

경남 농촌 지역 비소 오염 지하수의 시나리오별 위해성 평가

오세림¹ · 이진용^{2*} · 문상호³ · 장지욱⁴ · 정은주⁴

¹강원대학교 지질학과 석사과정, ²강원대학교 지질학과 교수,

³한국지질자원연구원 지하수환경연구센터 책임연구원, ⁴강원대학교 지질학과 박사과정

Risk Assessment of Arsenic-Contaminated Groundwater in Multiple Scenarios in a Rural Area of Gyeongnam Province, Korea

Serim Oh¹ · Jin-Yong Lee^{2*} · Sang-Ho Moon³ · Jiwook Jang⁴ · Eunju Jeong⁴

¹Master Course, Department of Geology, Kangwon National University

²Professor, Department of Geology, Kangwon National University

³Principal Researcher, Groundwater Environment Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

⁴Ph.D. Student, Department of Geology, Kangwon National University

Abstract

This work aims to assess the threat to human health of hazardous materials in groundwater that is used domestically and for drinking. Two distinct sub-assessments are considered: cancer and non-cancer risk. The studied groundwater is in an agricultural area of Gyeongnam Province, Korea, and is contaminated by arsenic at a mean level of 16.27 $\mu\text{g/L}$, far greater than the WHO guideline (10 $\mu\text{g/L}$ for drinking water). We collected groundwater data from the National Groundwater Information Center (gims.go.kr) and assessed the risk to human health following the methodology of the United States Environmental Protection Agency. We considered three exposure scenarios: domestic use (scenario 1) and drinking use with different doses (scenarios 2 and 3). Scenario 1 had a median hazard quotient (HQ) of 0.77 and a cancer risk (CR) of 0.013. Scenario 2 had a median HQ of 0.08 and a CR of 3.69×10^{-5} , and the values for scenario 3 were 0.11 and 4.82×10^{-5} , respectively. Scenario 1 is likely the most hazardous to human health. Further study of the origin of arsenic in groundwater in the study area is required, as are remedial measures to mitigate its health effects.

Keywords: risk assessment, groundwater, arsenic contamination, hazard quotient, cancer risk

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Jin-Yong Lee
E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr

Received: 4 October, 2022

Accepted: 25 October, 2022

© 2022 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

위해성 평가란 위험 물질에 대해 인체 건강에 대한 위협을 계산하는 것으로 발암성 평가와 비발암성 평가로 나뉜다. 본 연구는 경남 한 농촌 지역의 비소 오염 지하수를 생활용수, 음용수로 사용할 경우 인체에 미치는 영향을 평가하였다. 연구를 위해 국가지하수정보센터의 지하수 수질 자료를 이용하였다. 자료에 따르면 연구지역인 농촌 지역의 지하수는 평균 비소 농도가 16.27 $\mu\text{g/L}$ 로 세계보건기구가 제시한 비소 농도(10 $\mu\text{g/L}$)보다 높게 나타난다. 이에 따라 건강 위해가 있을 것이라고 판단하여 미국환경청에서 제시한 방법을 이용하여 위해성 평가를 수행하였다. 세 가지 노출 시나리오(생활용으로 이용하는 시나리오 1과 음용으로 이용하지만 사용량이 다른 시나리오 2와 3)를 작성하여 비소 노출에 대한 경우를 통해

위해성을 계산하였다. 시나리오 1에서의 HQ의 중앙값은 0.77, CR의 중앙값은 0.013을 보이며 시나리오 2에서는 HQ의 중앙값은 0.08, CR의 중앙값은 3.69×10^{-5} 로 나타났다. 시나리오 3은 HQ의 중앙값은 0.11, CR은 4.82×10^{-5} 였다. 인체에 잠재적 위험성이 가장 높게 나타난 것은 시나리오 1로 나타났다. 지하수 내의 비소 기원을 자세히 밝힐 필요가 있으며 지하수 이용 시 정화할 수 있는 대책 마련이 필요하다.

주요어: 위해성평가, 지하수, 비소 오염, 위해 지수, 발암성

서론

세계 수자원 중 해수는 96.5%, 담수는 2.5%로 구성되어 있으며(Shiklomanov, 1991) 담수 중 빙하와 만년설은 68.7%, 지하수는 30.1%, 지표수가 0.3%의 비율을 갖는다(Gleick, 1993). 이 중 지하수는 수질의 변화가 적고 가뭄 등 비상시 안정적인 물 공급이 가능하기 때문에 필수 수자원으로 인식되고 있다. 한국의 수자원 이용량 중 지하수 이용량은 11%이며 이 중 53%는 농촌 지역에서 이용한다(MOE and K-water, 2021).

지하수 오염은 흔한 환경 문제 중 하나이다(Fatta et al., 2002). 또한 이는 환경과 건강에 막대한 피해를 끼친다(Redwan et al., 2020). Smedley and Kinniburgh(2002)에 따르면 암석과 퇴적물에서 미량의 비소가 발생하며, 광산 활동 지역에서 비소의 농도가 높게 나타난다고 제시하였다. 비소의 점오염원은 비금속 제련소, 금광, 목재를 연소시키는 발전소이다(Nriagu et al., 2007). 퇴적물 내 비소는 철 수산화물과 관련되며 철이 환원되며 지하수로 방출된다(Berg et al., 2001). Podgorski and Berg(2020)의 비소 노출량 모델링에 따르면, 전 세계적으로 약 9,400만~2억 2,000만 명의 인구가 지하수로부터 고농도의 비소(>10 µg/L)에 노출될 가능성이 있는 것으로 추정된다. 지하수 내 비소는 인간에게 암, 피부질환, 신경계 장애 등에 건강 피해를 유발할 수 있다(Smith et al., 2000). 지하수를 통한 비소 노출은 식수 활용으로 간주되어 왔으나 쌀 섭취로 인한 비소 노출 또한 많이 이루어진다고 보고되었다(Mondal et al., 2010).

