

## 강원도 횡성지역의 지하수 수질 모니터링 및 인체 위해성 평가

강승혜<sup>1,2</sup> , 김기태<sup>1,3\*</sup> 

<sup>1</sup>서울과학기술대학교 에너지환경공학과, <sup>2</sup>FITI시험연구원, <sup>3</sup>서울과학기술대학교 환경공학과

## Water Quality Monitoring and Risk Assessment for Groundwater at Hoengseong, Gangwon-do Province

Seung-Hye Gang<sup>1,2</sup> and Ki-Tae Kim<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Energy Engineering, Seoul National University of Science and Technology, <sup>2</sup>FITI Testing & Research Institute,

<sup>3</sup>Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology

### ABSTRACT

**Background:** Concerns have been raised regarding the criteria of groundwater, in particular in Gwangwon-do Province where many residents drink groundwater due to the poor supply of tap water and a high nonconformity rate with water quality criteria nationwide.

**Objectives:** Water quality monitoring and risk assessment were conducted for groundwater in Hoengseong, Gangwon-do Province.

**Methods:** A total of 46 items required for meeting drinking water criteria were analyzed from 258 samples collected from March 2017 through August 2018 (152 sites in 2017 and 106 sites in 2018). Risk assessment was conducted for two non-carcinogens (F<sup>-</sup> and NO<sub>3</sub>-N), and one carcinogen (i.e., arsenic) based on their high nonconformity to water quality criteria.

**Results:** Water quality analysis revealed that the total proportion of nonconformities was determined to be 27.9%. The nonconformity rate for each content item is as follows: total colony counts (1.6%), total coliform (6.2%), *Escherichia coli* (1.2%), F<sup>-</sup> (8.1%), arsenic (4.7%), NO<sub>3</sub>-N (8.1%), pH (1.2%), manganese (0.4%), and turbidity (5.8%). Risk assessment indicated that fluoride induced a hazard quotient greater than 1 with the 95% UCL (Upper Confidence Limit) concentration of the total 258 sites and average, median, and 95% UCL concentrations of nonconformity sites. For NO<sub>3</sub>-N, there was no human health risk. For arsenic, the excess cancer risk exceeded the acceptable cancer risk of  $1 \times 10^{-6}$  with the average and 95% UCL concentrations of total 258 sites and average, median, and 95% UCL concentrations of nonconformity sites.

**Conclusions:** This study suggests that it is necessary to expand water quality monitoring of groundwater and conduct a more detailed risk assessment in order to establish a health care plan for the residents of Hoengseong, Gangwon-do Province.

**Key words:** Drinking water, groundwater, risk assessment, water quality criteria

**Received** July 29, 2021

**Revised** August 18, 2021

**Accepted** August 19, 2021

### Highlights:

- Total percent of nonconformities for groundwater quality criteria was 27.9%.
- Hazard quotient for fluoride was greater than 1 with the 95% UCL (Upper Confidence Limit) concentration of total 258 sites and average, median, and 95% UCL concentrations of nonconformity sites.
- No human health risks were observed for NO<sub>3</sub>-N.
- The excess cancer risk of arsenic exceeded the acceptable cancer risk of  $1 \times 10^{-4}$  with the 95% UCL concentrations of total 258 sites and average, median, and 95% UCL concentrations of nonconformity sites.

### \*Corresponding author:

Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Republic of Korea  
Tel: +82-2-970-6642  
Fax: +82-2-970-5576  
E-mail: [ktkim@seoultech.ac.kr](mailto:ktkim@seoultech.ac.kr)

## I. 서론

우리나라 2019년 상수도통계를 살펴보면, 상수도보급률은 2010년 97.7%에서 2019년 99.2%로 꾸준히 증가하고 있다. 100%에 도달하지 못한 것은 농어촌보급률이 95.4%에 머물러 있기 때문이다.<sup>1)</sup> 지역별 상수도 보급률은 전라남도, 강원도, 충청남도 순으로 낮게 나타났으며, 전국 시군별 상수도 보급률을 보면 강원도 홍천군과 횡성군이 전국에서 유일하게 90% 미만인 82.1%, 89.3%를 보이고 있다. 산이 많은 지역적 특징에 따른 낮은 상수도보급률로 인해 주민들은 지하수 등 다른 수자원으로 음용수 문제를 해결하고 있다.

우리나라 지하수 이용현황은 2019년 기준으로 연간 2,916백만 m<sup>3</sup>의 지하수가 농업용(51.9%), 생활용(41.4%), 공업용(5.8%)으로 이용되고 있다.<sup>2)</sup> 강원도 지역은 119,542개소에서 연간 187,364천 m<sup>3</sup>의 지하수를 개발, 이용하고 있다. 「지하수법」 제30조에 의거 시행된 지하수수질 검사결과를 보면 전국적인 지하수의 수질은 높은 적합률을 보이고 있으나, 강원도는 제주도(92.5%) 다음으로 적합률(95.4%)이 낮게 나타났다. 이는 낮은 상수도보급률로 다른 지역에 비해 더 높은 비율로 지하수가 음용수로 이용되고 있음을 예상해 볼 때, 강원도 지역의 지하수 수질에 대한 보다 자세한 조사가 필요하다는 것을 의미한다. 지하수 수질은 공단지역, 폐광산지역, 군부대시설 등 오염된 지역 특이적으로 조사되었고,<sup>3-5)</sup> 위해성평가도 오염된 토양에 대한 다환방향족 탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) 등 특정 물질(군)의 생태위해성 평가나 오염된 토양의 피부를 통한 접촉, 섭취 등이 고려된 인체위해성 평가 위주로 수행되었다.<sup>6-11)</sup> 지하수를 먹는 물로 사용하는 노출 시나리오에 대한 인체위해성 평가는 많은 연구들이 보고되지 않았는데, 이는 지하수를 먹는 물로 사용하는 예는 약수 등의 지하수를 마시는 일부 도시지역에 사는 사람들이나 상수도가 보급되지 않은 지역에 사는 사람들 등 지역이나 인구 특이적으로 노출되는 경우에 한정되어 있기 때문이다.

