



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士學位論文

사업장폐기물 소각시설 배출
대기오염물질에 대한 인체 위해성 평가

Human Risk Assessment on Air Pollutants
generated from Industrial Waste Incineration
Facilities

蔚山大學校 大學院

建設環境工學科

金珍佑

사업장폐기물 소각시설의
대기오염물질에 대한 인체 위해성 평가

指導教授 朴興錫

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함

2022 年 02 月

蔚山大學校 大學院

建設環境工學科

金珍佑

金珍佑의 工學碩士學位 論文을 認准함

審査委員 이 병 규 (印)

審査委員 경 대 승 (印)

審査委員 박 흥 석 (印)

蔚 山 大 學 校 大 學 院

2022年 02月

국문 요약

우리나라는 1970년대 이후 건설업, 제조업 등의 산업활동이 크게 번성하였고, 2000년대에 들어서 도시화가 본격적으로 진행되었다. 도시화가 이루어지면서 경제가 급격히 성장함에 따라 가계 소득이 증대되어 삶이 윤택해지면서 가정에서 소비가 많이 활성화되어 가계에서 배출되는 생활계폐기물이 많이 발생하였다. 또한 제조업, 건설업 등의 부흥으로 사업장폐기물도 많이 발생했다.

우리나라에서 급격히 발생한 폐기물을 처리하기 위해 매립, 소각, 재활용에 의한 폐기물 처리 방법을 주로 사용하였다. 특히, 매립에 의한 폐기물 처리 방법은 국토면적이 한정적인 우리나라의 환경적 제한사항에 부딪혀 증가한 폐기물을 처리하기 위해서 매립지 부지 선정 문제로 인하여 일정 비율을 소각에 의한 폐기물 처리 방법을 채택하고 있다. 폐기물 발생량에 대한 소각비율은 전국단위 6%로 일정한 반면에 울산지역은 약 2배 높은 소각 비율을 수행해 왔다.

2차 산업에 의한 경제활동이 주를 이루자 지구온난화라는 국제적 공동문제가 발생하였고, 국제적으로 미세먼지와 온실가스와 관련하여 기후변화 대응에 대한 관심이 높아짐에 따라 국내에서도 대기환경 영향 분석 및 관리에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

본 연구에서는 전국보다 높은 비율로 폐기물 소각을 해온 울산의 폐기물 처리 실태를 통해 사업장폐기물 소각시설에서 배출되는 대기오염물질이 울산지역 대기환경에 미치는 영향에 대한 연구가 이루어져야 할 필요가 있다고 판단하여 수행했다.

먼저, 사업장폐기물 소각시설에서 배출되는 대기오염물질의 영향범위 및 영향농도를 대기

질 예측 모델을 이용하여 산정하고 예측을 할 수 있다. 그리고 모델링을 통해 얻은 결과를 바탕으로 건강영향평가 중 비발암성 물질 평가와 발암성 물질 평가를 통한 위해도 평가를 수행하여 울산지역 사업장폐기물 소각시설에서 배출되는 대기오염물질이 울산시민과 지역 대기 환경에 미치는 영향을 평가할 수 있다.

사업장폐기물 소각시설과 관련하여 전국 폐기물 발생 및 처리현황은 환경부의 자료를 참고하였고, 국가 통계포털에서 울산지역 소각시설의 대기오염물질 배출량과 울산지역 폐기물 처리현황을 자료로 하였다.

대기질 예측 모델을 활용하기 위해 한국환경공단에서 제시하는 굴뚝자동측정기기(TMS) 결과 데이터, 기상청에서 제공하는 기상자료, GOOGLE EARTH 및 WEBGIS를 이용한 위치 및 지리, 지형자료를 이용하였다.

인체위해도 평가를 위해 대기오염물질 농도는 환경부와 한국환경공단에서 제공한 데이터를 활용하였고, 비발암성 및 발암성 물질 평가를 위해 필요한 노출계수는 최근 국립환경과학원에서 발간한 노출계수 핸드북을 참고하였다.

해당 연구를 통하여 대기질 예측 모델을 일반대기오염물질과 특정대기오염물질로 나누어 수행을 하였고, 예측 결과는 울산지역에서 사업장으로부터 반경 10 km까지 영향범위에 들어섰고, 반경 4km까지는 인체에 영향을 끼치는 수준이다.

건강영향평가를 비발암성 물질과 발암성 물질로 나누어 평가를 수행한 결과, 예측농도는 인체에 전체적으로 영향을 미치는 수준은 아니었지만 발암성 물질의 경우 미량의 농도에도 그 영향은 파급적이기 때문에 사업장폐기물 소각시설에 대한 지속적인 모니터링과 관리가 필요하다.

본 연구를 통하여 우리나라에서 발생하는 폐기물 발생량 및 처리방법에 대한 개선 방안을 제시할 수 있고, 대기보전 특별대책지역 안에 있는 사업장폐기물 소각장 운영방안에 대한 제언을 할 수 있는 정책 참고자료로 사용될 수 있는 기대효과가 있다.

그리고 소각시설에서 배출되는 대기오염물질에 대한 모니터링과 영향 평가를 위한 한계점에 대해 확인하고 이를 개선할 수 있는 방안 또한 찾을 수 있을 것으로 기대하고, 울산지역의 소각시설의 위치적 조건에 따른 그 영향의 미비성을 관리하기 위해서는 총량적인 관리가 필요할 것으로 판단한다.

목차

국문 요약.....	i
List of Tables.....	vi
List of Figures.....	vii
I. 서론.....	1
1. 연구 배경 및 필요성.....	1
2. 연구 목적 및 내용.....	6
II. 본론.....	8
1. 문헌고찰.....	8
2. 이론적고찰.....	14
2.1. 분산모델.....	14
2.1.1. 확산방정식.....	14
2.1.2. 가우시안 플룸식(Gaussian Flume Equation).....	15
2.1.3. 가우시안 퍼프식(Gaussian Puff Equation).....	17
2.2. 분산 모델의 종류.....	19
2.2.1. 상자모델(Box Model).....	19
2.2.2. 가우시안 플룸 모델(Gaussian Flume Model).....	20
2.2.3. 라그랑지안 모델(Lagrangian Model).....	20
2.2.4. 오일러리안 모델(Euler Model).....	20
2.3. 대기확산 모델링.....	21
2.3.1. WRF 모델.....	23
2.3.2. ISC3 모델.....	24
2.3.3. CMAQ 모델.....	25
2.3.4. CALPUFF 모델.....	26

2.4. 건강영향평가	27
3. 자료 및 연구방법	30
3.1. 연구자료.....	30
3.2. 연구방법.....	32
3.2.1. CALPUFF 모델	32
3.3. 연구결과.....	36
3.3.1. 대기 모델 결과.....	41
3.3.2. 인체 위해성 평가.....	48
3.3.3. 평가 결과.....	49
3.3.4. 한계점.....	50
Ⅲ. 결론	51
참고문헌	53
Abstract	54

List of Tables

Table 1 Effluent quality standard of air pollutants in waste incineration facilities (Gases) (law.go.kr)	9
Table 2 Effluent quality standard of air pollutants in waste incineration facilities (Gases) (law.go.kr) (Continued)	10
Table 3 Effluent quality standard of air pollutants in waste incineration facilities (Solids) (law.go.kr)	11
Table 4 Classification of Air Dispersion Models	19
Table 5 Type of Air Modeling	21
Table 6 Classification of domestic and international carcinogenic information	29
Table 7 CALMET Supporting Tool	33
Table 8 Information of Input Data in CALPUFF	34
Table 9 Non-carcinogenic risk assessment	48
Table 10 Carcinogenic risk assessment	49

List of Figures

Figure 1 Waste Generation in South Korea (Ministry of Environment, 2019)	1
Figure 2 Current Methods of Disposal 2014- 2018 (Ministry of Environment, 2019)	3
Figure 3 Incineration Portion of the Generated Waste- National level and Ulsan city (Ministry of Environment,2019).....	4
Figure 4 WRF Modeling System Flow Chart	24
Figure 5 CMAQ Modeling System.....	26
Figure 6 Location of Incineration Facilities in Ulsan city (GOOGLE EARTH)	30
Figure 7 CALPUFF System	32
Figure 8 Incineration condition in Ulsan (Ministry of Environment, 2020)	36
Figure 9 Dust Emission for 5 years in Incineration Facilities (kostat.go.kr).....	37
Figure 10 SO _x Emission for 5 years in Incineration Facilities (kostat.go.kr).....	37
Figure 11 NO _x Emission for 5 years in Incineration Facilities (kostat.go.kr).....	38
Figure 12 HCl Emission for 5 years in Incineration Facilities (kostat.go.kr)	39
Figure 13 CO Emission for 5 years in Incineration Facilities (kostat.go.kr)	39
Figure 14 Distribution of general air pollutants emitted by industrial waste	

incineration facilities 43

Figure 15 Distribution of Specific air pollutants emitted by industrial waste

incineration facilities 47

I. 서론

1. 연구 배경 및 필요성

우리나라는 1970년대 이후로 건설업, 제조업 등의 산업이 많이 발전하였고, 2000년대에 들어서 도시화가 진행되었다. 가계 소득이 증대됨에 따라 삶이 윤택해지면서 각 가정에서 소비량이 증가하여 생활쓰레기부터 각 산업 분야의 경기 활성화로 인한 사업장폐기물까지 전체 폐기물 발생량이 증가하고 있다.

아래 그래프는 환경부에서 발표한 2014년부터 2019년까지 전국 폐기물 발생량을 바탕으로 폐기물 종류별로 나타낸 것이다.

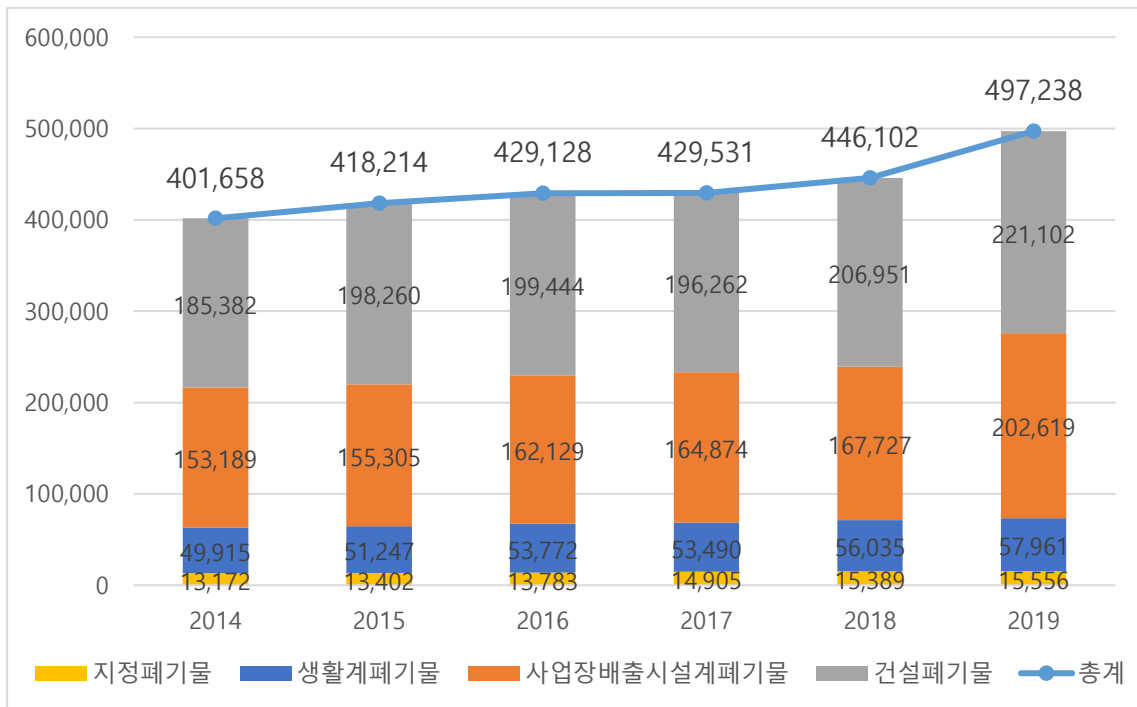


Figure 1 Waste Generation in South Korea (Ministry of Environment, 2019)

전국 폐기물 총량은 2014년 기준 401,658톤/일에서 5년이 지난, 2019년 기준 497,238톤/일로 95,580톤/일이 증가하였다. 2014년부터 2019년까지 폐기물 발생량 대비 사업장 배출시설계폐기물은 49,430톤/일, 건설폐기물은 35,720톤/일, 지정폐기물은 2,384톤/일, 생활계폐기물은 8,046톤/일로 비율을 차지하였고, 각각 24.4%, 16.2%, 15.3%, 13.9% 증가하였다.

국내에서는 폐기물을 처리하기 위해 매립, 소각, 재활용 3가지 처리방법을 활용하고 있다. 특히 매립 위주로 폐기물을 처리해오다 국토면적이 한정적인 우리나라의 한계에 부딪혀 증가한 폐기물을 처리하기 위해서 매립지 부지 선정 문제로 인하여 일정 비율을 소각에 의한 폐기물 처리 방법을 채택하고 있다.

폐기물 관리법 제2조제7호 중 '가. 폐기물을 재사용·재생이용하거나 재사용·재생이용할 수 있는 상태로 만드는 활동, 나. 폐기물로부터 에너지법 제2조제1호에 따른 에너지를 회수하거나 회수할 수 있는 상태로 만들거나 폐기물을 연료로 사용하는 활동으로서 환경부령으로 정하는 행동'과 환경부령 제942호 자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률 시행규칙에 의거하여 지속적으로 재활용 비율이 증가하고 있다.

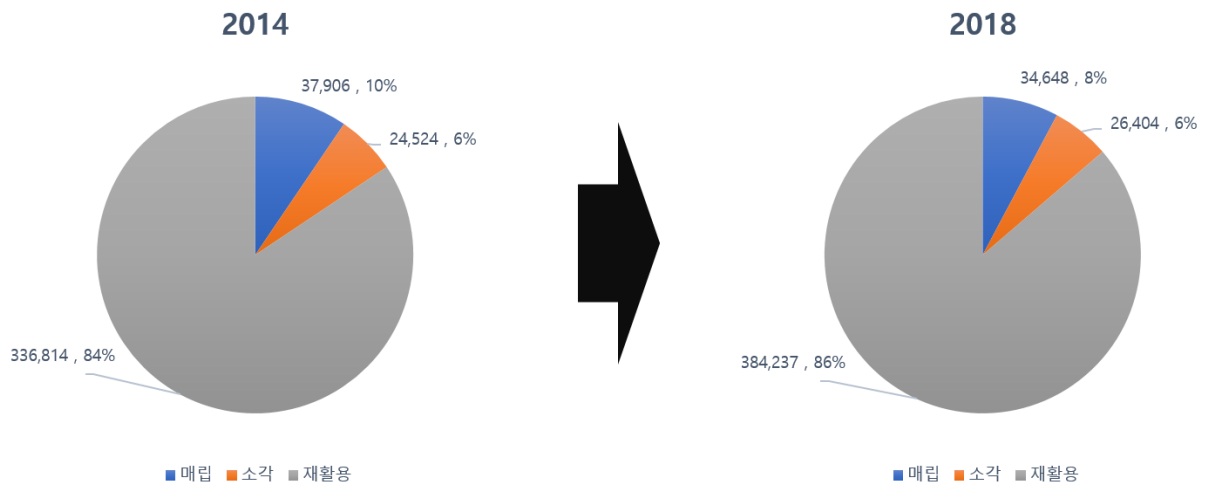


Figure 2 Current Methods of Disposal 2014- 2018 (Ministry of Environment, 2019)

2014년과 2018년 모두 폐기물 발생량 대비 재활용, 매립, 소각 순으로 폐기물 처리방법으로 많이 이용되었다. 재활용 비율은 21.7% 상승하였고, 소각 비율은 5.6% 상승하였고, 매립 비율은 24% 하락하였다. 매립이 하락한 것은 국내 토지 부족으로 인한 매립지 부지 선정 문제와 관련이 있다.

