

비음용 지하수 오염물질 기준설정체계 구축 연구: (1) 특정유해물질 Establishment of Non-Drinking Groundwater Quality Standards: (1) Specific Harmful Substances

안윤주[†] · 남선화 · 이우미 · 윤성지 · 윤진열 · 정승우* · 김혜진** · 김현구** · 김태승**
Youn-Joo An[†] · Sun-Hwa Nam · Woo-Mi Lee · Sung-Ji Yoon · Jin-Yul Yoon
Seung-Woo Jeong* · Hye-Jin Kim** · Huyn-Koo Kim** · Tae-Seung Kim**

건국대학교 환경과학과 · *군산대학교 환경공학과 · **국립환경과학원 토양지하수연구과

Department of Environmental Science, Konkuk University

*Department of Environmental Engineering, Kunsan University

**Soil and Groundwater Division, National Institute of Environmental Research

(2013년 4월 24일 접수, 2013년 9월 16일 채택)

Abstract : There is a need to establish systematic procedure of groundwater quality standards, however, there were no specified basis for establishing substances and values in Korean groundwater quality standards for non-drinking water. In this study, we reviewed basis for deriving groundwater quality standard in the developed countries, considering carcinogenic and non-carcinogenic risk via inhalation and dermal contact exposure pathways. Also, we reviewed the prior systematic procedure of standards related to water quality (e.g. drinking water, surface water, and wastewater). USEPA RAGS, ASTM RBCA, and Massachusettes presented the formulas for deriving groundwater concentrations of chemicals and there were similarity and differences. We suggests systematic procedure of groundwater quality standards, as follows. (1) Selection of groundwater pollutants population, (2) Possibility of risk assessment, (3) Selection of monitoring priority substances, (4) Monitoring, (5) Risk assessment, (6) Selection of groundwater quality standard candidates, (7) Selection of new substances and values for groundwater quality standards. Especially, groundwater concentration of hazardous material were presented according to revised risk formulas via inhalation and dermal contact.

Key Words : Groundwater, Water Quality Standards, Specific Harmful Substances, USEPA RAGS, ASTM RBCA

요약 : 비음용 목적의 지하수에 대한 국내 수질기준은 기준항목 및 기준치 설정에 근거가 명시되지 않아 체계적인 기준설정 체계 마련이 시급한 실정이다. 본 연구에서는 비음용 목적의 특정유해물질에 대한 위해성기반 한국 지하수 수질기준 설정체계를 마련하기 위해 흡입 및 피부접촉 노출경로를 고려한 위해성을 반영하고 있는 선진국의 지하수기준 설정근거를 분석하였으며, 국내 타 수질 관련 매체의 기준 설정 체계를 바탕으로 향후 한국 지하수기준의 설정체계를 제안하였다. 모니터링 우선항목 선정, 모니터링 수행, 위해성평가, 지하수 수질기준 후보물질 선정, 특정유해물질 지하수 수질기준 신규항목 선정 및 항목별 기준치 설정 단계로 제안하였다.

주제어 : 지하수, 수질기준, 특정유해물질, ASTM RBCA, USEPA RAGS

1. 서론

지하수는 지하의 지층이나 암석 사이의 빈틈을 채우고 있거나 흐르는 물을 지칭하며, 한국 지하수는 수자원 중 17%에 해당한다. 한국은 2010년 기준 3,806,987,014 m³/year의 지하수를 이용하고 있으며, 이 중 음용 목적의 지하수는 40.41%, 비음용 목적의 지하수는 59.59%를 차지한다. 또한 비음용 목적의 지하수는 농어업용수 48.87%, 생활용수 46%, 공업용수 4.4%, 기타용수 0.7%로 분류되어 사용되고 있다.¹⁾ 비음용 목적의 지하수에 대한 국내 수질기준은 “지하수의 수질보전 등에 관한 규칙”에 따르며, 생활용수, 농·어업용수, 공업용수의 이용목적별 특정유해물질 15개 항목(카드뮴, 비소, 시안, 수은, 유기인, 페놀, 납, 6가크롬, 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌, 1,1,1-트리클로로에탄, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌)에 대해 제시하고 있다. 현행 기준

