Technical Note

Relative Risk Ranking and Mapping Method Using Pollutant Release and Transfer Register Data

Hyejeong Han^{1,*} · Sungchul Shin^{2,*} · Keunwon Lee^{1,2} · Seungho Jung^{1,2}

¹Department of Environmental Engineering, Ajou University

²Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University

(Received August 11, 2020; Revised June 10, 2021; Accepted June 21, 2021)

Objectives : According to Article 12 of the Chemical Control Act, the government must publish PRTR data to satisfy people's right to know and reduce chemical emissions from chemical facilities. However, the database and annual reports are written in text and table that it's difficult to understand at a glance. Risk scoring, ranking and mapping for easy understanding of Pollutant Release and Transfer Register data's meaning and relative risk is the purpose of this study.

Methods : Previous cases were investigated and analyzed. Also, many chemical screening methods were investigated to develop equation. A calculation formula was developed and the relative risk score for the top emissions substances and workplace was calculated using Gyeonggi Province PRTR data, which recorded the largest population, emissions, and number of emitters nationwide. The calculated points are graded and expressed on the map to easily grasp the information visually.

Results and Discussion : It was confirmed at a glance that the distribution of the top emissions companies in province is concentrated in industrial parks. It was also confirmed that most of the sites with high risk scores were distributed along the West Coast. However, due to the lack of data available for risk calculation, many parts of the formula's development process were simplified or replaced with generic data, which limited the quantitative accuracy of the risk score.

Conclusions : The PRTR data was analyzed and processed to determine the relative risk ranking using a relatively simple formula. This allows us to express the meaning of the data more accurately. In particular, by expressing it on a map, it is possible to identify chemical substance emission sites that are of priority interest. It can be used to select priority targets for related implementing projects such as monitoring.

Keywords : TRI, PRTR, Risk Mapping, Scoring, GIS

The Korean text of this paper can be translated into multiple languages on the website of <http://jksee.or.kr> through Google Translator.

[†] Corresponding author

E-mail: processsafety@ajou.ac.kr

Tel: 031-219-2401 Fax: 031-219-3904

* These authors contributed equally to this work.

© 2021, Korean Society of Environmental Engineers

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

단 보

화학물질 배출·이동량 자료를 활용한 상대적 위험 순위산정 및 지도화 방법

한혜정^{1,*} · 신성철^{2,*} · 이근원^{1,2} · 정승호^{1,2,†}

¹아주대학교 환경공학과

²아주대학교 환경안전공학과

목적: 현행 화학법 12조에서는 국민의 알권리 충족 및 관련 기관의 원활한 화학물질 관리 등을 위해 배출·이동량 조사 자료를 공개하게 되어 있다. 하지만, 대부분이 텍스트와 테이블로 이루어져 있어 정보를 한눈에 알아보기 어렵다. 현행 화학물질 배출·이동량 조사 정보공개 시스템 자료의 의미 및 상대적 위험성을 이해하기 쉽게 점수화, 등급화하여 지도의 형태로 표시하는 것에 목적이 있다.

방법: 국내·외 이미 시행 중인 배출량 조사 자료기반의 지도 형태의 정보 제공 서비스들에 대해 분석하였다. 또한, 상대적 위험도의 점수화 및 지도화에 사용할 산정식 개발을 위해 화학물질에 대한 여러 대체 평가 방법들을 살펴 보며, 상대적 위험도 산정에 활용 가능한 자료 및 요소들을 정리하였다. 이를 토대로 산정식을 개발하고, 전국 최대의 인구, 배출량 및 배출 업체 수를 기록한 경기도의 PRTR 자료를 활용하여 배출량 상위 물질과 사업장에 대하여 상대적 위험점수를 산정하였다. 또한, 산정된 점수들을 등급화하여 지도상에 표현함으로써 시각적으로 정보를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다.

결과 및 토의: 도내 배출량 상위 사업장의 분포가 산업단지에 집중되어있는 것을 한눈에 확인할 수 있었다. 또한 위험점수가 높은 사업장 대부분이 서해안을 따라 분포되어 있다는 점도 확인할 수 있었다. 하지만, 위험도 산정을 위해 사용 가능한 자료가 부족함에 따라 산정식 개발과정에서 많은 부분을 간략화하거나, 범용적인 자료로 대체하다 보니 위험점수의 정량적인 정확도를 높이기에는 제한이 있었다.

결론: PRTR 자료를 분석하고 가공하며, 비교적 간단한 산정식을 이용한 상대적 위험 순위를 정하였다. 이를 통해 자료가 나타내는 의미를 훨씬 더 정확하게 표현할 수 있다고 판단된다. 특히 지도상에 표현함으로써, 우선적으로 관심이 요구되는 화학물질 배출 사업장들을 확인할 수 있었으며, 이는 모니터링 등 도내 관련 사업 시행 시 우선순위 대상을 선정하는 데 활용 가능하다고 생각된다.

