13.1 | 6.34 | 318.0 | 352 | 19.5 | SW1 | 10.3 | 6.13 | 75.1 | 351 | 3.9 | | |
| GW128 | 15.3 | 7.97 | 150.9 | 297 | 21.8 | SW2 | 9.6 | 5.63 | 16.4 | 362 | 6.3 | | |
| GW129 | 8.1 | 5.92 | 19.3 | 332 | 27.9 | SW3 | 16.5 | 6.91 | 138.5 | 350 | 0.9 | | |
| SW4 | 13.9 | 6.16 | 75.7 | 384 | 11.2 | SW5 | 17.4 | 7.33 | 139.5 | 376 | 0.7 | | |
| SW110 | 9.9 | 7.34 | 239.0 | 136 | 0.7 | SW101 | 11.9 | 5.14 | 89.8 | 393 | 9.7 | | |
| SW112 | 12.2 | 7.15 | 274.0 | 260 | 1.5 | SW102 | 14.7 | 4.05 | 260.0 | 523 | 17.0 | | |
| SW113 | 14.3 | 7.25 | 264.0 | 310 | 1.5 | SW103 | 13.7 | 3.85 | 750.0 | 500 | 10.4 | | |
| SW115 | 16.3 | 7.99 | 285.0 | - | 0.5 | SW104 | 14.3 | 4.00 | 618.0 | 502 | 12.0 | | |
| SW116 | 16.4 | 8.08 | 306.0 | - | 2.0 | SW105 | 13.2 | 4.24 | 555.0 | 506 | 6.9 | | |
| SW127 | 11.5 | 6.50 | 164.6 | 363 | 5.3 | SW106 | 11.7 | 4.60 | 412.0 | 462 | 5.5 | | |
| SW131 | 15.4 | 7.46 | 133.1 | 342 | 2.6 | SW107 | 11.9 | 4.58 | 423.0 | 575 | 8.4 | | |
| | | | | | | SW108 | 13.5 | 7.73 | 192.7 | 388 | 2.2 | | |
| | | | | | | SW109 | 12.8 | 6.22 | 244.0 | 311 | 11.5 | | |
| | | | | | | SW125 | 14.8 | 6.26 | 213.0 | 360 | 11.9 | | |
| | | | | | | SW132 | 17.7 | 8.36 | 126.4 | 320 | 3.1 | | |
| GW | Min. | 8.1 | 5.92 | 19.3 | 267 | 1.2 | GW | Min. | 9.9 | 5.38 | 120.8 | 79 | 0.8 |
| | Max. | 15.3 | 7.97 | 505.0 | 357 | 27.9 | | Max. | 15.5 | 7.61 | 366.0 | 383 | 7.6 |
| | Avg. | 13.2 | 6.76 | 278.1 | 321* | 10.8 | | Avg. | 13.3 | 6.63 | 217.7 | 324 | 3.6 |
| | Std. | 1.7 | 0.60 | 145.1 | 38* | 8.2 | | Std. | 1.8 | 0.82 | 84.9 | 96 | 2.9 |
| SW | Min. | 9.9 | 6.16 | 75.7 | 136 | 0.5 | SW | Min. | 9.6 | 3.85 | 16.4 | 311 | 0.7 |
| | Max. | 16.4 | 8.08 | 306.0 | 384 | 11.2 | | Max. | 17.7 | 8.36 | 750.0 | 575 | 17.0 |
| | Avg. | 13.7 | 7.24 | 217.7 | 299* | 3.2 | | Avg. | 13.6 | 5.67 | 283.6 | 419 | 7.4 |
| | Std. | 2.4 | 0.66 | 83.0 | 91* | 3.6 | | Std. | 2.4 | 1.46 | 219.3 | 84 | 4.7 |

note: -, undetectable value, *, value based on detectable data

으로 평균 13°C 내외로 나타나고 있다. 구룡산층 하천수에서 나타나는 낮은 pH와 높은 EC는 연구지역 동북부의 채석장 지류의 산성광산배수 시료들의 영향 때문이며, 이를 제외한 나머지 시료들의 pH는 상부 화전리층의 경우 주구성 광물인 방해석 등의 탄산염광물 용해에 의한 완충작용에 의해, 구룡산층의 경우 기반암에 협재된 박층의 석회암의 완충작용 및 탄질물에 의한 유기물 기원의 중탄산이온 때문에 pH의 폭이 중성 범위로 조절되는 것으로 사료된다. Eh는 기반암의 종류와 관계없이 지하수와 하천수 시료 모두 전반적으로 산화환경임을 알 수 있다.

4.2. 배경수질의 유형과 분포

실내에서 분석한 수질자료를 Piper diagram으로 나

타낸 결과, 상부 화전리층의 경우, 주구성 광물인 탄산염 광물의 용해에 의하여 지하수 및 하천수 모두 공통적으로 (Ca, Mg)-HCO₃ 유형의 수질 특성을 보인다 (Fig. 2). 그러나 일부시료(GW121, GW129)에서는 부분적으로 (Ca, Mg)-SO₄ 유형을 나타낸다. GW121, GW129에서 부분적으로 (Ca, Mg)-SO₄ 유형의 수질 특성을 보이는 것은, 저농도 시료에서 비록 미량이지만 Ca, Mg, SO₄가 다른 이온들에 비하여 상대적으로 물 속에 많이 녹아있기 때문에 나타난 영향으로 사료되는 바, 어떠한 독특한 매질특성을 표현한 것으로 해석되지는 않는다.

구룡산층의 경우, 지하수와 하천수 모두(Ca, Mg)-SO₄ 유형과 (Ca, Mg)-HCO₃ 유형으로 나뉘어진다. (Ca, Mg)-SO₄ 유형의 수질 특성은 pH의 감소에 기인

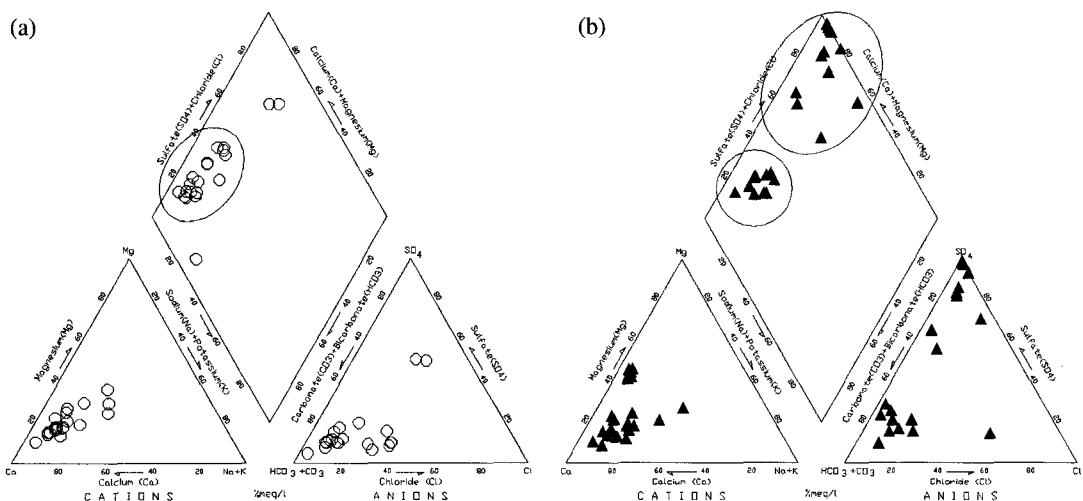


Fig. 2. Piper diagram showing the distribution of major cations and anions in water samples: (a) Upper Hwajeonni Formation and (b) Guryongsam Formation.

