

## 청주시 미세먼지 배출원의 특성과 대책에 대한 연구\*

김종연\*\* · 윤대옥\*\*\* · 김영훈\*\*\*\* · 신원정\*\*\*\*\*

### A Study on Characteristics and Countermeasures of Fine Dust Discharge Sources in Cheongju\*

Jong Yeon Kim\*\* · Dae Ok Youn\*\*\* · Young Hoon Kim\*\*\*\* · Won Jeong Shin\*\*\*\*\*

**요약 :** 환경부가 공개한 2016년 국가 대기오염 물질배출량 통계(대기보전정책지원시스템: CAPSS)에 의하면, 청주시에서는 2016년 약 4,776.8ton의 미세먼지와 초미세먼지가 만들어 졌으며, 그중 1차 미세먼지는 약 2,910ton(60.9%), 2차 미세먼지는 약 1,866.4ton(39.1%)이다. 우리나라 전체의 1차 미세먼지:2차 미세먼지의 비율인 70:30 정도에 비하여 2차 미세먼지의 비율이 높은 것으로 볼 수 있다. 이는 2차 미세먼지를 유발하는 오염 물질의 비율이 다른 지역에 비하여 높은 데 기인하는 것으로 볼 수 있다. 청주 지역에서 배출되는 대기오염 물질 가운데 황산화물의 경우 급격히 감소하고 있고, 질소산화물 역시 미미하지만 전반적인 감소의 경향성을 보이는 데 반하여 휘발성 유기화합물질이 양은 증가하는 양상을 보인다. 굴뚝원격감시체계의 결과에 의하면 질소산화물(NO<sub>x</sub>) 역시 폐기물 소각 시설을 중심으로 증가한다. 휘발성 유기화합물질의 배출 추정량 역시 폐기물 중간처리 부분이 차지하는 비중이 상당히 높은 것으로 나타나고 있다. 이에 따라, 청주시의 주된 미세먼지 배출원으로 추정되는 것은 도로 이동 오염원(23.3%), 비도로 이동 오염원(9.4%), 생활성 연소(8.7%), 제조업 연소(6.3%), 폐기물 중간처리(4.9%)이다. 폐기물 처리에 의한 미세먼지 배출 비율은 전국 평균 0.67%의 7배 이상에 해당하는 상당히 높은 비율로 이에 대한 대책이 필요한 것으로 보인다. 특히 청주시의 경우 외부로부터 유입된 사업장폐기물의 소각 비중이 높은 것으로 보이며, 폐기물 소각장의 지역 간 이동 등에 대한 연구와 정부 차원의 규제가 필수적인 것으로 보인다. 지역에서의 정확한 분석 연구와 정책 연구를 활성화할 수 있는 연구 인프라의 구축과 인력 양성이 필수적인 것으로 보인다.

주요어 : 미세먼지, 초미세먼지, 대기보전정책지원시스템(CAPSS), 휘발성 유기화합물질

**Abstract :** According to the 2016 National Air Pollutant Emissions Statistics (CAPSS) released by the Ministry of Environment, Cheongju produced about 4,776.8 tons of fine dust and ultrafine dust in 2016, of which about 2,910 tons (60.9%), Secondary fine dust is about 1,866.4 tons (39.1%). The ratio of secondary fine dust in Cheongju is higher than that of nationwide average of 70:30, which is the ratio of primary fine dust to secondary fine dust. This may be due to the high percentage of pollutants causing secondary fine dust compared to other regions. Among the air pollutants emitted from Cheongju region, sulfur oxides are rapidly decreasing and nitrogen oxides are insignificant but overall tend to decrease, while the amount of volatile organic compounds increases. As a result of the chimney remote monitoring system (TMS), NO<sub>x</sub> also increases in the waste

\*이 논문은 충북대학교 국립대학육성사업(2019) 지원을 받아 작성되었음.

\*\*충북대학교 지리교육과 교수(Professor, Department of Geography Education, Chungbuk National University, terrai@cnu.ac.kr)

\*\*\*충북대학교 지구과학교육과 부교수(Associate Professor, Department of Earth Science Education, Chungbuk National University, dyoun@chungbuk.ac.kr)

\*\*\*\*한국교육원대학교 지리교육과 교수(Professor, Department of Geography Education, Korea National University of Education, gis@knue.ac.kr)

\*\*\*\*\*서울대학교 지리교육과 박사수료(Ed.D. Candidate, Department of Geography Education, Seoul National University, shjles2995@naver.com)

incineration plant. Estimates of volatile organic compounds have also been shown to be quite high in the processing of waste. Accordingly, the main sources of fine dust in Cheongju are estimated to be road transport pollutants (23.3%), non-road transport pollutants (9.4%), biomass combustion (8.7%), manufacturing combustion (6.3%), and waste treatment (4.9%) to be. The rate of fine dust discharged by waste disposal is more than seven times the national average of 0.67%. In particular, Cheongju seems to have a high proportion of incineration of industrial wastes from outside, and research on the movement of waste incinerators between regions and governmental regulation are essential. It seems necessary to establish a research infrastructure and foster human resources to enable accurate analytical research and policy research in the region.

Key Words : PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, Clean Air Policy Support System (CAPSS), Volatile Organic Compounds (VOCs)

## I. 서론

미세먼지(particulate matter)는 대기 중에 입자상으로 존재하는 물질로 최근에 그 건강상의 위해(危害, harm) 등으로 인하여 상당한 관심을 끌고 있다. 특히 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)에 장기적으로 노출되는 것은 호흡기 질환과 심장순환계 질환에 영향을 미쳐 기대 수명을 감소시키는 요인으로 지적되고 있다. 대기오염의 정도가 심한 도시 지역의 경우 기대 수명 감소의 8% 이상이 장기간의 초미세먼지 노출에 의한 것으로 추정된다(Gowers *et al.*, 2014). 그런데 각종 미세먼지의 농도, 발생 원인 등은 지역별로 큰 차이를 나타내는 것이 일반적이다. 이는 미세먼지의 발생원의 다양성에 기인하며, 도시화의 진행 정도와 녹지의 확보 정도, 대기오염 저감을 위한 노력의 진행 정도가 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 우리나라의 경우 미세먼지의 발생 정도를 정확히 파악하기 위한 전국적인 관측망이 부족하다는 비판을 받아왔으며, 이를 개선하기 위한 노력이 이루어져 왔다. 또한 각 지역의 미세먼지 발생원에 대한 관리를 위한 노력의 중요성이 강조되어 왔다. 물론 국내의 고농도 미세먼지의 발생 원인에 대해서 그것이 국외 유입에 의한 것인지, 국내의 다양한 활동에 의한 것인지는 논란의 대상이기도 하다. 다만 그 영향의 경중의 차이가 있음에도 불구하고 국내의 미세먼지 저감을 위한 활동은 불가피한 상황이다.

미세먼지 저감을 위한 노력은 중앙 정부 차원의 노력도 필요하지만, 각 지역의 특성을 반영하는 지방 정부 차원의 저감 및 대응 정책 마련이 필수적이다. 특히 미세먼지 발생원의 지역적인 차이는 각 지역의 산업 및 도시의 특성과 밀접한 연관이 있기 때문에, 이러한 차이를 무시한 정책의 효과는 극히 낮을 수밖에 없다. 예를 들어 청주시의 경우 미세먼지 오염의 정도가 상당히 심각

한 것으로 나타나고 있어(2015년: 31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 2016년: 29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 2017년: 29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 환경기준: 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 다양한 대응책이 논의되고 있으나, 발생원별 특성에 대한 분석이 미비한 관계로 효과적인 대응이 이루어지지 못하고 있다.

이러한 중요성에도 불구하고 지리학 분야에서 미세먼지나 대기오염 물질의 지역적 차이를 밝히고 특성을 파악하기 위한 노력은 거의 이루어지지 못했다. 본 연구에서는 2015년과 2016년의 미세먼지 배출원 관련 자료(국립환경과학원 국가 대기오염 물질 배출량 서비스)를 주로 이용하여 청주시 지역의 미세먼지 배출원의 특징과 대응 방안을 논의하고자 한다. 우리나라의 경우 대기오염 물질의 배출원 파악은 1999년부터 시작되었으나, 초미세먼지에 대한 파악은 상당히 오랫동안 지체되었으며, 2011년 이후 전국적 차원의 초미세먼지의 배출원에 대한 조사가 이루어지기 시작하였다. 또한 조사 대상 배출원이나 배출량의 추정은 시간이 지나면서 보다 정교해 지는 상황이다. 현재의 경우 도로에서의 비산 먼지, 생물학적인 먼지 배출 등과 같이 발생하는 거의 모든 배출원에 대한 조사가 이루어지고 있으며, 이러한 조사는 2015년부터 이루어지기 시작하였다. 따라서 본 연구에서는 1999년 이후 발행된 대기오염 물질 배출원에 대한 자료 등을 활용하고, 2011년 이후의 초미세먼지 배출원 조사를 참고하여 분석하였으며, 주로 2015년과 2016년의 통계 자료를 현황 자료로 이용하고자 하였다. 청주시의 경우 행정구역의 변화가 있었으며, 2013년까지는 청주·청원 통합 이전의 통계로 청주시는 흥덕구와 상당구로 나뉘며 청원군이 별도로 분류된 것을 통합한 것이다. 이후 세종시가 출범하면서 청원군의 산단 일부가 세종시로 편입되었다. 2015년부터는 대기오염의 통계에 비산 먼지 및 생물성 연소가 포함되었다.

