

Technical Article

환경영향평가서 내 건강영향평가의 누적위해성평가 방법론적 개선

– 과거 10년 국내 산업단지 개발 사례를 중심으로 –

김은채 · 하종식

한국환경연구원

Methodological Improvement of the Cumulative Risk Assessment of Health Impact Assessment in Environmental Impact Assessment

– Focused on the Industrial Complex Development Projects in the Last Decade –

Eunchae Kim · Jongsik Ha

Korea Environment Institute

요약: 현행 환경영향평가 내 건강영향평가는 단일 물질별 기준초과 여부를 평가하고 적정 저감방안을 수립하도록 시행된다. 이에 따라 일부 개발 대상사업의 경우, 위해성평가의 모든 물질이 기준을 만족하지만 노출농도가 기준에 매우 근사한 경우가 존재한다. 하지만 여기서 모든 물질들의 동시 노출을 고려한다면 건강영향은 단일 물질별 관리보다 상당히 크게 발생할 여지가 있다. 실제로 수용체에 노출되는 건강영향을 파악하기 위해 배출물질의 통합평가 방법론의 구체화 및 개선방안 마련이 필요하다.

본 논문은 해외 선진사례 및 국내의 문헌고찰을 통해 누적위해성평가 및 위해성의 통합기법에 대한 개념을 정의하고, 산업단지 개발 시 다물질에 대한 건강영향을 고려한 누적위해성평가 활용을 위한 방법론을 제안하였다. 제안된 방법론을 통해 산업단지에 배출되는 유해중금속 4종(Ni, Cr⁶⁺, Cd, As)에 대한 통합지표를 산출하였으며, 과거 10년(2011~2020년) 간 수행된 산업단지 개발사업에 대한 사례적용을 통해 활용성을 확보하였다.

주요어: 환경영향평가, 건강영향 항목, 위생·공중보건 항목, 누적위해성평가, 방법론적 개선

Abstract: Health impact assessment in the environmental impact assessment is conducted to determine whether to exceed the standard of each single substance and to establish appropriate reduction measures. In some development projects, although all substances in risk assessment meet the standard, exposure concentration is very close to it. However, considering the cumulative exposure of all substances, health effects are likely to occur considerably severer than those of individual substances, so it is necessary to prepare a concrete and improved methodology for integrating evaluation of emissions to identify the health effects actually exposed to receptors of living things.

First Author: Eunchae Kim, Tel: +82-44-415-7431, E-mail: eckim@kei.re.kr, ORCID: 0000-0003-1137-7316

Corresponding Author: Jongsik Ha, Tel: +82-44-415-7754, E-mail: jsha@kei.re.kr, ORCID: 0000-0001-9473-5603

Received: 29 September, 2021. Revised: 15 November, 2021. Accepted: 16 November, 2021.

This study established the definition of cumulative risk assessment through overseas advanced cases and domestic and foreign literature reviews, and proposed a methodology for utilizing cumulative risk assessment considering health effects on multiple substances when developing industrial complexes. Applied by the proposed methodology, integrated indicators for four types of hazardous heavy metals (Ni, Cr⁶⁺, Cd, As) emitted from industrial complexes were calculated, and applicability was tested with case of the industrial complex development projects conducted over the last decade (2011-2020).

Keywords: Environmental impact assessment, Health impact items, Hygiene and public health, Cumulative risk assessment, Methodological improvement

I. 서론

환경영향평가(Environmental Impact Assessment) 내에서 건강영향에 대한 평가는 개발사업(산업단지, 화력발전소, 폐기물처리시설 등)으로 인한 건강영향 야기 가능성을 고려하여 「환경보전법」 제13조(건강영향 항목의 추가·평가 등)에 근거하여 2010년부터 시행되어왔다. 이와 관련하여 「환경보전법 시행령」 제12조(건강영향 항목의 추가·평가 대상) 및 제13조(건강영향 항목의 검토 등)에 따라 건강영향평가 대상사업은 환경영향평가 수행 시 한국환경연구원 등 건강영향평가 관련 전문기관의 검토를 통해 잠재적인 건강 악영향이 예상될 경우에 저감방안을 수립하도록 요구되고 있다. 배출물질에의 노출 관련 영향예측은 사업별 물질별 배출량을 산정·예측하고, 이를 확산모델 등을 통해 노출농도를 산정한다. 산정된 단일물질별 기준초과 여부를 평가하고 환경에 악영향을 미치는 항목에 대해서는 적정 저감방안을 마련한 후 해당 개발사업을 시행토록 하고 있다(Ministry of Environment 2011).

하지만 일부 개발 대상사업의 경우에 위해성평가 결과, 저감방안 수립기준을 만족하지만 모든 물질의 위해도 값이 1×10^{-5} 에 근접하는 경우가 존재한다. 이러한 경우 별다른 저감방안 수립 없이 개발사업이 협의되어 진행되는 경우가 있다. 개별 오염물질에 대한 위해성평가의 경우, 위해도(risk)라는 단일 지표를 활용함으로써 동일한 기준 하에 쉽게 적용 가능한 정량적 평가라는 장점이 있으나, 건강영향평가의 대상사업 특성, 수행 목적 등에 따른 실효성 있는 평가

결과를 도출하는데 한계가 있다. 이에 기존의 평가 대상물질에 대한 개별적인 위해성평가와 더불어 다수 오염물질에 대한 누적노출 및 영향을 고려하여, 평가 및 저감방안을 마련할 수 있도록 개선할 필요가 있다. 특히 전체 건강영향평가 대상사업의 약 70%를 차지하는 산업단지 개발사업의 저감방안으로 임계가 중배출량을 산정·관리하도록 하는데(Ministry of Environment 2021a), 영향예측에서 기준을 초과하는 물질들의 위해도 기준 1×10^{-5} 등을 만족하는 배출량 관리계획을 마련한다. 하지만 여기에서 모든 물질들의 동시 노출을 고려한다면 건강영향은 단일 물질별 관리보다 상당히 크게 발생할 여지가 있다.

