

개선된 화학물질 우선순위 선정 기법 (CRS-Korea II)과 그 활용을 통한 지역별 유독물 우선순위의 도출

최승필, 박화성¹, 이동수^{*}, 신용승², 김예신³, 신동천⁴

서울대학교 환경계획연구소, ¹국립환경과학원, ²한국환경정책·평가연구원,
³리스크컴, ⁴연세대학교 환경공해연구소

Development of CRS-Korea II and its Application to Setting the Priority of Toxic Chemicals for Local Provinces

Seung-Pil Choi, Hoa-Sung Park¹, Dong-Soo Lee^{*},
Yong-Seung Shin², Ye-Shin Kim³ and Dong-Chun Shin⁴

Environmental Research Institute, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

¹National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea

²Korea Environment Institute, Seoul 122-706, Korea

³Riskcom, Gyeonggi 435-040, Korea

⁴Institute for Environmental Research, Yonsei University, Seoul 120-752, Korea

ABSTRACT

A chemical ranking and scoring system, CRS-Korea, has recently been developed and proposed to use to prioritize on a screening level the toxic chemicals for monitoring and risk assessment. As CRS-Korea requires rigorous assessments prior to its wide application, an assessment was conducted in this study by examining the contribution of individual parameter score to the final chemical score or ranking. The sensitivity of the system to the default values for various parameters of missing data was also tested. The chemical ranking/score was found to depend primarily on the score of a single parameter, i. e., the chemical release, while toxicity scores show little correlation with the priority. Further analysis indicated that the dominating effect of the chemical release results from i) its multiplicative relationship with the other two exposure parameters (biodegradation and persistent) and ii) the fact that a maximum score of 10 was assigned to the chemical release parameter while 5 was assigned for all others. As the fraction of the data that are missing exceeded 70% for various toxicity parameters as compared to less than 10% for exposure parameters, the sensitivity of the ranking to the default value was not significant (rank correlation coefficient = 0.98) for toxicity parameters. Based on this assessment, an improved CRS system (CRS-Korea II) was proposed in which the impact of the chemical release was properly adjusted by changing the multiplicative relationship to additive one and the maximum score to 5. Chemical priority was derived for each of 16 provinces by using CRS-Korea II. The chemical priority was found to significantly vary among the provinces. It was concluded that not only the national chemical priority but the local chemical priority should be taken into account in setting the nationwide chemical monitoring and risk assessment strategy.

Key words : CRS-Korea, local chemical priority, sensitivity

^{*}To whom correspondence should be addressed.

Tel: +82-2-880-8522, E-mail: leeds@snu.ac.kr

서 론

현재 국내에서는 유해화학물질관리법에 의해 화학물질이 시장 진입시에는 유해성 심사를, 시장 유통시에는 유독물 영업등록 및 관리와 유통량 조사를, 환경 배출시에는 배출량 조사를 실시하고, 화학물질의 취급제한 및 금지의 관리 체계를 거치게 된다. 화학물질로 인한 피해는 물질의 독성과 환경 중의 노출량에 종합적으로 영향을 받는데 비해, 이러한 기존의 관리체계는 주로 독성을 기준으로 삼고 있기 때문에 화학물질로 인한 위협을 적절히 관리할 수 없는 측면이 있다(김용화, 1998). 따라서 독성과 노출을 모두 고려한 위해성을 기반으로 관리가 이루어질 필요가 있지만 실제 위해성 평가는 많은 정보와 자원을 요구하기 때문에 현실적으로는 대상물질의 수를 적절한 수준 이하로 유지할 수밖에 없는 실정이다(van Leeuwen *et al.*, 1995, 1996).

따라서 관리의 시급성에 대한 물질간의 우선순위를 먼저 결정하기 위해 우선순위결정(chemical ranking and scoring; 이하 CRS) 기법의 필요성이 대두되고 있으며, 실제로 지난 20년간 여러 국가에서 다양한 CRS 기법이 개발되었다(Swanson *et al.*, 1997; 김예신 등, 2003). 국내에서도 최근에는 환경부에서 유독물로 지정된 화학물질을 대상으로 인체와 생태에 대한 독성 및 노출로 인한 영향을 종합적으로 고려한 CRS 체계(CRS-Korea)가 기존의 국내의 연구결과를 바탕으로 본격적으로 만들어졌으며(박화성 등, 2005), 이를 활용하여 우선순위가 높은 물질을 선정하고 그들에 대한 위해성 평가가 진행되고 있다(연세대학교 환경공해연구소, 2003). 그러나 아직 CRS-Korea에 대한 충분한 검토와 평가가 이루어지지 않은 상태이기 때문에 이를 통한 보완 및 개선의 여지가 남아있다. 또한 CRS-Korea는 국가 전체를 대상으로 우선순위를 도출할 수 있도록 만들어진 체계이지만, 평가 대상 화학물질에 따라 국가규모의 평가와는 다른 특성이 지역별 평가에서 나타날 수 있는 가능성이 있다. 그러나 지역별 우선순위를 도출한 연구는 아직 이루어진 적이 없다. 따라서 화학물질 생산 및 소비, 오염의 지역적 특성과 차이를 반영한 지역별 우선순위를 선정하여 이를 국가 전체를 대상으로 한 우선순위

와 비교 검토를 하는 것은 화학물질관리상 매우 의미 있는 시사점을 제공할 것이다.

본 연구에서는 환경부에서 지정한 유독물을 대상으로 기존에 제안된 CRS-Korea를 평가하고, 그 결과를 바탕으로 개선된 CRS 체계를 제안하고자 한다. 또한 개선된 CRS 체계를 활용하여 전국의 16개 광역지자체를 대상으로 지역별 환경특성과 화학물질 사용량 등을 고려한 유독물의 지역별 우선순위를 선정 평가하고자 한다.

연구 범위 및 방법

본 연구는 세 단계로 구성되었다. 첫째, CRS 체계의 논리와 지표의 선정에 있어서 CRS-Korea와 국외의 대표적 CRS 체계들의 유사점과 차이점을 간단히 비교한다. 또한 CRS-Korea의 개선을 위해 도출된 우선순위와 그에 영향을 미치는 지표들 사이의 상관성분석을 통해 독성 및 노출 부분의 비중, 배점범위와 방식의 타당성을 평가한다. 한편, CRS 시스템에서 요구되는 자료들 가운데 흔히 결측치(missing data)가 존재하게 되는데, 이러한 경우에 대해 주어지는 기본 입력값(default value)에 따라 최종결과가 어떻게 변화하는지를 평가하는 것은 우선순위를 적절하게 이해하고 활용하기 위해서 대단히 중요하다. 이를 위해 기본 입력값에 대한 CRS-Korea의 최종 우선순위의 민감도분석(sensitivity analysis)을 실시하고, 이를 통해 그 특징을 파악해 본다. 본 연구에서는 민감도 분석결과를 통계적으로 평가하기 위해 순위상관분석을 실시하였다. 순위상관분석은 자료가 수치의 형태로 사용되기에는 불충분하고, 순위로서는 충분히 사용될 수 있는 정보인 경우에 사용된다(임규근, 1997; 편인범, 2001). 순위상관계수는 변수의 특성치에 의해서가 아니라 특성치의 순위에 의해서 두 변수간의 관련 정도를 나타내는 척도로 이용되며 식(1)과 같이 정의되는데, 특히 자료의 크기가 작을 때 순위상관계수가 상관계수보다 신뢰성이 높은 것으로 알려져 있다(임규근, 1997; 편인범, 2001).