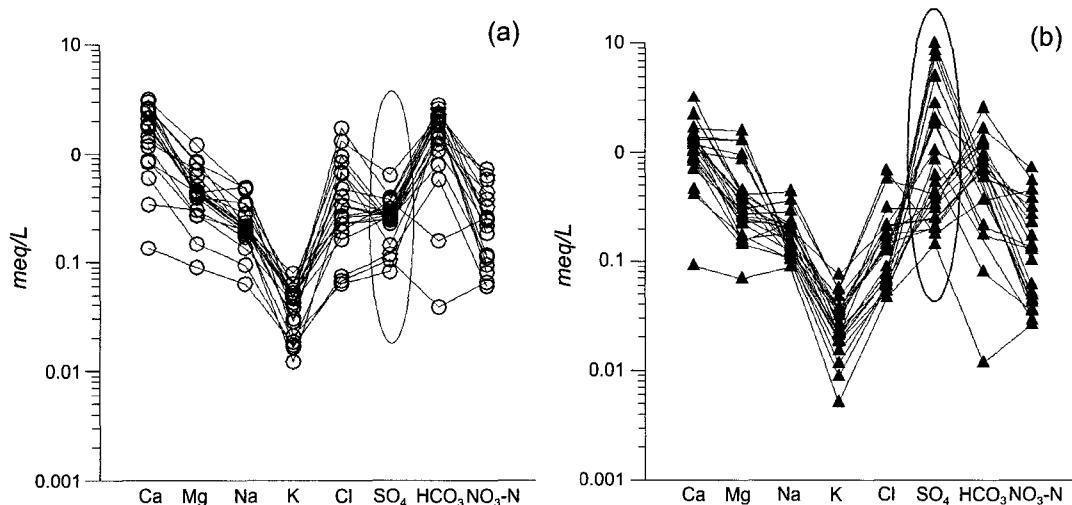


Fig. 3. Schoeller diagram showing the distribution of major cations and anions in water samples: (a) Upper Hwajeonni Formation and (b) Guryong Formation.

한 것이며, 높은 SO₄의 함량은 탄층 내에 존재하는 황화광물의 산화작용에 의한 것으로 해석된다. 이러한 특징은 특히 채석장 주변 하천수 시료에서 두드러지게 나타나고 있다. (Ca, Mg)-HCO₃ 유형의 수질 특성은 구룡산층 내에 협재된 소량의 암회색 석회암 및 탄질물에 의한 유기물 기원의 중탄산이온 성분이 지하수의 주성분을 조성하는데 영향을 미치는 것으로 해석된다.

전술한 두 기반암간의 배경수질의 차이를 구분하는 주된 원소를 알아보기 위해 Schoeller diagram에 주이온과 NO₃-N을 도시해 본 결과, 주로 SO₄가 기반암 간의 수질특성을 구분하는 것으로 나타났으며, 이는 특

히 구룡산층 지하수 시료와 채석장 하천수 시료에서 뚜렷하게 구분됨을 보인다(Fig. 3).

4.3. 지하수 및 하천수의 반응

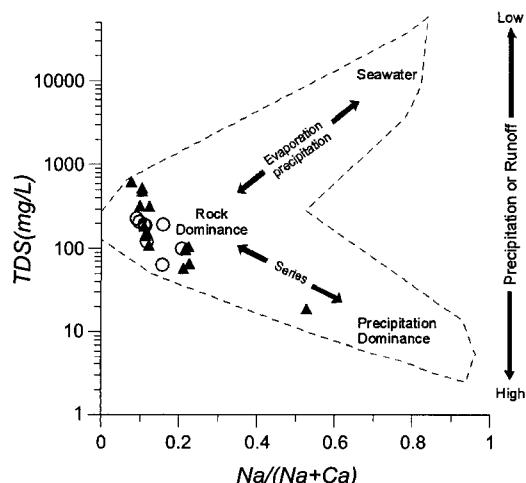
용존이온 중의 중탄산이온(HCO₃)과 규산(SiO₂)의 함량비로부터 지하수에서 주로 일어나는 대체적인 반응을 추정할 수 있다(Hounslow, 1995). 분석 결과, 상부 화전리층 지하수 시료들은 주로 함량비가 5이상으로 나타났고, 반면 구룡산층 지하수 시료들은 주로 함량비 5이하로 나타나 뚜렷한 차이를 보였다. 이는 풍화 과정 중에 상부 화전리층의 경우 탄산염광물 및 규산

Table 2. Results of chemical analysis of water samples in the study area.

Note: n.d., not determined; BDL, Below Detection Limit; WHO, std., World Health Organization drinking water quality standard

Table 3. The ratios of HCO_3 to SiO_2 concentrations in groundwater.

| $\text{HCO}_3/\text{SiO}_2$ | 0~5 | 5~10 | 10~ |
|-----------------------------|---|---|------------------|
| Upper Hwajeonni Formation | GW121, GW129 | GW111, GW114, GW117, GW118, GW119, GW126, GW128 | GW6, W120, GW122 |
| Guryongsan Formation | GW2, GW3, GW4, GW5, GW123, GW124, GW130 | GW7 | GW1 |

**Fig. 4.** The chemical composition of stream-water samples plotted on the Gibbs diagram. Abbreviations: O, Upper Hwajeonni Formation; ▲, Guyongsan Formation.

염광물의 공통적인 풍화작용이, 구룡산층의 경우 규산염광물의 풍화작용이 주된 요인으로 작용하고 있는 것으로 나타났다(Table 3). 그리고 상부 화전리층 시료 가운데, GW121과 GW129에서 그 비가 5이하로 나타나는데, 이는 전술한 바대로 저농도의 시료에서 상대적인 비를 계산하는 과정에서 나타난 결과일 뿐, 특별히 지질매체의 특성을 반영한 것은 아닌 것으로 사료된다. 또한 구룡산층의 GW1의 시료가 부분적으로 10 이상의 비를 보이는 것은, 구룡산층 내에 일부 협재되어 있는 탄산염광물의 풍화 및 탄층의 영향으로 추정된다. 그 동안 보고되어 온 바에 따르면 옥천대 지층은 탄층 및 탄질 세일층을 포함하기 때문에, 유기물 기원의 중탄산 이온의 생성은 연구지역의 수질 특성에 관여하고 있다고 사료된다. 그러나 상부 화전리층은 주로 석회암과 석회질 세일의 호층으로 구성되어 있기 때문에, 이 층 내에서 유기물 기원에 의한 중탄산이온의 생성량은 석회암 및 석회질 세일의 풍화에 따른 중탄산이온의 생성량에 비해 미약할 것으로 사료된다. 구

룡산층의 경우, 탄질물의 함유 범위가 넓고 단속적으로나마 어느 정도의 충분을 유지하는 것으로 보고되기 때문에 유기물 기원의 중탄산 이온의 수질특성에의 기여도는 클 것이라고 추정된다. 그러나 중탄산이온과 규산의 함량이 규산염 광물의 풍화영역으로 치우쳐 도시되는 것으로 살펴볼 때(Fig 6), 탄산염 광물의 풍화와 유기물 기원의 중탄산이온 생성에 의한 수질에의 영향 보다는 규산염광물의 풍화가 수질에 우세한 영향을 끼치고 있음을 판단케 한다. 따라서 중탄산이온과 규산의 함량비로부터 연구지역 지하수의 용존이온을 생성하고 배경 수질을 결정하는 주된 물-지질매체간의 반응은, 상부 화전리층의 경우 탄산염 및 규산염 광물의 공동적인 풍화, 구룡산층의 경우 규산염 광물의 풍화임을 알 수 있다.

하천수 시료의 경우, 용존이온들의 기원을 유추하기 위하여 Gibbs(1970)의 방법에 따랐다(Fig. 4).

