

기술자료

대기질 및 온실가스 측정망 운영 현황: 각국의 사례와 한국의 시사점

Current Status of Air Quality and Greenhouse Gas Monitoring Networks: Case Studies from Various Countries and Implications for South Korea

정창훈*, 김용표¹⁾

경인여자대학교 보건의료행정학과, ¹⁾이화여자대학교 환경블라인드스팟연구소센터

Chang Hoon Jung*, Yong Pyo Kim¹⁾

Department of Health Information and Administration, Kyungin Women's University, Incheon, Republic of Korea

¹⁾Research Center for Strategic Solutions for Environmental Blindspots in the Interest of Society, Ewha Womans University, Seoul, Republic of Korea

접수일 2024년 10월 4일

수정일 2024년 11월 5일

채택일 2024년 11월 5일

Received 4 October 2024

Revised 5 November 2024

Accepted 5 November 2024

*Corresponding author

Tel : +82-(0)32-540-0166

E-mail : jch@kiwu.ac.kr

Abstract Air quality monitoring is crucial for identifying major pollutants in regions with poor air quality and is essential for implementing control measures. These systems ensure national air quality standards are met and guide policy actions to improve environmental conditions. With the global adoption of greenhouse gas (GHG) emission reduction targets, monitoring systems are now also tracking GHG levels to assess mitigation policies' effectiveness. This study reviews the air quality and GHG monitoring systems of the United States, European Union (EU), Japan, and China, focusing on their operational characteristics and purposes. The integration of GHG monitoring into existing air quality networks, especially in urban areas, is increasingly important due to the significant share of global CO₂ emissions and air pollutants from cities. The study also aims to draw implications for South Korea's monitoring network, emphasizing the potential for integrated management of air quality and GHG monitoring.

Key words: Air Quality Monitoring Network, Greenhouse Gases (GHG), Case studies, Foreign countries

1. 서론

대기질 측정망을 통한 대기오염물질의 모니터링은 대기질이 좋지 않은 지역의 주요 오염물질을 파악할 수 있으며, 대기오염 통제 조치를 시행하여 대기질을 개선하는 데 활용된다. 또한, 모니터링 기능을 통해 국가에서 정한 대기환경기준을 충족하는지 확인하고, 필요한 정책 수단을 발굴할 수 있다. 수집된 대기질 데이터는 대기환경 개선을 위한 연구의 중요한 원천이 된다. 대기오염은 호흡기 및 심혈관 질환을 포함하여 다양한 건강 문제와 관련이 있기 때문에, 대기질 모니터링은 일반 대중의 주요 관심사이다. 따라서 대기질

모니터링은 정보 공개와 경고 시스템에서 중요한 역할을 한다(Park *et al.*, 2016; Jutze and Tabor, 1963).

이와 같은 이유로, 우리나라를 비롯한 세계 각국에서는 대기오염 모니터링 체계를 운영하고 있다. 각국의 모니터링 체계는 해당 국가에서 추구하는 모니터링의 목적, 대기환경 관리체계, 그리고 행정 관리체계와 밀접한 관련이 있다(Morikawa *et al.*, 2023; Tørseth *et al.*, 2023; NIER, 2022a, 2022b, 2020, 2013; USEPA, 1990).

더불어 온실가스 배출 감축 목표가 채택됨에 따라, 세계 각국에서는 진행 상황을 모니터링하고 완화 정책의 효과를 평가하는 것에 대한 관심이 높아지고 있

다(Gallagher and Holloway, 2022; IPCC, 2022; Sun *et al.*, 2022). 온실가스의 배출량은 크게 상향식과 하향식 방법으로 구분되는데 에너지 소비 데이터를 사용하여 계산하는 상향식 방법은 세분화된 화석 연료 소비 데이터를 확보하기 어렵고, 확보에 상당한 시간이 필요하다. 이러한 문제를 해결하는 방안으로 실시간으로 온실가스 변화를 측정하여 기존의 상향식 배출량 정보를 보완하는 하향식 접근 방법이 대두되고 있다(Joo *et al.*, 2022; Mitchell *et al.*, 2022).

최근에는 일부 대기오염 측정망에 온실가스 측정망이 편입되는 경우도 있다(Mitchell *et al.*, 2022; ICOS, 2021). 도시지역은 전 세계의 70% 이상의 이산화탄소(CO₂)와 대기오염의 전구물질인 CO와 NO₂ 등을 배출하고 있으며, 전 세계 인구의 절반 이상이 도시에 거주하고 있어 난방, 에너지 사용, 자동차 사용 등 인간 활동으로 인한 대기오염물질이 동시에 발생하고 있다(The WHITE HOUSE, 2023; Shusterman *et al.*, 2018). 따라서 도시지역 온실가스 측정의 중요성은 더욱 강조되고 있다.

본 연구에서는 미국, 유럽, 일본, 중국 등 해외 대기질 모니터링 운영체계를 검토하고 특성을 파악해 보고자 한다. 특히, 현황 파악과 더불어 국가별 모니터링의 운영 목적과 방향에 중점을 두고 우리나라 대기질 모니터링 체계에 시사점을 제시해 보고자 한다. 더불어 최근 급속히 진행되고 있는 주요 각국의 온실가스 모니터링 체계 중에서 특히, 도시지역의 온실가스 모니터링 체계를 살펴보고 기존 대기질 모니터링 체계와 온실가스 모니터링 체계의 통합적 운영의 가능성을 숙고해 보고자 한다.

2. 연구질문 및 방법

본 연구에서는 다음의 세 가지 연구 질문에 대하여 탐색해 보고자 한다. 첫째, 다른 나라와 비교해 볼 때 우리나라의 대기질 모니터링 운영의 범위나 목적을 확대할 필요는 없는가? 둘째, 우리나라의 대기오염 측정망은 그 수나 운영체계에 있어서 적절한가? 마지막

으로 도시지역 온실가스 측정망을 대기오염 측정망과 통합적으로 관리하는 것이 바람직한가?