중 생활용수와 농·어업용수의 기준 항목은 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌을 제외하고 동일하며, 기준치는 1,1,1-트리클로로에탄을 제외하고 동일하다. 또한 농·어업용수와 공업용수의 기준 항목은 동일하며, 수은, 유기인, 1,1,1-트리클로로에탄을 제외하고 공업용수의 기준치는 농·어업용수보다 2배 완화된 수치를 적용하고 있다(Table 1). 비음용 목적의 지하수기준 항목 및 기준치 설정 근거는 기존 지하수 관련 보고서²⁻⁴⁾를 통해 일부 유추할 수 있으나, 이용목적의 분류 기준, 항목 및 기준치 설정에 대한 명시된 근거가 없어 체계적인 기준설정체계 마련이 시급한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 비음용 목적의 특정유해물질에 대한 위해성 기반 한국 지하수 수질기준 설정체계를 마련하기 위해 흡입 및 피부 접촉 노출 경로를 고려한 위해성을 반영하고 있는 미국환경보호청(United States Environmental Protection Agency, USEPA)의 수퍼펀드 지역에 대한 위해

[†] Corresponding author E-mail: anyjoo@konkuk.ac.kr Tel: 02-2049-6090 Fax: 02-2201-6295

Table 1. Korean groundwater quality standards for specific harmful substances (unit : mg/L)

Substances	Uses		
	Domestic	Agri&Aqua-culture	Industrial
Cadmium	0.01	0.01	0.02
Arsenic	0.05	0.05	0.1
Cyanide	0.01	0.01	0.02
Mercury	0.001	0.001	0.001
Organophosphorus	0.0005	0.0005	0.0005
Phenol	0.005	0.005	0.01
Lead	0.1	0.1	0.2
Chromium (VI)	0.05	0.05	0.1
Trichloroethylene	0.03	0.03	0.06
Tetrachloroethylene	0.01	0.01	0.02
1,1,1-Trichloroethane	0.15	0.3	0.5
Benzene	0.015	-	-
Toluene	1	-	-
Ethylbenzene	0.45	-	-
Xylene	0.75	-	-

성평가지침(Risk Assessment Guidance for Superfund, RAGS), 미국재료시험학회(American Society for Testing and Materials, ASTM)의 위해성기반 시정 조치(Risk-based Corrective Action, RCA), 섭취 경로 이외 노출 경로를 바탕으로 상세한 기준 설정 근거를 명시한 미국 매사추세츠주 등의 지하수기준 설정 근거를 분석하였으며, 국내 타 수질 관련 매체의 기준 설정 체계를 바탕으로 향후 한국 지하수기준의 설정체계를 제안하였다. 한편 본 연구는 “신규 지하수 오염물질 기준설정체계 확립 연구⁵⁾의 일환으로, 비음용 목적의 특정유해물질에 대한 지하수 수질기준 설정체계 구축 시 고려되었다.

2. 선진국의 노출 다경로를 고려한 지하수기준 설정 근거 연구

2.1. USEPA RAGS의 지하수기준 설정 근거

USEPA는 Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act (CERCLA; 일명 Superfund법) 아래 유해물질 오염 지역의 정화 목적으로, 1989년(Part A)부터 2004년(Part E)까지 지하수, 지표수, 토양 매체를 중심으로 인체 위해성평가 지침(Risk assessment guidance for superfund, RAGS)을 마련하였다.⁶⁻⁸⁾ 이 중 지하수 관련 노출 경로는 음용수 섭취, 휘발성물질의 실내흡입, 목욕 시 피부 접촉에 해당되며, 발암 및 비발암영향에 대한 인체노출량 수치를 제시하고 있다. 실내흡입 경로의 경우 발암 및 비발암 영향 수식 모두 체중 70 kg, 노출빈도 70일/년, 노출기간 30년, 일일 실내호흡률 15 m³/day, 휘발계수 0.0005 × 1,000 L/m³을 공통 적용하고 있으며, 평균수명의 경우에만 발암 영향 70년, 비발암영향 30년을 차등 적용하고 있다. 또한 목표

초과발암위해도 및 목표유해지수는 각각 10⁻⁶ 및 1을 적용하고 있다. 피부접촉 경로의 평균수명은 발암영향 70년 × 365일/년, 비발암영향 노출기간 × 365일/년을 차등 적용하고 있다. 이외 샤워/목욕 또는 수영 노출경로에 따라 사건빈도는 1 사건/일 또는 지역별 상이(site-specific), 노출빈도는 350 일/년 또는 지역별 상이를 차등 적용하고 있으며, 성인 및 어린이에 따라 사건기간은 0.25~1시간/사건 또는 지역별 상이로, 노출기간은 6~30년으로, 체표면적은 66,000~18,000 cm²로 차등 적용하고 있다.

