

음용수 중 유해 화학 물질에 대한 위해성 평가에 관한 연구 - II 비발암성 화학물질을 중심으로 -

정 용 · 신동천 · 김종만 · 박성은
양지연 · 이자경 · 황만식 · 박연신

연세대학교 환경공해 연구소

Study on Health Risk Assessment of Non-carcinogenic Chemicals in Drinking Water

Yong Chung, Dong-Chun Shin, Jong-Man Kim, Seong-Eun Park, Ji-Yeon Yang,
Ja-Koung Lee, Man-Sik Hwang and Yeon-Shin Park

The Institute for Environmental Research, Yonsei University(IERY)

ABSTRACT

The purpose of this research is to estimate a safe environmental level of human exposure to thresholding-acting toxicants in drinking water and recommend the acceptable levels and management plans for maintaining good quality of drinking water and protecting health hazard. This research has been funded as a national project for three years from 1992 to 1995.

This study(the second year, 1993-1994) was conducted to monitor 39 species of non-carcinogenic chemicals such as volatile organic compounds(VOCs), polynuclear aromatic hydrocarbons(PAHs), pesticides and heavy metals of drinking water at some area in six cities of Korea, and evaluate health risk due to these chemicals through four main steps (hazard identification, exposure assessment, dose-response assessment and risk characterization) of risk assessment in drinking water.

In hazard identification, 39 species of non-carcinogenic chemicals were identified by the US EPA classification system. In the step of exposure assessment, sampling of tap water from the public water supply system had been conducted from 1993 to 1994, and 39 chemicals were analyzed. Indose-response assessment for non-carcinogens, reference doses(RfD) and lifetime health advisories(HAs) of lifetime acceptable levels were calculated. In risk characterization of detected chemicals, the hazard quotients of noncarcinogens were less than one except those of manganese and iron in D city.

서 론

국민의 소득수준이 향상으로 소비가 증대됨에 따라, 필요한 화학물질의 종류나 사용량이 급격히 증가되어 우리나라의 경우는 약 3만여종이상이 등록되었고, 약 만여종이상이 유통되는 것으로 보고되고 있다.¹⁾ 미국의 경우는 약 7만여종이상이 상업적인 용도로 쓰여지고 있는 실정이다.²⁾ 이들 화학물질들은 여러경로를 통해 공기, 물, 토양과 같은 다양한 환경매체로 침투되고 있으며, 인체노출기회를 더욱 증가시켜 우리의 건강을 위협하고 있다.

지난 몇년간 우리나라 주요 하천 및 상수원에서 일부 독성화학물질에 대한 오염사례는 위와 같은 사실을 반영하고 있음을 짐작할 수 있다. 이러한 화학물질에 대한 사전 위해성 평가와 관리가 철저히 이루어지지 않는다면, 앞으로 더 심각하고도 광범위한 수계오염이 발생할 가능성을 높게 될 것이다.

이미 선진국의 경우는 산업이나 농업에 이용되는 화학물질의 노출에 따른 일반공중의 건강을 보호하기 위하여, 타당한 동물이나 사람의 독성자료를 이용하여 위해성평가를 실행한 후 이들 물질의 안전한 인체노출 수준을 결정하여 규제해왔다.³⁾

Environmental Protection Agency(EPA), Food and Drug Administration(FDA), Food and Agricultural Organization and World Health Organization(FAO/WHO) 등과 같은 미국의 정부기관이나 국제단체에서는 역치(threshold)를 전제로하는 독성물질에 대한 일일 허용 섭취량(Acceptable Daily Intake; ADI)을 이용하여 인체 허용수준을 결정하고 이를 근거로 규제기준을 정하였다.³⁾ 이 ADI는 주로 식품첨가물이나 농약류의 안전수준을 결정하는데 광범위하게 이용되어져 왔다.

미국 EPA에서는 ADI와 동일한 개념인 접촉매체가 음용수 섭취인 경우는 구강 참고치(oral reference dose; oral RfD)를, 공기의 흡입에 의한 경우는 흡입 참고치(inhalation reference dose; oral RfD)를 비발암 독성물질에 대한 동물에서 사람으로의 외삽(extrapolation)의 근거로 제한하였다. 또한 이참고치를 근거로 하여 음용수질기준(Maximum Contaminant Levels; MCLs)을 설정하고 있다.⁴⁾

위와같이 비발암 독성물질에 대한 일일허용섭취량(ADI) 또는 참고치(RfD)를 이용한 건강 위해성 평가를 통해 과학적이고 합리적인 수질 기준을 설정하고

있으나, 우리나라의 경우는 화학물질에 대한 위해성 관리방안이 부재된 상태이다. 대부분의 수질기준 설정의 경우, 화학물질에 대한 우선관리순위도 없이 사회적으로 문제시되는 물질을 중심으로하여, 미국 EPA, WHO 그리고 일본의 기준치나 권고치중 좀 더 높은 농도를 제공하는 규제기관의 수치를 인용하고 있는 실정이다.⁵⁾

따라서, 본 연구에서는 음용수내 비발암독성 물질을 중심으로 건강 위해성 평가를 실행하여 허용수준을 결정하고 노출에 따른 안전수준을 평가하여 수질관리 정책결정의 중요한 기본자료를 제공하고자 한다.

