

Technical Article

산업단지 계획 시 유해대기오염물질에 대한 건강영향평가 사례 연구

김상목^{*,**} · 손은성^{***} · 서영교^{****} · 백성옥^{*}

영남대학교 환경공학과^{*}, (주)라임엔지니어링^{**}, 이투엠쓰리(주)^{***}, 국립환경과학원^{****}

A Case Study on Health Impact Assessment of Hazardous Air Pollutants in Industrial Complex Development Plan

Sang-Mok Kim^{*,**} · Eun-Seong Son^{***} · Young-Kyo Seo^{****} · Sung-Ok Baek^{*}

Dept. of Environmental Engineering, Yeungnam University^{*}

RIME Engineering Co., Ltd.^{**}

E2M3 Co., Ltd.^{***}

National Institute of Environmental Research^{****}

요약: 건강영향평가는 개발사업 시행에 따른 사람의 건강에 미치는 영향을 예측하여 건강피해를 최소화하기 위한 목적으로 환경영향평가 내에서 시행되고 있다. 하지만 건강영향평가 시 유해대기오염물질 배출량 산정방법에 대한 일관성 부족으로 건강영향평가 매뉴얼 개선이 필요하나, 아직 개정은 되지 않고 있다. 본 연구는 실제 산업단지 개발 사례 및 기 수행된 건강영향평가를 중심으로 유해대기오염물질 배출량 산정 시 매뉴얼에 제시된 원단위 산정 방법을 다르게 적용한 4가지 사례를 선정하여 각각 배출량을 산정하였다. 각 산정된 배출량을 토대로 CALPUFF 모델을 이용한 확산농도 예측 후, 노출농도를 기준으로 위해성 평가를 시행하였다. 위해성 평가 결과, 배출량 산정 방법별 위해도 수준의 차이가 비교적 크게 나타남에 따라, 배출량 산정시 원단위 적용에 대한 매뉴얼 개선이 필요한 것으로 검토되었다. 또한 배출량 산정 시 근거자료 활용에 대한 일관성, 건강영향평가에 최적화된 배출계수 개발, 현황 조사에 대한 신뢰성 향상이 필요할 것으로 판단된다.

주요어: 건강영향평가, 유해대기오염물질, 환경영향평가, 위해성평가, CALPUFF

Abstract: Health impact assessment is implemented within the Environmental impact assessment for the purpose of minimizing health damage by predicting the impact on human health following implementation of the development project. In health impact assessment, manual revision is required due to the lack of consistency in the method of estimating hazardous air pollutants emissions. This study estimated the emissions by calculating the emissions of hazardous air pollutants based on the

First & Corresponding Author: Sang-Mok Kim, Tel: +82-31-5177-7752, E-mail: bear1027@hanmail.net, ORCID: 0000-0001-7014-3910

Co-Authors: Eun-Seong Son, Tel: +82-31-365-3345, E-mail: ses@e2m3.com, ORCID: 0000-0003-1735-0026

Young-Kyo Seo, Tel: +82-52-248-5307, E-mail: youngkyo@korea.kr, ORCID: 0000-0003-3165-689X

Sung-Ok Baek, Tel: +82-53-810-2544, E-mail: soback@yu.ac.kr, ORCID: 0000-0003-3646-8409

Received: 3 October, 2019. Revised: 6 November, 2019. Accepted: 12 November, 2019.

actual industrial complex development cases and completed health impact assessments. As a result of risk assessment based on exposure concentration using CALPUFF model, the risk assessment results were different for each of the emission estimation methods, and manual improvement on the emission estimation method is needed.

Keywords: Health Impact Assessment (HIA), Hazardous Air Pollutants (HAPs), Environmental Impact Assessment (EIA), Risk assessment, CALPUFF

I. 서 론

경제성장 등으로 인간의 삶의 질이 향상되면서 보다 쾌적한 환경에서 살고 싶어 하는 욕구와 더불어 환경의 질이 건강에 미치는 영향에 대한 인식이 증대되고 있다. 이러한 변화에 따라 환경부에서는 과거 공기, 물, 토양 등의 환경 매체별 관리에서 건강을 중심으로 한 사전 예방적 차원의 정책을 수립하고 국민의 참여와 협력을 강화하는 방향으로 정책의 패러다임을 전환하고 있으며, 2008년 환경보건법을 제정·공포하여 건강을 고려한 사전 예방 정책의 대표적 수단으로 건강영향평가를 도입, 운영하고 있다(MOE 2010).

건강영향평가는 산업단지, 발전소, 소각장 등 특정 개발사업 시행에 따른 사람의 건강에 미치는 영향을 예측하여 건강피해를 최소화하기 위한 목적으로 2010년부터 환경영향평가서 내 위생·공중보건 항목에 건강영향을 추가하여 시행하고 있으며, 건강영향평가 매뉴얼(MOE 2013) 등에 제시된 방법론을 토대로 사업시행에 따른 인체 건강영향을 예측·평가하고 있다.

