

전라남도 미세먼지 배출원 특성

이상득[†] · 김인수 · 김용운 · 임은태 · 이상준* · 이범우** · 이해훈***

태림인더스트리(주) · *동신대학교 건축공학과 · **전남대학교
환경에너지공학과 · ***한울환경연구소

(2020년 10월 8일 접수, 2020년 10월 29일 수정, 2020년 11월 2일 채택)

Characteristics of Emission Inventory of Fine Particulate in Jeollanam-do Area

Sang-Deug Lee[†] · In-soo Kim · yeung-Un Kim · Eun-Tae Lim

Sang-Joon Lee* · Byeim-Woo Lee** · Hai-Hoon Lee***

*Terim Industry Co., Ltd. · *Department of Architectural Engineering, Dongshin University*

***Department of Envirmental-Energy Engineering Chonnam National University*

****Hanul Envirmental Center*

(Received 8, October 2020, Revised 29, October 2020, Accepted 2, November 2020)

Abstract

Based on the air pollutants emissions data, evaluated by the Clean Air Policy Support System (CAPSS) of the National Institute of Environmental Research (NIER), this paper identifies the characteristics of the emission inventory of air pollutants, primarily focused on the atmospheric Fine particles(PM_{2.5}), in Jeollanam-do Area. According to this paper, the amounts of and emissions are evaluated as 13,613 tons and 29,096 tons, respectively. Moreover, the amounts of emissions heavily related to the secondary particles are evaluated as 105,776 tons and considered the largest emission. The supposed amounts of the secondary particles of emissions are 31,898 tons. The causes of the emissions are identified as production process(39.5%), manufacturing combustion (19.6%), energy-industrial combustion (15.7%), non-road-mobile pollution sources (13.7%), road mobile pollution sources (5.8%), non-industrial combustion (2.9%), use of an organic solvent (1.8%), biological combustion (0.9%), and waste disposal (0.7%). Based on the amounts of emissions from eleven local small businesses located in Jeollanam-do Area, this paper evaluates that Yeongam County emits 406.4 tons, Gwangyang city emits 311.0 tons, Naju city emits 297.4 tons, Suncheon city emits 220.7 tons, Damyang County emits 206.3 tons, and Jangseong County emits 197.8 tons.

To reduce the amounts of emissions for the clean atmosphere in Jeollanam-do Area, it is necessary to investigate specific amounts of emissions from local small businesses and examine the exact causes of emissions based on a scientific basis. Furthermore, constructing the Diagnosis Evaluation System of the Atmospheric Environment as a solution for Jeollanam-do Area will establish customized countermeasures and support the improvement effect analysis.

Keywords : Clean Air Policy Support System(CAPSS), PM_{2.5}, PM₁₀, Scndary Fine Particles

1. 서론

미세먼지는 인간의 건강 및 사회생활, 그리고 국가적으로는 산업활동 저해와 함께 국

[†]Corresponding author E-mail: mokpo2484@hanmail.net

제경쟁력 저하 등으로 이어지는 심각한 현대적 환경문제이다. 이러한 피해를 저감하기 위해 환경부는 과학기술을 통해 미세먼지 문제를 근본적·혁신적 해결을 지원하는 미세먼지 특별법¹⁾을 시행하여 지역차원의 종합적·체계적인 미세먼지 문제해결을 최우선 과제로 설정하였다. 또한 2022년까지 미세먼지 배출량을 30% 이상 감축하고 나뭇잎수는 70%를 줄이는 강력하고 촘촘한 미세먼지 관리대책 등을 추진하고 있다. 이를 위해 공정률이 낮은 석탄화력발전소의 일부가 친환경 연료로 전환되고 노후 발전소는 모두 폐쇄함과 동시에 현재 수도권에서만 실시하고 있는 대기배출 총량제를 전국으로 확대하고 노후 경유차는 임기 내 77% 가량을 조기 폐차하기로 했다.

미세먼지는 대기 중에 부유하고 있는 입자상 대기오염물질이며, 공기역학적 지름의 크기에 따라 초미세먼지 ($PM_{2.5}$)와 미세먼지 (PM_{10})로 구분된다²⁾. 미세먼지는 생성과정에 따라 발생원에서 직접 배출되는 1차 미세먼지와 대기 중에 포함되어 있는 대기오염물질과 광화학반응에 의해 생성되는 2차 생성 미세먼지로 크게 나눌 수 있다.

일반적으로 1차 미세먼지는 비교적 입경이 큰 입자가 마찰 등의 기계적인 기작에 의해 생성되며, 2차 생성 미세먼지는 입자의 크기가 $2.5\mu m$ 보다 작아 대기 중의 화학반응에 의해 형성된다고 알려져 있다³⁾. 산업시설 연료의 연소과정, 경유 자동차 엔진의 연소에서 발생하는 검댕이나 대기에서 기체상 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 휘발성유기화합물(VOCs) 등이 반응해서 생성되는 황산염 입자와 질산염 입자, 유기 입자상입자가 2차 대기오염물질의 대표적인 물질이다⁴⁾.

이와 같이 자연·인위적 발생원으로부터 발생하는 미세먼지는 복사강제력에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 인체에 많은 영향을 미치고 있다. 세계보건기구(WHO)는 2012년 한 해 동안에 대기오염물질과 관련하여 약 700만 명이 조기 사망하는 것으로 보고하였고, 이는

전체 사망자의 8분의 1에 해당하는 수치이다. 특히 미세먼지는 대기오염 물질 중 인체에 가장 많은 영향을 미치는 물질이라고 보고하였다⁵⁾. 미세먼지는 인체 흡입 시 상부와 하부 기도에서 염증반응을 일으키고, 혈액 순환 장애를 유발하여 심장 질환을 유발시키기 때문에 기준성 대기오염물질 중에서 가장 인체 위해성이 높은 것으로 알려져 있다. 또한 미세먼지는 크기가 작을수록 폐포를 직접 통과하여 심혈관계 질환을 발생시키며, 무계당 표면적이 넓어 중금속 등이 입자표면에 달라붙을 수 있어서 인체에 대한 유해성이 매우 심각하다⁶⁾.