4. 수중 TDS(mg/L)의 양은 분석한 모든 이온의 농도의 총합으로 구하였다. 이 결과, 한 시료(SW2)를 제외한 모든 하천수 시료가 암석 기원임을 보였다. 따라서 연구지역의 상부 화전리층과 구룡산층 지역의 하천수 시료의 화학조성은 대부분 기반암의 직접적인 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

4.4. 수질 분석 데이터의 군집분석

전술한 내용에서, 지하수 시료의 경우 용존이온 중의 중탄산이온과 규산의 함량비를 이용하고, 하천수 시료의 경우 Gibbs(1970)의 방법을 이용하여, 각 시료들의 화학적 특성이 기반암의 종류에 따라 구분됨을 언급하였으나, 실제로 연구지역의 수질의 화학 조성이 기반암의 종류에 따라 구분되는지를 판단하기 위해서는 좀 더 객관적인 분석이 필요하다. 그 이유는 시료 채취를 오염 가능성성이 적은 지역에 한정하여 실시하였으나, 실제로는 채취된 시료가 발견되지 못한 오염원으로부터 심하게 오염되어 있을 수 있으며, 이러한 오염은 단순히 화학조성의 검토에 의해 나타나지 않을 수도 있기 때문이다(유재영 등, 1994). 따라서 통계프로그램인 SPSS 10.0을 이용하여, 시료들의 모든 화학분석데이터를 개별 독립변수로 하는 군집분석을 실시하여 객관성을 검토하고자 하였다(Fig. 5). 분석은, 지하수와 하천수 시료로 나누어 실시하였으며, 이 때 재설정된 최대 거리를 25로 설정하였다. 이 결과, 지하수는 크게 세 집단, 하천수는 크게 네 집단으로 분류되었다.

분석 결과, 지하수 시료의 경우, 구룡산층의 일부 시료(GW1)를 포함하는 상부 화전리층 시료들의 그룹 I,

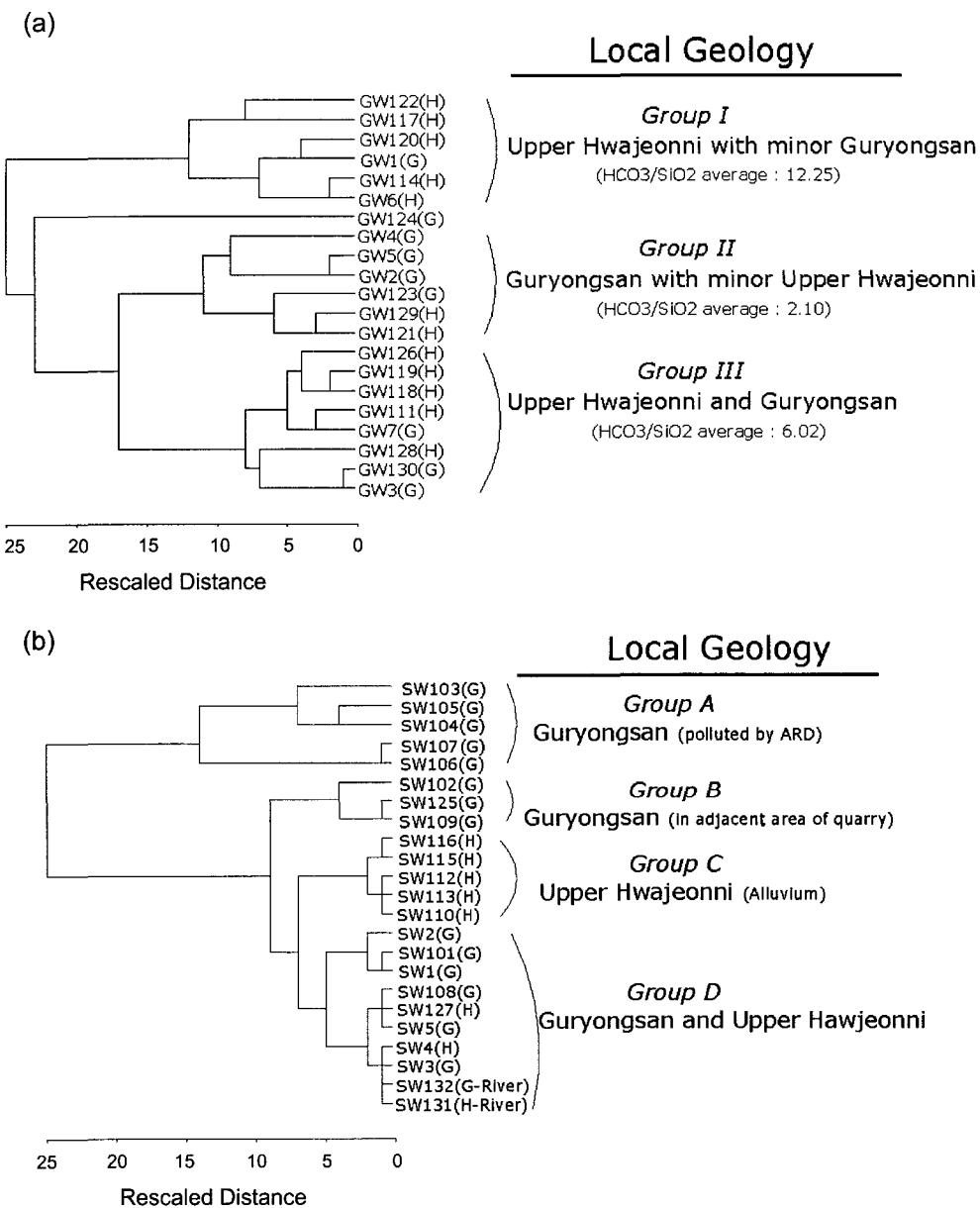


Fig. 5. Dendrogram based on the cluster analysis of water samples: (a) Groundwater; (b) Stream water Abbreviations; H, Upper Hawjeonni Formation; G, Guryongsan Formation; River, Dal-Chun.

상부 화전리층의 일부시료(GW121, GW129)를 포함하는 구룡산층 시료들의 그룹 II, 상부 화전리층 시료들과 구룡산층 시료들이 혼재되어 나타나는 그룹 III으로 구분되었다. 하천수 시료의 경우, 구룡산층 채석장 지류의 산성광산배수를 표현하는 그룹 A, 채석장 지류가 상부 화전리층 지류와 합쳐져 수질 특성이 달라졌음을 표현하는 그룹 B, 상부 화전리층의 충적층 특성을 나

타내는 시료들의 그룹 C, 상부 화전리층 시료들과 구룡산층 시료들이 혼재되어 나타나는 그룹 D로 구분되었다.

결과적으로, 연구지역의 지하수 시료는 중탄산이온과 규산의 함량비에서 나타난 결과와 유사하게 기반암의 종류에 따라 군집이 나누어지는 것을 확인할 수 있었으며(Fig. 6), 따라서 기반암의 종류에 따라 지하수의

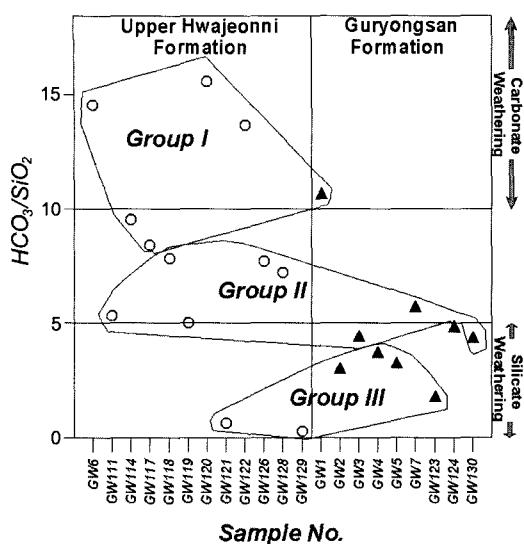


Fig. 6. Groups of groundwater samples compared to the ratio of HCO_3 to SiO_2 and bedrock formations. Abbreviations: ○, Upper Hwajeonni Formation; ▲, Guryongsan Formation.

