

기술자료

## 수도권 미세먼지 집중배출지역 분석

# Analysis of PM Hot-spot Emission Zone in Seoul Metropolitan Area

김동영, 최민애\*, 윤보미  
경기연구원 생태환경연구소

Dong Young Kim, Minae Choi\*, Bomi Yoon  
Department of Ecology & Environment, Gyeonggi Research Institute

접수일 2019년 6월 26일  
수정일 2019년 8월 6일  
채택일 2019년 8월 8일

Received 26 June 2019  
Revised 6 August 2019  
Accepted 8 August 2019

\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)31-250-3544  
E-mail : minae85@gri.kr

**Abstract** In recent years, social concern in the health risk of PM (Particulate Matter) has been increasing. In order to improve PM concentration, optimized management on the high density emission areas is required in consideration of the spatial distribution and contribution of source types. In this study, various geo-spatial PM emission related data sets such as emission facilities, traffic volumes, and other emission activities were constructed using GIS DB with the air pollutants emissions of the Seoul metropolitan area based on Korean National Emission Inventory (CAPSS, Clean Air Pollution Support System). The PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and NO<sub>x</sub> emission rates grid maps of 250 m × 250 m size were built for each emission sources in order to derive the hot-spot emission zone of air pollutants. Using the Optimized Hot-Spot Analysis (Getis-Ord Gi\*) technique, we extracted a spatial regions with a 95% confidence level of hot-spot emission. And then, the standardized analysis of the emission amount for the extracted area was used to derive the hot-spot emission areas and analyzed the emission contribution of source types in each area. The 10 hot-spot emission zones with 95% confidence level were analyzed in Seoul metropolitan area. Each zone has been characterized by dense emissions due to its distinctive source types. Emissions were concentrated mainly due to the location of many industrial facilities, high dense traffic volume, and high dense biomass burning and construction sites. It is expected that the effect of PM concentration improvement will be maximized by introducing the appropriate policy based on the contribution of each emission source to these hot-spot emission zones.

**Key words:** PM emission in Seoul metropolitan area, Hot-spot emission zone, Optimized emission management

## 1. 서 론

대기오염관리에서 대기오염물질 배출의 공간적 분포에 대한 이해는 매우 중요하다. 공간분포 분석은 대기질 모델링, 지역 대기질 정책 수립 등에 직접적으로 활용되기 때문이다. 현재 대기오염물질 배출의 공간분포 분석은 행정구역 단위뿐만 아니라 격자화 단위 분석까지 선행 연구를 통해 어느 정도 실용적인 단계에 와 있다(EEA, 2016; Kim, 2013).

사업장 배출시설은 개별 위치의 좌표로 관리되고 있으므로 누락되거나 부정확한 부분을 보완하면 매

우 정확하게 공간적으로 분석할 수 있다. 교통이나 연료소비 등 면배출원 부분은 배출의 원인행위인 활동도에 대한 공간정보화와 공간모델링 기법이 어느 정도 정형화되어 있어, 관련 자료의 정확성만 따라 준다면 역시 상당히 정확하게 분석해 낼 수 있다.

환경부의 대기오염물질 배출목록인 CAPSS (Clean Air Policy Support System, 대기정책지원시스템)에서는 전국에 걸쳐 시군구 행정구역 단위와 1 km 격자 크기의 배출량 정보를 기본적으로 제공하고 있다 (NIER, 2013a). 그러나 분석 지표가 되는 공간 자료 (산업시설 위치, 시가지 구역의 변동, 교통망과 교통

량의 변동 등)의 시의성이 떨어지고, 공간적 해상도가 1 km 격자 수준이어서 세부 지역단위에서의 정책적 활용에는 어느 정도 한계가 있다. 이는 Kim (2013, 2010) 등의 기존 연구에서도 마찬가지이다. 격자단위 분석은 모델링 연구의 전처리 과정에서 필수적이지만 대부분 3 km 혹은 9 km 격자 체계의 공간자료를 사용하기 때문에 보다 상세한 지역적 배출특성을 도출하기에는 역시 한계가 있다.

이 연구에서는 대기오염물질 배출에 영향을 미치는 주요 사회·경제적 요인과 그에 따른 배출원별 배출량을 공간 자료화하고, 공간 모델링을 통해 대기오염물질의 상세한 공간적 배출 양상을 분석하였다. 대기오염물질의 배출과 이동은 행정구역에 국한되지 않기 때문에 공간적 양상을 분석하는 데에는 행정구역 단위보다는 격자체계 분석이 매우 유리하다.

대기오염물질 배출량의 격자단위 공간분포를 분석하기 위해 수도권 전체 (인천광역시 옹진군 제외)를 대상으로 가로 세로 250 m 크기의 격자체계를 설정하고, CAPSS 배출량을 사용하여 각 배출원별로 격자 단위 배출량을 분석하였다. 격자 크기가 작을수록 공간적 해상도가 높아지지만 관련 자료들과 연계했을 때 정확성과 적용 가능성을 고려해야 한다.

격자단위로 분석된 배출량을 다시 Optimized Hot-Spot Analysis (Getis-Ord  $G_i^*$ ) 기법을 사용하여 미세

먼지 집중배출지역을 도출하였다. Getis-Ord  $G_i^*$  분석 결과에 따라 통계적으로 95% 이상의 유의성을 보이는 곳에 대하여 군집 패턴을 분석하였다. 배출이 집중되는 요인은 산업시설의 입지, 교통량의 밀집, 생물성 연소나 공사 현장의 밀집 등 지역적 여건에 따라 다르다. 따라서 각 지역별로 배출원별 특성을 연계하여 정책적 시사점을 살펴보았다. 이 연구의 결과는 해당지역의 배출특성을 보다 정확하게 도출함으로써 대기오염 관리의 과학적 기반을 강화할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 자료와 분석 방법

### 2.1 대기오염물질 배출량 자료 및 공간할당 지표

#### 2.1.1 CAPSS 배출량 자료

수도권 지역을 대상으로 미세먼지 배출 분석을 위해 사용한 대기오염물질 배출량은 환경부의 CAPSS 2015년 자료를 사용하였다. CAPSS는 배출원 분류 (SCC)별, 행정구역별 (시군구 단위)로 9종의 대기오염물질 (TSP,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_x$ ,  $NO_x$ , CO, VOC,  $NH_3$ , BC)을 대상으로 하고 있다. 본 연구에서 분석 대상물질은  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $NO_x$ 로 한정하였다.

2015년 CAPSS 수도권 지역의 대기오염물질 배출

**Table 1.** Air pollutants emission in Seoul metropolitan area by source categories (CAPSS, 2015).

Category	Emission (ton)			Ratio (%)		
	$PM_{10}$	$PM_{2.5}$	$NO_x$	$PM_{10}$	$PM_{2.5}$	$NO_x$
Seoul metropolitan area	50,602	16,146	297,832	100.0	100.0	100.0
Combustion in energy industry	747	674	17,158	1.5	4.2	5.8
Non-industrial combustion	515	364	39,608	1.0	2.3	13.3
Combustion in manufacturing industry	1,091	420	9,712	2.2	2.6	3.3
Industrial process	322	236	3,894	0.6	1.5	1.3
Energy storage & transport	0	0	0	0.0	0.0	0.0
Solvent utilization	0	0	0	0.0	0.0	0.0
Road transportation	3,147	2,896	143,642	6.2	17.9	48.2
Non-road transportation	4,105	3,773	80,017	8.1	23.4	26.9
Waste disposal	65	54	2,755	0.1	0.3	0.9
Agriculture	0	0	0	0.0	0.0	0.0
Other sources	122	110	68	0.2	0.7	0.0
Fugitive dust	38,217	5,685	0	75.5	35.2	0.0
Biomass burning	2,272	1,934	978	4.5	12.0	0.3

NIER (2018a)

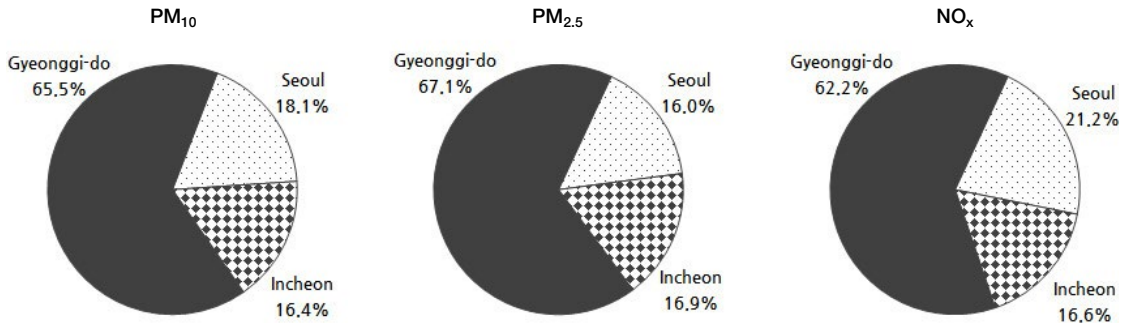


Fig. 1. Air pollutants emission rates in Seoul metropolitan area by administrative region (CAPSS, 2015).

량은 표 1과 같다(NIER, 2018a). 수도권 전체 대기오염물질 배출량은 PM<sub>10</sub> 50,602톤, PM<sub>2.5</sub> 16,146톤, NO<sub>x</sub> 297,832톤이다. 이 중 60% 이상이 그림 1과 같이 경기도에서 배출되었다. 배출원별로는 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 경우 비산먼지의 배출 비중이 제일 큰 것으로 나타났다. 비산먼지를 제외하면 비도로이동오염원이 각각 33.1%, 36.1%이고, 다음으로 도로이동오염원이 25.4%, 27.7%로 뒤를 이었다. NO<sub>x</sub>의 배출 비중은 도로이동오염원이 48.2%, 비도로이동오염원이 26.9% 순으로 높았다.

### 2.1.2 배출량 공간분포 분석을 위한 GIS 자료

공간분포 분석에 사용한 모든 GIS 자료는 동일한 투영법 및 좌표체계에 맞게 구축되어야 한다. 사용된 GIS 자료의 좌표체계 메타데이터는 표 2와 같다.

대기오염물질 배출량의 격자단위·공간분포를 분석하기 위해 먼저 격자의 크기와 적용 범위를 정해야 한다. 격자 크기가 작을수록 공간적 해상도가 높아지지만 관련 자료들과 연계했을 때 적용 가능성을 고려해야 한다. 그리고 대상 범위는 모든 지역을 다룰 수 있도록 충분히 크게 설정하여야 한다. 이 연구에서는 수도권 전체(인천광역시 옹진군 제외)를 대상으로 가로 세로 250 m 크기의 격자체계를 설정하고, CAPSS 배출량을 사용하여 각 배출원별로 격자 단위 배출량을 분석하였다. 격자수는 가로 710개, 세로 630개이며, 모든 격자에는 각각 번호를 부여하고 시군구별 속성 정보를 입력하여 공간분포 분석 시 배출원별

Table 2. Coordinate system for grid emission analysis.