PM_{10} 은 우리나라 대부분의 지역에서 1990년말까지 큰 감소폭을 보이다가 2000년 이후부터 낮은 감소 추세를 보이고 있다. 이미 상당히 높은 PM_{10} 수준을 보이는 포천, 평택, 당진, 서산, 동탄, 천안지역에서 2000년부터 두드러지게 증가하고 있다. 우리나라 대부분 지역에서 NO_2 는 낮은 농도로 유지되고 있지만, 중부, 전북, 영남의 교외 지역은 2000년 이후에도 정체되거나 미약한 증가 추세를 나타내고 있다⁷⁾.

전남 미세먼지 배출원의 특징 중 하나는 농·어촌지역에서 소각하는 농업잔재물의 생물성연소이다. 농업잔재물을 노천에서 소각할 경우 CO , NO_x , VOCs, 검댕을 포함한 상당한 양의 미세먼지가 대기 중으로 배출된다. 배출된 검댕, VOCs가 대기 온도, 수분 등과 광화학반응을 일으켜서 오존이나 질산과 같은 광화학 스모그를 형성하여 시정을 더욱 악화시키는 요인으로도 작용하고 있다. 이러한 미세먼지 관리를 위한 정책 수립 및 시행 과정에 문제를 파악하고, 이를 해결하기 위한 정책을 제시하기 위해서는 다양한 분야의 과학적, 기술적, 정책적 자료가 수집, 검토되어야 한다⁸⁾.

이러한 전남지역의 미세먼지로 인한 대기오염의 원인과 정도를 파악하고 그에 대한 저감대책 수립 및 배출원 규제를 위해서는

사전에 배출원에 대한 정량·정성분석이 선행되어야 하며, 이들 각 발생원에 대한 오염 기여도의 평가가 무엇보다도 중요하게 인식되고 있다.

따라서, 본 연구는 국립환경과학원이 공개한 2016년도 CAPSS 자료에 기반한 전라남도의 미세먼지 분석과 함께 CAPSS 자료에 누락된 소규모 대기배출 사업장(4·5종), 2차 생성 미세먼지의 추정량을 고찰하고자 한다.

2. 대기오염물질 배출원 분류

2.1. 배출원 분류

배출원의 분류는 국립환경과학원(2019)이 제시한 배출량 산정 방법 편람에 따라서 이루어진다. 이 산정방법은 산식의 변화, 산정하는 대상의 변화가 있을 경우에 변화한다.

우리나라는 1999년부터 7개의 대기오염 물질(CO , NO_x , SO_x , TSP, PM_{10} , VOCs, NH_3)을 대상으로 하는 대기보전정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS)을 구축하였으며, 2015년부터 $\text{PM}_{2.5}$ 를 추가하여 현재 총 8개의 대기오염물질을 대상으로 배출원 목록(Emission inventory)에 기초하여 각종 대기오염물질의 배출량을 추정하고 있다⁹⁾.

여기에는 각종 배출원의 활동자료와 연구된 배출 계수를 적용시키고 있다. 대기오염물질 배출에 대한 1~3종 사업장 조사시스템(Stack Emission Management System: SEMS)에 보고되는 각 배출원의 연료 사용량, 굴뚝 원격감시시스템(CleanSYS)의 자료 등을 활용하고 있으며, 소각량, 제품 생산량 등에 대한 자료를 기반으로 하여 배출되는 오염 물질의 양을 추정하고 있다. 또한 도로의 경우 통행량과 차종, 연료별 특징을 갖는 값을 활용한다. 물론 이러한 방식은 배출원에 대한 통계에 기반하고 있으며, 각 지역의 실제 대기오염의 정도와는 다른 결과를 보여줄 수 있다. 또한 해마다 산정방식의 변화가 발생할 수

있어 정보의 일관성이나 신뢰도의 문제를 유발할 수도 있다.

우리나라의 대기오염물질 배출원은 점·면 배출원, 이동 배출원, 비산먼지, 생물성연소로 크게 나눌 수 있으며, 점·면 오염원은 연료연소, 제조업 생산공정, 에너지 수송 및 저장, 유기용제 사용, 폐기물 처리, 농업, 기타 면오염원으로 분리되고 있다. Table 1.은 우리나라 대기오염물질 배출원 분류를 나타낸 것이다. 중분류에 속하는 오염물질 배출원은 각각의 사용 연료 혹은 차량의 경우 차량의 크기 등에 따라서 다른 배출계수가 적용된다.

2.2. 초미세먼지의 주요배출, 생성원인

입자상 대기오염물질은 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)와 미세먼지(PM_{10})로 분류되며, 각각의 공기역학적 지름이 $2.5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ 이하의 먼지를 의미한다.

