

인체 위해성기반 수질환경기준 항목 확대를 위한 연구

안윤주* · 남선화 · 이재관¹

(건국대학교 환경과학과, ¹국립환경과학원 수질환경과)

Expanding the Substances of Water Quality Standard for the Protection of Human Health Based on Risk Assessment. An, Youn-Joo*, Sun-Hwa Nam and Jae-Kwan Lee¹ (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; ¹Water Quality Division, National Institute of Environmental Research, Korea)

Water quality standards (WQS) are mandatory to guarantee the human health and protection of aquatic ecosystems, and maintain the condition of suitable water quality. The present WQS for the protection of human health in Korea contain nine substances (As, Cd, Cr⁶⁺, CN, Pb, Hg, ABS, organophosphorus compounds and PCBs), but it is insufficient to preserve the human and aquatic ecosystem from a variety of chemicals. Therefore, it is necessary to expand the substance of WQS for the protection of human health. In this study, we chose the 20 chemicals from 43 chemicals of the project entitled 'Development of Integrated Methodology for Evaluation of Water Environment'. The methodology for calculating water quality criteria was amended from the US Environmental Protection Agency (US EPA)'s equation for deriving ambient water quality criteria for the protection of human health. The factors including fish intake, drinking water intake, and human body weight used in the equation reflected Korean situations. The monitoring values were derived from the water quality monitoring data in Korean four main rivers. The orders of priorities of chemicals were evaluated by human health risk assessment, and the proposed WQS was derived by technical and economic analyses. These results were reflected to expand the WQS for the protection of human health.

Key words : human health, risk assessment, water quality criteria, water quality standard

서 론

수질환경기준은 인체 및 수생태계의 건강성을 보장하고 적합한 수질 상태를 유지하기 위해 제도적으로 필수 불가결한 기준이다(국립환경연구원, 2000). 우리나라의 수질환경기준은 1963년 공해방지법, 1978년 환경보전법, 1991년 수질환경보전법을 거치면서 점차적으로 수질항목을 확대해왔다. 1963년에 제정된 공해방지법에는 하천

과 호소 지역에 대한 사람의 건강보호 기준이 포함되지 않았으며, 공장 또는 사업장 폐액, 공장 또는 사업장 폐수, 하수처리장 방류수에 대한 기준뿐이었다. 그러다 1978년 제정된 환경보전법부터 하천과 호소 지역에 대한 사람의 건강보호 기준이 추가되면서 9개 항목(예, 카드뮴, 시안, 유기인, 납, 6가 크롬, 비소, 총수은, 알킬수은, PCB)에 대한 관리가 시작되었다. 이후 1980년대 후반에 개정된 환경보전법에서는 총수은과 알킬수은을 합쳐 수은으로 통일하여, 하천과 호소 지역에 대한 사람의 건강

* Corresponding author: Tel: 02) 2049-6090, Fax: 02) 2201-6295, E-mail: anyjoo@konkuk.ac.kr

보호 기준 8개 항목(예, 카드뮴, 시안, 유기인, 납, 6가 크롬, 비소, 수은, PCB)으로 설정하였다. 1991년 수질환경보전법 이래로 음이온 계면활성제(ABS)가 추가되면서 최근까지 하천과 호소 지역에 대한 사람의 건강보호 기준은 9개 항목으로 관리되고 있었다(국립환경연구원, 2000). 우리나라의 수질환경기준은 하천과 호소 지역에 대한 사람의 건강보호 기준을 점차적으로 확대해가고 있는 추세이나, 현재 4만여 종의 화학물질이 사용되고 있는 실정에 비하면(환경부, 2006) 아직도 상당히 미진한 수준의 관리가 이루어지고 있다고 볼 수 있다. 선진국의 사람을 위한 기준 또는 권고기준을 살펴보면 미국은 인체건강을 위한 연방권고기준 96개 항목(US EPA, 2006b), 일본은 사람 보호를 위한 수질환경기준 23개 항목(일본환경성, 1993), 유럽연합은 음용수로서의 지표수 수질환경기준 19개 항목(EC, 1991) 등 우리나라에 비해 상대적으로 많은 수질 유해화학물질을 제도적으로 관리하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 화학물질의 수가 다양해짐에 따라 인체 및 수생태 건강을 보장받기 위해서는 사람의 건강 보호를 위한 수질환경기준의 항목은 반드시 지속적으로 확대되어야 한다.

본 연구에서는 사람의 건강 보호를 위한 수질환경기준 항목 확대를 위해 수질유해화학물질에 대한 인체 위해성 평가를 기반으로 우선순위 물질을 선정하고, 기술적·경제적 영향 분석을 통해 항목별 수질환경기준으로 활용 가능한 기준치(안)를 제시하였다. 한편 본 연구는 “물환경종합평가방법 개발 조사연구(III)”(환경부, 국립환경과학원, 2006)의 일환으로, 인체위해성 기반 사람의 건강 보호를 위한 수질환경기준을 개정하는 데 반영되었다.