지하수 수질기준은 지하수 이용 목적에 따라 달리 적용되고 있다. 지하수 음용수의 경우 「먹는물관리법」 제5조에 따른 '먹는물의 수질기준'이 적용되고 있으며, 생활용수, 농·어업용수, 공업용수로 이용하는 경우에는 「지하수법」 제20조 제2항 및 「지하수의 수질보전 등에 관한 규칙」 제11조의 수질기준을 따르도록 하고 있다. 땅속에 흐르는 지하수는 체계적인 관리에 어려움이 있어 국가 전체 및 유역별로 지하수 수질을 포함한 기초자료를 정부차원에서 구축하고 있다. 현재 정부는 1990년 시범사업을 시작으로 30여 년 가까이 지하수 기초자료 구축을 위한 사업을 추진하고 있으나, 기초조사가 완료된 136개 지역 중 보완조사가 실시된 지역은 6개에 불과하다. 그 외에도 지하수 이용실태조사 자료의 신뢰성 저하, 지하수 시설 전수조사의 법적 근거 미비 등 지하수 이용 및 관리에 여러 가지 문제점이

있다.<sup>12)</sup> 이러한 지하수 관리상의 문제점 및 허점은 지하수 수질 관리 사각지대를 발생시키고 특히 지하수를 먹는 물로 사용하는 지역주민의 건강 문제 등 여러 가지 위해요소를 유발할 수 있다.

본 연구는 상수도가 제공되지 않아 지하수가 주된 음용수로 사용되고 있는 강원도 횡성군 258개 지점에 대한 수질기준의 적합 및 부적합 정도를 파악하고, 이를 바탕으로 부적합 항목에 대한 인체 위해성 평가를 실시하여, 지하수의 이용 및 오염 예방, 체계적인 수질관리에 대한 필요성을 제시할 목적으로 수행되었다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 조사대상 및 분석방법

강원도 횡성군을 9개 지역(A~I)으로 구분하여(Supplementary Fig. S1), 지하수 중 음용수를 사용하고 있으며 2017년 3월~2018년 8월에 정기검사 대상인 지점을 조사대상 관점으로 선정하였다. 9개 지역에서 Table 1과 같이 2017년 152개, 2018년 106개 지점 등 총 258개 지점에 대하여 지하수 시료채취 및 수질 분석을 진행하였다.

시료채취는 채취 전 수도꼭지 부착물(고무호스 등)을 제거 후 알코올로 멸균하고 수도꼭지를 열어 약 5분간 지하수를 흘러보낸 후 먹는물수질공정시험기준 ES 05130.b 시료채취와 보존방법에 따라 분석항목별로 분류하여 실시하였으며, 채취된 시료는 4℃ 냉장상태로 보관하였다.<sup>13)</sup> 분석항목은 먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙 제2조에 따라 지하수 음용수 46항목(대장균 선택)에 대하여 분석을 진행하였으며, 분석방법은 먹는물수질공정시험기준(국립환경과학원 고시 제2017-19호)에 준하여 실시하였다.<sup>13)</sup> 미생물은 일반세균(중온), 총대

**Table 1.** Number of sampling sites collected for two years of 2017 and 2018 in nine compartments at Hoengseong (A-I)

Area	Number of sampling site		Total
	2017 year	2018 year	
A	26	13	39
B	29	13	42
C	12	5	17
D	30	25	55
E	5	10	15
F	9	8	17
G	14	16	30
H	24	15	39
I	3	1	4
Total	152	106	258

**Table 2.** Information of instruments and reference materials used for chemical analysis of 16 inorganic, 3 aesthetic, and 17 organic compounds

Analysis contents	Instruments		Reference material		
	Instruments	Models	Company	Concentration (mg/L)	
Inorganic compounds (16)	Metals	ICP/MS	PerkinElmer Elan DEC II	SCP SCIENCE (Quality Control Standard.4)	100
	Hg	Mercury analyzer	PerkinElmer FIMS 400	Sigma-aldrich	1,000
	F <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> -N	IC	Thermo Aquion	Accustandard	1,000
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	UV/VIS	PerkinElmer Lambda25	Accustandard	1,000
	Cyanide	Automated analyzer	Aliance Auto Analyzer2	Accustandard	1,000
Aesthetic compounds (3)	Detergent	Automated analyzer	Aliance Auto Analyzer2	Wako	1,000
	Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	IC	Thermo Aquion	Accustandard	1,000
Organic compounds (17)	Organophosphorus pesticides	GC/NPD (Nitrogen Phosphorus Detector)	Agilent GC 7890B	Accustandard (Custom Pesticide Mix 6 compounds)	1,000
	Phenol	Automated analyzer	Aliance Auto Analyzer2	Accustandard	1,000
	Cabaryl	HPLC	FLD, Agilent 1100 series, 1260 FLD / Pinnacle PCX	Accustandard	100
	VOCs	GC/MS - Purge&Trap	Agilent GC 7890B, Agilent MS 5977A / TELEDYNE TEKMAR Stratum, AQUATEk 100	Accustandard (Custom VOC Standard 17 compounds)	100
	1,4-Dioxane			Accustandard	100

장균군, 대장균 항목을 분석하였고, 사용 배지로는 일반세균(중온)은 Plate Count Ager (BD, 500 g), 총대장균군과 대장균은 Colilert (IDEXX) 시판용 배지를 이용하였다. 대장균 분석을 위해 자외선투과(366 nm, 6와트)를 사용하였다. 탁도는 탁도계(HACH 2100AN)로 측정하였고, 수소이온농도는 pH측정기(SUNTEX TS-110)를 사용하여 분석하였다. 건강상 유해 영향 무기물질 16항목(중금속 11종-납, 비소, 셀레늄, 크롬, 카드뮴, 보론, 구리, 아연, 철, 망간, 알루미늄; 수은; 이온 2종-F<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub>-N; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N; 시안), 심미적 영향물질 3항목(세제; 이온 2종- Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 유기물질 17항목(유기인계 농약류 3종- 다이아지논, 파라티온, 페니트로티온; 페놀; 카바릴; 휘발성유기화합물 11종- 1,1,1-트리클로로에탄, 테트라클로로에틸렌, 트리클로로에틸렌, 디클로로메탄, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌, 1,1-디클로로에틸렌, 사염화탄소, 1,2-디브로모-3-클로로프로판; 1,4 다이옥산)에 대한 분석방법은 Table 2에 나타내었다. 검출농도 0은 먹는물 수질공정시험기준에서 시험결과 표시한계 기준 이하일 경우를 의미하며 불검출로 간주했다. 분석 시작 전 먹는물수질공정시험기준(국립환경과학원 고시 제2017-19호)의 ES 05001.a 정도보증/정도관리에 따라 각 항목에 대한 정도관리 및 정도보증을 실시하였다. 정도보증 및 정도관리 항목은 방법검출한계(Method Detection Limit, MDL), 정량한계(Limit Of Quantification, LOQ), 정밀도(Precision), 정확도(Accuracy)로 나타냈으며, 방법검출한계 및 정량한계는 정제수

에 정량한계 부근의 농도가 되도록 분석물질을 첨가한 시료 7개를 준비한 후 항목별 실험절차와 동일하게 측정하여 표준편차를 구하고, 표준편차에 3.14를 곱한 값을 방법검출한계, 10을 곱한 값을 정량한계로 산출하였다. 정밀도와 정확도는 정제수에 정량한계 농도의 1배~10배가 되도록 표준물질을 첨가한 시료 7개를 준비한 후 항목별 실험절차와 동일하게 측정하여 평균값과 표준편차를 구하였다. 정밀도는 측정값의 상대표준편차를 계산하여 항목별로 15~25% 이내로 산출하였고, 정확도는 시험분석 결과가 참값에 얼마나 근접하는가를 나타내는 것으로 인증표준물질을 분석한 결과값과 인증값과의 상대백분율을 구한 후 75~125% 이내로 산출하였다. 분석결과 먹는물수질공정시험기준의 항목별 정도관리 목표값에 모두 적합한 것으로 나타났다. 개별 항목별 분석결과에 대한 자세한 정도보증 및 정도관리 결과는 Supplementary Table S1에 보여주었다.