한편 국내의 지하수 비소는 수도권에서 인위적인 오염원으로 조사되며 충북 및 경남권에서 나타나는 비소는 지질 기원으로 파악된다(Ahn et al., 2005). 지질 기원의 암석은 옥천대의 변성퇴적암류와 백악기 화산암으로 추정하였다(Ahn et al., 2007). 또한 인위적 오염원인 광산 활동 주변의 농촌 지역을 조사한 결과 토양 농경지의 80%가 비소 또는 중금속에 오염되었다고 보고되었다(MOE, 2005). 인위적 오염원 주변 비소의 흡수 계수는 낮게 나타났다(Kwon et al., 2013). 산업단지 내 지하수의 비소 오염은 수산화물의 환원적 용해로 간주되며 심부 지하수의 경우 유기탄소의 양이 적어 환원이 잘 일어나지 않아 비소 오염이 적은 것으로 나타났다(Lee et al., 2010).

위해성 평가(risk assessment)는 미국환경청(United States Environmental Protection Agency, USEPA)에서 제안한 것으로 화학물질, 유류 유출과 같은 혼합물에 의해 인체에 위험을 미치는 유독성 물질에 노출되었을 때 사람에게 얼마나 건강 피해를 끼칠 수 있는지 판단하는 지표이다(Voudouris et al., 2010). 그러나 자연의 무작위성과 발생 가능성이 있어 충분한 정보가 필요하다(Wagner et al., 1992). 이에 대해 연령, 체중, 인구, 내성 등의 취약성 판단이 필요하다(Saidi et al., 2011). 체중에 따라서 성인과 어린이 중 어린이의 노출이 더 높은 것으로 나타난다(Ali et al., 2019). 위해성 평가는 비발암(non-carcinogenic) 평가와 발암(carcinogenic) 평가로 나뉘며, 발암 평가의 발암성 위해(cancer risk, CR)는 10^{-6} ~ 10^{-4} 사이의 허용 오염물질 수준이다. 민감 집단에 대하여 10^{-6} 을 적용한다. 비발암 평가의 위해비(hazard quotient, HQ)는 0.2~1 사이의 허용 오염물질 수준을 갖고 민감 집단에 대해 0.2을 적용한다(USEPA, 1997).

Bang et al.(2009)은 베트남의 하남 지역의 비소 오염과 인체의 위해성 평가를 진행하였다. 이 지역은 4개의 마을에서 비소 오염이 나타났으며 정화 처리된 지하수를 식수로 사용되는 지역에서는 42%의 사람들이 만성적인 비발암성 위해가 있는 것으로 추정되었다. 정화가 되지 않은 지하수는 100%의 사람들에게 비발암성 위해가 있다고 판단되었다. Ravindra

and Mor(2019)은 인도의 찬디가르 지역에서 폐기물, 농업 활동, 산업 활동에 의한 지하수 오염이 나타났다고 하였다. 비발암성 위해도는 평균 136, 발암성 위해도는 평균 60×10^{-6} 으로 계산되었다. Waqas et al.(2017)은 파키스탄의 라호르 지역의 비소오염 지하수에 대하여 연구를 진행하였다. 피부 노출과 경구 흡입에 대한 발암성 평가와 비발암성 평가를 진행하였다. 비발암성 위해도는 0.1~11의 값으로 나타났으며, 발암성 위해도는 5.89×10^{-7} ~ 2.77×10^{-5} 로 나타났다. Phan et al.(2010)은 캄보디아의 칸달과 크레이티 두 지역에 대한 비소 노출에 따른 위해성 평가를 진행하였다. 칸달 지역에서 비발암성 위해도는 0.63~35.82, 발암성 위해도는 3×10^{-4} , 크레이티 지역에서 비발암성 위해도는 1.3×10^{-3} ~2.087, 발암성 위해도는 1×10^{-6} ~ 10^{-4} 로 계산되었다고 하며 지역의 사람들을 검진해본 결과 칸달 지역에서 잠재적 비발암성 위험이 98.65%로 나타났으며 잠재적 발암성 위해는 5×10^{-3} 로 나타났다. 크레이티 지역에서는 잠재적 비발암성 위해는 13%, 발암성 위해는 34%으로 판단되었다.

Lee and Chon(2005)은 국내 동일, 옥동, 동정, 도곡과 화천 폐광산 주위의 식수로 이용되는 지하수 비소의 농도는 각각 $39 \mu\text{g/L}$, $38 \mu\text{g/L}$, $9 \mu\text{g/L}$, $1 \mu\text{g/L}$, $7 \mu\text{g/L}$ 으로 나타난다고 밝혔다. 지하수 접촉 시와 지하수 섭취 두 가지로 나눠 비발암성 위해성을 평가한 결과, 지하수 섭취 시 동일 광산에서 4.155, 옥동 광산에서 4.049로 인체에 위해한 것으로 나타났다. 지하수 접촉 시 비발암성 위해는 적은 것으로 나타났다. Gang and Kim(2021)은 강원도 횡성의 지하수에 대해 오염물질에 관한 수질 분석과 위해성 평가를 진행하였다. 비소 농도는 $19 \mu\text{g/L}$ 이하로 나타났으며 이에 대한 발암 위해도를 평가한 결과 음용수로 기준을 적용하여 상위 95%의 값에서 허용 위해도인 1×10^{-6} 을 초과하였다고 밝혔다. 전 세계적으로 지하수 내 비소에 대한 위해성 평가가 진행되었으며, 국내 또한 비소 오염에 대한 위해성 평가가 진행되고 있다.

비소 오염은 사람에게 유해하며 세계 전역에서 나타나고 있다. 지하수 내 비소 오염과 관련하여 국외 7,400여건, 국내 250여건의 연구가 진행되었으며 피해를 저감하기 위한 방안이 지속적으로 논의되고 있다. 국내의 지하수 내의 오염물질에 대한 위해성 평가는 약 20건이 진행되었다. 이들은 주로 광산 활동에 의한 위해성 평가를 다루고 있다. 그러나 광산 활동 지역이 아닌 지역도 비소 오염이 관찰되고 있다. 따라서 광산 활동 주변 지역뿐 아닌 지역에서도 비소에 대한 위해성 평가가 필요할 것으로 사료된다. 연구지역은 지하수 내의 비소가 검출되나 위해성 평가에 대한 연구는 아직 진행되지 않았다. 본 연구는 지하수 내 비소가 검출되는 경남의 한 농촌 지역을 대상으로, 지하수 내 비소가 인체에 영향을 얼마나 미칠 수 있는지에 대하여 보수적 시나리오 분석을 통해 평가하는 것을 목적으로 한다.