Projection name	Korean 1985 modified central belt
Projection type	Transverse mercator
Ellipsoid	Bessel 1841
Central meridian	127.0029
Central parallel	38.0000
False easting	200,000
False northing	500,000
Scale factor	1

Oh(2015)

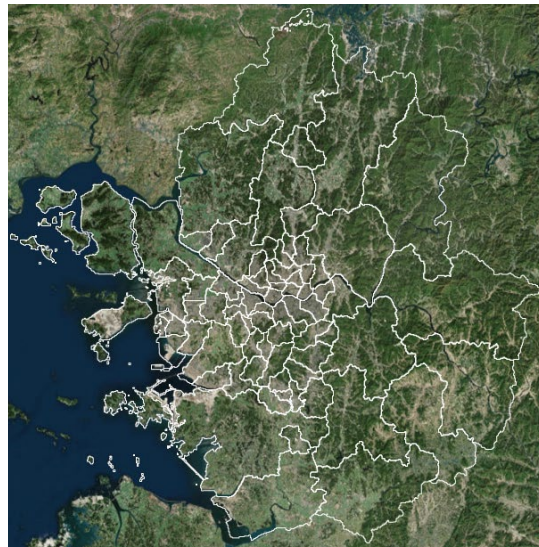


Fig. 2. Analysis area (Seoul metropolitan area).

배출량을 연동할 수 있도록 하였다. 공간분포 분석 대상의 연구범위는 그림 2와 같다.

공간할당에 사용한 GIS 자료의 형태는 다각형 (polygon), 점 (point), 선 (line)으로 구분된다. 배출시설은 1~3종 배출사업장의 경우 CAPSS에 미터 단위 좌표에 따른 배출량이 제공되고 있다. 반면, 4~5종 배출사업장의 경우 주소는 제시되어 있으나 좌표는 일부만 제공되는 경우가 있어 전반적으로 주소를 기준으로 지오코딩을 수행하여 점 자료로 변환하였다. 직화구이 음식점 자료는 형태 구분없이 일반 음식점으로만 지방행정자료로 공개되고 있다 (Local administrative authorization & permission data, 2018). 여기서 상호가 직화구이로 추정되는 음식점을 필터링하여 자료를 구축하고 점 자료로 변환하였다. 숯가마 시설 자료는 숯가마 업체 리스트를 사용하였다 (MOE, 2014).

선 형태의 도로망 자료는 수도권교통본부에서 배포되는 자료로 각종 교통 관련 계획의 효과적인 수립, 시행, 평가에 활용되는 『수도권 여객기·중점통행량(O/D) 현황화 공동사업』의 기초자료이다 (MTA, 2018). 이 자료는 교통시설의 공급과 토지이용계획을 평가하기 위한 것으로 자료의 형태는 노드 (node)와 링크 (link)로 구분되어 있다. 노드는 전국 지역 간 네트워크와 동일한 번호체계를 가지는 노드번호에 따른 좌표 값을 포함하고 있고, 링크의 연결을 위한 집합이라고 볼 수 있다. 링크는 도로 유형, 방향, 차로수, 길이, 속도 등의 속성을 가진다. 현재 교통수요모형에 의한 교통량은 2016년 수도권을 기준으로 1,135개의 지점 (88,862개 노드)에 대한 도로별, 차종별 주중 일 평균 교통량 자료를 구축하고 있다 (MTA, 2018).

다각형 형태의 GIS 파일인 토지피복도 (2014)는 농경지 면적과 기타 재배지, 인공 나지 항목을 추출하여 공간 분석에 사용하였다. 이때 농경지 면적은 토지피복도 분류에서 논, 밭, 과수원에 해당하는 지역을 적용하였다. 토지피복도 상에서는 교통지역 자료도 제공하고 있으나, 이 연구에서는 수도권교통본부에서 제공하는 선 형태의 도로망 자료를 사용하였다. 도시계획도 (2018)는 건설활동이 발생할 것으로 예상되는 공공주택 용도지구, 국민임대주택 용도지구, 도시개발구역 등의 자료를 합하여 하나의 파일로 구축

하여 사용하였다. 이 연구에서 구축된 GIS 자료목록은 표 3과 같다.

## 2.2 배출원별 공간분포 분석 방법

### 2.2.1 배출원별 공간할당 원리

배출량 공간 분석의 기본 원리는 다음 식과 같다.  $i$ 라는 공간 지리적 특성에 따른 배출량  $x$  ( $emission_{ix}$ )를 도출하기 위해서는 전체 배출량 ( $emission_t$ )에 격자 내 지리적 특정 값 ( $value_{ix}$ )에 대한 비율을 각각 적용하여 산출하게 된다 (EEA, 2016).

$$emission_{ix} = emission_t \times \frac{value_{ix}}{\sum_{jx} value}$$

배출량이 큰 점배출원은 직접 해당격자의 배출량으로 할당한다. 선배출원이나 면배출원은 격자별 할당 비율에 따라 배출량을 할당하게 된다. 이와 같이 배출원별 관련 공간정보를 중첩시켜서 특정 격자의 배출량을 산정하는 방법을 모식화하면 그림 3과 같다.

먼저 점 배출원인 대형 사업장은 기본적으로 위치 정보가 파악되고 있으므로 격자에 직접 할당한다. 선배출원에 해당하는 도로이동오염원은 도로가 지나는 위치를 각 해당 격자에 할당하되, 교통량 등 배출특성을 반영한 가중치를 적용하여 배출량을 배분한다. 소규모 사업장, 가정난방 등 면배출원은 기본적으로 행정구역 단위 배출량을 산정하는 결과를 사용하는데, 행정구역 단위 대비 격자 단위 활동도 가중치를 적용하여 격자에 배분하는 방법을 사용한다 (EEA, 2016).

### 2.2.2 배출원별 공간분포 분석

우리나라 국가 대기오염물질 배출목록 (CAPSS)에서 배출원은 에너지산업 연소, 비산업 연소, 제조업 연소, 생산 공정, 에너지 수송 및 저장, 유기용제 사용, 도로 이동오염원, 비도로 이동오염원, 폐기물 처리, 농업, 기타 면오염원, 생물성 연소, 비산먼지 등으로 구분된다 (NIER, 2018a). 이 연구에서는 분석대상 오염물질을  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $NO_x$ 로 한정하였으므로 VOC

**Table 3.** GIS data sets built in this study.

Category	Data	Type	References
Grid system	250 m × 250 m (cell 447,300)	Polygon	–
Administrative district	Si-Do Si-Gun-Gu Eup-Myeon-Dong	Polygon Polygon Polygon	National geographic information institute ( <a href="http://map.ngii.go.kr">http://map.ngii.go.kr</a> )
Population (2018)	250 m × 250 m Grid data	Polygon	
Land cover (2014)	Land cover classification, 1:25,000 land lot map	Polygon	Environment geographic information service ( <a href="https://egis.me.go.kr">https://egis.me.go.kr</a> )
Emission facility	Large industrial source in Seoul metropolitan area (2015)	Point	CAPSS Grid emission
	Small industrial source in Seoul and Incheon (2018)	Point	Local administrative authorization & permission data ( <a href="http://localdata.go.kr">http://localdata.go.kr</a> )
	Small industrial source in Gyeonggi-do (2017)	Point	Gyeonggi-do
	Charcoal manufacture (2014)	Point	Ministry of Environment (2014) Improvement of air pollution emission data by biomass burning
	Charbroiling cooking (2018)	Point	Local administrative authorization & permission data ( <a href="http://localdata.go.kr">http://localdata.go.kr</a> )
Road network & traffic volume (2016)	Expressway	Line	Metropolitan transportation authority (2018)
	Urban expressway	Line	Basic data on the analysis of transportation in the Seoul metropolitan area
	National highway	Line	
	Local road	Line	
Railway (2016)	Railroad network	Line	Korea transport database ( <a href="https://www.ktdb.go.kr">https://www.ktdb.go.kr</a> )
Port (2018)	National fishing harbors	Polygon	Korea ocean data market center ( <a href="https://www.khoa.go.kr/komc">https://www.khoa.go.kr/komc</a> )
	Harbor sites	Polygon	
Urban planning (2018)	Public housing zone	Polygon	National spatial data infrastructure portal ( <a href="http://www.nsvdi.go.kr">http://www.nsvdi.go.kr</a> )
	Public rent housing zone	Polygon	
	Urban development zone	Polygon	
	Urban and residential reconstruction zone	Polygon	
	Urban redevelopment zone	Polygon	
	Industrial complex zone	Polygon	
	Large residential complex development zone	Polygon	
	Land redevelopment zone	Polygon	

배출에만 해당되는 에너지 수송 및 저장, 유기용제 사용과 NH<sub>3</sub> 배출에만 해당되는 농업 부문은 제외하였다. 기타 면오염원 부문은 화재에 따른 배출량이 있는데 매년 일정하게 발생하지 않고, 정확한 구역에 대한 공간 자료를 구축하기 어려워 분석범위에서 제외하였다. 기본적으로 배출원별 공간할당 방법은 그림 4를 따른다. 격자 파일을 생성하고, 각 배출원 특성에 맞는 할당지표를 격자에 배분하여 배출량을 계

산한다.

CAPSS 자료는 시군구별 배출량을 공개하고 있으나, 일부 배출원은 읍면동별 배출량(비공개)도 구축하고 있다. CAPSS의 읍면동별 배출량 배분 지표(NIER, 2013b)는 공간 분석에 사용하기에는 한계가 있어 별도의 공간 배분 지표가 필요하다. 공간할당 지표는 CAPSS의 읍면동별 배분 지표 및 배출량 산정 방법을 고려하여 표 4와 같은 공간 할당 배분 지표를

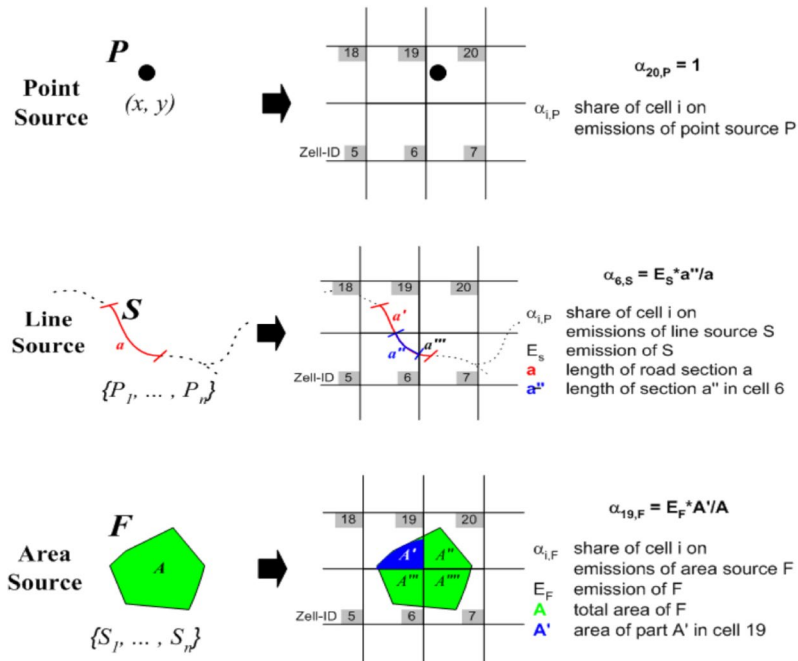


Fig. 3. Concepts of grid emission analysis.