2.2. ASTM RBCA의 지하수기준 설정 근거

ASTM RBCA는 물리·화학적 특성, 복합성, 인체 및 환경에 대한 잠재적 위해성 등의 지역적 특이성을 기초로 한 단계적 접근법에 따라, 인체 및 환경 보호를 위한 의사결정 근거로 이용되는데, RBCA는 대기, 지하수, surficial soil, subsurface soil 등 오염 매체를 대상으로 발암 및 비발암영향에 대한 Risk Based Screening levels (RBSLs)인 정확기준을 제시하고 있다.⁹⁾ 이 중 지하수 관련 노출경로는 지하수 섭취, 지하수에서 지반균열에 의한 실내증기흡입, 지하수에서 실외증기흡입으로 분류된다. 이 때 흡입 경로 수식은 US-EPA RAGS를 참고하였으며, 일부 수식 인자에 한해 상이 적용되었다. 목표초과발암위해도는 10⁻⁶~10⁻⁴로 제시하였으며, 목표유해지수는 1로 동일하게 적용되었다. 특히 토지 이용목적에 따라 노출기간 및 평균수명을 차등 적용하였으며, 노출기간의 경우 주거지역 30년, 상업 및 공업지역 25년을, 평균수명의 경우 발암영향은 70년, 비발암영향은 주거지역 30년, 상업 및 공업지역 25년을 적용하였다. 마지막으로 호흡률의 경우에도 실내 및 실외에 따라, 토지 이용목적에 따라 상이한 인자를 적용하였으며, 실내호흡률은 주거지역 15 m³/day, 상업 및 공업지역 20 m³/day를, 실외호흡률은 20 m³/day를 적용하였다.

2.3. 미국 매사추세츠주의 지하수기준 설정 근거

매사추세츠주의 지하수기준은 310 CMR 40.0932 Identification of Applicable Ground Water Categories에 근거하여, 물 섭취, 샤워 시 휘발로 인한 흡입, 물과의 접촉 시 피부흡수를 바탕으로 지하수 사용에 따른 잠재적인 인체 영향을 고려하고 있다.¹⁰⁾ 샤워 시 휘발로 인한 흡입 노출경로의 경우 휘발성유기물질에 한해 샤워 및 목욕 시 욕실 내 공기 중 노출농도 모델을 이용하였으며, 목표초과발암위해도 및 목표유해지수는 각각 10⁻⁶ 및 0.2를 적용하고 있다. 특히 수용체 연령에 따라 발암영향의 경우 샤워기간, 샤워실에 머무는 시간, 노출기간, 체중을 연령별 산정 후 종합하여 보수적 수치를 제시하고 있으며, 샤워기간은 38분, 샤워실에 머무는 시간은 64.33분, 노출 기간은 30년, 체중은 44.6 kg을 최종 적용하고 있다. 반면 비발암 영향의 경우 1~8세 어린이를 기준으로, 샤워기간은 45.7분, 샤워실에 머무는 시간은 65.7분, 노출기간은 7년, 체중은 17 kg을 적용하고 있다. 피부접촉 노출경로의 경우 USEPA RAGS를 참고하였으며, 일

부 수식인자에 한해 상이 적용되었다. 목표유해지수는 0.2로 USEPA RAGS보다 5배 강화되었으며, 목표초과발암위해도는 10^6 으로 동일하게 적용되었다. 특히 수용체 연령에 따라 발암영향의 경우 체표면적, 물과의 접촉시간, 노출기간, 체중을 연령별 산정 후 종합하여 보수적 수치를 제시하고 있으며, 비발암영향의 경우 1~8세 어린이를 기준으로 제시하고 있다. 한편 최종 지하수기준을 설정하기 위해 위해성 뿐 아니라 정량 한계, 배경 농도 등 기타 인자를 고려하였다. 먼저 발암위해성에 근거한 농도, 비발암위해성에 근거한 농도, 50% 냄새 인식 역치 중 가장 낮은 수치 a를 선정한 후, 수치 a와 한계 농도 0.005% 중 낮은 수치 b를 선정한다. 다음으로 수치 b, 분석 방법의 정량한계, 배경농도 중 가장 높은 수치 c를 선정한 후, 수치 c의 1개 유효숫자 형태로 반올림된 수치를 최종 기준으로 설정한다.

