

## 화학물질 우선순위 선정 기법에 대한 비교 분석

김예신, 박화성, 이동수\*, 신동천\*\*,\*

연세대학교 환경공해연구소, \*서울대학교 환경대학원,  
\*\*연세대학교 의과대학 예방의학교실

## Comparisons of Chemical Ranking and Scoring Methods

Ye-Shin Kim, Hoa-Sung Park, Dong-Soo Lee\* and Dong-Chun Shin\*\*,\*

*Institute for Environmental Research, Yonsei University, Seoul 120-752, Korea*

*\*Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

*\*\*Dept. of Preventive Medicine, College of Medicine, Yonsei University, Seoul 120-752, Korea*

### ABSTRACT

Although the variety and quantities of chemicals used have been increasing, no management strategies have been developed for these chemicals in our country. Therefore, it is important to identify the hazardous characteristics of chemicals and establish reasonable and effective management plans for them. However, because insufficient resources are available to evaluate all aspects of many varieties of chemicals, studies on suitable chemical ranking and scoring (CRS) system should be performed to ensure effective screening of priority chemicals. In addition, because most CRS systems have their own goals, it is impossible for only one generic system to be consistent with all the uses that have been developed. Therefore, priority systems should be developed with specific and clearly defined purposes in our nation. In this study, we investigated and discussed existing CRS systems, and proposed several elements and principles when designing CRS systems. First of all, the system should have clearly defined goals, keep neutral, and employ simple methods. In addition, researchers need to perform sensitivity analysis to find the main variables responsible for uncertainties and use the tiered approach to compose the effective management strategies for chemicals.

**Key words :** chemical ranking and scoring (CRS), EURAM, CHEMS-1, SCRAM, ARET

### 서 론

지난 20세기 동안 진행된 급속한 산업화로 우리의 생활수준은 현저히 상승하였으며, 이러한 부분에 화학물질이 지대한 공헌을 하였다고 할 수 있다. 의약품의 개발은 질병의 예방 및 치료를 가능

하게 하여 인류 생명 연장에 기여하였고, 플라스틱은 생활을 편리하게 하였으며, 화학비료와 농약의 개발은 농업의 생산성을 증대시켜 식량 부족 문제 해소에 기여하는 등 화학물질은 많은 분야에 걸쳐 경제 활동의 기초물질로서 현대 사회에서 없어서 안될 주요 요소가 되었다. 그러나 이렇게 효용을 갖고 있는 화학물질은 독성을 가지고 있으며, 제조, 사용, 유통 및 폐기되는 과정에서 인체에 노출되어 문제를 일으켜 온 것 역시 사실이다. 또한

※ To whom correspondence should be addressed.

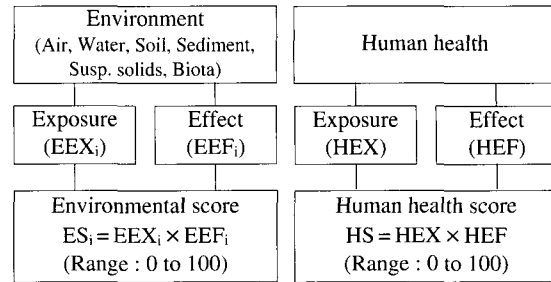
Tel: +82-2-361-5361, E-mail: dshin5@yumc.yonsei.ac.kr

우리가 항상 접하고 있는 물, 공기, 토양 등의 매체 환경오염 역시 화학물질로 인한 것이 대부분인 것으로 알려져 있다(환경부, 2002).

이러한 화학물질의 사용은 현재 증가 추세에 있어, 전 세계적으로 유통되고 있는 화학물질의 수는 약 10만종이며 매년 2,000여종이 새로 개발되어 유통되는 것으로 알려져 있다(환경부, 2000; 국립환경연구원, 1996). 국내에서도 같은 추세로, 현재 37,000여종의 화학물질이 유통되고 있으며, 매년 300여종이 새로 진입하고 있다(환경부, 2002). 이와 같이 화학물질의 유용성 때문에 인류는 앞으로도 화학물질을 이용하고 새로운 종류의 것을 개발할 것으로 예상되나, 이로 인한 유해 영향을 예측하는 것이 쉽지는 않은 것이 현실이다. 그러므로 화학물질의 안전성을 확인하고 적절한 관리 방안을 마련하는 것은 중요한 작업이라 할 수 있다(환경부, 2002).

화학물질의 적절한 관리 방안을 구축하기 위하여, 잠재적인 영향 및 관련된 모든 측면을 평가하는 것은 필요한 과정이지만, 그에 필요한 시간이나 재원은 부족한 실정이다. 또한 지난 10여년 동안 화학물질의 독성 및 환경 내에서의 거동을 검증하고 이러한 자료의 위해성을 평가하기 위하여 수많은 방법이 개발되어 왔으나 일반적으로 수용 가능한 형태로 개발되지 못하였고, 화학물질 선정에 필요한 재원이 부족하다는 측면만 강조되어 왔다. 그러나 실제 화학물질 우선순위 선정 기법에서는 위험성이 큰 물질에 대해 주의(attention) 및 자원(resources)을 집중하도록 하여 효율적인 관리를 유도할 수 있어야 한다(Gary *et al.*, 1994). 또한 구체적인 관리안이 필요한 화학물질을 선정하기 위한 최종 목표는 포괄적 위해성 평가를 실시하는 것이며, 이러한 측면에서 화학물질 우선순위 선정 기법을 제안하는 것은 이에 대한 중요한 시작점이 될 수 있다(Mary *et al.*, 1997a).