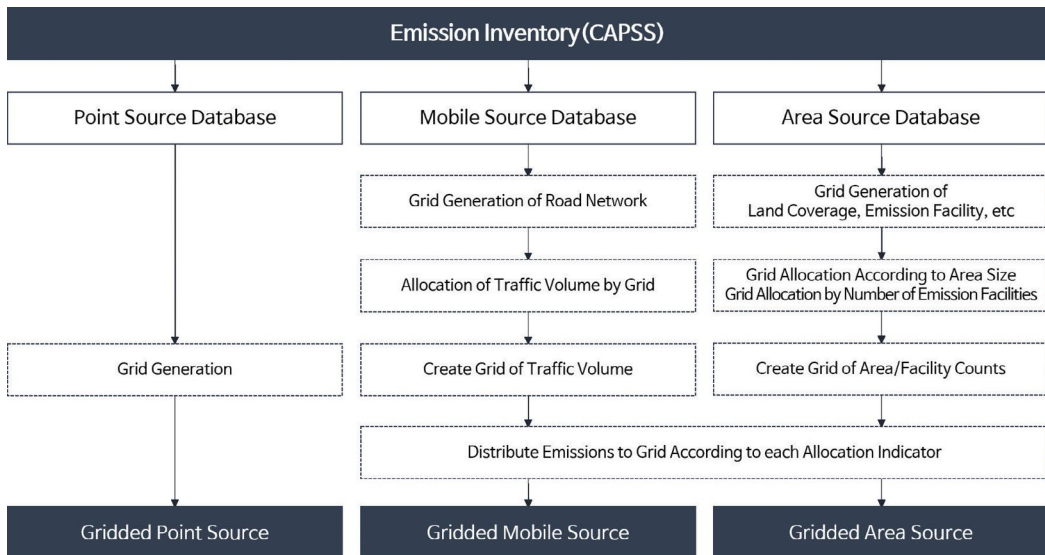


Fig. 4. Procedure of grid emission allocation by source types.

설정하고, GIS 자료로 구축하였다. 점배출원과 면배출원을 포괄하는 배출사업장 자료는 대규모 배출사업장(1~3층 대형 사업장 배출시설)의 경우 SEMS

(Stack Emission Management System, 대기배출원관리 시스템)에서 획득한 좌표를 그대로 사용하여 격자에 직접 할당하였다. SEMS에서는 배출량 정보뿐만 아니

**Table 4.** Spatial allocation factors by source types.

Category		Space allocation factor	Emission classification unit
Combustion in energy industry		Coordinates in SEMS DB	-
Non industrial combustion		Large point source: coordinate in SEMS DB	Si-Gun-Gu
Combustion in manufacturing industry		Small point source as area source: land use,	Si-Gun-Gu
Production process		population distribution	Si-Gun-Gu
Waste disposal			Si-Do
Road transportation		Traffic volumes	Seoul Metropolitan Area
Non road transportation	Railways	Railway line running hours	Seoul Metropolitan Area
	Ships	Harbor sites	Seoul Metropolitan Area
	Aircrafts	Airport runway length $\pm$ 1 km	Si-Gun-Gu
	Agricultural equipments	Land cover - crop field	Si-Gun-Gu
	Construction equipments	Urban planning	Si-Gun-Gu
Fugitive dust	Paved road	Traffic volumes	Seoul Metropolitan Area
	Unpaved road	Traffic volumes	Seoul Metropolitan Area
	Construction site	Urban planning	Si-Gun-Gu
	Open space	Land cover - bare land	Si-Gun-Gu
	Loading and unloading	Land cover - bare land	Si-Gun-Gu
	Agricultural activity	Land cover - crop field	Si-Gun-Gu
	Animal husbandry	Land cover - corp field	Si-Gun-Gu
	Waste disposal	Land cover - bare land	Si-Gun-Gu
Biomass burning	Municipal waste burning	Land cover - non urbanized area	Si-Gun-Gu
	Agricultural waste burning	Land cover - crop field	Si-Gun-Gu
	Charbroiling cooking	Charbroiling restaurant distribution	Si-Gun-Gu
	Wood/Wood-pellet stove and boiler	Land cover - non urbanized area	Si-Gun-Gu
	Traditional fireplace	Land cover - non urbanized area	Si-Gun-Gu
	Charcoal kiln	Charcoal kiln distribution	Si-Gun-Gu

라 굴뚝 위치, 높이, 배출 조건 등의 자료가 포함되어 있고, 개별 좌표 단위로 자료를 관리·유지하고 있다 (NIER, 2012). 현재 우리나라에는 2016년 말을 기준으로 1종에서 5종까지 약 57,500개 (MOE, 2018)의 대기 배출사업장이 있다. 이 중 점배출원으로 관리되고 있는 사업장은 3,736개 (NIER, 2018b) 정도이다.

소규모 사업장 배출시설은 CAPSS에서 전체 산업 부문 연료 사용량에서 대형 사업장의 연료 사용량을 제외한 나머지 연료 사용량으로 배출량을 산정한 다음, 면오염원으로 분류하고 있다. 이를 행정구역별 종업원 수로 공간 배분을 한다. 본 연구에서는 배출사업장의 면배출량을 수도권 지역 내 위치한 4~5종 배출시설의 좌표를 획득하여 시군구별 배출량을 격자 단위로 변환하였다.

비산업연소 부문은 주거, 상업, 공공기관 등에서 취사, 난방 등을 목적으로 하는 연료연소로 인해 배출

량이 발생한다. CAPSS에서는 이들을 구분하기 위한 면배출원 자료가 구축되어 있지 않으므로, 여기서는 격자별 인구수를 기준으로 배출량을 배분하였다.

이동배출원은 CAPSS에서는 차량의 등록지를 기준으로 하여 1년 동안의 운행거리를 지표로 배출량을 계산하고, 도로 분포에 따라 공간적으로 할당하기 때문에 실제 통행과는 차이가 발생할 수 있다. 이 연구에서는 차량 등록지 기준이 아니라 교통수요모형에서 도출된 각 도로의 노드 및 링크별 교통량을 격자 단위로 할당하여 수도권 전체 배출량을 배분하였다. 이때 이륜차에 의한 배출량은 고속국도와 도시고속화도로를 제외한 나머지 도로에 대해서만 승용차 교통량에 따라 할당하였다.

비도로이동오염원은 철도와 선박의 경우 이동오염원과 마찬가지로 수도권 전체 배출량을 각각 철도노선 구간별 운행시간과 항만구역으로 배출량을 격자

별로 할당하였다. 항공 부문은 CAPSS에서 사용하고 있는 방법과 같이 활주로 길이에 전후 1km를 적용하여 배출량을 배분하였다. 농업기계와 건설장비는 각각의 활동도 특성을 고려하여 토지피복도 상의 농경지와 도시계획지역을 공간할당 지표로 사용하였다.

비산먼지는 도로 재비산 먼지의 경우 도로 구간별 전체 교통량으로 공간 배분을 수행하였다. 건설공사 부문은 건설장비 부문의 공간 할당 영역과 동일하게 도시계획 지역을 적용하였고, 나대지, 하역 및 야적, 폐기물처리 부문은 토지피복도 상의 나지구역으로 할당하였다.

### 2.3 집중배출지역 분석 방법

격자 배출량 자료를 이용하여 집중배출지역을 도출하기 위해 GIS 분석도구 ArcGIS가 제공하고 있는 Optimized Hot-Spot Analysis 기법을 사용하였다. 이 기법은 배출량의 공간분포에 대한 국지적인 군집 성향을 분석하기 위한 것으로 각 객체(여기서는 격자 단위 배출량)에 대해 Getis-Ord  $G_i^*$  통계량을 계산하고 Z-score와 P-value를 이용하여 공간적인 군집 분포를 도출함으로써 배출량 분포가 일정한 범위 내 인접 지역들과의 어떠한 분포 패턴을 보이는지 파악할 수 있다(Songchitruksa *et al.*, 2010).

공간적 분포에 대한 군집분석에는 밀도에 기반한 군집분석, 다변량 군집분석 등 다양한 방법이 있으나 Optimized Hot-Spot Analysis 기법은 Hot-Spot Analysis 도구 중에서도 점 및 폴리곤 자료에 대해 자동으로 데이터를 집계하고 적절한 분석 규모를 파악하여 최적화된 다중 및 공간 분석이 가능하다(ESRI, 2019). Getis-Ord  $G_i^*$  통계량을 계산하는 수식은 다음과 같다.

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{S \sqrt{\left[ \frac{n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - \left( \sum_{j=1}^n w_{i,j} \right)^2}{n-1} \right]}}$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2}$$

여기서  $x_j$ 는 객체  $j$ 에 대한 속성값이고,  $w_{i,j}$ 는 객체  $i$ 와  $j$  사이의 공간가중치,  $n$ 은 전체 객체의 개수이다. 이는 해당 영역에 대해 높은 값의 군집(Hot-spot)과 낮은 값의 군집(Cold spot)을 통계적 유의수준과 함께 분석하는 기능을 가지고 있다. 일반적으로 Getis-Ord  $G_i^*$ 의 Z-score가  $< -1.65$  또는  $> +1.65$ 의 값을 나타낼 때는 90%의 신뢰구간을 의미하고,  $< -1.96$  또는  $> +1.96$ 의 값일 때는 95%의 신뢰구간을 의미하며,  $< -2.58$  또는  $> +2.58$ 의 Z-score는 99%의 신뢰구간을 의미한다(Peeters *et al.*, 2015).

이 연구에서는 Getis-Ord  $G_i^*$  분석 결과에 따라 통계적으로 95% 이상의 신뢰구간을 나타내는 공간 영역을 추출한 후, 해당 영역에 대한 배출량의 표준화 분석을 실시하여 집중배출지역을 도출하였고, 상위 10개 지역에 대한 배출 기여도를 분석하였다. 이때 배출원별로 특정 배출원의 지배적인 영향을 배제하기 위해 ① 전체 배출원을 포함한 경우, ② 전체 배출원에서 비산먼지를 제외한 경우, ③ 전체 배출원에서 대형 점오염원과 비산먼지를 제외한 경우, 3가지로 구분하여 배출량과 기여도를 산출하였다. 집중배출지역이 도출된 순서는 면적 대비 배출량이 가장 높게 나타나는 지역으로 해석될 수 있다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 격자 배출량 분석 결과

#### 3.1.1 배출원별 격자 배출량 분석 결과

배출원별로 각각 공간특성에 따른 할당지표에 따라 격자에 배분한 전체 배출량의 분포 결과는 오염물 질별로 그림 5~7과 같다. 전체 배출량과 함께 사업장, 이동오염원, 생활오염원으로 구분하여 분포를 비교하였다. 사업장의 경우 에너지산업 연소, 제조업 연소, 생산공정, 폐기물처리에 대한 분석 결과이고, 이동오염원은 도로/비도로이동오염원, 생활오염원은 비산업 연소, 생물성 연소, 비산먼지를 포함한 분석 결과이다.