건강영향평가 제도 시행 이후 건강영향평가 매뉴얼은 현황측정, 유해성 정보 등 일부 내용이 개정되었다. 그러나 지속적으로 개선이 요구되었던 유해대기오염물질(Hazardous Air Pollutants; HAPs) 배출량 산정방법 등은 관련 연구가 지속적으로 진행되고 있으나 아직 매뉴얼 개정은 되지 않고 있어, 배출량 산정 시 활용되는 자료 및 적용방법에 대한 일관성 부족 등으로 혼란을 야기하고 있다(MOE 2017).

본 연구에서는 실제 산업단지 개발 사례와 기 수행된 건강영향평가를 중심으로 유해대기오염물질 배출량 산정 시 건강영향평가 매뉴얼에 명시된 배출량 원단위 산정방법을 각각 다르게 적용하여 배출량을 산정하였다. 산정된 각각의 배출량은 대기확산모델

(CALPUFF)을 통해 인체 위해도 수준을 예측·평가하였다. 그 결과를 토대로 배출량 산정 시 원단위 적용방법에 따른 위해도 수준 차이를 비교하여, 건강영향평가 방법론과 관련된 연구 및 건강영향평가 매뉴얼 개정 시 참고자료로 활용하는데 도움이 되고자 한다.

II. 연구 방법

1. 대상사업 개요

본 연구 사례인 'OO산업단지 조성사업'은 지역 특화산업 육성을 위해 계획되었고, 농업 중심의 중소도시에 약 160만 m^2 의 면적을 대상으로 개발 진행 중에 있으며, 이 중 산업시설용지(약 84만 m^2)의 유치업종 계획은 Table 1과 같다. 사업지구 주변지역은 Figure 1과 같이 북측 산악지형, 남측은 하천이 위치하고, 대상지는 농림지역이 약 78%로 비교적 평탄한 지형에 계획되었다.

2. 대상물질 선정

본 연구의 평가 대상물질은 산업단지 건강영향평가 예측 항목(MOE 2013) 중 유해대기오염물질인 발암성 7종, 비발암성 6종을 대상으로 하였으며, Table 2에 제시하였다.

3. 연구방법

산업단지 개발에 따른 인체 위해도 평가를 위해 현황을 측정하고, 기 수행된 건강영향평가를 확인하여 배출량 산정 시 적용된 방법을 확인하였다. 그 결과를 토대로 건강영향평가 매뉴얼(MOE 2013) 및 관련 연구(MOE 2017)에 제시된 근거자료(PRTR 자료, 입주 예정 업체수)를 다르게 적용한 방법을 선정하여 배출량을 각각 산정하였다. 각 산정된 배출량을 토대로

Table 1. The plan of Manufacturing-type in industrial complex

Korea standard industrial classification	Area (m ²)	Ratio (%)
C10. Manufacture of food products	84,085	10.0
C20. Manufacture of chemicals and chemical products	125,401	14.9
C21. Manufacture of pharmaceuticals, medicinal chemical and botanical products	39,079	4.6
C23. Manufacture of other non-metallic mineral products	113,912	13.5
C24. Manufacture of basic metals	116,922	13.9
C25. Manufacture of fabricated metal products, except machinery and furniture	33,107	3.9
C26. Manufacture of electronic components, computer, visual, sounding and communication equipment	48,939	5.8
C27. Manufacture of medical, precision and optical instruments, watches and clocks	10,097	1.2
C28. Manufacture of electrical equipment	26,680	3.2
C29. Manufacture of other machinery and equipment	41,024	4.9
C30. Manufacture of motor vehicles, trailers and semitrailers	107,543	12.8
C31. Manufacture of other transport equipment	94,619	11.3
Total	841,408	100.0

Table 2. Target pollutant compounds

Classification	Compounds
Non-carcinogenic	H ₂ S, C ₆ H ₆ , HCN, HCl, NH ₃ , Hg
Carcinogenic	C ₆ H ₆ , As, Cd, Cr ⁶⁺ , HCHO, Ni, CH ₂ =CHCl

CALPUFF 모델을 이용한 확산농도 예측 후, 현황농도를 가중한 노출농도를 기준으로 위해성 평가를 시행하여, 배출량 산정방법에 따른 위해도 수준 차이를 분석하였다.

따라서 본 연구는 ‘사업계획 분석 및 기초자료 수집 → 대상물질 현황조사 → 배출량 산정(4가지 사례) → 노출농도 예측(CALPUFF 모델) → 위해도 평가(위해도 지수 및 발암 위해도 산정) → 결과 분석 및 고찰’의 순으로 진행하였다.

III. 연구 결과

산업단지 개발에 따른 건강영향평가를 위하여 현황을 측정하고, 대상물질(비발암성 6종, 발암성 7종)에 대하여 각 사례별 배출량을 적용한 후 CALPUFF 모델링을 수행하여, 그 결과 값에 현황농도를 가중한 노출농도를 예측하였다. 그리고 예측된 노출농도 기준 위해도 지수 및 발암 위해도를 계산하여 인체 위해성 평가를 시행하였다.

