



유해대기오염물질 모니터링을 위한 대도시 우선순위 측정지점 선정기법 제안

Suggestions on the Selection Method of Priority Monitoring Sites for Hazardous Air Pollutants in Megacities

권혜옥[†] · 김성준 · 김용표¹⁾ · 김상균²⁾ · 홍지형²⁾ · 최성득^{*}

울산과학기술원 도시환경공학부, ¹⁾이화여자대학교 화학신소재공학과,
²⁾국립환경과학원 기후대기연구부

(2017년 10월 10일 접수, 2017년 10월 31일 수정, 2017년 11월 1일 채택)

Hye-Ok Kwon[†], Seong-Joon Kim, Yong Pyo Kim¹⁾, Sang-Kyun Kim²⁾,
Ji-Hyung Hong²⁾ and Sung-Deuk Choi^{*}

School of Urban and Environmental Engineering,

Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

¹⁾*Department of Chemical Engineering, Ewha Womans University*

²⁾*Climate and Air Quality Research Department,
National Institute of Environmental Research (NIER)*

(Received 10 October 2017, revised 31 October 2017, accepted 1 November 2017)

Abstract

There is an overall guideline of the installation of air quality monitoring stations in Korea, but specified steps for the selection of monitoring sites for hazardous air pollutants (HAPs) are not provided. In this study, we proposed a systematic method for the selection of monitoring sites for HAPs using geographic information system (GIS). As a case study, the Seoul metropolitan area (Seoul, Incheon, and Gyeonggi Province) was chosen, and 15 factors including population, vehicle registration, and emission data were compiled for each grid cell (7 km × 7 km). The number of factors above the top 30% of individual data for each grid cell was used to select priority monitoring sites for HAPs. In addition, several background sites were added for data comparison and source identification. Three scenarios were suggested: Scenario 1 with 7 sites, Scenario 2 with 17 sites, and Scenario 3 with 30 sites. This proposal is not the final result for an intensive monitoring program, but it is an example of method development for selecting appropriate sampling sites. These results can be applied not only to HAPs monitoring in megacities but also to the national HAPs monitoring network.

Key words : Monitoring site, Air monitoring network, HAPs, GIS

[†]Current address: Disaster Scientific Investigation Division, National
Disaster Management Research Institute

^{*}Corresponding author.

Tel : +82-(0)52-217-2811, E-mail : sdchoi@unist.ac.kr

1. 서 론

유해대기오염물질(Hazardous Air Pollutants: HAPs)은 암을 유발하는 등 심각한 건강 문제를 일으키는 것으로 알려졌거나 의심되는 오염물질로서, 미국 환경청(United States Environmental Protection Agency: US EPA)은 187종 화합물을 HAPs로 지정하여 배출을 관리하고 있으며, 이 중 30종을 도시대기독성오염물질(Urban Air Toxic Pollutants)로 지정하였다(US EPA, 2017). 대표적인 HAPs로는 벤젠 등의 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds: VOCs), 다이옥신과 같은 잔류성유기오염물질(Persistent Organic Pollutants: POPs), 카드뮴과 수은 등의 중금속이 있다. 불완전 연소과정에서 생성되는 다이옥신과 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: PAHs)는 산불과 화산활동으로 자연적으로 배출되기도 하지만, 대부분 HAPs는 이동 오염원(자동차, 트럭, 버스 등)과 고정 오염원(공장, 정유소, 발전소 등)에서 인위적으로 배출되며, 실내(건축 자재, 세척 용제 등)에서도 배출된다(US EPA, 2017).

우리나라 대기환경보전법에는 64종의 대기오염물질이 지정되어 있으며, 이 중에서 43종이 유해성대기감시물질(대기오염물질 중 제7조에 따른 심사·평가 결과, 사람의 건강이나 동식물의 생육에 위해를 끼칠 수 있어 지속적인 측정이나 감시·관찰 등이 필요하다고 인정된 물질)로 지정되어 있다. 또한, 35종은 특정대기유해물질(저농도에서도 장기적인 섭취나 노출에 의하여 사람의 건강이나 동식물의 생육에 직접 또는 간접으로 위해를 끼칠 수 있어 대기 배출에 대한 관리가 필요하다)로 지정되었다. 특정대기유해물질 35종 중에서 24종은 US EPA의 도시대기독성오염물질과 중복된다. 이처럼 ‘유해대기오염물질’은 국내에서 법적 용어는 아니지만, 통상적으로 사용되는 용어이며, 영문 약어로 HAPs라고 지칭하는 사례가 많다.

환경부는 대기오염물질의 오염실태 파악, 대기질 감시, 대기질 개선을 위한 기초자료 확보를 목적으로 대기오염측정망을 운영한다. 대기오염측정망은 일반측정망과 집중측정망으로 나뉘며, 일반측정망은 일반대기오염측정망(도시대기, 교외대기, 국가배경농도, 도로변대기)과 특수대기오염측정망(유해대기물질, 대기중금속, 광화학대기오염물질, 산성 강하물, 지구대기, PM_{2.5}

