

국내·외 Chemical Ranking and Scoring 체계 비교분석을 통한 우선순위 토양오염물질 선정을 위한 평가인자 도출

안윤주^{1*} · 정승우² · 김태승³ · 이우미¹ · 남선화¹ · 백용욱^{1,3}

¹건국대학교 환경과학과, ²군산대학교 환경공학과, ³국립환경과학원 토양지하수연구과

Assessment factors for the Selection of Priority Soil Contaminants based on the Comparative Analysis of Chemical Ranking and Scoring Systems

Youn-Joo An^{1*} · Seung-Woo Jeong² · Tae-Seung Kim³ · Woo-Mi Lee¹
Sun-Hwa Nam¹ · Yong-Wook Baek^{1,3}

¹Department of Environmental Science, Konkuk University

²Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

³Soil and Groundwater Division, National Institute of Environmental Research

ABSTRACT

Soil quality standards (SQS) are necessary to protect the human health and soil biota from the exposure to soil pollutants. The current SQS in Korea contain only sixteen substances, and it is scheduled to expand the number of substances. Chemical ranking and scoring (CRS) system is very effective to screen the priority chemicals for the future SQS in terms of their toxicity and exposure potential. In this study, several CRS systems were extensively compared to propose the assessment factors that required for the screening of soil pollutants. The CRS systems considered in this study include the CHEMS-1 (Chemical Hazard Evaluation for Management Strategies), SCRAM (Scoring and Ranking Assessment Model), EURAM (European Union Risk Ranking Method), ARET (Accelerated Reduction/Elimination of Toxics), CRS-Korea, and other systems. The additional assessment factors of CRS suitable for soil pollutants were suggested. We suggest soil adsorption factor as an appropriate factor of CRS system to consider chemical transport from soil to groundwater. Other factors such as soil emission rate and cases of accident of soil pollutants were included. These results were reflected to screen the priority chemicals in Korea, as a part of the project entitled 'Setting the Priority of Soil Contaminants'.

Key words : Soil quality standards (SQS), Chemical ranking and scoring (CRS), Assessment factor, Priority chemicals

요 약 문

환경에는 매우 다양한 유해화학물질이 존재하며 지속적으로 새로운 화학물질이 개발되고 다시 환경 중으로 유출되고 있다. 화학물질의 관리나 규제를 위해서는 우선관리대상 오염물질(Priority Contaminants)을 결정해야 하는데, 이를 위한 과학적이고 정량적인 방법론으로는 우선순위선정(Chemical Ranking and Scoring, CRS)기법이 대표적이다. CRS기법에는 개발목적에 따라 다양한 평가인자들이 적용되는데 본 연구에서는 토양매체에서의 우선순위물질 선정시 필요한 인자를 제시하기 위해 다양한 CRS기법을 비교분석하여 토양특성을 고려할 수 있는 평가인자를 제시하였다. 연구대상 CRS는 국외에서 개발된 CHEMS-1, EURAM, SCRAM, ARET와 국내에서 개발된 CRS-Korea 및 그 외 기타 관련연구들이다. 기존에 개발된 CRS에 적용된 평가인자들을 비교분석한 결과 노출과 독성을 고려하여 우선순위물질을 선정하는데, 주로 화학물질의 잔류성, 생물축적성, 배출량 등을 공통적인 노출인자로 적용하고 있었고 독성

*Corresponding author : anyjoo@konkuk.ac.kr

원고접수일 : 2008. 9. 5 심사일 : 2008. 9. 19 게재승인일 : 2008. 11. 27

질의 및 토의 : 2009. 2. 28 까지

인자로는 인체와 환경독성을 고려하고 있다. 본 연구에서는 토양매체의 우선순위물질선정을 위하여 이러한 CRS기법들이 공통적으로 적용하고 있는 인자들 이외에 토양매체의 특성을 고려할 수 있는 토양배출량, 토양오염 사고사건사례, 선진국의 규제국가수 등을 평가인자로 제안하였으며, 지하수매체와의 연계성을 위하여 지하수이동성 인자를 새로이 추가하였다. 본 연구결과는 CRS기법을 비교분석하여 토양에서의 유해화학물질 우선순위 선정시 고려되어야 할 평가인자를 제안한 연구로 토양에 대한 CRS기법개발을 위한 기반연구로 활용될 수 있을 것이다.

주제어 : 토양질기준, 우선순위선정(CRS), 평가계수, 우선순위물질

1. 서 론

신규 화학물질의 생산 · 유통량 증가는 환경으로의 배출량 증가를 의미하며, 이는 관리해야 할 화학물질의 수적증가와 직접적으로 연결된다. 토양매체의 경우 현재 우리나라에서 관리하고 있는 항목은 토양오염 우려기준과 대책기준으로 구분된 17항목으로서, 기준설정에 대한 과학적 타당성이 충분하지 않고 기준 항목수 또한 선진국에 비해 부족한 실정이다. 따라서 환경부는 ‘토양보전 기본계획 수립 연구’에서 토양오염기준을 선진국 수준으로 접근하기 위해 2015년까지 토양오염기준 항목을 30개까지 단계적으로 확대할 계획이다(환경부, 2005). 한편 수환경의 경우 2006년도부터 ‘물환경 종합평가방법개발’ 연구사업을 통해 관리필요성이 있는 신규 화학물질을 선정하여 사람의 건강보호를 위한 수질환경기준 항목수를 기존 9항목에서 7항목을 추가하여 18항목으로 확대한 바 있다(환경부, 2006).