주제어: 화학물질 배출·이동량 조사, 위험성 평가, 정보공개, 위험지도

1. 서 론

국내 화학물질 배출·이동량 조사(PRTR; Pollutant Release and Transfer Registers)는 기업 스스로 화학물질 배출량을 파악하고, 배출 저감 노력을 통해 생산성 향상 및 환경오염을 최소화하는 것이 목적이다.¹⁾ 특히, 배출량 조사에서 정보공개는 국민의 알권리 충족은 물론, 이에 따른 영향 및 기타 요인들로 인한 환경적, 경제적 부분에 기여한다. 실제로 배출량 조사가 기업의 자발적 배출 저감을 유도하며, 특히 가시성이 높은 대기업에서 그 효과가 현저하게 나타난다는 선행연구를 확인할 수 있었다.^{2,3)}

국내 PRTR제도에서는 단순한 배출·이동량 자체의 데이터

만 제공하고 있다. ‘알권리 충족’이라는 관점에서 바라보았을 때, 해당 데이터를 일반 국민이 이해하기란 매우 어렵다고 판단된다. 관련 기관에서는 다른 국가의 PRTR제도처럼 조사 결과 기반의 지도화 서비스를 준비 중이지만 아직 일반에 대한 진행 상황 공개나 시범서비스 제공 등은 이루어지지 않고 있다.

2016년 화학물질 배출·이동량 조사에 따르면 경기도는 전국 최대의 인구, 배출량 및 배출 업체 수를 기록하였고 배출물질의 수도 두 번째로 많은 지역인 것으로 확인되었다.^{2,3)} 또한, 경기도는 난개발로 인해 취약계층 주 이용시설이 화학물질 배출 사업장과 인접한 경우가 많으며, 대다수 사업장의 규모가 작아 관리인력 및 시스템이 부실한 경우가 많다. 이러한

이유로 경기도는 전국에서 화학사고가 가장 많이 일어나는 지역이다. 따라서 본 연구에서는 경기도 지역의 배출량 자료와 배출·이동량 조사 결과, 각종 인체 유해성 정보 및 사업장 주변 환경 등을 함께 고려하여, 상대적 위험을 순위화한 지도를 작성하고 이를 분석하여 도내 화학물질 배출 관련 우선 관리대상 지역 등의 파악 및 지도화에 대한 개선점 등을 확인하고자 한다. 배출량 조사 관련 선행연구로서 Choi²⁾는 고형연료 소각시설의 N₂O배출특성 및 배출계수에 관해 조사하였고, Park³⁾은 국내의 트리클로로에틸렌의 물질흐름분석을 연구하였다. Jung⁴⁾은 초미세먼지의 지역 건강영향 정량화와 배출원 기여도에 관해 연구하였다. 이들 연구는 특정한 화학물질의 배출량을 조사하여 진행하였다. 전반적인 화학물질 배출·이동량에 관한 연구, 더 나아가 이를 지도화하는 연구는 이루어지지 않았으므로 총괄된 화학물질 배출·이동량 자료의 지도화에 관한 연구는 선행된 연구들과 차별점이 있다.

본 연구는 국내·외 PRTR 정보공개 제도의 지도 기반 서비스 조사, 위험지도 작성을 위한 물질의 유해성 및 사업장 주변 지역의 특징을 고려한 인체에 대한 위험성 등급화 및 순위화 방법에 관해 고찰한다. 이를 통해 상대적 위험도 산정에 활용 가능한 자료와 요소들, 계산 방식 등을 고려하여 산정식과 지도상 표현 방법을 개발 및 선택한다. 또, 실제 PRTR 자료를 토대로 경기도 지역의 배출량 상위 물질 10가지와 이를 사용하는 100개의 사업장에 대한 상대적 위험지도를 작성하고, 이를 평가하여 발전 및 보완점 등을 파악한다.

국민의 알권리 충족 및 배출 저감 유도를 위한 현행 화학물질 배출·이동량 조사 정보공개 시스템 자료의 의미 및 상대적 위험성을 보다 이해하기 쉽게 점수화, 등급화 및 시각화하고 이를 지도의 형태로 표시하는 것이 목적이다. 최종적으로 자료의 위험 정도를 쉽게 이해할 수 있도록 하고, 관련 기관에서는 도내 화학물질 배출 사업장 우선 관리대상 선정 등에 기여할 수 있도록 한다.

2. 방법론

2.1. 국내·외 화학물질 관련 지도 서비스 조사 및 비교

상대적 위험도 산정 및 지도화 표현을 위해 화학물질 정보 공개 선진국인 미국, 유럽, 일본 등의 PRTR 제도의 지도 서비스에 대해 시각적 표현 방식과 위험도 산정 방법을 조사 및

비교하였다.