2.4. 기타 지하수기준 설정 근거

미국 캘리포니아주, 뉴욕주의 지하수기준은 기준 목록만 제시되어있을 뿐, 기준 설정 근거가 미비하였다. 또한 워싱턴주, 플로리다주의 지하수기준은 섭취 노출경로만을 고려한 기준 설정 근거를 제시하고 있다.^{11,12)} 그러나 본 연구는 비응용 목적의 지하수의 흡입 및 피부접촉 노출경로 기반 기준 설정 근거를 분석하기 위한 것이므로, 상기 4개 주 자료는 선진국의 지하수기준 설정 체계 비교 분석 과정에서 제외하였다.

2.5. 선진국의 지하수기준 설정 체계 비교 분석

USEPA RAGS, ASTM RBCA, 미국 매사추세츠주의 지하수기준 설정 근거를 비교한 결과, 노출경로별 수식 및 수식인자를 일부 유사 또는 일부 상이하게 적용한 것으로 나타났다. 노출경로의 경우 실내흡입은 USEPA RAGS, ASTM RBCA, 미국 매사추세츠주 모두 제시하였고, 실외흡입은 ASTM RBCA만 제시하고 있으며, 피부접촉은 USEPA RAGS와 미국 매사추세츠주에서 제시하고 있다. 이 때 피부접촉 수식의 경우 미국 매사추세츠주가 USEPA RAGS를 참고하여 동일한 수식을 적용한 것으로 나타났으나, 적용된 수식

인자를 차등 적용한 것으로 나타났다. USEPA RAGS의 피부접촉 수식인자의 경우 성인과 어린이의 2개 수용체로 구분하여 체표면적, 물과의 접촉시간, 노출기간, 체중을 적용하였으나, 미국 매사추세츠주의 피부접촉 수식인자의 경우 1~8세, 8~15세, 15~30세, 30세 이상으로 구간을 설정하여 연령별 대표값을 개별 처리하여 적용하였으며, 특히 비발암영향의 경우 1~8세 대표값을 적용함으로써 상당히 보수적인 접근법을 시도하였다. 반면 실내흡입의 경우 USEPA RAGS는 휘발계수 기본값 $0.0005 \times 1,000 \text{ L/m}^3$ 를 적용한 반면, ASTM RBCA와 미국 매사추세츠주는 휘발계수 및 확산계수를 이용한 확산식을 적용함으로써 지하수, 토양, 실내공기 등 오염원으로부터 수용체까지의 노출경로에 포함된 환경조건(예: 모관대 두께, 토양 공극성, 대기 중 확산계수, 호흡률 등)을 개별 적용하였다. 한편 발암 및 비발암영향 수식에서 평균수명은 발암영향 70년, 비발암영향 30년을 주로 사용하였으나, 미국 매사추세츠주의 경우에만 1~8세 대표값을 적용함으로써 비발암 7년을 적용하는 것으로 나타났다(Table 2).

3. 국내 타 수질 관련 매체의 기준 설정 체계 분석

3.1. 먹는물기준 설정체계 분석

먹는물기준 설정체계는 모니터링항목 선정, 후보물질 선정, 먹는물 감시항목 선정, 신규 먹는물 기준항목 선정, 신규항목의 준거치 산정, 신규항목의 먹는물기준 설정을 바탕으로 제시되었다.¹³⁾ 모니터링 항목은 정수장에서 검출 가능한 물질, 국내 미규제 먹는물기준 항목, WHO 먹는물기준, 선진국의 먹는물기준 또는 권고치 등을 바탕으로 선정한다. 후보물질은 정수장에서 한번이라도 검출된 사례가 있는 물질, 검출된 사례가 없는 물질이라도 수계배출량이 크고, 국내 유통량이 많은 물질을 선정한다. 먹는물 감시항목은 물질의 배출량, 유통량, 잔류성, 생물축적성 등의 노출개연성과 물질 자체가 가지고 있는 급성독성, (아)만성독성, 발암성, 기타 독

Table 2. Comparison of parameters for calculating groundwater standards in the United states