연구 방법

1. 대상 화학물질 선정

인체위해성 기반 수질환경기준 항목의 확대를 위해 대상 화학물질은 수질평가 예비 항목(28개)과 먹는물 감시 항목(15개)을 포함한 총 43개 수질유해화학물질로 선정하였다. 이 물질들은 2006년 수행된 ‘물환경종합평가방법 개발 조사연구(III)’의 유해화학물질 검토대상 52개 물질에 포함되어 있다. 이 중 사람의 건강 보호를 위한 수질 준거치 산출을 위한 독성자료가 거의 전무한 iron, manganese, fluorine, copper, total organic carbon, ammonia nitrogen, nitrate, boron, diazinon, parathion, fenitrothion, carbaryl, 1,1,1-trichloroethane, xylene, 1,2-dibromo-3-chloropropane을 제외한 13개 수질평가 예비 항목과

Table 1. List of candidate substances for expanding Korean water quality standards.

Item	Substance
Preliminary item for water quality assessment (13)	Zinc (Zn), Trichloroethylene (TCE), Tetrachloroethylene (PCE), Dichloromethane (DCM), 1,1-dichloroethylene (1,1-DCE), Benzene, Carbon tetrachloride, Phenol, Selenium (Se), Toluene, Ethylbenzene, 1,2-dichloroethane, Chloroform
Monitoring item for drinking water (7)	Vinyl chloride, 2,4-dichlorophenol, 2,4,6-trichlorophenol, Pentachlorophenol (PCP), Diethylhexylphthalate (DEHP), Benzo(a)pyrene (BaP), Antimony (Sb)

chloroethane, styrene, chlorophenol,alachlor, diethylhexyladipate, 2,4-dichlorophenoxyacetic acid, dichloroacetic acid, trichloroacetic acid를 제외한 7개 먹는물 감시 항목을 포함하여 총 20개 항목을 최종 연구대상 화학물질로 선정하였다(Table 1).

2. 인체 위해성 평가를 통한 우선순위 물질 선정

1) 사람의 건강 보호를 위한 수질 준거치 산출 방법
대상 화학물질별 사람의 건강 보호를 위한 수질 준거치 산출을 위해 미국환경보호청(US Environmental Protection Agency, US EPA)의 발암·비발암 영향 수식을 수정 및 보완하여 활용하였다. 국내 실정을 반영하기 위해 수식에 적용되는 인자 중 체중(Human body weight, BW), 음용수 섭취량(Drinking water intake, DI), 어류 섭취량(Fish intake, FI)은 각각 한국인 성인 표준 기준인 60 kg, 2 L day⁻¹, 0.0641 kg day⁻¹사용하였다. 한편 미국은 성인 기준 영양 단계(Trophic Level, TL)(예, 저서성 어류, 피식어류, 포식어류)별 어류섭취량 TL2=3.8 g day⁻¹, TL3=8.0 g day⁻¹, TL4=5.7 g day⁻¹를 종합한 17.5 g day⁻¹를 사용하여 수질 준거치를 산출하였다(US EPA, 2000b). 그러나 국내에는 영양 단계별 어류 섭취량뿐만 아니라 담수어류 섭취량도 없기 때문에 우선적으로 시중에서 유통되는 전국적 어패류 섭취량 64.1 g day⁻¹(보건복지부, 2002)를 사용하였다.

(1) 발암 영향 수식

IRIS의 발암등급 A, B1, B2, C에 해당하거나 발암계수(Slope factor, SF)가 존재하는 대상물질은 다음과 같은 발암 영향 수식을 적용하여 수질 준거치를 산출하였다. 이때 US EPA에서 제시한 발암계수는 미국인 성인 표준

체중 70 kg을 기준으로 설정된 값이므로 한국인 성인 표준 체중 60 kg에 해당하는 발암계수로 변환하여 사용하였다.

$$AWQC_{\text{cancer effects}} = RSD \times \left(\frac{BW}{DI + (FI \times BCF)} \right),$$

$$RSD = \frac{10^{-6}}{SF \times \left(\frac{60}{70} \right)^{\frac{1}{3}}}$$

AWQC_{cancer effects}: 발암 영향을 고려한 수질 준거치 (mg L⁻¹)

RSD: 저용량 외삽에 근거한 발암 위해 특성적 용량 (Risk-specific dose for carcinogens based on a linear low-dose extrapolation) (mg kg⁻¹ day⁻¹)

BW : 체중 (성인 60 kg 기준)

DI : 음용수 섭취량 (성인 2 L day⁻¹ 기준)

FI : 어류 섭취량 (성인 0.0641 kg day⁻¹ 기준)

BCF: 생물농축계수 (L kg⁻¹)

SF : 발암계수 [(mg kg⁻¹ day⁻¹)⁻¹]

(2) 비발암 영향 수식

IRIS의 발암등급 D, E에 해당하거나 비발암참고치 (Reference dose, RfD)가 존재하는 대상물질은 다음과 같은 비발암 영향 수식을 적용하여 수질 준거치를 산출하였다.

$$AWQC_{\text{noncancer effects}} = RfD \times RSC \times \left(\frac{BW}{DI + (FI \times BCF)} \right)$$

AWQC_{noncancer effects}: 비발암 영향을 고려한 수질 준거치 (mg L⁻¹)

RfD: 비발암참고치 (mg kg⁻¹ day⁻¹)