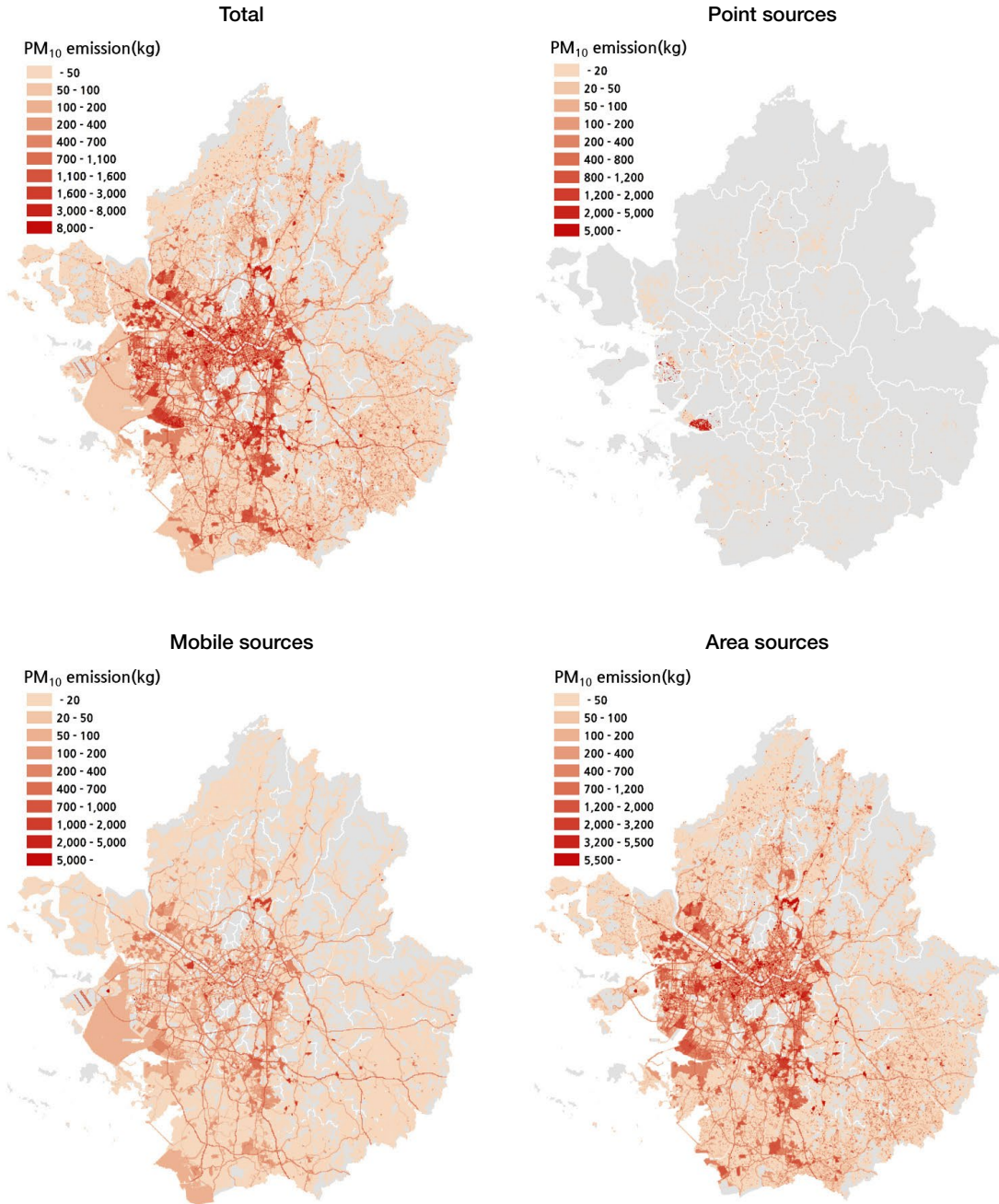


Fig. 5. Grid map of PM<sub>10</sub> emission.

대기오염물질 배출량은 전반적으로 서울 지역과 인근 도시에서 높았다. 사업장부문의 배출량은 반월국가산업단지 지역이 상대적으로 높았고, 이동오염원과

비산업 연소 부문은 인구가 집중되어 있는 서울 지역의 기여도가 큰 것으로 분석되었다. 반면 비도로이동 오염원 부문 중 건설기계, 농업기계와 생물성연소 부

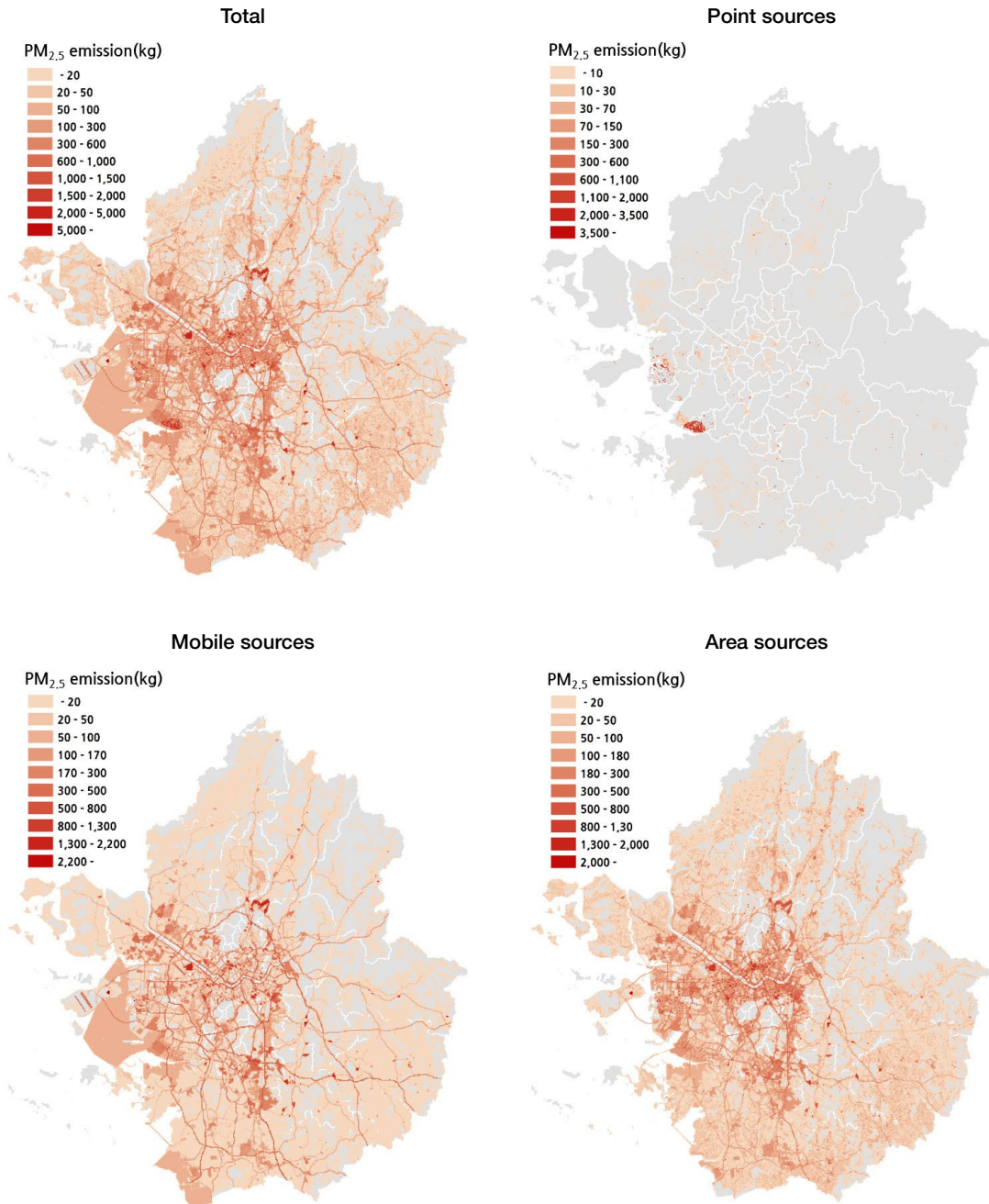


Fig. 6. Grid map of PM<sub>2.5</sub> emission.

문 중 노천소각은 교외지역에서 높은 배출을 보였다. 비산먼지는 주로 도로 상의 자동차 주행에 의한 영향이므로 도로망에 따라 배출분포가 높게 나타났다.

### 3.1.2 CAPSS 격자 배출량과의 비교

경기도 수원시를 기준으로 이 연구에서 도출된 결과와 CAPSS에서 제공하고 있는 격자 배출량을 비교

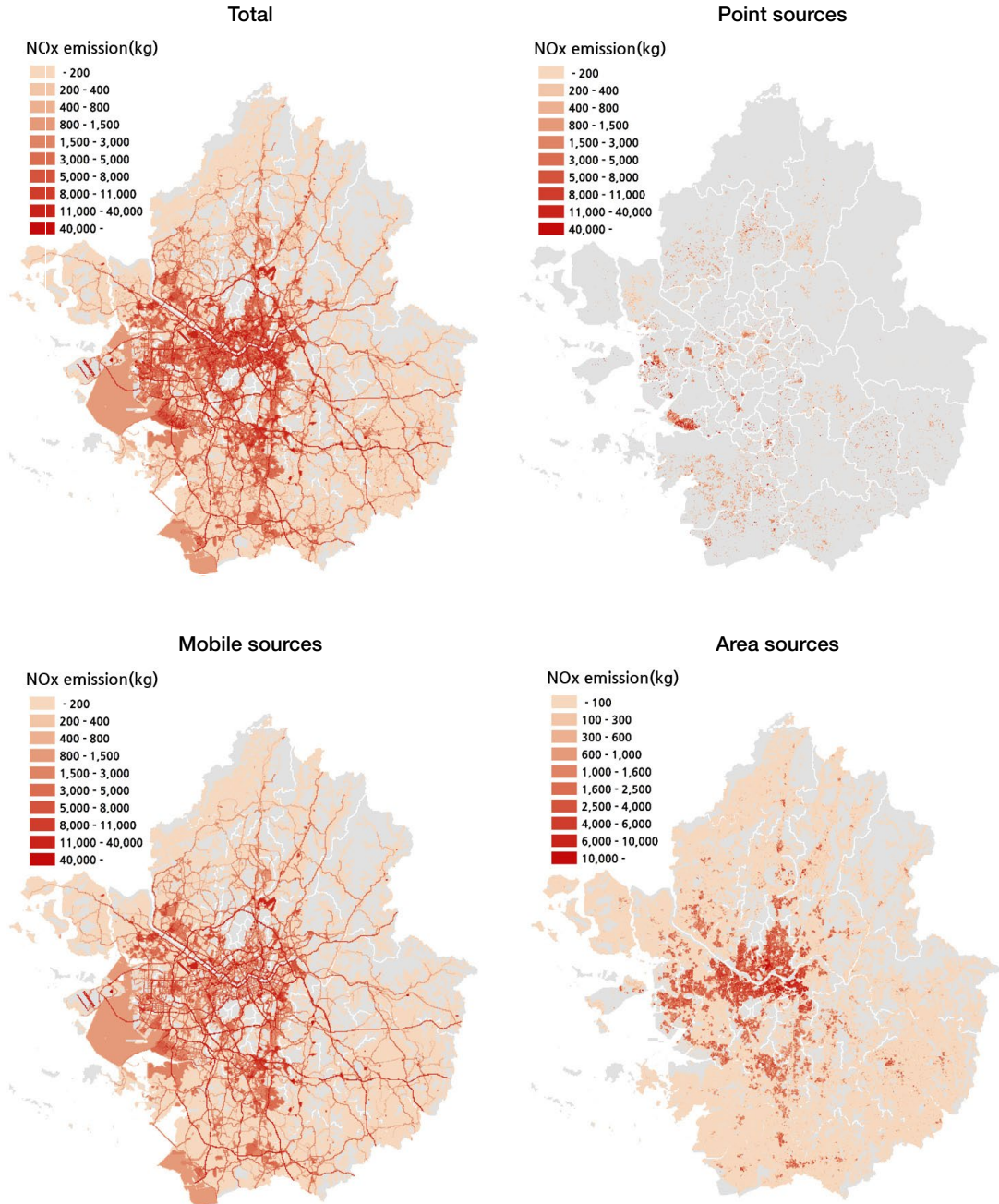


Fig. 7. Grid map of NO<sub>x</sub> emission.

