

권역별 대기오염물질의 연도별 배출 특성 분석

Analysis of Annual Emission Trends of Air Pollutants by Region

임준현 · 광경규 · 김 정 · 장영기*

수원대학교 환경공학과

(2018년 1월 5일 접수, 2018년 2월 2일 수정, 2018년 2월 14일 채택)

Jun Hyun Lim, Kyeong Kyu Kwak, Jeong Kim and Young Kee Jang*

Department of Environmental Engineering, The University of Suwon

(Received 5 January 2018, revised 2 February 2018, accepted 14 February 2018)

Abstract

Using the CAPSS emissions data, we analysed changes and reasons in the annual air pollutant emission trends from 1999 to 2014. The CO emissions in the metropolitan area decreased steadily since 2001, when the latest model year of automobiles and high efficiency fuel were applied. However, other regions have not changed significantly in annual emissions. NO_x emissions continued to increase since 2003, and unchanged after the decline in 2007. SO_x emissions are steadily declining due to the supply of low sulfur oil. The PM₁₀ and PM_{2.5} emissions were repeatedly affected by the influence of motor vehicles activities in the metropolitan area. In Gangwon and Chungcheong Provinces, emissions are increasing according to the use of coal in the manufacturing sector. And VOC and NH₃ emissions are increasing steadily every year.

The major CO emission sources was automobiles in the metropolitan area. However, agricultural residue burning was the biggest CO sources in the Chungcheong, Honam and Yeongnam Provinces. The major sources of NO_x emissions differ from region to region. In the Metropolitan area, Honam and Yeongnam region, the truck was the largest emitter of NO_x. However, the cement kiln was the largest producer of NO_x in Gangwon region, and the power plant is the largest emitter in Chungcheong Provinces.

Key words : CAPSS, Emission trend, Emissions, Air pollutants

1. 서 론

현재 국립환경과학원에서 운영하는 대기정책 지원 시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS)은 최근 배출계수를 이용하여 모델링에 활용할 수 있는 지자체 단위별 격자별 배출량을 산출하고 있다. CAPSS

에서 산출되는 배출자료는 수도권 대기환경 개선에 관한 특별법의 시행과 이에 따르는 총량규제 그리고 지자체의 시행계획 평가 등에 없어서는 안 되는 중요한 기초자료로 활용되고 있다(Kim and Jang, 2014). 대기질 모니터링을 위한 국가 대기오염측정망을 구축하여 지속적으로 모니터링을 실시하고 있으며 수도권, 특히 서울지역은 인구와 여러 시설이 집중되어 있어 대기환경이 다른 지역에 비해 많이 악화되었고, 이를 해결하

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-220-2147, E-mail : musim@suwon.ac.kr

기 위해 여러 대책도 다른 지역에 비해 먼저 시행되었다(Kim and Yeo, 2013). 최근 심각성이 커지고 있는 미세먼지의 경우 발생과정과 이동경로가 복잡하여 관리가 어려우며 입자의 크기와 발생원 등의 조건에 따라 처리대책도 다르기 때문에 각 특성에 맞는 관리 대책이 필요하다(Lee *et al.*, 2012).

2014년 CAPSS의 지역별, 대기오염물질별 배출량의 경우 CO, NO_x, VOC 배출량은 경기도의 배출량이 가장 많이 차지하고 있으며, SO_x와 NH₃는 충청남도, PM₁₀과 PM_{2.5}의 경우 경상북도의 배출량이 가장 많이 차지하고 있다.

이와 같이 지역별, 오염물질별 배출 특성이 다르기 때문에 지역별 대기질 특성에 대한 조사·분석 후 대상 지역에 적합한 대기질 저감 정책 적용이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 전국을 6개 권역으로 구분하여 1999년에서 2014년의 배출자료 분석을 통하여 권역별 배출특성을 분석하고자 하였다.

2. 연구 범위 및 방법

2.1 연구 범위

본 연구에서는 국립환경과학원의 대기정책지원시스템(CAPSS, Clean Air Policy Support System)의 1999년~2014년 대기오염물질 배출량과 수도권(서울특별시, 인천광역시, 경기도), 강원권(강원도), 충청권(대전광역시, 충청북도, 충청남도), 호남권(광주광역시, 전라

북도, 전라남도), 영남권(부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 경상북도, 경상남도), 제주권(제주도)로 구분한 6개 권역의 배출 특성을 분석하였다. 표 1은 CAPSS의 배출원 분류체계이다.

2.2 연구 방법

국립환경과학원에서는 매년 대기오염물질 배출량을 산정하고 있으며, 국가 대기오염물질 배출량 보고서를 작성, 제공하고 있다. 국가 대기오염물질 배출량 보고서에서는 배출량 산정 방법론과 배출계수 등 산정 방법 개선에 대한 내용을 나타내고 있으며, 대기오염물질별 주요한 연도별 변경사항과 배출량 변화를 표 2와 같다.

연도별 배출량 산정 방법 개선사항을 참고하여 CAPSS의 13개 대분류 배출원과 7개 대기오염물질(CO, NO_x, SO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, VOC, NH₃)을 대상으로 하여 1999년~2014년까지의 6개 권역의 대기오염물질 배출 특성 분석하였다.

3. 전국의 연도별 대기오염물질 배출특성 분석

전국 CO 배출량의 경우 1999년 1,139,704 ton/yr에서 2014년 782,136 ton/yr로 점진적으로 감소하는 추세를 나타내었다. 배출량의 감소 추세는 최근 연식의 자동차 등록대수 증가와 함께 최신 연식 차량의 고효율 연비 적용에 따른 승용차 부문의 배출량 감소와 이륜 차량의 규제연식 강화로 인한 배출량 감소의 영향으로 분석하고 있다.

