

시화·반월산업단지 인근지역의 환경보건 관리를 위한 우선관리대상 오염물질 선정에 관한 연구

김정곤* · 박윤석** · 백도명*** · 최경호****

Identification of Priority Pollutants in Shihwa-Banwol Techno Valley Area for Management of Environmental Health

Jungkon Kim · Yoonsuk Park · Do-Myung Paek · Kyungho Choi

국문요약 ■

ABSTRACT ■

I. 서 론 ■

II. 연구방법 ■

III. 결과 및 토의 ■

IV. 결 론 ■

참고문헌 ■

* 서울대학교 보건대학원 (koguma@snu.ac.kr)

** 서울대학교 보건대학원 (simon6909@empal.com)

*** 서울대학교 보건대학원 교수 (paekdm@snu.ac.kr)

**** 서울대학교 보건대학원 교수 (kyungho@snu.ac.kr)

국문 요약

화학물질의 사용은 인간문명의 발전과 더불어 지속적으로 증가해 왔다. 이에 따라 이를 화학물질이 인간의 건강과 환경에 미칠 잠재적인 영향에 대한 우려가 증대되고 있다. 그러나 인간이 사용하는 화학물질의 종류가 매우 다양하기 때문에 우선적인 관리가 필요한 화학물질을 파악하고 관리하는 노력이 필요하다. 이 연구는 환경오염 관련 문제제기가 지속되어 온 시화·반월산업단지 주변을 대상으로 환경보건문제의 원인을 규명하고 관리방안을 모색할 필요에 의해 착수되었다. 이 연구의 목적은 시화·반월공단 지역에서 제기될 수 있는 환경오염을 체계적으로 추적 관찰하고 오염원인물질의 관리방안을 모색하기 위해, 시화·반월 산업단지 지역에서 우선적으로 관리되어야 하는 주요 화학물질을 선정하는 것이다. 이를 위해 기존의 화학물질관리 우선순위 도출 방법론을 검토하고, 시화·반월산업단지 지역의 유해화학물질 배출량 자료와 환경오염 측정망 자료를 이용하였다. 연구결과 시화·반월 지역에서 우선관리대상물질로 파악된 물질은 디클로로메탄, 트리클로로에틸렌, 디아이아지논, 테트라클로로에틸렌, 크롬화합물, 주석화합물, 클로로아세트산, 아세트산 에틸, 아연화합물 등으로, 주로 휘발성유기화합물질군과 금속화합물이 많았다. 시화·반월 인근지역의 상시 측정망에서 확보한 환경오염도 자료와 우선관리대상물질의 이화학적 특성을 고려하였을 때, 특히 관리가 필요한 환경매체는 대기와 수계인 것으로 파악되었다.

| 주제어 | 화학물질, 우선관리대상물질, 시화·반월산업단지

Abstract

Use of chemicals has greatly increased along with development of human civilization. Concerns about potential effects of chemicals on human health and environment have also grown accordingly. Due to the enormous number of chemicals being used, however, it is neither practical nor feasible to regulate all the chemicals. Therefore, it is necessary to identify chemicals that deserve more immediate attention, based on the effects on receptors to be protected. This study was initiated by the need for developing management policies for Shihwa-Banwol Techno Valley and its vicinities of korea, where complaints and concerns on environmental contamination have been raised for long time. This study to identifies major chemicals that deserve most immediate attention in environmental health management in this area. For this purpose, the study employed CHEMS-1 (Chemical Hazard Evaluation for Management Strategies), and used chemical data from Toxics Release Inventory (TRI) and environmental contamination data from the environmental pollution monitoring network. Top priority pollutants identified in Shihwa-Banwol Techno Valley area were metals and volatile organic compounds, such as dichloromethane, trichloroethylene, diazinon, tetrachloroethylene, chromium compounds, tin compounds, chloroacetic acid, ethyl acetate, and zinc compounds, in an order of decreasing importance. An evaluation of physicochemical properties of the priority chemicals and the environmental pollution monitoring network database in Shihwa-Banwol Techno Valley suggested that the media that are of potential concern would be the atmosphere and aquatic environment.

| Keywords | chemicals, priority pollutants, Shihwa · Banwol Techno Valley

I 서 론

화학물질의 사용은 인간문명의 발전과 더불어 지속적으로 증가하고 있다. 현재 전 세계적으로 10만여 종의 화학물질이 유통되고 있으며(김강석, 1997), 국내에서도 현재 37,000여 종의 화학물질이 사용되고 매년 300여 종의 신규물질이 등록되고 있다(환경부, 2000). 따라서 이러한 화학물질이 환경에 유출되었을 때 환경생태계와 인간의 건강에 미칠 잠재적인 영향에 대한 우려가 증대되고 있다. 따라서 인간이 사용하는 화학물질의 잠재적 영향을 사전에 평가하여 적절한 관리방안을 구축하는 노력이 필요하다. 즉 화학물질 노출로 인한 인체 및 환경영향을 저감하기 위해서는 독성과 유통량, 배출량, 노출경로 등을 종합적으로 고려한 위해성을 평가하고, 이에 근거한 관리방안을 마련할 필요가 있다(환경부, 2004; Kim et al., 2003; Swanson et al., 1997). 그러나 현행 화학물질관리제도는 물질 자체의 독성에 치중한 유해성심사 위주로 운영되고 있어, 환경 중 배출량과 노출경로 및 검출빈도 등 사람과 환경의 건강에 영향을 미치는 다양한 요인들에 대한 고려가 부족한 실정이다.

시화·반월산업단지(이하 '시화·반월지역')는 1970년 말부터 신공업도시 건설계획에 따라 수도권 인근의 국가산업단지로 개발되었고, 시화지구개발계획에 따라 준공업용지로 지정되었던 곳을 변경하여 인근 주거지역이 조성되었다. 현재 음·식료품, 조립, 금속제품, 섬유, 화학 및 폐기물 업체가 가동 중이고, 시흥시와 안산시의 주거지역이 인접해 있다. 이 지역은 수도권의 산업시설이 집중되어 있으며 오염물질배출량은 크지 않지만 영세한 업체 수가 많아서 배출오염물질의 효율적인 관리가 어려운 형편이다(백도명 외, 2006). 한편 지역적 특성상 남서풍이 우세하여 공단에서 발생된 대기오염물질이 인접한 주거지역으로 이동한다. 이 때문에 지난 90년대 이후부터 시화공단과 반월공단에 인접한 지역에 거주하기 시작한 주민들에게서 악취에 대한 민원이 잦았다. 대기 중 악취민원이 가장 빈번한 시흥시 정왕동 지역에만 약 57,000세대 148,000명이 거주하고 있는 형편이다.

한편 공단지역 환경오염으로 인한 건강피해에 대한 우려도 제기되기 시작하였으나, 현재 까지 뚜렷이 오염원을 규명하거나 오염문제에 대한 관리방안을 제시하지 못하고 있다. 이 지역의 환경보건문제를 효과적으로 진단하고 나아가 관리방안을 마련하기 위해서는, 지역에서 제기되는 건강문제를 상시적으로 모니터링하기 위한 체계를 구축하고, 구체적인 건강문제와 그 기전을 규명하는 노력이 필요하며, 인간과 생태계의 입장에서 파악되는 오염의 원인과 노출경로를 파악하는 노력이 필요하다. 그러나 사용되는 모든 물질을 대상으로 노

출경로를 파악하고 환경모니터링을 수행하는 것은 현실적으로 어려운 일이다. 따라서 우선적으로 관리해야 할 필요가 있는 물질을 합리적으로 선정하는 것이 타당하다. 이를 위해서 다양한 화학물질 우선순위 선정기법이 제시되어 온 바 있다.