이러한 질문에 대한 해답을 찾기 위해 본 연구에서는 대기질 측정망과 온실가스 측정망에 대한 국가별 비교를 하고자 한다. 먼저 주요 법안과 문서에 정의된 대기질 모니터링의 목적을 검토하여 대기질 모니터링의 기능과 확장 가능성을 분석하고자 하였다. 이를 위해 국가별 대기질 측정망의 운영 목적을 미국, 유럽연합(EU), 일본, 중국 등 주요 국가에 대해 관련 법령 및 자료를 참조하여 살펴보았다. 전반적으로 대기질 측정망의 운영 목적은 대기질 현황 파악과 기준 초과 여부 파악 그리고 대국민 정보 제공 등이다. 본 연구에서는 각국의 대기오염 모니터링 운영에 있어 명시화된 법령 등의 자료를 비교하여 각국이 대기질 모니터링을 통해 얻고자 하는 최우선 정책 목표를 확인해 보고자 하였다. 다음으로 각국의 대기질 운영체계를 조사하였다. 미국은 환경보호국(EPA, Environmental Protection Agency)에서 운영하는 대기질 측정망을 중심으로(USEPA, 2024a, 2024b, 2016), EU는 각 회원국의 대기질 측정망 운영 현황을 종합하여 분석하였고(EEA, 2020, 2019), 일본과 중국의 경우, 각국 환경부의 대기질 모니터링 시스템 관련 자료 및 관련 논문을 참조하였다(MEOJ, 2022, 2017; Ito *et al.*, 2021; MEE, 2020, 2018, 2016, 2013; Wang *et al.*, 2014). 또한 본 연구에서는 온실가스 측정망의 국가별 비교를 위해, 미국, EU, 일본, 중국 등의 온실가스 측정망 관련 현황 및 계획을 조사하였다. 미국의 경우, 최근 발표된 온실가스 모니터링 관련 국가 계획보고서인 GHGMMIS(GHG Measurement, Monitoring, and Information System)를 중심으로 조사하였으며(The White House, 2023), EU는 ICOS(Integrated Carbon Observation System) 관련 자료를 참조하였다(ICOS, 2021, 2020, 2015). 중국은 Greenhouse Gas-Monitoring Network를, 일본은 Japanese Alliance for Climate Change Observation(JACCO)을 참조하였다(Sun *et al.*, 2022; JACCO, 2020).

최종적으로 분석된 국가별 상황에 대한 자료를 바탕으로 각 국가의 측정망 운영의 특성을 파악하고, 우

리나라 대기오염 측정망 운영에 있어서의 시사점을 제시하고자 하였다. 특히, 기존의 대기환경기준 충족 여부를 판단하는 기존 모니터링 체계에서 더 나아가 대중 인식 제고와 건강 영향, 온실가스 측정망과의 연계 등의 측면에서 향후 운영에 적용 가능한 제안을 도출하고자 하였다.

구체적인 분석에 들어가기 전 본 연구에서는 흔히 혼용되는 측정(measurement)과 실험(experiment), 관찰(혹은 관측, observation), 모니터링(monitring)에 대한 용어를 정리하고자 한다. 통상 측정은 속성이 영향을 받지 않는 정량적 속성의 관찰로 정의될 수 있다. 이에 비해 실험은 부분적으로 통제된 상태에서의 변화를 관찰하고 측정하는 것을 의미한다. 따라서 실험은 측정대상에 따라 개입(Intervention)이 필요할 수 있다(Hacking, 1983). 관찰은 직접 또는 도구와 이론을 통해 이루어지는 통제된 시각으로 데이터 생성의 기본 방식이다. 관찰과 측정의 관계를 살펴보면 우선 측정은 관찰의 한 형태로, 특정 속성을 수치화하는 과정이다. 따라서 관찰은 측정을 포함하는 더 넓은 개념으로, 측정은 정량적 데이터를 생성하는 관찰의 특정한 형태로 이해할 수 있다(Mari *et al.*, 2023; Bunge, 1983). 이에 비해 모니터링은 어떤 대상을 감시, 관찰한다는 뜻으로 지속적인 관찰을 통해 대상의 상태나 변화 등을 확인하는 것으로 정의된다. 모니터링은 정량적 프로세스뿐만 아니라 정성적 프로세스일 수 있는 반면 측정은 엄격하게 정량적이다. 관찰과 모니터링의 관계를 보면 지속적인 관찰을 모니터링이라 할 수 있다(ISO 9001, 2015). 대기질 측정망 모니터링은 정량적인 대기질에 대한 정보를 지속적으로 측정하므로, 넓은 의미에서는 관찰(관측)이라는 용어가, 좁은 의미에서는 모니터링이라는 표현이 적합하다.

3. 국가별 대기질 측정망의 운영 목적

3.1 우리나라 대기질 측정망의 운영 목적

우리나라의 대기오염 측정망 운영의 근거는 대기환경보전법 제3조에서 규정되어 있으며 대기오염 및 기

후·생태계 변화 유발물질의 실태를 파악하기 위하여 환경부령이 정하는 바에 따라 측정망을 설치하고 있다. 이는 대기오염 실태를 상시 파악하고 대기보전정책수립의 근거 자료로 활용하기 위함이다. 대기환경보전법 외 여러 법령(「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」 제15조(장거리 이동 미세먼지 배출원 현황 파악), 제22조(미세먼지 집중관리구역의 지정 등), 「항만 지역 등 대기질 개선에 관한 특별법」 제9조(실태조사 등)) 등에서 대기오염 측정 및 정보 제공 등과 관련한 근거가 제시되어 있다(ME, 2023; NIER, 2021). 표 1은 구체적인 법령과 조문, 내용을 보여주고 있다. 이들 규정을 살펴보면 전반적으로 우리나라 대기오염 측정망은 실태 파악을 주목적으로 하고, 측정에 따른 정보를 국민에 제공하는 것을 명시하고 있음을 알 수 있다. 또한 대기오염물질뿐만 아니라 온실가스를 포함한 기후 생태계 변화물질까지도 측정하는 것이 대기오염 측정망의 목적임을 알 수 있다.

3.2 미국 대기질 측정망의 운영 목적

해외 각 국가 역시 대기오염 측정망의 목적을 명확히 규정하고 있다. 미국의 청정대기법(Clean Air Act, CAA)은 주변 또는 실외공기를 오염시키는 배출물로부터 인간의 건강과 환경을 보호하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 모든 추가 기준 오염물질에 대한 대기 모니터링 측정 네트워크를 구축하도록 요구하고 있다. 이에 따른 구체적인 모니터링 운영의 목적을 1) 대기오염 데이터의 공개, 2) 환경기준 준수 및 배출저감 전략 개발, 그리고 3) 연구 목적으로 규정하고 있다(USEPA, 2016). 대기질 모니터링을 통해 수집된 데이터는 일반 대중에게 공개되어, 대기오염 수준에 대한 투명한 정보를 제공한다(USEPA, 2024a). 이는 시민들이 자신의 건강을 보호하기 위해 필요한 정보를 얻을 수 있도록 돕는다. 또한 모니터링 데이터는 환경기준 준수 여부를 평가하는 데 사용되며, 이를 통해 배출저감 전략을 개발하고 시행할 수 있도록 한다.