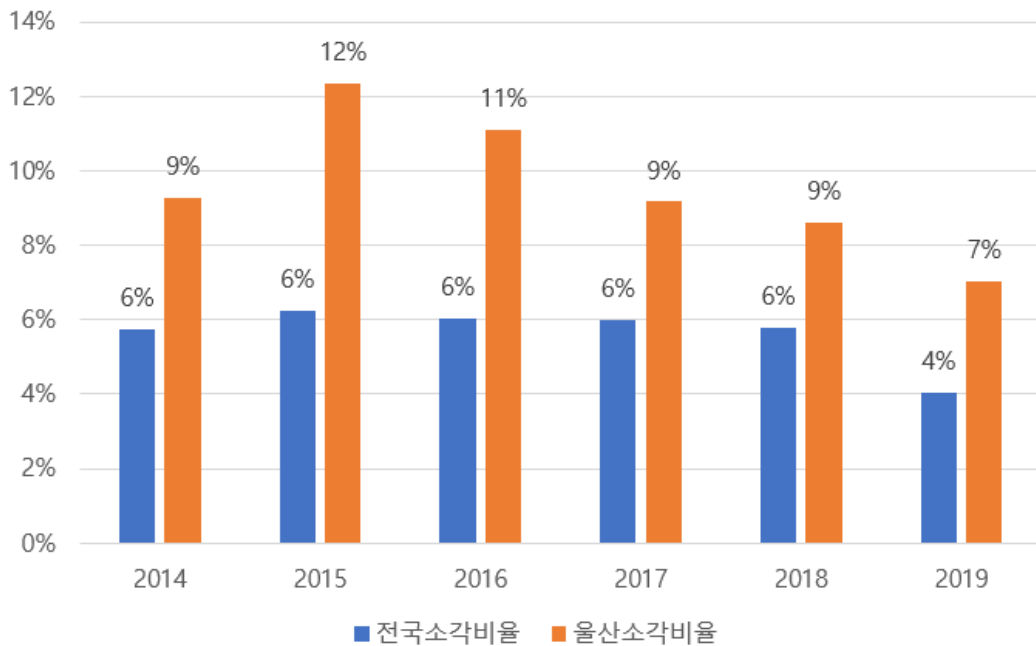


Figure 3 Incineration Portion of the Generated Waste- National level and Ulsan city (Ministry of Environment,2019)

그리고 폐기물 발생량에 대한 소각비율은 전국 단위에서는 2014년부터 2018년까지 6%로 거의 일정 비율 소각에 의한 방법으로 처리가 되고 있는 것을 확인할 수 있다.

하지만, 울산광역시의 경우 울산, 미포 및 온산 국가산업단지를 형성하면서 1999년 03월에 환경부고시 제99-35호¹ 대기보전 특별대책지역 지정 및 동지역내 대기오염저감을 위한 종합대책 제2조에 의해 특별대책지역으로 지정되면서 배출허용기준을 적용하여 대기환경에 대한 특별한 관리가 이루어지도록 만들어진 상황이다.

¹ 대기보전 특별대책지역 지정 및 동 지역 대기오염저감을 위한 종합대책은 환경정책기본법 제22조의 규정에 의한 대기보전 특별대책지역의 지정 및 동 지역 안의 대기오염저감을 위한 종합대책과 대기환경보전법 제 28조의2의 규정에 의한 휘발성 유기화합물질 관리에 관한 사항을 규정함을 목적으로 한다.

하지만 전국소각비율과 울산소각비율에 대한 2014년부터 2019년까지의 그래프를 통해 울산은 전국보다 높은 비율로 소각에 의한 폐기물 처리를 하고 있는 실정임을 알 수 있다. 따라서 사업장폐기물 소각시설에서 배출되는 대기오염물질이 울산지역 대기환경에 미치는 영향에 대한 연구가 이루어져야 할 필요성이 있다.

2. 연구 목적 및 내용

본 연구는 울산 지역의 사업장폐기물 소각시설에서 배출되는 대기오염물질이 지역 내에 확산되어 미치는 영향 범위를 산정하고, 영향농도를 예측하여 울산 지역 대기환경에 미치는 영향을 확인하는 것을 목적으로 한다. 또한 결과치를 바탕으로 인체 위해성 평가 중 비발암성 물질과 발암성 물질에 대한 평가를 수행하여 사업장폐기물 소각시설에서 배출되는 대기오염물질이 울산시민의 건강에 미치는 영향은 얼마나 위대한지에 대해 정량화하여 확인하고, 결과에 대해 토의하는 것을 최종 목적으로 한다.

이번 연구를 통해 사업장폐기물 소각시설이 울산 지역 대기환경과 울산 시민의 건강에 미치는 영향을 확인함으로써 대기보전 특별대책지역 안에 있는 사업장폐기물 소각장에 대해 제언을 할 수 있는 정책 참고자료로써 제시할 수 있다. 또한 울산 지역의 대기환경에 영향을 미칠 수 있는 다른 시설에 대한 연구도 활발히 진행될 수 있는 발판을 마련할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 폐기물 발생량 및 소각처리 현황은 환경부에서 발간한 전국 폐기물 발생 및 처리현황, 국가 통계 포털의 폐기물 처리현황_사업장배출시설계 폐기물을 참고한다. 또한 대기질 예측 모델을 활용하기 위해 한국환경공단에서 제공하는 굴뚝자동측정기기(TMS) 측정 결과 데이터, 기상청에서 제공하는 기상자료, GOOGLE EARTH 기반으로 위치정보, GIS기반으로 한 지형자료를 활용하였다. 울산지역 사업장폐기물 소각시설에 대해 연구를 수행하였다.

또한 대기질 예측 모델을 활용하기 위해서 대기오염물질 목록 및 배출농도가 필요한데, 모델링 수행을 통해 사업장폐기물 소각시설에서 배출하는 대기오염물질 배출량을 추정하고, 인

체 위해성 평가를 수행하여 우선 관리가 필요한 대기오염물질을 선별하여 보여준다.

Ⅱ. 본론

1. 문헌고찰

본 연구에서는 사업장폐기물 소각시설에서 배출되는 대기오염물질의 확산과 그 농도를 예측하고, 예측 결과를 바탕으로 대기오염물질이 울산시 내의 대기환경에 어떤 양상을 보이는지, 시민들에게 미치는 영향은 어떠한 수준인지를 알아보기 위해 인체 위해성 평가를 진행하고자 한다.

따라서 해당 연구를 진행하기 전에 연구방향을 잡고자 선행연구에 대해 알아보았다.

먼저, 현행 대기환경보전법 시행규칙 제15조 관련하여 대기오염물질의 배출허용기준은 가스형태의 물질과 입자형태의 물질로 나뉘는데 배출시설에 따라 배출허용기준은 달라진다.

본 연구에서는 폐기물 소각시설에서 배출되는 대기오염물질을 대상 물질로 하였고, 소각 시설에서 현재 따르고 있는 배출허용기준을 가스상 물질과 입자상 물질로 나누어 아래에 표로 나타냈다.

Table 1 Effluent quality standard of air pollutants in waste incineration facilities (Gases)
(law.go.kr)

Air Pollutants	Effluent Quality Standard (ppm)	Air Pollutants	Effluent Quality Standard (ppm)
NH3	Below 20(12)	HCN	Below 4
Br	Below 3	Benzene	Below 6
Phenol	Below 4	Hg	Below 0.05(12)
As	Below 0.2(12)	DCM	Below 50
Benzene	Below 6	TCE(Tri-CE)	Below 50
AN	Below 3	1,3-Butadiene	Below 6
Chloroform	Below 5	1,2-DCE	Below 12
Styrene	Below 23	TCE(Tetra-CE)	Below 10
CCl4	Below 3	Ethylbenzene	Below 23

Table 2 Effluent quality standard of air pollutants in waste incineration facilities (Gases)
(law.go.kr) (Continued)

Air Pollutants	Effluent Quality Standard (ppm)	Air Pollutants	Effluent Quality Standard (ppm)
CO	Capacity- Over 2 ton/hr, below 50(12) Less 2 ton/hr, below 200(12)	HCl	Capacity- Over 2 ton/hr, below 12(12) Less 2 ton/hr, below 15(12)
SO ₂	Capacity- Over 2 ton/hr, below 50(12) Less 2 ton/hr, below 70(12)	CS ₂	Capacity- Over 0.2 ton/hr, below 2(12) Less 0.2 ton/hr, below 4(12)
F	Capacity- Over 0.2 ton/hr, below 2(12) Less 0.2 ton/hr, below 2(12)		

**Table 3 Effluent quality standard of air pollutants in waste incineration facilities (Solids)
(law.go.kr)**

Air Pollutants	Effluent Quality Standard (mg/Sm3)
Dust	<u>Installed before 31 December 2014</u> Capacity Over 2 ton/hr, below 15(12) 0.2 ton/hr- 2 ton/hr 20(12) Less than 0.2 ton/hr, below 25(12) <u>Installed after 1 January 2015</u> Capacity Over 2 ton/hr, below 10(12) 0.2 ton/hr- 2 ton/hr, below 15(12) Less than 0.2 ton/hr, below 15(12)
	Cd
Pb	Capacity Over 2 ton/hr, below 0.2(12) 0.2 ton/hr- 2 ton/hr, below 0.4(12) Less 0.2 ton/hr, below 0.8(12)
Cr	Below 0.2(12)

Cu	Below 4
Ni	Below 2
Zn	Below 4

폐기물 소각시설에서 배출되는 대기오염물질이 대기환경에 미치는 영향에 대해 알아보는 연구는 지역별, 물질별 등 다양하게 이루어졌다.

지정폐기물 소각시설에서 배출되는 입자상 물질과 가스상 물질의 제어를 위해 배출특성을 연구한 사례가 있다.

먼저, 지정폐기물 소각시설에서 배출되는 대상 물질의 공정별 시료를 채취하여 물질별로 분석을 통해 배출특성을 파악하였다. 해당 연구를 통하여 폐기물 소각시설에서 대기오염물질 저감을 위해 방지시설의 성능에만 치중하는 것이 아니라 미규제오염물질에 대한 대처방안이 필요하다는 결과를 내었다.(Park et al. 2007)

국내 산업폐기물 소각시설 대상으로 유해대기오염물질의 배출특성에 대해 연구한 사례가 있는데 유해폐기물 소각시설의 배출허용기준이 정해져 있지 않아 도시폐기물 소각시설의 배출허용기준이 적용되어 있었다. 해당 연구에서 소각시설에서 배출되는 유해대기오염물질의 배출특성을 측정하고, 분석하여 국내의 규정을 준수하고 있는지를 판단하고, 유해대기오염물질을 제어하기 위한 시설의 관리방안에 대한 기대를 나타내었다.(김정훈 (Jeong Hun Kim), 이상협 (Sang Hyeob Lee) , 서용철 (Yong Chil Seo) , 송금주 (Geum Ju Song) n.d.)

본 연구에서는 사업장폐기물 소각시설에서 배출되는 대기오염물질의 예측농도를 산정하

기 위해 대기예측 모델링을 수행한다. 대기오염물질 배출 예측을 위해서 대기모델링을 수행하는 것은 미국환경보호청(US EPA)에서도 권고하고 있으며, 현재 ISC3-PRIME, AERMOD, CALPUFF 등 목적에 따른 많은 모델링 프로그램이 있다.(구윤서 2001)

데이터 수집이 용이해지고, 기상상황을 예측가능해짐에 따라 대기예측 모델링을 이용한 대기환경 영향에 대한 연구는 활발히 진행되고 있는 추세이다.

확산모델을 이용하여 도심에서 추적자 확산 실험을 한 사례가 있는데 오염물질의 특성을 파악하여 기상모델로 산출된 결과를 정량적으로 파악을 하였고, 기상에 따른 국지적인 현상을 모사하는데 어려움을 보였다. 따라서 좁은 영역에 대한 기상정보의 오차의 발생을 줄여야 할 필요성이 있다.(Lee et al. 2016)

또한 기상모델과 대기확산 모델을 수행하고, 그 결과자료를 이용하여 화학사고 정도와 위험범위를 알아보고 특정 물질에 대한 위해성을 평가한 사례가 있다. 대기확산 모델을 수행하기 위해 CALPUFF를 수행하였는데 입력 정보를 분명히 하여야 정확한 모델을 수행할 수 있다. 해당 연구를 통해 화학사고 발생 시 발생지역과 누출물질의 노출기간에 대한 위해성 평가를 수행하여 위험지역을 예측할 수 있는 척도가 된다. 하지만 해당 연구에서도 물질에 대한 정보가 부족하거나 위해성 평가에서 사용되는 노출계수의 평균값 사용으로 인한 불확실성에 대한 한계점이 나타났다.(Lee et al. 2016)

선행연구를 살펴본 바와 같이 본 연구에서 사용하고자 하는 적절한 대기예측 모델링 선정에서부터 입력 데이터를 이용하여 결과를 산출하고, 예측결과를 바탕으로 인체 위해성 평가를 수행할 때 노출계수의 불확실도를 최소화하고자 관련 연구자료의 검토가 필요하다고 판단하였다.

2. 이론적고찰

본 연구를 수행하는데 대기질 예측 모델을 활용하는데 관련이 있는 많은 모델 중에 분산모델에 대해 알아야 할 기초적인 이론에 대해서 소개하고자 한다. 해당 이론을 통해 사업장폐기물 소각시설에서 배출되는 대기오염물질이 확산되어 어느 방향으로, 그리고 얼마나 농도가 분산되는지에 대해 알 수 있고, 근래 대기질을 예측하는데 사용하는 대기 모델들은 다음과 같은 이론에서 기초하였다.

2.1. 분산모델

분산은 공기가 운동으로 생성되는 바람에 의하여 일어나며, 공기의 움직임은 일반적으로 바람과 같은 공기의 평균적 이동과 불규칙적인 소용돌이 형태인 난류로 나눌 수 있다. 확산은 두 지점 사이에 농도 차이가 존재할 때 난류, 분자운동 등 불규칙적인 움직임에 의하여 농도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 매질이 이동하여 넓게 퍼지며 희석되는 현상을 뜻한다. 하지만 분산은 매질의 평균적인 이동에 의하여 오염물질이 수송되는 이류와 확산 현상이다.(이종범, 김신도, 백성옥, 김동술 2016)

2.1.1. 확산방정식

X-방향의 확산방정식이란, 좌변은 어떤 지점에 있어서 농도 C의 시간 변화율이고 우변은 시간에 대한 농도의 구배를 나타내는 식이다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{식 1}$$

여기서, k_x 는 x-방향의 난류확산 계수이다.

평균적인 바람에 의하여 오염물질이 이동하여 농도가 변화되는 경우를 미분형태로 나타내면 다음 식과 같은 1차원 이류방정식이 된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} \quad \text{식 2}$$

여기서, u 는 x-방향의 풍속을 뜻한다.

확산과 이류과정을 포함하기 위하여 식 1과 식 2를 더하고 y-방향과 z-방향을 포함하면 식 3과 같이 확산과정과 이류과정을 모두 포함하는 3차원 이류확산방정식 (또는 간단히 분산방정식)이 된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \left(u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad \text{식 3}$$

여기서, k_y, k_z 는 각각 y와 z-방향의 난류 확산 계수이고, v 와 w 는 y와 z-방향의 풍속을 말한다.

