

춘천지역 일부 주민들의 먹는물 중 미량금속 및 무기 음이온에 대한 노출

김 희 갑*, 송 진 아, 송 병 열

강원대학교 환경과학과

Exposure of Selected Chuncheon Residents to Trace Metals and Inorganic Anions in Drinking Water

Hekap Kim *, Jina Song and Byeongyeol Song

Department of Environmental Science, Kangwon National University,
Chuncheon, Gangwon 200-701, Korea

ABSTRACT

This study was conducted to investigate the distribution of the concentrations of selected trace metals and inorganic anions in five types of drinking water samples (mineral spring water, well water, small community water, municipal tap water, and commercial mineral water) collected from Chuncheon, Gangwon-do in 2007. Forty four samples were analyzed for five metals and five anions using an atomic absorption spectrometer and an ion chromatograph, respectively. Arsenic (As) and nitrate (NO_3^-) concentrations in some groundwater samples did not meet the future (10 $\mu\text{g/L}$) and current (44 mg/L) Korean drinking water standards, respectively. On the other hand, any municipal tap water samples, the sources of which were lake surface water, satisfied the Korean standards. Human health risk assessment results showed that arsenic in all types of water, especially groundwater including commercial mineral water, may pose both noncarcinogenic and carcinogenic effects on the residents. It is concluded that groundwater is not safe drinking water any longer and that a national survey and follow-up measures need to be taken.

Key words : arsenic, contamination, drinking water, groundwater, nitrate

서 론

음용수로 섭취하는 물의 형태는 매우 다양하다. 도시의 거주자들은 상수 처리시설로부터 수도물(tap)을 공급받고 있지만, 대부분의 한국인들은 염소소독의 결과 생성되는 trihalomethanes (THMs)와 같은 소독부산물(Disinfection By-Products, DBPs)

로 인한 건강영향을 우려하여 수도물을 직접 섭취하는 경우는 매우 드물며, 그 대신에 수도물로 보리차나 옥수수차를 만들어 마시거나, 정수기로 수도물을 처리한 후에 마시는 경우가 많다(김희갑과 이수형, 1999a,b; Kim, 2008). 심지어 수도물을 음용수로 전혀 사용하지 않고, 다른 용도로만(설거지, 세탁, 욕실 등) 사용하는 사람들도 있다. 따라서 음용수는 별도로 얻어 섭취하는데, 여기에는 광천수 또는 샘물(mineral spring water)이라고도 하는 소위 약수나 지하 암반 대수층으로부터 퍼 올린 물을 물리적, 화학적으로 처리하여 병에 넣어 판매하는

*To whom correspondence should be addressed.
Tel: +82-33-250-8577, Fax: +82-33-251-3991
E-mail: kimh@kangwon.ac.kr

물인 먹는샘물(병입수, commercial bottled water)이 포함된다.

반면에 인구밀도가 낮고 경제적으로 낙후된 농촌 및 산간지역 주민들은 가정마다 우물(well)을 개발하여 지하수를 사용하거나, 마을 단위로 지하수 또는 지표수(계곡수)를 원수로 사용하는 소규모의 간이상수(small community water)를 사용한다. 그렇지만, 대부분의 간이상수 시설물은 관리가 소홀하여 원수의 정기적인 수질 검사는 물론이고 염소 등을 사용하는 소독조차 제대로 이루어지고 있지 않은 실정이다. 따라서 농촌 및 산간지역 주민들은 도시의 주민들에 비해 상대적으로 덜 관리되고 있는 물을 음용수로 사용하고 있다고 할 수 있다. 또한 농업에서 화학비료의 과도한 사용이나 소, 돼지 등의 가축 우리로부터 배출되는 분뇨 등으로 인해 인근의 지표수뿐만 아니라 지하수가 유아에게 청색증(methemoglobinemia)을 유발할 수 있는(Fewtrell, 2004) 질산염(NO_3^-)으로 오염된 사실이 지난 몇 년 동안 보고되기도 하였다(김형돈 등, 1998; 우남철 등, 1999; 김경호 등, 2002; 이병선과 우남철, 2002; 김연태와 우남철, 2003).

수돗물에 대한 불신과 마을상수의 소홀한 관리로 인한 불안감이 가중되고 있는 가운데 먹는샘물의 수요가 급증하여 2009년도 8월 현재 국내 먹는샘물의 업체 수는 69개에 달하고 있으며, 심지어 해외(미국, 캐나다, 독일, 이탈리아, 스페인, 영국, 오스트리아, 북한, 일본, 중국 등)에서도 수입되어 2009년 2월 현재 관련 업체의 수는 53개에 이르고 있다. 그런 가운데 언론의 보도를 통해 일부 먹는샘물에서 formaldehyde, bromate (BrO_3^-) 등이 검출되어 안전성에 문제가 제기되기도 하면서, 환경부는 2009년 9월에 먹는샘물의 기준치에 BrO_3^- 를 0.01 mg/L로 설정하여 포함시켰다. 한편 1998년부터 2002년까지 약 5년간에 걸쳐 57개의 먹는샘물에 대한 수질을 분석한 결과, 일부 먹는샘물에서 불소 및 As의 농도가 기준치를 초과하는 것으로 밝혀지기도 하였다(조병욱 등, 2002).