해 본 결과는 그림 8과 같다. CAPSS의 1 km 격자 배출량을 사용하면 광역적으로 공간분포를 파악하는데는 큰 무리가 없을 수도 있으나, 지역적인 범위로

들어가면 구체적인 공간 패턴이 정확히 드러나지 않아 훨씬 높은 해상도의 자료가 요구된다.

이 연구에서 도출한 결과는 250 m 격자이기 때문

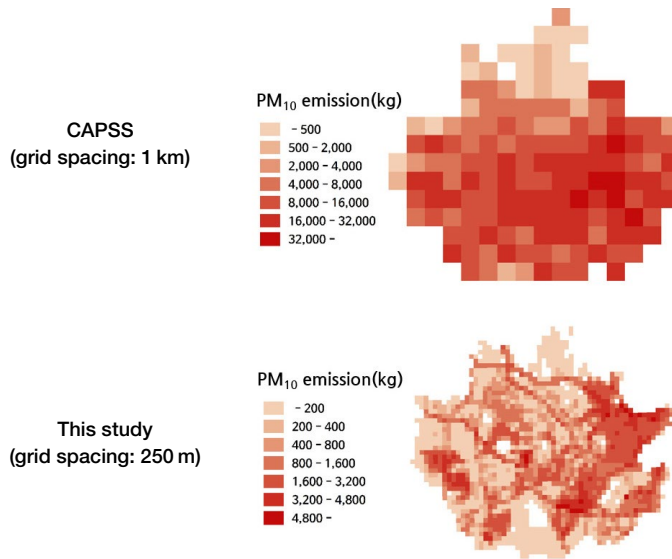


Fig. 8. Example comparison of grid resolution between CAPSS grid data and this study (Gyeonggi-do, Suwon-si).

에 좀더 세부적인 지역 패턴 분석이 가능함을 확인할 수 있다. 이와 같이 공간 해상도가 높아지면 세부 지역 단위의 배출량 분포특성과 함께 각 지역의 배출원 별 기여도 등 속성에 대한 특성도보다 상세하게 파악할 수 있다.

### 3.2 미세먼지 집중배출지역 분석 결과

#### 3.2.1 전체 배출원을 포함한 경우

전체 배출원을 포함했을 때  $PM_{10}$ 의 집중배출지역은 표 5, 그림 9와 같다. 인천광역시 중구 운남동이 가장 높은 배출 집중도를 나타냈고, 다음은 서울특별시 강서구 마곡동 일대였다.  $PM_{10}$  집중배출지역은 대부분 비산먼지에 의한 것으로 배출 기여도가 60% 이상으로 나타났는데, 이는 신도시 개발, 산업단지 설치 등 건설활동에 의한 영향이 주된 요인이었다.

반면, 반월국가산업단지가 위치한 안산시(안산 스마트허브)는 대기오염물질 배출 사업장이 많이 위치하고 있어 제조업 연소에 의한  $PM_{10}$  배출 비중이 69.3%로 가장 높게 나타났다. 여기서  $PM_{10}$  배출량을 살펴보면 안산시 단원구에서 점오염원에 해당하는

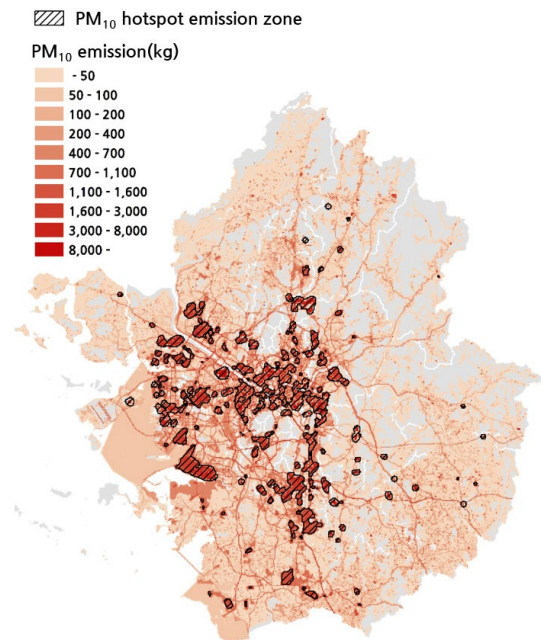


Fig. 9. Map of  $PM_{10}$  hot-spot emission area (include all sources).

제조업 연소 부문  $PM_{10}$  배출량은 1.2톤이었으나, 사업장 부문 면오염원은 855.5톤에 달했다. 따라서 이

**Table 5.** Emission rates of PM<sub>10</sub> hot-spot region (include all sources, %).

Region	Area (km <sup>2</sup> )	PM <sub>10</sub> emission (ton)	ton / km <sup>2</sup>	Emission rate (%)								
				Combustion in energy industry	Non industrial combustion	Combustion in manufacturing industry	Production process	Waste disposal	Road transportation	Non road transportation	Biomass burning	Fugitive dust
Unnam-dong, Jung-gu (Incheon)	4.3	1,505	353.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	12.2	0.0	<b>87.7</b>
Magok-dong, Gangseo-gu (Seoul)	10.3	896	87.4	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.8	11.6	0.2	<b>87.0</b>
Songjeong-dong/ Gyeongan-dong/ Yeok-dong, Gwangju-si (Gyeonggi-do)	7.4	570	76.5	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.5	16.0	0.3	<b>83.0</b>
Neungseo-myeon, Yeoju-si (Gyeonggi-do)	0.3	22	70.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.7	0.4	<b>85.9</b>
Majang-myeon, Icheon-si (Gyeonggi-do)	3.6	183	51.5	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	2.6	12.8	0.3	<b>84.3</b>
Uijeongbu-si (Gyeonggi-do)	26.3	1,347	51.2	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.8	17.1	0.6	<b>81.2</b>
Ansan Smart Hub (Gyeonggi-do)	24.3	1,208	49.6	1.1	0.0	<b>69.3</b>	0.3	1.4	1.5	2.1	0.1	24.2
Yeokbuk-dong, Cheoin-gu, Yongin-si (Gyeonggi-do)	4.9	234	47.3	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.9	15.2	0.3	<b>83.4</b>
Jungni-dong, Icheon-si (Gyeonggi-do)	2.3	104	44.9	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.5	13.1	0.6	<b>85.4</b>
Dong-gu/Jung-gu/ Michuhol-gu (Incheon)	29.6	1,324	44.6	0.1	0.5	13.9	15.8	0.1	1.9	6.4	0.4	<b>60.9</b>

**Table 6.** Emission rates of PM<sub>2.5</sub> hot-spot region (include all sources, %).

Region	Area (km <sup>2</sup> )	PM <sub>2.5</sub> emission (ton)	ton / km <sup>2</sup>	Emission rate (%)								
				Combustion in energy industry	Non industrial combustion	Combustion in manufacturing industry	Production process	Waste disposal	Road transportation	Non road transportation	Biomass burning	Fugitive dust
Unnam-dong, Jung-gu (Incheon)	4.1	302	73.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	<b>55.7</b>	0.2	43.8
Gwangam-dong, Dongducheon-si (Gyeonggi-do)	1.8	57	31.2	<b>99.0</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.7
Wonchang-dong, Seo-gu (Incheon)	3.6	112	30.8	<b>94.9</b>	0.0	0.0	1.4	0.0	0.4	0.0	0.2	3.2
Sindun-myeon, Icheon-si (Gyeonggi-do)	1.8	50	27.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.1	<b>94.6</b>	2.3
Songhyeon-dong/ Songnim-dong, Dong-gu Dohwa-dong, Michuhol-gu (Incheon)	8.0	210	26.2	0.7	0.4	8.2	<b>70.3</b>	0.2	2.8	6.9	0.4	10.1
Geongeon-dong, Sangnok-gu, Ansan-si (Gyeonggi-do)	0.1	1	21.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	16.7	39.8	1.1	<b>41.9</b>
Changsu-myeon, Pocheon-si (Gyeonggi-do)	1.8	38	20.9	<b>99.0</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.6	0.3
Magok-dong, Gangseo-gu (Seoul)	9.1	188	20.8	0.0	1.1	0.0	0.0	0.1	3.2	<b>50.7</b>	0.9	44.1
Ganam-eup, Yeosu-si (Gyeonggi-do)	1.8	37	20.2	0.0	0.0	9.3	<b>79.0</b>	0.0	7.9	0.1	0.6	3.0
Songjeong-dong/ Gyeongan-dong/ Yeok-dong, Gwangju-si (Gyeonggi-do)	7.7	152	19.7	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	2.1	<b>55.3</b>	9.5	32.6

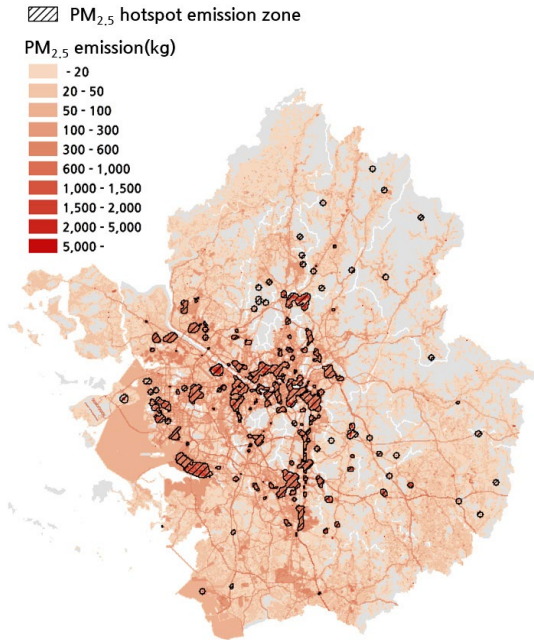


Fig. 10. Map of PM<sub>2.5</sub> hot-spot emission area (include all sources).

지역은 소규모 사업장들이 밀집해 있다는 것을 알 수 있다.

PM<sub>2.5</sub> 집중배출지역은 표 6 및 그림 10과 같았다. PM<sub>10</sub>은 대부분 비산먼지의 기여율이 높았으나, PM<sub>2.5</sub>는 대형 배출시설인 에너지산업 연소, 생산공정 부분의 기여율이 특히 높았다. 경기도 동두천시 광암동, 인천광역시 서구 원창동, 경기도 포천시 창수면은 발전소가 위치하여 에너지산업 연소 부문이 각각 99.0%, 94.9%, 99.0%로 높은 배출 기여도를 보였다.