## II. 미세먼지의 정의와 배출원의 분류 및 우리나라 전체의 배출원 특성

미세먼지란 대기 중에 떠다니거나 흩날려 내려오는 입자상 물질 가운데 작은 것을 의미한다. 입자상물질(粒子狀物質)이란 물질이 파쇄·선별·퇴적·이적(移積)될 때, 그 밖에 기계적으로 처리되거나 연소·합성·분해될 때 발생하는 고체상 또는 액체상의 미세한 물질을 말한다. 미세먼지는 일단 그 생성 과정에 따라 호흡기 부분에 침착되는 입자상의 물질로 대기 중에 직접 방출되는 1차(primary) 미세먼지와, 가스 형태로 대기 중에 방출된 뒤 광화학작용을 통하여 미세먼지로 변화되는 2차(secondary) 미세먼지로 구분할 수 있다. 2차 미세먼지를 형성하는 물질은 미세먼지 생성물질이라고 정의되며 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 황산화물(SO<sub>2</sub>), 휘발성 유기화합물(VOCs), 암모니아(NH<sub>3</sub>)가 여기에 포함된다. 1차 및 2차 미세먼지는 모두 입자의 크기에 따라서 10μm 이하의 크기인 미세먼지(PM<sub>10</sub>), 2.5μm 이하인 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)로 구분된다. 1차 먼지는 연소 과정을 통해 형성되는 연소성미세먼지와 연소 이외의 과정을 통해서 만들어지는 비연소성 미세먼지로 구분된다. 대부분의 국가 통계에서 배출량이 추정되는 미세먼지는 1차 미세먼지에 대한 것이며, 2차 미세먼지는 다양한 기상 상황, 온도 등에 의해서 화학 반응의 정도가 변하는 관계로 그 변환 정도를 정확히 파악하는 것은 어렵다. 본 연구에서는 충청북도가 활용한 변환식을 사용하였다. 충청북도는 NO<sub>x</sub>의 경우 0.079, SO<sub>x</sub>의 경우 0.345, VOC의 경우 0.024의 변환계수를 제시하고 있다(충청북도, 2019).

배출원의 분류는 국립환경과학원(2018)이 제시하는 배출량 산정 방법 편람에 따라서 이루어진다. 이 산정 방법은 산식의 변화, 산정하는 대상의 변화가 있을 경우 변화된다. 우리나라는 1999년부터 7개의 대기오염 물질(CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, TSP, PM<sub>10</sub>, VOC, NH<sub>3</sub>)을 대상으로 하는 대기보전정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, 이하 CAPSS)을 구축하여 활용하고 있으며, 이는 대기 배출원 목록(Emission inventory)에 기초하여 각종 대기오염 물질의 배출량을 추정하고 있다(국립환경과학원, 2019). 여기에는 각종 배출원의 활동 자료와 연구된 배출 계수를 적용시킨다. 여기에는 대기오염 물질 배출에 대한 1~3종 사업장 조사시스템(Stack Emission Management System: SEMS)에 보고되는 각 배출원의 연료사용량, 굴뚝원격감

시시스템(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 넣은 값을 활용한다. 물론 이러한 방식은 배출원에 대한 통계에 기반하므로 각 지역의 실제 대기오염의 정도와는 다른 결과를 보여줄 수 있다. 또한 해마다 산정 방식의 변화가 발생할 수 있어 정보의 일관성이나 신뢰도의 문제를 유발할 수도 있다.

우리나라의 대기오염 물질 배출원은 점 면 오염원, 이동 오염원, 비산 먼지, 생물성 연소로 나눌 수 있으며, 점 면 오염원은 연료 연소, 제조업 생산 공정, 에너지 수송 및 저장, 유기용제 사용, 폐기물 처리, 농업, 기타 면 오염원으로 나눌 수 있다. 세부 내용은 표 1과 같다. 각 중분류에 속하는 오염 물질 배출원은 각각의 사용 연료 혹은 차량의 경우 차량의 크기 등에 따라서 다른 배출 계수가 적용된다(국립환경과학원, 2014a).

이러한 기준에 따라서 전국적 및 광역 지방자치 단체별 미세먼지 배출량의 기여 정도를 파악하였다.

CAPSS에 의한 2016년 우리나라 전체의 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 배출 추정량은 연간 233,085ton이며, 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 배출 추정량은 연간 100,247ton이었다. 즉, 1차 미세먼지 배출량은 333,332ton(71.1%)이었다. 충청북도의 배출량 계수를 적용한 전국 2차 생성 초미세먼지의 추정량은 135,576.9ton(29.9%)으로 나타났다. 미세먼지의 경우 가장 중요한 배출원은 도로와 지표면으로부터의 재비산(46.22%), 제조업 생산과정에 필요한 연소(30.8%), 건설장비 및 중장비 농업용 장비를 포함하는 비도로 이동 오염원(6.69%), 농업 부산물소각 및 노천소각 등을 포함하는 생물성 연소(6.27%), 자동차의 도로 이동(4.55%)이 주요 배출원으로 나타났다. 한편 1차 초미세먼지는 제조업 연소(36.69%), 도로비산 먼지(17.24%), 비도로 이동원(14.32%), 생물성 연소(12.09%), 자동차의 도로 이용(9.72%) 순으로 배출되는 것으로 나타났다. 이들과는 달리 대기 중에 방출된 오염 물질이 광화학 작용을 통해 미세먼지를 만드는 2차 초미세먼지는, 자동차 등 도로 이동 오염원(27.24%), 비도로 이동 오염원(19.84%), 제조업 연소(12.48%), 발전소를 포함하는 에너지산업 연소(10.95%)가 주요 배출원으로 나타났다. 이들을 모두 합하여 본다면 우리나라의 초미세먼지 및 미세먼지의 주된 배출원은 도로의 비산 먼지, 제조업의 연소, 도로 이동 오염원, 비도로 이용 오염원 등으로 판단할 수 있다.

표 1. 우리나라의 대기오염 물질 배출원 분류

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(플레이어링 제외)의 소각에 의한 배출량만을 산정)
농업		비료사용 농경지, 분뇨관리
기타 면 오염원		자연 오염원 및 습지, 수체의 오염 물질 배출, 산불 및 화재
이동오염원	도로 이동오염원	차종별
	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
생활성 연소		노천 소각, 농업잔재물 소각, 고기구이, 목재난로 및 보일러, 아궁이, 숯가마

\* 국립환경과학원, 2019를 정리.

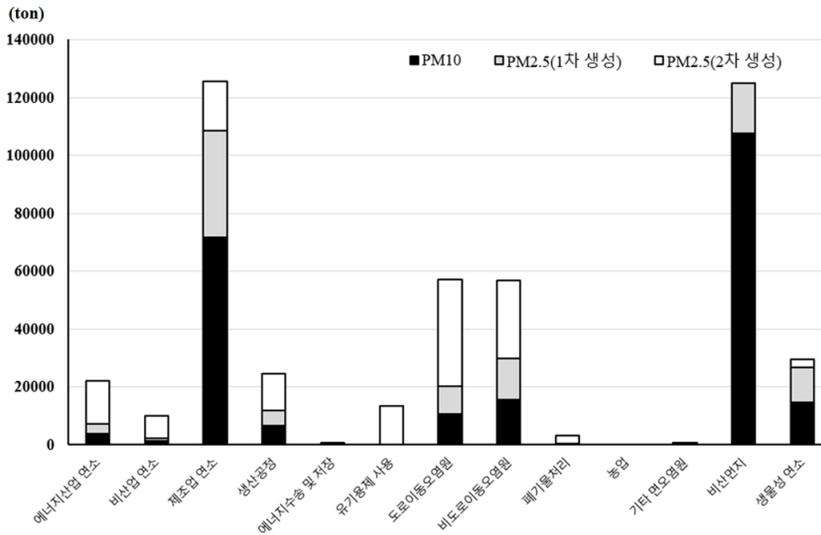


그림 1. 우리나라의 전체의 미세먼지 및 초미세먼지의 발생원 대분류별 배출 추정량(2016년)

출처 : 국립환경과학원 국가 대기오염물질 배출량 서비스(2019년 자료).

또한 발전소 등 에너지산업 연소와 생활성 연소, 생산 공정에서의 방출 역시 상당한 중요성을 지닌다. 이에 따라서 국가적으로는 석탄발전소 등 발전소의 가동 자제, 노후 경유 자동차의 교체 및 전기차 보급 등의 정책을 실시하고 있다(이혜경·배재현, 2019). 그러나 이러한

국가 전체적인 차원의 배출원의 성격은 각 지역의 배출원 특성을 전체적으로 반영하며, 각 지역마다 다르게 나타나는 특징은 반영하지 못한다. 예를 들어 울산의 경우 석유화학공업의 생산 공정에서 나오는 1차 및 2차 초미세먼지가 전체 발생량의 51%를 차지하며 다른 발생원들

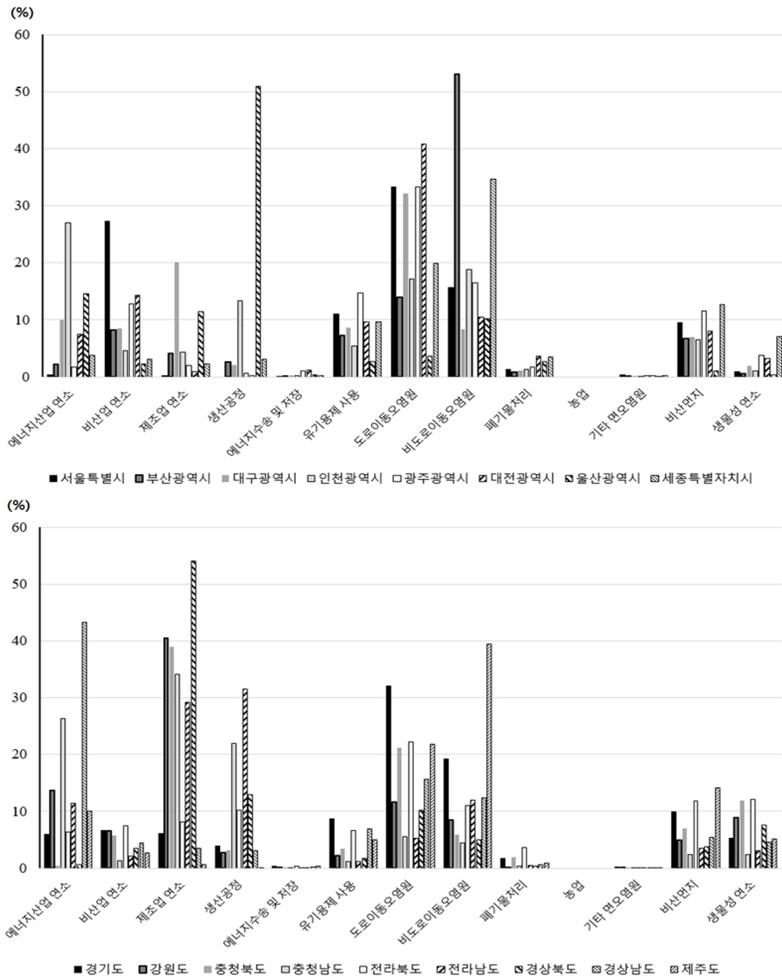


그림 2. 광역 지방자치단체별 미세먼지 및 초미세먼지의 발생원 대분류별 배출 추정 비율(2016년)

출처 : 국립환경과학원 국가 대기오염물질 배출량 서비스(2019년 자료).