## 2. 인체 위해성 평가항목 및 평가방법

상수도 미보급지역 안심지하수 수질조사에서 상수도 미보급지역 거주 주민들은 영유아가 없는 경우가 95%로 대상관정 소유자 중 약 65%가 60대 이상의 고령이며, 사용기간은 평균 20년 이내인 것으로 파악되었다.<sup>14)</sup> 이를 바탕으로 위해성 평가는 65세 이상 성인을 대상으로 수행하였다. 인체 위해성 평가항목은 지하수 음용수 수질검사 항목 중 미생물을 제외하고, 지하수 음용수 기준으로 부적합 판정을 받은 일반세균, 총대장

균군, 대장균, 망간, 비소, F<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub>-N, 수소이온농도, 탁도 중 CSF와 RfD가 존재하고, 부적합률과 검출 빈도가 높은 항목인 F<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub>-N, 비소를 결정하였다. 이 물질들은 미국환경보호청의 IRIS (Integrated Risk Information System) 분류체계에 따라 F<sup>-</sup>와 NO<sub>3</sub>-N는 비발암성 물질, 비소는 발암성 물질로 구분하여 인체 위해성 평가를 실시하였다.

「화학물질 위해성평가의 구체적 방법 등에 관한 규정」에서 제시하는 아래 알고리즘을 이용하여 일일평균노출량(Average daily dose, ADD)을 추정하였다. 지하수 음용수의 경우 경구섭취를 통한 노출이 가장 크며, 다른 경로에 의한 노출은 극히 드물 것으로 판단하여<sup>15,16)</sup> 지하수 음용수의 경구섭취를 통한 노출량만을 고려하였다.

$$ADD \text{ (mg/kg/day)} = \frac{C \times CR \times EF \times ED}{BW \times AT \times 365 \text{ (day/year)}} \quad (1)$$

- 여기서, ADD: 일일평균노출량(Average daily dose, mg/kg/day)
- C: 오염물질 농도(Contaminant concentration, mg/L)
- CR: 일일 음용수 섭취량(Contact Rate, L/day)
- EF: 노출빈도(Exposure Frequency, days/years)
- ED: 노출기간(Exposure Duration, years)
- BW: 평균체중(Body Weight, kg)
- AT: 평균기간(Average time, years)

노출계수는 한국인을 대상으로 조사된 한국노출계수핸드북에서 제시하는 노출계수 값을 사용했다.<sup>17)</sup> 평균체중(BW)은 60.7 kg (성인 남성 64.3 kg, 성인 여성 57.1 kg)을 사용하였으며, 가정집에서 매일 지하수를 음용하는 것으로 판단하여 노출 빈도(EF)는 365일로 산정하였다. 일일 물 섭취량(CR)은 1.5 L, 음용수를 통한 노출기간(ED)은 U.S. EPA에서 제시하는 주거지

역을 참고하여 발암물질과 비발암 물질 모두 30년으로 가정하여 산출하였다. 평균기간(AT)은 발암물질일 경우 우리나라 평균 기대수명인 78.6년(성인 남성 75.1세, 성인 여성 81.9세)을 사용하였으며, 비발암 물질일 경우 노출기간(ED)과 동일하게 30년으로 산정하였다.

비발암성 물질인 F<sup>-</sup>와 NO<sub>3</sub>-N의 유해지수(Hazard Quotient, HQ)는 일일평균노출량을 IRIS에서 제공하는 F<sup>-</sup> (0.06 mg/kg/day), NO<sub>3</sub>-N (1.60 mg/kg/day)의 독성참고치(Reference dose, RfD)를 나누어서 산출하였다(식 2).<sup>18)</sup> 유해지수가 1보다 클 경우 비발암 위해성이 있는 것으로 판단하였다.

$$\text{유해지수(HQ)} = \text{ADD/RfD} \quad (2)$$

- 여기서, ADD: 일일평균노출량(Average daily dose, mg/kg/day)
- RfD: 독성참고치(Reference dose, mg/kg/day)

발암물질인 비소의 위해성평가를 위해 일일평균노출량에 IRIS에서 제시되고 있는 발암잠재력(Cancer Slope Factor, CSF)를 곱하여 초과발암위해도(Excess Cancer Risk, ECR)를 산출하였다. 발암잠재력 값으로 oral slope factor인 1.5E+0 (mg/kg/day) 값을 사용하였다.<sup>18)</sup> 초과발암위해도는 「화학물질 위해성평가의 구체적 방법 등에 관한 규정」을 참고하여 허용위해기준 1×10<sup>-6</sup>과 비교하여 초과발암 위해여부를 판단하였다.

$$\text{초과발암위해도(ECR)} = \text{CSF} \times \text{ADD} \quad (3)$$

- 여기서, CSF: 발암잠재력  
(Cancer potency slope factor, (mg/kg/day)<sup>-1</sup>)
- ADD: 일일평균노출량  
(Average daily dose, mg/kg/day)

**Table 3.** Number of sites for detected microorganisms (general bacteria, total count of coliform group, *escherichia coli*) and their detection frequency (%) among total number of sampling sites selected in nine compartments at Hoengseong (A~I)

Area	Total number of sampling sites	Number of sites			Detection frequency (%)		
		General bacteria	Total count of coliform	<i>Escherichia coli</i>	General bacteria	Total count of coliform	<i>Escherichia coli</i>
A	39	14	5	2	35.9	12.8	5.1
B	42	9	0	0	21.4	0.0	0.0
C	17	5	2	0	29.4	11.8	0.0
D	55	39	1	0	70.9	1.8	0.0
E	15	6	3	0	40.0	20.0	0.0
F	17	7	1	0	41.2	2.9	0.0
G	30	18	1	0	60.0	3.3	0.0
H	39	25	2	1	64.1	5.1	4.2
I	4	3	1	0	75.0	25.0	0.0
Total	258	126	16	3	48.8	6.2	1.2

### III. 결 과

#### 1. 분석항목별 수질측정 결과

먹는물 수질기준(Supplementary Table S2)에서 미생물에 관한 기준으로 일반세균은 1 mL 중 100 CFU (Colony Forming Unit)를 넘지않고, 총대장균군과 대장균군은 100 mL에서 검출되지 않아야한다고 명시하고 있으므로, 총대장균군이나 대장균군이 검출된 지점은 먹는물 수질기준에 부적합함을 의미한다. 총대장균군과 대장균은 일반세균에 비해서는 적은 비율로 검출되었다 (Table 3).