대기오염물질은 발생원에서 직접 배출되는 1차 대기오염물질과 대기 중에서 반응하여 생성되는 2차 대기오염물질로 구분할 수 있다. 일반적으로 지름이 $2.5\mu\text{m}$ 보다 큰 먼지는 마찰 등의 기계적인 기작에 의해 생성된다고 알려져 있다. 황사나 공사장에서 날리는 흙먼지, 자동차 브레이크 마모 먼지, 도로의 비산먼지, 해염이 대표적인 물질이며, 모두 1차 대기오염물질이다. 지름이 $2.5\mu\text{m}$ 보다 작은 먼지는 이와는 다르게 일반적으로 화학반응에 의해 생성된다고 알려져 있다¹⁰⁾. 경유자동차 엔진 연소에서 생기는 검댕(1차 대기오염물질)이나 대기에서 기체상 황산화물이 반응해서 생기는 황산염 입자(2차 대기오염물질)가 대표적인 예이다. 대기 중의 탄성분은 크게 원소상탄소(Elemental Carbon, EC)와 유기탄소(Organic Carbon, OC), 탄산염으로 나눌 수 있다. 원소상탄소의 대표적인 예가 검댕이며, 이는 1차대기오염물질이다. 유기탄소는 직접 배출되는 성분(Primary Organic Aerosol, POA)과 대기 중의 화학반응에 의해 생기는

Table 1. Types of air pollutants emission inventory

대분류		중분류
연료 연소	에너지산업 연소	공공발전시설, 지역난방시설, 석유정제시설, 민간발전시설
	비산업 연소	상업 및 공공기관시설, 주거용시설, 농업 축산 수산업 시설
	제조업연소	연소시설, 공정로, 기타
제조업 생산 공정		석유제품산업, 제철제강, 비철금속업, 무기화학제품 제조업, 유기화학제품 제조업, 목재펠프 및 기타 제조업, 암모니아
에너지 수송 및 저장		주유 및 저유시설
유기용제 사용		도장시설, 세정시설, 세탁시설. 기타유기용제 사용(인쇄업, 아스팔트 도로포장 등)
폐기물 처리		소각, 폐수 처리, 매립(생활폐기물과 사업장폐기물(플레어링 제외)의 소각에 의한 배출량만을 산정)
농업		비료사용 농경지, 분뇨관리
기타 먼 오염원		자연 오염원 및 습지, 수체의 오염 물질 배출, 산불 및 화재
이동오염원	도로 이동오염원	차종
	비도로 이동 오염원	철도, 선박, 항공, 농업기계, 건설장비
비산 먼지		포장도로 재비산 먼지, 비포장도로 재비산 먼지, 건설공사, 나대지, 하역 및 야적, 농업활동, 축산활동, 건축 폐기물 처리
생물성 연소		노천 소각, 농업잔재물 소각, 고기구이, 목재난로 및 보일러, 아궁이, 숯가마

* 국립환경과학원, 2019 재정리

성분 (Secondary Organic Aerosol, SOA)으로 구분된다. 대기 중 반응에 의해 생성되는 초미세먼지의 주요 성분과 전구물질은 다음과 같다.

황산화물 (SO₂)+산화제→황산염 (SO₄⁻²)

이산화질소 (NO₂)+산화제→질산염 (NO₃⁻)

질소산화물+휘발성유기화합물+산화제 →

2차 유기 에어로졸 (SOA)

암모니아 (NH₃)+산성 먼지 (황산염, 질산염, 먼지 등) → 암모늄 (NH₄⁺)

초미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM₁₀)는 1차 대기오염물질과 2차 대기오염물질로 구성되어 있으며, 특히 고농도사례에서는 2차 대기오염물질의 비중이 매우 높다¹¹⁾. 따라서 대기 중의 초미세먼지 농도를 줄이기 위해서는 초미세먼지의 배출뿐만 아니라 이를 생성하는 전구물질의 배출도 같이 줄여야 한다. 고

농도사례 일때 질량 농도도 크게 증가 하지만, 전구물질의 화학반응에 의해 생성된 황산염, 질산염, 암모늄 무기이온 농도가 크게 증가하여 OC의 상당 부분도 SOA일 것으로 예상된다.

2.3. 대기오염물질 배출량 산정

본 연구에서는 2차 미세먼지 생성에 관련 있는 대기오염물질 6개(PM_{2.5}, PM₁₀, NO_x, SO_x, VOCs, NH₃)를 중심으로 CAPSS 배출원별 기준에 따라 전남의 대기오염물질 배출량을 고찰하였다.

Table 2.는 2016년도 우리나라 대기오염물질 배출원별 배출량을 나타낸 것이며, 대기오염물질의 배출량 총량은 338,831 ton이다. NO_x가 105,776 ton(31.2%)으로 가장 많고, 다음으로 VOCs 87,208 ton (25.7%), SO_x 62,171 ton (18.3%), NH₃ 40,967 ton(12.1%), PM₁₀ 29,096 ton (8.6%), PM_{2.5} 13,613

Table 2. Amount of air pollutants emissions in Jeollanam-do Area based on emission inventory

[Unit : ton/yr]

분 류		PM _{2.5}	PM ₁₀	NOx	SOx	VOCs	NH ₃
합 계		13,613	29,096	105,776	62,171	87,208	40,967
연료연소	에너지산업 연소	216	262	17,595	10,437	690	145
	비산업 연소	70	110	3,500	1,845	85	90
	제조업 연소	7,039	13,496	20,084	13,479	531	74
생산공정		1,724	2,300	15,858	29,890	43,527	8,642
에너지수송 및 저장		-	-	-	-	2,444	-
유기용제 사용		-	-	-	-	23,354	-
이동오염원	도로이동오염원	542	589	22,922	11	1,890	223
	비도로이동오염원	1,296	1,417	23,826	6,405	2,333	12
폐기물처리		18	21	889	94	4,383	1
농업		-	-	-	-	-	31,302
기타 먼오염원		14	15	9	-	31	476
비산먼지		1,565	9,460	-	-	-	-
생물성 연소		1,130	1,426	1,094	12	7,940	2

ton(4.0%) 순으로 조사되었다.