첫째, 음용수내 발생 가능한 오염물질중 비발암성 물질을 선정하여 인체 위험성을 확인하고

둘째, 선정된 대상물질의 환경내 오염 농도를 측정하여 인체 노출 평가를 실행하며

셋째, 용량-반응 평가에서 참고치를 계산하여 허용 노출수준을 산출하고, 현 오염수준에서의 안전수준을 평가하여,

넷째, 이들 결과를 토대로 우선적으로 감시되어야 할 비발암성 물질에 대한 미규제 수질오염 물질을 선정한다.

연구 방법

1 연구대상 물질 선정 및 위험성 확인

연구 대상 항목은 사용량, 유해성 및 각국의 기준설정 항목 등을 주요 근거로 하여 총 39종의 비발암성 물질을 선정하였다.⁶⁾ 세부 항목은 다음과 같다.

- 다환방향족 탄화수소류(6항목): acenaphthene, anthracene, pyrene, benzo(g,h,i)perylene, fluorene, phenanthrene
- 유기오염물질류(7항목): 1, 1-dichloroethylene, 1, 1, 1-trichloroethane, chlorobenzene, ethylbenzene, 1, 2-dichlorobenzene, toluene, m, p-xylene
- 중금속(10항목): Al, Ba, Cd, Cr⁶⁺, Cu, Mn, Zn, Ni, Hg, Se
- 염소계페놀류(2항목): 2-chlorophenol, 2, 4-dichlorophenol
- 농약류(14항목): captafol, chlorpyrifos, endrin, lindane, methoxychlor, diazinon, EPN, disulfoton, malathion, propa-

chlor, carbofuran, aldicarb, 2, 4-D, 2, 4, 5-T

이 연구에서는 비발암독성물질 39종이 인체에 유해한 영향을 끼치는지의 유무를 결정하기 위해서 IRIS(Integrated Risk Information System, 1993), IRPTC(International Register of Potentially Toxic Chemicals, 1994), TOMES plus (Toxicology Occupational Medicine and Environmental Series, 1992), TOXLINE (1993), Health Advisories(1990) 등 가용한 연구 논문 및 보고서 그리고 각종 데이터베이스를 통해 자료를 수집하였다.¹⁾

언어진 증거를 종합하여 미국 환경보호청(EPA)의 분류체계²⁾에 입각하여 비발암 독성 물질을 D(인체발암물질로 분류할 수 없는 물질)와 E(인체 비발암물질)로 분류하였다.

2. 노출 평가

1) 환경 노출 평가

전국 6개 도시(A~F)중 급수 인구가 가장 큰 8개의 정수장에서 공급되는 가정수를 대상으로 환경 오염도를 분석, 평가했다. 시료는 관말의 3지점을 선택하여 채취하였다. 시료의 채취 시기는 1994년 3월과 6월에 2회에 걸쳐 채취하였다. 시료의 대표성을 보완하기 위해서 1일 약 12시간 동안 각각의 시료에 대해 2회 내지 3회를 분취하여 총시료로 하였다. 이 연구에서 유기오염 물질류는 Purge and Trap/GC-MSD를 이용하여 측정하였고,³⁾ 다환방향족 탄화수소류는 GC/FID를 이용하여 측정하였다.⁴⁾

반면, 무기물질류는 한국화학연구소에서, 또한 농약류 및 염소계 폐놀류는 한국과학기술연구원의 도핑콘트롤센터(KIST DCC)에서 분석하였으며, 그 결과를 이용하였다.⁵⁾

2) 인체 노출 평가

음용수로 인한 직접적인 섭취 노출만을 고려한 인체 노출량을 산출하기 위해 비발암 독성 물질에 임의의 농도로 오염된 음용수를 70kg의 건강한 성인이 70년 평생 동안 하루 2L씩 마신다고 가정하였다.

음용수 섭취를 통한 위장관계 흡수율은 100%로 가정하였고, 노출기간 및 기대수명은 각각 70년으로 가정하였다.

섭취 인체 노출량(mg/kg/day)

$$= \frac{\text{현 오염도 수준(mg/L)} \times 2(\text{L/day}) \times \text{노출기간(70years)}}{70(\text{kg}) \times \text{기대수명(70 years)}}$$

3. 비발암 독성물질의 용량-반응 평가

일반적으로 비발암 독성 물질의 경우는 일정 용량 즉 역치(threshold)용량 이상으로 노출되어야 유해영향이 관찰된다. 다시 말하면 일정 용량 이하로 노출이 되었을 경우는 유해영향이 발생하지 않을 것으로 기대된다. 여기서 유해영향(adverse effect)의 종말점(endpoint)은 임의의 화학 물질에 노출됨으로 발생 가능한 그리고 정량 가능한 생리학 및 생화학적 모수의 변화(효소의 이상변화, 체중감소 등), 정신행동학적인 변화 또는 장기독성, 기형독성 및 발육독성 등을 통해 결정되어진다. 그림 1에서 보는 바와 같이 비발암 독성 물질에 대한 안전 수준을 결정하기 위해서 동물실험에서 특정 유해영향의 종말점에 대해 그 영향이 관찰되지 않는 수준(No Observed Adverse Effect Level)을 선택하였다.