납, 셀레늄, 크롬, 카드뮴, 수은, 시안, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N은 황성균 258개 모든 지점에서 불검출되었다. 보론은 49개 지점(19.0%)에서 검출되었고, 검출지역의 농도범위는 0.01~0.15 mg/L로 먹는물 수질기준(1.0 mg/L) 아래 미량으로 검출되었다. F<sup>-</sup>는 116개 지점(45.0%)에서 검출되었고, 검출지역의 농도범위는 0.15~7.32 mg/L, 평균값은 1.01±1.27 mg/L로 나타났다. NO<sub>3</sub>-N는 황성균 지역의 거의 모든 대상 관정에서 일정량 이상이 검출되었다. 241개 지점(93.4%)에서 검출되었고, 검출지역의 농도범위는 0.1~61.3 mg/L, 평균값은 4.2±5.9 mg/L로 나타났다. 비소는 21개 지점(8.1%)에서 검출되었고, 검출지역의 농도범위는 0.005~0.053 mg/L, 평균값은 0.016±0.012 mg/L이다(Table 4).

다이아지논, 파라타이온, 페니트로티온, 페놀, 카바릴, 1,1,1-트리클로로에탄, 테트라클로로에틸렌, 트리클로로에틸렌, 디클로로메탄, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌, 1,1-디클로로에틸렌, 사염화탄소, 1,2-디브로모-3-클로로프로판, 1,4-다이옥산은 불검출로 나타났다. 경도는 물의 세기로 모든 대상 관정에서 8~302 mg/L 범위로 측정되었고, 과망간산칼륨소비량은 0.3~5.7 mg/L로 측정되었다. 구리는 28개 지점(10.9%)에서 0.008~0.101 mg/L로 측정되었고, 먹는물 수질기준(1 mg/L 이하) 이하 농도로 검출되었다. 수소이온농도는 6.1~9.1로 측정되었으며, C지역 8.7, F지역 9.1, H지역 8.7로 먹는물 수질기준인 8.5보다 높게 검출되었다. 아연과 Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>은 검출빈도가 높은 항목으로, 아연의 경우 224개 지점(86.8%)에서 0.002~2.450 mg/L로 검출되었고, Cl<sup>-</sup>은 전체 258개 지점에서 1.0~144.6 mg/L, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>은 243개 지점(94.2%)에서 2~52 mg/L 범위로 측정되었다. 철은 64개 지점(24.8%), 망간은 32개 지점(12.4%)에서 검출되었으며, 망간은 D지역에서 0.576 mg/L로 먹는물 수질기준 0.3 mg/L를 초과한 것으로 나타났다. 알루미늄도 5개 지점(1.9%)에서 미량 검출되었고, 탁도는 물의 탁한 정도를 측정하는 것으로 모든 지역에서 0.05~4.84 NTU 범위로 검출되었으며, D지역에서 4.84 NTU로 가장 높게 나타났다.

Table 4. Number of sites, detection frequency (%), and the minimum, average, maximum concentration for F<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub>-N, and Arsenic in nine compartments at Hoengseong (A~I)

Area	Number of sampling sites	Number of sites			Detection frequency (%)			Detected concentration (mg/L)										
		Number of sites			Detection frequency (%)			F <sup>-</sup>			NO <sub>3</sub> -N			Arsenic				
		F <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> -N	Arsenic	F <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> -N	Arsenic	Min	Max	Avg.	SD	Min	Max	Avg.	SD	Min	Max	Avg.
A	39	16	37	0	94.9	0.0	41.0	41.0	0.68	0.85	0.2	25.7	5.1	6.1	0.000	0.000	0.000	0.000
B	42	13	39	9	92.9	21.4	31.0	31.0	0.63	0.91	0.1	14.8	2.4	2.8	0.006	0.053	0.019	0.014
C	17	9	15	0	88.2	0.0	52.9	88.2	2.12	1.65	0.2	7.5	2.0	2.0	0.000	0.000	0.000	0.000
D	55	22	52	1	94.5	1.8	40.0	40.0	0.87	0.96	0.1	61.3	6.5	9.7	0.006	0.006	0.006	0.000
E	15	10	15	1	100.0	6.7	66.7	100.0	0.53	0.49	0.2	18.1	3.9	4.2	0.006	0.006	0.006	0.000
F	17	11	14	7	82.4	41.2	64.7	82.4	0.75	0.88	0.1	11.1	2.4	3.2	0.005	0.033	0.018	0.010
G	30	13	30	0	100.0	0.0	43.3	100.0	1.08	1.32	0.7	20.5	4.3	3.9	0.000	0.000	0.000	0.000
H	39	22	35	3	89.7	7.7	56.4	89.7	1.44	1.69	0.2	10.1	3.2	2.5	0.005	0.013	0.008	0.004
I	4	0	4	0	100.0	0.0	0.0	100.0	0.00	0.00	2.6	12.5	8.3	3.6	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	258	116	241	21	93.4	8.1	45.0	93.4	1.01	1.27	0.1	61.3	4.2	5.9	0.005	0.053	0.016	0.012

\*Detection Limit: F<sup>-</sup> (0.15 mg/L), NO<sub>3</sub>-N (0.1 mg/L), Arsenic (0.005 mg/L).

### 2. 분석항목별 부적합

모든 개별 분석항목 중에서 하나라도 기준을 초과한 지점을 부적합으로 본다면, 강원도 횡성군 총 258개 중 72개 지점(27.9%)이 부적합으로 나타났다(Table 5). 부적합 판정을 가장 많이 받은 항목은 F와 NO<sub>3</sub>-N로 각 21개 지점(8.1%)에서 부적합으로 나타났으며, 총대장균군 16개(6.2%), 탁도 15개(5.8%), 비소 12개(4.7%), 일반세균 4개(1.6%), 대장균, 수소이온농도 각 3개(1.2%), 망간 1개(0.4%) 순으로 부적합 판정을 받았다.