Parameters	Classification		
	USEPA RAGS	ASTM RBCA	Massachusetts
Exposure pathway	Indoor vapor inhalation and dermal contact	Indoor vapor inhalation and outdoor vapor inhalation	Indoor vapor inhalation and dermal contact
Receptors	Adult and child	Adult	1~8, 8~15, 15~30, and 30~ (Especially, when non-carcinogenic effects was assessed, 1~8 of age was used.)
Inhalation factors	Volatilization factor $0.0005 \times 1,000 \text{ L/m}^3$	Volatilization factor was derived from effective diffusion coefficient through foundation cracks, capillary fringe, between groundwater and soil surface, and etc.	Inhalation exposure factor was derived from indoor air generation rate, air exchange rate, and etc.
Averaging time	70 year for carcinogenic effects and 30 years for non-carcinogenic effects	70 year for carcinogenic effects and 30 (residential) or 25 (commercial and industrial) years for non-carcinogenic effects	70 year for carcinogenic effects and 7 years for non-carcinogenic effects
Note	-	-	Equation for dermal contact is based on the USEPA RAGS.

성(예, 내분비계장애영향, 돌연변이성, 생식독성, 면역독성, 피부접촉독성 등) 등의 인체 유해성을 기준으로 지속적인 검출가능성이 있고 인체위해 우려가 있는 물질을 선정한다. 신규 먹는물기준 항목은 위해성 평가치 및 사회적 관심도를 고려하여 선정한다. 신규항목의 준거치는 WHO의 방법론을 참조하여 일일허용섭취량, 체중, 일일물섭취량 등을 고려하여 산정한다. 신규항목의 먹는물기준은 준거치에 대한 공학적, 분석적, 경제적 타당성 분석을 통해 설정한다.

3.2. 수질환경기준 설정체계 분석

수질환경기준 설정체계는 수질유해화학물질 모집단 선정, 위해성평가 가능, 모니터링 대상항목 선정, 모니터링 수행, 위해성 평가, 우선검토대상항목 선정, 수질환경기준 신규 항목 선정 및 항목별 기준치 설정을 바탕으로 제시되었다.¹⁴⁾ 신규 항목 설정 시 후보물질 범위를 선정하기 위해 국내외 수질관련환경기준 항목, 국내 배출량 조사 대상 물질, 국내 수질 모니터링 자료 존재 물질을 수집하여 수질유해화학물질 모집단을 선정한다. 다음으로 위해성 평가의 수질 준거치 산출 시 반드시 필요한 발암·비발암영향 필수 수식 인자(예, 발암계수, 비발암참고치, 생물농축계수)의 유무를 확인하여 위해성 평가 가능 여부를 판정한다. 그리고 화학물질 우선순위 체계 CRS-CRAFT (Chemical Ranking System-Chemical RANking surFacewater polluTants)를 활용하여 물질별 노출, 독성, 관심인자, 자료신뢰를 근거로 물질의 우선순위를 선정하고, 분석 용이성(예, 동시 분석 가능성, 분석 비용 등)을 바탕으로 모니터링 대상항목을 선정한다. 또한 대상항목별 모니터링은 중권역 114개 지점을 대상으로 연간 3회, 3년 연속 측정을 기준으로 수행된다. 위해성 평가는 발암·비발암 영향 수식을 활용한 준거치와 모니터링 값을 산출한 후, 이 두 수치를 비교한 ECR (Exposure-Criteria Ratio)을 산출함으로써 수행한다. 우선검토대상항목은 위해성

평가 결과 산출된 ECR, 모니터링 자료의 누적 검출률, 사회적 관심도를 기준으로 선정한다. 선정된 우선검토대상항목 중 공학적·분석적·경제적 타당성 분석 및 국내외 수질관련환경기준과의 비교를 통해 항목별 수질환경기준치를 설정한 후 최종 수질환경기준 신규항목을 선정한다.

3.3. 배출허용기준 설정체계 분석

배출허용기준 설정체계는 수질오염물질의 수환경으로의 배출 여부, 수질오염물질에 대한 수질환경기준의 존재 여부, 수질 근거 배출허용기준, 기술적/경제적 타당성 분석, 배출허용기준 설정을 바탕으로 제시되었다.¹⁵⁾ 수질오염물질의 수환경으로의 배출은 산업폐수종말처리장 및 개별 배출업소에서의 배출 여부를 확인하며, 점오염원으로부터의 배출 미확인 시 비점오염원 등의 오염원에 대한 전면적인 조사를 통해 배출을 확인한다. 수질오염물질에 대한 수질환경기준의 존재 시 이를 활용하나, 부재 시 인체 및 생태 유해도, 외국 기준치, 검출한계 등을 고려하여 잠정 기준을 설정한다. 잠정 기준(안)은 수질 근거 배출허용기준과 기술 근거 배출허용기준을 비교 검토한 후 기술적/경제적 타당성 분석을 통해 가/나/특례지역에 대한 배출허용기준을 설정하며, 청정지역에 대한 배출허용기준은 가/나/특례지역에 대한 배출허용기준보다 10배 강화하여 설정한다.

