

화학물질 유해기반지수의 시공간적 특성 분석 연구*

Analysis of Spatiotemporal Characteristics of Chemical Hazard-based Result Score

임유라** · 배현주***

Yu-ra Lim · Hyun-Joo Bae

요약: 산업화로 다양한 화학물질을 사용한 생산 및 폐기 과정에서 환경문제가 발생하기도 하며 화학물질 정보에 대한 관심이 증가하고 있다. 인체 영향을 고려한 화학물질의 유해수준을 파악한 지역별 정보가 필요한 시점이다. RSEI 유해기반지수는 화학물질 배출량에 인체 건강영향의 정도를 수치화한 독성가중치를 적용한 정량적인 지표이다. 본 연구는 2011~2020년 PRTR 자료를 토대로 화학물질 배출량과 RSEI의 유해기반지수를 산출하고 공간패턴 파악한 후 화학물질 배출량과 유해기반지수가 시공간 집중적으로 발생하는 핫스팟 지역을 탐색하였다. 핫스팟 지역에 대한 화학물질별, 업종별 특성을 비교하여 유해기반 관리가 필요한 부분을 확인하고자 하였다. 배출량 핫스팟 지역은 에틸벤젠이 80% 이상 비율인 반면 유해기반지수 핫스팟 지역은 크롬 비율이 90% 이상을 차지하였다. 화학물질 유해기반지수는 화학물질배출사업장에 대한 관리뿐만 아니라 지역의 환경관리에 활용될 수 있다.

핵심주제어: RSEI, 화학물질배출이동량, 유해기반지수, 고위험지역

Abstract: The production and disposal of chemical products cause environmental problems, and as such, regional information on chemical substance hazard level is required to ensure environmental and human safety. The RSEI hazard-based result score is a quantitative indicator that considers the degree of impact on human health as a toxicity-weighted value. This study identify hazard contribution and spatiotemporal characteristics by region and chemical by calculating a hazard-based result score using pollutant release and transfer register (PRTR) data from 2011 to 2020. Identification of the hazard-based result scores revealed differences in the type of chemicals and industry contributing to the discharge. The results showed that ethylbenzene accounted for $\geq 80\%$ of the discharged chemicals in the discharge hotspots, while chromium accounted for $\geq 90\%$ of the discharged chemicals in the hazard-based result score hotspots. The RSEI hazard-based result score can be used for the management of industries discharging chemical substances as well as local environmental health management.

Key Words: Risk Screening Environmental Indicators, Pollutant Release and Transfer Register, Hazardous Score, Hot-Spot

* 본 논문은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경보건디지털 조사기반 구축 기술개발사업(RS-2021-KE001615)의 지원을 받아 한국환경연구원이 수행한 “환경보건감시체계 구축 및 예방관리 기술 개발(2024-028(R))” 사업에 의해 수행되었음.

** 주저자, 인하대학교 의과대학연구소 연구원

*** 교신저자, 한국환경연구원 선임연구위원

I. 서론

산업구조가 다양화되면서 화학물질 종류와 사용량도 증가되고 화학물질을 이용한 생산과 폐기 과정에서 환경문제가 발생하기도 하며, 이러한 화학물질 정보에 대한 국민적 관심도 증가하고 있다(김시진·임유라·배현주, 2021). 환경문제를 해결하기 위한 정책 추진은 1세대 직접규제 중심, 2세대 시장매커니즘 기반에 이어 3세대 사전예방적이며 유연한 정보공개정책이 각광받고 있다(유상욱·배현희, 2015).

화학물질 관리를 위하여 국내에서는 화학물질통계조사와 화학물질배출이동량조사 정보가 공개되고 있다. 화학물질통계조사는 화학물질의 제조, 수입, 수출 등의 유통량과 관련한 통계자료로 1998년부터 통계조사가 이루어졌으며 2년마다(2010년 이후) 통계자료가 공표되었다. 화학물질배출이동량조사(Pollutant Release and Transfer Registers, PRTR) 자료는 사업자가 제조나 사용과정에서 환경으로 배출되는 화학물질의 양을 보고하여 국민에게 공개하는 것이다. 우리나라의 화학물질배출이동량조사 제도는 1996년 OECD 가입시 화학물질 배출량조사제도 도입을 약속하고, 유해화학물질 관리법을 개정하여 화학물질의 배출량조사에 필요한 법적 근거를 마련하여 시행되었다(임지영·김현지·김민선·이지호·이상목·이청수, 2018). 화학물질관리법 5조의 화학물질 배출량조사는 화학물질 배출로부터 국민의 건강과 환경을 보호하고 사업장으로 하여금 화학물질 배출의 저감을 유도하기 위하여 화학물질을 취급하는 사업장에 대하여 해당 화학물질을 취급하는 과정에서 배출되는 화학물질 현황 등을 조사한다고 명시하고 있다. PRTR의 궁극적인 목적이 국민의 건강을 지키기 위한 것임에도 불구하고, 현재 PRTR 정보는 유해성에 대한 정보 제공보다는 사업장의 배출이동량 등의 양적 정보에 집중되어 있다. 하지만 정보수요자의 관심은 자신이 살고 있는 지역의 오염수준과 화학물질의 인체 유해성 정도에 대한 정보에 더 큰 관심을 가질 가능성이 크다. 화학물질에 따라 적은 양이더라도 인체에 큰 영향을 미칠 수도 있으며 반대로 배출량은 많으나 인체 유해성 정도가 낮을 수도 있다. 사업체의 화학물질 배출량에 따른 인체 영향

을 평가하고, 지역별 특정 화학물질에 대한 위해 수준을 파악하기 위하여 미국의 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)은 화학물질배출량자료(Toxics Release Inventory, TRI)를 이용하여 화학물질에 의한 영향을 추정하기 위한 스크리닝 모델인 Risk-Screening Environmental Indicators(RSEI)를 개발하였다(US EPA, 2019). RSEI는 정량적인 위해성 평가는 아니지만 지역, 물질, 그리고 업종간의 비교가 가능하여 잠재적으로 만성적 건강 위해(chronic health risk)에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 물질, 업종, 지역 등을 파악할 수 있고 우선순위를 도출할 수 있는 과학적 근거를 제시할 수 있다(US EPA, 2019).

RSEI의 정보에 대하여 별도의 대쉬보드를 만들어 정보를 공개하고 있으며 개발된 RSEI를 활용하여 다양한 학술적 연구가 진행되었다. RSEI와 사회인구변수(인종, 저소득)와의 관련성을 파악한 연구가 이루어졌으며(Collins, 2011; Ash et al., 2018; Collins et al. 2016), 미국의 TRI 배출량과 RSEI의 추세를 파악하여 환경규제 준수를 평가할 수 있는 정량적 지표로서 기초자료 분석이 이루어졌다(Abel, Stephan, and Kraft, 2007; Zhou and Schoenung, 2009). RSEI 자료는 학술적 연구 이외에도 실제로 지역의 우선순위 관리 지역을 도출하는 정책의 과학적 근거로도 활용되고 있다(California Office of Environmental Health Hazard Assessment, 2021).

