creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

석사학위논문

생활폐기물 소각시설의 미세먼지 배출특성 및 대기질 영향 연구

Emission Characteristics and Air Quality Impact by Particulate Matter from Municipal Solid Waste Incinerator

2020년 2월

세종대학교 대학원
기후변화협동과정
우 지 윤

생활폐기물 소각시설의 미세먼지 배출특성 및 대기질 영향 연구

Emission Characteristics and Air Quality Impact by Particulate Matter from Municipal Solid Waste Incinerator

지도교수 전 의 찬

이 논문을 공학 석사학위논문으로 제출함

2020년 2월

세종대학교 대학원
기후변화협동과정
우 지 윤

우지윤의 석사학위논문을 인준함

2020년 2월

심사위원장 김 하 나 (인)

심 사 위 원 김 성 태 (인)

심 사 위 원 전 의 찬 (인)

국 문 초 록

미세먼지 문제의 해결을 위해서는 대형사업장 등 미세먼지 다량배출원의 정확한 배출량 파악이 우선되어야 한다. 배출량 산정에는 배출계수가 필수적인데 우리나라의 생활폐기물 소각시설의 경우, TSP와 미세먼지(PM-10)는 미국과 유럽에서 개발된 배출계수를 사용하고 있다. 초미세먼지(PM-2.5)의 경우에는 PM-10 배출계수에 PM-10 중 PM-2.5 분율을 적용하여 사용하고 있다. 즉, 외국에서 개발한 배출계수를 기반으로 산정하고 있으므로 국내 여건을 반영한 정확하고 신뢰도 높은 배출량을 산정하는 데에 어려움이 있다.

대형 생활폐기물 소각시설의 경우, 미세먼지를 비롯한 대기오염물질을 다량 배출하고 있지만 관련 연구는 미흡한 실정이다. 생활폐기물 소각시설에서 배출되는 미세먼지를 산정하기 위해서는 배출시설의 공정, 방지시설, 처리용량 등 세분화된 정보가 필요하며, 다양한 운전 조건을 고려한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 대형 생활폐기물 소각시설을 대상으로 미세먼지의 농도와 입경분율을 조사하고 배출계수를 산정하였으며, 실측에 따른 PM-2.5 농도를 기반으로 대상시설이 주변지역에 미치는 영향을 살펴보았다.

대상시설의 미세먼지 농도를 분석한 결과, 입자크기별 평균 농도는 각각 TSP 6.483㎎/㎥, PM-10 5.488㎎/㎥, PM-2.5 4.071㎎/㎥으로 나타났으며, 입자크기별 분포율은 10㎛ 이상이 16%, 2.5㎛ ~ 10㎛ 사이 입자의 분포율이 22%, 2.5㎛ 이하의 입자 크기는 62%로 가장 높게 나타났다. 미세먼지 측정 기준으로 입경분율의 비는 PM-10/TSP은 0.841, PM-2.5/TSP는 0.618, PM-2.5/PM-10는 0.731로 나타났다.

본 연구에서 개발한 생활폐기물 소각시설의 미세먼지 배출계수는 PM-10은 0.0441kg/ton, PM-2.5는 0.0330kg/ton으로 나타났으며, 이 값은 국가 배출계수인 0.0362kg/ton, 0.0240kg/ton과 비교해 각각 1.22배, 1.37배 높은 수준으로 나타났다.

대상시설에서 배출된 PM-2.5가 주변지역에 미치는 영향은 대상시설을 중심으로 가로세로 반경 약 2km 범위로 설정하여 대기확산모델인 CALPUFF를 통해 살펴보았다. 고농도 미세먼지 특별대책인 계절관리제 시행에 따라 대상시설의 가동률을 50%로 제어할 경우, 주변지역에 미치는 최대 농도는 제어가동 시 50% 저감되었으며, PM-2.5 농도 기준으로 일평균 환경기준인 35㎍/㎥의 1%에 해당하는 0.35㎍/㎥ 이상 영향을 주는 거리가 78% 감소된 것을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 우리나라의 쓰레기 특성 및 생활폐기물 소각로의 운전조건을 반영한 미세먼지 배출계수를 개발하여 우리나라 미세먼지 배출량 자료의 신뢰성을 제고하였다. 또, 소각로의 가동률 조정에 따른 대기질 영향 분석을 통해 효과적인 미세먼지 관리대책 수립에도 기여할 것으로 판단된다.

주요어 : 미세먼지, 생활폐기물 소각시설, 인벤토리, 배출계수,
CALPUFF, 확산영향

목　　차

제1장 서　론

제1절 연구의 배경 및 목적 ····· 1
제2절 연구의 내용 및 범위 ····· 3

제2장 이론적 고찰

제1절 미세먼지 발생 및 배출원 ····· 5
제2절 폐기물 발생 및 대기오염물질 배출 현황 ····· 10
제3절 선행연구 분석 ····· 15

제3장 연구방법

제1절 대상시설 선정 ····· 18
제2절 미세먼지 및 미세먼지 생성물질 측정방법 ····· 20
제3절 미세먼지 배출계수 산정방법 ····· 24
제4절 확산모델을 이용한 배출 분포 파악 ····· 25

제4장 생활폐기물 소각시설의 미세먼지 배출특성

제1절 생활폐기물 소각시설의 미세먼지 및 2차 생성물질 농도 ·· 27
제2절 생활폐기물 소각시설의 미세먼지 입경분율 ····· 31
제3절 생활폐기물 소각시설의 미세먼지 배출계수 ····· 36

제5장 생활폐기물 소각시설의 주변지역 대기질 영향 분석

제1절 대기확산모델 입력자료 ····· 39
제2절 생활폐기물 소각시설의 대기질 영향 분석 ····· 42

제6장 결 론

제1절 연구 요약 ····· 46
제2절 연구의 시사점 및 한계 ····· 48

참고문헌 ····· 50

Abstract ····· 52

표 목 차

<표 2-1> 먼지 항목의 국내 대기환경기준 변화 ····· 6
<표 2-2> 국가별 미세먼지 대기환경기준 비교 ····· 6
<표 2-3> 대기오염물질 배출량 분류체계 및 산정방법 ····· 8
<표 2-4> 폐기물 소각시설의 소각방식 현황 ····· 12
<표 2-5> 폐기물처리 배출원 분류체계 ····· 13
<표 2-6> 폐기물처리 부문 대기오염물질 배출량(2016년) ····· 14
<표 2-7> 생활폐기물 및 미세먼지 관련 국내·외 연구 ····· 17
<표 4-1> 생활폐기물 소각시설에서 발생되는 미세먼지 농도 ····· 28
<표 4-2> 대상시설에서 발생되는 NOx 및 SOx 농도 ····· 30
<표 4-3> 생활폐기물 소각시설에서 발생되는 미세먼지 입경분율 ····· 32
<표 4-4> 본 연구와 기존연구의 PM-10/TSP 비교 ····· 33
<표 4-5> 본 연구와 기존연구의 PM-2.5/TSP 비교 ····· 34
<표 4-6> 본 연구와 기존연구의 PM-2.5/PM-10 비교 ····· 35
<표 4-7> 생활폐기물 소각시설의 PM-10 배출계수 산정 결과 ····· 36
<표 4-8> 생활폐기물 소각시설의 PM-2.5 배출계수 산정 결과 ····· 37
<표 4-9> 본 연구와 기존연구의 배출계수 자료 비교 ····· 38
<표 5-1> 모델링 입력 자료 ····· 40

그 림 목 차

<그림 1-1> 연구 흐름도 ····· 4
<그림 2-1> 미세먼지 배출원별 배출량 비율(2016년) ····· 9
<그림 2-2> 폐기물 발생량 변화추이 ····· 10
<그림 2-3> 연도별 생활폐기물 처리방법별 처리율 변화추이 ····· 11
<그림 3-1> Cascade Impactor ····· 21
<그림 3-2> Stack Sampler ····· 21
<그림 3-3> Lung Sampler를 이용한 간헐포집(EPA Method 18) ····· 22
<그림 3-4> Lung Sampler에 의한 시료채취 ····· 23
<그림 3-5> CALPUFF 모델의 구성 ····· 26
<그림 4-1> 생활폐기물 소각시설에서 발생되는 미세먼지의 입자크기별 분포율 ·· 29
<그림 5-1> 모델링 영역(8km×8km) ····· 39
<그림 5-2> 기상대 위치도 ····· 41
<그림 5-3> 배출량 변화에 따른 PM-2.5 등농도 분포도(분석영역 8km×8km) ··· 43
<그림 5-4> 배출량 변화에 따른 PM-2.5 등농도 분포도(분석영역 4km×3.5km) ·· 45

제1장 서 론

제1절 연구의 배경 및 목적

최근 고농도 미세먼지가 빈번히 발생함에 따라 미세먼지는 국가적 재난으로 부상하였으며, 국민안전과 건강을 심각하게 위협하고 있다. 정부는 이를 해결하기 위해 「미세먼지 관리 종합대책(2017.9.26.)」과 「비상·상시 미세먼지 관리 강화대책(2018.11.8.)」을 수립하여 미세먼지 관리에 총력을 기울이고 있으며, 2019년 2월 15일부터는 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」이 발효되어 시행되고 있다. 뒤이어 2019년 11월 1일, 정부에서는 기존의 종합대책을 평가하며 새로운 5개년 계획인 「미세먼지 관리 종합계획(2020~2024)」을 발표하였다. 이렇게 정부 차원의 관리·감독이 매년 강화되고 있지만 여전히 선진국보다 높은 미세먼지 농도가 지속되고 있다. 전문가들은 미세먼지 문제가 해결되지 않는 이유 중 하나로 배출량 통계의 신뢰도가 낮은 것을 지적하고 있다.

정부는 국내·외 복합 영향으로 인해 고농도 미세먼지가 집중 발생하는 12월부터 3월까지 평상시와 차별되는 국내 대응 대책이 필요하다고 판단하여 「미세먼지 고농도 시기 대응 특별대책(2019.11.1.)」에서는 계절관리제를 도입하고 있다. 계절관리제는 고농도 시기에 평시보다 강화된 저감정책을 시행하는 것으로 기저농도를 낮춰 고농도 발생 강도 및 빈도를 완화하는 것을 목표로 하는 제도이며, 해당 시기에 산업, 수송 발전 등 주요 배출 부문에 대해 조치사항을 유도·권고하고 있다(환경부, 2019). 산업 부문에서는 대형사업장(1종)을 중심으로 사업장별 저감장치 효율화, 가동률 조정 등의 방안을 통해 업종별 특성을 고려한 추가

감축을 유도하고 있고, 이 중 대형 폐기물 소각시설은 가동률 조정 등을 통한 미세먼지 배출량 관리 대상 사업장으로 꾸준히 논의되고 있다. 이러한 폐기물 소각시설에서는 상당량의 먼지를 포함한 대기오염물질이 배출되고 있으나, 미세먼지에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

폐기물 소각시설의 미세먼지 배출량을 산정하기 위해서는 입경별 배출계수가 필요하다. 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS)에서는 국내에 적합한 배출계수가 존재하지 않아 외국의 배출계수를 차용하고 있다. TSP는 유럽의 CORINAIR의 배출계수 중 방지시설이 설치된 Modern Plant Type 소각시설의 배출계수를 사용하고 있으며, PM-10은 US EPA의 배출계수를 사용하고 있다(국립환경과학원, 2013). PM-2.5는 실측에 기반한 배출계수를 사용하고 있지만 외국의 배출계수인 PM-10 배출계수를 기준으로 하고 있으므로 온전히 국내 실측에 기반한 배출계수라고 보기는 어렵다. 이에 따라 정확하고 신뢰도 높은 배출량을 산정하는 데는 어려움이 있어 국내 실정에 맞춘 배출계수를 개발할 필요가 있다.

