

국내 지하수(샘물)의 중금속 잔류 현황 및 안전성 관리 방안 연구

이이내 · 손보영 · 양미희 · 박상민 · 이원석 · 박주현[†]

국립환경과학원 상하수도연구과

Safety Management and Heavy Metal Residue Status in Groundwater (Spring Water), Korea

Lee-nae Lee, Bo-young Son, Mi-hee Yang, Sang-min Park, Won-seok Lee, and Ju-hyun Park[†]

Water Supply and Sewerage Research Division, National Institute of Environmental Research

Received July 24, 2018/Revised August 24, 2018/Accepted September 20, 2018

As part of a risk assessment, this study assessed all the intake holes used by spring water manufacturers. The main findings are summarized here. The detection rate of 10 elements, including boron, was approximately 60% or higher, and antimony was recorded at a rate of 45% or so. Arsenic, which is one of the contaminants assessed in the water quality standard for drinking water, exceeded the limit at four and three sites in the former and latter half of the year, respectively. The other contaminants were within regulatory limits. Antimony and molybdenum, which are on the water quality watch list, were also within the appropriate range. All other hazardous trace elements were recorded at a considerably lower level than the overseas standards. The non-carcinogenic toxicity risk value was obtained by dividing the lifetime average daily dose (LADD) by the reference dose (RfD) of intake toxicity exposure. The hazard quotient (HQ) was below 1/10th of the WHO limit for all elements. The risk evaluation results were below 1/10th of the WHO risk limit and therefore, raised no risk concerns, however, there is a need perform regular examinations on the elements with high detection frequency and assess their exposure amount. In the future, quality management or drinking water will require regular checks and the regulation of hygiene in the manufacturing process. Furthermore, it is necessary to monitor and manage new elements that originate in geological features.

Key words: Groundwater, Spring water, Hazard Quotient, Lifetime Average Daily Dose (LADD)

1. 서 론

인체는 수분, 단백질, 지방, 무기질 등으로 구성되어 있으며, 이 중에서 약 75%가 수분으로 이루어져 있다.¹⁾ 물은 인체 신진대사에 필수적이며, 세포와 체온조절, 조직보호 등에 중요한 역할을 하고 있음에도 많은 현대인들이 일일 권장 수준의 수분을 섭취하지 못하고 있다. 일일 권장되는 물의 양은 개인의 활동량에 따라 다르지만, 의학연구소(Institute of Medicine, IOM)에서는 남성은 하루 3 L, 여성은 하루 2.2 L로 권장했다.²⁾ 생활수준 향상과 편리함을 추구하려는 생활방식의 변화로 먹

는샘물의 사용량은 지난 5년간 매년 약 10%의 증가율을 보였으며 연간 약 350만 톤이 판매된다.³⁾ 2017년 12월 환경부 정책자료 현황 기준으로 국내 먹는샘물 제조업 등록업체는 60여개소가 있으며 전체 일일 취수 허용량은 약 4만 3천 톤이다⁴⁾. 제조업체별로 원수 취수를 위해 약 5~10개의 취수공을 설치하고 있으며, 우리나라 전체로 보면 약 195개의 취수공이 먹는샘물 제조를 위해 설치되어 있다. 먹는물관리법에서 먹는샘물 제조에 사용할 수 있는 정수공정으로 오존처리 이외에 물리적인 처리만을 허용하고 있어, 거의 모든 제조시설은 물리적 여과 소독이 주요 정수공정이다. 국내에서 먹는샘물

[†]To whom correspondence should be addressed.

개발을 위해서는 원수의 기준이 몇몇 항목 외에는 정수기준을 만족해야 한다. 이는 국제적으로도 유래를 찾아보기 힘들고, 매우 엄격한 관리기준으로 평가된다. 먹는물관리법에서 먹는샘물 제조에 물리적 처리만을 허용하고 있는 것도 이러한 엄격한 관리기준이 있기 때문에 가능하다고 할 수 있다. 현재 먹는샘물의 수질기준은 미생물을 포함하여 유기 및 무기화학물질 등 총 51개 항목에 대해 설정되어 있다. 먹는샘물의 수질은 다양한 지질에 영향을 받고 있으므로, 수질기준 항목 이외의 규제하고 있지 않는 미량유해 물질도 존재할 가능성이 높다. 따라서 이러한 미규제 미량유해물질에 대한 지속적인 조사를 통하여 인체 노출량을 파악하고, 인체 위해 가능성이 있는 물질에 대해서는 관리기준을 설정하여 엄격하게 관리할 필요가 있다.

금속은 지질형성에서 자연적으로 발생하는 무기물질이며 일부 금속은 일상생활에 필수적이고, 이 외에도 식수에는 만성 또는 급성 중독을 일으키는 금속이 포함되어 있다. 대부분 중금속 오염의 위험은 자연 발생 및 인위적 활동으로 인해 지표수 및 지하수에서 발생한다.^{5,6)} 독성 금속은 주로 산업, 광업 및 농업이나 대부분 환경으로 배출되는 폐기물로 인해 존재하고 특히 전기도금, 금속 제련 및 화학 산업, 제조공정에서 많이 배출된다. 독성수준은 금속의 유형, 생물학적 역할 및 그것에 노출된 생명체의 유형에 달려있다.⁷⁾ EPA는 비소, 바륨, 카드뮴, 크롬, 납, 구리, 수은, 셀레늄, 니켈, 칼륨, 탈륨, 안티몬 및 베릴륨을 포함한 금속에 대해 최대 오염물질 수준(MCL)을 설정했다.⁸⁾

