

《原著》

음용 및 비음용 지하수 우선관리대상 항목 선정기법: CROWN (Chemical Ranking of Groundwater PollutaNts)

안윤주^{1*} · 이우미¹ · 정승우²

¹건국대학교 환경과학과

²군산대학교 환경공학과

Chemical Ranking and Scoring Methodology for the Drinking and non-drinking Groundwater pollutants: CROWN (Chemical Ranking of Groundwater PollutaNts)

Youn-Joo An^{1*} · Woo-Mi Lee¹ · Seung-Woo Jeong²

¹Department of Environmental Science, Konkuk University

²Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

ABSTRACT

The Korean groundwater law regulates 20 groundwater contamination parameters, including 14 specific harmful substances. Expanding the number of groundwater quality standards are needed to cope with recent groundwater quality deterioration due to the use of various chemicals. Chemical ranking and scoring system (CRS) is a scientific tool to sort priority chemicals by considering exposure and toxicity potentials. In this study, we developed a CRS for scoring and ranking of possible groundwater pollutants and screened priority substances to be later considered in the Korean standard expansion. Chemical Ranking Of groundWater pollutaNts (CROWN) incorporates important parameters consisting of exposure potential, human and water ecotoxicity, interests, and certainty. Furthermore, CROWN additionally evaluated existence of other media standards to consider impacts by contamination of other media. The 197 substances that were common to 9 countries were selected first. CROWN evaluated and ranked each chemical, and finally suggested priority substances. Suggested priority substances were classified into two groups according to the groundwater use purposes: drinking and non-drinking. The priority substances were further classified into 1st and 2nd group priorities. The 1st group consists of 75 substances, including the all the Korean groundwater standard parameters. CROWN will be used in selecting groundwater pollutants for possible inclusion in the Korean standard expansion.

Key words : Chemical ranking and scoring (CRS), Groundwater, Groundwater quality standard, Groundwater pollutants

1. 서 론

우리나라에서는 1990년대 초반 건설부에서 지하수법을 제정한 이후로 1996년, 2002년 지하수관리 기본계획을 수립하여 국가적 차원의 관리를 실시하고 있다. 그러나 산업화에 따라 오염물질 증가, 농약 및 비료 사용증가, 군부대 및 공단지역에서 발생하는 유류, 유기용제, 폐광 및 폐기물매립장으로부터 유출되는 유독물질, 지하수 내 방사

선 물질 등 지하수 오염물질은 점차 증가하고 갈수록 심각해지고 있어 이를 관리하기 위한 방안이 필요하다. Kim et al.(2010)은 1996년부터 2007년까지 지하수 오염추세를 분석한 결과 도시와 공단지역의 수질오염이 심화되고 있으며, 2000년대 이후 수질악화가 가속화 되고 있다고 보고하였다. 한편 지하수 수질은 토양, 지표수 등 타 매체와 밀접하게 연계되어있어 지하수 오염이 인체 및 환경에 미치는 영향도 지하수 용도에 따라 다양하게 나타나므로 위

*Corresponding author : anyjoo@konkuk.ac.kr

원고접수일 : 2012. 8. 17 심사일 : 2012. 11. 28 게재승인일 : 2012. 11. 29

질의 및 토의 : 2013. 4. 30 까지

해성기반의 지하수 연구의 필요성이 높아지고 있다.

현재 우리나라는 ‘지하수의 수질보전 등에 관한 규칙’에서 이용목적에 따라 음용수, 생활용수, 농·어업용수, 공업용수로 분류하고 있다. 음용수의 경우 먹는물 관리법에 의거하여 먹는물 수질기준을 적용하고 있으며, 비음용 목적은 일반오염물질 4항목(pH, 총대장균군, NO₃-N, Cl⁻)과 특정 유해물질 15항목(Cd, As, CN, Hg, 유기인, Phenol, Pb, Cr⁶⁺, TCE, PCE, 1,1,1-trichloroethane, Benzene, Toluene, Ethyl benzene, Xylene)의 총 19개 항목에 대해 관리하고 있다. 그러나 기준 초과시 용도를 변경하여 사용가능한 현 용도별 관리의 문제점을 인식하고 음용·비음용의 이원화 방안이 제안되고 있다(MOE, 2005). 한편 외국의 경우 대부분의 국가에서 음용수원으로 지하수를 이용하고 있어 비교적 다양한 지하수오염물질항목을 설정하고 이를 관리하고 있으며 과학적 기반의 접근으로 기준항목 및 기준치를 설정하고 있다. 미국 뉴욕주 323개, 워싱턴 주 175개, 일본 26개 항목 등 외국의 현황과 비교시 우리나라의 지하수오염기준항목의 확대가 절실히 필요한 실정이다.

화학물질 선정기법(Chemical ranking and scoring, CRS)은 정량적으로 우선순위 화학물질을 선별할 수 있는 과학적인 방법이다. 미국, 유럽, 캐나다 등에서는 유해물질 관리를 위하여 CRS를 활용하고 있다. 국외의 대표적인 CRS기법은 미국에서 개발된 CHEMS-1(Chemical Hazard Evaluation for Management Strategies)(US EPA, 1994)과 SCRAM(Scoring and Ranking Assessment Model)(Snyder et al., 2000), 유럽연합의 EURAM(European Union Risk Ranking Method)(Hanset et al., 1999), 캐나다의 ARET(Acekerated Reduction/Elimination of Toxics)(Ali, 2001) 등이 있다. 국내의 경우 ‘위해우려물질 선정 및 평가연구’(MOE, 2003)에서 CRS-Korea를 개발하였으며(Kim et al., 2003; Park et al., 2005; Choi et al., 2005), 최근 토양과 지표수의 경우 각 매체특성을 고려한 우선순위 오염물질 선정기법을 개발하였다. 토양의 경우 220개의 토양오염물질을 대상으로 인체 및 생태독성, 노출가능성, 관심인자를 고려하여 토양오염기준항목 확대를 위한 선정기법(CROSS; Chemical Ranking Of Soil Substances)을 개발하고 토양오염 우선순위 물질을 도출한 바 있다(NIER, 2007; Jeong and An, 2012). 지표수의 경우 161개의 후보물질을 대상으로 CRAFT(Chemical RANKing of surFacewater polluTants)를 구축하였다(NIER, 2010; Nam et al., 2011). 지하수매체 오염과 상관성이 높은 토양과 지표수의 경우 각 매체 특성을