주 및 연방 정부는 대기질 개선을 위한 정책을 수립하는 데 중요한 역할을 한다. 대기질 모니터링 데이터는 대기오염의 원인과 영향을 연구하는 데 사용되며,

Table 1. Major laws and regulations related to air quality monitoring in Korea

Laws/Regulations	Articles/Sections	Key contents
Clean Air Conservation Act	Article 3 (Constant Measurement)	<ul style="list-style-type: none"> Mandates the installation of air pollution measuring networks by the Minister of Environment and local authorities to monitor air pollution levels continuously. Results are reported to the Minister of Environment.
	Article 4 (Determination on Measuring Network Installation Plans)	<ul style="list-style-type: none"> Requires the Minister of Environment to create and publicly notify detailed plans for air pollution measuring networks, including locations and areas.
Clean Air Conservation Act Enforcement Rules	Article 11 (Types of Monitoring Networks and Reporting of Results)	<ul style="list-style-type: none"> Regulations related to reporting the types of air pollution monitoring networks and measurement data
	Article 12 (Notification of Monitoring Network Installation Plans)	<ul style="list-style-type: none"> Procedures for deciding and announcing plans for the installation of monitoring networks
Special Act on the Reduction and Management of Fine Dust	Article 15 (Ascertainment of Current State of Sources of Long-Range Transported Fine Dust Emissions)	<ul style="list-style-type: none"> Provide cooperation and request related business entities to equip fine dust measuring instruments on aircraft, vessels, etc. to ascertain the route, concentration, etc. of long-range transported fine dust.
Special Act on the Improvement of Air Quality in Port Areas	Article 9 (Surveys)	<ul style="list-style-type: none"> Mandates the establishment of an air quality monitoring network in ports by the Minister of Oceans and Fisheries and the Minister of Environment.
Guidelines for Operating Air Quality Monitoring Networks	Ministry of Environment Notices and Guidelines	<ul style="list-style-type: none"> Regulations on the operation procedures, equipment maintenance, data management, and reporting methods for air quality monitoring networks.

이를 통해 새로운 기술과 방법을 개발하여 대기오염을 줄이고, 장기적으로는 더 나은 환경을 조성하는 데 기여한다. 그밖에 규제 준수 모니터링으로서의 대기질 모니터링의 역할이 있다. EPA와 주 정부는 대기질 모니터링을 통해 규제대상 시설들이 대기오염 방지 규정을 준수하는지 확인하는데 이는 법적 기준을 충족하지 못하는 시설에 대한 조치를 취하는 데 중요한 역할을 하게 된다. 표 2에서 미국 청정대기법의 주요 내용을 확인할 수 있다.

3.3 EU 대기질 측정망의 운영 목적

유럽연합(EU)에서 대기질 모니터링의 주요 목적은 대기질 지침과 여러 국가 단위에서 발간된 보고서에서 확인할 수 있다(EEA, 2020; EC, 2008). EU의 경우 Ambient Air Quality Directive (2008/50/EC)를 통해

서 대기질 모니터링 및 관리에 대한 법적인 틀을 제공하고 있으며, 대기질 모니터링의 목적을 1) 공공 건강과 환경을 보호, 2) 대기질이 정해진 기준을 충족(준수)하는지 확인, 3) 대기 중의 다양한 오염물질 수준을 평가하고 이를 법적 한계와 건강 기반 기준과 비교 등으로 설명하고 있다(EC, 2008). 또한 모니터링 결과는 정책 입안자들이 대기질 개선 및 배출 감소를 위한 전략을 개발하고 시행하는 데 도움을 주고, 국가 및 지역 수준에서 대기질 계획 및 프로그램을 설계하는 데 사용될 수 있다.

EU 역시 모니터링을 대기질 문제에 대한 공공 인식을 높이고 오염을 줄이기 위한 행동을 장려하기 위해 일반 대중에게 대기질 자료를 투명하게 공개하고, 이를 통해 대중의 신뢰를 구축하고 대기질 관리에 대한 지역사회의 참여 촉진을 목적으로 한다. 정기적인 모

Table 2. Summary of the key elements of the Clean Air Act (CAA) under the EPA.

Key element	Description
Initial Clean Air Act (1963)	<ul style="list-style-type: none"> Established federal authority to address air pollution, marking the first national air quality law in the U.S.
1970 Amendments	<ul style="list-style-type: none"> Major overhaul establishing the framework of the CAA. Created the EPA to enforce the act, introduced National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) under Section 109, and mandated emissions standards for industrial and mobile sources under Sections 111 and 112.
1977 Amendments	<ul style="list-style-type: none"> Focused on areas failing to meet NAAQS deadlines, setting stricter requirements for regions with persistent air quality issues. Introduced New Source Performance Standards (NSPS) under Section 111 and Prevention of Significant Deterioration (PSD) for areas with cleaner air quality under Sections 160–169A.
1990 Amendments	<ul style="list-style-type: none"> Expanded the act significantly to address emerging environmental issues, including acid rain, urban air pollution, and toxic emissions. Established the Acid Rain Program (cap-and-trade for SO₂ and NO_x) under Title IV and expanded controls on Hazardous Air Pollutants (HAPs) under Section 112. Introduced provisions for stratospheric ozone protection under Title VI.
National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)	<ul style="list-style-type: none"> Sets limits on concentrations of specific pollutants to protect public health, particularly for vulnerable groups. NAAQS is defined under Section 109.
State Implementation Plans (SIPs)	<ul style="list-style-type: none"> Requires states to create SIPs, demonstrating how they will achieve and maintain NAAQS through local regulations and enforcement. SIP requirements are outlined in Section 110.
Hazardous Air Pollutants (HAPs)	<ul style="list-style-type: none"> Enforces stricter controls on pollutants that cause serious health effects (e.g., benzene, mercury) by requiring industries to use Maximum Achievable Control Technologies (MACT) under Section 112.
New Source Performance Standards (NSPS)	<ul style="list-style-type: none"> Imposes standards for new or modified industrial sources of pollution, ensuring they incorporate up-to-date emission controls, under Section 111.
Acid Rain Program (1990)	<ul style="list-style-type: none"> Introduced as part of the 1990 amendments, this program uses a cap-and-trade system to reduce sulfur dioxide (SO₂) and nitrogen oxides (NO_x) emissions that contribute to acid rain, primarily from coal-fired power plants under Title IV.
Motor Vehicle Emissions and Fuel Standards	<ul style="list-style-type: none"> Establishes emissions standards for vehicles and fuel requirements aimed at reducing pollution from transportation sources (Provisions for vehicle emissions and fuel standards are found in Title II).
EPA Enforcement Authority	<ul style="list-style-type: none"> Grants the EPA authority to monitor compliance, enforce regulations, and penalize violators, promoting adherence to the act's standards. EPA's enforcement powers are outlined in Sections 113 and 114.