화학물질에 대한 관리의 우선순위 선정은 위해성평가와 비슷한 방식으로 수행된다. 즉 위험(hazard)과 노출(exposure)의 함수로 화학물질의 위해성 정도를 산정하고 이에 근거하여 화학물질관리의 우선순위를 도출한다(Kim et al., 2003). 그러나 오염물질의 위해성에 영향을 미치는 모든 측면을 평가하는 것도 어렵고, 그러한 정보를 정량화하는 것도 어려우므로 위해성을 반정량적으로 점수화하여 우선적인 관리가 필요한 물질을 구분하는 것이 바람직하다. 화학물질관리의 우선순위 선정을 위한 방법론이 많이 개발되었는데(Davis et al., 1994), 일반적으로 널리 사용되는 방법에는 EURAM(European 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) 등이 있다. EURAM과 ARET는 대량사용 화학물질에 대한 관리 및 저감 우선순위 선정 등 구체적인 관리 방안을 이끌어 내기 위한 수단으로 이용되고 있다. CHEMS-1과 SCRAM은 일차적인 화학물질 선별을 목적으로 활용되는 경우가 많다(환경부, 2004; Kim et al., 2003; Snyder et al., 2000; Swanson et al., 1997). 이중에서 CHEMS-1(Chemical Hazard Evaluation for Management Strategies)은 기존 미국의 화학물질관리의 허점을 보완하기 위해 개발된 것으로, 인체 및 환경에 대한 화학물질의 상대적 위험성을 평가하고 좀 더 안전한 제품을 생산하거나 대체품을 활용하기 위한 목적으로 개발된 방법이다(Swanson et al., 1997). CHEMS-1은 논리가 비교적 명확하고 지표선정이 용이하며, 변수값의 입력범위를 사용자가 목적에 따라 임의로 설정할 수 있다는 장점이 있다. 또한 화학물질이 인간에 미치는 영향과 환경에 미치는 영향에 동일한 비중을 부여한다는 특징이 있다(환경부, 2004; Kim et al., 2003; Swanson et al., 1997).

본 연구는 시화·반월지역에서 대량으로 사용되고 있는 화학물질을 대상으로 향후 장기적인 노출 모니터링 또는 위해관리 프로그램이 필요한 주요 오염물질을 파악하기 위한 목적으로 수행되었다. 이를 통해 시화·반월지역의 환경보건문제에 대한 과학적이고 현실성 있는 관리방안 마련을 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

II 연구방법

1. 조사대상 화학물질

시화·반월지역의 우선 관리대상물질을 선정하기 위해 국립환경과학원에서 제공한 2002~2004년 화학물질배출량목록(Toxics Release Inventory: TRI)에서 파악된 물질들을 대상으로 평가를 수행하였다. 2002년과 2003년의 화학물질배출량목록에 의하면 시화·반월지역에서 50인 이상 종업원이 있는 사업장에서 50톤 이상 취급되는 물질은 각 72개(142개 업체)와 73개(165개 업체)다. 2004년에는 선정기준이 바뀌어 화학물질배출량목록은 종업원 30인 이상의 사업장에서 10톤(발암성 및 생식독성은 1톤)이상 취급되는 물질을 대상으로 작성되었다. 그 결과 2004년에는 378개 업체에서 사용된 119개 물질이 보고되었다. 2002~2004년 화학물질배출량목록에서 한 차례 이상 파악된 총 122개 물질 중 필요한 정보를 확보하기 어려운 2개의 물질을 제외한 120개 물질을 조사대상물질로 선정하였다. 대상 화학물질의 배출량은 조사대상기간 중의 평균값을 이용하였다.

화학물질배출량목록에서 파악된 물질 중 특히 일부 무기화학물질은 혼합물 형태로 되어 있어 노출자료를 검색하거나 독성값을 파악하는 데 어려움이 있다. 이 연구에서는 혼합물 형태로 존재하는 물질의 경우 그 가운데 가장 널리 사용되는 물질을 선정하여 우선순위 선정에 활용하는 Swanson 등(1997)의 방법을 따랐다<Appendix 1>.

2. CHEMS-1을 이용한 우선관리대상 화학물질의 선정 방법

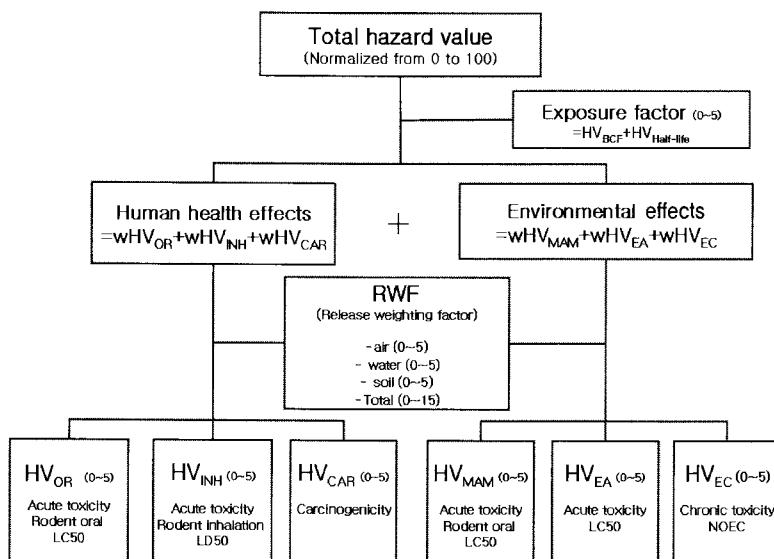
우선관리대상 화학물질을 선정하기 위해 CHEMS-1의 방법론을 수행하였다(EPA, 1994; Swanson et al., 1997). 화학물질 우선순위 선정의 기준이 되는 총 유해도는 화학물질의 인체영향(human effect), 환경영향(environmental effect), 노출계수(exposure factor)를 근거로 산출되었다<그림1, eq1>.

인체영향에 관련된 지표(변수)로는 설치류에 대한 급성흡입독성 유해도값(HV_{INH}), 급성 경구독성 유해도값(HV_{OR}), 발암등급 유해도값(HV_{CAR})이 사용되었고, 환경영향에 관련한 지표(변수)는 수서생물영향과 육상동물영향으로 구분하였다. 수서생물영향은 급성생태독성 유해도값(HV_{EA})과 만성생태독성 유해도값(HV_{EC}) 등을 사용하였으며, 육상생물영향은 급성경구독성 유해도값(HV_{MAM})으로 표현하였다. 노출계수를 산정하기 위해서는 환경 중 지속

성 변수와 생축적성 변수를 사용하였다. 환경 중 지속성은 수중 반감기 변수(Half-life in water, $HV_{Half-life}$)가 이용되었고, 생축적성은 물환경 생축적도(Aquatic Bioconcentration Factor, BCF, HV_{BCF})로 표현되었다.

CHEMS-1은 우선순위 설정의 목적에 따라 사용자가 임의로 필요한 변수에 가중치(term weighting factors)를 부여할 수 있다. 본 연구에서는 Swanson 등의 방법(1997)에 따라 노출 경로와 환경매체에 따라 화학물질의 환경 중 배출량에 가중치를 부여한 배출량 가중 유해도 (release-weighted hazard values)를 계산하였다. 배출가중계수(release weighting factor, RWF)로는 화학물질배출량목록에 보고된 환경(대기, 물, 토양) 중 배출량이 사용되었다.

그림1 시화·반월지역에서 사용되는 유해물질의 우선관리 대상물질 순위선정을 위한 흐름도



3. 변수값의 선정

우선순위 설정에 필요한 각 지표 및 변수의 값은 유해물질데이터뱅크(hazardous substances data bank: HSDB), 환경부의 화학물질안전관리센터, 미국 환경보호청(US Environmental Protection Agency: US EPA)의 통합위해성정보시스템(Integrated Risk Information System: IRIS), 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer: IARC) 데이터베이스 등을 이용하여 구하였다.

유해물질데이터뱅크와 같이 검정된 실험자료가 존재하는 경우에는 그 자료를 우선적으로 사용하였다. 그러나 실험자료가 존재하지 않는 경우에는 구조-활성 관계식(Structure-Activity Relationships: SARs) 또는 정량적 구조-활성 관계식(Quantitative Structure-Activity Relationships: QSARs) 등의 모형을 활용하여 변수값을 추정하였다. 모형을 이용하여 유추할 수도 없는 경우에는 결측값(missing value)으로 구분하여 '0'을 부여하였고 종유해도 산정에는 사용하지 않았다. CHEMS-1을 이용해서 화학물질의 우선순위를 분석한 선행 연구(Swanson et. al, 1997)에서도 결측된 값에 대해 '0'을 부여하고 우선순위 산정에 사용하지 않았다. 결측값에 대해 보수적으로 최고값을 부여할 경우 결측변수의 수가 많은 화학물질이 상위순위를 점할 가능성이 높기 때문이다. 이와 같은 보수적인 접근법은 사전주의 원칙에 부합할 수 있으나, 화학물질의 관리방안을 모색하려는 현실적인 목적에는 적절하지 않을 수 있다.