우리나라의 상수도 보급률은 1997년 84.5%에서 2007년 현재 92.1%에 이를 정도로 높은 편이다(환경부, 2008). 반면에 지방상수도 이외의 시설을 이용하고 있는 인구는 마을상수도가 1,572천 명(3.1%), 소규모 급수시설이 601천 명(1.2%), 전용상수도는 273천 명(0.5%)이고, 이밖에 우물을 이용

하는 인구는 1,527천 명(3.1%)인 것으로 보고되었다. 한편 2007년 기준으로 춘천의 상수도 보급률은 94.0%로 전국의 평균을 넘고 있다(춘천시 통계연보, 2008). 춘천에는 용산정수장과 소양정수장이 운영되고 있으며, 상류의 호수로부터 내려오는 표류수를 원수로 이용하고 있고, 연간 각각 8,915,135 및 23,379,961 m^3 의 물을 춘천지역에 공급하고 있다. 그리고 춘천의 외곽 지역에는 2007년 현재 140개의 간이상수 시설이 있고, 이를 통해 약 14,300여 명이 물을 공급받고 있으며(환경부, 2008), 산간 곳곳에 소위 약수터가 개발되어 있으나 관리가 부실할 뿐만 아니라, 정기적인 수질검사도 잘 이루어지지 않고 있는 실정이다.

이 연구에서는 춘천시민들이 섭취하는 물을 유형에 따라 다섯 가지로 구분하여 채취한 후, 미량유해금속과 무기 음이온에 대해 분석하고 비교하고, 일부 성분에 대해 위해성 평가를 실시하여, 춘천시민들이 사용하는 물의 안전성을 평가했다.

재료 및 방법

1. 시 약

분석 대상물질인 미량금속(Pb, As, Se, Cr 및 Cd)의 표준물질은 Wako사의 제품을, 그리고 음이온(F^- , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- 및 SO_4^{2-})의 표준물질은 Supelco사의 제품을 사용하였다. 질산 및 염산은 초고순도의 Wako사의 제품을 사용하였으며, KI, NaHCO_3 및 Na_2CO_3 는 Duksan으로부터 구입하여 사용하였다.

2. 시료의 채취

음용수를 다섯 가지의 형태, 즉 광천수(A), 우물물(B), 마을상수(C), 수돗물(D) 및 병입수(E)로 구분하여 춘천 지역에서 2007년 8월 23일부터 10월 29일에 걸쳐 채취하였다(Fig. 1, Table 1). A~D의 시료는 각각 8개의 지점으로부터 채취하였으며(Fig. 1), 현장에서 pH를 측정하였다. 시료는 0.45 μm 의 멤브레인 필터(Whatman)로 여과한 후에 200 mL의 폴리에틸렌 용기에 채취하였으며, 금속 분석용 시료에는 진한 질산을 가하여 pH 2 이하가 되도록 하였고, 음이온 분석용 시료는 아이스박스에 넣어 저온에 보관하여 실험실로 운반하였다. 마을상수

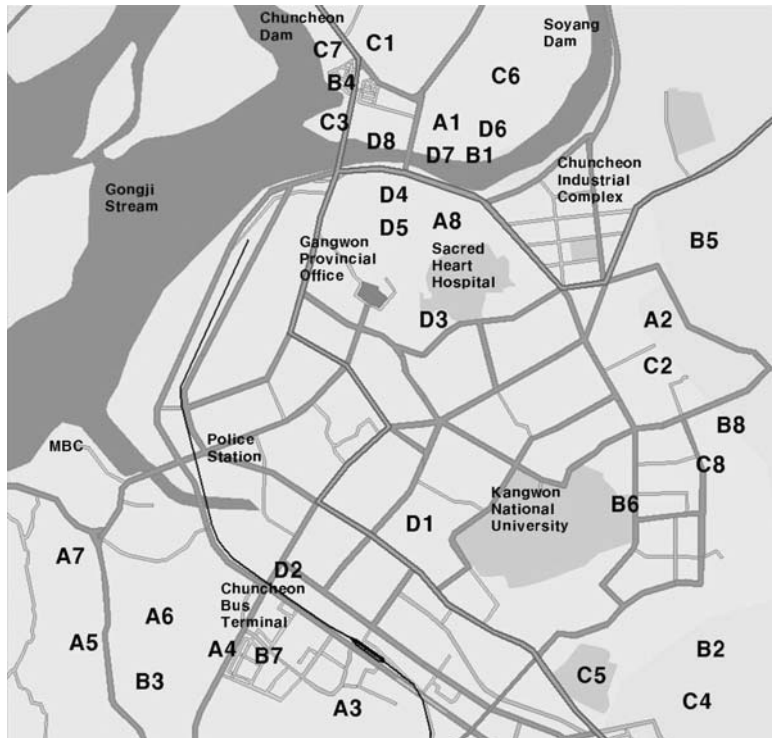


Fig. 1. Location of 32 sampling sites for collecting mineral spring water (A), well water (B), small community water (C), and municipal tap water (D) samples in Chuncheon.

Table 1. Sample information

Water type	Symbol	Number of samples	Source water
Mineral spring water	A	8	Underground
Well water	B	8	Underground
Small community water	C	8	Underground (7), surface (1)
Municipal tap water	D	8	Surface
Commercial mineral water	E	12	Underground

시료 중 7개소는 지하수를, 1개소(C8)는 지표수를 원수로 사용하고 있었다. 병입수(E) 시료는 춘천에 위치한 10군데의 상점으로부터 얻되, 중복되는 경우에는 한 군데에서만 구입하였으며, 실험실로 운반한 직후에 pH를 측정하였다. 시료는 분석 전까지 4°C에서 보관하였으며, 일주일 이내에 미량금속 및 음이온에 대해 분석하였다.