니터링은 대기질의 장기적 추세를 분석할 수 있게 하며, 이는 대기질 관리 조치의 효과를 평가하고 추가 조치가 필요한 분야를 강조할 수 있다(EEA, 2019). 표 3은 최근까지의 EU의 Ambient Air Quality Directives (AAQD)의 변천 과정을 보여주고 있다.

3. 4 일본 대기질 측정망의 운영 목적

일본은 대기오염 방지법에 대기질 모니터링에 관련

한 역할을 규정하고 있다. 크게 대기오염방지법 18조와 24조에 있는 국가와 지자체의 의무와 구체적 모니터링과 보고의 규정을 통해 대기질 모니터링 목적을 제시하고 있다(MEOJ, 2017). 2022년도에 발간된 대기환경 상시모니터링 매뉴얼(6판)에 의하면, 대기환경 상시 모니터링 프로그램의 목적은 지방공공조직인 도도부현(都道府県), 정부 등에서 대기오염을 지속적으로 측정하고, 지역의 대기오염에 관한 비상 대책

Table 3. History of the EU Ambient Air Quality Directives (AAQD).

Year	Key events
1980	Established directives to manage SO ₂ and particulate matter (PM)
1982~1992	Established directives to manage Pb, NO ₂ , and O ₃
2004	Introduced standards for arsenic, cadmium, mercury, nickel, and polycyclic aromatic hydrocarbons (2004/107/EC)
2008	Introduced air quality standards for PM _{2.5} (2008/50/EC)
2011	Commission Implementing Decision 2011/850/EU (IPR Decision): Related to the dissemination, exchange, and reporting of air quality information (pertaining to 2004/107/EC and 2008/50/EC)
2015	Directive 2015/1480: Guidelines for reference methods, data validation, and location of sampling points for air quality assessment (amending annexes of 2004/107/EC and 2008/50/EC)
2022	The Commission (EC) proposed to update the existing air quality regulations in the EU, aiming to integrate and revise the current ambient air quality directives (2004/107/EC and 2008/50/EC)
2024	Agreement on strengthening air quality standards (EC)

을 강구하고, 대기환경, 발생원의 상황, 농도가 높은 지역을 파악하고, 오염 방지 대책의 효과를 파악함과 동시에 전국의 오염 추세와 시간 경과에 따른 오염의 변화를 파악하여 대기오염 방지 대책의 기초 데이터로 활용하는 것을 목적으로 한다고 적시되어 있다 (MEOJ, 2022). 더불어, 기존에는 지속적인 모니터링을 통해 얻은 결과를 응급 대책의 자료로 활용하고 환경기준의 적정성을 판단하는 데 중점을 두었지만, 점차 환경 영향 평가, 광역 오염 메커니즘의 해명, 환경기초 계획의 책정 등으로 사용 범위가 확대되고 있음을 기술하고 있다 (Morikawa *et al.*, 2023; MEOJ, 2022). 일본의 대기오염 방지법에서 규정한 대기질 모니터링에 관련한 주요 규정 및 내용은 표 4와 같다.

3.5 중국 대기질 측정망의 운영 목적

중국 정부기관들은 대기질 모니터링의 필요성과 목적을 여러 규정을 통해 강조하고 있다 (MEE, 2016, 2013, 1989). 중국 대기오염 제어 액션플랜 (China's Air Pollution Control Action Plan)과 중국 국가환경모니터링센터 (China National Environmental Monitoring Center, CNEMC)에 의하면, 대기질 모니터링 데이터는 오염 제어 정책의 효과를 평가하며, 공공 건강 보호를 위해 대기질 데이터를 사용하는 데 활용된다 (MEE,

2013). 중국 국가환경모니터링센터 (CNEMC)는 생태환경부 직속 (MEE) 기관으로 국가 대기질 모니터링 운영 및 모니터링과 관련한 정도관리 기술 개발 및 기술 지침 등을 제공하고 있다. 기타 제13차 5개년 계획 (The 13th Five-Year Plan for Ecological and Environmental Protection)에 의하면, 배출 제어에서 포괄적인 대기질 관리로의 전략적 전환을 지원하기 위해 모니터링 데이터의 활용을 강조하고 있다 (MEE, 2016). 표 5는 중국 대기오염 모니터링과 관련된 법적 근거와 주요 내용을 정리하고 있다.

3.6 각국 대기질 측정망 운영 목적 비교 고찰

이상의 사례를 통해 보듯이 각국은 법령과 각종 규정을 통해 대기질 모니터링의 운영 목적을 명시하고 있다. 대기질 모니터링은 오염 정도의 평가, 대기오염 데이터를 적시에 일반 대중에게 제공, 대기질 목표 또는 기준의 이행 여부 판단, 배출 통제 정책의 효과 평가, 대기질 추세에 대한 정보 제공 등의 기본적인 기능 외 대기질 모델 평가에 활용될 수 있는 데이터 제공, 연구 지원 등 다양한 목적에 활용될 수 있다.

우리나라의 경우 대기질 개선을 위한 계획 수립 및 시행 규정, 대기오염물질의 측정 및 보고 규정, 측정망의 기본 규정, 측정망 설치 및 운영, 측정기기 인증 및

Table 4. Key provisions related to monitoring in Japan's Air Pollution Control Act.

Policy	Article	Summary
National Government Policy	Articles 18~38	<ul style="list-style-type: none"> The national government must work with local entities to study hazardous air pollution and use scientific knowledge to assess its health impacts. Based on these studies, it must evaluate and periodically disclose health risk levels associated with each hazardous air pollutant. To support business measures and local policies, the government must gather and share information on emission control technologies. These efforts aim to enhance public awareness, encourage pollution control measures, and strengthen local environmental policies.
Local Government Policy	Articles 18~39	<ul style="list-style-type: none"> Local public entities should assess air pollution from hazardous pollutants within their districts. They must provide businesses with information to encourage pollution control measures. Local entities should work to spread awareness among residents on preventing air pollution caused by hazardous pollutants.
Continuous Monitoring	Article 22	<ul style="list-style-type: none"> Prefectural governors must take measures to monitor air pollution continuously, excluding radioactive substances, as per the regulations of the Ministry of the Environment. Prefectural governments must continuously monitor air pollution and report the results to the Minister of the Environment.
	Article 24	<ul style="list-style-type: none"> A prefectural governor must disclose the air pollution status for the prefectural area pursuant to the provisions of Order of the Ministry of the Environment. The Minister of the Environment must disclose the status of the pollution of the air by radioactive substances pursuant to the provisions of Order of the Ministry of the Environment.