모든 종류의 독성값에 0~5점까지 유해도값(hazard value: HV)을 부여함으로써 동일한 비중을 갖도록 하였다. 보수적인 평가를 위해 각 지표값이 여러 가지로 제시될 경우 가장 민감한 값을 대표값으로 결정하였고, 지표의 값이 범위로 제시될 경우에도 보수적인 수치를 사용하였다. 발암등급의 경우는 자료를 제공하는 기관의 등급 적용기준을 서로 비교하여 유사한 등급끼리 분류하였고, 한 물질에 대해 발암등급이 상이할 경우에는 더 보수적인 발암등급을 사용하였다.

1) 인체영향

사람에 미치는 건강영향은 급성경구, 흡입독성 자료와 발암성 자료를 이용하여 점수화하였다. 급성흡입 및 경구 독성값은 각각 설치류 급성 반수치사공기농도(median lethal concentration: LC₅₀)와 반수치사용량(median lethal dose: LD₅₀) 자료를 근거로 하였다. 설치류 급성독성값이 여러 종에 대해 존재할 경우에는 그 가운데 가장 민감한 종의 결과를 이용하였다. 급성경구독성의 유해도값(HV_{OR})과 급성흡입독성의 유해도값(HV_{INH})은 <표1>에 따라 부여하였다(Swanson et al., 1997). 설치류 급성흡입독성치는 노출시간이 4시간에 가까운 실험으로부터 얻은 결과를 사용하여 4시간 노출독성으로 환산하였다(Swanson et al., 1997). 흡입독성값의 단위가 mg/m³로 주어질 경우 미국 산업보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health: NIOSH)의 식을 이용하여 ppm 단위로 변환하였다.

표1 독성자료에 근거한 유해도값(HV)의 부여

	Conditions	Score and estimation equations
HV_{OR}	$5 \text{ mg/kg} < LD50 \leq 5,000 \text{ mg/kg}$	6.2 - 1.7(log LD50)
	$LD50 > 5,000 \text{ mg/kg}$; and	0
	$LD50 \leq 5 \text{ mg/kg}$	5
HV_{INH}	$31.6 \text{ ppm} < LC50 \leq 10,000 \text{ ppm}$	8.0 - 2.0(log LC50)
	$LC50 > 10,000 \text{ ppm}$	0
	$LC50 \leq 31.6 \text{ ppm}$	5
HV_{EA}	$1 \text{ mg/l} \leq LC50 < 1,000 \text{ mg/l}$	-1.67(log LC50) + 5.0
	$LC50 \geq 1,000 \text{ mg/l}$; and	0
	$LC50 < 1 \text{ mg/l}$	5
HV_{EC}	$0.1 \text{ mg/l} \leq NOEL < 100 \text{ mg/l}$	3.33 - 1.67(log NOEL)
	$NOEL \geq 100 \text{ mg/l}$	0
	$NOEL < 0.1 \text{ mg/l}$	5
$HV_{Half-life}$	$t_{1/2} \leq 4 \text{ d}$ and	1
	$t_{1/2} > 500 \text{ d}$	2.5
HV_{BCF}	$4 \text{ d} < t_{1/2} \leq 500 \text{ d}$	0.311(ln $t_{1/2}$) + 0.568
	$1.0 \leq \log BCF \leq 4.0$	0.5(log BCF) + 0.5
	$\log BCF \leq 1.0$	1
	$\log BCF > 4.0$	2.5

LC50 (Lethal concentration); LD50 (Lethal dose); ppm (part per million); NOEL (No observable effect level); $t_{1/2}$ (half-life)

화학물질의 발암등급은 국제암연구소와 미국 환경보호청의 기준에 근거하였다<표2>. Swanson 등은 발암성이 알려지지 않은 물질의 발암성을 MICROQSAR(ver. 2.0)를 이용하여 유추한 바 있으나(Swanson et al., 1997) 본 연구에서 발암성이 알려지지 않은 물질에 대해서는 결측값으로 남겨 두었다.

표2 국제암센터(IARC)와 미국 환경보호청(US EPA)의 분류체계에 근거한 발암 유해도값

IARC classification	Hazard value	US EPA classification	Hazard value
Group 4	0	Group E	0
Group 3	0	Group D	0
NA ^a	NA	Group C	1.5
Group 2B	3.5	Group B2	3.5
Group 2A	4	Group B1	4
Group 1	5	Group A	5

^a NA: Not Applicable

IARC: International Agency for Research on Cancer

US EPA: US Environmental Protection Agency

화학물질에 따라 배출량 차이가 매우 큰 점을 고려하여 배출가중계수(Release Weighting Factor: RWF)를 부여할 때는 <표3>과 같이 배출량 자료의 분포에 따라 고르게 1~5점을 받을 수 있도록 설계하였다. 이를 통해 화학물질배출량이 순위선정에 지나치게 큰 영향력을 미치지 못하도록 하였다. 배출되는 매체의 특성을 고려하여 배출가중계수가 적용되었다. 즉, 급성경구독성의 유해도값(HV_{OR})에는 수계 배출가중계수(RWF_W)가, 급성흡입독성의 유해도값(HV_{INH})에는 대기 배출가중계수(RWF_A)가, 발암성의 유해도값(HV_{CAR})에 대해서는 전체 배출가중계수(RWF_T)가 각각 적용되었다.

표3 연간 평균 배출량에 근거한 배출가중계수(RWF)의 부여 기준

Score for RWF	0	1	2	3	4	5
Amount released (kg/year)	0	0~100	100~1,000	1,000~10,000	10,000~100,000	>100,000

RWF: Release weighting factor

2) 환경영향

환경영향은 육상생물 영향과 수서생물 영향에 근거하여 산정되었다. 육상생물 영향의 유해도값(HV_{MAM})은 인체 급성경구 건강영향에 대한 유해도값 부여기준과 동일한 기준을 사용하였다<표1>. 수생생물에 미치는 환경영향은 급성 수생태독성값과 만성 수생태독성값 자료를 활용하여 산출하였다. 물고기 LC50와 같은 급성 수생태계 영향 자료가 없을 경우에는 QSARs를 이용해서 급성 수생태독성값을 추정하였다. 실측 독성자료가 없는 유기물질의 경우 baseline toxicity, nonpolar narcosis, polar narcosis, 그리고 weak acid respiratory uncoupling을 포함한 다양한 작용기전에 근거한 모형(ECOSAR, Clements and Nabholz, 1994)을 이용하여 LC50를 추정하였다. 그러나 실측 독성자료가 없는 무기화합물의 경우에는 적절한 독성추정 모형이 없어 독성값을 추정할 수 없었다. 급성 수생생물 영향의 유해도값(HV_{EA})은 <표1>과 같은 기준에 따라 부여하였다. 만성 수생태독성영향을 점수화하기 위해 최대무영향용량(no observable effect level: NOEL)이 사용되는데, NOEL이 존재하지 않는 화학물질에 대해서는 Kow와 급성독성값을 이용하여 NOEL을 추정하였다<표4>. Swanson 등(1997)은 기존에 보고된 급만성독성비(acute-chronic ratio: ACR)를 근거로 NOEL을 계산한 바 있다. 만일 log Kow가 6보다 클 경우에는 급성독성이 없는 것으로 간주하여 "0"을 부여하였다<표4>. 육상생물 영향의 유해도값(HV_{MAM}), 급성

수생생물 영향의 유해도값(HV_{EA}), 만성 수생생물 영향의 유해도값(HV_{EC})에 대해 모두 수계 배출가중계수(RWF_W)가 적용되었다.