1. 현황 조사

대상물질에 대한 현황 조사를 위하여 사업지구 인근 주거지역, 주풍향 등을 고려한 6개 지점을 선정하여 3계절(여름, 가을, 겨울)을 대상으로 대기오염공정시험기준에 준하여 조사하였고, 조사결과는 Table 3에 지점별 평균값으로 제시하였다. 조사결과를 살펴보면 Ni, NH₃을 제외한 나머지 항목은 검출한계 이하로 조사되었는데, 본 사업지구는 농업 중심의 중소도시에 위치하며, 사업지구 주변은 전, 임야, 주거지 등 특별한 배출원이 존재하지 않아 저 농도를 보이는 것으로 예상되었다. 또한, Ni은 사업지구 서측 4 km 이격하여 위치한 소규모의 폐기물 소각시설 영향으로, NH₃의 경우 사업지구 주변 농·축산업 영향으로 현황조사 시 검출된 것으로 파악되었다.

국가측정망(중금속대기측정망, 광화학대기오염물질측정망)은 약 50 km 이상 이격하여 위치하고, 위치한 도시의 산업 특성도 달라 사업지구 현황과는 다른 농도 분포 양상을 보일 것으로 예상되어 본 연구에는 제시하지 않았다.

2. 배출량 산정

1) 산정방법

산업단지 계획 시 특정업체 입주를 위해 계획되는 일부 산업단지를 제외하고, 본 산업단지를 포함한 대

Table 3. Average background concentrations by point

Point	C ₆ H ₆ (μg/m ³)	HCHO (μg/m ³)	Ni (μg/m ³)	Cr (μg/m ³)	CH ₂ -CHCl (μg/m ³)	Cd (μg/m ³)	As (μg/m ³)	C ₈ H ₈ (μg/m ³)	HCl (μg/m ³)	NH ₃ (μg/m ³)	H ₂ S (μg/m ³)	HCN (μg/m ³)	Hg (μg/m ³)
①	N.D.*	N.D.	0.005	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	75.9	N.D.	N.D.	N.D.
②	N.D.	N.D.	0.007	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	68.3	N.D.	N.D.	N.D.
③	N.D.	N.D.	0.008	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	98.7	N.D.	N.D.	N.D.
④	N.D.	N.D.	0.004	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	106.3	N.D.	N.D.	N.D.
⑤	N.D.	N.D.	0.007	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	75.9	N.D.	N.D.	N.D.
⑥	N.D.	N.D.	N.D	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	53.1	N.D.	N.D.	N.D.
DL**	2.0	0.617	5E-04	0.002	0.020	2E-04	5E-05	0.019	1,008	4.55	0.09	67.5	1E-05

* N.D. : Not Detected, ** DL : Detection Limit

부분의 산업단지는 입주 기업이 확정되지 않아 유해 대기오염물질의 업종별 배출 원단위를 활용하여 배출량을 산정한다. 그리고 배출량 산정 시 건강영향평가 매뉴얼(MOE 2013)에 따라 국내 화학물질 배출·이동량 정보(Pollutant Release and Transfer Registers, PRTR), 산업입지 원단위(LH 2015), 입주의향서 등을 활용하게 된다. 본 연구에서는 기 수행된 건강영향평가를 환경영향평가 정보지원시스템(EIASS)을 이용하여 분석 후 배출량 산정 시 적용된 방법을 토대로 PRTR 자료, 입주 예정 업체수를 다르게 적용한 아래 4가지 방법들을 선정하여 배출량을 각각 산정하였다. 각 산정 방법별 특징은 Table 4에 정리하였고, 시안화수소(HCN)를 대상으로 배출량 산정과정 예시를 Table 5에 제시하였다.

- ① CASE 1
 - 배출원단위(kg/년·m²) = 2014년 업종별·오염물질별 배출량(kg/년) ÷ 해당업종 조사 업체수(개) ÷ 산업입지 원단위상 업종 평균 면적(m²/개)
 - 배출량(g/sec) = 배출원단위(kg/년·m²) × 업종별 계획 면적(m²)
- ② CASE 2
 - 배출원단위(kg/년·m²) = 2014년 업종별·오염물질별 배출량(kg/년) ÷ 해당물질 배출 업체수(개) ÷ 산업입지 원단위상 업종 평균 면적(m²/개)
 - 배출량(g/sec) = 배출원단위(kg/년·m²) × 업종별 계획 면적(m²)
- ③ CASE 3
 - 배출원단위(kg/년·개) = 2014년 업종별·오염물

Table 4. Characteristics by emission calculation method

CASE	Pros and cons
CASE 1	<ul style="list-style-type: none"> • Emission changes are severe by year due to the application of one-year PRTR. • Over-calculation of emissions can be prevented by applying the number of survey companies. But the worst case is unpredictable. • Difficult to calculate actual emissions by applying average area of industry.
CASE 2	<ul style="list-style-type: none"> • Emission changes are severe by year due to the application of one-year PRTR. • The worst case can be predicted by applying the number of emission companies. But emissions can be overestimated. • Difficult to calculate actual emissions by applying average area of industry.
CASE 3	<ul style="list-style-type: none"> • Emission changes are severe by year due to the application of one-year PRTR. • The worst case can be predicted by the number of emission companies. But emissions can be overestimated. • Emissions are closer to reality by applying the area of occupancy request. But it is not certain whether or not to actually move in.
CASE 4	<ul style="list-style-type: none"> • The annual fluctuations in emissions are not large due to the median average of the three-year PRTR. • The application of median averages can prevent some overestimates. • Difficult to calculate actual emissions by applying average area of industry.