$$r_s = 1 - \left[6 \sum_{i=1}^n d_i^2 / n(n^2 - 1) \right] \quad (1)$$

r_s : 순위상관계수

$d_i = x_i - y_i$ (x_i, y_i : 두 변수의 각각의 순위)
 n : 관찰 쌍의 수

실제 CRS-Korea의 경우, 수치로 나타낼 수 있는 지표와 그렇지 못한 지표(발암성 및 기타독성)로 구성되어 있으며, 최종순위를 선정하는 과정에서 점수의 범위를 정규화하는 단계가 포함되어 있어 선정지표의 점수가 그대로 최종순위에 반영되지는 않는다(연세대학교 환경공해연구소, 2003; 박화성 등, 2005). 이에 본 연구에서는 CRS-Korea에서 도출되는 기본 입력값에 따른 최종 순위의 민감도를 분석하기 위해 선정지표 점수의 순위와 최종순위간의 상관성을 분석하는 것이 효율적인 것으로 판단되어 순위상관분석법을 채택하였다. 둘째, 이러한 평가의 결과들을 종합하여 문제점 및 보완점들을 도출하고 그를 바탕으로 기존의 것에 비해 개선된 CRS-Korea II를 제안한다. 셋째, 화학물질 관리에 있어서 지역별 우선순위의 특성을 알아보기 위해 CRS-Korea II를 활용하여 전국 광역시 및 도 지역을 대상으로 시·도별 유독물질 우선순위를 도출한다. 이를 위해 1999~2001년 사이의 유독물 실적보고 자료(환경부, 1999~2001)를 지역별로 분류하여 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 기존 CRS 체계의 특성 비교

CRS-Korea의 체계에 대한 상세한 내용은 기존의 문헌(연세대학교 환경공해연구소, 2003; 박화성 등, 2005)에 설명되어 있으므로 여기에서는 생략하며, 주요 특성을 외국의 대표적인 CRS 체계들과 비교하여 Table 1에 정리하였다. 여러 CRS 체계에서 공통적으로 위해도 평가의 두 요소인 노출과 독성을 모두 사용하고 있음을 알 수 있다. 또한 물질의 우선순위를 평가함에 있어서 인체위해도 뿐만 아니라 생태위해도도 중요한 고려인자임을 보여 주고 있다.

선정된 지표를 살펴보면 독성부분에서는 인체와 생태로 구분하고 있으며, 주로 반수치사량(lethal dose, LD₅₀ 또는 lethal concentration, LC₅₀), 무영향농도수준(No Observed Adverse Effect Level, NOAEL), 최저영향농도수준(Lowest Observed

Adverse Effect Level, LOAEL) 등이 사용되며, EURAM(Europe Union Risk rAnking Method)의 경우 독특하게 Risk-phrase를 채택하고 있다(Hansen *et al.*, 1999). 노출부분에서는 대부분 잔류성과 생물농축성이 고려되며 이들에 대한 지표로서 각각 반감기와 BAF(Bioaccumulation Factor) 또는 BCF(Bioaccumulation Factor)를 채택하고 있다. 노출과 독성 지표간 비중은 CRS-Korea와 EURAM에서는 1:1로 두고 있으며, SCRAM(chemical SCoring and Ranking Assessment Model)(Erin *et al.*, 2000; Rachel *et al.*, 2002)과 RCRA(Resources Conservation & Recovery Act)(US EPA, 1998)는 노출에 더 큰 비중을, CHEMS-1(Chemical Hazard Evaluation for Management Strategies)(US EPA, 1994)은 독성에 더 큰 비중을 두고 있어서 평가의 목적이나 대상 물질에 따라 다를 수 있음을 보여 준다. 또한 최종 순위를 도출하기 위한 노출과 독성의 관계를 보면 CRS-Korea와 EURAM 그리고 CHEMS-1이 위해도평가의 틀을 그대로 따라 “곱의 관계”를 채택하고 있으며, SCRAM과 RCRA는 노출과 독성의 “합의 관계”를 채택하고 있다.

각 지표들에 대한 배점방식은 CRS-Korea, SCRAM, ARET(Accerated Reduction/ Elimination of Toxics), RCRA가 구간 배점방식을 채택하고 있으나 EURAM과 CHEMS-1은 로그 배점방식을 채택하고 있어서 점수가 연속적이다(Environment Canada, 1994; US EPA, 1998; Erin *et al.*, 2000; Rachel *et al.*, 2002; 박화성 등, 2005). 한편 필요한 정보가 없는 경우에는 기본입력값을 지정하여 사용하도록 하고 있는데, CRS-Korea와 CHEMS-1에서는 최소값에서 최대값을 유연하게 적용할 수 있고, EURAM은 보수적으로 최대값을 적용하며, SCRAM은 자료의 질에 따라 불확실성점수(uncertainty score)를 부여하여 최종 순위 산정에 포함시키고 있다.

환경 오염도를 평가하기 위해서는 배출량 정보가 필요하나 대다수의 물질들에 대해 배출량정보는 존재하지 않기 때문에 그를 기반으로 하는 것은 CHEMS-1뿐이었으며 CRS-Korea, EURAM, RCRA에서는 대리지표로서 사용량 자료를 사용하도록 되어 있다. 또한 총 배출량이나 사용량 자료로부터 각 매질별 배출량을 추정하기 위해서 CRS-Korea, EURAM, SCRAM, RCRA에서는 Mackay