표4 유해도 값과 매개변수 도출을 위한 수식

Parameters	Equations	Conditions
WHV_{OR}^a	$HV_{OR} \times RWF_W^b$	
WHV_{INH}	$HV_{INH} \times RWF_A^c$	
WHV_{CAR}	$HV_{CAR} \times RWF_T^d$	
WHV_{MAM}	$HV_{MAM} \times RWF_W$	
WHV_{EA}	$HV_{EA} \times RWF_W$	
WHV_{EC}	$HV_{EC} \times RWF_W$	
NOEL	$LC50/(5.3 \cdot \log Kow - 6.6)$	$2 \leq \log Kow < 5$
	0.05(LC50)	inorganics or $\log Kow \geq 5$
	0.25(LC50)	$\log Kow < 2$
Log BCF	$0.91(\log Kow) - 1.975 \log (6.8 \times 10^7 Kow + 1) - 0.786$	
LC50 @4h	$(LC50 @ t h) \times t/4$	
X ppm ^e	$(Y \text{ mg/m}^3)(24.45)/(\text{molecular weight})$	
Y mg/m ³	$(X \text{ ppm})(\text{molecular weight})/24.45$	

^a WHV_x = release-weighted hazard value for term x ; ^b RWF_W = water release weighting factor; ^c RWF_A = air release weighting factor; ^d RWF_T = total release weighting factor ; ^eppm (part per million)

3) 노출계수

대상 오염물질의 환경 중 노출수준을 결정하는 노출계수로서 지속성(persistency)과 생축적성(bioaccumulation)의 두 가지 지표를 사용하였다. 지속성을 설명하는 변수로는 BOD 반감기(유기화합물의 BOD가 수중에서 반으로 줄어드는 데 걸리는 시간)와 가수분해 반감기(수중 pH 7의 조건에서 유기화합물의 절반이 가수분해에 의해 분해되는 데 걸리는 시간) 등을 사용할 수 있다. Hunter와 Culver는 실험자료의 변이가 크거나 실측자료를 찾기 힘든 물질의 경우에는 MICROQSAR(ver. 2.0)를 이용하여 BOD 반감기와 가수분해 반감기를 추정하였다(Hunter and Culver, 1992). 본 연구에서는 지속성을 나타내는 변수로서 수중 반감기를 선택하였고, 실측자료가 없는 경우에는 EPIWin(v3.12, US EPA)의 fugacity model을 이용하여 계산하였다. <표1>에서 반감기에 따른 점수 부여기준을 설명하였다.

생축적(bioaccumulation)을 설명하는 변수로는 수중 생축적도(Aquatic Bioconcentration Factor: BCF)를 사용했다. 실측값이 없는 유기물질의 경우 Bintein 등(1993)이 개발한 QSAR 모형식을 사용하여 추정하였고, 무기물질의 경우에는 HSDB에서 제공하는 수치를 이용하였다. 생축적도 추정 등에 중요하게 활용된 Kow 값은 QSAR의 중요 변수이므로 가능한 경우에는 실측값을 사용하였으나, 실측값이 없는 경우에는 미국 환경보호청에서 제공하는 EPIwin v3.12 프로그램을 이용하여 추정하였다. 우선순위를 선정하기 위해 사용한 각 지표에 대한 실측자료, 유추된 자료 그리고 누락자료의 비율을 <표5>에 정리하였다. 인체독성값이 누락된 경우에는 모형을 사용하여 값을 추정하지 않았다.

표5 우선순위 선정에 사용된 변수별 실측, 추정 그리고 실측값의 수와 빈도

Endpoint	No. measured data points (% of total)	No. estimated data points (% of total)	No. missing data points (% of total)
log Kow	58 (48)	14 (12)	48 (40)
Oral LD50	87 (73)	0 (0)	33 (28)
Inhalation LC50	55 (46)	0 (0)	65 (54)
Carcinogenicity	46 (38)	0 (0)	74 (62)
Aquatic toxic LC50	102 (85)	10 (8)	8 (7)
Aquatic toxic NOEL	40 (33)	72 (60)	8 (7)
Half life in water	0 (0)	112 (93)	8 (7)
BCF	1 ^a (1)	70 (58)	49 (41)

^a Measured data point was used for inorganic chemicals only.

4) 총 유해도값의 산정

총 유해도값(total hazard value, tHV)은 인체 및 환경독성, 배출량 및 노출계수에 근거하여 계산된다(eq1). 인체건강 영향의 유해도값은 0에서 125까지, 가중된 환경영향은 0에서 75점까지의 범위를 가지며, 노출계수는 0에서 5점까지 범위를 갖는다. 따라서 이론적으로 산출된 총 유해도값의 최고치는 1,000점(예, [125 + 75] × 5)이지만 이 연구에서는 산출된 총 유해도값을 100점 만점으로 표준화하였다.

CHEMS-1 기법(Davis et al., 1994; Swanson et al., 1997)은 우선순위 선정 목적에 부합하게 평가하기 위해 각 지표의 유해도에 가중치를 부여할 수 있다. 본 연구에서는 Swanson 등(1997)의 방법에 따라 화학물질의 환경 중 배출량에 가중치를 두었다<그림1, 표4>. <표6>은 디클로로메탄을 예로 들어 총 유해도값의 산출과정을 보인 것이다.

$$\text{tHV} = \frac{(wHV_{\text{OR}} + wHV_{\text{INH}} + wHV_{\text{CAR}} + wHV_{\text{MAM}} + wHV_{\text{EA}} + wHV_{\text{EC}})}{\text{Human health effects}} \times \frac{(HV_{\text{half-life}} + HV_{\text{BCF}})}{\text{Environmental effects}} \times \text{Exposure Factor} \quad --- \text{eq1}$$

#6 Dichloromethane을 이용한 총 유해도값의 산출 예

Parameters	Abbreviates	data	Release weighting factor (RWF)	Score	
				Not weighted by releases	Weighted by releases
Oral LD50 (mg/kg)	HV _{OR}	1600		0.75	1.51
Inhalation LC50 (ppm)	HV _{INH}	15		5.0	20.0
EPA/IARC cancer class	HV _{CAR}	B2		3.5	24.50
Human health effects				9.25	46.01
Oral LD50 (mg/kg)	HV _{MAM}	1600		0.75	1.51
Aquatic toxicity LC50 (mg/L)	HV _{EA}	68.0		1.94	3.88
Aquatic toxicity no effect level (mg/L)	HV _{EC}	130.00		0.0	0.0
Environmental effects				2.69	5.39
log BCF (unitless)	HV _{BCF}	0.35		1.00	1.00
Hydrolysis t _{1/t}	HV _{half-life}	37.5		1.70	1.70
Exposure factor				2.70	2.70
Air releases (kg/year)	RWF _A	77644.5	4.0		
Water releases (kg/year)	RWF _W	661.8	2.0		
Soil releases (kg/year)	RWF _S	27.2	1.0		
Total releases (kg/year)	RWF _T		7.0		
Total hazard value				32.2	138.5

III | 결과 및 토의

1. 우선관리대상물질 선정

시화·반월지역 화학물질배출량목록에서 파악된 물질 120종을 대상으로 CHEMS-1방법을 활용하여 위해성에 근거한 우선관리순위를 도출한 결과, 휘발성유기화합물질군(VOCs)이 가장 많았고, 중금속화합물, 비휘발유기물, 산류와 농약류 등이 그 뒤를 이었다. 선정된 우선관리대상 화학물질 상위 30종을 <표7>에 제시하였다. 최상위 순위를 점한 디클로로메탄은 급성독성이 높고 자극성, 발암성이 있는 물질로서 노출계수는 중간수준이나 발암등급이 높고 인체흡입독성 점수가 매우 높았다. 대기 중으로 배출되는 양이 연간 80여 톤에 이르렀으며, 수계로도 다량 유출되는 것으로 나타났다. 농약류인 다이아지논은 대기와 수계로

배출되는 양은 적으나 인체흡입과 경구독성 그리고 급성생태독성이 아주 높아서 중요한 관리대상물질로 선정되었다. 상위 30개 물질 중 중금속이 7종 포함되었는데, 중금속은 일반적으로 환경 중 잔류성이 크고 인체 및 환경 독성이 강하며 환경으로도 많이 배출된다 (Mitchell et al., 2002; Park et al., 2004). 크롬화합물의 대표물질로 사용된 삼산화크롬은 인체경구, 흡입독성과 생태급만성독성이 아주 강하지만 생축적되지 않고 반감기가 짧아 노출계수 점수가 낮게 산출되었다.