을 고려한 우선순위 선정기법을 개발하였고 따라서 지하수도 체계적이고 과학적인 오염물질 관리를 위해서는 이에 매체특성을 고려한 우선순위 선정기법 개발이 요구된다.

본 연구에서는 화학물질을 대상으로 과학적 기반의 우선관리대상 지하수 오염물질 선정을 위한 기법 (Chemical Ranking Of groundWater pollutaNts, CROWN)을 구축하고 우선관리대상 항목을 도출하였다. CROWN의 체계는 CROSS를 토대로 하여 타 매체연계성을 고려하고 지하수 용도의 차별성을 부여하기 위한 평가인자들을 포함하였다.

2. 연구방법

화학물질 우선순위 선정을 위해 기개발된 다양한 선정기법을 조사하여 비교 검토하였다. 현재 다양한 CRS기법이 개발되어 있으며 그 목적 또한 다양하다. 본 연구에서는 여러 CRS기법 중 미국의 ASTDR(Agency for Toxic Substances and Disease Registry)/EPA(Environment Protection Agency)의 유해물질 우선순위 도출방법(ASTDR, 2007), SCRAM(Snyder et al., 2000)과 CHEMS-1(US EPA, 1994; Swanson et al., 1997), 유럽의 EURAM(Hanset et al., 1999), 캐나다의 ARET(Ali, 2001), 그리고 국내에서 개발된 위해우려물질 우선순위 선정기법인 CRS-Korea(Kim et al., 2003; Park et al., 2005; Choi et al., 2005), 최근 토양오염기준항목 확대를 위해 개발된 CROSS(NIER, 2007; Jeong and An, 2012)를 참고로 하여 지하수 우선관리대상 항목선정을 위한 체계를 제안하였다.

우선순위 선정을 위한 지하수 오염 후보물질은 미국 15개 주(노스캐롤라이나, 뉴욕, 뉴저지, 메릴랜드, 매사추세츠, 버지니아, 버몬트, 아이다호, 와이오밍, 워싱턴, 위스콘신, 유타, 일리노이, 콜로라도, 플로리다)와 아일랜드, 이탈리아, 스위스, 호주, 덴마크, 슬로베니아, 네덜란드, 일본 등 총 9개국의 지하수 수질기준 항목(음용수가 아닌 지하수 기준으로 명시된 항목만 포함)을 대상으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 우선관리대상 지하수오염 후보물질 선정

우선관리대상 후보물질은 다음과 같은 기준에 의해 선정하였다. (1) 8개 주요국가(네덜란드, 덴마크, 스위스, 슬로베니아, 아일랜드, 이탈리아, 호주, 일본)에서 음용수가 아닌 지하수 수질기준으로 명시된 모든 항목을 조사하

였다. (2) 미국 15개주 (노스캐롤라이나, 뉴욕, 뉴저지, 메릴랜드, 매사추세츠, 버지니아, 버몬트, 아이다호, 와이오밍, 워싱턴, 위스콘신, 유타, 일리노이, 콜로라도, 플로리다)의 지하수 기준항목을 조사하여, (3) 15개주 중 10개 주 이상에서 공통적으로 규제하고 있는 화학물질을 선별하였다. 미국 15개 주의 전체 지하수 수질기준항목 총 677개 중 10개 주 이상에서 공통적으로 고려하고 있는 화학물질은 67개였다. 미국을 제외한 8개 국가의 전체 지하수 기준항목 중 화학물질은 총 216개이었으며, 미국 10주에서 공통적으로 고려하고 있는 67개 물질중 216개 물질에 포함되지 않는 12개 물질을 포함하여 총 228개 화학물질을 선별하였다. 그 후 (4) 국내 상황을 반영하기 위하여 2006년 환경부 유통량 자료에서 국내 유통량 50만 톤 이상 화학물질 7개를 추가한 후 (5) 복합체(complex)와 CAS No가 없는 화학물질을 제외한 후 최종적으로 197개 후보물질을 선정하였다.

3.2. 우선관리대상 지하수 오염물질 선정기법(CROWN) 구축

기개발된 우선순위 선정기법들의 평가인자를 비교분석하고(An et al., 2008) 지하수 매체의 오염특성을 반영하여 지하수 우선관리대상 물질 선정을 위한 CRS기법인 CROWN을 구축하였다. CROWN에서는 노출가능성, 인체 독성, 생태독성, 관심인자, 타매체 연계기준, 자료신뢰도를 평가인자로 고려하였다. 한편 본 연구에서 구축하고자하는 CRS기법은 특정매체에 대한 우선관리대상물질을 선정한다는 점에서 토양오염물질 우선순위 선정기법인 CROSS와 그 목적이 부합한다. 따라서 기본적인 평가체계는 CROSS을 토대로 하되 지하수 매체특성을 반영할 수 있

는 평가인자를 포함하였다. 지하수 오염물질은 토양과 지표수와 밀접하게 연계되어 있어 타매체 연계기준 인자를 포함하였고 사용용도는 음용과 비음용으로 이원화 하여 차별성을 부여하였다. 또한 자료의 유·무, 실측치와 예측치가 우선순위 도출에 미치는 영향을 고려하기 위하여 자료신뢰도 평가인자를 포함하였다.