본 연구에서는 경기도 내 생활폐기물 소각시설을 대상으로 미세먼지의 배출특성을 알아보고, 실측결과를 바탕으로 한 배출계수를 개발하고자 한다. 그리고 생활폐기물 소각시설의 가동률 조정에 따라 주변 대기질에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

제2절 연구의 내용 및 범위

본 연구에서는 미세먼지 배출특성을 살펴보고, 실측을 기반으로 미세먼지 배출계수를 개발하였다. 또, 소각시설의 가동률 조정에 따른 미세먼지 배출량을 산정하고, 주변지역의 대기질 영향을 분석하였다.

소각시설의 미세먼지 농도는 중량농도법을 사용하여 분석하였으며, Lung Sampler와 Gas Analyzer를 통해 폐기물 소각 시 다량 발생하는 미세먼지 생성물질인 NOx와 SOx도 함께 측정하였다.

미세먼지(PM-10, PM-2.5)는 입자 크기별 농도 분석과 함께 분율을 분석하고, 미세먼지 생성물질(NOx, SOx)의 농도를 함께 살피며 대상시설에서 발생하는 미세먼지 배출특성을 분석하였다. 본 연구에서 실측한 미세먼지 농도와 대상시설의 TMS 데이터를 수집하여 배출계수를 산정하였고, 현재 국가에서 사용 중인 폐기물소각 부문의 배출계수와 비교하였다. 본 연구에서 개발한 배출계수를 이용하여 생활폐기물 소각시설의 가동률 변화에 따른 배출량을 산정하고, 대상시설이 주변지역의 대기질에 미치는 영향을 분석하였다.

연구의 필요성
◦ 미세먼지 및 미세먼지 생성물질이 다량 발생하는 생활폐기물 소각시설의 미세먼지 발생에 관한 연구 미흡 ◦ 폐기물소각 부문의 미세먼지 배출량 관리를 위해 분율 연구 및 신뢰도 높은 배출계수 개발 필요

⇓

생활폐기물 소각시설에서 발생되는 미세먼지 및 미세먼지 생성물질 농도 측정
◦ 중량농도법을 이용한 미세먼지 농도 측정 ◦ Lung Sampler 및 Gas Analyzer를 이용한 미세먼지 생성물질 (NOx, SOx) 포집 및 측정

⇓

생활폐기물 소각시설에서 발생되는 미세먼지 배출특성 분석
◦ 미세먼지 생성물질(NOx, SOx) 농도 분석 ◦ 미세먼지(PM-10, PM-2.5) 농도 및 분율 분석 ◦ 미세먼지(PM-10, PM-2.5) 배출계수 산정 및 비교

⇓

생활폐기물 소각시설에서 발생되는 미세먼지에 의한 대기질 영향 분석
◦ 대기확산모델을 통한 생활폐기물 소각시설에서 발생되는 미세먼지에 의한 주변지역 대기질 영향 분석

<그림 1-1> 연구 흐름도

제2장 이론적 고찰

제1절 미세먼지 발생 및 배출원

1. 미세먼지의 발생과 환경기준

먼지는 대기 중에 떠다니거나 흩날려 내려오는 입자상물질을 말하며, 직경에 따라 100㎛ 이하인 총먼지(TSP, Total Suspended Particles)와 입자 직경이 매우 작은 미세먼지(PM, Particulate Matter)로 구분한다. 미세먼지는 다시 직경이 10㎛보다 작은 PM-10 과 2.5㎛보다 작은 PM-2.5 로 나뉘게 된다(환경부, 2016).

미세먼지는 공장 굴뚝, 자동차의 배기구 등 발생원으로부터 고체상태에서 직접 배출되는 1차 배출과 발생원에서 배출된 물질이 대기 중에서 화학반응을 일으켜 미세먼지가 되는 2차 생성으로 나누어진다. 수도권에서의 2차 생성 비중은 PM-2.5 발생량의 72%를 차지할 만큼 매우 높다고 알려져 있는데 PM-2.5 2차 생성물질에는 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 암모니아(NH_3), 휘발성유기화합물(VOCs) 등이 있다.

미세먼지의 대기환경 기준(<표 2-1> 참조)은 1992년까지는 총먼지만 있었으나, 1993년에 PM-10이 추가되어 함께 관리되기 시작하였다. 2001년에는 총먼지 기준을 폐지하였고, 2011년에 PM-2.5를 신설하였다. 이어 2018년 3월에는 PM-2.5의 연평균, 일평균 농도의 기준을 미국・일본과 동일한 수준으로 강화하였다(<표 2-2>참조).

<표 2-1> 먼지 항목의 국내 대기환경기준 변화

(단위: ㎍/㎥)

항 목	구 분						
	1983	1991	1993	2001	2007	2011	2018
총먼지	150 (연) 300 (일)	150 (연) 300 (일)	150 (연) 300 (일)	(삭 제)			
PM-10	-	-	80 (연) 150 (일)	70 (연) 150 (일)	50 (연) 100 (일)	50 (연) 100 (일)	50 (연) 100 (일)
PM-2.5	-	-	-	-	-	25 (연) 50 (일)	15 (연) 35 (일)

출처 : 환경부(2018), 환경정책기본법 시행령

<표 2-2> 국가별 미세먼지 대기환경기준 비교

(단위: ㎍/㎥)

항 목	기준시간	환경기준 비교					
		국내	WHO	EU	미국	일본	중국
PM-10	연간	15	10	25	12, 15	15	35
	24시간	35	25	-	35	35	75
PM-2.5	연간	50	20	40	-	-	70
	24시간	100	50	50	150	100	150

출처 : 환경부(2019), 미세먼지! 무엇이든 물어보세요

2. 미세먼지 배출원 및 배출량

「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」에 따르면 미세먼지 배출원은 미세먼지와 미세먼지 생성물질을 대기에 배출하는 시설물・기계・기구 및 그 밖의 물체로 정의하고 있다. 대표적인 배출원으로는 사업장, 발전소, 건설현장, 자동차 등 이동수단과 비산먼지 등이 있다.

국립환경과학원은 국가 대기보전 정책수립 및 관련 연구에 필요한 기초자료를 확보하기 위해, 대기오염물질 배출원을 체계적으로 분류하고 배출원별 활동자료와 배출계수를 기초로 배출량을 산정하는 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, 이하 CAPSS)을 운영하고 있다(국립환경과학원, 2018). CAPSS에서는 1999년부터 CO, NOx, SOx, TSP, PM-10, VOCs, NH_3에 해당하는 총 7개의 대기오염물질을 대상으로 배출량을 산정하기 시작했으며, 2011년에는 PM-2.5 항목을 추가하였다.

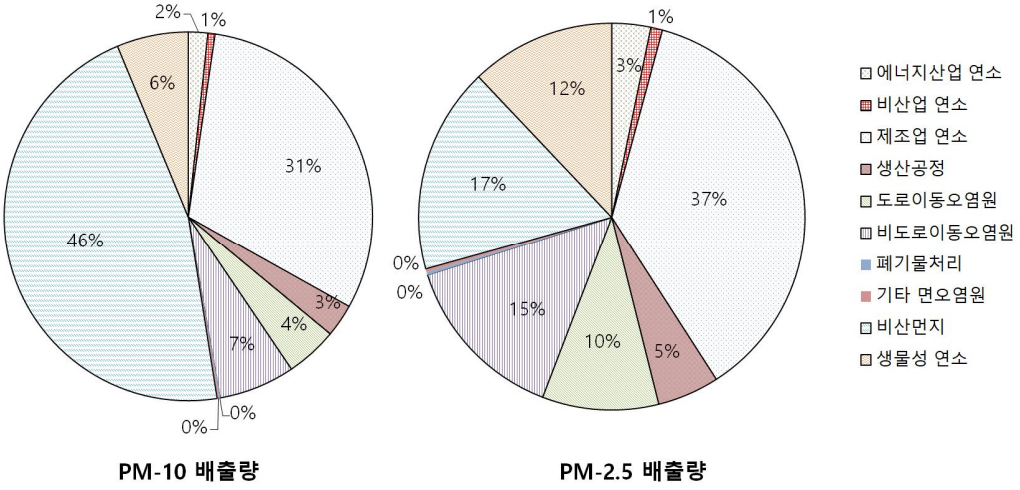
CAPSS는 유럽 CORINAIR 배출원 분류체계(SNAP 97)를 기초로 하고 있으며, 현재는 국내 실정에 맞추어 13개의 대분류로 분류하여 각 배출원별 배출량을 산정하고 있다(<표 2-3> 참조). 현재 PM-10과 PM-2.5는 13개의 배출원 중 에너지산업 연소(01), 비산업 연소(02), 제조업 연소(03), 생산공정(04), 도로이동오염원(07), 비도로이동오염원(08), 폐기물처리(09), 기타 면오염원(11), 비산먼지(12), 생물성 연소(13)의 총 10개 배출원에 대하여 배출량이 산정되고 있다.

<표 2-3> 대기오염물질 배출량 분류체계 및 산정방법

SCC	배출원 분류체계	배출량 산정방법
01	에너지산업 연소	- 연료 연소에 의한 배출량에 해당하며 대기배출원관리 시스템(SEMS) 및 관련 기초 통계자료를 기반으로 한 배출량 산정 - 점오염원에서 소비되는 연료를 제외한 나머지 연료를 면오염원으로 분류하며 석유공사, 석탄협회 등의 통계자료를 기초로 배출량을 산정
02	비산업 연소	
03	제조업 연소	
04	생산공정	- 제품 생산량이나 원료 투입량을 기반으로 산출하며, 생산 공정 부문의 배출개수는 미국 EPA, 유럽 CORINAIR 및 국내조사에서 검증된 배출계수를 적용
05	에너지수송 및 저장	- 화석연료, 특히 휘발성이 강한 휘발유의 공급으로 인한 VOC 배출량을 산정 - 주유소를 제외한 배출계수는 유럽 CORINAIR 계수 사용, 주유소는 국내 연구결과 반영 적용
06	유기용제 사용	- 페인트, 잉크 등 휘발성이 큰 유기용제의 사용에 따른 VOC 배출량 산정 - 산업시설 도장, 세탁, 인쇄 등으로 나누어 산정
07	도로이동오염원	- 자동차로 인한 대기오염물질 배출량을 산정하며, 차종별 이용 연료도 구분하여 배출량 산정
08	비도로 이동오염원	- 자동차 이외의 내연기관을 장착한 철도, 선방운항 및 항공기, 건설장비 배출량으로 분류 산정
09	폐기물처리	- 폐기물 소각, 폐수처리, 매립, 퇴비화 등의 폐기물 처리로 인한 대기오염물질 배출량 산정
10	농업	- 가축의 분뇨관리 및 비료사용으로 인한 암모니아 배출량을 산정
11	기타 면오염원	- 식생에 의한 오염물질 배출, 습지나 토양에서의 오염물질 배출, 산불 및 화재 등 배출량 산정
12	비산먼지	- 도로운행으로 인한 자동차 재비산먼지와 사업장 등에서 일정 배출구 없이 대기로 배출되는 먼지에 대한 배출량 산정
13	생물성연소	- 고기 및 생선구이, 노천소각, 아궁이 등에서 대기로 배출되는 오염물질의 국내개발 계수 적용 배출량 산정

출처: 국립환경과학원(2019), 2016 국가 대기오염물질 배출량

굴뚝에서의 1차 배출을 기준으로 PM-10과 PM-2.5의 배출원별 배출량 비율을 살펴본 것은 <그림 2-1>과 같다. 2016년 기준 PM-10은 비산먼지가 전체 배출량의 46.2%(107,735ton)를 차지하며 가장 많았고, 제조업 연소(30.8%, 71,794ton), 비도로이동오염원(6,7%, 15,588ton)이 뒤를 이었다. PM-2.5의 경우, 제조업 연소가 전체 배출량의 36.7%(36,785ton)을 차지하며 가장 많았고, 비산먼지(17.2%, 17,286ton), 비도로이동오염원(14.3%, 14,354ton)이 뒤를 이었다(<그림 2-1> 참조). 이 중 폐기물처리에 의한 PM-10 배출량은 전체 배출량의 0.13%, PM-2.5는 전체 배출량의 0.11%를 차지하며 각각 295ton과 252ton 발생한 것으로 나타났다.