미국환경보호청(EPA; United States Environmental Protection Agency)의 TRI (The Toxics Release Inventory) Explorer 시스템은 현행 국내 PRTR 정보공개시스템이 개발 당시 이를 참조함에 따라 상당히 유사하다. Fact Sheet라는 페이지를 통해 지역별로 제공되며 지도, 그래프와 차트 등 시각적 요소를 활용하여 화학물질 관련 전문지식이 없더라도 쉽게 배출량과 추세를 확인할 수 있다는 차이점이 있다.⁵⁾

미국의 EPA의 RSEI (Risk-Screening Environmental Indicators) Result Map은 배출량 자료기반으로 산정한 위험점수를 지도의 형태로 구획·사업장별로 명암을 달리하여 제공한다.⁶⁾

일본의 경우, 제품평가기술기반기구에서 제공하는 PRTR 지도를 통해 전국 단위 배출량 기반의 대기 중 화학물질 농도를 시각적으로 쉽게 파악할 수 있다.

유럽연합의 유럽 환경청(EEA; European Environment Agency)의 E-PRTR은 PRTR 자료만을 표현함으로써 단기간에 많은 자료를 지도로 구현하기에 적합하다.

우리나라는 PRTR 정보를 지도를 이용하여 일반에 공개하는 공공서비스가 없다. 민간단체 ‘일과 건강’이 서비스하는 ‘우리 동네 위험지도 2.0’ 애플리케이션에서는 취급량을 기반으로 한 위험지도를 제공하며, 일상생활과 밀접한 화학 안전 정보를 제공한다.

국내·외에서 제공 중인 PRTR제도 관련 지도화 서비스를 분석해보았다. 형태는 서비스별 큰 차이가 없었지만, 표현방식의 차이가 있었다. 표시 방식의 표현은 넓은 지도의 경우 표시가 겹친다는 단점이 있다. 격자별 음영을 달리하여 농도를 표현하는 방식은 각 격자에 대한 위험정보가 필요하다. 마지막으로, 원 형태의 영향범위 표현방식의 경우 정확도 높은 자료를 활용한 수준 높은 모델링이 수반되어야 한다. Table 1은 각 지도화 서비스의 특징을 쉽게 파악할 수 있도록 비교 분석한 것이다.

2.2. 주요 화학물질 위해성 산정 방법 선행제도 조사 및 비교

화학물질 배출·이동량 자료 가공 시 결과의 잘못된 해석을 방지하고, 활용도를 높이기 위해 점수화 및 순위화가 필요하다. 이를 위해 해외의 관련 제도의 위해성 산정기법 및 사용 인자들을 파악 및 활용하였다. 결과적으로, 간결하고 효과적으로 상대적 위험정보를 전달할 수 있는 산정 방법을 개발하였다.

Table 1. Comparison of emission-based mapping services.

Item	USA		Japan	Europe	Korea
Name of service	TRI explorer	RSEI result map	PRTR map	E-PRTR	Our local hazard maps 2.0
Servicing group	EPA	EPA	NITE	EEA	Private
Core standard	Emission	Calculated risk rating	Modeled concentration	Emission	Volume of business
Label method	Point	Point, color, shadow	Shadow by lattice	Modeled form	Radius effect
Platform	Web	Web	Web	Web	Mobile

2.2.1. 미국 EPA의 RSEI

RSEI는 미국 EPA에서 제공하는 TRI 데이터를 활용하여 사업장의 유해화학물질 배출량에 따른 인간에 대한 잠재적인 영향을 점수화, 순위화를 위해 개발한 스크리닝 모델이다.

화학물질 배출량, 독성물질의 환경 거동 및 이동 경로, 인체 노출경로 및 범위, 영향을 받는 인구수 등을 활용한다. 이는 비교적 짧은 시간과 적은 비용으로 위험도를 계산하는 효율적인 방법이다. 이 모델에서 대기 중 화학물질에 노출되는 인체의 위험도 산정에 관한 부분을 집중적으로 살펴보았다.

일반적으로 RSEI Map을 통해 제공되는 RSEI 점수는 ‘위해성 관련 결과’이다. ‘위해성 관련 결과’는 별도의 산정식을 통해 산출된 산정 노출량과 독성 가중치, 인구수를 곱하여 산출된다.

$$DOSE_{air} = \frac{C_{air} * I_{air}}{BW} \times 11,000$$

$DOSE_{air}$ = 해당지역의대기중농도($\mu g/m^3$)

I_{air} = 호흡률(m/day)

BW = 체중(kg)

1,000 = 환산계수(μg)

2.2.2. 미국 EPA의 TSCA Work Plan

미국 독성물질 관리법(TSCA; Toxic Substances Control Act)은 신규 및 기존 화학물질의 잠재적 위험을 평가하고 화학물질이 인체와 환경에 미치는 위험을 해결하기 위한 제도이다.⁷⁾ TSCA는 기존 화학물질을 평가하기 위해 순위화, 위해성 평가, 위해 관리의 3단계 프로세스를 진행한다.