3.4. 국내 타 수질 관련 매체 기준 설정체계 비교 분석

먹는물기준, 수질환경기준, 배출허용기준의 설정체계를 비교한 결과, 대상 화학물질의 거동, 각각의 먹는물, 지표수, 배출수에서의 모니터링 자료를 바탕으로 수행한 위해성평가, 사회적 요인(예: 사회적 관심도, 외국 기준치, 공학적·분석적·경제적 타당성 등)을 중심으로 유사한 설정체계를 적용한 것으로 나타났다. 단, 수질환경기준의 설정체계는 화학물질 우선순위 체계인 CRS-CRAFT의 노출, 독성, 관심인

Table 3. Comparison of procedure for establishing drinking water, surface water, and effluent water quality standards in Korea

Procedure	Korean water quality-related quality standards		
	Drinking water	Surface water	Effluent water
Selection of pollutants population	<ul style="list-style-type: none"> • Domestic filtration plant monitoring chemicals • Domestic non-regulation chemicals • External drinking water quality standards 	<ul style="list-style-type: none"> • Domestic and external water-related quality standards • Domestic toxic released inventory chemicals • Domestic surface water monitoring chemicals 	<ul style="list-style-type: none"> • Domestic and external water-related quality standards • Domestic toxic released inventory chemicals • Domestic effluent water monitoring chemicals
Selection of priority substances	<ul style="list-style-type: none"> • Priority of chemicals using exposure, toxicity, and issue • Monitoring • Human health risk assessment 	<ul style="list-style-type: none"> • Available data review (Slope factor, unit risk, references dose, reference concentration, and bioconcentration factor) • Priority of chemicals using CRS-CROWN (Exposure, toxicity, issue, and reliability) and analysis (Possibility and cost of analysis) • Monitoring • Human health and ecological risk assessment 	<ul style="list-style-type: none"> • Priority of chemicals using exposure and toxicity • Monitoring • Human health and ecological risk assessment
Selection of standard values	<ul style="list-style-type: none"> • Technical and economical analysis 	<ul style="list-style-type: none"> • Technical and economical analysis • Comparison using Domestic and external water-related quality standards 	<ul style="list-style-type: none"> • Technical and economical analysis • Comparison using Domestic and external water-related quality standards

자, 자료신뢰에 대한 등급화된 배점 방식을 통해 먹는물 기준 및 배출허용기준의 설정체계에 비해 상대적으로 체계적인 우선순위 물질 선별 단계를 이행하도록 되어 있다(Table 3).

4. 한국 지하수기준 설정체계 제안

선진국의 흡입 및 피부접촉 노출경로를 고려한 위해성 기반 지하수기준 설정 근거와 국내 타 수질 관련 매체 기준 설정체계를 바탕으로 비비용 목적의 한국 지하수기준 설정체계를 다음과 같이 제안하고자 한다. 한국 지하수기준 항목 및 기준치 설정체계는 지하수오염물질 모집단 선정, 위해성평가 가능 여부 판정, 모니터링 우선항목 선정, 모니터링 수행, 위해성평가, 지하수 수질기준 후보물질 선정, 특정유해물질 지하수 수질기준 신규항목 선정 및 항목별 기준치 설정 단계로 구성하였다. 지하수오염물질 모집단은 국외 지하수기준 공통 항목 및 국내 50만 톤 이상의 물질 유통량 자료를 포함하고, 복합체 및 Non-Cas No. 물질을 제외하고 선정한다. 위해성평가 가능 여부는 섭취 발암계수, 흡입 단위위해도, 섭취 및 흡입 비발암참고치 등 가용한 자료 존재 여부를 바탕으로 판정한다. 모니터링 우선항목은 CRS-CROWN¹⁶⁾의 노출 가능성, 인체 및 수서독성, 관심인자, 매체연계, 자료 신뢰도 평가 인자를 적용하여 우선순위를 부여한 후 분석 용이성에 따라 물질 그룹화한다. 모니터링은 지점, 빈도, 심도 등의 조건을 고려하여 수행하며, 미국의 흡입 및 피부 접촉 경로를 고려한 발암 및 비발암 수식에 따라 산출된 지하수 중 유해물질 농도, 모니터링 자료의 대표값, 누