환경다매체에서 우선관리대상이 되는 화학물질을 선정하기 위한 과학적이고 정량적인 기법으로는 화학물질 우선순위 선정(Chemical Ranking and Scoring; CRS) 체계가 대표적이라 할 수 있다. 미국, 유럽, 캐나다를 포함한 선진국에서는 유해화학물질의 관리를 위해 CRS기법을 적극 활용하고 있다. 예를 들면 미국의 독성물질 및 질병사고 대응관리국(Agency for Toxic Substances and Disease Registry; ATSDR)에서는 국가정화우선대상부지(National Priority List; NPL)에서 빈번하게 검출되는 오염물질에 대해 인체위해성을 고려한 우선관리대상 오염물질을 발표하고 있다(ATSDR, 2005). 또한 CHEMS-1(Chemical Hazard Evaluation for Management Strategies) (US EPA, 1994; Swanson et al., 1997)과 SCRAM(Scoring and Ranking Assessment Model) (Snyder et al., 2000a; 2000b; 2000c)은 미국에서 개발된 인체 및 환경위해성 기반의 화학물질 스크리닝 도구라 할 수 있다. 유럽국가의 경우 유럽연합에서 개발된 EURAM(European Union Risk Ranking Method)를 이용하고 있으며(Hansen et al., 1999), 캐나다는 독성, 잔류성, 생물축적성이 있는 물

질에 대해 ARET(Accelerated Reduction/Elimination of Toxics) 목록을 선정하고 있다(Ali, 2001; EC, 1994).

한편 국내에서는 2003년도에 환경부의 ‘위해우려물질 선정 및 평가 연구’에서 유해화학물질의 독성과 인체 및 환경으로의 노출을 고려한 선정기법을 개발하여 유해화학물질 관리에 필요한 기법을 제안하고 우선관리가 필요한 위해우려물질 목록을 작성한 바 있다. 환경부에서는 국내형 화학물질 우선순위 선정기법을 개발하기 위하여 대표적인 CRS기법들을 비교분석하여 국내 적용성을 검토하고 이를 토대로 유해화학물질 관리를 위한 CRS-Korea라는 우선순위 선정기법을 개발하였으며 그 후 CRS-Korea의 문제점을 보완하여 CRS-Korea 를 제안하였다(김예신 등, 2003; 박화성 등, 2005; 최승필 등, 2005).

위에서 언급된 대표적인 CRS기법을 포함한 51개의 CRS기법에 대해 조사된 보고서(Daivs et al., 1994)와 국내에서 개발된 CRS기법은 대기, 수질, 그리고 환경다매체를 대상으로 개발된 것이며, 토양매체의 특성을 고려한 토양오염물질에 대한 CRS기법은 아직 제안된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 토양오염기준의 확대를 위해서 우선적으로 선정되어야 할 토양오염물질의 스크리닝을 위해, 국내 · 외에서 개발된 다양한 CRS체계를 비교분석하고, 이를 토대로 우선순위 토양오염물질 선정을 위해 고려되어야 할 평가인자를 제시하였다. 한편 본 연구는 “우선관리대상 토양오염물질 선정 연구”(국립환경과학원, 2007)의 일환으로, 토양환경기준 확대를 위한 토양오염 우선순위 물질을 선정하는데 반영되었다.

2. 연구방법

기준에 개발된 화학물질의 우선순위 선정기법을 고찰하기 위해 51개의 CRS방법을 비교 평가한 문서(Davis et al, 1994), 미국 ATSDR의 2005 CERCLA(The Comprehensive Environment Response, Compensation, and Liability Act) 유해물질 우선순위목록의 알고리즘(ATSDR, 2005), 유럽연합 EURAM(Hansen et al., 1999), 미국 CHEMS-1(US EPA, 1994; Swanson et al., 1997), 미

국 SCRAM(Snyder et al., 2000a; 2000b; 2000c), 캐나다의 ARET(Ali, 2001; EC, 1994)에 대한 대표적인 기법들을 비교분석하였다.

국내의 우선순위물질선정에 대한 연구로는 환경부 위해 우려물질 선정 및 평가 연구(환경부, 2003), 물환경종합평가기법 개발 조사연구(환경부, 2006), 폐수배출허용기준 적용대상물질 확대지정을 위한 연구(환경부, 2001) 등이 있으며, 이들은 기타매체의 우선순위물질 선정에 대한 적용 기법을 참고하기 위해 포함시켰다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 국내외 우선순위결정 기법 비교

3.1.1. 미국 ATSDR/EPA

CERCLA법(42 U.S.C. 9604 [i][2], 104(i)(2) of CERCLA)에 의해서 EPA와 ATSDR은 NPL(National Priority List)사이트에서 가장 빈번하게 검출되는 최소 100여개 물질에 대해 인체 위해성을 고려한 우선관리대상 오염물질을 발표하게 되어있다. 미국의 우선관리대상 유해물질 선정방법은 세 가지 인자에 대해 평가 점수를 부여하고 합산하여 순위를 결정하게 된다. 세 가지 평가 인자는 NPL내 검출빈도, 독성, 인체노출가능성이다. NPL내 검출빈도와 독성은 각각 600점을 부여하고 인체노출가능성의 경우 노출과 농도로 구분하여 각 300점씩 부여하여 총점은 1800점이 된다.

NPL내 발견빈도는 HazDat내 1674개 NPL 사이트에서 발견되는 유해물질별 검출빈도에 따라 최고검출빈도에 대한 대상물질의 검출빈도의 비율에 의해 점수가 산출된다. 따라서 선별된 대상물질은 모두 1~600점의 점수를 받게 된다.