2.2.3. 미국 EPA의 E-Fast 2014

E-FAST (Exposure and Fate Assessment Screening Tool)는 대기, 지표수, 매립지 및 일상생활에서의 제품 사용으로 인해 흡입, 경구, 경피에 노출되는 추정치를 계산해주는 도구이다.⁸⁾ 이 도구에서 제공하는 대기 방출에 대한 대기질 분산 모델링 중 하나인 ‘Screen3 모델’을 사용하여 농도를 추정하고, 이것으로 노출 빈도, 기간 흡입속도, 노출 대상의 체중 등을 이용해 예상 흡입량을 계산한다.⁹⁾

2.2.4. 미국의 CRS방법, CHEMS-1체계

화학물질 관리 분야 선진국들에서는 위해성이 높은 물질을 순위를 정해 그 우선순위가 높은 물질들을 우선적으로 관리한다. 이를 위해 CHEMS-1(미국), EURAM(유럽), ARET(캐나다)와 같은 여러 가지 화학물질 순위 및 점수(CRS; Chemical Ranking and Score)시스템이 개발되어 있다.

화학물질의 순위화를 위해서는 물질별 유해성 평가를 대체하는 위험도 산정이 필요하다. TRI 자료와 연간 농약 사용량 자료를 통해 산정한 화학물질의 안전한 대체품을 찾기 위해

개발된 CHEMS-1체계에서 건강 유해성을 산정하는 부분에 초점을 두었다. CHEMS-1체계의 계산 방식 위험도 산정은 식 (1)을 활용한다.¹⁰⁾

$$(\text{인체영향} + \text{환경영향}) \times \text{잠재적 노출} \quad (1)$$

2.3. 배출량 자료의 위험 등급화 방법 개발

PRTR 자료가 나타내는 상대적 위험성을 올바르게 표현하기 위해 선행 개발된 산정 방법을 분석하였다. 이를 통해 위험의 상대적 점수산정 및 순위화에 활용할 수 있는 요소를 선정하였다. 최종적으로 선정된 요소는 배출량, 용량-반응 관계 등 물질 유해성 자료를 기반으로 한 다양한 독성참고치(RFCs, IUR, EPA 노출계수 등), 노출 집단의 구성정보(인구, 나이, 성별 등)이다. 정교한 위험 등급 계산을 위해 필요하다고 판단된 요소는 ‘농도’인데, 실측 혹은 모델링이 수반되어야 하므로 등급산정 요소에서 제외하기로 하였다.

해외 위험지도 및 화학물질 위험도 점수화 방법을 토대로, 화학물질의 개별 위험도 산정에 활용할 요소는 GHS 건강 유해성 항목과 구분, 사고대비물질 여부, 음면동 단위의 거주 인구수이다. 요소를 활용하여 개발한 상대적 위험점수를 산정하는 계산식은 식 (2)와 같다.

상대적 위험점수

$$= (\text{총 GHS 환산 점수} \times \text{고위험 물질에 대한 배수, 2}) \times \text{배출량} \times \text{인구수} \quad (2)$$

GHS (Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals)제도는 전 세계적인 시스템으로, 화학물질의 유해·위해성의 분류의 형태를 통일한다. 또한, GHS 유해성 항목 분류는 동물 시험 결과와 실제 인체에 대한 역학 조사 및 사례연구 등 정확도 높은 자료를 바탕으로 분류하므로, 화학물질의 위험성을 구분하는 요소로 적합하다.¹¹⁾

위험점수 산정 시 물질의 물리·화학적 특성에 따라 위험도를 반영하는 경우 정확성을 위해 주변 지형 및 입지와 사업장 내 시설의 배치, 방호시설, 관리 수준 등이 함께 고려되어야 한다. 실제로 경기도는 전국에서 배출량이 가장 많은 지자체이다. 물질의 특성과 관련된 위험성에 따른 위험도 차이를 위험점수 산정에 반영하기 위해 사고대비물질* 지정 여부를 산정식에 활용하였다. 이에 따라 직접적으로 위험도 산정에 반영하기 위해 간소화하여 보수적인 값으로 2를 곱하는 방식으로 적용하였다. 사고대비물질은 국가에서 급성독성, 폭발성 등이 강한 물질을 분류한 것으로서, 이 식에서 가중치를 산정하기 위하여 이용하였다.

모델링 없이 영향범위 내 정확한 인구수를 구하기는 불가능하다. 따라서 읍, 면, 동 단위의 행정구역별 통계조사에 따른

* 사고대비물질은 화학물질관리법에서 사고 위험성 자체가 크거나 사고 발생 시 그 피해가 크다고 판단되어 특별하게 관리되는 물질이다.

Table 2. The top 20 emissions substances in Gyeonggi Province.

Order	Chemical	CAS No.	Emitters No.	Air pollutants emission [kg/yr]
1	Toluene	108-88-3	178	4,756,879
2	Ethyl acetate	141-78-6	136	2,659,415
3	Xylene (o,m,p mixture)	1330-20-7	86	1,315,306
4	Methyl ethyl ketone	78-93-3	110	1,183,108
5	2-propanol	67-63-0	104	449,465
6	Methyl alcohol	67-56-1	127	428,250
7	N,N-dimethylformamide	68-12-2	42	396,411
8	Dichloromethane	75-09-2	54	307,764
9	Ammonia (ammonium hydroxide)	7664-41-7 (1336-21-6)	68	179,583
10	Vinyl acetate	108-05-4	14	156,744
11	Perfluorocarbons	308069-13-8	6	150,738
12	Trichloroethylene	79-01-6	8	139,883
13	Sulfur hexafluoride	2551-62-4	4	86,861
14	Acrylic acid	140-88-5	13	78,295
15	Zinc oxide and its compounds	1314-13-2	89	73,466
16	Hydrogen chloride	7647-01-0	137	71,020
17	N-hexane	110-54-3	26	63,460
18	Tetrachloroethylene	127-18-4	4	55,015
19	Aluminum and its compounds	7429-90-5	172	50,355
20	Acetic acid	64-19-7	67	44,080

인구수를 산정식 계산 요소로 사용하였다.