성분)으로 세분된다. 집중측정망의 경우, 전국에 6개소(백령도, 수도권, 중부권, 호남권, 제주권, 영남권)가 설치되어 있다(MOE, 2016). HAPs는 유해대기물질측정망(국가 운영, 전국 32개소)과 대기중금속측정망(지자체 운영, 전국 54개소)에서 측정된다. 유해대기물질측정망의 경우, 인구 50만 이상 도시의 도심지역, 주요 산업단지, 배경농도지역 등에 측정소를 설치하며, VOC 14종과 PAH 7종을 측정한다(VOC 17종과 PAH 16종으로 확대 예정). 국가 유해대기오염물질 기본계획 수립 및 배출특성사업 종합 평가(Korea Air Toxics Plan: KATOP)에서는 2017년까지 유해대기물질측정소를 총 60개소로 확충하는 것을 제안하였다. 이에 환경부는 제2차 대기환경개선 종합계획(2016~2025)을 통해, 2025년까지 유해대기물질측정소를 100개 지점으로 확충할 예정이다. 대기중금속측정망(중금속 12종 측정)의 경우, 인구 50만 이상 도시지역 및 주요 산업단지에 각각 1개소 이상 측정소를 설치하며, 특별시와 광역시에는 2개소 이상 설치한다. 인구 50만 명 미만의 도시지역에 주요 산업단지가 있는 경우에는 산업단지 및 그 인근 지역에 1개소 이상 설치한다. 측정소 위치선정은 대기오염공정시험기준 환경대기 시료채취방법을 따르며, 측정대상지역 인구분포와 밀도를 고려한 인구 비례 방법, 지도상 2~3 km 격자 기반의 횡단 메르카토르(Transverse Mercator: TM) 좌표 방법, 대표지점 중심의 동심원과 방위별 직선 활용방법이 있다(MOE, 2016).

대기오염측정망 자료를 종합적으로 해석하여 대기질을 평가하고 특정 오염원을 감시하기 위해서는, 개별 측정소가 해당 지역 오염현황을 대표해야 한다. 특히, 도시에서 물리적 환경요인(교통, 녹지와 하천, 토지이용 등)은 측정결과에 영향을 미치므로(Lee and Sohn, 2015), 측정소 위치 선정은 매우 중요하다. 대도시에서 HAPs의 주요 배출원은 자동차를 제외하면 대규모 산업단지와 같은 고정 오염원일 가능성이 크다. 그러므로 측정지점 선정 시, 산업단지의 입지조건(주거지역과의 거리와 계절별 주풍향 등)을 고려해야 한다(Baek and Jeon, 2013).

국가와 지자체 차원에서 대기오염측정소가 꾸준히 확충되고 있으며, 기존 측정망의 문제점을 지적하고 개선안을 제시하는 연구들이 수행되었다. 예를 들어, 지리정보시스템(Geographic Information System: GIS)

(Yoo and Park, 2007; Woo *et al.*, 2005)과 대기확산모델(Lee *et al.*, 2010a; Jung, 2000)을 활용한 대기오염측정망 적절성 분석이 수행되었으며, 통계기법을 활용한 대기오염 특성과 측정망 평가(Lee, 2013; Choi *et al.*, 2016)가 이루어졌다. 또한, 인구와 오염물질배출량에 따른 측정망 적절성 평가(Lee *et al.*, 2010b), 공간통계를 이용한 대기오염 특성파악과 측정망 평가(Choi, 2014), 배출량 기반의 유해대기오염물질 모니터링 우선순위 산업단지와 측정지점 선정 연구(Kwon *et al.*, 2014)가 수행되었다. 이러한 선행연구에서는 측정소 선정기준과 기존 측정소의 해당 지역 대표성 문제가 제기되었다.

한편, 국립환경과학원은 2005년부터 ‘시화·반월지역 유해대기오염물질 조사연구’를 시작으로 전국 주요 산업단에 대한 HAPs 집중 모니터링을 수행하고 있다. 2013년부터는 서울을 시작으로 ‘도시지역 유해대기오염물질 모니터링’ 사업을 진행 중이다. 이들 사업에서는 산업이나 도시별로 3~4개 지점을 선택하여 4계절(계절당 7~10일 이상) 동안 HAPs를 측정한다. 그러므로 소수의 측정지점이 해당 지역의 대기오염 현황을 잘 반영할 수 있도록 대표성 있는 지점 선정이 필요하다. 그러나 이러한 집중 모니터링 사업에서 측정지점을 선정하는 객관적인 세부 지침이 아직 제시되지 않았다.

본 연구에서는 GIS를 이용하여 대도시의 인구 계층, 대기오염 배출량, 오염원 자료를 체계적으로 정리하여 HAPs 측정지점을 객관적이고 합리적으로 선정하는 방법론을 제시하였다. 이를 위해, 수도권(서울, 인천, 경기)을 시범지역으로 선택하여 우선순위 측정지점을 선정하였다. 본 연구는 도시지역 HAPs 모니터링을 위해 수행되었으나, 다양한 대기오염 모니터링 연구와 측정망 확충 등에도 응용될 수 있을 것이다.

2. 측정지점 선정을 위한 기초자료와 절차

HAPs 측정지점을 선정하기 위해서는 GIS를 이용하여 해당 지역의 각종 정보를 정리하고, 위성자료(또는 항공사진)와 현장 답사를 통해 지역 특성을 상세히 파악하는 것이 바람직하다. 측정지점 선정을 위해 고려할 수 있는 인자에는 행정구역별 기초자료, 기상자료,

오염물질 관련 자료, 측정분석기술 등이 있다(표 1). 기본적으로 모니터링 지역의 행정구역별 기초자료인 인구수(연령대 분류), 인구밀도, 자동차 등록 대수(교통량), 점 오염원, 면 오염원, 도로 등의 위치정보를 수집한다. 기존 측정망(유해대기물질, 대기중금속, 도시대기) 자료를 분석하여 HAPs와 기준성대기오염물질(SO₂, CO, O₃, NO₂, PM)의 농도분포를 파악하고, 기존 측정소가 해당 지역의 HAPs 오염특성을 반영하기에 적합한지 판단한다. 이러한 과정에서 수집한 자료를 데이터베이스화(DB)하고 GIS 소프트웨어를 이용하여 공간자료를 생성한다. 또한, 해당 지역의 기상자료를 수집하여 계절별로 분석하여 계절별 주풍향에 따른 배출원 영향을 예측한다. 기상자료 확보가 어려운 경우에는 주변 지역의 기상자료를 활용하거나 기상장 모델 결과를 활용할 수 있다. 필요한 경우에는 대기확산모델을 이용하여 주요 배출원의 영향범위를 파악한다.