RSC: 상대근원기여도 (Relative source contribution factor)

BW : 체중 (성인 60 kg 기준)

DI : 음용수 섭취량 (성인 2 L day⁻¹ 기준)

FI : 어류 섭취량 (성인 0.0641 kg day⁻¹ 기준)

BCF: 생물농축계수 (L kg⁻¹)

2) 수질 모니터링 값 산출 방법

대상 화학물질별 수질 모니터링 값을 산출하기 위해 2004년부터 2005년까지 한강, 낙동강, 금강, 영산강 유역 85~113개 지점을 대상으로 한 수질 모니터링 8~9회분 자료를 활용하였다. 이때 불검출 (non-detected, ND) 값은 검출한계 (detection limit, DL)의 반값 (DL/2)을 적용하였고, 대표값은 전체 시료 측정값의 평균값 (mean)을 적용하였다.

3) 위해도 결정을 통한 우선순위 물질 선정

대상 화학물질별 위해도 즉, 수질 준거치와 수질 모니터링 값과의 비에 따라 우선순위 물질을 선정하였다.

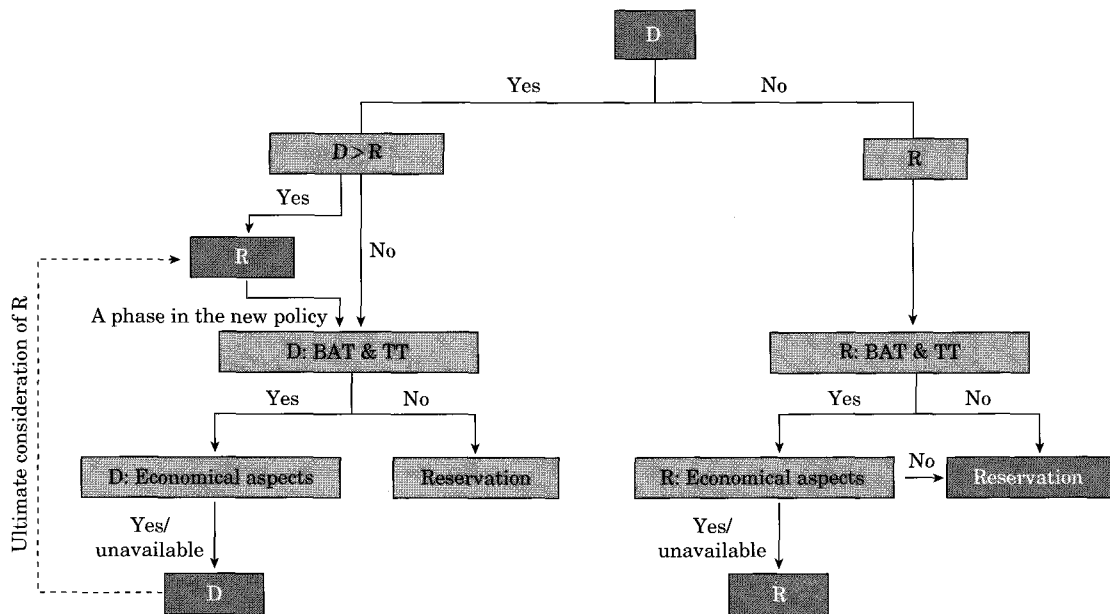


Fig. 1. The system of expanding the new Korean water quality standard when drinking water quality standard is present. D: Drinking water standard, R: Value of risk assessment, BAT: Best available technology, TT: Treatment technique.

3. 영향 분석을 통한 수질환경기준치(안) 제시

준거치(Criteria)는 인체건강 및 수생태계 보호를 위해 안전한 수질 상태를 보장할 수 있는 수준으로, 오염물질에 노출된 생물체의 영향에 관한 과학적 기반을 토대로 도출된 수치이다. 따라서 준거치는 공학적 처리 가능성, 분석 능력, 경제적인 영향에 대한 고려를 전혀 하지 않은 수치이다. 반면 기준(Standard)은 인체건강 및 수생태계 보호를 위해 오염물질로 인한 영향을 최대한 배제하기 위한 수준으로, 각종 과학 기술과 경제적 수준을 감안하여 행정적 목표로서 설정된 수치이다. 그러므로 본 연구에서 제시된 수질 준거치는 기준으로 제시되기 이전에 기술적·경제적 영향 분석을 통해 행정적 목표로서의 적용 가능성을 고려할 필요가 있다. 따라서 수질 준거치와 먹는물 기준과의 비교 분석, 기술적 영향 분석, 경제적 영향 분석 단계를 통해 Fig. 1과 같이 수질환경기준치(안)을 선정하는 체계를 제시하였다. 이때 먹는물 기준은 국내 먹는물 기준과 세계보건기구(World Health Organization, WHO)의 먹는물 기준을 참고하였고, 두 가지 기준 모두 존재할 경우 단계적 강화 차원에서 둘 중 더 완화된 수치를 우선적으로 활용하였다.