독성점수는 누출 신고 대상용량(RQ: Reportable Quantity)을 독성위해순위결정(Toxicity hazard scoring)에 사용하고 있다. RQ를 사용하는 이유는 다음과 같다. (1) RQ 도출과정에서 이미 독성평가관련인자들이 고려되어졌고, (2) 현장에서 발견되고 있는 대부분의 유해물질에 관한 정보를 수용하고 있으며, (3) 독성평가과정 중 사용된 모든 데이터가 검증된 문헌을 사용하였고, (4) RQ의 인체영향 수치 결정에 있어 weight-of-evidence 기법을 사용하였기 때문이다. 그러나 RQ가 보고되지 않은 물질의 경우 RQ 산정방법에 의해 독성/환경점수(TEs: Toxicity/Environmental Score)를 산정하여 이용한다. TEs는 만성독성과 발암성 각각에 대하여 RQ를 산정한 후 이중 가장 낮은

값으로 결정된다. 대상물질이 환경에 노출되었을 경우 생분해/가수분해/광분해 등의 성질을 가지고 있다면, 한 단계 높게 TES 점수가 결정된다. 만성독성은 동물실험결과로부터 얻어진 Minimum Effective Dose(MED)를 인체 MED로 환산하여 이용한다. 인체 MED로부터 1~10의 Rating Value by dose(RVd)값을 얻고 동물실험결과로부터 독성영향 종류에 따라 Rating Value based on effect(RVe)값을 1~10까지 결정하게 된다. 결정된 RVd와 RVe를 곱하여 종합점수를 산정하고, 얻어진 종합점수에 의해 1, 10, 100, 1000, 5000에 해당하는 RQ값이 결정된다. 발암성은 US EPA 또는 국제암연구소(IARC; International Agency for Research on Cancer)에 의해 분류된 ABC에 의해 TES수치가 1, 10, 100으로 부여된다. 한편 독성점수 결정 시 초기에 로그값을 RQ/TEs에 바로 취해 1, 10에 해당하는 물질들의 독성점수가 과다하게 산정되는 폐단이 있어 최근에는 2/3에 COR (cumulative ordinal rank)값을 지수로 취해 구해진 값을 600과 곱해 최종 독성점수를 계산하고 있다. 한편 정보가 유효하지 않은 물질의 경우 해당 유해물질과 유사한 구조를 가지고 있는 물질의 RQ값을 TES로 사용하고 있다.

인체노출가능성점수(600점)는 노출농도점수(300점)와 노출점수(300점)의 합으로 결정된다. 인체노출농도는 각 환경매체의 평균 오염농도로부터 오염원기여도(source contribution, SC)를 산출하고 SC를 300점을 기준으로 환산하여 이용한다. 인체노출점수는 최고노출빈도수에 대한 노출빈도수의 비율에 노출점수인 300을 곱하여 결정된다.

ATSDR이 우선관리대상물질 목록을 작성하는 목적은 법에 의해서 독성관리종합계획(Toxicological profiles)을 수립하는데 목적이 있다. 즉 우선관리대상물질목록은 유해물질의 경향을 파악할 수 있으므로 유해물질 관리, 독성자료 구축 및 모니터링측면에서 아주 유용한 정보로 활용되고 있다.

3.1.2. 미국 CHEMS-1

CHEMS는 인체 및 환경에 대한 화학물질의 유해성을 평가하기 위한 스크리닝 도구로 독성 및 잠재적 노출을 평가하여 화학배출자료를 평가하는 것에 목적이 있다(US EPA, 1994; Swanson et al., 1997).

인체영향은 급성영향으로 경구독성(LD50)과 흡입독성(LC50)을 평가한다. 만성영향은 발암성과 기타영향(돌연변이원성, 성장독성, 생식독성, 신경독성 그리고 기타 만성영향)을 이용하여 평가한다. 발암성의 경우 US EPA와 IARC의 발암분류등급을 바탕으로 점수를 부여한다. 기타

영향(돌연변이원성, 발육독성, 생식독성, 신경독성 그리고 기타 만성영향)은 각각의 독성종말점에 대해 정성적으로 평가하여 점수를 산출한다. 환경영향의 경우 급성독성은 설치류의 경구독성(LD50)과 어류독성(LC50)을 평가하고 만성독성은 어류독성(LOEL, Lowest Observed Effect Level)을 이용하여 평가한다. CHEMS-1의 노출 평가 자료는 연간 TRI자료와 잔류성(생물학적 비생물학적 분해)과 생물농축계수(수서 BCF)를 포함한다. 인체영향은 0~20 점까지(급성과 만성영향 각각 10점씩), 생태영향은 0~15 점, 노출은 1~7.5로 최고점은 262.5가 된다. 이를 0~100의 scale로 정규화 하여 순위선정에 이용한다.

3.1.3. 미국 SCRAM

SCRAM은 미국 Great Lakes의 오염물질의 우선순위를 도출하기 위해 개발된 모델이다. SCRAM은 불확실성을 고려하여 평가한다는 점에서 다른 screening system과 차별화된다(Mitchell et al., 2002). 잔류성, 생물축적성, 독성의 인자와 각 인자별 불확실성을 고려하여 평가한다.

(1) 생물농축성에 의거한 순위산정 생물농축성은 BAF(Bioaccumulation Factors), BCF(Bioconcentration Factors), K_{ow} 을 이용하여 평가한다. 생물농축성은 값에 따라 5개의 구간으로 나누어 1~5점까지 부여한다. 측정 BAF, 측정 BCF, K_{ow} , 예측 BAF, 예측 BCF의 순으로 우선순위를 두며 자료의 신뢰성에 따라 0~5점의 불확실성 점수를 결정하여 최종 점수를 산출한다.

(2) 환경 내 잔류성 환경 내 잔류성은 생물, 대기, 토양, 퇴적물, 수계 등 5계의 환경매체의 반감기를 이용한다. 만약 반감기에 대한 실측치 부재시 Level III Multi-Media Model을 이용하여 예측할 수 있다. 생물농축성과 마찬가지로 환경 내 잔류성 평가도 자료의 신뢰성에 따라 각 범주별 불확실성 점수를 0~2점 부여한다. 이와 같은 방법으로 산정된 잔류성 점수는 그 결과에 따라 급성·(아)만성 독성영향평가 방법으로 나누게 된다. 만약 1 또는 2점을 얻은 경우라면 급성 독성영향평가로, 3, 4, 5점의 경우는 만성 독성영향평가로 진행된다. 또한 1단계와 2단계의 점수가 산정되면 각각의 점수를 이용하여 노출잠재력에 관한 위해성평가가 가능하다.