지역 내 주요 배출원의 영향을 파악하기 위해서 일차적으로 기존 연구자료를 조사한다. 상황에 따라 대기오염자료뿐만 아니라 지하수와 토양 오염자료 등을 검토할 필요가 있다. 토양과 지하수가 PAHs, VOCs, 중금속으로 오염된 사례들이 보고되고 있는데, 이 경우에는 대기오염도 예상되기 때문이다. 실제로 광주광역시 하남동에서는 트리클로로에틸렌(TCE)이 대기뿐만

Table 1. Consideration parameters for the selection of monitoring sites for hazardous air pollutants.

Classification	Parameter
Basic information	• Population density
	• Number of registered automobiles
Pollution data	• Location of emission sources (point, line, and area sources)
	• Data from literature review (reports, papers, and theses)
	• Measurement data from air pollution monitoring networks
Meteorological data	• Emission statistics
	• Wind speed and direction, rainfall, and humidity
Measurement methods	• Wind rose, wind field models, and air dispersion models
	• Sampling time and frequency
	• Sampling methods (active and passive sampling)
	• Analytical instruments

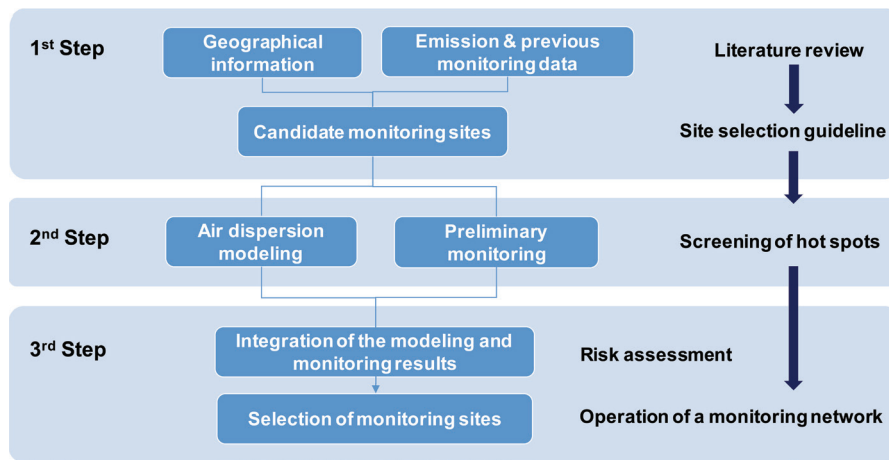


Fig. 1. Three steps for a monitoring network for hazardous air pollutants in megacities.

아니라 지하수에서도 고농도로 검출된 사례가 있다 (Yun *et al.*, 2003).

비교적 간단한 스크리닝 기법을 이용하여 HAPs의 공간분포를 파악하고, 이를 기초로 집중 측정지점을 선정하는 방법도 고려할 수 있다. 특히, 수동대기채취기(Passive Air Sampler: PAS)를 이용하면 오염물질의 공간분포를 효과적으로 확인할 수 있다(Choi and Chang, 2005). VOCs를 대상으로 다양한 종류의 PAS가 판매되고 있으며, PAHs를 대상으로도 PAS가 개발되어 모니터링에 사용되고 있다(Choi *et al.*, 2012). 중금속의 경우에는 대기침적기를 사용하거나 PAS 내에 필터를 장착하여 간접적으로 대기 농도를 추정할 수 있다. 시료채취방법뿐만 아니라 분석 장비에 따라 측정지점 수와 위치가 달라질 수 있다. 예를 들어, 자동 분석장비를 차량에 탑재하여 실시간 분석이 가능하면 측정지점 운영을 탄력적으로 조정할 수 있다.

표 1에 제시한 자료목록을 고려하여 HAPs 측정지점을 선정하는 절차를 제안하였다(그림 1). 1단계에서는 지역 현황과 기존 문헌조사를 바탕으로 측정지점 후보군을 선정한다. 2단계에서는 대기확산모델링이나 수동 대기채취기를 활용한 예비 모니터링을 통해 주요 오염원을 파악하여 측정지점 후보군을 조정한다. 마지막 3단계에서는 모델링/모니터링 결과를 종합하고 인체 위해성평가를 실시하여 최종 측정지점을 제안하고 측정망 운영안(측정지점 개수, 위치, 분석대상항목, 측정주

기 등)을 마련한다. 대부분 지역에서 HAPs 모델링/모니터링 자료가 부족하기 때문에, 선행연구에서의 측정지점 선정은 1단계에서 제한된 자료를 바탕으로 이루어졌다. 그러나 오염우려지역에 대해서는 2단계 선정 절차를 거치는 것이 측정결과의 대표성을 확보하고 상시 측정 등을 위해서 바람직하다. 대기확산모델을 이용하여 주요 배출원의 영향범위를 파악하거나, PAS를 활용한 스크리닝 기법으로 HAPs의 공간분포를 파악하여 측정지점을 선정하는 것을 고려할 수 있다. 3단계에서는 모델링/모니터링 자료를 활용하여 해당 지역 인구 계층을 고려한 위해성평가가 가능할 것이다. 이를 토대로 최종적으로 측정지점을 제안할 수 있다. 해당 지역 HAPs 오염현황을 신뢰성 있게 파악하기 위해서는 가급적 많은 측정지점이 필요하지만, 모니터링 목적과 예산 규모에 맞추어 측정지점 수를 조정해야 한다. 본 논문에서는 국립환경과학원 지원으로 수행한 1단계 연구결과를 주로 제시하였으며, 2~3단계 연구는 한국환경산업기술원 지원으로 수행되고 있다.