2차 생성 미세먼지에 깊이 관여하고 있는 황산화물(SOx)의 주요 배출원별 배출량은 제조업 생산공정이 29,890 ton(48.1%), 제조업연소 13,479 ton(21.7%), 에너지산업연소 10,436 ton(16.8%), 비도로오염원 4,057 ton(10.3%) 순이며, 제조업 생산공정과 연료연소(41.4%)에 의해 주로 배출되는 것으로 조사되었다.

또한, 질소산화물(NOx)은 이동오염원 44.2%, 연료연소 38.9%, 제조업 생산공정 15.0%, 생물성연소 1.0%, 폐기물 처리에서 0.8% 순이며, 이동오염원의 비도로이동오염원(22.5%)에서 가장 많이 배출되고 있다. 휘발성유기화합물(VOCs)은 제조업 생산공정이 49.9%로 가장 많이 배출되고, 유기용제 사용이 26.8%, 생물성 연소 9.1%, 폐기물처리 5.0%, 이동오염원 4.9%, 에너지 수송 및 저장 2.8% 순으로 나타나고 있다.

3. 전라남도 미세먼지 배출원의 특징

3.1. 연도별 미세먼지 배출량 추이

전라남도의 2016년도 기준, PM_{2.5}의 배출량은 13,613 ton, PM₁₀은 29,096 ton으로 파악되었다. Fig. 1은 전라남도 미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀)의 최근 5년간의 변화추이를 각각 나타낸 것이다. 2015년도를 정점으로 증가하다가 감소하는 경향을 나타내고 있으며, PM_{2.5}의 경우 2016년도 대비 2017년도에 15.5% 감소하는 것으로 나타났다.

3.2. 1차 미세먼지 배출량 산정

3.2.1. 미세먼지 배출원별 특징

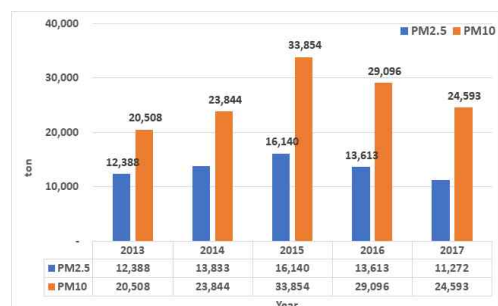
**Fig. 1.** Annual changes in fine dust emissions.

Fig. 2는 전라남도 미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀)의 배출원별 배출량을 나타낸 것이다. PM_{2.5}의 배출원별 배출량은 연료연소가 53.5%로 가장 많이 배출되고 있으며, 이동오염원이 13.5%, 제조업 생산공정이 12.7%, 비산먼지가 11.5%, 그리고 생물성연소가 8.5% 순으로 조사되었다. PM₁₀의 경우 연료연소가 47.7%로 가장 많으며, 비산먼지가 32.5%, 제조업 생산공정이 7.9%, 이동오염원이 6.9%, 그리고 생물성연소가 4.9% 순으로 조사되었다. PM_{2.5}와 PM₁₀의 공통적으로 배출원 비중이 가장 큰 연료연소는 제조업부문이며, 제조업 부문에서도 석탄류 연소에 의해 가장 많이 배출되는 것으로 확인되었다. 따라서 전남의 미세먼지를 저감하기 위해서는 산업시설에서 연료로 사용되고 있는 석탄류를 최대한 줄이고 친환경 연료로 대처하는 방안이 필요하다.

또한 PM₁₀의 비산먼지 부문도 32.5%로 매우 높은 비중을 차지하는 특징이 있으며, 비산먼지를 독립적인 배출원으로 봐야 하는가에 대해서는 약간의 논란의 소지가 있다. 비산먼지에는 사업장 또는 공정상에서 일정한 배출구 없이 대기로 배출되는 먼지들이 포함되며, 건설공사, 나대지, 하역 및 야적, 농업 활동, 축산활동, 건설폐기물 재활용으로 인해 발생하는 비산먼지도 포함된다. 이중 전남 비산먼지 배출량의 가장 큰 비중을 차지하는 것은 나대지 부문으로 조사되었다.

3.2.2. 부문별 미세먼지 특징

환경부의 미세먼지관리 종합계획에 준하여 산업부문, 도로·수송부문 그리고 농업·생활 부문으로 분류하여 배출량을 산정하였다. 산업 부문은 에너지산업 연소, 제조업 연소, 생산 공정, 폐기물 처리이며, 도로·수송 부문은 도로 이동오염원, 비도로 이동오염원, 그리고 생활·농업 부문은 비산먼지, 생물성연소, 농업, 유기용제, 기타 먼오염원으로 분류된다. Fig. 3은 미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀)의 부문별 배출

량을 나타낸 것이다. PM_{2.5}는 산업부문에서 8,997 ton(66.1%), 도로·수송부문에서 1,837 ton (13.5%), 농업·생활 부문에서 2,779 ton(20.4%) 으로 대부분 산업부문에서 배출되는 특징을 나타내고 있다. 산업부문에서도 제조업 연소의 1차 금속산업 부문에서 6,906 ton(76.8%)으로 압도적인 배출 비중을 나타내고 있으며, 다음으로 제철·제강업에서 1,469

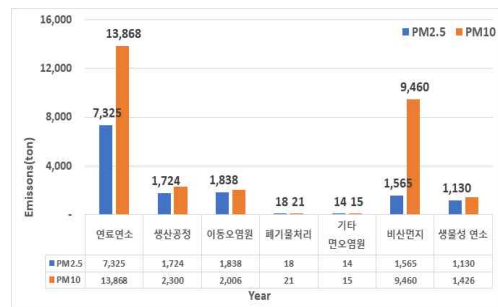


Fig. 2. Amount of fine dust emissions based on types of emission inventory.