Table 5. Major laws and regulations related to air quality monitoring in China.

Law/Regulation	Legal basis	Key content
Environmental Protection Law of the People's Republic of China	Establishes the fundamental principles of environmental protection and policies for air quality improvement.	Provides the legal foundation for air quality monitoring.
Air Pollution Prevention and Control Law	Regulations for the establishment and operation of air quality monitoring networks.	Defines standards for pollutant emissions and monitoring methods.
Air Pollution Prevention and Control Action Plan	Sets strategic goals and policies for air quality improvement.	Includes measures to strengthen air quality monitoring.
The 13th Five-Year Plan for Ecological and Environmental Protection	Outlines policy directions for air quality improvement.	Specifies measures to enhance air quality monitoring networks.

기준 규정, 대기오염물질의 측정 방법 및 절차, 측정망 운영기준, 대기오염 측정망의 설치 및 운영절차 규정, 대기오염물질의 측정기준 및 절차 규정, 측정망의 운영 및 관리 규정, 측정망의 운영절차, 장비 유지보수, 데이터 관리 및 보고 방법 규정 등이 대기환경보전법 (Air Quality Conservation Act), 대기환경보전법 시행령 (Enforcement Decree), 대기환경보전법 시행규칙

(Enforcement Rules), 대기질 측정망운영 지침 등에 적시되어 있으나, 대부분 측정망 관리와 관련한 세부적인 절차와 규정과 관련한 사항으로 측정망 운영 목적은 실태조사에 국한되어 있다. 이에 비해 일본, 미국 등은 유해대기오염물질이 인체건강에 미치는 영향에 대한 과학적 지식을 증진, 연구 지원 등의 목적이 명시되어 있다(MEOJ, 2022; USEPA, 1990). 따라서 측정

망의 운영 목적을 보다 포괄적으로 확대하는 것이 필요해 보인다. 이러한 선언적 혹은 법적 근거가 되는 법령이나 규정을 통해 모니터링의 운영 목적을 확대하는 것은 대기 모니터링 관련 연구에서 모니터링의 중요성을 제고하고 측정망을 활용한 실험적 연구 및 새로운 기술의 도입, 그리고 최근 이슈화되는 지역사회 모니터링 (community monitoring) 등의 근거를 지지해주는 데 주요한 근거가 될 수 있다.

4. 대기오염 측정망의 운영체계

4.1 우리나라의 측정망 운영체계

우리나라 대기오염 측정망은 대기환경보전법 시행규칙 제11조에 따라 수도권대기환경청장, 국립환경과학원장 또는 한국환경공단(이하 중앙정부)이 설치하는 대기오염 측정망 8종과 특별시장·광역시장·특별자치시장·도지사 또는 특별자치도지사(이하 지방정부)가 설치하는 대기오염 측정망 3종, 그리고 항만지역 등 대기질 개선에 관한 특별법에 따라 중앙정부가 설치하는 항만 측정망이 있다(ME, 2023; MOF, 2023). 대기환경보전법에 의한 중앙정부 측정망은 1) 대기오염물질의 지역배경농도를 측정하기 위한 교외대기 측정망, 2) 대기오염물질의 국가배경농도와 장거리이동현황을 파악하기 위한 국가배경농도 측정망, 3) 도시지역 또는 산업단지 인근 지역의 특정대기유해물질(중금속을 제외한다)의 오염도를 측정하기 위한 유해대기물질 측정망, 4) 도시지역의 휘발성유기화합물 등의 농도를 측정하기 위한 광화학대기오염물질 측정망, 5) 산성 대기오염물질의 건성 및 습성 침착량을 측정하기 위한 산성강하물 측정망, 6) 기후·생태계 변화 유발물질의 농도를 측정하기 위한 지구대기 측정망, 7) 장거리이동대기오염물질의 성분을 집중 측정하기 위한 대기오염집중측정망, 8) 초미세먼지(PM_{2.5})의 성분 및 농도를 측정하기 위한 PM-2.5 성분 측정망이다. 지방정부 측정망은 1) 도시지역의 대기오염물질 농도를 측정하기 위한 도시대기 측정망, 2) 도로변의 대기

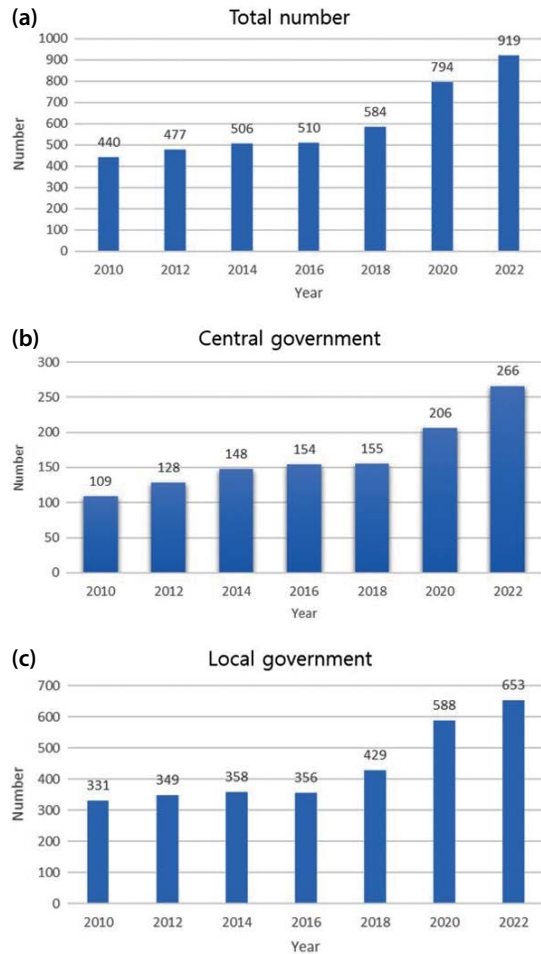


Fig. 1. Trend of the number of monitoring sites between 2010~2022. (a) Total number of sites, (b) number of sites operated by central government, (c) number of sites operated by local government (NIER, 2023).