의 비율은 상대적으로 낮게 나타난다. 강원도 역시 제조업 연소로 인한 배출량이 40.4%에 달하고, 경상북도 역시 54.1%가 제조업 연소로 인한 것으로 나타나, 도로 이동 오염원에 의한 초미세먼지배출량이 많은 다른 지역들과 차이를 보여주고 있다(그림 2). 이들은 각 지역의 산업 구조 특성과 관련이 깊은 것으로 볼 수 있다.

이러한 지역적인 차이들은 광역 지방자치단체를 구성하는 기초 지방자치단체에서도 나타나고 있다. 특히 면적이 상당히 넓은 지방자치단체들의 경우 지역적인 편차가 크게 나타난다. 시와 군이 혼재하는 지역은 서로 다른 특성이 발생할 가능성이 많으며, 특정 산업이 밀집해 있는 지역들의 경우 그러한 지역 특성에 따른 미세먼

지가 발생할 것으로 보인다. 따라서 광역 지방자치단체를 통해 집행되는 다양한 정책들에는 기초 지방자치단체에서 발생하는 다양한 미세먼지 발생원에 대한 정리와 관리가 필수적인 것으로 보인다.

### III. 청주시의 미세 먼지 배출원의 특성

#### 1. 청주시의 전반적인 대기오염 물질 배출 특성

청주시의 1999년~2016년의 대기오염 물질 배출량의 변화(표 2) 동향을 보면, 일산화탄소의 배출량이 전반적

표 2. 청주시의 대기오염 물질 배출량 변화(1999~2016년)

(단위: kg/year)

	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	VOC
1999	17,405,210	17,626,498	6,695,576	1,596,385	-	11,320,895
2000	18,668,929	17,701,206	5,055,063	1,341,868	-	11,993,518
2001	16,952,643	19,435,574	5,501,320	1,581,268	-	13,595,882
2002	16,573,282	20,865,783	5,439,441	1,503,902	-	16,432,314
2003	17,071,609	20,209,652	4,970,388	1,530,557	-	14,983,709
2004	18,231,849	21,280,430	4,059,799	1,198,801	-	15,897,643
2005	17,471,852	18,607,350	4,610,254	1,302,374	-	14,236,470
2006	18,832,387	18,827,628	4,956,755	1,286,641	-	15,637,446
2007	13,404,306	18,204,713	2,987,124	1,554,942	-	19,624,104
2009	12,998,871	14,107,380	3,494,542	1,740,848	-	16,635,685
2010	14,878,368	16,272,846	3,471,487	1,827,590	-	18,840,081
2011	13,203,300	13,189,686	2,613,714	1,517,071	924,156	18,243,850
2012	13,184,257	14,445,987	2,005,336	820,125	576,192	15,587,493
2013	11,894,687	13,904,648	1,858,318	748,888	538,429	15,684,077
2014	7,887,515	12,466,005	1,028,048	427,990	362,422	14,822,611
2015a	10,842,572	12,875,342	847,921	2,206,486	787,053	16,906,503
2015b	7,246,776	12,711,576	846,110	422,896	360,163	15,901,286
2016a	10,967,002	14,996,527	787,602	2,112,604	797,825	17,079,989
2016b	7,369,088	14,830,979	785,789	446,131	381,523	16,058,337

출처 : 국립환경과학원 국가 대기오염물질 배출량 서비스(1999~2016년 자료).

\* a: 비산 먼지 및 생물성 연소 포함.

\*\* b: 비산 먼지 및 생물성 연소 제외.

으로 크게 감소하는 경향을 보여준다. 1999년 연간 배출 추정량은 17,405ton/year 수준이었으나, 2016년의 경우 비산 먼지와 생물성 연소를 포함할 경우 10,967ton/year로 감소하며 이를 2014년과 동일한 기준으로 할 경우, 각각 7,247ton/year와 7,369ton/year로 감소하는 경향을 보여 준다. 일산화탄소는 연료 속의 탄소 성분이 불완전 연소되는 것이 주된 발생원으로 청주시의 경우 도로 이동 즉, 수송 부분과 생물 연소, 주택과 공공기관에서의 비산업 연소, 그리고 건설 중장비 등이 주된 배출원으로 나타나고 있다. 제조업에서의 연소와 폐기물 처리 역시 기여하고 있다. 질소 계열의 오염 물질은 2000년대 초반 까지 전반적으로 증가하다가 이후 감소하는 경향을 보이며, 2016년에 증가한 것으로 나타나고 있다. 질소 계열의 오염 물질은 자동차, 발전소 등 고온 연소과정과 화학물질의 제조에서 배출되는 것으로 알려져 있으며, 청주시의 경우에도 주된 배출원은 자동차와 건설장비,

제조업 연소 등이 중요한 배출원이며 주택과 공공기관의 연소, 폐기물 처리과정 역시 배출의 일부를 차지한다. 이들의 경우 경유 차량 등 자동차에 의한 배출이 가장 큰 것은 전국적인 경향과 상당 부분 일치한다.

이에 비하여 청주시의 경우 1차 미세먼지 배출량은 2,112.6ton, 1차 초미세먼지 배출량은 797.8ton으로 파악되었다. 미세먼지의 경우 비산 먼지의 비중이 69%로 압도적인 비율을 차지하며, 자동차의 이용으로 인한 도로 이동이 10.62%, 건설 및 농업 기계 이용이 5.97%를 차지하는 데 비하여 발전 산업 등 에너지산업 등은 전국적인 비중에 비하여 낮은 비중을 보이고 있다. 1차 생성 초미세먼지의 배출원은 비산 먼지가 30.7%, 도로 이동이 25.9%, 비도로 이동이 12.6%, 제조업 연소가 3.23%로 나타나고 있다. 특이한 사항은 청주시의 경우 폐기물 처리에 의한 1차 초미세먼지 발생량 역시 1.7%로 전국에 비하여 매우 높은 것으로 나타나고 있다.

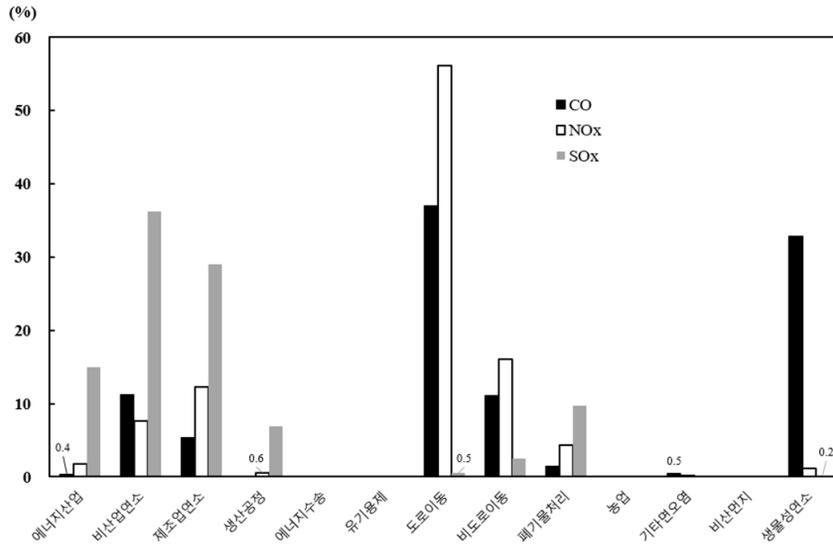


그림 3. 청주시 대기오염 물질(CO, NOx, SOx)의 배출원별 비율(2016년)

\* 국가통계포털 환경부 자료를 바탕으로 작성.

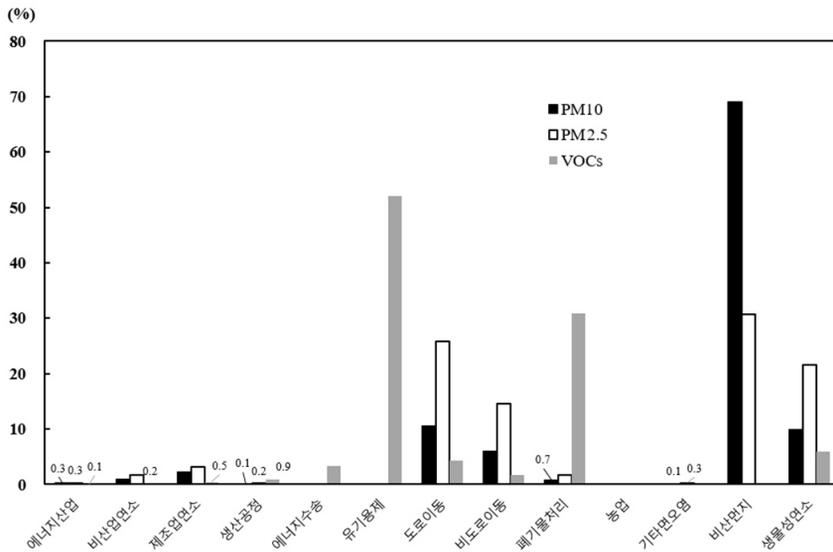


그림 4. 청주시 대기오염 물질(PM2.5, PM10, VOCs)의 배출원별 비율(2016년)

\* 국가통계포털 환경부 자료를 바탕으로 작성.

## 2. 청주시 1차 미세먼지 배출원의 특성

청주시의 미세먼지 배출원으로 가장 큰 비중을 차지하고 있는 것은 비산 먼지이다. 물론 비산 먼지를 독립적인 배출원으로 봐야 하는가에 대해서는 논란의 소지가 있다.