적검출률(2회/연, 3년) 및 사회적 관심도를 고려하여 지하수 수질기준 후보물질을 선정한다. 특정유해물질은 미국의 샤워 시 실내의 흡입 및 피부 접촉 경로별 발암 및 비발암 수식에 따라 산출된 특정유해물질 농도 중 강화 수치를 선정하며, 배경농도, 공학적/분석적/경제적 영향, 지하수, 먹는물, 지표수, 배출수와 같은 국내의 수질관련기준을 고려하여 지하수 수질 관리 위원회(가칭)를 통해 신규항목을 선정하고 항목별 기준치를 설정한다(Fig. 1). 특히 기준치 설정체계는 미국의 샤워 시 실내의 흡입 및 피부 접촉 경로별 발암 및 비발암 수식을 수정 및 보완하여 산출된 지하수 유해물질 농도 중 강화 수치를 선정하며, 배경농도, 공학적/분석적/경제적 영향, 지하수, 먹는물, 지표수, 배출수와 같은 국내의 수질관련기준을 고려하여 가장 완화된 수치를 항목별 기준치로 설정한다. 이 때 실내의 흡입 및 피부접촉 경로별 발암 및 비발암 수식인자는 국내 실정을 반영하기 위해 체중, 음용수 섭취량, 샤워시간, 샤워실에 머무는 시간, 총체표면적, 노출기간, 평균수명, 일일호흡률에 한해 국내형 노출인자를 적용하며,^{14,17-19)} 목표초과발암위해도 및 목표유해지수는 10^{-5} 및 0.2~1로 설정한다. 노출 시나리오는 인위적으로 지하수를 직접 추출하여 생활용수로 사용할 경우 샤워 시 실내증기흡입 및 피부접촉을 고려하며, 자연적으로 지하수 → 토양 → 대기를 통한 실외증기흡입을 고려한다. 배경농도는 중금속에 한해 지하수 모니터링 자료의 90% 상한치를 활용한다. 공학적/분석적/경제적 영향 중 공학적 영향은 현재의 공학적 처리 능력에 의해 수계 배출 후 희석 농도로 간주할 수 있으므로 모니터링 자료의 최소값을 활용하고, 분석적 영향은 미국 NEMI (National Environmental Methods

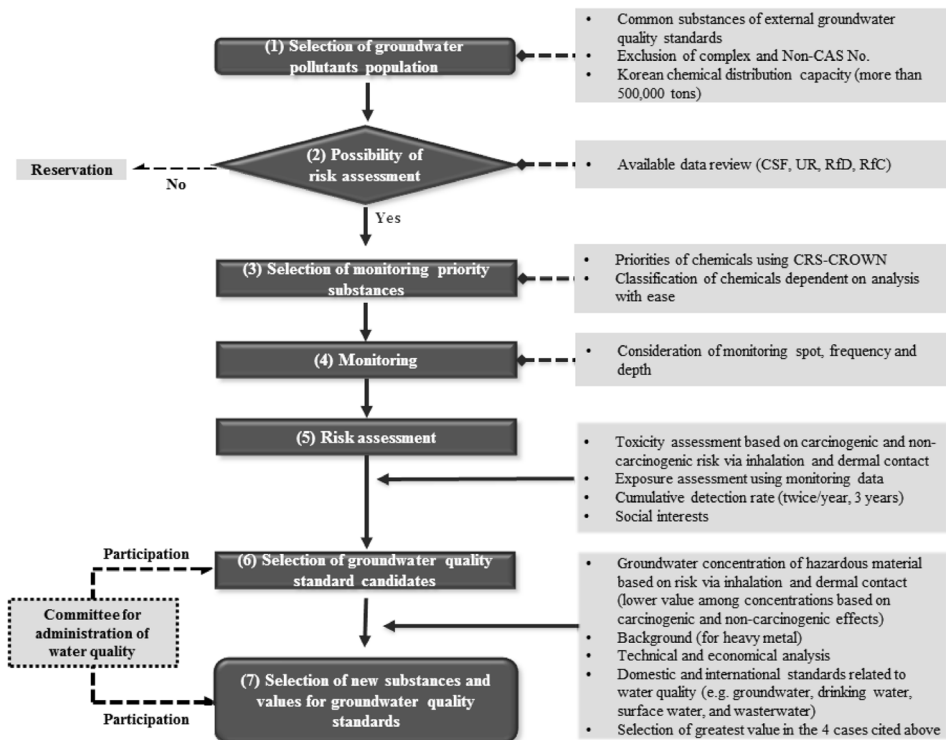


Fig. 1. System of establishing groundwater quality standards for specific harmful substances in Korea.