수질특성이 달라지는 것을 알 수 있었다. 하천수 시료 역시 지하수와 마찬가지로 기반암의 종류에 따라 군집이 나뉘어짐을 알 수 있었으나, 이 경우 상부 화전리 층의 충적층 하천수 시료와 구릉산층 채석장 지역의 산성광산배수 시료의 기여도로 인해 군집이 나뉘어지는 것으로도 추정할 수 있다. 종합하면, 지하수와 하천수 모두 비교적 기반암의 종류에 따라 수질특성이 다르게 나타남을 알 수 있었다.

4.5. 수질 분석 데이터의 요인분석

연구지역의 수질 특성이 과연 기반암의 어떠한 요인에 의하여 영향을 받는 것인지, 기반암 풍화의 원인 외에 다른 요인이 수질의 화학 성분에 대한 영향을 미치고 있는지, 그리고 각각의 세분화된 요인 내부의 구체적인 의미가 무엇인지를 알아보기 위하여 요인분석을 실시하였다. 이를 위해, 지하수 및 하천수의 화학성분 가운데 주양이온(Na, K, Ca, Mg), 주음이온(Cl, HCO_3 , SO_4 , F, NO_3-N)을 독립변수로 선정하였으며, 기타 미량 중금속들은 분석에서 제외시켰다. 미량 중금속들을 분석에서 제외시킨 이유는 이들을 독립변수로 투여할 경우 주된 변수가 결과에 영향을 미칠 수 있는 영향을 감소시키기 때문이다. 또한 지하수 및 하천수 시료 모두를 하나의 범주로 놓고 분석을 실시하였는데, 이는 지하수 및 하천수를 각기 분석했던 경우 KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)측도가 신뢰도 유무 결정수

Table 4. Results of factor analysis for water samples from the study area.

| Variable | Factor | Factor | Factor |
|----------------|--------|--------|--------|
| HCO_3 | 0.799 | -0.172 | -0.239 |
| SO_4 | -0.293 | 0.925 | 0.180 |
| Na | 0.816 | -0.128 | 0.195 |
| K | 0.499 | -0.044 | -0.731 |
| Ca | 0.803 | 0.263 | -0.159 |
| Mg | 0.281 | 0.921 | 0.089 |
| Si | 0.193 | 0.418 | 0.828 |
| Cl | 0.848 | -0.029 | 0.029 |
| NO_3-N | 0.689 | -0.120 | -0.125 |
| F | -0.230 | 0.937 | 0.166 |
| Eigenvalues | 3.646 | 36.459 | 36.459 |
| % of Variances | 2.889 | 28.890 | 65.349 |
| Cumulative % | 1.426 | 14.260 | 79.609 |

준인 0.5 이하로 떨어지는 결과를 보였기 때문이다. 지하수 및 하천수 시료를 동시에 하나의 범주로 보고 요인분석을 할 수 있었던 또 다른 이유는, 지하수와 하천수 시료 모두 화학자료 분석과 군집분석에서 나타난 대로 기반암 종류에 따른 풍화의 영향을 받고 있음이 확인되었기 때문에, 지하수와 하천수 시료를 각기 다른 범주에서 분석하지 않아도 요인분석이 개연성을 떨 수 있다고 판단되었기 때문이다. Table 4에는 각 시료의 화학 성분에 대한 R모드 요인 분석 결과 얻어진 주요 요인들의 고유벡터(Eigenvector)와 고유치(Eigenvalue)들을 행렬로 표시하였다. 각 요인들은 주성분 분석법(Principal Component Analysis)을 이용하여 구한 후, 해석을 용이하게 하기 위하여 베리맥스(Varimax)법으로 회전시킨 후 요인을 얻었다.

요인 I은 Cl, HCO_3 , Na, (K), Ca, NO_3-N 성분이, 요인 II는 SO_4 , Mg, F 성분이, 요인 III은 K, Si 성분이 주요 성분임을 보여주며, 이들의 전체 자료 분산에 대한 기여율은 각각 36.5%, 28.9%, 14.3%이다. 이러한 각 요인들의 의미를 알아보기 위해 화학 성분들간의 상관관계를 살펴볼 필요가 있다.

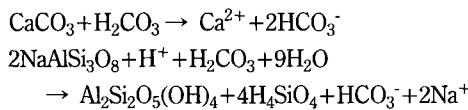
요인 I은 99.99%의 유의수준에서 HCO_3 과 Ca간에 상관계수가 0.819로서 비교적 높은 상관관계를 보이고, HCO_3 과 Na, Cl과 NO_3-N 은 상관계수가 각각 0.551, 0.505로서 중간정도의 상관관계를 보이며(Table 5), 이들 화학 원소쌍들은 회귀직선상에서 정의 상관관계를 드러낸다(Fig. 7). 이들을 제외한 나머지 원소들간에는 상관관계는 높게 나타나지만, 회귀직선으로 도시했을 경우 한 두 시료의 영향으로 인하여 높은 상관관계를 나타낼 뿐 비례관계는 성립하지 않는다. HCO_3 과 Ca,

Table 5. Correlation matrix of water constituents

| | HCO ₃ | SO ₄ | Na | K | Ca | Mg | Si | Cl | NO ₃ -N | F |
|--------------------|------------------|-----------------|---------|----------|---------|---------|--------|--------|--------------------|-------|
| HCO ₃ | 1.000 | | | | | | | | | |
| SO ₄ | -0.488* | 1.000 | | | | | | | | |
| Na | 0.551* | -0.310 | 1.000 | | | | | | | |
| K | 0.437** | -0.300 | 0.406** | 1.000 | | | | | | |
| Ca | 0.819* | -0.030 | 0.426** | 0.347 | 1.000 | | | | | |
| Mg | 0.017 | 0.775* | 0.152 | 0.011 | 0.397** | 1.000 | | | | |
| Si | -0.123 | 0.482* | 0.227 | -0.446** | 0.147 | 0.458** | 1.000 | | | |
| Cl | 0.530* | -0.263 | 0.726* | 0.417** | 0.533* | 0.300 | 0.089 | 1.000 | | |
| NO ₃ -N | 0.443** | -0.293 | 0.392** | 0.461** | 0.511* | 0.033 | 0.060 | 0.505* | 1.000 | |
| F | -0.348 | 0.949* | -0.235 | -0.261 | 0.017 | 0.796* | 0.493* | -0.256 | -0.311 | 1.000 |

*p<0.001; **p<0.01

HCO₃와 Na의 상관관계는 각기 연구지역 상부 화전리층과 구릉산층에 협재한 탄산염 광물의 용해와 앤바이트(albite)가 카올리나이트(kaolinite)로 용해되는 과정을 설명하는 것으로 사료된다.