3.2.1. CROWN 알고리즘

CROWN의 기본체계는 화학물질에 대한 각 평가인자의 합을 산출함으로써 우선순위를 선정하도록 구성하였다(Fig. 1). 각 화학물질에 대한 노출가능성(생물축적성 + 잔류성 + 지하수 이동성 + 유통량 + 타 매체 연계배출량), 독성(인체(발암성 + 급성 + 아만성 + 기타독성) + 생태(수서급성 + 수서(아)만성)), 관심인자(규제국가 수 + 사건사고 + 물질특성 + 오염도), 타 매체 연계기준(음용: 수질기준 + 토양기준 + 국내 먹는물 기준 + WHO먹는물 기준/비음용: 수질기준 + 토양기준), 자료신뢰성(축적성 + 잔류성 + 유통량 + 매체연계배출량 + 수서 급성독성 + 수서(아)만성 독성)의 총합이 그 물질의 점수가 되고, 이를 순위화하여 우선순위 물질을 선정하였다. 한편 노출가능성, 독성, 관심인자는 같은 비율로 배점하였고, 타 매체연계 기준 중 특히 먹는물 기준의 경우 다른 인자들에 비해 점수배점을 크게 하여 지하수 용도에 따른 우선순위 물질 순위에 차별성을 부여하였다.

3.2.2. 노출가능성

노출가능성은 생물축적성(5점), 잔류성(5점), 지하수 이동성(10점), 유통량(5점), 매체연계배출량(5점) 등 총 30점을 부여하였다(Table 1). 생물축적성은 수서생물에 대한

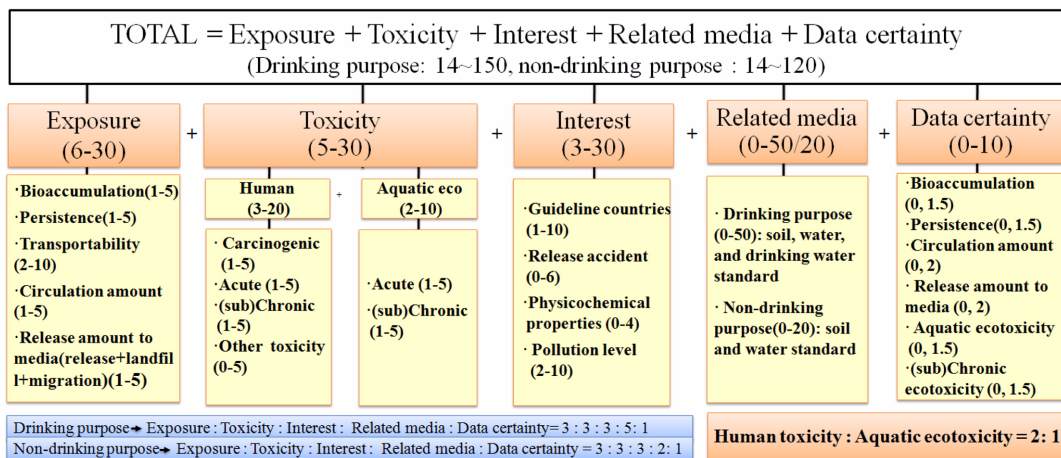


Fig. 1. Algorithm of Chemical Ranking Of groundWater pollutaNts (CROWN).

Table 1. Scoring table for exposure potential in CROWN

Bioaccumulation		Persistence		Transportability		Circulation amount		Release amount to soil and water	
Score	BAF, BCF, K_{ow}	Score	$t_{1/2}$ in water (days)	Score	K_d (L/kg)	Score	(Kg/y)	Score	Sum of release, landfill, and migration amount (kg/y)
5	> 100,000	5	> 100	10	≤ 0.5	5	> 10,000	5	> 1,000,000
4	> 10,000- ≤ 100,000	4	> 50- ≤ 100	8	> 0.5- ≤ 1	4	> 5,000- ≤ 10,000	4	> 100,000- ≤ 1,000,000
3	> 1,000- ≤ 10,000	3	> 20- ≤ 50	6	> 1- ≤ 100	3	> 1,000- ≤ 5,000	3	> 10,000- ≤ 100,000
2	> 100- ≤ 1,000	2	> 4- ≤ 20	4	> 100- ≤ 1,000	2	> 500- ≤ 1,000	2	> 1,000- ≤ 10,000
1	≤ 100	1	≤ 4	2	> 1,000	1	≤ 500	1	≤ 1,000

Table 2. Scoring table for human toxicity factors in CROWN

Score	Acute toxicity			(Sub) Chronic toxicity		Carcinogenicity		Other human toxicity*
	oral LD50	Inhalation LC50	R-phrase	oral N(L)OAEL	inhalation N(L)OAEL	IARC	IRIS	
5	≤ 5	≤ 15	R23, 26	≤ 1	≤ 3	1	A	All
4.5	-	-	R20	-	-	-	-	-
4	> 5- ≤ 50	> 15- ≤ 150	R28	> 1- ≤ 10	> 3- ≤ 30	2A	B1, B2	4 of 5
3.5	-	-	R25	-	-	-	-	-
3	> 50- ≤ 500	> 150- ≤ 1,500	-	> 10- ≤ 100	> 30- ≤ 300	2B	C	3 of 5
2.5	-	-	R22	-	-	-	-	-
2	> 500- ≤ 5,000	> 1,500- ≤ 15,000	-	> 100- ≤ 1,000	> 300- ≤ 3,000	3	D	2 of 5
1	> 5,000	> 15,000	-	> 1,000	> 3,000	4	E	1 of 5

