Research Paper

Estimation of Groundwater Quality and Background Level in Boseong Area, South Korea

Sang-Ho Moon¹, Jinwon Lee², Kangjoo Kim^{2*}, Jeong-woung Ju³

¹Climate Change Response Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, 34132, Korea

²Department of Environmental Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 54150, Korea

³Geogreen21, 901 E&C Venture Dream Tower, Seoul 08376, Korea

*Corresponding author : kangjoo@kunsan.ac.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 13 January 2022
Received in revised form 15 February 2022
Manuscript accepted 21 February 2022
Available online 28 February 2022

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2022.55.1.29>

Research Highlights

- Groundwater quality in Boseong area was characterized based on 200 chemical data collected during July 2019.
- Groundwater data were classified by NO₃ contents and alkalinity. Also, concentration process of NO₃-N, As, Fe, Pb, Mn, Zn, PO₄, F, Sr was discussed.
- Background concentrations in Boseong area were reestimated using the BRIDGE method and compared with previously reported ones.

ABSTRACT

The groundwater quality in Boseong area was characterized and their background concentrations were estimated based on the chemical data obtained from 200 groundwater samples collected during July 2019. Groundwater data were classified into two groups: Group 1 with NO₃⁻ < 44.3 mg/L and Group 2 with NO₃⁻ ≥ 44.3 mg/L. Results of t-tests indicate that groundwaters in Group 2 are significantly higher in water temperature and Ca concentration and significantly lower in F, As, Pb and Zn concentrations. It was also revealed that groundwaters Group 2 are closely linked to low pH, alkalinity, NH₄, NO₂, F, As, Fe, Mn, Pb and Zn levels, and high EC and water temperature. Background concentrations were estimated using the the BRIDGE method. The results depicted the higher levels in NO₃, NH₄, PO₄, As, Fe, Mn than the ones estimated by MOE and KECO (2018; 2019), which were prepared for the three catchment units in Boseong. The results of this study are believed to have more reliability because more data were used.

Keywords: Boseong area, groundwater, background level, water quality

Citation: Moon, S.-H., Lee, J., Kim, K., Ju, J.-w. (2022) Estimation of Groundwater Quality and Background Level in Boseong Area, South Korea. *Korea Economic and Environmental Geology*, v.55, p.29-43, doi:10.9719/EEG2022.55.1.29.

연구논문

보성지역 지하수의 배경 수질 및 오염 특성 분석

문상호¹ · 이진원² · 김강주^{2,*} · 주정웅³

¹한국지질자원연구원 기후변화대응연구본부 지하수환경연구센터

²군산대학교 환경공학과

³(주)지오그린21

*책임저자 : kangjoo@kunsan.ac.kr

요 약

2019년 7월에 얻어진 200개의 지하수 수질자료를 활용하여 보성지역 지하수의 수질 특성을 평가하고, 배경 수질을 도출하였다. 지하수는 질산성질소 농도를 기준으로 Group 1($\text{NO}_3^- < 44.3 \text{ mg/L}$)과 Group 2($\text{NO}_3^- \geq 44.3 \text{ mg/L}$)로 구분하였다. t-test 결과, Group 2는 Group 1에 비해 유의성 있게 수온과 Ca 농도가 높았고, F, As, Pb, Zn 등의 농도는 낮게 나타났다. 질산염 농도가 높은 경우에는 낮은 pH, 알칼리도, NH_4 , NO_2 , F, As, Fe, Mn, Pb, Zn 등의 농도를 보였으며, EC 및 수온은 높아지는 경향을 보였다. 한편, 배경농도는 BRIDGE 방법으로 설정하였다. 본 연구에서 설정된 NO_3 , NH_4 , PO_4 , As, Fe, Mn 항목들에 대한 배경농도 값들은 기존의 환경부 보고서(MOE and KECO, 2018; 2019)에 제시된 중권역별 배경농도 산정 결과보다는 다소 높게 설정되었다. 본 연구에 이용된 수질자료의 수가 훨씬 많다는 점을 감안하면, 본 연구에서 산출된 배경수질 자료의 신뢰성이 더 높은 것이라 판단된다.

주요어 : 보성지역, 지하수, 배경농도, 수질 특성

1. 서 론

지하수의 수질은 기본적으로 대수층 및 그 지역 주변 토양/암석과의 물-암석 반응 그리고 물순환 범위/속도 등에 의해 결정되지만, 산업화, 인구 증가에 따른 도시 확대, 농업 발달 등 인위적 오염 요인들로 인해 지하수의 수질이 영향을 받는다. 인위적 요인들에 의한 지하수 수질 오염을 평가하는 데에는 여러 가지 방법이 있었으나, 최근에는 해당 지역의 배경 수질을 설정한 후 지하수 내 각 이온 성분마다 배경 수질에서 벗어나는 상태가 어느 정도인지, 그리고 향후 오염물질의 함량이 상승 추세인지 하강 추세를인지 검토해 보는 방법이 많이 이용되고 있다.

지하수 수질의 배경농도(background level, BL)와 문턱값(threshold value, TV)은 2000년대 이후 유럽 각국에서 지하수 관리를 위한 기본 개념으로 활용되고 있다(EC, 2000, 2006, 2008, 2009; EPA, 2010; Mendizabal et al., 2012). 유럽에서는 2000년 “Natural Baseline Quality in Europe Aquifers: A Basis for Aquifer Management (BaSeLiNe)”라는 프로젝트를 도출하였고, 12개 EU 국가가 본 프로젝트에 참여하였다(Nieto et al., 2005). BaSeLiNe 프로젝트는 표준화된 전유럽적인 수질관리를 위해서 자연수질의 배경농도를 설정하는 것을 목적으로 한다. 이

러한 작업은 유럽의 많은 나라에 대하여 설정하였고, BaSeLiNe 프로젝트는 단순한 통계적기법을 바탕으로 배경농도를 설정할 것을 추천하고 있다. 이후, 2005년 과학적 원리를 바탕으로 한 지하수 문턱값을 도출하기 위하여 19개국에 참여하는 BRIDGE (Background cRiteria for the Identification of Groundwater thrEsholds)가 시작되었다. 본 BRIDGE 프로젝트는 먼저 자연적인 배경농도를 설정할 것을 추천하고 있으며, 이에 의하면, 자연 배경농도는 지질, 생물, 대기에서 자연적 과정에 의해 녹아들어난 원소, 화학종, 또는 화학물질의 농도라고 정의하고 있다(BRIDGE project, 2006).

국내에서도 최근에 지하수 배경농도 설정에 대한 연구가 수행되어 왔다(KEI, 2013; Nam et al., 2013; Yea et al., 2014; An et al., 2014; 2015; Kim et al., 2015; Cha and Seo, 2020). 유럽위원회(European Commission, EC)의 물 관리-기본지침(Water Framework Directive, WFD)과 지하수 지침(Groundwater Directive, GWD)에서는 배경농도를 인위적 영향이 거의 없거나 존재하지 않는 상태의 지하수체에서의 물질 농도로 정의하고 있으나, 우리나라 국립환경과학원에서는 배경농도를 인위적 영향을 받지 않거나 매우 적게 받은 자연 상태의 지하수 내에서 자연기원 물질에 의한 농도 혹은 지표 값으로 정의하고 있다.

환경부에서는 전국의 지하수 수질 현황을 파악하고 수질 변화 추세를 정기적으로 파악할 목적으로 국가지하수수질 측정망(National Groundwater Quality Monitoring Networks, NGQMN)을 운영하고 있으며, 측정망에서 축적된 측정된 자료는 지하수 수질 정책 수립에 이용되고 있다(MOE, 2013). 환경부와 한국환경공단에서는 이들 측정망 자료를 활용하여 2015년부터 2019년까지 전국을 대상으로 중권역 단위의 배경 수질을 검토하였으며, 몇 년간 연속적으로 축적된 자료를 활용하여 수질 추세분석도 수행한 바 있다.