이에 본 연구에서는 기존의 화학물질 우선순위 선정 기법의 구성 요소 및 기본 원칙 등을 고찰하여, 차후 우리나라에서도 어떠한 구체적 목적을 갖는 기법을 제안할 경우, 기본 자료로 활용할 수 있도록 하였다. 또한, 이러한 기법을 개발·적용할 때 포함되어야 할 요소 및 원리들을 제안하고자 하였다.



EEX (Environmental EXposure score); EEF (Environmental EFFEct score); ES (Environmental Score); HEX (Human health EXposure score); HEF (Human health EFFEct score); HS (Human health Score)

Fig. 1. Scheme of EURAM.

## 기존 화학물질 우선순위 선정 기법

화학물질에 대한 우선순위 선정 (chemical ranking and scoring; 이하 CRS) 기법은 위해성 평가와 일관성을 갖는 개념으로, 위험(hazard)과 노출(exposure)의 합수로 화학물질의 위협(threat) 정도를 설정하고 이를 지표로 하여 우선순위를 도출한다. CRS 기법은 일반적으로 개발 목표 및 범위를 설정하고, 어떠한 자료를 이용하여 우선순위를 도출한 후 이에 맞게 자료의 양이나 형태를 결정한다. 정리된 자료를 이용하여 화학물질의 순위 및 점수를 산정하고, 도출된 결과를 효율적으로 나타내는 순차적 과정으로 구성된다(Mary *et al.*, 1997a).

본 연구에서는 US EPA (1994a)의 연구에서 비교·고찰한 50여종의 CRS 기법 중에서 목적 및 논리가 뚜렷하나 정교함의 차이가 있는 일부 시스템에 대해 고찰하였다.

### 1. EURAM

EURAM (European Union Risk Ranking Method)은 EU (European Union)에서 위해성 평가 및 관리 대상 물질을 선정하기 위한 기법으로, 유럽 내에서 생산용량이 연간 1,000톤 이상이 되는 물질(High Production Volume Chemicals; HPVCs)을 대상으로 하며, 주로 EU 회원국들이 작성한 IUCLID (International Uniform Chemical Information Database) 내의 내용을 토대로 한다(Hansen *et al.*, 1999). 이 시스템에서는 크게 생태 및 인체 영향에 대한 우선

순위가 도출되며 (Fig. 1), 이를 토대로 전문가들의 판단을 통합하여 최종 순위를 결정하고 위해성 평가 대상물질로 삼는다 (ECB, 2000).

#### 1) 생태 노출 및 영향

생태 노출 부분에서의 지표는 크게 배출, 분배, 분해성으로, 배출은 해당 화학물질의 여러 가지 이용 형태에 따른 사용 비율로서, 어떤 형태로 얼마의 양이 사용되는지를 고려하여 결정한다. 분배의 경우에는 Mackay level I 모델에 의한 각 compartment (air, water, soil, sediment, suspended solids, biota) 별로의 분할 비율 (fugacity capacities or Z values ( $\text{mol/m}^3 \cdot \text{Pa}$ ))을 산출하여 적용한다. 분해성은 OECD (Organization for Economic Cooperation and Development)의 고유한 평가 방법에 따른 결과를 반영하여 환경중 잔존 비율을 결정한다. 위의 3가지 노출 지표들을 모두 곱하고, 대수를 취하거나 일정한 식을 통하여 0~10점으로 정규화 시켜준다 (Hansen *et al.*, 1999). 생태 영향에서는 NOEC (No Observed Effect Concentration) 및 AF (Assessment Factor)를 이용하며, 수생종에 대한 독성값을 도출하고, 독성 시험의 질에 따라 AF를 달리 적용하고 이를 나누어 지표로 이용한다. 도출된 값 역시 생태 노출에서와 마찬가지로 대수를 취하거나 일정한 식을 통하여 0~10점으로 정규화 시켜준다 (Hansen *et al.*, 1999). 그 후 이들 생태에 대한 노출 및 영향의 점수를 곱하여 최종 점수로 이용한다. 이때 가용한 자료의 이용성을 극대화하기 위하여 각 물질의 BCF (Bioaccumulation Factor)를 점수로 환산하고, 이를 이용하여 수생 생태에 대한 최종 점수를 산출하고 순위 선정에 이용한다 (Hansen *et al.*, 1999).