3. 시범지역 우선순위 측정지점 선정 결과

3.1 수도권 자료조사와 측정지점 선정절차

본 연구에서는 경기도, 인천광역시, 서울특별시를 포함한 수도권을 측정지점 선정 시범지역으로 선택하였

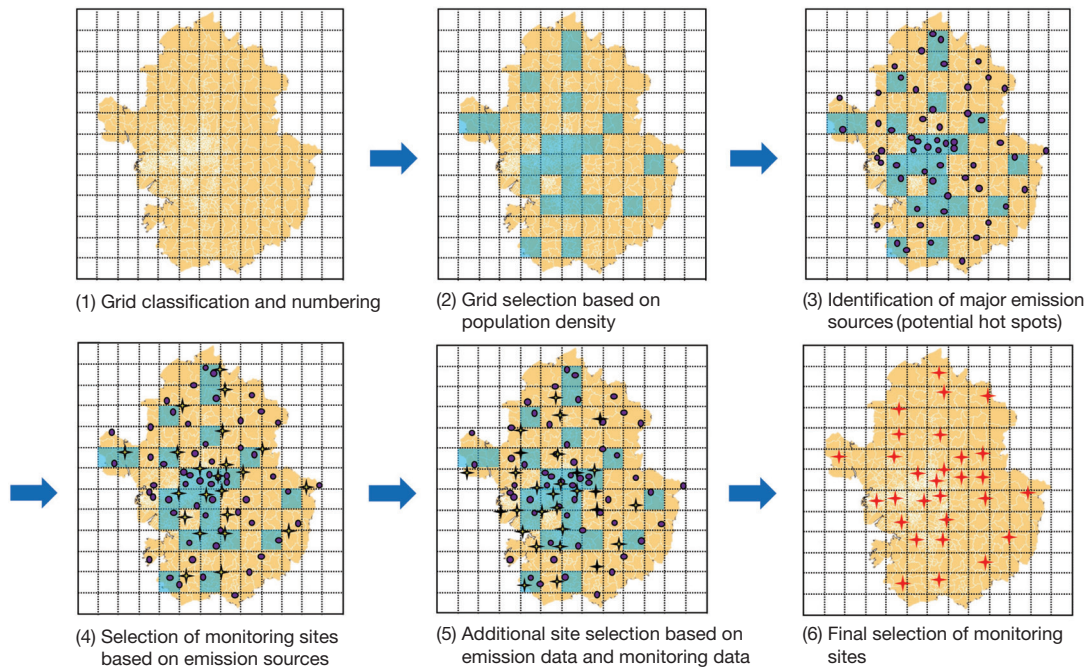


Fig. 2. Selection procedure of monitoring sites for hazardous air pollutants in the Seoul metropolitan area. This procedure is an example of the 1st Step in Fig. 1.

다. 수도권에 설치된 측정망 현황(유해대기물질, 대기 중금속, 도시대기측정망)을 파악하고, 위성자료(항공사진)를 활용하여 모든 측정소 주변의 입지조건을 검토하였다. HAPs 측정지점 선정에 위한 평가기준을 마련하고, 이를 충족하는 세부 행정구역을 검토하였다. 기존 측정소가 본 연구에서 설정한 기준을 충족하는 행정구역에 위치하면, HAPs 측정지점으로 우선 선정하였다.

수도권 유해대기물질측정소는 서울(3개소), 인천(3개소), 경기도(2개소)에 총 8개소가 있으며, 배경지역인 인천 석모도 측정소를 제외하면 수도권에서 7개소가 운영되고 있다. 대기중금속측정소는 14개소(서울 5, 인천 5, 경기 4)가 운영 중이며, 도시대기측정소는 서울 25개소, 인천 15개소, 경기 65개소로 총 105개소가 확인되었다.

국가통계포털사이트(<http://www.kosis.kr>)에서 2015년도 인구와 차량 등록 대수 자료를 입수하였다. 행정구역별 통계자료는 가급적 동 단위의 자료를 사용하였고, 부득이한 경우에는 구 단위로 정리하였다. 또한,

2008년 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System: CAPSS) 배출량 자료를 입수하여 GIS 소프트웨어(ArcGIS, Esri)에 입력하고 배출량 분포도를 작성하였다. 본 연구에서는 산업도시가 아닌 인구가 많은 대도시(서울)를 주요 대상으로 하였으므로, 화학물질 배출이동량 정보시스템(Pollutant Release and Transfer Registers: PRTR) 자료를 고려하지 않았다. 수도권 HAPs 분포에 영향을 미칠 수 있는 주요 배출원으로 버스터미널(Rakopoulos *et al.*, 2010), 발전소(EH&E, 2011), 기차역(Thornes *et al.*, 2016), 소각장(Vilavert *et al.*, 2011)을 고려하였으며, 해당 배출원의 위치를 확인하여 GIS에 입력하였다.