연구대상 지역인 보성지역에 대하여는 환경부에 의해 3개 중권역(이사천, 주암댐, 섬진강 서남해)별로 21개 항목의 배경농도가 산정되었다(MOE and KECO, 2019). 한편, 보성지역은 2019년부터 2020년까지 2년간 지하수 기초조사가 수행되었으며, 그 일환으로 200개 관정에 대하여 2회의 수질조사가 수행되었다. 이 연구에서는 보성지역 지하수 기초조사 보고서(MOE and KIGAM, 2020)에 수록된 2019년도 지하수 수질 분석 자료를 토대로 보성지역의 수질 특성을 검토하였으며, BRIGE 법에 의한 배경 수질 평가와 환경부가 중권역별로 산정한 배경 수질 자료를 상호 비교하여 보성지역의 지하수 오염 현황 및 추세를 평가해 보았다.

2. 연구 지역 및 연구 방법

2.1. 연구 지역

연구 지역인 보성군은 전라남도 동남부 해안에 위치하고 있으며, 주변에는 고흥, 순천, 장흥, 화순과 접하고 있다. 행정구역은 2개 읍(보성, 별교) 10개 면(노동, 미력,

검백, 울어, 복내, 문덕, 조성, 득량, 회천, 웅치)으로 이루어져 있고, 면적은 663.53 km²이다(Fig. 1). 보성지역은 전형적인 농업지역에 해당되며, 남해안에 면해 있는 산록을 이용한 차 재배와 약용작물의 생산이 특히 유명하다.

수자원단위지도에 의하면, 보성군은 섬진강, 섬진강남해 2개 대권역에 속하며, 3개 중권역(주암댐, 섬진강 서남해, 이사천), 9개 표준유역(보성강상류, 검백수위표, 주암댐상류, 동북천, 주암댐, 마수천, 별교천, 동룡천, 대강천)으로 구성된다(Fig. 1, MOE and KIGAM, 2020).

보성군의 지질은 선캄브리아시대의 화강편마암과 반상변정질편마암, 고생대 페름기의 명봉층, 중생대 백악기의 퇴적암과 화강암류, 신생대 제4기 충적층 등으로 구성된다. 이 중 선캄브리아시대의 반상변정질편마암이 44.40%,

Fig. 1. Municipal and catchment boundaries in Boseong area (MOE and KIGAM, 2020).

Fig. 2. Hydrogeologic units in Boseong area (MOE and KIGAM, 2020).

화강편마암이 17.86%로서 두 암석이 전체 면적의 62% 정도를 차지할 정도로 대부분의 지질을 구성하고 있다(MOE and KIGAM, 2020). 지하수관리기본계획 수정계획(2017~2026)(MOLIT, 2017)에 따른 보성지역의 유역별 수문지질단위는 Fig. 2와 같다. 변성암과 이들 주변에 발달한 미고결 쇄설성 퇴적층이 대부분을 차지하고 있으며, 이들 수문지질단위가 보성지역 지하수의 수질 특성을 전반적으로 지배하고 있다.

2.2. 시료 채취 및 현장수질 분석

수질 특성과 배경 수질 분석을 위해 이용된 자료는 보성지역 지하수 기초조사를 위해 2019년 7월에 채취/분석된 지하수 시료들이다. 지하수의 현장 수질(수온, 전기전도도, 용존산소, pH)은 휴대용 수질측정장비(WTW Multi 3420)를 이용하여 측정하였다. 지하수 시료는 각 관정별로 0.45 μm 멤브레인 필터를 사용해 현장 여과한 후 저온 상태에서 실험실로 운반되어 주요 용존이온 분석에 사용되었다.

2.3. 주요 용존이온 분석

지하수 시료의 알칼리도(alkalinity)는 Gran 적정법을 이용하여 측정하였으며, 주요 음이온중 Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , Br^- , F^- 는 이온 크로마토그래프(Dionex DX500), PO_4^{3-} 는 여과 후 질산 처리된 시료를 발색법으로 분석하였다. 주요 양이온 중 Li^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , NH_4^+ 는 이온 크로마토그래프(Dionex DX500), Si^{4+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} 및 미량원소(As , Cu , Al , Pb , Zn , Sr)는 유도결합 플라즈마(PerkinElmer)를 이용하여 분석하였다.

2.4. 배경농도 평가

국가적인 배경농도 설정방법이 만들어지지 않았거나 보다 발전된 방법으로 설정방법을 만들어 낼만큼 자료가

충분하지 않다면, BRIDGE 프로젝트에서 추천하는 방법을 사용하도록 하고 있다. 연구지역 전체를 대상으로 2019년 7월 기간 중에 채수된 200개 지하수의 수질 자료를 이용한 배경농도는 Table 1과 같이 BRIDGE 프로젝트가 제안하는 데이터 선택 기준(Hinsby et al., 2008; Wendland et al., 2008)과 본 연구에서 채택한 배경농도 설정 기준으로 평가하였다. Table 1의 자료선별 기준에서 해당되는 자료의 수에 맞추어 90th 또는 97.7th percentiles을 배경농도로 설정하게 된다(Hinsby and Condesso de Melo, 2006; Muller et al., 2006). 선별된 자료의 수가 60개를 넘어서는 경우에는 97.7th percentile을 이용하고, 자료의 수가 60개 미만이거나 인간 활동에 의한 영향을 제외할 수 없는 경우에는 90th percentile을 이용한다(Muller et al., 2006). 본 연구에서는 Table 1과 같은 데이터 선택 기준을 활용한 결과, 총 200 개의 자료 중 73 개의 자료가 선택되었고, 따라서, 97.7번째 percentile을 배경농도로 설정하게 되었다.

한편, 환경부·한국환경공단에 의한 보고서 「2018년도 지하수 수질관리 기반구축 최종보고서: 섬진강서남해 유역(MOE and KECO, 2018)」, 「2019년도 지하수 수질관리 기반구축 최종보고서 (MOE and KECO, 2019)」에서는 보성군 전체를 대상으로 배경농도를 설정한 것이 아니라, 보성지역 내 3개 중권역(주암댐, 섬진강 서남해, 이사천) 기준으로 12개 항목에 대하여 배경농도를 설정하였다. 2018년과 2019년의 지하수 수질관리 기반구축 사업에서는 ① 사전선별 → ② 수질자료 분류 및 처리 → ③ 정규성 검정 → ④ 배경농도 산정 절차를 따랐다.

이때, 사전선별 과정에서의 제거 기준은 (1) 이온전하 균형(CBE, charge balance error): $\pm 10\%$ 초과, (2) 심도 정보: 없음, (3) 염수대수층: NaCl 1,000 mg/L 초과(각 이온당량 고려), Cl^- 606.61 mg/L 초과(이온분석 미실시 경우), (4) NO_3^- -N 일정 농도 이상 제거: NO_3^- -N ≥ 2.259 mg/L,

Table 1. A comparison of data selection protocols between BRIDGE method and this study used for estimation of groundwater background level

Data choice of BRIDGE method	Data choice in this study
Data excluded when $\text{CBE} \geq 10\%$ or when depths of samples and aquifers are unknown	Data excluded when $\text{CBE} \geq 10\%$
Data excluded when influenced by hydrothermal fluid or salt water. Criteria: $[(\text{Na}) + (\text{Cl})] > 1000 \text{ mg/l}$	Data excluded when $[(\text{Na}) + (\text{Cl})] > 1000 \text{ mg/l}$
Time-series data can be used by their median values.	Time-series data unavailable.
Data excluded when samples were collected from the sites contaminated by agrochemicals and PAHs, etc.	Agrochemicals and PAHs data unavailable.
Data excluded when $\text{NO}_3 \geq 10 \text{ mg/L}$	Data excluded when $\text{NO}_3 \geq 10 \text{ mg/L}$
Data excluded when $\text{NH}_4 \geq 0.5 \text{ mg/L}$	Data excluded when $\text{NH}_4 \geq 0.5 \text{ mg/L}$

CBE: charge balance error, PAHs: polycyclic aromatic hydrocarbons

(5) 인위적 오염물질(BTEX 등): 유기화학물질 검출 등이다. 배경농도 산정 시 자료의 정규성 여부 및 불검출자료(ND) 포함 여부에 따라 산정 방법이 달리 정해지며, 불검출 비율이 통상 낮거나 없는 경우에는 90th 백분위수, 변곡점 등을 기준으로 하였다. 배경농도의 적용 항목은 일반 오염물질 2개(질산성 질소, 염소), 특정 유해물질 6개(비소, 납, 카드뮴, 수은, 유기인, 6가 크롬), 기타 4개(볼소, 철, 망간, 암모니아성 질소) 등 지하수 생활용수 수질 기준 및 기타 항목 12개이다.