생산공정 부문 배출이 높은 지역은 인천광역시 동구, 남구 일대로 대규모 사업장과 함께 소규모 사업장의 화학제품 제조업 등의 영향으로 생산공정 부문의 배출 기여도가 70.3%에 달하였다. 경기도 여주시 가남읍도 대규모 사업장에 의한 영향으로 생산공정 부문이 79.0%를 차지하였다. 비도로이동오염원 부문의 배출 비중이 큰 지역은 인천광역시 중구 운남동, 서울특별시 강서구 마곡동, 경기도 광주시 일대로 도시개

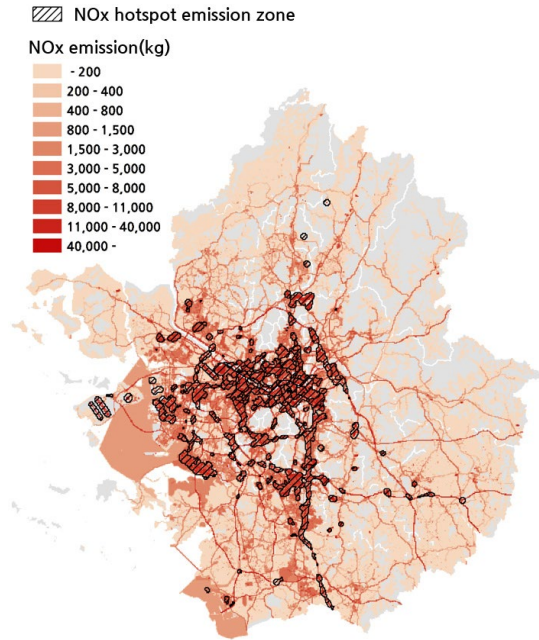


Fig. 11. Map of NO<sub>x</sub> hot-spot emission area (include all sources).

발에 따른 건설장비 사용이 주요 원인이었다.

그 밖에 경기도 이천시 신둔면은 노천소각, 숯가마 등 생물성 연소에 의한 영향이 94.6%로 가장 컸고, 비산먼지에 의한 영향이 큰 지역은 경기도 안산시 상록구 건건동으로 건설활동이 주요 원인인 것으로 분석되었다.

NO<sub>x</sub> 집중배출지역은 표 7 및 그림 11과 같다. NO<sub>x</sub> 배출이 가장 집중된 지역은 경기도 평택시 포승읍이었다. 이 지역과 함께 인천광역시 서구, 경기도 성남시 분당구, 경기도 포천시, 경기도 고양시 일산동구 지역은 대규모 사업장에 의한 에너지산업 연소 부문의 배출 기여율이 높았다.

비도로이동오염원의 배출 집중도가 높은 지역은 인천광역시 중구 운남동, 경기도 광주시 일부 지역으로 건설활동에 의한 영향이 컸다. 그리고 경기도 여주시 가남읍은 대규모 사업장에 의한 생산공정 영향이 컸고, 서울특별시 중구 일대는 비산업 연소 부문의 배출로 인해 집중배출지역으로 나타났다.

**Table 7.** Emission rates of NO<sub>x</sub> hot-spot region (include all sources, %).

Region	Area (km <sup>2</sup> )	NO <sub>x</sub> emission (ton)	ton/km <sup>2</sup>	Emission rate (%)							
				Combustion in energy industry	Non industrial combustion	Combustion in manufacturing industry	Production process	Waste disposal	Road transportation	Non road transportation	Biomass burning
Poseung-eup, Pyeongtaek-si (Gyeonggi-do)	1.3	1,575	1,259.3	<b>98.0</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0
Unnam-dong, Jung-gu (Incheon)	4.3	3,555	823.8	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	1.0	<b>98.5</b>	0.0
Ganam-eup, Yeosu-si (Gyeonggi-do)	2.3	1,705	736.5	0.0	0.0	8.1	<b>82.4</b>	0.0	0.0	9.5	0.0
Gyeongseo-dong, Seo-gu (Incheon)	3.0	1,545	514.5	<b>95.1</b>	0.0	0.0	0.0	3.1	0.2	1.5	0.0
Wonchang-dong, Seo-gu (Incheon)	4.9	2,393	484.2	<b>91.3</b>	0.0	0.2	7.4	0.0	1.0	0.0	0.0
Bundang-dong, Bundang-gu, Seongnam-si (Gyeonggi-do)	2.3	1,066	460.6	<b>89.3</b>	1.7	0.0	0.0	0.0	4.6	4.4	0.0
Changsu-myeon, Pocheon-si (Gyeonggi-do)	2.3	725	313.2	<b>99.6</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0
Jung-gu (Seoul)	8.7	2,561	294.6	0.0	<b>45.4</b>	3.1	0.0	0.7	16.8	33.9	0.0
Baekseok-dong, Ilsandong-gu, Goyang-si (Gyeonggi-do)	2.3	681	294.2	<b>72.6</b>	8.7	0.0	0.0	3.0	6.4	9.3	0.0
Songjeong-dong/ Gyeongdong-dong/ Yeok-dong, Gwangju-si (Gyeonggi-do)	7.1	1,954	276.5	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	6.6	<b>89.3</b>	0.0



**Table 8.** Emission rates of PM<sub>10</sub> hot-spot region (exclude fugitive dust, %).

Region	Area (km <sup>2</sup> )	PM <sub>10</sub> emission (ton)	ton/km <sup>2</sup>	Emission rate (%)							
				Combustion in energy industry	Non industrial combustion	Combustion in manufacturing industry	Production process	Waste disposal	Road transportation	Non road transportation	Biomass burning
Unnam-dong, Jung-gu (Incheon)	4.3	185	42.8	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.5	<b>99.1</b>	0.4
Ansam Smart Hub (Gyeonggi-do)	28.5	928	32.5	1.5	0.0	<b>90.3</b>	0.4	1.8	2.3	3.6	0.1
Hagik-dong, Michuhol-gu (Incheon)	6.4	170	26.4	0.0	0.5	<b>86.1</b>	0.2	0.0	5.0	7.6	0.5
Wonchang-dong, Seo-gu (Incheon)	4.6	116	25.4	<b>93.4</b>	0.0	0.0	5.8	0.0	0.5	0.0	0.2
Gwangam-dong, Dongducheon-si (Gyeonggi-do)	2.3	56	24.3	<b>99.6</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
Dong-gu/Jung-gu/ Michuhol-gu (Incheon)	13.4	324	24.2	0.4	1.0	9.5	<b>67.9</b>	0.5	2.7	17.3	0.7
Sindun-myeon, lcheon-si (Gyeonggi-do)	2.3	52	22.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	0.1	<b>96.1</b>
Jungni-dong/ Jeungil-dong, lcheon-si (Gyeonggi-do)	0.5	9	18.7	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	1.2	<b>97.1</b>	1.2
Ganam-eup, Yeosu-si (Gyeonggi-do)	2.3	43	18.5	0.0	0.0	14.4	<b>75.3</b>	0.0	9.3	0.1	0.8
Mohyeon-eup, Cheoin-gu, Yongin-si (Gyeonggi-do)	0.3	4	17.4	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	<b>98.4</b>	1.4

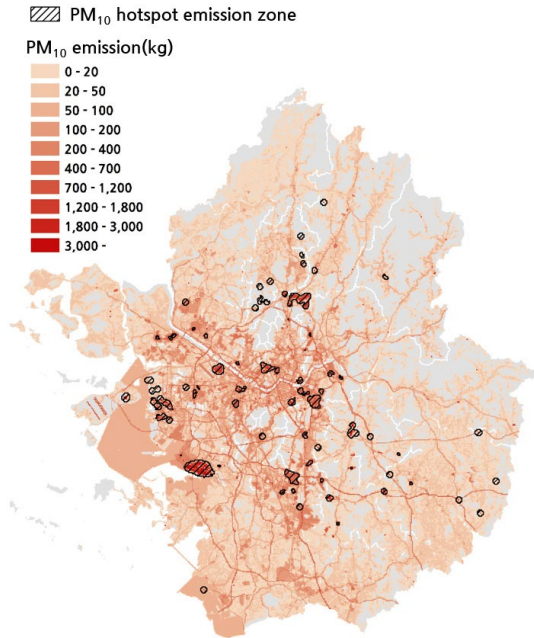


Fig. 12. Map of PM<sub>10</sub> hot-spot emission area (exclude fugitive dust).

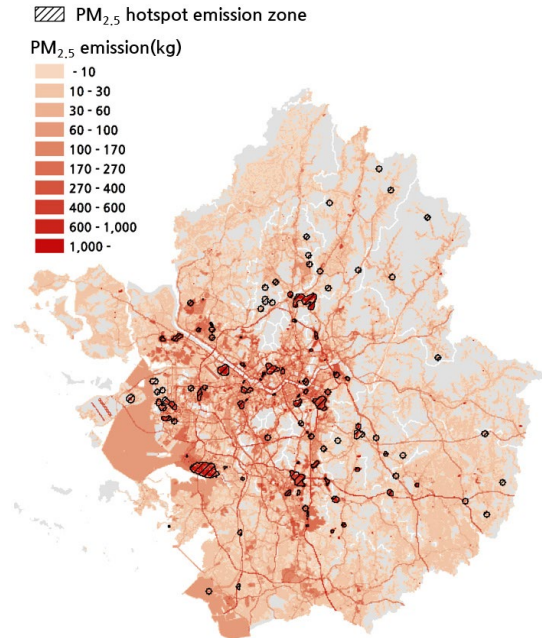


Fig. 13. Map of PM<sub>2.5</sub> hot-spot emission area (exclude fugitive dust).

### 3. 2. 2 비산먼지를 제외한 경우

CAPSS 배출량을 적용하여 분석하면 대부분의 지역에서 비산먼지 배출량 비중이 너무 커서 다른 배출원 영향이 드러나지 않는 경우가 많다. 따라서 비산먼지를 제외한 배출원의 영향을 살펴보기 위해 비산먼지를 제외하고 다시 배출원별 비중을 분석하였다.

비산먼지를 제외했을 때 PM<sub>10</sub> 집중배출지역은 표 8, 그림 12와 같다. 이들 지역은 전체 배출원을 포함하여 분석한 PM<sub>2.5</sub> 집중배출지역과 비슷하게 나타났다. 비산먼지를 제외하고 PM<sub>10</sub> 배출 집중도가 가장 높은 지역은 인천광역시 중구 운남동으로 비도로이동오염원에 의한 영향이 컸다. 다음으로 경기도 안산시의 반월국가산업단지와 인천광역시 남구 학익동 일대로 제조업 연소에 의한 배출 기여도가 각각 90.3%, 86.1%로 나타났다.

비산먼지를 제외했을 때 PM<sub>2.5</sub> 집중배출지역은 표 9, 그림 13과 같다. 앞선 분석과 비슷한 결과를 나타내었다. 에너지산업 연소 부문의 배출 기여율이 높은 지

역은 경기도 동두천시 광암동, 인천광역시 서구 원창동 등이고, 제조업 연소 부문이 높은 지역은 인천광역시 남구 학익동이었다. 생산공정 부문의 배출이 높은 지역은 인천광역시 동구, 남구 일대와 경기도 여주시 가남읍이었다. 비도로이동오염원 부문의 배출 기여율이 높은 지역은 인천광역시 중구 운남동이었고, 생물성연소 부문 배출 비중이 높게 나타난 지역은 경기도 이천시, 경기도 안산시 단원구로 분석되었다.

### 3. 2. 3 비산먼지와 대형 점오염원을 제외한 경우

대형 점오염원이 위치하고 있으면 개별 사업장 하나의 비중이 너무 커서 다른 배출원의 영향이 구분되지 않는 경우가 생긴다. 따라서 비산먼지와 함께 대형 사업장을 제외하고 지역별 배출원을 다시 분석하여 살펴보았다.