연구지역 및 연구방법

연구지역

Fig. 1은 연구지역의 위치 및 지질도이다. 연구지역의 북쪽에는 낙동강과 남강을, 남서로 산을 접하고 있어 남고북저 지형으로 경상남도 중간에 위치한 농촌 지역이다. 경상분지 내에 위치하여 있으며 백악기 하양층군(함안층, 진동층), 유천층군(안산암), 불국사 관입화성암군(화강섬록암, 흑운모화강암, 장석반암, 규장반암, 염기성암맥, 산성암맥)으로 이루어져 있다(Chang, 1975). 또한 이들을 부정합으로 덮는 제 4기 미고결 퇴적층으로 구성되어 있다. 하양층군은 육성 퇴적층으로서 세일과 사암으로 이루어져 있으며 관입화성암으로 인해 국부적으로 혼펠스화 되어있다(Kim et al., 2001).

유천층군은 경상분지 남동부에 분포한 화산암으로 하부의 중성화산암류와 상부의 산성화산암류로 나뉜다(Chang et al., 1984). 중성화산암류는 안산암질암류, 산성화산암류는 유문암질암류로 구분되며 이 사이에는 퇴적암층이 존재한다(Sang et al., 1998). 불국사 관입 화성암류는 저반 혹은 암주의 형태로 관입한 기저암 형태이다. 연구지역의 충적층은 자갈, 모래, 실트, 점토로 이루어져 있고 일부 지역에 넓은 평야 충적층이 발달되어 있다(MOE and KIGAM, 2018).

이 지역은 남부 해안성 기후를 띄고 2020년의 연 평균 기온은 13.3°C, 최고기온 35.8°C, 최저기온 -12.1°C이며 연 강수량은 1,629 mm이다(MOE and K-water, 2021). 지하수 관정은 총 3,710개소이며 생활용 관정 1,768개소, 농어업용 관정 1,758개소, 공업용 관정 184개소이다. 지하수 총 이용량은 12,338,472 m³/년이며 이 중 농어업용이 39%로 가장 높은 비율을 차지하고 생활용으로 38%, 공업용으로 23%가 이용된다(NGIC, 2021).

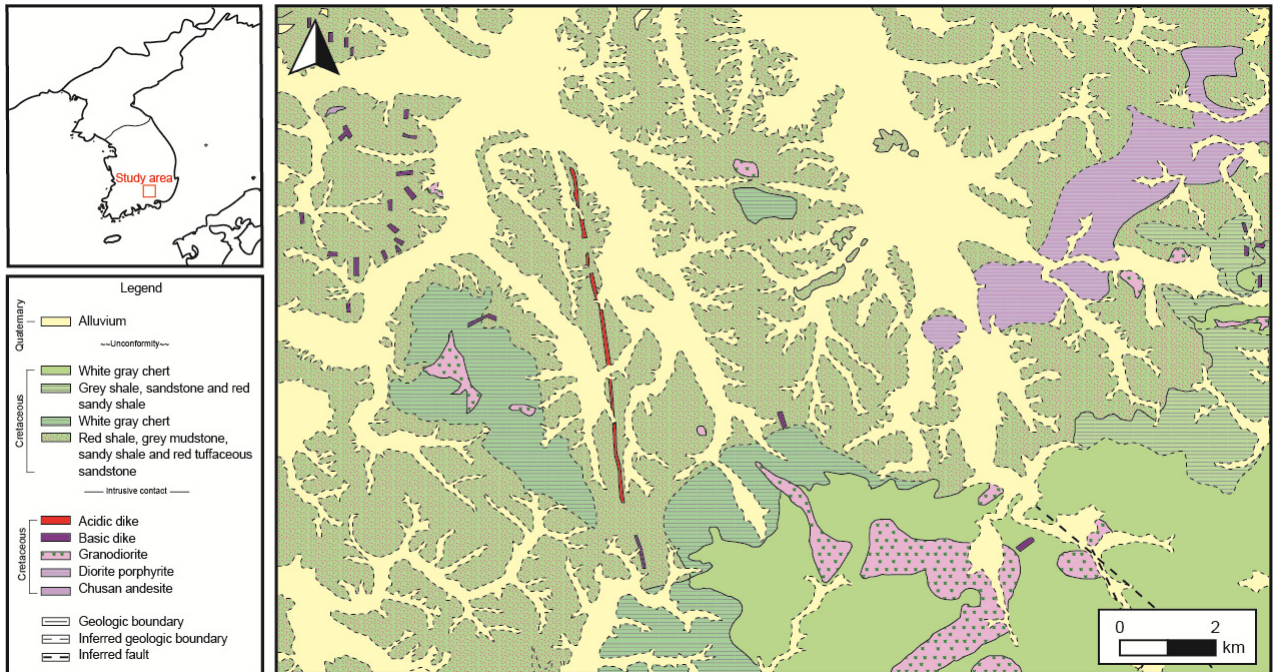


Fig. 1. Location and geological map of the study area.