그러나 이 자료가 없는 경우는 종종 영향이 관찰되는 최저수준(LOAEL: Lowest Observed Adverse Effect Level)을 대신 선택하였다.

이들 수준에 불확실성 상수(uncertainty factor)인 안전한계(safety margin)를 고려하여 동물에서 사람으로의 외삽(extrapolation)함으로써 인체의 안전 수준을 결정하였다. 이 연구에서는 위에서 언급한 가정들을 토대로 하여 음용수중 일일 허용 농도라 할 수 있는 평생건강 권고치(lifetime health advisories)를 산출하였다(그림 1). 이 연구에서는 평생건강 권고치를 안전 허용 수준(70kg의 건강한 성인이 수돗물을 일일 2L씩 평생 마시고 살 때, 유해영향이 발생하지 않을 것으로 기대되는 일일 평균 농도)으로 간주하였다. 결국, 수돗물에서 측정된 오염도와 평생건강 권고치와 비교하면 유해영향의 발생 가능성을 추정할 수 있다. 각 항목에 대한 자세한 산출방법은 다음과 같다.

1) 무관찰 유해영향 수준(No observed adverse effect level; NOAEL, mg/kg/day)

동물실험이나 역학연구에 있어 유해한 영향(생화학, 생리학, 해부병리학적 지표에 의거)을 나타내지 않는 수준으로 문헌을 통해 결정하였다.

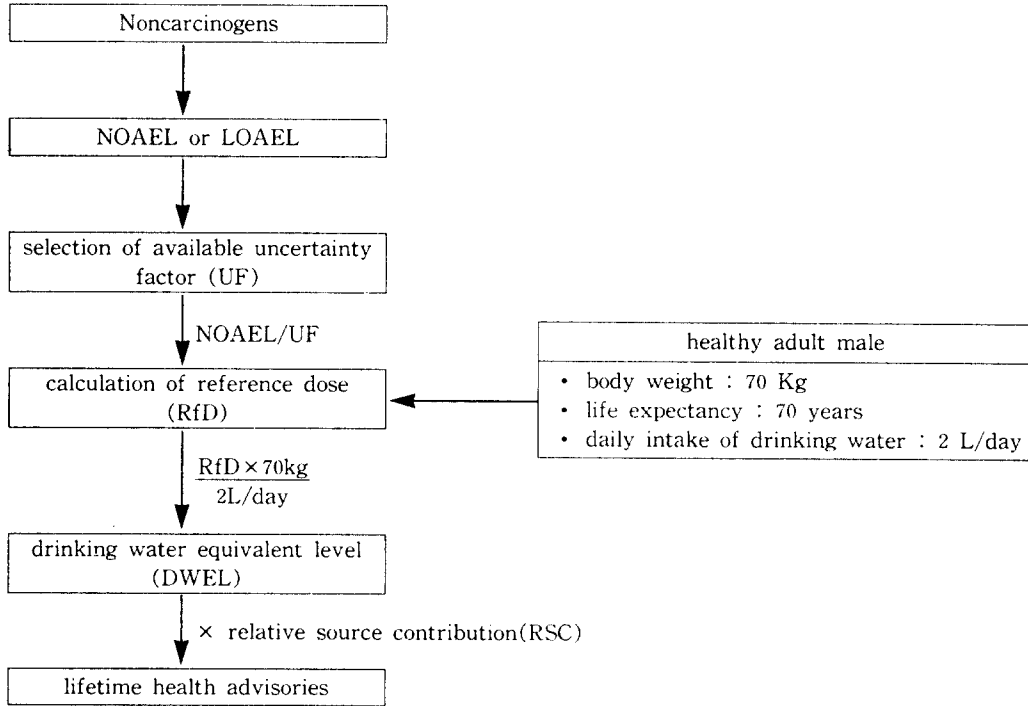


Fig. 1. Frame for dose-response assessment of noncarcinogens.

2) 불확실성 상수(Uncertainty factor; UF)

종내 및 종간 다양성(intraspecies and interspecies variability), 민감한 소집단(sensitive subpopulation), 동물실험의 질 및 기간 등을 고려하여, 상이한 인구집단에 있어 실제적으로 안전한 수준을 결정하기 위해 적용하는 상수로 아래와 같은 지표에 의거 선택하였다.⁷⁾

3) 참고치(Reference dose; RfD, mg/kg/day)

어떤 물질에 평생 노출 되었을 경우, 유해한 영향이 발생하지 않을 것으로 기대되는 일일 노출 허용량으로 다음과 같은 수식에 의해 산출하였다.

$$\text{참고치(mg/kg/day)} = \frac{\text{무관찰 유해 영향 수준(mg/kg/day)}}{\text{불확실성 상수}}$$

4) 음용수에 해당하는 농도(Drinking Water Equivalent Level; DWEL, mg/L)