#### 2) 인체 노출 및 영향

인체 노출 영역의 지표는 크게 배출, 분배로, 배출은 생태 노출 부분에서의 내용과 동일하다. 분배에서는 끓는점, 증기압,  $\text{Log K}_{ow}$  (octanol/water partition coefficients)가 이용되며, 끓는점과 증기압에 대한 일정한 간격을 적용하여 점수를 부여한 후 둘 중에서 큰 점수를 채택하고, 이를  $\text{Log K}_{ow}$ 에 대해 할당된 점수와 합산한다. 여기서 끓는점이나 증기압은 상온에서의 위험 잠재력을 나타내며, 다른 우선순위 선정 기법에서는 주로 이용하지 않는 지표로서, 이 기법을 이용한 화학물질 관리가 주로

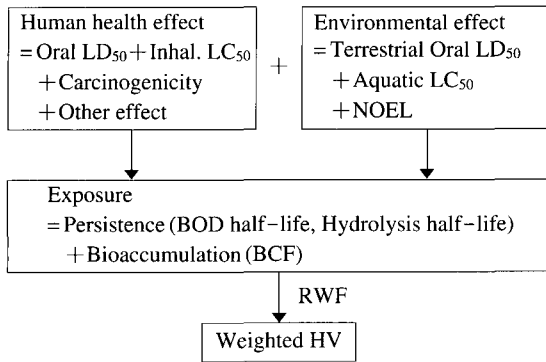
작업장, 즉 소규모 노출 공간에서의 인체 독성을 평가하고자 하는 것임을 알 수 있다. 또한 이들 정보에 대해 자료가 가용하지 않는 경우 전체적으로 보수적인 값을 기본 값으로 적용하도록 하고 있다. 최종적으로는 이용된 2가지 지표를 곱하여 인체 노출 점수로 이용하고, 앞서 생태 노출 부분과 마찬가지로 0~10점 범위로 정규화 시켜준다 (Hansen *et al.*, 1999). 인체 영향에 대한 평가는 주로 유전·생식·반복 노출로 인한 독성에 대한 결과에 기초하여 결정된 화학물질의 고유한 R-phrase (risk phrase)를 이용하여 0~10점 사이의 점수를 할당한다. 이때 한 물질에 대하여 여러 가지 R-phrase 값이 있다면 이 중 가장 점수가 높은 결과를 취한다 (Hansen *et al.*, 1999). 최종적으로 생태에서와 마찬가지로 인체에 대한 노출 및 영향의 점수를 곱하여 최종 점수로 이용한다 (Hansen *et al.*, 1999).

EURAM은 어떠한 가중치를 적용하지는 않고 있으며, 일정한 수식으로 표현하여 적용하고자 하였다. 또한 해당 지표에 대한 값이 없는 경우에는 주로 최고 점수를 할당하는 보수적인 성향을 갖고 있다. 앞서 설명한 방법을 이용하여 현재 EU (European Union)는 4차에 걸쳐 141종의 우선순위 목록을 발표하였다 (ECB, 2003).

## 2. CHEMS-1

미국 역시 EU와 마찬가지로 지난 10여년 동안 화학물질 관리를 위한 평가를 진행하고, 이를 위한 방법을 개발하였으나 일관성이 없거나 체계적이지 못하다는 지적을 받아왔다. 이에 University of Tennessee가 인체 및 환경에 대한 화학물질의 상대적 위험성을 평가하고, 생산품 및 제조 공정상에서 좀 더 안전한 대체품을 개발하기 위한 screening tool로서 CHEMS-1 (Chemical Hazard Evaluation for Management Strategies)을 개발하였다 (Mary *et al.*, 1997b).

전체적 구성은 그림 2와 같으며, 인체 독성 점수와 생태 독성 점수를 합산하여, 노출 관련 점수를 곱하여 최종 점수를 도출한다. 요구되는 자료는 가능한 구체적 실험 결과에 기초한 HSDB (Hazardous Substance Data Bank)와 같은 자료원에 의존하도록 하였으며, 각 지표에 대해서 값이 여러 개인 경우 가장 민감한 자료를 채택하였다 (US EPA, 1994b;



RWF (Release Weighting Factor); HV (Hazard Value)

Fig. 2. Scheme of CHEMS-1.

Mary *et al.*, 1997b).

#### 1) 인체 및 생태 영향

인체 및 생태 영향을 분리하여 적용하였으며, 인체 영향은 급성의 설치류에 대한 구강 경로 및 호흡을 통한 급성 독성치, IRIS (Integrated Risk Information System)와 IARC (International Agency for Research on Cancer)의 발암 분류 등급과 기타 독성 영향 지표(돌연변이원성, 발육독성, 생식독성, 신경 독성 및 기타 만성 독성)에 대한 양성 결과의 유무를 만성 영향 지표로 이용하고, 이들 영향에 대해 모두 일정한 기준에 의거하여 0~5점을 부여하였다. 생태에 대한 영향은 설치류에 대한 구강 경로를 통한 급성 독성치 및 어류에 대한 급성 독성치, 어류에 대한 NOEC (No Observed Effect Concentration) 등 총 3가지를 이용하며, 이들 지표에 대해서도 일정한 기준에 의거하여 모두 0~5점을 부여하였다(US EPA, 1994b; Mary *et al.*, 1997b).

#### 2) 인체 및 생태 노출

인체 및 생태에 대해 산출된 독성 점수에 공통적인 노출 점수를 적용하는데, 이와 관련된 지표는 잔류성 (persistence), 생물농축성 (bioaccumulation) 등으로 설정하고, 각각에 대해서 생물학적 분해 반감기, 가수분해 반감기, 수생 생물에 대한 BCF (bioaccumulation factor)를 지표로 삼고, 각각 1~2.5점을 할당하였다(US EPA, 1994b; Mary *et al.*, 1997b).