질별 배출량(kg/년) ÷ 해당물질 배출 업체수(개)

• 배출량(g/sec) = 배출원단위(kg/년·개) × 입주 예정 업체수(개)*

* 입주의향서 내 요청 면적을 고려하여 입주 예정 업체수 적용

④ CASE 4

• 배출원단위(kg/년·m²) = 2013~2015년 업종별·오염물질별·업체별 배출량의 중간값 평균(kg/년·개)* ÷ 산업입지 원단위상 업종 평균 면적(m²/개)
* MOE(2017)

• 배출량(g/sec) = 배출원단위(kg/년·m²) × 업종별 계획 면적(m²)

2) 산정결과

앞서 기술한 배출량 산정방법에 따라 각각 업종별·물질별 배출량을 산정 후 물질별로 배출량을 정리하여 Table 6에 제시하였다. 산정 결과 대체로 CASE 2가 높은 배출량을 보였으며, CASE 1이 낮은 배출량으로 산정되었다. 높은 배출량을 보이는 CASE 2 대비 물질별 비율을 살펴보면 CASE 1은 0.004~0.210, CASE 3은 0.170~0.264, CASE 4는 0.144~1.114 수준을 보여 산정방법별 편차가 비교적 큰 것으로 나

타났다. 특히 PRTR을 활용한 원단위 산정 시 조사업체 수(CASE 1)와 배출업체 수(CASE 2) 중 어떤 것을 적용 하는가에 따라 시안화수소(HCN)의 경우 최대 약 270배, 평균 약 14배의 편차를 보여 가장 큰 영향을 주었으며, 입주 예정업체 수 적용방법(CASE 2 vs CASE 3)에 따라서도 약 5배의 차이를 보였다. 또한 3년간의 중간값 평균을 적용한 CASE 4의 경우에도 단일년도 배출량을 적용한 CASE 2에 비해 평균 약 60% 수준으로 낮게 산정되었으나, 시안화수소(HCN), 카드뮴(Cd)의 경우에는 유사하거나 더 많이 배출되는 것으로 산정되는 등 PRTR 자료의 연도별 편차로 인하여 배출량 산정 시 PRTR 해당년도를 어떻게 선택 하느냐에 따라서도 차이를 보였다.

3. 예측모델 선정

1) CALPUFF 모델

확산 농도 예측을 위한 대기 확산 모델은 CALPUFF 모델을 적용하였다. CALPUFF 모델은 시·공간에 따른 바람장의 변화를 Puff의 이동으로 나타낼 수 있기 때문에 비정상상태(Unsteady state)를 구현할 수 있으며, 유체의 흐름을 정상상태로 가정하여 수행하는

Table 5. Example of emission calculation method (HCN)

CASE	Example of emission calculation method (HCN)		Emissions (g/s)
CASE 1	C20*	• $\frac{3,069 \text{ kg / year}}{561 \text{ places} \times 11,031.8 \text{ m}^2/\text{place}} \times 125,401 \text{ m}^2 = 1.97E - 03 \text{ g/s}$	0.0021
	C24	• $\frac{67 \text{ kg / year}}{359 \text{ places} \times 7,843.5 \text{ m}^2/\text{place}} \times 116,922 \text{ m}^2 = 8.82E - 05 \text{ g/s}$	
CASE 2	C20	• $\frac{3,069 \text{ kg / year}}{2 \text{ places} \times 11,031.8 \text{ m}^2/\text{place}} \times 125,401 \text{ m}^2 = 5.53E - 01 \text{ g/s}$	0.5689
	C24	• $\frac{67 \text{ kg / year}}{2 \text{ places} \times 7,843.5 \text{ m}^2/\text{place}} \times 116,922 \text{ m}^2 = 1.58E - 02 \text{ g/s}$	
CASE 3	C20	• $\frac{3,069 \text{ kg / year}}{2 \text{ places}} \times 3 \text{ places} = 1.46E - 01 \text{ g/s}$	0.1492
	C24	• $\frac{67 \text{ kg / year}}{2 \text{ places}} \times 3 \text{ places} = 3.19E - 03 \text{ g/s}$	
CASE 4	C20	• $\frac{1,676.3 \text{ kg / year} \cdot \text{place}}{11,031.8 \text{ m}^2/\text{place}} \times 125,401 \text{ m}^2 = 6.04E - 01 \text{ g/s}$	0.6335
	C24	• $\frac{62 \text{ kg / year} \cdot \text{place}}{7,843.5 \text{ m}^2/\text{place}} \times 116,922 \text{ m}^2 = 2.93E - 02 \text{ g/s}$	