<그림 2-1> 미세먼지(PM-10, PM-2.5) 배출원별 배출량 비율(2016년)

출처: 대기정책지원시스템, 2016

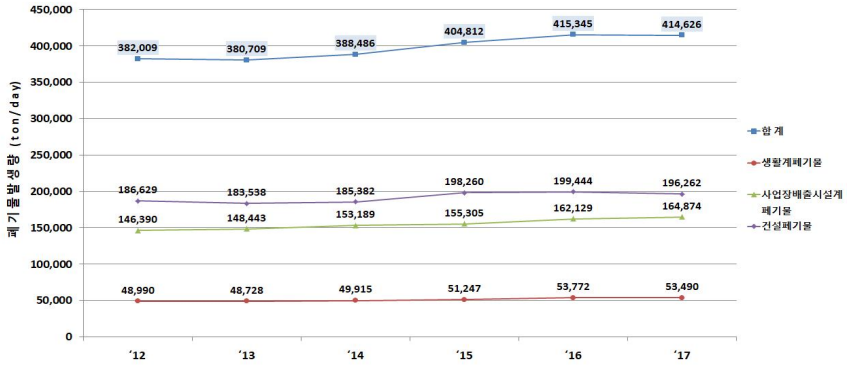
제2절 폐기물 발생 및 대기오염물질 배출 현황

1. 폐기물 발생 및 처리현황

환경부(2018)에 따르면 우리나라의 폐기물 발생량은 2017년 기준 414,626ton/day로 전년 대비 0.17% 감소하였다. 생활폐기물은 53,490ton/day로 전년 대비 0.5% 감소하였으며, 사업장폐기물의 경우 164,874ton/day로 전년대비 1.7% 증가하였고, 건설폐기물은 196,262ton/day로 전년대비 1.6% 감소하였다.

폐기물 발생량 변화추이를 살펴보면, 생활폐기물은 2013년부터 2016년까지 꾸준히 증가하는 추이를 나타냈으나 2017년에 소폭 감소하였다. 사업장폐기물은 2012년부터 2017년까지 꾸준히 증가하는 추세를 나타내고 있으며, 건설폐기물의 경우 2012년 이후 증감을 반복하다 2017년 전년대비 1.6% 감소하였다(<그림 2-2> 참조).

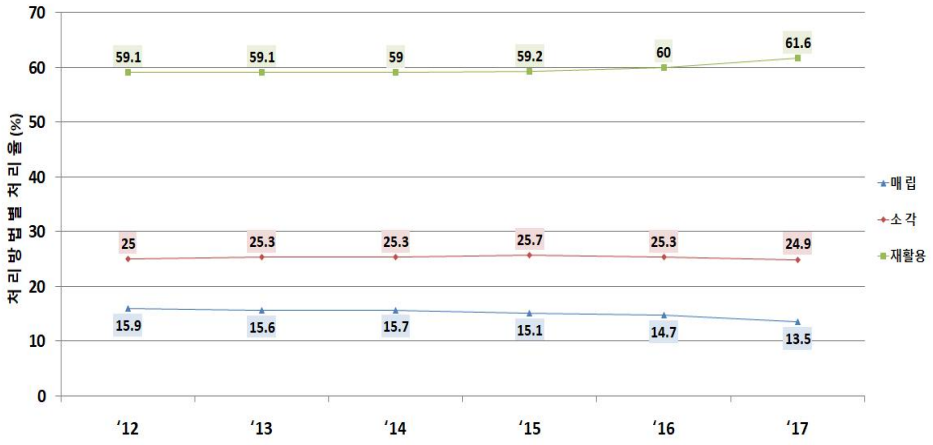
지역별 폐기물 발생량은 경기 18.3%, 충남 12.8%, 서울 11.1% 순으로 많았으며, 위 3개 시·도의 발생량이 전국 폐기물 발생량의 42.2%를 차지하는 것으로 조사되었다.



<그림 2-2> 폐기물 발생량 변화추이

출처: 환경부(2018), 전국 폐기물 발생 및 처리 현황(2017)

국내의 생활폐기물 처리방법은 매립, 소각, 재활용으로 구분된다. 2017년 기준 재활용이 32,932ton/day로 61.6%를 차지하며 가장 많았고, 그 뒤로 소각이 13,318ton/day로 24.9%, 매립이 7,240ton/day로 13.5% 순으로 나타났다. 이는 2016년과 대비하여 재활용률의 경우 1.6% 증가했으며, 소각률은 0.4% 감소, 매립률은 1.2% 감소하였다.



<그림 2-3> 연도별 생활폐기물 처리방법별 처리율 변화추이

출처: 환경부(2018), 전국 폐기물 발생 및 처리 현황(2017)

현재 우리나라의 폐기물 소각시설은 소각량에 따라 대형(2,000kg/hr 이상), 중형(200~2,000kg/hr), 소형(200kg/hr 이하) 사업장으로 구분하고 있다. 운영방식은 일 24시간 가동하는 연속식과 하루 16시간 가동하는 준연속식, 일 8시간 가동하는 회분식으로 구분된다. 또한 소각방식에 따라 분류하면 스토커방식, 유동상식, 회전로식, 열분해식, 용융식 등으로 구분된다(윤상규, 2013).

2015년 기준 지방자치단체에서 운영하는 국내 생활폐기물 소각시설은 <표 2-4>에서 보는 바와 같이 전국에 184개소이며, 대형사업장으로 분류되는 소각시설은 대부분 연속 연소 방식을 사용하고 있다. 소각방식은 스토커방식이 135개소로 가장 많았으며 고정상방식, 열분해용융방식이 뒤를 잇고 있다(<표 2-4> 참조).

<표 2-4> 폐기물 소각시설의 소각방식 현황

(단위 : 개소)

구분	지방자치단체	자가처리업체	계
스토커	135	1	136
유동상식	4	-	4
스토커 + 로타리킬른	1	-	1
분무연속	-	-	-
고정상	17	12	29
열분해용융	17	1	18
가스화용융	1	-	1
상연소	6	1	7
직화식	-	4	4
기타	3	-	3
계	184	19	203

출처: 환경부, 2016

2. 폐기물 소각시설의 대기오염물질 배출현황

CAPSS 배출원 분류체계에 따르면, 폐기물처리 부문의 배출원은 <표 2-5>와 같이 폐기물소각 부문과 기타 폐기물처리 부문으로 구분할 수 있다. 폐기물소각 부문은 생활폐기물과 사업장폐기물으로 재분류되고, 기타 폐기물처리 부문은 산업폐수 처리, 주거외 상업폐수 처리, 매립 세가지로 재분류할 수 있다.

<표 2-5> 폐기물처리 배출원 분류체계

대분류	중분류	소분류	세분류
폐기물 처리	폐기물 소각	생활폐기물	소형(200kg/hr이하)
			중형(200~2,000kg/hr이하)
			대형(2,000kg/hr이상)
			기타
		사업장폐기물 (플레어링 제외)	소형(200kg/hr이하)
			중형(200~2,000kg/hr이하)
			대형(2,000kg/hr이상)
			기타
	기타 폐기물 처리	산업폐수 처리	
		주거외 상업폐수 처리	
		매립	

출처: 국립환경과학원(2013), 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(Ⅲ)

<표 2-6>과 같이 폐기물소각 부문은 CO, NOx 등 8개 항목에 대해 배출량을 산정하고 있지만 기타 폐기물 처리 부문은 활동자료 및 배출계수의 부족으로 VOC 및 NH_3 항목에 대하여만 배출량이 산정되고 있다. 폐기물소각 부문의 PM-10 배출량 295ton/yr 중 생활폐기물 소각 부문은 78ton/yr으로 26.39%를 차지하고 있으며, PM-2.5 배출량 252ton/yr 중 생활폐기물 소각 부문은 58ton/yr으로 22.94%에 해당한다.

<표 2-6> 폐기물처리 부문 대기오염물질 배출량(2016년)

(단위 : ton/yr)

대분류	중분류	소분류	CO	NOx	SOx	TSP	PM-10	PM-2.5	VOC	NH_3
폐기물 처리	폐기물 소각	생활폐기물	786	3,436	1,609	107	78	58	108	-
		사업장폐기물	1,222	10,133	552	299	217	194	55,412	
	기타 폐기물 처리	산업폐수 처리	-						-	6
		주거와 상업폐수 처리								16
		매립							3,468	-

출처: 대기정책지원시스템, 2016

제3절 선행연구 분석

생활폐기물 소각시설에서 발생되는 미세먼지에 관련된 선행연구를 살펴본 결과, 폐기물 소각시설에 관한 연구나 미세먼지에 관한 연구들은 다수 있었으나, 생활폐기물 소각시설에서 발생되는 미세먼지에 관한 연구는 많지 않았다.

국립환경과학원(2009)은 2005년 CAPSS 자료를 기준으로 PM-10 배출량이 많은 대분류된 배출원 중 배출비율이 높은 생활폐기물 소각시설, 화력발전시설, 제철제강 소결시설 등 대표적인 시설을 대상으로 연구를 진행하였다. 이 중 생활폐기물 소각시설에서 배출되는 먼지 농도 측정을 위해 미국 EPA 201A 방법을 기준으로 사이클론 채취기를 사용하여 시료를 채취하였으며, 시간당 17ton의 원료가 투입되는 대형 생활폐기물 소각시설을 대상시설로 선정하였다. 공정설비는 소각로/폐열보일러/EP/습식세정/gas reheater/SCR의 순서이다. 측정 결과, PM-10 농도는 평균 1.18 ~ 1.35mg/S㎥($1.27_{avg.}$mg/S㎥), PM-2.5 농도는 평균 0.81 ~ 1.14mg/S㎥ ($0.95_{avg.}$mg/S㎥) 으로 나타났으며, PM-2.5/PM-10 분율은 69 ~ 84%로 나타났다.

국립환경과학원(2013)은 PM-2.5 다량 배출사업장인 생활폐기물 소각시설, 유연탄 화력발전시설, 시멘트 소성로 등 대형사업장을 대상으로 입경별 먼지 농도를 측정하고 배출계수를 산정하였다. 이 중 생활폐기물 소각시설에서 배출되는 먼지 농도 측정을 위해 미국 EPA 201A 방법을 기준으로 사이클론 채취기를 사용하였으며, 소각시설 총 3개소를 대상으로 연구를 진행하였다. ‘소각시설 1’은 원료투입량 150ton/day로 SNCR/SDR/활성탄/여과집진 순서의 공정설비를 갖추고 있고, ‘소각시설 2’는 250ton/day로 SNCR/SCR/여과집진, ‘소각시설 3’은 300ton/day로

전기집진/습식세정/SCR 순서의 공정설비를 갖추고 있다. 측정 결과, PM-10 농도는 소각시설 1은 $0.574_{avg.}$mg/S㎥, 소각시설 2는 $7.864_{avg.}$mg/S㎥, 소각시설 3은 $1.420_{avg.}$mg/S㎥로 나타났고, PM-2.5 농도는 각각 $0.344_{avg.}$mg/S㎥, $3.681_{avg.}$mg/S㎥, $0.351_{avg.}$mg/S㎥로 나타났다. PM-2.5/PM-10 분율은 소각시설 1이 평균 0.60, 소각시설 2는 평균 0.47, 소각시설 3은 평균 0.95로 나타났다. 실측을 바탕으로 산정한 배출계수는 소각시설1은 PM-10 3.5g/ton, PM-2.5 2.1g/ton, 소각시설2는 PM-10 47.0g/ton, PM-2.5 22.1g/ton, 소각시설3은 PM-10 10.4g/ton, PM-2.5 9.9g/ton으로 나타났다.