* 5 toxicity effects: Endocrine effects, genotoxicity(including mutagenicity), reproductive toxicity, immunotoxicity, and dermal toxicity

bioaccumulation factor(BAF)또는 bioconcentration factor (BCF)를 이용하였으며 실측치를 우선으로 하고 부재시 예측치를 이용하였다. 실측치는 미국 환경청(US EPA)의 ECOTOX DB, 미국 국립 의학 도서관(US National Library of Medicine, NLM)의 Hazardous Substances Data Bank(HSDB), 그리고 유럽물질화학국(ECB)의 European chemical Substances Information System (ESIS)로부터 수집하였고, 예측치는 US EPA의 Estimation Program interface (EPI) suit로부터 K_{ow} 를 이용하였다. 잔류성의 경우 반감기를 종말점으로 평가하였으며 EPI suit의 자료를 사용하였다. 지하수 이동성은 토양에서 지하수로의 오염물질 노출가능성을 고려하기 위해 토양흡착계수(K_d)를 반영하였으며 미국 에너지부(US department of energy)에서 운영하는 ‘The risk assessment information system(RAIS)’와 ‘우선관리대상 토양오염물질 선정연구’(NIER, 2007)의 자료를 이용하였다. 한편 지하수의 경우 배출량자료가 존재하지 않으므로 물질별 유통량 자료를 이용하여 지하수로의 오염물질 노출을 간접적으로 평가하였다. 또한 매체연계배출량은 토양오염물질과 수질오염물질이 지하수로 누출될 가능성을 고려하기 위하

여 포함하였으며 수계/토양 배출량, 폐기물 매립량, 폐수/폐기물 이동량 자료를 이용하였다. 유통량자료의 경우 2006년 환경부의 ‘화학물질유통량 조사결과’를 활용하였으며 수계배출량, 폐수/폐기물 이동량 자료는 ‘2006년 환경부 배출량 자료’를, 토양배출량 및 폐기물 매립량 자료는 ‘우선관리대상 토양오염물질 선정연구’(NIER, 2007)를 이용하였다.

3.2.3. 인체독성

급성(5점), (아)만성독성(5점), 발암성(5점), 기타 인체독성(5점)을 평가인자로 고려하였으며 총 20점을 배점하였다(Table 2). 급성독성은 HSDB내 제시된 섭취와 호흡에 대한 반수치사량(LD50, LC50)을 우선시하고 독성값 부재시 ESIS에서 제시하고있는 R-phrase를 활용하였다. 만약 섭취와 호흡에 대한 두 개 이상의 R-phrase가 존재시 더 높은 점수를 이용하였다. (아)만성독성은 IRIS에 제시된 섭취와 호흡에 대한 (아)만성독성 자료를 이용하고 두 종말점에 대한 독성값이 모두 존재시에는 높은 점수를 적용하였다. 발암성은 국제 암연구소(International Agency of Research on Cancer, IARC)와 미국환경청 IRIS의 발암

Table 3. Scoring table for aquatic ecotoxicity factors in CROWN

Score	Acute toxicity L(E)C50 (mg/L)	(sub)Chronic toxicity N(L)OEC (mg/L)	
	Fish, invertebrate, or algae	Fish, plant	Invertebrate
5	≤ 1	≤ 0.1	≤ 10
4	> 1- ≤ 10	> 0.1- ≤ 1	> 10- ≤ 100
3	> 10- ≤ 100	> 1- ≤ 10	> 100- ≤ 1,000
2	> 100- ≤ 1,000	> 10- ≤ 100	> 1,000- ≤ 5,000
1	> 1,000	> 100	> 5,000

Table 4. Scoring table for interests section of CROWM

Number of standard countries*		Release accident		Physicochemical properties	
Score	Countries	Score	Happened	Score	Explosive, flammable, corrosive, oxidative
10	9	6	In Korea and other countries	4	4 properties
9	8	4	In Korea	3	3 properties
8	7	2	In other countries	2	2 properties
7	6	0	No data	1	1 properties
6	5			0	Not applicable
5	4				
4	3				
3	2				
2	1				

* 8 countries (except US) and US (if considered common in 10 states)

등급자료를 이용하였으며 IARC 발암등급을 우선시하였다. 기타 인체독성으로는 내분비계장애영향, 돌연변이성, 생식 독성, 면역독성, 피부접촉독성 등 총 5가지 독성영향을 고려하였으며 각 영향에 1점씩 부여하고, 독성영향 수에 따라 배점화 하였다. 내분비계장애물질에 해당되는 오염물질은 세계생태보전기금(World Wildlife Fund, WWF)에서 제시하고 있는 자료를 활용하였으며(MOE, 1999), 그 외 독성영향은 ESIS의 R-phrase를 이용하였다.

3.2.4. 수서생태독성

급성(5점)과 (아)만성독성(5점)을 평가하였으며 총 10점을 배점하였다(Table 3). 각 자료는 US EPA의 ECOTOX DB로부터 수집하였으며, 각 평가인자별 어류, 무척추동물, 조류에 대한 1개 이상의 독성값이 존재할 경우 최저값(점수배점이 더 높은 값)을 이용하였다. 아만성독성의 경우 어류와 수서식물에 대한 점수배점과 무척추동물의 점수배점 달리하였는데 이는 SCRAM의 배점체계를 참고하였다. 독성값 부재시 US EPA의 EPI suit의 예측치를 활용하였다.