(3) 급성·(아)만성 독성 영향평가 SCRAM은 다른 model과 달리 생태독성평가의 대상생물종을 육상의 경우 식물, 포유류, 파충류, 조류, 무척추동물을 수서는 식물, 양서류, 온수생장어류, 냉수생장어류, 무척추동물 등 다양한 생물을 대상으로 한다. 각 종에 대한 수집된 독성자료의 가장 민감한 값을 채택하여 점수로 산정한다(0~5점). 불확실성

점수는 가용한 독성자료가 없다면 각 구분별로 최대점수(5점)를 부여한다. (아)만성 인체독성은 일반독성, 생식독성, 성장독성, 발암성, 기타독성의 5가지 범주로 구분하고 있다. 기타독성의 경우 유전독성, 행동영향, 면역체계영향, 내분비계 영향 등을 평가한다. 이러한 인자들의 수집자료는 가장 민감한 값을 채택하여 점수로 산정한다. 불확실성 점수의 경우 가용한 독성자료가 없다면 기타 독성 항목을 제외한 4가지 항목에서 최대점수를 부여받게 된다.

SCRAM은 생물농축성, 잔류성, 급성육상독성, 급성수서독성, (아)만성육상독성, (아)만성수서독성, (아)만성 인체독성 등에 대한 영향을 평가하고 각 인자들에 대한 불확실성을 고려하여 화학물질의 우선순위를 선정한다.

3.1.4. 유럽 EURAM

EURAM은 IUCLID(International Uniform Chemical Information Database)내 표시된 HPVCs(High production volume chemicals, 연간생산량 천 톤 이상 물질)의 유해 화학물질 순위를 결정하기 위한 방법이다(Hansen et al., 1999). EURAM은 간단한 노출-영향 모델을 이용하여 인체 및 환경의 잠재적인 위해성을 평가하고 이를 바탕으로 물질의 우선순위를 선정한 뒤 최종적으로 전문가들의 판단을 거쳐 우선순위목록을 제안한다.

EURAM에서는 노출을 수용체에 따라 환경노출, 인체노출의 두 가지로 구분하여 평가하고 있다. 환경의 경우 배출(emission), 분배(distribution), 분해(Degradation)의 세 가지 노출인자를 고려하며 인체의 경우 배출, 분배의 두 가지 인자를 고려하여 노출량을 산출한다. 환경노출의 경우 배출은 화학물질의 이용 형태(T_I , T_{II} , T_{III} , T_{IV})에 따라 사용 비율을 적용한다. 분배의 경우 Mackay level I 모델을 이용하여 각 매체별(대기, 물, 토양, 퇴적물, 부유물, 생물) 분배 비율을 산출한다. 적용한다. 분해는 OECD의 고유 방법에 따른 결과를 토대로 물 환경 내 생분해 후 배출 물질의 잔존 비율을 적용한다. 매체에 대한 환경 노출치는 배출, 분배, 분해의 세 가지 인자를 모두 곱하여 산출하며, 이를 0~10점으로 점수화한다. 인체 노출의 경우 배출은 환경노출과 같은 방식으로 산출하며 분배의 경우 끓는점과 증기압 그리고 $\log K_{ow}$ 를 이용하여 산출한다.

환경 영향치는 다양한 생물종에 대한 독성 자료로부터 가용한 만성값이 있을 경우 이를 이용하고 만성값이 없을 경우 급성값을 이용하여 평가한다. 가용한 독성자료의 생물종 수에 따라 평가계수가 결정되며 수집된 독성자료의 최저값에 적용하여 0~10점의 환경영향치를 산출하게 된

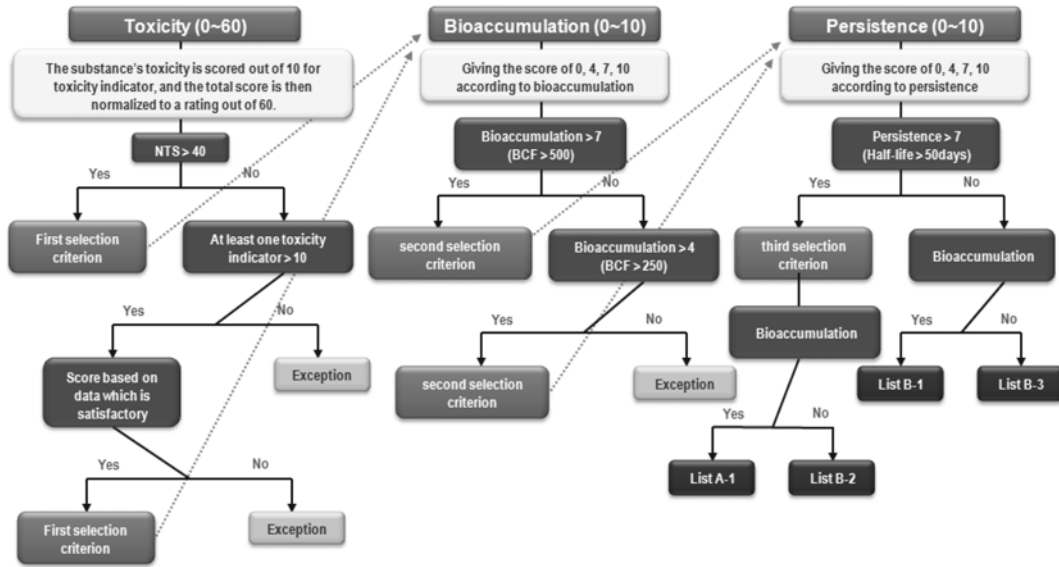


Fig. 1. Process of selecting and categorizing chemicals by ARET (EC, 1994).

다. 인체영향은 반복 용량 독성, 유전독성, 생식 독성에 대한 실험 결과인 R-phrases를 사용하여 결정한다.