Table 1. Comparisons of several chemical ranking and scoring methods

System	Indicator	Exposure	Toxicity	Weight between exposure and toxicity	Relationship between exposure and toxicity	Scoring	Release data	Multimedia model
						Data gaps		
CRS - Korea		Persistence: Half-life (air, water, sediment, soil) Bioaccumulation: BAF, BCF	Human: LC ₅₀ , LD ₅₀ , NO (A)EL, LO (A)EL, WOE, Other toxicity Ecological: LC ₅₀ , LD ₅₀ , NO (A)EC, LO (A)EC, NO (A)EL, LO (A)EL	1 : 1	Multiplication	Interval [1 ~ 5] Usage score [1 ~ 10] min. ~ max.	Usage	Mackay level I
EURAM		Human : B.P., V.P., K _{ow} Ecological: BCF, Biodegradation	Human: Risk-phrases Ecological: NOEC, EC ₁₀ , EC ₅₀ , LC ₅₀ , R-phrases	1 : 1	Multiplication	Logarithm (indicator: 0 ~ 10, final score: 0 ~ 100) max.	Usage	Mackay level I
CHEMS-1		Persistence: BOD half-life, Hydrolysis half-life Bioaccumulation: BCF	Human: LC ₅₀ , LD ₅₀ , Carcinogenicity, Other specific effects Ecological: LC ₅₀ , LD ₅₀ , NOEL	Exposure < Toxicity	Multiplication	Logarithm (toxicity: 0 ~ 5, exposure: 1 ~ 2.5) min. or max.	TRI	no
SCRAM		Persistence: Half-life (biota, air, soil, sediment, water) Bioaccumulation: BCF, BAF, K _{ow}	Human: LO (A)EL, NO (A)EL, ED ₁₀ Ecological: ED ₅₀ , LD ₅₀ , EC ₅₀ , LC ₅₀ , LO (A)EL, NO (A)EL	1.5 : 1	Addition	Interval (1 ~ 5) Uncertainty score	no	Mackay level III
ARET		Persistence: Half-life (air, water, or sediment) Bioaccumulation: BCF, K _{ow}	LD ₅₀ , LC ₅₀ , EC ₅₀ , NOEL, etc.	NA	NA	Interval (0 ~ 10)	no	no
RCRA		PBT characteristics, Environmental programmatic concerns Persistence: regional half-life Bioaccumulation: BAF of BCF	Human: LOAEL Ecological: LC ₅₀ , NOEC	2 : 1	Addition	Interval (1 ~ 3)	yes	EQC (Mackay level III)

*EURAM (Europe Union Risk Ranking Method); CHEMS-1 (Chemical Hazard Evaluation for Management Strategies); SCRAM (chemical Scoring and Ranking Assessment Model); ARET (Accelerated Reduction/Elimination of Toxics); RCRA (Resources Conservation & Recovery Act); BAF (Bioaccumulation Factor); BCF (Bioaccumulation Factor); B.P. (Boiling Point); V.P. (Vapor Pressure); K_{ow} (octanol-water coefficient); BOD (Biological Oxygen Demand); PBT (Persistent, Bioaccumulative and Toxic); LC₅₀ (lethal concentration); LD₅₀ (lethal dose); NO (A)EL (No Observed (Adverse) Effect Level); LO (A)EL (Lowest Observed (Adverse) Effect Level); WOE (weight-of-evidence); EC (Effective concentration); NA (Not applicable); TRI (Toxics Release Inventory); EQC (Equilibrium Criterion).

Table 2. Correlation coefficients (r) between final score and exposure or toxicity score in CRS-Korea

	Exposure (r)	Toxicity (r)
Human risk	0.93	0.50
Ecological risk	Aquatic ecological risk	0.83
	Terrestrial ecological risk	0.83

Type 다매체거동모형 (Mackay, 1991)이 채택되고 있다.

2. 지표와 우선순위의 상관성 분석

우선순위의 평가를 위해서 CRS-Korea에서 사용하고 있는 지표는 인체와 생태, 노출과 독성 등 각 분야별로 매우 다양하다(박화성 등, 2005). 따라서 이들 가운데 어느 한 분야 혹은 일부 지표들에 의해 우선순위가 지나치게 편중된 영향을 받지 않도록 하는 것이 대단히 중요하다. 먼저 최종점수와 노출분야 혹은 독성분야의 점수와와의 상관관계를 분석한 결과 Table 2에 요약된 바와 같이 독성점수 보다는 노출분야의 점수가 최종점수와 큰 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

이는 최종점수가 노출분야의 점수에 의해 주로 좌우됨을 나타내 주는 것으로서 현재 CRS-Korea에 의해 도출되는 유독물의 우선순위는 독성 보다는 노출에 의해 크게 좌우될 수 있음을 의미한다. 이는 한편으로 대상물질이 모두 유독물이기 때문에 독성에 의한 물질간 차이가 상대적으로 작기 때문일 수도 있지만, 다른 한편으로는 현 체계의 구조적 특성 때문일 수도 있다.

그 원인을 파악하기 위해서 노출분야의 각 지표인 지속성, 생물농축성, 배출량의 점수들과 최종점수의 상관관계를 조사하였다. 그 결과 Table 3에서 볼 수 있는 바와 같이 이들 가운데에서도 배출량과 최종점수간의 상관관계가 0.83으로 가장 높았다. 반면 지속성의 상관계수는 독성지표들의 상관계수와 큰 차이가 없었으며 생물농축성은 최종점수와와의 상관관계가 아주 낮은 것으로 나타났다. 따라서 노출분야의 높은 상관계수는 실제로는 주로 배출량의 영향에 의한 것으로 판단된다.

배출량 점수와 최종 점수의 상관관계가 높은 이

Table 3. Correlation coefficients (r) between total score and individual parameter score in CRS-Korea

Parameters	Correlation coefficient (r)
Total release	0.83
Terrestrial release	0.72
Release to water	0.71
Persistence	0.48
Human sub-/chronic toxicity	0.47
Terrestrial sub-/chronic toxicity	0.47
Carcinogenicity	0.39
Other toxicity	0.38
Aquatic sub-/chronic toxicity	0.18
Aquatic acute toxicity	0.07
Bioaccumulation	0.07
Human acute toxicity	0.06
Terrestrial acute toxicity	-0.02

유는 크게 두 가지를 들 수 있을 것이다. 첫째, 배출량 점수는 지속성 점수와 생물농축성 점수를 합한 점수와 곱의 관계에 있다는 구조적 특성과, 둘째, 배출량 점수는 총점 10점으로서 다른 개별 지표보다 점수의 폭이 크며 대상물질들의 배출량 점수의 변이의 폭이 다른 어떤 지표의 변이보다 크기 때문에 그에 의한 차이가 상대적으로 큰 변별력을 가지고 최종 점수에 반영될 가능성이 있다. 현재 대부분의 물질에 대해 배출량 정보가 부재하여 사용량을 대리지표로 사용하기 때문에 그 불확실성이 작지 않음을 고려하면 이와 같은 배출량 점수의 과도한 영향에 대한 보완이 우선적으로 필요함을 알 수 있다.

한편 독성 지표들 가운데 육상생태 급성독성과 수서생태의 급만성 독성지표들은 최종 우선순위결과와 상관성이 아주 낮은 것으로 나타났는데, 이는 자료의 부족으로 인해 주로 기본입력값을 많이 사용하였기 때문이다. 현재 CRS-Korea를 통해 얻어지는 우선순위결과는 이러한 기본입력값의 영향을 배제하지 못한 상태에서 도출된 것이기 때문에 더 합리적인 결과를 얻기 위해서는 앞으로 이들 지표에 대한 신뢰성 있는 자료의 획득이 대단히 중요한 과제이다.