단일 물질별로 위해성평가를 수행할 경우, 개별 물질에 대해 독립적인 용량-반응 평가 및 노출평가를 실시하기 때문에 물질 간의 상호작용(interaction)을 고려할 수 없다. 그러나 현실은 다양한 유해화학물질에 동시다발적으로 노출되므로 이러한 실질적 위해(risk)를 추정하기 위해서는 상호작용을 고려한 누적위해성평가(cumulative risk assessment) 기술 개발이 필요하다. 미국 환경청(US Environmental Protection Agency; US EPA)은 배출사업장의 다양한 유해오염물질의 위해도를 통합·평가하기 위해 독성가중치(toxicity weight)를 활용한 지표(Risk-Screening Environmental Indicator; RSEI)를 개발하여 사용하고 있다(Environmental Protection Agency 2019). 우리나라에서도 각 개발사업별 건강영향평가를 수행할 때, 단순히 물질의 종류 및 양, 그리고 독성참고치(Reference Concentration; RfC)만을 고려하는 것보다는 독성가중치를 활용한 위해성을

고려할 필요가 있다.

본 논문은 산업단지 개발 시 다(multi)물질에 대한 건강영향을 고려하기 위해 누적위해성평가 방법론을 제시하고, 해당 방법론에 대한 적용성을 검증하고자 하였다. 이를 위해 현행 건강영향평가의 수행 특성을 반영한 누적위해성평가 지표를 개발하고, 실제 과거 10년간 수행된 산업단지 개발사업의 건강영향평가의 사례적용을 통해 향후 적정하게 활용할 수 있는 방안을 제안하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 문헌조사를 통한 개념정의

1) 누적위해성평가의 용어

국내에서는 누적노출 및 위해성에 대해 합의된 개념이 없어, 이를 정의하기 위한 다수의 연구(Korea Environment Institute 2018, Korea Food & Drug Administration 2012)가 진행되고 있으나 여전히 통합노출, 복합노출 등 유사 개념의 용어가 혼용되어 사용되고 있다. 본 논문의 목적인 환경영향평가서 내 건강영향평가의 누적위해성평가를 수행하기 위해서는 우선 누적위해성평가의 개념 및 범위를 명확히 해야 한다. 이에 국내외 문헌조사를 통해 US EPA, 세계보건기구(World Health Organization; WHO) 등의 국외 위해성평가 체계를 조사하여 최신 동향을 파악하고, 누적위해성평가의 용어를 정의하였다.

2) 위해성의 통합기법

다물질의 위해성평가 연구는 US EPA와 유럽연합

(European Union; EU)을 중심으로 주도되고 있으며, WHO, 국제화학물질 안전성계획(International Programme on Chemical Safety; IPCS) 등에서도 시도되고 있다. 일반적인 접근은 다물질의 독립적인 독성 발현을 가정한 용량 가성성(dose additive) 기법들을 주로 적용하나, 독성물질 질병 등록청(Agency for Toxic Substances and Disease Registry; ATSDR)은 다물질의 상호작용 및 독성가중치를 고려한 위해성평가 기법을 제안한 바 있다(ATSDR 2018). 이와 같은 해외 선진사례 및 관련 문헌 고찰을 통해 다물질의 위해성 통합기법을 살펴보고, 이를 바탕으로 건강영향평가의 수행 특성을 고려한 다물질의 통합지표 개발을 위한 방법론을 제안하고자 하였다.

2. 사례적용을 통한 적용성 확보

1) 과거 건강영향평가 대상사업에의 적용

현행 건강영향평가는 산업단지의 개발사업 중 면적이 15만m² 이상인 국가산업단지 및 일반산업단지를 대상으로 매년 약 30여 건 수행되고 있다(Korea Environment Institute 2017). 본 논문에서는 기존에 수행된 개발사업에 대한 위해성평가 결과와 통합지표를 활용한 누적위해성평가를 비교분석 하였다. 이에 과거 10년(2011~2020년) 간 수행된 산업단지 개발사업을 조사하였다(Table 1). 본 논문에서 활용된 각각의 국가산업단지 개발계획 관련 정보는 환경영향평가정보지원시스템(www.eiass.go.kr)에서 공개되는 환경영향평가서 본안 내용을 바탕으로 위생·공중보건 항목 내 예측농도가 가장 높은 지점의 농도 값을 사용하였다.

Table 1. Status of the health impact assessment in the last decade (2011~2020)

| Classification | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | Total |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Industrial complex | 34 | 39 | 32 | 33 | 21 | 33 | 23 | 18 | 18 | 30 | 281 |
| Thermal power plant | 14 | 11 | 11 | 14 | 7 | 5 | 5 | 4 | 4 | 10 | 85 |
| Waste disposal facility | 3 | 4 | 3 | 0 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 1 | 24 |
| Incineration facility | 1 | 2 | 1 | 0 | 2 | 2 | 0 | 1 | 3 | 1 | 13 |
| Landfill | 2 | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 11 |
| Livestock night soil treatment facility | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 | 2 | 3 | 0 | 1 | 0 | 10 |
| Total | 51 | 54 | 47 | 50 | 31 | 43 | 33 | 24 | 26 | 41 | 400 |

2) 통합지표의 기준 제시

위해성평가를 수행하여 예측된 위해도의 사전 예방적 관리 필요 여부를 판단하기 위해서는 위해성 판단 기준이 필요하다. 일반적으로 위해수준은 최소위해수준(De Minimis Risk)과 견딜 수 있는 위해수준(tolerable risk)에 대한 합의 혹은 위해성이 낮아 그 수준을 무시해도 될 정도의 위해수준(negligible risk)으로 받아들여지고 있다(Cohrssen and Covello 1989). 그러나 불가피한 경우, 이러한 위험을 허용할 수밖에 없는 상황에서는 위해성과 경제성을 고려하여 정치적 개입에 의한 목표수준을 설정한 허용위해도(acceptable risk)를 받아들이고 있다(Fischhoff et al. 1981). 따라서 과거 개발사업의 저감방안 수립 정도 등에 의한 허용위해도를 고려하여 전문가적 판단에 근거한 일반 대중이 허용할 수 있다고 용인되는 사회적 합의 수준에서의 통합지표 기준을 제안하였다.

3) 통합지표 활용결과 분석

본 논문에서 제안한 통합지표의 기준을 적용하여 저감방안 수립이 필요한 사업과 기존 평가 방법으로의 저감방안 수립이 필요한 사업을 비교·분석하였다. 기존에 개별 물질별 평가에서 저감방안의 수립이 요구되지 않았으나 통합지표로 평가 시 저감방안의 수립이 요구되는 사업들을 정리하여 물질별 평가결과를 확인하고 기존 개별 물질별 평가에서의 한계점 및 문제점을 도출해보고자 하였다. 반대로 기존 개별 물질별 평가에서는 저감방안 수립을 요구했으나 통합지표 평가에서는 저감방안 수립을 요구하지 않는 사업들에 대한 분석을 통해서 통합지표를 통한 평가에서 나타날 수 있는 문제점도 확인하고자 하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 개념정의

1) 누적위해성평가

누적위해성평가를 정의하기에 앞서 누적노출과 누적위해성에 대한 개념 정의가 이루어져야 한다. 일반적으로 '누적'의 사전적 의미는 '포개어 여러 번 쌓음'

으로 노출과 위해성의 관점에서 보았을 때 노출물질의 누적, 노출시간의 누적, 노출경로의 누적으로 해석할 수 있다. 이와 같이 누적노출과 누적위해성에 대한 관점이 다양하기 때문에 누적노출과 누적위해성의 개념과 범위 또한 다양하게 정의된다.