수질오염물질은 중금속, 미생물, 비료 및 수많은 독성 유기화합물로 구성되어 있는데 이 중에서 중금속은 인체 건강에 필수적 요소는 아니지만 과량의 금속은 부작용을 일으킬 수 있으며,⁹⁾ 인체 중독에 가장 많이 관련되어 있는 음용수의 중금속은 철, 카드뮴, 구리, 아연, 크롬 등이다. 인체에 미치는 치명적인 영향은 정신 및 중추신경기능이 손상되거나 감소되고 혈액 성분의 불규칙성을 초래하여 신장이나 간과 같은 중요한 부분에 악영향을 미친다.¹⁰⁾ 이런 금속의 장기간 노출은 알츠하이머 병, 파킨슨 병 등을 일으키는 신체적, 근육적, 신경학적 퇴행성 과정을 초래하고, 납은 뼈의 칼슘을 대체할 수 있는 능력을 가지고 있다. 구리는 필수적인 미량원소지만 과도한 섭취 시 독성을 일으킬 수 있고, 카드뮴은 저농도에서도 독성을 지니며 생물체와 생태계에 생물 축적을 일으키며 10년에서 33년의 생물학적 반감기를 가지고 있다. 망간, 철, 니켈과 같은 중금속은 효소 활동에

필요하지만, 중금속이 노출되거나 대량 섭취되는 경우는 사람에게 큰 영향을 끼치고 인체는 섭취, 흡수 및 흡입 경로로 중금속에 노출된다.¹¹⁾ 섭취 경로는 음식과 식수를 섭취함으로 간접적으로 노출되고, 흡수 및 흡입 경로는 공기 중의 에어로졸이나 증기 금속이 폐 속으로 흡입되는 피부와 호흡 기관을 통한 중금속의 직접적인 접촉이다.^{12,13)} 중금속 노출 경로는 흡수, 흡입 및 마지막으로 섭취이며 따라서 식수의 섭취가 중금속 노출의 주원인이 된다. 이에 따라 물속의 중금속 오염의 위험한 성질을 고려하여 문제를 평가하고 식수의 중금속 오염 위험을 줄이기 위한 방법 등의 제안이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 전국적으로 널리 분포되어 있는 먹는샘물 제조업체의 모든 취수공을 대상으로 샘물의 금속류 함량을 분석하고, 이를 토대로 인체 노출량 및 인체 위해 평가를 실시하여 수질기준 설정 등 위해 관리 필요성 여부를 고찰하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사대상

본 연구는 국내 전국적으로 분포되어 있는 먹는샘물

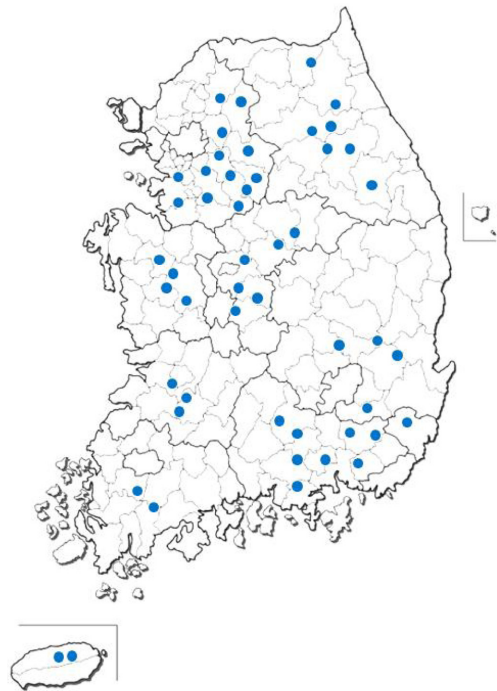


Fig. 1. Location map of sampling sites for natural mineral water in Korea.

Table 1. Number of investigated sites in research area

Item		G.G	K.S	C.C	J.L	G.W	J.J	Total
Number of suppliers	First half	13	13	10	5	7	2	50
	Second half	13	11	9	6	5	2	46
Number of intake hole	First half	56	44	29	20	12	7	168
	Second half	56	32	26	19	12	7	152

제조업체 중 휴업 등의 사유로 취수가 불가능한 업체를 제외한 모든 취수공의 먹는샘물 원수로 하였다. 시료 채취는 2016년에 5월, 10월에 걸쳐 상·하반기로 나누어 2회 조사하였고, 조사지점의 분포는 Fig. 1에 나타냈고 상반기에 50개 제조업체에서 168개 취수공, 하반기에 46개 제조업체에서 152개 취수공에서 채취하였다(Table 1).

2.2. 분석항목 및 방법

분석항목은 먹는물 수질기준에 포함된 B, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As와 미규제 항목인 Mo, Ge, V, Ni, Se, Sb, Ba, Co, Be, Ti, Ag, Sn 등의 항목을 선정하였다. 분석 방법은 먹는물수질공정시험기준¹⁴⁾과 US EPA Method 200.8¹⁵⁾에 따라 0.45 µm 멤브레인 필터로 여과하고 50 mL polyethylene bottle에 담아 0.2% 질산을 첨가한 후 pH 2 이하로 조절하여 내부표준물질(Internal standard)을 20 µg/L로 하였다. 분석기기는 Jena사의 ICP-MS (Plasma Quant MS)를 사용하여 분석하였으며 분석조건은 Table 2에 정리하였다.