위와 같이 자료를 확보한 이후의 측정지점 선정과정을 그림 2에 나타내었다. (1) 수도권을 7km×7km 격자로 구분하고, 전체 225개(15×15) 격자에 번호를 부여하였다. (2) 인구밀도 상위 격자를 선정하였다. (3) 격자별 주요 배출원(버스터미널, 발전소, 기차역, 소각장) 존재 여부를 확인하였다. (4) 대기오염물질 배출량 상위 격자를 확인하고 그중 인구밀도가 상위이고 주요

배출원이 위치한 격자를 선정하였다. (5) 기존에 운영되고 있는 측정망(도시대기, 유해대기물질, 대기중금속)에서 높은 농도 수준을 나타낸 측정소가 있거나 배출량이 많은 격자를 파악하였다. (6) 최종 선정된 격자별로 적절한 측정지점 위치를 고려하였다.

본 연구에서는 측정지점 선정기준을 만족하는 격자에 15개 인자별로 1점을 부여하고(15점 만점), 점수 합계 순위를 고려하여 우선순위 측정지점을 제시하였다. 측정지점 선정기준에 사용한 15개 인자는 인구밀도, 소형·대형 자동차 등록 대수, 대형자동차 CO, NO_x, SO_x, VOC 배출량, 소형자동차 CO, NO_x, SO_x, VOC 배출량, CAPSS 자료 중 NO_x, SO_x, VOC 배출량, 주요 배출원 존재 여부(터미널, 발전소, 기차역, 소각장)였다. 각 인자의 상위 30%에 해당하는 격자에 점수(1점)를 부여하였으며, 이외 격자에는 점수를 부여하지 않았다. 본 연구에서는 우선순위 측정지점 선정을 위한 체계적인 방법 수립에 초점을 맞추기 위해, 단일 기준으로 인자별 가중치 없이 기준치 이상의 해당 격자에만 점수를 부여하였다. 그러나 인자의 종류, 인자별 가중치, 점수 차등화에 따라 지점 선정 결과가 달라질 수 있다. 현재, 한국환경산업기술원 지원으로 다양한 격자 선정기준과 가중치에 관련한 연구를 진행 중이다.

3.2 우선순위 격자 선정 기준

수도권 지역별 연령계층과 성별 구성에 큰 차이가 없으므로, 측정지점 선정에 있어서 행정구별 인구수(90만 명 초과)와 단위면적당 인구수(0.06 명/km² 초과)를 기준으로 설정하였다. 고양시, 성남시, 수원시가 행정구별 인구수가 많았고 부천시, 광명시, 안양시, 성남시가 단위면적당 인구밀도가 높은 지역으로 나타났으므로 해당 격자에 점수를 부여하였다.

수도권의 소형자동차(승용차, 택시)와 대형자동차(승합차, 버스, 트럭) 등록 대수를 확인하여 소형자동차에는 20만 대를 선정 기준으로 설정하였으며, 대형자동차에는 6만 대를 기준으로 점수를 부여하였다. 소형자동차와 대형자동차 모두 고양시, 성남시, 용인시에 가장 많이 등록된 것으로 나타났다. 소형차량과 대형차량으로 구분하여 대기오염물질(CO, NO_x, SO_x, VOCs) 배출량 기준을 선정하였다. 대형자동차의 경우, CO 배출량 1,000 tonne/y, NO_x 배출량 3,000 tonne/y, SO_x 배출량 2 tonne/y, VOC 배출량 500 tonne/y를 측정지점 선

Table 2. Parameters and standards for the selection of monitoring sites for hazardous air pollutants in the Seoul metropolitan area.

	Parameter	Standard	Score
1	Population density	0.06 people/km ²	1
2	Number of small cars	200,000 car	1
3	Number of large cars	60,000 car	1
4	CO emission from large cars	1,000 tonne/y	1
5	NO _x emission from large cars	3,000 tonne/y	1
6	SO _x emission from large cars	2 tonne/y	1
7	VOC emission from large cars	500 tonne/y	1
8	CO emission from small cars	3,000 tonne/y	1
9	NO _x emission from small cars	800 tonne/y	1
10	SO _x emission from small cars	5 tonne/y	1
11	VOC emission from small cars	400 tonne/y	1
12	NO _x emission from CAPSS	4,000 tonne/y	1
13	SO _x emission from CAPSS	3,000 tonne/y	1
14	VOC emission from CAPSS	7,000 tonne/y	1
15	Major emission sources	Bus terminal, Power plant, Train station, Waste incinerator	1

정기준으로 설정하였다. CO, NO_x, SO_x 배출량은 연천군, 가평군, 여주시, 평택시 등 물류창고가 위치한 경기도에 많았으며, VOC 배출량은 연천군, 서울 일부, 오산시에 많았다. 소형자동차의 CO, NO_x, SO_x, VOC 배출량은 각각 3,000 tonne/y, 800 tonne/y, 5 tonne/y, 400 tonne/y를 초과기준으로 설정하였다. 네 항목 모두 고양시, 성남시, 수원시, 용인시에서 배출량이 많았다.

CAPSS에서 조사된 NO_x, SO_x, VOC 배출량에 대해서는 4,000 tonne/y, 3,000 tonne/y, 7,000 tonne/y를 초과기준으로 설정하였다. NO_x 배출량은 인천 중구와 화성시, SO_x 배출량은 화성시, VOC 배출량은 파주시, 인천 연수구, 화성시, 평택시에 많았다. 세 항목 모두 화성시에서 공통으로 높았다. 터미널, 기차역, 화력발전소, 소각장과 같은 주요 HAPs 배출원은 수도권 전역에 산발적으로 위치하였으며, 해당 격자에 모두 점수를 부여하였다. 특히, 고양시에는 화력발전소, 기차역, 소각장이 모두 있었다(본 연구에서는 선박 배출과 관련된 항구(인천항, 평택항)를 고려하지 않았음). 최종적으로 지금까지 제시한 총 15개의 선정기준(표 2)에 따라 개별 격자에 점수를 부여하여 그 합으로 우선순위 격자를 선정하고, 해당 격자에 유해대기오염물질측정소와 대기중금속측정소가 존재하는지 확인하였다.