2.1.2. 가우시안 플룸식(Gaussian Plume Equation)

어떤 굴뚝에서 연기가 지속적으로 배출되고, 이때 시간에 따라서 배출량의 변화나 풍향, 풍속, 안정도 등의 기상조건의 변화가 없다고 간주하는 상태를 정상상태라 말한다. 이러한 정상상태 아래에서는 연기의 모양은 시간에 따라서 변화하지 않는 것처럼 보인다. 이와 같은 정상상태를 고려하면 아래와 같은 가정을 정할 수 있기 때문에 이류확산방정식 식은 간단한 형태가 된다.

기상자료의 단위시간 동안의 평균 풍향의 풍하 방향을 x-축으로 하면, y-축 방향의 풍속은

0이 되고, 이 시간 동안의 평균 수직방향의 풍속은 0으로 간주할 수 있다. 또한 보통 주 풍향인 x-축 방향으로 식 4와 같이 이류가 확산보다 현저히 커서 x-축 방향의 확산은 무시할 수 있다.

$$k_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \ll u \frac{\partial C}{\partial x} \quad \text{식 4}$$

정상상태라고 가정하므로, 시간에 따른 농도변화도 무시할 수 있다. 따라서 3차원 이류확산 방정식은 다음과 같이 간략화 된다.

한점에 모여 있던 오염물질은 시간이 지나면 대기의 난류운동에 따라 점차로 퍼져나가게 된다. 이때 난류는 3차원 공간에서 무작위 운동이므로 난류에 의한 확산도 무작위하게 퍼져나가게 된다. 그러므로 농도분포는 정규분포를 보인다.

수식에서 농도에 대한 해를 구하기 위해, 우선 연기의 중심축에 대한 농도분포가 정규분포를 보인다고 간주한 후, 확산계수를 연기의 확산폭으로 치환하면 다음과 같은 가우시안 플룸식의 기본형을 구할 수 있다.

$$C(x, y, z) = \frac{q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right)} \quad \text{식 5}$$

여기서 q는 오염물질의 단위시간당 배출량이며, σ_y 는 수평연기확산 폭이며, σ_z 는 수직연기확산 폭이다.

실제로 대기오염물질의 농도를 계산하기 위하여서는 굴뚝높이, 지표면에서의 반사를 고려하여야 하며 연기가 장거리로 퍼져나가는 경우에는 혼합층 상부에 존재하는 상층역전층과 지표면사이에서의 다중반사도 고려하여야 된다.

굴뚝에서 연기가 배출되어 풍하측으로 확산되는 경우, 연기모양과 농도분포는 연기의 중

심선에서 농도는 가장 높고, 가장자리로 갈수록 정규분포곡선에 따라 농도가 감소한다. 연기의 중심선에서 농도분포가 정규분포의 표준편차에 해당하는 지점까지의 거리가 연기의 확산 폭이며, 수평확산 폭이 σ_y , 수직확산 폭이 σ_z 이다. 굴뚝에서 배출된 연기가 상승하는 높이를 연기상승고라고 하며, 실제 굴뚝높이에 연기상승고를 합한 전체높이를 유효 굴뚝높이라고 한다.

2.1.3. 가우시안 퍼프식(Gaussian Puff Equation)

굴뚝에서 연속적으로 배출되는 연기를 작게 잘라서 각각의 연기덩어리를 이동, 확산시켜서 농도를 계산한 후, 모든 연기덩어리의 농도를 종합하여 대상지역의 농도분포와 시간변화를 계산하는 모델이다. 보통 굴뚝 1개당 1시간에 여러 개의 퍼프를 배출한다.

각각의 연기덩어리의 중심은 연기덩어리가 위치한 지점과 해당시각의 풍향과 풍속에 의하여 이동된다. 연기덩어리의 중심에서 확산에 의하여 연기가 퍼지는 형태는 정상분포를 이룬다는 가정 하에 임의의 시간 간격별로 농도분포를 계산한다.

한 개 퍼프의 농도분포를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$C(x, y, z, t) = \frac{M}{(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} F \quad \text{식 6}$$

$$F = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)} \quad \text{식 7}$$

여기서, C 는 농도 (g/m^3), x 는 퍼프 중심에서부터 주 풍향 방향으로의 거리 (m), y 는 퍼프 중심에서부터 주 풍향의 직각방향으로의 거리 (m), z 는 퍼프 중심으로부터의 고도 (m), M 은 퍼프 1개의 질량 (g), σ_x 는 풍하측 방향으로의 확산 폭 (m), σ_y 는 직각방향으로의 확산 폭 (m), σ_z 는 수직방향으로의 확산 폭 (m)이다.

굴뚝에서 시각 $t=0$ 에 배출된 퍼프 A는 시각 $t=1(t_1)$ 에는 동풍에 의하여 서쪽으로 이동하면서 난류에 의하여 작은 원 범위로 확산되며 $t=2$ 에는 남남동풍에 의하여 북북서 방향으로 이동하고 $t=3$ 에는 남동풍에 의하여 북서쪽으로 이동하면서 확산된다. 한편 $t=1$ 에 배출된 퍼프 B는 남남동풍에 의하여 $t=2$ 에는 굴뚝의 북북서 방향으로 이동한 후 $t=3$ 에는 굴뚝의 북서쪽으로 이동한다. 이와 같이 퍼프모델은 풍향과 풍속의 시간변화와 지역에 따른 풍향풍속의 차이를 고려할 수 있으며, 배출량의 시간변화도 계산 가능하다. 어떤 시간 동안의 평균농도의 수평분포를 계산하려면 매 시간 단계별로 퍼프의 위치와 확산폭으로 농도분포를 계산하고 그 시간까지 배출된 모든 퍼프에 대한 농도분포를 합하여 시간별 수평농도 분포를 계산한다. 그리고 시간별 농도분포를 대상기간동안 평균하여 평균수평분포를 구하게 된다.

2.2. 분산 모델의 종류

Table 4 Classification of Air Dispersion Models

Model	Details
Box Model	Mass Conservation Law
Gaussian Flume Model	Gaussian Flume Equation
Gaussian Puff Model	Gaussian Puff Equation
Lagrangian Model	Based on Lagrangian Coordinate
Eulerian Model	Based on Eulerian Coordinate

대기분산 모델이 응용되는 분야는 매우 광범위하고 사용목적에 따라 요구되는 기능도 다양하다. 적용대상에 따라 모델링지역의 수평규모가 수 km에서 수천 km까지 다양하며 적용지역의 지형도 평탄, 산악, 해안지역 등 다양하다. 대기분산 모델은 이론에 따라 상자모델, 가우시안 플룸 모델, 가우시안 퍼프 모델, 라그랑지안 모델, 오일러리안 모델이 있다.

2.2.1. 상자모델(Box Model)

상자모델(Box Model)은 오염물질의 질량보존의 법칙에 기본을 둔 모델로, 상자를 하나의 넓은 지역으로 가정하고 상자내부의 오염물질 배출량, 외부로 유입되는 오염물질, 화학반응에 의한 물질의 생성과 소멸을 고려한다.

2.2.2. 가우시안 플룸 모델(Gaussian Flume Model)

가우시안 플룸 모델(Gaussian Flume Model)은 굴뚝에서 배출된 오염물질의 농도분포가 정규분포를 이룬다고 가정한 정상상태 모델이다. 배출량과 기상조건이 시간에 따라 변화하지 않는 정상상태를 가정하며 화학반응을 고려하지 못한다. 계산과정이 단순하여 사용이 용이하여 환경영향평가 등의 실용적인 목적에 이용되는 등 많이 이용되는 모델 중 하나이다.

2.2.3. 라그랑지안 모델(Lagrangian Model)

라그랑지안 모델(Lagrangian Model)은 라그랑지안 좌표계(Lagrangian Coordinate)의 개념을 적용하여 좌표계의 원점을 공기의 움직임에 따라 이동시키면서 오염물질의 위치를 추적하여 농도를 계산하는 모델이다.

2.2.4. 오일러리안 모델(Euler Model)

오일러리안 모델(Euler Model)은 대상으로 하는 3차원 공간을 고정좌표계의 여러 개의 격자로 세분하여 각 격자별로 다음과 같은 이류확산방정식으로 이류, 확산, 화학반응 과정과 제거과정을 계산하여 오염농도의 3차원 분포와 시간변화를 계산하는 모델로서 3차원 격자 모델이라고도 한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial(uC)}{\partial x} - \frac{\partial(vC)}{\partial y} - \frac{\partial(wC)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right] + S + R - D$$

여기서, C는 대기오염 농도, u, v, w는 수평 및 수직 바람성분, K_x, K_y, K_z는 수평 및 수직 난류 확산계수를 나타내며, S는 오염물질의 배출량, R은 대기 중 화학반응에 의한 생성항, D는 건식 침적 또는 습식 침적에 의한 제거항을 나타낸다.

2.3. 대기확산 모델링

과학과 기술의 발달로 인해 컴퓨터의 성능 및 처리속도가 크게 향상됨에 따라 모델링 계산 속도에 의한 제한 요소가 많이 사라지게 되었다. 이에 따라 확산에 대한 이론이 많이 진보하게 되었고, 새로운 모델이 많이 개발되었다. 또한 일부 모델은 미국 환경보호청(EPA)에서 연구에 활용할 수 있도록 권고를 하고 있다.

대기확산 모델링은 앞에서 설명한 대기확산 방정식들을 이용하여 오염물질의 거동과 영향 범위, 영향 농도 등을 실제 기상 자료, 지형 자료를 바탕으로 현장 영향 평가를 위해 프로그램으로 개발된 것으로 현재 상용화 되어있는 대기질 예측모델은 다음과 같다.(Yoo 2020)

Table 5 Type of Air Modeling

Model	Features
AerScreen	A straightforward assessment model that provides the worst-case prediction results that can arise only with discharge conditions and simple elevation data as a screening version of the AERMOD model.
CALINE3	Easy to follow and simulate the effect of continuous line pollutants applying the Pasquill diffusion curve.
CAL3HC/CAL3QHCR	Appropriate for estimating the concentration of pollutants in areas where vehicles are congested, especially at intersections. It requires complex input data.
ISC3	Divided into long-term (ISCLT3) and short-term

	<p>(ISCST3) models.</p> <p>Contaminant half-life and chemical conversion rate, particle gravitational sedimentation, absorption and dry deposition, plume rise and building downwash is considered.</p>
AERMOD	<p>The assumption that the atmospheric state, which was a disadvantage of the ISC3 model, is spatially uniform and the problem of application in complex terrain are supplemented.</p> <p>It is easy to use for a relatively simple business and is currently the most widely used.</p>
CALPUFF	<p>Using the 3D meteorological field provided because of the meteorological model as input data. It can fully consider complex wind fields and terrain.</p>
CMAQ, CAMX, UAM	<p>Advection, diffusion, and reactions can be considered as the factors that determine the concentration of pollutants that may occur in the atmosphere. Difficult to calculate and operate emissions.</p>

오염물질에 대한 정보가 복잡하거나 미흡한 정보가 있는 경우 배출량 정보를 추정하는 별도의 프로그램이 활용되어야 하고, 대기질 예측에 영향을 미칠 것으로 예상되는 경우에는 별

도의 모델을 통해 추정을 해야 한다. 대기질 예측 모델만으로 다양한 경우의 현실을 묘사하는 것은 불가능하기 때문에 현실성 있는 모델링 결과를 산출하기 위해서 다양한 기법이 필요하다.

2.3.1. WRF 모델

WRF 모델은 미국 국립대기환경연구소(National Center for Atmospheric Research)에서 실제 기상예보에 활용하기 위해 제작한 대표적인 지역 기상모델이다.

WRF 모델은 연직격자로 Eulerian 질량좌표계를, 수평격자로 Arakawa-C 격자체계를 사용하며, 기상에 영향을 미치는 풍향, 풍속, 강우, 기온 등 기상인자의 관계를 질량, 운동량, 엔트로피, 스칼라량 등에 대한 3 차 시간 적분법을 통해 해석하는 플러스 형태의 방정식을 사용한다.

지표면을 가로·세로로 구분한 Eulerian 격자의 높이 방향으로 5~7 개로 구분된 Arakawa-C 격자가 이루는 입체모형의 셀(Cell)에 대하여 공기밀도, 기온, 기압, 습도 등 약 72 개의 기상정보를 바탕으로 셀 내의 기상현상을 예측하고, 공기가 해당 셀에서 다른 셀로 이동하게 되면 그 셀로 유입되는 공기 특성에 대한 정보를 다시 입력하여 차위의 셀에 대하여 기상현상을 예측하는 형태로 진행한다.

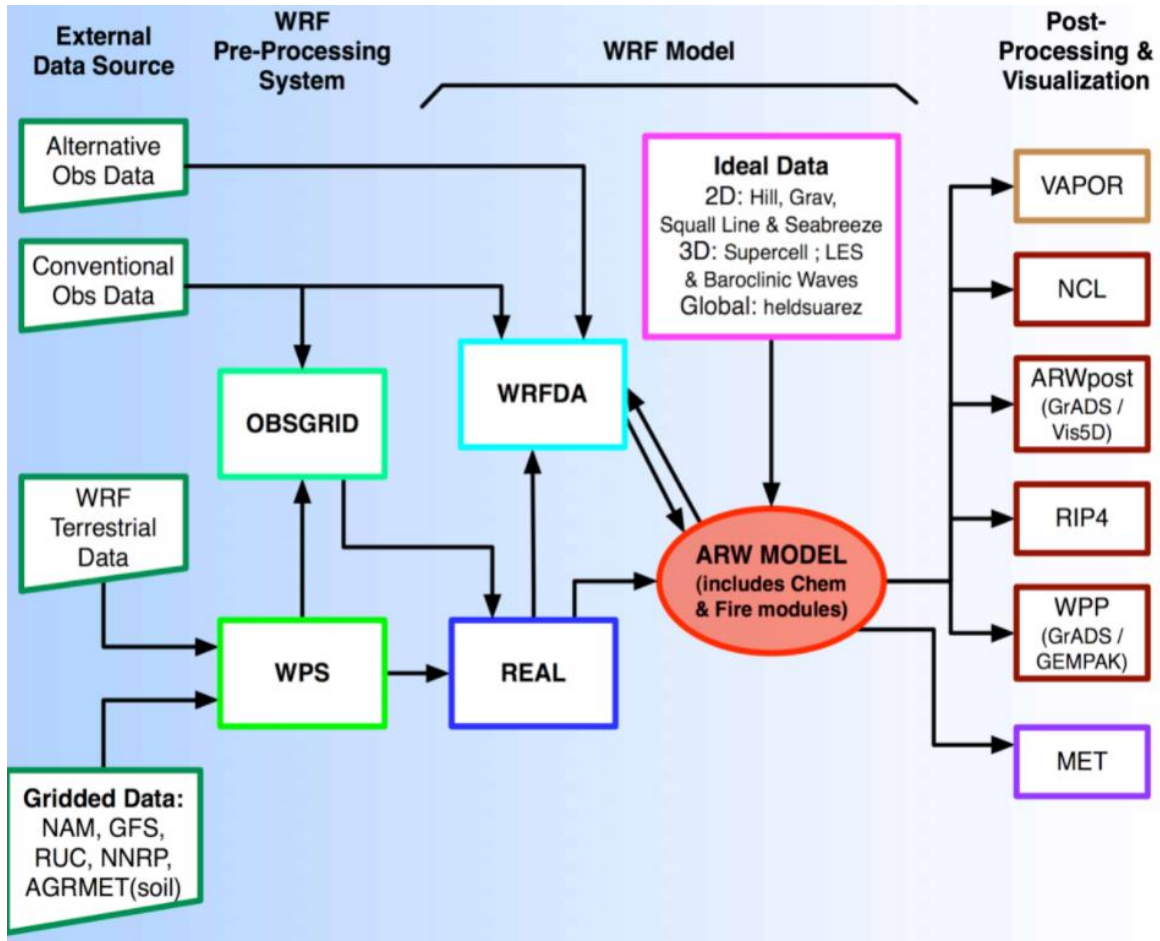


Figure 4 WRF Modeling System Flow Chart

2.3.2. ISC3 모델

대기오염물질 확산을 표현하는 기본 모델인 가우시안 모델의 발전된 모델이며, 미국에서는 사업장의 배출시설 허가 및 환경영향평가 등에서 주로 사용되고 있다.