2.3. 위해성 평가 절차

위해성 평가는 화학물질이 인체와 생태계에 미치는 결과를 예측하기 위해 관련 노출 및 독성 정보를 체계적으로 검토 및 평가하는 과정으로 정의하며¹⁶⁾, National Research Council(NRC)에서는 개인이나 집단이 위험한 물질이나 상황에 노출되었을 때의 건강 영향을 정의하기 위해 사용하는 것이라고 표현했다¹⁷⁾. 위험성 확인(hazard identification), 용량-반응평가(dose-response

assessment), 노출평가(exposure assessment), 위해도 결정(risk characterization)의 4단계로 구분되며(Fig. 2), 일반적으로 생태학적 및 건강적 위험에 대한 확률이 추정되는 주요 구성 요소가 포함된다.¹⁸⁻²⁰⁾ 이에 따라 2.1에 따른 샘플 시료의 분석결과를 바탕으로 위해성 평가를 수행하였다.

2.3.1. 위험성 확인

위험성 확인(Hazard identification)은 어떤 화학물질에 노출되었을 때, 유해한 영향을 유발시키는데 대한 자료와 정보를 수집하고 유해성 여부 정도를 확인하는 단계이다. Integrated Risk Information System(IRIS)의 발암분류체계를 참고하여 각 물질들을 발암성과 비발암성으로 구분하여 비발암물질을 위주로 평가하였고, 분류되어 있지 않은 물질들은 비발암물질로 가정하였다.

2.3.2. 용량-반응평가

용량-반응평가(Dose-response assessment)는 노출 정도와 건강 영향이 발생할 확률이 어느 정도인가를 추정하여 노출된 용량과 독성 사이의 관계를 나타내는 단계이다.^{20,21)} 비발암물질의 경우는 인체노출량 산출을 위해서 EPA IRIS, IARC의 자료를 참고하여 NOAEL or LOAEL, UF, RfD 등의 자료를 수집하여 먹는물에 상응하는 농도(Drinking Water Equivalent Level, DWEL)를 산출하였다.

2.3.3. 노출평가

노출평가(Exposure assessment)는 다양한 노출 환경 매체(공기, 음용수, 식품, 토양 등)를 통한 유해물질이 인체노출 빈도(EF), 기간(AT) 및 분포 등을 통해 추정치를 결정하는 단계로 나타낸다.²⁰⁾ 노출 측정기준은 일반적으로 개인의 평생 발암성 물질의 일일섭취량에 대한 추정치인 평생 평균 일일노출량(Lifetime Average Daily Dose, LADD)을 산출하였다. 식에 사용될 조건들은 국립환경과학원 고시 제2014-48호 별표 5와 IRIS, IARC 자료 등에서 제시하고 있는 조건들을 적용하였다.

Table 2. ICP-MS instrument operating conditions for metals

Item	Conditions
Instrument	ICP-MS Plasma Quant MS
Plasma Flow	9.0 L/min
Auxiliary Flow	1.2 L/min
Nebulizer Flow	1.0 L/min
Sheath Gas	0.14 L/min
Sample Injection Rate	0.9 mL/min

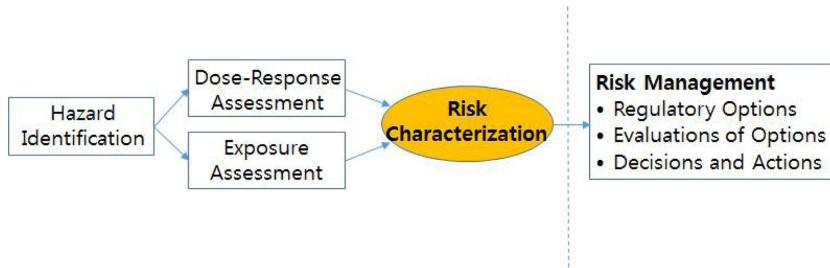


Fig. 2. Risk assessment process.

2.3.4. 위해도 결정

위해도 결정(Risk characterization)은 위험성확인, 용량-반응 평가와 노출평가 결과에서 도출된 정보를 조합하고 위해도 결정하는 과정으로 우선순위 결정을 위한 최종적 단계이다. 비발암물질은 허용기준참고치(Reference Dose, RfD) 또는 허용기준농도(Reference Concentration, RfC)에 대한 노출 추정치의 비율로 위험 값(HQ)을 산출하였다. 위험 값(HQ)은 ‘1’ 이하인 경우에는 독성이 발생할 가능성이 적으며 ‘1’을 초과하는 경우에는 오염원에 노출될 우려가 있고, ‘1’에서 크게 상회한다면 조치가 필요하다.²¹⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 샘플 시료의 무기물질 조사 결과

국내 샘플에서 2016년 상·하반기 무기물질 함량을 분석한 결과 Ge, Co, Se, Be, Ti, Ag, Sn, Sb을 제외한 물질에서는 대부분 50% 이상의 검출률을 보였다. 먹는 물 수질 기준에 포함된 B의 8개 항목은 Table 3과 같이 평균 농도는 상·하반기 모두 큰 차이 없이 비슷했고, 평균 농도 범위는 0.17~6.31 µg/L로 나타났으며, 아연이 471.33 µg/L로 가장 높게 나타난 지점이 있었지만 수질기준인 3 mg/L에 비하면 기준 적합으로 우려할 수준은 아닌 것으로 나타났다. 비소의 경우는 평균 1.54 µg/L로 0~17.27 µg/L의 범위를 보였는데, 상반기에서 4지점에서 비소 수질기준 0.01 mg/L를 초과하였고, 하반기에는 3지점에서 초과하였다. 비소는 지질에 영향을 받는 물질로서 화산 암석 및 황화물이 있는 지역에서는 농도가 높아질 수 있고,²²⁾ 국내 지질특성상 비소, 불소, 우라늄 등이 산재해있는 것과 영향이 있는 것으로 판단된다.