자료수집

본 연구에서 사용된 지하수 자료는 국가지하수정보센터(www.gims.go.kr)에서 취득하였다. 환경부와 한국지질자원연구원(KIGAM)에서 해당 연구지역에서 2017~2018년에 진행한 지하수 기초조사 보고서에서 수집한 자료를 이용하였다. 이들의 지하수 조사는 1년에 2회씩 2년간 진행되었으며 조사 시 현장 수질 조사, 수위 측정, 지질 조사가 이루어졌다. 1차와 3차 조사는 현장 수질 조사는 물론 화학분석이 더해졌다. 조사에 따르면 평수위 암반 지하수는 0.48~42.33 m, 충적층/풍화대 지하수는 0.57~4.17 m의 심도를 갖는다. 지하수 화학분석은 2017년 우기에 암반 152개소, 충적층/풍화대 48개소에서 분석하였으며, 2018년 건기에 암반 151개소, 충적층/풍화대 49개소에서 분석하였다. 현장에서 현장수질(수온, 수소이온농도(pH), 전기전도도(electrical conductivity, EC), 용존산소량(dissolved oxygen, DO))을 측정하였으며, 양이온(Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, total Fe, total Mn, Si⁴⁺, Sr²⁺, total As), 음이온(F⁻, Cl⁻, Br⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻)을 분석하였다. 본 연구에서는 현장 수질 분석 결과와 화학분석 자료를 이용하여 지하수의 특성을 파악하고 위해성 평가를 수행하였다.

위해성 평가

일반적으로 위해성 평가를 위한 오염물질의 유입 경로는 3가지로 경구 섭취, 피부 노출, 공기 중 흡입으로 구분된다.

지하수를 통한 노출을 판단하기 위하여 공기를 통한 흡입은 제외하고 경구 섭취(직접적인 음용)와 피부 노출(샤워에 의한 노출)에 대하여 평가하였다. 노출률, 발암성 및 비발암성 위해도는 미국환경청에서 제시된 식으로 평가하였다(USEPA, 1997). 노출률은 지하수 내 노출 경로에 따라 산정 식에 차이가 있으며 본 연구에서는 아래의 식을 이용하였다.

일일 피부 노출률(mg/kg/day) :

$$E = \frac{DA_{event} \times SA \times EV \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

$$DA_{event} = K_p \times C_w \times t_{event} \quad (2)$$

일일 지하수 음용 노출률(mg/kg/day) :

$$E = \frac{C_w \times IR_w \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (3)$$

여기서, E 는 노출률(mg/kg/day), DA_{event} 는 이벤트 당 흡수량, EV 는 이벤트 빈도, EF 는 노출 주기(day/year), ED 는 노출 시간(year), BW 는 평균 몸무게(kg), AT 는 평균 노출 기간($365 \times \text{year}$), K_p 는 피부투과성 계수, SA 는 피부 표면적, t_{event} 는 노출 시간(hr/event), C_w 는 지하수 내 오염물질 농도($\mu\text{g/L}$), IR_w 은 1일 음용수 섭취율(L/day)이다. C_w 와 EF 를 제외한 인자들은 미국환경청에서 제공한 기본값을 이용하였다($K_p = 0.001$, $t_{event} = 0.58 \text{ hr/event}$, $SA = 18,000$, $EV = 1$, $ED = 30 \text{ year}$, $BW = 70 \text{ kg}$, $AT = 10,950 \text{ day}$ ($30\text{년} \times 365\text{일}$), $IR_w = 2 \text{ L/day}$)(USEPA, 2004).

발암 위해와 비발암 위하는 아래의 식으로 계산된다.

발암 위해도(CR) :

$$CR = SF \times E \quad (4)$$

비발암 위해도(HQ) :

$$HQ = \frac{E}{RfD} \quad (5)$$

각 인자들은 미국환경청에서 제공된 평가지침에 제시된 값을 사용하였다(USEPA, 2004). 식 (4)와 식 (5)에서 CR 은 발암 위해도, SF 는 비소의 발암계수(mg/kg/day)⁻¹, HQ 는 비발암 위해도, RfD 는 비소의 비발암성 독성치를 사용하였다. SF 와 RfD 는 경구흡수와 피부흡수로 나뉘게 되는데 경구흡수의 경우 SF 의 값을 $1.5(\text{mg/kg/day})^{-1}$, 피부흡수는 $61(\text{mg/kg/day})^{-1}$ 로 계산하였다. RfD 는 경구흡수의 경우 0.0003 mg/kg/day , 피부흡수의 경우 $0.00029 \text{ mg/kg/day}$ 로 계산하였다.

시나리오 분석

인체 건강에 미치는 위해도를 평가하기 위해 연구지역 내 지하수 이용 별 발생 위험에 대해 총 3가지의 시나리오를 작성하였다. 연구지역에서 사용되는 지하수는 주로 생활용수로, 시나리오 1은 1년간 샤워를 통한 피부 노출로 설정하였다.

시나리오 2와 시나리오 3은 지하수 음용 기간에 따른 위해도를 비교하기 위해 일일 지하수 음용 노출률 산정식 중 노출 주기를 다르게 설정하여 평가하였다. 시나리오 2는 지하수를 365일 중 182일을 지하수 음용하였을 때로, 시나리오 3은 274일을 지하수 음용하였을 때로 설정하였다. 이는 사람들의 생활 양식이 변화함에 따라서 지하수와 먹는 샘물 등을 혼용하여 음용한다는 가정을 통해 음용 일수를 다르게 산정하였다.

정규성 검정

연구지역 지하수의 현장수질(수온, pH, 전기전도도, 용존산소량)과 양이온 및 음이온의 통계값을 우기와 건기 분석결과를 Table 1에 나타냈다. 비소농도는 건기에만 측정되었으며 이산화질소 농도는 우기에만 측정되었다. Fig. 2는 주요 양·음이온(Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻)과 건기의 비소 농도에 대한 빈도이다. 기본적으로 자료를 파악 및 분석하기 위해 분포가 정규성을 띠는지 검정을 한다. 따라서 양·음이온 농도와 비소 농도는 Log 값으로 변환하여 정규성 검정(Shapiro-Wilks test)을 수행하였다. *p*-value > 0.05를 정규분포로 판단 기준으로 삼았고 그 결과 정규분포하는 것을 확인하였다.