표7 총 유해도값에 근거하여 산출된 우선관리대상 상위 30위 화학물질

Rank	Chemicals	물질군	Score			Total hazard value (%) ^b
			Human health effects	Environmental effects	Exposure factor	
1	디클로로메탄	VOCs	46.01	5.39	2.70	100
2	트리클로로에틸렌	VOCs	20.00	9.02	2.99	63
3	다이아지논	농약류	7.89	14.11	2.91	46
4	테트라클로로에틸렌	VOCs	17.69	0.00	3.49	44
5	크롬 화합물 ^a	중금속화합물	15.93	25.93	1.41	43
6	주석 화합물 ^a	중금속화합물	13.06	10.97	2.45	42
7	클로로아세트산	산류	7.91	13.24	2.41	37
8	아세트산 에틸	유기화합물	11.65	7.99	2.41	34
9	아연 화합물 ^a	중금속화합물	6.43	26.43	1.41	33
10	스티렌	VOCs	19.30	10.35	1.45	31
11	4,4'-디이소시안산 디페닐메탄	비휘발유기물 ^c	10.00	0.00	4.13	30
12	황산 디메틸	비휘발유기물	17.00	0.00	2.41	30
13	구리 화합물 ^a	중금속화합물	3.98	23.98	1.41	28
14	부탄	VOCs	14.69	0.00	2.66	28
15	포름알데히드	VOCs	16.00	0.00	2.41	28
16	니켈 화합물 ^a	중금속화합물	20.00	7.18	1.41	28
16	질산	산류	17.50	9.68	1.41	28
18	디(2-에틸헥실) 프탈레이트	비휘발유기물	10.50	0.00	3.55	27
19	납 화합물 ^a	중금속화합물	16.00	10.00	1.41	26
20	아닐린	비휘발유기물	13.06	0.00	2.41	23
21	페놀	비휘발유기물	2.07	9.44	2.71	22
22	2,4-디이소시안산 툴루엔	비휘발유기물	17.00	0.00	1.70	21
23	벤젠	VOCs	10.00	0.00	2.77	20
24	에피클로로히드린	유기화합물	17.38	9.41	1.00	19
25	아크릴산 에틸	유기화합물	11.00	0.00	2.41	19
26	1,2-디클로로에탄	VOCs	9.80	0.00	2.70	19
27	3,3'-디클로로-4,4'-디아미노디페닐메탄	비휘발유기물	7.00	0.00	3.74	19
28	안티몬 화합물 ^a	중금속화합물	7.00	10.00	1.41	17
29	황산	산류	16.49	0.00	1.41	17
29	글루타르알데히드	유기화합물	7.72	0.00	3.01	17

^a The appendix lists the surrogate compounds used for the metal compounds in this evaluation.^b Number is the total hazard value for that chemical, normalized to a 0-100 scale.^c 증기압이 0.1mmHg(20°C) 이하인 화학물질.

2. 우선관리대상물질의 환경매체별 오염수준

본 연구에서 우선관리대상물질로 선정된 화학물질의 환경매체별 오염 기여도를 파악하기 위해 상위 30개 우선관리대상 물질 중 대상지역의 상시측정망 자료가 확보된 물질들(n=11)을 중심으로 환경 중 오염도를 살펴보았다. 상시측정망 자료의 측정항목이 주로 중금속에 치중되어 있어 모든 화학물질의 환경오염 기여도를 잘 반영하는 것은 아니지만, 대기 중 오염도가 가장 높은 물질은 벤젠으로 3.83 ug/m^3 (1.2ppb)이었고, 물(0.876ppm)과 토양(87.33ppm)에서는 아연 화합물의 오염도가 가장 높게 나타났다<표8>.

따라서 각 화학물질의 환경 중 거동을 잘 반영할 수 있는 이화학적 특성을 통하여 상위 30개 우선관리대상물질이 환경매체에 미치는 기여도를 간접적으로 파악하였다. 증기압 자료를 찾을 수 있는 화학물질은 모두 25개가 있었고, 이 가운데 휘발성이 우려되는 수준의 증기압을 가지고 있는 물질이 19개가 파악되었다. 이들 물질이 환경에 배출되었을 때 궁극적으로 대기로 이동할 가능성이 높은 것으로 판단되었다. 20°C 에서 증기압이 0.1mmHg 이상이거나 증기압을 모를 때는 분자 중에 탄소가 12개 원자 혹은 그 이상의 원자가 있는 유기화학물질의 경우 휘발성이 있어 VOC로 분류할 수 있다(Anderson, 1993).

우선관리대상물질로 선정된 물질 중에서는 증기압이 높을 뿐 아니라 수용성이 높은 물질도 많았다. 전체 30개 물질 중 수용성 정보를 찾을 수 있었던 물질 25개 중 약 76%(n=19)가 100ppm 이상의 수용성을 보였으며 3 이하의 낮은 log Kow 값을 갖고 있다. 이는 대상화학물질이 대기로 배출되더라도 높은 수용성 때문에 강우에 의해 습식 침전이 일어나 수계로 이동할 수 있으며, 토양으로 배출되더라도 토양 중 유기물에 결합되는 힘이 약하고 유거수(runoff) 등으로 수계로 이동할 가능성이 높음을 시사한다.

표8 시화·반월지역에서 우선관리대상물질로 선정된 상위 30개 화학물질의 보고된 환경 중 검출농도와 이화학적 성질

Rank	Chemicals	Environmental level			Physico-Chemical properties		
		Air ^f	Water ^g (ppm)	Soil ^h (ppm)	Vapor pressure (mmHg, 25°C)	Solubility (mg/L)	Log Kow
1	디클로로메탄(Dichloromethane)	-	-	-	435.0	1.4 E 03	1.25
2	트리클로로에틸렌(Trichloroethylene)	0.4 ppb	ND ⁱ	ND	57.8	1.1 E03	2.61
3	디아지논(Diazinon)	-	-	-	9.0E-05	40	3.81
4	테트라클로로에틸렌(tetrachloroethylene)	0.00 ppb	ND	ND	18.5	150	3.4
5	크롬 화합물 ^j (Chromium compounds)	0.01 ug/m^3	0.004	ND	-	6.1 E03	-

표8 시화·반월지역에서 우선관리대상물질로 선정된 상위 30개 화학물질의 보고된 환경 중 검출농도와 이화학적 성질 (계속)

Rank	Chemicals	Environmental level			Physico-Chemical properties		
		Air ^f	Water ^g (ppm)	Soil ^h (ppm)	Vapor pressure (mmHg, 25°C)	Solubility (mg/L)	Log Kow
6	주석 화합물(Tin compounds)	-	-	-	2.0 ^a	-	0.97
7	클로로아세트산(Chloroacetic acid)	-	-	-	6.5E-02	6.1 E06	0.22
8	아세트산 에틸(Ethyl acetate)	-	-	-	93.2	6.4 E04	0.73
9	아연 화합물 ^b (Zinc compounds)	-	0.876	87.33	-	5.8 E05	-
10	스티렌(Styrene)	0.3 ppb	-	-	6.4	310.0	2.95
11	4,4'-다이소시안산 디페닐메탄(Diphenylmethane 4,4-diisocyanate)	-	-	-	-	1.5	-
12	황산 디메틸(Dimethyl sulfate)	-	-	-	0.5	2.8 E04	0.03
13	구리 화합물 ^b (Copper compounds)	0.28ug/m ³	0.011	2.31	-	2.4 E05	-
14	부탄(n-Butane)	-	-	-	1,820.0	61.2	2.89
15	포름알데히드(Formaldehyde)	-	-	-	3,890.0	5.5 E05	0.35
16	니켈 화합물 ^b (Nickel compounds)	0.01 ug/m ³	-	31.42	1.0 ^b	6.4 E05	-
16	질산(Nitric acid)	-	-	-	63.1	9.0 E04	0.21
18	디(2-에틸헥실) 프탈레이트(Bis(2-ethylhexyl)phthalate)	-	-	-	7.3E-09	0.3	7.60
19	납 화합물 ^b (Lead compounds)	0.09 ug/m ³	0.005	4.44	7.5E-03 ^c	50.4	-
20	아닐린(Aniline)	-	-	-	0.5	3.6 E03	0.90
21	페놀(Phenol)	-	0.005	ND	3.5 E-01	9.3 E03	1.46
22	2,4-다이소시안산 톨루엔(Toluene-2,4-diisocyanate)	-	-	-	0.01	-	-
23	벤젠(Benzene)	1.2 ppb ⁱ	-	-	94.8	1,975.0	2.13
24	에피클로로히드린(Epichlorohydrin)	-	-	-	10 .0	-	0.26
25	아크릴산 에틸 (Ethyl acrylate)	-	-	-	38.6	1.5 E03	1.32
26	1,2-디클로로에탄 (1,2-Dichloroethane)	ND	-	-	87.0	9.1 E03	1.48
27	3,3'-디클로로-4,4'-디아미노디페닐메탄 (4,4'-methylenebis(2-chloroaniline))	-	-	-	2.86 E-07	8.7 E-04	3.91
28	안티몬화합물 ^b (Antimony compounds)	-	-	-	1 ^e	-	-
29	황산(Sulfuric acid)	-	-	-	5.9E-05	1.0 E06	-
29	글루타르알데히드(Glutaraldehyde)	-	-	-	17.0	-	0.01