2.4. 지도화 대상 선정 및 지도 표현

경기도 지역의 PRTR 자료를 활용한 상대적 위험도 산정 및 지도화하기 위해 대상 물질과 사업장 선정 방법을 결정하였다. 경기도 내에는 수많은 중소 사업장이 있으며, 화학물질의 종류 또한 셀 수 없이 많다. 하지만, 대부분 물질의 취급 및 배출량이 적기 때문에 배출량 조사 결과와 물질 독성정보를 기반으로 상대적 위험성을 고려하여 10가지 물질을 위험점수화 및 지도화 대상으로 선정하기로 하였다. 일반적으로 국내 PRTR 자료는 각 사업장의 보고 후 조사연도로부터 2년 뒤에 공개된다. 연구가 진행된 시점에서 접근할 수 있는 최신 데이터인 2016년 PRTR 조사 결과를 활용하였다.

대상 사업장 선정은 사업장별 대상물질의 총배출량 합계를 구하여 경기도 내 상위 100개의 사업장을 선별하였다. 각 사업장 주변 인구수는 읍, 면, 동 행정구역별 인구수를 활용하였다. 자료는 가장 최근의 통계자료인 2019년 10월 행정안전부 주민등록 인구통계 자료를 사용하였다. 추후 더 넓은 범위의 지도에도 적용할 수 있도록 20,000명 간격으로 1~5의 점수를 부여하였다.

대상 물질 선정은 도내 배출량 20위 내의 물질 중 알려진 배출량, 배출 사업장 수, 물질의 유해성과 사회적 관심, 관련 규제 기준의 존재 여부, 일부 사업장을 대상으로 시행 중인

부지경계선 밖 모니터링 사업과의 연계 및 발전 가능성 등을 종합해 선정한 것을 Table 2에 나타냈다.¹²⁾ 대상 사업장의 경우 선정된 10가지 물질에 대해 배출량이 높은 사업장들을 살펴보고 종합하여 대상 사업장을 선정하였다. 각 대상 물질 및 사업장 선정 후에는 앞서 개발한 산정식을 이용하여 상대적 위험점수를 계산하며, 이를 등급화하였다. 지리정보 시스템(GIS; Geographic Information System)과 연계하여 지도의 형태로 표시하였다.

지도화를 위해 국내·외 선행 사례들을 참고하여 연구에 가장 적합한 방식으로 지도에 구현하였다. 지도화 프로그램으로는 QGIS 2.18.20을 사용하였다. 대상 사업장이 위치한 행정구역은 투명도를 준 음영으로 알아보기 쉽게 표시하였다. 또한, 외곽선의 색상을 조정하여 서로 다른 등급의 객체 간 시각적 구분이 조금 더 명확하도록 구현하였다. 사업장이 위치한 좌표상에 점수 결과에 따른 점 형태의 객체를 위치시키는 방식으로 정보를 표현하였다.

등급별 사업장의 지도상 표기에 대해 점 객체의 색상은 산업안전보건법 시행규칙상의 ‘안전보건표지의 색채, 색도 기준 및 용도’에 따라 금지 및 경고를 나타내는 ‘빨강’과 ‘노랑’을 밝기와 명암을 조정한 후 총 6단계의 등급체계에 활용하였다. 등급체계에 적용된 위험점수 분포와 색상 결과는 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Rating system by risk score for mapping.

Rating	Score interval	Rating color	RGB code	No. of company
1	10,000,000~		#C64539	5
2	5,000,000~9,999,999		#d16334	4
3	1,000,000~4,999,999		#E5ABA6	25
4	500,000~999,999		#E5ABA6	17
5	100,000~499,999		#F2CD9F	40
6	~99,999		#fff099	9