1) 수질 준거치와 먹는물 기준과의 비교 분석

수질 준거치가 대상 화학물질에 대해 존재하는 먹는물 기준보다 낮을 경우 단계적 강화 차원에서 먹는물 기준에 대한 기술적 영향 분석을 우선적으로 수행하였다. 또한 먹는물 기준이 수질 준거치보다 낮을 경우 마찬가지로 먹는물 기준에 대한 기술적 영향 분석을 수행하였다. 반면 대상 화학물질에 대한 먹는물 기준이 존재하지 않을 경우 수질 준거치에 대한 기술적 적용 가능성을 평가하였다.

2) 기술적 영향 분석

상기 수질 준거치와 먹는물 기준과의 비교 분석으로부터 도출된 수치에 대한 기술적 영향 분석은 공학적 측면과 분석적 측면을 고려하였다. 먼저 공학적 측면은 산업폐수종말처리장 자료, 국내 배출량 자료, 국내 모니터링 자료를 이용하여 앞서 도출된 수치의 공학적 처리 타당성을 검토하였다. 다음으로 분석적 측면은 측정방법에 따른 검출한계를 이용하여 앞서 도출된 수치의 분석적 적용 타당성을 평가하였다.

(1) 공학적 영향 분석

먼저 산업폐수종말처리장 자료를 이용한 공학적 처리 타당성은 US EPA의 NPDES (National Pollutant Discharge Elimination System) 프로그램을 활용하였다. 미국은

점오염원으로부터 수계로 오염물질을 방류하는 모든 시설들은 폐수배출허가를 받도록 되어 있다. 폐수배출허가를 받기 위해서는 오염물질 처리기술에 근거한 기술근거 배출한계(Technology-Based Effluent Limit, TBEL)와 지정용도 보호를 위한 수질근거 배출한계(Water Quality-Based Effluent Limit, WQBEL)를 고려해야 한다. 이 중 기술근거 배출한계가 방류수역의 수질환경기준을 충족시키기에 충분하지 않을 경우 더 엄격한 배출한계를 도출하기 위해 WQBEL을 고려한다(US EPA, 1996). WQBEL을 산정하기 위해서는 오염부하할당량(Waste Load Allocation, WLA)이 필요하며, WLA는 다음과 같은 완전혼합평가(Complete mix assessment)의 오염물질의 거동에 따른 정상모형(Steady-state model) 물질수지모형(Mass balance model) 수식에 의해 산정된다(US EPA, 1996). 따라서 본 연구에서는 상기 WQBEL을 바탕으로 희석배수 10을 적용한 희석율을 고려하여 방류수역 내 오염물질의 농도를 산출하였다. 이때 산출된 오염물질의 농도와 수질 준거치와 먹는물 기준과의 비교 분석으로부터 도출된 수치와 비교하여 공학적 처리 타당성을 검토하였다.

$$C_d = \frac{C_r Q_r - C_s Q_s}{Q_d}$$

C_d =배출수 내 오염물질 농도[Pollutant concentration in waste discharge (million gallons per day, mgd)]

C_r =완전혼합 후 방류수역 오염물질 농도 [Resultant in-stream pollutant concentration in the stream reach after complete mixing ($mg L^{-1}$)]

Q_r =방류수역 유량 (배경유량+배출수 유량) [Resultant in-stream flow, after discharge (mgd)]

C_s =오염물질 배경 농도 [Background in-stream pollutant concentration ($mg L^{-1}$)]

Q_s =배출지점 상류 배경유량 [Background stream flow above point of discharge (mgd)]

Q_d =배출수 유량 [Waste discharge flow (mgd)]

다음으로 국내 배출량 자료를 이용한 공학적 처리 타당성은 국내에서 사용하고 있는 폐수처리기술에 의해 배출되는 오염물질의 수계배출량자료와 공장폐수방류량자료를 바탕으로 방류수내 오염물질의 희석농도를 산정하여, 이를 수질 준거치와 먹는물 기준과의 비교 분석으로부터 도출된 수치와 비교하였다.

마지막으로 국내 모니터링 자료를 이용한 공학적 처리 타당성은 현 시점에서 가능한 수처리 기술에 의해 공학적으로 처리, 저감된 후 수계로 배출된 후 희석된 농도가 모

니터링 자료라 볼 수 있으므로, 이를 수질 준거치와 먹는물 기준과의 비교·분석으로부터 도출된 수치와 비교하였다.

(2) 분석적 영향 분석

분석적 영향 분석은 US EPA 및 USGS (United States Geological Survey)의 기금으로 운영되는 NEMI (National Environmental Methods Index) 자료를 바탕으로 측정방법에 따른 검출한계와 수질 준거치와 먹는물 기준과의 비교 분석으로부터 도출된 수치와 비교하였다.