WHO/IPCS에서는 단일물질에 대한 모든 경로를 통한 인구통계학적·공간적·시간적 노출을 단일물질의 합계노출(Aggregate exposure)로 정의하고, 두 개 이상의 물질에 대한 노출의 합을 누적노출(Cumulative exposure)로 정의한다(World Health Organization 2009). 비슷한 맥락으로 US EPA의 경우 노출물질 수에 따라 단일물질에 대한 두 개 이상의 경로를 통한 노출의 합을 단일물질의 합계노출(Aggregate exposure)로 정의하고, 두 개 이상의 물질에 대한 두 개 이상의 경로를 통한 노출의 합을 누적노출(Cumulative exposure)로 정의하고 있다(Environmental Protection Agency 2003). 한편 우리나라 식품의약품안전처는 누적노출을 한 생물체에 대해 단일물질이 체내로 들어오는 노출량의 합으로 정의하고 있다(Ministry of Food and Drug Safety 2011). 정리해보면, 국내에서는 누적노출을 단일물질에 대한 노출의 합(Cumulative exposure)으로 정의하는 반면 WHO/IPCS와 EPA는 이를 단일물질의 합계노출(Aggregate exposure)과 두 개 이상의 물질에 대한 노출의 합을 누적노출(Cumulative exposure)로 구분하여 정의하고 있다.

본 논문에서는 다양한 유해오염물질의 대기배출량을 평가하기 위해 두 개 이상의 다물질에 대한 단일경로를 통한 노출의 합을 누적노출로 정의하고, 노출경로의 경우 호흡(inhalation)을 통한 노출만 고려하였다. 대기는 유해물질이 환경으로 유입되는 일차 관문일 뿐만 아니라 공기를 통한 호흡이 인체의 노출경로에서 가장 큰 부분을 차지하고 있기 때문에 상대적으로 다른 매체보다 중요하게 취급하였다.

2) 위해성의 통합

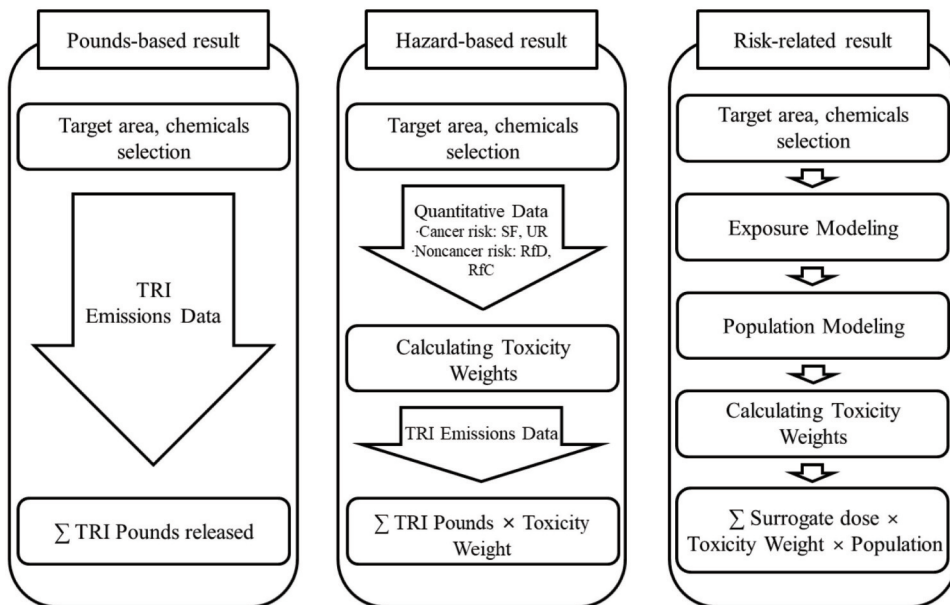
위해성의 통합을 위한 다물질의 독성평가 방법의 연구는 1920년대부터 행해져 1926년에는 혼합독성이란 개념이 제시되었으며, ATSDR, US EPA 등을

중심으로 다물질에 대한 유해성, 위해성평가 지침서가 발행되었다(Agency for Toxic Substances and Disease Registry 2004; Environmental Protection Agency 1986). 가장 보편적인 방법으로, 여러 구성 물질이 서로 다른 독성 작용기전으로 독립적으로 작용함을 가정하고 화학물질의 위해도를 합산하는 방법이다. 비발암성 물질의 경우, 개별 물질의 위해도 지수(Hazard Quotient; HQ) 값을 합산하여 총 위해도 지수(Hazard Index; HI)가 1을 초과할 경우 위해성평가 대상 집단에 대한 잠재적 위해(potential risk)가 있는 상태로 판단한다. 발암성 물질의 경우, 개별 물질의 발암위해도(cancer Risk) 값을 합산한 총 발암위해도(total cancer risk)를 산출한다(Environmental Protection Agency 2000).

장점으로는 단순히 용량을 더하는 단순성으로 같은 기전에 의해 같은 효과를 일으키는 구성성분들의 평가에 가장 적절하게 적용된다. 하지만 이러한 방법은 누적되는 물질의 수가 많을수록 전체 위해도 값이 커지므로 과보호(overprotection) 우려가 있기 때문에 끝점(endpoint)이 동일한 물질들끼리 분리하여 평가할 필요가 있다. 또한 개별 물질들 사이의 상호작용이 확인되지 않은 경우에는 적용하지 못한다는 단점이 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해 미국 정부는 화학물질 배출량 자료(Toxic Release Inventory; TRI)를 이용하여 환경과 인체 영향의 변화 추이를 나타내는 지표를 개발하였다. 이에 US EPA에서 TRI를 이용하여 배출량 기반(pounds-based), 유해 기반(hazard-based), 위해 기반(risk-related) 관점에 기초하여 산업체 배출에 따른 잠재적 인체 영향을 평가하는 RSEI를 개발하였다(Figure 1). RSEI는 특정 지역의 다매체별 노출 모델링을 적용하기 위해 개발된 기법으로, 위해도 산정 시 독성가중치(toxicity weight)에 근거한 개별 물질이 가지는 독성에 상대적 가중치를 부여하여 우선순위를 산정할 수 있는 특징이 있다(Environmental Protection Agency 2019).