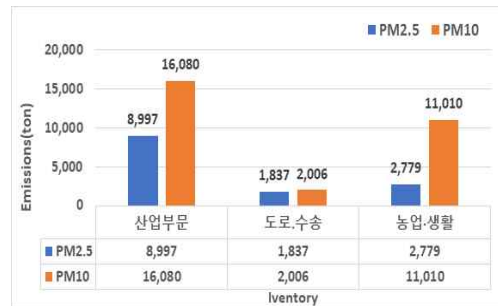


Fig. 3. Amount of fine dust emissions based on its types.



Fig. 4. Amount of fine dust emissions from manufacturing combustion.

ton (16.3%), 그리고 발전시설에서 214 ton(2.4%) 순으로 배출되고 있다. Fig. 4. 는 제조업 연소 부문의 미세먼지 배출량을 나타낸 것이며, 전남의 미세먼지 배출원 특징 중의 하나가 1차 금속산업 및 제철-제강 부문에서 90% 이상의 배출 비중을 차지하고 있다.

PM₁₀은 산업부문 16,080 ton(55.3%), 도로·수송 부문 2,006 ton(6.9%), 농업·생활 부문 11,010 ton (37.8%)으로 주로 산업부문에서 배출되는 특징을 나타내고 있다. 농업·생활 부문의 PM₁₀의 배출량이 높게 나타난 것은 나대지(1,949 ton)와 농업활동(1,920 ton)에서 배출되는 비산먼지에 기인한 것으로 보인다.

도로·수송부문 PM_{2.5}의 경우, 도로이동오염원이 393 ton(29.5%), 비도로이동오염원 1,2960 ton(70.5%)이며, 주로 선박이 46.8%로 배출 비중이 크고, 다음으로 화물차가 21.4%, 건설장비가 11.3%, 농업기계가 11.0%, 그리고 RV가 5.5% 순으로 나타나고 있다.

생활·농업 부문 PM_{2.5}의 경우, 비산먼지가 1,565 ton (56.3%)로 가장 많은 비중을 차지하고, 생물성연소가 1,130 ton(40.7%), 비산업연소가 70 ton(2.5%), 기타 먼오염원이 14 ton(0.5%) 순으로 조사 되었다. 생물성연소 중에서 농업잔재물 소각에 의한 배출량은 772 ton (27.8%)으로 생활농업 부문에서 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 생물성연소는 농업잔재물 소각, 장작 등 나무 연료의 사용 및 음식물 조리과정에서 발생하는 미세먼지 등을 포함하는 것으로 도·농복합지역의 일반적인 특성으로 볼 수 있다. 따라서, 도·농복합지역인 나주, 장성, 담양의 대기관측소 자료를 분석해 보면 농번기인 5월, 6월, 11월의 미세먼지 농도가 높게 나타나는 현상도 농업잔재물의 소각에 의한 것으로 판단되며, 농어촌 미세먼지 저감대책과 함께 농업잔재물 처리 문제가 매우 중요한 과제임을 암시해주고 있다.

한편 비산먼지(PM₁₀) 기준으로 볼 때, 농업활동이 24.5%, 도로재미산이 23.1%, 축산활동이 15.82%로 중요한 미세먼지 오염원으로 나

타나고 있으며, 특히 도로를 운행하는 자동차의 타이어, 브레이크 시스템과 도로 표시용 페인트의 마모에 의해 발생하는 비산먼지는 미세플라스틱을 발생시키는 원인이 되고 있다. 타이어 업계에서는 도로비산 미세먼지의 10% 이내의 비율이 타이어 마모에 의한 것으로 추정하고 있으나, 연구자들은 40% 이상으로 보고 있다.

3.2.3. 사용 연료에 따른 배출원

Fig. 6은 연료의 종류에 따라 배출되는 미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀)의 배출량을 각각 나타낸 것이다. PM_{2.5}의 배출량은 무연탄이 51.1%로 가장 많이 배출되고, 그 다음으로 경유가 7.5%, B-C유가 6.0%, 유연탄이 1.3%, 휘발유가 0.4% 순으로 조사 되었다. 또한 PM₁₀은 무연탄이 45.4%로 가장 많이 배출되고, 그 다음으로 경유가 3.8%, B-C유가 3.2%, 유연탄이 1.3%, 휘발유가 0.2%순으로 나타나고 있다. 연료의 종류, 사용 목적, 사용량에 따라 배출되는 배출량이 다를 수 있으나, 현재 전남의 연료에 따른 미세먼지 배출량의 비율은 무·유연탄의 사용에 따라 배출되는 미세먼지가 50% 이상을 차지하고 있어 미세먼지를 저감하기 위해서는 무·유연탄을 대체할 수 있는 청정연료의 사용이 절대적으로 필요하다.

3.3. 소규모 사업장(4·5종) 배출원

3.3.1. 소규모 사업장 배출량 산정 방법

CAPSS 자료의 배출량 통계는 점오염원은 SEMS자료 배출량을 이용하며, 면오염원은 연료소비량, 생산량 등을 활동자료에 의해 배출량을 산정하고 있다. 1~3종 배출시설은 SEMS에 의해 실시간으로 측정되고 점오염원으로 분류되어 관리되고 있으나, 4, 5종 사업장은 소규모 사업장인 경우가 많고 SEMS 관리 대상에 포함되지 않기 때문에 CAPSS에서도 정확한 파악이 되지 않을 것으로 판단된다. 따라서 본 절에서는 CAPSS 자료에 누락된 전남