김혜리(2015)는 생활폐기물 소각시설, 유연탄 화력발전시설, 시멘트 소성시설 등 먼지를 배출하는 시설들을 대상으로 먼지 농도를 파악하고 그에 따른 입경분율 및 배출계수를 산정하였다. 이 중 소각시설의 경우, 배출 설비별로 먼지의 질량농도 및 입경 분율을 파악한 결과, 각 시설마다 농도 및 분율이 차이를 보였고, 산정된 배출계수는 국가 배출계수보다 낮은 수준인 TSP 4.6g/ton, PM-10 2.9g/ton, PM-2.5 1.8g/ton으로 나타났다.

박현수(2019)는 발전시설과 소각시설을 중심으로 미세먼지 배출특성을 살펴보았다. 소각시설에서 발생하는 먼지의 농도를 입경별로 나누어 측정하였으며, 이 중 TSP 중 PM-10 이상의 분포율은 46.4%, PM-2.5 ~ PM-10사이의 분포율은 20.3%, PM-2.5의 분포율은 33.2%로 나타났다. 또한 중금속 농도를 분석한 결과, 소각시설에서 배출되는 중금속이 발전시설에 비해 PM-10의 경우 6배~10배 높은 것으로 나타났다.

<표 2-7> 생활폐기물 및 미세먼지 관련 국내·외 연구

관련 연구	연구 내용
국립환경과학원 (2009)	· 실측을 통해 대형 생활폐기물 소각시설의 먼지의 질량농도 및 입경 분율을 조사함.
국립환경과학원 (2013)	· 실측을 통해 대형 생활폐기물 소각시설의 3개소를 대상으로 먼지의 질량농도 및 입경 분율을 조사하고, 미세먼지 배출계수를 산정함. · 개발한 배출계수는 PM-10의 경우, 소각시설2만 국가 배출계수 값보다 높은 수준을 보였으며, PM-2.5의 경우, 소각시설 3개소 모두 국가 배출계수 값보다 낮은 수준으로 나타남.
김혜리 (2015)	· 생활폐기물 소각시설의 먼지의 질량농도 및 입경 분율을 조사하고, 배출계수를 개발함. · 개발한 배출계수는 국가 배출계수 값보다 낮은 수준으로 나타남.
박현수 (2019)	· 소각시설의 미세먼지 배출특성을 살피기 위해 입경별 먼지 농도를 측정함.

제3장 연구방법

본 연구에서는 대형 생활폐기물 소각시설의 최종 배출구를 대상으로 중량농도법을 이용하여 총 10회에 걸쳐 미세먼지를 측정·분석하였고, Gas Analyzer를 이용하여 미세먼지 생성물질을 포집·측정하였다. 또한, 대기확산모델을 이용하여 대상시설에서 배출되는 미세먼지가 주변지역에 미치는 영향을 분석하였다.

제1절 대상시설 선정

전국 생활폐기물의 1일 평균 발생량은 53,490ton으로 경기 지역이 11,605ton/day로 가장 많이 발생하고, 서울 9,217ton/day, 경남 4,004ton/day 순으로 많이 배출된다(환경부, 2018). 또한 2015년 기준, 지방자치단체에서 관리하는 생활폐기물 소각시설 186개소 중 163개소는 화격자 방식의 소각로 형태로 가장 많았으며, 다음으로 열분해 용융 방식이 8개소, 열분해 방식이 7개소 등으로 조사되었다(한국환경산업기술원, 2018). 본 연구에서는 1일 평균 생활폐기물이 가장 많이 배출되는 경기도에 위치한 지방자치단체 관할 생활폐기물 소각시설 중 가장 많이 사용되고 있는 소각로 형식인 화격자 방식을 사용하는 소각시설을 대상시설로 선정하였다.

주변지역으로는 대상시설을 중심으로 4km 반경 안에서 서쪽과 북쪽으로는 국가산업단지가 위치해 있고, 남쪽으로는 공공시설 개발구역이 있으며, 서쪽에는 4,000세대 이상이 거주하고 있는 아파트단지 및 대형병원 등의 주거지가 위치하고 있다.

대상시설은 200ton/day 규모의 화격자 방식을 사용하며, 24시간 가동

하는 연속 연소식 소각시설로 소각설비, 연소가스냉각설비, 연소가스처리설비 네 단계로 구성된다. 소각설비는 수거·반입된 쓰레기를 소각하는 쓰리게 소각처리시설의 핵심시설로서, 송풍기, 소각로, 폐열보일러 등으로 구성되어 있다. 투입 호퍼에 투입된 쓰레기는 급진기에 의해 연소제어시스템에 따라 계단식 화격자 위로 공급되며, 화격자로 이송된 쓰레기는 건조, 연소, 후연소의 과정을 거치며 소각된다. 연소가스 냉각설비는 소각로에서 발생되는 고온(850℃~1100℃)의 연소가스를 이용하여 과열 증기를 발생시키는 자연순환형 수관식 형식의 증기 발생장치로 80.08%의 효율을 가진다. 연소가스처리설비는 먼지, 황산화물, 질소산화물, 다이옥신 등 유해가스와 중금속류를 처리해 배출하는 설비로, 무촉매환원설비(SNCR), 반건식반응흡수탑(SDA), 활성탄주입설비(A/C), 여과집진기(B/F)로 구성되어 있다.

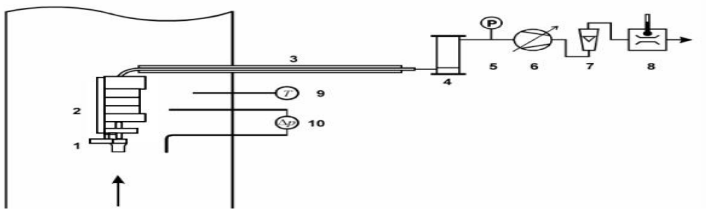
제2절 미세먼지(PM-10, PM-2.5) 및 미세먼지 생성물질 측정방법

1. 미세먼지(PM-10, PM-2.5) 측정방법

본 연구에서는 대상시설에서 발생하는 미세먼지의 측정을 위해 대상시설의 최종 배출구를 대상으로 총 10회에 걸쳐 샘플링 당 최소 1시간 이상씩 진행하였다.

미세먼지 농도 측정에는 중량농도법을 사용하였다. 중량농도법은 포집된 미세먼지의 중량을 저울로 재는 방식으로 국제표준시험기준인 ISO 23210을 근거로 작성된 Cascade Impactor 형식의 KS(한국산업표준) I ISO 23210:2012 방법을 선택하였다. 측정장비인 Cascade Impactor(PM-10, PM-2.5 Impactor, Johnas, Paul Gothe GmbH)의 모식도와 사진은 <그림 3-1> 및 <그림 3-2>와 같다.

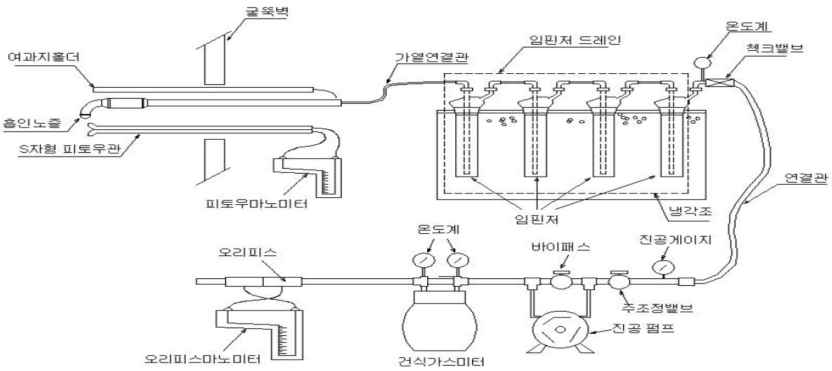
시료 채취 전, 온도와 습도가 유지된 실험실에서 외부 먼지 유입을 최소화하여 여과지를 제작하고, 항온항습장치에서 여과지를 안정화시킨 후, 분석용 저울로 0.01㎎ 단위까지 3회 이상 측정하였다. 시료의 채취를 위하여 Cascade Impactor에 배기가스 유속에 적합한 적정 직경 8mm, 10mm 노즐을 연결해 굴뚝시료채취장치(Stack Sampler, CAE, USA)를 통해 배기가스 중 미세먼지를 등속흡인함에 따라 측정장비 내 여과지에 미세먼지를 입경별 분리포집하였다. 포집한 미세먼지는 실험실로 이송해 다시 항온항습장치를 통해 여과지를 안정화시킨 후, 무게를 측정하였다. 이러한 과정을 거치며 시료채취 전과 후 여지 무게의 차이에 따라 대상시설에서 발생하는 미세먼지의 농도를 파악하였다.

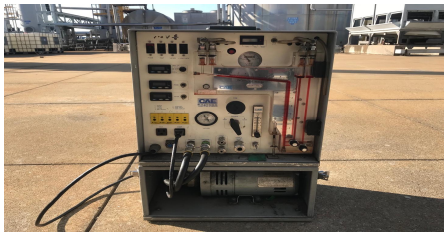


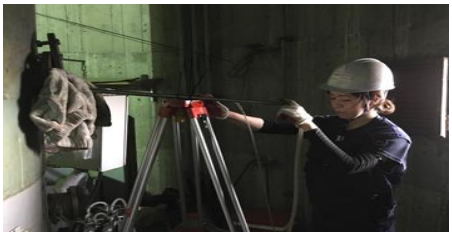
Components of the setup are given below:

1. Isokinetic nozzle
2. Two-stage impactor
3. Suction tube
4. Drying column
5. Manometer
6. Pump
7. Flow meter
8. Gas volume measurement device with thermometer
9. Temperature measurement device
10. Pitot tube with differential pressure meter

<그림 3-1> Cascade Impactor(PM-10, PM-2.5 Impactor, Johnas, Paul Gothe GmbH)



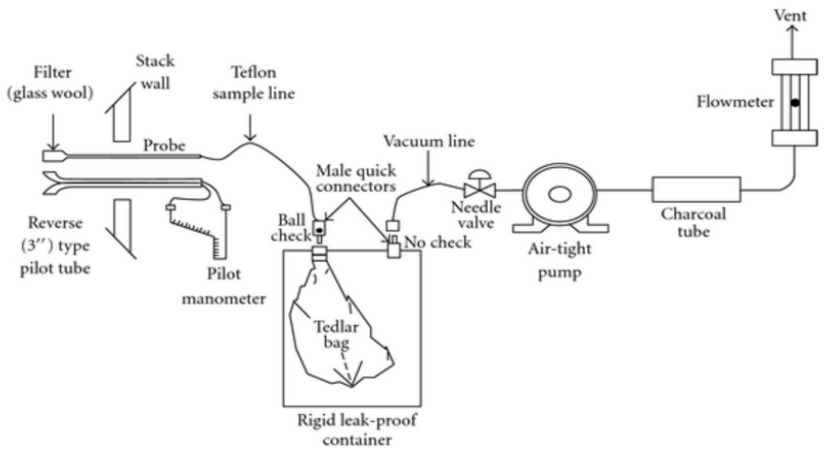




<그림 3-2> Stack Sampler(CAE, USA)

2. 미세먼지 생성물질 측정방법

본 연구에서 측정한 미세먼지 생성물질은 NOx, SOx로 위 물질의 측정을 위해 EPA Method 18(US EPA, 2000) 방법을 사용하였다. 배기가스 내 해당 오염물질을 총 10회에 걸쳐 간헐포집 후, Gas Analyzer(GreenLine MK2)를 이용하여 각각의 농도를 분석하였다(<그림 3-3> 참조).