3) 경제적 영향 분석

경제적 영향 분석은 US EPA에서 제시한 비용 효과와 편익 효과를 비교하였다. 비용 효과는 수질 준거치와 먹는물 기준 간의 차이에 해당하는 단위 부피당 오염물질의 양을 저감시키기 위한 소요 비용을 산출한 것이다. US EPA에서는 점오염원으로부터 배출되는 오염물질에 대해 최대유출농도를 사용하는 저비용 시나리오와 배출한계를 사용하는 고비용 시나리오로 나뉜다(US EPA, 1999). 따라서 본 연구에서는 실제적인 경우를 잘 대표할 수 있는 저비용 시나리오를 사용하여 대상 화학물질의 1lb 당 저감 비용을 POTW (Publicly Owned Treatment Work)의 $35\$ \text{lb}^{-1} \text{eq}^{-1}$ 로 가정하여 비용 효과를 산출하였다. 편익 효과는 수질 준거치와 먹는물 기준 간의 차이에

해당하는 오염물질의 저감으로 인한 편익(예, 발암·비발암 영향 감소 등)을 산출한 것이다. 생태학적 이익과 같은 질적인 부분에 대한 화폐화 및 현 상황에서의 비발암 영향 평가는 용이하지 않다(US EPA, 2000a). 따라서 본 연구에서는 국내 암 환자의 연간 치료비용을 바탕으로 대상 화학물질에 대한 발암 가능성을 수질 준거치와 먹는물 기준 간의 차이에 따라 계산하여 화폐화하였다. 한국인의 대표적인 암 27종을 선별하여 암환자수와 총진료비를 토대로 1인당 1년 평균 진료비를 산정하여, 암환자(1인 기준)가 30년간 치료를 받을 경우 소요되는 예상 비용을 산출하였다.

결과 및 고찰

1. 인체 위해성 평가를 통한 우선순위 물질 선정

대상 화학물질의 우선순위를 선정하기 위해 수질 준거치와 모니터링 값을 활용한 인체 위해성 평가를 사용하였다. 먼저 대상 화학물질별 독성자료의 총축도에 따라 발암·비발암 영향 수식을 적용하여 사람의 건강보호를 위한 수질 준거치를 산출한 결과 12개 발암 영향 수질 준거치와 8개 비발암 영향 수질 준거치가 산출되었다

Table 2. Ambient water quality criteria for the protection of human health proposed in this study.

Substance	Carcinogenicity	SF ($\text{mg kg}^{-1} \text{day}^{-1}$) ⁻¹	RfD ($\text{mg kg}^{-1} \text{day}^{-1}$)	RSC	BCF (L kg^{-1})	Criteria ($\mu\text{g L}^{-1}$)	
						Cancer effects	Noncancer effects
Zinc	D	—	0.333	1	47	—	4000
Trichloroethylene	—	0.0126	—	—	10.6	1.9	—
Tetrachloroethylene	—	0.0398	0.014	—	30.6	0.4	—
Dichloromethane	B2	0.0075	0.0615	—	0.9	4.1	—
1,1-dichloroethylene	C	0.6	0.046	0.2	5.6	—	234
Benzene	A	0.055	0.004	—	5.2	0.49	—
Carbon tetrachloride	B2	0.13	0.0007	—	18.75	0.15	—
Phenol	D	—	0.31	1	1.4	—	8900
Selenium	D	—	0.005	1	4.8	—	130
Toluene	—	—	0.08	1	10.7	—	1800
Ethylbenzene	D	—	0.097	1	37.5	—	1300
1,2-dichloroethane	B2	0.091	—	—	1.2	0.33	—
Chloroform	B2	0.0061	0.013	—	3.75	4.6	—
Vinyl chloride	A	0.0174	0.003	—	1.17	1.75	—
2,4-dichlorophenol	—	—	0.003	1	40.7	—	39
2,4,6-trichlorophenol	B2	0.011	—	—	150	0.49	—
Pentachlorophenol	B2	0.12	0.03	—	11	0.19	—
Diethylhexylphthalate	B2	0.014	0.019	—	130	0.44	—
Benzo(a)pyrene	B2	7.3	—	—	30	0.0022	—
Antimony	—	—	0.0004	0.4	1	—	4.7

SF (Slope factor); RfD (Reference dose); RSC (Relative source contribution factor); BCF (Bioconcentration factor)

Table 3. Water quality monitoring values from major rivers in Korea.

Substance	Mean ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Detection frequency (%)	Site numbers	Detection limit ($\mu\text{g L}^{-1}$)
Zinc	50.95	92.2	113	0.1
Trichloroethylene	0.12	8.1	113	0.1
Tetrachloroethylene	0.07	4.4	113	0.1
Dichloromethane	0.65	11.5	113	0.1
1,1-dichloroethylene	0.05	0.4	113	0.1
Benzene	0.07	6.1	113	0.1
Carbon tetrachloride	0.06	1.7	113	0.1
Phenol	2.59	4.9	113	5
Selenium	0.31	17.0	113	0.1
Toluene	0.28	23.6	113	0.1
Ethylbenzene	0.16	18.4	113	0.1
1,2-dichloroethane	0.11	3.6	113	0.2
Chloroform	0.49	20.2	113	0.1
Vinyl chloride	0.14	3.9	85	0.1
2,4-dichlorophenol	0.006	10.0	85	0.01
2,4,6-trichlorophenol	0.01	29.5	85	0.005
Pentachlorophenol	0.009	4.4	85	0.01
Diethylhexylphthalate	0.66	36.4	85	0.01
Benzo(a)pyrene	0	0	85	0.02
Antimony	0.79	56.7	85	0.15* 0.1**

*: Detection limit used in 2004

** : Detection limit used in 2005

Table 4. The order of priorities of toxic substance based on human health risk assessment.