비산 먼지에는 사업장 또는 공정상에서 일정한 배출구 없이 대기 중으로 배출되는 먼지들이 포함되며, 건설공사, 나대지, 하역 및 야적, 농업활동, 축산활동, 건설폐기물 재활용으로 인해 발생하는 비산 먼지도 포함된다. 이중 가장 많은 비중을 차지하는 것은 도로 재비산으로 보인다.

표 3. 2016년 청주시 대기오염 물질 배출 추정량

(단위: kg/year)

	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	VOC	NH <sub>3</sub>
에너지산업	44,841	271,225	118,051	10,852	6,265	2,416	10,380	6,462
비산업연소	1,234,803	1,146,378	285,262	24,171	20,114	13,553	36,557	16,477
제조업연소	587,460	1,843,878	228,567	73,961	49,305	25,808	78,034	23,091
생산공정	1,936	83,255	54,212	4,571	2,291	1,861	158,220	17,625
에너지수송	0	0	0	0	0	0	572,735	0
유기용제	0	0	0	0	0	0	8,893,747	0
도로 이동	4,065,613	8,426,979	4,171	224,281	224,281	206,339	725,471	83,462
비도로 이동	1,217,715	2,411,360	19,323	126,239	126,166	116,073	302,354	1,432
폐기물 처리	158,414	646,532	76,203	21,114	15,317	13,320	5,276,015	499
농업	0	0	0	0	0	0	0	2,899,237
기타 면오염	58,305	1,372	0	3,765	2,392	2,153	4,824	208,799
비산 먼지	0	0	0	4,662,865	1,458,476	244,629	0	0
생물성 연소	3,597,914	165,548	1,813	447,567	207,997	171,672	1,021,652	293
합계	10,967,002	14,996,527	787,602	5,599,387	2,112,604	797,825	17,079,989	3,257,378

출처 : 국립환경과학원 국가 대기오염물질 배출량 서비스(2019년 자료).

청주시의 경우 ‘포장도로 재비산’에 의한 미세먼지(PM<sub>10</sub>)가 502,072ton, 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 121,469ton으로 각각 전체 미세먼지 발생량의 23.8%와 15.2%를 차지한다(총량은 623,341ton). 이는 자동차연료의 연소로 인한 직접 PM<sub>10</sub> 발생량 224,281ton (총 발생량의 10.6%)의 2배에 달하며, PM<sub>2.5</sub> 발생량 206,339ton(25.9%)의 절반 이상에 해당하는 양이다. 한편 자동차의 연료 연소로 인한 NO<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub>, VOCs에 의해 형성되는 미세먼지의 2차 생성량(미세먼지 및 초미세먼지 합산)은 684,581.6ton으로 추정되므로 2차 생성에 의한 총량에 유사한 수준의 미세먼지가 타이어 마모 등과 같은 요인에 의하여 형성되는 것으로 볼 수 있다.

도시 내 비산 먼지의 경우 그 기원은 매우 다양하다. 먼저 가장 많은 비중을 차지하는 것은 다른 메커니즘을 통해 만들어진 미세먼지가 도로에 집적되는 사례이다. 이 경우 2차적 재비산의 사례로 보아야 할 것이다. 서울의 경우 2015년 재비산 먼지가 미세먼지의 24%, 초미세먼지의 21%를 차지하고 있는 것으로 알려졌다(최유진·김영은, 2018). 한편 도로를 운행하는 자동차의 타이어, 브레이크 시스템과 도로 표시용 페인트의 마모(abrasion)는 미세플라스틱(micro plastic)을 발생시키며, 이들이 대기 중에서는 비연소기원 미세먼지(non-exhaust particulate matter)가 된다. 타이어 업계에서는 도로비산 미세먼지의 10% 이내의 비율이 타이어 마모에 의한 것으로 보는 데 비하여 연구자들은 40% 이상으로 보고 있다. 유럽의 도

시들의 경우 도로 발생 미세먼지의 절반 정도를 비연소 기원의 물질로 보고 있으며(Querol *et al.*, 2004), 스위스의 경우 도시 내 도로의 PM<sub>10</sub>의 21%가 브레이크 마모, 38%가 재비산, 연료 연소에 의한 것이 41%라고 보고된 바 있다(Bukowiecki *et al.*, 2010). 고속도로에서는 재비산이 56%, 연료 연소가 41%로 나타나고 있다. 독일의 베를린의 경우 도로변 오염 물질인 PM<sub>10</sub>의 50%가 비연소 기원으로 분석되고 있으나(Lenschow *et al.*, 2001), 전반적으로 추가적인 자료 확보를 통한 정리가 필요하다(Penkata *et al.*, 2018). 한편 국내에서의 발생량 산정은 국내외의 각종 산정 방법론과 국내 실측값(도로 재비산 먼지 산정 시 활용되는 도로별 silt 부하량 등)을 활용해 산정하고 있는 것으로 알려져 있다. 우리나라는 도로에서 발생하는 연료 연소 배출량을 별도로 조사 분류하므로, 이를 합산하여 본다면 도로에서의 PM<sub>10</sub> 발생비율은 40% 이상으로 추정하는 것이 타당한 것으로 보인다. 구성 물질에 대한 정확한 분석이 필요한 것으로 판단된다. 또한 PM<sub>2.5</sub>의 경우 연료 연소에 의한 영향이 강한 것으로 추정된다(Penkata *et al.*, 2018). 한편 고무 물질만을 분석한 연구자들은 일반적인 도시의 초미세먼지에서 도로 발생이 차지하는 부분이 전체 도시 초미세먼지의 0.27%에 불과하다는 주장을 하고 있다(Panko *et al.*, 2019). 그러나 다른 부분에 대해서는 분석이 불가능하다는 문제가 있으며, 각 국가별, 도시별로 다른 결과가 나오고 있기 때문에, 각 구성 물질별 특성에 따른 실증적인 배출

량 파악이 필수적인 것으로 보인다.

다음으로 도로 이동에 의한 미세먼지의 경우 두 번째로 큰 비중을 차지하는데, 실측 통계량이 있는 곳에서는 실측 통계량을 기반으로 배출량을 추정하며, 그렇지 않은 곳에서는 차량의 등록지 정보를 바탕으로 배출량을 산정하고 있다. 그러나 실제 등록지와 차량의 운행 지역의 차이가 존재하는 경우가 많아 자료의 타당성에 대한 비판이 존재한다. 청주시의 경우 2019년 10월 현재 417,993대의 차량이 등록되어 있다. 물론 이 통계에는 비도로 이동 오염원으로 분류되는 특수차량도 일부 포함된 것임을 유의하여야 한다. 한편 청주시의 차량 연료별 등록 현황은 파악하기 어렵다. 청주시가 포함된 충청북도의 경우에는 836,367대의 등록 차량 가운데 휘발유 차량이 360,126대(43.1%), 경유 차량이 385,786대(46%), LPG차량 68,884대 등으로 나타나고 있어 경유 차량의 비중이 휘발유 차량에 비해 높은 편에 속한다(국토교통부, 2019). 이러한 현상은 광역시보다는 도 단위에서 널리 나타나는 특징이다. 전국적으로는 23,594,014대의 등록 차량 가운데 휘발유 연료 차량이 10,892,434대(46.2%), 경유 차량이 9,970,489대(42.3%)로 경유차의 비율이 상대적으로 낮은 편이다. 정부의 정책에서 경유차 관리 부분의 경우 현재의 수도권 중심의 대응이 아닌 각 도의 상황에 따른 대응이 필요한 부분 중에 하나로 볼 수 있다. 한편 배출량의 정확한 추계를 위해서는 자동차 이동량 등에 대한 파악이 정확하게 이루어져야 할 것으로 보인다.

전반적으로는 도로와 관련된 미세먼지의 비중이 80%에 달하는 관계로 나대지의 축소와, 도로 비산의 감축이 필수적인 것으로 보인다. 현재는 진공 청소차를 활용한 도로 청소 등이 이루어지고 있으며, 차량 2부제 등과 같은 방식이 동원되고 있으나, 근본적으로는 도로 교통량의 감축을 위한 노력이 필수적인 것으로 이해된다. 특히 대중교통망의 확충과 대중교통의 이용을 증대하기 위한 각종 인프라의 보강, 버스 노선의 개선 등이 주요 대안으로 제시되지만 그 실행은 전반적으로 미진하다고 볼 수 있다. 또한 녹지 면적의 증대를 위한 노력 역시 필요한 것으로 보인다.

그 다음으로 큰 비중을 차지하는 것은 소위 '비도로 이동 오염원'으로서, 도로를 주행하는 자동차 이외에 내연기관을 장착한 철도, 선박운항 및 항공기, 건설장비, 농기계 배출량으로 분류하여 산정한다. 청주시의 경우 청

주공항이 위치해 있고 KTX 오송역 등 고속철도 구간이 있으며 충북선 철도가 통과하지만, 비도로 이동 오염원에서 가장 많은 비중을 차지하는 것은 건설 장비에 의한 배출이다. 또한 공장에서 사용되는 각종 중장비 역시 이 항목에 포함되어, 지게 차량의 등록 수 등도 영향을 미치는 것으로 보인다. 다만 이들의 경우 정부 정책의 관리대상에서 상당 부분 벗어나 있다는 문제가 있어 이에 대한 개선이 요구된다.

한편 농기계 사용에 의한 배출과 생물성 연소에 의한 배출은 농업 지역의 미세먼지 및 대기오염 물질 배출에서 상당한 비중을 차지한다. 이 중 생물성 연소는 농업의 부산물 소각, 장작 등 나무 연료의 사용 및 음식물 조리과정에서 발생하는 미세먼지 등을 포함하는 것으로 도농복합 지역의 일반적인 특성으로 볼 수 있다. 이에 반하여 폐기물 처리에 의한 미세먼지의 생성 문제는 다른 지역에서 보기 어려운 상황으로 일반적인 미세먼지 대책과 함께 폐기물 처리 문제가 상당히 중요한 과제임을 보여 주고 있다.