참고치(mg/kg/day)를 음용수에 상응하는 농도 단위(mg/L)로 전환한 수준으로 다음과 같은 방법에 의거하여 산출하였다.

$$\text{DWEL(mg/L)} = \frac{\text{참고치(mg/kg/day)} \times \text{평균체중(70kg)}}{\text{일일 음용수 섭취량(2L/day)}}$$

고려해야할 내용	적용상수
• 사람에 있어 적절한 노출기간에 따르는 타당한 실험결과	10
• 사람에 대한 자료가 유용하지 않아 동물장기연구의 타당한 결과를 이용한 경우	100
• 사람에 대한 자료가 유용하지 않고 만성노출연구의 실험 결과를 이용한 경우	1000
• NOAEL 대신 LOAEL(Lowest observed adverse effect level)을 사용한 경우	× 10'
• 과학적인 판단에 의거 사용된 불확실성 상수,	× 2~5'

* 첨가상수는 불확실성 상수에 곱해진다(예를 들면 사람에 대한 자료가 유용하지 않고 만성노출 연구의 실험결과를 이용하고 NOAEL 대신 LOAEL을 이용한 경우, 불확실성 상수는 1,000 × 10 = 10,000이 된다).

5) 오염원 상대 기여도(Relative source contribution; RSC)

다양한 환경 매체(대기, 음용수, 식품, 토양) 중 어떤 물질의 총 오염도 중 각각의 매체가 기여하는 분율로서 음용수로 인한 기여도는 실측치가 없는 경우, 일반적으로 유기화학물은 20%, 무기화학물은 10%로 가정하였다.”

6) 평생건강 권고치(Lifetime health advisories; Lifetime HAS, mg/L)

DWEL중 음용수섭취로 인한 기여도를 고려한 농도로서, 다음과 같은 방법에 의해 계산하였다.

$$\text{평생건강 권고치(mg/L)} = \text{DWEL} \times \text{오염원 상대 기여도}$$

4. 위해도 결정

비발암성 물질의 노출에 따른 안전성 평가는 용량반응 평가를 통해 산출된 참고치 또는 평생 건강 권고치와의 비교를 통해 실행하였다. 즉 현 오염 수준을 평생 동안의 일일 허용량(참고치) 또는 허용 농도(평생 건강 권고치)와 비교함으로써 현 오염 수준이 “1”을 초과하는 경우에는 유해 영향(독성)이 발생할 가능성이

을 제시해 주며, “1”이하인 경우에는 안전역에 속해 있음을 제시해 준다.

$$\begin{aligned} \text{위험값} &= \frac{\text{현 오염도 수준에서의 인체 노출량(mg/kg/day)}}{\text{참고치(mg/kg/day)} \times \text{오염원 상대 기여도}} \\ &= \frac{\text{현 오염도 수준(ug/L)}}{\text{평생 건강 권고치(ug/L)}} \end{aligned}$$

결과 및 고찰

1. 위험성 확인

연구대상 물질 총 39종 중 인체발암물질로 분류할 수 없는 물질(D)과 인체 비발암 물질(E)은 각각 66.7%, 33.3%를 나타내었다(표 1).

다환방향족 탄화수소류, 유기오염물질류 및 중금속류는 대부분이 D그룹으로 분류되었으며, chlorophenol류는 모두 E그룹으로, 그리고 농약류는 D와 E그룹에 균등하게 분류되었다.

일반적으로 대기오염물질중 발암물질로 잘 알려진 크롬 6가, 카드뮴 및 니켈의 경우는 표 1에서 보는바

Table 1. Hazard classification of selected chemicals.

Classification*	PAHs (6)	VOCs & Solvents (7)	Chlorophenols (2)	Heavy metals (10)	Pesticides (14)
Noncarcinogenic toxicant (D)	Anthracene Benzo(g, h, i)perylene Fluorene Phenanthrene Pyrene	1, 1-dichloroethylene 1, 1, 1-trichloroethane Chlorobenzene Ethylbenzene 1, 2-dichlorobenzene Toluene m, p-Xylene		Aluminium Barium Cadmium Chromium VI Copper Nickel Manganese Mercury Selenium Zinc	Aldicarb 2, 4-D Endrine Methoxychlor 2, 4, 5-T
Noncarcinogenic toxicant (E)	Acenaphthene		2-chlorophenol 2, 4-dichlorophenol		Carbofuran Captafol Chlorpyrifos Diazinon Disulfoton EPN Lindane Malathion Propachlor

* EPA classification system

와 같이 음용수를 통한 섭취경로의 경우는 비발암성물질(D)로 분류되었다.

2 노출 평가

1) 환경 노출 평가

6개 도시(A~B)의 8개 정수장 중심으로 가정수에 서 유기오염물질, 다환방향족 탄화수소류, 무기물류, 농약류 및 염소계 폐놀류를 측정하였다.