^a at 100°C; ^b at 671°C; ^c at 724°C; and; ^e at 574°C, instead of 25°C

^f 상시측정망 시흥시 정왕동지점 2005년 평균치(중금속 외 자료), 상시측정망 경기도 안산시 지점 중금속 2006년 6월 평균(중금속 자료)

^g 상시측정망 반월공단지점 2003~2006년 평균치

^h 상시측정망 반월공단지점 2002년, 2006년 1월 경기도 안산시 정왕동

ⁱ Not analyzed

^j Not detected

대상지역의 상시측정망 자료가 비교적 잘 확보되어 있는 중금속의 환경 중 오염도를 살펴보면 대기 중 오염도가 가장 높은 중금속은 구리($0.28 \text{ ug}/\text{m}^3$)이고 물과 토양 중에서는 아연(각각 0.88 mg/L , 87.33 mg/L)이었다<표9>. 대부분 중금속은 대기와 물에서의 오염도는 낮은 수준이었으나 토양 오염도는 비교적 높은 편이었다. 그러나 수생태독성이 높은 중금속이 많이 있기 때문에 물 오염수준이 낮다고 하더라도 수생태계 영향을 배제할 수는 없다. 중금속의 인체독성을 보면, 니켈과 납은 발암성이 높으며, 카드뮴, 수은, 망간 및 비소는 인체 독성이 강한 물질이나, 중금속의 인체독성이 우선순위에 큰 영향을 미치지는 않았다.

표9 시화·반월지역의 우선관리대상 중금속의 환경 중 검출농도 및 독성

우선 순위	중금속	대기 (ug/m^3)	물 (mg/L)	토양 (mg/L)	Toxicity ^a		Ecotoxicity ^d (mg/L)
					Cancer potency ^b ($\text{mg}/\text{kg}/\text{day}$) ⁻¹	NOAEL ^c ($\text{mg}/\text{kg}/\text{day}$)	
1	크롬	0.01	0.00	ND ^e	510	2.5	0.02
2	아연	- ^f	0.88	87.33	-	-	0.01
3	구리	0.28	0.01	2.31	-	16	0.003
4	니켈	0.01	-	31.42	0.9	5	0.5
5	납	0.09	0.01	4.44	0.04	-	0.1
6	알루미늄	-	-	-	-	26	0.1
7	카드뮴	0.00	0.00	ND	6.3	0.01	0.04
8	수은	-	ND	ND	-	0.23	0.2
9	망간	0.08	0.38	-	-	0.14	40
9	비소	-	0.00	0.01	1.5	0.0008	8.3
9	코발트	-	-	-	-	24.8	0.05

^a 환경부, 위해우려물질 선정 및 평가 연구(최종보고서): 납, 카드뮴 및 수은의 위해성 평가, 2005; Integrated risk information system (IRIS), USEPA; Proposed Amendments to the Hexavalent Chromium Airborne Toxic Control Measure for Chrome Plating and Chromic Acid Anodizing Operations, Stakeholder workgroup meetings, may 10th, 2006 Sacramento, CA, California Environmental Protection Agency; Risk assessment-Copper, Expert group on vitamins and minerals, 2003; MorningStar Consulting Inc., U.S. High Production Volume (HPV) Chemical Challenge Program, 2005; Agency for Toxic Substances & Disease Registry (ATSDR)

^b 발암력: 선형 다단계 모델을 적용하여 도출된 암 발생 위험의 계량치

^c 부작용이 확인되지 않는 노출량의 최대량

^d Aquatic acute toxicity

^e Not analyzed

^f Not detected or available

3. 유해도값 산정에 기재된 불확실성

이 연구에서 파악된 우선관리대상 물질 목록은 모형 추정값을 사용하는 등 자료의 제한성 때문에 불확실성이 존재한다. 특히 유해도값을 구하기 위해 실측값 대신 예측값을 사용하거나 결측값으로 간주하여 산정된 우선순위의 불확실성에 대한 우려가 있다.

우선순위 선정을 위해 사용한 변수값의 불확실성에 따라 우선순위 설정 결과가 어떻게 변화하는지 분석하였다<표10>. 사용한 변수의 불확실성 수준에 따라 인체영향, 환경영향 및 노출계수 등의 유해도값 산정에 사용된 변수의 수가 다르므로, 변수의 수로 표준화한 총 유해도값을 eq2와 같은 방식으로 구하였다.

본 연구에서 수행한 방법처럼 변수값으로 실측값, 예측값, 결측값을 모두 사용하여 선정한 우선순위 목록과 비교하였을 때, 실측값과 예측값을 사용하여 선정된 우선순위 목록에는 8가지의 물질이 새롭게 상위 30위 내로 진입하였고, 실측값만으로 순위를 산출했을 경우에는 12가지의 물질이 새로 우선순위 30개 물질에 추가되었다.

$$\text{tHV} = \frac{[(\text{wHV}_{\text{OR}} + \text{wHV}_{\text{INH}} + \text{wHV}_{\text{CAR}}) + (\text{wHV}_{\text{MAM}} + \text{wHV}_{\text{EA}} + \text{wHV}_{\text{EC}})]}{\text{Number of variable}} \times \frac{(\text{HV}_{\text{half-life}} + \text{HV}_{\text{BCF}})}{\text{Number of variable}} \quad \text{--- eq2}$$

표10 사용한 변수값의 불확실성 수준에 따른 우선순위 화학물질의 변화

우선 순위	우선순위 선정에 사용한 변수값의 종류		
	실측값 + 예측값 + 결측값	실측값 + 예측값	실측값
1	디클로로메탄	니켈 화합물	디클로로메탄
2	트리클로로에틸렌	질산	스티렌
3	디이아지논	납 화합물	트리클로로에틸렌
4	테트라클로로에틸렌	크롬 화합물	디(2-에틸헥실) 프탈레이트
5	크롬 화합물	황산	벤젠
6	주석 화합물	디클로로메탄	부탄
7	클로로아세트산	클로로솔폰산	주석 화합물
8	아세트산 에틸	아연 화합물	테트라클로로에틸렌
9	아연 화합물	구리 화합물	에피클로로히드린
10	스티렌	플루오르화 수소	아세트산 에틸
11	4,4'-다이소시안산 디페닐메탄	트리클로로에틸렌	클로로아세트산
12	황산 디메틸	스티렌	3,3'-디클로로-4,4'-디아미노디페닐메탄
13	구리 화합물	석면	황산 디메틸
14	부탄	염소	포름알데히드

표10 사용한 변수값의 불확실성 수준에 따른 우선순위 화학물질의 변화 (계속)

우선 순위	우선순위 선정에 사용한 변수값의 종류		
	실측값+예측값+결측값	실측값+예측값	실측값
15	포름알데히드	벤젠	메르캅토아세트산
16	니켈 화합물	옥시염화 인	톨루엔
17	질산	디이아지논	아닐린
18	디(2-에틸헥실) 프탈레이트	주석 화합물	페놀
19	납 화합물	테트라클로로에틸렌	산화 에틸렌
20	아닐린	아세트산 애틸	글루타르알데히드
21	페놀	클로로아세트산	아크릴산 애틸
22	2,4-디아소시안산 톨루엔	부탄	1,2-디클로로에탄
23	벤젠	안티몬 화합물	2-푸란메탄올
24	에피클로로히드린	2,4-디아소시안산 톨루엔	염화 벤질
25	아크릴산 애틸	디(2-에틸헥실) 프탈레이트	헥사클로로에탄
26	1,2-디클로로에탄	에피클로로히드린	크레졸(o-,m-,p- 이성질체 포함)
27	3,3'-디클로로-4,4'-디아미노디페닐메탄	암모니아	디클로로보스
28	안티몬 화합물	염화 티오닐	아세트산
29	황산	바륨 화합물	클로로포름
30	글루타르알데히드	4,4'-디아소시안산 디페닐메탄	아크릴로니트릴