3.1.5. 캐나다 ARET

캐나다 내에서 30종의 PBTs(Persistent/Bioaccumulative/Toxic substances)에 대한 배출 제거와 87종의 잠재적 유해성을 지닌 독성 물질에 대한 배출 저감을 위해 개발된 비강제 프로그램이다(Ali, 2001; EC, 1994). ARET list는 캐나다 환경에서 검출되는 화학물질 목록으로부터 선정되는데, 이 물질들은 인체 및 동식물에 대한 유해영향, 지속성, 생물축적성을 가지고 있다. ARET 후보물질은 다음과 같은 기준에 의해 선정되며, 화학물질 선정 및 분류 과정은 Fig. 1과 같다.

(1) 독성에 따른 화학물질 순위(Ranking chemicals by toxicity)

CESARS(Chemical Evaluation Search and Retrieval System) 데이터베이스 내 화학물질을 대상으로 독성, 생물축적성, 잔류성을 바탕으로 점수화한 MOEE(Ontario Ministry of Environment and Energy) 점수체계를 적용하여 화학물질의 우선순위를 선정한다.

(2) 독성에 따른 화학물질 심사(Screen chemicals by toxicity)

NTS(Normalized Toxicity score)를 산출하기 위해서는 MOEE 점수체계의 6개 독성 지표(예. 급성 치사, 만성/아만성 식물독성, 만성/아만성 비동물독성, 만성/아만성 동물독성, 최기성, 발암성 또는 유전독성/돌연변이독성) 중 최

소 3개 이상의 독성자료가 존재해야 하고, 한 지표 내 여러 가지 값이 산출될 경우 가장 민감한 종을 대상으로 보수적인 경우(worst case)에 기초하여 NTS를 산출하여야 한다. 이 때 NTS가 40점 이상인 화학물질은 제 1 선택 범주에 포함된다. 다음으로 6개 독성 지표 중 하나라도 10점 이상인 화학물질 역시 제1선택범주에 포함된다.

(3) 생물농축성에 따른 점수화(Score for bioconcentration)

BCF(Bioconcentration Factor) 500 이상인 화학물질의 경우 7~10점을 부여받아 제2선택범주에 포함된다.

(4) 지속성에 따른 점수화(Score for persistence)

반감기가 50일 이상인 화학물질의 경우 7~10점을 부여받아 제3선택범주에 포함된다.

위의 과정에 의해 선정된 후보물질들은 그 특성에 따라 list A-1, list A-2, list B-1, list B-2, list B-3의 5가지로 구분된다(Table 1).

3.1.6. 한국 CRS-Korea

2003년 환경부에서 수행된 “위해우려물질 선정 및 평가 연구”의 경우(환경부, 2003), 유독물(유해화학물질관리법), 국제적 관심 물질(국내 내분비계 장애물질 연구 사업 대상 물질, OECD SIDS(Screening Information DataSets)의 대량생산화학물질(High Production Volume, HPV), 스톡홀름 잔류성유기오염물질(Persistence Organic Pollutants, POPs), 국내 관심 물질(국내 대기·수질·토양 특정 오염 관리 물질, 국내 화학물질 배출량 조사 대상 물질, 제

Table 1. Five lists of substances categories in ARET (Ali, 2001)

Categories	Remark
List A-1	30 substances which met the persistence, bioaccumulation and toxicity criteria
List A-2	2 substances which met the three criteria but failed to gain consensus on reduction targets
List B-1	8 substances which met the toxicity and bioaccumulation criteria
List B-2	33 substances which met the persistence and toxicity criteria
List B-3	44 substances that met only the toxicity criterion

Table 2. Comparison of CRS Systems (I)

CRS (Score)		CHEMS-1 (0-100)	SCRAM (4-85)	EURAM (0-200)	ARET (0-70)	CRS-Korea (0.8-200)	
Exposure vs. Toxicity		Exp. < Tox.	1.5 : 1	1 : 1	-	1 : 1	
Functional Relation of Exposure and Toxicity		Multiplication	Summation	Multiplication	-	Multiplication	
Exposure	Bioaccumulation	1, 2.5	1-5	0-3	0-10	1-5	
	Persistent	1, 2.5	1-5	0.1-1.0	0-10	1-5	
	Emission (TRI)	-	-	a	-	1-10	
Human Toxicity	Carcinogenic	0-5	1-5	0-10	0-10	1-5	
	Acute	Intake	0-5	-	0-3	0-10	1-5
		Inhalation					
	Chronic	b	1-5	b	0-10	1-5	
Other toxicity	0-5	1-5	0-10	0-10	1-5		
Environ. Toxicity	Acute	Terrestrial	0, 5	1-5	c	-	1-5
		Aquatic				0-10	
	Chronic	Terrestrial	-	1-5	c	0-10	1-5
Aquatic		0, 5					

^a Depends on usage pattern

^b Evaluate chronic toxicity as carcinogenicity and other specific effects

^c Apply assessment factor to the lowest NOEC or L(E)C50

* Refer to Choi et al., 2005 (최승필 등, 2005)

품에 포함 가능한 인체 유해 물질) 등의 유해화학물질을 대상으로 CRS 프로그램을 개발하여 인체 및 환경에 대한 위해 우려 물질 106종을 선정한 바 있다. 이 연구는 화학물질 자체 독성과 유통량, 배출량, 인체 및 환경으로의 노출 경로 등을 종합적으로 고려하여 위해우려가 큰 물질을 선정하였다.

3.1.7. 국내 주요연구

2001년 환경부에서 수행된 “폐수배출허용기준 적용대상 물질 확대지정을 위한 연구”에서는 국내의 먹는물 수질기준(감시) 항목, 미국의 우선순위 독성물질 항목, 일본의 건강보호 관련(감시) 항목, 유럽의 우선순위 독성물질 항목 등을 대상으로 발암성, 생물농축계수, 유통량, 배출량 등을 고려하여 수질유해화학물질 116종을 선정한 바 있다.