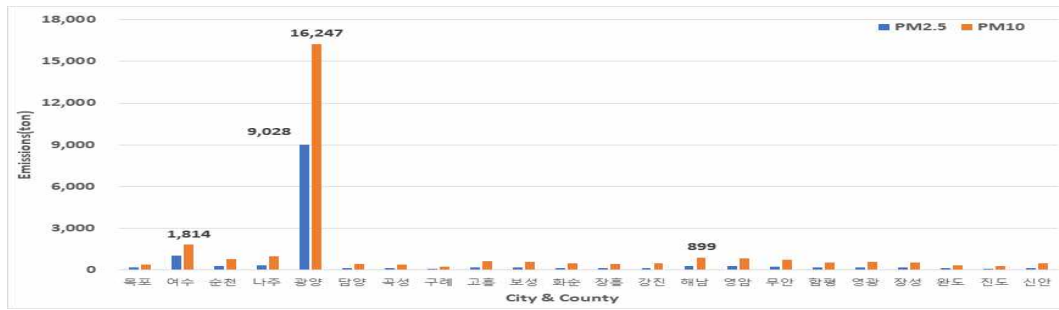


Fig. 5. Amount of fine dust emissions based on cities and counties in Jeollanam-do Area.

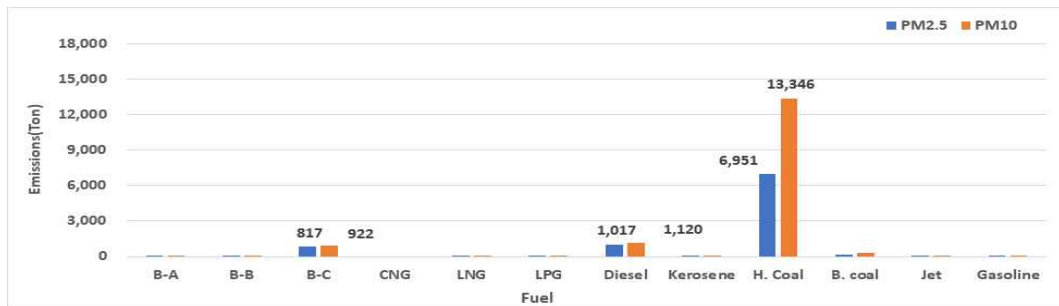


Fig. 6. Amount of fine dust emissions based on energy inventory.

의 4, 5종 대기배출시설에 대한 11개 시군을 대상으로 미세먼지 배출량을 산정하였다.

전남 11개 시·군 소규모 사업장의 미세먼지를 산정하기 위하여 4, 5종 대기배출시설 인허가 자료를 분석하였으며, 허가 신청서에는 배출시설 및 방지시설 설치 내역서, 방지시설의 일반도, 방지시설의 연간 유지관리 계획서, 대기오염물질 발생량 산정에 관한 자료가 포함되어 있다.

인·허가 자료에는 각 배출시설별 먼지 발생량만 존재하기 때문에 이를 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 로 전환하는 보정작업이 필요하며, 따라서 본 과제에서는 CAPSS자료의 부문별 PM_{10}/TSP , $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비율을 각 배출원별로 적용하였다. 또한, 수집된 자료는 각 대기배출시설별 먼지발생량을 포함하고 있으나, 방지효율이 고려되지 않았으므로 본 연구에서는 국립환경과학원 자료를 이용하여 11개 시·군 자료에 이를 추가하고 배출량 산정 시 이를 이용하였다.

3.3.2. 3.2.1 소규모 사업장 배출량

11개 시군의 소규모 사업장의 배출량을 결정하는 것은 업체수, 가동시간, 연료사용량 등을 고려한 것이며, 본 연구에서는 CAPSS 자료의 점, 면오염원 배출량 자료를 활용하여 2016년 4, 5종 사업장의 배출량을 추정하였다.

Fig. 7은 전남 시·군별 소규모 사업장(45종)의 미세먼지 배출량을 산정한 결과이며, $PM_{2.5}$ 의 경우, 영암군 406.4 ton, 광양시 311.0 ton, 나주시 297.4 ton, 순천시 220.7 ton, 담양군 206.3 ton, 장성군 197.8 ton 순으로 배출되고 있다.

Fig. 8은 배출원별 소규모 사업장(45종)의 미세먼지 배출량을 산정한 결과이며, $PM_{2.5}$ 의 경우, 제조업 연소가 50.2%로 가장 많이 배출되고 있으며, 유기용제사용(도장시설)이 19.2%, 폐기물처리가 11.5%, 미분류가 8.8%, 그리고 생산공정이 7.5% 순으로 조사되었다.

3.4. 2차 미세먼지 배출량 산정

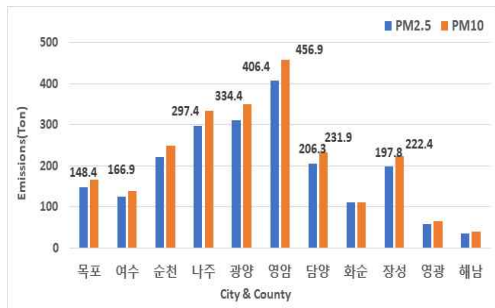


Fig. 7. Amount of fine dust emissions from eleven local small businesses.

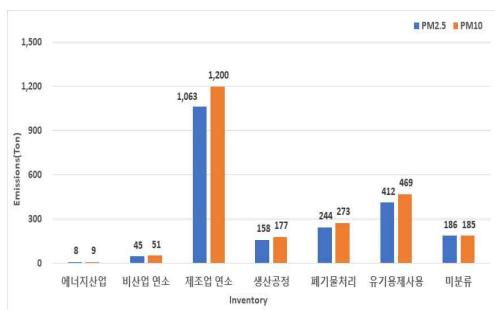


Fig. 8. Amount of fine dust emissions from local small businesses based on emission inventory.