3. 시료의 분석

다섯 가지 미량금속인 Pb, As, Se, Cr 및 Cd에 대

한 분석은 원자흡광광도계 (AAS, Spectra 400, Varian, Inc.)로 실시하였다. Pb, Cr 및 Cd은 graphite furnace 방식으로, As 및 Se은 vapor generation 방식으로 분석하였다. 각 성분에 대한 검량선의 결정계수(r^2)는 0.997 이상으로 양호하였고, Pb, As, Se, Cr 및 Cd 분석에 대한 방법검출한계 (method detection limit, MDL)는 각각 0.27, 0.06, 0.15, 1.2 및 0.10 µg/L이었으며, 세 번 반복하여 분석한 결과에 대한 상대표준편차(relative standard deviation, RSD)는 2.4 ~ 4.5%의 범위에 있어 비교적 높은 재현성을 나타냈다.

무기 음이온인 F^- , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- 및 SO_4^{2-} 에 대한 이온 크로마토그래프(IC)로 실시하였다. 분석에 사용된 칼럼은 Allsep Anion (7 μm 공극, 내경 4.6 mm \times 길이 100 mm, Alltech)이었고, 이동상으로는 0.85 mM $NaHCO_3$ /0.90 mM Na_2CO_3 이었다. 이동상은 Shimadzu사의 LC-9A 펌프를 사용하여 1.2 mL/min의 유속으로 흘러주었고, 검출기로는 suppressed conductivity detector (Waters 431)를 사용하였다. 각 음이온에 대한 검량선의 r^2 는 0.998 이상 이었고, MDL은 0.0026, 0.0018, 0.014, 0.011 및 0.013 mg/L이었으며, 7회 반복하여 분석한 결과에 대한 재현성은 RSD로 2.7~4.2%의 범위였다.

4. 자료의 분석

MDL 이하의 자료는 MDL 값에 1/2을 곱한 후에 자료 분석에 사용하였다. 반면에 방법정량한계 (method quantitation limit, MQL)는 MDL에 3을 곱하여 추정하였으며, MDL과 MQL 사이의 값은 MDL + 1/2 (MQL-MDL)로 변환한 후에 자료 분석에 사용하였다. 통계 분석에는 SYSTAT 12 (Systat Software, Inc.)가 사용되었는데, 표본의 개수가 적은데다가 동질 및 정규분포는 아니지만, 다섯 가지 형태의 물 간의 금속 및 음이온 농도 차이의 여부는 one-way ANOVA로 검정하고, 통계적으로 유의한 경우에는 Post Hoc 검정을 통해 차이가 있는 짝을 찾았다. 통계적인 유의성 여부는 유의수준 (α) 0.1에서 결정하였다.

5. 위해성 평가

미량금속과 음이온 중에서 비교적 농도가 높아 현재 또는 장래의 기준치를 초과한 사례가 있는 As와 NO_3^- 에 대해 인체에 미칠 수 있는 건강위해도를 미국 National Research Council (NRC, 1983, 1994)에 의한 지침에 따라 실시하였다.

As에 만성적으로 경구 노출될 경우 색소침착과도 (hyperpigmentation) 및 각화증 (keratosis)이 유발되며, 때로는 혈관합병증 (vascular complication)이 일어날 수도 있다 (IRIS). 또한 As를 만성적으로 경구 섭취 시 인체에 피부암이 발생하는 것으로 알려져 있어, As는 human carcinogen (group A)으로 분류되고 있다 (IRIS).

IRIS에서는 As의 비발암성에 대한 NOAEL (no

observed adverse effect level)은 0.0008 mg/kg/day, UF (uncertainty factor) 및 MF (modifying factor)는 각각 3과 1로 설정하여, RfD (reference dose)는 수식 $NOAEL/(UF \times MF)$ 에 따라 3×10^{-4} mg/kg/day로 추정하고 있다. 또한 경구 섭취에 따른 피부암 발생의 위해도를 산정하기 위해 필요한 SF (slope factor) 값은 다단모델에 의해 1.5 (mg/kg/day) $^{-1}$ 로 제시하고 있다.

한편 0~3세 (특히 6개월 미만)의 유아들이 음용수 중 NO_3^- 를 섭취할 경우 blue-baby syndrome 또는 cyanosis라고도 하는 메트헤모글로빈혈증 (methemoglobinemia)을 유발할 수 있다 (Fewtrell, 2004). IRIS에서는 NO_3^- 에 대한 NOAEL은 1.6 mg/kg/day로, 그리고 UF와 MF는 각각 1로 평가하여 RfD는 1.6 mg/kg/day로 추정하고 있다. 그렇지만, NO_3^- 에 대한 발암성의 증거는 아직까지 없다.