Substance	Criteria ($\mu\text{g L}^{-1}$) [A]	Monitoring values [B]		Ratio [B/A]	Order
		Mean ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Detection frequency (%)		
Zinc	4000	50.95	92.2	0.01	13
Trichloroethylene	1.9	0.12	8.1	0.07	10
Tetrachloroethylene	0.4	0.07	4.4	0.18	4
Dichloromethane	4.1	0.65	11.5	0.16	6
1,1-dichloroethylene	234	0.05	0.4	0.0002	16
Benzene	0.49	0.07	6.1	0.13	7
Carbon tetrachloride	0.15	0.06	1.7	0.39	2
Phenol	8900	2.59	4.9	0.0003	15
Selenium	130	0.31	17.0	0.002	14
Toluene	1800	0.28	23.6	0.0002	18
Ethylbenzene	1300	0.16	18.4	0.0001	19
1,2-dichloroethane	0.33	0.11	3.6	0.34	3
Chloroform	4.6	0.49	20.2	0.11	8
Vinyl chloride	1.75	0.14	3.9	0.08	9
2,4-dichlorophenol	39	0.006	10.0	0.0002	17
2,4,6-trichlorophenol	0.49	0.01	29.5	0.02	12
Pentachlorophenol	0.19	0.009	4.4	0.05	11
Diethylhexylphthalate	0.44	0.66	36.4	1.50	1
Benzo(a)pyrene	0.0022	0	0	0	20
Antimony	4.7	0.79	56.7	0.17	5

(Table 2). 다음으로 대상 화학물질별 수질 모니터링 자료를 처리하여 대표값을 산출한 결과 대상 화학물질 중 아연의 검출 농도와 검출 빈도가 가장 높은 것으로 나타

났다(Table 3). 마지막으로 앞서 산출된 수질 준거치와 모니터링 값과의 비인 위해도를 기준으로 1부터 20까지의 우선순위 물질을 선정하였다. 대상 화학물질에 대한

인체 위해성 평가 결과 위해도 1.5인 Diethylhexylphthalate가 대상 화학물질 중 위해우려가 가장 높은 물질로 평가되었고, Diethylhexylphthalate를 제외한 19개 대상 화학물질은 위해우려가 상당히 낮은 것으로 평가되었

다(Table 4).

한편 US EPA의 국가수질권고치에서는 vinyl chloride의 사람의 건강 보호를 위한 수질 준거치를 2002년 2.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 2004년 0.025 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 강화한 바 있다(US

Table 5. Proposed water quality standards.

Substance	Criteria ($\mu\text{g L}^{-1}$)	MV ($\mu\text{g L}^{-1}$) [DF (%)]	Drinking water standard ($\mu\text{g L}^{-1}$)					Water quality standard ($\mu\text{g L}^{-1}$)				
			US	Japan	EU	Korea	WHO	US		Japan	EU	Korea
								NY*	MO			
Zinc	3985.88	50.95 (92.2)	-	-	-	1000	-	-	-	-	3000	1000
Trichloroethylene	1.87	0.12 (8.1)	5	30	-	30	20	-	-	30	-	30
Tetrachloroethylene	0.40	0.07 (4.4)	5	10	-	10	40	-	5	10	10	40
Dichloromethane	4.09	0.65 (11.5)	5	20	-	20	20	5 (200)	5	20	20	20
1,1-dichloroethylene	234	0.05 (0.4)	7	20	-	30	-	-	-	20	-	30
Benzene	0.49	0.07 (6.1)	5	10	1	10	10	1 (10)	5	10	10	10
Carbon tetrachloride	0.15	0.06 (1.7)	5	2	-	2	4	5	2.5	2	12	4
Phenol	8900.63	2.59 (4.9)	-	-	-	5	-	-	-	-	1	5
Selenium	130	0.31 (17.0)	50	10	-	10	10	10	-	10	10	10
Toluene	1787.13	0.28 (23.6)	100	-	-	700	700	5	-	-	-	700
Ethylbenzene	1321.60	0.16 (18.4)	700	-	-	300	300	-	-	-	-	300
1,2-dichloroethane	0.33	0.11 (3.6)	5	4	3	-	30	0.6	3.8	4	10	30
Chloroform	4.62	0.49 (20.2)	80	60	50	80	300	7	57	-	-	80
Vinyl chloride	1.75	0.14 (3.9)	2	-	-	-	0.3	2	-	-	-	R
2,4-dichlorophenol	39	0.006 (10.0)	-	-	-	-	900**	-	-	-	1	900
2,4,6-trichlorophenol	0.49	0.01 (29.5)	-	-	-	-	200	-	-	-	1	200
Pentachlorophenol	0.19	0.009 (4.4)	1	-	-	-	9	-	-	-	1	9
Diethylhexylphthalate	0.44	0.66 (36.4)	6	-	-	-	8	5	6	-	1.3	8
Benzo(a)pyrene	0.0022	0 (0)	0.2	-	-	-	0.7	ND	-	-	-	0.7
Antimony	4.65	0.79 (56.7)	6	-	5	-	20	3	6	-	-	20

*Standards of health for fish consumption is in parenthesis.