최종적으로 인체 및 생태 영향에 대한 점수를 합산하고 노출에 대한 점수를 곱하여 최종 점수를

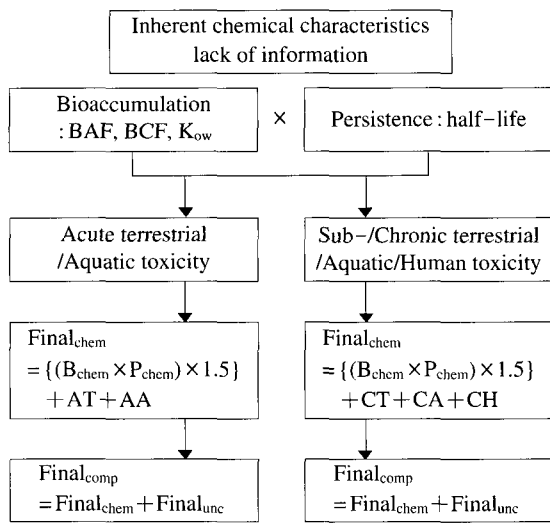
산출한다. 이때 이용자가 목적에 맞게 각 지표의 가중치를 변화시킬 수 있도록 하고, 또 결손 자료에 대해서 기준값을 '0점' 또는 '5점'으로 부여하거나, 인체 독성에서 기타 독성 영향을 제외하기도 하는 등 유연하게 고안되었다(US EPA, 1994b; Mary *et al.*, 1997b). 또한 일부 제한적이기는 하나, TRI (Toxics Release Inventory)를 이용하여 잠재적 노출 지표로 적용할 수도 있게 하였다. 이때 배출량에 자연 대수를 취하여 이 지표가 최종 순위에 대해 우점 요인이 되지 않도록 하였다(US EPA, 1994b; Mary *et al.*, 1997b). TRI내 물질과 다량 이용되고 있는 농약류, 총 158종을 대상으로 배출량을 가중치로 적용하여 이와 같은 방법으로 우선순위를 도출한 결과, 크롬·비소·납 화합물 등 주로 중금속류가 상위에 선정되었다(US EPA, 1994b).

### 3. SCRAM

SCRAM (Chemical Scoring and Ranking Assessment Model)은 시중에 이용되는 화학물질이 증가함에 따라 환경중으로 배출되어 유해 영향을 유발할 수 있는 물질에 대한 스크리닝이 필요하다고 판단되어 미국에서 개발된 기법이다. 간단한 excel spreadsheet 형태로 구성되어 있어 쉽게 결과를 도출할 수 있으며, 평가 과정에서 불완전한 자료에 기초하여 도출된 결과는 막대한 불확실성을 초래한다는 점을 강조하여, 정보가 부족한 화학물질에 대해 불확실성 점수를 부여하고 이를 최종 결과에 반영하도록 하였다(Fig. 3) (Erin *et al.*, 2000).

#### 1) 노출

우선 생물농축성에 대한 점수를 산출하기 위하여 BAF (bioaccumulation factors), BCF 또는  $K_{ow}$ 에 일정한 구간에 따른 점수(0~5점)를 할당하고, 이용 가능한 정보의 형태에 따라 불확실성 점수 (uncertainty score)를 결정한다. 이어서 잔류성은 5가지 환경 매체 (생물, 대기, 토양, 저질, 물) 내에서의 반감기에 기초하여 점수를 산정하는데, 역시 일정한 구간에 따라 0~5점을 할당하고, 각 매체에 대한 점수가 결정되면 5가지 중 가장 큰 점수를 전체 잔류성에 대한 점수로 이용한다. 만약 특정 매체에 대해 이용 가능한 측정된 반감기가 없다면, Level III 다매체 모델을 이용하여 추정할 수 있으며, 가용한 자료의 형태에 따라 불확실성 점수를 부여한



AT (acute terrestrial toxicity); AA (acute aquatic toxicity); CT (chronic terrestrial toxicity); CA (chronic aquatic toxicity); CH (chronic human toxicity);  $B_{chem}$  and  $P_{chem}$  (chemical score for bioaccumulation and persistence of the chemical);  $Final_{chem}$  (final chemical score);  $Final_{unc}$  (final uncertainty score for the chemical);  $Final_{comp}$  (final composite score)

Fig. 3. Scheme of SCRAM.

다(Erin *et al.*, 2000). 화학물질의 정확한 기작이 규명되지 않거나, 영향이 미미하게나마 나타나는 등의 경우에도 대상물질을 우려 범주에 포함하기 위해 노출 지표 점수를 서로 곱하고 가중치를 적용한다(Rachel *et al.*, 2002; Erin *et al.*, 2000). 이때, 잔류성에 대한 점수가 1 또는 2점이라면 급성 독성을 우려하여 그에 대한 점수를 산정하고, 만약 3, 4, 5 점이라면 아만성/만성 독성을 우려하여 그에 대한 점수를 산정한다(Erin *et al.*, 2000).

2) 영향

급성 독성에 대한 점수는 육상 및 수생 생물에 대한 독성으로 구성되고, 각각 5가지 하위 범주에 속하는 중에 대한 독성치 중 가장 큰 값을 점수로 선택한다. 아만성/만성 독성에 대한 점수는 육상, 수생 및 인체에 대한 독성으로 구성되며, 육상 및 수생 생물에 대한 배점 방법은 급성과 동일하다. 다만, 인체 독성의 경우, 일반 독성, 생식 독성, 발육 독성, 발암성, 기타 독성 등 5가지 범주로 구분하여 점수를 할당하고, 최고 점수를 인체 독성 점수로 채택하였다. 각각 불확실성 점수는 독성 수치가 가

용하지 않은 경우 각 하위 범주에 할당하며, 급성 및 아만성/만성 영향 모두 이 점수에 독성 점수를 합산하여 composite score를 산출한다(Erin *et al.*, 2000).