먹는샘물 수질감시항목인 안티몬과 2017년부터 시행

된 몰리브덴의 평균농도는 각각 0.21 µg/L(0~3.91 µg/L), 3.23 µg/L(0~29.76 µg/L)로 나타났다. 안티몬은 WHO, 일본, 한국(20 µg/L), 미국, 캐나다(6 µg/L), 호주(3 µg/L) 수질기준²³⁻²⁵⁾에 비교하면 상당히 하회한 수준으로 보여졌고, 몰리브덴도 일본감시항목 기준이 70 µg/L, 호주 50µg/L에 비교하면 기준에 미치지 못하는 것으로 나타났다.

규제하고 있지 않은 물질 중에서는 니켈, 바나듐, 바륨의 평균 농도는 각각 0.32 µg/L(0~9.97 µg/L), 0.96 µg/L(0~8.23), 11.4 µg/L(0~169.32 µg/L)로 나타났고 90% 이상으로 높은 검출률을 보였지만 국외 니켈 수질 기준인 일본, 호주, 유럽(20 µg/L)과 바륨 수질 기준인 WHO, 일본(700 µg/L) 등에 비교하면 상당히 낮은 수준인 것으로 알 수 있다. 그 외 물질은 대부분 극미량의 수준이었고(Table 3), Fig. 3에는 95분위의 값으로 농도 범위별로 항목을 구분하여 나타냈다.

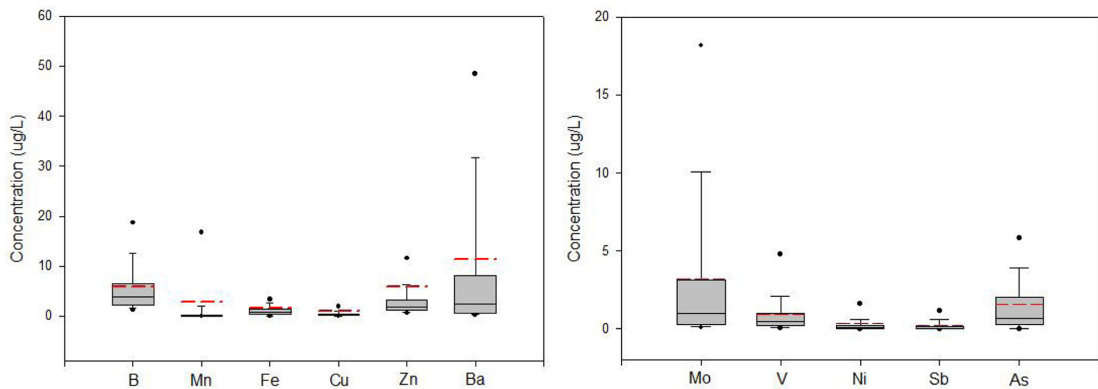
3.2. 위해성 평가

3.2.1. 위험성 확인

조사대상 중 무기물질에 대한 위험성 확인은 노출이 특정 유해한 건강 영향(암, 선천성 결함)의 발병을 증가시킬 수 있는 가능성의 여부를 결정하고, 과학적인 데이터 조사를 위한 EPA의 Integrated Risk Information System (IRIS), Drinking Water Standards and Health Advisories (DWSHA), International Agency for Research on Cancer (IARC) 등에서 독성자료를 참고하여 Table 4와 같이 분류하였다. 대개 연구 자료가 없을 시에는 동물 연구(쥐, 토끼, 원숭이 등) 자료가 인간의 잠재적인 위험에 대한 추론을 위해 사용되는데 동물 대상의 결과를 인간에게 외삽하는 것은 불확실성이 있다.²⁰⁾ 분석 항목 중 적절한 발암 근거가 없는 물질은 Table 4와 같이 망간, 구리, 아연, 셀레늄, 은, 바륨 등으로 분류

Table 3. Concentration and detection rate in source water (unit: $\mu\text{g/L}$)