<그림 3-3> Lung Sampler를 이용한 간헐포집(EPA Method 18)

출처 : US EPA, 2000

간헐포집은 Lung Sampler(ACEN, KOREA) 내부에 Tedlar bag(SKC, US)을 연결한 후, Lung Sampler의 펌프를 작동시켜 장비 내부를 부압으로 만들어 시료가 펌프를 거치지 않고 Tedlar bag 내에 포집되는 방법이다. 대상시설에서 배출되는 배기가스의 평균유속은 15m/sec 이상이고, 온도는 평균 145℃로 포집되는 과정에서 시료채취관에 의해 변성이 일어나야 하지 않기 때문에 스테인레스강 재질의 시료채취관을 제작하여 사용하였다. 또한 Lung Sampler 앞에 임핀저와 실리카겔을 담은 흡수병을 설치하여 배기가스 내 수분을 제거하였다(<그림 3-4> 참조).

(a) Lung Sampler(ACEN, KOREA)

(b) 시료채취 모습

<그림 3-4> Lung Sampler에 의한 시료채취

제3절 미세먼지(PM-10, PM-2.5) 배출계수 산정방법

본 연구에서는 생활폐기물 소각시설의 미세먼지(PM-10, PM-2.5) 배출계수 산정을 위하여 식 (1)을 사용하였다. 미세먼지 농도(㎎/㎥)는 실측에 의한 값이며, 1일 적산유량(S㎥/day), 1일 소각량(ton-waste/day)을 이용하여 계산했다. 유량 및 소각량 자료의 경우, 대상시설로부터 TMS 자료를 제공받아 산정하였다

$$EF_{PM} = \frac{C_{PM} \times Q_{day}}{W} \times 10^{-6} \qquad (1)$$

EF_{PM} = PM 배출계수(kg PM/ton-waste)

C_{PM} = PM 농도(㎎/㎥)

Q_{dau} = 1일 적산유량(S㎥/day)

W = 1일 소각량(ton-waste/day)

제4절 확산모델을 이용한 배출 분포 파악

대기질 예측모델링은 오염원으로부터 대기 중 오염물질 배출과 기상변수, 오염물질의 제거 및 수송 과정과 관련된 매개변수와 같은 종속변수들을 이용하여 대기오염물질들의 시・공간적인 농도를 계산하는 것이다(최윤현, 2009).

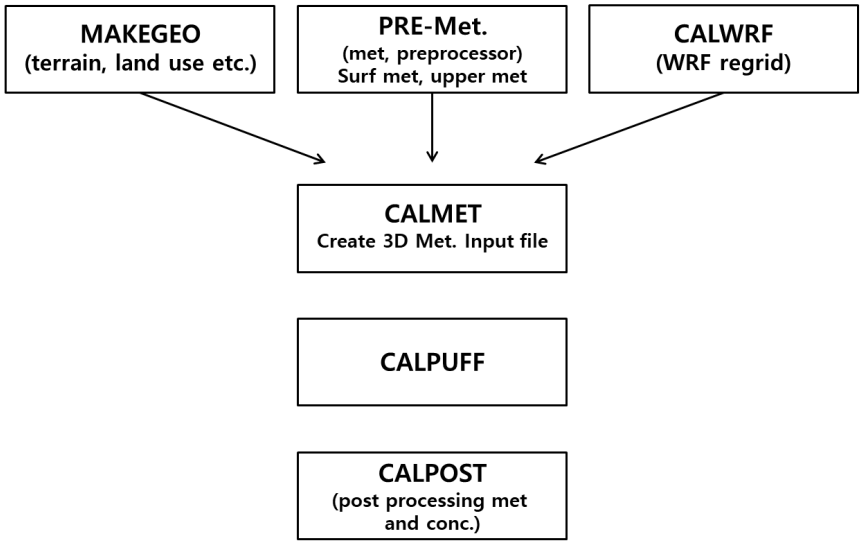
대기확산모델은 방법에 따라 확산식에 기초한 결정론적 모델, 과거자료의 통계적인 특징을 분석해 작성하는 통계 모델, 실제 지형이나 건물 등의 모형을 사용해 확산 특성을 조사하는 물리 모델로 구분할 수 있다. 확산모델의 종류는 매우 많으며 분류하는 관점에 따라 적용이론, 기간, 대상지역 규모, 지형, 오염물질 반응성, 대기상태, 오염원 종류 등에 따라 분류할 수 있다. 우리나라의 대기질 환경영향평가는 사업 유형에 따라 적정 모델을 사용하여 대기확산 모델링을 수행하고 있다. 환경영향평가의 대기질 작성 가이드라인에 따르면 발전소, 소각장 등 대형 점오염원의 경우, CALPUFF 모델의 사용을 권장하고 있다.

CALPUFF 모델은 굴뚝에서 연속적으로 배출되는 연기를 잘게 나누어진 각각의 연기 덩어리(puff)로 배출된다고 가정하고, 이 배출된 퍼프가 공간적 해상도를 갖는 바람장을 따라 이동・확산 될 때, 퍼프가 미치는 영향을 종합해 수용지점의 농도를 계산하는 모델이다.

또한, 오염물질의 침적, 점·선·면 오염원에 의한 지표면의 영향, 시정거리 평가, 장거리 수송 연구와 같은 대기질 모델링 연구의 광범위한 변화를 모사가 가능하며, 한시간부터 일년까지 시간에 대한 농도 예측과 복잡한 지형상황도 고려 가능한 비정상상태 모델이다(고경진, 2009; 하민진, 2015).

<그림 3-5>와 같이 CALPUFF 모델은 진단・예측 기상장 생성 모듈을

포함한 기상 모델링(CALMET)과 화학적 제거, 복잡지형 알고리즘, 빌딩 다운워시, 연기침강 등을 다루는 가우시안 퍼프 확산모델(CALPUFF), 기상 자료와 농도 및 침적량에 대한 결과를 볼 수 있는 후 처리 프로그램(CALPOST)의 세가지 요소로 구성되어 있다. <그림 3-6>에는 CALPUFF 모델을 구성하고 있는 요소를 도식화하였다.



<그림 3-5> CALPUFF 모델의 구성

제4장 생활폐기물 소각시설의 미세먼지 배출특성

제1절 생활폐기물 소각시설의 미세먼지 및 2차 생성물질 농도

1. 생활폐기물 소각시설에서 발생되는 미세먼지 농도

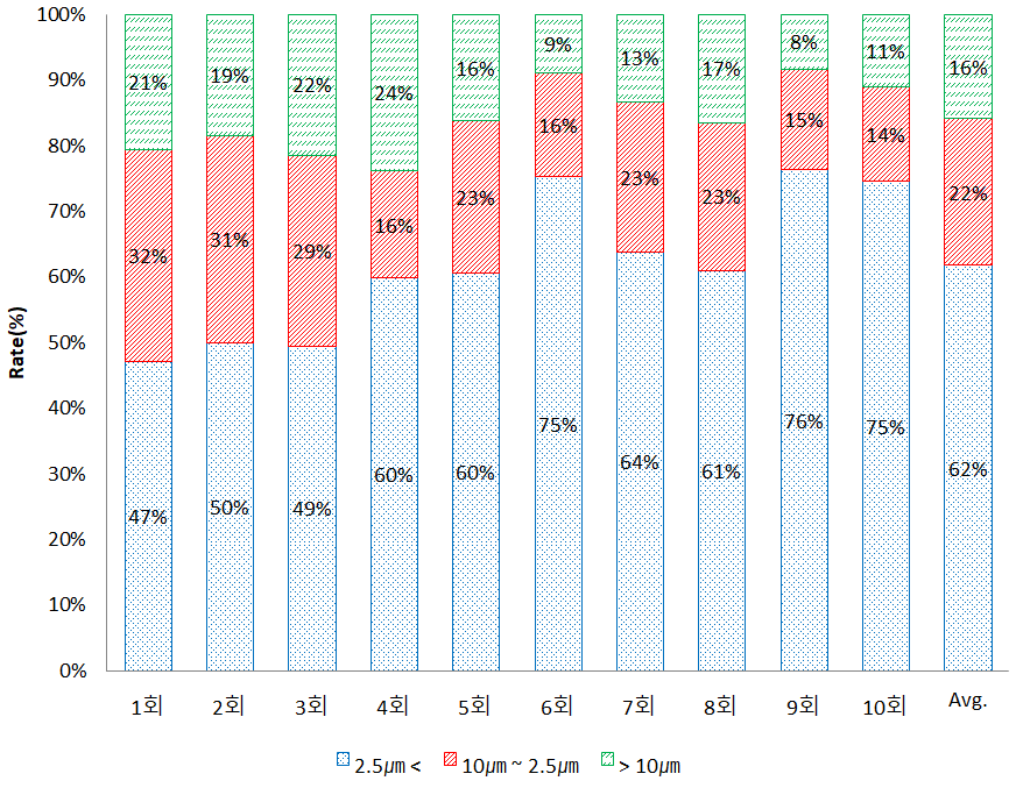
대상시설에서 발생되는 미세먼지(PM-10, PM-2.5)는 등속흡인 조건에서 총 10회 측정하였다(<표 4-1> 참조). 대상시설에서 발생되는 평균 농도는 TSP 6.483(±0.965)mg/m^3, PM-10 5.488(±1.123)mg/m^3, PM-2.5는 4.071(±1.241)mg/m^3으로 분석되었다.

<표 4-1> 생활폐기물 소각시설에서 발생되는 미세먼지 농도

(단위 : mg/㎥)

시료번호 / 입자크기	1	2	3	4	5	6
TSP	6.286	5.429	5.909	5.157	5.450	7.046
PM-10	4.986	4.419	4.638	3.924	4.563	6.409
PM-2.5	2.962	2.715	2.922	3.083	3.295	5.302
시료번호 / 입자크기	7	8	9	10	평균	표준편차
TSP	7.135	7.047	7.944	7.423	6.483	0.965
PM-10	6.186	5.884	7.279	6.596	5.488	1.123
PM-2.5	4.544	4.297	6.063	5.530	4.071	1.241

TSP를 100%로 보았을 때, 농도의 분석값을 토대로 산정된 생활폐기물 소각시설의 미세먼지를 PM-2.5 이하, PM-10~PM-2.5, PM-10 이상 입자 크기별 평균 분포를 나타내었다. 살펴보면 10㎛ 이상이 16%, 10㎛~2.5㎛ 사이의 분포율은 22% 그리고 2.5㎛ 이하의 입자 크기는 62%로 가장 높게 나타났다(<그림 4-1> 참조).



<그림 4-1> 생활폐기물 소각시설에서 발생되는 미세먼지의 입자크기별 분포율

2. 생활폐기물 소각시설에서 발생되는 미세먼지 생성물질 농도

대상시설에서 발생되는 미세먼지 생성물질 중 NOx, SOx 분석은 총 10회 실시하였다. 분석 결과, NOx의 평균 농도는 23.44ppm이며, 표준편차는 6.01ppm로 나타났다. SOx의 평균 농도는 1.37ppm이며, 표준편차는 0.70ppm로 나타났다(<표 4-2> 참조).