SCRAM은 다른 시스템과는 달리 자료의 결손을 오히려 점수로 반영할 수 있기 때문에 잘 알려지지 않은 화학물질에 대해 높은 점수를 할당하는 편(bias)이 존재할 수 있으나, 이는 정보가 부족한 화학물질을 차후 평가 및 연구 목록에서 제외하기보다는 자료 확보를 위한 연구를 진행해야 한다는 것을 강조하고자 하는 의도를 갖고 있다(Erin *et al.*, 2000).

4. ARET

ARET (Accelerated Reduction/Elimination of Toxics)는 캐나다의 환경 기관에서 유해 영향 잠재력이 있는 물질에 대해 자발적으로 배출 저감 및 제거를 촉구하기 위하여 개발된 기법으로, CESARS (Chemical Evaluation Search and Retrieval System) 데이터베이스 내의 가용한 물질을 대상으로 관리 대상물질을 추출하기 위해 관리 필요 정도를 분류한다(Environmental Canada, 1994; ICF, 1994).

독성 지표 6가지 중 3개 이상에 대한 값이 있으면 독성 점수를 산출하고, 60점 만점으로 normalize 시켜준 독성 점수가 40점 이상이면, 관리 대상 목록에 오르게 된다. 노출 지표는 생물농축성과 잔류성으로, 일정한 구간에 맞는 점수를 할당하여 각각이 7점 이상이면 Group A, 아니면 B-1에 속하게 되고, 차후 관리시 차례대로 우선순위를 둔다. 또한 노출 지표가 4점 이상인 경우와 미만인 경우로 구분하여 Group B-2, B-3으로 구분하고, 현재 총 117종을 4가지 등급으로 구분하여, 각각에 대한 장단기적 저감 목표를 설정하고 있다(Environmental Canada, 1994).

5. 기타

앞서 설명한 4가지 방법 이외의 방법에도, US EPA는 국가적 폐기물 최소화계획안(Waste Minimization and Prioritization Plan)에 부합하여 개발한 방법인 WMPT (Waste Minimization Prioritization Tool)에 기초하여 (David *et al.*, 2001), 이를 포함하는 RCRA (Resources Conservation and Recovery

Act)라고 하는 PBT (persistent, bioaccumulative, toxic)의 특성을 갖는 유해 폐기물이나 이들이 분해되어 발생하는 화학물질을 최소화하기 위한 목적의 기법을 개발하기도 하였다 (US EPA, 1998b).

MCMR (Michigan Critical Materials Register) 방법은 미국의 미시간주에서 개발된 방법으로 수질 저하요인이 될 수 있는 물질 목록을 도출하고자 하는 목적으로 개발되었다. 이용하는 지표로서는 여러 가지 독성 및 생물농축성, 잔류성 등이 포함되며, 수질 저하로 인한 심미적 요인도 포함되었다. 이를 통해 도출된 화학물질을 이용하는 사업장에

서는 연간 이용량, 배출량, 폐기량 등에 대한 보고서를 매년 제출하도록 규정하고 있다 (Mary *et al.*, 1997a; Heriot Watt university, 2003).

국내에서도 화학물질 우선순위 선정 기법을 제안하고자 하는 연구가 진행되었으나, 주로 명확한 목적을 제시하지 않은 채 노출을 동시에 고려하지 않고 독성만을 지표로 하여 우선순위를 도출하는 수준에 그치고 있으며 (국립환경연구원, 1991), 그 외에도 지표 선정에 주관적 요소가 개입되거나 평가 논리가 명확하지 못하여 타당성이 부족한 것으로 평가된다 (한국화학연구소, 1995).

**Table 1.** Comparisons of several chemical ranking and scoring methods

	EURAM	CHEMS-1	SCRAM	ARET
Chemicals	Only existing	Exsting & New	Exsting & New	Exsting & New
Emission	Usage	TRI	No	No
Model use	Mackay I for environmental exposure level	No	Mackay III for $t_{1/2}$ in air, soil, sediment, water	No
Exposure	Human (2) : Boiling point or Vapour pressure, and $K_{ow}$	Bioaccumulation (1) : BCF	Bioaccumulation (1) : BAF, BCF or $K_{ow}$	Bioaccumulation (1) : BCF or $K_{ow}$
Parameters (# of variables)	Ecological (33) : Distribution, Dergadation  Other (1) : Emission	Persistence (2) : BOD $t_{1/2}$ , Hydrolysis $t_{1/2}$	Persistence (5) : $t_{1/2}$ in air, soil, water, sediment, biota	Persistence (1) : $t_{1/2}$ in air, water, sediment
Total	36	3 or 4	6	2
Toxicity	Human (1) : R-phrases  Ecological (1) : NOEC	Human (8) : LD <sub>50</sub> , LC <sub>50</sub> , WOE, others  Ecological (3) : LD <sub>50</sub> , LC <sub>50</sub> , NOEC	Human : NOAEL, ED <sub>10</sub> , others  Ecological : LC <sub>50</sub> , NOEC, and others	LD <sub>50</sub> , NOEL, and others
Total	2	11	28	22
Data gaps	Highest default	Highest or lowest	Uncertainty score	-
Relation between exp. & tox.	Multiplication	Multiplication	Addition	NA*
Scaling & range	Logarithm (0~10)	Logarithm (0~5)	Interval (1~5)	Interval (0~10)
Weight	Exp : Tox = 1 : 1	Exp < Tox	Exp : Tox = 1.5 : 1	NA*
Score aggregation	Exposure: not aggr. Toxicity: not aggr. Final: not aggr.	Exposure: single Toxicity: aggr. Final: fused	Exposure: single Toxicity: fused Final: fused	Exposure: single Toxicity: fused Final: fused