3.2.5. 관심인자

관심인자로는 각 지하수 항목에 대해 규제하고 있는 국

가수(10점), 국내외 사고사건사례(6점), 물질의 물리화학적 특성(4점), 오염도(10점)를 고려하였다(Table 4). 규제국가수는 우선관리대상 후보물질 선정시 조사한 8개 국가와 미국(10주 이상 규제시)에서 규제하고 있는 국가수 (총 9개국)을 종말점으로 평가하였다. 국내외 사고사건사례는 오염물질의 수계노출유무를 평가하였으며 자료는 한국화재보험협회와 US Chemical Safety and Hazard Investigation Board로부터 수집하였다. 물질특성은 ECB의 R-phrase를 이용하여 가연성(R10, R11, R12, R15, R17), 폭발성(R2, R3), 부식성(R34, R35), 산화성(R7, R8)을 평가하였다. 오염도는 모니터링자료 가용시 활용할 수 있도록 포함하였으며 현행기준 존재유무에 따라 평가할 수 있도록 기준을 제시하였다(Table 5). 한편 오염도평가를 위한 지하수 모니터링자료 이용시 최대값을 기준으로 평가하는 것이 안전할 것으로 사료된다.

3.2.6. 타매체 연계기준

지하수는 토양과 수질의 특성을 모두 고려할 필요가 있다. 지하수는 최초오염이 발생하는 매체가 되기도 하지만 오염된 수질이나 토양으로 인해 이차오염 가능성이 크므로 타매체로부터 오염될 가능성을 고려할 필요가 있다. 따

Table 5. Scoring table for pollution levels in CROWN

Score	Monitored data	Standard in Korea	Except standard in Korea
10	Serious	2 time exceed of standard level	3 times above lowest foreign standard level
8	High	Exceed of standard level	2 times above lowest foreign standard level
6	Moderate	Standard level ~ half of standard level	Exceed of lowest foreign standard level
4	Low	Half of standard level ~ detection limit	Below of lowest foreign standard level
2	Below of detection limit		

Table 6. Scoring table for standard of media (soil and water) standard related with groundwater* in CROWN

Score	Drinking purpose		Non-drinking purpose	
	Presence of standard of soil, water, and drinking water		Presence of standard in soil and water	
10	Soil standard		Soil standard	
10	Water standard		Water standard	
20	Drinking water standard			
10	Drinking water standard of WHO			

*Sum of score, which is exist standard in soil, water, and drinking water standard

Table 7. Scoring table for data certainty in CROWN

Bioaccumulation		Persistence		Circulation amount		Release amount to soil and water		Acute water ecotoxicity		(sub)Chronic water ecotoxicity	
1.5	Measurement data	1.5	Measurement data	2	Data exist	2	Data exist	1.5	Measurement data	1.5	Measurement data
0	Predicted data (K _{ow})	0	Predicted data	0	no data	0	no data	0	Predicted data	0	Predicted data

라서 토양오염기준, 수질환경기준을 매체연계 기준으로 고려하였다(Table 6). 한편 지하수의 용도는 크게 음용과 비음용으로 구분할 수 있으므로 용도에 따른 오염물질 우선순위선정이 가능하도록 이원화하였다. 음용의 경우 먹는물 기준을 고려하여 국내 먹는물 기준과 World Health Organization(WHO)에서 선정하고 있는 먹는물 기준항목(WHO, 2006)을 모두 고려하였고 국내 기준에 더 큰 점수를 배점하였다.

3.2.7. 자료신뢰도

실측치 부재시 예측치를 활용할 때, 그리고 자료 존재의 유무는 우선순위선정 결과에 높은 영향을 미친다. 또한 자료의 부재는 결과의 불확실성과 직결된다. 따라서 이를 고려하기 위하여 자료신뢰도를 평가인자로 반영하였다(Table 7). 대상인자는 생물축적성, 잔류성, 유통량, 매체연계 배출량, 수서생태 급/(아)만성독성 등이며 각 인자별 최고점이 5점인 경우(생물축적성, 잔류성, 수서생태 급/(아)만성독성) 자료신뢰도 점수를 1.5점으로 배점하고 최고점이 10점(유통량, 매체연계배출량)인 인자는 2점으로 부여

하여 총 10점으로 배점하였다. 한편 자료가 부재인 평가인자의 경우 각 인자의 중간점수를 부여하여 평가하였다.

3.3. 우선관리대상 지하수 오염물질 선정

지하수오염 후보물질 총 197개를 CROWN에 의해 우선순위를 도출한 후 1순위와 2순위 물질로 구분하여 우선순위 물질을 선별하였다(Fig. 2; Table 8, 9). 한편 오염도의 경우 현행기준이외 대부분의 물질의 모니터링 자료가 부족하여 일괄적으로 오염도 점수배점의 중간 점수인 6점을 부여하여 평가하였다. 1순위 물질은 규제국가 점수가 7점 이상이거나(21개 물질) 규제국가 점수가 3점 이상이고 자료신뢰도 3.5점 이상인(54개 물질)물질 총 75개가 선정되었고 나머지 122개 물질은 2순위 그룹으로 분류하였다. 이러한 순위 분류기준은 점수와 무관하게 우선관리가 필요한 물질임에도 하위에 위치하는 것과 자료부재 및 예측치사용에 따른 불확실성을 고려해 주기 위함이다.