농약류 및 염소계 폐놀류는 전지역에서 불검출되었으며, 유기오염물질류는 대부분 기준을 초과하지는 않지만 C, D와 F지역에서 1, 1-dichloroethylene의 경우는 미국 EPA의 기준을 초과한다(표 2). 무기물질의 경우는 전 조사지역에서 미국 EPA, WHO 또는 우리 나라 음용수질 기준을 초과하는 경우는 없었다(표 3). 또한 PAHs는 대부분 불검출되었으며, 검출된 경우에도 미국 EPA 음용수질 기준을 초과하

Table 2. Mean concentrations and standards or guidelines of drinking water for organic contaminants.

Organics	Standard/Guideline			Mean concentration (Min, Max), ug/L					
	EPA	WHO	KOREA	A	B	C	D	E	F
1,1-dichloroethylene	7.0	30.0	-	0.82 (ND, 11.36)	0.28 (ND, 0.71)	21.23 (0.50, 80.56)	0.69 (ND, 1.90)	22.60 (0.25, 69.82)	15.94 (ND, 61.01)
1,1,1-trichloroethane	200	2000(p)	100	1.05 (ND, 9.61)	ND	5.44 (1.01, 10.13)	0.40 (ND, 0.81)	5.94 (0.34, 17.84)	7.10 (ND, 21.12)
1,2-dichloroethane	5	30	-	2.33 (0.07, 4.76)	2.38 (0.21, 4.61)	2.42 (0.22, 4.79)	2.70 (0.07, 5.74)	2.74 (0.22, 5.54)	17.67 (0.28, 93.59)
toluene	1,000	700	700	0.58 (ND, 2.10)	ND	0.92 (ND, 3.23)	ND	1.03 (ND, 3.45)	0.98 (ND, 2.36)
chlorobenzene	100	100	-	0.09 (ND, 0.32)	0.04 (ND, 0.07)	0.06 (ND, 0.15)	0.04 (ND, 0.07)	0.07 (ND, 0.17)	0.07 (ND, 0.14)
ethylbenzene	700	300	3,000	0.03 (ND, 0.56)	0.36 (ND, 2.13)	ND	ND	ND	ND
m, p-xylene	10,000	500	500	ND	ND	9.50 (ND, 32.45)	ND	10.12 (ND, 33.46)	10.6 (ND, 24.23)
1,2-dichlorobenzene	600	1,000	-	ND	ND	0.35 (ND, 1.48)	ND	0.28 (ND, 1.34)	0.37 (ND, 0.85)

(P): proposed, ND: not detected, Min: Minimum value, Max: Maximum value

Table 3. Mean concentrations and standards or guidelines of drinking water for inorganic contaminants.

inorganics	Standard/Guideline (mg/L)			Mean concentration* (Min, Max) mg/L					
	EPA	WHO	KOREA	A	B	C	D	E	F
Al	0.52~0.2	-	0.2	0.012(0.006, 0.018)	0.010(0.002, 0.023)	0.009(0.005, 0.012)	0.008(0.003, 0.012)	0.006(ND, 0.008)	0.004(0.002, 0.005)
Ba	2	0.7	-	0.010(0.003, 0.039)	0.009(0.004, 0.017)	0.010(0.004, 0.022)	0.013(0.005, 0.021)	0.010(0.006, 0.014)	0.006(0.002, 0.010)
Cu	1.3	1.5	1.0	0.004(ND, 0.014)	0.005(0.003, 0.007)	0.004(0.001, 0.010)	0.011(ND, 0.021)	0.013(ND, 0.036)	0.018(0.007, 0.046)
Mn	0.05	0.5	0.3	0.013(ND, 0.043)	0.002(ND, 0.005)	0.003(ND, 0.006)	0.027(ND, 0.050)	0.007(ND, 0.016)	0.015(0.003, 0.031)
Ni	0.1	0.02	-	0.0001(ND, 0.001)	0.00016(ND, 0.001)	0.005(ND, 0.002)	0.00033(ND, 0.002)	ND	0.00067(ND, 0.002)
Zn	5	-	1	0.045(0.003, 0.180)	0.035(0.022, 0.052)	0.017(0.012, 0.020)	0.157(0.048, 0.058)	0.020(0.009, 0.034)	0.031(0.011, 0.048)
Cd	0.05	0.03	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cr ⁺	0.1	0.05	0.05	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Hg	0.002	0.001	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Se	0.05	0.01	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND: not detected, Min: Minimum value, Max: Maximum value

Source of raw data of contaminant concentrations: Studies on the hazard identification and toxicity evaluation of environmental pollutants(), Korea Chemical and Technology Institute, 1994

Table 4. Lifetime average daily exposure of chemicals of drinking water in several cities.