NO_x 배출량은 2003년까지 점차 증가한 후 큰 변화를 나타내지 않았으며, 2007년 감소 추세를 보인 이후 중간의 변화가 크게 나타나지 않았다. 2007년의 배출량 감소는 에너지 산업연소 부문에서 CleanSYS 배출량 적용에 의한 영향으로 분석하고 있다.

SO_x 배출량의 경우 큰 변동을 보이지 않았으나 2007년과 2014년 약간의 배출량 감소가 나타났다. 2007년의 배출량 감소는 CleanSYS의 측정치 적용에 따른 에너지산업연소 부문의 배출량 감소로 전체 배출량의 감소 추세가 나타났다. 2009년 이후에는 생산공정의 배출량 증가와 2011년 폐기물처리 부문의 CleanSYS 배

Table 1. Air pollutant emission source categories classification in CAPSS.

SCC	Source category
01	Combustion in energy production
02	Non industrial combustion
03	Combustion in manufacturing industry
04	Production process
05	Energy storage & transport
06	Solvent utilization
07	Road transportation
08	Non Road transportation
09	Waste disposal
10	Agriculture
11	Other sources
12	Fugitive dust
13	Biological combustion

Source: National air pollution estimation method manual, NIER, 2013

Table 2. Major modifications of calculation method for air pollutant emissions.

Pollutant	Year	Changes	Emission change
CO	2009	<ul style="list-style-type: none"> • Correction of duplication activities in waste disposal • Number of registered motorcycles, emission factor and one trip length update of road transportation • Addition of new construction equipment of non-road transportation and revision of operating distance of ship 	Year-on-year 16.2% increase
	2011	<ul style="list-style-type: none"> • Addition of biological combustion of source classification 	Year-on-year 28% increase
NO _x	2001	<ul style="list-style-type: none"> • Application of CORINAIR emission factor in europe and change of fuel classification system 	Year-on-year 19% increase
SO _x	2007	<ul style="list-style-type: none"> • Additional use of anthracite coal for non-civilian use in combustion in manufacturing industry • Application of CleanSYS to the emission facility 	Year-on-year 9.8% decrease
	2005	<ul style="list-style-type: none"> • Application of silt loading change in fugitive dust (0.360 g/m² → 0.077 g/m²) 	Year-on-year 51.5% decrease
PM ₁₀	2007	<ul style="list-style-type: none"> • Application of silt load by road type in fugitive dust • Improvement of average car weight • Apply rainfall day • Fugitive dust new additions to the sector (construction, open area, unloading and landing) 	Year-on-year 29.5% increase
	2009	<ul style="list-style-type: none"> • Fugitive dust new additional source (Unpaved roads fugitive dust, Animal husbandry, waste disposal, agricultural activities) 	Year-on-year 19.2% increase
VOC	2011	<ul style="list-style-type: none"> • Establishment of vapor recovery facility Change of emission factor of gas station • Increased use of solvent utilization and increased emissions from production processes, combustion in energy production, waste disposal, and combustion in manufacturing industry 	Year-on-year 13% increase

출자료 보완으로 소폭의 배출량 증가를 나타내었다.

PM₁₀ 배출량은 1999년 180,445 ton/yr, 2014년 208,274 ton/yr로 주요 배출원인 비산먼지부문의 배출량은 큰 변화를 나타내지 않았으나 제조업연소 부문의 무연탄 사용량에 따라 배출량 증감의 변화를 나타내고 있다.

PM_{2.5} 배출량은 1999년 70,127 ton/yr, 2014년 88,641 ton/yr로 주요 배출원인 비산먼지부문의 배출량은 PM₁₀과 마찬가지로 큰 변화를 나타내지 않았으나 제조업연소, 생물성연소 부문의 배출량 증가에 따라 2006년, 2011년 증가를 보였다가 감소 추세를 나타내고 있다.

VOC 배출량의 경우 1999년 833,346 ton/yr, 2014년 969,245 ton/yr로 연도별 유기용제사용 증가와 2011년 생물성연소의 배출량 증가로 인하여 증가폭이 크지는 않으나 꾸준히 증가하는 추세를 나타내었다.

NH₃ 배출량의 경우 1999년 216,071 ton/yr, 2014년 292,510 ton/yr로 1999년 이후 점진적인 증가 추세를 나타내었다. 그림 1에 전국의 오염물질별 배출량 추세를 나타내었다.

를 나타내었다.

1999년과 2014년의 CO 배출원별 배출 기여율은 도로이동오염원의 배출비율이 1999년 72.1%에서 2014년 36.1% 감소한 35.9%를 차지하는 것으로 나타났다. 또한 2011년 이후 생물성연소의 CO 배출량 증가로 다소 배출량이 증가하였다. 하지만 도로이동오염원부문의 최근연식의 배출계수 적용과 이륜차의 배출량이 감소하였으며 LPG택시의 규제 강화에 따른 주행거리 감소와 경유화물차의 Euro-III 이후 차량의 배출계수 개선 등으로 다시 감소추세를 나타내고 있다.

NO_x의 1999년과 2014년 배출원별 배출 기여율을 비교하여 보면 도로이동오염원의 경우 자동차 배출개선 등으로 배출량은 감소하였지만 배출 기여율은 1999년 32.6%에서 2014년 33.8%로 증가하였고 에너지산업연소의 배출량이 감소하여 1999년 23%에서 15.2%로 감소하였다.