국내의 경우 PRTR 정보가 2010년 전면 공개되고 2015년부터 관련 연구가 진행되었는데 연도별, 지역별 추세를 파악하거나 환경정의 측면에서 지역별로 화학물질배출시설 및 배출량과 사회경제변수를 비교한 연구가 주로 이루어졌다. 지역별 추세를 파악한 연구에서는 화학물질 배출량이 지역별 상이한 차이를 보였다(김시진 등, 2021; 유상욱·배현희, 2015). 또한 매체별, 지역별, 화학물질별 기여도를 배출·이동량 자체의 분포와 비교함으로써 유해기반 관리가 필요한 부분을 확인할 수 있는 기초자료를 제시하였다(김시진 등, 2021).

PRTR 자료를 활용한 분포 특성 연구는 환경정의 측면의 지역별 특징을 파악한 연구가 주로 진행되었는데 PRTR자료를 이용하여 배출시설수와 배출

량의 커널밀도분석 결과 지역적 패턴 차이가 나타났으며(Yoon, Kang, and Park, 2017), 사회경제적 변수와 화학물질 배출량간의 유의미한 관련성을 보였다(이승훈·반영운·백종인·고정근·심수은, 2018).

이처럼 화학물질 배출량과 유해기반지수와 관련한 연구사례의 경우 추이를 파악하고, 배출량과 유해기반지수의 단순 비교를 통한 기초자료 제시에 중점을 맞춘 연구가 주로 이루어졌으며, 국내에서 화학물질 배출량과 관련한 공간분포 특성은 지역의 환경정의를 파악하기 위한 기초 자료로서 활용되었다. 환경정책 수립에서 한정된 자원과 시간을 효율적으로 배분하기 위해서는 과학적 근거자료로서 인체 영향을 고려한 화학물질의 유해수준을 파악한 지역별 자료가 필요하다. 하지만 현재 배출량과 유해기반지수 차이가 발생하는 지역적 공간분포 특성이나 유해기반지수가 높게 나타나는 지역의 특성을 파악한 연구는 미흡한 실정이다.

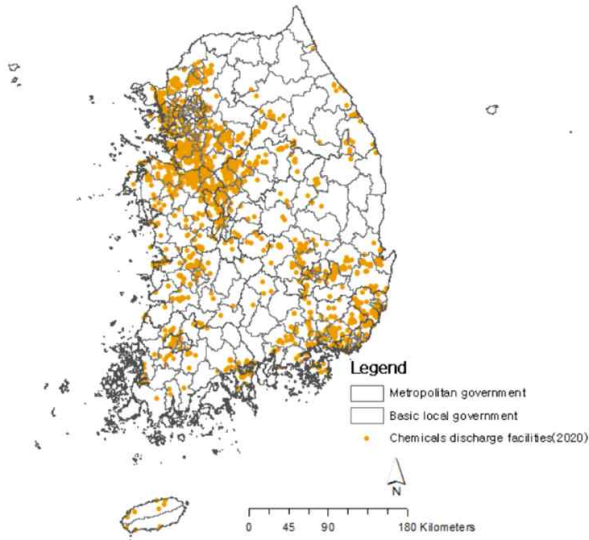
본 연구에서는 PRTR 자료를 토대로 화학물질 배출량과 RSEI의 유해기반지수를 산출하고 시공간분포 특성을 파악하고자 하였다. 또한 화학물질 배출량과 유해기반지수가 지속적으로 높았던 지역의 화학물질별, 업종별 특성을 비교하여 유해기반 관리가 필요한 부분을 확인하고 정책적 활용 방안을 제시하고자 한다.

II. 연구자료 및 방법

1. 연구의 범위 및 연구자료

본 연구에서 화학물질 배출량과 RSEI 유해기반지수를 산출하여 지역적 공간패턴을 파악하고 배출량과 유해기반지수가 집중적으로 발생하는 지역을 탐색하기 위하여 전국 시군구(250개, 2020년 기준)를 공간적 범위로 설정하였으며 환경부 화학물질배출이동량 자료(PRTR)사업장(3,803개, 2020년 기준)을 대상으로 하였다(〈그림 1〉).

〈그림 1〉 화학물질배출이동량 자료 조사사업장 위치(2020년)



본 연구에서는 RSEI 유해기반지수를 산출하기 위하여 환경부의 화학물질 배출이동량(PRTR) 자료를 활용하였다. 화학물질별, 매체별(대기, 수계, 토양) 배출량과 이동량에 정보를 제공하는 PRTR 조사 업종은 1999년 화학물질 배출이동량 조사가 시행된 이후 최근 2020년(2022년 공개기준)에는 화학제품제조, 1차 금속 제조업 등 33개 업종 228종 화학물질을 대상으로 조사가 이루어졌다. PRTR은 사업장내에서 처리 후 대기, 수계, 토양으로 직접 배출되는 배출량과 사업장내에서 관리하는 매립지에 매립되는 자가 매립량, 폐기물처리업체로 이동되는 조사대상 화학물질의 위탁처리량으로 구분된다. 본 연구에서는 사업장에서 직접 배출되는 화학물질 배출량을 중심으로 2011년부터 2020년까지 자료를 구축하였다.

PRTR 자료에 등록된 업체의 주소를 기준으로 GeocodingTool(Biz GIS 제공)을 통해 좌표로 변환하는 지오코딩을 하였으며 ArcGIS Pro로 지도화 하였다. 정제된 자료를 기반으로 화학물질 배출량과 유해기반지수를 산정하고 지역별로 합산하여 시군구별 자료를 산출하였다.

2. 연구방법

1) RSEI 모델의 유해기반지수 산정 방법

본 연구에서는 화학물질 배출량이 동일한 가중치를 가지는 한계를 개선하고자 독성가중치를 적용한 유해기반지수를 산정하였다. 본 연구에서는 PRTR 자료의 가용성을 고려하여 세 가지 방법 중 유해기반지수를 중심으로 화학물질 배출특성을 파악하였다. RSEI의 유해기반지수는 화학물질 배출량에 매체별, 노출경로별 독성가중치(Toxicity Weight)를 곱하여 산출한다. 산정 과정은 첫째, 대상지역과 화학물질을 선정하고, 둘째, 화학물질에 해당하는 독성가중치를 산정하여, 셋째, 화학물질 배출량에 독성가중치를 곱하여 계산한다. 유해기반 점수는 화학물질 배출량과 특정 매체(대기, 수질, 토양)에 따라 대응하는 독성가중치를 곱하여 산출하며 최종 유해기반지수는 화학물질의 매체별 값을 합산한다. 화학물질에 적용해야 할 독성가중치가 없는 경우 유해기반지수는 0이 된다(US EPA, 2019).

본 연구에서는 PRTR자료를 활용하여 조사 대상이 되는 228종의 화학물질에 대한 유해기반지수를 산출하였다. 독성자료는 2022년 구축된 RSEI 버전 2.3.10의 독성가중치 자료를 활용하였다. 독성가중치는 매체별 노출경로에 따라 발암, 비발암별 적용되는 독성가중치 값이 달라지는데 발암물질은 경구에 의한 Oral slope factor(OSF)와 흡입에 의한 Inhalation unit risk(IUR) 독성값이 적용되며, 비발암은 용량기준의 Reference dose(RfD)와 농도 기준의 Reference concentration(RfC)을 사용한다(US EPA, 2019). 유해기반지수는 노출경로에서 만성노출과 관련된 발암물질과 기타 유형의 만성독성 영향에 중점을 둔 독성값에 대한 독성가중치를 산출하게 되며, 화학물질이 발암과 비발암 모두 영향을 갖는 경우 각각 독성가중치를 산정하여 가장 높은 값이 해당 화학물질의 독성가중치로 결정된다.