물환경종합평가기법 개발 조사연구(III)의 일환으로 수행된 “인체 및 수생태계 위해성평가체계 구축”(환경부, 2006) 연구에서는 국내 수계 유출가능성이 있는 유해화학

물질 검토 대상 항목 275종을 선정하여 유해물질의 유해성, 잔류성, 배출량 등의 평가기준을 적용하여 1, 2, 3, 4 순위 그룹별 우선순위 목록을 도출한 바 있다(안윤주 등, 2008). 이 때 후보 물질로 활용된 검토 대상 유해화학물질은 2005년 환경부에서 수행된 “2003년도 화학물질 배출량 조사결과”의 조사 대상 화학 물질 148종, 2003년 환경부에서 수행된 “위해우려물질 선정 및 평가 연구”의 56종, 그리고 “폐수배출허용기준 적용대상물질 확대지정을 위한 연구”의 71종을 포함한다.

3.2. 우선순위 결정기법 비교평가

Table 2는 국외의 대표적 CRS인 CHEMS-1, SCRAM, EURAM, ARET와 국내에서 개발된 CRS-Korea의 기본 구조를 분석한 것이고, Table 3은 각 CRS의 개발주체와 목적을 비교한 표이다. 대부분의 우선순위평가기법들은 기본적으로 노출과 독성을 고려하여 유해물질 순위를 결정하고 있다. CHEMS-1은 노출과 독성 중 독성에 더 큰

Table 3. Comparison of CRS Systems (II)

CRSs	Developer	Usage of priority setting	Target media
ATSDR/EPA	US EPA & ATSDR	Preparation of a priority hazardous chemicals commonly found at NPL sites	soil
CHEMS-1	USA	Evaluation of the toxic effects and the potential exposure to chemicals by considering chemical release data	multi-media
SCRAM	USA	Analytical tool in chemical scoring and ranking	multi-media
EURAM	European Union	Regulation of high production volume chemicals (> 1,000 ton/y) in EU	multi-media
ARET	Canada	Release reduction of toxic substances	multi-media
CRS-Korea	Korea	Screening toxic chemicals for monitoring and risk assessment	multi-media

* Refer to Davis GA et al., 1994

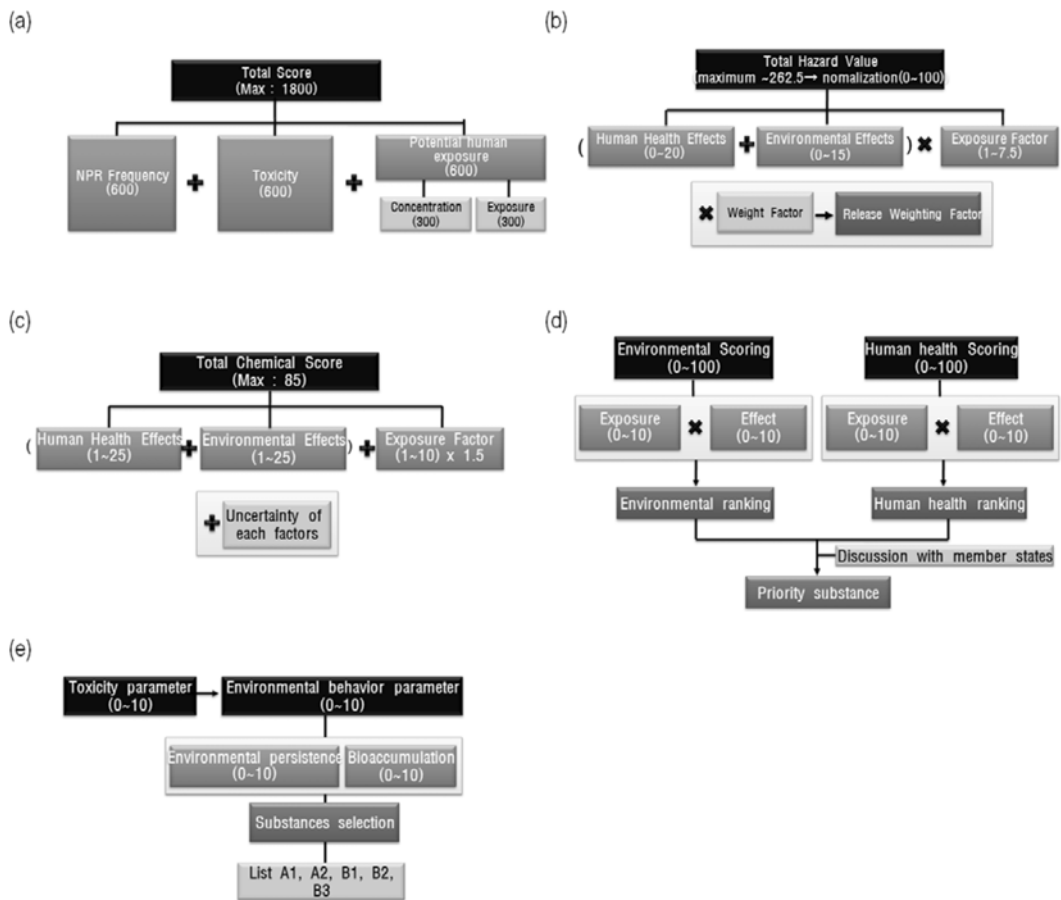


Fig. 3. Scheme of CRS systems. (a) ATSDR, (b) CHEMS-1, (c) SCRAM, (d) EURAM, (e) ARET.

비중을 두고 유해화학물질의 우선순위를 도출하고 있다. 반면 SCRAM은 노출에 1.5배 더 가중치를 두고 있으며 EURAM과 CRS-Korea는 노출과 독성의 비율을 1:1로 똑같이 적용하고 있다. ARET의 경우 독성, 생물축적성, 잔류성 등 세 가지 인자들만 고려하여 물질들의 순위그룹을 분류한다.