Table 1. Statistical results of physicochemical characteristics in the study area

	Wet season				Dry season			
	Min	Max	Med	SD	Min	Max	Med	SD
T (°C)	15.7	27.3	18.1	2.5	11.1	21.3	16.6	1.5
pH	5.3	8.8	7.8	0.5	6.5	8.9	7.7	0.5
EC (µS/cm)	75	2,210	425	368.2	82	2,240	377	352.8
DO (mg/L)	0.6	14.2	3.9	2.1	0.5	13.2	2.7	1.9
Ca ²⁺ (mg/L)	10.8	762.5	48.8	88.9	5.4	520.2	48.4	89.2
Mg ²⁺ (mg/L)	0.3	43.1	8.2	7.5	0.5	55.6	8.6	8.3
Na ⁺ (mg/L)	7.0	282.7	15.9	30.5	2.2	201.7	14.6	27.5
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	23.4	752.9	149.6	107.0	7.3	590.4	139.7	96.6
Cl ⁻ (mg/L)	0.9	1,158.4	15.2	87.8	2.2	352.0	12.4	34.0
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	0.0	1,250.8	32.6	225.9	0.8	1,510.0	30.9	260.0
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0.0	73.1	6.3	14.2	0.0	147.0	6.9	20.9
Total Fe (mg/L)	0.0	65.7	0.0	6.2	0.0	37.7	0.0	3.2
Total Mn (mg/L)	0.0	5.0	0.0	0.6	0.0	4.8	0.0	0.6
Si ⁴⁺ (mg/L)	0.0	18.8	6.0	3.9	1.3	24.7	10.1	4.4
Sr ²⁺ (mg/L)	0.0	16.0	0.6	2.4	0.0	17.1	0.7	3.4
Total As (µg/L)	-	-	-	-	0.0	733.7	1.5	76.5
F ⁻ (mg/L)	0.0	3.4	0.3	0.4	0.0	2.9	0.0	0.3
Br ⁻ (mg/L)	0.0	2.0	0.0	0.1	0.0	1.3	0.0	0.1
NO ₂ ⁻ (mg/L)	0.0	2.2	0.0	0.2	-	-	-	-
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	0.0	1.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0

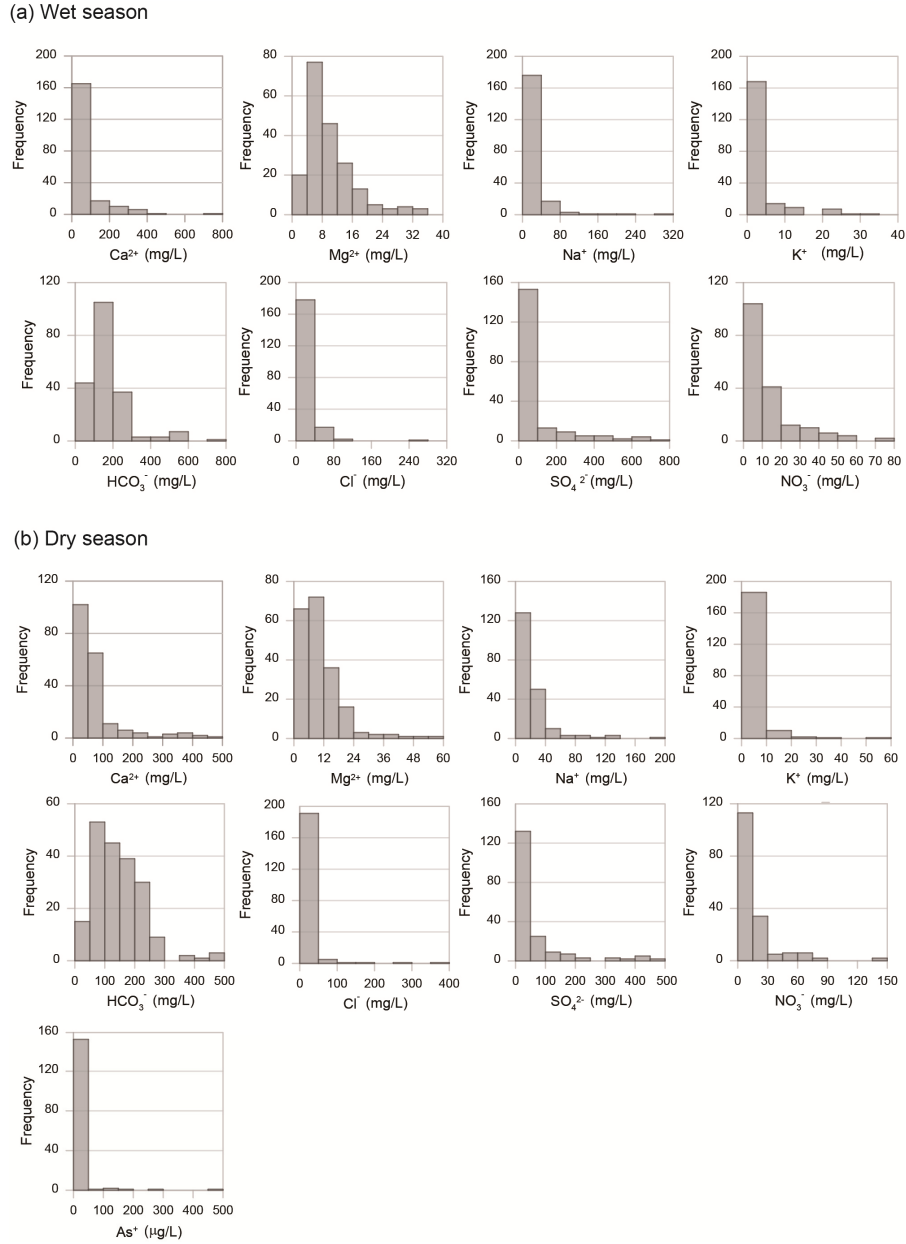


Fig. 2. Concentration histograms of major ions and arsenic in groundwater in the (a) wet and (b) dry season.