Index)의 분석기기별 정량한계 목록의 최소 정량한계를 활용하며, 경제적 영향은 물질 저감 비용과 물질 저감으로 인한 편익 자료를 활용한다. 국내외 수질관련기준은 국내 먹는물기준, WHO 먹는물기준, 국외 먹는물기준 중 강화 기준, 국내 지표수기준, 국외 지표수기준 중 강화 기준, 국내 배출수기준, 국외 배출수기준 중 강화 기준, 국외 지하수기준 순으로 적용한다.

5. 현재의 제한점 및 향후 방향 제시

본 연구에서 제안된 비음용 목적의 한국 지하수기준 설정체계는 위해성 평가 및 배경 농도 산출 시 가용한 지점, 빈도, 심도 등을 고려한 모니터링 자료 구축, 위해성 기반 지하수 특정유해물질 농도 산출 수식 인자의 국내화 단계가 선행되어야 한다. 모니터링 자료는 특정유해물질의 노출 수준을 평가할 수 있는 객관적인 자료로서 신뢰성 있는 자료를 확보하기 위해서는 대표적인 모니터링 지점 선정, 모니터링 다회 수행, 지하수 심도 구분 등을 중심으로 확립된 모니터링 체계에 따라 모니터링 자료가 구축되어야 한다. 또한 특정유해물질 농도 산출 수식인자는 노출기간, 체중, 샤워기간, 샤워실에 머무는 시간, 평균수명, 체표면적, 실외 호흡률 등 일부 국내화 가능한 인자가 존재하나, 지표면과 지하수면 사이의 두께, 공극성, 공기함량 등의 환경 조건이 상이하므로 이와 관련된 대표적인 국내형 인자가 확보되어야 한다.

사 사

본 연구는 국립환경과학원 ‘신규 지하수 오염물질 기준설정체계 확립 연구’사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

KSEE

참고문헌

1. Ministry of environment (ME), “2010 Groundwater water quality measurement network operating results,” pp. 1~44(2011).
2. Council for Environmental Science (CES), “A study on establishment of groundwater quality standards and groundwater pollution judgement standards,” pp. 1~178(1993).
3. Ministry of environment (ME), “A study on examination of adequacy and control scheme for groundwater quality standards,” pp. 1~152(1999).
4. Ministry of environment (ME), “A study on preceding scheme for improvement of groundwater quality standards,” pp. 1~138(2007).
5. National institute of environmental research (NIER), “A study on establishment system for standards of new groundwater pollutants,” p. 243(2012).
6. USEPA, “Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part A),” pp. 1~6-52 (1989).
7. USEPA, “Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part B),” pp. 1-54 (1991).
8. USEPA, “Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part E),” pp. 1~E-2 (2004).
9. ASTM, “Standard guide for risk-based corrective action applied at petroleum release sites,” pp. 1~53(2010).
10. Massachusetts department of environmental protection, “Background documentation for the development of the MCP numerical standards,” pp. 1~91(1994).
11. Florida department of environmental protection, “Technical report: Development of cleanup target levels (CTLs) for chapter 62-777, F.A.C.,” pp. 1~150(2005).
12. Washington state legislature, <http://apps.leg.wa.gov/WAC/default.aspx?cite=173-340-900>(2012).
13. National Institute of Environmental Research (NIER), “A study on establishment system for standards of drinking water,” pp. 1~199(2008).
14. National Institute of Environmental Research (NIER), “Derivation of Investigation and management scheme for expanding substances for protecting human health (V),” pp. 1~252(2011).
15. National Institute of Environmental Research (NIER), “A study on establishment for expanding specific water quality substances and effluent standards,” pp. 1~459(2009).
16. National Institute of Environmental Research (NIER), “A study on chemical ranking and scoring methodology for groundwater pollutants,” pp. 1~317(2009).
17. National Institute of Environmental Research (NIER), “A study on technique for assessing hazard concern chemicals (III),” pp. 1~1073(2006).
18. Statistics Korea, “2003 Life table results,” pp. 1~22(2005).
19. Ministry of environment (ME), “Korean exposure factors handbook,” pp. 1~226(2007).