이번 연구에서는 보성군 전체 지역 200개 관정을 대상으로 2019년 7월에 채취/분석한 지하수 시료를 대상으로 배경농도를 설정하였으며, 환경부·한국환경공단 보고서(MOE and KECO, 2018; 2019)가 보고한 보성지역 3개 중권역(주암댐, 섬진강 서남해, 이사천)별 12개 항목에 대한 배경농도 산정 결과와 비교 검토하였다. 두 가지 방법은 기본적으로 BRIDGE 방법을 이용하여 동일한 방식을 이용한 것이지만, 시료 채취 기간, 수질 항목의 개수, 항목별로 이용된 자료의 개수 등에서 차이가 크다. 이번 연구에서 검토된 수질 항목은 26개이고, 환경부·한국환경공단이 배경농도 설정에 이용한 항목은 12개 뿐이다. 또한, 환경부·한국환경공단이 배경농도 산정에 사용한 자료는 몇 년간의 연속된 자료를 이용하였으나, 이용 자료의 개수가 적은 항목들이 많은 편이다. 예를 들어, 섬진강서남해 유역에 대한 배경농도 산정에서 12개 수질 항목 중 7개 항목의 최종 이용 자료 개수는 각각 76개였으나, 5개 항목의 이용 자료 개수는 3개 뿐으로서 자료의 개수가 너무 적었다. 한편, 환경부·한국환경공단 보고서

에서 사전 선별된 자료는 몇 년간의 자료이긴 하나, 매년 동일한 관정을 대상으로 한 것이 아닌 경우가 있으며, 동일 항목에 대하여도 연도별/분기별로 자료 개수가 서로 상이한 문제점이 있다.

3. 연구결과 및 토의

3.1. 수질 분석 결과

2019년 7월에 연구지역에서 채취/분석된 200개 시료에 대하여 얻어진 수질분석 결과의 통계자료와 빈도 분석 결과는 Table 2 및 Fig. 3과 같다. 지하수의 현장 수질 및 음/양이온의 함량 특성은 아래와 같다.

현장 수질: pH(수소이온농도)는 5.46~8.33 범위이고, 평균 6.63, 중앙값은 6.57이다. ORP는 19.2~587 mV 범위, 평균 241 mV, 중앙값은 230 mV이다. DO(용존산소)는 1.11~10.02 mg/L 범위, 평균 7.21 mg/L, 중앙값은 7.43 mg/L이다. EC(전기전도도)는 54.0~13,280 μ S/cm 범위, 평균 291 μ S/cm, 중앙값은 165 μ S/cm이다. EC 값이 1,000 μ S/cm 이상을 보이는 것은 해수침투의 영향을 받은 것으로 판단된다. T(수온)은 14.6~19.1 °C 범위를 보였다.

음이온 함량: 알칼리도는 0.20~2.56 meq/L 범위를 보였다. 알칼리도는 각종 화학반응에 의하여 변화되며, 지하수에서 알칼리도를 증가시키는 가장 큰 요인은 광물의 풍화이다(Kim et al., 2008). 따라서, 알칼리도는 지하수의 대수층 체류시간을 지시하기도 한다. F는 0~2.80 mg/L 범위이며, 먹는물 기준치 1.5 mg/L를 초과한 것은 2개 시

Table 2. Statistics of field parameters and ion concentrations for groundwater samples collected on July 2019 at Boseong area

	Min	Max	Median	mean	std		Min	Max	Median	mean	std
pH	5.46	8.33	6.57	6.63	0.47	Li (μ g/L)	0.00	67.4	0.01	4.27	8.79
ORP (RmV)	19.2	587	230	241	75.1	Na (mg/L)	1.78	2,565	10.1	28.7	186
DO (mg/L)	1.11	10.02	7.43	7.21	1.58	K (mg/L)	0.35	44.9	1.42	2.90	4.88
EC (μ S/cm)	54.0	13,280	165	291	1,009	Mg (mg/L)	0.57	245	3.70	6.34	19.2
TDS (mg/L)	27.0	6,640	82.5	146	504	Ca (mg/L)	2.88	293	14.0	20.1	27.2
T (°C)	14.6	19.1	17	17.0	1.02	PO ₄ (mg/L)	0.00	5.73	0.130	0.19	0.45
Alkalinity (meq/L)	0.20	2.56	0.76	0.87	0.44	Si (mg/L)	3.30	23.9	11.2	11.0	2.95
F (mg/L)	0.00	2.80	0.067	0.12	0.27	As (μ g/L)	0.00	84.5	1.1	3.4	8.6
Cl (mg/L)	0.76	4,626	8.96	48.0	346	Fe (mg/L)	0.00	15.5	0.00	0.13	1.12
Br (mg/L)	0.00	17.0	0.02	0.14	1.23	Mn (mg/L)	0.00	1.77	0.000	0.03	0.18
NO ₃ (mg/L)	0.11	238	13.74	21.87	29.91	Cu (μ g/L)	0.00	102	0.93	3.13	8.23
NO ₃ -N (mg/L)	0.02	53.7	3.10	4.94	6.75	Al (mg/L)	0.00	0.33	0.010	0.02	0.03
NO ₂ (mg/L)	0.00	2.04	0.010	0.03	0.17	Pb (μ g/L)	0.00	14.9	0.00	0.37	1.28
NH ₄ (mg/L)	0.00	1.40	0.000	0.04	0.16	Zn (μ g/L)	0.00	6,850	19.4	190	791
NH ₄ -N (mg/L)	0.00	0.55	0.000	0.02	0.08	Ni (μ g/L)	0.00	977	0.00	5.62	69.1
SO ₄ (mg/L)	0.48	610	6.16	12.5	45.3	Sr (mg/L)	0.01	3.93	0.12	0.21	0.41

Fig. 3. Frequency analyses for field parameters and ion concentrations of groundwater sampled on July 2019 at Boseong area.

Fig. 3. Continued.

료뿐이다. Cl은 0.76~4,626 mg/L 범위이나, 평균은 48.0 mg/L, 중앙값 8.96 mg/L이다. Cl은 인간의 활동과 밀접한 관련이 있는 화학종이며, 하수나 비료 살포 등과 관련이 있다. 연구지역에서 1,000 mg/L 이상의 농도를 보이는 지하수가 3개 관찰되었으며, 이는 해수침투에 의한 것으로 판단된다. 이외에도 먹는물 기준치 250 mg/L를 초과하는 지역이 1개 관찰되었다. Br은 0~17.0 mg/L 범위이나, 평균과 중앙값은 각각 0.14 mg/L, 0.02 mg/L로서 적은 값이다. Br 함량이 1 mg/L 이상으로 높은 경우는 해수침투 영향인 것으로 판단된다.