ISC 모델의 물질 확산계산은 정적 계산에 해당되지만 기상모델과 접목하여 바람의 방향, 세기 등 기상자료를 연속정보로 입력하는 경우 사실상 오염물질 분포는 동적해석이 가능하고, 단기 모델과 장기 모델로 구분되지만 사업장에서 배출되는 오염물질의 확산을 모사할 때에는

일반적으로 단기 모델이 사용되며, 장기 모델이 필요한 경우에는 통상적으로 다른 개발된 다양한 다른 모델이 사용된다.

점배출원, 비점배출원, 건성침적, 습윤 침적, 지면 스크리닝 기법 등의 모듈로 구성되고, 점배출원 모듈은 가우시안 모델을 근간으로 풍하 방향으로 가로확산 및 세로확산이 모두 정규분포 함수라고 가정하고 공간의 각 지점에서의 오염물질 농도를 산정한다.

배출된 오염 물질은 바람의 방향에 따라 풍하 방향과 횡방향으로 확산되면 좌표의 각 지점(x, y, z)에서의 오염물질의 농도가 시간의 함수로 표현한다.

확산 수준은 파스칼 안정도 분류별 풍하 방향의 거리가 지수함수 형태로 적용되며, 풍속은 고도에 따라 다르기 때문에 고도별 풍속이 공기의 안정도 분류의 함수로 적용한다.

배기가스와 대기의 온도차에 의한 부력 배출과 관성에 의한 배출도 대기안정도가 불안정, 중립, 안정의 각 경우별로 배출속도의 함수로 표현되며, 이를 통해 굴뚝 높이 이상으로 상승하여 확산되는 배기가스의 실제 확산높이를 산정하여 반영한다.

배기가스의 배출속도와 풍속의 상관관계를 통해 굴뚝 끝에서의 와류 및 건물이 인근에 위치하여 발생하는 와류를 확인할 수 있다.

2.3.3. CMAQ 모델

EPA 에서 개발한 광역 대기질 예측 모델로서, 기본 모듈에서 최소 해상도가 3km*3km 이다.

모델링을 수행할 구획인 도메인을 설정하고 최소 3km*3km 의 격자로 세분화한 후, 각 격자에서는 오염물질이 완전 혼합한다고 가정하고 오염물질의 배출, 기상인자의 변화 등을

통해 도메인 전체에 대하여 각 격자에 따른 오염물질의 농도차이를 분석한다. 기상모델에서 사용되는 격자체계를 동일하게 이용하며, 격자로 구성된 도메인에 대해 가장 끝에 위치한 격자부터 도메인 외부에서 격자로 들어오는 오염물질 초기조건(ICON, Initial Condition) 및 경계조건(BCON, Boundary Condition)을 설정한다. 격자로 유입되는 물질, 격자 내의 배출원으로부터 배출되는 물질, 각 물질이 광화학 반응으로 생성·소멸과정 등이 계산되고 기상정보에 따라 풍하 방향의 다른 격자는 그것을 다시 초기조건 및 경계조건으로 인식하여 격자 내 오염물질 농도를 계산하는 방식으로 수행한다. 광역 모델이므로 미세 지역의 오염물질 분포를 예측하기 보다는 기상현상, 광화학 반응 등을 충실히 반영하여 현실에 근접한 모사가 가능한 것이 특징이다.

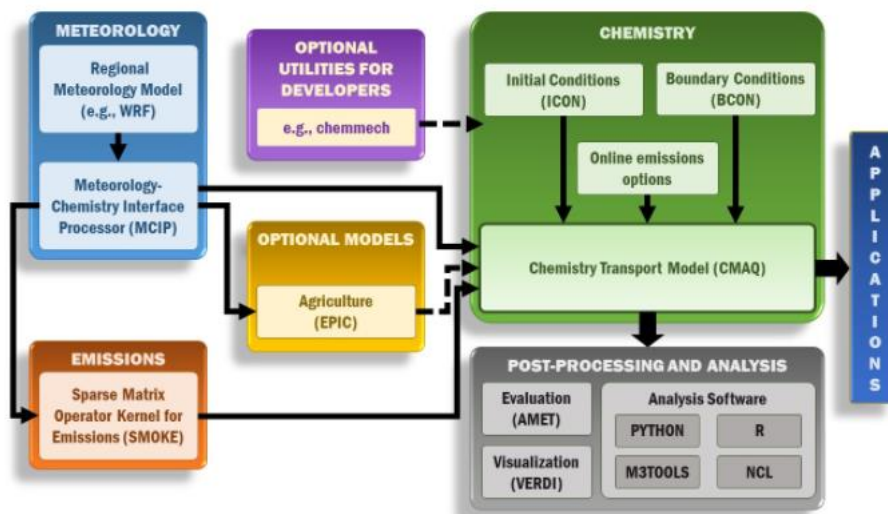


Figure 5 CMAQ Modeling System

2.3.4. CALPUFF 모델

CALPUFF 모델은 배출되는 연기가 퍼프(Puff) 로 배출된다고 가정하고, 시간 및 공간에 따른 바람장의 변화를 퍼프의 이동에 고려할 수 있는 비정상상태 모델이다.

정상상태 모델인 ISCST3 나 AERMOD 보다 정확하게 시간에 따른 풍향 및 풍속의 변화를 확산에 반영할 수 있다.

점, 면 오염원에 대하여 시간적 농도를 계산할 수 있고, 오염원으로부터 수십 미터에서 수백 킬로미터까지 모델링이 가능하고, 복잡한 지형에서도 강점이 있어 원하는 주기에 대해 농도 예측 가능하다는 장점이 있다.

CALPUFF 모델링 시스템은 CALMET, CALPUFF, CALPOST 및 기상과 지형 처리 프로그램으로 구성되어진다.

- (CALMET) 3 차원 격자 모델링 영역에서 시간별 바람장 및 온도장을 생성하는 기상모델로서 혼합고도, 지표특성, 확산 특성과 같은 2 차원 자료 또한 CALMET 을 통해 생성

- (CALPUFF) 오염원으로부터 배출된 퍼프를 확산 프로세스를 통해 모사하는 확산, 수송 모델로서 CALPUFF 의 일차적인 결과에는 특정 지역에서의 시간별 농도나 시간별 침적 플럭스(deposition fluxes)중 하나를 포함

- (CALPOST) 특정 지역에서의 시간별 농도나 침적 플럭스(deposition fluxes) 결과를 처리

2.4. 건강영향평가

건강영향평가는 정책, 계획, 프로그램 및 프로젝트가 인체 건강에 미치는 영향과 그 분포를 파악하는 도구, 절차, 방법 또는 그 조합이라 정의할 수 있다.

건강영향평가의 목적은 특정 인구집단의 건강에 미치는 잠재적 영향을 확인하고 인체건강에 미치는 긍정적인 영향은 최대화하고 부정적 영향과 건강불평등을 최소화하여 의사결정권자에게 정보를 제공하는 것이다.

환경보건법 제13조(건강영향 항목의 추가 평가 등) 제1항²의 규정에 근거하여 건강영향평가를 실시했다.

대기질 건강영향평가에는 비발암성 물질 평가와 발암성 물질 평가가 있다.

비발암성 물질 평가는 위해도 지수를 이용하여 평가하는 방법으로 위해도 지수는 대상지역의 물질별 대기 중 오염물질 현황 농도와 대기확산모델로 예측한 농도를 합한 농도를 호흡노출참고치로 나누어 계산한다. 비발암성 물질의 위해도 지수 값이 1 이상인 경우, 독성이 있는 것으로 판단하고, 반대로 1 미만인 경우 안전하다고 판단할 수 있다.

$$\text{위해도 지수} = \text{농도} / \text{호흡노출참고치}$$

$$\text{호흡노출참고치} = \text{NOAEL or LOAEL} / \text{불확실도} / \text{첨가상수}$$

발암성 물질 평가는 발암위해도를 산정하여 평가하는 것으로 우리나라의 경우 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 까지를 위해도 판단기준으로 환경보건법 시행규칙 별표 1에서 정하고 있는데 원칙적으로 10^{-6} 을 기준으로 하고 있다. 호흡단위위해도를 이용하여 발암위해도를 산정할 수 있으며, 호흡단

² 환경보건법 제13조 제1항 : 관계 행정기관의 장이나 환경영향평가 대상사업의 사업계획을 수립하거나 시행하는 사업자는 「환경정책기본법」 제25조에 따른 사전환경성 검토 또는 「환경영향평가법」 제2조 제1호에 따른 환경영향평가의 대상이 되는 행정계획 및 개발사업 중 대통령령으로 정하는 행정계획 및 개발사업에 대하여 검토·평가 항목에 환경유해인자가 국민건강에 미치는 영향을 추가하여 환경부장관이나 지방환경관서의 장에게 검토·평가에 대한 협의를 요청하여야 한다.

위위해도에 대기확산모델로 예측한 농도를 곱하여 구할 수 있다.

$$\text{발암위해도} = \text{호흡단위위해도} * \text{예측농도}$$

Table 6 Classification of domestic and international carcinogenic information

Section		Characteristic
Exposure standard on Chemical and Physical Factor	1A	Substances with the evidence of carcinogenicity in human
	2B	Substances with the evidence of carcinogenicity in animals
	2	Substances with limited evidence in human or animals
IARC	Group 1	Carcinogenic
	Group 2A	High potential for carcinogenic
	Group 2B	Cause carcinogenic
	Group 3	Not classified carcinogenic
	Group 4	Rarely cause carcinogenic

3. 자료 및 연구방법

3.1. 연구자료

본 연구에서는 대기환경 영향평가를 위해서 국내 도시 중 산업단지를 형성하여 폐기물 중 사업장폐기물이 차지하는 비율이 높은 울산광역시를 대상 지점으로 선정하였다.

울산광역시를 대상 지점으로 선정한 이유는 제조 및 중공업 도시로서 위상이 있을 뿐 아니라 1999년에 울산, 미포 및 온산 국가산업단지가 대기보전 특별대책지역으로 지정되면서 대기환경에 미치는 영향에 대한 연구가 공업단지 위주로 진행되고 있어 추가적인 영향인자에 대한 연구도 필요하다고 판단하였다.

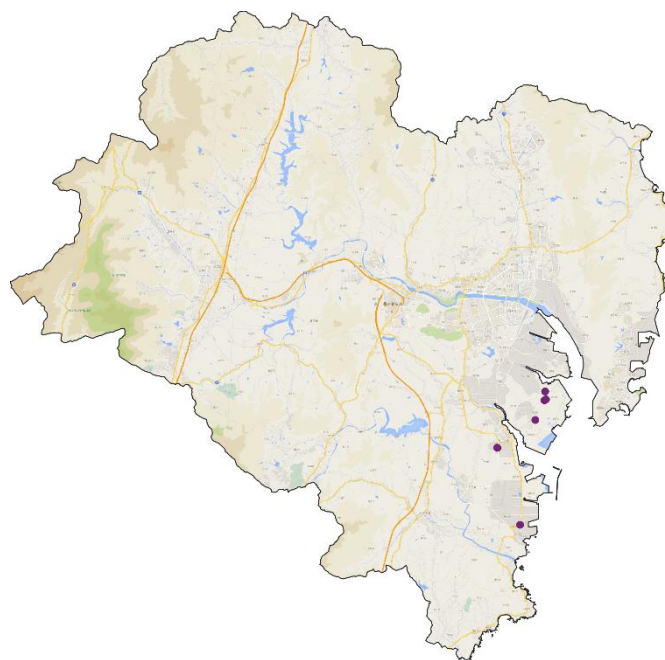


Figure 6 Location of Incineration Facilities in Ulsan city (GOOGLE EARTH)

현재 울산광역시 내에 사업장폐기물 소각시설은 총 다섯 군데가 있는데 해마다 폐기물 발생량이 증가하여 소각시설에 유입되는 폐기물량도 증가하고 있다. 폐기물량이 증가하는 과정에서 일정비율을 소각에 의한 방법으로 처리하는 것은 소각비율은 해마다 같지만 소각량은 점진적으로 증가한다고 볼 수 있다.

본 연구에서 참고하는 대기오염물질 농도는 환경부와 한국환경공단에서 제공하는 자료를 활용하였으며, 연간 평균 농도를 사용하였다. 배출되는 연간 대기오염물질 농도의 기준년도는 2020년으로, 그 외 인체 위해도 평가를 위한 노출계수는 최근 국립환경과학원에서 발간한 노출계수 핸드북을 참고하였다.

3.2. 연구방법

3.2.1. CALPUFF 모델

CALPUFF 모델은 굴뚝에서 배출되는 연기를 퍼프 상태로 배출된다고 가정하고, 시간 및 공간에 따라 바람장의 변화를 퍼프의 이동에 고려하는 즉, 오염물질의 침적과 점, 선, 면오염원에 의한 지표면, 산불의 영향, 시정거리 평가, 장거리 운반 연구와 같은 대기질 모델링 연구의 광범위한 변화를 모사하는데 적합한 비정상상태의 모델이다. 급격한 바람장 변화를 나타내는 지역에 유용하고, 수십 미터에서 수백 킬로미터까지 모델링이 가능한 장점이 있다.

CALPUFF모델의 대기 모델링 시스템은 아래 그림과 같이 CALMET, CALPUFF, CALPOST 등으로 구성되어 있다고 볼 수 있다.

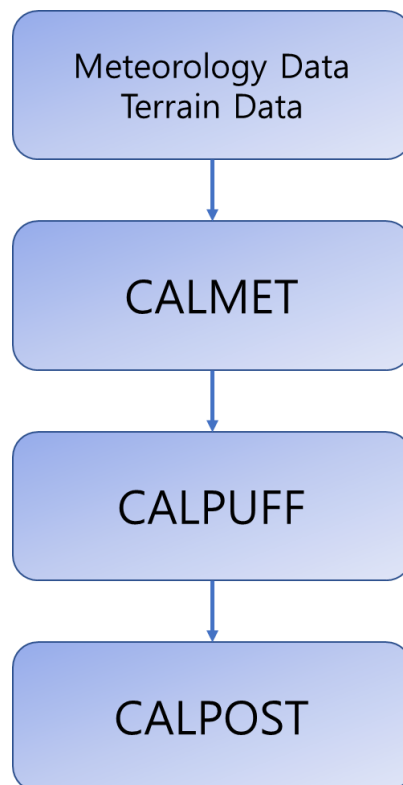


Figure 7 CALPUFF System

CALMET은 기상정보, 지리적 정보 등 대기환경 상황을 내포하여 시뮬레이션 상황을 연출하는 역할을 한다.