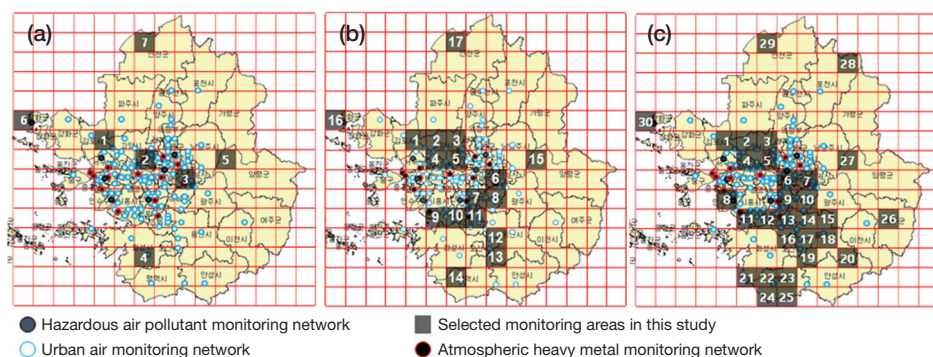


Fig. 3. Selected priority monitoring sites for hazardous air pollutants in the Seoul metropolitan area: (a) Scenario 1 with 7 sites, (b) Scenario 2 with 17 sites, and (c) Scenario 3 with 30 sites.

3.3 측정지점 선정 결과

HAPs 오염현황을 보다 정확하게 파악하기 위해서는 측정지점이 많은 것이 바람직하지만, 사업 규모(시료채취 주기, 분석항목, 사업비)에 적합하게 측정지점수를 선택할 수밖에 없다. 국립환경과학원에서 수행하는 산업지역 유해대기오염물질 모니터링 사업에서는 단일 도시를 대상으로 3~4개 시료채취지점을 고려하여 2억 원 규모의 연구비가 투입되었다. 즉, 4계절(계절당 7일 이상) 모니터링에 지점 당 약 5천만 원의 예산이 소요되었다. 본 연구에서는 수도권(서울, 경기, 인천) 전체를 대상으로 4억 원 예산 기준 7개 지점, 9억 원 예산 기준 17개 지점, 예산이 충분하다는 가정하에 30개 지점 선정 시나리오를 설정하고 측정지점 선정 결과를 지도에 나타내었다(그림 3).

첫 번째 시나리오(7개 측정지점)에서는 우선순위 측정소 선정기준에 의해 15점 만점 중에서 9점 이상을 받은 격자 3개를 선정하였다(격자 1~3). 이 격자들은 모두 도심 특성을 대표하므로, 공단지역과 배경농도지역의 특성을 대표하는 격자를 추가로 선정하였다. 공장 수와 CAPSS 배출량이 많은 화성군(공단지역, 격자 4)과 측정지점 선정기준 점수를 전혀 얻지 못한 양평군(배경지역, 격자 5)을 추가하였다. 또한, 중국으로부터의 장거리 이동과 북한에서 배출되어 수도권으로 유입되는 대기오염물질의 영향을 고려하기 위해(Kim *et al.*, 2011), 강화도(격자 6)와 연천군(격자 7)을 배경지역으로 추가하였다.

두 번째 시나리오(17개 측정지점)에서는 우선순위 측정소 선정기준에 의해 15점 만점 중에서 8점 이상을

받은 격자 14개를 선정하였다(격자 1~14). 이 격자들은 모두 도심과 공단의 특성을 대표하므로, 첫 번째 시나리오처럼 배경농도지역 특성을 대표하는 격자 세 개(양평군: 격자 15, 강화도: 격자 16, 연천군: 격자 17)를 추가하였다.

세 번째 시나리오(30개 측정지점)에서는 우선순위 측정소 선정기준에 의해 15점 만점 중에서 7점 이상을 받은 격자 25개를 선정하였다(격자 1~25). 이 격자들은 역시 도심과 공단의 특성을 대표하므로 배경농도지역 특성을 대표하는 격자 5개를 추가하였다. 공간적 편중을 줄이기 위해 여주시(격자 26), 양평군(격자 27), 포천시(격자 28)를 추가로 선정하였으며, 중국과 북한으로부터의 오염 영향을 고려하기 위해 연천군(격자 29)과 강화도(격자 30)를 추가하였다.

본 연구에서는 수도권 전역을 대상으로 다수의 측정지점을 선정했기 때문에 두 번째와 세 번째 시나리오를 모니터링 사업에 반영하기에는 비교적 많은 예산이 필요하다. 또한, 동 시간대에 시료를 채취하기 위해서 다수의 농동대기채취기와 연구인력이 요구되므로 모니터링 수행에 현실적인 어려움이 있다. 이러한 경우에는 수동대기채취기를 사용하여 다수 지점에서 주요 HAPs를 스크리닝 후 측정지점 수와 분석항목 수를 축소하는 방안을 고려할 수 있다.

위에서 언급한 세 가지 시나리오에 따라 선정한 격자의 측정지점 목록을 표 3에 제시하였다. 우선순위로 선정된 격자에 기존 측정소(도시대기측정망, 유해대기물질측정망, 대기중금속측정망)가 존재하면, 해당 측정소 주변지역의 현황을 파악하고 별다른 문제가 없으면

Table 3. Selected priority monitoring sites for hazardous air pollutants in the Seoul metropolitan area.