(Unit: mg/kg/day)

Chemicals	A	B	C	D	E	F
1, 1-dichloroethylene	2.34×10^{-5}	8.00×10^{-6}	6.07×10^{-4}	1.97×10^{-5}	6.46×10^{-4}	4.55×10^{-4}
1, 1, 1-trichloroethane	3.00×10^{-5}	NA	1.55×10^{-4}	1.14×10^{-5}	1.70×10^{-4}	2.03×10^{-4}
toluene	1.66×10^{-5}	NA	2.63×10^{-5}	NA	2.94×10^{-5}	2.80×10^{-5}
chlorobenzene	2.57×10^{-6}	1.14×10^{-6}	1.71×10^{-6}	1.14×10^{-6}	2.00×10^{-6}	2.00×10^{-6}
ethylbenzene	8.57×10^{-7}	1.03×10^{-5}	NA	NA	NA	NA
m, p-xylene	NA	NA	2.71×10^{-4}	NA	2.89×10^{-4}	3.03×10^{-4}
1, 2-dichlorobenzene	NA	NA	1.00×10^{-5}	NA	8.00×10^{-6}	1.06×10^{-5}
Aluminium (Al)	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0001
Barium (Ba)	0.0003	0.0003	0.0003	0.0004	0.0003	0.0002
Copper (Cu)	0.0001	0.0001	0.0001	0.0003	0.0004	0.0005
Manganese (Mn)	0.0004	0.0001	0.0001	0.0008	0.0002	0.0004
Nickel (Ni)	0.000003	0.0005	0.00001	0.00001	NA	0.00002
Zinc (Zn)	0.0013	0.001	0.00005	0.0045	0.0006	0.0009
Cadmium (Cd)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Chromium (VI) (Cr ⁶⁺)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Mercury (Hg)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Selenium (Se)	NA	NA	NA	NA	NA	NA

ND: not detected, NA: not available

지 않는 수준으로 나타났다.

2) 인체 노출 평가

각 지역에서 유기오염물질류의 인체 노출량은 A지역의 경우 3개의 정수장에서 송수하는 가정수 3지점 (동일시료, 2회 채취)을 채취하였으므로 36개의 시료에 대한 그리고, B~F지역의 경우는 12개의 가정수 시료에 대한 평균값을 이용하여 일일 평균 인체 노출량을 산정하였다(표 4).

각 지역에서 무기물질의 인체 노출량은 A지역의 경우 각 정수장(3개)에서 송수되는 가정수(3지점)에 대해 1, 2차(3월과 6월) 시료(총 18개)에 대한 평균값을 이용하였고, B~F지역의 경우 한 정수장을 대상으로 6개의 시료에 대한 평균값을 이용하여 일일 평균 인체노출량을 산정하였다(표 4).

비발암성 물질에 대한 일일 평균 인체노출량을 지역 별로 비교하면 경향이 뚜렷하지는 않았지만 D지역이 일부 무기물질에 대해 비교적 높은 인체 노출량을 나타내고 있었다.

3. 용량-반응 평가

NOAEL(유해 영향이 관찰되지 않는 수준)/LOAEL(최저 유해 영향이 관찰되는 수준)을 결정하기 위해서는 여러 가지 발생 가능한 독성효과중 장기

독성외에도 효소, 체중 또는 혈압의 변화와 같은 각각의 물질에 대한 NOAEL/LOAEL을 표 5에 제시하였다.

이를 이용하여 음용수중 비발암성 물질의 안전 수준을 결정하기 위해서 평생건강 권고치를 계산하였다(표 5). 여기서 평생건강 권고치는 일일 허용 가능한 평균 농도로써 이 수준으로 오염된 물을 평생 마시고 살 때 (1일 2L씩, 70년동안) 유해 영향이 발생되지 않은 것으로 기대되는 농도이다.

이 연구에서 산출된 평생건강 권고치는 미국 EPA 또는 WHO의 기준 범위내에 포함되었다. 즉 EPA 및 WHO에서 비발암성 물질의 기준을 설정하는 과정은 본 연구 절차와 동일하나, 약간의 차이를 보이는 것은 사용한 동물실험 자료나 유해 영향의 종말점을 결정하는 가정이 다소 상이하기 때문이다. 또한 toluene의 평생건강 권고치가 미국 EPA 및 WHO의 기준보다 큰 이유는 심미적인 영향(맛 또는 냄새에 대한 역치)을 고려하지 않고 인체 유해 영향에 대해서만 고려했기 때문이다.

참고치의 수준은 동일 물질이라도 실험종, 실험기간, 노출경로, 가장 민감한 독성 종말점(toxicological end-point)의 선택등에 따라, 많은 불확실성을 내포할 수 있으므로 여러 동물종, 여러 연구에서 도출된 결과를 최대한 활용하여 참고치를 결정하여야 한

Table 5. Health advisories of noncarcinogens.