Table 7 CALMET Supporting Tool

Geophysical Supporting Tools	Meteorological Supporting Tools
TERREL	METSCAN
CTGCOMP	READ62
MAKEGEO	SMERGE
CALMM5	PXTRACT
	PMERGE

CALPUFF는 대기질 예측 모델 수행을 위한 대기오염물질 배출량에 대한 전반적인 정보를 입력하는 역할을 한다.

CALPOST는 CALPUFF 모델 결과를 원하는 형태로 출력을 해주는 역할을 한다.

각 프로세스에서 필요한 정보는 메모 프로그램을 실행하여 입력데이터를 파일로 변환해 적용할 수 있다.

본 연구에서 대기질 예측 모델링을 수행하는데 적용한 입력데이터는 아래 표에 나타내었다.

Table 8 Information of Input Data in CALPUFF

Classification		Substance
Grid origin	X (East)	524.287 km
	Y (North)	3933.852 km
Grid spacing		0.5 km
Domain Size	Nx (No. x grid cells)	92
	Ny (No. y grid cells)	90
Projection		UTM
UTM zone		52(North)
Cell face heights		0, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1200, 2000
Time Zone		UTC+0900
Datum		WGS-84
Period		2020.09.30~2021.09.30

본 연구에서 수행하는 대기질 예측 모델링에 대해 부가 설명을 한다면 먼저, 연구 대상지역의 지형 및 기상자료를 입력해야 한다.

울산광역시의 지형자료는 환경부에서 제공하는 토지피복도를 이용하였고, 지형의 고도자료는 USGS(United States Geological Survey)에서 제공하는 SRTM3를 활용하였으며, 기상자료는 기상청 기상자료개방 포털의 공개자료를 사용하였다.

CALPUFF 모델을 운용하기 위해서 기상장을 생성하는 시스템인 CALMET 모델을 활용해야 한다. CALMET 모델은 지표 기상 관측자료와 고층 기상 관측자료를 공간적으로 활용하여 격자점에서 풍향 및 풍속을 구하는 진단적 방법을 활용한다. 시간 단위의 바람과 온도는 3차원 GRID 기상장으로 표현한다.

대기오염물질 배출량 산정에 필요한 시설정보 및 각종 활동에 대한 자료를 제공하는 대기 배출원관리 시스템의 2016년에서 2020년 자료를 활용하였고, 대기오염물질 목록 및 배출농도는 2020년을 기준으로 최근 5개년 중 가장 높은 농도 값을 사용하였다. 소각시설 배출구에 대해서는 배출속도, 배출온도, 배출구 직경 및 높이 등은 대기오염물질의 확산에 영향을 미칠 수 있어 세부정보를 고려해야한다.

모델링 모사영역은 사업장폐기물 소각시설을 포함하고, 울산지역의 지리적, 지형적 특성을 고려할 수 있도록 울산광역시 전 지역 도메인을 활용하고 도메인은 격자 하나당 가로, 세로 0.5km, 총 가로 92개, 세로 90개로 구성한다.

기온, 풍향, 풍속, 강수조건 등 다양한 기상조건이 골고루 반영될 수 있도록 충분한 모사기간을 설정한다. 본 연구에서는 사업장폐기물 소각시설 배출 대기오염물질에 의한 울산지역 대기질의 경과를 위해 1년간의 연속적인 모사를 수행한다.

사업장폐기물 소각시설 배출 대기오염물질 29종(일반대기오염물질: 11종, 특정대기오염물질 : 18종)의 확산에 따른 영향 범위 및 연평균 농도를 산출한다.

3.3. 연구결과

최근 사업장폐기물 소각시설에서 폐기물 대행 처리를 하게 됨에 따라 2009년부터 2019년 까지 울산시 내에서 처리되는 사업장폐기물의 소각 처리량이 점차 증가하고 있는 것을 확인 했다.

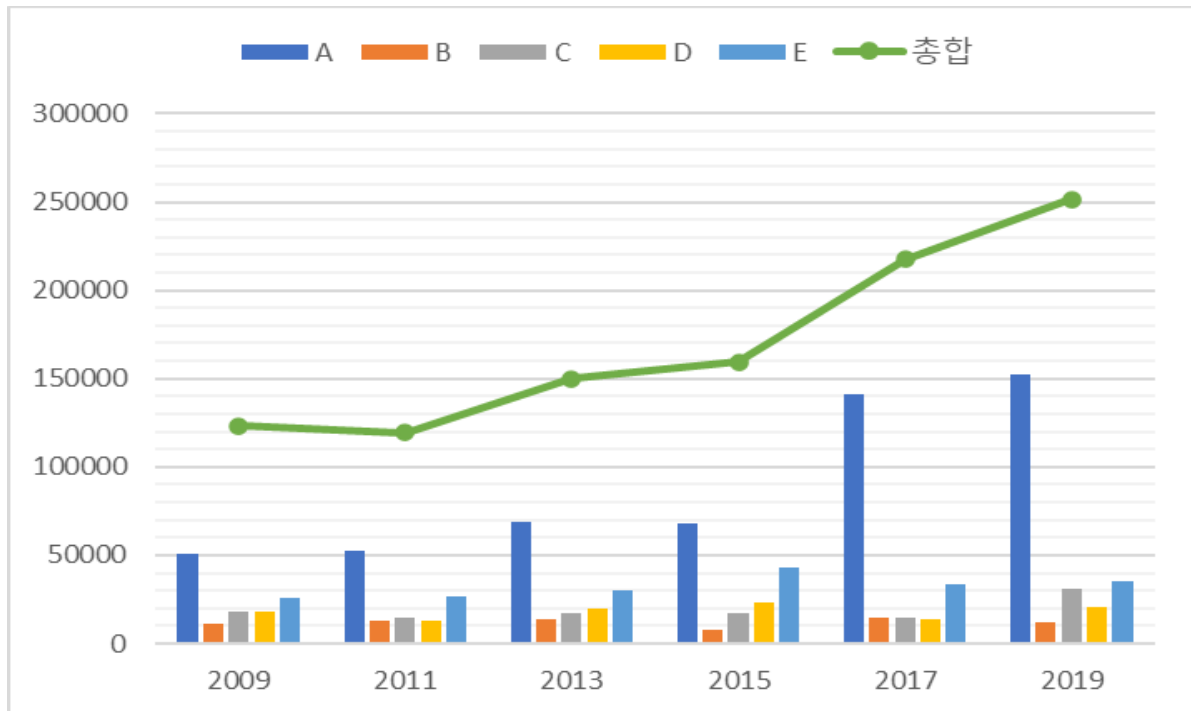


Figure 8 Incineration condition in Ulsan (Ministry of Environment, 2020)

2019년 기준, 울산 사업장폐기물 소각시설에서 처리하는 전체 소각량은 251,449톤으로 2009년 소각 처리량인 123,429톤에 비해 103% 증가하였다.

폐기물의 종류가 다양해짐에 따라 폐기물 소각과정에서 다양한 오염물질이 발생한다. 2015년부터 굴뚝자동측정기기(TMS)에 의한 일부 대기오염물질 배출에 대한 실시간 모니터링 자료를 공개를 시작하게 되었다. 따라서 통계청에 보고된 울산지역 5개 소각처리 업체(A, B, C, D, E)가 폐기물 소각을 하면서 배출된 일부 대기오염물질의 연도별로 배출량(kg/yr)을 아래 그

래프에 나타냈다.

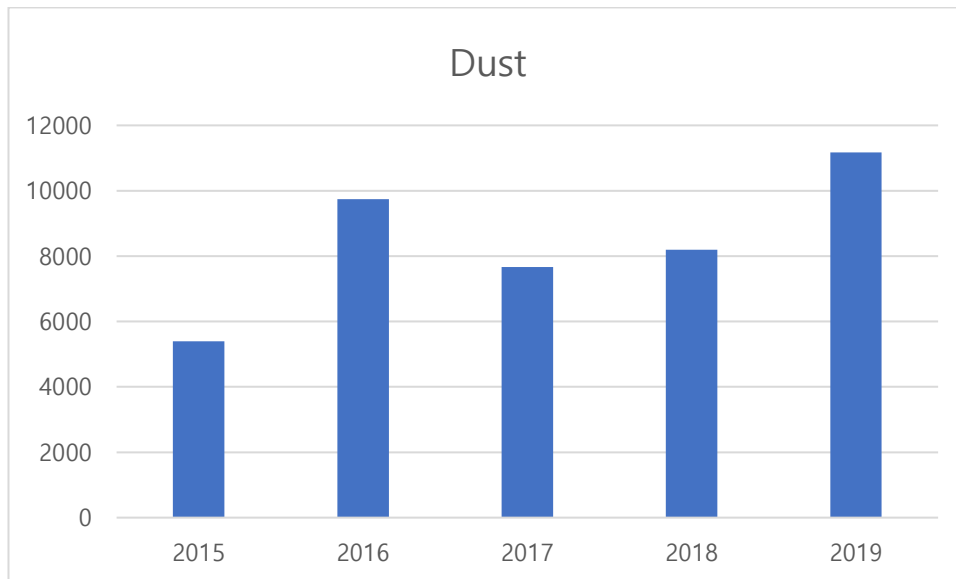


Figure 9 Dust Emission for 5 years in Incineration Facilities (kostat.go.kr)

먼지의 경우 소각 처리량이 늘어남에 따라 배출량도 증가하는 추세를 보이고 있다. 2015년 5개 소각업체에서 배출하는 먼지 발생량이 5,393 kg/yr이었다면 2019년에는 11,174 kg/yr으로 2015년 대비 약 2배가 증가하였다.

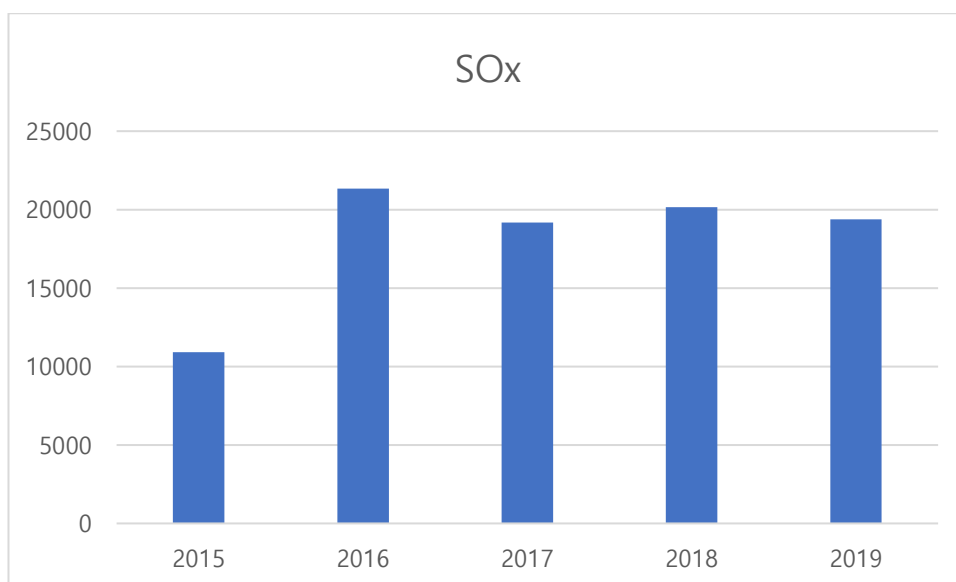


Figure 10 SOx Emission for 5 years in Incineration Facilities (kostat.go.kr)

황산화물의 경우, 2015년 10,920 kg/yr이 배출되었는데 2019년 19,389 kg/yr으로 2015년 대비 2019년에 약 44프로가 증가하였다.

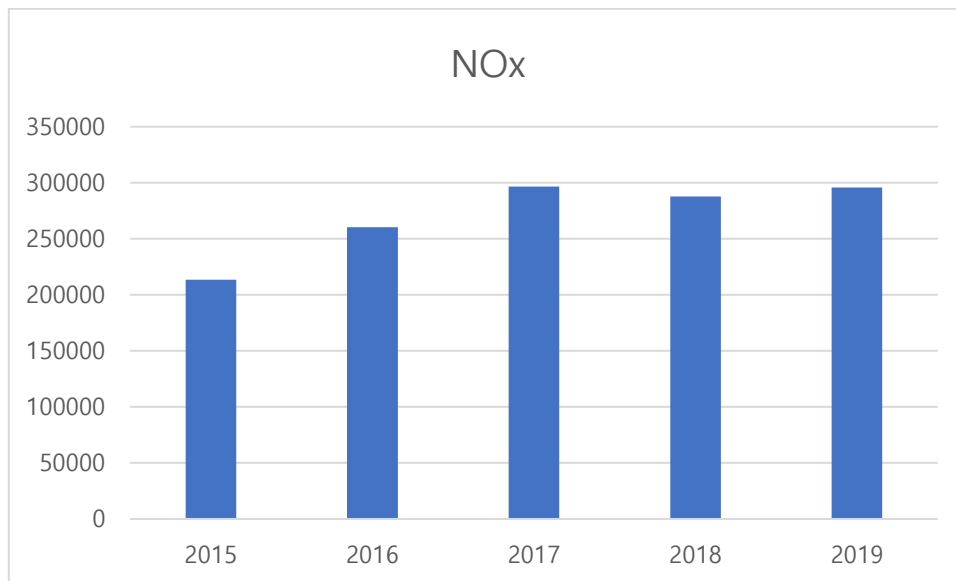


Figure 11 NOx Emission for 5 years in Incineration Facilities (kostat.go.kr)

질소산화물의 경우, 2015년 213,539 kg/yr에서 2019년 295,716 kg/yr으로 폐기물 소각 과정에서 약 28프로 배출량이 증가하였다.

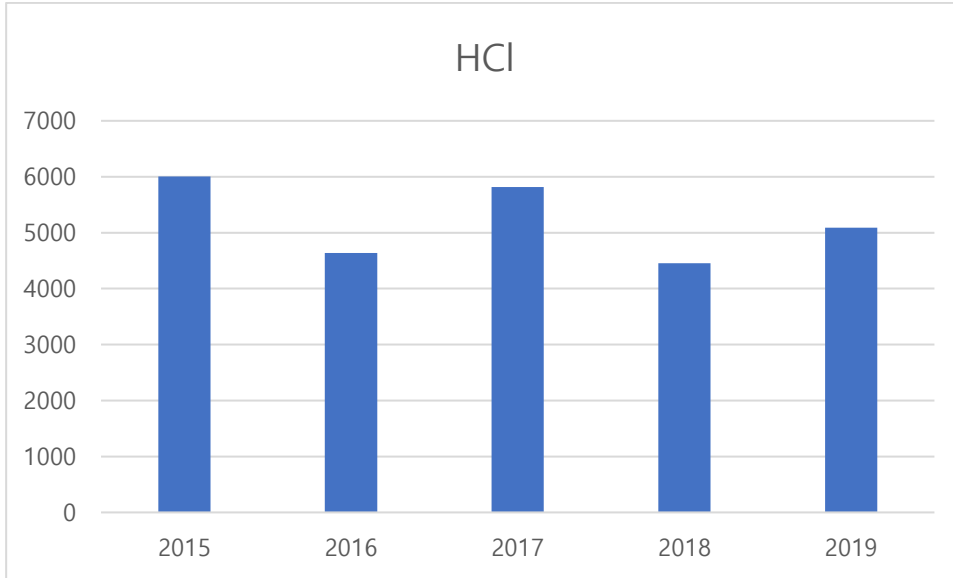


Figure 12 HCl Emission for 5 years in Incineration Facilities (kostat.go.kr)

염화수소의 경우, 2015년부터 2019년까지 배출량이 증감을 반복하여 일정하게 배출되는

것으로 보인다.