1순위 물질을 물질 군별로 분류한 후 현행 기준물질 포함여부를 평가한 결과 중금속류(26개), 유기염소계 화합물(15개), 방향족 화합물(9개), 농약 및 기타(25개) 중 유기

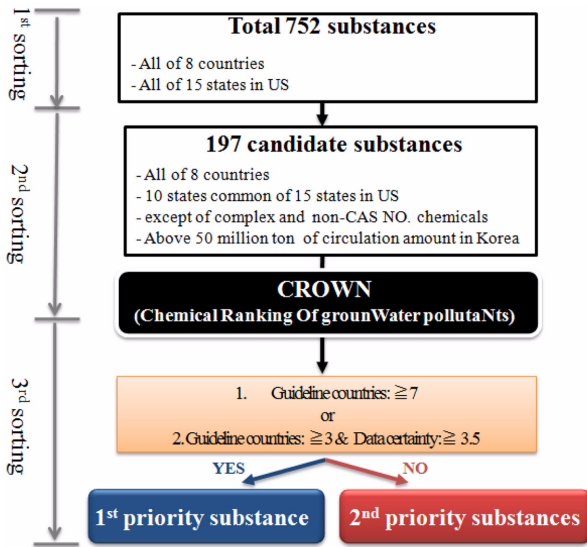


Fig. 2. Procedure for selecting priority substances of groundwater pollutant.

인을 제외한 특정유해물질 14개와 일반오염물질 2개 (nitrate, chloride) 등 총 16개의 물질이 상위에 위치하는 것을 확인하였다. 한편 현행기준의 특정유해물질 14개 중 우선순위 항목에서 빠진 유기인은 우리나라와 일본을 제외한 다른 나라에서는 개별농약으로 관리하고 있고 우리나라도 먹는물 기준에서는 5개의 농약(diazion, parathion, fenitrothion, carbaryl, 1,2-dibromo-3-chloropropane)으로 관리하고 있으며, 아일랜드, 스위스, 슬로베니아의 경우 phosphate 항목으로 관리하고 있었다. 1순위 물질에서 현행 기준을 제외한 상위 10개 물질은 음용의 경우 Cu, trichloromethane(chloroform), Zn, tetrachloromethane, Se, Mn, F⁻, dichloromethane, Sb, Ni 순이었으며, 비음용은 Cu, Zn, trichloromethane (chloroform), Sb, Ni, 1,2-dichloroethane, tetrachloromethane, dichloromethane, Sb, vinyl chloride 순으로 도출되었다.

Table 8. CROWN evaluation rankings for 75 priority groundwater substances for drinking purpose

Rank	Substance	Rank	Substance	Rank	Substance
<i>1st priority group</i>					
1	Benzene	26	Chromium, total	51	Molybdenum
2	Cadmium	27	Aluminium	52	Methyl-tert-butylether (MTBE)
3	Lead	28	Nitrate-N	53	Simazine
4	Arsenic	29	Vinylchloride	54	Hexachlorobenzene
5	Tetrachloroethene	30	Dichloroethene(1,1-)	55	Naphthalene
6	Copper	31	γ-HCH(lindane)	56	Dieldrin
7	Mercury	32	Di(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP)	57	Heptachloro
8	Cyanides	33	Pentachlorophenol	58	Fluoranthene
9	Toluene	34	Styrene	59	Magnesium
10	Trichloroethene	35	Benzo(a)pyrene	60	Beryllium
11	Trichloromethane (chloroform)	36	Carbofuran	61	Isopropanol
12	Xylenes	37	Endrin	62	Pentachlorobenzene
13	Phenol	38	Trichloroethane(1,1,1-)	63	Trichlorobenzenes
14	Zinc	39	Iron	64	Di-n-butyl phthalate
15	Tetrachloromethane	40	Ammonia	65	Cobalt
16	Ethylbenzene	41	Barium	66	Chlorobenzene
17	Selenium	42	Chloride(mg Cl/L)	67	Silver
18	Manganese	43	DDT	68	Tin
19	Fluoride(mg F/L)	44	Atrazine	69	Trichloroethane(1,1,2-)
20	Dichloromethane	45	Chlordane(total)	70	Sodium
21	Antimony	46	Hexachlorobutadiene	71	Thallium
22	Boron	47	Alachlor	72	Potassium
23	Nickel	48	Endosulfan	73	Vanadium
24	Dichloroethane(1,2-)	49	Nitrite-N	74	EDTA
25	Chromium VI	50	Dichlorobenzene(1,2-)	75	Phosphate