4. 국내외 오염물질의 관리우선순위 목록 비교

환경오염물질의 우선관리순위를 선정한 예는 국내외에서 많이 찾을 수 있다. 미국 질병관리 본부(CDC)의 독성물질 및 질병등록부(Agency for Toxic Substances and Disease Registry: ATSDR)에서는 매 2년마다 종합환경대응보상책임법(Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act: CERCLA)의 우선순위목록(National Priorities List: NPL)에 등재된 유해물질 폐기장소나 시설에서 검출되는 화합물질을 대상으로 우선관리대상물질목록을 작성한다. 우선관리대상물질목록 작성의 방법은 우선순위목록 부지(NPL site)에서의 출현빈도(frequency of occurrence)와 독성(toxicity) 및 인간노출가능성(potential for human exposure) 등을 척도로 하여 각각 동일한 점수를 부여하고 세 척도의 합으로 순위를 정하는 것이다(ATSDR, 2005). NPL 출현빈도는 ATSDR의 Hazardous Substance Release/Health Effects Database(HazDat)의 자료를 이용하여 NPL 장소에서 최다 출현한 물질의 빈도에 대한 대상물질 출현빈도의 비를 점수화하였다. 화학물질의 독성을 평가하기 위해 기본급성독성, 만성독성, 발암성, 수생태독성, 가연성(ignitability), 반응성

(reactivity)에 근거하여 나눠진 다섯 개의 카테고리로 구성된 Reportable Quantities(RQs)를 사용하였고, RQs가 없을 경우 Toxicity/Environmental Score(TES)로 대신하였다. 인간 노출 가능성은 화학물질의 환경 중 농도와 인구집단의 노출상태(exposure status of populations)를 지표로 하였다. CERCLA의 우선관리대상물질 상위 30개를 <표11>에 보였다.

한국 환경부에서는 위해우려물질 선정과 평가를 위한 연구를 통해 위해우려물질 선정프로그램을 개발하였다. 이 프로그램의 적용결과와 발암성, 국제사회의 논의동향 등을 종합적으로 평가하여 위해우려물질 106종을 선정하였고, 이 가운데 유독물 우선순위가 높은 물질로서 불확실성이 낮은 물질과, 노출과 독성 수준이 높은 물질, 그리고 독성은 낮지만 전문가 평가에서 위해도가 커 우선평가가 필요하다고 판단되는 물질 등을 중심으로 우선평가대상물질과 장기적 위해성평가 대상물질을 선정하였다(환경부, 2004). 주요 대상물질을 <표 11>에 보였다.

우선관리대상물질로 선정된 30개 화학물질을 기준에 미국 ATSDR에서 선정한 우선관리 대상물질과, 한국 위해우려물질사업에서 선정된 대상물질과 비교한 결과, 시화·반월지역 을 대상으로 선정된 30개 우선관리대상물질 중 미국 NPL site에서 위해우려물질로 선정된 물질목록에 속한 물질은 벤젠, 크롬, 납, 트리클로로에틸렌의 네 가지였고, 국내 위해우려물질관리사업에서 파악된 우선순위목록에 속한 물질목록에 속한 물질은 dichloromethane, chromium compounds, ethyl acetate 등 휘발성유기화합물질군, 중금속 화합물, 및 비휘발성유기물에 속하는 16가지였다<그림2>. 위의 세 목록에 모두 속하는 물질로는 벤젠, 크롬, 납, 트리클로로에틸린 등 4종이 파악되었다.

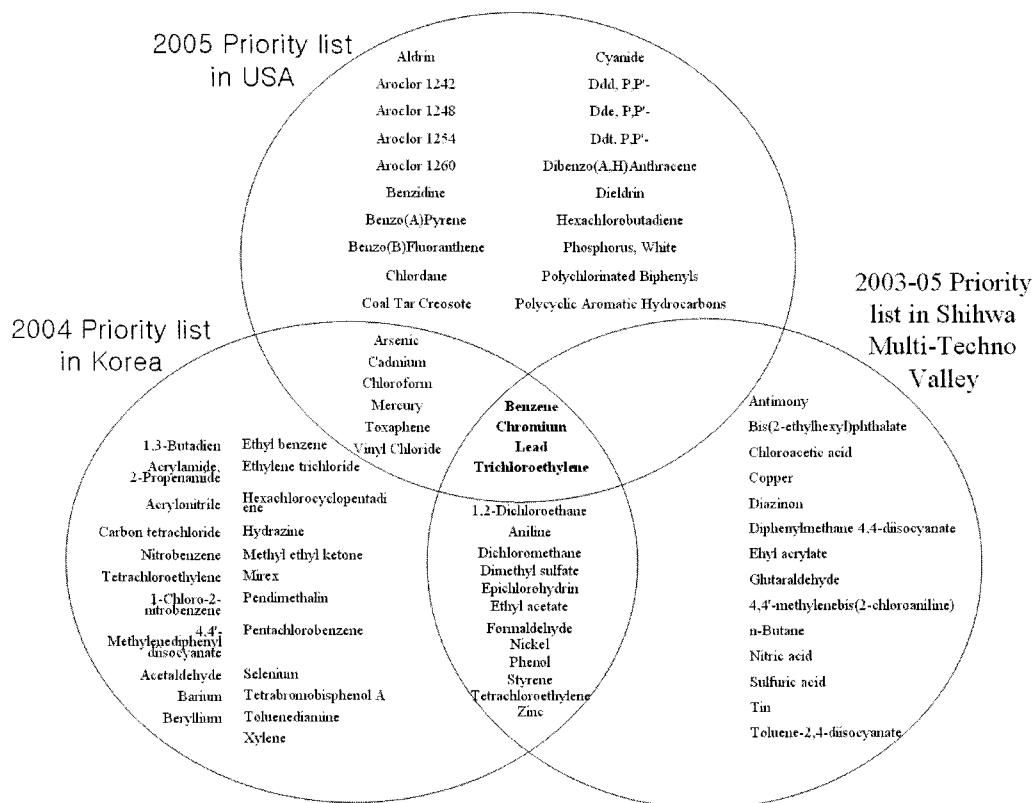
한편 한국 환경부에서는 "산업폐수 유해물질감시 항목 제도"를 통해 화학물질의 종류와 사용량이 증가함에 따라 수계로 배출되는 유해한 특정수질유해물질을 관리하고 있다. 시화·반월지역에서 우선관리대상물질 상위 30위 내에 속한 화학물질 중 "산업폐수 유해물질 감시 항목 제도"의 특정수질유해물질 목록에 속하는 물질은 디클로로메탄, 테트라클로로에틸렌, 크롬화합물, 구리화합물, 납화합물, 폐놀, 벤젠, 트리클로로에틸렌, 1,2-디클로로에탄 등 9개 물질이다.

표11 화학물질 순위선정의 결과 비교

순위	미국 CDC CERCLA ^a 화학물질 우선 순위목록(2005)	한국 화학물질 우선순위(2004) ^b		시화반월공단 지역 우선관리대상 화학물질(2003~2005)
		우선평가 대상물질	장기적 위해성평가 대상 물질	
1	Arsenic	Chromium & its compound	Nickel & its compounds	Dichloromethane
2	Lead	Nitrobenzene	Mirex	Trichloroethylene
3	Mercury	Phenol	Pendimethalin	Diazinon
4	Vinyl Chloride	Benzene	Pentachlorobenzene	Tetrachloroethylene
5	Polychlorinated Biphenyls	Toluene	Tetrabromobisphenol A	Chromium compounds
6	Benzene	Acrylonitrile	Toxaphene	Tin compounds
7	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	Formaldehyde	1,2-Dichloroethane	Chloroacetic acid
8	Cadmium	Tetrachloroethylene	Chloroform	Ethyl acetate
9	Benzo(A)Pyrene	Carbon tetrachloride	Ethyl acetate	Zinc compounds
10	Benzo(B)Fluoranthene	Lead & its compounds	Ethylene trichloride	Styrene
11	Chloroform	Mercury & its compounds	Methyl ethyl ketone (MEK)	Diphenylmethane 4,4-disocyanate
12	DDT, p,p'	Acrylamide, 2-Propenamide	Xylene	Dimethyl sulfate
13	Aroclor 1254	Arsenic, inorganic	Acetaldehyde	Copper compounds
14	Aroclor 1260	Cadmium & its compounds	Dichloromethane	n-Butane
15	Dibenzo(A,H)Anthracene	1,3-Butadien	Ethyl benzene	Formaldehyde
16	Trichloroethylene	Trichloroethylene	Styrene	Nickel compounds
17	Dieldrin		Vinyl chloride	Nitric acid
18	Chromium, Hexavalent		Aniline	Bis(2-ethylhexyl)phthalate
19	Phosphorus, White		Dimethyl sulfate	Lead compounds
20	DDE, p,p'		Toluenediamine	Aniline
21	Chlordane		4,4'-Methylenediphenyl diisocyanate	Phenol
22	Hexachlorobutadiene		1-Chloro-2-nitrobenzene	Toluene 2,4-diisocyanate
23	Coal Tar Creosote		Epichlorohydrin	Benzene
24	DDD, p,p'		Hexachlorocyclopentadiene	Epichlorohydrin
25	Aldrin		Hydrazine, monohydrate	Ethyl acrylate
26	Benzidine		Barium & its compounds	1,2-Dichloroethane
27	Aroclor 1248		Beryllium & its compounds	4,4'-methylenebis(2-chloroaniline)
28	Cyanide		Selenium & its compounds	Antimony compounds
29	Aroclor 1242		Zinc & its compounds	Sulfuric acid
30	Toxaphene			Glutaraldehyde