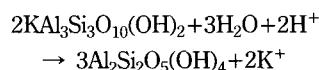


Cl과 NO₃-N은, GW117과 GW122를 제외한 나머지 시료에서 두 성분간에 양호한 상관관계를 보인다. Cl의 기원은 일반적으로 흑운모같은 광물 격자 내에 미량으로 존재하는 염화물이나, 증발암, 그리고 유체포유물로부터의 공급, 맷틀기원 그리고 인위적인 기원등을 들 수 있다(Rogers, 1989). 그리고 Cl은 오염되지 않은 일반수에서 SO₄보다 낮게 나온다(Hem, 1992). 연구지역 44개 물 시료 가운데 9개 시료에서 Cl의 농도가 SO₄의 농도보다 높게 나왔다. 이들 9개 시료는 모두 가정용 천부 지하수 시료이며, 그 가운데 6개 시료는 상부 화전리층 충적층 지역의 시료이다. 따라서 Cl의 농도는 가정의 생활하수나 액비성분과 같은 인위적인 오염의 영향을 일정부분 받고 있는 것으로 사료된다. 또한 GW117과 GW122는 집단 정화조 주변 가정용 천부 지하수 시료로서, Cl을 과다 포함하는 가정용 하수의 영향으로 추세선에서 멀어진 것으로 추정된다. 유아에게 청색증을 일으킬 수 있는 NO₃-N은 대기중 질소, 식물 기원, 토양 내 유기물, 가축/인간의 분뇨, 지표의 생활하수나 비료성분 등에서 기원하는 것으로 알려져 있다. 연구지역 물 시료 내 Cl과 NO₃-N상관관계(Table 5)는 NO₃-N 역시 Cl과 마찬가지로 지표 오염원으로부터 함께 유입되었을 가능성을 지시한다. 그러나 더욱 정확한 NO₃-N의 오염원 규명을 위해서는 추후 질소 동위원소에 대한 연구가 필요할 것이다. 이

로 살펴볼 때, 요인 I은 주로 탄산염광물과 규산염광물의 풍화, 그리고 자연적이고 인위적인 원인에서 기인하는 Cl 및 NO₃-N의 영향을 설명하는 요인으로 사료된다.

요인 II는 99.99%의 유의수준에서 SO₄와 Mg, SO₄와 F, Mg와 F간에 상관계수가 각각 0.775, 0.949, 0.796으로서 비교적 높은 상관관계를 보인다(Table 5). 그러나 이들을 회귀직선상에 표시해 보면 구릉산층 채석장 지류의 몇 개 하천수 시료의 영향으로 높은 상관관계가 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 상부 화전리층 시료를 제외한 구릉산층 시료만으로 각 성분들간의 상관관계를 도시해 보면, 이 경우 SO₄와 Mg, SO₄와 F, Mg와 F간에 비교적 좋은 상관관계를 보이는 것을 알 수 있다(Fig. 7). 이는 황화광물의 풍화가 Mg를 포함하는 탄산염 광물과 F를 포함하는 형석 및 인회석등을 공용해 시킴에 따라 생긴 결과로 추정된다. 따라서 요인 II는 황화광물의 풍화를 설명하는 요인으로 사료된다.

요인 III은 K, Si를 설명하는 요인으로서, 두 성분간에는 유의수준 99.99%에서 상관관계가 드러나지 않는다. 다만 K와 Si간에는 99%의 유의수준에서 -0.446의 상관관계를 보이는데(Table 5), 이는 백운모가 카올리나이트로 풍화되는 반응을 이용하여 설명할 수 있다. 또한 K가 오염유발 성분인 Cl, NO₃-N등과도 역시 회귀직선상에서 상관관계를 보이지 않는 점으로 미루어 볼 때, 아래의 물-암석 반응이 지하에서 일어나고 있음을 비교적 추정 가능하다.



따라서 요인 III은 상부 화전리층과 구릉산층의 주구성광물인 백운모의 풍화를 설명하는 요인임을 알 수 있다.

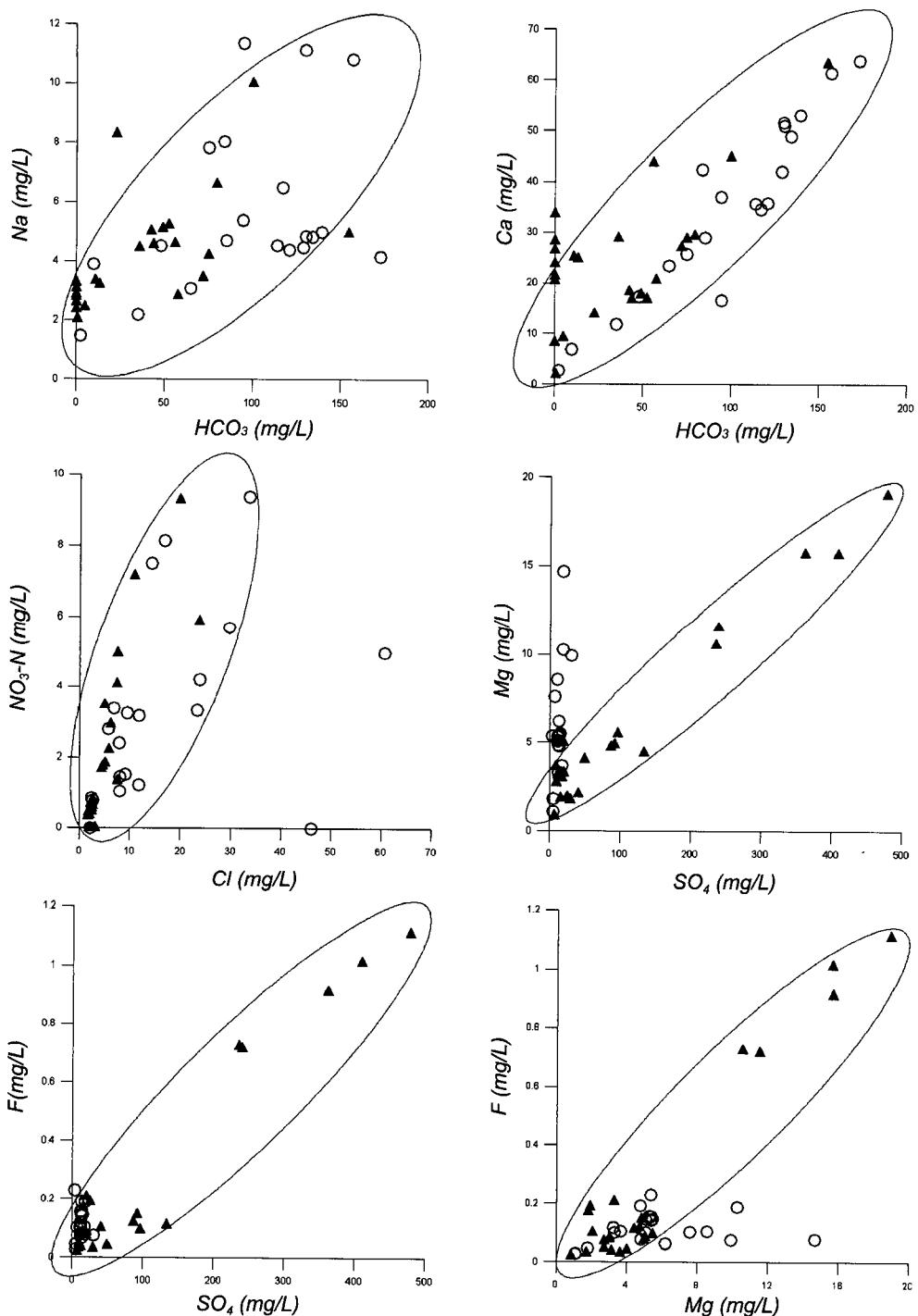


Fig. 7. Correlations among the constituents of water samples. Abbreviations: O, Upper Hawjeonni Formation; ▲, Guryongsan Formation.

Fig. 8에는 전체 물 시료에 대하여 계산된 요인의 고유벡터를 이용하여 채취된 시료의 득점을 계산하고, 이

를 바탕으로 Factor I와 Factor II의 관계로 표현한 요인공간(factor matrix)상에 시료의 위치를 표시하였다.