\*NA (Not applicable); Exp. (Exposure); Tox. (Toxicity); aggr. (aggregation)

**6. 화학물질 우선순위 선정 기법 비교**

기존의 화학물질 우선순위 선정 기법에 대하여 비교한 주요 결과는 다음과 같다(Table 1). CRS 기법의 주요 요인은 적용하고자 하는 목적이 무엇인지, 노출 및 독성에 대한 지표를 어떻게 선정하고 점수를 부여하는지, 산출된 점수를 어떠한 방법으로 통합하는지에 관한 것이다.

EURAM과 ARET는 대량 사용 물질에 대한 관리 및 저장 우선순위 선정 등 구체적인 관리 방안을 이끌어 내기 위한 수단으로 이용되는 반면, CHEMS-1과 SCRAM은 일차적인 화학물질 선별을 목적으로 한다. 또한 EURAM은 사용량을 지표로 이용하기 때문에 현재 사용하는 물질에 대해서만 적용이 가능하며, 나머지 배출량을 반드시 이용하지 않는 기법들은 신규 화학물질에 대해서도 적용이 가능하다.

노출 관련 점수 도출시, EURAM은 각 환경 매체별 분산능을 계산하기 때문에 가장 많은 자료를 필요로 하나, 대부분의 기법들은 생물 농축성과 잔류성을 주요 항목으로 설정하고, 각각 BCF나 반감기 등을 대표 지표로 이용하고 있으며, 배출량 정보도 가능한 경우 사용하도록 하고 있다. 또한 독성 관련 점수 도출시 R-phrase라는 독특한 지표를 사용하는 EURAM을 제외하고는 모두 인체 영향에 대해서 급성 독성치, 만성 독성치, 발암성 등에 대한 자료를, 생태 영향에 대해서는 주로 어류에 대한 급성 독성치 또는 만성 독성치를, 일정한 척도로 구분하여 점수를 할당하는 방법을 주로 적용한다. 특히 ARET는 인체나 생태에 대한 독성 영향을 구분하지 않고 적용하고 있으며, SCRAM은 어류 이외에 다른 종에 대한 정보도 가능한 포함하도록 하고 있어 실제 필요로 하는 지표수가 가장 많다.

노출과 독성 부분에서 산출된 점수는 대부분 곱하여 최종 점수로 반영하나, SCRAM은 노출에 대한 영향을 강조하기 위하여 노출 항목 내에서는 서로 지표 점수를 곱하고, 독성과는 합을 취하는 구조로 개발되어 있다. ARET는 순서도 형태로 구성되어 각각의 지표에 대한 점수가 일정 점수를 넘는지, 그렇지 않은지를 이용하여 결과물을 구성하도록 구성되어 있다. 또한 점수를 산출하는 과정에서 EURAM과 CHEMS-1은 원자료를 일정한 범

주로 고르게 할당하기 위하여 기존의 수많은 자료를 이용하여, 상용대수 및 일정한 상수를 적용하는 식을 개발하고 일정 구간 내에서 점수를 할당하고, SCRAM과 ARET는 원자료에 일정한 구간을 적용하여 점수를 도출하도록 하므로, 전자의 방법이 좀 더 복잡한 식을 요구하는 방법이다.

최종적으로 산출되는 점수에서 독성과 노출 부분의 비율을 살펴보면 EURAM은 둘 간의 비율이 동일하며, SCRAM은 독성 자료가 없어도 대상 물질을 우려 범주에 두기 위해서 노출을 강조하고 있으며, CHEMS-1은 독성에 대한 최대 점수가 노출에 대한 최대 점수에 비해 크게 산출되어 배출량 정보를 고려하지 않을 경우 독성에 대한 점수가 크게 산출된다. 인체 및 생태에 대한 점수는 EURAM은 개별 특성을 모두 반영하여 최종적으로는 전문가의 판단에 의존하므로 통합하지 않으며, CHEMS-1은 노출은 생태 및 인체를 동일하게 적용하고 독성 영향을 합산 하여 구성된다. SCRAM은 노출 정보를 동시에 이용하고, 독성을 급성과 만성으로 구분하고 이를 통합하지 않는다. 또한 data gap 처리시 EURAM은 보수적인 값을 할당하도록 하며, CHEMS-1은 기본값을 최대·최소 값으로 사용자가 임의로 설정하여 결과를 비교할 수 있도록 하였고, SCRAM은 자료의 부족을 불확실성 점수로서 화학물질의 최종 점수로 반영하게 하여 자료 확보에 주안을 두도록 한다.