	First half				Second half			
	Ave.	Range.	detection (%)	Med	Ave.	Range	detection (%)	Med
B	5.44	0~105.16	92.3	3.21	6.25	0~40.99	99.3	4.21
Cr	0.22	0~1.48	88.1	0.15	0.28	0~2.28	96.1	0.19
Mn	3.14	0~117.94	64.3	0.08	2.50	0~110.61	55.9	0.07
Fe	2.10	0~110.00	85.1	1.09	0.97	0.18~7.68	100	0.66
Cu	1.28	0~130.57	99.4	2.08	0.93	0~53.52	89.5	0.38
Zn	5.50	0~348.34	99.4	2.08	6.31	0~471.33	90.8	1.56
As	1.54	0~17.27	87.5	0.65	1.71	0~17.40	84.9	0.72
Mo	3.32	0~29.76	98.2	0.99	3.14	0~29.75	94.7	0.94
Ge	0.02	0~0.93	6	0.00	0.01	0~0.43	5.9	0
V	0.96	0~8.23	99.4	0.52	0.96	0~8.11	94.1	0.46
Ni	0.39	0~9.97	92.3	0.15	0.25	0~9.20	44.7	0
Se	0.17	0~2.23	26.2	0.00	0.21	0~2.50	32.2	0
Ba	12.16	0~164.56	96.4	2.51	10.64	0~169.32	97.4	2.43
Co	0.01	0~1.26	1.2	0.00	0.02	0~1.38	1.3	0
Be	0.01	0~0.25	2.4	0.00	0.01	0~0.28	2.6	0
Ti	0.02	0~2.29	1.2	0	0	0	0	0
Ag	0	0	0	0	0.01	0~0.59	1.3	0
Sn	0	0	0	0	0	0	0	0
Sb	0.21	0~3.91	44.6	0	0.21	0~2.74	46.7	0

**Fig. 3.** Statistical data for the samples range in source water.

되고, 붕소는 발암 가능성이 없다고 알려진 것으로 분류되었다. 니켈의 경우, 국제암연구소(IARC)에서는 니켈 화합물은 인체에 발암성이 있고, 금속성 니켈은 인체에 발암 가능성이 있다고 발표하였다. EPA는 니켈 제련소 먼지와 아황산니켈이 발암물질이라고 하였다.²⁶⁾ 그러나 니켈에 대한 경구 노출로 인한 발암성 위험의 증거가 부족하고 많은 역학 연구^{27,28)}가 이루어졌지만 환경으로부터 수용성 니켈 화합물의 높은 농도가 인간의 경구 노출은 극도로 가능성이 낮고, 자료가 많이 부족하다.^{26,29)}

인체발암물질로 추정되는 물질은 비소, 베릴륨, 바나듐, 코발트 등으로 분류되었다(Table 4).

3.2.2. 용량-반응평가

위해성 평가의 주요 기준 중 하나는 인과 관계의 유무를 결정하는 것으로 이러한 관계에 대한 타당성이 있다면, 용량-반응평가 자료는 필수적이며 위해성 결정의 주요 방법이다. 또한, 암 발병 위험을 평가하기 위해서 특정수준의 위험과 관련이 있고, 용량-반응 데이터가 사

Table 4. Classification of categorization of metals³⁰⁻³²⁾

Item	Carcinogenesis Grade			Potential Health Effects from Ingestion of Water
	IRIS	DWSHA	IARC	
Boron	E	I	-	Decreased fetal weight (developmental)
Chromium	-	D	-	None reported
Manganese	D	D	-	Impairment of neurobehavioral function
Iron	-	-	-	-
Copper	D	D	-	Gastrointestinal irritation
Zinc	D	I	-	Decreases in erythrocyte Cu, Zn-superoxide dismutase activity in healthy adult male and female volunteers
Arsenic	A	A	Group 1	Hyperpigmentation, keratosis and possible vascular complications
Molybdenum	-	D	-	Increased uric acid levels
Germanium	-	-	-	-
Vanadium	-	-	Group 2B	Decreased hair cystine
Nickel	A	-	Group 2B	-
Selenium	D	D	Group 3	Liver damage
Antimony	-	D	-	Longevity, blood glucose, cholesterol
Barium	D	N	-	Nephropathy
Cobalt	-	-	Group 2B	-
Beryllium	B1	-	Group 1	Bone, Lung damage, Small intestinal lesions
Titanium	-	-	Group 2B	-
Thallium	-	I	-	Kidney, liver, Brain, Intestinal
Silver	D	D	-	Argyria
Tin	-	-	-	-

용된다.³³⁾

흡입에 대한 기준 농도(RfC)와 경구 노출에 대한 기준 용량(RfD)은 만성 노출에 대한 비발암 물질 평가에 주로 사용되는 독성 추정 기준이다. 일반적으로 RfD는 유해 영향을 미치지 않을 가능성이 있는 인체에 불확도 요인(UF)을 적용하여 NOAEL, LOAEL, BMDL로부터 경구 노출에 대한 추정치로 정의하며 아래 식³⁴⁾을 이용하여 Table 5에 나타냈다.

$RfD(mg/kg/day)$

$$= \frac{NOAEL(or LOAEL or BMDL)(mg/kg/day)}{UF \times MF}$$

경구 노출에 대한 기준 용량(RfD)을 이용하여 먹는물 에 상응하는 농도(DWEL)를 아래 식³⁴⁾에 따라 산출하였고, DWEL에 사용되는 조건은 국립환경과학원 고시 2014-48호 별표 5에 적용하여 체중은 성인 평균 62.4 kg, 먹는물 일일섭취량은 1.5 L/day로 적용하였다. 비발암 물질에 대해 산출된 DWEL는 0.02~8.56 mg/L의

