

음성 분지 지역 지하수 주원소 수리지구화학과 지질 특성의 관계 분석

오종현^{1,2} · 고동찬^{2,*} · 유용재¹ · 조병욱² · 염병우² · 김성원²

¹충남대학교 지질환경과학과

²한국지질자원연구원

Assessing relationship of major element hydrogeochemistry in groundwater and geological features in the Eumseong basin area

Jong Hyun Oh^{1,2} · Dong-Chan Koh^{2,*} · Yongjae Yu¹ · Byong-Wook Cho² · Byoung-Woo Yum² · Sung Won Kim²

¹Department of Geological Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

요 약

결정질암 파쇄 대수층에서 지하수는 절리 및 단층과 같은 암석내 불연속면을 따라 유동하며 주변 암석과 오렉동암 반응하게 된다. 이러한 지질학적 요소들이 지하수 주원소의 수리지구화학적 특징에 미치는 영향을 알아보기 위해 다양한 암상과 대규모 단층이 나타나는 음성 분지 및 주변지역을 연구지역으로 선정하고, 78개의 천부 및 심부 관정에서 지하수 시료를 채취하고 주원소 화학분석을 수행하였다. 양이온은 Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ 순으로 농도가 낮게 나타났고, 음이온은 HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- 순으로 농도가 낮게 나타났다. 지하수의 수화학 유형은 Ca-HCO_3 유형이 대부분이고 $\text{Ca-(Cl+NO}_3\text{+SO}_4)$ 와 Na-HCO_3 유형도 나타났다. 지하수의 심도가 깊을수록, 대체로 HCO_3^- , Ca^{2+} , Na^+ 원소들의 농도가 높게 나왔고 단층과의 거리에 따라서는 별다른 특징이 나타나지 않았다. 그리고 퇴적암지역 지하수에서는 HCO_3^- , Ca^{2+} 의 농도가 높고, 화강암지역 지하수에서는 NO_3^- , $\text{SiO}_2(\text{aq})$ 의 농도가 높았다. 심부지하수일수록 대체로 물-암석 반응이 오래 진행된 것으로 보이지만 단층을 통한 심부지하수의 천부로 이동은 확인되지 않는다. 기반암 암상에 따른 지하수 주원소 특성 차이는 기반암의 광물 조성과 풍화 특성의 차이에 의한 것으로 추정된다. 이번 연구 결과는 결정질암 지역 파쇄 대수층 지하수의 화학적 특징 및 지하수 유동과 지하수자원 특성 평가에도 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

주요어: 파쇄 대수층, 물-암석 반응, 기반암 암상, 단층, 관정 심도

ABSTRACT: In fractured crystalline bedrock aquifers, groundwater flows through discontinuous surfaces such as joints and faults and reacts with the rocks for a long time. To investigate the effect of these geological factors on the hydrogeochemical characteristics of major elements in groundwater, the Eumseong basin and surrounding areas, which has a variety of bedrock lithology and large-scale faults, was selected as study area. 78 groundwater samples were taken from shallow and deep wells in the study area and analyzed for major elements. Cation concentrations were in the decreasing order of Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , and K^+ , and anion concentrations were HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , and NO_3^- . Ca-HCO_3 was the dominant water type followed by $\text{Ca-(Cl+NO}_3\text{+SO}_4)$ and Na-HCO_3 types. The deeper the total depth of the wells, the higher the concentrations of HCO_3^- , Ca^{2+} , and Na^+ and no clear relationships were found between major element concentrations and the distance from the fault. The concentrations of HCO_3^- and Ca^{2+} were higher in groundwater of sedimentary rock area, and the concentrations of NO_3^- and $\text{SiO}_2(\text{aq})$ were higher in groundwater of granitic rock area. With the increase in total depth of the wells, degree of water-rock interactions generally increased. However, the upward movement of deep groundwater to shallow zones through the fault was not confirmed. The difference of major element characteristics in groundwater of the study area is likely to be due to the difference of mineral compositions and weathering characteristics of the bedrocks. The results of this study are expected to be helpful for understanding chemical characteristics of groundwater and evaluating flow conditions and groundwater resources in fractured bedrock aquifers.

Key words: fractured aquifer, water-rock interaction, bedrock lithology, faults, well depth

*Corresponding author: +82-42-868-3079, E-mail: chankoh@kigam.re.kr

1. 서론

지하수는 강수의 조성, 암석 및 토양과의 상호반응 그리고 오염 물질 등의 영향에 따라 화학적 특징이 결정되며, 심도에 따라 지하수의 진화단계가 달라지기 때문에, 심도 또한 지하수 화학조성에 영향을 미치는 중요한 요소이다(Jeong *et al.*, 2004). 대표적인 예로, 암석들은 퇴적암, 화성암, 변성암 등 그 성인에 따라 여러 종류의 암석들로 나뉘고, 각각의 암석에 따라 광물 조성이 다르기 때문에, 반응한 암석에 따라 지하수의 수질 특성이 달라진다(Moon, 2017). 또한, 지하수의 화학적 특징은 단열대 분포와 같은 지질 구조 등에 의해서도 영향을 받는다(Kim *et al.*, 2007). 즉, 기반암 내에서 지하수의 유동은 단층, 절리와 같은 불연속면에 의해 지배되고, 단층 중심부와 손상대의 비율에 따라 단층대가 지하수 유동의 통로 혹은 장벽 역할을 하게 된다(Kim *et al.*, 2008).

주변의 암상 및 심도 등과 관련한 지하수의 수리지화학적 특징에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔다. Lee *et al.* (1997a, 1997b)은 국내 화강암 내 심부지하수와 변성퇴적암류 내 지하수의 화학적 특징을 연구하였고, 각각 비교 연구를 진행하였다. Sung *et al.* (1998), Cho *et al.* (1998), Choo *et al.* (1998)은 각각 국내 선캄브리아기 변성암지역, 대보화강암 및 불국사화강암지역, 옥천계 변성암지역의 먹는샘물 지하수의 화학적 특징에 대해 연구하였다. Moon (2017)은 다양한 암상이 나타나는 영동지역을 대상으로 충적층/풍화대 지하수와 암반 지하수로 나누어, 주변 암상 및 심도에 따른 화학적 특징을 연구하였다. 그리고 Folch *et al.* (2011)은 스페인 북동부의 Selva basin 지역에서 지하수의 수위를 측정하고 지하수 시료의 수리지화학 인자 분석 및 동위원소 분석을 통하여 지질학적 조건(암상 및 지질구조)과 인위적인 지하수 개발이 해당 지역의 수리지질학적인 시스템에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구를 진행하였다. 또한 Varol and Davraz (2014)은 고철질암, 쇄설성 퇴적암, 백운석(dolomite)을 포함한 석회암 등 다양한 암상이 나타나는 터키의 Tefenni plain 지역에서 지하수의 수리지화학적 특징을 연구하고 그 특징을 주변 암상과 연관하여 해석하였다.

단층이 많이 나타나는 지역에서 단층을 통한 지하수의 순환 여부 및 단층이 지하수의 수리지화학

적 측면에 미치는 영향을 연구한 사례들도 있다. Jeong *et al.* (2016b)는 화강편마암, 흑운모편마암, 영동층군 명륜동층의 퇴적암류가 나타나는 충북 영동 지역에서 암상 및 심도에 따라 주원소들의 화학적 특징을 연구하고, 우라늄과 Rn-222의 방사성 원소 농도 분포를 영동단층과 관련하여 지하수의 거동 특징을 해석하였다. 또한 후속 문헌에서 헬륨 동위원소비 ($^3\text{He}/^4\text{He}$)를 이용하여 양산단층대에서의 지하수 유동도 해석하였다(Jeong *et al.*, 2016a). Kim *et al.* (2014)는 아팔레치아 산맥 용기대 전면지에서 고생대 쓰러스트 단층이 파쇄 암반 대수층의 수리지질 및 지하수의 수리지구화학에 미치는 영향을 연구하였다. 그리고 Petitta *et al.* (2011)가 이탈리아 중부의 Acque Albule Basin과 Velino River Valley의 두 지역에서 심도, 암상에 따른 수리지구화학 및 동위원소 특성에 대해 연구하고 단층이 천부 지하수와 심부 지하수의 혼합에 미치는 영향을 확인하였다.

이번 연구의 목적은 조사 지역 지질 특성이 지하수의 주원소 수리지구화학 특성에 미치는 영향을 알아보는 것이다. 이를 위해 화강암, 편마암, 퇴적암 등 다양한 암상이 나타나고 대규모의 단층대가 나타나는 음성분지 및 그 주변지역을 연구지역으로 선정하였다. 연구지역은 일부 충적층이 나타나기는 하지만, 대체로 충적층의 두께는 얇고 대부분 파쇄 암반 대수층으로 이루어져 있어 물-암석 반응에 초점을 두어 지하수의 수리지구화학적 특성을 연구하기에 더욱 적합하다고 판단되었다.

2. 연구 지역

2.1 일반 현황 및 지질 특성

연구 지역은 우리나라 중앙부에서 약간 북서쪽에 해당하며 행정구역상 충청북도 음성군, 진천군, 증평군, 괴산군에 해당한다(그림 1a). 연구지역의 연평균 기온은 12.4°C, 연평균강수량은 1,340 mm 이고 6~9월의 강수량이 69.3%를 차지하여 여름철에 강수가 편중된다(K-water, 2010). 연구지역의 북서쪽에 해당하는 진천군 및 음성군의 일부지역과 남쪽부터 동쪽에 이르는 증평군 및 음성군의 일부지역은 화강암지역에 해당하고 지형적으로 저지대의 평야 지대이다. 농업 활동이 많이 이루어지고 주거지 및 상업 시설들이 밀집되어 있는 것이 특징이다. 반면

음성군, 진천군, 증평군의 일부 지역에 해당하는 연구지역의 중앙에 위치한 음성소분지의 퇴적암지역과 분지의 북동부 및 남서부에 위치한 편마암지역은 반대로 산악 및 고지대를 이루고 주로 개발이 안된 자연지이며 소규모의 주거지 및 농업지가 나타나는 것이 특징이다(그림 1b).