SO_x의 배출원별 배출 기여율은 1999년 에너지산업연소와 제조업연소가 각각 33.7%, 29.2%로 가장 높은 비율을 나타냈지만 2014년에는 에너지산업연소와 생

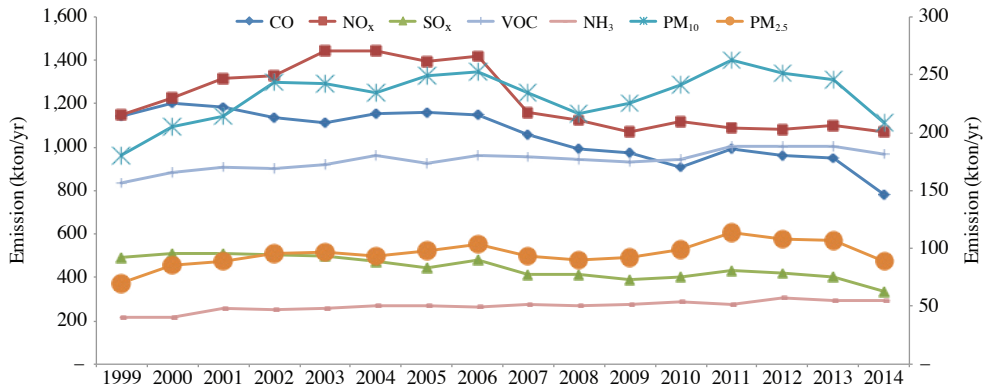


Fig. 1. Annual trend of Air Pollutants emissions.

산 공정이 가장 높은 배출 기여율을 나타내었다.

PM₁₀ 배출원별 배출 기여율은 1999년의 경우 비산먼지 부문에서 56.4%로 가장 높은 배출 기여율을 나타냈었으며, 2014년의 경우 비산먼지 부문이 9% 감소한 47.4%, 제조업 연소 부문이 16.2% 증가한 28.8%의 배출 기여율을 나타내었다.

PM_{2.5} 1999년 도로이동오염원과 비산먼지부문의 PM_{2.5} 배출량이 각각 28.7%와 22.6%의 배출비율을 보였으며 2014년에는 각각 10.4%와 18.2%로 감소하였다, 13.2%였던 제조업연소는 2007년 이후 무연탄 사용량이 꾸준히 증가하여 큰 비중을 차지하였지만 2011년 이후 감소 추세를 보여 34.2%의 배출 기여율을 나타내었다.

VOC의 경우 배출원별 배출 기여율의 경우 도로이동오염원의 중대형 경유 화물차의 활동도가 감소하여 17.2%에서 5.1%로 배출 비율이 감소하였으며, 1999년과 2014년 모두 유기용제사용과 생산 공정 부문에서 가장 큰 배출 기여율을 나타내었다.

NH₃ 배출원별 배출 기여율의 경우 1999년과 2014년 모두 농업과 생산 공정 부문에서 가장 큰 배출 기여율을 나타내었다. 그림 2와 그림 3에 1999년과 2014년의 오염물질별 배출 기여율을 나타내었다.

4. 권역별 대기오염물질 배출 특성 비교

4.1 권역별 연도별 배출추세 비교

CO 배출량의 경우 도로이동오염원의 승용차 부문이

큰 비중을 차지하는 수도권은 2001년 이후 최신연식의 자동차 등록대수 증가와 고효율 연비가 적용되어 꾸준히 감소하는 추세를 나타내었다. 강원권, 충청권, 호남권, 영남권의 경우 생물성연소의 농업잔재물 소각 부문에서 큰 비중을 차지하고 있어 연도별 배출추세에 큰 변화는 없었다. 강원권은 2000년 기타 면오염원의 산불 및 화재의 영향으로 배출량이 일시 증가하였으나 전체 배출량은 큰 변화는 나타내지 않았다.

NO_x 배출량의 경우 전반적으로 2004~2006년을 정점으로 증가하였다가 2007년 감소된 이후 권역별로 증감 차이를 보이고 있다. 2007년에는 CleanSYS 배출량이 적용되었고 이후 자동차 배출개선 등의 영향으로 배출량이 감소하였다. 하지만 충청권은 생산 공정과 생물성연소의 배출량 증가로 인하여 2008년 이후 배출량 증가 추세를 보이고 있다.

SO_x 배출은 강원권의 경우 제조업연소의 무연탄 사용량에 따라 2011년과 2012년 증가 추세를 나타내었으며 충청권 역시 충남지역 제조업연소의 1차 금속산업부문의 무연탄 사용량 증가로 인하여 2012년 배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 호남권의 경우 2011년 폐기물처리 부문의 CleanSYS 배출자로 보완으로 증가추세를 나타내었으며, 2011년 이후 다시 감소 추세를 나타내었다. 영남권은 2005년 에너지산업연소의 공공발전시설 부문의 배출량이 크게 줄어 전체 배출량 감소에 영향을 주었으며 이후 감소 추세를 나타내었다.