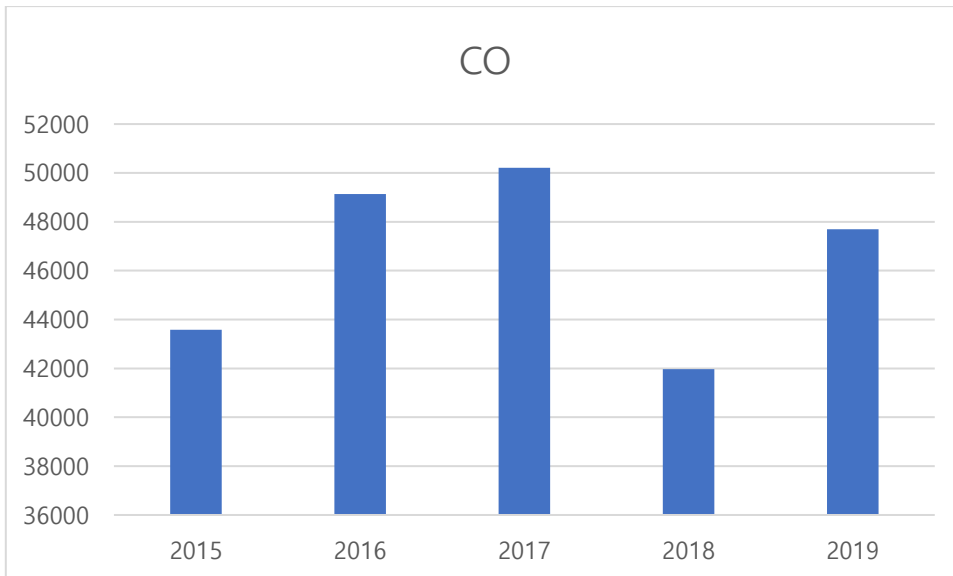


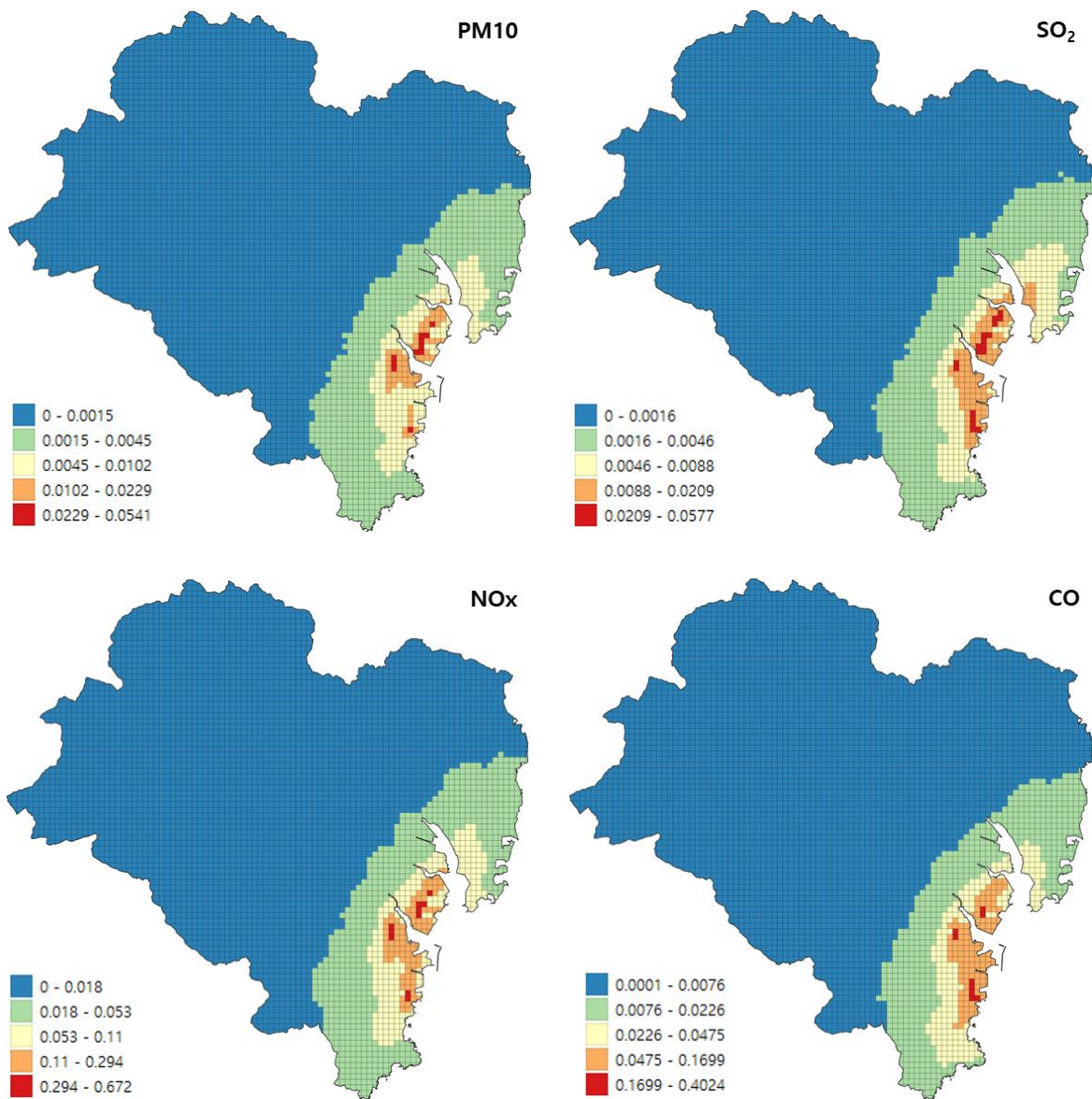
Figure 13 CO Emission for 5 years in Incineration Facilities (kostat.go.kr)

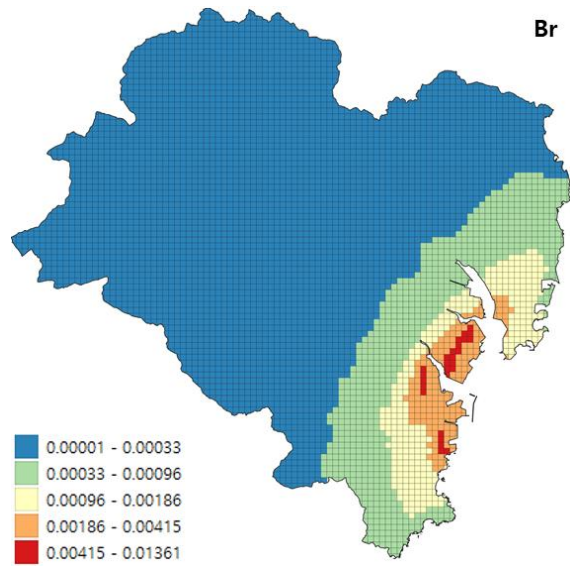
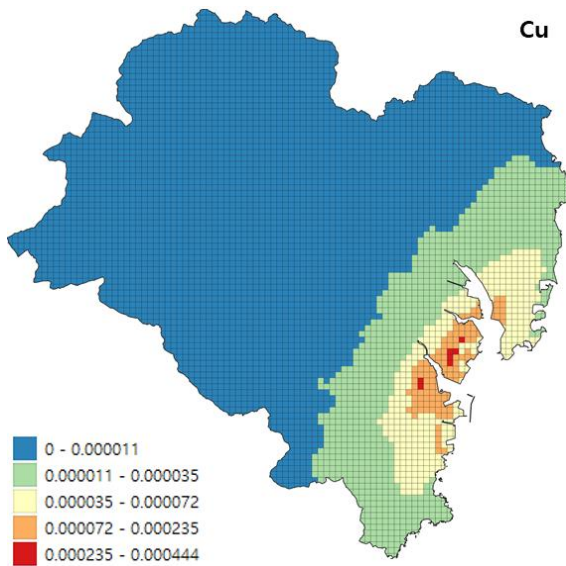
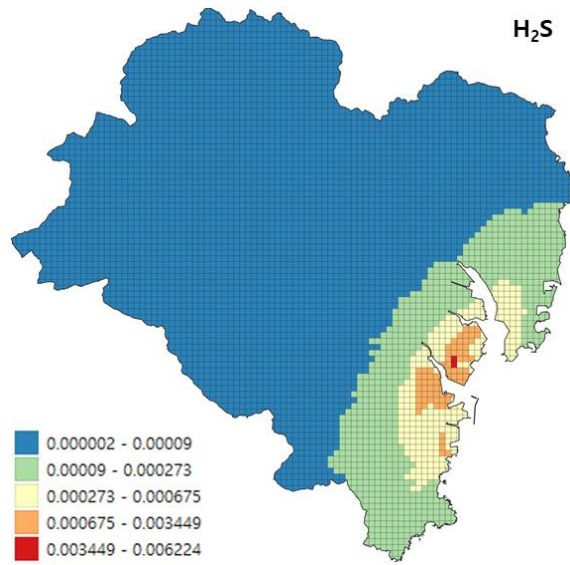
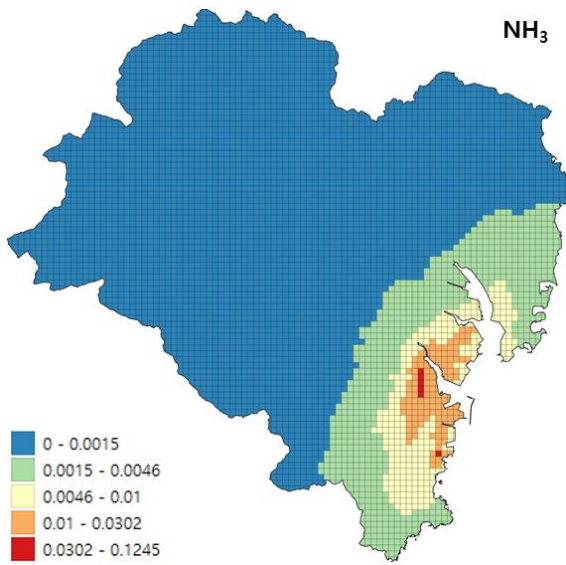
일산화탄소의 경우, 2015년부터 2017년까지 증가하는 추세를 보이다가 2019년까지 일부 감소한 양상을 보였다.

해당 결과를 통하여 2015년부터 2019년까지 소각에 의한 폐기물 처리량이 커짐에 따라 대기오염물질 배출량도 상관관계가 있음을 확인하였다.

3.3.1. 대기 모델 결과

대기오염물질을 일반대기오염물질과 특정대기오염물질로 나누어 각각 CALPUFF 모델을 이용하여 시뮬레이션을 통해 예측 농도를 산정하여 영향 범위 및 농도 수준을 최대 농도를 기준으로 균등분하여 등고선도 형태로 아래와 같이 나타내었다.