2.5. 총 GHS 환산 점수산정

배출량 자료의 위험 등급화 방법 개발과 지도화 대상 선정 및 지도 표현과정을 통해 최종적으로 위험의 상대적 점수산정 및 순위화에 활용할 수 있다고 판단된 요소는 배출량, 용량·반응 관계 등 물질 유해성 자료를 기반으로 한 다양한 독성참고치, 노출 집단의 구성정보 등이다. 점수화 및 순위화 대상 물질 선정에 있어 가장 핵심이 되는 요소는 ‘배출량’이다. 2016년 PRTR 보고서와 정보공개 시스템에서 2016년 배출·이동량 자료의 경기도 내 상위 20위 물질목록을 면밀히 확인하였다. 또한, 각 물질의 배출 업체 수, 배출량, 물질의 알려진 유해성 등을 분석 및 고려하여 대상 물질을 선정하였으며, 11월 29일부터 시행되는 배출 저감 대상 물질 일부를 포함하였다. 전국 단위의 물질 배출량 순위와 중첩되는 고순위 물질들을 선정함으로써, 추후 전국 단위의 확대된 위험지도를 작성하더라도 대표성을 갖도록 대상을 선정하였다. 다만 물질 선정 중 점수화에 필요한 GHS 건강 유해성 분류가 없거나, 배출 사업장 수가 5개 미만으로 위험도 산정에 있어 대표성을 띠지 않는 물질은 제외하였다.

총 GHS 환산 점수를 산정한 방법은 다음과 같다. GHS 건강 유해성 구분을 산정식에 사용하기 위해 각 항목에 점수를 부여하여 환산하였다. 각 구분이 의미하는 바에 대한 유해·위험 문구를 살펴보면 큰 숫자에서 낮은 숫자로 갈수록 그 상대적 유해성이 큰 것은 동일하다. 하지만, 그 유해성에 대한 정도는 각 항목 간 차이를 보인다. 특히, 발암성, 생식독성, 생식세포 변이원성 물질의 경우 CMR 물질로 지정되어 중점적으로 관리되고 있을 정도로 그 위험성이 높은 물질이라 판단된다. 따라서 GHS 구분을 계산에 사용하기 위해 항목별 점수를 부여할 때, 다른 물질에 비해 그 유해성에 있어 2배 더 큰 점수를 부여해야 한다고 판단하였다. 각 물질에 따른 GHS 건강 유해성 분류의 환산 점수를 모두 더하여 총 GHS 환산 점수를 산정한 것을 Table 4에 나타냈다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 총 GHS 환산 점수산정 결과

최종적으로 선정된 10개 물질과 각 물질에 대한 총 GHS 환산 점수산정은 Table 5와 같다.

Table 4. GHS conversion score.

Hazard item	Category	GHS conversion score
Acute toxicity - by oral route	Category 1,2	3
	Category 3	2
	Category 4	1
Acute toxicity - by dermal route	Category 1,2	3
	Category 3	2
	Category 4	1
Acute toxicity - by inhalation route	Category 1,2	3
	Category 3	2
	Category 4	1
Aspiration hazard	Category 1	2
	Category 2	1
Skin corrosion/irritation	Category 1	2
	Category 2	1
Skin sensitization	Category 1	1
Serious eye damage/ Eye irritation	Category 1	2
	Category 2	1
Respiratory sensitization	Category 1	1
Target organ toxicity -single exposure	Category 1	3
	Category 2	2
	Category 3	1
Target organ toxicity -repeated exposure	Category 1	2
	Category 2	1
Germ cell mutagenicity	Category 1	6
	Category 2	3
Carcinogenicity	Category 1	6
	Category 2	3
Reproductive toxicity	Category 1	6
	Category 2	3

각 인자를 상대적 위험점수 산정식에 적용한 최종 결과는 Table 6과 같다.

위험도 산정방식에서 배출량은 별도의 등급화를 거치지 않고 물질 자체의 위험성과 인구의 공급 방식으로 계산했다. 최종 산정 점수를 살펴보면 배출량이 높은 사업장이 위험점수가 높은 경우도 많았지만, 배출물질의 위험성과 지역 인구수에 따라 위험점수가 크게 높은 사업장도 적지 않음을 확인할 수

Table 5. Hazard scores for the 10 selected substances.

No.	Chemical	GHS health hazardous classification		Substances requiring preparation for accidents	Total GHS conversion score
1	Toluene	H315	Skin corrosion/irritation category 2	○	16
		H361	Reproductive toxicity category 2		
		H336	Target organ toxicity -single exposure category 3		
		H373	Target organ toxicity -repeated exposure category 2		
		H304	Aspiration hazard category 1		
2	Ethyl acetate	H319	Serious eye damage/ eye irritation category 2	○	4
		H336	Target organ toxicity -single exposure category 3		
3	Xylene (o, m, p mixture)	H312	Acute toxicity - by dermal route category 4		7
		H332	Acute toxicity - by inhalation route category 4		
		H315	Skin corrosion/irritation category 2		
		H319	Serious eye damage/ eye irritation category 2		
		H336	Target organ toxicity -single exposure category 3		
		H372	Target organ toxicity -repeated exposure category 1		
4	Methyl ethyl ketone	H319	Serious eye damage/ eye irritation category 2	○	4
		H336	Target organ toxicity -single exposure category 3		
5	Methyl alcohol	H301	Acute toxicity - by oral route category 3	○	20
		H311	Acute toxicity - by dermal route category 3		
		H331	Acute toxicity - by inhalation route category 3		
		H319	Serious eye damage/ eye irritation category 2		
		H370	Target organ toxicity -single exposure category 1		
6	N,N-Dimethylformamide	H319	Serious eye damage/ eye irritation category 2		7
		H360	Reproductive toxicity category 1		
7	Dichloromethane	H315	Skin corrosion/irritation category 2		14
		H319	Serious eye damage/ eye irritation category 2		
		H341	Germ cell mutagenicity category 2		
		H350	Carcinogenicity category 1(1b)		
		H336	Target organ toxicity -single exposure category 3		
8	Trichloroethylene	H372	Target organ toxicity -repeated exposure category 1		7
		H319	Serious eye damage/ eye irritation category 2		
		H350	Carcinogenicity category 1		