Noncarcinogen	NOAEL or LOAEL* (mg/kg/day)	Uncertainty factor: UF	Reference dose: RfD (mg/kg/day)	DWEL (mg/L)	RSC HAs	Lifetime (mg/L)
2-Chlorophenol	5(N) 50(L)	1000 1000	0.005 0.086	0.175 3.01	20 20	0.035 0.062
1, 2-Dichlorobenzene	85.7(N)	1000	0.02	0.7	20	0.14
chlorobebzene	27.25(N)	1000	0.097	3.395	20	0.679
Ethylbenzene	54.5(L) 97.1(N)					
Monochlorobenzene	40(N)	1000	0.040	1.4	20	0.28
Toluene	1130mg/m ³ (N) ¹	100	0.346	12.11	20	2.422
1, 1-Dichloroethylene	9(L)	1000	0.009	0.315	20	0.063
1, 1, 1-Trichloroethane	1365mg/m ³ (N) ²	1000	0.035	1.225	20	0.245
Xylene	337mg/m ³ (N) ¹	1000	0.06162	2.1567	20	0.43134
Aldicarb	0.02(L)	100	0.0002	0.007	20	0.0014
Carbofuran	0.5(N)	100	0.005	0.175	20	0.035
Disulfoton	0.04(N)	1000	0.00004	0.0014	20	0.00028
Endrin	0.0045(N)	1000	0.0000045	0.0002	20	0.00004
EPN	0.01(N)	1000	0.00001	0.00035	20	0.00007
Methoxychlor	5.0(N)	100	0.05	1.75	20	0.35
2, 4, 5-T	3(N) 10(L)	300	0.01	0.35	20	0.07
2, 4-dichlorophenol	0.3	100	0.003	0.105	20	0.021
2, 4-D	1.0(N)	100	0.01	0.35	20	0.07
Captafol	2(L)	1000	0.002	0.07	20	0.014
Diazinon	0.009	100	0.00009	0.00315	20	0.00063
Lindane	0.33	1000	0.00033	0.01155	20	0.00231
Malathion	0.23	10	0.023	0.805	20	0.161
Propachlor	13.3	1000	0.0132	0.462	20	0.0924
Cadmium	0.005(L)	10	0.0005	0.0175	25	0.004375
ChromiumVI	2.41(N)	100(5)	0.00482	0.168	71	0.11928
Mercury	0.21	1000	0.000158	0.00553	20	0.001106
Barium	0.005	3	0.07	2.45	10	0.245
Manganese	0.015	1	0.005	0.175	10	0.0175
Selenium	5	3	0.005	0.175	10	0.0175
Zinc	1,000	3	0.33	11.55	10	1.155
Nickel	1.0(L)	300	0.0167	0.5845	10	0.05845
Anthracene	0.05mg/kg/inj	3000	0.3	10.5	20	2
Fluorene	125	3000	0.04	1.4	20	0.28
Acenaphthene	175	3000	0.06	2.1	20	0.42

$$\text{Health Advisories: HAs} = \frac{\text{NOAEL or LOAEL} \times \text{body weight}}{\text{uncertainty factor} \times \text{daily drinking water intake}}$$

$$\text{Reference Dose: RfD} = \frac{\text{NOAEL or LOAEL}}{\text{uncertainty factor}(\text{or} \times \text{additional factor})}$$

$$\text{DWEL(Drinking Water Equivalent Level)} = \frac{\text{RfD} \times 70\text{kg}}{2\text{L/day}}$$

$$\text{Lifetime Health Advisories} = \text{DWEL} \times \text{Relative Source Contribution(RSC)}$$

Total Absorbed Dose; TAD = NOAEL or LOAEL (inhalation animal data) × exposure time × daily breathing rate per day × 5/7 × absorption fraction / 70kg

¹⁾inhalation animal data NOAEL: 1130mg/m³ --> TAD: 346mg/kg/day

²⁾inhalation animal data LOAEL: 1365mg/m³ --> TAD: 35mg/kg/day

³⁾inhalation animal data NOAEL: 337mg/m³ --> TAD: 61.62mg/kg/day

* animal data for NOAEL/LOAEL were obtained by information source such as IRIS, TOXLINE, IRPTC, EPA health advisories, TOMES plus etc.

Table 6. Hazard quotients due to non-carcinogenic chemicals of drinking water in several cities.

Chemical	Hazard Quotients					
	A	B	C	D	E	F
1, 1-dichloroethylene	0.013	0.004	0.337	0.011	0.359	0.253
1, 1, 1-trichloroethane	0.004	NA	0.022	0.0016	0.024	0.03
toluen	0.0002	NA	0.0004	NA	0.0004	0.0004
chlorobenzene	0.0003	0.0001	0.0002	0.0001	0.0003	0.0003
ethybenzene	0.00004	0.0005	NA	NA	NA	NA
m, p-xylene	NA	NA	0.022	NA	0.023	0.025
1, 2-dichlorobenzene	NA	NA	0.00058	NA	0.0005	0.00061
Al	0.240	0.200	0.180	0.160	0.120	0.080
Ba	0.041	0.037	0.041	0.053	0.041	0.024
Cu	0.003	0.004	0.003	0.008	0.010	0.014
Mn	0.743	0.011	0.017	1.54	0.040	0.857
Vi	0.002	0.002	0.007	0.006	NA	0.011
AN	0.039	0.030	0.015	0.136	0.017	0.027

NA: not available

다. 또한 타당한 최신 연구결과가 도출되면, 이를 수 정보완하여야 한다.