3. 기본입력값에 대한 민감도 분석

CRS-Korea는 그 사용을 가능하면 쉽게 하기 위해서 선정지표의 점수화를 위해 필요한 자료의 중

Table 4. Number and fraction of missing data for individual parameters for the toxic chemicals in Korea

Indicator	Missing data	
	No. (total number : 650)*	% of total
Bioaccumulation	60	9%
Persistence	34	5%
Human acute toxicity	115	18%
Human & Terrestrial sub-/chronic toxicity	508	79%
Carcinogenicity	466	72%
Aquatic acute toxicity	66	10%
Aquatic sub-/chronic toxicity	86	13%
Terrestrial acute toxicity	138	21%

*Expanding several toxic chemical compounds and salts to representative single chemicals based on toxic chemical information

류를 최소화 시키고자 하였다 (Swanson and Socha, 1997). 그럼에도 불구하고 CRS-Korea를 환경부 지정 유독물에 적용할 때 결측치가 많은 것으로 나타났다 (Table 4). 인체 및 육상생태의 만성독성 지표의 경우 전체 대상물질의 약 79%, 발암성 지표의 경우 약 72%가 필요한 정보를 빠뜨리고 있어 독성자료는 많이 보완되어야 할 필요가 있는 반면, 노출과 관련된 자료의 결측률은 10% 미만으로 상대적으로 낮았다. 결측치를 보이는 지표에 대해서는 물질에 관계없이 같은 기본입력값이 부여 되도록 되어 있기 때문에 일부 독성지표들의 높은 결측률은 물질간의 독성의 차이를 구분하지 못하는 결과를 초래하며 이는 앞에서 나타난 대로 최종점수와 독성점수의 상관관계를 약화시키는 한

Table 5. Sensitivity of the ranking to the default value, for top 30 chemicals selected using CRS-Korea

Rank	Default value = 1	Default value = 5
1	Benzene	Ammonia
2	Phosphorus	Chromic acid
3	Ammonia	Benzene
4	Acrylonitrile	Acrylonitrile
5	Phenol	Methanol
6	Chromic trioxide, Chromium trioxide, Chromic anhydride	o-Xylene
7	Toluene	Phosphorus
8	1-Chloro-2-nitrobenzene	Hydrochloric acid
9	Hydrochloric acid	Sodium hydroxide
10	4,4'-Methylenediphenyl diisocyanate (MDI)	Ethyl acetate
11	Ethyl acetate	Phenol
12	Nitrobenzene	Chromic trioxide, Chromium trioxide, Chromic anhydride
13	Chromic acid	Chlorosulfonic acid
14	o-Xylene	Toluene
15	Formaldehyde	1-Chloro-2-nitrobenzene
16	Sulfuric acid	2,5-Diaminotoluene
17	Propylene oxide	Antimony trisulfide
18	Chloroform	Bromine
19	Epichlorohydrin	4,4'-Methylenediphenyl diisocyanate (MDI)
20	Aniline	Phosgene
21	o-Cresol	Thionyl chloride
22	Chlorosulfonic acid	Nitrobenzene
23	2,5-Diaminotoluene	Hydrazine/Hydrazine sulfate
24	Ethylene oxide	Sodium nitrite
25	Carbon tetrachloride	2-Vinylpyridine
26	Tetrachloroethylene	Lead acetate
27	1,2-Dichloroethane	Formaldehyde
28	Methanol	Sulfuric acid
29	Lead acetate	Propylene oxide
30	Sodium nitrite	Nitric acid

Table 6. Sensitivity of the ranking to the parameters of missing data fraction exceeding 50%, top 30 chemicals selected using CRS-Korea

Rank	Default = 1 for Human & Terrestrial sub-/chronic toxicity, Carcinogenicity	Default = 5 for Human & Terrestrial sub-/chronic toxicity, Carcinogenicity
1	Phosphorus	o-Xylene
2	Acrylonitrile	Phenol
3	o-Xylene	Acrylonitrile
4	Chromic acid	Phosphorus
5	1-Chloro-2-nitrobenzene	Benzene
6	Chlorosulfonic acid	Ammonia
7	Phenol	Toluene
8	Ammonia	1-Chloro-2-nitrobenzene
9	Ethyl acetate	Hydrochloric acid
10	2,5-Diaminotoluene	Chromic acid
11	Benzene	4,4'-Methylenediphenyl diisocyanate (MDI)
12	Hydrochloric acid	2,5-Diaminotoluene
13	Toluene	Ethyl acetate
14	4,4'-Methylenediphenyl diisocyanate (MDI)	Chlorosulfonic acid
15	Chromic trioxide, Chromium trioxide, Chromic anhydride	Chromic trioxide, Chromium trioxide, Chromic anhydride
16	Sulfuric acid	Nitrobenzene
17	Hydrazine, monohydrate	Bromine
18	Phosgene	Methanol
19	Formaldehyde	Sulfuric acid
20	Aniline	Sodium hydroxide
21	Nitrobenzene	Lead acetate
22	o-Phenylenediamine	Sodium nitrite
23	o-Cresol	2-Vinylpyridine
24	2-Vinylpyridine	Antimony trisulfide
25	Chloroform	Propylene oxide
26	Sodium nitrite	Phosgene
27	Bromine	Aniline
28	Dimethyl sulfate	Formaldehyde
29	Propylene oxide	Thionyl chloride
30	Epichlorohydrin	Hydrazine, monohydrate

*Shaded chemicals are those that their inclusion in the top 30 list depends on the default values used for missing data.

원인이 될 수 있다.

그러나 이러한 결측치에 대해서는 기본입력값을 부여하여 점수를 산정하는 것이 일반적인 방법이나 (Swanson and Socha, 1997), CRS의 목적이나 활용의 기본적인 철학에 따라 기본입력값을 부여하는 방식이 달라진다. 예를 들면 EURAM에서는 최대값을 부여함으로써 모르는 것은 가장 위험한 것으로 처리한다는 사전예방의 원칙을 존중한다 (Hansen *et al.*, 1999). 이러한 방식은 또한 결측치가 여럿인 물질이 지나치게 위협적인 것으로 평가되는 것을 줄이기 위해 부족한 자료를 신속하게 생산하도록 유도하는 효과도 있다. 반면 SCRAM은

자료의 질에 따라 불확실성 점수를 부여하여 최종 순위평가에 고려하고 있다 (Erin *et al.*, 2000; Rachel *et al.*, 2002). 또한 CRS-Korea와 CHEMS-1에서는 기본입력값을 최소값에서 최대값을 유연하게 적용할 수 있도록 되어 있기 때문에, 어떤 값을 사용하는가에 따라 최중우선순위 결과가 현저히 바뀌는 경우도 발생할 수 있다 (US EPA, 1994; 박화성 등, 2005). 따라서 기본입력값에 따른 결과의 민감도 혹은 불확실성에 대한 평가는 결과의 적절한 활용을 위해서 반드시 필요하다.