오염물질 농도를 측정하기 위한 도로변대기 측정망, 3) 대기 중의 중금속 농도를 측정하기 위한 대기중금속 측정망이다.

2022년 12월 현재 중앙정부 측정소는 266개소, 지방정부 측정소는 653개소로 총 919개소이다. 그림 1에서 보듯이 측정소 개수는 미세먼지가 사회문제화된 2016년 이후부터 급격하게 증가하여 2022년에는 2016년 대비 두 배 가까이 증가하였다. 그림 2는 도시대기 측정망의 공간분포를 보여주고 있다. 도시대기

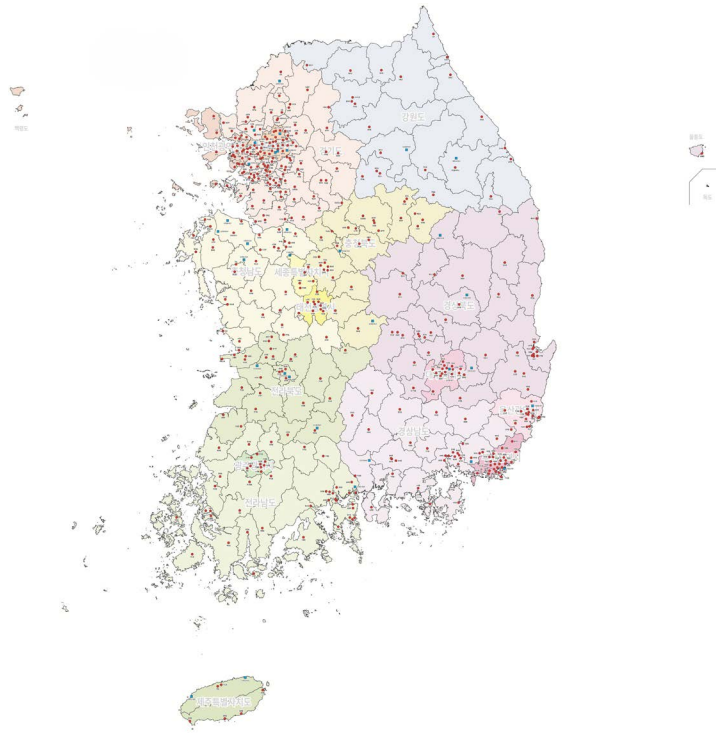


Fig. 2. Locations of Urban monitoring station in Korea (2020) (Source: Air Pollution Monitoring Network Operation Plan (2021~2025), ME, 2020).

측정망의 특성상 인구가 밀집한 도시지역에 측정망이 밀집되어 있는 것을 확인할 수 있다.

4.2 미국의 측정망 운영체계

미국의 경우 대기오염 측정망은 주정부 (state), 부족 (tribal), 지방정부 (local governments) 등이 설계 및 관리의 주체가 되어 운영된다. 대기질 모니터링 관리 및 운영에 있어서의 EPA의 역할은 Code of Federal Regulations (CFR)에 준하여, 필수 요구사항과 가이드 등을 제공한다. 예를 들어, CFR Part 40은 네트워크 디자인과 운영에 필요한 요구사항을, CFR Part 50과 CFR Part 53는 네트워크 모니터링의 방법을, CFR Part 58은 대기질 감시 (Ambient Air Quality Surveillance)와 관련된 사항을 다룬다 (USEPA, 2022, 2017). EPA 산하의 대기 모니터링 기술 정보 센터 (Ambient Monitoring Technology Information Center, AMTIC, [https://](https://www.epa.gov/amtic)

www.epa.gov/amtic)는 모니터링 프로그램의 기술 정보를 제공 (technical information)한다. AMTIC는 대기 모니터링 관련 정보 교환을 중심으로 운영되는데 대기 모니터링과 관련된 모든 연방 규정, 주변 모니터링 QA/QC 관련 정보 및 주변 모니터링 관련 정보를 제공한다 (USEPA, 2017). 미국의 모니터링 네트워크 유형은 매우 복잡하고 다양하게 구성되어 있으며, 주정부, 연방정부, 기타 여러 기관이 연계되어 있다. 청정공기법 (CAA)에 의하면 EPA 산하의 Office of Air Quality Planning and Standards (OAQPS)에서는 모든 주에 기준 오염물질에 대한 대기 모니터링 측정망 네트워크를 구축하도록 요구한다. 주 및 지역 대기 모니터링 스테이션 (Networks of State or Local Air Monitoring Stations, SLAMS)이라고 하는 각 SLAMS 측정망에서 주는 모니터링 결과에 대한 연간 요약물 OAQPS에 제공해야 하며, 결과는 OAQPS에서 사용할 수 있

어야 한다. 미 전역의 전략적 위치에서 대기질에 대한 시기적절하고 자세한 정보를 얻기 위해 OAQPS는 추가 모니터 네트워크인 국가 대기 모니터링 스테이션(National air monitoring stations, NAMS)을 구축했다. SLAMS 네트워크의 일부인 NAMS 사이트는 보다 엄격한 모니터 위치, 장비 유형 및 품질 보증 기준을 충족해야 하며, NAMS 모니터는 또한 OAQPS에 자세한 분기 및 연간 모니터링 결과를 제출해야 한다.

특수 목적 모니터(Special Purpose Monitor, SPMS)는 주 및 지방 기관에서 매우 구체적이거나 단기적인 모니터링 목표를 달성하는 데 사용된다. EPA는 입자 물질의 화학적 구성을 모니터링하고 데이터를 수집하기 위해 화학 성분 분석 네트워크(Chemical Species Network, CSN)를 구축했다. CSN 사이트는 장기간에 걸쳐 PM_{2.5}에 포함된 특정 이온, 금속, 탄소 성분 및 유기 화합물의 농도 변화를 측정한다. 이 사이트들은 다양한 SLAMS 측정소 위치에 배치되어 있다. 이들 사이트의 위치는 일부는 기존의 광화학 평가 모니터링 스테이션(Photochemical Assessment Monitoring Stations, PAMS) 중 배치되며, 나머지 사이트의 위치는 EPA, 지역 사무소 및 모니터링 기관들이 협력하여 주로 대규모 도시지역 내 또는 근처에 배치된다(USEPA, 2017).