연구 지역은 백악기 음성분지 및 주변 지역에 해당한다. 음성분지는 북동-남서 방향으로 발달한 공주단층계에 해당하는 금왕단층 및 공주단층의 좌수향 주향이동 단층운동에 수반되어 형성된 인리형 분지(引離形盆地; pull-apart basin)이다(Ryang *et al.*, 1998). 분지 내 암상으로는 이암, 사암, 역암 등 다양한 쇄설성 퇴적암과 일부 화산암이 나타난다(Ryang *et al.*, 1998). 화산 활동은 대륙호-섭입작용(continental arc-subduction)이 원인인 것으로 보이며(Ryang, 2013), 현무암질, 안산암질, 유문암질의 화산암이 모두 나타나고 하부는 용암류가, 상부는 화성쇄설암이 우세한 편이다(Hwang *et al.*, 2019). 분지의 북동부 및 남서부는 주로 선캄브리아기의 호상편마암과 화강편마암이 분포하고, 분지의 북서부 및 남동부는 주로 쥐라기에 관입된 화강암류가 분포한다(Lee *et al.*, 1996). 선캄브리아기 호상편마암의 경우 백색 및 흑색의 얇은 층이 거의 평행하게 발달되어 호층을 이루며 백색부는 장석이 주이고 석영이 발견되며 흑색부는 흑운모가 주이다(Jung *et al.*, 1976). 화강편마암의 경우 편마구조를 가진 담회색의 화강암이며 구성광물은 장석, 석영 및 흑운모로 되어 있다(Jung *et al.*, 1976). 화강암의 경우 1:250,000 대전 지질 도폭(Lee *et al.*, 1996) 상에서 쥐라기 화강암(Jgr)로 분류되나, 1:50,000

음성 도폭(Jung *et al.*, 1976) 상에서는 조립 흑운모 화강암, 조립 편마상 화강암, 반상 화강암으로 세분된다. 조립 흑운모 화강암은 칼리장석, 석영 및 흑운모로 구성되어 있으며 전체적으로 반사형 입상이고 부수광물로 백운모, 인회석 및 전기석이 나타난다(Jung *et al.*, 1976). 조립 편마상 화강암의 경우 곳곳에 따라 흑운모 농도는 변화하지만 본 암은 흑운모 화강암이고 반상 화강암의 경우 반정으로 미사장석과 사장석이 나오며 그 밖에 부분은 석영, 사장석 및 흑운모로 구성된다(Jung *et al.*, 1976).

2.2 수리지질 및 지하수 이용 특성

연구지역에 해당하는 수문지질 단위는 미고결 쇄설성 퇴적층, 백악기 산성관입 화성암, 백악기 쇄설성 퇴적암, 트라이아스기-쥐라기 산성 관입 화성암, 정편마암, 준편마암이다. 지하수의 산출특성(비양수량, 투수량계수)을 보면 평균값을 기준으로 미고결 쇄설성 퇴적층에서 투수량계수와 비양수량이 모두 가장 높게 나왔고 그 다음으로 백악기 쇄설성 퇴적암, 트라이아스기-쥐라기 산성 관입 화성암, 백악기 산성관입 화성암, 준편마암 순으로 나왔다. 충적층의 평균 두께는 평균 14.2 m이고, 전기비저항 탐사자료를 모두 포함할 경우, 평균 두께는 15.5 m이다(K-walter, 2009).

연구지역의 지역별 지하수 이용량($m^3/일$)을 보면, 음성군은 107,535, 진천군은 74,993, 증평군은 18,823이다. 단위면적당 이용량(단위: $m^3/일/km^2$)으로는, 전국 81.1, 음성군 207.4, 진천군 183.9, 증평군 230.0으로 연구지역 모두 단위면적당 이용량이 전국 자료

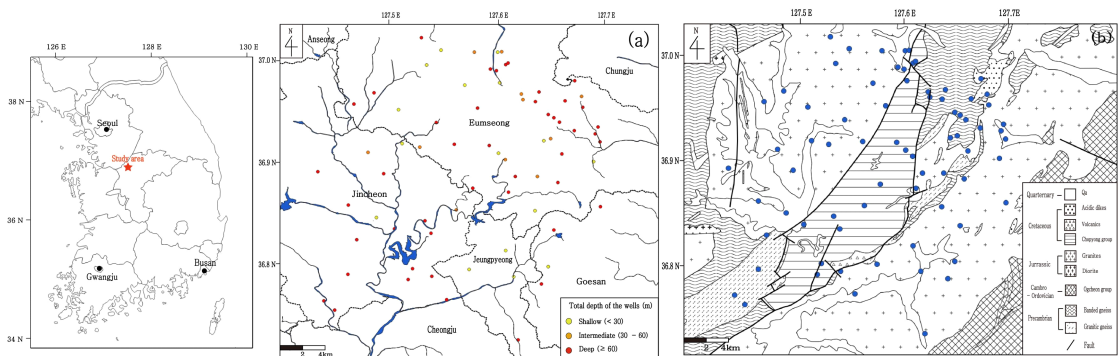


Fig. 1. Location maps of study area and groundwater sampling sites with streams and administrative boundaries (a) and lithology and faults (b).

와 비교했을 때 월등히 높고, 증평군의 경우 전체 이용량은 가장 적지만, 면적당 이용량은 가장 많다. 지하수 개발가능량 대비 사용량도 전국 22.9%, 음성군 56.8%, 진천군 39.6%, 증평군 66.4%로 세 지역 모두 전국에 비해 확실히 높으며, 증평군에서 가장 높은 비율을 보인다.

지하수 용도별 이용비율을 보면, 음성군의 경우 생활용 34.0%, 공업용 16.9%, 농·어업용 48.8%, 기타 0.3%, 진천군의 경우 생활용 42.1%, 공업용 10.4%, 농·어업용 47.5%, 기타 0.1% 그리고 증평군의 경우 생활용 42.9%, 공업용 7.9%, 농·어업용 49.2%이다. 지하수가 세 지역에서 모두 대부분 생활용과 농·어업용으로 사용되는 것을 알 수 있다.

관정 심도별 지하수 이용량을 20 m 이하, 20 ~ 60 m, 60 m 초과와 3그룹으로 나누어 보면, 전국적으로 보았을 때 총 이용량 기준으로 심도 20 m 이하 지하수는 19.3%, 심도 20 ~ 60 m 지하수는 26.3%, 심도 60 m 초과 지하수는 52.6%의 비율로 이용된다. 음성군의 경우, 심도 20 m 이하 지하수는 3.4%, 심도 20 ~ 60 m 지하수는 44.5%, 심도 60 m 초과 지하수는 52.0% 비율로 나타난다. 진천군의 경우, 각각 26.2, 24.7, 48.6% 그리고 증평군의 경우, 각각 39.5, 34.7, 25.7%로 나타난다. 심도 60 m를 초과하는 지하수 이용 비율은 음성군과 진천군의 경우 전국과 비슷하며, 증평군에서는 전국의 절반 정도로 상당히 적게 나타난다. 반면, 20 m 이하의 천부 지하수 이용 비율은 전국과 비교했을 때, 진천군과 증평군에서 높으며, 음성군에서는 상당히 낮은 것을 알 수 있다(K-water, 2021).

2.3 토지이용 및 잠재오염원

음성지역의 토지이용도는 산림(47.6%), 농경지(37.0%)가 대부분으로 전체의 84.6%를 차지하며, 나머지는 나대지(6.0%), 초지(5.5%), 시가지(3.1%), 수계(0.8%) 순으로 나왔다. 잠재오염원은 959개소 중 축산단지 405개소, 주유소 72개소, 세차장 17개소, 공업단지 30개소, 폐수배출시설 435개소로 주로 축산단지와 폐수배출시설이 잠재오염원의 대부분을 차지하고 있다(K-water, 2009).

진천지역은 산림지가 54.1%로 가장 많은 비중을 차지했고, 그 다음이 농경지로 39.5%로 나왔으며, 주거지역 및 수면지역은 각각 4.9%, 1.5%로 적은

비중을 차지했다. 진천군의 잠재오염원 현황에 대해서는 오염 물질 배출 가능성이 있는 총 404개소의 시설에 대하여 축산폐수시설, 토양오염시설, 폐수배출시설 및 기타로 4가지로 구분하였으며, 축산폐수시설 336개소, 토양오염시설 52개소, 폐수배출시설 15개소, 기타 1개소로 대부분 축산폐수시설인 것을 알 수 있다(K-water, 2010).

증평·괴산 지역의 경우, 산림지가 70.1%에 해당하고, 농경지가 23.2%를 차지하였으며 나머지는 초지, 시가지, 나지 및 수계지로 각각 2.8%, 1.7%, 1.4%, 0.3%로 차지하는 비중이 상당히 낮았다. 증평군의 잠재오염원조사 결과 총 177개소 중 축산단지가 123개소(69.5%), 토양오염시설이 23개소(13%), 폐기물처리 시설이 22개소(12.4%), 폐수배출시설이 9개소(5.1%)로 나왔다(K-water, 2017).

3. 연구 방법

3.1 현장조사 및 시료채취

연구 지역 내에서 지하수 시료를 78개를 채취하였으며, 화강암지역에서 48개, 변성암지역에서 16개, 퇴적암지역에서 14개를 채취하였다. 시료 채취는 2021년 5월부터 2021년 11월까지 이루어졌으며, 대부분의 지하수(GF-1 ~ GF-72)는 계절적으로 늦봄부터 여름에 해당하는 2021년 5월부터 7월까지 채수되었고 일부 지하수(GF-73 ~ GF-78)는 늦가을인 2021년 11월 말에 채수되었다. 지하수의 현장 수질은 휴대용 측정기기(Multi 3620 IDS, WTW)를 이용하여 측정하였으며, 측정 항목으로 온도(°C), 수소이온농도(pH), 산화환원전위(ORP), 전기전도도(EC), 용존산소(DO)를 측정하였다. 측정 방법은 지하수공에서 지하수를 채수 후 채수통에 담긴 지하수 시료에 측정기기를 넣고 온도와 전기전도도 수치가 변하지 않을 때 까지 반복하여 확인한 후 위 항목들의 측정값들을 기재하였다.