결과 및 토론

지하수의 화학적 특성

파이퍼 다이어그램(Piper diagram)은 물 속 주요 양·음이온의 노르말농도를 이용하여 수질 유형을 분류하는 것이다 (Piper, 1944). 수집된 자료를 이용하여 파이퍼 다이어그램을 통하여 원소 구성에 따른 수질 유형을 분류하였다. Fig. 3에서 가장 많이 나타난 수질 유형은 Ca-HCO₃ 유형이며, Ca-SO₄ 유형, Na-HCO₃ 유형, Na-Cl 유형의 순으로 나타났다. 연구 지역 내 지하수의 수질 유형은 대체로 오염되지 않은 천부지하수로 나타나며, 일부 지역에서 지질 기원의 황철석 산화에 의해 SO₄²⁻가 높게 나타나는 것으로 추정된다(Cha and Seo, 2020).

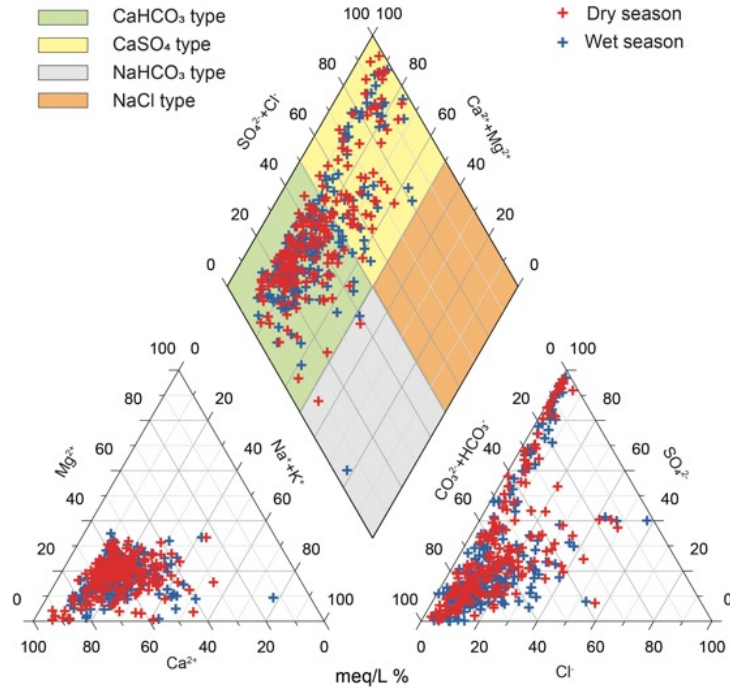


Fig. 3. Piper diagram classifying groundwater type in the study area.

시나리오 분석을 통한 지하수 사용 시 인체 위해성 평가

Table 1의 비소 농도값을 식 (1), 식 (2)에 적용하여 시나리오 1의 피부 노출률을 계산하였으며 식 (3)을 적용하여 시나리오 2와 3의 지하수 음용 시 노출률을 계산하였다. 이렇게 계산된 노출률을 식 (4), 식 (5)에 적용하여 시나리오 별 CR과 HQ를 도출하였다.

민감집단은 어린이, 청소년, 임산부, 유전병, 지병 등의 집단을 말한다(USEPA, 2022). 본 연구의 시나리오는 민감집단이 아닌 일반 성인에 대해 작성되어 $HQ \geq 1$, $CR \geq 10^{-4}$ 면 비발암성 위해, 발암성 위해가 있다고 판단하였다. Table 2와 Fig. 4는 시나리오별 CR과 HQ의 값을 도시한 것이다. 시나리오 1에서 HQ가 1 이상은 88개, CR은 10^{-4} 이상이 165개로 나타났다. HQ의 중앙값은 0.77, CR의 중앙값은 0.013을 보인다. 시나리오 2에서는 $HQ \geq 1$ 이 22개로 중앙값은 0.08, $CR \geq 10^{-4}$ 이 63개이며 중앙값은 3.69×10^{-5} 로 나타난다. 시나리오 3은 $HQ \geq 1$ 이 23개, $CR \geq 10^{-4}$ 는 67개이며 HQ의 중앙값은 0.11, CR은 4.82×10^{-5} 이다.

Table 2. Hazard quotient (HQ) and cancer risk (CR) in the study area for the three scenarios

Scenario	Type	HQ				CR			
		Min	Max	Med	SD	Min	Max	Med	SD
Scenario 1	Skin exposure: 365	0.05	377.33	0.77	39.37	9.09×10^{-4}	6.67	0.013	0.69
Scenario 2	Groundwater: 182, Freshwater: 182	0.004	67.0	0.08	5.43	2.13×10^{-6}	0.03	3.69×10^{-5}	2.44×10^{-3}
Scenario 3	Groundwater: 274, Freshwater: 91	0.007	52.4	0.11	5.47	3.21×10^{-6}	0.02	4.82×10^{-5}	2.46×10^{-3}