물 중 As와 NO_3^- 에 대하여 호흡기와 피부를 통한 노출은 거의 무시할 만하기 때문에, 노출 평가에서는 물의 경구 섭취를 통한 노출만을 포함하였다. 비발암성에 대한 노출량은 ADD (average daily dose)로, 그리고 발암성에 대한 노출량은 LADD (lifetime average daily dose)로 산정하였으며, 이에 사용된 각각의 노출인자 (exposure factor)는 Table 4에 보여주고 있다. As에 대해서는 성인에 대한 발암성과 비발암성을, NO_3^- 에 대해서는 영유아에 대한 비발암성을 평가하였기 때문에, 노출기간은 각각 30 및 3년으로 하였다. 먹는물의 종류별로 농도의 중앙값 (50 백분율 값)과 90 백분율 값에 대한 노출량을 산정한 후에, As와 NO_3^- 에 대한 경구 노출 결과 발생할 수 있는 위해도를 산정하였다.

결과 및 고찰

1. pH 및 미량금속의 농도

A, B, C, D 및 E 시료에 대한 평균 pH는 각각 7.54, 7.48, 6.91, 6.49 및 7.44였으며, 먹는물 및 먹는샘물에 대한 수소이온농도 기준치인 5.8~8.6을 초과한 시료는 하나도 없었다.

Table 2에는 다섯 가지 형태의 먹는물 중 미량금속의 농도에 대한 기술통계값인 평균±표준편차, 중앙값 및 범위 (최대값~최소값)를 나타냈다. 현재 먹는물의 기준치 (Pb, 50 $\mu g/L$; As, 50 $\mu g/L$; Cd, 5

Table 2. Descriptive statistics (average \pm standard deviation, median, and range) for the concentrations ($\mu\text{g/L}$) of trace metals in five types of water samples

Water type	Statistic	Pb	As	Se	Cr	Cd
A	Avg \pm sd ^a	0.442 \pm 0.260	7.90 \pm 5.81	1.20 \pm 0.504	1.85 \pm 1.04	
	Median	0.455	6.12	1.26	2.60	0.200*
	Max ~ min	(0.135 ~ 0.980)	(0.030 ~ 18.3)	(0.590 ~ 1.88)	(0.600 ~ 2.60)	
B	Avg \pm sd	0.528 \pm 0.207	10.3 \pm 8.01	0.655 \pm 0.414	3.12 \pm 2.38	
	Median	0.455	9.23	0.740	2.60	0.200*
	Max ~ min	(0.455 ~ 1.01)	(0.030 ~ 21.6)	(0.075 ~ 1.27)	(0.600 ~ 8.76)	
C	Avg \pm sd	0.601 \pm 0.271	9.17 \pm 3.01	0.170 \pm 0.152	4.11 \pm 5.95	0.293 \pm 0.149
	Median	0.455	8.23	0.120	2.60	0.200
	Max ~ min	(0.455 ~ 1.06)	(5.73 ~ 13.4)	(0.075 ~ 0.533)	(0.60 ~ 18.7)	(0.200 ~ 0.576)
D	Avg \pm sd	1.99 \pm 4.23	3.40 \pm 1.33		1.60 \pm 1.07	0.600 \pm 0.877
	Median	0.455	2.90	0.075*	1.60	0.200
	Max ~ min	(0.135 ~ 12.4)	(2.11 ~ 5.86)		(0.600 ~ 2.60)	(0.200 ~ 2.72)
E	Avg \pm sd	0.430 \pm 0.344	8.81 \pm 4.05	0.888 \pm 0.481	1.90 \pm 1.23	0.209 \pm 0.030
	Median	0.455	8.26	0.745	2.60	0.200
	Max ~ min	(0.135 ~ 1.41)	(0.030 ~ 14.3)	(0.241 ~ 2.03)	(0.600 ~ 4.18)	(0.200 ~ 0.305)

*All measured concentrations were below their respective method detection limits.

^aAverage \pm standard deviation.

$\mu\text{g/L}$; Cr^{6+} , 50 $\mu\text{g/L}$; Se, 10 $\mu\text{g/L}$)와 비교해 볼 때 모든 금속들은 기준치 이하의 농도를 나타냈으며, 특히 Cd은 대부분의 시료인 36개 (81.8%)에서 MDL 이하의 농도를 나타냈다. 그렇지만, As의 기준치는 2011년 1월부터 10 $\mu\text{g/L}$ 로 강화될 예정인데, 광천수(A) 시료는 2개 (25.0%), 우물물(B)과 마을상수(C) 시료는 3개 (37.5%), 그리고 병입수(E) 시료는 4개 (33.3%)의 시료에서 이 기준을 초과하였다. 가장 높은 농도는 2개의 우물물(B) 시료에서 21.6 $\mu\text{g/L}$ 를 나타냈다. 반면에 수돗물(D) 시료에서는 이 기준을 초과하는 경우가 하나도 없었다.