PM₁₀과 PM_{2.5} 배출량은 수도권의 경우 비산먼지와 도로이동오염원의 영향으로 증감을 반복하고 있으며

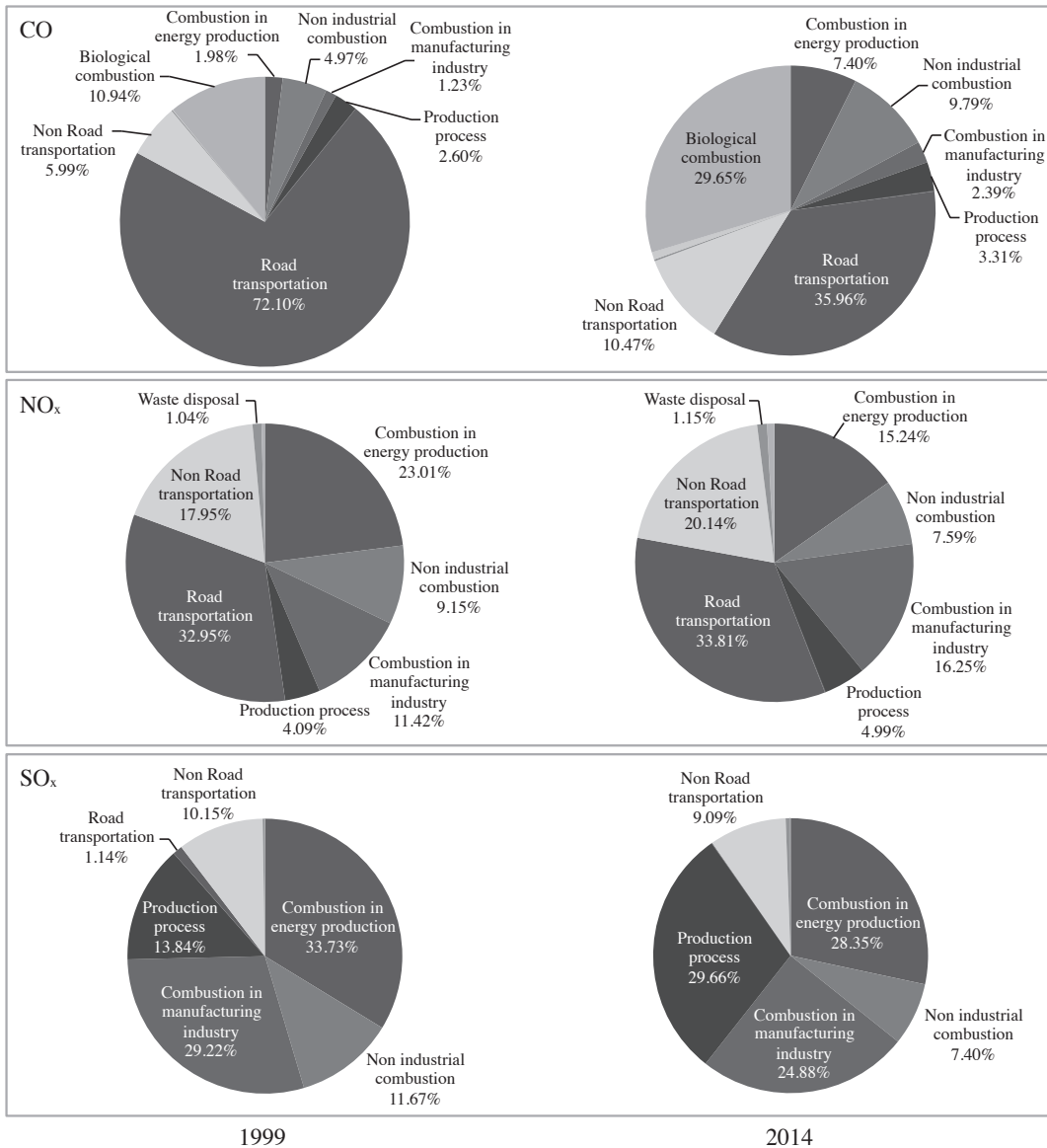


Fig. 2. Air Pollutants emissions ratio by source (CO, NO_x, SO_x).

강원권, 충청권에서는 제조업연소의 무연탄 사용량에 따라 배출량의 변화를 나타내고 있다. 미세먼지는 오염물질 중 권역별로 배출량 변동이 가장 크게 나타나고 있어서 실제 권역별 대기질에 어떤 영향을 주었는지 분석이 필요하다.

VOC의 경우 6개 권역 모두 유기용제사용의 영향으로 증감을 반복하고 있으며 수도권은 전반적으로 감소

추세를 보이고 있으며 충청권, 호남권, 영남권의 경우 1999년 대비 지속적인 증가 추세를 보이고 있다.

NH₃의 배출량은 6개 권역 모두 약한 증가 추세를 보이고 있으며, 수도권의 2011년 분뇨관리부문의 배출량 감소로 배출량이 감소하였으나 전체적인 배출량은 증가 추세를 나타내고 있다. 충청권은 농업부문의 배출량이 꾸준히 증가 추세를 나타내고 있으며, 호남권