Table 5. Drinking water equivalent of non-carcinogens

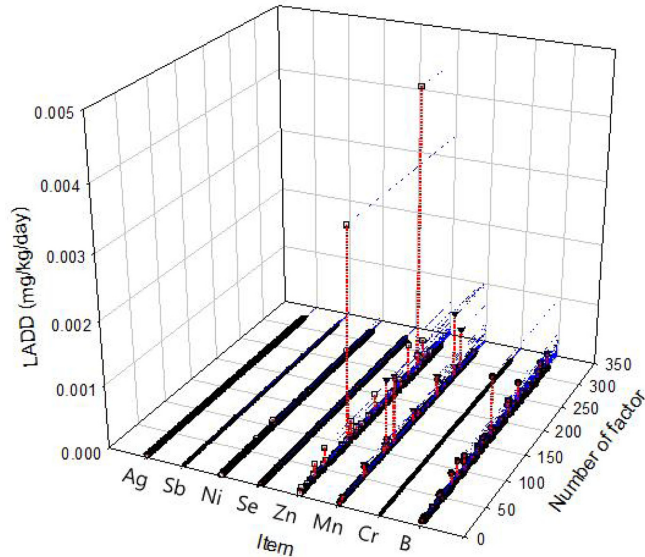
	RfD	NOAEL/LOAEL	UF	MF	DWEL
Boron	2×10^{-1}	10.3(BMDL)	66	-	8.56
Chromium	3×10^{-3}	2.5 / -	300	3	0.13
Manganese	0.14	0.14	1	1	5.99
Zinc	3×10^{-1}	- / 0.91	3		12.84
Nikel	0.02	5 / -	300	1	0.86
Selenium	0.005	0.015 / 0.023	3	1	0.21
Antimony	4×10^{-4}	/ 0.35	1000	1	0.02
Silver	5×10^{-3}	1.4×10^{-2}	3	1	0.21

*RfD: Reference Dose, NOAEL(mg/kg/day): No-Observed-Adverse-Effect Level, LOAEL(mg/kg/day): Lowest-Observed-Adverse-Effect Level, UF: Uncertainty factor, MF: Modyfing factor, DWEL(mg/L): Drinking Water Equivalent Level, Lifetime

Table 6. Requisite parameters for calculating the hazard quotient (HQ)

CR	EF	ED	BW	AT
1.5	350	30	64.2	25550

*CR(L/day): Contact rate, EF(day/year): Exposure frequency, ED(years): Exposure duration, BW(kg): Body Weight, AT(day): Period over which exposure is averaged

**Fig. 4.** Results of lifetime average daily dose (LADD) of metals in spring water.

범위로 나타났다.

$$DWEL(\text{mg/L}) = \frac{RfD(\text{mg/kg/day}) \times BW(\text{kg})}{CR(\text{L/day})}$$

3.2.3. 노출평가

노출평가는 평가 결과를 제시하고 위험 특성 분석을 정량화하는데 필수적인 요소로서 위험이 누적 수명 선량에 비례한다는 전제의 기반으로 노출평가에 사용된 평생 평균 일일노출량(LADD)으로 추정한다.³³⁾ 일일노출량 산정을 위한 노출 계수 중 접촉률(Contact Rate, CR)은 흡입, 경구 또는 피부 접촉을 통하여 매체와 신체가 접하는 정도로서 먹는물 일일 섭취량(1.5 L/day)을 가정하였다. 노출빈도(Exposure Frequency, EF)와 노출지속시간(Exposure Duration, ED)은 30년, 노출평균기간은 70년으로 적용하였다(Table 6).³⁴⁾ 중금속류에 대한 분석 결과는 일부 항목을 제외하고 대부분 검출되었으며, 일일노출량은 그 중에서 통계 값과 검출률 등을 고려하여 약 8종에 대해 아래 식에 따라 평균을 산출한 결과,

0.000004~0.000117 mg/kg/day의 범위를 보였고, 전체 범위는 0~0.0045257 mg/kg/day로 나타났다(Fig. 4).

$$LADD(\text{mg/kg/day}) = \text{Concentration}(\text{mg/L}) \times \frac{CR(\text{L/day}) \times EF(\text{d/year}) \times ED(\text{years})}{BW(\text{kg}) \times AT(\text{day})}$$

3.2.4. 위험도 결정

위해도 결정은 위해성 평가의 마지막 단계로 용량-반응평가와 노출평가로부터 얻은 정보를 통합하여 과학적 자문을 제공하는 과정으로서, 국제 연합 식량 농업기구(FAO), 세계보건기구(WHO), 식품첨가물전문가위원회(JECFA), 잔류농약회의(JMPR) 등 여러 세계적인 기관에서 위해 특성을 규명하고 건강 지침 값을 제안하여 사용되어왔다.³⁵⁾

인체 비발암성 물질은 매일 물을 섭취함으로써 발생 가능한 일평균 독성 위험값(Hazard Quotient, HQ)을 추정하여 1.0 이하인 경우에는 독성이 발생할 가능성이 적으며 HQ가 1.0을 초과할 경우에는 오염원에 노출될 우려가 있어 조치가 필요하다.²¹⁾ EPA IRIS에 경구 노출

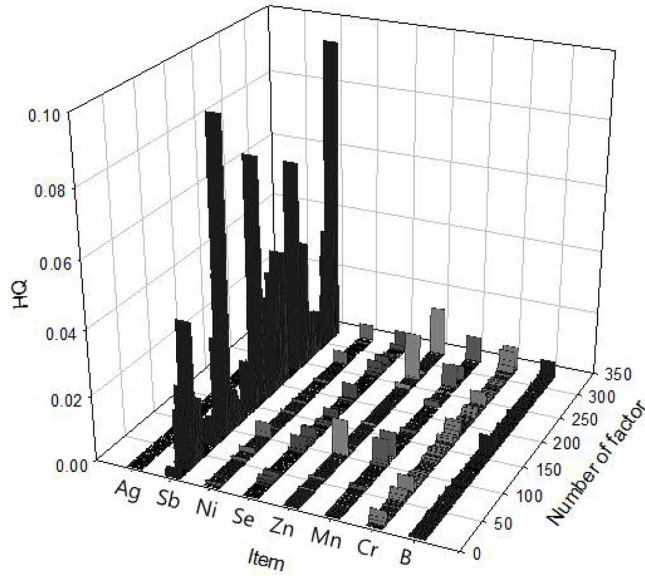


Fig. 5. Results of hazard quotient(HQ) of metals in spring water.