화학물질 유해기반지수는 특정 단위가 존재하지 않아 배출량과의 절대적 비교가 아닌 상대적 비교가 가능하며 같은 방법을 통하여 적용된 화학물질별, 업종별, 지역별 상대적 평가가 가능하다. 이러한 정보는 RSEI 목적에 따

라 화학물질, 산업, 지역 등의 상대적 위험도를 평가할 수 있는 수치가 산출되며 이러한 수치를 합산하고 비교할 수 있다.

2) 커널 밀도 분석

본 연구에서는 화학물질배출시설의 점자료를 활용하여 각 사업체의 화학물질 배출량과 유해기반지수에 대한 공간적 패턴을 분석하였다. 화학물질배출시설과 같은 점 개체의 경우 분포 패턴을 규칙적, 임의적, 군집적 패턴으로 분류할 수 있으며 규칙적, 임의적 패턴의 경우는 시각적으로 판단하기 어렵기 때문에 통계적 분석방법을 사용하게 된다(길혜민·박혁서·박지윤, 2015). 밀도 분석에서 커널(kernel) 분석은 대상지의 점 개체의 분포를 바탕으로 대상지 전체에 걸쳐 공간밀도를 추정하게 된다. 밀도 추정은 격자들의 중심점 간의 거리가 증가할수록 연관성이 감소하며 일정한 크기의 대역폭(bandwidth)을 설정하여, 대역폭 내에서 점 개체들을 기준으로 하여 격자의 밀도를 조정한다(이희연·심재현, 2011). 즉, 주어진 점들로부터 대상지역 전체 각 셀의 공간밀도 Z 를 추정하기 위해 kernel이라고 불리는 확률밀도함수를 이용한다. S 지점에 대한 공간밀도 $\lambda(S)$ 는 다음과 같은 식 (1)를 통해 산출된다(이희연, 2005).

$$\hat{\lambda}_\tau(S) = \frac{1}{\delta_\tau(S)} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau^2} k\left(\frac{(S - S_i)}{\tau}\right) \quad (1)$$

여기서, $k\left(\frac{(S - S_i)}{\tau}\right)$: 커널함수

$\lambda > 0$: 공간밀도를 추정하기 위한 대역폭(bandwidth)

$\delta_\tau(S)$: 가장자리 보정 요소

본 연구에서 화학물질시설의 배출량과 유해기반지수에 대한 커널밀도분석은 ArcGIS Pro를 이용하여 산출하고 지도화하였다.

3) 핫스팟(Hotspot) 분석

시군구의 화학물질 배출량과 유해기반지수 핫스팟(Hotspot) 지역을 탐색하기 위하여 시공간스캔통계량(spatiotemporal scan statistics, SaTScan)을 활용하였다. SaTScan은 Kulldorff가 미국 국립암연구소(National Cancer Institute)와 개발한 프로그램으로 우도비(likelihood ratio)에 기초하여 통계적 군집(cluster)을 탐색하여 클러스터를 찾아낸다(Kulldorff, 2018). 핫스팟 지역은 클러스터 지역을 의미한다. SaTScan은 우도비에 로그를 취한 로그 우도비(log likelihood ratio; LLR)를 이용하여 연구대상지의 모든 탐색모형에 대한 우도비를 계산하고, LLR의 최대값을 구하면 그때의 탐색모형이 가장 유의한 클러스터(primary cluster)가 된다. 즉, 우도비를 비교하여 최대우도비를 산출하게 되며 최대우도비가 관측된 지역과 시기가 바로 시공간 집중이 발생한 핫스팟 지역이 된다(강호제, 2007). SaTScan은 자료 형태에 따라 베르누이 모델, 포아송 모델, 지수 모델, 정규 모델을 적용할 수 있다(손학기 등, 2008).

본 연구에서 활용한 화학물질 배출량과 유해기반지수는 연속형 자료로 정규 모델을 적용하였다. 정규 모델에서 평균은 $\mu = X/N$, 분산은 $\sigma^2 = \frac{\sum_i (\mu - x_i)^2}{N}$, i 지역의 관찰값을 x_i 라 하였을 때 우도비는 다음 식 (2)와 같다(Kulldorff, Huang, and Konty, 2009).

$$L_0 = \prod_i \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

또한, SaTScan은 과거에 시공간집중이 발생했던 공간과 시간적 범위를 찾는 후향적 분석(retrospective analysis)과 최근 상황을 근거로 시공간집중이 발생하고 있는 지역을 찾는 전향적 분석(prospective analysis)의 두가지 형태로 구분된다(Aturinde and Mansourian, 2022).

본 연구에서는 특정 시점에 화학물질 배출량과 유해기반지수가 집중되었

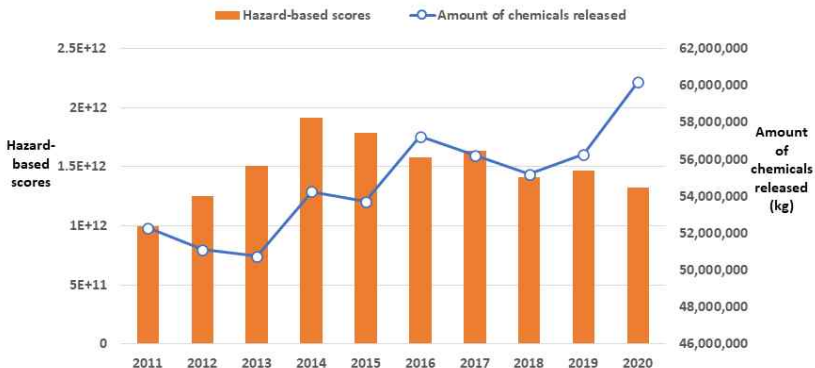
던 지역을 탐색하기 위한 후향적 분석과 현재 진행형의 시공간 집중의 범위를 파악할 수 있는 전향적 분석을 실시하였다. 핫스팟 분석은 SaTScan v9.6을 사용하였으며 ArcGIS Pro를 이용하여 지도화하였다.

III. 연구 결과

1. 화학물질 배출량 및 유해기반지수 기본통계량 및 커널밀도 분석

2011년부터 2020년까지의 화학물질 배출량과 화학물질 유해기반지수의 추세를 파악한 결과는 <그림 2>와 같다. 대기, 수계, 토양으로 직접 배출되는 화학물질 배출량은 2011년부터 2013년까지는 52,288,640kg에서 50,767,030kg으로 감소하다가 2016년 57,247,558kg으로 증가하고 최근 2020년 60,206,324kg으로 2011년 대비 1.2배 증가한 추세를 보였다. 독성가중치를 고려한 화학물질 유해기반지수의 경우는 2011년 996,401,327,105에서 2014년 1,917,718,544,780으로 지속적으로 증가하는 추세를 보이다 2016년에는 감소하여 최근 2020년 1,325,427,370,398으로 지속적으로 감소하는 추세를 나타내 화학물질 배출량과 유해기반지수의 연도별 추이에서 차이를 보였다.