	Site selection	Location	Classification
Scenario 1			
1	Urban air monitoring site	Sau-dong, Gimpo	Urban
2	Urban air monitoring site	Daeheung-dong, Mapo	Urban
3	Urban air monitoring site	Bangi-dong, Songpa	Urban
4	Urban air monitoring site	Dongtan-dong, Hwaseong	Industrial
5	New site	Gongheung-ri, Yangpyeong	Background
6	HAPs monitoring site	Seongmo-ri, Ganghwa	Background
7	New site	Wangjing-myeon, Yeoncheon	Background
Scenario 2			
1	Urban air monitoring site	Sau-dong, Gimpo	Urban
2	Urban air monitoring site	Daeheung-dong, Mapo	Urban
3	Urban air monitoring site	Bangi-dong, Songpa	Urban
4	Urban air monitoring site	Dongtan-dong, Hwaseong	Industrial
5	New site	Gongheung-ri, Yangpyeong	Background
6	Heavy metal monitoring site	Sangdaewon-dong, Seongnam	Industrial
7	New site	Hagui-dong, Uiwang	Urban
8	Urban air monitoring site	Unjung-dong, Seongnam	Urban
9	Heavy metal monitoring site	Wonsi-dong, Ansan	Industrial
10	Urban air monitoring site	Bono-dong, Ansan	Urban
11	Heavy metal monitoring site	Sinpung-dong, Suwon	Industrial
12	Urban air monitoring site	Gugal-dong, Yongin	Urban
13	New site	Namsa-myeon, Yongin	Urban
14	New site	Poseung-myeon, Pyeongtaek	Industrial
15	New site	Gongheung-ri, Yangpyeong	Background
16	HAPs monitoring site	Ganghwa-gun, Incheon	Background
17	New site	Wangjing-myeon, Yeoncheon	Background
Scenario 3			
1	Urban air monitoring site	Sau-dong, Gimpo	Urban
2	Urban air monitoring site	Jeongbalsan-dong, Goyang	Urban
3	New site	Goyang-dong, Goyang	Urban
4	Urban air monitoring site	Haengsin-dong, Goyang	Urban
5	Urban air monitoring site	Daeheung-dong, Mapo	Urban
6	Heavy metal monitoring site	Yangjae-dong, Seocho	Urban
7	Heavy metal monitoring site	Sangdaewon-dong, Seongnam	Industrial
8	HAPs monitoring site	Jeongwang-dong, Siheung	Industrial
9	New site	Hagui-dong, Uiwang	Urban
10	Urban air monitoring site	Unjung-dong, Seongnam	Urban
11	Heavy metal monitoring site	Wonsi-dong, Ansan	Industrial
12	Urban air monitoring site	Bono-dong, Ansan	Urban
13	Heavy metal monitoring site	Sinpung-dong, Suwon	Urban
14	Urban air monitoring site	Pungdeokcheon-dong, Yongin	Urban
15	New site	Mohyeon-myeon, Yongin	Urban
16	New site	Sema-dong, Osan	Urban
17	Urban air monitoring site	Gugal-dong, Yongin	Urban
18	Urban air monitoring site	Gimnyangjang-dong, Yongin	Urban
19	New site	Namsa-myeon, Yongin	Urban
20	New site	Baegam-myeon, Yongin	Urban
21	New site	Ujeong-myeon, Hwaseong	Background
22	New site	Poseung-myeon, Pyeongtaek	Industrial
23	New site	Godeok-myeon, Pyeongtaek	Urban
24	Urban air monitoring site	Anjung-myeon, Pyeongtaek	Urban
25	Urban air monitoring site	Bijeon-dong, Pyeongtaek	Urban
26	New site	Neungseo-myeon, Yeosu	Background
27	New site	Gongheung-ri, Yangpyeong	Background
28	New site	Idong-myeon, Pocheon	Background
29	New site	Wangjing-myeon, Yeoncheon	Background
30	HAPs monitoring site	Ganghwa-gun, Incheon	Background

측정지점으로 선정하였다. 첫 번째 시나리오에서는 2개 신규 측정지점, 두 번째 시나리오에서 6개 신규 측정지점, 마지막 시나리오에서는 13개 신규 측정지점이 설정되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 GIS를 기반으로 도시지역의 HAPs 오염원, 지리적 조건, 인구 특성을 반영한 측정지점 선정기법을 제안하였다. 수도권(서울, 인천, 경기)을 시범 대상으로 선정하여, 인구밀도와 대기오염 배출량 등 15개 인자 자료를 수집하고 GIS에 입력하였다. 인자별 상위 30%에 해당하는 지역(격자)에 점수를 부여하여 우선순위의 측정지점을 선정하고, 일부 배경지역도 추가하여 최종적으로 측정지점 선정 안을 제시하였다. 이 선정 안은 실제 수도권 HAPs 모니터링 사업을 위해 최종적으로 제시한 결과는 아니며, 객관적 자료와 GIS를 활용하여 HAPs에 적합한 측정지점을 선정하는 절차와 방법에 관한 일례이다. 본 연구에서는 입수하기 수월한 자료만을 고려하였으므로, 인자 선정과 가중치 등에 대한 추가 연구가 필요하다. 특히, 관련 기관과 전문가들의 의견수렴을 통해 측정지점을 합리적으로 선정하기 위한 세부지침을 마련해야 한다.