Table 5. To be Continued

No.	Chemical	GHS health hazardous classification		Substances requiring preparation for accidents	Total GHS conversion score
9	Ammonia (Ammonium hydroxide)	H331	Acute toxicity – by inhalation route category 3	○	8
		H314	Skin corrosion/irritation category 1		
10	Hydrogen chloride	H301	Acute toxicity – by oral route category 3	○	14
		H331	Acute toxicity – by inhalation route category 3		
		H314	Skin corrosion/irritation category 1		
		H335	Target organ toxicity –single exposure category 3		

Table 6. Relative risk scores for total emissions.

Order	Name	Population ¹³⁾	Overall human risk score	Emission
1	A	86,908	18,404,815	1,727,237
2	B	86,908	12,159,956	1,031,132
3	C	82,857	8,531,044	710,170
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
97	SC	4,707	83,976	8,673
98	TC	3,709	34,400	8,600
99	UC	3,709	428,215	8,558
100	VC	3,456	86,716	8,203

있었다. 산정식을 통해 구한 점수는 상대적 위험의 순위화를 위한 점수로, 실제 위험도의 차이를 나타내는 것이 아님을 유의하여야 한다.

3.2. 위험지도 작성 결과

산정된 상대적 위험점수를 지도화하기 위해 등급화가 필요함에 따라, 전체 대상 사업장의 위험점수를 살펴보았다. 점수가 가장 높은 사업장과 낮은 사업장의 차이는 매우 큰 것으로 나타났다. 또, 사업장 점수분포를 보면 전체적으로 점수 구간별 사업장 수가 고르지 않음을 확인할 수 있었다. 해외 선행 사례와 산정한 위험점수 분포를 고려하여 총 6단계의 등급을 부여하였다.

지도화한 자료는 스크롤링을 통해 1:2,000,000에서 1:1,000까지 범위의 축척을 제공하며, 1:25,000의 축척에서 가장 보기 좋게 제작되었다. 또, 객체별 사업장명, 주소, 배출물질, 총배출량, 산정된 위험점수 등의 고유 자료를 내장하고 있어 확장을 통해 사업장 정보에 대한 라벨을 노출 시키거나 조건부 검색이 가능하도록 작업한 결과는 **Fig. 1**과 같다.

작성된 위험지도를 살펴보면 도내 배출량 상위 사업장의 분포가 산업단지에 집중되어있다. 특히 안산의 반월·시화 국가 산업단지의 경우 업체 수와 밀집도, 위험점수 등이 가장 높다는 것을 한눈에 확인할 수 있었으며 안산, 시흥, 화성, 평택 등 서해안을 따라 위험점수가 높은 사업장들이 대부분

Fig. 1. Map of risk scores across all regions of Gyeonggi Province.

분포해 있다는 점도 확인할 수 있었다. 이를 활용하여 도내 화학물질 배출 사업장 관리 시 우선순위를 고려할 수 있으며, 도민들이 자신들이 거주지역의 화학물질 위험도를 이해하여 사업장의 자발적인 배출 저감을 유도할 수 있다고 판단된다.

4. 결론

화학물질 배출·이동량 조사는 화학물질이 어떤 방식으로 얼마나 배출되는지를 국가 차원에서 조사하고, 이를 국민에게 공개한다는 점에서 큰 의미를 갖는 제도이다.

본 연구에서는 화학물질 배출·이동량 자료를 활용하여 그 상대적 위험성을 산정하는 방법을 연구하고 이를 일부 대상에 적용하여 그 효용성을 살펴보았다. 또한, 이에 대해 지도화함으로써 공개된 자료의 활용도를 높이고, 비교적 알아보기 쉬운 정보로 가공하였다.

상대적 위험의 순위화만으로도 자료가 나타내는 의미를 훨씬 더 정확하게 표현할 수 있고 다양한 분야에 활용 가능하다고 판단되었다. 특히, 주요 배출량 고순위 물질에 대해 상대적 위험도를 평가하고 이를 지도상에 표현함으로써, 그 결과물을 보고 우선적으로 관심이 요구되는 화학물질 배출 사업장을 확인할 수 있으며, 이를 모니터링 등의 도내 관련 사업 시행 시 우선 순위 대상을 선정하는 데에 활용 가능하다고 생각된다.