PAMS 네트워크는 주 및 지방 기관에서 운영하는 오존 전구체 모니터링 네트워크이다. PAMS 프로그램은 원래 1990년대 초에 청정공기법(CAA) 182(c) (1)항의 요구 사항을 충족하기 위해 시작되었으며, 2015년 상당한 개정을 거쳤으며, 100만 명 이상의 인구가 있는 핵심 기반 통계 지역(CBSA)의 기존 국가 핵심 모니터링 네트워크(National Core, NCore) 사이트에서 오존 전구체 측정을 수행하도록 요구한다. 2024년 현재 43개 측정소에서 운용되고 있다. 필수 PAMS 사이트의 주요 목적은 오존 모델 개발을 지원하고 중요한 오존 전구체 농도의 추세를 추적하기 위해 오존 전구체 및 기상 측정 데이터베이스를 개발하는 것이다.

NCore 네트워크는 다중 오염물질 측정소로 여러 모니터링 네트워크와 측정을 통합하기 위한 모니터링

체계화 전략의 일부로 모든 주(50개 주, 워싱턴 D.C., 푸에르토리코, 버진 아일랜드)는 최소한 하나의 NCore 사이트를 운영해야 한다. NCore에서는 미세먼지(PM_{2.5}, PM_{10-2.5}), 오존(O₃), 이산화황(SO₂), 일산화탄소(CO), 질소 산화물(NO/NO₂/NO_x), 기본 기상 데이터 등을 측정한다. 일부 NCore 사이트는 납(Pb)을 측정한다. NCore 네트워크는 2022년 기준 43개 지점 도시지역과 20개의 농촌지역에 사이트가 있다. 모니터링 지점은 특성화된 PM_{2.5} 성분을 측정하는 STN(Speciation Trend Network) 사이트, 오존 전구체를 측정하는 PAMS 사이트 및 공기 독성물질을 측정하는 NATTS 사이트와 이 새로운 측정소를 같은 위치에 배치하고 있다. 모니터링 프로그램을 이와 같이 하나의 위치에 결합함으로써, EPA와 파트너기관들은 이용 가능한 다중 오염물질의 정보를 극대화할 수 있다.

국가 대기 독성 추세 관측소(National Air Toxics Trends Stations, NATTS) 네트워크는 일관된 품질의 장기적인 대기 독성물질(HAP, Hazardous Air Pollutant) 모니터링 데이터를 제공하기 위해 개발되었다. NATTS 네트워크는 1) 추세와 배출 감소 프로그램의 효과 평가(Assessing Trends and Emission Reduction Program Effectiveness), 2) 대기질 모델 평가 및 검증(Assessing and Verifying Air Quality Models), 3) 대기질 모델 평가 및 검증(Assessing and Verifying Air Quality Models), 4) 수용 모델에 입력할 데이터 제공(Providing Data for Direct Input to Source-Receptor Models) 등의 역할을 한다. NATTS 네트워크는 2003년에 시작되었으며, 미국 전역에 2008년 현재 27개의 사이트로 구성되어 있다. 각 사이트에서는 보통 100개 이상의 오염물질을 모니터링하지만, 그중 19개만 공식적으로 요구한다. 대상 HAPs에는 휘발성 유기 화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs), 카보닐(Carbonyls), PM₁₀ 금속 및 다환 방향족 탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)가 포함된다.

도시 대기 독성 모니터링 프로그램(Urban Air Toxics Monitoring Program, UATMP)은 EPA가 자금을 지원하여 주, 지역 및 부족 모니터링 기관이 대기 독성

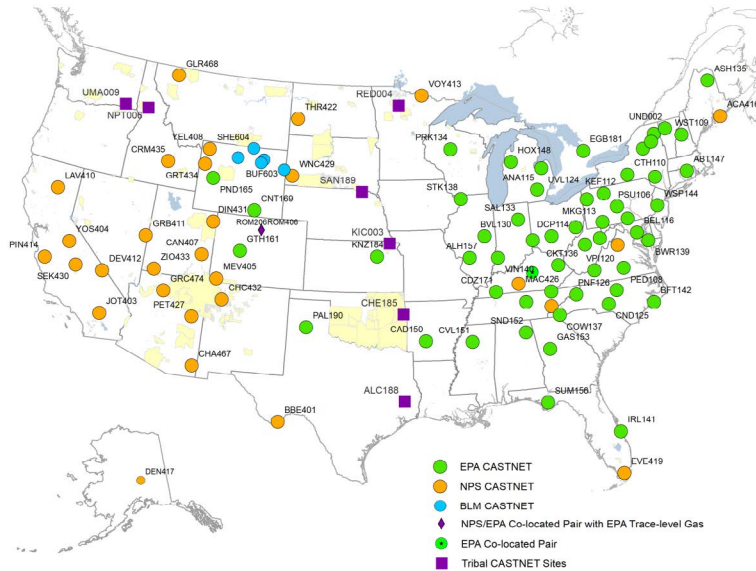


Fig. 3. CASTNET site location and operating agencies (<https://www.epa.gov/castnet/castnet-site-locations>).

모니터링 이니셔티브 및 연구를 수행하도록 지원하는 프로그램이다. 각 UATMP 연구의 성격과 범위는 모니터링 기관에 의해 결정되며 다양하다. 2003년, OAQPS는 교통 및 대기질 사무소, 연구 개발 사무소의 국가 노출 연구소 및 10개 EPA 지역 사무소와 협력하여 지역 규모 대기 독성물질 모니터링 (Community-Scale Air Toxics Ambient Monitoring, CSATAM) 을 시작하였다.

IMPROVE (Interagency Monitoring of Protected Visual Environments) 프로그램은 미국의 청정 지역에 위치한 관측소에서 $PM_{2.5}$ 의 주요 성분(황산염, 질산염, 유기 및 무기 탄소, 미량 금속 등)에 대한 20년 이상의 기록을 제공한다. 이 프로그램은 국립공원관리청 (National Park Service)이 주도하며, 여러 연방 및 주 정부 기관이 지원하고 있다. 또한 IMPROVE 네트워크를 통해 시정과 그 변화를 추적하고 있다.