부적합 지점의 평균 농도는 일반세균 190 CFU/mL, F 3.34 mg/L, 비소 0.022 mg/L, NO<sub>3</sub>-N 16.3 mg/L, 수소이온농도 8.8, 망간 0.576 mg/L, 탁도 2.15 NTU로 나타났다. Fig. 1과 같이 지역별로 부적합 빈도가 높은 항목인 F, NO<sub>3</sub>-N, 비소, 탁도의 부적합 평균 농도를 보면, A지역은 F 3.98 mg/L, NO<sub>3</sub>-N 17.8 mg/L, 탁도 2.13 NTU으로 나타났고, B지역은 F 2.56 mg/L, 비소 0.024 mg/L, NO<sub>3</sub>-N 14.8 mg/L, 탁도 1.59 NTU로 나타났다. C지역은 F만 3.60 mg/L로 나타났고, D지역은 F 2.59 mg/L, NO<sub>3</sub>-N 23.0 mg/L, 탁도 3.09 NTU로 측정되었다. E지역은 F 1.62 mg/L, NO<sub>3</sub>-N 18.1 mg/L, 탁도 1.64 NTU로 나타났고, F지역은 F 3.33 mg/L, 비소 0.023 mg/L, NO<sub>3</sub>-N 11.1 mg/L, 탁도 2.09 NTU로 측정되었다. G지역은 F 4.06 mg/L, NO<sub>3</sub>-N 16.4 mg/L, 탁도 1.37 NTU로 나타났으며, H지역은 F 4.01 mg/L, 비소 0.013 mg/L, NO<sub>3</sub>-N 10.1 mg/L, 탁도 2.35 NTU로 I지역은 NO<sub>3</sub>-N만 12.5 mg/L로 측정되었다.

### 3. 인체 위해성 평가결과

인체 위해성 평가는 부적합률과 검출 빈도가 높은 항목인 F, NO<sub>3</sub>-N, 비소를 대상으로 수행하였다. 이들 물질의 노출량을 추정하기 위한 오염물질 농도는 횡성군 258개 지점에 대한 오염 특성을 반영하고자 횡성군 전체 검출결과와 먹는물 수질기

준 부적합 지역의 결과로 나누어 구분하였다. 첫 번째로 전체 258개 지점에 대한 평균값과 중간값, 상위 95%값으로 구분하여 인체 위해성 평가를 실시하였고, 두 번째로 먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙에 따라 지하수 음용수 기준을 초과한 지역을 따로 구분하여 평균값과 중간값, 상위 95%값에 대한 인체 위해성 평가를 실시하였다.

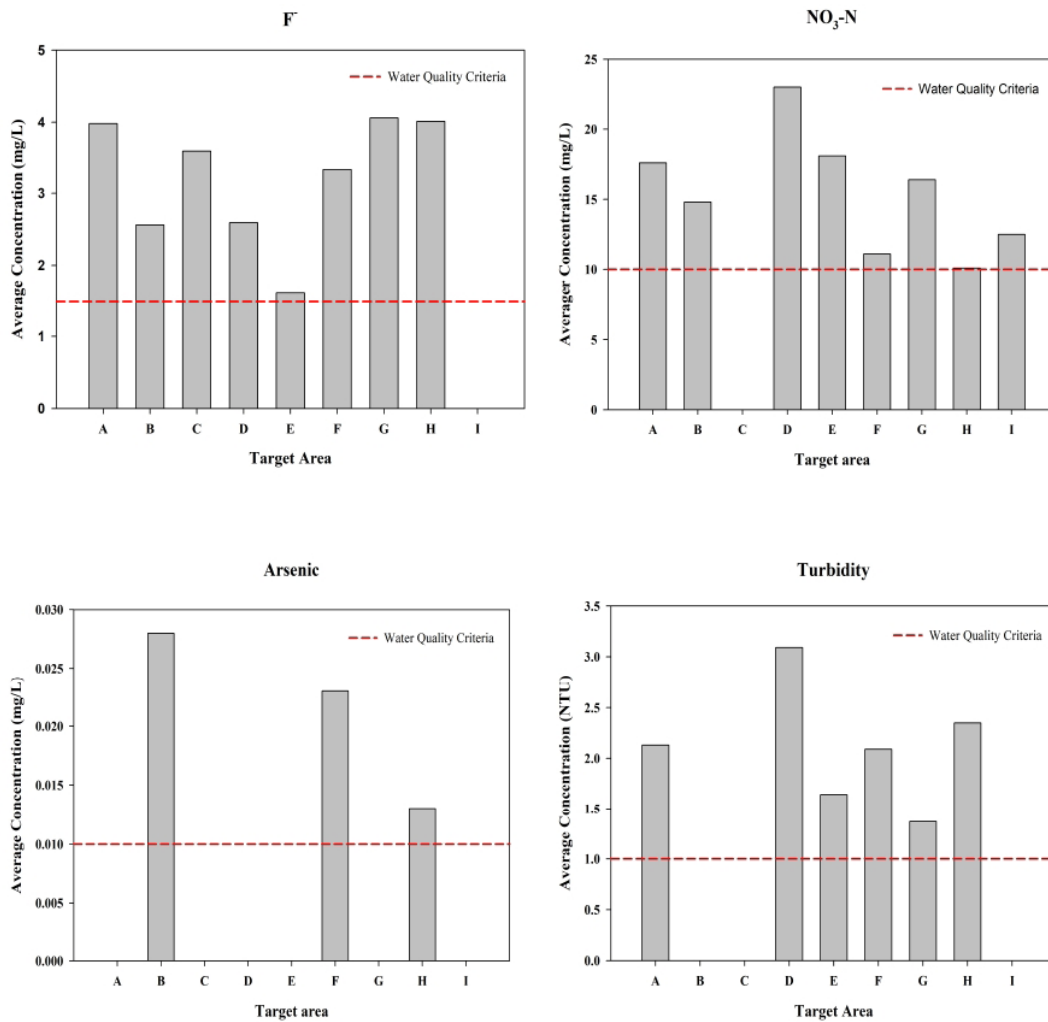
인체 위해성 평가 결과(Table 6), F의 경우, 258개 지점에 대한 평균값과 중간값의 유해지수는 1보다 작으므로 인체 유해성이 없는 것으로 나타났지만, 상위 95%값의 유해지수는 1보다 크게 나타났다. 지하수 음용수 기준을 초과한 지역을 대상으로 한 결과에서는 평균값과 중간값, 상위 95%값 모두에서 유해지수가 1보다 컸다. NO<sub>3</sub>-N의 경우, 258개 지점에 대한 결과와 지하수 음용수 기준을 초과한 지역의 결과 평균값과 중간값, 상위 95%값을 적용했을 때 유해지수가 모두 1보다 작으므로 인체 유해성이 없는 것으로 나타났다. 비소의 경우는 258개 지점의 중간값에 근거한 초과발암위해도 없는 것으로 나타났지만, 평균값과 상위 95% 값의 초과발암위해도는 허용위해도인 1×10<sup>-6</sup>을 초과하였다. 지하수 음용수 기준을 초과한 지역에서는 지하수 음용수 기준을 초과한 지역에서는 평균값과 중간값, 상위 95%값 모두에서 허용위해도인 1×10<sup>-6</sup>을 초과하였다.