**Maximum acceptable concentration of drinking water standard in Canada MV (Monitoring Values); DF (Detection Frequency); NY (New York); MO (Montana); R (Reservation); ND (Non Detected)

EPA, 2002a; US EPA, 2003). 이는 US EPA의 공보(Federal Register)에 근거하여, vinyl chloride의 발암계수가 $0.0174 [(mg\ kg^{-1}\ day^{-1})^{-1}]$ 에서 $1.5 [(mg\ kg^{-1}\ day^{-1})^{-1}]$ 로 개정됨에 따라 변경된 발암계수를 적용하여 수질 준거치를 산출하였기 때문이다(US EPA, 2003). 우리나라도 이러한 미국의 개정 사항을 감안하여 vinyl chloride의 변경된 발암계수를 적용함으로써 사람의 건강 보호를 위한 수질 준거치를 강화할 수 있다. 그러나 본 연구에서 활용된 수질 모니터링 자료에 따르면, vinyl chloride의 검출 빈도가 3.85%로 다른 대상 화학물질들에 비해 상당히 적게 검출되었고 2004년 한강의 일부 지점에서 검출된 이래로 국내 수계에서 검출된 바 없으므로 다른 물질들에 비해 수체유출가능성이 낮은 것으로 사료된다. 또한 vinyl chloride의 분석 난이도가 높아 현재 국내 분석 기반으로 분석하기에 상당히 어려운 실정이다. 따라서 현 시점에서 vinyl chloride의 수질 준거치를 강화하여 우선순위를 상향 조정하는 것보다 우선관리대상물질로 선정하여 수질 모니터링 자료 구축 및 분석 역량 향상 등의 연구 기반을 다지면서 향후 유동적으로 조정해야 할 것이다.

2. 영향 분석을 통한 수질환경기준치(안) 제시

대상 화학물질별 영향 분석을 통한 수질환경기준치(안)을 제시하기 위해 수질 준거치와 먹는물 기준을 비교한 결과 20개의 기술적 영향 분석이 필요한 물질들이 선정되었다. 20개 대상 화학물질 중 9개 물질(trichloroethylene, tetrachloroethylene, dichloromethane, benzene, carbon chloride, 1,2-dichloroethane, chloroform, diethylhexylphtalate, antimony)은 먹는물 기준이 수질 준거치보다 높아 단계적 강화 차원에서 우선적으로 먹는물 기준에 대한 기술적 영향 분석이 필요하였다. 또한 10개 물질(zinc, 1,1-dichloroethylene, phenol, selenium, toluene, ethylbenzene, vinyl chloride, pentachlorophenol, 2,4,6-trichlorophenol, benzo(a)pyrene)은 먹는물 기준이 수질 준거치보다 낮아 먹는물 기준에 대한 기술적 적용 타당성을 평가하였다. 반면 2,4-dichlorophenol은 국내 및 WHO의 먹는물 기준이 존재하지 않아 캐나다의 먹는물 기준을 참고하였고, 먹는물 기준이 수질 준거치보다 높아 단계적 강화 차원에서 우선적으로 먹는물 기준에 대한 기술적 적용 가능성을 검토하였다. 한편 경제적 영향 분석은 기술적 타당성이 확보된 물질에 한해 수행되었는데, 대표적인 물질에는 dichloromethane이 있다.

대상 화학물질별 수질환경기준치(안)을 제시한 결과 대체로 국내 또는 WHO의 먹는물 기준 수준인 것으로 나

타났다(Table 5). 우리나라, 유럽 등 담수어를 섭취하는 국가에서는 먹이 연체에 의한 생물농축을 고려하여 수생체 중심의 보전을 향상시킬 필요가 있다. 따라서 궁극적으로 먹는물 수준 이하로 수질환경기준치(안)을 강화하는 것이 바람직하나, 수질환경기준 항목으로 처음 검토되는 현 상황에서는 급진적 강화보다 단계적 강화를 통해 향후 유동적으로 조정해야 할 것이다. 즉 국내 현황을 고려하여 기준이 될 수 있는 수치 중 우선적으로 완화된 수치를 제시하고, 향후 기술적·경제적 타당성이 검증되면 단계적으로 기준을 강화해 나가는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

3. 현재의 제한점 및 향후 방향 제시

본 연구에서 활용된 인체 위해성 평가와 수질환경기준(안) 제시 방안은 국내 환경에 적합한 수질환경기준을 제시하기 위해 몇 가지 수정 및 보완될 필요가 있다. 첫째, 수질 준거치를 산출하기 위해 적용된 어류 섭취량(FI)은 가용한 자료가 전무하여 전국적 어패류 섭취량을 임의 사용하였다. 이때 어패류 섭취량은 담수어뿐만 아니라 해수어, 패류가 모두 포함되어 있기 때문에 과다 산정된 인자로 인해 보수적인 수질 준거치가 도출되었을 가능성이 있다. 둘째, 수질 모니터링 값을 산출하기 위해 사용된 모니터링 자료는 2년(4~5회 연⁻¹) 동안 축적된 자료로서 다회성 자료이기는 하나, 국가적 관리 항목 설정 기반으로 활용되기에는 신뢰성이 다소 낮은 것으로 판단된다. 셋째, 본 연구에서 제시한 수질환경기준치(안)은 단계적 강화 차원에서 접근함에 따라 대체로 먹는물 기준 수준으로 설정되었다. 그러나 우리나라에서는 담수어 섭취 사례가 빈번하기 때문에 생물농축으로 인한 오염물질의 인체로의 노출 가능성을 배제할 수 없다. 즉 음용수에 의한 인체 영향만을 고려한 먹는물 기준보다 음용수뿐 아니라 담수어와 같은 유기체에 의한 인체 영향을 복합적으로 고려하는 방향으로 수질환경기준을 강화할 필요가 있다. 따라서 향후 수질환경기준 설정 연구에서는 담수어류 섭취량 확보 및 수질 모니터링 자료 축적 그리고 먹는물 기준 이하로의 수질환경기준치 설정 가능 기반 확립 등의 측면을 고려하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