한편, 위험도 산정을 위한 자료 확인 시 국내에는 지역별 세부 기상정보나 인구수, 나이별, 신체조건별 독성 가중치 혹은 노출계수 등의 사용 가능한 자료가 부족하였다. 이에 따라, 산정식 개발과정에서 간략화하거나, 범용적인 자료로 대체하다 보니 위험점수의 정량적인 정확도를 높이기에는 제한이 있었다. 화학물질의 위험성 산정이나 대체 평가 등에 관한 연구가 활발히 이루어지기 위해서는 국내 현황에 맞는 노출계수 등의 다양한 자료가 국가 차원에서 연구되고 공개되어야 할 것이다.

향후 더 넓은 범위의 대상 사업장과 물질을 포함하는, 개선된 배출·이동량 자료기반의 상대적 위험지도를 작성하는 연구가 수행되어야 한다. 또, 이를 Python 등의 코딩, API와 결합하여 웹 지도 혹은 스마트폰 애플리케이션의 형태로 구현하여 활용도를 높일 수 있는 방향으로 연구가 이루어져야 한다. 일반적으로 국내 PRTR 자료는 각 사업장의 보고 후 조사연도로부터 2년 뒤에 공개된다. 연구가 진행된 시점에서 접근할 수 있는 최신 데이터인 2016년 PRTR 조사 결과를 활용하였다. 향후 연구에는 공개되는 최신 정보를 자동으로 업데이트하는 방식이 포함되어야 한다. 마지막으로, 더 정확한 자료의 제공을 위해 사고 시 위험성에 대한 지도를 추가하기 위한 연구가 필요하다.

Acknowledgement

본 연구는 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 한국생산기술연구원의 산업미세먼지저감 및 화학안전관리 전문인력양성사업(P0012787)의 지원을 받아 수행한 과제로 이에 감사드립니다.

References

1. Pollutant Release and Transfer Register System, <https://icis.me.go.kr/prtr/dscamtExamInSystem/purps.do>(2018).
2. S. H. Choi, J. C. Go, The investigation of emission characteristics and emission factor of N₂O at solid refuse fuel incinerator, J. Korean Soc. Environ. Eng., 41(2), 82-88 (2019).
3. J. C. Park, Y. W. Hwang, J. B. Kim, Y. W. Kim, Material flow analysis of trichloroethylene in Korea, J. Korean Soc. Environ. Eng., 42(4), 188-196(2020).
4. S. W. Jung, G. T. Seo, Estimation of the local human health burden due to inhalation of fine particulate matter and identification of major emission sources using a life cycle impact assessment method, J. Korean Soc. Environ. Eng., 361-371(2019).
5. S. W. Cha, H. S. Par, H. Y. Kim, J. H. Lee, Development of a program (TRIWIN) to estimate TRI emissions, in Proceedings of the Annual Meeting of Korean Society of Environmental Engineers, KSEE, Pohang, pp. 123-124(2001).
6. U.S. Environmental Protection Agency, EPA's Risk-Screening Environmental Indicators(RSEI) Methodology, version 2.3.7, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C., USA, pp. 1-92(2018).
7. G. S. Park, H. S. Kim, B. H. Jeon, Analysis and suggestions on current chemical management in Korea, J. Korean Soc. Environ. Eng., 39(11), 650-654(2017).
8. U.S. Environmental Protection Agency, Exposure and Fate Assessment Screening Tool (E-FAST) Version 2.0 Documentation Manual, U.S. Environmental Protection Agency pp. 1-174(2007).
9. M. B. Swanson, G. A. Davis, L. E. Kincaid, T. W. Schultz, J. E. Bartmess, S. L. Jones, E. L. George, A screening method for ranking and scoring chemicals by potential human health and environmental impacts, Environ. Toxicol. Chem., 16(2), 372-383(1997).
10. U.S. Environmental Protection Agency, Chemical Hazard Evaluation Management Strategies: A Method for Ranking and Scoring Chemicals by Potential Human Health and Environmental Impacts, U.S. Environmental Protection Agency, pp. 1-120(1994).
11. W. S. Eoh, S. M. Lee, K. S. Park, Comparison of recognition of chemical substances about health·safety· practice in small and medium-sized manufacturing industries, J. Korean Soc. Saf., 34(4), 49-58(2019).
12. Pollutant Release and Transfer Register System, <https://icis.me.go.kr/prtr/main.do>(2018).
13. Ministry of the Interior and Safety, Resident registered population by administrative district (Eup, MyeonDong) /5years of age, Ministry of the Interior and Safety, Sejong, Korea(2019).

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors and Contribution Statement

Hyejeong Han

Department of Environmental Engineering, Ajou University, MS Candidate, ORCID[®] 0000-0003-2637-0627: Writing-original draft, Writing-review and editing.

Sungchul Shin

Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, MS, ORCID[®] 0000-0003-1946-1328: Data curation, Data analysis, Methodology, Visualization.

Keunwon Lee

Department of Environmental Engineering, Ajou University, Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Professor, ORCID[®] 0000-0002-4073-1110: Project administration.

Seungho Jung

Department of Environmental Engineering, Ajou University, Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Professor, ORCID[®] 0000-0001-8339-441X: Funding acquisition, Supervision, Resources.