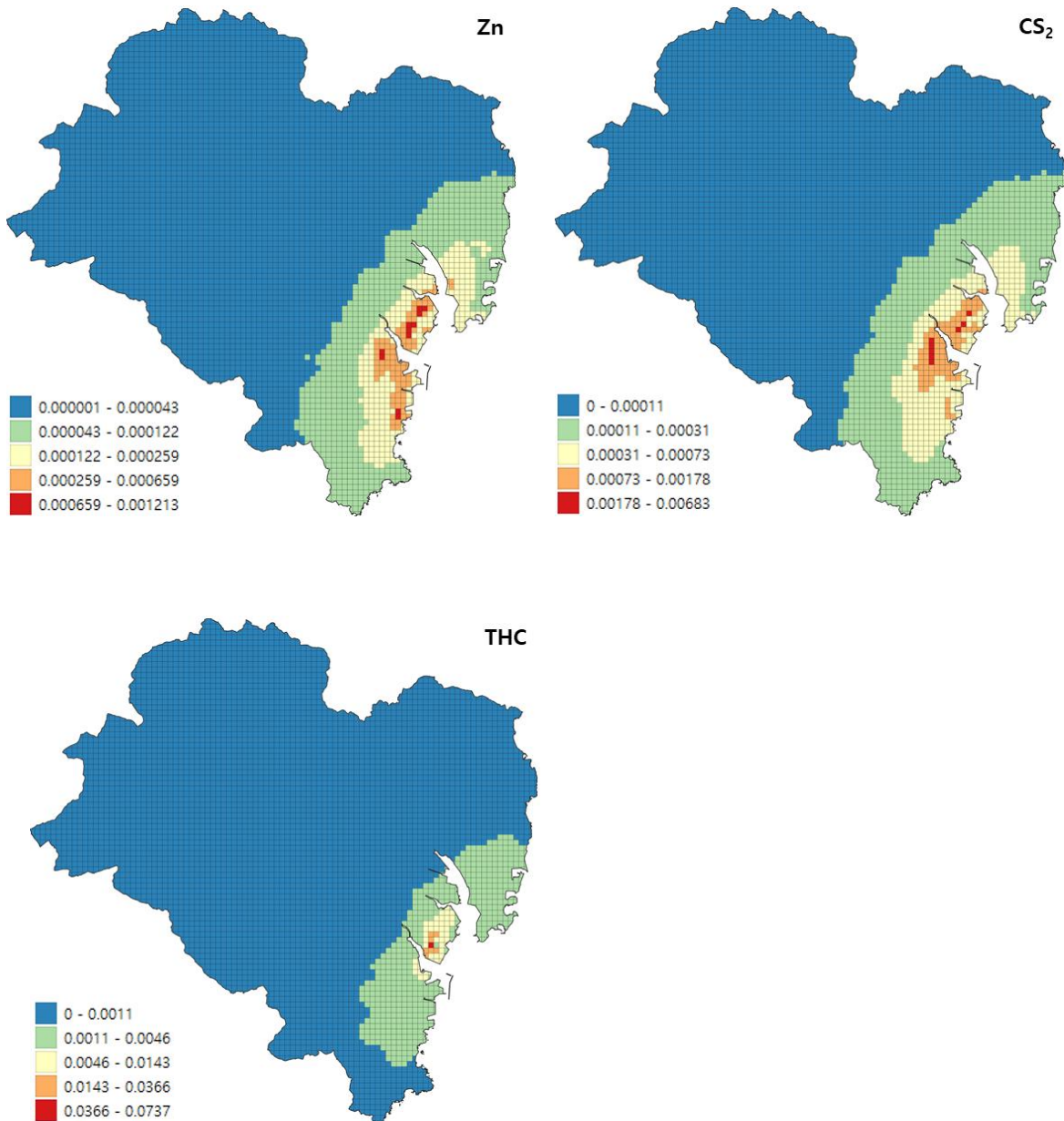
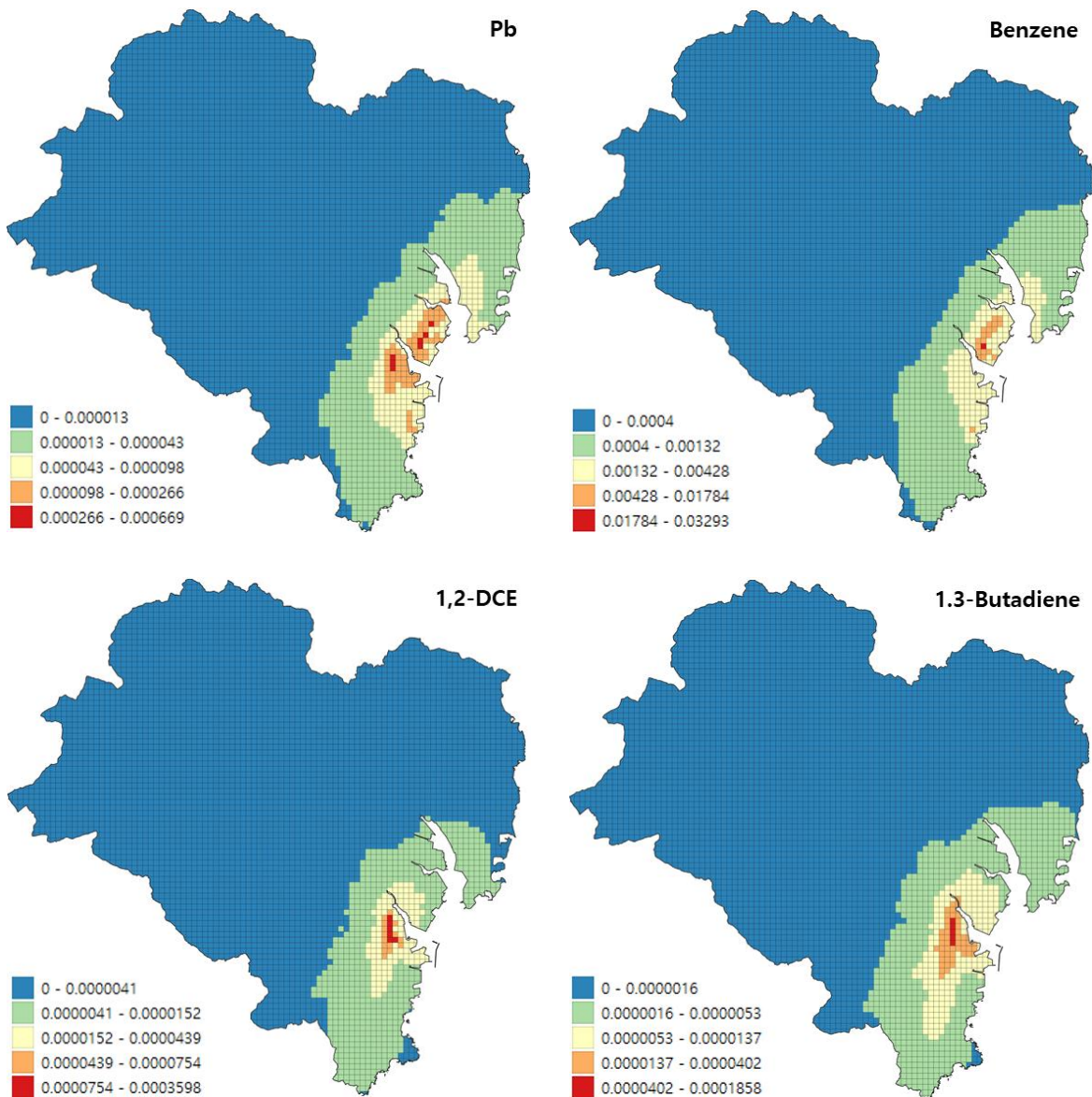
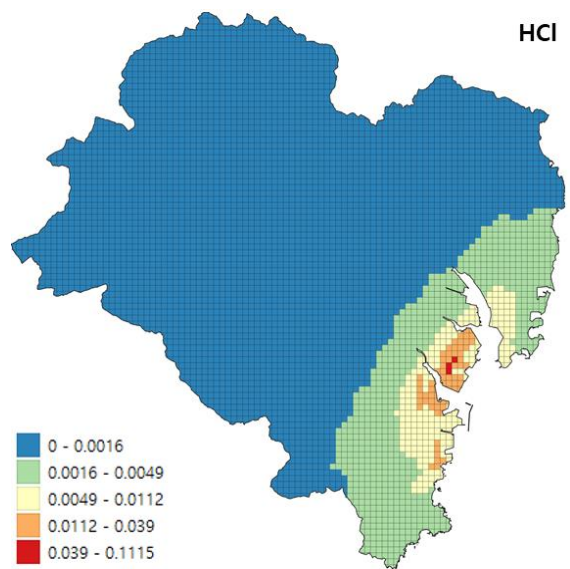
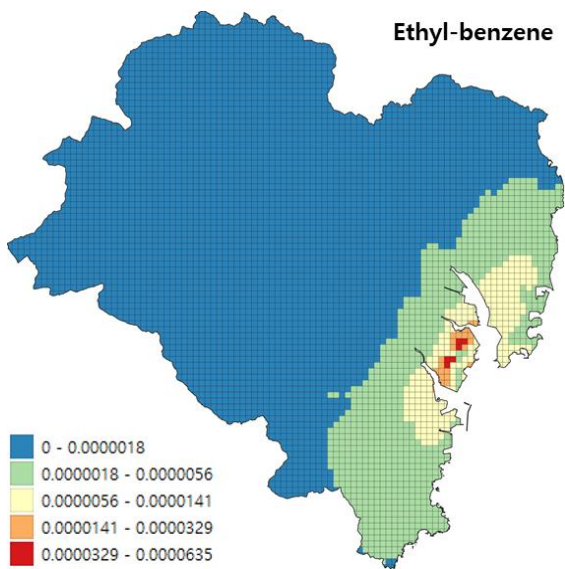
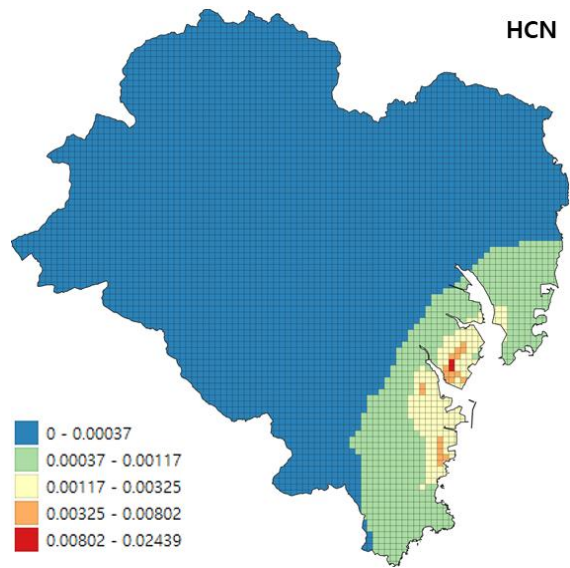
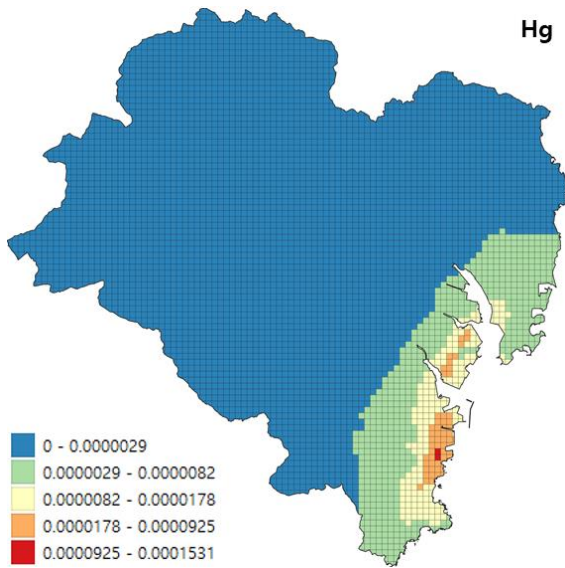
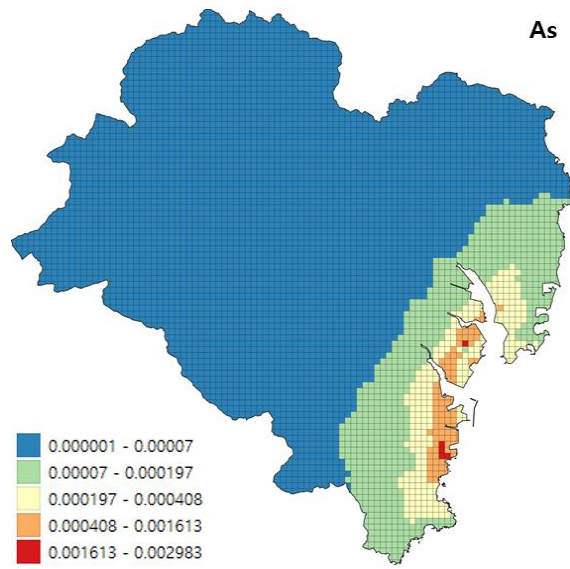
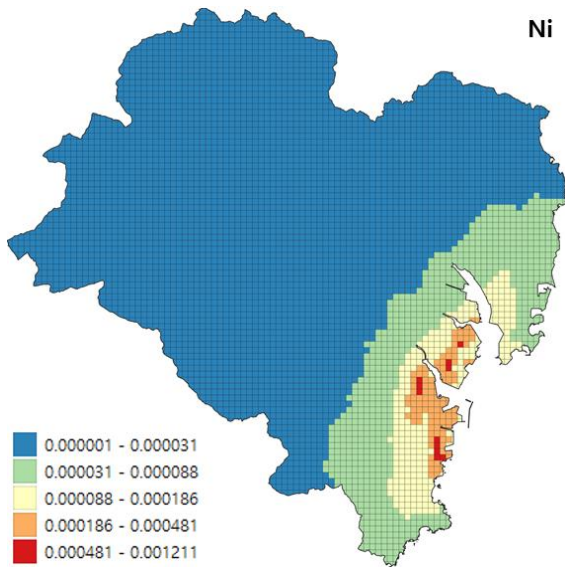


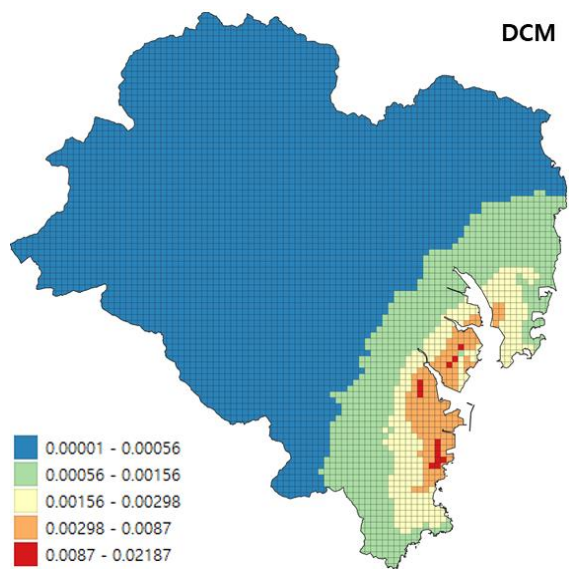
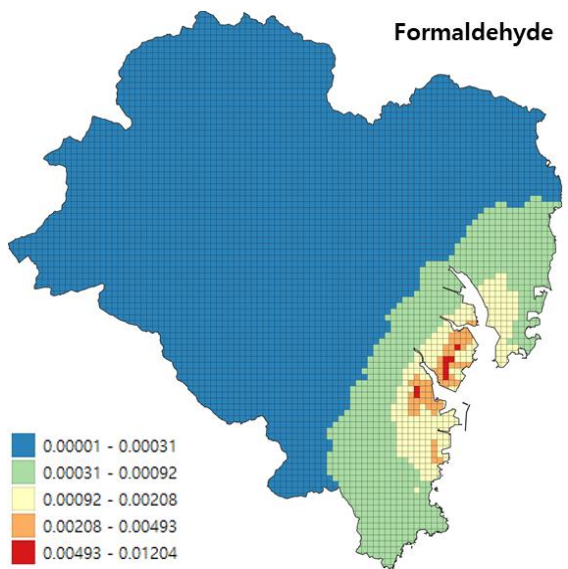
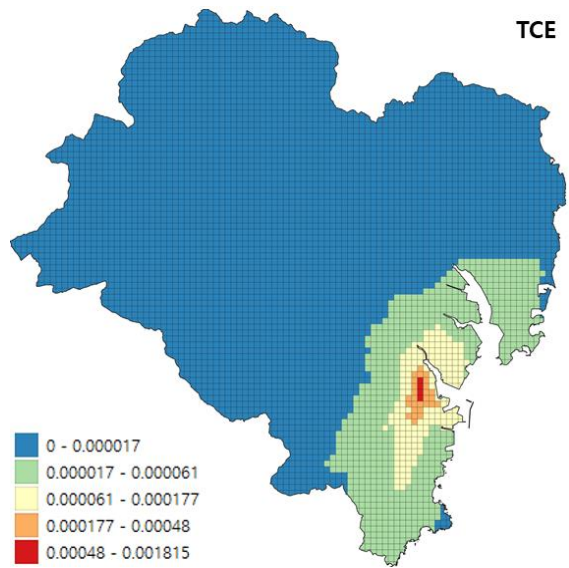
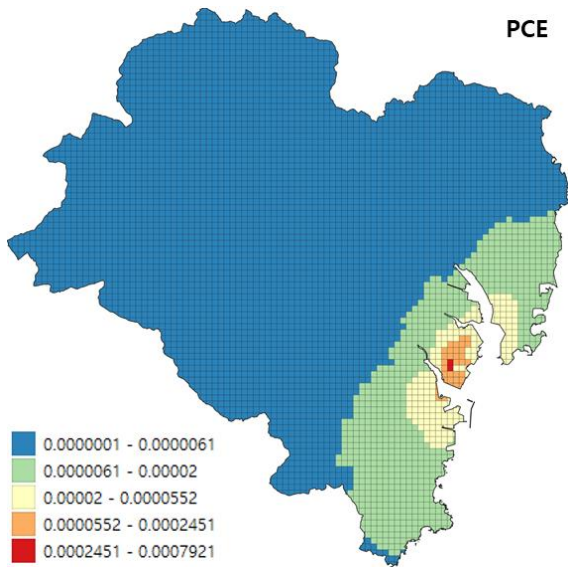
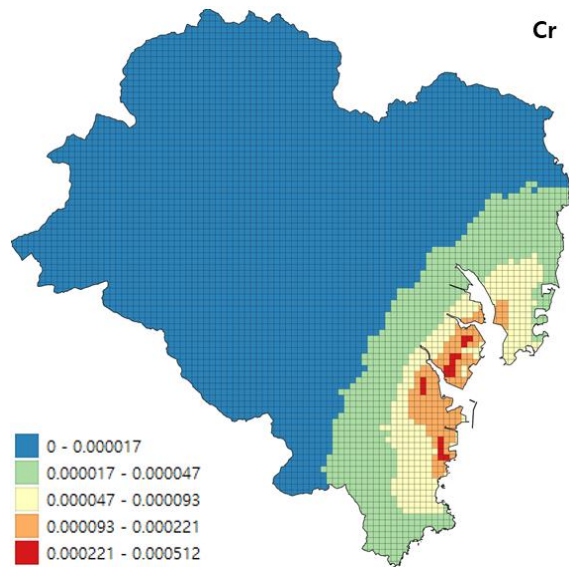
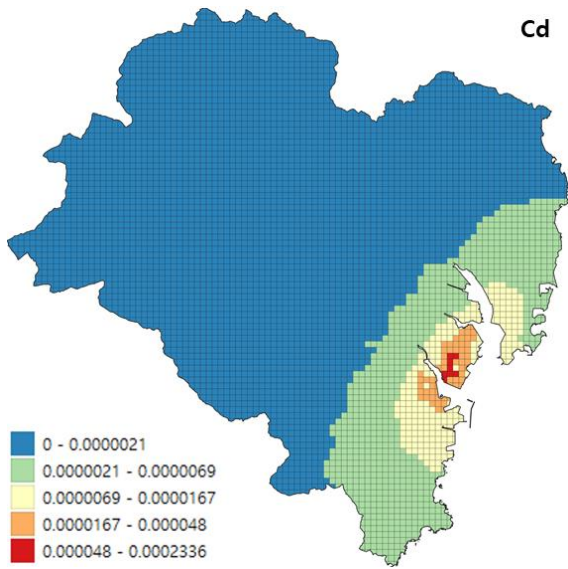
Figure 14 Distribution of general air pollutants emitted by industrial waste incineration facilities

일반대기오염물질의 총 배출농도는 $7.819 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 일반대기오염물질에서 대기오염물질 배출허용 기준을 초과한 지점이 없었지만, 질소산화물, 일산화탄소, 이산화황의 농도는 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 울산 지역에서 사업장폐기물 소각시설에서 배출되는 일반 대기오염물질 11종 중 상대적으로 높은 오염물질의 경우 최대 반경 10km 범위까지 영향을

미치고 있고, 4km 이내에는 각 오염물질별 영향 농도가 높은 것으로 보인다. 울산 지역 내에 사업장폐기물 소각시설에서 배출되는 오염물질의 영향이 행정구역상 남구, 동구, 북구, 중구 일부 등이 영향 범위 내에 모두 포함이 되고, 현재보다 더 많은 소각이 이루어진다면 영향반경이 넓어지는 것은 물론, 각 오염물질의 평균농도가 증가함으로 인체 위해성은 더 상승할 것으로 보인다.