<그림 2> 2011~2020년 화학물질 배출량과 유해기반지수 추세



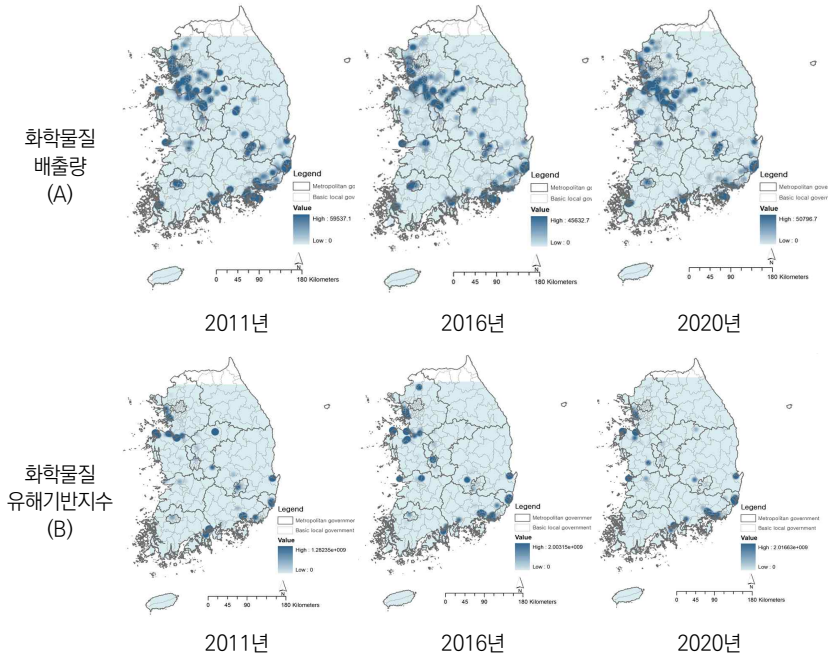
2011년부터 2020년까지 전국 250개 시군구의 화학물질 배출량과 RSEI 유해기반지수의 기본통계량은 <표 1>과 같다. 10년간 화학물질 배출량 평균은 275,734kg이며 유해기반지수는 평균 7,502,554,120이었다. 표준편차는 화학물질 배출량 646,479과 유해기반지수 31,975,767,479으로 변동계수(sd/mean)를 계산하면 화학물질 배출량(2.3)보다 유해기반지수(4.3)가 높게 나타나 유해기반지수의 지역별 차이가 더 큰 것으로 분석되었다.

<표 1> 2011~2020년 화학물질 배출량과 유해기반지수의 기본통계량

구분	최소값	퍼센타일			최대값	평균	표준편차
		25	50	75			
화학물질 배출량 (kg)	0	514	23,601	286,356	6,845,502	275,734	646,479
화학물질 유해기반지수	0	68,007	9,866,813	658,513,498	484,074,160,509	7,502,554,120	31,975,767,479

본 연구에서는 2011년부터 2020년까지 화학물질 배출량과 유해기반지수의 핫스팟 분석에 앞서 공간패턴을 파악하기 위하여 커널밀도분석을 실시하였으며, 2011년, 2016년, 2020년의 결과 값은 <그림 3>과 같다. 화학물질배출시설의 배출량을 토대로 전국을 대상으로 공간밀도를 추정하는 것이며, 화학물질 배출량은 인천과 대구, 부산, 울산 등 7대 도시에 속한 지역이 다른 지역보다 화학물질 배출량의 밀집도가 높은 패턴을 보였으며 연도별로 유사한 패턴을 보였다. 화학물질 배출량과 달리 RSEI 유해기반지수의 경우는 연도별로 공간적 차이가 발생하였다. 2011년에는 화학물질 유해기반지수의 경우 충남, 부산 일부 지역에서 높은 값을 보였으며, 최근 2020년에도 충남과 경남 일부지역에서 화학물질 유해기반지수 밀도가 다른 지역보다 높게 나타났다.

〈그림 3〉 2011~2020년 화학물질 배출량(A)과 RSEI 유해기반지수(B)의 커널밀도 분석



본 연구의 지역별 공간 특성 파악을 위한 커널밀도 분석에서 RSEI 유해기반지수가 높은 지역은 특정 지역에 집중하여 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 화학물질 배출량 조사결과 보고서(2022)에서 화학물질 배출량은 경기도>경상남도>울산광역시 순으로 배출량이 높았으며, 지역별 공간특성에서도 화학물질 배출량이 이들 지역을 중심으로 높게 나타났다. 인체 위해성을 고려한 RSEI 유해기반지수의 경우도 김시진 등 (2021)연구에서 시도별로 유해기반지수가 높았던 충청남도, 경상남도에서 커널 밀도함수가 높게 나타났다. 본 연구에서는 화학물질 배출량이나 유해기반지수에 대한 특성을 시각화하여 지역별로 파악할 수 있었다.

2. 화학물질 배출량 및 유해기반지수 핫스팟 분석

공간적 패턴에서 차이를 보였던 화학물질 배출량과 유해기반지수에 대해

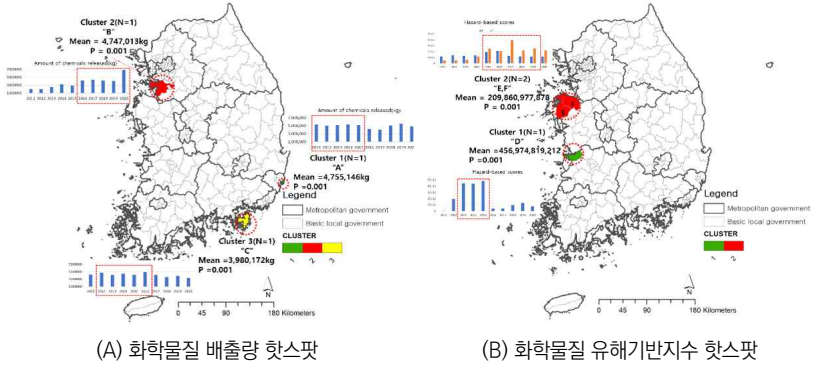
여 시공간집중이 발생하는 지역을 탐색하기 위하여 SaTScan의 정규 모델을 이용하여 후향적 분석과 전향적 분석을 실시하였다. 2011년부터 2020년까지 전국 250개 시군구의 화학물배출량과 유해기반지수 자료를 활용 핫스팟 분석을 실시한 결과, 화학물질 배출량의 경우 과거에서부터 시공간집중이 발생한 지역을 탐색하는 후향적 분석과 현재 진행형으로 발생하는 지역을 탐색하는 전향적 분석 모두 클러스터 지역은 동일하지만 클러스터가 탐색된 시기는 차이를 보였다.