시료를 채취한 지점들 주변에는 As의 인위적인 오염원이 전혀 없는 데도 불구하고, 일부 시료에서 2010년 기준인 10 $\mu\text{g/L}$ 를 초과하였다. 일반적으로 인위적인 요인에 의해 오염되지 않은 지하수에서 As의 농도는 <0.5 ~ 10 $\mu\text{g/L}$ 이지만, 때로는 10 ~ 5,300 $\mu\text{g/L}$ 의 고농도를 나타내기도 하였다(Smedley and Kinniburgh, 2002). 이 연구에서 얻은 지하수의 10 $\mu\text{g/L}$ 초과율 37.1% (13/35)는 자연적 As 오염이 가장 심각한 방글라데시에서의 초과율 50%보다는 다소 낮은 편이지만(van Geen *et al.*, 2003; Bibi *et al.*, 2008), 비교적 높은 편이라고 할 수 있다. 춘천 지역에는 별도의 인위적인 오염원이 존재하지 않

때문에, As가 함유된 광물로부터 기원한 자연적인 오염원에 의해 비교적 고농도가 발생한 것으로 판단되며, 추후에 이와 관련된 지질학적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 국내에서는 아직까지 지하수의 As 오염에 대한 체계적인 연구나 조사가 이루어지지 않았지만, 2002년도에 조사된 57개의 먹는샘물에서는 19.3%가(조병욱 등, 2002), 그리고 폐광산 지역이 포함된 전남지역 조사에서는 36.3%가(이해훈, 2002) 10 $\mu\text{g/L}$ 를 초과하는 것으로 나타났다.

One-way ANOVA 검정 결과, 금속 성분 중에서는 As ($p=0.068$)와 Se ($p=0.000$)가 10%의 유의수준에서 통계적으로 그룹(물의 형태) 간에 차이가 있는 것으로 나타났다(Fig. 2). 이 성분들에 대해 Fisher's Least-Significant-Difference (LSD) 방법으로 Post Hoc 검정을 실시한 결과, As에 대해서는 가장 농도가 낮은 수돗물(D)은 나머지 네 종류의 물(광천수, 우물물, 마을상수, 병입수)과 통계적인 차이가 있는 것으로 나타났으며, Se에 대해서는 가장 농도가 높은 광천수(A)가 나머지 네 형태의 물과, 우물물(B)은 마을상수(C) 및 수돗물(D)과, 그리고 두 번째로 농도가 높은 병입수(E)는 마을상수(C) 및 수돗물(D)과 유의한 차이가 있었다.

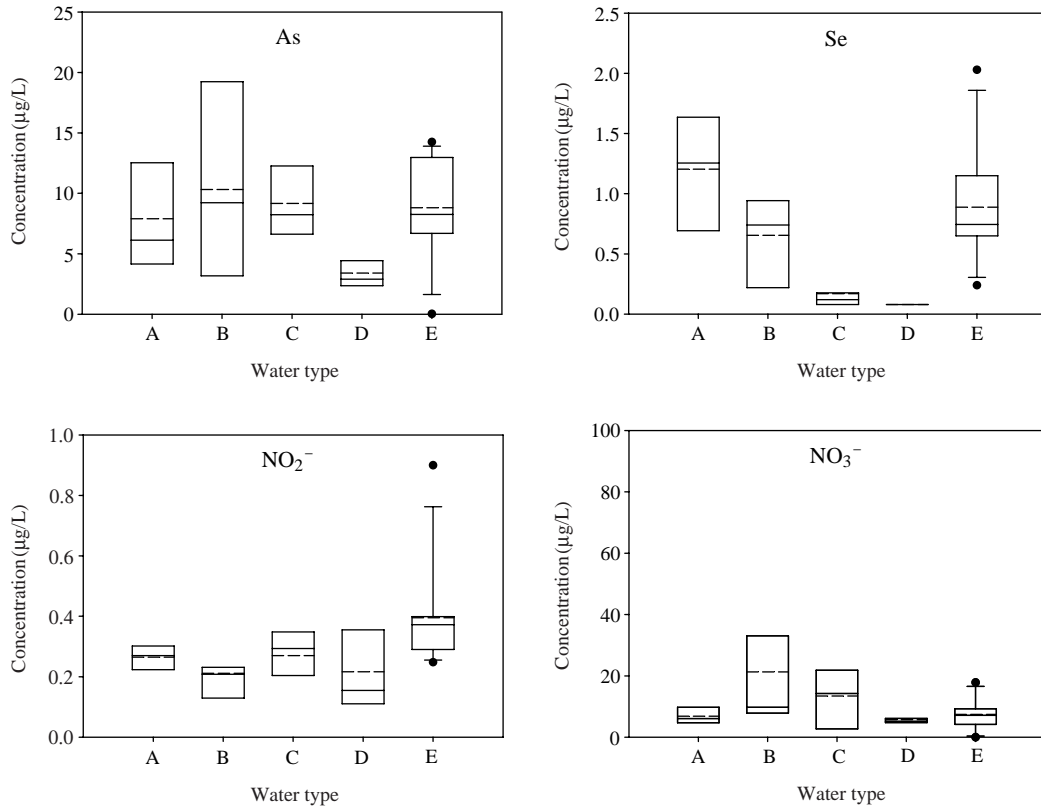


Fig. 2. Box plots compare the concentrations of As, Se, NO_2^- , and NO_3^- among the five types of water. The whiskers (the horizontal lines outside the box) display the values which are closest to $1.5 \times Q1$ or $1.5 \times Q3$ but still are inside this interval. All values outside this interval are mild outliers and are plotted with a dot.