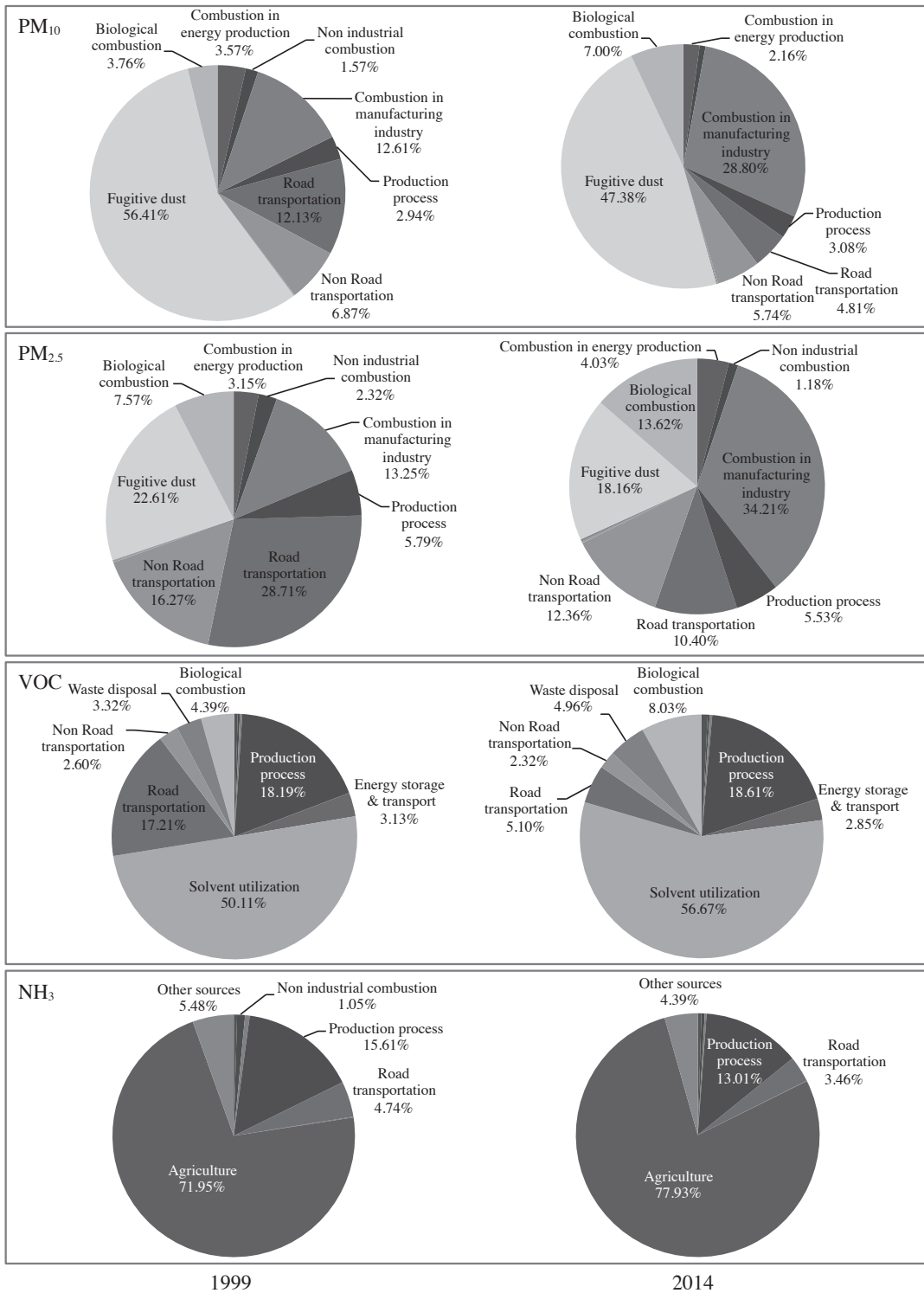


Fig. 3. Air Pollutants emissions ratio by source (PM₁₀, PM_{2.5}, VOC, NH₃).