이와같은 참고치를 이용한 접근의 단점은 동물실험에서 NOAEL를 결정하기란 쉽지않고, 시간과 비용이 소요되며, 동물실험에서 얻어진 용량반응 자료를 충분히 활용하지 못하는 단점을 지니고 있다. 따라서 최근에는 이들 용량반응 자료를 모두 이용할 수 있는 모델이 개발되고 있으며, 이 모델을 이용하여 참고치에 해당하는 benchmark dose를 산출하는 확률적 접근들이 시도되고 있다.⁸⁾

미국 EPA의 경우는 위와 같은 과정을 통해 산출된 평생건강권고치를 음용수 수질기준인 최대 허용 오염농도 (Maximum Contaminant Level; MCL)으로 정하고 있다. 또한 최대 허용 오염농도 목표치(Maximum Contaminant Level Goal; MCLG)는 MCL과 동일농도로 설정하고 있다. 그러나 여러가지 기술적인 접근(technical feasibility) 즉 분석적인 문제, 공학적인 처리기술 문제로 인해 이 수준을 못 미치는 경우도 있으나 이 수준에 도달하려는 노력을

기울이고 있다.

4. 유해 영향의 정량화

비발암성 물질에 대한 유해 영향의 정량화는 위험값(평균농도/평생건강 권고치)을 이용하였다. 위험값을 산정한 결과, 유기오염 물질류(유기용매 포함)는 전지역에서 모두 "1"미만의 값으로 허용 가능한 수준으로 간주할 수 있다(표 6).

중금속류의 위험값은 D지역에서 망간이 "1"에 근접한 것을 제외하고는 모두 "1"미만의 값으로 산출되어 현 오염도 수준은 허용 가능한 수준으로 간주할 수 있다(표 6). 반면 비발암성 농약류는 전 지역에서 발견출되었으므로 잠정적으로는 안전하다 볼 수 있으나, 계속적인 감시는 필요하다고 사료된다.

결론 및 제언

1994년 3월과 6월에 A~F지역의 8개 정수장의 원수, 정수 및 가정수를 대상으로 휘발성 유기오염물질

및 유기용매류, 다환방향족 탄화수소류를 분석한 결과와, 한국 화학연구소와 KIST DCC에서 분석한 중금속류와 농약류 및 염소계 폐놀류에 대한 오염도 자료를 이용하여 위해성을 평가를 수행한 결과는 다음과 같다.

1. 연구대상 물질 총 39종을 대상으로 인체 위험성을 확인하였으며, 미국 환경보호청(EPA)의 분류 체계로 보면, 인체발암물질로 분류할 수 없는 물질(D)과 인체 비발암 물질(E)은 각각 66.7%, 33.3%를 나타내었다.

2. 연구대상 물질 총 39종에 대해 오염도를 분석한 결과, 농약류와 염소계 폐놀류는 전지역에서 불검출되었다. 유기오염물질의 경우, 1, 1-dichloroethylene 이 D, E와 F지역의 가정수 평균 농도가 미국 환경보호청(US EPA)의 최대허용농도(MCL)를 초과한 것을 제외하고는 전지역에서 미국, 세계보건기구 및 우리나라의 음용수수질기준을 초과하는 물질은 없었다.

3. 음용수중 비발암성 물질의 섭취에 따른 독성위해도를 평가하기 위한 지수로서 참고치 또는 평생건강 권고치를 용량-반응 평가모델을 통해 산출하였다.

4. 비발암성 물질에 대한 유해 영향의 정량화는 위험값(평균농도/평생건강 권고치)을 이용하였다. 위험값을 산정한 결과, 유기오염 물질류(유기용매 포함)는 전지역에서 모두 "1"미만의 값으로 허용 가능한 수준으로 간주할 수 있다. 중금속류의 위험값은 D지역에서 Mn의 경우 "1"에 근접한 것을 제외하고는 모두 "1"미만의 값으로 산출되어 현 오염도 수준은 허용 가능한 수준으로 간주할 수 있다. 반면 비발암성 농약류는 전 지역에서 불검출되었으므로 잠정적으로는 안전하다 볼 수 있으나, 지속적인 감시는 필요하다고 사료

된다.

마지막으로 타당성과 신뢰성 있는 동물이나 인체 자료를 통해 비발암성물질의 허용수준을 결정하고, 이를 근거로하여 계획적이고 합리적인 수질정책을 결정하고 우리나라 실정에 적합한 수질기준을 설정해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 연세대학교 환경공해연구소, 수질오염물질의 위해성 평가 및 관리기술 개발(2차년도), 환경처(1994)
2. Si Duk Lee, Risk assessment and risk management of noncriteria pollutants, Toxicology and Industrial Health 6(5), 245-255(1990)
3. Michael L.D. and Jerry F.S., Regulatory history and experimental support of uncertainty (safe) factor, Regul. Toxicol. Pharmacol. 3, 224-238(1983)
4. Michael L.D. et al., On reference dose(RfD) and its underlying toxicity data base, Toxicology and Industrial Health 8(3), 171-189(1992)
5. US Environmental Protection Agency, Federal Register 51(1986)
6. 한국화학연구소, 환경오염물질의 위험성 확인 및 독성평가에 관한 연구(II), 환경처(1994)
7. US EPA, Risk assessment, management and communication of drinking water contamination, Office of Drinking Water, EPA/625/489/024, June(1990)
8. Crump K.S., A new method for determining allowable daily intake, Fundamental and Applied Toxicology 4, 854-871(1984)