Fig. 2는 ATSDR, CHEMS-1, SCRAM, EURAM, ARET의 기본 알고리즘을 도식화한 것이다. CRS의 알고

리즘은 노출과 독성을 구성하는 각 인자들의 합 또는 곱의 공식으로 구성되어 있다. ATSDR은 검출빈도, 독성, 인체노출가능성의 합으로 총점을 산출한다. SCRAM의 경우 인체독성, 환경독성, 노출의 세 가지 평가인자의 합을 통해 총점을 산출하며 CHEMS-1은 인체와 환경독성에 노출을 곱하여 산출한다. EURAM은 인체독성과 인체노출의 곱 그리고 환경독성과 환경노출의 곱에 의해 각각을 구분하여 우선순위목록을 도출하며, CRS-Korea의 경우 인

Table 4. Endpoints of 53 Chemical Ranking Systems (Davis GA et al., 1994)

	Criteria	Endpoints
Exposure	Degradation	Half-life in environment compartment(air, water, soil, sediment)(16), biodegradation(5), photolysis(4), hydrolysis(7), BOD 1/2life, BOD ₅ /COD, BOD ₂₈ , BOD/ThOD(5),
	Transport/Distribution	Adsorption(K _d , K _{oc})(4), water solubility(5), log K _{ow} (P, P _{ow})(17), BC(A)F(18), distribution/transport(7)
	Estimated dose, environmental occurrence, concentration, or release	Projected levels in various media/compartment(3), estimate concentration(3), frequency(5), occurrence in air, soil, water(5), concentration(5), TRI/release(4), annual release to environment(8), productive volume(8), import volume(3), use volume(3)
	Exposure frequency or intensity	Use pattern(3), Population size(7), intensity of exposure(3)
Human	non carcinogen/generic health effect	Acute LD50/LC50(3), type of effect(4), chronic MED(3), RfD/RfC(11), irritation/sensitization(3), general acute/chronic toxicity(7), RQ(acute, chronic, carcinogenic)(5), TPQ(3)
	Carcinogenic	weight, amount, or type of evidence(or probability)(19). potency or slope factor(5), ED10(5), qualitative potency or effects(8), carcinogen (yes or no)(3), unit risk factor(3),
	Mutagenic	weight, amount, or type of evidence(5), effect(3)
	Genotoxicity	weight, amount, or type of evidence(3)
	Developmental/reproductive toxicity	weight, amount, or type of evidence(5), effect dose(5), development/reproductive toxicity(4),
Environment	Aquatic toxicity	ambient water quality criteria(4), NOAEL(5), acute LC50(22), acute EC50(11), subchronic/chronic EC50(4), subchronic/chronic MATC(5), NOEL/NOEC(3)
	Plant toxicity	plant EC50(5), plant NOAEL/NOAEC(3),
	Terrestrial (non mammal)	acute LD50(3)
Other	Physico chemical properties	Ignitability/flash point(6), boiling point(5), reactivity/explosivity(6), vapor pressure(3)

제와 생태 각각에 대하여 독성과 노출의 곱으로 위해도 점수를 산정한 후 합하여 물질의 순위를 도출한다.

한편 위에서 제시한 CRS기법을 포함한 53개의 CRS기법에 대하여 평가종말점을 비교해 보았다(Table 4). 노출의 경우 크게 분해, 이동/분배, 배출/발생/사용량, 노출빈도 등을 종말점으로 평가하고 있으며 인체영향의 경우 급·만성 대한 일반독성영향, 발암성, 돌연변이나 유전, 생식독성과 같은 기타독성으로 나누어 평가하고 있다. 일반독성영향은 LD50또는 LC50를 주로 평가하며 발암성은 대부분의 CRS에서 IRIS나 IARC의 발암계수를 이용하고 있다. 생태의 경우 수서와 토양으로 구분하여 급성은 L(E)C50, 만성은 NOEC을 적용하고 있다. 또한 폭발성, 끓는점, 가연성 등 유해물질의 물리화학적 특성을 평가인자로 고려하는 CRS도 있었다. 각 기법의 특이점으로 EURAM은 인체와 환경에 대한 각각의 우선순위물질들 선정 후 전문가 협의를 통해 최종 우선순위목록을 도출하고 있으며 인체 독성평가시 유럽연합에서 사용하고 있는 평가지표인 R-phrase를 이용하여 점수를 배점하고 있다. CHEMS-1는 배출량에 가중치를 두어 평가하고 있다. SCRAM은 다른 CRS기법에 비해 평가종말점이 세분화되어있고 생태영향의 경우 수서와 토양생태를 모두 고려하고 있으며 각 인자별로 불확실성점수를 부여하여 평가한

다. ARET는 물질별 총점으로 순위를 정하는 것이 아니라 평가대상물질을 유해성에 따라 5가지 그룹으로 선별하는 방식이다.

4. 토양오염물질 우선순위 평가시 고려 인자

CHEMS-1, SCRAM, ARET, EURAM, CRS-Korea는 모두 다매체를 고려한 평가기법이었다. ATSDR의 경우 국가우선순위 부지에서 발견빈도가 높은 물질에 대하여 우선순위를 제시하고 있으나 토양매체의 특성을 고려하여 평가하고 있진 않았다. 그 외에 51개 CRS기법 중에서도 토양을 대상으로 하여 우선순위를 선정하는 기법은 없었다.