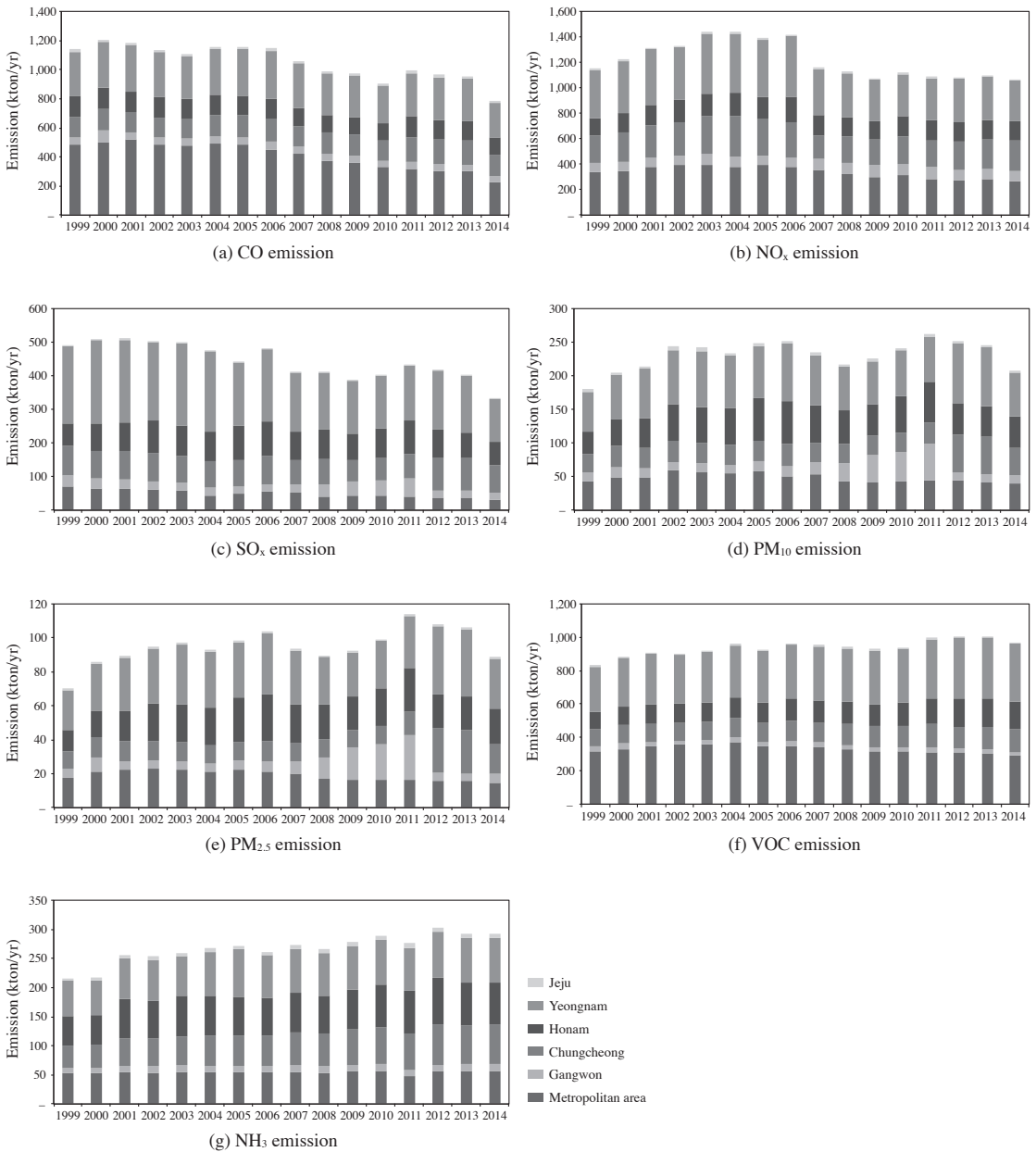


Fig. 4. Annual trends of air pollutant emission by regions.

은 2011년 이후 에너지산업연소 배출량 증가로 증가 추세를 나타내고 있다. 영남권의 경우 유기용제사용 증가와 2011년 생물성연소의 배출량 증가로 인하여 꾸준히 증가하는 추세를 나타내었다. 그림 4에 권역별 오염물질의 배출추세를 나타내었다.

4.2 권역별 주요 배출원

배출량 산출 방법론 변화를 고려하여 재산정된 2014년 배출자료를 기준으로 권역별 주요 배출원을 분석하기 위하여 상위 1~3위를 차지하는 중분류 배출원의 구성비를 살펴보았다.

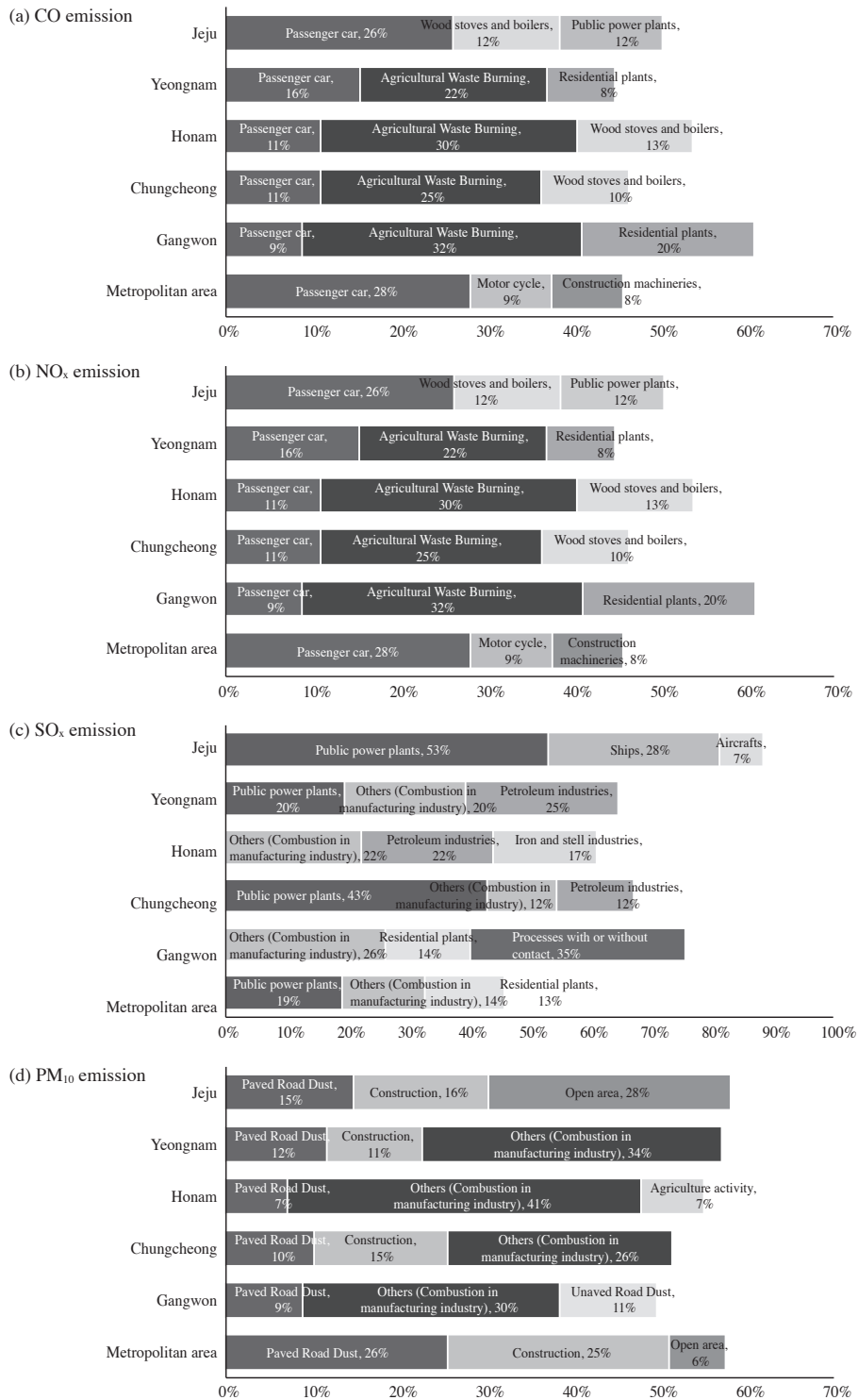


Fig. 5. Top 3 emissions source by regions.