<표 4-2> 대상시설에서 발생되는 NOx 및 SOx 농도

(단위 : ppm)

시료번호	NOx	SOx
1	24.97	2.38
2	18.64	1.40
3	18.47	2.53
4	17.44	1.86
5	22.27	1.18
6	26.00	0.80
7	34.85	1.12
8	30.47	0.36
9	16.44	0.77
10	24.87	1.31
평균(ppm)	23.44	1.37
표준편차(ppm)	6.01	0.70

제2절 생활폐기물 소각시설의 미세먼지 입경분율

대형사업장 등 점오염원에서 발생하는 미세먼지의 관리를 위해서는 각 배출시설에 대한 배출량 파악이 필수적이다. 일반적으로 배출시설의 배출량 산정을 위해 쓰이는 배출계수는 TSP를 기준으로 개발되며, PM-10 및 PM-2.5의 배출계수는 TSP 배출계수에 먼지 입경분율을 곱하여 산정하게 되므로, 미세먼지 입경분율은 배출량 산정에 중요한 요소이다.

1. 생활폐기물 소각시설에서 발생되는 미세먼지 입경분율

대상시설에서 발생되는 미세먼지의 입경분율은 측정한 미세먼지의 농도를 바탕으로 그 입경에 따라 PM-10/TSP, PM-2.5/TSP, PM-2.5/PM-10 세 종류로 나누어 그 비율을 살펴보았다. 그 결과, PM-10/TSP의 평균은 0.841, PM-2.5/TSP의 평균은 0.618, PM-2.5/PM-10의 평균은 0.731로 나타났다(<표 4-3> 참조).

<표 4-3> 생활폐기물 소각시설에서 발생되는 미세먼지 입경분율

시료번호 / 입경분율	1	2	3	4	5	6
PM-10/TSP	0.793	0.814	0.785	0.761	0.837	0.910
PM-2.5/TSP	0.471	0.500	0.495	0.598	0.605	0.752
PM-2.5/PM-10	0.594	0.614	0.630	0.786	0.722	0.827
시료번호 / 입경분율	7	8	9	10	평균	표준편차
PM-10/TSP	0.867	0.835	0.916	0.889	0.841	0.054
PM-2.5/TSP	0.637	0.610	0.763	0.745	0.618	0.109
PM-2.5/PM-10	0.735	0.730	0.833	0.838	0.731	0.092

2. 생활폐기물 소각시설의 미세먼지 입경분율 비교

가. PM-10 입경분율

연구 결과, TSP 대비 PM-10의 분율은 0.8407로 분석되었으며, PM-10/TSP 분율은 <표 4-4>에서 보는 바와 같이 연구에 따라서 다양하게 나타났다. 대상시설의 방지시설은 SNCR(Selective Non-Catalytic Reduction, 무촉매환원설비), SDA(Semi-Dry Absorber, 반건식반응흡수탑), A/C(Activated Carbon, 활성탄주입설비) 그리고 여과집진 네 단계로 이루어져 있다. 본 연구와 유사한 방지시설을 가진 소각시설을 대상으로 연구한 국립환경과학원(2013)의 분율값은 0.6300으로 본 연구보다 작았다(<표 4-4> 참조).

<표 4-4> 본 연구와 기존연구의 PM-10/TSP 비교

구분	생활폐기물 소각시설(대형)	
	방지시설	입경분율 (PM-10/TSP)
본 연구	SNCR-SDA-A/C-여과집진	0.8407
국립환경과학원 (2013)	SNCR-SDA-A/C-여과집진	0.6300
	SNCR-SDA-여과집진	0.3800
	전기집진-습식세정-SCR[1]	0.9900
한국환경공단 (2013)	전기집진-습식세정-SCR	0.3450

1) SCR(Selective Catalytic Reduction): 선택적환원촉매

나. PM-2.5 입경분율

연구 결과, TSP 대비 PM-2.5의 분율은 0.6176으로 분석되었으며, PM-2.5/TSP 분율은 <표 4-5>에서 보는 바와 같이 연구에 따라서 다양하게 나타났다. 본 연구와 유사한 방지시설을 가진 소각시설을 대상으로 연구한 국립환경과학원(2013)의 분율값은 0.3800으로 본 연구보다 작았다(<표 4-5> 참조).

<표 4-5> 본 연구와 기존연구의 PM-2.5/TSP 비교

구분	생활폐기물 소각시설(대형)	
	방지시설	입경분율 (PM-2.5/TSP)
본 연구	SNCR-SDA-A/C-여과집진	0.6176
국립환경과학원 (2013)	SNCR-SDA-A/C-여과집진	0.3800
	SNCR-SDA-여과집진	0.1800
	전기집진-습식세정-SCR	0.9400
한국환경공단 (2013)	전기집진-습식세정-SCR	0.1860

다. PM-10 대비 PM-2.5 입경분율

연구 결과, PM-10 대비 PM-2.5 분율은 0.7310으로 분석되었으며, PM-2.5/PM-10 분율은 <표 4-6>과 같이 연구에 따라서 다양하게 나타났다. 현재 국가에서 PM-2.5 배출계수 산정을 위해 사용하고 있는 생활폐기물 소각시설의 PM-2.5/PM-10 분율은 0.6617로 본 연구보다 크며, 본 연구와 유사한 방지시설을 가진 소각시설을 대상으로 연구한 국립환경과학원(2013)의 분율값은 0.6000으로 본 연구보다 작았다(<표 4-6> 참조). 방지시설이 같은 경우에도 입경분율에 차이가 있는 것은 소각되는 생활폐기물의 성상, 소각로 운전조건 등에 차이가 있기 때문이다.

<표 4-6> 본 연구와 기존연구의 PM-2.5/PM-10 비교

구분	생활폐기물 소각시설(대형)	
	방지시설	입경분율 (PM-2.5/PM-10)
본 연구	SNCR-SDA-A/C-여과집진	0.7310
국가 사용 값	-	0.6617
국립환경과학원 (2009)	전기집진-습식세정-SCR	0.7800
국립환경과학원 (2013)	SNCR-SDA-A/C-여과집진	0.6000
	SNCR-SDA-여과집진	0.4700
	전기집진-습식세정-SCR	0.9500
한국환경공단 (2013)	전기집진-습식세정-SCR	0.4550

제3절 생활폐기물 소각시설의 미세먼지 배출계수

1. 생활폐기물 소각시설의 미세먼지 배출계수 산정

생활폐기물 소각시설의 미세먼지 배출계수를 산정하기 위해 연구 대상시설로부터 샘플링 시간동안의 배기가스 유량, 소각량 데이터를 제공받아 사용하였다. 배출계수는 식 (1)을 사용하여 산정하였으며, 계산에 사용된 배기가스 유량, 소각량, 회차별 미세먼지 배출농도를 <표 4-7> 및 <표 4-8>에 나타냈다.

가. PM-10 배출계수

생활폐기물 소각시설의 PM-10 배출계수는 <표 4-7>과 같다. 10회 측정된 생활폐기물 소각시설의 PM-10 배출계수 최솟값과 최댓값은 각각 0.0648kg/ton, 0.0266kg/ton으로 나타났으며, 평균값은 0.0441kg/ton으로 나타났다.

<표 4-7> 생활폐기물 소각시설의 PM-10 배출계수 산정 결과

시료 번호	농도 (mg/㎥)	샘플링 시간당 적산유량 (S㎥/hr)	샘플링 시간당 소각량 (ton/hr)	배출계수 (kg/ton)
1	4.986	61,466	8.07	0.0380
2	4.419	62,799	8.63	0.0322
3	4.638	61,146	7.92	0.0358
4	3.924	59,876	8.83	0.0266
5	4.563	59,148	8.88	0.0304
6	6.409	69,123	6.84	0.0648
7	6.183	65,307	7.08	0.0571
8	5.884	59,148	7.99	0.0436
9	7.279	63,305	7.89	0.0584
10	6.596	63,869	7.71	0.0546
평균(kg/ton)				0.0441
표준편차(kg/ton)				0.0136

나. PM-2.5 배출계수

생활폐기물 소각시설의 PM-2.5 배출계수는 <표 4-8>과 같다. 10회 측정된 생활폐기물 소각시설의 PM-10 배출계수 최솟값과 최댓값은 각각 0.0536kg/ton, 0.0198kg/ton으로 나타났으며, 평균값은 0.0330kg/ton으로 나타났다.

<표 4-8> 생활폐기물 소각시설의 PM-2.5 배출계수 산정 결과

시료 번호	농도 (mg/㎥)	샘플링 시간당 적산유량 (S㎥/hr)	샘플링 시간당 소각량 (ton/hr)	배출계수 (kg/ton)
1	2.962	61,466	8.07	0.0226
2	2.715	62,799	8.63	0.0198
3	2.922	61,146	7.92	0.0226
4	3.083	59,876	8.83	0.0209
5	3.295	59,148	8.88	0.0219
6	5.302	69,123	6.84	0.0536
7	4.544	65,307	7.08	0.0419
8	4.297	59,148	7.99	0.0318
9	6.063	63,305	7.89	0.0486
10	5.530	63,869	7.71	0.0458
평균(kg/ton)				0.0330
표준편차(kg/ton)				0.0132

2. 생활폐기물 소각시설의 미세먼지 배출계수 비교

<표 4-9>에 본 연구와 선행연구에 의한 생활폐기물 소각시설의 미세먼지 배출계수를 비교하였다. 본 연구에서 개발한 생활폐기물 소각시설의 PM-10 배출계수는 0.0441kg/ton, PM-2.5 배출계수는 0.0330kg/ton으로 국가 배출계수인 0.0362kg/ton, 0.0240kg/ton보다 각각 1.22배, 1.37배 크게 나타났다.

<표 4-9> 본 연구와 기존연구의 배출계수 자료 비교

(단위 : kg/ton)

구분	생활폐기물 소각시설(대형)		비고 (방지시설)
	PM-10	PM-2.5	
본 연구	0.0441	0.0330	SNCR-SDA-A/C-여과집진
국가 배출계수	0.0362	0.0240	-
국립환경과학원 (2013)	0.0035	0.0021	SNCR-SDA-A/C-여과집진
	0.0470	0.0221	SNCR-SDA-여과집진
	0.0104	0.0099	전기집진-습식세정-SCR

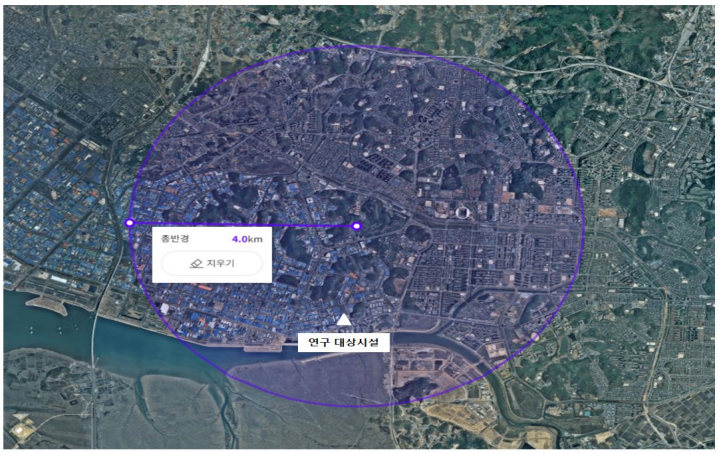
제5장 생활폐기물 소각시설의 주변지역 대기질 영향 분석

대상시설에서 배출되는 PM-2.5가 주변지역 대기질에 미치는 영향을 대기확산모델을 이용하여 분석하였다. 고농도 미세먼지 발생 시, 비상저감조치 발령에 따라 대상시설인 대형 생활폐기물 소각시설의 가동률을 조정한다고 가정했을 때의 대기질 영향을 살펴보았다.

제1절 대기확산모델 입력자료

1. 모델링 입력자료

CALPUFF 모델을 구동하기 위해 모델링 영역은 연구 대상시설을 중심으로 4방위로 동서방향으로는 각각 2km, 북쪽 6km, 남쪽 2km 이격된 범위로 설정하였고(<그림 5-1> 참조), 다음 <표 5-1>과 같은 조건을 입력하였다.