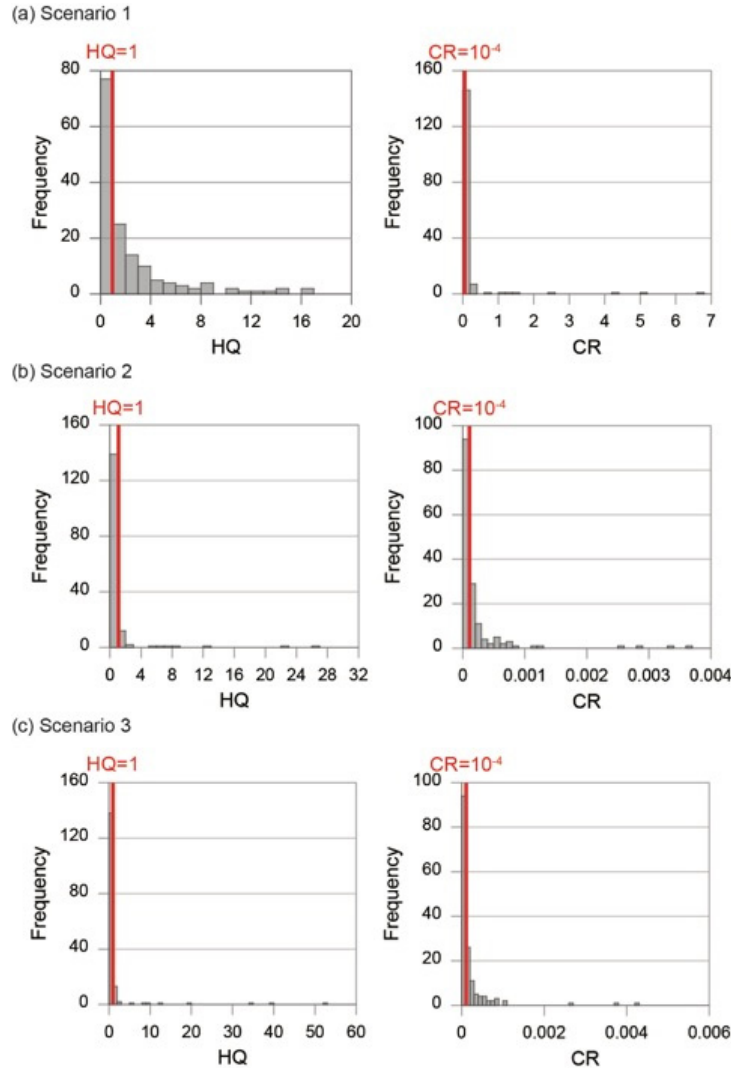


Fig. 4. Hazard quotient and cancer risk in the study area: (a) scenario 1, (b) scenario 2, and (c) scenario 3.

중국 징후이 지역은 비소 오염에 대한 위해성 평가 결과 발암성 위해의 평균은 1.00×10^{-4} 이며 비발암성 위해의 평균은 0.52로 계산되었다(Zhang et al., 2019). 국내 황성에서 진행된 비소 오염의 위해성 평가 결과, 발암성 위해도가 음용수 기준으로 상위 95%의 값에서 허용 위해도인 1×10^{-6} 을 초과하였다고 밝혔다(Gang and Kim, 2021). 위의 결과와 비교하면 연구지역의 위해성은 상당히 높은 것으로 나타난다. 또한 연구지역의 위해성을 각 시나리오끼리 비교한 결과, 위해도가 가장 높게 나타난 시나리오는 지속적인 피부 노출이 있을 때이며, 낮게 나타난 시나리오는 지하수를 182일 섭취했을 때이다. 본 연구결과는 시나리오 작성 시 지하수 음용 및 접촉하였을 경우, 노출률이 높은 시나리오를 통해 위해성을 평가하여 높게 나타난 것으로 보인다. 또한, 본 연구에서 설정한 시나리오 1은 1년을 동안의 노출을, 시나리오 2와 3은 주기를 다르게 하였기 때문에 시나리오 1에서 위해도가 높게 나타난 것으로 사료된다. 본 연구의 인체의 위해성은 사람들의 생활습관, 정화장치 등을 고려하지 않아 실제 위해도는 더 낮을 것으로 사료된다.

결론

본 연구는 국가지하수정보센터에서 수집된 지하수 자료를 바탕으로 수행되었다. 이 자료를 바탕으로 경남의 한 농촌 지역에 대하여 지하수 화학분석과 미국환경청에서 제시된 식을 이용하여 시나리오 분석을 통한 위해성 평가를 진행하였다. 이에 따른 결과는 다음과 같다.

- (1) 파이퍼 다이어그램을 통해 수질의 유형을 평가한 결과 일부 지하수에서 SO_4^{2-} 가 높게 나타났으며 이는 퇴적물 및 암석에 있는 황철석이 산화되어 나타난 것으로 추정된다.
- (2) 시나리오 분석을 통한 연구지역의 위해성 평가 결과 시나리오 2와 3의 지하수 음용을 하였을 때 HQ가 1 이상인 시료의 개수는 22개, 23개이며, 시나리오 1에서의 지속적인 피부 노출이 있을 시는 88개로 나타났다. 이를 통해 세 시나리오를 비교하면 지속적인 피부 노출이 있을 때 인체에 가장 위해하다고 판단된다.

본 연구는 미국환경청과 환경부에서 제공한 기본값을 최대치로 설정하여 보수적으로 위해성 평가를 수행하였기 때문에 실제의 위해성보다 다소 높게 나타날 수 있다.

사사

본 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2019R1A6A1A03033167). 또한 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 미세플라스틱 측정 및 위해성평가 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(2020003110010). 문상호는 한국지질자원연구원의 기본사업 “기후변화대응 대용량지하수 확보 및 최적 활용기술 개발(GP2020-012)” 관련하여 수행하였음.

References

- Ahn, J.S., Ko, K.S., Chon, C.M., 2007, Arsenic occurrence in groundwater of Korea, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 12(5), 64-72 (in Korean with English abstract).
- Ahn, J.S., Ko, K.S., Lee, J.S., Kim, J.Y., 2005, Characteristics of natural arsenic contamination in groundwater and its occurrences, *Economic and Environmental Geology*, 38, 547-561 (in Korean with English abstract).
- Ali, S., Fakhri, Y., Golbini, M., Thakur, S.K., Alinejad, A., Parseh, I., Shekhar, S., Bhattacharya, P., 2019, Concentration of fluoride in groundwater of India: A systematic review, meta-analysis and risk assessment, *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100224.
- Bang, S., Viet, P.H., Kim, K.W., 2009, Contamination of groundwater and risk assessment for arsenic exposure in Ha Nam province, Vietnam, *Environment International*, 35(3), 466-472.
- Berg, M., Tran, H.C., Nguyen, T.C., Pham, H.V., Schertenleib, R., Giger, W., 2001, Arsenic contamination of groundwater and drinking water in Vietnam: A human health threat, *Environmental Science and Technology*, 35(13), 2621-2626.
- Cha, S.Y., 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 Technology*, 26(1), 39-54 (in Korean with English abstract).
- Chang, K.H., 1975, Cretaceous stratigraphy of southeast Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, 11(1), 1-23 (in Korean with English abstract).
- Chang, K.H., Lee, Y.D., Lee, Y.G., Seo, S.J., Oh, K.Y., Lee, C.H., 1984, Unconformity at the base of the Late Cretaceous Yucheon Group, *Journal of the Geological Society of Korea*, 20, 41-50 (in Korean with English abstract).