청주의 경우 독립적인 화력 발전 설비가 없고, 열병합 발전의 방식으로 이루어지는 지역난방 발전 그리고 폐자원을 활용한 발전 설비가 있다. 이에 따라 발생하는 미세먼지는 전체 발생량의 약 6%를 차지한다. 전체 비율로 보면 큰 비율은 아니나, 다른 것에 비해 오염원의 수가 매우 적다는 것에 주목해야 한다. 실제 통계상에 나타나는 오염원은 2개소에 불과한 관계로 오염원 1개소당 배출량은 상당하다고 볼 수 있다. 현재 청주시 지역난방의 경우 76,000세대의 열에너지 공급 등을 담당하는 시설의 연료를 병크C유로 사용하고 있으며, 이후 LNG를 사용하는 설비로의 개선이 진행되고 있다(한국지역난방공사, 2019). 한편 신재생에너지 발전으로 분류되는 폐기물 소각을 통한 발전의 경우 대기오염 물질의 과도한 방출로 논란이 일어나고 있다. 충청북도 전체로 본다면 2019년 현재 충청북도의 발전량 990,309kW 가운데 유류를 이용한 발전 설비가 58,300kW, 신재생 에너지가 932,009kW를 차지한다. 청주에는 태양광 발전 설비와 폐기물 시설이 있으며, 신재생 에너지 가운데 수력이 511,604kW, 태양광이 365,211kW, 바이오 2,140kW, 폐기물이 53,054kW로 나타나고 있다(한국전력공사, 2019). 이 중 폐기물 소각을 통한 신재생에너지 활용은 대기오염에 부정적 영향을 미치는 것으로 파악되고 있어 대책 마련이 필요한 것으로 보인다.

제조업 연소 부분(3.2%)은 제조업의 운영과정에서 연료의 연소를 통하여 발생하는 미세먼지로 산업 활동을 위한 연료 사용을 기준으로 발생량을 추정하고 있으며, 청주 인근의 산업 단지에서의 배출이 주를 이루는 것으로 알려져 있다. 청주의 경우 산업단지가 지속적으로 증가하고 있어 이 부분에서의 미세먼지 배출도 상당히 증가할 것으로 예상된다.

비산업연소 부분에는 공공과 일반 주택 부분의 연료 사용에 의한 것이 주를 이루며 각 가정의 도시가스 사용 등과 같은 연료 사용량이 배출량 추정의 근거 자료로 활용된다. 서울이나 대도시와 마찬가지로 도시가스(LNG)를 이용한 가정용 보일러, 건물 난방용 보일러 등의 사용이 주를 이루는 것으로 직접적인 배출 문제에서도 상당한 비중을 차지하고 있으며, 2차 미세먼지 발생에도 상당한 기여를 하는 것으로 알려져 있다(최유진·고경진, 2013). 서울시의 경우 미세먼지 발생의 39%가 난방 및 발전 부분의 배출이었으며 그 중 46%가 가정에서의 난방이 주된 원인인 것으로 밝혀져, 보일러 교체에 대한 지원 사업 등을 시행하고 있다. 청주시의 경우 전체 372,742 가구(2017년 기준) 가운데 단독주택이 164,733채, 연립다세대 10,949채 등으로 상당한 수를 차지하고 있으며, 아파트 194,653채 가운데 1990년대 이전에 지어진 노후 아파트들의 경우 개별난방을 하고 있어 단독주택 및 연립주택과 마찬가지로 보일러의 활용이 상당한 비중을 차지하고 있다. 따라서 이에 대한 적극적인 대응이 필요한 상황이라고 할 수 있다.

한편 청주의 대기오염 물질 배출 특성 가운데 주목할 만한 것은 폐기물 처리에 의한 것이다(1.7%). 폐기물 처리 부분은 폐기물 소각, 폐수 처리, 매립, 퇴비화 등의 폐기물 처리로 인한 오염 물질 방출로 생활폐기물과 사업장폐기물(플레이어링 제외)의 소각에 의한 배출량만을 산정하므로 사실상 소각에 의한 배출 가운데 건설폐기물 소각 등은 제외된다. 청주 지역의 소각장 폐기물 문제는 2차 미세먼지 발생과 관련하여 논의하도록 한다.

### 3. 2차 미세먼지의 현황과 대응

2차 미세먼지란 대기 중으로 방출된 대기오염 물질이 대기 중의 다른 오염 물질과 결합되어 만들어지는 미세먼지로 주로 초미세먼지의 입경을 지닌다(박기홍·김영준, 2018). 이들의 경우 주로 질산염, 황산염, 유기입자가

만들어져 나타나며, 원인이 되는 대기오염 물질은 질소산화물, 황산화물, 휘발성 유기화합물과 암모니아이다. 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 질소산화물, 황산화물, 휘발성 유기물질 등의 배출 특성을 분석하고자 한다. 암모니아의 경우 미세먼지 형성에 상당히 중요한 요인이지만, 변환식 등이 정확히 제공되고 있지 못하여 논의에서 제외하였다. 본 연구에서는 2016년 배출원 통계를 기반으로 1999년 이후의 대기오염 물질 배출량 변화, 2015년 이후의 TMS 관측 시스템의 기록을 바탕으로 중심으로 살펴보았다.

앞서 지적한 바와 같이 2차 미세먼지의 경우 정확한 추정이 쉽지 않은 관계로 공식적인 통계에 집계되고 있지는 않다. 이에 각 지자체들은 연구 용역 등을 통하여 2차 미세먼지의 발생량을 추정하고 있다. 청주시의 2016년 2차 미세먼지 발생 추정량은 아직 발표되지 않았으며, 현재 연구 용역이 진행되고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 이전의 연구 성과를 바탕으로 2차 미세먼지 발생량을 추정하였다(표 4). 청주시의 2차 초미세먼지는 연간 1,866.4ton으로 2차 생성에 의한 초미세먼지의 비율이 상당히 높은 것으로 나타나고 있다. 물론 전국적으로도 2차 생성의 비율이 높지만, 청주시는 그 비율이 보다 큰 편이다. 청주시의 2차 초미세먼지 발생은 도로 이동이 36.7%, 제조업 연소가 12.1%, 유기용제의 사용이 11.4%, 비도로 이동이 10.9%, 폐기물 처리가 10.92%로 나타나고 있다. 1차와 2차 미세먼지 및 초미세먼지 발생량을 함께 고려할 경우, 비산 먼지(35.7%), 도로 이동(23.3%), 비도로 이동(9.4%), 생물성 연소(8.7%), 제조업 연소(6.3)가 주요 배출원으로 나타났으며 폐기물 처리가 4.9%를 차지하고 있다.

2차 미세먼지 생성에 관여하는 청주시의 주요 대기오염 물질 가운데 양이 가장 많은 것은 NO<sub>x</sub>(14,996,527 kg/year)이며, 그 다음이 VOCs(17,079,989kg/year)이고, 가장 양이 적은 것은 SO<sub>x</sub>(787,602kg/year)이다. 1999~2016년의 통계를 기반으로 각 오염 물질 배출 추정량의 변화를 추정해보면 그림 5와 같다. 질산화물은 변동이 있거나 전반적으로 감소하는 경향을 보이며, 황산화물은 지속적인 감소를 보여주고 있다. 반면 휘발성 유기화합물의 경우 점진적으로 증가하는 경향성이 나타난다.

표 4. 청주의 1차 및 2차 미세먼지 발생 추정량

	1차 미세먼지 (PM <sub>10</sub> +PM <sub>2.5</sub> )	2차 미세먼지 (NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , VOCs)	합계 (kg/year)
에너지산업	8,681	62,403	71,084
비산업연소	33,667	189,857	223,524
제조업연소	75,113	226,395	301,508
생산공정	4,152	29,078	33,230
에너지수송	0	13,746	13,746
유기용제	0	213,450	213,450
도로 이동	430,620	684,582	1,115,202
비도로 이동	242,239	204,420	446,659
폐기물 처리	28,638	203,991	232,628
농업	0	0	0
기타면오염	4,545	224	4,770
비산 먼지	1,703,105	0	1,703,105
생물성 연소	379,669	38,223	417,892
합계	2,910,428	1,866,369	4,776,797

\* 국립환경과학원 국가 대기오염물질 배출량 서비스(2019년 자료)를 저자가 계산.

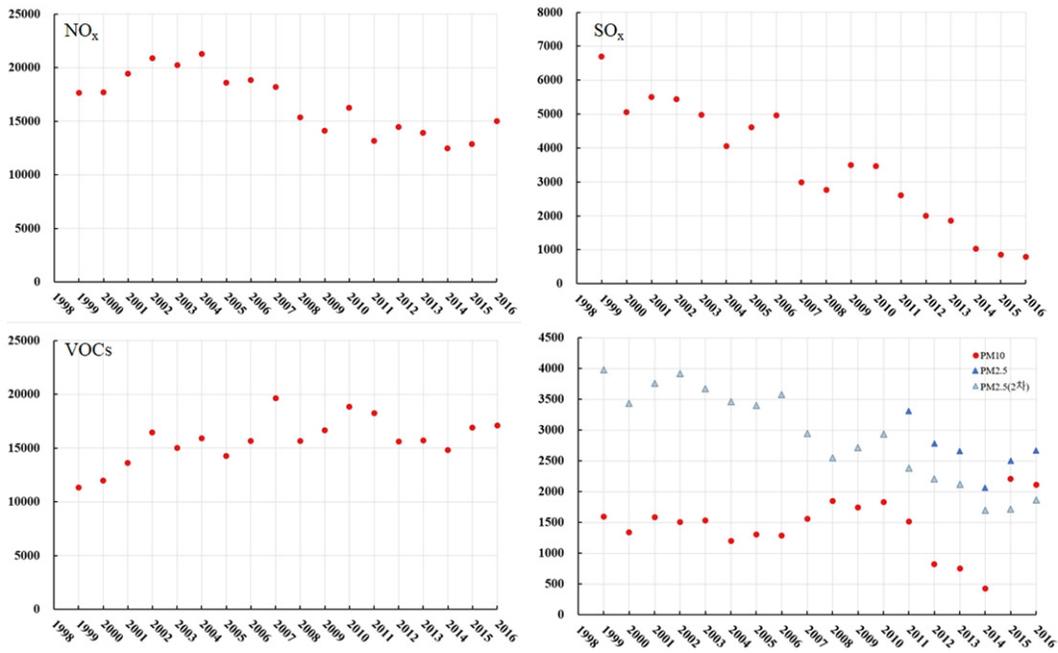


그림 5. 청주시 주요 대기오염 물질 배출량의 변화(1999~2016년)

출처 : 국립환경과학원 국가 대기오염물질 배출량 서비스(1999~2016년 자료).