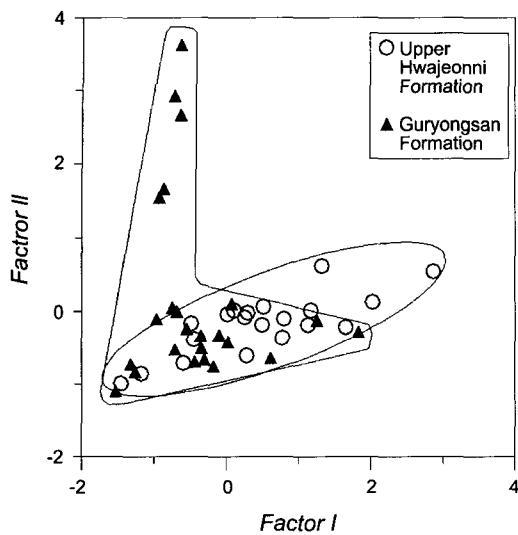


Fig. 8. Plot of factor scores of the water samples in factor space.

상부 화전리층 시료의 경우, 주로 탄산염 및 규산염 광물의 풍화와 인위적인 Cl^- 과 NO_3^- -N의 오염을 설명하는 Factor I축을 따라서 나열되어 있다. 반면, 구룡산층 시료의 경우 황화광물의 풍화를 설명하는 Factor II축을 따라 나열되는 동시에 탄산염 및 규산염 광물의 풍화의 영향을 받아 Factor I축을 따라서도 나열되어 있다. 이러한 특징은 앞서 살펴본 Piper 및 Schoeller diagram 상에 도시된 각 층의 배경수질의 특성과도 유사한 결과를 보인다.

이상의 통계분석 결과를 종합해 보면, 이 연구지역의 지하수 및 하천수의 수질은 수리화학적 특성의 주요부분이 기반암 내 광물의 용해에 의해 조절되고 있으며, 또한 각각의 수질 특성은 기반암의 종류에 따라 규제되고 있음을 알 수 있다.

4.6. 변형된 오염지수를 이용한 수질오염 고찰

Nimick and Moore(1991)는 범람원 퇴적물 내 중금속 물질들이 물과의 반응에 의하여 용출되었을 때, 수생 생물의 건강에 위해를 끼칠 수 있는 정도를 평가하기 위해 오염지수(Pollution Index: PI)를 사용하였다. 따라서 Nimick and Moore(1991)의 PI에서는 수생 생물에 독성을 끼치지 않는 Mn등은 오염지수 계산에서 제외시키고, Al, As, Cd, Cu, Fe, Ni, Zn 등은 수생 생물에 독성을 끼치는 바 계산에 포함하였다. 계산을 위한 수식은 아래와 같고, 계산된 PI값이 0이상이며 위해성 수준을 넘어섰음을 의미하며, 0이하는 그렇지 않음을 의미한다.

$$\text{Pollution Index (P.I.)} = \frac{\sum \log_{10} \left(\frac{\text{metal concentration in water extract}}{\text{hazard level for metal}} \right)}{\text{number of metals}}$$

이 연구에서는 Nimick and Moore(1991)가 대상으로 한 수생 생물에 대한 위해성 여부를, 인간건강에 대한 위해성 여부라는 개념으로 변형된 오염지수 (Modified Pollution Index; M.P.I.)를 산정하여, 수질 오염 평가에 도입하였다. 변형된 오염지수 계산은, 인간건강에 대한 위해성의 가장 보편적인 기준을 도입하고자 세계보건기구(World Health Organization; W.H.O.)에서 지정한 먹는물 내 건강에 유의한 화학물질들을 대상으로 하였다. 이 연구에서 수행한 분석항목 가운데, 세계보건기구의 수질 기준에 해당하는 원소는 Na, Cl, SO_4^{2-} , NO_3^- -N, NO_2^- , NH_4^+ , Al, Cd, Cr, Cu, F, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn 이었으며, 이 가운데 NO_2^- , NH_4^+ , Li, Mo은 모든 시료에서 검출한계 이하로 나타났으므로 대상에서 제외하였다. 변형된 오염지수 계산을 위한 수식은 아래와 같으며, P.I.와 마찬가지로 M.P.I.도 계산된 값이 0이상이면 인간 건강에 위해한 수준임을 의미하며, 0이하는 그렇지 않음을 의미한다.

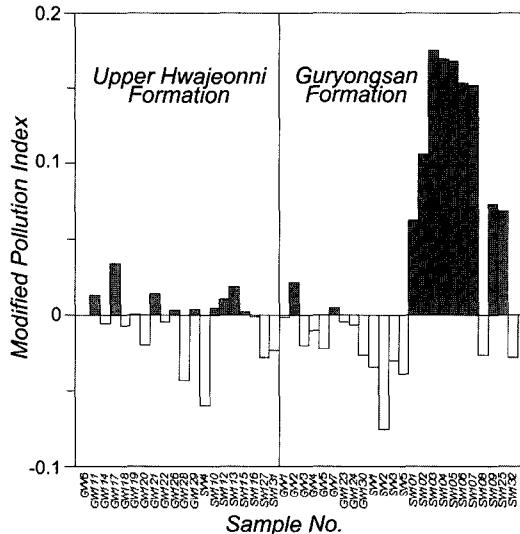
Modified Pollution Index (M.P.I.)

$$\text{Modified Pollution Index (M.P.I.)} = \frac{\sum \log_{10} \left(\frac{\text{hazardous chemical constituents concentration in water}}{\text{hazard level for hazardous chemical constituents}} \right)}{\text{number of hazardous chemical constituents}}$$

Fig. 9에는 변형된 오염지수 계산식을 사용하여 계산되어진 모든 시료의 M.P.I.값을 도시하였다. 연구지역의 M.P.I.는 -0.08~0.18 범위로 나타났으며, 구룡산층 채석장에서 발생한 ARD(Acid Rock Drainage)의 영향은 채석장 앞 1차 수계에 인간 건강에 심각한 위험을 가할 수 있는 오염을 진행시키고 있음을 알 수 있었다. Table 6에는 M.P.I. 값이 0이하로 나타나는 시료들과 0 이상으로 나타나는 시료들을 크게 두 그룹으로 나누어 분리한 후, 개별 원소마다의 M.P.I.값을 도시하였다. Table 6에서 볼 수 있듯, Al, Mn, Ni은 M.P.I.값에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났으며, SO_4^{2-} , F, Fe, Cd, Pb등은 중간정도의 영향을, 그리고 Cl, NO_3^- -N, Na, Zn, Cr, Cu은 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이는 각 시료에서 검출된 원소들의 농도 대비 세계보건기구의 수질기준치 값이 Al, Mn, Ni등의 원소에서는 크게 나타나고, SO_4^{2-} , F, Fe, Cd, Pb등은 중간정도, 나머지 원소에서는 거의 나타나지 않았기 때문으로 판단된다. Fig. 10에는 M.P.I. 값이 0이하로 나타나는 시료들과 0이상으로 나타나는 시료들을 구분하여 pH를 x

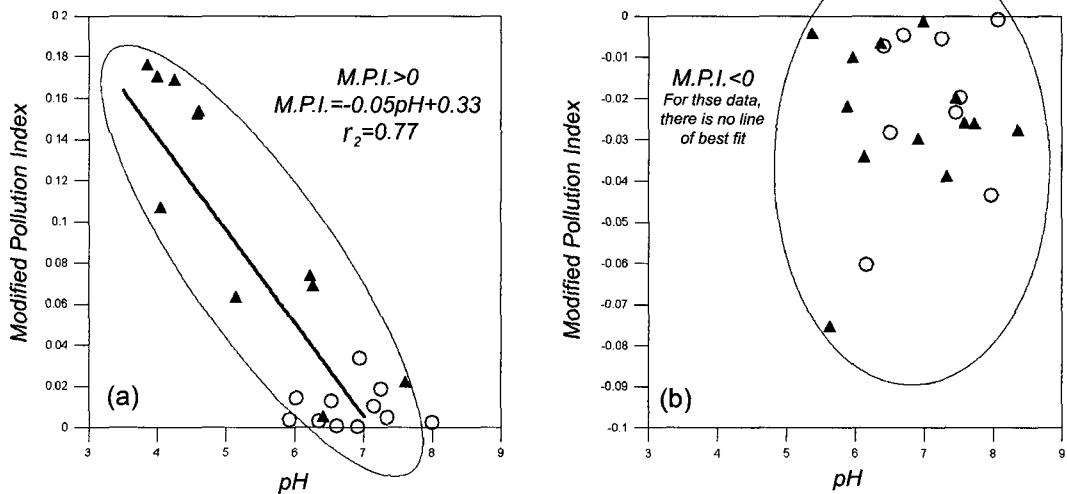
Table 6. Average M.P.I. values of chemical constituents.