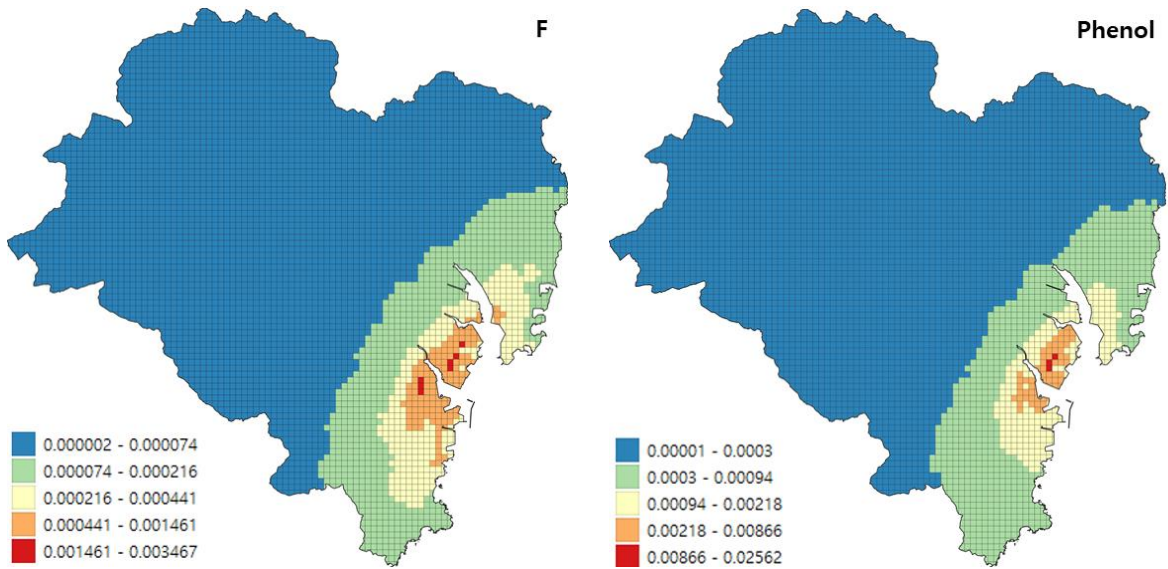


Figure 15 Distribution of Specific air pollutants emitted by industrial waste incineration facilities

울산 지역에서 사업장폐기물 소각시설에서 배출되는 특정대기오염물질은 총 18종으로 배출량이 상대적으로 높은 오염물질의 경우 최대 반경 10km 범위까지 영향을 미치고 있고, 사업장 위치 반경 4km 이내는 영향수준이 높다. 특정대기오염물질의 총 배출농도는 $0.466 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 일반대기오염물질에 비해 상대적으로 미미하였으나 낮은 농도임에도 독성, 발암성, 체내 축적 등 위해성 영향을 줄 수 있는 물질이므로 지속적인 모니터링을 통한 관리가 필요하다.

3.3.2. 인체 위해성 평가

현재 울산지역 사업장폐기물 소각시설에서 배출되는 물질 중 건강영향평가가 가능한 대상 물질에 대해 비발암성 위해도 평가와 발암성 위해도 평가를 수행하였다. 비발암성 위해도 평가는 벤젠, 1,3-부타디엔, 수은화합물, 시안화수소, 에틸벤젠, 염화수소, PCE, TCE, 디클로메탄이 있다. 발암성 위해도 평가는 벤젠, 1,2-디클로로에탄, 1,3-부타디엔, 니켈화합물, 비소화합물, 카드뮴화합물, PCE, 포름알데히드, 디클로로메탄 등이 있다.

Table 9 Non-carcinogenic risk assessment

Substances	Concentration (Average)	RfC	HQ	Rank
HCN	3.200E-02	8.30E-01	3.855E-02	1
HCl	1.914E-01	2.00E+01	9.570E-03	2
1,3-Butadiene	1.518E-04	2.00E-02	7.590E-03	3
Benzene	4.529E-02	3.00E+01	1.510E-03	4
Hg	3.067E-04	3.00E-01	1.022E-03	5
TCE	1.483E-03	2.00E+00	7.416E-04	6
DCM	8.734E-02	6.00E+02	1.456E-04	7
PCE	6.388E-04	4.00E+01	1.597E-05	8
Ethylbenzene	2.688E-04	1.00E+03	2.688E-07	9

Table 10 Carcinogenic risk assessment

Substances	Concentration (Average)	IUR	CR	Rank
As	9.841E-03	4.30E-03	4.232E-05	1
Ni	4.222E-03	2.40E-04	1.013E-06	2
Formaldehyde	4.055E-02	1.30E-05	5.272E-07	3
Cd	2.751E-04	1.80E-03	4.952E-07	4
1,3-Butadiene	1.518E-04	2.40E-03	3.643E-07	5
Benzene	4.529E-02	7.80E-06	3.533E-07	6
1,2-DCE	2.941E-04	2.60E-05	7.646E-09	7
DCM	8.734E-02	1.00E-08	8.734E-10	8
PCE	6.388E-04	2.60E-07	1.661E-10	9

3.3.3. 평가 결과

비발암성 위해도 평가 결과, HI가 0.059로 1보다 미만이기 때문에 인체에 유해한 영향을 미치지 않을 것으로 확실하게 보여주고 있으나 HQ값이 상대적으로 높은 시안화수소, 염화수소, 1,3-부타디엔의 배출량을 저감해야 할 필요가 있다.

발암성 위해도 평가 결과, 전체 CR값이 0.0000451 수준으로 개별 오염물질에 대한 CR값은 물론, 복합오염물질에 대한 CR값의 허용한계 미만으로 나타나고 있기 때문에 발암에 대한 위험성 또한 없다. 다만 비소화합물과 니켈화합물이 각각 0.0000423, 0.000001013으로 개별 오염물질에 대한 CR값의 기준인 0.000001을 초과하기 때문에 개별 오염물질에 대한 지속적인 모니터링을 해야 할 필요가 있다.

3.3.4. 한계점

본 연구를 수행하는 과정에서 대기오염물질 배출과 관련하여 울산지역 소각시설에서 배출되는 대기오염물질에 대한 정보를 획득하는 과정에서 한국환경공단에서 제공하는 굴뚝자동측정기기(TMS)로 획득가능한 데이터베이스의 한계와 지속적인 모니터링으로 얻은 데이터가 아니기 때문에 불확실도가 존재한다.

대기질 예측 모델링의 정확한 분석을 위해 모델에 필요한 입력 데이터에 대해 적절한 정보가 필요하기 때문에 빅데이터화 하여 데이터에 대한 보완이 시급하다. 대기오염물질의 확산에 대한 연속적인 모니터링화 할 수 있는 방안 개선과 데이터 수집 후 빠르고 정확하게 저장할 수 있는 클라우드 기반 서비스를 통한 데이터베이스의 구체화 및 확보에 대한 한계를 극복해야할 필요가 있다.

마지막으로 인체 위해성 평가(건강영향평가)를 수행할 시에 인체 노출 계수에 대한 우리나라의 기준에 맞는 자료가 필요하다. 미국환경청(US EPA)에서 권고하는 인체 위해성 평가를 할 경우 우리나라에 부합하지 않는 정보가 많아 불확실도가 매우 크고, 한국인과 다른 신체 구조로 인하여 보다 정확한 평가를 위해 국내 환경에 맞게 개편되어야 할 필요가 있다.

Ⅲ. 결론

울산지역 사업장폐기물 소각시설은 국가산업단지 내에 위치해 있고, 선행연구에서는 배출 오염원으로서 산업단지 혹은 일반 폐기물 소각시설에 대한 특정 오염물질에 대한 연구가 진행한 사례가 있었다.

본 연구에서는 소각시설에서 배출 가능성이 있는 모든 대기오염물질에 대해서 건강영향평가에 필요한 기초자료를 바탕으로 인체 위해도 평가를 수행가능한 대기오염물질에 평가를 진행하였다.

울산지역 사업장폐기물 소각시설에서 배출되는 대기오염물질을 확인하고, 대기질 예측 모델을 이용하여 일반대기오염물질 11종과 특정대기오염물질 18종의 연평균 농도와 환경영향 범위를 정량화 시켜 확인하였다.

대기질 예측 모델은 지형을 고려할 수 있고, 특정 기간과 현지 기상장을 반영하여 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있는 CALPUFF 모델을 이용하여 사업장폐기물 소각장에서 배출되는 대기오염물질은 최대 반경 10km 범위까지 영향을 미치는 것을 확인하였고, 사업장 위치 반경 4km이내에서 영향이 가장 높은 것으로 분석되었다. 해당 환경영향 범위를 산정하면서 미량으로 독성, 발암성 등 악영향을 미치는 특정대기오염물질의 총 배출농도는 0.466 수준이었고, 비발암성 및 발암성 위해도 평가 결과, 시안화수소, 염화수소, 1,3-부타디엔, 비소화합물, 니켈 화합물, 포름알데히드 등 주요 물질이 미치는 영향을 최소화하기 위해서 해당 물질에 대한 계속적인 모니터링과 저감대책 마련이 필요하다.

또한 연구를 진행한 울산지역 소각시설의 경우, 산업단지 내에 위치해 있어 배출농도의 차

이로 인해 소각시설의 배출농도가 무시될 수 있는 우려가 있다. 따라서 대기오염물질 배출량이 대기환경보전법 상 기준을 초과하지 않는 것으로 결과가 도출되었으나 장기적인 관점에서 인체에 위해 가능성이 있다는 사실만으로 사후 규제로 해결하려고 한다면 악영향을 미칠 수 있으므로 총량적인 관점에서 문제를 해결해야 할 필요성이 제고된다.

참고문헌

Lee, Chong Bum et al. 2016. "Evaluation of CALPUFF Dispersion Model Using Tracer Experiment Data 서 론." *Journal of Environment* 11(1): 7-16.

Park, J.M. et al. 2007. "Characteristics of Hazardous Air Pollutant Emissions from Waste Incinerators." *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 23(2): 183-90.

Yoo, Ji Hyun. 2020. "A Study on Fine Dust Modeling for Air Quality Prediction." *Journal of IKEEE* 24(4): 1136-40.

구윤서. 2001. "최근 대기확산 모델링의 동향 및 응용 사례.Pdf." 환경기술정보.

김정훈 (Jeong Hun Kim), 이상협 (Sang Hyeob Lee) , 서용철 (Yong Chil Seo) , 송금주 (Geum Ju Song), (Deepak Pudasainee). "원저(原著): 유해폐기물소각시설에서의 유해대기오염물질(HAPs) 배출 특성 및 제거효율연구." 한국폐기물자원순환학회지 25(2): 180-86. <https://kiss.kstudy.com/thesis/thesis-view.asp?key=2674877> (January 13, 2022).

이종범, 김신도, 백성옥, 김동술최금찬. 2016. 대기환경. ed. 한국대기환경학회. 동화기술.

WRF MODELING SYSTEM Flow Chart, WRF MODELING SYSTEM (ucar.edu)

CMAQ Modeling System, CMAQ Models | US EPA

환경영향평가서 내 위생공중보건 항목 작성을 위한 건강영향 항목의 평가 매뉴얼, 환경부 환경보건정책관실, 2013.12

Jesse L. The, Cristiane L. The, Michael A. Johnson, CALPUFF View User Guide, Lakes Environmental, 2020

Abstract

In Korea, industrial activities such as construction and manufacturing prospered greatly after the 1970s, and urbanization began in the 2000s. Due to urbanization, household income increased, and life became more affluent as the economy expanded. As a result, household consumption became more active, resulting in a large amount of household waste. The revival of the manufacturing and construction industries also generated a lot of industrial waste.

With the increase of waste in Korea, waste treatment methods such as landfill, incineration, and recycling are being used widely. In particular, the waste treatment method of dump adopts a method of incineration of a certain percentage due to the problem of landfill site selection to deal with the increased waste in Korea, where the land area is limited. While the rate of incineration to the amount of waste generated is constant at 6% nationwide, Ulsan has performed an incineration rate that is twice as high.

As economic activities by the secondary industry were predominant, a joint international problem of global warming arose. As the interest in responding to climate change in relation to fine dust and greenhouse gases internationally increased, Korea is also focused on air environment impact analysis and management and research is being actively conducted on this.

In this study, it was determined that it was necessary to conduct a study on the effect of air pollutants emitted from industrial waste incineration facilities on the air environment

in Ulsan as the actual waste treatment situation in Ulsan, which has been incinerated is at a higher rate than the nation.

First, the impact range and concentration of air pollutants emitted from industrial waste incineration facilities can be calculated and predicted using the air quality prediction model. And based on the results obtained through modeling, risk assessment was performed using non-carcinogenic substance evaluation and carcinogenic substance evaluation focused on a health impact evaluation.

Data from the Ministry of Environment were referenced for the nationwide waste generation and treatment status in relation to industrial waste incineration facilities, and the air pollutant emissions and waste treatment status of Ulsan were used as data from the national statistical portal.

The result data of the automatic chimney measurement system (TMS) presented by the Korea Environment Corporation, the meteorological data provided by the Korea Meteorological Administration, and the location, geography, and topography data using GOOGLE EARTH and WEBGIS were used to model the air quality prediction.

For the human risk assessment, data provided by the Ministry of Environment and the Korea Environment Corporation were used for air pollutant concentrations, and the exposure factors necessary for the evaluation of non-carcinogenic and carcinogenic substances were referred to the Exposure Factor Handbook recently published by the National Academy of Environmental Sciences.

Through this study, the air quality prediction model was divided into general air pollutants and specific air pollutants levels.

As a result of carrying out the evaluation by dividing the health impact assessment into non-carcinogenic substances and carcinogenic substances, the predicted concentration was not at the level that had an overall effect on the human body, but in the case of carcinogenic substances, the effect is massive even at trace concentrations, leaving a continuous need to monitor and manage of industrial waste incineration facilities.

Through this study, it is expected that it can be used as a policy reference to suggest ways to improve the amount of waste generated and treatment methods in Korea and to make suggestions on how to operate an industrial waste incineration plant in a special air conservation area.

In addition, it is expected that the limit for monitoring and impact evaluation of air pollutants emitted from the incineration facility will be identified and ways to improve it will also be found, and the impact of the location conditions of the incineration facilities in Ulsan is requires proper management to minimize the inadequacies.