질소산화물의 발생은 앞서 논한 바와 같이 1999년 이후 감소하는 양상이지만, 일시적인 증가 등이 나타나고 있다. 가장 중요한 배출원은 자동차 및 중장비와 같은 디젤 연료 사용 장비인 것으로 나타나고 있다. 오염 물질의 배출량 변화 동향을 파악하기 위한 다른 자료인 굴

뚝배출량 감시체계의 측정 결과는 향후의 변화 동향을 추정할 수 있도록 한다. 물론 굴뚝감시체계는 자동차나 다른 이 수송 장비 등에 대해 실시되는 체계는 아니며 주로 1~3종 배출 업체들을 대상으로 한다, 즉 이들은 연간 100,000ton 이상의 오염 물질을 배출하는 사업체들을

표 5. 청주시 주요 대기오염 방출 업체의 TMS 측정 결과

(단위: kg/year)

	2015	2016	2017	2018
총오염 물질	1,123,934	1,235,507	1,169,578	1,207,332
먼지	25,892	30,595	27,732	23,549
황산화물	135,811	146,190	91,505	48,354
질소산화물	811,581	850,262	822,623	891,656
염화수소	31,447	42,025	49,286	52,899
이산화탄소	119,203	142,658	137,706	136,267

\* 국가통계포털 환경부 자료를 바탕으로 작성.

대상으로 한다. 2015~2018년의 TMS 측정 결과에 의하면 질소산화물의 배출이 다시 증가하는 것으로 나타나고 있어 향후 대응이 시급한 것으로 보인다. 측정 대상 사업체들은 폐기물 처리와 에너지산업 연소가 주를 이룬다. 특히 2015년 대비 2018년의 TMS 측정 결과는 10% 이상 증가한 것으로 나타나고 있다. 이 증가의 상당 부분은 일부 폐기물 중간처리업체에 의한 것으로 파악되고 있다. 이에 대한 체계적인 대안의 마련이 필요한 것으로 보인다. 디젤 이용 차량의 경우 정부의 적극적인 경유 차량 폐차 지원과 사용 제한 등이 이루어지고 있으며, 전기차를 포함하는 친환경 차량으로의 변환이 추진되고 있다. 그러나 휘발유 차량의 경우 이산화탄소의 배출량이 많아 대기오염의 직접적인 피해는 줄일 수 있으나, 지구온난화에 미치는 영향은 더 커지게 될 것으로 보인다. 이에 소위 연료 전환과정에서 휘발유 차량으로의 전환에 대해서는 제한을 가해야 할 것으로 보인다.

SO<sub>x</sub>의 배출량은 SO<sub>x</sub> 787,602kg/year로, 양은 적은 편이며 전반적으로 배출량이 급격히 감소 중이다(그림 5). SO<sub>x</sub>는 단일 배출원으로서 가정용 연료 부분이 35.8%로 큰 비중을 차지하고 있다. 특히 가정용 무연탄에 의한 SO<sub>x</sub> 발생량은 청주시 전체 발생량의 35.6%로 상당한 비중을 차지하고 있어 이에 대한 조속한 대책이 요구된다. 한편 다른 SO<sub>x</sub>의 주요 발생원으로는 자동차 특히 경유 자동차와 디젤을 연료로 하는 중장비, 병커C유를 사용하는 에너지산업 연소 등이 있다. 도로 이동과 비도로 이동 모두 대기 환경 규제로 이루어진 초저유황 경유의 보급 등으로 이들의 발생량은 감소되는 것으로 보인다. 에너지산업 연소의 경우 전량 청주의 지역난방공사에서 배출되는 양(환경부 TMS 계측 결과)으로 이들의 연료 변환 작업이 진행될 예정이다. 굴뚝감시체계의 측정 결과 역시 2015년 이후 지속적으로 발생량이 감소하고 있

는 것으로 나타나고 있다. 한편 직접 측정이 어려운 가정용 연료를 포함하는 비산업 연소 가운데 무연탄의 연소에 의한 SO<sub>x</sub>의 발생량은 99.3%에 달하고 있어 청주시 내의 무연탄 활용을 최소화하기 위한 정책적인 노력이 필수적인 것으로 보인다.

앞서 논의한 바와 같이 휘발성 유기화합물질의 발생량은 지속적으로 증가하고 있으며, 향후 보다 증가할 것으로 예상된다. 이들의 경우 굴뚝감시체계의 대상이 아닌 관계로, 정확한 배출량의 추정은 어렵다. 휘발성 유기화합물질은 일반적으로 에너지 수송과 저장, 유기용제의 사용에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있다. 에너지 수송 및 저장이란 화석연료, 특히 휘발성이 강한 휘발유의 공급으로 인한 VOCs 배출량을 산정한다. 여기에는 정유공장 및 저유소의 출하기지에서 수송수단(탱크트럭 등)에 적재할 때의 배출 및 저장탱크에서의 배출, 주유소에서의 급유 등이 포함된다. 우리나라의 경우 휘발유 이외의 유류에 대해서는 파악하지 않으며 청주의 경우 대형 저유소 등이 없기 때문에 주유소의 수가 중요한 요소가 된다. 유기용제의 사용은 페인트, 잉크, 세탁소 용매 및 가정용품 등 휘발성이 큰 유기용제의 사용에 따른 휘발성 유기화합물 배출량을 산정하는 것이며, 산업시설 도장, 건축물·비산업용 도장, 세정, 세탁, 기타 인쇄, 가정, 아스팔트 포장 등이 포함된다. 청주의 경우 2016년 가장 중요한 배출원은 유기용제(52.1%)이며, 에너지 수송 및 저장은 3.4%이다. 그러나 폐기물 처리에 의한 배출량이 30.9%를 차지한다. 앞서 논한 바와 같이 폐기물 처리에는 폐기물의 소각만이 포함된다. 청주의 경우 폐기물 소각에 의한 비율은 다른 지역에 비하여 대단히 높은 것으로 나타나고 있다.

표 6. 청주시 소재 폐기를 중간처리업체 현황(2017년)

사업체 및 기관명	사업구분	처리능력 (ton/day)	처리량 (ton/year)	1일 처리량 (ton/day)
깨끗한나라(주)	사업폐기물 자체소각	46(400)*	89,628	245.56
대한제지	사업폐기물 자체소각+중간처분	451	16,888	46.27
우진환경개발	중간처분	99(48+51)**	39,166	107.30
진주산업(클렌코)	중간처분	352(108+72+172)**	123,580	338.58
다나에너지솔루션	중간처분	91	36,861	100.99
한세이프	중간처분	92(46+46)**	40,201	110.14
나투라페이퍼	중간처분	370	96,287	263.80
롯데네슬레	사업폐기물 자체소각	144	25,657	70.29
LG화학	사업폐기물 자체소각	31	2,976	8.15
청주시 하수처리과	사업폐기물 자체소각	90	43,775	119.93
청주시	생활폐기물 소각	400	124,296	340.54

출처 : 환경부·한국환경공단, 2018.

\* 처분 시설의 증설이 확인되었으나, 환경부의 관련 통계에 반영되지 않은 처리 용량.

\*\* 2기 이상의 처리 시설(소각로)이 있어 각각 처리 용량이 분리 정리되어야 하나, 1개 시설로만 통계 처리가 이루어진 관계로 각 시설의 용량을 표기.

표 7. 청주시 발생 폐기물의 처리주체별 처리현황

(단위: ton/day)

	합계(자치단체 처리 포함)				처리업체				자가 처리			
	소계	매립	소각	재활용	소계	매립	소각	재활용	소계	매립	소각	재활용
생활폐기물	1,124	119	373	633	465	1	42	422	3	0	0	2
시설폐기물	3,440	565	934	1,941	2,538	565	68	1,904	903	1	866	37
건설폐기물	3,578	1	74	3,503	3,578	1	74	3,503	0	0	0	0
합계	8,142	685	1,381	6,077	6,581	567	184	5,830	906	1	866	39

출처 : 환경부·한국환경공단, 2018.

#### IV. 토론: 청주시와 폐기물 소각 문제

오염 물질 배출원에 있어서 청주시가 전국적인 특성과 가장 큰 차이를 보이는 부분은 폐기물 처리에 의한 미세먼지와 오염 물질 발생 비율이다. 특히 1차 미세먼지와 2차 미세먼지를 합한 경우 전체 미세먼지 배출량 가운데 4.9%가 폐기물 처리에 의한 것으로 도로 이동(23.3%), 비도로 이동(9.4%), 생물성 연소(8.7%), 제조업 연소(6.3%)에 이은 다섯 번째 중요 배출원이다. 이는 전국 평균 0.67%의 7배 이상에 해당하는 비율이다. 또한 충청북도의 1.2%에 비해서도 4배 이상에 해당하는 비율이다. 따라서 청주시의 미세먼지 관련 대책에서 다른 지역과 확연한 차이를 나타내는 부분이 폐기물 처리 부분으로 볼 수 있다. 가장 심각한 문제는 다른 대기오염 물질이 감소 또는 안정화 경향과는 달리 폐기물 처리 부분에서 오염 물질 배출량은 감소하지 않고 일부는 상당히

증가한다는 것이다. 이에 따라 청주시의 폐기물 처리 부분을 살펴보았다.