본 연구를 통해 GIS 자료를 활용하여 HAPs 측정지점을 객관적으로 선정하는 방법을 마련한 것에 의의가 있으며, 현재 이 연구결과를 활용하여 서울시를 대상으로 HAPs 측정지점을 선정하는 연구를 수행하고 있다. 이러한 연구결과를 산단지역과 도시지역의 HAPs 모니터링 사업에 활용할 수 있을 뿐만 아니라, 제2차 대기환경개선종합계획(2016~2025)에 포함된 'HAPs 통합 모니터링 체계 구축'에도 활용할 수 있다. 본 연구 방법을 보다 체계화하고 적절한 입력자료를 사용하여 측정지점과 측정자료에 대한 신뢰성을 향상한다면, 궁극적으로 대기질 개선에 도움이 될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원 도시지역 유해대기오염 물질 관리 전략 수립 연구, 한국환경산업기술원 환경

정책기반 공공기술개발사업(2016000160002), 한국환경산업기술원 화학사고 대응 환경기술개발사업(2017001960001)의 지원으로 수행되었습니다. GIS 입력자료 수집에 도움을 준 UNIST 대학원생들과 학부생들에게 감사의 마음을 전합니다.

References

- Baek, S.-O., Jeon, C.-G. (2013) Current status and future direction of management of hazardous air pollutants in Korea - Focusing on ambient air monitoring issues, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(5), 513-527. (in Korean with English abstract)
- Choi, I.-J. (2014) Evaluation of air pollution and air quality monitoring networks using geostatistical analysis: focusing on metropolitan area and petrochemical industrial area, Kyungpook National University, PhD thesis.
- Choi, I.-J., Jo, W.-K., Sin, S.-H. (2016) Evaluation of air pollution monitoring networks in Seoul metropolitan area using multivariate analysis, *Journal of Environmental Science International*, 25(5), 673-681. (in Korean with English abstract)
- Choi, S.-D., Chang, Y.-S. (2005) Air monitoring of persistent organic pollutants using passive air samplers, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 21(5), 481-494. (in Korean with English abstract)
- Choi, S.-D., Kwon, H.-O., Lee, Y.-S., Park, E.-J., Oh, J.-Y. (2012) Improving the spatial resolution of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons using passive air samplers in a multi-industrial city, *Journal of Hazardous Materials*, 241-242, 252-258.
- Environmental Health & Engineering, Inc (EH&E) (2011) Emission of Hazardous Air Pollutants from Coal Fired Power Plants.
- Jung, K.-R. (2000) A Study on optimization of air pollution monitoring system in Ulsan area, University of Ulsan, MS thesis.
- Kim, I.S., Lee, J.Y., Kim, Y.P. (2011) Energy usage and emissions of air pollutants in North Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(3), 303-312. (in Korean with English abstract)
- Kwon, H.-O., Ghim, Y.S., Kim, S.-K., Hong, J.-H., Choi,

- S.-D. (2014) Systematic selection of priority industrial complexes and sampling sites for the monitoring of hazardous air pollutants, *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, 17(2), 63-72. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.-K., Lee, J.-B., Choi, S.-W. (2010a) The appropriacy evaluation of air quality monitoring networks in Dae-gu using the ISC3, *Journal of Nakdong River Environmental Research Institute*, 14(1), 267-282. (in Korean with English abstract)
- Lee, G.-H. (2013) A study of air quality monitoring network position using geostatistical methods in Ulsan area, *Kyungbuk National University, MS thesis*.
- Lee, J.-B., Lee, C.-K., Choi, S.-W. (2010b) The appropriacy evaluation of automatic air pollution monitoring by population and air pollutant generation rate, *Journal of Nakdong River Environmental Research Institute*, 14(1), 301-319. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.-S., Sohn, D.-W. (2015) An analysis of the relationships between the characteristics of urban physical environment and air pollution in Seoul, *Journal of the Urban Design Institute of Korea Urban Design*, 16(3), 5-19. (in Korean with English abstract)
- Ministry of Environment (MOE) (2016) Installation and Operation Guidelines for Air Pollution Monitoring Networks.
- Rakopoulos, D.C., Rakopoulos, C.D., Hountalas, D.T., Kakaras, E.C., Giakoumis, E.G., Papagiannakis, R.G. (2010) Investigation of the performance and emissions of bus engine operating on butanol/diesel fuel blends, *Fuel*, 89(10), 2781-2790.
- Thornes, J.E., Hickman, A., Baker, C., Cai, X., Saborit, J.M.D. (2016) Air quality in enclosed railway stations, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1-9.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2017) Initial List of Hazardous Air Pollutants with Modifications, <https://www.epa.gov/haps/initial-list-hazardous-air-pollutants-modifications>
- Vilavert, L., Nadal, M., Figueras, M.J., Kumar, V., Domingo, J.L. (2011) Levels of chemical and microbiological pollutants in the vicinity of a waste incineration plant and human health risks: Temporal trends, *Chemosphere*, 84(10), 1476-1483.
- Woo, N.Y., Sik, K.J., Gil, C.B. (2005) The allocation analysis of TMS using GIS, *Journal of the Korean Society for Geo-spatial Information Science*, 13(1), 81-87. (in Korean with English abstract)
- Yoo, E.-C., Park, O.-H. (2007) Optimization of air quality monitoring networks in Busan using a GIS-based decision support system, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(5), 526-538. (in Korean with English abstract)
- Yun, U., Cho, B.-W., Eum, C.-H., Sung, I.-H. (2003) Analysis on the contamination and source of VOCs in groundwaters of Gwangju area, *The Journal of Engineering Geology*, 13(4), 389-404. (in Korean with English abstract)