대형 점오염원과 비산먼지 배출량을 제외한 PM<sub>10</sub> 집중배출지역은 표 10, 그림 14와 같다. PM<sub>10</sub> 배출 집중도는 인천광역시 중구 운남동, 경기도 안산시 순으

**Table 9.** Emission rates of PM<sub>2.5</sub> hot-spot region (exclude fugitive dust, %).

Region	Area (km <sup>2</sup> )	PM <sub>2.5</sub> emission (ton)	ton/km <sup>2</sup>	Emission rate (%)							
				Combustion in energy industry	Non industrial combustion	Combustion in manufacturing industry	Production process	Waste disposal	Road transportation	Non road transportation	Biomass burning
Unnam-dong, Jung-gu (Incheon)	3.9	170	43.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.4	<b>99.2</b>	0.3
Gwangam-dong, Dongducheon-si (Gyeonggi-do)	1.8	56	31.0	<b>99.7</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
Wonchang-dong, Seo-gu (Incheon)	3.6	108	29.8	<b>98.0</b>	0.0	0.0	1.4	0.0	0.4	0.0	0.2
Songhyeon-dong/ Songnim-dong, Dong-gu Dohwa-dong, Michuhol-gu (Incheon)	6.1	180	29.7	0.8	0.4	8.3	<b>81.9</b>	0.3	2.2	6.0	0.3
Sindun-myeon, Icheon-si (Gyeonggi-do)	1.8	48	26.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.1	<b>96.9</b>
Hagik-dong, Michuhol-gu (Incheon)	1.8	48	26.2	0.0	0.3	<b>90.5</b>	0.0	0.0	7.0	1.3	0.9
Changsu-myeon, Pocheon-si (Gyeonggi-do)	1.8	38	20.9	<b>99.3</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.6
Ganam-eup, Yeosu-si (Gyeonggi-do)	1.8	36	19.6	0.0	0.0	9.6	<b>81.5</b>	0.0	8.1	0.1	0.6
Gyeongseo-dong, Seo-gu (Incheon)	2.9	55	19.0	<b>95.9</b>	0.0	0.0	0.0	1.4	0.1	2.6	0.1
Gojan-dong, Danwon-gu, Ansan-si (Gyeonggi-do)	0.4	7	17.6	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	1.6	0.1	<b>98.0</b>

**Table 10.** Emission rates of PM<sub>10</sub> hot-spot region (exclude fugitive dust and large point sources, %).

Region	Area (km <sup>2</sup> )	PM <sub>10</sub> emission (ton)	ton/km <sup>2</sup>	Emission rate(%)						
				Non industrial combustion	Combustion in manufacturing industry	Production process	Waste disposal	Road transportation	Non road transportation	Biomass burning
Unnam-dong, Jung-gu (Incheon)	4.6	185	39.9	0.1	0.0	0.0	0.0	0.5	<b>99.1</b>	0.4
Ansan Smart Hub (Gyeonggi-do)	29.6	899	30.4	0.1	<b>93.2</b>	0.3	0.0	3.1	3.1	0.2
Sindun-myeon, Icheon-si (Gyeonggi-do)	2.3	52	22.3	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	0.1	<b>96.1</b>
Bungnae-myeon, Yeosu-si (Gyeonggi-do)	2.8	36	13.2	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	0.1	<b>96.3</b>
Songjeong-dong/ Gyeongan-dong/ Yeok-dong, Gwangju-si (Gyeonggi-do)	9.0	112	12.4	1.1	0.0	0.0	0.0	3.5	<b>81.5</b>	14.0
Magok-dong, Gangseo-gu (Seoul)	10.0	116	11.6	2.5	0.0	0.0	0.1	6.1	<b>89.5</b>	1.8
Uijeongbu-si (Gyeonggi-do)	23.8	230	9.6	1.8	0.0	0.0	0.0	3.7	<b>91.4</b>	3.0
Mohyeon-eup, Cheoin-gu, Yongin-si (Gyeonggi-do)	1.0	9	9.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>98.3</b>	1.5
Yeokbuk-dong, Cheoin-gu, Yongin-si (Gyeonggi-do)	4.1	36	8.9	1.3	0.0	0.0	0.0	4.3	<b>93.0</b>	1.4
Majang-myeon, Icheon-si (Gyeonggi-do)	3.5	29	8.2	0.7	0.0	0.0	0.0	16.3	<b>81.3</b>	1.6

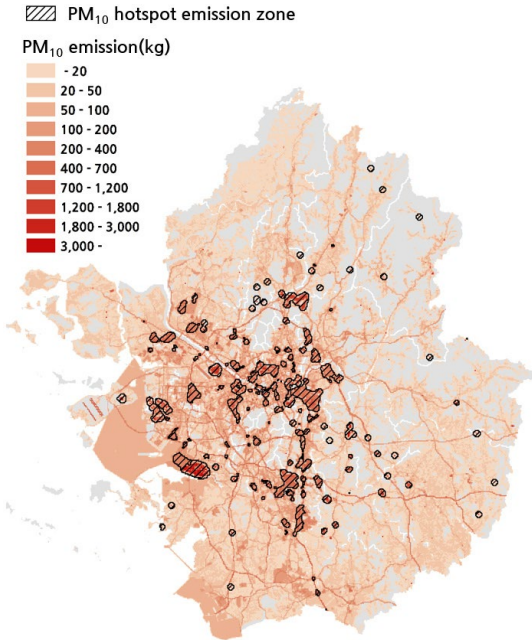


Fig. 14. Map of PM<sub>10</sub> hot-spot emission area (exclude fugitive dust and large point sources).

로 높았는데, 이는 비도로이동배출원과 제조업 연소 부분의 배출로 인한 것이었다. 다음으로 인천시 신둔면과 여주시 북내면은 생물성 연소에 의한 영향이 높았다.

인천광역시 중구 운남동과 함께 추가적으로 경기도 광주시 일부지역, 서울특별시 마곡동 일대 등의 PM<sub>10</sub> 집중배출지역은 비도로이동오염원의 배출 기여도가 큰 지역으로, 주로 도시개발로 인한 건설장비 사용이 주요 원인이었다.

대형 점오염원과 비산먼지 배출량을 제외했을 때 PM<sub>2.5</sub> 집중배출지역은 표 11, 그림 15와 같다. 대부분 PM<sub>10</sub> 집중배출지역 분석 결과와 비슷한 원인을 보였다. PM<sub>2.5</sub> 집중도가 가장 큰 지역은 인천광역시 중구 운남동이었다고, 다음으로 경기도 인천시 신둔면, 반월 국가산업단지가 위치한 안산시 순이었다.

비도로이동오염원의 배출 비중이 높은 지역은 인천광역시 중구 운남동, 경기도 광주시 일부 지역, 서울특별시 마곡동 일대 등이었다. PM<sub>10</sub>과는 다르게 경

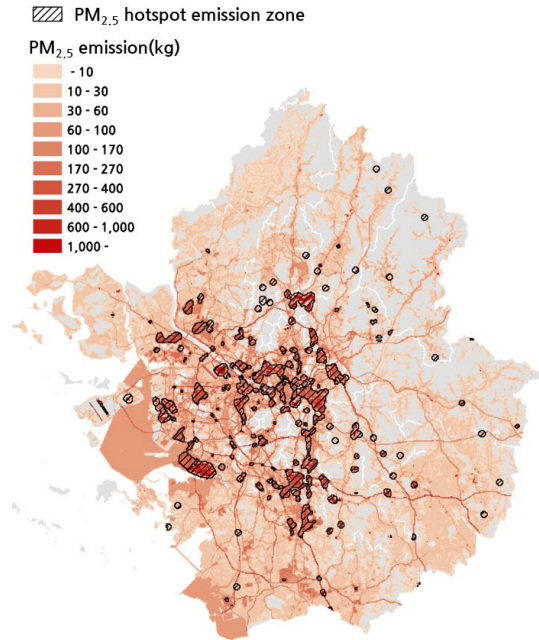


Fig. 15. Map of PM<sub>2.5</sub> hot-spot emission area (exclude fugitive dust and large point sources).

기도 양주시, 장흥면, 여주시 점동면의 PM<sub>2.5</sub> 배출 집중도가 좀더 높은 것으로 분석되었는데, 이들 지역은 생물성 연소로 인한 영향이 큰 지역이다.

전체 배출원에 대한 NO<sub>x</sub> 상위 10개 집중배출지역은 에너지산업 연소에 대한 영향이 큰 지역이었다. 대형 점오염원을 제외했을 때, NO<sub>x</sub> 집중배출지역은 표 12, 그림 16과 같았고, 주로 도로/비도로이동오염원에 대한 영향이 큰 것으로 분석되었다. 인천광역시 중구 운남동은 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>와 같이 NO<sub>x</sub> 배출 집중도 역시 가장 높은 지역으로 나타났으며 건설장비에 의한 배출 기여율이 98.5%를 차지하였다. 이 밖에 인천광역시 중구 일대, 경기도 광주시 일부 지역, 서울특별시 강서구 마곡동 일대 등도 건설장비에 의한 영향이 주된 요인이었다. 인천광역시 강화군 강화읍은 일반산업단지 개발로 인한 건설장비 영향이 컸다.

두 번째로 NO<sub>x</sub> 배출 집중도가 높은 서울특별시 중구는 인구 밀집에 따른 주거, 상업, 공공부분의 비산업 연소 부분의 배출 비율이 높게 나타났다. 도로이

**Table 11.** Emission rates of PM<sub>2.5</sub> hot-spot region(exclude fugitive dust and large point sources, %).

Region	Area (km <sup>2</sup> )	PM <sub>2.5</sub> emission (ton)	ton/km <sup>2</sup>	Emission rate (%)						
				Non industrial combustion	Combustion in manufacturing industry	Production process	Waste disposal	Road transportation	Non road transportation	Biomass burning
Unnam-dong, Jung-gu (Incheon)	4.8	170	35.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.5	<b>99.1</b>	0.3
Sindun-myeon, lcheon-si (Gyeonggi-do)	2.3	49	21.1	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	0.1	<b>96.2</b>
Ansan Smart Hub (Gyeonggi-do)	26.1	348	13.3	0.0	<b>86.8</b>	0.7	0.0	5.2	6.9	0.3
Bungnae-myeon, Yeosu-si (Gyeonggi-do)	2.8	34	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.1	<b>96.4</b>
Songjeong-dong/ Gyeongan-dong/ Yeok-dong, Gwangju-si (Gyeonggi-do)	9.1	103	11.4	0.9	0.0	0.0	0.0	3.5	<b>81.4</b>	14.2
Magok-dong, Gangseo-gu (Seoul)	11.2	111	9.9	2.4	0.0	0.0	0.1	6.8	<b>86.1</b>	4.7
Uijeongbu-si (Gyeonggi-do)	28.5	233	8.2	1.6	0.0	0.0	0.0	4.4	<b>91.0</b>	3.0
Jangheung-myeon, Yangju-si (Gyeonggi-do)	3.6	27	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	<b>99.4</b>
Jeomdong-myeon, Yeosu-si (Gyeonggi-do)	2.3	17	7.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.8	1.3	<b>97.8</b>
Yeokbuk-dong, Cheoin-gu, Yongin-si (Gyeonggi-do)	4.6	34	7.4	1.2	0.0	0.0	0.0	4.6	<b>92.6</b>	1.6