먼저 폐기물 처리 부분은 현행 법령상, 수집 및 운반, 중간처리, 최종 처리로 나뉘며 중간처리라는 말은 수집 운반된 폐기물을 분쇄, 파쇄, 건조, 소각하는 것을 포함한다. 최종처리는 소각된 폐기물 또는 폐기물 자체를 정해진 매립구역에 매립하는 것을 의미한다. 따라서 중간처리의 대부분은 소각을 의미하게 된다. 특히 미세먼지나 대기오염 물질 방출 부분은 소각만이 반영된다. 폐기물 처리과정은 생활폐기물과 사업장폐기물로 다시 나뉘며, 생활폐기물은 지방자치 단체가 관할구역을 정하여 수집, 운반, 처리하고, 사업장폐기물은 각 개별 사업장 또는 산업단지별로 폐기물 처리 방안을 마련하여 시행해야 한다. 사업장폐기물의 경우 폐기물 수집 구역이 정해져 있지 않으며 민간 처리 업체들에게 위탁 처리하게 된다. 생활폐기물과 사업장폐기물의 발생량, 처리 방식들

은 기록되고 있으며 환경부가 이를 수합 공개하고 있다. 중간처리의 경우 각 지자체에 건설을 위한 적정성 평가를 통해 허가를 받은 뒤, 건설하여 영업하도록 되어 있으며, 규모에 따라 환경영향평가 등 법적인 절차가 진행된다. 의료 폐기물과 지정 폐기물 등의 경우에도 사업장폐기물과 마찬가지로 폐기물 처리 구역이 정해져 있지 않다.

청주의 경우 주변에 2개의 지자체 폐기물 처리 시설과 9개의 민간 폐기물 중간처리 시설 그리고 1개의 폐기물 이용 발전 시설이 있다(표 6). 이 민간 폐기물 중간처리 시설 가운데 5개는 민간 기업으로 폐기물 중간처리를 전문으로 한다. 1개 기업은 자체 발생 폐기물 소각과 폐기물 중간처리업을 겸하는 자격을 지니고 있다. 3개는 자체 발생 폐기물만을 중간처리하고 있다(환경부·한국환경공단, 2018). 지방자치단체의 운영 시설은 청주시 발생 생활폐기물과 청주시 사업장에서 발생한 생활폐기물을 소각하고 있으며 2017년 124,296ton을 소각 처리하였다. 또한 하수 처리과정에서 발생한 폐기물 43,775ton 역시 소각 처리되었다. 정부 통계상 1인당 생활폐기물 발생량으로 보고되는 양은 소각장으로 반입된 양과 재활용, 매립장으로 반입되는 양을 합한 것으로 소각 문제에 대한 정보의 일부에 해당한다. 2017년 청주시의 사업장 등에서 발생하는 총 소각 처리 폐기물의 양은 503,995.5ton으로 생활폐기물은 전체의 24.7% 수준이다. 청주시의 생활폐기물 전체 발생량은 1일 1인당 1.3kg 정도이며, 충청북도는 1.25kg 수준이다. 전국 평균은 1.01kg으로 나타나 있다. 전국적으로 인구 1인당 가장 많은 폐기물이 발생하는 지역은 제주도 1.93kg에 달하며, 2위는 강원으로 1.49kg으로 알려져 있다(환경부·한국환경공단, 2018). 제주와 강원은 경우는 관광객과 상주인구 비율 문제와 관련된 것으로 보인다. 다른 지역의 경우 그 격차가 상당한데, 이에 대한 연구가 필요한 것으로 보인다.

한편 청주시에서 발생하는 사업장폐기물 가운데 사업체 내에서 소각되는 경우는 865.8ton/day이며, 처리업체에 위탁되는 것은 68.4ton/day이다. 즉, 1일 평균 934.2ton의 청주 지역 발생 폐기물이 소각되고 있다. 그런데 실제 민간 부분의 소각량은 평균 1,291.08ton/day 달한다(환경부·한국환경공단, 2018). 물론 국회 국정감사 자료에 의하면 청주의 6개 소각 업체가 1일 처리하는 양은 1,448ton/day로 나타나 있다. 환경부·한국환경공단(2018) 자료를 기준으로 할 경우, 청주시의 폐기물 처리량 가운데 하루 평균 356.9ton은 청주시에서 발생하지 않는 폐기물

이 소각되고 있다. 건설폐기물 가운데 소각되는 74ton을 포함한다 해도 282.9ton의 외부 유입이 발생하는 것으로 볼 수 있다. 이는 인근의 다른 충북 지역에서의 유입되는 것으로, 상당 부분은 고속도로망을 통해 유입되는 것으로 알려져 있다. 이는 현행 폐기물 관련법에서 사업장폐기물의 처리를 다른 지역으로 이전하여도 되는 데에서 발생하는 문제점으로 보인다.

물론 절대적인 배출량의 측면에서 보면 다른 일반적인 미세먼지 저감을 위한 정책의 시행이 필수적이다. 특히 발생량의 상당 부분을 차지하는 도로와 각종 공사장 등의 비산 먼지를 제거하기 위한 적극적인 정책의 필요성이 요구된다. 일반적으로 시행되는 비산 먼지 관련 정책은 내연 기관의 연소로 인한 도로의 미세먼지 저감 정책과 상당 부분은 동일하다. 자동차 운행의 제한과 도로의 미세먼지 흡입 등의 정책은 도로에서 발생하는 연소 및 비연소 기원 물질의 제거에 상당한 효과를 지니고 있는 것으로 알려져 있다(최유진·김영은, 2018). 이외에도 도로의 가로수 정비 및 미세먼지 제거를 위한 차단 도시 숲의 조성은 상당한 효과를 보일 것으로 보인다. 그러나 도로 비산 먼지 확산의 공간적 범위와 고도 등에 대해서는 추가적인 연구가 필요한 상황이다. 비산 먼지의 확산 고도와 고도별 농도들이 확인된 후, 적절한 차단 숲의 수종과 나무의 높이 등이 정해질 수 있을 것으로 보이며, 이를 위해서는 각 지점별 농도와 구성 물질의 특성을 파악할 수 있는 현장 연구의 진행이 필수적이다. 앞서 지적한 바와 같이 비산 먼지의 경우 그 화학적 조성의 파악을 통해 연소 기원과 비연소 기원을 식별할 수 있다. 그리고 각 기원의 차이에 따라서 적절한 대책의 마련이 가능해 진다.

또한 다른 측면에서 주요 발생원 주변에 대한 차단의 실시이다. 청주 지역의 오염 물질 확산에 대한 각종 시뮬레이션의 결과들에 의하면 NO<sub>x</sub>의 확산 범위는 배출원을 중심으로 하여 특정한 방향의 특정한 거리에 낙하하는 경향이 나타난다. 이는 또한 계절적인 풍향의 변화에 따라 변화한다. 특정 대기오염 물질의 최대농도 출현 지점은 출현 농도와 차이가 나타나는데, 이에 대한 구체적인 분석이 이루어져야 하며, 대기순환모형을 활용한 시뮬레이션을 통해 적절한 확산 저지 방안 등이 마련되어야 할 것이다. 제조업과 폐기물 처리, 발전산업 연소 등은 최대오염 발생 지점을 중심으로 시설 자체의 저감 설비 구축과 동시에 오염 물질의 집중 낙하 지역을 중심으

로 차단 숲이나 완충 지대의 마련이 이루어져야 할 것이다. 특히 주거지역과 오염 물질 배출원 사이에 완충적인 역할을 하는 녹지의 마련이 필수적인 것으로 보인다. 녹지의 경우 직접적인 수목의 활동을 통하여 대기오염 물질을 직접 제거하는 경우도 있으며, 수목에 의한 풍속의 저하나 풍향의 변화를 통해 피해를 저감하는 현상도 가능한 것으로 보인다. 한편 청주는 소백산지에서 분기된 산지가 남서 방향으로 발달해 있어, 오염 물질의 집적이 발생하는 양상이 이와 관련되어 나타날 것으로 보인다. 하지만 이러한 현상에 대한 구체적인 증거 역시 부족하기 때문에, 이 부분에 대한 연구가 필요한 것으로 보인다. 한편 이러한 사항은 전반적인 도시구조와 도시계획과 관련된 사항으로 아직까지 정부의 관련 대책은 매우 미흡하다고 할 수 있다. 정부가 마련하는 미세먼지 및 대기오염 관련 정책들이 각 부처별로 분산되어 있고, 친환경 차량 개발과의 경우 차량의 교체와 같은 사업에 집중되고 있다(이혜경·배재현, 2019). 한편 미세먼지 발생의 중요한 매개 요인인 암모니아에 대한 관리 방안 마련도 필수적이거나, 미세먼지에 대한 기여 계수(변환계수) 등이 정확히 파악되지 않은 관계로 정확한 미세먼지 기여를 파악하기 어렵고, 농업 분야의 발생량이 상당한 비중을 차지하는 관계로 저감 방안의 마련이 쉽지 않은 상황이라는 점도 상당한 난관으로 보인다.

마지막으로 본 분석의 대상이 된 CAPSS의 배출원 관리 체계의 문제가 있다. 굴뚝감시체계(TMS)를 통해 수집되는 자료와 일부 자료를 제외하고 상당수의 배출량 산정이 직접 측정이 아닌 간접적 추정 자료로서 정확한 배출량을 파악하는 것이 어렵다. 또한 해당 추정 값이 타당한지에 대한 검증 작업은 이루어지지 못하고 있다. 도로 배출량의 경우 직접 측정이 아닌 자동차의 통과 대수를 기준으로 산정하는 경우가 많고 수도권을 제외한 지역의 경우 교통량 정보조차도 정확하지 않은 관계로 차량의 등록 대수를 기준으로 배출량을 산정하고 있다. 즉, 실제 배출되는 대기오염 물질량을 정확히 파악하는 것 자체가 이루어지지 못하고 있다. 또한 직접 측정하는 굴뚝원격감시체계 역시 측정 대상이 먼지, 황산화물, 질소산화물, 염화수소, 불화수소, 암모니아, 일산화탄소로 한정된다. 즉, 주요 2차 미세먼지유발 물질인 VOCs 등의 경우에는 측정되지 않고 있으며, 다른 발암물질 등은 아예 측정이 이루어지지 못한다는 문제가 있다. 다른 한편으로는 오염 물질에 따른 배출계수의 산정에 대해서도

학자들에 따라서 상당한 견해 차이가 있는 것이 사실이다. 이의 해소를 위해서는 각 지역별로 대기오염 물질의 화학적인 분석이 실시되어야 한다. 물론 여기에는 국가적 차원의 행정적인 노력만큼, 지역의 분석 역량 및 연구 능력 배양이 필수적이며 이러한 시스템을 구축하기 위한 연구 역시 필요한 것이 사실이다. 국내의 경우 대부분의 분석과 같은 기능들은 중앙 정부나 다른 정부의 산하기관 등에 집중되어 있으며, 지역의 경우 지방자치단체의 재정적인 능력과 지자체(장)의 관심에 의해 상당한 능력 차이가 나타나고 있으며 전문 인력의 부족은 만성적인 문제이다. 그러므로 지역 차원의 대응을 위한 전반적인 시스템 마련부터 모색하여야 하는 것으로 판단된다.