NO₃는 0.11~238 mg/L 범위이다. 평균 21.9 mg/L, 중앙값 13.74 mg/L를 보였으며, 95% 정도가 60 mg/L 미만이다. 연구지역은 질산염에 의한 오염이 심한 것으로 나타났으며, 질산성 질소(NO₃-N)의 먹는물 기준치 10 mg/L를 초과하는 시료는 23개(12%), 생활용수 기준 20 mg/L를 초과하는 시료는 6개(3%)이다. 질산염은 약한 환원환경에서 탈질되므로, 이의 존재는 대수층이 인간의 활동과 같은 지표환경 변화에 민감함을 의미한다. NO₂는 0~2.04 mg/L 범위이다. 아질산은 질산염의 탈질 또는 암모니아의 산화 과정 중에 발생한다(Appelo and Postma, 2005). 연구지역에서 아질산염의 농도는 97% 정도가 0.1 mg/L

미만으로 매우 낮았다. SO₄는 0.477~610 mg/L 범위이나, 평균과 중앙값은 각각 12.5 mg/L, 6.16 mg/L이다. 황산염은 석고와 같은 황산염 광물, 해수침투, 열수작용 등에 의해 농집되며, 심한 환원환경에서는 환원되어 황화철로 침전한다. 이때, 비소 등과 같은 중금속들이 같이 침전한다. 황산염의 먹는물 기준 200 mg/L를 초과하는 시료는 1개이며, 해수에서 기원한 것으로 판단된다. PO₄ 성분은 0~5.73 mg/L 범위, 평균 0.19 mg/L, 중앙값 6.16 mg/L이다. 인산염은 산화철에 매우 잘 흡착되며, 환원환경하에 있는 지하수에서는 산화철의 환원에 의해 높은 농도를 보이기도 한다(Kim et al., 2008; Kim et al., 2012).

양이온 함량: Na는 1.78~2,565 mg/L 범위이나, 95% 이상이 25 mg/L 미만의 범위를 보인다. Na는 사장석과 같은 광물의 풍화에 의해서도 농집될 수 있으나, 주로 인간의 활동 또는 해수에 의한 영향을 반영한다. K는 0.346~44.9 mg/L 범위이며, 평균과 중앙값은 각각 2.90 mg/L, 1.42 mg/L이다. 칼륨은 비료의 주요 성분이나, 정장석, 흑운모와 같은 광물의 풍화, 해수에 의한 영향으로 농집되기도 한다. Na-사장석과 정장석은 비교적 풍화에 강하기 때문에 광물의 풍화에 의한 농도 증가는 미약하게 나타

난다(Kim, 2002). Mg는 0.573~245 mg/L 범위이며, 95% 이상이 10 mg/L 미만이다. Ca는 2.88~293 mg/L 범위이며, 97%가 60 mg/L 미만이다. Mg, Ca는 주로 광물의 풍화, 이온교환 반응 등에 의해 증가되며, pCO_2 가 높아지는 경우에는 광물의 용해도가 증가되어 농도가 증가하게 된다.

NH_4 는 0~1.40 mg/L 범위이다. 암모늄은 유기물의 분해에 의해 지하수 속에 농집되며(Havey et al., 2002), 산화조건에서는 질산염으로 전이된다. 따라서, 암모늄의 존재는 유기물의 분해가 왕성한 환원환경하에 있음을 의미한다. 암모니아성 질소의 먹는물 기준치 0.5 mg/L (N 기준)을 초과한 시료는 3개이다.

Sr은 0.01~3.93 mg/L 범위이며, 96%가 0.6 mg/L 미만이다. Sr은 Ca와 비슷하게 거동한다. Li는 0~67.4 mg/L 범위이며, 평균은 4.27 mg/L, 중앙값은 0.01 mg/L이다. Li는 주로 열수작용에 의해 지하수 속에 농집되며, Li 농도가 높은 물은 열수활동을 반영한다고 할 수 있다. Si는 3.30~23.9 mg/L 범위이며, 평균 11.0 mg/L, 중앙값 11.2 mg/L이다. 광물의 풍화와 2차 광물의 포화도에 의해 농도가 결정되며, 전반적으로 pH가 낮고 비교적 최근에 함양된 지하수에 농도가 낮게 나타난다. As는 0~84.5 μ g/L 범위로 나타났다. 비소는 인산염과 마찬가지로 산화철에 매우 잘 흡착되며(Appelo and Postma, 2005; Kim et al., 2012), 환원환경하에 있는 지하수에서는 산화철의 환원에 의해 높은 농도를 보이기도 한다. 실제로 조사지역의 비소 농도가 질산염의 농도가 낮은 경우에 높은 농도를 보이는 것으로 보아 이러한 과정을 반영하는 것으로 보인다. Fe는 0~15.5 mg/L 범위이며, 평균 0.134 mg/L, 중앙값 0 mg/L이다. 3가 철의 용해도는 매우 낮기 때문에, 0.1 mg/L 이상으로 용존된 철은 대부분 2가 형태라고 할 수 있다. 지하수 속에 철의 농도가 높아지는 것은 산화철의 환원이라고 할 수 있으며, 낮아지는 경우는 지하수가 산화환경에 있거나, 환원환경이라고 해도 황산염의 환원 또는 능철석의 침전에 의해 농도가 낮아질 수 있다(Ha et al., 2019). Mn은 0~1.77 mg/L 범위이며, 평균 0.031 mg/L이다. 망간은 질산염이 환원되는 것보다는 강한 환원환경이지만, 매우 약한 환원환경에서 환원되어 농도가 증가된다. 따라서, 망간의 농도는 철과 마찬가지로 질산염과 역의 상관관계를 보인다. 환원환경에서 망간의 농도가 낮아지는 기작은 능망간석의 침전으로 알려져 있다(Appelo and Postma, 2005).

3.2. 수질 영향 요인 해석

지하수 시료 분류: 지하수의 수질영향 요인을 해석하기 위하여 질산이온의 먹는물 기준치(44.3 mg/L)를 기준으로 시료를 다음과 같이 크게 2개 그룹으로 분류하였다.

질산성질소 농도가 낮은 Group 1은 알칼리도 1 meq/L를 기준으로 Group 1.1과 Group 1.2로 추가 분류하였다. 알칼리도는 주로 광물과의 반응에 의해 증가되고, pH, Eh와 함께 물의 지구화학적 특성을 이해하기 위한 기본 변수라고 할 수 있다. Kim et al.(2018)에 의하면, 우리나라 지하수의 상당수가 1.0 meq/L의 낮은 농도를 보인다. 보성지역에서는 질산성질소 함량이 낮은 Group 1은 시료 수 177개이며, 그 중에 알칼리도가 1 meq/L 이하가 126개, 1 meq/L 이상이 51개이다. 질산성질소 농도가 높은 Group 2에는 200개 시료 중 23개가 이에 해당되었다.

Group 1 (n=177): $NO_3 \leq 44.3$ mg/L

Group 1.1 (n=126): Alkalinity ≤ 1 meq/L

Group 1.2 (n=51): Alkalinity > 1 meq/L

Group 2 (n=23): $NO_3 \geq 44.3$ mg/L

그룹별 농도: 위와 같이 분류된 각 그룹별 수질과 그룹간의 평균값 비교 결과는 Table 3 및 Fig. 4와 같다.

t-test에 따른 평균값 비교 결과, 질산성질소가 높은 집단(Group 2)은 질산성질소가 낮은 집단(Group 1)에 비하여 유의성이 있는게 높은 수온과 높은 Ca 농도를 보였고, F, As, Pb, Zn 등은 유의성이 있는 낮은 값을 보였다. Group 1에서 알칼리도가 낮은 집단(Group 1.1)과 높은 집단(Group 1.2)과의 비교에서는 Group 1.2의 EC, 수온, F, Li, Ca, Si, Zn, Sr의 농도가 Group 1.1에 비하여 유의성 있게 높았다. 아울러, Group 1.2의 높은 pCO_2 및 $SI_{Calcite}$ 값도 유의성 있다. 이를 바탕으로 볼 때, Group 1에서는 광물의 풍화가 F, Li, Ca, Si, Zn, Sr 등을 농집시키는 주된 과정으로 판단된다.