현장수질 측정 후 채수한 지하수 시료는 500 ml 폴리에틸렌 용기(HPDE)에 담았고 양이온·음이온 분석용 시료는 현장에서 0.45 µm 공극의 필터를 이용하여 부유물질을 제거한 후 20 ml 용기에 담았다. 양이온 분석용 시료는 특정 원소들이 침전하여 벽면에 붙거나 바닥에 가라앉는 현상을 방지하기 위해 30%의 농질산을 첨가하여 pH를 낮추었다.

3.2 화학 분석

화학 분석은 주요 양이온(Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , $\text{SiO}_2(\text{aq})$) 농도, 주요 음이온(Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) 농도 그리고 알칼리도로 나누어 분석하였다. 알칼리도는 pH 적정곡선 변곡점법 및 Gran 적정법을 이용하여 측정하였으며, 중탄산 농도(HCO_3^- mg/L)로 제시하였다. 음이온 농도는 한국지질자원연구원의 이온크로마토그래피(DIONEX AQUION, ThermoFisher Scientific, USA)를 이용하여 측정하였고, 양이온 농도는 유도결합 플라즈마 원자방출 광학분광 광도계(Optima 7300DV, PerkinElmer, USA)를 이용하여 측정하였다.

시료별로 측정된 양이온·음이온의 농도들을 바탕으로 분석된 원소들의 당량전하를 계산하여 전기전도도 값과 비교하여 양이온과 음이온 모두 전기전도도 값과의 비율이 0.9 ~ 1.1 사이에 해당하는지 확인하였다. 그리고 양이온과 음이온의 당량전하간의 차이(charge balance)를 계산하여 5% 이상이면 확인 및 재분석을 실시하여 모든 시료에 대해 당량전하간의 차이(charge balance)가 5% 이내로 나오도록 하였다.

3.3 통계 분석

연구지역에서 채취하여 분석된 78개의 시료에 대해서 시료별로 현장수질 자료와 양이온·음이온 농도 자료를 취합하여 총 13개 항목(온도, pH, EC, TDS, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , $\text{SiO}_2(\text{aq})$)에 대한 데이터를 바탕으로 통계분석을 진행하였다. 인위적 오염의 영향을 지시하는 NO_3^- 가 높은 시료는 본 연구의 관심 주제인 물-암석 반응에 초점을 두어 해석하기 어려울 것으로 판단하여 상자도표(Box-whisker plot)에 도시하여 NO_3^- 값이 이상치(outlier)에 해당하는 5개 시료는 제외하였다. 그 후 73개 시료의 각 항목별 데이터에 대해서 검출한계 이하의 데이터는 검출한계/2로 처리하였고 최대값, 최소값, 평균값, 중앙값, 표준편차 등을 계산하였다. 또한 각 항목에 대해 막대 도표(histogram)를 작성하여 각 항목별로 정규분포를 이루는지 확인하고 정규분포를 이루지 않는다면, 상용로그(log)를 취하여 로그를 취한 값이 정규분포를 이루는지 확인하였다.

이후 각 항목에 대해서 상관분석을 진행하였는

데, 온도, pH를 제외한 나머지 항목이 모두 로그-정규(log-normal) 분포를 이루었기 때문에, 항목의 값들을 로그로 변환하여 분석하는 피어슨의 로그-변형 상관 분석(Pearson's log-transformed correlation analysis) 방법을 사용하였다. 또한, 산점도 그래프를 작성하여 상관분석으로 나타난 결과가 그래프에서도 잘 반영되는지 확인하였다.

암상은 화강암(Granitic rocks), 변성암(Metamorphic rocks), 퇴적암(Sedimentary rocks)으로 단순화하여 분류하였으며, 가장 가까운 단층과의 거리는 떨어진 거리가 0 ~ 250 m이면 단층과 가까운 관정(Near well), 250 m ~ 1 km이면 단층과 중간 정도 떨어진 관정(Intermediate well), 1 km 보다 멀리 떨어져 있으면 멀리 떨어진 관정(Far well)으로 분류하였다. 관정 심도는 심도가 30 m 미만이면 천부 관정(Shallow well), 30 m 이상이고 60 m 미만이면 중심도 관정(Intermediate well), 60 m 이상이면 심부 관정(Deep well)으로 분류하였다. 그리고 각 관정 심도에 해당하는 지하수들을 각각 천부 지하수, 중심도 지하수, 심부 지하수로 명명하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 지하수 현장수질과 주원소 특성

수소이온농도(pH)의 경우 5.79 ~ 8.97로 약산성에서 알칼리성까지 다양하게 나오며 전기전도도(EC)도 111 ~ 1,214 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 범위가 큰 편이다(표 1). 이는 지하수 주변의 암상 및 물-암석 반응 기간 또는 천부에서의 인위적인 오염물질의 영향에 따라 pH, EC값의 범위가 크게 나타나는 것으로 판단된다.

주원소 농도에 대해 보면, 양이온의 경우 Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ 의 평균 농도가 각각 mg/L 단위로 35.0, 19.7, 6.20, 1.76으로 Ca^{2+} , Na^+ 가 대부분을 차지한다. 음이온의 경우 HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- 의 평균 농도가 각각 mg/L 단위로 130, 18.0, 17.2, 14.5로 HCO_3^- 가 음이온 중의 대부분을 차지한다. HCO_3^- 는 탄산염이나 규산염 광물 등이 용해되어 지하수내로 공급된다(Sung *et al.*, 1998). 따라서 해당 결과로부터, 연구지역 내 지하수의 수리지구화학적 특징은 전반적으로 물-암석 반응에 영향을 많이 받을 수 있다. 국내 남원 지역 지하수에 대해 연구한 기존 문헌에서도 mass balance analysis를 이용하여 지하

Table 1. Summary of measured field parameters and concentrations of major dissolved constituents in groundwater (n=73).

	Temp. (°C)	pH (-)	EC (µS/cm)	Ca ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SiO ₂ (aq) (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
Min.	10.7	5.79	111	2.53	5.48	0.43	0.36	44.0	1.10	2.67	3.67	0.05
Max.	19.5	8.97	1,210	159	158	31.2	8.04	847	165	83.4	63.7	41.5
Ave.	15.2	7.08	313	35.0	19.7	6.20	1.76	130	18.0	17.2	24.5	14.5
Std.	1.61	0.66	184	24.0	23.5	4.34	1.43	127	25.1	15.7	10.6	11.6
Med.	15.1	6.96	272	29.3	13.0	5.30	1.33	98.4	11.2	12.5	24.0	12.2

수의 수리지구화학에 미치는 요인들을 분석한 결과, 광물의 풍화작용이 지하수의 수리지구화학에 큰 영향을 미치는 요인으로 나타났다(Kim *et al.*, 2005). 또한 Ca²⁺, Na⁺ 농도가 높은 것은 연구지역을 이루는 암석들 중 화강암, 편마암이 대체로 장석을 많이 포함하며 퇴적암 또한 주변의 화강암 및 편마암에서 풍화된 입자들이 운반 및 퇴적되었기 때문에 화학조성 측면에서 크게 차이가 나지 않을 것으로 판단한다.

Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, NO₃⁻, SiO₂(aq)의 농도 분포를 1:250,000 지질도상에 도시하여 확인해 보았다. 퇴적암지역에서는 Ca²⁺, Mg²⁺의 농도가 평균적으로 미세하게 높게 나왔고, 화강암지역에서는 NO₃⁻, SiO₂(aq)의 농도가 눈에 띄게 높게 나왔으며, 편마암지역에서는 NO₃⁻ 농도가 대체로 낮은 것을 제외하면 별 다른 특징은 보이지 않는다(그림 2). 단층과의 관계를 보았을 때, 주원소의 농도 분포는 단층의 유무 및 단층과의 근접도와는 크게 관련이 없는 것을 알 수 있다.

4.2 수리지구화학 인자간 상관관계 및 주요 원소별 기원 추정

연구지역 지하수의 현장수질과 주원소들의 농도를 포함하여 12개 항목(온도, pH, EC, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, SiO₂(aq))에 대해 상관분석을 하여 아래의 표로 정리하였다(표 2). EC는 대부분의 원소들과 상관성이 높은 편이며, 특히 HCO₃⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺과의 상관성이 높은 것을 알 수 있다. 이는 지하수 내의 용존 이온들 대부분은 물-암석 반응에서 기원하기 때문으로 해석할 수 있다. 이 원소들 중 Ca²⁺과 Mg²⁺의 상관계수가 0.85로 굉장히 높게 나타났는데, 기존에 Cho *et al.* (1998)가

불국사화강암지역 지하수를 연구한 문헌에서도 두 원소의 상관계수가 0.87로 굉장히 높게 나타났다. 이는 기반암 암상과는 별개로 열극 내부를 충전하는 광물질 중 백운석(dolomite) 또는 Mg이 포함된 방해석과 같이 Ca과 Mg을 모두 포함하는 광물들이 용해된 결과로 생각된다(Lee *et al.*, 1997a).