* Korea standard industrial classification

Table 6. Calculation of emissions by case

Compounds		Emissions (g/s)				Ratio		
		CASE 1 (a)	CASE 2 (b)	CASE 3 (c)	CASE 4 (d)	(a) / (b)	(c) / (b)	(d) / (b)
Non-carcinogenic	H ₂ S	0.0176	2.1061	0.4243	1.9599	0.008	0.201	0.931
	C ₈ H ₈	0.1143	2.4101	0.4093	2.2420	0.047	0.170	0.930
	HCN	0.0021	0.5689	0.1492	0.6335	0.004	0.262	1.114
	HCl	0.4722	2.5088	0.4832	1.0018	0.188	0.193	0.399
	NH ₃	0.3585	4.1806	0.7426	1.8988	0.086	0.178	0.454
Carcinogenic	C ₆ H ₆	0.0755	1.5067	0.3543	0.5648	0.050	0.235	0.375
	As	0.0005	0.0257	0.0052	0.0148	0.019	0.202	0.576
	Cd	0.0001	0.0105	0.0019	0.0104	0.008	0.181	0.986
	Cr ⁶⁺	0.0009	0.0045	0.0008	0.0006	0.210	0.178	0.144
	Ni	0.0433	0.2136	0.0420	0.0403	0.203	0.197	0.189
	HCHO	0.0270	0.5917	0.1543	0.3467	0.046	0.261	0.586
	CH ₂ =CHCl	0.0223	1.7847	0.4710	0.5665	0.012	0.264	0.317

Hg : No emissions

모델(AERMOD 등)보다 시간에 따른 풍향 및 풍속의 변화를 보다 정확히 확산에 반영할 수 있는 장점이 있고, 복잡지형에서의 산곡풍이나 해안가에서의 해륙풍 순환과 같은 급격한 바람장 변화를 나타내는 지역에 유용하게 적용될 수 있는 모델이다(MOE 2007).

2) 모델링 입력자료

기상장(CALMET) 모델 수행 시 사업지구 주변에 위치한 종관기상관측소(700 m 이격)의 1년간(2015년) 지표기상자료, 고층기상관측소(80 km 이격)의 레원존데이터, 환경부 상세지형자료 및 토지이용도

자료를 이용하였으며, 모델링 영역은 사업지구를 중심으로 14 km×14 km를 대상으로 하였다(Figure 1). CALMET 모델로 생성된 기상장과 Table 6에서 산정된 배출량을 적용하여 배출량 산정 방법별로 모델링을 수행하였고, 사업지구 주변에 위치한 주거지역 등 15개 영향예상지점을 선정하여 지점별 24시간 평균 착지농도를 예측하였다.

4. 노출농도 예측

CALPUFF 모델링 수행 결과에 따른 영향 예상 지점별 예측농도에 현황농도를 가중한 노출농도 중 최

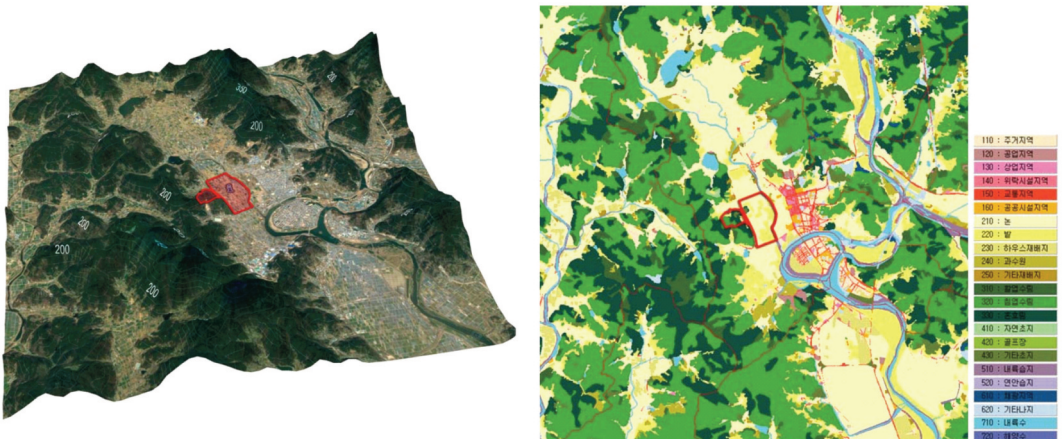


Figure 1. Terrain and land use Status

Table 7. Calpuff modeling input condition

Input list		Input condition	
		Modeling area (14 km × 14 km)	
Grid origin (Reference Point)	UTMX (km)	468.389	
	UTMY (km)	3,920.836	
Grid spacing (ΔX) (km)		0.2	
Domain Size	Nx (No. of x grid Cells)	70	
	Ny (No. of y grid Cells)	70	
Projection		Universal Transverse Mercator (UTM)	
UTM zone		52 (Northern)	
No. of Vertical layers		9	
Cell face heights (m)		0, 20, 50, 100, 200, 300, 500, 1000, 2000, 3000	
Bias		-1, -1, -1, -0.5, 0, 0.5, 1, 1	
Time zone		UTC+0900	

Table 8. Exposure concentrations by case (24 hour average)