RSEI 독성가중치는 물질의 독성에 비례하도록 설계되었는데, 각 물질의 가중치를 할당하기 위해 몇 가지 다른 알고리즘을 사용한다(Environmental Protection Agency 2019). 발암물질에 대한 독성가중치는 식 (1)과 같이 각 물질의 호흡단위위해도(Inhalation Unit Risk; IUR)에 상수 2.8×10^{-7} 을 나



Source: EPA's Risk-Screening Environmental Indicators (RSEI) Methodology (EPA, 2019)를 바탕으로 저자 작성.

Figure 1. Description of Risk-Screening Environmental Indicators results

Table 2. Chemical list regulated by the Environmental Impact Assessment and Si-Gun-Gu Environmental Plan Guideline

| No. | Classification | Health Impact Assessment | | | | | | | | | | Si-Gun-Gu Environmental Plan Guideline | Inhalation Unit Risk/ Reference Concentration (mg/m ³) | Toxicity Weight | Subject |
|-----|--|--------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|---|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|--|--|-----------------|---------|
| | | Industrial complex | | Thermal power plant | Incineration facility | Landfill | Livestock night soil treatment facility | General | | Petroleum refinery | | | | | |
| 1 | Gaseous pollutants (VOCs, PAHs, etc.) | Benzene | Benzene | Benzene | Benzene | Benzene | Benzene | Benzene | Benzene | Benzene | Benzene | | 0.0078 | 28,000 | |
| 2 | | Formaldehyde | Formaldehyde | Formaldehyde | Formaldehyde | Formaldehyde | Formaldehyde | Formaldehyde | Formaldehyde | Formaldehyde | Formaldehyde | | 0.013 | 46,000 | |
| 3 | | | Toluene | Toluene | | Toluene | | Toluene | | Toluene | | | 5 | 0.7 | |
| 4 | | | m-Xylene | Xylene | | Xylene | | Xylene | | Xylene | | | 0.1 | 35 | |
| 5 | | | Ethylbenzene | Ethylbenzene | Ethylbenzene | Ethylbenzene | Ethylbenzene | Ethylbenzene | Ethylbenzene | Ethylbenzene | Ethylbenzene | | 0.0025 | 890 | |
| 6 | | | | Chloroform | Chloroform | Chloroform | Chloroform | Chloroform | Chloroform | Chloroform | Chloroform | | 0.023 | 82,000 | |
| 7 | | | | | | 1,2-Dichloroethane | | 1,2-Dichloroethane | | 1,2-Dichloroethane | | | 0.026 | 93,000 | |
| 8 | | | | | | Trichloroethylene | | Trichloroethylene | | Trichloroethylene | | | 0.0041 | 15,000 | |
| 9 | | | | | | Carbontetrachloride | | Carbontetrachloride | | Carbontetrachloride | | | 0.006 | 21,000 | |
| 10 | | | | n-Hexane | | | | | | | | | 0.7 | 5 | |
| 11 | Particulate pollutants (PM, Heavy metal, etc.) | | Acetaldehyde | Acetaldehyde | Acetaldehyde | Acetaldehyde | Acetaldehyde | Acetaldehyde | Acetaldehyde | Acetaldehyde | Acetaldehyde | | 0.0022 | 7,900 | |
| 12 | | | Cyclohexane | | | | | | | | | | 6 | 0.58 | |
| 13 | | | Vinyl chloride | | | | | | Vinyl chloride | | | | 0.0088 | 31,000 | |
| 14 | | | Styrene | | Styrene | Styrene | Styrene | Styrene | Styrene | Styrene | Styrene | | 1 | 3.5 | |
| 15 | | | Ammonia | | | | | | Ammonia | Ammonia | Ammonia | | 0.5 | 7 | |
| 16 | | | Hydrogen sulfide | Hydrogen sulfide | Hydrogen sulfide | Hydrogen sulfide | Hydrogen sulfide | Hydrogen sulfide | Hydrogen sulfide | Hydrogen sulfide | Hydrogen sulfide | | 0.002 | 1,800 | |
| 17 | | | Hydrogen chloride | Hydrogen chloride | Hydrogen chloride | Hydrogen chloride | Hydrogen chloride | Hydrogen chloride | Hydrogen chloride | Hydrogen chloride | Hydrogen chloride | | 0.02 | 180 | |
| 18 | | | Hydrogen cyanide | | | | | | | | | | 0.0008 | 4,400 | |
| 19 | | | | Acrolein | | | | | | | | | 0.00002 | 180,000 | |
| 20 | | | | Dioxin | Dioxin | Dioxin | Dioxin | Dioxin | Dioxin | Dioxin | Dioxin | | - | - | |
| 21 | | | Naphthalene | | | | | | | | | 0.034 | 12,000 | | |
| 22 | | Nickel | Nickel | Nickel | Nickel | Nickel | Nickel | Nickel | Nickel | Nickel | | 0.24 | 860,000 | o | |
| 23 | | Chromium (6+) | Chromium (6+) | Chromium (6+) | Chromium (6+) | Chromium (6+) | Chromium (6+) | Chromium (6+) | Chromium (6+) | Chromium (6+) | Chromium (6+) | 12 | 43,000,000 | o | |
| 24 | | Cadmium | Cadmium | Cadmium | Cadmium | Cadmium | Cadmium | Cadmium | Cadmium | Cadmium | Cadmium | 1.8 | 6,400,000 | o | |
| 25 | | Arsenic | Arsenic | Arsenic | Arsenic | Arsenic | Arsenic | Arsenic | Arsenic | Arsenic | Arsenic | 4.3 | 15,000,000 | o | |
| 26 | | Mercury | Mercury | Mercury | Mercury | Mercury | Mercury | Mercury | Mercury | Mercury | Mercury | 0.0003 | 12,000 | | |
| 27 | | | Manganese | | | | | | | | | 0.0003 | 12,000 | | |
| 28 | | | | Lead | Lead | Lead | Lead | Lead | Lead | Lead | Lead | - | - | | |
| 29 | | | Barium | | | | | | | | | 0.0005 | 7,000 | | |
| 30 | | | Beryllium | Beryllium | Beryllium | Beryllium | Beryllium | Beryllium | Beryllium | Beryllium | Beryllium | 2.4 | 8,600,000 | | |