| | Al | Mn | Ni | SO_4 | F | Fe | Cd | Pb | Cl | $\text{NO}_3\text{-N}$ | Na | Zn | Cr | Cu | M.P.I. |
|--|-------|------|------|---------------|------|------|------|------|------|------------------------|------|------|------|------|--------|
| Average value of negative M.P.I. samples | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.08 | 0.06 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.04 | 0.25 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -0.02 |
| Average value of positive M.P.I. samples | 35.69 | 4.52 | 7.41 | 0.41 | 0.20 | 0.51 | 0.16 | 0.59 | 0.04 | 0.22 | 0.02 | 0.06 | 0.01 | 0.02 | 0.06 |

**Fig. 9.** Modified Pollution Index for the water samples in this study.

축으로 하는 회귀직선상에 각기 도시하였다. 이 결과, M.P.I. 값이 0이상으로 나타나는 시료들은 pH에 대하여 부(-)의 상관관계($r^2=0.77$)를 보이는 반면, M.P.I.가

0이하로 나타나는 시료들은 pH와 무관하게 도시됨을 알 수 있었다. 이는 M.P.I. 값이 0이상으로 나타나는 시료들의 경우, 주로 pH가 낮은 산화환경에서 용탈이 쉽게 일어나는 중금속들의 영향을 많이 받은 시료들이기 때문에, 이러한 원소들의 영향 때문에 나타난 결과로 판단된다. Fig. 11에는 앞에서 실시한 군집분석의 결과에 따라 지하수와 지표수 시료 그룹을 나눈 후, 이들 그룹과 M.P.I.값과의 상관관계를 알아보고자 하였다. 전술한 바대로 M.P.I.값은 주로 pH와 관계된 중금속류의 함량의 영향을 많이 반영하는 값이기 때문에, 주이온의 함량에 주로 영향을 받는 군집분석의 결과와는 다소 차이를 가짐을 예상할 수 있다. 이러한 예상은 Fig. 11의 지하수 시료에서 확인할 수 있었으나, 하천수의 경우에는 군집분석의 결과와 비교적 일치함을 보였다. 이는 하천수 시료에서는 산성~약알칼리성 범위의 다양한 pH에 따른 중금속 함량의 차이가 대폭 반영된 것으로 판단된다. 따라서 이러한 변형된 오염지수의 결과는, 음용수 취수자와 관리자로 하여금 이 연구지역 수질의 pH에 대한 정보만을 가지고 있을 경우에도 수질의 인간건강에 대한 위험성 여부를 짐작케 하는 오염지시인자로

**Fig. 10.** Scatter plots of modified pollution indices according to pH. (a) positive M.P.I. and (b) negative M.P.I.; Abbreviations: ○, Upper Hawjeonni Formation; ▲, Guryongsan Formation.

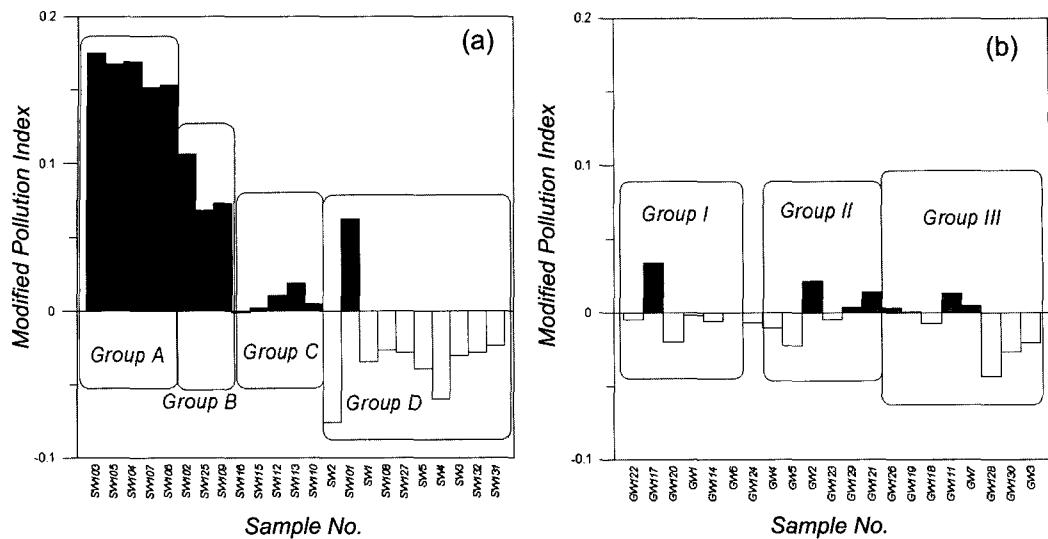


Fig. 11. M.P.I. of stream- and groundwater samples compared with groups resulted by cluster analysis.: (a) stream-water samples (b) groundwater samples.

서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

수질자료를 Piper 및 Schoeller diagram으로 도시하고, 물-암석 반응 및 통계분석으로 분석한 결과, 상부 화전리층 시료들은 $(Ca, Mg)\text{-HCO}_3$ 유형으로, 구룡산 층 시료들은 $(Ca, Mg)\text{-SO}_4$ 및 $(Ca, Mg)\text{-HCO}_3$ 유형으로 나타나며, 두 층이 분포하는 지역의 배경수질 차 이를 결정하는 주된 원소는 SO_4 인 것으로 나타났다. 상부 화전리층 지하수 시료들은 주로 탄산염 및 규산염 광물의 공통적인 풍화작용이, 구룡산층 지하수 시료들은 주로 규산염 및 황화광물의 공통적인 풍화작용이 주된 요인으로 작용하고 있었다. 하천수 시료의 경우 Gibbs의 방법에 따라 도시해 본 결과, 연구지역의 하천수 시료의 화학조성은 대부분 기반암의 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 결과적으로 연구지역의 지하수 및 하천수의 수질특성은 기반암의 종류에 따라 규제되고 있었다.

연구지역의 수자원의 수질오염 가능성을 예측하기 위해 변형된 오염지수(M.P.I.)를 도입하여 평가한 결과, 변형된 오염지수는 -0.08~0.18 범위로 나타났다. 변형된 오염지수가 0이상으로 나타나서 오염가능성을 지시하는 시료들은 구룡산총 지역의 채석장 인근 시료였으며, 이 지역에서는 산성광산배수의 영향이 수질오염 가능성으로 나타나고 있다. 결과적으로 채석장 인근지역에서는

증금속 원소들의 용해로 인하여 pH에 대하여 부(-)의 상관관계($r^2=0.77$)를 보였다.

지하수·하천수 각각의 수질특성은 지역적인 기반암 종류에 따른 영향이 명확히 나타나며, 변형된 오염지 수의 결과는 황화광물이 부화된 기반암지역에서는 pH에 대한 정보만으로도 수질의 대략적인 오염여부를 짐작케 한다. 이러한 연구의 결과는 수자원의 관리자와 사용자에게 수자원 개발·이용 및 연계관리 측면에서 적극적인 편의를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 3-5-1)에 의해 수행되었으며, 유익한 심사평을 해 주신 서울대학교 전효택 교수님과 한국지질자원연구원 지세정 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- 김종신, 전호택 (1997) 추부지역 흑색세일 및 접판암 분포
지역에서의 잠재적 독성원소들의 분산과 부화. *자원환경*
경지질, 30권, p. 89-103.