3.3. 지하수 내 질산성 질소 및 As, Fe, Pb, Mn, Zn, PO_4 , F, Sr 농집 과정

Fig. 5는 질산염의 농도를 각 화학변수에 대하여 도시한 결과이다. 질산염의 농도는 pH 7 이하, 알칼리도 1.5 meq/L 미만에서 높게 나타났으며, NH_4 , F, As, Fe, Mn, Pb, Zn 등의 농도가 낮고, EC 및 수온은 비교적 높은 물에서 높아지는 경향을 보였다. 지하수의 채수가 여름철에 이루어졌음을 고려할 때, 높은 수온은 지표환경에 민감한 정도를 반영하고, NH_4 , NO_2 , Fe, Mn 등은 환원환경을 반영하므로, 질산성질소는 지표환경에 민감한 산화환경에 있는 대수층에서 농도가 높아지는 것을 알 수 있다. 담수조건에서는 질산성질소가 높은 물이 높은 EC를 보이는 것으로 보아, 질산성질소는 농업활동(즉, 비료살포)와 관련이 있는 것으로 판단된다.

재미있게도 질산성질소의 농도가 낮은 물이 As, Fe, Pb,

Table 3. Comparisons of statistic data and t-test results among each group for groundwater samples collected on July 2019 at Boseong area

	Group 1.1		Group 1.2		Group 1 (all)		Group 2		t-test results (p value)	
	mean	stdev	mean	stdev	mean	stdev	mean	stdev	Group 1.1 and 1.2	Group 1 and 2
pH	6.58	0.480	6.72	0.449	6.62	0.474	6.69	0.410	0.080	0.520
ORP(RmV)	252	79.7	226	68.5	244	77.4	211	46.3	0.041	0.006
DO (mg/L)	7.34	1.60	6.93	1.64	7.22	1.62	7.13	1.24	0.126	0.797
EC (μ S/cm)	137	42.4	573	1912	262	1039	513	716	0.109	0.146
TDS(mg/L)	68.3	21.2	286	956	131	519	256	358	0.109	0.146
수온($^{\circ}$ C)	16.7	1.03	17.3	0.938	16.9	1.03	17.6	0.753	0.002	0.001
Alk(meq/L)	0.650	0.192	1.41	0.388	0.869	0.434	0.889	0.467	0.000	0.840
F (mg/L)	0.070	0.040	0.254	0.510	0.123	0.287	0.063	0.047	0.013	0.013
Cl (mg/L)	9.00	5.35	130	667	43.9	360	79.8	214	0.201	0.496
Br (mg/L)	0.020	0.017	0.436	2.42	0.140	1.30	0.100	0.274	0.224	0.730
NO ₃ (mg/L)	14.2	10.6	13.0	10.2	13.9	10.5	83.4	52.3	0.476	0.000
NO ₂ (mg/L)	0.017	0.049	0.059	0.292	0.029	0.162	0.067	0.189	0.309	0.301
NH ₄ (mg/L)	0.046	0.164	0.043	0.171	0.045	0.165	0.023	0.035	0.908	0.128
SO ₄ (mg/L)	5.97	4.65	25.3	86.7	11.5	47.2	19.5	25.5	0.118	0.218
Li (μ g/L)	2.13	3.06	7.53	9.24	3.69	6.08	8.71	19.5	0.000	0.232
Na (mg/L)	9.05	2.72	73.0	362	27.5	195	38.1	83.6	0.213	0.643
K (mg/L)	2.14	2.83	4.29	8.05	2.76	5.00	3.97	3.72	0.069	0.266
Mg (mg/L)	3.19	1.47	11.9	35.6	5.71	19.4	11.2	16.8	0.086	0.199
Ca (mg/L)	11.5	3.94	30.6	40.0	17.0	23.2	44.5	40.6	0.001	0.004
PO ₄ (mg/L)	0.159	0.126	0.137	0.090	0.153	0.117	0.512	1.28	0.197	0.193
Si (mg/L)	10.5	2.61	11.6	3.47	10.8	2.92	12.0	3.08	0.015	0.632
As (μ g/L)	2.64	4.25	6.49	15.3	3.75	9.08	0.943	1.34	0.083	0.000
Fe (mg/L)	0.061	0.255	0.369	2.17	0.149	1.18	0.013	0.024	0.307	0.121
Mn (mg/L)	0.022	0.162	0.065	0.258	0.035	0.194	0.004	0.012	0.451	0.045
Cu (μ g/L)	2.38	4.63	3.04	3.84	2.57	4.41	7.43	20.8	0.126	0.327
Al (mg/L)	20.0	34.2	14.0	18.4	18.3	30.6	26.1	26.1	0.146	0.461
Pb (μ g/L)	0.410	1.48	0.422	1.02	0.413	1.36	0.013	0.045	0.986	0.000
Zn (μ g/L)	90.7	223	501	1494	209	839	41.2	53.8	0.045	0.005
Ni (μ g/L)	8.54	87.0	0.778	1.83	6.30	73.4	0.418	1.59	0.311	0.260
Sr (mg/L)	0.097	0.039	0.374	0.640	0.176	0.365	0.453	0.619	0.022	0.058
pCO ₂	-2.03	0.466	-1.82	0.395	-1.97	0.456	-2.15	0.388	0.010	0.423
SI _{Calcite}	-2.21	0.685	-1.67	0.557	-2.05	0.694	-1.62	0.705	0.000	0.005

Mn, Zn 등의 금속 농도가 낮게 나타났다. 이러한 결과는 As가 질산염이 모두 환원되고 산화철이 환원되는 상황에서 용출됨을 의미한다(Kim et al., 2012). 즉, 산화철의 환원적 용해에 의해 As의 농도가 증가됨을 반영한다고 할 수 있다. As 뿐 아니라 Pb, Zn 등 많은 중금속들은 산화철에 잘 흡착되는 바, 이들 중금속들은 산화철이 환원되는 상황에서 같이 용출될 수 있다. 많은 사람들은 PO₄를 인간 활동에 의한 영향을 반영한다고 해석하기도 하나, 사실은 불소와 인산염도 산화철에 강하게 흡착하기 때문에 산화철의 환원적 용해는 이들의 농도를 증가시키게

된다(Kim et al., 2012). 따라서, 질산염의 농도가 낮고 산화철의 농도가 높은 조건에서 불소와 인산염의 농도가 높은 것은 바로 산화철의 환원적 용해를 지시하는 것이라고 할 수 있다.

단, Sr의 경우는 알칼리도와 마찬가지로 광물과의 반응에 의하여 농집되는 바, Sr의 농도가 높은 물의 경우는 대수층에 오랜 시간 체류했다고 할 수 있다. 이러한 물은 지표환경 변화에 민감하지 않기 때문에 낮은 질산염 농도를 보인다.

Fig. 4. Comparison of groundwater quality between Group 1(1.1 & 1.2) and Group 2 for groundwater sampled on July 2019 at Boseong area.

3.4. 배경농도 산정 결과

3개 중권역 단위의 배경농도 결과: 「2018 및 2019 지하수 수질관리 기반구축 사업 (MOE and KECO, 2018; 2019)」에서 12개 항목에 대하여 산정한 배경농도 값 중 보성지역 3개 중권역 단위의 배경농도는 Table 4와 같이 정리된다. 이들 값은 모두 수문지질단위별로 정리되었으며, 중권역 전체 지역을 대상으로 한 배경농도도 산정되었다.

보성지역에서 3개 중권역별 배경농도 산정에는 2009~2018년 동안의 토양지하수정보시스템(<https://sgis.nier.go.kr/>)에 등록된 정기수질검사 결과와 2007~2018년 동안의 환경부 지하수수질측정망 운영 결과 중에서, 주암댐과 이사천, 섬진강서남해 유역에 해당하는 각각 1,337개, 2,352

개, 939개 자료가 이용되었다(MOE and KECO, 2018; 2019). 이 보고서에서는 중권역별로 배경농도가 산정되었으며, 중권역 내에 분포하는 수문지질단위별로도 개별적으로 배경농도가 산정되어 있다. 따라서, 금번 연구에서 인용된 3개 중권역별 배경농도는 수문지질단위별 배경농도를 모두 포함하여 범위로 표현될 수 있다.