- Fatta, D., Naoum, D., Loizidou, M., 2002, Integrated environmental monitoring and simulation system for use as a management decision support tool in urban areas, *Journal of Environmental Management*, 64, 333-343.
- Gang, S.H., Kim, K.T., 2021, Water quality monitoring and risk assessment for groundwater at Hoengseong, Gangwon province, *Journal of Environmental Health Sciences*, 47, 356-365 (in Korean with English abstract).
- Gleick, P.H., 1993, Water and conflict: Fresh water resources and international security, *International Security*, 18(1), 79-112.
- Kim, Y.S., Seo, I.S., Heo, N.Y., Lee, J.H., Kim, B.T., 2001, Engineering characteristics of shale due to the angle of bedding planes, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 17(1), 5-13 (in Korean with English abstract).
- Kwon, J.C., Jung, M.C., Kang, M.H., 2013, Contents and seasonal variations of arsenic in paddy soils and rice crops around the abandoned metal mines, *Economic and Environmental Geology*, 46(4), 329-338 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.S., Chon, H.T., 2005, Risk assessment of arsenic by human exposure of contaminated soil, groundwater and rice grain, *Economic and Environmental Geology*, 38(5), 535-545 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., Moon, S.H., Yun, S.T., 2010, Contamination of groundwater by arsenic and other constituents in an industrial complex, *Environmental Earth Sciences*, 60(1), 65-79.
- MOE (Ministry of Environment) and KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resource), 2018, Report for basic research of groundwater of Haman area, 11-15.
- MOE (Ministry of Environment) and K-water, 2021, Groundwater annual report, MOE and K-water, 413p.
- MOE (Ministry of Environment), 2005, Detailed survey for soil and water contamination in abandoned metal mines in Korea, MOE, Seoul.
- Mondal, D., Banerjee, M., Kundu, M., Banerjee, N., Bhattacharya, U., Giri, A.K., Ganguli, B., Roy, S.S., Polya, D.A., 2010, Comparison of drinking water, raw rice and cooking of rice as arsenic exposure routes in three contrasting areas of West Bengal, India, *Environmental Geochemistry and Health*, 32(6), 463-477.
- NGIC (National Groundwater Information Center), 2021, Groundwater annual report, 413p.
- Nriagu, D.G., Bhattacharya, P., Mukherjee, A.B., Bundschuh, J., Zevenhoven, R., Loeppert, R.H., 2007, Arsenic in soil and groundwater: An overview, 9, 3-60.
- Phan, K., Sthiannopkao, S., Kim, K.W., Wong, M.H., Sao, V., Hashim, J.H., Yasin, M.S.M., Aljunid, S.M., 2010, Health risk assessment of inorganic arsenic intake of Cambodia residents through groundwater drinking pathway, *Water Research*, 44(19), 5777-5788.
- Piper, A.M., 1944, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25(6), 914-928.
- Podgorski, J., Berg, M., 2020, Global threat of arsenic in groundwater, *Science*, 368(6493), 845-850.
- Ravindra, K., Mor, S., 2019, Distribution and health risk assessment of arsenic and selected heavy metals in Groundwater of Chandigarh, India, *Environmental Pollution*, 250, 820-830.
- Redwan, M., Moneim, A.A.A., Mohammed, N.E., Masoud, A.M., 2020, Sources and health risk assessments of nitrate in groundwater, West of Tahta area, Sohag, Egypt, *Episodes Journal of International Geoscience*, 43(2), 751-760.
- Saidi, S., Bouri, S., Dhia, H.B., Anselme, B., 2011, Assessment of groundwater risk using intrinsic vulnerability and hazard mapping: Application to Souassi aquifer, Tunisian Sahel, *Agricultural Water Management*, 98(10), 1671-1682.
- Sang, W.K., Sang, K.H., Yoon, J.L., Jae, Y.L., In, S.K., 1998, Petrology of the Cretaceous volcanic rocks in northern Yucheon Minor Basin, Korea, *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 7(1), 27-36 (in Korean with English abstract).
- Shiklomanov, I.A., 1991, The world's water resources, *Proceedings of the International Symposium to Commemorate 25 Years of the IHP, UNESCO/IHP, Paris*, 93-126.
- Smedley, P.L., Kinniburgh, D.G., 2002, A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters,

Applied Geochemistry, 17, 517-568.

- Smith, A.H., Lingas, E.O., Rahman, M., 2000, Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: A public health emergency, *Bulletin of the World Health Organization*, 78(9), 1093-1103.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 1997, Exposure factors handbook, EPA/600/P95/002Fa (Update to Exposure Factors Handbook, EPA/600/8-89/043), Environmental Protection Agency Region I, Washington DC, USA.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2004, Risk Assessment guidance for superfund, Washington DC, USA.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2022, Conducting a human health risk assessment, Retrieved from <https://www.epa.gov/risk/conducting-human-health-risk-assessment>.
- Voudouris, K., Kazakis, N., Polemio, M., Kareklas, K., 2010, Assessment of intrinsic vulnerability using DRASTIC model and GIS in Kiti aquifer, Cyprus, *European Water*, 30, 13-24.
- Wagner, J.M., Shamir, U., Nemati, H.R., 1992, Groundwater quality management under uncertainty: Stochastic programming approaches and the value of information, *Water Resources Research*, 28(5), 1233-1246.
- Waqas, H., Shan, A., Khan, Y.G., Nawaz, R., Rizwan, M., Rehman, M.S.U., Ahmed, W., Jabeen, M., 2017, Human health risk assessment of arsenic in groundwater aquifers of Lahore, Pakistan, *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 23(4), 836-850.
- Zhang, Y., Xu, B., Guo, Z., Han, J., Li, H., Jin, L., Chen, F., Xiong, Y., 2019, Human health risk assessment of groundwater arsenic contamination in Jinghui irrigation district, China, *Journal of Environmental Management*, 237, 163-169.