2. 무기 음이온의 농도

다섯 가지 무기 음이온 중에서 NO_3^- (44 mg/L; $\text{NO}_3\text{-N}$, 10 mg/L)를 제외하고는 기준치 (F^- , 2.0 mg/L; Cl^- , 250 mg/L; SO_4^{2-} , 200 mg/L)를 초과한 성분은 없었다. 다만 NO_3^- 는 우물물(B) 중 1개의 시료에서 기준치를 초과하여 82.6 mg/L에 이르렀고, 기준치에 가까운 농도인 40.4 mg/L를 나타낸 시료도 있었다. 다섯 가지 형태의 먹는물 중에서 우물물(B)과 마을상수(C)에서 농도의 평균과 중앙값이 가장 높아, NO_3^- 의 주요 오염원이 농업 및 축산과 관련된 활동을 알 수 있었다. 반면에 나머지 세 가지 형태의 물은 거의 유사한 수준으로 약 6~7 mg/L의 농도를 나타냈다.

One-way ANOVA 검정 결과, 이온 성분 중에서

는 NO_2^- ($p=0.008$)와 NO_3^- ($p=0.098$)가 10%의 유의수준에서 통계적으로 그룹(물의 형태) 간에 차이가 있는 것으로 나타났다(Fig. 2). 이 성분들에 대해 Fisher's Least-Significant-Difference (LSD) 방법으로 Post Hoc 검정을 실시한 결과, NO_2^- 에 대해서는 가장 농도가 높은 병입수(E)가 나머지 네 종류의 물과 통계적인 차이가 있었으며, NO_3^- 에 대해서는 우물물(B)이 마을상수(C)를 제외한 나머지 물과 차이가 있는 것으로 나타났다.

이와 같은 NO_3^- 에 의한 지하수 오염은 경기도 용인(우남칠 등, 1999), 충북 괴산(김형돈 등, 1998), 금강권역(김경호 등, 2002), 경기도 안성(김연태와 우남칠, 2003) 및 강원도 춘천(김탁수 등, 2004)을 대상으로 연구한 결과에서도 나타나, 최근에 들어 우리나라의 지하수가 결코 화학물질로부터 안전하

Table 3. Descriptive statistics (average \pm standard deviation, median, and range) for the concentrations (mg/L) of anions in five types of water samples

Water type	Statistic	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
A	Avg \pm sd*	0.310 \pm 0.097	3.03 \pm 1.96	0.265 \pm 0.054	6.86 \pm 4.17	7.24 \pm 5.31
	Median	0.291	2.31	0.270	6.07	5.96
	Max ~ min	(0.182 ~ 0.440)	(1.19 ~ 7.33)	(0.177 ~ 0.353)	(0.930 ~ 14.7)	(3.66 ~ 20.0)
B	Avg \pm sd	0.289 \pm 0.132	10.4 \pm 8.41	0.211 \pm 0.094	21.3 \pm 27.4	6.21 \pm 4.47
	Median	0.269	7.49	0.208	9.78	6.72
	Max ~ min	(0.120 ~ 0.542)	(1.96 ~ 27.5)	(0.111 ~ 0.412)	(0.453 ~ 82.6)	(0.672 ~ 12.3)
C	Avg \pm sd	0.331 \pm 0.240	5.35 \pm 7.67	0.270 \pm 0.090	13.4 \pm 10.7	8.81 \pm 4.58
	Median	0.233	2.93	0.293	14.2	8.82
	Max ~ min	(0.157 ~ 0.869)	(0.617 ~ 23.5)	(0.111 ~ 0.366)	(0.557 ~ 28.4)	(2.86 ~ 14.8)
D	Avg \pm sd	0.260 \pm 0.255	6.50 \pm 1.80	0.217 \pm 0.127	5.72 \pm 1.77	4.89 \pm 1.05
	Median	0.163	6.97	0.155	5.17	4.87
	Max ~ min	(0.160 ~ 0.811)	(2.19 ~ 8.12)	(0.111 ~ 0.399)	(4.20 ~ 9.83)	(2.73 ~ 6.47)
E	Avg \pm sd	0.250 \pm 0.102	7.52 \pm 6.58	0.395 \pm 0.169	7.43 \pm 4.91	7.73 \pm 4.07
	Median	0.226	5.62	0.372	7.14	7.67
	Max ~ min	(0.144 ~ 0.488)	(1.61 ~ 24.9)	(0.248 ~ 0.900)	(0.005 ~ 17.8)	(2.01 ~ 14.5)

*Average \pm standard deviation.**Table 4.** Exposure factors used for estimating ADD and LADD values

Factor	Abbreviation	Unit	Value		Source
			NO ₃ ⁻	As	
Water ingestion rate	IR	L/day	1.83	1.83	Kim, 2008
Exposure duration	ED	yr	3	30	USEPA, 1997
Exposure frequency	EF	day/yr	365	365	USEPA, 1997
Body weight	BW	kg	11.5	63	KATS, 2004
Averaging time	AT	yr	3	30	USEPA, 1997
Lifetime	LT	yr	—	78.6	Jang <i>et al.</i> , 2007

다고 할 수 없음을 알 수 있었다. 이 연구에서 광천수(A), 우물물(B) 및 마을상수(C)를 통틀었을 때 질산성 질소의 기준치를 초과한 비율인 41.7% (10/24)는 이 연구 대상 지역 중 일부가 포함된 춘천시 외곽지역인 신동면의 12개 리에서 총 73개 시료에 대한 초과율 33.3% (김탁수 등, 2004)와 비교할 때 다소 높아, 춘천 외곽 지역의 지하수의 수질이 무기염으로 인해 악화되어 가는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 NO₃⁻의 오염은 농업활동, 축산활동 및 가정의 오폐수에 의해 발생하는 것으로 알려져 있어, 향후 이 지역에 거주하면서 오염된 지하수를 섭취하는 주민들의 건강을 보호하기 위한 대책의 마련이 필요함을 알 수 있다.