12개 수질 항목 중 카드뮴, 수은, 유기인, 납, 6가 크롬 등의 배경농도는 3개 중권역 모두에서 검출 한계 이하로 나타났다. 비소의 배경농도는 이사천 유역에서 검출 한계 이하로 나타났으나, 주암댐과 섬진강서남해 유역에서는 각각 0.0025~0.0218 mg/L, 0.00015~0.01073 mg/L로 산정되었으며, 주암댐 유역에서 분포하는 관입화성암 지

Fig. 5. Correlations between NO_3^- concentration and other water quality items of groundwater sampled on July 2019 at Boseong area. (closed circle: Group 1.1, open circle: Group 1.2, red cross: Group 2).

역에서 가장 높게 나타났다.

질산성질소의 배경농도는 1.43~1.9 mg/L 범위로서 유역 별/지질별로 큰 차이는 없으며, 주암댐 유역의 쇠설성 퇴적

암 분포지역에서 1.43 mg/L로서 가장 작게 나타났다. 염소 이온은 이사천 유역의 미고결 퇴적물 지역에서 상대적으로 크게 산정되었으며, 주암댐 유역의 쇠설성 퇴적암 지역에

Table 4. Previous estimation results for background level of three catchments in Boseong area (MOE and KECO, 2018; 2019) (unit: mg/L)

Catchment	Items	Hydrogeologic Units					Whole Area
		U.S.	N.V.	I.I.	C.S.	M.R.	
Isacheon stream	NO ₃ -N	1.900	1.665	1.600	1.900	1.900	1.900
	Cl	36.7	20.2	14.5	25.0	10.0	25.0
	Cd	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001
	As	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025
	Hg	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
	Organic P	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025
	Pb	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025
	Cr ⁶⁺	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	F	1.000	0.750	0.721	0.721	0.075	0.721
	NH ₄ -N	0.023	0.062	0.019	0.019	0.005	0.019
	Fe	0.080	0.030	0.025	0.025	0.025	0.025
	Mn	0.0652	0.0388	0.0318	0.0318	0.0025	0.0318
Juam dam	NO ₃ -N	1.700	1.700	1.900	1.430	1.700	1.700
	Cl	13.8	13.7	12.2	9.0	14.0	13.6
	Cd	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	As	0.0093	0.0025	0.0218	0.0076	0.0110	0.0097
	Hg	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
	Organic P	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025
	Pb	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025
	Cr ⁶⁺	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	F	0.280	0.280	0.281	0.281	0.192	0.281
	NH ₄ -N	0.005	0.015	0.015	0.015	0.027	0.015
	Fe	0.025	0.080	0.078	0.078	0.080	0.078
	Mn	0.0168	0.0169	0.0169	0.0169	0.0087	0.0169
Western south sea area of Seomjin-gang river	NO ₃ -N	1.66	1.90	1.87	1.48	1.80	1.80
	Cl	33.19	18.32	12.82	14.20	16.00	16.00
	Cd	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	As	0.00198	0.01073	0.00015	0.00015	0.00375	0.00673
	Hg	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
	Organic P	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025	0.00025
	Pb	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
	Cr ⁶⁺	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035
	F	0.310	0.410	0.284	0.310	0.025	0.310
	NH ₄ -N	0.050	0.026	0.042	0.050	0.050	0.050
	Fe	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035
	Mn	0.00546	0.00160	0.00025	0.00546	0.01000	0.00546

(Abb.) U.S.: Unconsolidated Sediments, N.V.: Non-porous Volcanics, M.R.: Metamorphosed Rocks
I.I.: Intrusive Igneous Rocks, C.S.: Clastic Sedimentary Rocks,

서 염소 이온의 배경농도가 작게 산정되었다. 불소는 이 사천 지역의 미고결 퇴적물 지역에서 가장 높게 산정되었다.

보성지역 배경농도에 대한 「2018 및 2019 지하수 수질 관리 기반구축 사업 (MOE and KECO, 2018; 2019)」의 보고서를 종합해 보면, 12개 항목에 대한 수질 배경농도 값은 먹는물 수질기준보다 낮게 산정되었으며, 카드뮴, 시안, 수은, 유기인, 납, 6가 크롬 등은 불검출이 우세하여 매우 낮은 배경농도 값을 가지는 것으로 산정되었다.

2019년 7월 지하수를 활용한 배경농도 산정: 보성지역 전체를 대상으로 2019년 7월 중에 채취/분석된 200개 지하수 시료들에 대하여 BRIDGE 법에 따라 배경농도로 설정하였다. 자료의 수가 60개를 넘어서는 경우 97.7th percentile을 이용하고, 자료의 수가 60개 미만이거나 인 간활동에 의한 영향을 제외할 수 없는 경우에는 90th percentile을 이용하게 된다(Muller et al., 2006). Table 1과 같은 데이터 선택 기준을 활용한 결과, 본 연구에서는 총

200개의 자료 중 73개의 자료가 선택되었고, 이에 따라 97.7번째 percentile을 배경농도로 설정하였다. 이와 같은 방법으로 산정된 각 수질항목별 배경농도는 Table 5와 같다.

본 연구에서는 EC 등 총 26개 항목에 대하여 배경농도를 설정하였다. 설정된 배경농도를 보면, EC, TDS, Cl, Br, NO₃, Na, Mg 등은 평균값보다 같거나 작은 값이 배경농도로 설정되었으며, 이와 같이 배경농도/평균 비율이 낮은 수치를 보이는 항목들은 지역적인 지화학적 환경에 크게 영향을 받지 않는 것들로서, 연구지역인 보성지역에서 보편적인 배경농도 값이라 할 수 있다. 반면에, F, Li, As, Fe, Mn, Pb, Zn는 평균값에 비하여 5 배가 넘는 배경농도 값을 보였으며, 이와 같이 배경농도/평균의 비율이 높은 수치를 보인 항목들은 지역적으로 수질 오염의 가능성이 높은 것으로 해석된다. 또한, 이들 항목들은 배경농도/평균의 비율이 낮은 수치를 보이는 항목들에 비하여 보다 큰 표준편차를 보이고 있어서, 지역적으로 지화학적 환경에 의해 크게 영향을 받는 것들이라고 할 수 있다. 알칼리도, NO₂, NH₄, SO₄, K, Ca, PO₄, Si, Cu, Al, Ni, Sr 등은 배경농도 값이 평균값에 비하여 1~5배 사이에 해당하였다.

한편, 2009~2018년의 수질 자료를 활용한 「2018 및 2019 지하수 수질관리 기반구축 사업 (MOE and KECO, 2018; 2019)」 배경농도 결과와 금번 연구 결과에 의한 배경농도 결과를 비교해 보면 Table 5와 같다. 「2018 및 2019 지하수 수질관리 기반구축 사업 (MOE and KECO,

2018; 2019)」에서 12개 항목(NO₃-N, Cl, As, Pb, Cd, Hg, 유기인, Cr⁶, F, Fe, Mn, NH₄-N) 중 Cd, Hg, Cr⁶⁺ 3개 항목은 2019년도 시료에서 분석되지 않았을 뿐만 아니라, 환경부 자료에서도 대부분 검출한계 이하라서 비교 의미가 없다. 9개 항목 중 F, Cl, Pb는 본 연구에서 얻어진 2019년 시료 200개의 배경농도가 환경부의 2009~2018 자료에 의한 배경농도 범위 내에 포함된다, 나머지 NO₃-N, NH₄-N, PO₄-P, As, Fe, Mn 항목은 본 연구에서 얻어진 자료에 의한 배경농도가 환경부에 의한 배경농도 범위의 상한 값보다 높게 나타났다.