누어 산출한다. 해당 산출과정은 US EPA의 발암성 분류기준에 따라 A·B 등급의 발암물질에 대해서 적용 가능하며, C 등급에 해당하는 물질의 경우 불확실성계수(uncertainty factor) 10을 나누어 준다. 비발암물질의 경우, 식 (2)와 같이 상수 3.5에 흡입독성참고치(Reference Concentration; RfC)를 나누는 방식으로 산출하였다. 이렇게 산출된 결과는 기존의 위해성평가와는 절차 및 방법에 있어 차이가 있으므로 절대적 의미를 부여하기보다는(특정 기준 초과에 따른 건강영향 여부 판단 등) 각 화학물질의 중요성에 대한 상대적 비교에 그 의미를 두어야 한다.

$$\text{Carcinogen Toxicity Weight} = \frac{IUR(\text{mg}/\text{m}^3)^{-1}}{2.8 \times 10^{-7}} \quad (1)$$

$$\text{Noncarcinogen Toxicity Weight} = \frac{3.5}{RfC(\text{mg}/\text{m}^3)} \quad (2)$$

3) 국내 건강영향평가 현실성을 고려한 통합물질 선정

현행 건강영향평가 대상물질 및 시·군·구 환경계획 수립지침 대상물질에 대한 평가는 단일물질을 기준으로 이루어지고 있는데(Ministry of Environment 2021a; Ministry of Environment 2021b), 이를 통합하여 평가하기 위해서는 단일 영향요인에 대한 정보(single stressor information), 영향요인의 상호작용 및 다중노출에 대한 정보(approaches for predicting risk of multiple stressors), 의사결정 지표(decision indices), 확률론적 접근법(probability approach) 등을 고려하여야 한다(Environmental Protection Agency 2003).

본 논문에서는 현행 건강영향평가 대상물질 및 시·군·구 환경계획 수립지침 대상물질 중, (a)단일 영향요인에 대한 정보가 확인가능하며 (b)다중 영향요인의 노출조건을 통합하는 것이 가능하다고 판단되는 물질과 (c)개발 이후 세부 물질별 저감방안 수립 등을 고려하여 대상물질을 선정하였다. 특히 산업단지의 경우 일반적인 대기환경과 비교하였을 때, 다양한 산업활동으로 인해 입자상물질에 포함된 중금속의 농도가 매우 높은 수준일 수 있다. 일반적으로 산업시설

에서 배출되는 주요 중금속으로 니켈(Ni), 납(Pb), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr) 등이 존재하며 이러한 중금속들은 상대적으로 긴 반감기로 인하여 인체에 축적될 수 있는 유해 중금속으로 인식되고 있다. 본 논문에서는 과거 건강영향평가 대상사업에 대하여 대기 중 입자상물질에 포함된 중금속 4종(Ni, Cr⁶⁺, Cd, As)의 예측농도를 이용해 누적위해성평가를 이용한 통합위해도 지표로 선정하였다.

대상물질의 위해성 통합 평가를 위해 RSEI의 위해기반 관점에서 각 물질의 독성가중치를 고려한 대기 유해물질의 통합지표를 산출하였다. 노출농도는 환경영향평가 본안 위생·공중보건 항목 내 예측지점 중 가장 높은 예측농도 값을 사용하였고, 모든 수용체가 동일하게 노출된다는 가정 하에 인구수를 1로 두어 아래와 같은 과정을 통해 각 개발사업별 통합위해도 값을 산출하였다.

$$\begin{aligned} & \Sigma(\text{노출농도} \times \text{독성가중치} \times \text{인구수}) \\ &= \Sigma(\text{노출농도} \times \text{독성가중치} \times 1) \\ &= (\text{Ni 예측농도} \times 860,000) + (\text{Cr}^{6+} \text{ 예측농도} \times 43,000,000) + (\text{Cd 예측농도} \times 6,400,000) \\ & \quad + (\text{As 예측농도} \times 15,000,000) \end{aligned}$$

2. 사례적용 결과

1) 자료 처리

본 논문에서는 산업단지를 대상으로 유해 중금속 4종에 대한 예상 노출농도를 통해 통합 위해성 지표 값을 산출하였다. 2011년부터 2020년까지 과거 10년간 수행된 환경영향평가 대상 산업단지가 281개, 281개 중 본안에서 대상물질 4종에 대한 예측 농도 확인이 가능한 개발사업이 203개, 203개 중 개별 물질의 발암위해도가 1×10^{-4} 를 초과하는 개발사업 91개, 1×10^{-9} 이하인 개발사업 2개를 제외한 산업단지가 110개였다. 110개 사업에 대하여 통합 위해성 지표 값의 평균 및 표준편차는 각각 116,575 및 141,325으로 나타났으며, 최소값 및 최대값은 각각 17 및 622,516으로 나타났다(Figure 2).

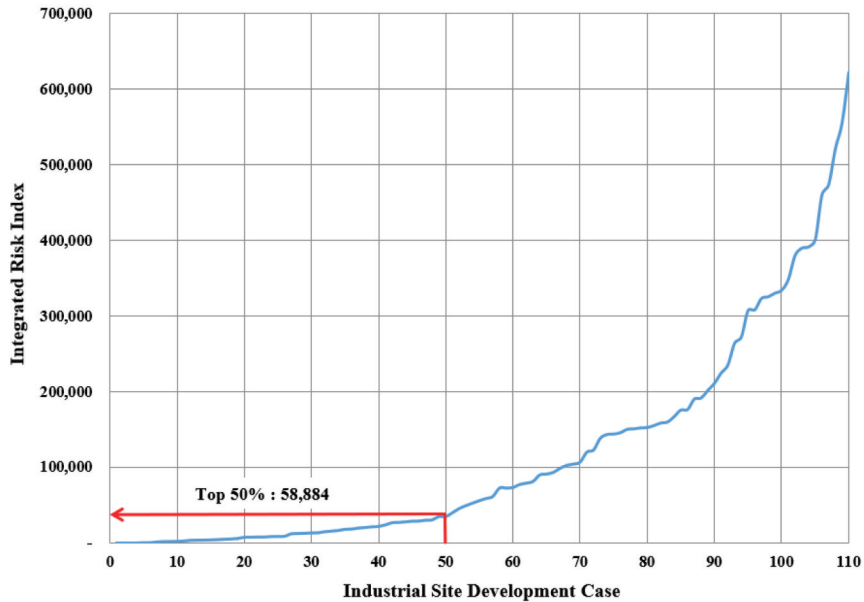


Figure 2. The integrated risk indices of 110 cases

2) 통합지표 적용

누적위해성평가를 이용한 통합지표 적용 전후를 비교하기 위하여 110개 사업의 상위 10%부터 상위 95%까지의 통합지표 값을 산출하고, 대상물질 단일