## IV. 고 찰

본 연구는 먹는 물 수질 기준에서 제시하고 있는 항목에 대해서, 강원도 횡성군에서 지하수를 음용수로 사용하는 258개 지점에 대한 수질검사를 실시하여, 먹는 물 수질 기준으로 적합 및 부적합 정도를 파악하였다. 강원도 횡성군 총 258개 중 72개 지점(27.9%)이 부적합으로 나타났다. 「지하수법」에 의거 시행된 강원도 지하수의 지하수 수질검사 결과에서는 부적

**Table 5.** Total number and total percent of nonconformity in nine compartments at Hoengseong (A~I)

Area	2017 year		2018 year		Total number of nonconformity	Total percent of nonconformity (%)
	Number of nonconformity	Percent of nonconformity (%)	Number of nonconformity	Percent of nonconformity (%)		
A	6	23.1	5	38.5	11	28.2
B	9	31.0	4	30.8	13	31.0
C	4	33.3	2	40.0	6	35.3
D	8	26.7	6	24.0	14	25.5
E	1	20.0	4	40.0	5	33.3
F	5	55.6	4	50.0	9	52.9
G	3	21.4	2	12.5	5	16.7
H	4	16.7	4	26.7	8	20.5
I	1	33.3	0	0.0	1	25.0
Total	41	27.0	31	29.3	72	27.9



**Fig. 1.** Average concentration of F<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub>-N, Arsenic, and Turbidity of nonconformity areas in nine compartments at Hoengseong (A-I). \*Drinking water criteria : F<sup>-</sup> (1.5 mg/L), NO<sub>3</sub>-N (10 mg/L), Arsenic (0.010 mg/L), Turbidity (1 NTU)

**Table 6.** Risk assessment based on average, median, and 95% Upper Confidence Limit (UCL) concentration of F<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub>-N, Arsenic for total (258 sampling sites) and nonconformity sites

		Concentration (mg/L)		Average daily dose (mg/kg/day)		Hazard Quotient for F <sup>-</sup> and NO <sub>3</sub> -N Excess Cancer Ratio for arsenic	
		Total	Nonconformity sites	Total	Nonconformity sites	Total	Nonconformity sites
F <sup>-</sup>	Avg.	0.46	3.36	0.011	0.083	0.189	1.384
	Median	0	3.42	0	0.085	0	1.409
	95% UCL	2.92	4.69	0.072	0.116	1.203	1.932
NO <sub>3</sub> -N	Avg.	3.9	18.5	0.096	0.457	0.060	0.286
	Median	2.3	14.8	0.057	0.366	0.036	0.229
	95% UCL	12.3	31.5	0.304	0.778	0.190	0.487
Arsenic	Avg.	0.001	0.023	1×10 <sup>-5</sup>	2.2×10 <sup>-4</sup>	1.4×10 <sup>-5</sup>	3.3×10 <sup>-4</sup>
	Median	0	0.018	0	1.7×10 <sup>-4</sup>	0	2.5×10 <sup>-4</sup>
	95% UCL	0.008	0.043	8×10 <sup>-5</sup>	4.1×10 <sup>-4</sup>	1.1×10 <sup>-4</sup>	6.1×10 <sup>-4</sup>

합도가 5%로 보고되고 있는데,<sup>1)</sup> 얼마나 많은 표본이 존재하는지, 세부 지역과 세부 측정 항목에서 부적합도를 보이는지 등 구체적인 결과가 공개되지 않아 본 연구와 직접적인 비교는 불가능하다. 한편, 본 연구에서 측정된 모든 지점의 전체 부적합도는 개별 항목별 부적합도보다 높게 나온 것으로부터 2항목 이상에서 부적합을 보이는 지점은 그 수가 적다는 것을 알 수 있다. 실제 결과에서도, 258개 중 17개 지점(6.6%)만이 2항목 이상에서 동시에 부적합으로 나타났다.

일반세균은 126개(48.8%), 총대장균군 16개(6.2%), 대장균은 3개 지점(1.2%)에서 검출되었으며, 총대장균군과 대장균은 일반세균에 비해 적게 검출되었다. 미생물 지표의 경우 관정 깊이와 강우량, 시설 노후화로 인한 외부 오염원 유입이 주요 원인이며, 농촌지역의 경우 퇴비나 거름 등을 많이 사용하기 때문으로 판단된다. 본 연구 대상에 포함된 산간지역에서 일반세균의 검출된 비율이 50% 가까이 되는지는 다소 불분명하다. F는 116개 지점(45.0%)에서 검출되었고, H지역에서 7.32 mg/L로 가장 높게 나타났다. 비소는 21개 지점(8.1%)에서 검출되었으며, B지역과 F지역에서 검출 빈도가 높고, 검출농도는 B지역에서 0.053 mg/L로 가장 높게 나타났다. NO<sub>3</sub>-N는 241개 지점(93.4%)에서 검출되었고, D지역에서 61.3 mg/L로 가장 높게 측정되었다. 건강상 유해영향 유기물질(17항목) 및 심미적 영향물질에 관한 기준(17항목) 중 아연, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 경도, 탁도는 검출 빈도가 높은 항목으로 D지역에서 가장 높은 농도로 검출되었다. NO<sub>3</sub>-N는 농업활동으로 인한 퇴비나 거름 등을 많이 사용하는 농촌지역이나 시설 노후화로 인한 외부 오염원 유입이 많은 지역에서 검출 빈도가 높은 항목이다. F는 지역의 지질학적 특성에 따라 검출빈도가 달라지는데 주로 화강암, 편암, 편마암, 화강편마암 지역의 지하수에서 높은 함량을 나타내며, pH가 중성이며 알칼리성 조건에서 그 용해가 활발하게 일어난다. 횡성군에서 F가 45.0% 이상으로 높은 검출률을 보이며, 부적합일 경우 평균농도가 3.34 mg/L로 먹는물 수질기준 1.5 mg/L보다 2.5배 높은 농도로 검출되었음은 지질적인 특징 때문으로 판단된다. 횡성군의 지질은 경기육괴의 동북부에 위치하면서 옥천대의 외측에서 그와 평행하게 분포하고 있는 대보화강암대에 분포하고 있다. 이 지역은 선캄브리아기의 편암 및 편마암류, 주라기의 대보화강암, 백악기의 안산암을 중심으로 하는 화산암류와 퇴적암류 및 조립질, 중립질 흑운모 화강암류와 제4기 충적층으로 구성되어 있다.<sup>19)</sup> 다른 연구에서는 본 연구보다 높은 F 검출농도를 보고하고 있는데, 강원도 양양군, 강릉시 사천면, 충분 청원군의 지하수 F 농도는 각각 9.96, 11.4, 10.7 mg/L로 검출되었다.<sup>20)</sup> 또한 환원환경에서 F의 용해도가 높아지기 때문에 지표면에서 가까운 지하수보다 심부지하수에서 F의 농도가 높게 나타난다. F의 검출은 지질뿐 만 아니라 지하수의 산출 심도에 따라 달라지는데, 같은 화강암 지대라 할지라도 심도 100 m 미만 관정에서 평균 0.17 mg/L의 F가 검출