CRS-Korea에서는 결측치에 대한 기본입력값을 최소 1점에서 최대 5점까지 부여할 수 있게 설계

Table 7. Sensitivity of the ranking to the exposure parameters, top 30 chemicals selected using CRS-Korea

Rank	Default = 1 for Exposure parameters including Persistence, Bioaccumulation, and Release	Default = 5 for Exposure parameters including Persistence, Bioaccumulation, and Release
1	Formaldehyde	Mixture of trihexylphosphine oxide, tri-n-octyl phosphine oxide, dioctyl mono-octyl dihexylphosphine oxide
2	Carbofuran	Formaldehyde
3	Parathion	Diazinon
4	Dichlorvos	Benzoximate
5	Endosulfan	Ammonia
6	Chlorpyrifos	Alkyldimethylbenzylammonium chloride
7	Naled	Chloropromurite
8	Dinoseb, 2-sec-Butyl-4, 6-dinitrophenol	Chlorfenvinphos
9	Bis(tributyl tin) oxide	Terbufos
10	Chloroform	Fenvalerate
11	Malathion	Phorate
12	Chromic trioxide, Chromium trioxide, Chromic anhydride	Fluazinam
13	Benzene	Sodium tetrafluoroborate
14	Fenthion	N-Alkyl toluidine
15	Benzidine	1, 6-Bis (2, 3-epoxypropoxy) naphthalene
16	Carbon tetrachloride	Ethyl 5,5-diphenyl-2-isoxazoline- 3-carboxylate
17	Cyhalothrin	Nickel monoxide
18	Acrylonitrile	Sodium azide
19	Acrylamide, 2-Propenamide	Antimony trisulfide
20	Epichlorohydrin	Oxydemeton-methyl
21	Carbosulfan	Zeta cypermethrin
22	Hexachlorocyclopentadiene	Carbofuran
23	1, 2-Dibromoethane	Parathion
24	4, 4'-Methylenediphenyl diisocyanate (MDI)	Fenthion
25	Isophorone diisocyanate	Phosphamidon
26	Hexamethylene diisocyanate	Tebupirimfos
27	Molinate	N,N,N-Trimethyl-1-hexadecanaminium chloride
28	Propylene oxide, Methyloxirane	Dimethoate
29	Ammonia	Dichlorvos
30	Chlorothalonil	Methiocarb

*Shaded chemicals are those that their inclusion in the top 30 list depends on the default values used for missing data.

되었다. 기본입력값에 대한 최종결과의 민감도를 평가하기 위해 결측치의 기본입력값을 1점과 5점을 부여하여 최종 우선순위 결과를 도출한 후 상위 30개 물질의 목록을 비교하였다(Table 5).

Table 5에서 음영 표시한 8개의 물질은 기본입력값에 따라 상위 30위 목록 내에 포함 여부가 달라지며 상위 10위까지의 결과에서는 Benzene, Ammonia, Acrylonitrile, Hydrochloric acid가 양쪽 모두에 공통적으로 순위에 올랐다. 또한 결측치가 50% 이상인 3개의 지표(인체 및 육상생태 만성독성, 발암성)에 대한 기본입력값의 민감도를 검사한 결과,

상위 30개 물질 중 5개의 물질만이 서로 달라지는 것으로 나타났다(Table 6). 한편, 비교를 위하여 노출관련 지표들의 기본입력값 변화에 따른 결과의 민감도 분석을 실시하였다. Table 7은 노출분야 전체에 대한 민감도, Table 8은 배출량에 대한 민감도, Table 9는 잔류성과 생물농축성에 대한 민감도를 정리한 결과이다. 상위 30위에 오른 물질들 가운데, 노출분야에서는 기본입력값에 따라 24개 물질이 바뀌며 배출량 지표의 경우 18개 물질이, 잔류성과 생물농축성 지표에 의해서는 8개의 물질이 바뀌는 것으로 나타나서 배출량 지표의 영향이 크

Table 8. Sensitivity of the ranking to the default value of chemical release, top 30 chemicals selected using CRS-Korea

Rank	Default = 1 for Release	Default = 5 for Release
1	Endosulfan	N-Alkyl toluidine
2	Chlorpyrifos	1,6-Bis(2,3-epoxypropoxy) naphthalene
3	Bis(tributyl tin) oxide	Ethyl 5,5-diphenyl-2-isoxazoline-3-carboxylate
4	Hexachlorocyclopentadiene	Fensulfothion
5	Fenthion	Butyltriphenylphosphonium chloride
6	Carbofuran	1,1-Iminodi(octamethylene) diguanidinium tris(dodecylbenzenesulfonate)
7	Cyhalothrin	Endosulfan
8	Chlorothalonil	Diazinon
9	Chloroform	Fenvalerate
10	Diazinon	Antimony trisulfide
11	Chromic trioxide, Chromium trioxide, Chromic anhydride	Mercury acetate
12	Benzene	Chlorpyrifos
13	Dicofol	Hexachlorocyclopentadiene
14	Mercury acetate	Methyl hydrazine
15	Parathion	Bis(tributyl tin) oxide
16	1,2-Dibromoethane	Fenazaquin
17	4,4'-Methylenediphenyl diisocyanate (MDI)	Pyridaben
18	Carbosulfan	Terbufos
19	Carbon tetrachloride	Fluazinam
20	Dichlorvos	Dicofol
21	Terbufos	Fenthion
22	Ammonia	Monocrotophos
23	Ethylene oxide	Cyhalothrin
24	o-Cresol	Azocyclotin
25	Carbaryl	Triazophos
26	Aniline	Cyfluthrin
27	Thallium (I) acetate	Fenitrothion
28	Methomyl	Flusulfamide
29	Pyridaben	4-Bromo-2-(4-chlorophenyl)-1-(ethoxymethyl)-5-(trifluoromethyl)pyrrole-3-carbonitrile, CHLORFENAPYR
30	Fenazaquin	Fluquinconazole

*Shaded chemicals are those that their inclusion in the top 30 list depends on the default values used for missing data.

다는 사실이 다시 드러났다.

이러한 결과를 기본입력값의 변화에 따른 순위 상관 분석을 통해 종합적으로 살펴보면 Table 10과 같다. 순위상관계수가 낮은 것은 기본입력값이 바뀔 때 따라 순위의 변화가 심해서 바뀌기 전후의 순위상관성이 매우 낮음을 의미한다. 노출분야의 상관관계수가 0.27로 아주 낮으며 개별지표 가운데서 사용량의 순위상관계수가 0.57로 다른 것에 비해 더 낮음을 알 수 있다. 반면에 독성관련 지표에 의한 순위상관성은 0.98로 매우 높아 기본입력값

이 바뀌더라도 전체 순위가 크게 바뀌지 않음을 보여 준다.

이상의 분석에서 결측치가 많은 독성지표들의 기본입력값 변화에 따른 민감도가 상대적으로 낮게 나타나는 원인은 앞서 고찰한 바와 같이 독성 지표들의 비중이 CRS-Korea의 체계에서 상대적으로 작기 때문이라는 점이 다시 확인되었다.