울산시 A구의 후향적 분석에서 2011년부터 2015년까지 배출량이 집중적으로 높은 값을 보였으며, 클러스터2에 해당하는 경기도 B시는 2016년부터 2020년까지 배출량이 집중적으로 높은 값을 보였다. 마지막으로 클러스터 3에 해당하는 경남 C시는 2012년부터 2016년까지 화학물질 배출량이 집중적으로 발생하는 것으로 나타났다(그림 4(A)). 전향적 분석에서는 A,B,C 지역 모두 2016년부터 2020년까지 화학물질 배출량이 집중적으로 발생하였으며(그림 4(C)), 화학물질 배출량 핫스팟 지역은 과거와 현재 모두 배출량이 높은 지역으로 탐색되었다.

유해기반지수는 후향적 분석과 전향적 분석에서 탐색된 클러스터 지역의 차이가 발생하였다. 후향적 분석에서는 클러스터1지역에 전라북도 D시가 포함되었으나, 전향적 분석에서는 제외되었으며 후향적 분석에서 클러스터 2에 포함된 충청남도 E시, F시가 전향적 분석에서 클러스터1에 포함되었다(〈그림 4(B),(D)〉). 화학물질 배출량과 RSEI 유해기반지수 핫스팟 분석 결과는 P값이 0.01이하로 통계적으로 유의미한 결과로 나타났다.

〈그림 4〉 2011~2020년 시공간도형별 화학물질 배출량(A,C)과 유해기반지수(B,D) 클러스터 분포

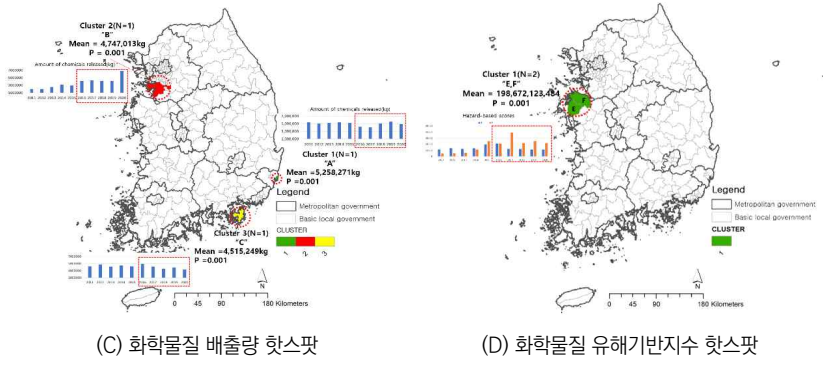
후향적 시공간분석



(A) 화학물질 배출량 핫스팟

(B) 화학물질 유해기반지수 핫스팟

전향적 시공간분석



(C) 화학물질 배출량 핫스팟

(D) 화학물질 유해기반지수 핫스팟

2011년부터 2020년 동안 화학물질 배출량의 핫스팟 분석 결과 우도비의 차이로 가장 유의한 지역인 클러스터1(primary cluster)은 후향적 분석과 전향적 분석 모두 울산시 A로 탐색되었으며, 2011~2015년 평균 화학물질 배출량은 5,258,271kg으로 클러스터 지역을 제외한 외부의 화학물질 배출량인 208,834kg 보다 25배 이상 높게 나타났다. 2016~2020년의 5년간 평균은 2015~2018년으로 4년 평균 4,639,946kg이며 클러스터 지역을 제외한 외부의 화학물질 배출량 평균인 205,740kg 보다 22배 이상 높게 나타났다. 클러스터1 다음으로 우도비가 높게 나타난 클러스터2에 해당하는 지역은 경기도 B시로 후향적 분석과 전향적 분석의 핫스팟으로 탐색된 기간이 모두

2016~2020년으로 나타났으며 5년간 평균 배출량은 4,747,013kg으로 클러스터2를 제외한 지역의 화학물질 배출량 평균인 209,859kg보다 23배 이상 높게 나타났다.

2011년부터 2020년 동안 RSEI 유해기반지수의 핫스팟 분석 결과 후향적 분석에서 클러스터1로 탐색된 전라북도 D시의 시공간 집중이 발생한 시기는 2013~2015년으로 3년간 평균 유해기반지수는 456,974,819,212로 클러스터 외 지역의 평균 유해기반지수인 5,424,624,019보다 84배 이상 높게 나타났다. 2016년 이후 유해기반지수가 급격히 감소하여 전향적 분석에서는 클러스터 지역으로 탐색되지 않았다. 충청남도 E시와 F시의 경우는 후향적 분석에서는 클러스터2에 포함되었으며, 전향적 분석에서는 클러스터1에 포함된 유해기반지수의 핫스팟 지역이다. E시와 F시의 2016~2020년 평균 유해기반지수 198,672,123,484으로 클러스터 외 지역의 평균 유해기반지수인 6,594,428,313보다 38배 이상 높게 나타났다.

〈표 2〉 2011~2020년 화학물질 배출량과 유해기반지수의 시공간스캔 통계량

구분	클러스터 (N)	연도	우도비	P 값	평균	
					클러스터 내부	클러스터 외부
후향적 시공간분석						
화학물질 배출량 핫스팟	1(1)	2011~2015	200.06	0.001	5,258,271	208,834
	2(1)	2016~2020	158.95	0.001	4,747,013	209,859
	3(1)	2012~2016	142.16	0.001	4,515,249	210,323
화학물질 유해기반지수 핫스팟	1(1)	2013~2015	441.99	0.001	456,974,819,212	5,424,624,019
	2(2)	2015~2019	283.93	0.001	209,860,977,878	5,136,910,620
전향적 시공간분석						
화학물질 배출량 핫스팟	1(1)	2016~2020	159.56	0.001	4,755,146	209,842
	2(1)	2016~2020	158.95	0.001	4,747,013	209,859
	3(1)	2016~2020	107.48	0.001	3,980,172	211,395
화학물질 유해기반지수 핫스팟	1(2)	2016~2020	250.48	0.001	198,672,123,484	5,168,878,775

3. 핫스팟 지역의 화학물질 배출량 및 유해기반지수 특성

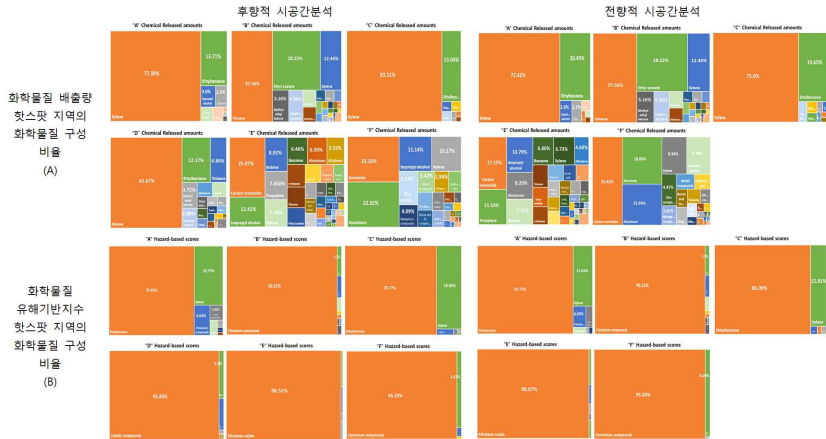
1) 핫스팟 지역의 화학물질별 특성

본 연구에서는 후향적 분석에서 배출량의 클러스터 지역으로 탐색된 A, B, C 지역과 유해기반지수의 클러스터 지역으로 탐색된 D, E, F 지역의 배출량과 유해기반지수의 클러스터로 탐색된 시기의 평균 화학물질 기여도를 파악하였다(〈그림 5〉).