Table 7. Results of lifetime average daily dose (LADD) and hazard quotient (HQ) of metals in spring water

	Ave (µg/L)	95 th	LADD (mg/kg/day)	HQ
Boron	5.82	18.72	0.0000559	0.0002795
Chromium	0.25	0.85	0.0000024	0.0007982
Manganese	2.83	16.74	0.0000272	0.0001943
Zinc	5.88	11.68	0.0000565	0.0001883
Nikel	0.18	0.87	0.0000018	0.0003544
Selenium	0.32	1.61	0.0000031	0.0001556
Antimony	0.21	1.14	0.0000020	0.0050345
Silver	0.00	0.00	0.0000000	0.0000054

에 대한 기준 용량(RfD)이 평가되어 있는 8개 항목을 선정하여 전체 약 320건에 대한 독성 위험 값을 Fig. 5에 나타내었고, 평균 독성 위험 값은 Table 7에 나타냈다. 모든 물질에서 0.0000054~0.0050345의 범위로 WHO 허용위해수준인 1.0의 1/10을 초과하지 않았고, 이로 인해 위해 가능성은 미미한 것으로 보여졌다. Table 3과 같이 검출률이 높은 항목들은 지속적으로 관리가 필요할 것으로 판단된다.

$$HQ = \frac{LADD(mg/kg/day)}{RfD(mg/kg/day)}$$

3.3. 안전성 관리 개선 방향

샘물은 암반대수층 등 수질의 안정성을 유지할 수 있

는 자연 상태의 물만이 개발이 가능하고, 오존처리를 제외하고 물리적인 처리만으로 제조하여 제품수와 동등할 정도로 깨끗해야 한다. 그렇기 때문에 대부분의 제품이 천연 용천수라고 볼 수 있다.

샘물의 관리는 국내 지질 특성상 비소, 불소, 우라늄 등의 지층이 산재하고, 심도별로 농도 차이가 큰 경우가 있기 때문에 취수 심도에 미치지 못하는 지층의 지하수가 혼입되게 되면 원수 수질 기준을 초과할 우려가 있다.

샘물 수질기준 항목은, 유럽에 비해 강화된 기준으로 적용하고 있고, 제품수는 미국 FDA보다는 다소 적게, 유럽이나 일본 광천수의 기준보다는 많은 항목을 관리하고 있다. 국내 먹는샘물에 대한 수질 관리는 샘물(원수) 47개 항목과 먹는샘물(제품수) 51개 항목으로 규정하고 있으며, 사전 예방의 관리를 위한 수질감시항목으

로 포름알데히드, 안티몬, 몰리브덴 등 3개 물질을 지정하여 관리하고 있고, 이 외 바륨, 니켈 등은 지질기원 유해물질 중 검출수준은 높지 않지만 검출빈도가 높아서 지속적인 모니터링이 필요하다. EPA나 WHO의 경우는 위해성 평가 결과에 따라 먹는물 수질기준을 설정하고 있고, 우리나라에서도 위해성 평가로 인해 수질기준 항목 추가 설정과 수질기준 강화를 위하여 위해성 평가 시스템과 폭넓은 위해성 평가가 이루어지고 있다.

향후 규제하고 있지 않은 물질 중에서 지질에서 기원될 수 있는 신규 물질들을 지속적으로 모니터링하여 수질관리항목으로 관리해야 된다. 따라서 본 연구는 위해성 평가를 통해 기초적인 자료로 많은 도움이 될 수 있을 것이라고 판단되며 향후 수질기준의 강화와 수질 기준 추가 설정 시 참고가 될 수 있을 것으로 기대한다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 먹는샘물 제조업체의 모든 취수공을 대상으로 무기물질 함량조사 및 인체위해도 평가를 실시하였으며, 연구결과를 요약하면 아래와 같다.

1) 붕소 외 10개 물질에서 약 60% 이상의 검출률을 나타냈고, 안티몬은 약 45%의 검출률을 보였다. 먹는물 수질기준 항목 중 비소가 상반기에 4지점, 하반기 3지점에서 기준을 초과하였고 이 외 항목들은 기준에 적합하였다. 수질감시항목인 안티몬, 몰리브덴의 경우도 모두 적합하였고, 그 외 모든 미량유해물질 모두가 외국 기준과 비교해보면 상당히 낮은 수준이었다.

2) 평균 일일노출량(LADD)에서 섭취독성노출에 대한 기준용량(RfD)를 나누어 비발암성독성 위험값을 산출한 결과는 모든 물질에서 독성 위험값(HQ)의 값이 0.0000054~0.0050345의 범위로 WHO 허용위해수준의 1/10을 초과하지 않았다.