NO₃⁻는 Na⁺, HCO₃⁻와의 상관계수가 각각 -0.5, -0.59로 음의 상관성이 크게 나타난다. 기존 문헌 중 충북 영동지역에서 조사된 지하수에서도 NO₃⁻와 Na⁺, HCO₃⁻와의 상관계수가 각각 -0.29, -0.46으로 비슷한 결과가 나왔다(Jeong *et al.*, 2016b). 물-암석 반응이 진행되면서 전반적으로 농도가 높아지는 Na⁺, HCO₃⁻와 반대로 NO₃⁻는 주로 생활하수 또는 축산 폐기물 등과 같은 오염원에서 기원하는 원소이기 때문에 이러한 음의 상관관계가 나타난 것으로 생각된다(Lee *et al.*, 1997a). pH는 NO₃⁻, SiO₂(aq)와 -0.37, -0.42로 음의 상관성이 나타난다. NO₃⁻의 유입으로 수소이온(H⁺)들이 생성되고 이로 인해 규산염 광물들의 용해가 촉진된다(Kim *et al.*, 2005). 즉, NO₃⁻ 농도가 높을수록 대체로 지하수는 산성화되며 그로 인한 규소의 용해도 촉진되어 이러한 상관관계가 나타나는 것으로 해석된다.

용존 항목 농도간의 관계를 보면 HCO₃⁻ 농도가 Ca²⁺, Na⁺ 농도와는 양의 상관성, NO₃⁻ 농도와는 음의 상관성이 나타나고, SiO₂(aq), SO₄²⁻, Cl⁻ 농도와는 상관관계가 나타나지 않음을 알 수 있다(그림 3). Si의 경우는 주로 암석에서 기원하는 원소이나 그 농도가 물-암석 반응 시간보다는 지하수의 pH 혹은 다른 요인에 의해 더 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. SO₄²⁻의 경우 주로 황화광물의 산화작용에 의해 지하수로 유입되는 원소이기 때문에(Lee *et al.*,

1997a), HCO_3^- 농도와는 상관성이 없다. Cl^- 은 농업 활동과 같은 인위적 활동으로 주로 발생하지만 물-암석 반응에 의해 의해서도 공급되기도 하며 단층을

통한 심부지하수의 유동으로 인한 혼합효과에 의해 농도가 높아지기도 한다(Varol and Davraz, 2014). 여기서는 NO_3^- 와의 상관성이 높은 것으로 보아 인

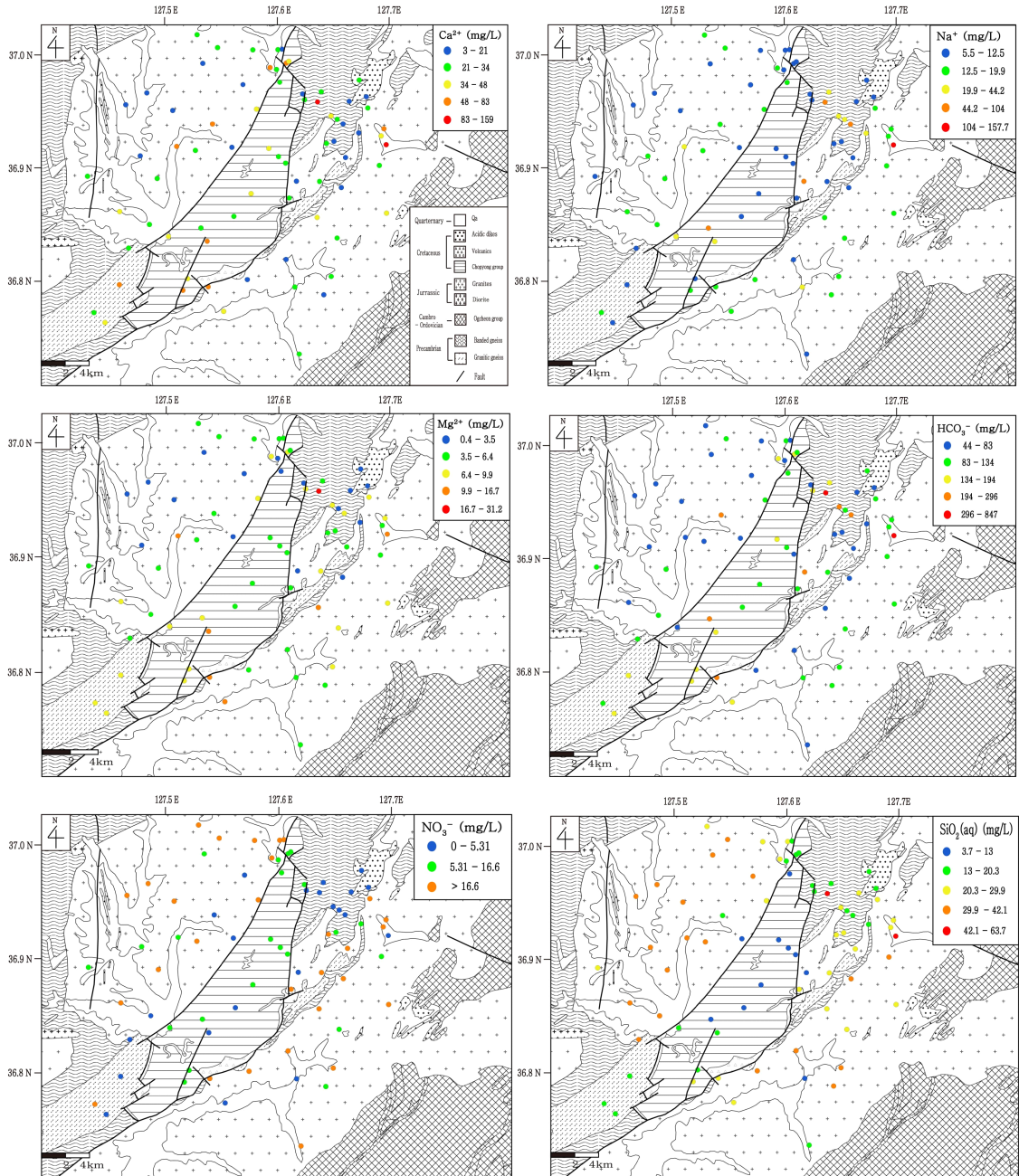


Fig. 2. Spatial distribution of concentrations of major dissolved constituents in groundwater on the geologic map with bedrock lithology and major faults. Concentration intervals were based on natural breaks for HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , and $\text{SiO}_2(\text{aq})$, and referenced standard breaks (Kim *et al.*, 2015) for NO_3^- .

Table 2. Pearson's correlation coefficients of field parameters and concentrations of major dissolved constituents in groundwater using log transformation except temperature and pH.

	Temp.	pH	EC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	SiO ₂ (aq)
Temp.												
pH												
EC	<i>0.20</i> (0.08)											
Ca ²⁺			0.76 (<i><0.01</i>)									
Mg ²⁺		<i>-0.27</i> (0.02)	0.75 (<i><0.01</i>)	0.85 (<i><0.01</i>)								
Na ⁺			0.72 (<i><0.01</i>)	<i>0.22</i> (0.06)	<i>0.29</i> (0.01)							
K ⁺		<i>-0.34</i> (<i><0.01</i>)	<i>0.5</i> (<i><0.01</i>)	<i>0.35</i> (<i><0.01</i>)	<i>0.44</i> (<i><0.01</i>)	<i>0.41</i> (<i><0.01</i>)						
HCO ₃ ⁻		<i>0.22</i> (0.06)	0.80 (<i><0.01</i>)	<i>0.57</i> (<i><0.01</i>)	<i>0.54</i> (<i><0.01</i>)	<i>0.69</i> (<i><0.01</i>)	<i>0.36</i> (<i><0.01</i>)					
Cl ⁻		<i>-0.32</i> (<i><0.01</i>)	<i>0.49</i> (<i><0.01</i>)	<i>0.55</i> (<i><0.01</i>)	<i>0.57</i> (<i><0.01</i>)		<i>0.3</i> (<i><0.01</i>)					
SO ₄ ²⁻			<i>0.41</i> (<i><0.01</i>)	<i>0.45</i> (<i><0.01</i>)	<i>0.41</i> (<i><0.01</i>)		<i>0.26</i> (0.03)		<i>0.32</i> (<i><0.01</i>)			
NO ₃ ⁻	<i>0.22</i> (0.07)	<i>-0.37</i> (<i><0.01</i>)	<i>-0.26</i> (0.03)			<i>-0.5</i> (<i><0.01</i>)		<i>-0.59</i> (<i><0.01</i>)	<i>0.41</i> (<i><0.01</i>)			
SiO ₂ (aq)		<i>-0.42</i> (<i><0.01</i>)							<i>0.23</i> (0.05)	<i>-0.23</i> (0.05)	<i>0.22</i> (0.06)	

* Correlation coefficients (r) were shown in bold for > 0.7, in normal for 0.4 - 0.7, and in italic for < 0.4 with p-value in parenthesis. If r >= 0.7, the correlation is interpreted as high, if 0.4 = < r < 0.7, as moderate, and if r < 0.4, as low (Hinkle *et al.*, 2003).

위적 오염에 의해 주로 유입되는 것으로 생각된다.

4.3 관정 심도 및 단층과의 근접도에 따른 수리지구화학 특성

연구지역 지하수를 상자도표(Box-whisker plot) (그림 4)에서 볼 수 있는 것처럼 관정 심도에 따라 원소들의 농도를 비교해 보았다. 대체로 심부지하수에서 HCO₃⁻, Ca²⁺, Na⁺와 같은 주요 원소들의 농도가 높은 반면, NO₃⁻의 농도는 낮은 편이다. HCO₃⁻는 대표적인 물-암석 반응 기원 원소이며, Ca²⁺, Na⁺도 대체로 그러한 원소이다. Ca²⁺은 주로 탄산염광물의 조화용해 및 규산염광물의 비조화용해로부터, Na⁺은 주로 규산염광물인 사장석의 비조화용해로부터 기원한다(Lee *et al.*, 1997a). 이와 대조적으로, NO₃⁻는 주로 지표의 오염원으로부터 기원하는 원소이고 지하에서 희석작용이나 음이온교환반응 등에 의해 농

도가 감소한다(Lee *et al.*, 1997a). 따라서 이러한 원소들의 농도 분포는 연구지역에서 심부 지하수가 천부, 중심도 지하수에 비해 물-암석 반응이 대체로 오래 진행된 지하수임을 지시한다.