화학물질 배출량 핫스팟 지역인 울산시 A와 경상남도 C와 유해기반지수의 핫스팟 지역인 전라북도 D시의 경우 대규모 조선업체가 위치하고 있으며, 화학물질 배출량의 화학물질별 구성 비율이 유사한 형태를 보였는데 화학물질 배출량은 울산시 A구의 경우 자일렌(77.39%)과 에틸벤젠(13.71%)이 가장 많이 배출되며 경상남도 C도 자일렌(83.51%)과 에틸벤젠(13.04%) 순으로 배출되었고, 전라북도 D시는 자일렌(61.67%)과 에틸벤젠(12.17%) 순으로 배출되었다. 전라북도 D시의 경우 코발트 및 그 화합물의 독성가중치가 17,000,000로 매우 높은 값을 보여 D시의 유해기반지수 화학물질에 95% 이상의 기여도를 나타냈다.

전향적 분석은 배출량과 유해기반지수의 핫스팟 지역의 2016~2020년 5년 평균 값을 활용하여 화학물질의 기여도를 파악하였다. A, B, C시의 경우 후향적 분석에서의 화학물질 기여도와 유사한 기여도를 보였으며, 유해기반지수 핫스팟 지역인 충청남도 E시와 F시는 대규모 산업단지가 위치한 지역으로 다양한 화학물질이 배출되고 있다. E시와 F시의 경우 1순위로 일산화탄소가 차지하는 비율이 각 17.15%, 25.42%로 다른 화학물질보다 높은 비율을 차지하였다. 유해기반지수의 경우 E시는 산화에틸렌이 98%이상 기여하였으며 F시는 크롬 및 그 화합물이 95% 이상 기여하였다.

〈그림 5〉 핫스팟 지역에서 화학물질 배출량과 유해기반지수의 화학물질 구성 비율



2) 핫스팟 지역의 업종별 특성

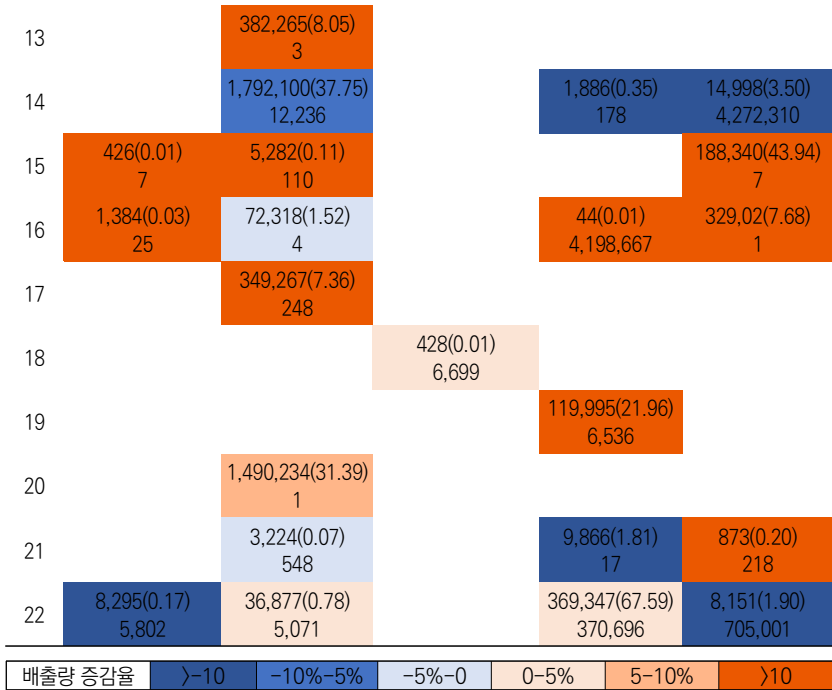
본 연구에서는 후향적 분석과 전향적 분석에서 모두 핫스팟 지역 선정된 A, B, C, E, F지역의 2016~2020년 업종별 화학물질 배출량과 유해기반지수 ratio(유해기반지수/배출량)을 분석하여 업종별 유해기반지수 비율의 기여도를 파악하였다(〈표 3〉). 화학물질 배출량의 핫스팟 지역인 울산 A와 경상남도 C의 경우 기타 운송장비 제조업에서 배출되는 화학물질 배출량은 5년 평균(2016~2020)이 각각 4,736,858kg(99.62%), 3,967,833kg(99.69%)으로 가장 높은 배출량을 보였다. 울산 A구의 경우 기타 운송장비 제조업이 5년간 5% 이하의 배출량 증가율을 보였으며, 경상남도 C시의 경우는 5~10%의 감소율을 보였다. 경기도 B시는 5년 평균 배출량이 높은 업종은 자동차 및 트레일러(37.75%), 펄프, 종이 및 종이제품(31.39%)로 나타났으며 A, C지역과 달리 다양한 업종에서 화학물질이 배출되고 있다. E시의 경우는 대규모 석유화학단지가 위치하고 있어, 화학물질 및 화학제품 제조업에서 67.59%의 기여도를 보이며 5년간 5% 이하의 증가율을 보였다. 전기장비 제조업의 경우 배출량이 낮아 상대적으로 배출량대비 유해기반지수 ratio가 높게 나타났으며, 화학물질 및 화학제품의 경우는 배출량도 높고 유해기반지수도 높아 배

출량대비 유해기반지수 ratio가 높게 나타나는 경향을 보였다. 유해기반지수 핫스팟 지역인 F시의 경우 대규모 화력발전소와 제철소가 위치하고 있어 이들 업종에서 배출되는 화학물질 배출량이 높은 것으로 나타났다. 전기, 가스, 증기 및 공기 조절 공급업의 배출량이 43.94%로 가장 높았으며 1차 금속 제조업이 26.45%로 기여도가 높게 나타났다. 1차 금속 제조업의 배출량은 5년간 5~10%의 증가율을 보였으며 전기, 가스, 증기 및 공기 조절 공급업은 10% 이상의 증가율을 보였다. 배출량대비 유해기반지수 ratio는 자동차 및 트레일러 제조업과 1차 금속 제조업에서 높게 나타났으며 이는 전술하였던 크롬에 의한 유해기반지수가 높게 나타났기 때문이다.