3) 위해성 평가결과, WHO 허용위해수준의 1/10을 초과하지 않았기 때문에 위해 우려는 없는 것으로 추정되지만, 검출빈도가 높은 물질들의 경우는 지속적인 모니터링과 조사를 통해 노출량을 평가할 필요가 있다. 또한, 지질에서 기원될 수 있는 신규 물질들도 꾸준히 모니터링이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다 (NIER-2016-01-01-107).

참고문헌

1. S. T. Han, W. T. Hwang, G. R. Kim, "The development and present state of water service facilities", *The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, **1998**, 27, 435-443.
2. Medical news today, <https://www.medicalnewstoday.com/articles/313389.php>, 2016.
3. Ministry of Environment. Environmental Statistics Yearbook, **2014**, 27, 125.
4. 환경부, 먹는샘물 제조업체 및 수입판매업체 현황(17. 12월 기준).
5. S. Khan, M. Shahnaz, N. Jehan, S. Rehman, M. T. Shah and I. Din, "Drinking water quality and human health risk in Charsadda district, Pakistan", *Journal of Cleaner Production*, **2013**, 60, 93-101.
6. J. He and L. Charlet, "A review of arsenic presence in China drinking water", *Journal of Hydrology*, **2013**, 492, 79-88.
7. T. R. He, X. B. Feng, Y. N. Guo, and G. L. Qiu, "The impact of eutrophication on the biogeochemical cycling of mercury species in a reservoir: A case study from Hongfeng Reservoir, Guizhou, China, *Environ Pollution*, **2008**, 154, 56-67.
8. United States Environmental Protection Agency (USA. EPA.). "<http://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations/#one>",
9. J. O. Nriagu and M. J. Kim, "Trace metals in drinking water: sources and effects", *Security of Public Water Supplies*, **2000**, 115-131.
10. V. C. Mohod, and D. Jayashree, "Review of heavy metals in drinking water and their effect on human health," *International Journal of Innovative Research in Science*, **2013**, 7, 2292-2296.
11. C. E. Housecroft and A. G. Sharpe, "The trace metal of life" *Inorganic Chemistry*, Pearson, Madrid, **2005**, 830-833.
12. W. S. Beckett, G. F. Nordberg and T. W. Clarkson, "Routes of exposure, dose, and metabolism of metals", *Handbook on the toxicology of metals*, 3rded, **2007**, 39-64.
13. R. Cornelis and M. Nordberg, "General chemistry, analytical methods, and speciation", *Handbook on the toxicology of metals*, 3rded, **2007**, 11-38.
15. 환경부, 먹는물공정시험기준, **2015**.
16. United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA.). "Method 200.8, Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry." **1998**.

16. 국립환경과학원, “화학물질 위해성평가의 구체적 방법 등에 관한 규정” **2014**, 48호.
17. National Research council (NRC). “Risk assessment in the federal government: Managing the process”, **1983**.
18. World health organization (WHO). “Principles and Methods for the Risk Assessment of Chemicals in Food, Chapter 2-Risk assessment and its role in risk analysis”, **2009**.
19. United States Environmental Protection Agency (USA. EPA.). “<http://www.epa.gov/risk/conduction-human-health-risk-assessment>”,
20. United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA.). “Guideline for Carcinogen Risk Assessment, Risk Assessment Forum, Washington, DC.,” **2005**.
21. United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA). “Risk Characterization Handbook, EPA 100-B-00-002, Science Policy Council”, Environmental Protection Agency, Washington, DC 20460, United States Environmental Protection Agency, E-8”, **2000**.
22. World health organization (WHO). “Arsenic in drinking water”, Background document for development of WHO Guidelines for Drinking water Quality, **2011**, 1-2.
23. World health organization (WHO). “Guidelines for Drinking-water Quality”, Background document for development of WHO Guidelines for Drinking water Quality, **2011**.
24. Government of Canada. “Guidelines for Canadian Drinking Water Quality”, Health Canada, **2017**.
25. Australian Government. “Australian Drinking Water Guidelines”, National Health and Medical Research Council, **2018**.
26. Agency for Toxic substances and Disease Registry (ATSDR), “Toxicological profile for Nickel”, U.S. Department of health and human services, **2005**, 5-6.
27. Toxicology Excellence for Risk Assessment (TERA), “Toxicology Review of soluble Nickel salts”, **1999**.
28. Danish Environmental Protection Agency for the European Union. “Nickel sulphate risk assessment”, **2004**.
29. World health organization (WHO). “Nickel in drinking water”, Background document for development of WHO Guidelines for Drinking water Quality, **2005**.
30. United States Environmental Protection Agency (USA. EPA.). “<http://www.epa.gov/iris>”,
31. United States Environmental Protection Agency (USA. EPA.). “2018 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories Tables”, U.S. Environmental Protection Agency Washington, DC, **2018**, 3.
32. International Agency for Research on Cancer (IARC). “<http://www.iarc.fr>”,
33. World health organization (WHO). “Principles and Methods for the Risk Assessment of Chemicals in Food, Chapter 6-Dietary exposure assessment of chemicals in food”, **2009**.
34. W. W. Nazaroff, and Alvarez-Cohen, “Environmental Engineering Science 01 Edition, Wiley”, **1989**.
35. World health organization (WHO). “Principles and Methods for the Risk Assessment of Chemicals in Food, Chapter 7-Risk Characterization”, **2009**.