Table 9. Ranking of 197 groundwater contaminants for non-drinking purpose

Rank	Substance	Rank	Substance	Rank	Substance
<i>1st priority group</i>					
1	Benzene	26	Di(2-ethylhexyl)phthalate(DEHP)	51	Trichlorobenzenes
2	Cadmium	27	Selenium	52	Boron
3	Lead	28	Styrene (vinylbenzene)	53	Di-n-butyl phthalate
4	Arsenic	29	Endosulfan	54	Cobalt
5	Tetrachloroethene	30	Carbofuran	55	Chlordane (total)
6	Copper	31	Methyl-tert-butylether (MTBE)	56	Hexachlorobutadiene
7	Mercury	32	Benzo(a)pyrene	57	Chlorobenzene
8	Zinc	33	Chromium,total	58	Tin
9	Phenol	34	Endrin	59	Silver
10	Chromium VI	35	Manganese	60	Alachlor
11	Cyanides	36	Fluoride (mg F/L)	61	Trichloroethane(1,1,2-)
12	Toluene	37	Naphthalene	62	Nitrite-N
13	Trichloromethane (chloroform)	38	Hexachlorobenzene	63	Dichlorobenzene(1,2-)
14	Trichloroethene	39	Dieldrin	64	Molybdenum
15	Xylenes	40	Aluminium	65	Trichloroethane(1,1,1-)
16	Antimony	41	Barium	66	Thallium
17	Nickel	42	Heptachloro	67	Sodium
18	Dichloroethane(1,2-)	43	Fluoranthene	68	Simazine
19	Tetrachloromethane	44	Magnesium	69	Iron
20	Ethylbenzene	45	Dichloroethene(1,1-)	70	Nitrate-N
21	Dichloromethane	46	Beryllium	71	Vanadium
22	Ammonia	47	Isopropanol	72	Potassium
23	Vinyl chloride	48	Pentachlorobenzene	73	Chloride (mgCl/l)
24	γ-HCH (lindane)	49	DDT	74	EDTA
25	Pentachlorophenol	50	Atrazine	75	Phosphate
<i>2nd priority group</i>					
76	PCBs	117	Bromoxynil	158	Butanol
77	Acrylonitrile	118	Phenantrene	159	Dichlorprop
78	Anilines	119	Butylacetates	160	Imide
79	Acetone	120	Dibromo-3-chloropropane,1,2-(DBCP,1,2-)	161	Calcium
80	Dichloropropene(1,3-)	121	Dichlorvos	162	Dichloroethene, trans-1,2-
81	Ethylacetate	122	Dichlorobenzene(1,4-)	163	Tetrahydrothiophene
82	Methanol	123	Adsorb-cash halogen connections	164	Chloronaphthalene
83	DDD	124	Diuron	165	Chlorophenol
84	Aldrin	125	Titanium	166	Diethylene glycol
85	Formaldehyde	126	Chlorfenvinphos	167	Picloram
86	PCB 52	127	Nitrophenols	168	Sulphate
87	Acrylamide	128	Benzo(k)fluoranthene	169	Polycyclic aromatic hydrocarbons
88	Cresols (sum)	129	Dichloropropane, 1,2-	170	Dichloroethane(1,1-)
89	Dioxin	130	Pyridine	171	Uranium
90	Thiuram	131	Ethylene glycol	172	Dichloroethene(1,2-)
91	Maneb	132	Resorcinol (m-dihydroxybenzene)	173	MCPA
92	PCB 101	133	Isoproturon	174	Nitrilotriactic acid
93	Heptachloro-epoxide	134	Benzo(a)anthracene	175	Amides
94	Triflualin	135	Anthracene	176	Indeno(1,2,3-cd)pyrene

Table 9. Ranking of 196 groundwater contaminants for non-drinking purpose

Rank	Substance	Rank	Substance	Rank	Substance
95	Permethrin	136	Chlorine	177	Triazine
96	Nitrobenzene	137	Lithium	178	Thiocyanate
97	α -HCH	138	Trichlorophenols	179	Mecoprop
98	Dichlorophenoxy acetic acid, 2,4-	139	Cis-1,2-dichloroethylene	180	Chloromethylphenols(4-)
99	Carbaryl	140	Methylisobutylketone	181	Triazoles
100	Thiobencarb	141	Methoxychlor	182	Dichloropropane
101	Chloropyrifos	142	Butane	183	Silicon dioxide
102	Hexane, n-	143	DDE	184	Strontium
103	PCB 138	144	Benzo(ghi)perylene	185	Monochloramine (Chloramine)
104	PCB 180	145	Tetrachlorobenzenes	186	Tribromomethane
105	Toxaphene	146	Chlorophenol(2-)	187	Dichloroaniline
106	Azinphos-methyl	147	Tetrahydrofuran	188	Sulfate
107	β -HCH	148	Trichlorophenoxy propionic acid, 2,4,5-(Silvex)	189	Benzotriazole
108	Mineral oil	149	Pentachloroaniline	190	Bromide (mgBr/l)
109	Trichlorobenzene, 1,2,4-	150	PCB 118	191	Benzonitriles
110	Trichlorophenol(2,4,6-)	151	PCB 28	192	Diethylether
111	Catechol (o-dihydroxybenzene)	152	Isopropyl benzene	193	Tellurium
112	Methylethylketone	153	Dibromomethane(1,2-)	194	Radium, 226 and 228 (combined)
113	Malathion	154	Chrysene	195	Carbonate
114	PCB 153	155	Benzo(b)fluoranthene	196	Bicarbonate
115	Tetrachlorophenols	156	Dichloroethene	197	Cyclohexanone

3.4. 연구의 제한점 및 향후 방향제시

본 연구에서는 우선순위 항목 선정에 위한 모집단으로 외국에서 관리하고 있는 지하수 항목을 대상으로 하였기 때문에 국내에서 유통되지 않은 물질이 일부 포함되어 있을 개연성이 있다. 오염도의 경우 모니터링 자료가 현행 지하수 기준항목 및 일부 관심물질로 한정되어 있어 우선순위 항목 산출시 반영하지 못하였으나 질산염과 같은 빈번하게 문제시 되고 있는 오염물질의 경우 오염도를 고려한다면 순위가 변동될 수 있다. 또한 무자료와 예측치를 사용하여 평가한 인자의 경우 향후 자료를 보완하여 재평가가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 네덜란드, 아일랜드, 덴마크, 이탈리아, 스위스, 호주, 슬로베니아, 일본 등 8개국과 미국 15개 주의 지하수 수질기준 항목을 대상으로 후보물질을 선정하고 지하수 오염물질 우선관리대상 물질 선정기법인 CROWN을 구축하였다. CROWN에 의해 도출된 우선순위 항목은 1, 2순위로 구분하였으며, 1순위 물질에는 현행기준을 포함하여 총 75개의 물질이 도출되었다. 1순위