〈표 3〉 핫스팟 지역에서 업종별 화학물질 배출량 및 유해기반지수 기여율

업종*	A 배출량(%) Ratio**	B 배출량(%) Ratio**	C 배출량(%) Ratio**	E 배출량(%) Ratio**	F 배출량(%) Ratio**
1		1,213(0.03) 574		50,263(9.20) 699	113,363(26.45) 1,681,118
2		3,468(0.07) 246			
3		326,155(6.87) 6			72(0.02) 8,600
4		80,814(1.70) 581	11,902(0.30) 157		36,910(8.61) 9,627
5	10,575(0.22) 174	6,028(0.13) 1,128			9,341(2.18) 306,897
6	4,736,858(99.62) 208		3,967,833(99.69) 203		
7		144,418(3.04) 1			
8		60(0.00) 4		968(0.18) 2,020	22,896(5.34) 9,326
9					7,273(1.70) 54
10			9(0.00) 6,309		
11		20,827(0.44) 5			
12		32,488(0.68) 1,011			9(0.00) 180

18 ■ 환경정책 제32권 제4호



* 1. 1차 금속, 2. 가구, 3. 고무 및 플라스틱제품, 4. 금속 가공제품, 5. 기타 기계 및 장비, 6. 기타 운송 장비, 7. 기타 제품, 8. 비금속 광물제품, 9. 섬유제품, 10. 수도업, 11. 식료품, 12. 의료용 물질 및 의약품, 13. 인쇄 및 기록매체 복제업, 14. 자동차 및 트레일러, 15. 전기, 가스, 증기 및 공기 조절 공급업, 16. 전기장비, 17. 전자 부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비, 18. 창고 및 운송관련 서비스업, 19. 코크스, 연탄 및 석유정제품, 20. 펄프, 종이 및 종이제품, 21. 폐기물 수집, 운반, 처리 및 원료 재생업, 22. 화학 물질 및 화학제품

** : RSEI 유해기반지수/화학물질 배출량

IV. 결론

본 연구에서는 PRTR자료를 활용하여 전국 시군구의 화학물질 배출량과 유해기반지수를 산정하였으며, 화학물질배출시설에서 배출되는 화학물질 배출량과 유해기반지수의 공간적 패턴을 파악한 결과, 화학물질 배출량과 유해기반지수의 공간적 패턴이 상이하게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 화학물질 배출량과 유해기반지수가 시공간적으로 집중적으로 발생하는 핫스팟 지역을 탐색한 결과, 화학물질 배출량과 유해기반지수의 핫스팟 지역

이 다르게 탐색되었고, 배출량과 유해기반지수에 기여하는 화학물질 종류와 업종에서도 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이를 통하여 화학물질 배출량과 유해기반지수의 특성을 고려한 화학물질 관리 방안 마련 필요성을 제시하였다.

또한, RSEI 유해기반지수는 정량적인 지표뿐만 아니라 지역의 환경특성이나 인체 건강영향을 관리하는데 활용될 수 있다. 독성물질의 배출량만을 보고하면 물질의 잠재적 독성 위험이 과소 평가될 가능성이 있으며(Amanda et al., 2022) 화학물질 배출량에 대한 양적인 측면에서의 관리뿐만 아니라 인체 위해성을 고려한 질적인 관리를 위하여 지역 차원에서 RSEI 유해기반지수가 활용될 수 있다.

PRTR 제도의 주요 목적은 국민의 건강과 환경을 보호하기 위한 것으로 배출량에 대한 정보뿐만 아니라 인체 위해성을 고려한 정보의 제공도 필요하다. 현재 국내의 화학물질배출시설의 규제 준수 정도를 파악하는데 사용되는 정량적인 지표는 화학물질 배출량에 대한 것이다. 화학물질 배출량은 건강영향에 대한 직간접적인 영향을 설명하지 못한다. 따라서 인체 건강에 대한 영향을 기반으로 하는 화학물질이나 업종의 우선순위를 지정할 수 있는 포괄적인 지표가 필요하며, 배출량과 더불어 인체 건강영향의 정도를 수치화한 독성가중치를 적용한 RSEI 유해기반지수가 정량적인 지표로 활용될 수 있다.

화학물질 배출량과 유해기반지수는 지역적 차이가 크게 나타나며 특정 물질에 따라 유해성이 높을 수 있으며 양적인 측면에서 화학물질 배출량에 대한 공간적 우선순위를 파악하는 것뿐만 아니라 인체 위해성을 고려한 유해기반지수에 대한 공간적 우선순위를 파악하고 이들 지역에 대한 화학물질의 특성과 업종 특성을 파악함으로써 우선 관리대상에 선정하여 효율적인 화학물질 관리 방향을 제시할 수 있을 것이다.

건강 영향을 고려한 유해수준을 파악하여 지역별 우선관리 화학물질을 선정하는데 본 연구의 결과가 활용될 수 있다. RSEI 유해기반지수 핫스팟 지역인 충청남도 F지역에서 화학물질 배출량과 유해기반지수의 화학물질 구성

에 차이가 나타났다. F의 경우 화학물질 배출량은 일산화탄소(25.42%), 암모니아(18.00%), 알루미늄(15.64%) 순으로 비중을 차지하였으며, RSEI 유해기반지수에 대한 화학물질 비율은 크롬 및 그 화합물이 95% 이상을 차지하였다. 크롬은 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 인체에 암을 일으키는 물질인 Group 1에 해당하는 화학물질로 독성가중치도 43,000,000로 매우 높다. Collins의 2011년 연구에서는 다양한 화학물질이 건강영향을 미치기 보다는 인체 위해성이 높은 화학물질이 건강위험에 기여한다고 제시하였다.

본 연구에서 도출한 RSEI 유해기반지수 또한 다양한 화학물질보다는 크롬, 카드뮴 등 적은 수의 화학물질로부터 영향을 받고 있으며 이들 물질에 대한 집중적인 관리가 환경질과 건강 피해 예방을 위하여 필요하다.

화학물질 관리에 있어 대상물질뿐만 아니라 지역별 특성에 맞는 우선관리 대상 업종을 선정하여 관리하는데 활용될 수 있다. 화학물질별 특성뿐만 아니라 업종별 기여도에서도 핫스팟 지역별로 차이가 나타났다. 화학물질 배출량의 핫스팟 지역의 경우 배출량 기여도가 가장 높은 업종은 기타 운송장비 제조업으로, 화학물질안전원이 2020년에 발간한 보고서에 따르면 2018년 기타 운송장비 제조업이 전체 배출량의 21.5%를 차지하여 가장 많은 배출량 업종으로 나타났다. 기타 운송장비 제조업의 배출량이 90% 이상인 A와 C지역의 경우 대형조선소가 위치하고 있으며, A지역의 경우 2016~2018년 수주가 올라가면서(중소벤처기업진흥공단 융합금융처, 2019) 그에 따른 연쇄적 조건으로 사용하는 관련 화학물질 배출량도 증가하였으나, C지역의 경우 사업성 악화로 인하여 관련 화학물질 배출량이 감소하는 경향을 보인 것으로 파악된다. 업종별 화학물질기여도는 경제상황과 비례관계에 놓일 경우가 많으며 독성물질 배출의 불균형은 예외적인 부분이 아닌 오염발생의 기본 패턴으로 나타난다(Collins, Munoz, and Jaja, 2020). 화학물질 분야에서는 일부 업종에서 독성이 높은 물질 배출의 많은 부분을 차지하며 이러한 특수성을 고려하여 지역 상황에 맞는 관리방안을 마련하고 오염물질을 감소시킬 전략을 마련하여야 한다.