**Table 12.** Emission rates of NO<sub>x</sub> hot-spot region (exclude large point sources, %).

Region	Area (km <sup>2</sup> )	NO <sub>x</sub> emission (ton)	ton/km <sup>2</sup>	Emission rate (%)						
				Non industrial combustion	Combustion in manufacturing industry	Production process	Waste disposal	Road transportation	Non road transportation	Biomass burning
Unnam-dong, Jung-gu (Incheon)	4.8	3,555	748.0	0.5	0.0	0.0	0.0	1.0	<b>98.5</b>	0.0
Jung-gu (Seoul)	9.1	2,536	279.7	<b>42.8</b>	3.1	0.0	0.8	18.7	34.5	0.0
Jung-gu (Incheon)	3.6	974	268.5	7.1	1.6	0.0	0.0	10.6	<b>80.7</b>	0.0
Songjeong-dong/ Gyeongan-dong/ Yeok-dong, Gwangju-si (Gyeonggi-do)	8.4	2,016	240.5	4.5	0.0	0.0	0.0	7.2	<b>88.2</b>	0.0
Jayang-dong, Gwangjin-gu (Seoul)	4.4	955	218.2	18.7	0.0	0.0	0.1	<b>41.1</b>	40.1	0.0
Magok-dong, Gangseo-gu (Seoul)	14.5	2,918	201.1	8.6	0.1	0.0	0.1	23.0	<b>68.1</b>	0.0
Ganghwa-eup, Ganghwa-gun (Incheon)	0.4	72	190.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<b>99.9</b>	0.1
Songpa-gu (Seoul)	15.4	2,827	183.0	29.4	0.1	0.0	0.2	<b>40.2</b>	30.1	0.0
Yangpyeong-dong/ Mullae-dong, Yeongdeungpo-gu (Seoul)	10.6	1,914	181.1	19.2	3.6	0.0	0.8	<b>53.6</b>	22.7	0.0
Moga Rest Areas for Drowsy Drivers of Jungbu Expressway	0.2	33	175.4	0.6	0.0	0.0	0.0	<b>99.0</b>	0.2	0.1

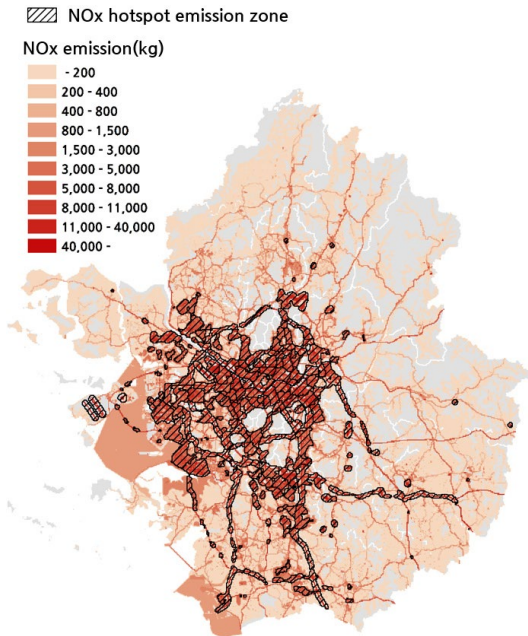


Fig. 16. Map of NO<sub>x</sub> hot-spot emission area (exclude large point sources).

동오염원의 배출 기여율이 높은 지역은 교통량 밀집이 원인으로 서울특별시 광진구 자양동, 송파구, 영등포구 등이 대표적인 지역이었다.

#### 4. 요약 및 결론

이 연구에서는 2015년 CAPSS 배출량을 사용하여 수도권지역에서 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>x</sub> 배출량에 대해 배출원별로 250 m×250 m의 격자 배출량을 구축하고, 이를 ArcGIS의 Optimized Hot-Spot Analysis (Getis-Ord Gi\*) 기법을 사용하여 95% 이상의 신뢰구간을 나타내는 집중배출지역을 추출하였다. 해당 영역에 대하여 3가지 조건(전체 배출원, 비산먼지 제외, 점오염원과 비산먼지 제외)으로 구분하여 다시 배출 기여도를 분석하였다.

전체적으로 집중배출지역은 각 영역마다 다양한 배출원과 인접지역의 영향으로 인해 배출량이 밀집되어 있는 것으로 나타났다. 전체 배출원을 대상으로

분석했을 경우 PM<sub>10</sub>은 신도시나 산업단지 개발 등 건설활동에 의한 비산먼지 배출이 주요 원인인 것으로 나타났다. PM<sub>2.5</sub>는 대규모 사업장의 영향으로 에너지산업 연소와 생산공정의 배출비중이 큰 지역으로 경기도 동두천시 광암동, 인천광역시 서구 원창동 등에서 높았고, 경기도 이천시 신둔면은 노천소각, 숯가마 등 생물성 연소에 의한 기여가 큰 지역인 것으로 확인되었다. NO<sub>x</sub>도 주요 지역에서 에너지산업 연소 부문이 주요 배출원이었다.

전체 배출원에서 비산먼지를 제외했을 때, PM<sub>10</sub>의 경우 건설활동에 따른 영향으로 인천광역시 중구 운남동의 배출 집중도가 가장 높았고, 다음으로 경기도 안산시, 인천광역시 남구 일대가 제조업 연소에 의한 영향이 컸다. PM<sub>2.5</sub>도 PM<sub>10</sub>과 비슷한 결과를 나타내었다.

비산먼지와 점오염원을 제외하면 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>는 대부분의 집중배출지역에서 건설장비의 영향이 주요 원인으로 나타났고, 생물성 연소 부문의 배출 집중도가 높은 지역도 상위 집중배출지역으로 분류되었다. NO<sub>x</sub>는 비도로이동오염원 부분이 높은 지역과 함께 도로이동오염원의 배출 비중이 높은 서울특별시 광진구, 송파구, 영등포구 등도 집중배출지역으로 나타났다.

이 연구에서 CAPSS 배출량을 이용하여 격자별로 배출량을 추정하고, 그것을 기초자료로 하여 집중배출지역을 분석하는 데 있어서 몇 가지 한계점이 존재한다. 먼저 CAPSS 배출량 자료가 갖는 한계점이 있다. CAPSS 자료는 현재 누락된 배출원이 다수 있고, 배출량 산정방법 또한 개선 여지가 많다는 점이 누차 지적되어 왔다(NIER, 2017). 특히 사업장 부분에서 대형 배출시설에서도 배출계수가 없어 배출량이 산정되지 않는 경우가 있고, 중소 사업장은 배출량이 대부분 누락되어 지역적 특성을 제대로 반영하지 못하는 측면이 있다. 또 공간적으로도 CAPSS에서는 시군구 단위 배출량을 산정하고 있지만 연료연소, 교통 등 상당 부분에서 시도 단위의 활동도 자료를 사용하는 다음 시군구 단위로 할당하는 방법을 사용하기 때문에 오차가 있을 수 있다. 이와 같은 요인들은 이 연구의 분석 결과에 그대로 반영되기 때문에 자료의 정확



도를 떨어뜨리는 요인이 된다.

이 연구의 분석과정에서도 결과에 오차를 가중시키는 요인이 있다. CAPSS 대기오염물질 배출량은 2015년 기준자료이나 격자 할당 지표로 사용되는 공간자료의 시점이 달라 시·공간 자료 연계에 한계가 있을 수 있고, 2019년인 현시점에서 보면 그간 상당한 변화가 생겼을 수도 있다. 그리고 배출시설 자료는 대부분 인허가 자료를 사용하였기 때문에 실제 운영되는 시설과 일치되지 않을 수 있고, 주소나 상호 등이 없는 시설은 제외되어 실제와는 상당이 차이가 날 수 있다. 또한 CAPSS는 통계청의 관련 자료를 기반으로 배출량을 산정하고 있는데, 이 연구에서는 공간할당지표로 토지피복도와 같은 다른 종류의 자료를 사용하였기 때문에 공간할당 과정에서 위치상의 오류가 발생할 수 있다. 예를 들어 생활폐기물 노천소각에 의한 배출의 경우 CAPSS에서는 통계청에서 조사된 농업종사자 수로 배출량을 계산하고 있다. 그러나 이 연구에서는 농업종사자의 공간분포 자료가 없기 때문에 토지피복도 상의 농경지 면적에 따라 CAPSS 배출량을 할당하였다. 따라서 서울시 일부 지역은 농경지가 없음에도 불구하고 노천소각에 의한 배출량은 집계되고 있으나, 본 연구에서는 배출량이 할당되지 않기 때문에 차이가 발생할 수 있다.

그러나 격자 배출량이 실제 오염물질이 배출되는 영역을 정확하게 대표하는 데 한계가 있다 하더라도 격자 배출량의 해상도를 높임으로써 좀더 집약적인 공간분포 분석이 가능하다. 향후 CAPSS 배출량 자료의 전반적인 개선과 함께 수도권 대기오염물질 집중배출지역 공간 분석 결과를 바탕으로 해당 지역에 적합한 정책과 연계하면 대기질 개선 효과를 극대화할 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- Environment geographic information service (2018) <https://egis.me.go.kr>
- ESRI (2019) <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-statistics/an-overview-of-the-mapping-clusters-toolset.htm>
- European Environment Agency (EEA) (2016) Spatial Mapping of Emissions.
- Kim, D.Y. (2010) Spatial Analysis of Air Pollutants Emission in the Seoul Metropolitan Area, Gyeonggi Research Institute. (in Korean)
- Kim, D.Y. (2013) Assessment of High-risk Region to Air Pollution in Gyeonggi-do, Gyeonggi Research Institute. (in Korean)
- Korea ocean data market center (2018) <https://www.khoa.go.kr/komc>
- Korea transport database (2018) <https://www.ktdb.go.kr>
- Local administrative authorization & permission data (2018) <http://localdata.go.kr>
- Metropolitan Transportation Authority (MTA) (2018) Basic data on the analysis of transportation in the Seoul metropolitan area. (in Korean)
- Ministry of Environment (MOE) (2014) Improvement of Air Pollution Emission Data by Biomass Burning. (in Korean)
- Ministry of Environment (MOE) (2018) 2018 White Paper of Environment. (in Korean)
- National geographic information institute (2018) <http://map.ngii.go.kr>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2012) A Study on the Characteristics of the Process Facilities using SEMS Data. (in Korean)
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2013a) CAPSS2SMOKE Program Manual. (in Korean)
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2013b) National air Pollutant Emission Calculation Guideline III. (in Korean)
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2017) Development of National Air Pollutants Emission Estimation Methods and Improvement Road-map. (in Korean)
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018a) National air pollutants emission 2015. (in Korean)
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018b) Standard Operation Procedure for the Estimate of Basic Data for National Air Pollutant Emissions. (in Korean)
- National spatial data infrastructure portal (2018) <http://www.nsdg.go.kr>
- Oh, H.J. (2015) The Coordinate Transformation of Digital Geological Map in accordance with the World Geodetic System, The Korean Society of Economic and Environmental Geology, 48(6), 537-543. (in Korean with English abstract), DOI: <https://doi.org/10.9719/eeg.2015>.

48.6.537.

- Peeters, A., Zude, M., Kathner, J., Unlu, M., Kanber, U., Hetzroni, A., Gebbers, R., Ben-Gal, A. (2015) Getis-Ord's hot-and cold-spot statistics as a basis for multivariate spatial clustering of orchard tree data, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.12.011>.
- Songchitruksa, P., Zeng, X. (2010) Getis-Ord Spatial Statistics to Identify Hot-Spots by Using Incident Management Data, *Transportation Research Record Journal of the*

*Transportation Research Board*, 2165, 42-51, DOI: <https://doi.org/10.3141/2165-05>.

### Authors Information

김동영 (경기연구원 생태환경연구실 선임연구위원)  
최민애 (경기연구원 생태환경연구실 연구원)  
윤보미 (경기연구원 생태환경연구실 연구원)