적 요

본 연구에서는 사람의 건강 보호를 위한 수질환경기준 항목 확대를 위해 20개 수질유해화학물질을 대상으로

US EPA의 발암·비발암 영향 수식을 국내 실정에 맞게 수정 및 보완하여 인체 위해성 평가를 수행하였다. 또한 인체 위해성 평가를 기반으로 선정된 우선순위 물질에 대해 기술적·경제적 영향 분석을 통해 행정적 목표로서의 적용 타당성을 판별하였다. 그리하여 20개 우선순위 물질 중 diethylhexylphthalate가 위해 우려가 가장 높은 물질로 평가되었고, 항목별 수질환경기준으로 활용 가능한 기준치(안)은 단계적 강화 측면에서 대체로 먹는물 기준 수준으로 제시되었다. 본 연구에서 활용된 인체 위해성 평가와 수질환경기준(안) 제시 방안은 현 단계에서 적용 가능한 방법으로, 향후 보다 합리적인 기준 설정을 위해 수정 및 보완될 필요가 있다. 즉 담수어류 섭취량 자료 확보, 수질 모니터링 자료 축적, 먹는물 기준 이하로의 수질환경기준치 설정 가능 기반 확립 등의 측면을 보강한다면 향후 국내 수질환경기준 항목 확대에 과학적 근거를 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 환경부·국립환경과학원 “물환경종합평가방법 개발 조사연구(III)-인체 및 수생태계 위해성평가체계 구축” 사업의 일환으로 수행되었음.

인 용 문 헌

- 국립환경과학원. 2003. 특정수질유해물질 확대지정 및 배출허용기준 설정연구.
- 국립환경연구원. 2000. 정책 결정자를 위한 수질관련 기준 비교분석.
- 국민보훈관리공단. 2002. 2001년 암 환자 실태 통계 보고서.
- 보건복지부. 2002. 2001년도 국민건강영양조사.
- 수자원공사. 1998. 수자원편람.
- 일본환경성. 1993. 수질오염에 관한 환경기준에 대하여(<http://www.env.go.jp/kr/standards>).
- 환경부. 1999. 공공기반기술 성과확산 사업 - 환경위해성평가방법 제정 및 환경독성평가 기술이전.
- 환경부. 2005a. 2003년도 화학물질 배출량 조사결과.
- 환경부. 2005b. 2004년도 공장폐수의 발생과 처리.
- 환경부. 2006. 환경백서. p. 699-700.
- 환경부, 국립환경과학원. 2004. 물환경종합평가방법 개발 조사연구(I).
- 환경부, 국립환경과학원. 2005. 물환경종합평가방법 개발 조사연구(II).
- 환경부, 국립환경과학원. 2006. 물환경종합평가방법 개발 조사연구(III)-인체 및 수생태계 위해성 평가체계 구축.
- CCME. 2003. Canadian environmental quality guidelines. Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg.
- EC. 1991. Council directive of 16 June 1975 concerning the quality required of surface water intended for the abstraction of drinking water in the member states, 75/440/EEC.
- NYDEC. 1999. Surface water and groundwater quality standards and groundwater effluent limitations 6 NYCRR Part 703.
- US EPA. 1996. NPDES permit writers' manual.
- US EPA. 1997. Exposure factors handbook.
- US EPA. 1999. Economic analysis of the california toxics rule.
- US EPA. 2000a. Water quality standards; Establishment of numeric criteria for priority toxic pollutants for the state of california; Rule. Federal register. Vol. 65, No. 97.
- US EPA. 2000b. Methodology for deriving ambient water quality criteria for the protection of human health.
- US EPA. 2001. Robust estimation of mean and variance using environmental data sets with below detection limit observations.
- US EPA. 2002a. National recommended water quality criteria: 2002-human health criteria calculation matrix.
- US EPA. 2002b. NEMI (<http://www.nemi.gov>).
- US EPA. 2003. National recommended water quality criteria for the protection of human health. Federal register. Vol. 68, No. 250.
- US EPA. 2004. 2004 Edition of the drinking water standards and health advisories.
- US EPA. 2006a. IRIS (<http://www.epa.gov/iris>).
- US EPA. 2006b. National recommended water quality criteria.
- WHO. 2006. Guidelines for drinking-water quality first addendum to 3rd edition. Vol. 1.

(Manuscript received 23 February 2008,
Revision accepted 15 March 2008)