본 연구에서 전국 시군구를 대상으로 화학물질 배출량과 유해기반지수의 지역적 특성을 파악하고 전반적인 화학물질 관리 전략에서 RSEI의 필요성을 제시하였으나 몇 가지 제한점이 있다. 첫째, RSEI의 방법론은 최악의 상황(worst case scenario)를 가정한 단순 모델링으로 1차적인 모니터링이나 정책도출을 위한 우선순위 선정 수준에서 활용성이 높으나 추가 화학물질 관리 정책을 도출하기 위해서는 검증이 필요하다. 둘째, 독성가중치에 따라 산정되는 유해기반지수는 일부 물질에 대하여 과대 추정될 수 있어 RSEI를 활용하여 화학물질의 우선 관리 전략을 마련하게 된다면 일부 물질에 대한 추가 검토가 필요한 한계점을 가지고 있다. 향후에 화학물질과 업종의 지역별 상세한 특성을 고려한 RSEI의 결과 해석이 이루어 질 수 있을 것이다.

환경오염으로 과부하된 지역사회에서 환경의 질과 건강피해를 예방할 수 있는 방법으로 타겟팅 된 오염물질의 관리나 핫스팟 지역에 대한 관리는 재원과 인력을 효율적으로 활용할 수 있는 방법 중 하나이다. 향후에 RSEI 유해기반지수를 지표로 이용하여 화학물질의 모니터링 강화 연구나 지표를 활용한 지역, 매체, 화학물질의 건강영향을 평가한 연구가 지속적으로 이루어진다면 화학물질배출이동량조사의 목적인 인간의 건강과 지역의 환경 향상에 기여할 수 있을 것이다.

■ 참고문헌 ■

- 강호제, 2007, “시공간분석기법: 시공간분석의 변화와 응용,” 『국토』, 309, pp.104-111.
- 길혜민·박혁서·박지윤, 2015, “GIS 기반 커널밀도함수분석과 LISA 분석을 활용한 요양병원 입지선정요인분석: 수도권 지역의 수요·공급요인을 중심으로: 수도권의 수요·공급요인을 중심으로,” 『주거환경』, 13(4), pp.283-299.
- 김시진·임유라·배현주, 2021, “화학물질 배출·이동량 자료를 이용한 유해기반 지수의 시공간 특성 연구,” 『한국환경보건학회지』, 47(2), pp.144-154.
- 손학기·박기호(2008), “부동산 가격변동 핫스팟 탐색을 위한 공간통계기법,” 『대한지리학회지』, 43(3), pp.392-411.
- 유상욱·배현희(A), 2015, “2004-2012년 지역별 유해화학물질 배출량 및 인체유해성 추이 분석,” 『환경정책』, 23(1), pp.21-41.

- 유상욱·배현희(B), 2015, “환경정보공개정책에 대한 기업의 전략적 행동-유해화학물질 배출량 정보공개를 중심으로,” 『한국정책학회보』, 24(3), pp.95-121.
- 이승훈·반영운·백종인·고정근·심수은, 2018, “환경정의 관점에서 본 지방정부 화학물질 배출의 사회 경제적 특성 비교 분석,” 『Crisisonomy』, 14(9), pp.133-144.
- 임지영·김현지·김민선·이지호·이상목·이청수, 2018, “2006~2015년 동안 국내 유해화학물질 배출량 변화에 관한 연구,” 『한국환경보건학회지』, 44(1), pp.15-23.
- 이희연, 2005, “인터넷 산업의 입지적 특성과 공간적 집적화,” 『국토계획』, 40(2), pp.33-51.
- 이희연·심재현, 2011, 『GIS 지리정보학 이론과 실습』, 서울: 법문사.
- 중소벤처기업진흥공단 융합금융처, 『2019, KOSME 산업분석 리포트 - 조선산업-』, (2019-7), 중소기업진흥공단.
- 화학물질안전원, 2022, 『2020년도 화학물질 배출량 조사결과』, 화학물질안전원.
- Abel, T., Stephan, M. and Kraft, M., 2007, “Environmental information disclosure and risk reduction among the states,” *State and Local Government Review*, 39(3), pp.153-165.
- Amanda, T., Charette, D.T., Hill, M.B. Collins, and J.E. Mirowsky, 2022, “Assessing the quantity and toxicity of chemical releases from TRI facilities in Upstate New York,” *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 12, pp.417-429.
- Ash, M. and Boyce, J.K., 2018, “Racial disparities in pollution exposure and employment at US industrial facilities,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(42), pp.10636-10641.
- Aturinde, A. and Mansourian, A., 2022, “Space-Time Surveillance of COVID-19 Seasonal Clusters: A Case of Sweden,” *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(5), 307 <https://doi.org/10.3390/ijgi11050307>
- California Office of Environmental Health Hazard Assessment, 2021, *CalEnviroScreen 4.0 Report*. <https://oehha.ca.gov/calenviroscreen/report/calenviroscreen-40>
- Collins, M., 2011, “Risk-based targeting: identifying disproportionalities in the sources and effects of industrial pollution,” *American Journal of Public Health*, 101(S1), pp.S231-S237.
- Collins, M., Munoz, I. and JaJa J., 2016, “Linking ‘toxic outliers’ to environmental justice communities,” *Environmental Research Letters*, 11(1), 015004, doi:10.1088/1748-9326/11/1/015004.
- Collins, M., Pulver, S., Hill, D. and Manski, B., 2020, “Characterizing disproportionality in facility-level toxic releases in US manufacturing, 1998-2012,” *Environmental Research Letters*, 15(6), 10.1088/1748-9326/ab7393

- Kulldorff, M., Huang, L. and Konty, K., 2009, "A scan statistic for continuous data based on the normal probability model," *International Journal of Health Geographics*, 8(58), doi:10.1186/1476-072X-8-58
- Kulldorff M., 2018, SaTScan User Guide v9.6.
- US EPA, 2019, *EPA's risk-screening environmental indicators(RSEI) methodology, Version 2.3.8*, Washington, DC
- Yoon, D.K., Kang, J.E. and Park, J.Y., 2017, "Exploring Environmental Inequity in South Korea: An Analysis of the Distribution of Toxic Release Inventory (TRI) Facilities and Toxic Releases," *Sustainability*, 9(10), 1886, <https://doi.org/10.3390/su9101886>
- Zhou, X. and Schoenung, J., 2009, "Combining U.S.-based prioritization tools to improve screening level accountability for environmental impact: The case of the chemical manufacturing industry," *Journal of Hazardous Materials*, (172), pp.423-431.

임유라: 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부에서 생태조경학 석사학위를 취득하고 현재 인하대학교 의과학연구소에 재직 중이다. 지역 단위의 환경보건과 관련된 통합정보 구축, 환경보건통합평가 등에 관한 연구를 수행하고 있다(yrlim326@gmail.com).

배현주: 서울대학교 보건대학원에서 환경보건학 박사학위를 취득하고 현재 한국환경연구원 환경보건연구실에 재직 중이다. 환경유해인자의 건강영향 평가, 환경보건 감시체계 구축 등에 관한 연구를 수행하고 있다(hjbae@kei.re.kr).

투 고 일: 2024년 11월 07일
 심 사 일: 2024년 11월 20일
 게재확정일: 2024년 12월 06일