「2018 지하수 수질관리 기반구축 사업 (MOE and KECO, 2018)」에서 섬진강서남해 유역에 대한 배경농도 산정에는 전체 939개 수질분석 자료 중 528개(56.2%)의 자료가 선정되었다. 그러나, 섬진강서남해 유역에는 여러 시/군이 함께 분포되어 있으며, 이들 중 보성군에 해당되는 지역에서는 분석에 활용된 기초선별 자료 수가 462개, 사전선별된 자료 개수가 76개였다. 12개 수질 항목 중 6개 항목들(Pb, As, Hg, NO₃, Cd, Cl, Cr⁶⁺)은 76개의 자료가 모두 이용되었으나, F, Fe, Mn, NH₄-N, SO₄ 등은 이용된 자료가 3개 뿐으로서 자료의 개수가 너무 적었다. 한편, 사전선별된 자료도 연도별/분기별로 개수가 서로 상이하여, 2019년 1, 2, 3, 4분기에 각각 18개, 1개, 7개, 2개, 2010년 1, 2, 3, 4분기에 각각 7개, 0개, 6개, 0개의 자료만 이용되는 등 각 연도별로 수질분석이 이루어진 관정

Table 5. Comparison of background levels for groundwater in Boseong area between this study results and those from MOE and KECO (2018; 2019)

	Result of this study		Data from MOE & KECO		Result of this study		Data from MOE & KECO
	BL ^a	BL ^a /mean	BL ^b (range)		BL ^a	BL ^a /mean	BL ^b (range)
EC (μS/cm)	291	1.00		Mg (mg/L)	5.66	0.89	
TDS (mg/L)	146	1.00		Ca (mg/L)	35.2	1.75	
Alkalinity (meq/L)	2.21	2.53		PO ₄ (mg/L)	0.296	1.53	
F (mg/L)	0.600	5.17	0.025~1.00	cal.PO ₄ -P (mg/L)	0.097	1.56	0.00025
Cl (mg/L)	22.5	0.47	9.0~36.7	Si (mg/L)	16.8	1.53	
Br (mg/L)	0.064	0.47		As (μg/L)	33.4	9.74	0.15~11.0
NO ₃ (mg/L)	9.88	0.45		Fe (mg/L)	1.51	11.3	0.0035~0.08
cal.NO ₃ -N (mg/L)	2.23	0.45	1.43~1.90	Mn (mg/L)	0.94	30.3	0.00160~0.0652
NO ₂ (mg/L)	0.034	1.03		Cu (μg/L)	11.7	3.74	
NH ₄ (mg/L)	0.120	2.79		Al (mg/L)	0.068	3.58	
cal.NH ₄ -N (mg/L)	0.093	3.00	0.005~0.062	Pb (μg/L)	2.22	6.05	0.05~2.5
SO ₄ (mg/L)	16.2	1.30		Zn (μg/L)	5660	29.8	
Li (μg/L)	21.9	5.13		Ni (μg/L)	8.77	1.56	
Na (mg/L)	19.0	0.66		Sr (mg/L)	0.366	1.76	
K (mg/L)	10.5	3.62					

BL^a: Background Level data estimated in this study (by method of BRIDGE project, 2006)

BL^b: Background Level data (average values) from MOE and KECO (2018; 2019)

cal.: calculated values

의 개수가 적은 편이었고, 동일 관정에 대해서 연속적으로 자료가 생성된 것도 아니라는 문제점이 있다.

기본적으로 배경농도는 유역단위로 설정된다. 그러나, 시/군 단위로서 보성지역의 배경농도를 설정하는 데 있어서는 「2018 및 2019 지하수 수질관리 기반구축 사업(MOE and KECO, 2018; 2019)」과 같이 연도별로 서로 다른 관정들을 대상으로 얻어진 적은 개수의 자료를 이용하여 배경농도를 구하는 것은 효율적이라 보기 어렵다. 또한, 하나의 중권역 내에는 보성군 이외에도 주변의 다른 시/군들이 포함되어 있어서, 보성지역을 대표하는 배경농도로 보기 어렵다. 그리고, 매년 수질분석 대상 관정들이 달라지고, 해당 연도에 분석된 자료의 개수도 적은 상태에서 배경농도를 산정하는 것 또한 합리적이지 못한 것으로 판단된다. 금번 연구에서는 2019년 7월에 집중하여 지하수 시료가 채취되었으며, 보성지역 전체에 대하여 골고루 분포하는 200개 관정에 대하여 수질분석 자료가 취득되었다. 따라서, 금번 연구에서 보성군에서만 채취/분석된 200개 지하수 수질 자료를 이용하여 산정한 배경농도 값을 보성지역의 대표적인 배경농도 값으로 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

4. 결 론

보성지역에서 2019년도 7월에 채취한 지하수 시료 200개의 분석을 통해 보성지역 지하수의 수질특성 및 배경농도를 검토하였으며, 그 결과는 다음과 같이 요약된다.

(1) 지하수의 수질 영향 요인을 해석하기 위해, NO_3 성분의 먹는물 기준치(44.3 mg/L)를 기준으로 보성지역 지하수를 분류하였다. 질산염 농도가 기준치보다 낮은 것은 Group 1, 기준치보다 높은 것은 Group 2로 분류하였으며, Group 1은 알칼리도를 기준으로 다시 Group 1.1 ($\text{Alkalinity} \leq 1 \text{ meq/L}$), Group 1.2 ($\text{Alkalinity} \geq 1 \text{ meq/L}$)로 추가 분류하였다.

(2) t-test에 따른 평균값 비교 결과, Group 2는 Group 1에 비하여 유의성이 높은 수온과 Ca 농도를 보였고, F, As, Pb, Zn 등은 유의성이 있는 낮은 값을 보였다. Group 1.2는 Group 1.1에 비해 EC, 수온, F, Li, Ca, Si, Zn, Sr의 농도가 유의성 있게 높았으며, PCO_2 및 $\text{SI}_{\text{calcite}}$ 값도 유의성 있게 높았다. 이로 보아, Group 1에서는 광물의 풍화가 F, Li, Ca, Si, Zn, Sr 등을 농집시키는 주된 과정인 것으로 해석된다.

(3) 질산염의 농도는 pH, 알칼리도가 비교적 낮고, NH_4 , NO_2 , F, As, Fe, Mn, Pb, Zn 등의 농도가 낮고, EC 및 수온이 비교적 높은 물에서 높아지는 경향을 보였다. 즉, 보성지역 지하수 내 As, Pb, Zn 등의 중금속들은 산화철

이 환원되는 상황에서 용출될 수 있음을 보여준다.

(4) BRIDGE 방법에 의해 총 26개 항목에 대한 배경농도를 설정하였다. EC, TDS, Cl, Br, NO_3 , Na, Mg 등은 평균값보다 같거나 작은 값이 배경농도로 설정되었으나, F, Li, As, Fe, Mn, Pb, Zn는 평균값에 비하여 5 배가 넘는 배경농도 값을 보였다. 이와 같이 배경농도/평균 비율이 높은 수치를 보인 항목들은 낮은 수치를 보이는 항목들에 비하여 큰 표준편차를 보이고 있으며, 지역적인 지화학적 환경에 크게 영향을 받는 것들이라고 할 수 있다.

(5) 금번 연구에서 산정한 배경농도 중 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, As, Fe, Mn 항목은 환경부에 의한 중권역별 배경농도 범위의 상한 값보다 높게 나타났다. 이 연구에서 배경농도 산정은 2019년 7월에 집중적으로 채취/분석된 지하수 시료 200개를 대상으로 수행한 것으로서, 여러 지자체가 함께 포함되어 있는 중권역별 배경농도 산정 결과보다는 금번의 연구 결과를 보성군의 대표적인 배경농도로 활용할 것을 권장한다.