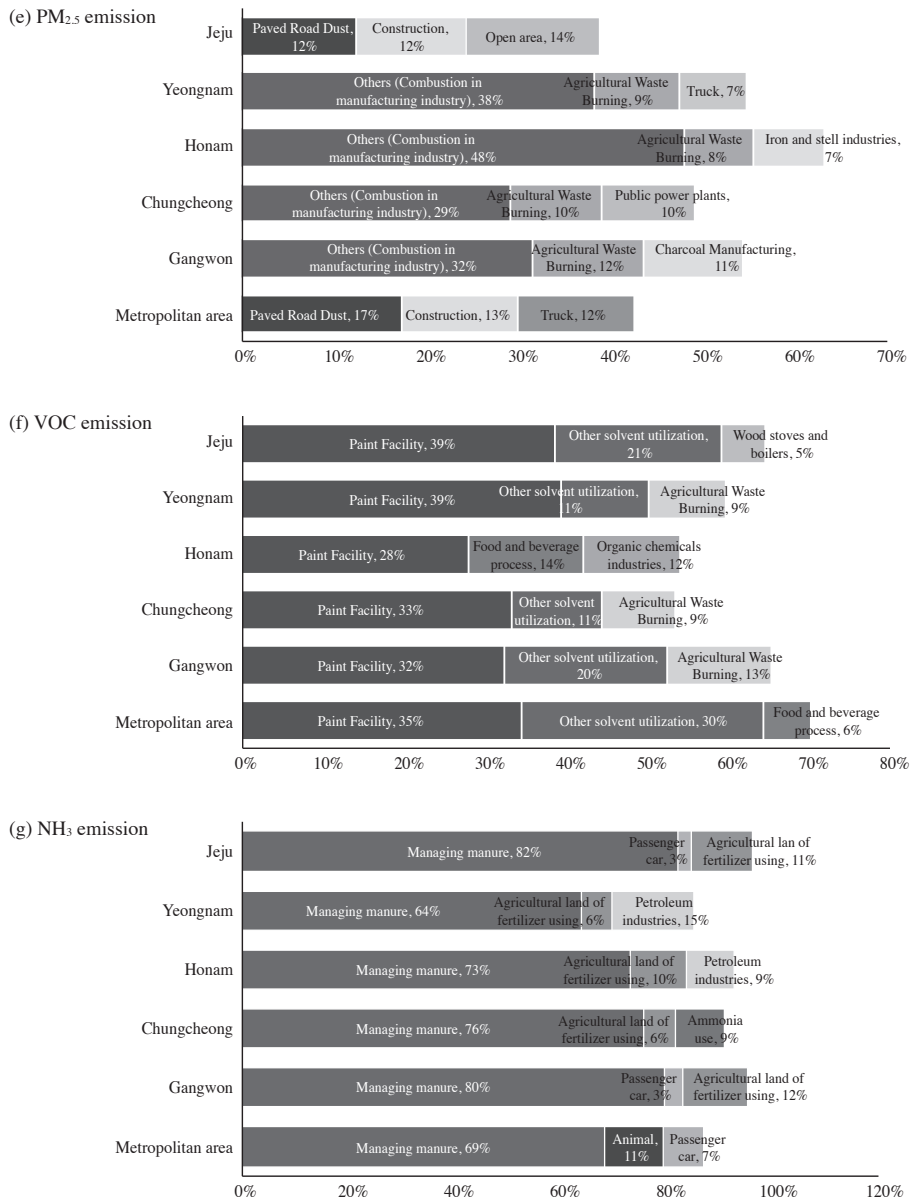


Fig. 5. Continued.

2014년 기준 권역별 CO의 주요 배출원은 수도권과 제주권의 경우 도로이동오염원의 승용차 부문에서 가장 많은 비중을 차지하였으며 강원권, 충청권, 호남권, 영남권은 생물성연소의 농업잔재물 소각에서 가장 큰 비중을 차지하였다.

NO_x의 주요 배출원은 권역별로 다른 것이 특징이었

다. 수도권, 호남권, 영남권은 화물차가 가장 큰 배출원으로 나타났으나 강원권은 제조업연소의 공정로, 충청권은 에너지산업연소의 공공발전시설이 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 제주권의 경우 공공발전과 건설장비가 주요 배출원인 것으로 나타났다.

SO_x의 주요 배출원은 수도권과 충청권, 제주권이 예

너지산업연소의 공공발전시설로 나타났으며, 강원권은 제조업연소의 공정로 부문으로 나타났다. 호남권의 경우 제조업연소의 기타, 영남권은 생산공정의 석유제품 산업부문이 주요 배출원인 것으로 나타났다.