김형돈, 우남칠, 최미정 (1998) 충북 괴산군 덕평리 일대
의 지하수 수질과 오염. *지하수환경*, 5권, p. 141-147

오근창, 윤정현, 김경웅, 박천영, 김정빈, 양동윤, 김주용,
이광희 (2001) 광주광역시 운정동위생매립장 주변 지
하수와 하천수의 환경지구화학적 오염특성. *자원환경*
지질, 34권, p. 523-537.

유재영, 최인규, 김형수 (1994) 춘천 지역의 기반암 종류

- 에 따른 지표수의 지구화학적 특성. *지질학회지*, 30권, p. 307-324.
- 이봉주, 문상호, 박기화, 고동찬, 고기원 (2002) 제주도 용천수의 수리지화학적 특성. *지질학회지*, 38권, p. 421-439.
- 이인호, 조병욱, 이병대 (2003) 대구시 퇴적암 분포 지역의 지하수에 대한 환경지화학적 특성. *지질공학*, 13권, p. 1-16.
- 이인호, 조병욱, 이병대, 성익환, 임용수 (2002) 광주광역시 지하수의 수리지화학적 특성 연구. *지하수토양환경*, 7권, p. 115-132.
- 이종혁, 이민성, 박봉순 (1980) 한국지질도-미원도록 (1: 50000). 자원개발연구소.
- 이진수, 전효택, 김경웅 (1996) 충주지역 흑색세일 분포지역에서의 잠재적 독성원소들의 분산과 부화. *자원환경지질*, 29권, p. 495-508.
- 이진수, 전효택, 김경웅 (1997) 보은지역 흑색세일 분포지역에서의 암석-토양-식물계내 잠재적 독성원소들의 분산과 이동. *자원환경지질*, 30권, p. 587-601.
- 이진수, 전효택, 김경웅 (1998) 옥천대 흑색세일 및 점판암 분포지역의 토양과 식물내 독성원소들의 지구화학적 거동. *한국자원공학회지*, 35권, p. 287-300.
- 이현구, 이찬희 (1997) 덕평지역의 탄진 변성니질암에 관한 환경적 독성원소의 지구화학적 기원, 거동 및 부화. *자원환경지질*, 30권, p. 553-566.
- 전철민, 문희수, 최선경, 우남칠 (1997) 충북 괴산 덕평리 일대 흑색 세일 및 흑색점판암기원 토양-의 점토광물 조성 및 중금속원소의 분산. *자원환경지질*, 30권, p. 567-586.
- 전효택, 이희근, 이종운, 이대혁, 류동우, 오석영 (1997) 동해신광산 터널굴착공사와 관련된 지표수 및 지하수의 유동변화에 대한 조사연구(II)-수리지구화학적 고찰. *지하수환경*, 4권, p. 27-40.
- 전효택, 정명채 (1991) 함우라늄 흑색세일 분포지역에서의 유독성원소들의 분산에 관한 지구화학적 연구. *광산지질*, 24권, p. 245-260.
- 한석중, 험세영, 성의환, 이병대, 조병욱, 조명희 (1999) 동래온천지역의 지열수와 지하수의 지화학적 특성. *지질공학*, 9권, p. 207-225.
- 한원식, 우남칠, 이기철, 이광식 (2002) 무주지역 수질특성 자료의 통계학적 분석에 의한 소유역 구분. *지하수토양환경*, 7권, p. 19-32.
- 한정희, 박계현 (1996) 대전지역 지하수에 험유된 우라늄 및 라돈의 함량. *자원환경지질*, 29권, p. 589-595.
- Chon, H.T., Cho, C.H., Kim, K.W. and Moon, H.S. (1996) The occurrence and dispersion of potentially toxic elements in areas covered with black shales and slates in Korea. *Applied Geochemistry*, v. 11, p. 69-76.
- Chon, H.T. and Oh, S.Y. (2000) Hydrogeochemical characteristics and contamination of surface water and groundwater in the Middle Okchon zone, Korea. *Geosystem engineering*, v. 3, p. 98-107.
- 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: IGWMC, Colorado School of Mine, p. 91-100.
- Fishman, M.J. (1993) Method of analysis by the U.S. Geological Survey national water quality laboratory-determination of inorganic and organic constituents in water and fluvial sediments. USGS open-file reports 217
- Gibbs, R.J. (1970) Mechanism controlling world water chemistry. *Science*, v. 170, p. 135-137.
- Hem, J.D. (1992) Study and Interpretation of the chemical characteristics of natural water. USGS Water-supply paper 2254, 3rd(ed), 263p.
- Hounslow, A.W. (1995) Water Quality Data-Analysis and Interpretation. Lewis Publishers, New York, 397p.
- Lee, J.S., Chon, H.T. and Kim, K.W. (1998a) Migration and dispersion of trace elements in the rock-soil-plant system in areas underlain by black shales and slates of the Okchon zone, Korea. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 65, p. 13-30.
- Lee, J.S., Chon, H.T., Kim, J.S., Kim, K.W. and Moon, H.S. (1998b) Enrichment of potentially toxic elements in areas underlain by black shales and slates in Korea. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 20, p. 135-147.
- Nimick, D.A. and Moore, J.M. (1991) Prediction of water-soluble metal concentrations in fluvially deposited tailing sediments, Upper Clark Fork Valley, Montana, U.S.A. *Applied Geochemistry*, v. 6, p. 635-646.
- Reeve, A.S., Siegal, D.I. and Glaser, P.H. (1996) Geochemical controls on peatland pore water from the Hudson Bay Lowland: a multivariate statistical approach. *Journal of Hydrology*, v. 181, p. 285-304.
- Ritz, R.W., Wright, S.L., Mann, B. and Chen, M. (1993) Analysis of temporal variability in hydrochemical data used for multivariate analyses. *Ground Water*, v. 31, p. 221-229.
- Rogers, R.J. (1989) Geochemical comparison of ground water in area of New England, New York, and Pennsylvania. *Ground Water*, v. 27, p. 690-712.
- Stetzenbach, K.J., Hodge, V.F., Guo, C., Farnham, I.M. and Johannesson K.H. (2001) Geochemical and statistical evidence of deep carbonate groundwater within overlying volcanic rock aquifer/aquitards of southern Nevada, USA. *Journal of Hydrology*, v. 243, p. 254-271.
- Suk H. and Lee, K.K. (1999) Charaterization of a ground water hydrochemical system through multivariate analysis: clustering into ground water zones. *Ground Water*, v. 37, p. 358-366.
- Swanson, S.K., Bahr, J.M., Schwar, M.T. and Potter, K.W. (2001) Two-way clustering analysis of geochemical data to constrain spring source waters. *Chemical Geology*, v. 179, p. 73-91.
- Usunoff, E.J. and Guzman-Guzman, A. (1989) Multivariate analysis in hydrochemistry: An example of the use of factor and correspondence. *Ground Water*, v. 27, p. 27-34.
- Woo, N.C. and Choi, M. J. (1998) Groundwater quality in the shallow aquifer nearby the Gubong gold-mine tailings. *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, v. 5, p. 148-154.
- Woo, N.C. and Choi, Mi J. (2001) Arsenic and metal contamination of water resources from mining wastes in Korea. *Environmental Geology*, v. 40, p. 305-311.
- Woo, N.C., Choi, M.J. and Lee, S.K. (2002) Assessment of groundwater quality and contaminantion from Uranium-bearing black shales in Goesan-Boeun area. *Korea Environmental Geochemistry and Health*, v. 24, p. 261-273.