전체적으로 그림 4를 통해 비교해보면 EURAM은 화학물질의 사용량과 거동 및 동태까지 고려하는 특이성이 가장 높은 시스템이었으며, CHEMS-1, SCRAM, ARET 순으로 정교함 정도가 떨어지는

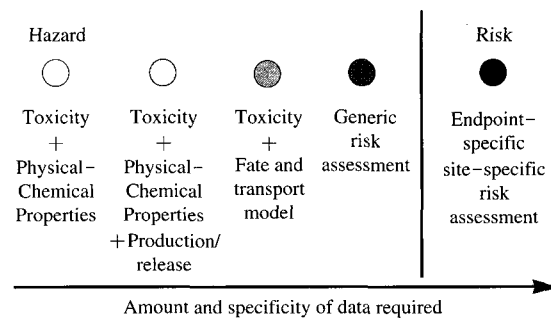


Fig. 4. Conceptual framework of several CRS methods (source : Mary *et al.*, 1997a)

것으로 평가된다. 즉 EURAM은 생태 및 인체에 대한 비율을 적절히 잘 구성하였으나, 노출 지표가 복잡한 편이며 인체 독성 평가시 R-phrase에 대한 재해석이 필요하다. CHEMS-1은 전개 논리가 비교적 명확하고 지표 선정도 용이하나 배출량 정보가 정확해야 한다. SCRAM와 ARET는 필요로 하는 독성 지표가 여러 가지 종에 대한 것으로, 그대로 이용할 경우 결손 자료가 많아질 수 있으며, 기본 자료 확보가 필요하다.

## 7. 화학물질 우선 순위 선정 기법 제안

이미 미국 및 유럽, 캐나다 등을 비롯한 일부 선진국에서는 위해가 우려되는 화학물질을 우선적으로 관리하기 위해 인체나 생태에 대한 독성 및 노출 가능성 등을 종합적으로 고려하여 각 나라에 맞는 우선순위 선정 시스템과 화학물질 관리 시스템을 운영하고 있다. OECD에서도 자국에 맞는 화학물질 관리를 도모하도록 하기 위하여, 화학물질에 대한 정보 수집과 위해성 평가를 시행하도록 규정하고 있으며, 가입국인 우리나라 역시 이러한 국제적 추세에 적절히 대응하기 위해서 국내 실정에 맞는 화학물질 우선순위 선정 기법과 관리 방안 수립이 요구된다(NIER, 1996; 환경부, 2000). 이러한 화학물질 우선순위 선정 기법을 개발하거나 적용할 때 일반적으로 다음과 같은 원리에 부합하여 개발되어야 할 것이다.

우선, 화학물질 우선순위 선정 기법을 적용하기 위해 가능한 명확한 목적을 규정해야 한다. 목적에 따라 기법의 범위 및 전개 논리가 달라질 수 있기 때문에, 이에 대해 가장 명확한 규정이 필요하다. 그에 맞는 방법을 개발할 수도 있으나, 부합하는 기존의 방법을 선택하는 것도 좋은 방안이다(Mary *et al.*, 1997a). 또한 도출된 결과는 이용자에게 이해가 용이하고, 수용 가능하도록 기법 내의 방법 및 결과가 명백해야 한다. 데이터를 이용할 때는 자료가 없는 물질이나 자료를 모두 갖고 있는 물질을 임의로 분류해서는 안되며, 결손 자료에 대해서 기준값을 고정적으로 최소 또는 최대값으로만 입력하지 않도록 구성하여 중립성을 유지하는 것이 좋다. 그러나 SCRAM과 같이 자료 수집을 유도하기 위한 목적을 갖는 경우에는 비중립적인 방법으로 자료 결손을 처리할 수도 있다.

이용된 자료는 차후에도 이용 가능하도록 변형하지 않도록 하고, 정확한 자료원, 자료 분류 체계, 기타 자료 선별 및 조작 법칙 등을 포함하여 자료 선별 기준이 구체적으로 설명되어야 한다(Mary *et al.*, 1997a). 또한 아무리 정교한 기법이라 해도 많은 입력 자료를 필요로 한다면 자료가 없는 물질에 대해서는 적절하게 평가하기가 어려워지며 결과의 신뢰도가 떨어지게 된다. 따라서 가능한 적은 수의 지표를 가지고도 평가가 가능하도록 너무 복잡하지 않고 실용적인 필요가 있다. 일반적으로도 CRS 기법은 특정 목적을 만족하는 수준에서 구체적인 것이 좋으며 단순할수록 더 나은 방법이라고 평가된다(Mary *et al.*, 1997a).