단층과의 근접도와 주요 원소들의 농도들 간의 관계를 보았을 때, 그림(그림 5)과 같이 나왔다. 단층과 가까운 지하수 중에서 천부 지하수가 없었기 때문에 여기서는 천부 지하수의 데이터를 제거하고 단층과의 거리에만 초점을 두어 정리 및 해석하였다. 그래프에 도시된 원소들 모두 단층과의 거리와 상관성이 없는 것을 알 수 있다. 연구지역은 수많은 단층계가 나타나는 지역이지만, 단층과 가까운 지하수에서 HCO₃⁻, Ca²⁺ 등과 같은 주요 원소들의 농도가 높게 나타나지는 않은 것으로 보아 연구지역의 단층들이 지하수의 유동통로 역할을 잘 하지 못하는 것으로 보인다. Lee *et al.* (2021)이 남한 전역의 천

연광천수에 대해 수행한 연구에 따르면, CO₂가 풍부한 지하수나 온도가 높은 열수는 주로 단층대 또는 암상 경계부에 높은 비율로 나와 단층대를 통하여 심부 기원의 탄산수 및 열수가 천부 방향으로 이동할 수 있다고 해석하였다. Jeong *et al.* (2016a)이 양산단층대에서 지하수의 수리지구화학 및 비활성 기체 동위원소 특성을 연구한 사례에서도 양산단층대가 지하수의 순환을 돕는 열린 단층대라는 결과가 나와 이번 연구지역의 단층과는 성격이 다른 것을 알 수 있다. 양산단층대를 포함한 활성단층들과는 달리 연구지역의 공주·금왕 단층은 현재 활동을 하지 않아 지하수가 유동할 수 있는 공간이 상대적으로 적어 단층대를 통한 지하수의 유동이 활발하지 않은 것으로 해석된다.

지하수의 수리지구화학 유형은 Ca-HCO₃이 72.6%, Ca-(Cl+NO₃+SO₄)이 21.9%, Na-HCO₃이 5.5%로 나왔으며, Na-(Cl+NO₃+SO₄)은 나타나지 않았다(그림 6). 이러한 결과로 볼 때, 연구지역 지하수는 일부 오염의 영향도 있지만 전반적인 특징은 물-암석 반응에 의해 결정됨을 알 수 있다. 관정 심도를 기준으

로 보면(그림 6a), 대체로 천부 지하수에서는 Cl+NO₃+SO₄ 비율이 높은 지하수가 많은데, 이는 천부 지하수가 대체로 지표와 가까워 오염물질의 영향을 많은 것으로 볼 수 있다(Jeong *et al.*, 2016b). 심부지하수에서는 Na⁺/Ca²⁺ 비율이 높은 지하수가 많아지는데, 이는 심부로 갈수록 방해석이 점점 포화상태에 이르고 암석내의 사장석과의 반응에 의해 Na⁺은 지하수 내로 꾸준히 공급되면서 나타나는 결과로 보고 있다(Lee *et al.*, 1997a). 충북 영동지역의 복합 지질이 나타나는 지역에서도, 심부지하수의 경우 Na-HCO₃ 유형 비율이 높으며 천부 지하수에서는 Ca-NO₃(SO₄) 유형이 많이 나왔다(Jeong *et al.*, 2016b). 단층과의 거리를 기준으로 보았을 때(그림 6b), 단층과 가까운 지하수에서 심부지하수 유형인 Na-HCO₃ 유형이 전혀 관찰되지 않아, 해당 결과는 연구지역의 단층들이 지하수의 유동통로 역할을 못하는 단층이라는 가설에 더욱 가능성을 실어준다.

4.4 기반암 암상에 따른 수리지구화학 특성

HCO₃⁻, Ca²⁺ 농도의 경우 중앙값을 포함하여 전

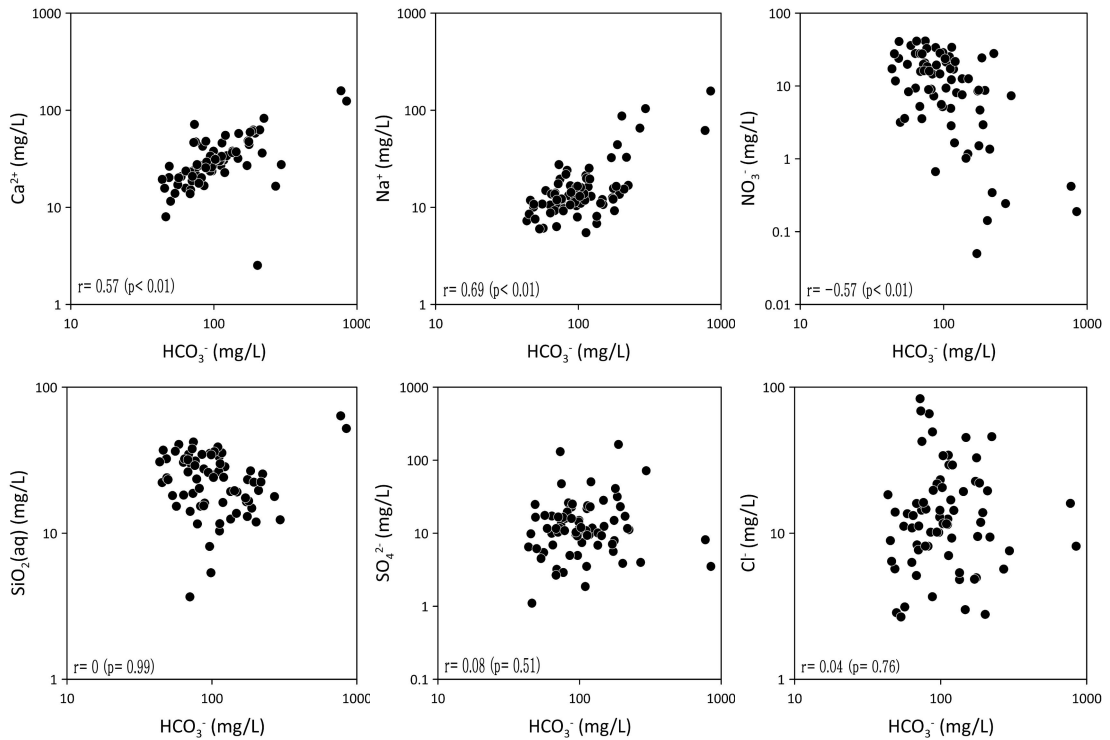


Fig. 3. Bivariate plots of HCO₃⁻ concentration and concentrations of other dissolved constituents in groundwater.

반적인 값들이 퇴적암지역 지하수에서 상대적으로 높게 나왔다(그림 7). 퇴적암지역의 경우 층간물질인 방해석과 같은 탄산염 광물들의 영향으로 지하수에서 Ca^{2+} , Mg^{2+} 농도가 다른 지역 지하수에 비해 높게 나올 가능성이 있다(Lee *et al.*, 1998). 특히 음성분지의 이암의 경우 석회질 단괴가 나타나기도 한다(Ryang, 2018). 퇴적암 내에 포함된 이러한 탄산염 물질의 영향을 받아 일부 지하수내의 HCO_3^- , Ca^{2+} 농도가 높아진 것으로 추정된다.

NO_3^- 와 $SiO_2(aq)$ 농도의 경우 화강암지역 지하수에서 다른 지역 지하수에 비해 높게 나온 편이다. 기존 충북 영동군에서 조사된 문헌에서도, 화강암지역 암반 지하수에서 해당 물질들의 농도가 다른 지역 암반 지하수에 비해 대체로 높게 나왔다(Moon, 2017). 화강암의 경우 화학적 풍화에 약한 암석으로 대부분의 화강암지역의 경우 오랜 풍화작용을 받아 저지대

를 이루는 경우가 흔하며, 연구지역도 이러한 양상을 띠고 있다. 그 결과, 인구가 밀집되어 농업활동 및 축산활동이 상대적으로 활발히 이루어지면서 NO_3^- 등의 오염물질 배출이 많아지고 지하수의 산성화로 인해 암석내의 Si의 용해도 활발해져, 화강암지역 지하수에서 NO_3^- , $SiO_2(aq)$ 의 농도가 높게 나오게 된 것으로 해석된다.

기반암 암상에 따른 수질유형의 특성을 보면, 대체로 화강암지역 지하수에서 $Cl^-+NO_3^-+SO_4^{2-}$ 의 당량농도 비율이 다른 지역의 지하수에 비해 상대적으로 높음을 알 수 있다(그림 8). 이는 화강암지역 지하수가 상대적으로 오염물질의 영향을 많이 받은 결과로 해석된다. 편마암지역 지하수에서는 Na^++K^+ 비율이 미세하게 높게 나왔는데, 이는 풍화가 잘 되지 않고 투수성이 낮은 특성이 반영된 결과로 생각된다. 지하수의 체류 시간은 심도뿐만 아니라 대수층의