## V. 결론

본 연구에서는 환경부가 공개한 2016년 국가대기오염 물질배출량을 바탕으로 청주시의 대기오염 물질의 배출원 특징을 미세먼지를 중심으로 파악하였다. 청주시에서는 2016년 약 4,776.8ton의 미세먼지와 초미세먼지가 만들어졌으며, 그중 1차 미세먼지는 약 2,910ton (60.9%), 대기오염 물질이 대기 중에서 화학반응을 통하여 만들어진 2차 미세먼지는 약 1,866.4ton(39.1%)으로 나타났다. 이는 우리나라 전체의 1차 미세먼지와 2차 미세먼지의 비율인 7:3에 비하여 2차 미세먼지의 비율이 높은 것으로 볼 수 있다. 이는 청주 지역에서 배출되는 대기오염 물질 가운데 2차 미세먼지를 유발하는 오염 물질의 비율이 다른 지역에 비하여 높은 데에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 청주 지역에서 배출되는 대기오염 물질 가운데 황산화물은 급격히 감소하고 있고, 질소산화물 역시 미미하지만 전반적인 감소의 경향성을 보이는데 반하여 휘발성 유기화합물질이 양은 증가하는 양상을 보이는 것도 중요한 특성이라고 볼 수 있다. 다만 굴뚝원격감시체계를 통해 파악되는 바는 질소산화물 역시 폐기물 소각 시설을 중심으로 증가하는 유형이 나타나고 있다. 한편 휘발성 유기화합물질의 배출 추정량 역시 폐기물 중간처리 부분이 차지하는 비중이 상당히 높은 것으로 나타나고 있다.

이에 따라 청주시의 주된 미세먼지 배출원으로 추정되는 것은 도로 이동 오염원(23.3%), 비도로 이동 오염원(9.4%), 생물성 연소(8.7%), 제조업 연소(6.3%), 폐기

물 중간처리(4.9%)라 할 수 있다. 폐기물 처리에 의한 미세먼지 배출 비율은 전국 평균 0.67%의 7배 이상에 해당하는 상당히 높은 비율로 이에 대한 대책이 필요한 것으로 보인다. 특히 청주시의 경우 외부로부터 유입된 사업장폐기물의 소각 비중이 높은 것으로 보이며, 폐기물 소각장의 지역 간 이동 등에 대한 연구와 정부 차원의 규제가 필수적인 것으로 보인다.

현재로는 배출되는 오염 물질의 화학적인 조성이나, 오염 물질의 공간적인 분포 등에 대한 과학적이고 검증 가능한 분석 결과가 존재하지 않으며, 정확한 배출량 추정을 할 수 있는 기초자료 수집 등도 사실상 이루어지지 않는 상황이다. 따라서 이에 대한 향후 연구가 필요한 것으로 보인다.

한편 대응의 측면에서는 오염 물질의 확산을 저지하고 공기를 정화할 수 있는 도시계획과 녹지 조성 등이 필수적인 것으로 보이나 이 역시 이들의 설치를 위한 과학적인 자료의 수집도 이루어지지 못한 상태이므로 시급한 개선이 요구된다. 한편 지역 차원에서의 연구를 활성화할 수 있는 지역 연구 인프라 구축과 인력 양성 역시 필수적이다.

## 참고문헌

강현·박기학·김은수·황윤빈·임승빈·조상범·최성봉, 2012, 「타이어 및 브레이크 패드 마모에 의한 비산먼지 배출량 및 위해성 조사», 안산: 수도권대기환경청.

국립환경과학원, 2007, 「대기오염물질 배출량 산정방법 편람 (I)」, 인천: 국립환경과학원.

국립환경과학원, 2013, 「대기오염물질 배출량 산정방법 편람 (III)」, 인천: 국립환경과학원.

국립환경과학원, 2014a, 「PM<sub>2.5</sub> 배출계수 자료집: 2011년 대기오염 물질 배출량 기준», 인천: 국립환경과학원.

국립환경과학원, 2014b, 「생물성 연소에 의한 대기오염물질 배출량 산정방법 편람: 2011년 대기오염 물질 배출량 기준», 인천: 국립환경과학원.

국립환경과학원, 2018, 「국가 대기오염물질 배출량 기초자료 구축을 위한 표준업무절차서: 2015년 배출량 기준», 인천: 국립환경과학원.

국립환경과학원, 2019, 「국가 대기오염물질 배출량 기초자료 구축을 위한 표준업무절차서: 2015년 배출량 기준」,

인천: 국립환경과학원.

국토교통부, 2019, 「자동차등록차량 현황보고(2019.10월)」, 세종: 국토교통부.

박기홍·김영준, 2018, 「초미세먼지 측정 기술의 현재와 미래 초미세먼지 원인 및 영향의 정확한 진단을 위하여」, 광주: GIST Press.

이석환·김홍석·박준혁·조규백, 2011, “실제 도로 주행과정에서 타이어와 도로의 마찰에 의해서 발생하는 미세입자의 특성연구” 한국대기환경학회지, 28(2), 131-141.

이혜경·배재현, 2019, 「(NARS 현안분석 57)미세먼지 행정의 현황과 개선과제」, 서울: 국회입법조사처.

장동호·김태완, 2010, 「타이어 미세먼지 측정법 개발과 미세먼지 저감을 위한 High Mileage 타이어 개발에 관한 연구」, 과천: 환경부.

최유진·고경진, 2013, 「(서울연 2013-PR-64)건물 난방용 연소기기의 대기오염물질 관리 방안 연구」, 서울: 서울연구원.

최유진·김영은, 2018, 「(서울연 2018-PR-29)미세먼지 저감을 위한 도로청소 개선방안」, 서울: 서울연구원.

충청북도, 2019, 「충청북도 대기질 개선 기본 계획」.

한국전력공사, 2019, 「2019년 한국전력통계(제88호)」.

한국지역난방공사, 2019, 「청주 열병합발전설비 개체」(<http://www.alio.go.kr/popReport.do?seq=2019043001823829&disclosureNo=2019043001823829#>).

환경부·한국환경공단, 2018, 「(2017년도)전국 폐기물 발생 및 처리 현황」, 세종: 환경부.

Bukowiecki, N., Lienemann, P., Hill, M., Furger, M., Richard, A., Amato, F., Prévôt, A.S.H., Baltensperger, U., Buchmann, B., and Gehrig, R., 2010, PM<sub>10</sub> emission factors for non-exhaust particles generated by road traffic in an urban street canyon and along a freeway in Switzerland, *Atmospheric Environment*, 44(19), 2330-2340.

Department for Environment Food & Rural Affairs and Department for Transport, 2018, *Call for Evidence on Brake, Tyre and Road Surface Wear*, London: UK Government.

Gowers, A.M., Miller, B.G., and Stedman, J.R., 2014, *Estimating Local Mortality Burdens Associated with Particulate Air Pollution (PHE-CRCE-010)*, London: Public Health England.

- Lenschow, P., Abraham, H.J., Kutzner, K., Lutz, M., Preuß, J.D., and Reichenbacher, W., 2001, Some ideas about the sources of PM<sub>10</sub>, *Atmospheric Environment*, 35(1), S23-S33.
- Panko, J.M., Hitchcock, K.M., Fuller, G.W., and Green, D., 2019, Evaluation of tire wear contribution to PM<sub>2.5</sub> in urban environments, *Atmosphere*, 10(99) (doi:10.3390/atmos10020099).
- Penkała, M., Ogrodnik, P., and Rogula-Kozłowska, W., 2018, Particulate matter from the road surface abrasion as a problem of non-exhaust emission control, *Environments*, 5(1) (doi:10.3390/environments5010009).
- Querol, X., Alastuey, A., Ruiz, C.R., Artinano, B., Hansson, H.C., Harrison, R.M., Buringh, E., Brink, H.M., Lutz, M., and Bruckmann, P., 2004, Speciation and origin of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in selected European cities, *Atmospheric Environment*, 38(38), 6547-6555.
- Wakeling, D., Passant, N.R., Murrells, T.P., Pang, Y., Thistlethwaite, G., Walker, C., Brown, P., Del Vento, S., Hunter, R., Wiltshire, J., Broomfield, M., Watterson, J., Pearson, B., Rushton, K., Hobson, M., Smith, H., and Misselbrook, T., 2017, *UK Informative Inventory Report (1990 to 2015)*, London: UK Government.
- 국가통계포털, “(환경부 자료)대기오염물질 배출시설 및 굴뚝TMS 부착사업장 배출량 현황”, [http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=106&tblId=DT\\_106N\\_03\\_0200079&conn\\_path=I3](http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=106&tblId=DT_106N_03_0200079&conn_path=I3)
- 국립환경과학원 국가 대기오염물질 배출량 서비스, “1999~2019년 자료”, <http://airemiss.nier.go.kr>
- 교신 : 김종연, 28644, 충청북도 청주시 서원구 충대로 1, 충북대학교 사범대학 지리교육과(이메일: terraic@cbnu.ac.kr)
- Correspondence : Jong Yeon Kim, 28644, 1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, Korea, Department of Geography Education, College of Education, Chungbuk National University (Email: terraic@cbnu.ac.kr)
- 투 고 일: 2019년 11월 29일  
심사완료일: 2019년 12월 11일  
투고확정일: 2019년 12월 15일