2차 미세먼지는 자동차, 발전소와 같은 고온 연소기관에서 발생하는 NO, NO₂와 화석연료연소 시 발생하는 SO₂가 빛을 받아 산화되면서 NH₃, O₃, 수증기 등과 결합해 여러 화학반응을 통해 생성되는 초미세먼지(PM_{2.5})를 말한다⁸⁾.

이들의 반응 경로는 상당히 복잡한 것으로 알려져 있으며, 사실상 비선형성을 지니고 있으나, 그럼에도 불구하고 전반적인 변환계수를 적용하여 발생량을 추정하고 있다. 이 부분에서는 2차 미세먼지를 만드는 NO_x, SO_x, VOCs 등의 배출 특성을 분석하고자 한다. 암모니아의 경우 미세먼지 형성에 상당히 중요한 요인으로 작용하지만, 변환식 등이 정확히 제공되지 않아 본 연구에서는 제외하였다.

환경부는 2017년 9월 관계부처합동 미세먼지 관리 종합대책에서 우리나라 전역을 대상으로 2차 미세먼지 발생량을 추정하였다. 추

정에 사용된 PM_{2.5} 생성 전환계수는 NO_x 0.079, SO_x 0.345, VOCs 0.024 이다. 따라서 본 절에서는 2016년 CAPSS 배출량 결과를 토대로 환경부가 제시한 PM_{2.5} 미세먼지 생성 전환계수를 적용하여 전남의 2차 생성 미세먼지 발생량을 추정하였다. Table 3은 2차 생성 미세먼지를 고려한 배출원별 초미세먼지(PM_{2.5}) 배출량을 나타낸 것이다. 2016년에 전라남도에서 발생한 PM_{2.5}의 총 배출량은 배출원에서 직접 배출된 13,613 ton과 대기중의 광화학반응에 의해 생성된 31,898 ton을 더한 45,511 ton/yr이며, 2차 생성에 의해 발생한 초미세먼지 배출량의 비율은 70.1%로 확인되었다.

전남의 2차 미세먼지 발생량은 31,898 ton으로 2차 생성에 의한 미세먼지의 생성 비율이 상당히 높은 것으로 나타나고 있다. 물론 전국적으로도 2차 생성의 비율이 높지만, 전남은 그 비율이 비교적 높은 편이다. 전남의 2차 초미세먼지 발생량은 생산공정이 39.5%, 제조업 연소가 19.6%, 에너지 산업이 15.7%, 비도로이동오염원이 13.7%, 도로이동오염원이 5.8%, 비산업 연소가 2.9%, 유기용제 사용이 1.8%, 생물성연소 0.9%, 그리고 폐기물 처리가 0.7%로 나타나고 있다. 1차와 2차 미세먼지 발생량을 함께 고려할 경우, 주요 배출원은 생산공정이 31.5%로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 그 다음으로 제조업 연소가 29.2%, 비도로 이동오염원이 12.0%, 에너지 산업이 11.5%로 조사되었다. 또한, 도로이동오염원이 5.3%, 비산먼지가 3.4%, 생물성연소가 3.1%, 비산업 연소가 2.2%, 유기용제 사용이 1.2%, 그리고 폐기물 처리가 0.5%로 고찰되었다. 대기 중의 2차 미세먼지 생성에 관여하는 주요 대기오염물질 중에서 가장 높은 비율을 차지하고 있는 것은 SO_x(21,450 ton)가 67.2%이며, 그 다음으로 NO_x(8,356 ton), 가장 배출량이 적은 것은 VOCs(2,093 ton)이다.

산업부문의 2차 미세먼지 생성 추정량은 24,072톤/년으로 전체 2차 생성량의 75.5%를

Table 3. Amount of Micro particulate matter(PM_{2.5}) emissions for secondary particles based on emission inventory

[Unit : ton/yr]

	1차 PM _{2.5}	2차 PM _{2.5}	합 계
합 계	13,613	31,898	45,511
에너지산업	216	5,007	5,223
비산업 연소	70	915	985
제조업 연소	7,039	6,250	13,289
생산공정	1,724	12,609	14,333
에너지수송	0	59	59
유기용제 사용	0	560	560
도로이동	542	1,860	2,402
비도로이동	1,296	4,148	5,444
폐기물처리	18	208	226
농업	0	0	0
기타 먼오염원	14	1	15
비산먼지	1,565	0	1,565
생물성연소	1,130	281	1,411

자료출처 : 국가미세먼지정보센터(2016), 배출원별 배출량 자료 재구성

차지하며, 전남의 미세먼지를 저감하기 위해서는 산업부문에서 생성되는 NO_x, SO_x 및 VOCs를 저감해야 하는 당위성을 부여하고 있다. 도로·수송부문의 2차 생성 추정량은 6,008톤/년로 전체 2차 생성량의 25.0%이며, 비도로 이동오염원 부문 69.0%, 도로이동오염원 부문 31.0% 차지하는 것으로 나타났으며, 비도로이동오염원의 대부분은 선박배출원에 기인한 것으로 조사되었다.

4. 결론

본 연구에서는 국립환경과학원의 CAPSS 자료의 2016년도 대기오염물질배출량을 기반으로 전남의 대기오염 물질의 배출원 특징을 미세먼지를 중심으로 파악하였다.