따라서 토양오염물질 우선순위 선정시 고려해야할 인자들을 다음과 같이 제안하는 바이다. 평가대상 매체가 토양이므로 토양매체 특성을 고려할 수 있는 인자들이 포함되어야 한다. 특히 토양오염물질은 지하수로 이동할 개연성이 있기 때문에 이를 고려할 수 있는 인자를 포함해야 하는데 이는 토양흡착계수(K_d)를 이용하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 토양흡착계수가 큰 물질은 토양으로부터 탈착될 가능성이 낮으며 계수가 낮은 물질은 탈착가능성이 높은 것을 의미하므로 오염물질의 토양에서 지하수로의 이동성을 고려하기에 적합한 인자로 판단된다. 그 외

에 고려되어야 할 인자들은 위에서 분석한 53개 CRS기법에서 공통적으로 적용하고 있는 평가인자들이다. 이 인자들은 오염물질이 환경에서 야기할 수 있는 문제점을 평가할 수 있는 지표이다. 노출의 경우 잔류성, 생물축적성, 배출량 등이 고려되어야 할 것이며 특히 배출량의 경우 자기매립량, 폐기물이동량, 토양 TRI등 토양으로의 오염물질 배출량을 고려해야 한다. 독성의 경우 인체독성과 토양오염물질에 직접적으로 영향을 받는 토양생태독성을 고려해야 한다. 인체의 경우 일반적인 독성(경구, 흡입독성)과 발암성 그리고 생식, 유전독성 등 다양한 인체 유발가능 독성인자가 고려되어야 하며, 토양생태독성의 경우 토양생물에 대한 급·만성 독성영향을 고려해야 한다. 그 외에 정성적인 평가인자로 토양오염사고사건을 야기한 물질, 외국에서의 토양오염기준항목설정여부, 물리화학적 특성 등이 관심인자로 고려될 수 있을 것이다.

5. 결 론

국제적으로 평가대상매체, 이용목적에 따라 다양한 CRS기법이 개발되어 있다. CRS는 목적에 따라 다양한 평가인자들을 이용하여 과학적인 방법으로 유해화학물질의 우선순위를 설정할 수 있다. 선진국의 경우 유해화학물질의 관리 및 규제시 우선순위선정기법을 이용하며, 환경기준 설정을 위한 후보물질 선별시에도 CRS를 활용한다. 본 연구에서 비교분석한 53개 CRS의 경우 대상매체가 수질, 대기 그리고 다매체를 대상으로 한 기법이었으며 토양을 대상으로 개발된 기법은 없었다. 특정매체를 대상으로 할 경우 대상매체의 특성을 고려할 수 있는 인자를 포함하여야 그 결과에 타당성을 부여할 수 있을 것이다.

본 연구는 토양오염물질 기준항목확대를 위한 우선순위물질목록 선정을 위해 개발된 CRS기법들을 비교분석하여 평가시 고려해야할 인자들을 제안하였다. 평가인자로 토양에서 지하수로의 이동성을 고려할 수 있는 토양흡착계수를 새로이 추가하고, 토양배출량, 선진국 규제국가수, 토양오염 사고사건사례를 포함시켰다. 본 연구에서 제안한 평가인자들은 토양매체를 대상으로 한 우선순위선정기법 개발시 토양특성을 고려한 평가인자로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국립환경과학원의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

- 국립환경과학원, 2007, 우선관리대상 토양오염물질 선정 연구.
- 김예신, 박화성, 이동수, 신동천, 2003, 화학물질 우선순위 선정 기법에 대한 비교 분석, 한국환경독성학회지 **18**(3), 183-191.
- 박화성, 김예신, 이동수, 신용승, 최승필, 박성은, 김명현, 양지연, 신동천, 2005, 화학물질 우선순위 선정 기법 (CRS-Korea)의 개발과 적용, 한국환경독성학회지 **20**(2), 109-121.
- 안윤주, 남선화, 이재관, 2008, 수계 유출가능성이 있는 유해화학물질 분류화, 한국물환경학회지 **24**(2), 247-259.
- 최승필, 박화성, 이동수, 신용승, 김예신, 신동천, 2005, 개선된 화학물질 우선순위 선정 기법 (CRS-Korea II)과 그 활용을 통한 지역별 유독물 우선순위의 도출, 한국환경독성학회지, **20**(4), 311-325.
- 환경부, 2003, 위해우려물질 선정 및 평가 연구.
- 환경부, 2005, 토양보전 기본계획 수립 연구.
- 환경부, 2006, 물환경종합평가기법 개발 조사연구(III)-인체 및 수생태계 위해성평가체계 구축.
- 환경부, 2001, 폐수배출허용기준 적용대상물질 확대지정을 위한 연구.
- Ali, B., 2001, Multistakeholder collaboration outcomes in environmental voluntary initiatives: The case of A.R.E.T. initiative.
- ATSDR, 2005, 2005 CERCLA Priority List of Hazardous Substances That Will Be The Subject of Toxicological Profiles and Support Document, Division of Toxicology, Washington DC., USA
- Davis, G.A., Swanson, M., and Jones, S., 1994, Comparative evaluation of chemical ranking and scoring methodologies.
- EC (Environment Canada), 1994, The ARET substance selection process and guidelines.
- 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. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **18**, 772-779.
- Mitchell, R.R., Summer, C.L., Blonde, S.A., Bush, D.M., Hurlburt, G.K., Snyder, E.M., and Giesy, J.P., 2002, SCRAM: a scoring and ranking system for persistent, bioaccumulative, and toxic substances for the north American Great lakes-resulting chemical scores and rankings. *Human and Ecological Risk Assessment*, **8**, 537-557.
- 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., 2000a, SCRAM: A scoring and ranking system for persistent, bioaccumulative, and toxic substances for the North American Great lake. Part . Structure of the scoring and ranking system. *Environment Science and Pollution Research*, **7**, 51-61.

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., 2000b, SCRAM: A scoring and ranking system for persistent, bioaccumulative, and toxic substances for the North American Great lake. Part . Bioaccumulation potential and persistence. *Environment Science and Pollution Research*, **7**, 116-121.

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., 2000c, SCRAM: A scoring and ranking system for persistent, bioaccumulative, and toxic substances for the North American Great lake. Part . Acute and subchronic or chronic toxicity. *Environ-*

ment Science and Pollution Research, **7**, 176-184.

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. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **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.