4. CRS-Korea의 개선

이상의 분석에서 CRS-Korea의 평가는 노출분

Table 9. Sensitivity of the ranking to the default value of persistence and bioaccumulation, top 30 chemicals selected using CRS-Korea

Rank	Persistence and Bioaccumulation score to 1 (default value to 1 for other indicators)	Persistence and Bioaccumulation score to 5 (default value to 5 for other indicators)
1	Formaldehyde	Formaldehyde
2	Acrylonitrile	Ammonia
3	Benzene	Acrylonitrile
4	1-Chloro-2-nitrobenzene	Chromic acid
5	Phosphorus	Benzene
6	Sulfuric acid	Sodium hydroxide
7	Propylene oxide	o-Xylene
8	Ammonia	1-Chloro-2-nitrobenzene
9	Phenol	Phosphorus
10	Chromic trioxide, Chromium trioxide,	Chromic anhydride Sulfuric acid
11	Toluene	Propylene oxide
12	Epichlorohydrin	Nitric acid
13	Hydrochloric acid	Hydrochloric acid
14	4,4'-Methylenediphenyl diisocyanate (MDI)	Ethyl acetate
15	Ethyl acetate	Phenol
16	Nitrobenzene	Chromic trioxide, Chromium trioxide, Chromic anhydride
17	1,2-Dichloroethane	Chlorosulfonic acid
18	Hydrogen peroxide	Toluene
19	Chromic acid	2,5-Diaminotoluene
20	o-Xylene	2-Vinylpyridine
21	Acrylamide	Epichlorohydrin
22	Dimethyl sulfate	Hydrogen peroxide
23	Methyl ethyl ketone (MEK)	Dichromic acid
24	Chloroform	Dimethyl sulfate
25	Aniline	Bromine
26	o-Cresol	4,4'-Methylenediphenyl diisocyanate (MDI)
27	Chlorosulfonic acid	Phosgene
28	2,5-Diaminotoluene	Thionyl chloride
29	Ethylene oxide	Fuming sulfuric acid
30	Methanol	Nitrobenzene

*Shading indicates a chemical that is unique to one column in the Table.

야 특히 배출량 지표에 의해 특히 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 이는 독성자료가 많이 부족하여 많은 물질들에 대해 동일한 독성 기본입력값을 사용하기 때문이기도 하다. 그러나 그보다 더 중요한 이유는 본 평가체계에서 배출량은 최대접수도 다른 지표들의 두 배로 클 뿐만 아니라 다른 노출 평가지표인 잔류성과 생물농축성과 합이 관계가 아니라 곱의 관계에 있기 때문이다. 따라서 CRS-Korea를 적절하게 활용할 수 있기 위해서는 독성 자료의 생산 혹은 보충이 필요할 뿐만 아니라, 특히 배출량지표에 의한 과도한 영향을 조정할 필요

Table 10. Rank correlation coefficient between the default values of 1 and 5

Correlation coefficients	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄
	0.98	0.27	0.57	0.85

*r₁, r₂, r₃, r₄: Correlation coefficients for chronic/subchronic toxicity & carcinogenicity, exposure, release, and persistence & bioaccumulation, respectively.

가 있다.

배출량지표의 영향을 줄이는 방법으로는 먼저 지표의 배점을 줄여 다른 지표와 동일하게 하거나

Table 11. Correlation coefficients (r) of exposure and toxicity scores with total score in revised CRS-Korea (Intervals for chemical release : 1~5)

		Revised CRS system		CRS-Korea	
		Exposure (r)	Toxicity (r)	Exposure (r)	Toxicity (r)
Human risk		0.87	0.54	0.93	0.50
Ecological risk	Aquatic ecological risk	0.81	0.26	0.83	0.14
	Terrestrial ecological risk	0.83	0.39	0.83	0.35

Table 12. Correlation coefficients (r) of exposure and toxicity scores with total score in revised CRS-Korea (Changing to additive relationships between chemical release and persistence/bioaccumulation)

		Revised CRS system		CRS-Korea	
		Exposure (r)	Toxicity (r)	Exposure (r)	Toxicity (r)
Human risk		0.70	0.67	0.93	0.50
Ecological risk	Aquatic ecological risk	0.68	0.53	0.83	0.14
	Terrestrial ecological risk	0.71	0.58	0.83	0.35

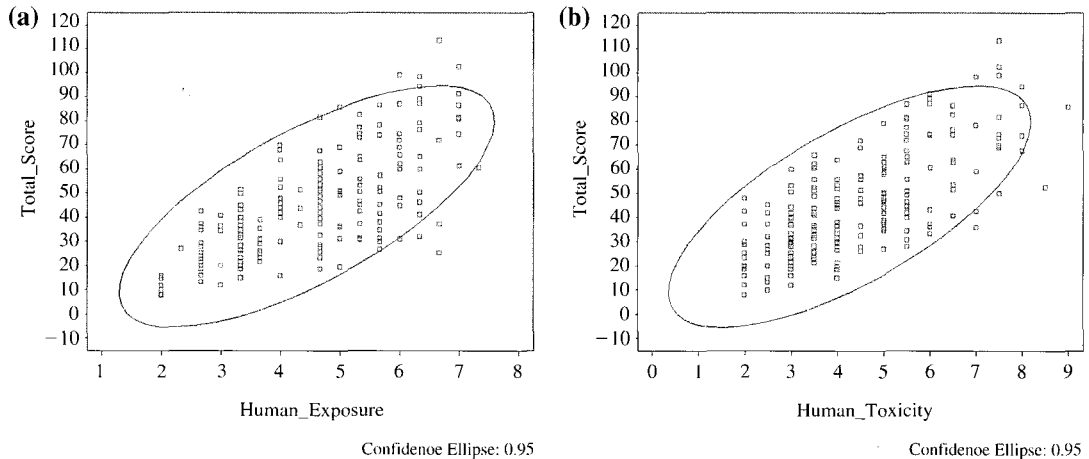


Fig. 1. Correlation between total score and (a) exposure score and (b) human toxicity score in revised CRS-Korea.

다른 노출지표와의 관계를 현재의 곱에서 합으로 바꾸는 것이다 (US EPA, 1998; Erin *et al.*, 2000; Rachel *et al.*, 2002). 일차적으로 배점을 다른 지표들과 동일하게 5점으로 했을 경우, 우선순위의 배출량에 대한 의존도가 부분적으로 줄긴 하였지만 여전히 독성지표에 비해 매우 크게 나타났다 (Table 11).