사 사

이 연구는 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업(CAP-17-05-KIGAM)의 지원을 받아 수행되었습니다. 이 논문은 환경부의 “보성지역 통합 지하수 기초조사” 보고서 및 부록에 수록된 자료를 주로 활용하였으며, 이 논문을 심사하여 주신 익명의 심사위원들께 감사의 말씀을 드립니다.

References

- An, Y.-J., Nam, S.-H. and Jeong, S.-W. (2014) Establishment of non-drinking groundwater quality standards: general contamination substances. J. Soil Groundw. Environ., v.19, p.24-29. doi: 10.7857/JSGE.2014.19.6.024
- An, H., Jeon, S.-W., Lee, S.J., Hyun, Y., Yoon, H. and Kim, R.-H. (2015) Suggestion of groundwater quality management framework using threshold values and trend analysis. J. Soil Groundw. Environ., v.20, p.112-120. doi: 10.7857/JSGE.2015.20.7.112
- Appelo, C.A.J. and Postma, D. (2005) Geochemistry, Groundwater and Pollution (2nd ed.). Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema. doi: 10.1201/9781439833544
- BRIDGE project (2006) D10: Impact of Hydrogeological Conditions on Pollutant Behaviour in Groundwater and Related Ecosystems. Volume 1. Available online: http://hydrologie.org/BIB/Publ_UNESCO/SOG_BRIDGE/Deliverables/WP2/D10_VOL-1.pdf.
- “BRIDGE”. Available online: http://nfp-at.eionet.europa.eu/Publicirc/eionet-circle/bridge/library?l=/deliverables/d22_final_reppdf/_EN_1.0_&a=d
- Cha, S. and Seo, Y.G. (2020) Groundwater quality in Gyeongnam region using groundwater quality monitoring data: Characteristics

- according to depth and geological features by background water quality exclusive monitoring network. *Clean Technol.*, v.26, p.39-54. doi: 10.7464/ksct.2020.26.1.39
- EC(European Commission) (2000) Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy.
- EC(European Commission) (2006) Directive 2006/118/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006 on the protection of groundwater against pollution and deterioration.
- EC(European Commission) (2008) Directive 2008/32/EC of the European Parliament and of the Council of 11 March 2008 amending Directive 2000/60/EC establishing a framework for community action in the field of water policy, as regards the implementing powers conferred on the commission.
- EC(European Commission) (2009) Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC) Guidance document No. 18 Guidance on groundwater status and trend assessment.
- EPA(Environmental Protection Agency), Ireland (2010) Methodology for establishing groundwater threshold values and the assessment of chemical and quantitative status of groundwater, including an assessment of pollution trends and trend reversal.
- Ha, Q.K., Choi, S., Phan, N.L., Kim, K., Phan, C.N., Nguyen, V.K. and Ko, K.S. (2019) Occurrence of metal-rich acidic groundwaters around the Mekong Delta (Vietnam): A phenomenon linked to well installation. *Science of the Total Environment*, v.654, p.1100-1109. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.200
- Harvey, C.F., Swartz, C.H., Badruzzaman, A.B.M., Keon-Blute, N., Yu, W., Ashraf Ali, M., Jay, J., Beckie, R., Niedan, V., Brabander, D.J., Oates, P.M., Ashfaq, K.N., Islam, S., Hemond, H.F. and Ahmed, M.F. (2002) Arsenic mobility and groundwater extraction in Bangladesh. *Science*, v.298, p.1602-1606. doi: 10.1126/science.1076978
- Hinsby, K. and Condesso de Melo, M.T. (2006) Application and evaluation of a proposed methodology for derivation of groundwater threshold values—a case study summary report. Report to the EU Project.
- Hinsby, K., Condesso de Melo, M. and Dahl, M. (2008) European case studies supporting the derivation of natural background levels and groundwater threshold values for the protection of dependent ecosystems and human health. *Science of the Total Environment*, v.401, p.1-20. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.03.018
- KEI(Korea Environment Institute) (2013) A study on the determination of background levels in groundwater and improvement of groundwater quality standards (I).
- Kim, K. (2002) Plagioclase weathering in groundwater system of a sandy, silicate aquifer. *Hydrological Processes*, v.16, p.1793-1806. doi: 10.1002/hyp.1081
- Kim, K. (2003) Long term disturbance of groundwater chemistry following well installation. *Ground Water*, v.41, p.780-789. doi: 10.1111/j.1745-6584.2003.tb02419.x
- Kim, K., Hamm, S.-Y., Kim, R.H., and Kim, H. (2018) A review on alkalinity analysis methods suitable for Korean groundwater. *Econ. Environ. Geol.*, v.51, p.509-520. doi: 10.9719/EEG.2018.51.6.509
- Kim, K., Kim, H.J., Choi, B.Y., Kim, S.H., Park, K.H., Park, E., Koh, D.C. and Yun, S.T. (2008) Fe and Mn levels regulated by agricultural activities in alluvial groundwaters underneath a flooded paddy field. *Applied Geochemistry*, v.23, p.44-57. doi: 10.1016/j.apgeochem.2007.09.004
- Kim, S.H., Kim, K., Ko, K.S., Kim, Y., Lee, K.S. (2012) Co-contamination of arsenic and fluoride in the groundwater of unconsolidated aquifers under reducing environments. *Chemosphere*, v.87, p.851-856. doi: 10.1016/j.chemosphere.2012.01.025
- 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. *J. Geochem. Explor.*, v.148, p.196-205. doi: 10.1016/j.gexplo.2014.10.001
- Mendizabal, I., Baggelaar, P.K. and Stuyfzand, P.J. (2012) Hydrochemical trends for public supply well fields in the Netherlands (1898-2008), natural backgrounds and upscaling to groundwater bodies. *J. Hydrol.*, v.450-451, p.279-292. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.04.050
- MOE(Ministry of Environment) (2013) Establishment of groundwater quality monitoring networks and groundwater monitoring plan.
- MOE(Ministry of Environment) and KECO(Korea Environment Corporation) (2018) Report for 2018 basic establishment of groundwater quality control: Western south sea area of Seomjingang River. 132p.
- MOE(Ministry of Environment) and KECO(Korea Environment Corporation) (2019) Final report for 2019 basic establishment of groundwater quality control. 330p.
- MOE(Ministry of Environment) and KIGAM(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources) (2020) Report for basic research of groundwater of Boseong area. p.11-5.
- MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2017) Amending plan for Basic Groundwater Management Plan (2017 ~ 2026). p.168.
- Muller, D., Blum, A., Hart, A., et al. (2006) Final proposal for a methodology to set up groundwater threshold values in Europe. Report to the EU Project “BRIDGE”. Available online: https://hydrologie.org/BIB/Publ_UNESCO/SOG_BRIDGE/Deliverables/WP3/D18.pdf
- Nam, S.-H., Lee, W.-M., Jeong, S.-W., Kim, H.-J., Kim, H.-K., Kim, T.-S. and An, Y.-J. (2013) Comparative study of groundwater threshold values in European Commission and members states for improving management of groundwater quality in Korea. *J. Soil Groundw. Environ.*, v.18, p.23-32. doi: 10.7857/JSGE.2013.18.3.023
- Nieto, P., Custodio, E. and Manzana, M. (2005) Baseline groundwater quality: a European approach. *Environmental Science & Policy*, v.8, p.399-409. doi: 10.1016/j.envsci.2005.04.004
- Wendland, F., Berthold, G., Blum, A., et al. (2008) Derivation of natural background levels and threshold values for groundwater bodies in the Upper Rhine Valley (France, Switzerland and Germany). *Desalination*, v.226, p.160-168. doi: 10.1016/j.desal.2007.01.240
- Yea, Y.-D., Seo, Y.-G., Kim, R.-H., Cho, D.-J., Kim, K.-S. and Cho, W.-S. (2014) A study on estimating background concentration of groundwater for water quality assessment in non-water supply district. *J. Korean Soc. Water Wastewater*, v.28, p.345-358. doi: 10.11001/jksww.2014.28.3.345