Compounds		Exposure concentrations (μg/m ³)				Ratio		
		CASE 1 (a)	CASE 2 (b)	CASE 3 (c)	CASE 4 (d)	(a)/(b)	(c)/(b)	(d)/(b)
Non-carcinogenic	H ₂ S	0.26	30.49	6.15	28.57	0.008	0.202	0.937
	C ₈ H ₈	2.05	26.82	5.06	21.05	0.076	0.189	0.785
	HCN	0.05	15.04	3.94	16.57	0.004	0.262	1.102
	HCl	5.32	28.06	6.03	10.54	0.190	0.215	0.375
	NH ₃	153.57	171.01	155.70	162.07	0.898	0.910	0.948
Carcinogenic	C ₆ H ₆	1.99	32.75	8.43	7.61	0.061	0.257	0.232
	As	0.01	0.37	0.07	0.21	0.019	0.201	0.564
	Cd	0.00	0.14	0.03	0.19	0.008	0.195	1.398
	Cr ⁶⁺	0.01	0.04	0.01	0.01	0.214	0.191	0.168
	Ni	0.52	2.45	0.50	0.52	0.213	0.202	0.211
	HCHO	0.79	7.84	2.41	3.49	0.101	0.307	0.445
	CH ₂ =CHCl	0.60	47.83	12.70	15.23	0.013	0.266	0.318

대농도를 Table 8에 제시하였다. 노출농도는 시안화 수소(HCN), 카드뮴(Cd)을 제외하면 대체로 CASE 2 > CASE 4 > CASE 3 > CASE 1의 순으로 예측되었고, 암모니아(NH₃), 니켈(Ni)을 제외한 다른 물질들은 현황농도가 검출한계 이하로 조사되어 배출량 산정 방법별 배출량 차이가 노출농도에 반영되어 배출량 산정결과와 비교적 유사한 경향을 보였다. 카드뮴(Cd)의 경우 CASE 4가 CASE 2에 비해 배출량은 다소 낮게 산정되었으나, 카드뮴을 배출하는 업종이 영향예상지점과 인접하여 노출농도가 높게 예측되었다.

5. 위해도지수 및 발암위해도 산정

1) 위해도 지수 산정 방법(비발암성 물질)

비발암성 물질은 위해도 지수(Hazard quotient)를 이용하여 인체 영향 여부를 검토하였고, 아래의 산정식과 같이 위해도 지수는 노출 농도를 호흡노출참고치(Reference concentration; RfC)로 나누어 계산하였다. 위해도 지수 값이 1 이상인 경우 유해한 영향이 있는 것으로, 1 이하인 경우 유해한 영향이 없는 것으로 평가하였다(MOE 2013).

$$\text{위해도 지수(Hazard quotient)} = \frac{\text{노출농도}(\mu\text{g}/\text{m}^3)}{\text{호흡노출참고치(RfC, } \mu\text{g}/\text{m}^3)}$$

Table 9. Reference concentration of non-carcinogenic compounds (Industrial complex)

Compounds	RfC (µg/m³)	Compounds	RfC (µg/m³)
C ₈ H ₈	1,000	H ₂ S	2
HCL	20	HCN	0.8
NH ₃	500	-	-

2) 발암위해도 산정 방법(발암성 물질)

발암성 물질의 경우는 발암위해도(Cancer risk)를 산정하여 영향여부를 검토하였고, 발암 위해도는 호흡단위위해도(Inhalation unit risk)와 발암잠재력(Cancer slope factor)을 이용하여 산정하는 방법 중 아래의 산정식과 같이 호흡단위위해도를 활용하여 노출 농도에 곱하여 계산하였다. 위해도 판단기준은 '학교보건법 시행규칙 별표1'에서 10⁻⁴~10⁻⁶으로 정하고 있으며, 일반적으로 10⁻⁶을 기준으로 하고, 최적방지

시설 설치 시 10⁻⁵로 적용할 수 있다(MOE 2013). 본 연구에서는 10⁻⁶을 기준으로 검토하였다.

• 발암위해도(Cancer risk) =
노출농도(µg/m³) × 호흡단위위해도(µg/m³)⁻¹

3) 위해성 평가 결과

Table 8에 제시된 최대 노출 농도를 기준으로 비발암성 물질은 물질별 호흡노출참고치(RfC)를 고려한 위해도 지수를 산정하고, 발암성 물질은 호흡단위위

Table 10. Inhalation unit risk of carcinogenic compounds (Industrial complex)

Compounds	Inhalation unit risk (µg/m³) ⁻¹	Compounds	Inhalation unit risk (µg/m³) ⁻¹
HCHO	1.3 × 10 ⁻⁵	Cd	1.8 × 10 ⁻³
Ni	2.4 × 10 ⁻⁴	As	4.3 × 10 ⁻³
Cr ⁶⁺	1.2 × 10 ⁻²	C ₆ H ₆	7.8 × 10 ⁻⁶
CH ₂ =CHCl	4.4 × 10 ⁻⁶	-	-