그룹에는 현행기준(16개)과 국제적 관심물질(POPs: 6개, Pre-POPs: 3개, PAHs: 3개) 등이 포함되어 있으며 ‘신규 지하수 오염물질 조사 연구’에서 수행한 20개 모니터링 물질 중 15개 물질(Al, Sb, Br, Cu, 1,2-dichloroethane, 1,1-dichloroethene, dichloromethane, fluoride, Mn, Ni, Se, tetrachloromethane, 1,1,2-trichloroethane, trichloromethane, Zn)을 고르게 포함하고 있다는 점에서 우선관리대상 물질 선정과정이 적절한 것으로 판단된다. 그러나 관심인자인 오염도의 경우 모니터링 자료가 충분하지 않은 관계로 일괄적으로 중간점수를 부여하여 평가하였다는 한계점이 있다. 따라서 향후 모니터링 자료를 충분히 확보하여 고려할 필요가 있다. 본 연구에서 CROWN을 통해 도출된 1순위 우선관리대상 물질은 향후 지하수 오염물질 기준 확대 및 지하수 모니터링 계획 등 지하수 정책 수립에 활용되고 있다.

사 사

본 연구는 국립환경과학원의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

- Ali, B., 2001, Multistakeholder collaboration outcomes in environmental voluntary initiatives: The case of A.R.E.T. initiative.
- An, Y.-J., Jeong, S.-W., Kim, T.-S., Lee, W.-M., Nam, S.-H., and Beak, Y.-B., 2008, Assessment factors for the selection of priority soil contaminants based on the comparative analysis of chemical ranking and scoring systems, *J. of Soil & Groundwater Env.* **13**(6), 62-71.
- APAT, 2004, Qualita' Acque Sotteranee.
- ATSDR, 2007, 2007 CERCLA Priority List of Hazardous Substances That Will Be The Subject of Toxicological Profiles and Support Document, Division of Toxicology, Washington DC., USA.
- BAFU, 2004, Wegleitung Grundwasserschutz.
- Choi, S.-P., Park, H.-S., Lee, D.-S., Shin, Y.-S., Kim, Y.-S., and Shin, D.-C., 2005, Development of CRS-Korea II and its application to setting the priority of toxic chemicals for local provinces, *J Environ Toxicol*, **20**(4), 311-325.
- Danish EPA, 2002, Guidelines on remediation of contaminated sites.
- Environmental Agency of The Republic of Slovenia, 2008, Water quality in Slovenia.
- Hanset, B.G., van Haelst, A.G., Leeuwen, K.V., and van der Zandt, P., 1999, Priority setting for existing chemicals: European union risk ranking method, *Environ Toxicol Chem*, **18**, 772-779.
- Irish EPA, 2003, Towards setting guideline values for the protection of groundwater in Ireland (Interim report)ion (2006/118/EC).
- Jeong, S.-W. and An, Y.-J., 2012, Construction of a chemical ranking system of soil pollution substances for screening of priority soil contaminants in Korea, *Environ Monit Assess*, **184**, 2193-2204.
- Kim, Y.-S., Park, H.-S., Lee, D.-S., and Shin, D.-C., 2003, Comparisons of chemical ranking and scoring methods, *J Environ Toxicol*, **18**(3), 183-191.
- Kim, G., Choi, D. Yoon, P., and Kim, K., 2010, Trends of groundwater quality in the areas with a high possibility of pollution, *J Korean Geo environ Soc*, **11**(3), 5-16.
- MOE (Ministry of Environment), 1999, Environmental source-book.
- MOE (Ministry of Environment), 2003, Selection and Evaluation of risk concern materials.
- MOE (Ministry of Environment), 2005, Improved methods on groundwater quality management and pollution remediation.
- MOE/NIER (Ministry of Environment/National Institute of Environmental Research), 2006, Development of integrated methodology for evaluation of water environment (III)-Establishment of risk assessment systems for human and aquatic ecosystem.
- Nam, S.-H., Kwak, J.-I., Yoon, S.-J., Jeong, S.-W., and An, Y.-J., 2011, Chemical ranking and scoring methodology for the protection of human health and aquatic ecosystem in Korea surface-water: CRAFT (Chemical RAnking of surFacewater polluTants), *J Korean Soc Water Quality*, **27**(6), 804-812.
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2007, Establishment of priority soil pollutants.
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2010, Establishment of priority pollutants for human and aquatic ecosystem.
- Park, H.-S., Kim, Y.-S., Lee, D.-S., Shin, Y.-S., Choi, S.-P., Park, S.-E., Kim, M.-H., Yang, J.-Y., and Shin, D.-C., 2005, Development of Korea chemical ranking and scoring systems (CRS-Korea) and its application to prioritizing national toxic chemicals, *J Environ Toxicol*, **20**(2), 109-121.
- Snyder, E.M., Snyder, S.A., Giesy, J.P., Blonde, S.A., Hurlburt, G.K., Summer, C.L., Mitchell, R.R., and Bush, D.M., 2000, SCRAM: A scoring and ranking system for persistent, bioaccumulative, and toxic substances for the North American Great lake. Part I. Structure of the scoring and ranking system. *Environ Sci Pollut Res*, **7**, 51-61.
- Swanson, M.B., Davis, G.A., Kincaid, L.E., Schultz, T.W., Bartmess, J.E., Jones, S.L., and George, E.L., 1997, A screening method for ranking and scoring chemicals by potential human health and environmental impact. *Environ Toxicol Chem*, **16**, 372-383.
- US EPA, 1994, Chemical hazard evaluation for management strategies: A method for ranking and scoring chemicals by potential human health and environmental impacts.
- WHO, 2006, Guidelines for drinking-water quality, 1st addendum to 3rd edition, Volume 1 Recommendations.