그 외에도 기법 내에 불확실성이 내재하므로 이에 대해 인식해야 하며, 화학물질에 대해 어떠한 결정을 위한 독점적 수단으로 이용해서는 안 되고, 목적에 따라 다양한 결과를 도출할 수 있도록 유연성을 가지는 것이 좋다. 또한 자료의 불확실성을 고려하기 위하여 민감도 분석을 실행하여, 실제 자료가 결과에 어떻게 영향을 주는지 실험하고, 어떤 구성 요소가 결과에 영향을 미치는 주된 인자가 되는지를 규명하는 과정이 필요하다. 즉 결과가 불확실하므로 전문가의 판단과 같은 정성적 평가를 적용하여, 구체적 평가가 필요한 물질 수를 줄여나감으로써 우선순위 선정의 효율을 극대화할 수 있도록 구성하는 것이 좋다. 이와 같은 화학물질 관리 체계 내에서, 우선순위 선정 기법의 물질 선정에서는 의음성(false negative)의 가능성을 최소화하도록 체계가 구성되어야 한다. 즉, CRS 기법을 통한 스크리닝시 위해도가 낮은 물질이 선정되는 경우 차후 평가과정에서 수정이 가능하지만, 반대로 위해도가 높은 물질이 제외되는 경우에는 추후에 평가가 불가능하게 된다(Mary *et al.*, 1997a).

위와 같은 원리에 입각하여 기법을 개발하고 국내에서 적용하고자 하여 지표에 대한 자료를 구축할 때 다음과 같은 점에 유의할 필요가 있다. 위해도를 설명하기 위해 이용하는 독성 지표는, 주로 자료의 가용성이 문제가 되므로, 이에 대한 자료 확보가 중요하다. 이에 SIDS(Screening Information Data Set) 사업을 통해 각 나라별로 해당 물질에 대한 정보를 구축해 가고 있으므로 이를 적극적으로 이용하는 것이 바람직하다. 노출 정보의 경우, 화학물질의 특성 정보는 국가별로 차이가 없으나 배출



량의 정보를 이용하는 경우 불확실성의 원인이 될 수 있다. 국내의 배출량 보고 제도는 일정 기준 이상의 사업장에 대해서 기준 이상의 물질에 대해 보고하도록 하고 있어(환경부, 2003), 이 과정에서 보고자의 전문성 부족 및 조사 대상 물질의 누락 등이 변수로 작용할 수 있기 때문에, 이에 대한 불확실성이 반드시 고려되어야 하며, 국가적 차원에서도 좀더 포괄적이고 체계적인 조사 계획과 조사 자료의 신뢰성 확보 방안이 수립되어야 할 것이다.

## 맺 음 말

본 연구에서는 기존의 화학물질 우선순위 선정 기법에 대해 고찰하고, 이들을 서로 비교해보았다. 또한 국내에서 이와 같은 우선순위 선정 기법을 제안하기 전에 반영되어야 할 원리들을 제안하였다. 우선 목적을 명확히 하고, 자료 입력시 중립성을 유지하고, 이용하기 용이하도록 개발되는 것이 좋다. 이러한 원칙에 입각하여 제안된 CRS 기법은 위해성 평가에서 필요한 정량적 지표에 대한 가용성이 떨어지기 때문에 기법의 논리나 자료의 신뢰도만 확보된다면, 화학물질 관리에 대한 선별 수단으로서 유용할 것으로 기대된다. 또한 이를 토대로 결과의 불확실성을 설명하기 위해서 민감도 분석이나 단계적 접근을 수행하여 효율적인 화학물질 관리 체계를 구성할 필요가 있다.

## 감사의 글

본 연구는 2003년 환경부의 “위해우려물질 선정 및 평가 연구”의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

국립환경연구원. 화학물질 관리 체계 개선을 위한 기반 연구, 1996.  
국립환경연구원. 화학물질의 환경 위해성 평가 연구, 1991.

한국화학연구소. 환경오염물질의 위험성확인 및 독성평가에 관한 연구. 환경부, 1995.  
환경부. 화학물질 배출량조사 지침, 2003.  
환경부. 환경백서, 2002.  
환경부. 유해화학물질관리 기본계획, 2000.  
ECB (European Chemical Bureau). <http://ecb.jrc.it>, 2003.  
Environment Canada. The ARET substance selection process and guideline, 1994.  
ICF. Preliminary survey of chemical exposure screening method (Briefing report), 1994.  
Erin MS, Shane AS, John PG *et al.* SCRAM : A Scoring and Ranking System for Persistent, Bioaccumulative, and Toxic Substances for the North American Great Lakes - Part I : Structure of the Scoring and Ranking System, Environmental Science and Pollution Research 2000; 7(1): 1-11.  
Gary AD, Mary BS, Sheila J. Comparative evaluation of chemical ranking and scoring methodologies, US EPA, 1994.  
Hansen BG, Haelst AL *et al.* Priority setting for existing chemicals; The European Union risk ranking method, Environmental Toxicity and chemistry 1999; 18: 772-779.  
Heriot Watt university. Examples of the application of data to hazard and risk assessment, 2003.  
Mary BS and Adam CS. Chemical ranking and scoring : Guidelines for relative assessment of chemicals, SETAC press, 1997a.  
Mary BS, Gary AD, Lori EK, Terry WS, John EB, Sheila LJ and Emma LG. A screening method for ranking and scoring chemicals by potential human health and environmental impacts, Environmental Toxicology and Chemistry 1997b; 16(2): 372-383.  
Rachel RM, Cheryl LS, Shari AB *et al.* 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 2002; 8(3): 537-557.  
US EPA. Chemical Screening Report for the RCRA PBT List Docket, 1998.  
US EPA. Comparative evaluation of chemical ranking and scoring methodology, 1994a.  
US EPA. Chemical hazard evaluation for management strategies; A method for ranking and scoring chemicals by potential human health and environmental impacts, 1994b.