위해도 초과 비율 및 통합지표 초과 비율을 비교해 보았다(Table 3). 대상 물질별 발암위해도 초과비율은 각각 Ni 25%, Cr⁶⁺ 42%, Cd 13%, As 28%로 나타났다. 통합지표의 기준은 4개 물질을 포함한 결과의 전

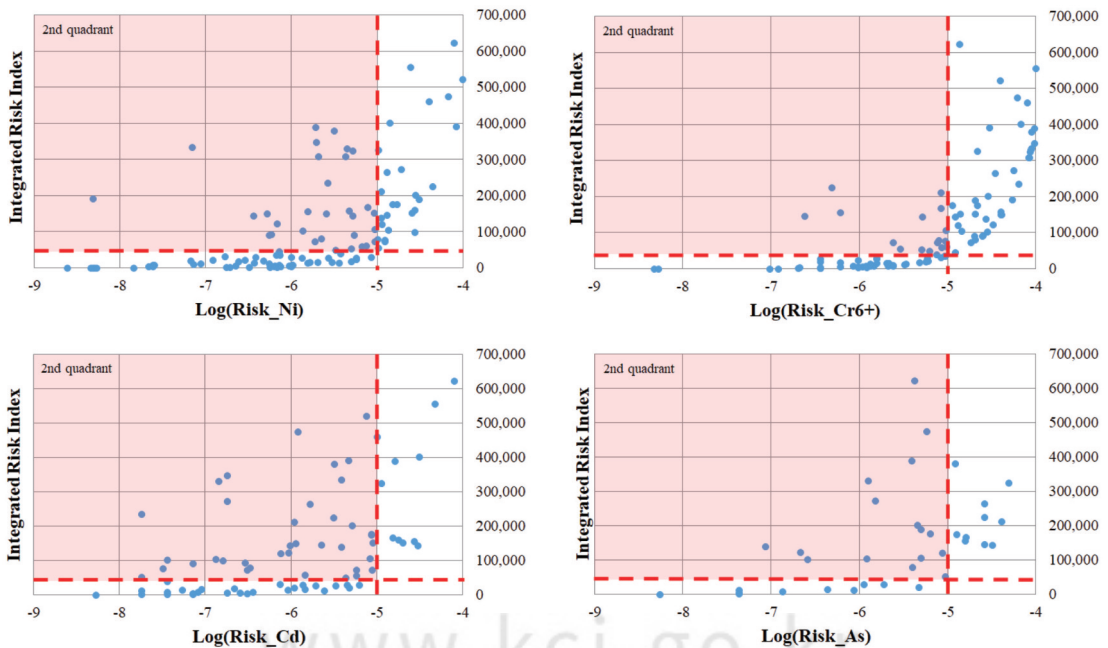


Figure 3. Cases comparison between cancer risk and integrated risk

Table 3. Cross-tabulations of cancer risk and integrated risk in 110 cases of the health impact assessment in the last decade (2011~2020)

| Classification | Nickel (110) | | Chromium (6+)(98) | | Cadmium (77) | | Arsenic (36) | | Total* (110) | | Excess of integrated risk (%) |
|---------------------------|--------------|-------|-------------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|-------------------------------|
| | >10-5 | ≤10-5 | >10-5 | ≤10-5 | >10-5 | ≤10-5 | >10-5 | ≤10-5 | >10-5 | ≤10-5 | |
| Top 10% | >334,295 | 7 | 3 | 10 | 0 | 6 | 1 | 3 | 10 | 0 | 9 |
| | ≤334,295 | 20 | 80 | 31 | 57 | 60 | 9 | 23 | 43 | 57 | |
| Top 20% | >201,650 | 12 | 9 | 19 | 2 | 13 | 5 | 5 | 21 | 0 | 19 |
| | ≤201,650 | 15 | 74 | 22 | 55 | 53 | 5 | 21 | 32 | 57 | |
| Top 30% | >151,033 | 18 | 14 | 27 | 4 | 17 | 8 | 8 | 32 | 0 | 29 |
| | ≤151,033 | 9 | 69 | 14 | 53 | 49 | 2 | 18 | 21 | 57 | |
| Top 40% | >98,788 | 22 | 21 | 35 | 7 | 26 | 10 | 14 | 42 | 1 | 39 |
| | ≤98,788 | 5 | 62 | 6 | 50 | 40 | 0 | 12 | 11 | 56 | |
| Top 50% | >58,884 | 26 | 28 | 40 | 12 | 34 | 10 | 15 | 51 | 3 | 49 |
| | ≤58,884 | 1 | 55 | 1 | 45 | 32 | 0 | 11 | 2 | 54 | |
| Top 55% | >35,054 | 27 | 33 | 41 | 17 | 39 | 10 | 16 | 53 | 7 | 55 |
| | ≤35,054 | 0 | 50 | 0 | 40 | 27 | 0 | 10 | 0 | 50 | |
| Top 60% | >28,823 | 27 | 38 | 41 | 21 | 41 | 10 | 17 | 53 | 12 | 59 |
| | ≤28,823 | 0 | 45 | 0 | 36 | 25 | 0 | 9 | 0 | 45 | |
| Top 65% | >21,372 | 27 | 44 | 41 | 26 | 45 | 10 | 18 | 53 | 18 | 65 |
| | ≤21,372 | 0 | 39 | 0 | 31 | 21 | 0 | 8 | 0 | 39 | |
| Top 70% | >16,506 | 27 | 49 | 41 | 30 | 48 | 10 | 19 | 53 | 23 | 69 |
| | ≤16,506 | 0 | 34 | 0 | 27 | 18 | 0 | 7 | 0 | 34 | |
| Top 75% | >12,586 | 27 | 55 | 41 | 35 | 52 | 10 | 20 | 53 | 29 | 75 |
| | ≤12,586 | 0 | 28 | 0 | 22 | 14 | 0 | 6 | 0 | 28 | |
| Top 80% | >7,902 | 27 | 60 | 41 | 39 | 55 | 10 | 22 | 53 | 34 | 79 |
| | ≤7,902 | 0 | 23 | 0 | 18 | 11 | 0 | 4 | 0 | 23 | |
| Top 85% | >4,926 | 27 | 66 | 41 | 45 | 59 | 10 | 23 | 53 | 40 | 85 |
| | ≤4,926 | 0 | 17 | 0 | 12 | 7 | 0 | 3 | 0 | 17 | |
| Top 90% | >3,517 | 27 | 71 | 41 | 49 | 62 | 10 | 24 | 53 | 45 | 89 |
| | ≤3,517 | 0 | 12 | 0 | 8 | 4 | 0 | 2 | 0 | 12 | |
| Top 95% | >439 | 27 | 77 | 41 | 53 | 65 | 10 | 25 | 53 | 51 | 95 |
| | ≤439 | 0 | 6 | 0 | 4 | 1 | 0 | 1 | 0 | 6 | |
| Excess of cancer risk (%) | | 25 | | 42 | | 13 | | 28 | | 48 | |