되었으나 심도 300 m이상의 경우 20배 이상 높은 농도인 평균 4.47 mg/L의 F가 검출되었다.<sup>20)</sup> 비소는 지각 중의 자연부존 함량이 20번째로 많이 존재하는 물질로 비소에 대한 지하수 오염은 중요하게 다루어지고 있으며,<sup>21,22)</sup> 일반적인 지하수에서 비소의 농도는 <0.5~10 µg/L 범위로 나타나지만, 광산활동 등으로 오염된 지하수에서는 10 mg/L까지도 검출된다.<sup>23)</sup>

F와 NO<sub>3</sub>-N, 비소를 대상으로 인체 위해성 평가를 실시한 결과, 모든 경우에서 유해지수가 1보다 작게 나온 NO<sub>3</sub>-N를 제외하고, F와 비소는 각각 유해지수 기준과 초과발암 허용위해도 기준을 초과하였다. F의 경우 횡성군 258개 지점에 대한 상위 95% 값과 먹는물 수질기준을 초과한 부적합 지역에 대한 평균값, 중간값, 상위 95% 값에서 유해지수가 1보다 크게 나타났는데, 이는 높은 농도의 F가 검출된 부적합 지역 위주로 위해관리가 필요하다는 것을 의미한다. 국내 다른 연구에서 7개 권역 510개 시료와 그 중 부적합 시료 286개 시료에 대한 인체 위해성 평가를 실시한 결과를 보면, F와 NO<sub>3</sub>-N의 경우 모든 지역에서 평균값과 중간값, 상위 95% 값의 유해지수가 1보다 낮아 인체 유해성이 없는 것으로 나타났으나, F의 경우 수질 기준을 초과하는 일부지역은 유해지수가 1을 초과하여 인체 유해성이 있는 것으로 나타났다.<sup>24)</sup> F는 급성 독성으로 6 mg/day 이상 계속적으로 섭취할 경우 체중 감소, 오심, 구토, 변비, 무근무력증, 만성 경련, 폐출혈 등이 나타나며, 만성 중독 시는 음료수의 F농도 2 mg/L 이상에서 반상치가 생기고, 8 mg/L 이상에서 골연화증이 나타난다. F의 기준은 1.5 mg/L 이하로 정하였는데, 이는 F를 3 mg/L 이상 함유한 물을 마시는 경우에는 95%의 사람이 반상치에 걸리지만, 1 mg/L에서는 반상치에 걸리는 비율이 15%이고, 0.8 mg/L이하에서는 반상치가 발생하지 않는다는 관점에서 기준치를 설정한 것이다.<sup>25)</sup> 발암 물질인 비소의 경우, 횡성군 258개 지점에 대한 상위 95% 값에서 초과발암 위해도가 높게 나왔고, 먹는물 수질기준을 초과한 부적합 지역에서는 모든 값(평균값, 중간값, 상위 95% 값)에 대해서 초과발암에 대한 인체 유해성이 있는 것으로 나타났다. Chae (2021)<sup>24)</sup> 연구에서 본 연구결과와 유사하게 510개 시료(충북 33개소, 강원도 47개소, 경기도 36개소, 경남 60개소, 인천 50개소, 전북 83개소, 충남 150개소)의 상위 95% 값의 초과발암위해도와 부적합 시료 286개 시료의 평균값과 중간값, 상위 95% 값의 초과발암위해도가 발암 허용위해도 기준을 초과한 것으로 보고하고 있다. 비소의 경우는, 검출되지 않은 곳(237개)이 대부분이지만, 총 모니터링된 지점과 부적합 지역 모두에서 유해성이 나타났으므로, 비소 검출 여부를 면밀히 관찰하여 전반적인 관리가 필요할 것으로 판단된다. 비소의 인체 섭취 99% 정도가 식품과 음용수에 의한 것으로 알려져 있다. 소화기로 섭취된 수용성 비소는 60~90% 흡수되며, 피부를 통한 흡수는 경미하다고 보고되고 있다. 비소의 급성독성영향으로 피부, 점막 및 결막에 대한 국소 자극작용이 있으며 심



하면 피사도 유발한다. 만성적으로 장기간 노출되었을 경우 피부, 폐, 간, 신장, 방광 조직 등의 암을 유발하는 것으로 알려져 있다.<sup>26)</sup>

본 연구는 지하수의 수질을 측정하고 이를 바탕으로 잘 고려되지 않았던 지하수를 식수로 이용하는 특이적인 시나리오에 대한 위해성평가 결과를 제시한 연구로 의의가 있으나, 특이적 시나리오와 조사 특성에서 오는 몇 가지 한계점이 있다. 본 연구 결과는 정기검사 대상이 된 일부 지역만 조사한 결과로, hing성군 전체 결과로 보기에는 어려움이 있다. 노출경로는 주로 지하수를 식수로 사용하므로 음용 섭취에 의한 노출만 고려하였으나 지하수를 생활용수로도 사용하는 경우 위해성평가 대상이 되었던 F, NO<sub>3</sub>-N, 비소 등이 샤워 등의 활동을 통한 피부 접촉이나 호흡 경로로 노출될 개연성이 있다. 노출 및 위해성 평가대상도 상수도 미보급 지역의 주요 거주 연령대를 고려한 65세 이상 성인으로만 특정하여 다른 연령대에 대한 조사는 이뤄지지 않았다. 노출인자에 대한 불확실성은 원자료가 자체적으로 생산한 결과이므로 자료 의존성이 높으며, 자료값 또한 원자료의 측정 오차에 의해 위해성평가의 불확실성이 존재한다. 미생물의 경우 기준 초과 원인으로 주변 오염물질 유입, 야생동물의 분변 영향, 관정 내 온·습도, 강우량, 물리적 장벽의 부실 등 외부오염원 유입이 주요 원인이며, 특히 하절기에는 장마철 초기강우 유입 등에 의해 미생물 오염도가 높게 나타날 수 있을 것으로 판단된다. 마지막으로 본 연구 결과는 2017년 3월~2018년 8월까지 조사 결과를 활용하였으나 계절 및 강수량, 시설 등 외부환경의 영향을 고려하지 않아 미생물 기준의 부적합에 대한 정확한 원인을 제시하기가 어려웠다.