Table 11. Hazard quotient of Non-carcinogenic compounds

Compounds	Hazard quotient				Ratio		
	CASE 1 (a)	CASE 2 (b)	CASE 3 (c)	CASE 4 (d)	(a) / (b)	(c) / (b)	(d) / (b)
H ₂ S	0.128	15.246	3.075	14.287	0.008	0.202	0.937
C ₈ H ₈	0.002	0.027	0.005	0.021	0.076	0.189	0.785
HCN	0.067	18.794	4.925	20.713	0.004	0.262	1.102
HCl	0.266	1.403	0.302	0.527	0.190	0.215	0.375
NH ₃	0.307	0.342	0.311	0.324	0.898	0.910	0.948

Table 12. Cancer risk of Carcinogenic compounds

Compounds	Cancer risk				Ratio		
	CASE 1 (a)	CASE 2 (b)	CASE 3 (c)	CASE 4 (d)	(a) / (b)	(c) / (b)	(d) / (b)
C ₆ H ₆	1.55E-05	2.55E-04	6.58E-05	5.94E-05	0.061	0.257	0.232
As	3.07E-05	1.59E-03	3.19E-04	8.94E-04	0.019	0.201	0.564
Cd	2.05E-06	2.48E-04	4.84E-05	3.46E-04	0.008	0.195	1.398
Cr ⁶⁺	1.08E-04	5.04E-04	9.60E-05	8.46E-05	0.214	0.191	0.168
Ni	1.25E-04	5.87E-04	1.19E-04	1.24E-04	0.213	0.202	0.211
HCHO	1.03E-05	1.02E-04	3.13E-05	4.54E-05	0.101	0.307	0.445
CH ₂ =CHCl	2.64E-06	2.10E-04	5.59E-05	6.70E-05	0.013	0.266	0.318

해도(Inhalation unit risk)를 고려하여 발암 위해도 를 산정하였다.

비발암성 물질에 대한 위해도 지수 산정결과 Table 11과 같이 CASE 1은 전체 물질이 위해도 지수 1을 만족하여 유해한 영향이 없는 것으로 검토되었고, CASE 2는 황화수소(H_2S), 시안화수소(HCN) 및 염화수소(HCl), CASE 3, 4는 황화수소(H_2S), 시안화수소(HCN)가 위해도 지수 1을 초과하는 것으로 검토되었다. CASE 2 대비 물질별 위해도 지수 비율을 살펴보면 CASE 1은 0.004~0.898, CASE 3은 0.189~0.910, CASE 4는 0.375~1.102 수준을 보였다.

발암성 물질에 대한 발암 위해도 산정 결과 Table 12와 같이 CASE 1의 카드뮴(Cd), 염화비닐($CH_2=CHCl$)을 제외한 나머지 물질과 CASE 2~4의 전체 물질이 위해도 판단기준인 10^{-6} 을 초과하는 것으로 검토되었다. CASE 2 대비 물질별 발암 위해도 비율을 살펴보면 CASE 1은 0.008~0.214, CASE 3은 0.191~0.307, CASE 4는 0.168~1.398 수준을 보였다.

IV. 결론 및 고찰

본 연구는 실제 산업단지 개발 사례와 기 수행된 건강영향평가를 중심으로 건강영향평가 매뉴얼 등에 명시된 배출량 원단위 산정방법을 각각 다르게 적용하여 유해대기오염물질에 대한 배출량을 산정하고, 대기확산모델링(CALPUFF) 수행 결과에 현황농도를 가중한 노출농도를 예측하여 건강 위해성을 평가하였다.

위해성 평가 결과 비발암성 물질은 CASE 1을 제외한 나머지 배출량 산정방법에서 위해도 지수를 초과하였고, 발암성 물질은 모두 발암 위해도를 초과하는 것으로 예측되어 위해도 기준을 준수하기 위한 배출부하량(임계배출량) 관리 등의 저감 대책 수립이 필요한 것으로 검토되었다. 위해도 수준이 대체로 높은 값을 나타내는 CASE 2 대비 물질별 위해도 수준 비율을 살펴보면, CASE 1은 0.004~0.898, CASE 3은 0.189~0.910, CASE 4는 0.168~1.398 수준으로 비교적 편차가 크게 나타났다. 그 이유는 배출량 산정 방법에 따른 영향으로 PRTR의 업종별 조사 업체수를 적용하여 평균 배출량을 산정한 CASE 1이 물질별

배출 업체수를 적용하여 최악의 경우를 가정한 CASE 2~4에 비해 가장 낮은 수준을 보였다. 그리고 3개년 PRTR의 중간값 평균을 적용한 CASE 4는 1개년도 PRTR을 적용한 CASE 2에 비해 연도별 PRTR 배출량 변동에 따른 과대, 과소 예측 가능성은 감소시킬 수 있었으나, 여전히 위해도 기준을 초과하는 수준의 높은 배출량을 보였다. 또한 산업입지 원단위상 업종 평균면적을 적용한 CASE 2에 비해 입주의향서의 요청면적을 적용한 CASE 3가 입주예정 업체수의 감소로 배출량이 낮게 산정되었으나, 입주의향서를 제출한 기업의 실제 입주여부는 불확실하여 과소 예측 가능성을 가지고 있는 점 등을 미루어 보았을 때 배출량 산정시 원단위 적용에 대한 개선이 필요할 것으로 판단된다.