3. 위해성 평가 및 관리 방안

비발암 위해도는 수식 ADD/RfD에 의해 산정한 HQ (hazard quotient) 값이 1보다 클 경우에는 위해도가 있는 것으로 판단하였다. 반면에 발암 위해도는 수식 LADD \times SF에 의해 초과 평생 발암 위해도 (excess lifetime cancer risk, ELCR)를 산정하였으며, 1×10^{-5} 를 허용수준 (acceptable level)으로 설정하였다.

Table 5에는 As와 NO₃⁻의 비발암성에 대한 ADD와 HQ 값을 보여주고 있다. 두 성분 각각의 중앙값에 대한 HQ 값은 모두 1을 초과하지 않았고, 90 백분율 값에 대해서는 NO₃⁻가 모두 1 이하인 반면에, As는 수돗물(D)을 제외한 나머지 종류

Table 5. Estimated ADD and HQ values for NO_3^- and As

Chemical species	Water type	Concentration ($\mu\text{g/L}$)		ADD (mg/kg/day)		HQ	
		50th percentile	90th percentile	50th percentile	90th percentile	50th percentile	90th percentile
NO_3^-	A	6.07	11.9	0.18	0.35	0.11	0.22
	B	9.78	53.1	0.28	1.5	0.18	0.96
	C	14.2	23.9	0.41	0.69	0.26	0.43
	D	5.17	7.39	0.15	0.21	0.094	0.13
	E	7.14	13.2	0.21	0.38	0.13	0.24
As	A	6.12	14.7	1.8×10^{-4}	4.3×10^{-4}	0.59	1.4
	B	9.23	21.6	2.7×10^{-4}	6.3×10^{-4}	0.89	2.1
	C	8.23	12.7	2.4×10^{-4}	3.7×10^{-4}	0.80	1.2
	D	2.90	4.92	8.4×10^{-5}	1.4×10^{-4}	0.28	0.48
	E	8.26	13.1	2.4×10^{-4}	3.8×10^{-4}	0.80	1.3

Table 6. Estimated LADD and excess cancer risk values for As

Chemical species	Water type	Concentration ($\mu\text{g/L}$)		LADD (mg/kg/day)		Risk ($\times 10^{-5}$)	
		50th percentile	90th percentile	50th percentile	90th percentile	50th percentile	90th percentile
As	A	6.12	14.7	7.0×10^{-5}	1.7×10^{-4}	11	25
	B	9.23	21.6	1.1×10^{-4}	2.5×10^{-4}	16	37
	C	8.23	12.7	9.4×10^{-5}	1.5×10^{-4}	14	22
	D	2.90	4.92	3.3×10^{-5}	5.6×10^{-5}	5.0	8.4
	E	8.26	13.1	9.4×10^{-5}	1.5×10^{-4}	14	22

의 물에서 1을 약간 초과하여 1.2~2.1의 범위를 나타냈다.

Table 6에는 As에 대한 초과 발암 위험도를 나타냈는데, 중앙값과 90 백분율 값 모두에 대해 1×10^{-5} 를 초과하여, 중앙값은 인구 십만 명 당 5.0(수돗물)~16(우물물)의 분포를, 90 백분율 값은 인구 십만 명 당 8.4(수돗물)~37(우물물)의 분포를 보였다. 따라서 현재의 이용 가능한 자료를 바탕으로 실시한 As에 대한 위험성 평가 결과, 춘천지역 주민들이 먹는물로 사용하고 있는 모든 종류의 물이 허용 수준을 초과하고 있음을 알 수 있다.

우리나라도 미국이나 WHO와 같이 2011년부터 먹는물 중 As의 기준치를 $10 \mu\text{g/L}$ 로 강화할 예정이지만, 이 연구 결과뿐만 아니라 IRIS의 평가 결과(위해도 수준 1×10^{-5} 에 해당되는 농도가 $0.2 \mu\text{g/L}$ 에 비추어 볼 때, 향후에 단계적으로 더 강화할 필요가 있다고 생각한다.

이 연구에서 춘천 지역의 주민들이 섭취하는 음용수를 다섯 종류로 나누어 미량금속과 무기 음이

온에 대해 오염도를 조사한 후 각 형태별로 위험성 평가를 실시한 결과, 어떤 형태의 물도 화학적으로는 안전하다고 단언할 수 없다는 것을 알 수 있었다. 수돗물의 보급률은 점차 증가하고 있는 추세이지만, DBPs로 인한 건강 악영향을 지나치게 우려하여 가정마다 별도로 정수기를 사용하든지, 지하수와 같은 먹는샘물에 대한 의존 정도가 높아지고 있다. 이에 따라 위험성 전달(risk communication)의 과정을 통해 바른 정보의 제공과 인식의 전환이 필요함을 알 수 있다. 또한 마을상수의 원수로 사용하는 지하수의 수질도 점차 악화되고 있고 전문적인 관리가 이루어지고 있지 않고 있기 때문에, 향후 마을상수의 새로운 시스템을 구축할 필요가 있음을 알 수 있다. 현장을 직접 방문하여 소득 여부만을 관리하는 것이 아니라, 일부 항목(예, As, NO_3^- 등)에 대해서는 처리 과정을 포함한 온라인 상시 모니터링 시스템을 구축하여 관리하는 것이 하나의 실례가 될 수 있다. 또한 여러 가지 형태의 다양한 음용수에 대해 전국 규모의 오염 실태를 조

사하여, 우리나라에서 사용되고 있는 음용수의 안전성을 확보하기 위한 기반 자료가 필요하다고 생각한다.