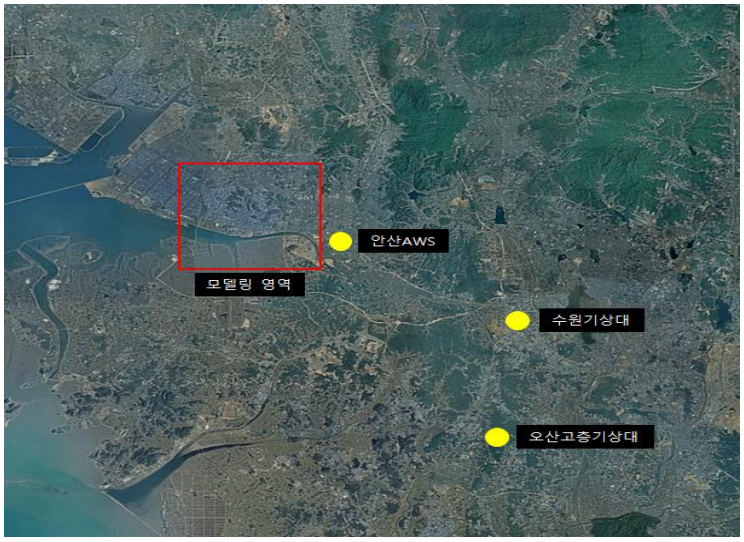
<그림 5-1> 모델링 영역(8km×8km)

<표 5-1> 모델링 입력 자료

항목		내용
		연구 대상시설 주변지역(8km×8km)
Grid origin (reference point)	X(Easting)	304814
	Y(Northing)	4132363
Grid spacing(⊿X)		0.1km
Domain Size	Nx (no. x grid Cells)	81
	Ny (no. y grid Cells)	81
Time zone		UTC+0900
Projection		UTM 52 ZONE
Origin of Projection	Lattitude	37.31
	Longitude	126.79
continent/Ocean		Asia
Region		South Korea
Modeling period		2018년 12월 1일 ~ 2019년 11월 30일

2. 기상 입력자료

대기질 모델링 시 기상현황의 반영을 위해 모델링 영역 인근에 위치한 기상관측소의 기상자료를 이용하였다. 지표기상의 반영을 위해 수원기상대와 안산AWS의 자료를 이용했으며, 상층기상의 반영을 위해 오산고층기상대의 자료를 이용하였다(<그림 5-2> 참조).



<그림 5-2> 기상대 위치도

3. 배출량 자료

CALPUFF 모델을 이용해 오염원의 영향을 평가하기 위해서는 오염물질 배출원의 자료가 요구된다. 본 연구에서는 연구 대상시설에서 발생하는 PM-2.5의 주변지역 영향을 알아보기 위해 대상시설의 굴뚝높이(m), 배출구 직경(m), 배가스속도(m/s), 배가스온도(℃)와 같은 입력자료를 사용하였고, 대상시설에서 실측한 PM-2.5 배출량 자료를 사용하였다.

제2절 생활폐기물 소각시설의 대기질 영향 분석

1. 대기질 영향 분석 개요

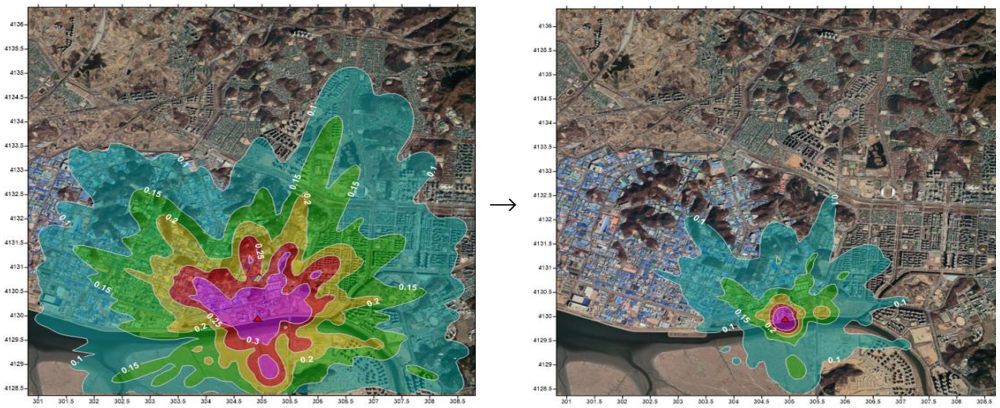
정부는 계절적 요인과 국내·외 복합 영향으로 12월부터 3월에 집중적으로 발생하는 고농도 미세먼지의 해결을 위해 「미세먼지 고농도 시기 대응 특별대책(2019.11.1.)」을 2019년 11월 발표하였다. 이 대책에서는 고농도 미세먼지의 발생 억제와 농도 완화에 총력을 기하기 위해 해당 기간동안 계절관리제를 도입하고 있으며, 산업부문 중 미세먼지 주요 배출 공공사업장에 대해 가동을 단축하는 등의 조치를 시행 예정에 있다.

대형 폐기물 소각시설도 소각량 및 가동률 조정 등을 통한 배출량 관리의 잠재적 대상 사업장으로, 본 연구에서는 대상시설이 배출량 관리 대상 사업장으로 지정된 것으로 가정하였다. 대상시설의 가동률을 처리용량의 절반 수준인 50%로 제어했을 때, 대상시설에서 배출되는 PM-2.5에 의한 주변지역 대기질 영향을 분석하였다.

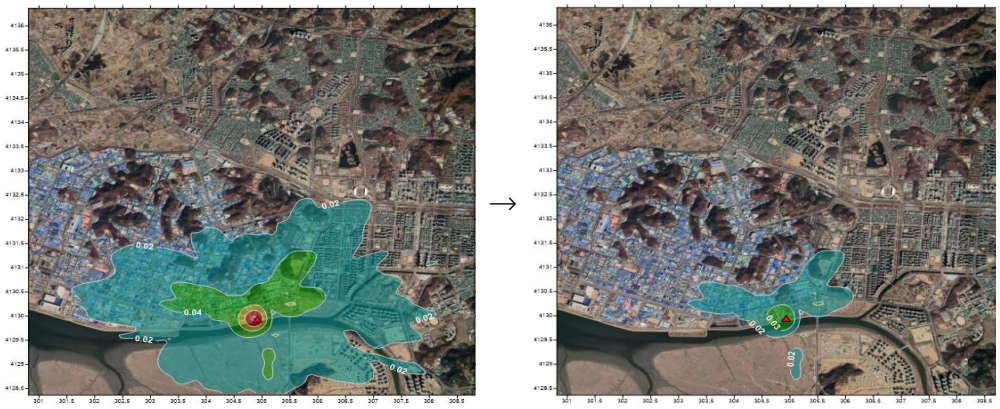
2. 대기질 영향 분석 결과

폐기물 소각시설을 중심으로 동서방향 각각 4km, 남쪽 2km, 북쪽 6km 이격된 지점까지의 PM-2.5 1시간 최대, 일최대, 연평균 농도 분포를 <그림 5-3>에 나타내었다.

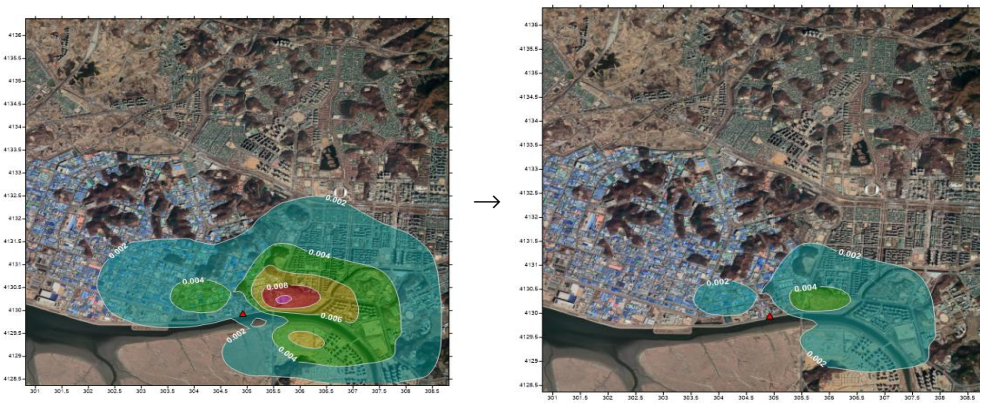
가동률 조정에 따른 영향을 평가하기 위해 최대 가동 수준을 (a), 50% 가동 수준을 (b)라고 구분하였다. 1시간 최대농도는 (a)가 0.3㎍/㎥, (b)가 0.2㎍/㎥로 나타났고, 24시간 최대농도는 (a) 0.04㎍/㎥, (b) 0.03㎍/㎥로 나타났으며, 연평균 농도는 (a) 0.008㎍/㎥, (b) 0.004㎍/㎥로 나타났다.



[1시간 최대]



[일최대]



[연평균]

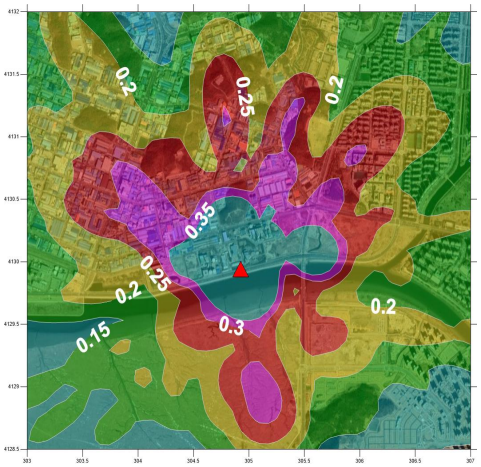
(a) (최대 가동 시) → (b) (50% 가동 시)

<그림 5-3> 배출량 변화에 따른 PM-2.5 등농도 분포도
(분석영역 8km×8km)

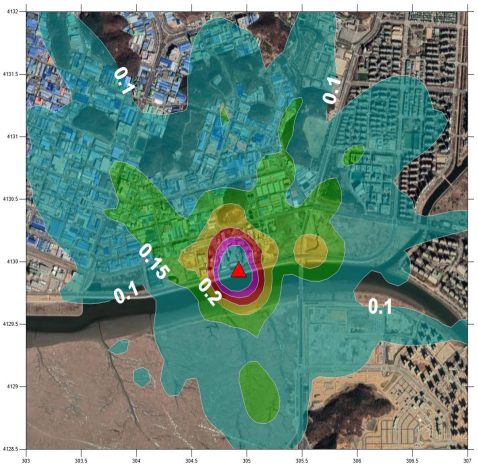
폐기물 소각시설의 주변지역 대기질 영향을 상세히 살펴보기 위해 분석영역을 4km×3.5km로 <그림 5-4>와 같이 재설정하고 모델링하였다. 가동률 비교대상은 <그림 5-3>과 같이 대상시설 최대 가동 수준일 경우를 (a), 50% 제어가동 수준일 경우를 (b)라고 구분하였다.

(a)의 경우, 주변지역에 미치는 PM-2.5의 최대농도는 0.97㎍/㎥로 PM-2.5의 일평균 환경기준치인 35㎍/㎥의 2.8%에 달하는 수치를 나타내며, 일평균 기준치의 1%에 해당하는 0.35㎍/㎥ 이상의 영향을 주는 거리는 대상시설을 중심으로 최대 0.91km까지 미치는 것으로 나타났다. 또한, 가동률을 50% 수준으로 저감하는 (b)의 경우, 주변지역에 미치는 PM-2.5의 최대농도는 0.48㎍/㎥로 PM-2.5 일평균 환경기준치의 1.4%에 달하는 수치를 나타내며, 일평균 기준치의 1%에 해당하는 0.35㎍/㎥ 이상의 영향을 주는 거리는 대상시설을 중심으로 최대 0.2km까지인 것으로 나타났다.