따라서 배출량의 배점의 크기보다는 다른 지표와의 관계에 변화가 있어야 합을 알 수 있었다. 이러한 결과에 근거하여 배출량지표의 관계를 곱에

서 합으로 바꾸고 그에 따라 배점도 다른 노출지표와 동일하게 5점으로 축소한 후 상관분석을 실시하였다. 이후 노출부분 및 독성부분과 최종점수와의 상관성과 분포도를 분석해본 결과, 노출부분은 상관계수의 범위가 0.68~0.71, 독성부분은 0.53~0.67로 나타나 노출부분과 독성부분이 거의 유사한 비중을 갖게 된 것을 알 수 있었다 (Table 12). 이는 CRS-Korea에서 나타난 과도한 노출부분의 비중 문제가 해결되었음을 나타낸다. 실제로 대상 유독물질의 최종 점수가 노출점수나 독성점

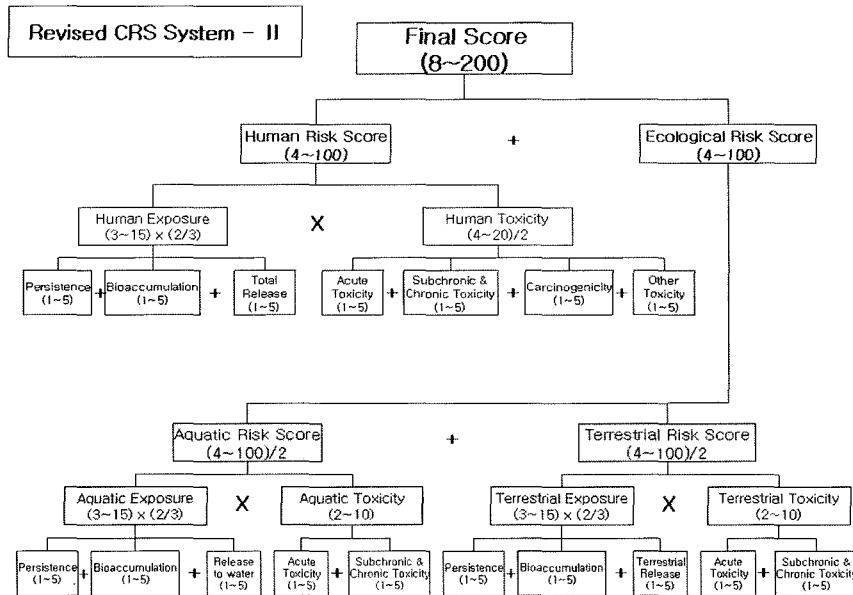


Fig. 2. Scheme of CRS-Korea II.

Table 13. Surface areas of soil and water in the 16 provinces*

Unit : m ²	Total	Soil	Water
Seoul	6.06E+08	5.48E+08	5.80E+07
Busan	7.62E+08	7.03E+08	5.91E+07
Daegu	8.86E+08	8.20E+08	6.57E+07
Incheon	9.80E+08	9.37E+08	4.31E+07
Gwangju	5.01E+08	4.65E+08	3.67E+07
Daejeon	5.40E+08	4.92E+08	4.79E+07
Ulsan	1.06E+09	1.00E+09	5.18E+07
Gyeonggi	1.01E+10	9.47E+09	6.62E+08
Gangwon	1.66E+10	1.60E+10	6.35E+08
Chungbuk	7.43E+09	6.97E+09	4.66E+08
Chungnam	8.60E+09	7.96E+09	6.40E+08
Jeonbuk	8.05E+09	7.48E+09	5.75E+08
Jeonnam	1.20E+10	1.13E+10	6.49E+08
Gyeongbuk	1.90E+10	1.80E+10	1.07E+09
Gyeongnam	1.05E+10	9.94E+09	5.76E+08
Jeju	1.85E+09	1.82E+09	2.94E+07

*Cited from Annual report of construction & transportation in Korea, 2002.

수에 의해 고르게 영향을 받는 것이 Fig. 1에 잘 나타나고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 CRS-Korea를 개선하여 배출량 지표의 점수 역시 다른 지표들과 같이 5점 척도를 부여하고, 나머지 노출관련 변수

Table 14. The total usage of toxic chemicals from 1999 to 2001*

Area	Number of Toxic chemicals used	Quantity (unit : ton)
Seoul	56	366,395.8
Busan	64	1,892,746.1
Daegu	41	2,794,220.5
Incheon	114	5,125,132.6
Gwangju	14	44,897.9
Daejeon	103	18,894,870.2
Ulsan	73	339,829.0
Gyeonggi	123	7,361,858.6
Gangwon	16	1,208,804.7
Chungbuk	57	3,090,378.9
Chungnam	70	3,228,339.2
Jeonbuk	72	4,902,412.0
Jeonnam	68	11,983,927.5
Gyeongbuk	84	6,307,863.3
Gyeongnam	72	9,420,177.2
Jeju	5	264.7
Total		76,962,118.2

*Cited from Use of Toxic Chemicals, Report, Ministry of Environment in Korea, 1999~2001.

들과 합의 관계에 두어 CRS-Korea II를 제안하였다(Fig. 2).

Table 15. Chemicals priority (top 3) for local provinces as determined by using CRS-Korea II*

	Default : 1			Default : 5		
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
Seoul	Chlorpyrifos	Ammonia	Chloroform	Antimony trisulfide	Ammonia	Mercury acetate
Busan	Bis (tributyl tin) oxide	4,4'-Methylenediphenyl diisocyanate (MDI)	Chromic trioxide, Chromium trioxide, Chromic anhydride	Antimony trisulfide	Mercury acetate	Chromic acid
Daegu	Ammonia	Chromic trioxide, Chromium trioxide, Chromic anhydride	Toluene	Fenvalerate	Antimony trisulfide	Ammonia
Incheon	Phosphorus	Carbofuran	Chloroethanol	N-Alkyl toluidine	Antimony trisulfide	Mercury acetate
Gwangju	Chromic trioxide, Chromium trioxide, Chromic anhydride	Ammonia	Toluene	Ammonia	Chromic trioxide, Chromium trioxide, Chromic anhydride	Chromic acid
Daejeon	Endosulfan	Chlorpyrifos	Chloroethanol	1,1-Iminodi (octamethylene) diguanidinium tris (dodecylbenzenesulfonate)	Endosulfan	Diazinon
Ulsan	Benzene	Bis (tributyl tin) oxide	Chloroform	Butyltriphenylphosphonium chloride	Antimony trisulfide	Ammonia
Gyeonggi	Chlorpyrifos	Bis (tributyl tin) oxide	Hexachlorocyclopentadiene	1,6-Bis (2,3-epoxypropoxy) naphthalene	Ethyl 5,5-diphenyl-2-isoxazoline-3-carboxylate	Antimony trisulfide
Gangwon	Chromic trioxide, Chromium trioxide, Chromic anhydride	Toluene	Hydrochloric acid	Ammonia	Hydrochloric acid	Ethyl acetate
Chungbuk	Ammonia	Chloroform	Chromic trioxide, Chromium trioxide, Chromic anhydride	Antimony trisulfide	Ammonia	Chlorfenvinphos
Chungnam	Benzene	Chromic trioxide, Chromium trioxide, Chromic anhydride	Chloroform	Antimony trisulfide	Benzene	Ammonia
Jeonbuk	Chlorpyrifos	Bis (tributyl tin) oxide	Fenthion	Antimony trisulfide	Diazinon	Chlorpyrifos
Jeonnam	Benzene	Ammonia	Chromic trioxide, Chromium trioxide, Chromic anhydride	Antimony trisulfide	Ammonia	Benzene
Gyeongbuk	Chlorpyrifos	Carbofuran	4,4'-Methylenediphenyl diisocyanate (MDI)	Antimony trisulfide	Diazinon	Mercury acetate
Gyeongnam	Chlorpyrifos	Bis (tributyl tin) oxide	Chromic trioxide, Chromium trioxide, Chromic anhydride	Butyltriphenylphosphonium chloride	Antimony trisulfide	Chlorpyrifos
Jeju	Sulfuric acid	Allyl alcohol	Methanol	Methanol	Sodium hydroxide	Potassium chlorate

*Shaded chemicals are those remain in the top 3 list regardless of the default value used.