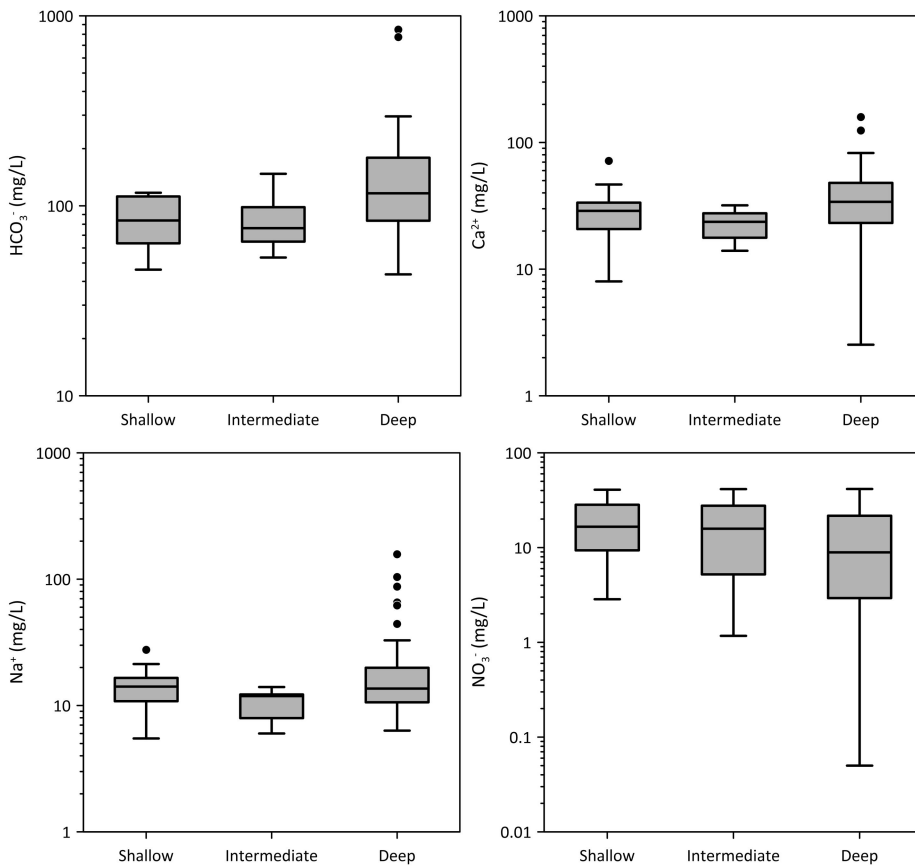


Fig. 4. Box-whisker plots of concentrations of major ions in groundwater for three groups classified by total depth of the wells.

투수성에 의해서도 크게 좌우되는데(Roques *et al.*, 2014), 지하수가 유동이 느려 체류시간이 길어지면서 물-암석 반응이 더 많이 일어나, 비슷한 심도의 다른 암상 지역 지하수에 비해 심부지하수의 특징을 보이는 것으로 볼 수 있다.

화강암지역 지하수 중에서 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 의 당량농도 비율이 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 에 비해 극단적으로 높게 나타난 지하수 시료도 존재한다. 관정심도, 단층과의 근접도에 따라 도시한 파이프 도시(piper plot)에서 보면, 이 지하수는 단층과의 거리가 중간정도 떨어진 심부 지하수이며, 심도가 200 m로 다른 심부지하수에 비해서도 심도가 상당히 깊은 편이다. Ryu *et al.* (2012) 이 한국원자력연구원 지하처분연구시설(KURT) 주

변 화강암 부지에서 조사한 지하수에서, 심도 300 m 이상의 지하수들은 거의 대부분 Na-HCO_3 의 유형을 나타냈다. 이 지하수는 심부에서 물-암석 반응을 오래 거치면서 주변 화강암 내의 Na-사장석과 같은 Na를 포함하는 광물들과 오랫동안 반응하였으며, Ca^{2+} 의 절대 농도가 매우 적은 것으로 보아, 양이온 교환 반응 또한 오래 진행된 결과로 생각된다 (Chae *et al.*, 2006).

4.5 인위적 오염에 의한 수리지구화학 특성

지하수 내의 NO_3^- 농도를 이용하여 오염 지하수, 비오염 지하수 그룹으로 나누었으며, 그룹을 나누는 기준 농도는 인위적 오염의 영향이 확실해지기 시작

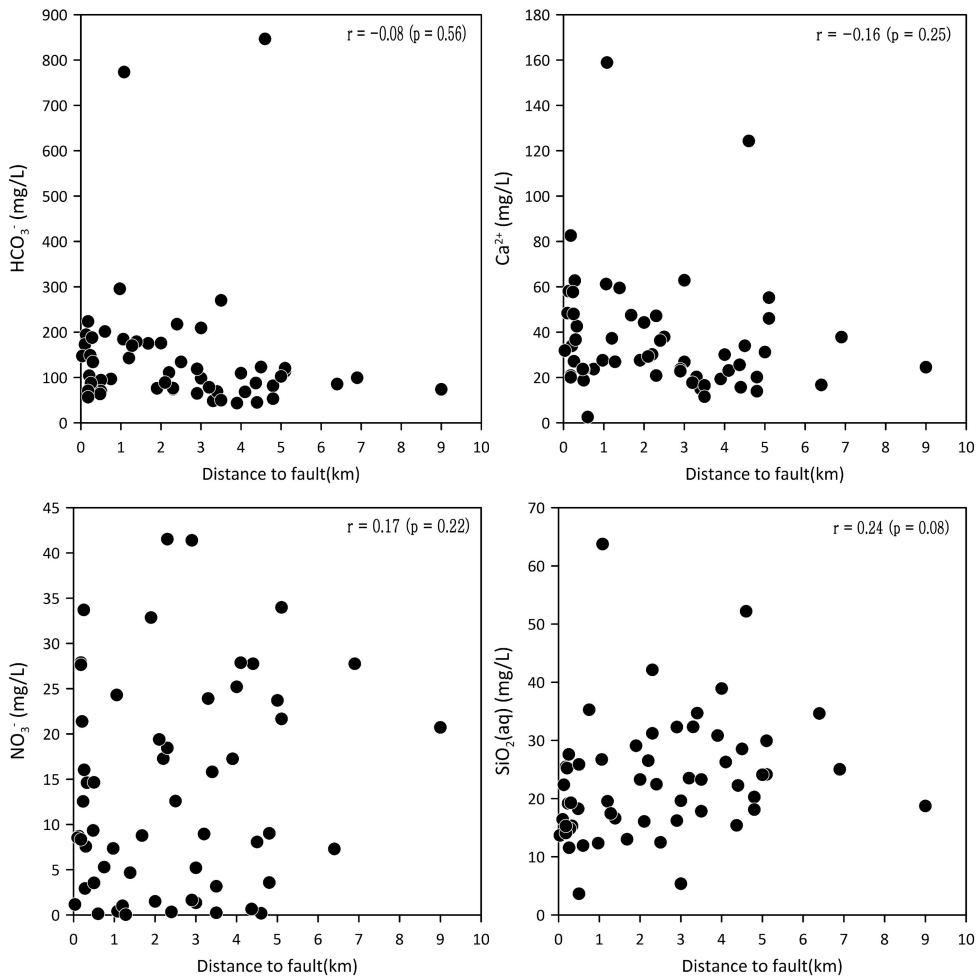


Fig. 5. Variation of concentrations of major dissolved constituents in groundwater along the distance to mapped faults.

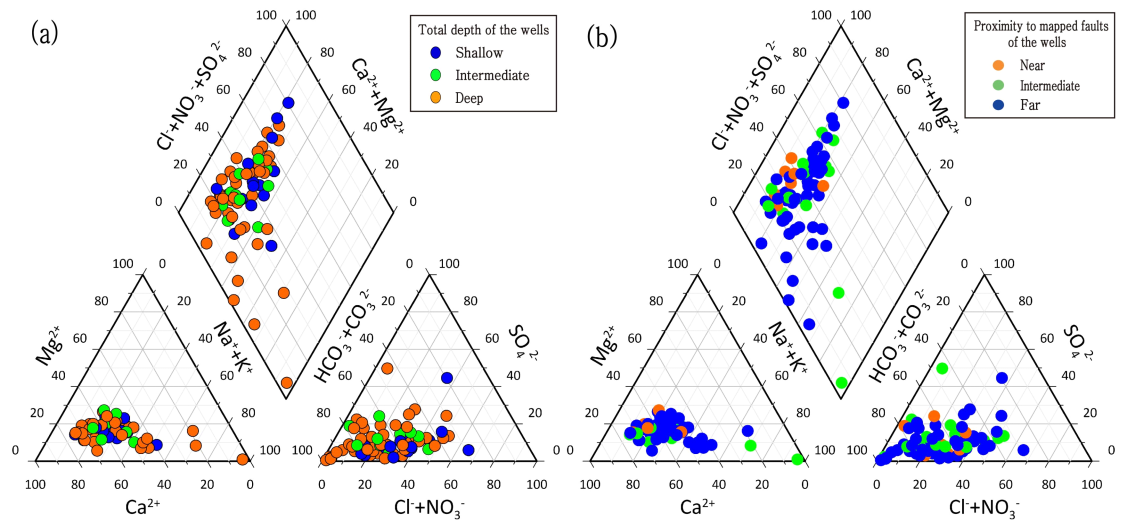


Fig. 6. Piper plots of groundwater classified by total depth of the wells (a) and by proximity to mapped faults of the wells (b).