이는 비상저감조치 등 특정 목적에 의해 일시적으로 대상시설의 배출량을 최대 배출량의 50% 수준으로 제어하는 경우, 주변지역에 미치는 최대 농도의 50%를 저감할 수 있으며, PM-2.5 일평균 기준치의 1%에 해당하는 0.35㎍/㎥ 이상의 영향을 주는 거리는 약 4/5가 감소되는 것을 의미한다.



(a) 최대 가동 시
1시간 최대농도 분포도



(b) 50% 제어가동 시
1시간 최대농도 분포도

<그림 5-4> 배출량 변화에 따른 PM-2.5 등농도 분포도
(분석영역 4km×3.5km)

제6장 결 론

제1절 연구 요약

우리나라의 생활폐기물 발생량은 2017년 기준 53,490ton/day로 발생량 통계가 집계되기 시작한 1994년 이후 지속적으로 증가하고 있다. 생활폐기물 처리방법은 재활용 비중이 가장 크고 다음으로 소각 방법이 많이 사용되고 있다. 폐기물소각 부문의 PM-2.5 배출량은 2016년 기준 252ton으로 우리나라 PM-2.5 총 배출량의 0.11%를 차지하고 이 중 생활폐기물 소각부문이 23%를 차지하고 있다.

본 연구에서는 경기도에 위치한 200ton/day 규모의 지방자치단체 관할 대형 생활폐기물 소각시설을 연구 대상시설로 선정하였다. 대상시설에서 배출되는 미세먼지의 입경별 농도와 입경분율을 조사하고, 폐기물 소각 시의 입경별 배출계수를 산정하였으며, 대상시설의 미세먼지가 주변지역에 미치는 영향을 분석하였다.

연구 대상시설에서 배출되는 미세먼지는 굴뚝시료채취장치(Stack sampler, CAE)를 이용하여 배가스 속도와 등속으로 흡인하면서 Cascade Impactor(PM-10, PM-2.5 Impactor, Johnas Paul Gothe GmbH)에 먼지를 포집하였다. 포집된 미세먼지 농도를 분석한 결과, 평균농도는 TSP 6.483 mg/m^3, PM-10 5.488 mg/m^3, PM-2.5 4.071 mg/m^{3}으로 분석되었다.

일반적으로 배출시설의 미세먼지 배출계수는 굴뚝의 TSP 농도를 기준으로 먼지의 입경분율을 곱하여 산정하고 있어 배출계수 산정 시 중요한 자료로 사용된다. 본 연구의 먼지 입경분율은 PM-10/TSP 0.841, PM-2.5/TSP 0.618, PM-2.5/PM-10 0.731로 나타났고, 미세먼지 배출계수는 PM-10 0.0441kg/ton, PM-2.5 0.0330kg/ton으로 산정되었다. 이는 국가

배출계수 값과 비교하면 PM-10은 1.22배, PM-2.5는 1.37배 크게 나타났다. 본 연구는 국내 여건이 반영된 실측값을 바탕으로 입경분율 및 배출계수를 산정하였으며, 이는 미세먼지 배출량 신뢰성 개선에 유의미한 자료로 사용될 수 있을 것이다.

대형 생활폐기물 소각시설은 미세먼지 고농도 시기 특별대책인 계절관리제 시행으로 가동률 조정 등을 통한 배출량 관리의 잠재적 대상 사업장이다. 이에 따라 대상시설이 배출량 관리 대상 사업장으로 지정된 것으로 가정하였으며, 가동률을 처리 용량의 50%로 제어했을 때, 주변 대기질에 어떤 영향을 주는지 CALPUFF 모델을 통해 분석하였다.

그 결과, PM-2.5 일평균 기준치의 1%에 해당하는 0.35㎍/㎥ 이상의 영향을 주는 거리는 약 4/5가 감소되는 것을 알 수 있었고, 이를 통해 계절관리제가 미세먼지 관리에 긍정적인 결과를 가져올 것으로 사료된다.

제2절 연구의 시사점 및 한계

본 연구에서는 대형 생활폐기물 소각시설을 대상으로 미세먼지의 농도와 입경분율을 조사하고 배출계수를 산정하였으며, 대상시설의 미세먼지가 주변지역에 미치는 영향을 대기확산모델을 통하여 살펴보았다.

본 연구의 시사점은 다음과 같다.

첫째, 미세먼지를 포함한 대기오염물질 다량 배출원인 대형 생활폐기물 소각시설에서 발생되는 미세먼지에 관한 연구가 많지 않다는 점에서 본 연구의 결과는 관련 정책의 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

둘째, 본 연구에서 개발한 미세먼지 배출계수는 우리나라의 쓰레기 성상 특성 및 생활폐기물 소각로의 운전조건을 반영한 값으로, 폐기물처리 분야의 미세먼지 배출량의 신뢰성 개선에 유효한 자료로 사용될 것으로 판단된다.

셋째, 미세먼지 고농도 시기 대응 특별대책인 계절관리제의 일환으로 시행 중에 있는 대형사업장 가동률 조정에 따라 주변 대기질에 미치는 영향을 분석하였으며, 이는 국가 미세먼지 관리대책 수립의 기초자료로 사용될 수 있을 것이다.

본 연구의 한계를 정리하면 다음과 같다.

본 연구에서는 생활폐기물 소각시설 중에서도 소각량 규모가 2,000kg/hr 이상인 대형 소각시설을 대상으로 연구를 진행하였다. 중형 및 소형 생활폐기물 소각시설의 경우에도 향후 유사한 연구가 진행되어야 할 것이다.

생활폐기물은 특성상 계절 및 지역에 따라 특성이 변하게 되고, 또 소각시설에 따라 처리 공정과 방지시설이 다르게 된다. 폐기물소각 부문

국가 배출량의 신뢰성 및 정확도 향상을 위해서는 다양한 지역과 계절별 특성을 반영할 수 있는 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

한국환경정책·평가연구원, 2005, 『환경영향평가시 대기확산모델의 적용에 관한 연구』

국립환경과학원, 2009, 『PM2.5 대기환경기준 설정을 위한 연구』

국립환경과학원, 2009, 『국내 배출원을 고려한 대기오염물질 성분비 자료 구축 연구(Ⅰ)』

국립환경과학원, 2009, 『국내 배출원을 고려한 대기오염물질 성분비 자료 구축 연구(Ⅱ)』

국립환경과학원, 2010, 『국내 배출원을 고려한 대기오염물질 성분비 자료 구축 연구(Ⅲ)』

국립환경과학원, 2013, 『PM2.5 다량 배출사업장 성분비 구축 및 관리방안 마련 연구』

국립환경과학원, 2017, 『대기배출시설의 미세먼지 관리방안 마련을 위한 배출특성 연구(Ⅰ)』

환경부, 2016, 『바로 알면 보인다. 미세먼지, 도대체 뭘까?』

관계부처 합동, 2017, 『미세먼지 관리 종합대책』

환경부, 2018, 『환경백서』

한국환경공단, 2018, 『전국 폐기물 발생 및 처리현황』

관계부처 합동, 2019, 『미세먼지 고농도 시기(‘19.12~’20.3) 대응 특별 대책』

김혜리, 2015, “EPA 201A 방법을 이용한 주요 배출시설별 먼지 배출특성 및 화학조성에 관한 연구” 석사학위 논문, 인하대학교, 인천

권대현, 2015, “굴뚝 CEM자료와 CALPUFF 모델을 활용한 해안가 대형 배출원 대기환경 영향평가” 석사학위 논문, 안양대학교, 안양

하민진, 2015, “기후변화의 대기오염 확산 영향 평가” 석사학위 논문, 세종대학교, 서울

박현수, 2019, “대기오염 배출시설의 미세먼지(PM10, PM2.5) 배출 특성” 박사학위 논문, 국립군산대학교, 군산

Abastract

Emission Characteristics and Air Quality Impact by Particulate Matter from Municipal Solid Waste Incinerator

Jiyun Woo
Cooperation Course for Climate Change
The Graduate School
Sejong University

In order to solve the particulate matter problem, the first priority should be to identify the exact amount of particulate matter emissions from large-scale emission sources. In case of emission factors essential for calculating emissions from municipal solid waste incinerator, as for TSP and PM-10, emission coefficients developed in the U.S. and Europe are applied and in case of PM-2.5, they are calculated by applying particulate matter ratio of emissions. In other words, it is difficult to calculate accurate and reliable emissions that reflect domestic conditions

Large-scale municipal solid waste incinerator emit large amounts of air pollutants, including particulate matter, but the related research is insufficient. In order to calculate particulate matter emitted from municipal solid waste incinerator, detailed information such as the process of the emission facilities, prevention facilities and the capacity for treatment is

needed, and research is needed to take into account various driving conditions.

In this study, the concentration and the ratio of particualte matter were investigated for large-scale municipal solid waste incinerator and the emission factors were calculated, and the effect of target facilities on the surrounding areas was examined based on PM-2.5 concentration based on the actual measurement.

According to the analysis of particulate matter concentration of the target facilities, the average concentration per particle size was TSP 6.483 ㎎/㎥, PM-10 5.488 ㎎/㎥ and PM-2.5 4.071 ㎎/㎥ respectively, while the distribution rate for particles between 10㎛ and 2.5㎛ and 10㎛ was the highest at 22% and 62% respectively. Based on the measured concentration of particualte matter, the average value of the standing fraction was 0.841, PM-10.5/TSP 0.618 and PM-10/PM-2.5, respectively, at 0.731. The particualte matter emission coefficients for municipal solid waste incinerator developed in this study were 0.0441 kg/ton for PM-10 and 0.0330 kg/ton for PM-2.5, which were 1.22 times and 1.37 times higher than the national emission factors of 0.0362 kg/ton and 0.0240 kg/ton, respectively.

The effect of PM-2.5 emitted from the target facility on the surrounding area was set to a range of about 2km in horizontal radius around the target facility and examined through CALPUFF, an atmospheric diffusion model. The implementation of the seasonal management system, a special measure for the case of high-concentration particulate matter resulted in a 50% reduction in operation of the target facilities, and a 78% decrease in the maximum concentration on the surrounding areas, which is equivalent to 1%

of the PM-2.5 24-hour mean(35㎍/㎥).

This study is thought to have developed emission coefficients that reflect the characteristics of waste and the operation conditions of the incinerator of the domestic municipal solid waste incinerator, and be able to be used as basic data for the establishment of the national particulate matter control measures.

Keyword : Particulate Matter, Municipal Solid Waste Incinerator, Inventory, Emission Factor, CALPUFF, Diffusion impact

감사의 글

길다면 길고 짧다면 짧았던 지난 2년간, 많은 분의 도움이 있었기에 이렇게 석사학위과정을 마무리할 수 있었던 것 같습니다. 이 글을 통해 짧게나마 감사의 인사를 드리고자 합니다.

한결같은 관심으로 방향성을 잃지 않도록 지도해주신 전의찬 교수님, 바쁘신 중에도 매번 꼼꼼히 검토해주시고 의견 주신 김성태 박사님, 그리고 항상 격려와 응원을 아끼지 않으며 챙겨주신 김하나 교수님께 감사드립니다.

어떠한 물음에도 같이 고민하고 답해주며, 잊을 수 없는 추억들을 만들어 준 우리 연구실 인원들에게도 감사드립니다. 조성흠 박사님, 조창상 박사님, 홍윤정 박사님, 강성민 박사님, 김민욱 박사님 그리고 승현오빠, 준영이, 재호, 성동이, 세근이, 진영이 모두에게 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 항상 옆에서 함께하며 어떤 결정에도 응원해준 소중한 가족에게도 사랑과 감사를 전합니다. 지난 2년을 양분 삼아 더욱 성장할 수 있는 제가 되도록 하겠습니다.