5. 지역별 우선순위

유독물의 사용은 그 종류와 양에 있어서 지역별로 차이가 있다. 따라서 전국을 대상으로 하는 우선순위와 지역별 우선순위는 달라질 수 있다. 특히 어떤 유독물이 한 지역에서 집중적으로 사용되는 경우 그 양이 전국적으로는 중요하지 않다 하더라도 해당지역에는 심각한 영향을 미칠 가능성이 크다. 따라서 장차 유독물질을 효율적으로 관리하기 위해서는 전국적인 관점에서 뿐만 아니라 지역별 우선순위를 도출할 필요가 있다. 이를 위해 앞서 제안된 CRS-Korea II를 이용하여 전국 광역시·도별로 화학물질 우선순위를 선정해 보았다.

지역별 순위를 선정하기 위해서는 먼저 Mackay Level I 모형의 사용을 위해 지역별 환경변수자료 (Table 13)와 배출량 자료를 필요로 한다. 환경변수 자료는 건설교통부에서 제공하는 건설교통통계연보의 내용중 지목별 국토이용현황자료(건설교통부, 2002)를, 지역별 배출량자료는 1999년부터 2001년까지의 환경부 유독물실적보고자료(환경부, 1999~2001)를 이용하였다(Table 14).

지역별 우선순위 결과 가운데 상위 3위까지만의 결과를 살펴보면, 전국을 대상으로 한 우선순위 결과와 공통점도 있지만 많은 차이를 보이는 점도 있다 (Table 15). 기본입력값으로 1을 부여했을 때 전국을 대상으로 한 결과에서는 Endosulfan, Benzene, Chlorpyrifos 순으로 우선순위가 높게 나타났다. 이 중 Benzene은 울산광역시, 충청남도, 전라남도에서, Chlorpyrifos는 서울특별시, 경기도, 전라북도, 경상북도, 경상남도에서 순위가 높게 나타났는데 이는 여러 지역에서 이들 물질이 공통적으로 많이 사용되고 있기 때문일 것이다. 이와 비슷한 경향을 보이는 물질로는 Ammonia, 4,4'-Methylenediphenyldiisocyanate (MDI), Bis (tributyltin) oxide, Chromic trioxide 등이 있다. 이와 달리, Endosulfan은 대전광역시에서 phosphorus은 인천광역시에서만 높은 순위에 올랐다. 이는 이들 물질이 일부지역에서만 집중적으로 사용되고 있음을 의미한다. 이러한 결과는 전국적 차원에서 우선순위가 높은 물질이 있을 수 있으며 그와는 달리 국가적으로는 우선순위가 높지 않으나 지역적으로는 우선순위가 높은 물질이 있을 수 있다는 점을 보여준다. 따라서 환경적으로 건전하고 효율적인 유독

물의 관리를 위해서는 이러한 두 물질군을 구분하여 관리할 필요가 있을 것이다.

결론

기존의 CRS-Korea를 평가한 결과 도출된 우선순위가 노출, 특히 배출량의 점수에 의해 지나치게 좌우되는 것으로 나타났다. 이는 기본적으로 배출량이 나머지 노출평가 항목인 잔류성과 생물농축성과 곱의 관계에 있기 때문인 것으로 밝혀졌다. 따라서 이 관계를 합의를 관계로 바꿈으로서 우선순위가 배출량 점수에 의해 좌우되는 현상을 방지하고 여러 독성 및 노출 항목들에 의해 고르게 평가될 수 있도록 개선된 체계 (CRS-Korea II)를 제안하였다.

또한 이를 활용하여 광역지자체별로 유독물 우선순위를 도출해 본 결과 전국과 지역간의 차이뿐만 아니라 지역간의 차이도 큰 것으로 나타났다. 따라서 앞으로는 전국규모의 우선순위와는 별도로 지역별로 세부적인 관리계획을 세우고 그를 바탕으로 유독물 관리가 이루어질 필요가 있을 것으로 판단되며 이러한 목적으로 CRS-Korea II가 효율적으로 활용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- 건설교통부. 건설교통통계연보, 2002.
- 김예신, 박화성, 이동수, 신동천. 화학물질 우선순위 선정 기법에 대한 비교 분석, 한국환경독성학회지 2003; 18(3): 183-191.
- 김용화. 환경호르몬의 현황과 대책 세미나-유해화학물질의 위해성 심사 및 관리, 1998.
- 박화성, 김예신, 이동수, 신승승, 최승필, 박성은, 김명현, 양지연, 신동천. 화학물질의 우선순위선정기법 (CRS-Korea)의 개발과 적용, 한국환경독성학회지 2005; 20(2): 109-121.
- 연세대학교 환경공해연구소. 위해우려물질 선정 및 평가 연구. 환경부 2003.
- 임규근. 통계학 입문, 도서출판 대림 1997.
- 편인범. 통계학의 이해, 대광서림 2001.
- 환경부. 유독물 실적보고, 1999~2001.
- 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 1 : Structure of the Scoring and Ranking System, Environmental Science and Pollution Research 2000; 7(1): 1–11.
- Environment Canada. The ARET substance selection & guideline, 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.
- Mackay D. Multimedia Environmental Models, Lewis Publishers 1991.
- 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.
- Swanson MB and Socha AC. Chemical ranking and scoring : Guidelines for relative assessment of chemicals, SETAC press 1997.
- Swanson MB. Davis GA. Kincaid LE. Schultz TW. Bartmess JE, Jones SL, George EL. A screening method for ranking and scoring chemicals by potential human health and environmental impacts, Environmental Toxicity and Chemistry 1997; 16(2): 372–383.
- US EPA, Chemical hazard evaluation for management strategies; A method for ranking and scoring chemicals by potential human health and environmental impacts, 1994.
- US EPA, Chemical Screening Report for the RCRA PBT List Docket, 1998.
- van Leeuwen CJ, Van Hermens JL M. Risk. Assessment of Chemicals : An Introduction, Kluwer Academic Publishers 1995.
- van Leeuwen CJ, Bro-Rasmussen F, Feijtel TCJ, Arndt R, Bussian BM, Calamari D, Glynn P, Grandy NJ, Hansen B, van Hemmen JJ, Hurst P, King N, Koch R, Muller M, Solbe JF, Speijers GAB, Vermeire T. Risk assessment and management of new and exiting chemicals, Environmental Toxicology and Pharmacology 1996; 2: 243–299.