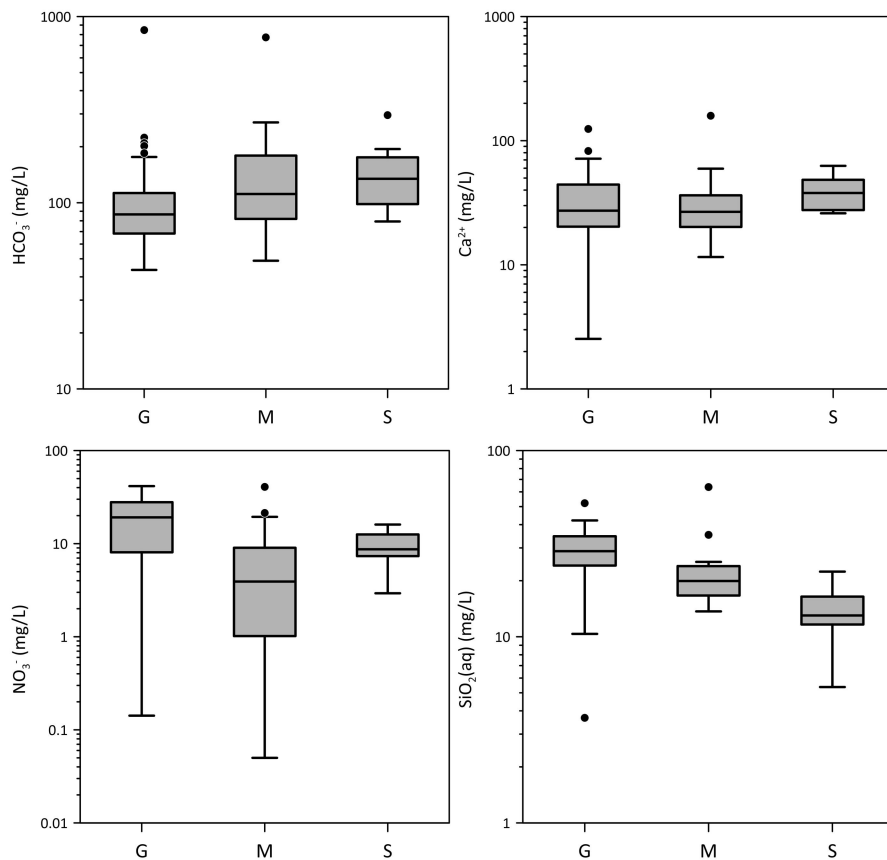


Fig. 7. Box-whisker plots of concentrations of major dissolved constituents in groundwater classified by simplified bedrock lithology (G: Granitic rocks, M: Metamorphic rocks, S: Sedimentary rocks).

하는 농도 기준(threshold value of anthropogenic contamination)인 16.6 mg/L로 하였다(Kim *et al.*, 2015). 총 73개의 지하수 중, NO₃⁻ 농도가 기준 농도 이상으로 나오는 오염 지하수는 29개, 기준 농도 미만으로 나오는 비오염 지하수는 44개로 나왔다. 대수층의 심도에 따라 오염 지하수, 비오염 지하수의 비율을 보면, 천부 지하수에서는 오염 지하수가 75%, 비오염 지하수가 25%로 나왔고 중심도 지하수에서는 오염 지하수가 45%, 비오염 지하수가 55%로 나왔으며 심부지하수에서는 오염 지하수가 34.7%, 비오염 지하수가 65.3%로 나왔다. 오염 지하수 비율이 천부 지하수(75%), 중심도 지하수(45%), 심부 지하수(34.7%) 순으로 확연하게 줄어드는 경향을 확인할 수 있고, 이를 바탕으로 심도가 낮은 관정일수록 주변의 오염물질의 침투에 더 취약한 것을 알 수 있다.

지하수 오염에 크게 영향을 미치는 요인을 확인하기 위해, 지하수 내의 질산염이 고농도로 나타나는 지점에서의 토지 이용 및 주변 잠재 오염원 여부를 확인하였다. 고농도의 NO₃⁻ 기준은 인위적 오염

의 영향을 크게 받은 농도 기준(threshold value of severe contamination)인 37.1 mg/L을 참고하여 사용하였다(Kim *et al.*, 2015). 이 기준에 따르면 총 3개(GF-8, GF-33, GF-58) 지하수의 NO₃⁻ 농도가 고농도에 해당했다. 이 중 2개의 지하수(GF-33, GF-58)는 주거 지역과 가깝지만 주로 주변에 밭이 대규모로 나타나며 GF-33의 경우 주변에 산업시설까지 존재한다. 이런 결과로 보아 밭에서의 경작활동으로 인한 영향이 지하수의 질산성 질소 오염에 영향을 줄 가능성이 크며, 산업단지에서 배출하는 오염수 또한 이러한 가능성이 있다고 볼 수 있다. 강원도 양구에서 지하수를 연구한 결과에서도 대체로 논이 있는 지역에 비해 밭이 있는 지역의 지하수에서 질산성 질소의 오염이 심하게 나타난 자료가 있다(Kaown *et al.*, 2020).

비오염 지하수, 오염 지하수에 대하여 각각 상관분석을 진행하였다. 비오염 지하수가 오염 지하수보다 EC-HCO₃⁻ 상관도는 더 높았으나, EC-Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ 상관도는 비오염 지하수보다 오염 지하수에서 더 높았다. 이러한 결과는 해당 원소들이 지표의 오

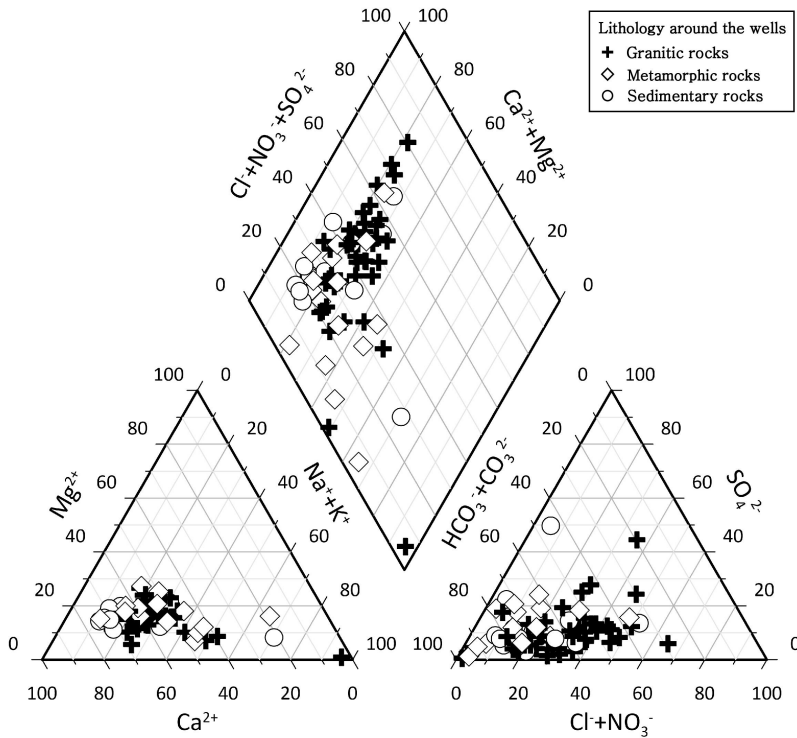


Fig. 8. Piper plot of groundwater classified by simplified bedrock lithology.

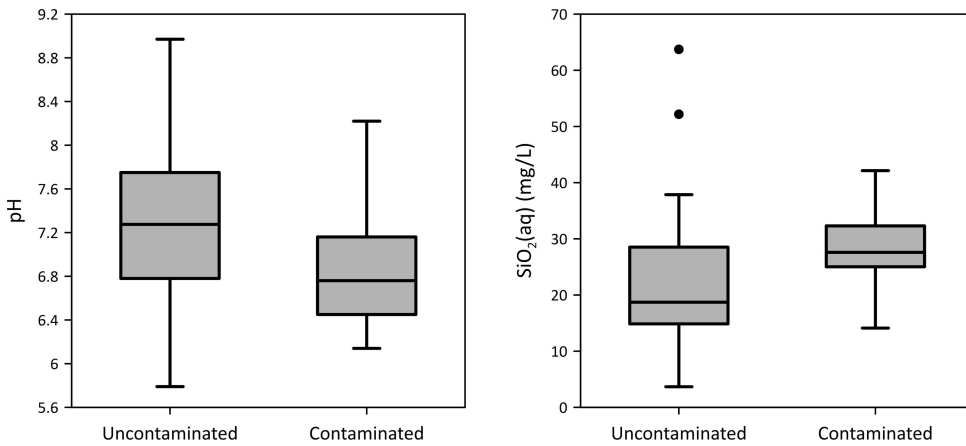


Fig. 9. Box-whisker plots of pH and $\text{SiO}_2(\text{aq})$ concentration in groundwater classified by the extent of nitrate contamination.

염 물질에도 같이 들어있어 물-암석 반응을 오래 거치지 않은 지하수도 특정 오염 물질에 오래 노출되면 해당 원소들의 농도가 높아질 수 있음을 의미한다. Ca, Mg의 경우 토양 산성화를 방지하기 위한 석회비료(lime fertilizer)에, Na의 경우 거름 및 유기질 비료에 상당부분 포함되는 원소이다(Kaown *et al.*, 2020).

오염된 지하수의 경우 비오염 지하수에 비해 전반적으로 pH가 낮게 나타났는데 이는 오염물질로 인해 지하수가 산성화된 것으로 추정된다(그림 9). $\text{SiO}_2(\text{aq})$ 농도는 오염된 지하수에서 상대적으로 높게 나타났다. 인위적인 오염물질 유입이 지하수를 산성화 시키며, 광물의 용해를 촉진시킬 수 있다(Roques *et al.*, 2014). Kwon *et al.* (2020)이 노성천 및 인근 지역에서 조사한 문헌에서도, $\text{SiO}_2(\text{aq})$ 농도가 높게 나온 지하수 시료에 대해서 화학비료의 과다 사용으로 인한 지하수의 산성화가 원인인 것으로 해석하였다. 연구지역 내 오염 지하수에서도, 오염 물질로 인한 지하수의 산성화로 인해 암석내의 규산염의 용해 및 반응이 더 활발해져 지하수내 규산염 농도가 높아졌을 것으로 생각된다.

5. 요약 및 결론

1) 연구 지역 지하수의 주원소 수리지구화학적 특징은 주로 물-암석 반응에 의해 결정되며, 이로부터 기원하는 HCO_3^- , Ca^{2+} , Na^+ 등의 원소들의 농도가

대체로 심부지하수에서 높게 나타나 깊은 심도의 지하수일수록 물-암석 반응이 오래 진행된 것을 알 수 있다.

2) 단층과의 거리에 따른 지하수의 주원소 특징 및 수리지구화학 유형이 뚜렷하게 구분되지 않아 연구 지역에 다양한 규모의 단층이 많이 발달함에도 불구하고 단층대를 따른 심부지하수의 유입은 확인되지 않는다.