결 론

춘천지역에서 수돗물을 포함하여 음용수로 사용되고 있는 광천수, 우물물, 마을상수 및 시중에 유통되고 있는 먹는샘물을 일부 채취하여 중금속 및 음이온에 대해 분석한 결과, 수돗물을 제외한 일부 시료에서 비소(As) 또는 질산염(NO_3^-)의 농도가 현재 또는 2011년의 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 위해성 평가 결과, 수돗물을 제외한 나머지 형태의 물에서 As의 비발암 및 발암 위험도가 우려할 만한 수준인 것으로 나타나, 비교적 안전하다고 생각해 온 지하수가 무기물질에 의해 오염되어 있어, 이에 대한 적절한 관리 조치가 필요함을 알 수 있었다. 특히 점차 시장의 규모가 확대되어 심지어 외국에서조차 수입되고 있는 먹는샘물에 대해서는 보다 엄격한 수질검사와 관리가 필요하다는 것을 알 수 있었다. 향후에 보다 합리적인 조치와 규제를 위해서는 전국 규모의 지하수 오염 실태 조사가 필요하며, 특히 소외된 계층인 농촌 및 산간지역 주민들에 대해 안전한 물을 공급하기 위한 방안이 수립되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

기술표준원(KATS). 한국인의 인체 치수 조사, 2004.
 김경호, 윤성택, 채기탁, 최병영, 김순오, 김강주, 김형수, 이철우. 금강 권역 충적층 지하수의 질산염 오염: 질산성 질소의 기원과 거동 고찰 및 안전한 용수 공급을 위한 제언, 대한지질공학회지 2002; 12(4): 471-484.
 김연태, 우남철. 축사가 밀집된 농촌지역 천부지하수의 질산염 오염특성, 한국지하수토양환경학회지 2003; 8(1): 57-67.
 김탁수, 이용미, 김문선, 김성연, 신혜철, 최경호, 정문호. 일부 농촌지역의 오염원 현황과 먹는물 수질에 관한 조사연구, 한국환경위생학회지 2004; 30(2): 98-103.
 김형돈, 우남철, 최미정. 충북 괴산군 덕평리 일대의 지하수 수질과 오염, 한국지하수환경학회지 1998; 5(3): 141-148.
 김희갑, 이수형. 보리차 제조시 수돗물 중 염소소독부산물

의 제거 여부 및 보리차·옥수수차·결명차 중 Mail-lard 반응 생성물 동정, 한국농화학회지 1999a; 42(3): 256-261.
 김희갑, 이수형. 조리시 가열에 따른 수돗물 중 염소소독 부산물의 농도 변화와 인체 섭취 노출, 한국환경독성학회지 1999b; 14(1-2): 35-43.
 우남철, 최미정, 정성욱, 이승구. 경기도 용인시 일대 천부 지하수의 수질특성 연구, 한국지하수환경학회지 1999; 6(2): 53-58.
 이병선, 우남철. 서울특별시 지하철 A 설계구간에서의 지하수 수질 및 오염특성, 대한지질공학회지 2002; 12(4): 379-394.
 이혜훈. 화순 남부지역 지표수 및 지하수의 비소 분포 특성, 전남대학교 박사학위논문, 2002.
 장재연, 조수남, 김소연, 김선자, 정해관. 한국노출계수핸드북, 환경부, 서울, 대한민국, 2007.
 조병욱, 이병대, 이인호, 추창오. 국내 먹는샘물의 특정 수질 항목에 대한 고찰, 대한지질공학회지 2002; 12(4): 395-404.
 춘천시 통계연보. <http://chstat.org>, 2008.
 환경부. 2007년 상수도통계, 2008.
 Bibi MH, Ahmed F and Ishiga H. Geochemical study of arsenic concentrations in groundwater of the Meghna River Delta, Bangladesh, J Geochem Explor 2008; 97: 43-58.
 Fewtrell L. Drinking-water nitrate, methemoglobinemia, and global burden of disease: a discussion, Environ Health Perspect 2004; 112: 1371-1374.
 IRIS (Integrated Risk Information System). <http://www.epa.gov/iris/>.
 Kim H. Seasonal variations in the household exposures of housewives to volatile tap water disinfection by-products, Sci Total Environ 2008; 403: 59-76.
 NRC (National Research Council). Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process, National Academy Press, Washington, DC, 1983.
 NRC (National Research Council). Science and Judgment in Risk Assessment, National Academy Press, Washington, DC, 1994.
 Smedley PL and Kinniburgh DG. A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters, Appl Geochem 2002; 17: 517-568.
 U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency). Exposure Factors Handbook. Washington, DC, 1997.
 van Geen A, Zheng Y, Versteeg R, Stute M, Horneman A, Dhar R, Steckler M, Gelman A, Small C, Ahsan H, Graziano JH, Hussain I and Ahmed KM. Spatial variability of arsenic in 6000 tube wells in a 25 km² area of Bangladesh, Water Resour Res 2003; 39(5): 1140-1151.