아울러 본 사례 연구를 통해 발견된 문제점에 대해 아래와 같이 제안하여 향후 진행되는 건강영향평가 방법론 개선 연구 및 매뉴얼 개정 시 참고자료로 제공하고자 한다.

첫째, 배출량 산정 시 근거자료 적용에 대한 일관성이 필요하다. 본 사례 연구에서도 볼 수 있듯이 건강영향평가 매뉴얼 등에 명시된 자료를 활용하여도 원단위 적용 방법에 따라 상당한 배출량 차이를 보였다. 본 연구에서 검토한 배출량 산정 방법은 기 수행된 건강영향평가 실제 사례임을 고려하였을 때, 평가자의 배출량 산정 방법에 따라 결과가 다르게 나올 수 있음을 알 수 있다. 따라서 향후 건강영향평가 매뉴얼 개정 시 PRTR 활용 및 입주 예정 업체수 적용에 있어 일관성이 수반되어야 건강영향평가 방법론에 대한 혼란을 줄이고 건강영향평가에 대한 신뢰성이 확보되리라 예상된다.

둘째, 건강영향평가에 최적화된 배출계수 개발이 필요하다. PRTR의 경우 연도별 조사 자료의 편차로 해당년도를 어떻게 선택하느냐에 따라 배출량 차이를 보였으며, CASE 1과 같이 다른 산정방법 보다 배출량이 현저히 낮게 산정된 경우에도 발암 위해도를 만족시키지 못하여 추가 저감 대책이 필요한 것으로 검토되었다. 따라서 PRTR을 활용하여 최악의 경우를 가정하기 보다는 실제 운영되는 산업단지 사례를 토대로 개발된 배출량 원단위를 적용한다면 위해성 평

가에 대한 신뢰성이 높아지리라 예상된다.

셋째, 현황 조사결과에 대한 신뢰성 향상이 필요하다. 건강영향평가 시 노출농도는 현황농도에 예측 농도를 가중하여 평가하게 되므로 현황농도는 중요한 요소이고, 환경 대기 중 유해대기오염물질은 배출가스와 달리 저 농도로 존재하여 측정·분석방법에 따른 오차가 발생할 가능성이 크다. 본 연구에서도 현황 농도가 대부분 검출한계 이하로 조사되어 분석기기의 검출한계를 확인한 결과, 일부 물질의 경우 분석기와 분석방법의 한계로 국가측정망에서 흔히 검출되는 물질임에도 검출한계 이하로 나타났다. 따라서 환경 대기 중 극미량 농도 측정·분석방법에 대한 검증 및 정도관리, 검출한계 및 정량한계 제시, 인근 국가측정망 또는 연구문헌 결과와 비교 등으로 현황농도에 대한 신뢰성을 높이는 방안이 필요할 것으로 예상된다.

References

- Baek SO, Kang BW, Han JS, Lee MD, Lee HS, Kim JH, Son ES. 2009. Concentration Characteristics of Airborne Hexavalent Chromium in the Industrial Area. J KOSAE. 25(3): 179-187. [Korean Literature]
- EIASS. Environmental Impact Assessment Support System[Internet]. Available from: <https://eiass.go.kr>.
- Joseph SS, David GS, Robert JY. 2000. A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model. Earth Tech, Inc.
- KEI. 2005. The Application of Air Quality Models on Environment Impact. pp.44-50. [Korean Literature]
- LH. 2015. Estimation of basic unit for Industrial sites. p.79. [Korean Literature]
- Ministry of environment Korea(MOE). 2007. A study on the utilization guidelines of the environmental impact prediction model. pp.289-299. [Korean Literature]
- Ministry of environment Korea (MOE). 2009. User Guide for Environmental Impact prediction Model. pp.20-23. [Korean Literature]
- Ministry of environment Korea (MOE). 2010. Development of health impact assessment techniques and pilot project research(IV). pp.1-2. [Korean Literature]
- Ministry of environment Korea (MOE). 2013. Manual of evaluation of health impact items for preparation of hygiene and public health items in environmental impact assessment. pp.7, 14-23. [Korean Literature]
- Ministry of environment Korea (MOE). 2014. A Study on Implementing the Plan for Improving Health Impact Assessment. pp.3, 149-166. [Korean Literature]
- Ministry of environment Korea (MOE). 2016a. Survey report on pollutant release and transfer registers(2014). pp.5, 12-15. [Korean Literature]
- Ministry of environment Korea (MOE). 2016b. Annual report of air quality in Korea 2015. [Korean Literature]
- Ministry of environment Korea (MOE). 2017. A Study on the Improvement of Health Impact Assessment Methodology. pp.3-4, 22-24. [Korean Literature]
- Park JH. 2008. Meteorological Field Generation Method for CALPUFF Model. Master's Thesis. Inha University, Inchen. p.5. [Korean Literature]
- PRTR. Pollutant Release and Transfer Registers [Internet]. Available from: <https://icis.me.go.kr/prtr/main.do>.