PM₁₀의 주요 배출원은 수도권의 경우 비산먼지의 도로재비산먼지, 제주권은 비산먼지의 나대지로 나타났으며 그 외 권역에서는 제조업연소의 기타부문이 주요 배출원인 것으로 나타났다. PM_{2.5}의 경우 1위 배출원은 PM₁₀과 동일하였으나 건설장비와 농업잔재물 소각이 주요 배출원으로 나타났다.

VOC의 경우 6개 권역 모두 유기용제사용의 도장시설이 주요 배출원인 것으로 나타났으며, 그 다음으로 호남권은 식음료 가공부문, 그 외 권역에서는 기타 유기용제사용의 배출비중이 높은 것으로 나타났다.

NH₃의 주요 배출원은 6개 권역 모두 농업의 분뇨관리부문이 가장 높게 나타났다. 그림 5에 권역별 오염물질의 주요 배출원을 나타내었다.

5. 결 론

1999년부터 2014년까지의 CAPSS 대기오염물질 배출자료를 이용하여 수도권(서울특별시, 인천광역시, 경기도), 강원권(강원도), 충청권(대전광역시, 충청북도, 충청남도), 호남권(광주광역시, 전라북도, 전라남도), 영남권(부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 경상북도, 경상남도), 제주권(제주도)으로 구분한 6개 권역의 배출특성을 분석하였다.

CAPSS에서는 1999년 이후 매년 연간배출량을 발표하고 있으며 활동도의 변화뿐만 아니라 산정방법이 개선됨에 따라 배출량의 변화가 나타난다. 각 물질별 연도별 변경사항과 배출량 변화를 정리하였다. 또한 1999년~2011년의 최신 방법론을 적용하여 재산정된 7가지 대기오염물질(CO, NO_x, SO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, VOC, NH₃)의 연도별 배출량 변화를 비교하였다.

오염물질별 배출량 변화는 CO의 경우 수도권은 2001년 이후 최신연식의 자동차 등록대수 증가와 고 효율 연비가 적용되어 꾸준히 감소하는 추세를 나타냈으나 다른 권역은 연도별 배출추세에 큰 변동이 없었다. NO_x 배출량은 2003년까지 점차 증가한 후 변동이 없다가 2007년에 감소를 보인 이후 증감의 변화가 별

로 없었다.

PM₁₀과 PM_{2.5} 배출량은 수도권의 경우 비산먼지와 도로이동오염원의 영향으로 증감을 반복하고 있으며 강원권, 충청권에서는 제조업연소의 무연탄 사용량에 따라 배출량의 변화를 나타내고 있다. 미세먼지는 오염물질 중 권역별로 배출량 변동이 가장 크게 나타나고 있어서 실제 권역별 대기질에 어떤 영향을 주었는지 분석이 필요하다.

2014년 대기오염물질 배출량을 이용한 권역별, 대기오염물질 배출량 중분류 기준의 배출량 우선순위를 분석한 결과 CO 배출량의 우선순위는 수도권과 제주권은 도로이동오염원 승용차의 배출량이 가장 많은 것으로 나타났으며, 강원권, 충청권, 호남권의 경우 생물성 연소부문의 농업잔재물 소각의 배출량이 많은 것으로 나타났다.

권역별 NO_x 배출량의 우선순위의 경우 수도권, 호남권, 영남권은 도로이동오염원 화물차의 배출량이 가장 많은 것으로 나타났으며, 강원권은 제조업연소 공정로, 제주권은 비도로이동오염원 건설장비의 배출량이 많은 것으로 나타났다. 충청권의 경우 에너지산업연소 공공발전시설의 배출량이 많은 것으로 나타났다.

권역별 SO_x 배출량의 우선순위의 경우 수도권, 충청권, 제주권은 에너지산업연소 공공발전시설의 배출량이 가장 많은 것으로 나타났으며, 강원권은 제조업연소 공정로, 호남권은 제조업연소 기타의 배출량이 많은 것으로 나타났다. 영남권은 생산공정 석유제품산업의 배출량이 많은 것으로 나타났다.

권역별 PM₁₀과 PM_{2.5} 배출량의 우선순위의 경우 수도권은 비산먼지 도로재비산먼지, 제주권은 비산먼지 나대지의 배출량이 가장 많은 것으로 나타났으며, 강원권, 충청권, 호남권, 영남권은 제조업연소 기타의 배출량이 많은 것으로 나타났다.

기존의 대기질 개선을 위한 관리 정책은 주로 수도권에 집중되어 진행되어왔으며, 도로이동오염원의 배출 저감을 우선으로 이루어져왔다. 6개 권역의 배출원별 대기오염물질 배출특성을 비교한 결과 지역별 배출특성의 차이를 나타내고 있으며, 각 지역에 적합한 대기질 관리 정책을 위해서는 대기오염물질 배출량 개선과 함께 지역별 배출 특성 변화에 대한 조사가 지속적으로 필요하다.

감사의 글

이 연구는 국립환경과학원의 권역별 배출원-지형-기상을 고려한 대기질 특성 심층분석 연구(2017)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Kim, J., Jang, Y.K. (2014) Uncertainty Assessment for CAPSS Emission Inventory by DARS, Journal of Korean

Society for Atmospheric Environment, 30(1), 26-36. (in Korean with English abstract)

Kim, Y.P., Yeo, M.J. (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)

Lee, Y.K., Lee, K.J., Lee, J.S. Shin, E.S. (2012) Regional Characteristics of Particle Size Distribution of PM₁₀, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 28(6), 666-674. (in Korean with English abstract)

National Institute of Environmental Research (NIER) (2013) National air pollution estimation method manual.