## V. 결 론

본 연구에서 상수도 미보급 지역의 지하수는 먹는 물 수질 기준을 초과하여 부적합으로 판정된 지역의 비율이 30% 가까이 됨을 보여주었고, 그에 따라 지하수를 먹는 물로 이용하는 경우, F와 비소에 의한 비발암성, 발암성 위해성이 발생할 가능성이 있는 것으로 추정되었다. 따라서 보다 많은 지역의 지하수 수질검사가 필요할 것이며, 특히, F와 비소의 고농도로 검출된 지역에서 위해성이 높게 나왔으므로 해당 지역의 주민들이 어떤 인구학적 특징이 있고, 지하수를 어떻게 이용하고 있는지 등에 대해 관찰조사 같은 보다 자세한 현장 실태조사가 필요하다. 지하수를 이용하는 주민들의 인체 시료를 이용해 F와 비소의 실제적인 노출 수준을 파악하고, 건강 영향을 파악할 수 있는 지표도 함께 분석하여 노출 수준과 건강영향과의 상관성을 살펴볼 수 있는 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

## Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

## Supplementary Materials

Supplementary materials can be found via <https://doi.org/10.5668/JEHS.2021.47.4.356>.

## References

1. Ministry of Environment. Water Supply Annual Report in Korea, 2019. Daejeon: Ministry of Environment; 2021.
2. Ministry of Environment, K Water. Groundwater Annual Report, 2019. Daejeon: Ministry of Environment, K Water; 2020.
3. Hamm SY, Kim KS, Lee JH, Cheong JY, Sung IH, Jang S. Characteristics of groundwater quality in Sasang industrial area, Busan Metropolitan City. *Econ Environ Geol*. 2006; 39(6): 753-770.
4. Jeon H, Hamm S, Cheong J, Ryu S, Jang S, Lee J, et al. Risk assessment of groundwater and soil in Sasang Industrial Area in Busan Metropolitan City. *J Eng Geol*. 2009; 19(3): 295-306.
5. Lim T, Lee S, Cho H, Kim S. Comparison of human health risk assessment of heavy metal contamination from two abandoned metal mines using metal mine-specific exposure parameters. *J Environ Impact Assess*. 2016; 25(6): 414-431.
6. Jeon HT. A study on risk assessment of contaminated groundwater and soil in industrial, urban, and agricultural areas [dissertation]. [Busan]: Pusan National University; 2010
7. Ryu SM. Study on groundwater contamination of industrial complex and risk assessment in Busan Metropolitan City [dissertation]. [Busan]: Pusan National University; 2002
8. Jang YC, Lee SW, Shin YS, Kim HK, Lee JH. Human health risk assessment of benzene from industrial complexes of Chungcheong and Jeonla Province. *J Environ Impact Assess*. 2011; 20(4): 497-507.
9. Feng H, Zhou J, Chai B, Zhou A, Li J, Zhu H, et al. Groundwater environmental risk assessment of abandoned coal mine in each phase of the mine life cycle: a case study of Hongshan coal mine, North China. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2020; 27(33): 42001-42021.
10. Lee JS, Kwon HH, Shim YS, Kim TH. Risk assessment of heavy metals in the vicinity of the abandoned metal mine areas. *J Soil Groundw Environ*. 2007; 12(1): 97-102.
11. Ryu SM, Hamm SY, Jeong JY, Shin HM, Oh BI, Kim MC. Risk assessment of a fuel-contaminated Site. Paper presented at: Proceedings of the Korean Society of Soil and Groundwater Environment

- Conference; 2002 September 13-14; Busan, Korea. Seoul: Korean Society of Soil and Groundwater Environment, 2002. p. 370-373.
12. Kim JS. Sustainable Use and Management of Groundwater. Seoul: National Assembly Research Service; 2019. p.11-30.
  13. National Institute of Environmental Research. Korea Official Test Method of Drinking Water Quality(No. 2017-19). Incheon: National Institute of Environmental Research; 2017.
  14. Ministry of Environment. Investigation of Safe Groundwater Water Quality in Areas where Water Supply is not Provided. Sejong: Ministry of Environment; 2018.
  15. Park JW. Health risk assessment for small scale water works in Gyeongsangnam-do [dissertation]. [Jinju]: Gyeongsang National University; 2018
  16. Ryu DK. Water quality and human health risk assessment on springs in Seoul [dissertation]. [Seoul]: University of Seoul; 2005
  17. Jang J, Kim S, Kim S, Lee K, Cheong H, Kim E, et al. General factors of the Korean exposure factors handbook. *J Prev Med Public Health*. 2014; 47(1): 7-17.
  18. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). IRIS Assessments / Chemical Assessment Summary. Available: <https://www.epa.gov/iris> [accessed 11 May 2019].
  19. Ko EJ, Ko HS. The 2nd National Ecosystem Survey; The Geomorphological features Hongcheon-Hoengseong, Ministry of Environment; 1998. p. 1-6.
  20. Moon YR, Yoo EH. Comparative Study for the Ground Water Management Based on Geological Condition. Sejong: Korea Environment Institute; 2006.
  21. Zhang Y, Xu B, Guo Z, Han J, Li H, Jin L, et al. Human health risk assessment of groundwater arsenic contamination in Jinghui irrigation district, China. *J Environ Manage*. 2019; 237: 163-169.
  22. Ahn JS, Ko K, Lee J, Kim J. Characteristics of natural arsenic contamination in groundwater and its occurrences. *Econ Environ Geol*. 2005; 38(5): 547-561.
  23. Smedley PL, Kinniburgh DG. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Appl Geochem*. 2002; 17(5): 517-568.
  24. Chae SM. Water quality characteristics and risk assessment for groundwater in local areas [dissertation]. [Cheongju]: Chungbuk National University; 2021
  25. Ryu DK. Water quality and human health risk assessment on springs in Seoul [dissertation]. [Seoul]: University of Seoul; 2005
  26. Lee GH. Health risk assessment of heavy metals in residents around abandoned metal mines [dissertation]. [Asan]: Soonchunhyang University; 2013

#### 〈저자정보〉

강승혜(석사졸업, 선임연구원), 김기태(교수)