전남에서는 2016년도에 초미세먼지(PM_{2.5})가 13,613 ton, 미세먼지(PM₁₀)가 29,096 ton이 배출되고 있으며, 2차 생성 미세먼지에 깊이 관여하고 있는 NO_x가 105,776 ton(31.2%)으로

가장 높은 배출 비율을 차지하고, 다음으로 VOCs 87,208 ton (25.7%), SO_x 62,171 ton (18.3%), NH₃ 40,967 ton(12.1%)으로 조사되었다

PM_{2.5}의 배출원별 배출량은 연료에 의한 연소가 53.5%로 가장 많이 높고, 이동오염원이 13.5%, 제조업 생산공정이 12.7%, 비산먼지가 11.5%, 그리고 생물성연소가 8.5%으로 조사되었다. 연료연소 부문에서 배출원 비중이 가장 큰 것은 제조업연소 부문이며, 제조업연소 부문에서도 석탄류 연소에 의한 배출 비율이 가장 큰 것으로 확인되었다. 따라서 전남의 미세먼지를 저감하기 위해서는 산업시설에서 연료로 사용되고 있는 석탄류를 최대한 줄이고 친환경 연료로 대처하는 방안이 필요하다.

환경부의 미세먼지관리 종합계획에 준하여 산업부문, 도로·수송부문 그리고 농업·생활 부문으로 분류하여 배출량을 산정하였으며, 초미세먼지(PM_{2.5}) 경우 산업부문에서 8,997 ton(66.1%), 도로·수송부문에서 1,837 ton

(13.5%), 농업·생활 부문에서 2,779 ton(20.4%)으로 대부분 산업부문에서 배출되는 특징을 지니고 있다.

전남 시·군별 초미세먼지(PM_{2.5}) 배출량은 광양시가 9,028 ton(66.3%)으로 22개 시·군 중에서 절대적인 배출량 비중을 차지하고 있으며, 다음으로 여수시가 7.4%, 나주시가 2.3%, 순천시가 2.0%, 그리고 해남군과 영암군이 각각 2.2%, 1.9% 순으로 나타나고 있다.

전남의 11개 시·군별 소규모 사업장(45종)의 초미세먼지(PM_{2.5}) 배출량은 영암군이 406.4 ton으로 가장 많이 배출되고, 광양시가 311.0 ton, 나주시가 297.4 ton, 순천시가 220.7 ton, 담양군이 206.3 ton, 장성군이 197.8 ton 순으로 배출되고 있다. 또한 배출원별 배출량은 제조업 연소가 50.2%, 유기용제 사용(도장시설)이 19.2%, 폐기물처리가 11.5%, 미분류가 8.8%, 그리고 생산공정이 7.5% 순으로 조사되었다.

전남의 2차 미세먼지 발생량은 31,898 ton으로 2차 생성에 의한 미세먼지의 생성 비율이 상당히 높은 것으로 나타나고 있다. 배출원별 2차 초미세먼지 발생량은 생산공정이 39.5%, 제조업 연소가 19.6%, 에너지산업 연소가 15.7%, 비도로이동오염원이 13.7%, 도로이동오염원이 5.8%, 비산업 연소가 2.9%, 유기용제 사용이 1.8%, 생물성연소 0.9%, 그리고 폐기물 처리가 0.7%로 조사되었다.

전라남도의 초미세먼지(PM_{2.5})를 저감하고 깨끗한 공기를 유지하기 위해서는 소규모 사업장을 포함한 배출원별 상세 배출량 조사, 생성기작, 위해성 평가, 모델링 분야의 과학적인 접근이 필요하다. 특히, 초미세먼지(PM_{2.5})의 과학적 근거를 기반으로 발생원인의 신속정확한 규명, 지역 맞춤형 대책 수립 및 개선효과 분석 지원을 위한 전남형 대기환경 진단·평가 시스템 구축이 필수적이다. 이를 수행하기 위해서는 보다 효과적인 대기관리 및 소통 체계 구축 또한 필요하다.

사 사

이 연구는 2020년 전남녹색환경지원센터 지원을 받아 수행된 연구입니다

참고문헌

1. 환경부, 미세먼지 관리종합대책, 관계부처 합동 자료집, 2019.
2. World Health Organization. Air pollution including WHO's 1999 guidelines for airpollution control. Geneva, World Health Organization, 2000
3. 최현정, 이화운, 임현호, 송재활, 2008, 광양만 권역에서의 고농도 오존 사례에 대한 기상 및 대기질 분석, 한국환경과학회지, 17(7), 743-753.
4. 國立環境研究所, 2006, 日本における光化学オキシダント等の舉動解明に關する研究, 國立環境研究所研究報告.
5. Kyung SY, Kim YS, Kim WJ, Park MS, Song JW, Yum H, et al .Guideline for the prevention and management of particulate matter/Asian dust particle induced adverse health effect on the patients with pulmonary diseases. Journal of the Korean Medical Association 2015;58(11) : 1060-9.
6. Ministry of Health & Welfare. Health Impacts of Air Pollutionin Korea. Seoul : Korea ; 2016
7. Hwang, Y.-J., Lee, S.-J., Do, H.-S., Lee, Y.-K., Son, T.-J.,Kwon, T.-G., Han, J.-W., Kang, D.-H., Kim, J.-W.(2009) The Analysis of PM₁₀ Concentration and the Evaluation of Influences by Meteorological Factors in Ambient Air of Daegu Area, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 25(5), 459-471. (in Korean with English abstract)
8. 김용표, 초미세먼지 문제 해결을 위한 연구

- 및 정책 방향, 한국대기환경학회지, 33(3), 191-204.
9. 국립환경과학원, 2019, 「국가 대기오염물질 배출량 기초자료 구축을 위한 표준업무절차서 : 2015년 배출량 기준
10. Seinfeld, J.H. and S.H. Pandis (2016) Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, third edition, John Wiley & Sons Inc, Hoboken, New Jersey, USA.
11. Kim, Y.P. and M.J. Yeo, (2013) The trend of the concentrations of the criteria pollutants over Seoul, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 29(4), 369-377. (in Korean with English abstract)