^a <http://www.atsdr.cdc.gov/cercla/clist-supportdoc.html>^b 환경부, "위해우려물질관리 사업의 현황 및 향후 추진계획"

그림2 미국, 한국 및 시화·반월지역의 우선관리대상 화학물질 우선순위 비교



N 결 론

본 연구에서는 시화·반월지역의 유해화학물질의 배출량 자료와 환경오염도 측정망 자료에 근거하여 시화·반월지역의 화학물질 우선관리대상물질 목록을 제시하였다. 이를 위해 CHEMS-1 기법을 시화·반월지역에 적용하였다. 그 결과 시화·반월지역에서 높은 유해성을 보이는 것으로 추정된 물질은 디클로로메탄, 트리클로로에틸렌, 디이아지논, 테트라클로로에틸렌, 크롬화합물, 주석화합물, 클로로아세트산, 아세트산 에틸, 아연화합물, 스티렌 등이었다. 상위에 속하는 화학물질은 주로 휘발성유기화합물질군과 금속화합물이 많았는데, 이는 금속제품, 섬유, 화학 및 폐기물 업체가 많이 가동하고 있는 시화·반월지역의 특성에 근거하는 것으로 보인다. 상시측정망에서 확보한 이 지역의 환경오염도 자료와 우선관리대상물질의 이화학적 특성을 고려하였을 때, 특히 모니터링 또는 관리가 필요한 환경매체는 대기와 수계인 것으로 판단된다. 우선순위 선정과정에서 사용된 일부 변수는 해당되는 값을 찾을 수 없었고, 실측자료가 없는 경우에는 추정모형 등을 사용하여 구한 추정치를 사용하는 등, 불확실성이 존재한다. 그러나 이 연구는 대기 중 악취민원과 환경보건 문제에 대한 우려가 큰 시화·반월지역을 대상으로 위해성에 근거한 화학물질 추적 모니터링 및 관리대책 마련을 위한 우선순위를 도출한 기초자료로 의미가 있다.

참고문헌

- 김강석. 1997. 「유해화학물질 적정 규제수단에 관한 연구」 한국환경정책·평가연구원.
- 환경부. 2000. 「유해화학물질관리 기본계획」
- _____. 2004. 「위해우려물질관리 관리사업의 현황 및 향후 추진계획」
- Anderson, W.C. 1993. Vacuum Vapor Extraction. In John, P., A. Baehr, R. A. Brown, R. Hinchee and G. Hoaq (eds) *Innovative Site Remediation Technology*. Annapolis: American Academy of Environmental Engineers.
- ATSDR. 2005. *CERCLA Priority List of Hazardous Substances That will be the Subject of Toxicological Profiles and Support Document*.
- Bintein, S., J. Devillers and W. Karcher. 1993. "Non-linear Dependence of Fish Bioconcentration on N-octanol/Water Partition Coefficient" *SAR QSAR in Environmental Research* 1:29–39.
- Clements, R.G. and J.V. Nabholz. 1994. *ECOSAR, Version 1.01*. Washington DC: Office of Pollution Prevention and Toxics: US EPA.
- Davis, G.A., M. Swanson and S. Jones. 1994. *Comparative Evaluation of Chemical Ranking and Scoring Methodologies*. 3N-3545-NAEX. Washington DC: US EPA.
- Davis, G.A. et al. 1994. *Chemical Hazard Evaluation for Management Strategies; A Method for Ranking and Scoring Chemicals by Potential Human Health and Environmental Impacts*. Cincinnati: US EPA.
- Hunter, R.S. and F.D. Culver. 1992. *MICROQSAR version 2.0*. Bozeman, MT, USA: Institute for Biological and Chemical Process Analysis, Montana State University.
- Kim, Y. et al. 2003. "Comparisons of Chemical Ranking and Scoring Methods" *Journal of Environmental Toxicology* 18: 183-191.
- Snyder, E.M. et al. 2000. "SCRAM: A Scoring and Ranking System for Persistent, Bioaccumulative, and Toxic Substances for the North American Great Lakes" *Environmental Science and Pollution Research* 7: 1-11.
- Swanson, M.B. et al. 1997. "A Screening Method for Ranking and Scoring Chemicals by Potential Human Health and Environmental Impacts" *Environmental Toxicology and Chemistry* 16: 372-383.

(Appendix 1) 화학물질배출량목록에 포함된 무기화합물 범주와 그 대표 화합물

TRI inorganic chemical category	Surrogate compound
알루미늄 화합물	염화 알루미늄(AlCl ₃)
비소 화합물	삼산화 비소(As ₂ O ₃)
바륨 화합물	염화바륨(BaCl ₂)
붕소 화합물	산화붕소(B ₂ O ₃)
주석 화합물	디부틸주석 디염화물(C ₈ H ₁₈ Cl ₂ Sn)
카드뮴 화합물	염화카드뮴(CdCl ₂)
코발트 화합물	염화코발트(CoCl ₂)
크롬 화합물	삼산화크롬(CrO ₃)
구리 화합물	황산구리(CuSO ₄)
수은 화합물	염화수은(HgCl ₂)
망간 화합물	산화망간(MnO)
니켈 화합물	니켈염화물(NiCl ₂)
납 화합물	산화납(PbO)
안티모니 화합물	삼산화 이안티모니(Sb ₂ O ₃)
아연 화합물	황산아연(ZnSO ₄)

(Appendix 2) 용어 및 약어

Abbreviated	Note
LC50	Median lethal concentration 급성 반수치사농도
LD50	Median lethal dose 급성 반수치사용량
NOEL	No observable effect level 최대무영향수준
t _{1/2}	Half-life 반감기: 물질이 초기 값의 절반이 되는데 걸리는 시간으로 환경 중 지속성을 나타내는 지표
HV _{INH}	Inhalation LC50 인체영향에 관한 급성흡입독성 유해도값
HV _{OR}	Oral LD50 인체영향에 관한 급성경구독성 유해도값
HV _{CAR}	EPA/IARC classification of carcinogenicity 발암등급 유해도값
HV _{EA}	Aquatic life LC50 수서생물영향에 관한 급성생태독성 유해도값
HV _{EC}	Aquatic life no effect level 수서생물영향에 관한 만성생태독성 유해도값
HV _{MAM}	Oral LD50 육상생물영향에 관한 급성경구독성 유해도값
HV _{Half-life}	Half-life in water 환경 중 지속성을 나타내는 수중 반감기 유해도값
ACR	Acute to chronic ratio 급만성독성비
HV _{BCF}	Aquatic bioconcentration factor 물환경 생축적도 유해도 값: 화학물질의 생축적성을 나타내는 지표
Kow	1-octanol/water partition coefficient 옥탄-물 분배계수·흡착성 유기화합물의 지방에 대한 농축정도를 나타내는 지표
wHV	Release-weighted hazard value 환경 중 배출량에 따라 가중치를 부여해 얻어진 가중 독성 유해도값
RWF	Release weighting factor 배출가중계수