3) 퇴적암지역 지하수에서 HCO_3^- , Ca^{2+} 의 농도가 높아 암석 내 탄산염 물질의 영향을 받은 것으로 보이고, 화강암지역 지하수는 NO_3^- 농도가 높아 질산염 오염의 영향을 가장 많이 받았으며, 편마암지역 지하수는 대체로 심부 지하수 유형에 해당되어 낮은 투수성으로 인해 물-암석 반응이 오래된 진행된 것으로 추정된다.

4) 지하수의 질산염 오염도는 천부로 갈수록 증가하고, 오염된 지하수는 대체로 pH가 낮으며 규산염 광물의 용해가 촉진되어 $\text{SiO}_2(\text{aq})$ 농도가 높고, 질산염은 주로 밭에서의 경작활동에서 유래하는 것으로 추정된다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원의 기본과제인 ‘국내 기반암 잠재적 유해원소 통합관리 및 유해성 평가(21-3121)’과제의 지원으로 수행되었습니다. 지하수 관정 조사를 허락해주시고 정보를 제공해주신

관정 관리자분들에게 감사의 마음을 전해드립니다.

REFERENCES

- Chae, G.-T., Yun, S.-T., Kim, K.J. and Mayer, B.H., 2006, Hydrogeochemistry of sodium-bicarbonate type bedrock groundwater in the Pochen spa area, South Korea: water-rock interaction and hydrologic mixing. *Journal of Hydrology*, 321, 326-343.
- Cho, B.W., Sung, I.H., Choo, C.O., Lee, B.D. and Kim, T.K., 1998, Hydrochemical characteristics of natural mineral water in the Daebo and Bulguksa granites. *The Journal of Engineering Geology*, 8, 247-259 (in Korean with English abstract).
- Choo, C.-O., Sung, I.-H., Cho, B.-W., Lee, B.-D. and Kim, T.-K., 1998, Hydrochemistry of groundwater at natural mineral water plants in the Okcheon metamorphic belt. *Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 3, 93-107 (in Korean with English abstract).
- Folch, A., Menció, A., Puig, R., Soler, A. and Mas-Pla, J., 2011, Groundwater development effects on different scale hydrogeological systems using head, hydrochemical and isotopic data and implications for water resources management: The Selva basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 403, 83-102.
- Hinkle, D.E., Wiersma, W. and Jurs, S.G., 2003, *Applied Statistics for the Behavioral Sciences*. Houghton Mifflin College Division, 756 p.
- Hwang, S.K., Kim, S.W., Kee, W.-S. and Kim, J.J., 2019, U-Pb zircon ages and division of the Cretaceous volcanic arc in the Korean Peninsula: Spatiotemporal evolution of the arc volcanism. *Journal of the Geological Society of Korea*, 55, 595-619 (in Korean with English abstract).
- Jeong, C.H., Choi, H.Y., Lee, Y.C., Lee, Y.J. and Yang, J.H., 2016a, Hydrochemistry and noble gas isotopes of groundwaters around the fault zones. *The Journal of Engineering Geology*, 26, 551-559 (in Korean with English abstract).
- Jeong, C.H., Lee, B.D., Sung, I.H. and Cho, B.U., 2004, Effect of well depth, host rocks and mineralization zone on hydrochemical characteristics of groundwater in the Umsung area. *The Journal of Engineering Geology*, 14, 469-485 (in Korean with English abstract).
- Jeong, C.H., Lee, Y.J., Lee, Y.C., Kim, M.S., Kim, H.K., Kim, T.S., Jo, B.U. and Choi, H.Y., 2016b, Hydrochemistry and occurrences of natural radioactive materials from groundwater in various geological environment. *The Journal of Engineering Geology*, 26, 531-549 (in Korean with English abstract).
- Jung, C.H., Park, Y.A. and Kim, H.M., 1976, Explanatory text and geological map of Eumseong sheet (1:50,000). Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 32 p (in Korean).
- Kaown, D.I., Koh, D.-C., Yu, H.K., Kim, H.J., Yoon, Y.-Y., Yum, B.-W. and Lee, K.-K., 2020, Combined effects of recharge and hydrogeochemical conditions on nitrate in groundwater of a highland agricultural basin based on multiple environmental tracers. *Agricultural Water Management*, 240, 106327.
- Kim, D.-H., Lee, J.-H., Park, K.T., Kim, S.C., Choi, Y.-M., Seo, Y.-R., Noh, G.M. and Hamm, S.-Y., 2008, Characteristics of joint systems and their relationship with groundwater system in the Nakdong river mid-basin. *The Journal of Engineering Geology*, 18, 483-492 (in Korean with English abstract).
- Kim, G.-Y., Koh, Y.K., Bae, D.S., Won, C.H., Jung, D.-H. and Choi, B.Y., 2007, Geochemical and environment isotope study on the groundwater from the Youngcheon area, Gyeongbuk province. *Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 12, 35-53 (in Korean with English abstract).
- Kim, J., Ryan, P., Klepeis, K., Gleeson, T., North, K., Bean, J., Davis, L. and Filoon, J., 2014, Tectonic evolution of a Paleozoic thrust fault influences the hydrogeology of a fractured rock aquifer, northeastern Appalachian foreland. *Geofluids*, 14, 266-290.
- Kim, K.-H., Yun, S.-T., Kim, H.-K. and Kim, J.-W., 2015, Determination of natural backgrounds and thresholds of nitrate in South Korean groundwater using model-based statistical approaches. *Journal of Geochemical Exploration*, 148, 196-205.
- Kim, K.J., Rajmohan, N.R., Kim, H.-J., Kim, S.-H., Hwang, G.-S., Yun, S.-T., Gu, B.H., Cho, M.J. and Lee, S.-H., 2005, Evaluation of geochemical processes affecting groundwater chemistry based on mass balance approach: A case study in Namwon, Korea. *Geochemical Journal*, 39, 357-369.
- Kwon, H.-I., Koh, D.-C., Jung, Y.-Y., Kim, D.-H. and Ha, K.C., 2020, Evaluating the impacts of intense seasonal groundwater pumping on stream-aquifer interactions in agricultural riparian zones using a multi-parameter approach. *Journal of Hydrology*, 584, 124683.
- K-water, 2009, Basic Investigation Report of groundwater in Eumseong Area. 221 p (in Korean).
- K-water, 2010, Basic Investigation Report of groundwater in Jincheon Area. 266 p (in Korean).
- K-water, 2017, Basic Investigation Report of groundwater in Jeungpyeong and Goesan Area. 252 p (in Korean).
- K-water, 2021, Groundwater Annual Report. 413 p (in Korean).
- Lee, B.-J., Kim, D.-H., Choi, H.-I., Gi, W.-S. and Park, K.-H., 1996, Explanatory note of the Daejeon sheet (1:250,000). Korea Institute of Mineral Resources, 59 p (in Korean with English abstract).

- Lee, J.M., Koh, D.-C., Chae, G.-T., Kee, W.-S. and Ko, K.-S., 2021, Integrated assessment of major element geochemistry and geological setting of traditional natural mineral water sources in South Korea at the national scale. *Journal of Hydrology*, 598, 126249.
- Lee, J.-U., Chon, H.-T. and John, Y.-W., 1997a, Geochemical characteristics of deep granitic groundwater in Korea. *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, 4, 199-211 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-U., Chon, H.-T. and John, Y.-W., 1997b, Geochemical characteristics of groundwater in Korea with different aquifer geology and temperature-comparative study with granitic groundwater. *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, 4, 212-222 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-Y., Kim, C.-H., Lee, I.-H. and Koh, I.-S., 1998, Geochemical study on the groundwater in Goryeong area. *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, 5, 162-170 (in Korean with English abstract).
- Moon, S.-H., 2017, Hydrogeochemistry of groundwater occurring in complex geological environment of Yeongdong area, Chungbuk, Korea. *Economic and Environment Geology*, 50, 445-466 (in Korean with English abstract).
- Petitta, M., Primavera, P., Tuccimei, P. and Aravena, R., 2011, Interaction between deep and shallow groundwater systems in areas affected by Quaternary tectonics (Central Italy): a geochemical and isotope approach. *Environmental Earth Sciences*, 63, 11-30.
- Roques, C., Aquilina, L., Bour, O., Maréchal, J.C., Dewandel, B., Pauwels, H., Labasque, T., Ayraud, V.V. and Hochreutener, R., 2014, Groundwater sources and geochemical processes in a crystalline fault aquifer. *Journal of Hydrology*, 519, 3110-3128.
- Ryang, W.-H., 2013, Characteristics of strike-slip basin formation and sedimentary fills and the Cretaceous small basins of the Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 31-45 (in Korean with English abstract).
- Ryang, W.-H., 2018, Gugokri-Nongdari sedimentary succession and environment in the southwestern Eumsung basin (Cretaceous), Korea. *Journal of the Korean earth science society*, 39, 545-554 (in Korean with English abstract).
- Ryang, W.H., Chough, S.K., Kim, J.S. and Son, H.W., 1998, Sedimentological study of Cretaceous Umseong basin. *Proceedings of the Korean Society of Petroleum Geology*, 1-9 (in Korean).
- Ryu, J.-H., Kwon, J.-S., Kim, G.-Y. and Koh, Y.-K., 2012, Geochemical characterization of rock-water interaction in groundwater at the KURT Site. *Journal of the Korean Radioactive Waste Society*, 10, 189-197.
- Sung, I.-H., Choo, C.-O., Cho, B.-W., Lee, B.-D., Kim, T.-K. and Lee, I.-H., 1998, Hydrochemical properties of the groundwater used for the natural mineral waters in Precambrian metamorphic terrains, Korea. *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, 5, 203-209 (in Korean with English abstract).
- Varol, S. and Davraz, A., 2014, Assessment of geochemistry and hydrogeochemical processes in groundwater of the Tefenni plain (Burdur/Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 71, 4657-4673.

Received : January 28, 2023

Revised : February 26, 2023

Accepted : February 27, 2023