*if any of the four substances exceeds the standard.

체적인 위해도 수준을 판단하기 위하여, 4개 물질 중 한 가지 물질이라도 발암위해도를 초과하는 사업의 비율이 약 50%인 수준과 통합지표 값을 초과하는 사업의 비율이 약 50% 수준으로 나타나는 상위 50%의 통합지표 값인 58,884를 통합지표 기준으로 설정하였다.

선정된 통합지표의 기준 및 기준 발암위해도 기준에 대한 개별 물질 분포를 살펴보면, 발암위해도 기준은 만족하지만 통합지표의 기준을 초과하는 사업이 각 물질별로 Ni 28개, Cr⁶⁺ 12개, Cd 34개, As 15개로 나타났다(Figure 3). Figure 3의 각 그래프의 제2사분면(second quadrant)에 속하는 사업들의 경우, 개별 물질의 발암위해도가 기준 이하이므로 현행 환경영향평가법 상으로 저감방안 수립 없이 사업이 협의될 수 있으나, 4가지 물질에 대한 통합노출 평가를 통해 보다 포괄적인 환경문제를 놓고 비교 위험에 대해 살펴볼 필요가 있다. 해당 사업들의 통합지표 기준이 초과된 지점에서, 각 물질별 기여도를 파악하여 기여율이 높은 물질에 대한 저감방안 수립 및 배출업종의 입주 제한 등 배출량을 줄일 수 있는 관리가 필요하다.

3) Top 50% 수준에서의 평가결과 적용

단일 물질별 위해도 기준(1×10^{-5})은 만족하지만 통합지표의 기준(58,884)을 초과한 과소평가 사업이 3개, 통합지표의 기준은 만족하지만 단일 물질별 위해도 기준을 초과한 과대평가 사업이 2개로 나타났다(Table 4). 3개의 과소평가 사업은 기존 환경영향평가 적용 시 추가적인 저감방안 수립 없이 사업이 합의된 경우이다. 그러나 개별 물질의 위해도를 살펴보면 A 사업의 경우 Ni와 Cr⁶⁺의 발암위해도가 각각 0.93×10^{-5} , 0.95×10^{-5} 로 위해도 기준에 매우 근접하며, B 사업의 Cr⁶⁺ 발암위해도(0.97×10^{-5}), C 사업의 Ni 발암위해도(0.93×10^{-5}) 또한 위해도 기준인 1×10^{-5} 와 매우 근사한 값으로 나타났다. 이러한 경우, 통합지표를 적용함으로써 인체 위해도가 높은 물질을 중점으로 다양한 배출물질의 상호작용을 고려한 재평가를 통해 저감방안을 마련하는 계기가 될 수 있으며 보다 보수적인 기준으로 수용체에 대한 악영향을 예방할 수 있다.

반면 통합지표의 기준은 만족하지만 단일 물질별 위해도 기준을 초과한 과대평가된 2개의 사업을 살펴보면 통합지표 값 측면에서는 과소평가된 결과이다. D 사업의 Ni 발암위해도가 기준치 보다 0.03×10^{-5}

Table 4. Project's information of underestimated and overestimated cases

| Classification | Development projects | Location | Size (m ²) | Type of industry | Cancer Risk | | | | Integrated Risk Index |
|------------------------------------|----------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------------------|-------------|---------------|----------|----------|-----------------------|
| | | | | | Nickel | Chromium (6+) | Cadmium | Arsenic | |
| Underestimated cases ¹⁾ | A | Haman-gun, Gyeongsangnam-do | 818,215 | C10, C17, C24, C25, C29~31, C35, H52 | 9.31E-06 | 9.47E-06 | 8.32E-06 | 4.95E-06 | 107,000 |
| | B | Sacheon-si, Gyeongsangnam-do | 313,753 | H52, C22, C23, C25, C29, C30 | 7.45E-06 | 9.72E-06 | - | - | 61,533 |
| | C | Taebaek-si, Gangwon-do | 229,273 | C13, C26, C29, C30, C33 | 9.34E-06 | 2.40E-06 | 8.82E-06 | - | 73,414 |
| Overestimated cases ²⁾ | D | Jung-gu, Incheon | 495,144 | C26, C29, H49~52 | 1.03E-05 | 2.89E-06 | 5.80E-06 | - | 56,010 |
| | E | Uiryeong-gun, Gyeongsangnam-do | 296,497 | C29, C31 | 7.20E-07 | 1.20E-05 | - | - | 45,580 |

1) If the cancer risk is satisfied but the integrated risk is exceeded.

2) If the integrated risk is satisfied but the cancer risk is exceeded.

초과하였고, E 사업의 Cr^{6+} 발암위해도가 기준치 보다 0.2×10^{-5} 초과한 것으로 나타났다. 이는 단일 물질에 대한 위해성평가의 경우, 여러 예측지점 중 각 물질에 대한 최대 노출농도 산출 지점을 기준으로 위해성평가를 시행하지만, 통합지표의 경우, 다물질의 누적위해성평가를 위해 4가지 물질에 대해 동일한 예측지점의 농도값을 활용하여 하나의 통합지표 값을 산출하기 때문이다. 이러한 경우, 평가 시 예측지점은 건강영향이 미칠 경우를 고려하여 선정된 주요 지점이기 때문에 단일 물질의 건강기준이 초과할 경우는 그 값이 해당 물질에 국한되거나 통합지표 기준을 만족해도 해당 지점에 대해 저감대책을 강구하도록 협의할 수 있다.

4) 기준 설정

본 논문에서는 과거 평가 사례 등을 고려하여 상위 50% 개발사업의 통합지표 값인 58,884를 누적위해성평가 지표로 선정하여 기존의 위해성평가 기준과 비교하였다. 산출된 통합지표 기준을 통해 기존의 위해도 기준을 근사하게 벗어나는 개발사업을 가려낼 수 있고, 해당 사업에 대하여 추가적인 평가 및 관리의 필요성을 제시할 수 있었다. 하지만 최종적인 통합지표의 기준은 과거 사업에 대한 분석뿐만 아니라, 현실적으로 개발사업자가 적용할 수 있는 저감방안의 수준(경제적 수준 등)을 고려하여 설정할 필요가 있다. 「환경영향평가법」에 따르면 환경보전목표는 환경기준, 과학적 지식, 경험, 및 외국에서 사용되고 있는 기준 등을 바탕으로 설정하라고 하고 있으며, 이를 반영할 경우에 사회적 요구에 따라 그 수준을 본 논문에서 제안한 50% 수준보다 완화된 25% 수준까지도 제안할 수 있을 것이다. 또한 제시된 통합지표의 기준은 절대적인 값이 될 수 없으므로, 기존의 환경영향평가의 건강영향평가 기준과 병합하여 기준을 설정할 필요가 있다.

IV. 요약 및 결론

이 논문에서는 독성가중치를 활용한 유해 중금속 4종(Ni, Cr^{6+} , Cd, As)의 누적위해성평가를 통해 4개

물질의 통합지표를 산정하였다. 이들 과정에서 수반되는 불확실성에 대한 문제들이 발생할 수 있다. 예를 들면 오염농도의 대표성 문제, 독성가중치에서 도출되는 상대적인 위해도의 적용에 있어 내재적인 불확실성 등 한계점이 있지만 현행 환경영향평가 과정에서 획득 가능한 자료 분석을 통해 4개 물질에 대한 누적위해성평가를 시행하였으며, 실제 과거 10년간 산업단지 개발사업에 적용해 봄으로써 누적위해성평가를 위한 통합지표 수준을 설정하였다.

독성가중치를 활용하여 산출된 통합지표의 경우 그 값이 절대적인 의미를 가질 수 없으며 상대적인 비교만 가능하지만 인체영향에 대해 통합적인 독성 정보를 제공할 수 있기 때문에 건강영향평가 시 유효하게 이용될 수 있다고 판단된다. 산업단지 개발사업 110개에 대하여 통합지표 수준과 기존의 건강영향평가 기준을 비교해 본 결과, 통합지표를 적용함으로써 개별 물질의 위해성 기준을 만족하지만 노출농도가 기준에 매우 근사하게 사업이 협의된 경우를 선별할 수 있다. 또한 현재 건강영향평가 수행 시 예측농도가 최대로 나타난 지점에 한하여 건강기준을 적용하고 있지만, 통합지표의 경우에는 대상물질들에 대하여 동일한 지점의 예측농도 값을 활용하여 수용체 중심의 누적된 노출을 고려할 수 있다는 장점이 있다.

제안된 통합지표는 일부 유해 중금속에 대해 제한적으로 시도되었으나, 향후 이외 대기오염물질에 대한 기준을 확대하고 다수의 산업단지 개발계획에 있어 방법론을 적용해본다면 과학적으로 합당한 수준의 평가 기준을 도출할 수 있을 것이다. 이러한 위해성평가의 과정을 거쳐 얻어진 평가치는 여러 가지 사회·제도적인 문제, 경제적인 문제들을 고려하여 전문가 협의를 통해 현행 환경영향평가와 적절히 연계해서 이루어질 때 한 단계 더 높일 수 있는 실천력 있는 사전 예방 수단으로 기능하게 될 것이다.

사사

본 논문은 한국환경산업기술원의 환경보건 디지털 조사 기반 구축 개발사업(과제번호: RE202101454)의 지원을 받아 2021년 한국환경연구원에서 수행한

「환경유해인자 노출에 의한 공간의 환경보건상태 평가 기술개발(2021-060(R))」 사업 및 환경부에서 지원을 받아 2021년 한국환경연구원에서 수행한 「건강영향평가 방법 고도화 및 사후 검토체계 마련 연구(2021-065)」 사업의 연구결과 일부를 바탕으로 작성되었습니다.

References

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2004. Guidance manual for the assessment of Joint toxication of chemical mixtures.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2018. Framework for Assessing Health Impacts of Multiple Chemicals and Other Stressors, U.S. Department of Health and Human Services Public Health Service.
- Cohrssen and Covello. 1989. Risk analysis: A guide to principles and methods for analyzing health and environmental risks, Council on Environmental Quality, Washington, DC.
- Environmental Protection Agency. 1986. Guidelines for health risk assessment of chemical mixtures, Federal Register 51(185): 34014-34025.
- Environmental Protection Agency. 2000. Supplementary guidance for conducting health risk assessment of chemical mixtures, EPA/630/R-00/002, Washington, DC, 20460.
- Environmental Protection Agency. 2003. Framework for Cumulative Risk Assessment, Washington, DC, 20460.
- Environmental Protection Agency. 2019. EPA's Risk-Screening Environmental Indicators (RSEI) Methodology, Office of Pollution Prevention and Toxics, Washington, DC, 20460.
- Fischhoff B, Lichtenstein S, Slovic P, Derby SL, Keeney RL. 1981. Acceptable Risk. Cambridge University Press, Cambridge.
- Korea Environmental Institute. 2018. Study on the Cumulative Risk Assessment for Safety Management of Household Chemical Products. [Korean Literature]
- Korea Food & Drug Administration. 2011. Risk Assessment Glossography II. [Korean Literature]
- Korea Food & Drug Administration. 2012. Research on Risk Assessment of Combined Exposure to multiple chemicals. [Korean Literature]
- Ministry of Environment. 2011. Manual for Assessment of Health Impact Items. [Korean Literature]
- Ministry of Environment. 2017. A Study on the Improvement of Health Impact Assessment Method. [Korean Literature]
- Ministry of Environment. 2021a. Manual for Additional Evaluation of Health Impact Items. [Korean Literature]
- Ministry of Environment. 2021b. Si·Gun·Gu Environmental Plan Guideline. [Korean Literature]
- World Health Organization. 2009. Assessment of Combined Exposures to Multiple Chemicals: Report of a WHO/IPCS International Workshop on Aggregate/Cumulative Risk Assessment, Geneva.