Clean Air Status and Trends Network (CASTNET)은 미국과 캐나다 전역에 2021년 기준으로 99개의 사이트를 갖춘 장기 대기 모니터링 프로그램이다. 이 프로그램은 미국 EPA 대기 프로그램 사무소에서 관리 및 운영하며, 국립공원관리청 (National Park Service,

NPS) 대기 자원 부서, 와이오밍 주 토지관리국 (Bureau of Land Management, BLM) 등 여러 연방, 주, 지방 파트너와 7개의 원주민 부족 (federal, state, and local partners including seven Native American tribes)과 협력하여 운영된다(그림 3). CASTNET은 1990년 청정 대기법 수정안에 따라 설립되었으며, 오염물질 농도와 산성 침전물 (acidic deposition)의 변화 추이를 보고하여 배출 저감 프로그램의 효과를 평가하는 역할을 한다. CASTNET은 미국에서 유일하게 일관되고 장기적인 산성 건성 침전물 데이터를 제공하는 네트워크이다. 1978년에 설립된 국가 대기 침전물 프로그램 (NADP)은 강수(산성비)에 포함된 산성 화합물을 측정하기 위해 만들어졌으며, 대부분의 CASTNET 사이트는 NADP의 습성 침전물 네트워크 (NTN)와 함께 위치해 있다.

NADP/NTN (National Atmospheric Deposition Program/National Trends Network)은 강수량의 화학적 성질을 추적하는 전국적인 장기 네트워크이다. NADP/NTN은 수소 이온(pH로서의 산성), 황산염, 질산염, 암모늄, 염화물 및 염기 양이온에 대한 농도 및 습식 침적 데이터를 제공한다. 현재 NADP/NTN

Table 6. CASTNET/NADP network summary.

Network measurement	Method	Pollutant(s)/Analyte(s)	Number of sites
CASTNET	Weekly filter pack	Particles (SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^-); Gases (SO_2 , HNO_3)	94
	Continuous UV analyzer	O_3	86
	Continuous pulse fluorescence analyzer	SO_2	3
	Continuous chemiluminescence analyzer	NO/NO_y	8
	Continuous chemiluminescence analyzer	NO/NO_x	1
	Continuous gas filter correlation analyzer	CO	3
NADP/NTN	Weekly precipitation collector + rain gage	SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , pH, precipitation amount	258
NADP/AMoN	Biweekly passive sampler	NH_3	101

<https://www3.epa.gov/castnet/docs/CASTNET-Factsheet-2021.pdf>

은 미국, 캐나다, 푸에르토리코 및 버진 아일랜드에 걸쳐 250개 이상의 사이트로 성장했다. NADP는 또한 기체 암모니아(NH_3)의 대기 농도를 추적하는 전국 네트워크인 암모니아 모니터링 네트워크(NADP/AMoN)를 운영한다(USEPA, 2024b, 2017, 2008). 표 6은 CASTNET/NADP 네트워크의 주요 측정방법과 측정물질을 보여준다.

4.3 EU의 측정망 운영체계

EU의 대표적 측정망으로 EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme)을 들 수 있다. EMEP은 장거리 국경 간 대기오염 문제를 다루기 위해 설립된 프로그램으로, 유엔 경제위원회(UNECE)와 관련된 법적 틀에 기반하고 있다(EMEP, 1979). EMEP의 법적 근거는 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP)으로 장거리 국경 간 대기오염을 감소시키기 위해 1979년에 체결되었으며, 장거리 오염의 모니터링과 평가를 담당한다. Protocol on Heavy Metals (1998) 및 Protocol on Persistent Organic Pollutants (1998)는 CLRTAP의 하위 조약으로, 특정

오염물질에 대한 규제를 강화하고 모니터링을 요구한다. EMEP은 이러한 조약의 요구 사항을 충족하기 위해 관련 데이터를 수집한다(ECE, 1998a, 1998b; EMEP, 1979). EMEP의 목적은 장거리 국경 간 대기오염의 원인과 영향을 평가하고, 오염물질의 장거리 수송 및 침적에 대한 데이터를 제공하는 것이다. EMEP은 이 데이터를 사용하여 정책 권고 및 국제 협상을 지원하며 UNECE의 CLRTAP 사무국에 의해 관리된다. 각 회원국은 EMEP의 모니터링 및 평가 활동에 참여하며, 데이터는 국제적으로 협력하여 수집되고 분석된다.

EMEP과 달리 유럽 대기질 모니터링 네트워크(Euroairnet/Eionet (European air quality monitoring network))가 운영되고 있는데 Euroairnet은 국가에 이미 있는 측정망에서 선택하며, 데이터는 유럽 대기질 데이터베이스인 Airbase에 보고된다(https://data.europa.eu/data/datasets/data_airbase-the-european-air-quality-database). Euroairnet은 유럽 연합(EU) 회원국과 기타 참여국의 국가 대기질 모니터링 네트워크에서 수집된 데이터를 통합하는 유럽의 대기질 모니터

Table 7. Comparison of EUROAIRNET and EMEP programs.

Item	Euroairnet	EMEP
Purpose	Real-time air quality monitoring and public information provision	Monitoring and assessment of long-range transboundary air pollution
Scope	Air quality monitoring in EU member states and other participating countries	Monitoring of air pollution including long-range transport and deposition
Management	European Environment Agency (EEA)	Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP) under the United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)
Data type	Real-time and historical air quality data	Regional data, long-range transport and deposition data, modeling results
Integration	Support for evaluating air quality trends and regulatory effectiveness across the EU	Support for international air quality agreements and policy development
Legal basis	Ambient Air Quality Directive (2008/50/EC)	Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP), Protocol on Heavy Metals (1998), and Protocol on Persistent Organic Pollutants (1998)

링 네트워크로 유럽 환경청 (EEA)에서 관리하며, 유럽 전체에 대한 포괄적이고 조화된 대기질 데이터를 제공하는 것을 목표로 한다. Euroairnet 데이터는 유럽 대기질 포털 (European Air Quality Portal)에 제공되며, 사용자에게 유럽 전역의 실시간 및 과거 대기질 데이터를 접근할 수 있도록 오염 수준, 대기질 지수 및 추세에 대한 자세한 정보를 제공한다.

EIONET (European Environment Information and Observation Network)은 유럽 전역에서 대기를 포함한 전체 환경 데이터와 정보를 교환하는 역할을 하는 네트워크로, Euroairnet과 같은 다양한 주제별 네트워크를 포함한다 (Tørseth *et al.*, 2023; EEA, 2020). 표 7은 Euroairnet과 EMEP 프로그램을 비교하였다. 보고된 최신 데이터는 지체 없이 대중에게 제공하며, 잠정적인 데이터로 간주된다. 데이터는 거의 실시간으로 보고되며, 일반적으로 국가의 전체 모니터링 측정소 중 일부만 포함한다. 유럽의 고정 샘플링 지점은 EU가 제시한 거시 및 미시 규모 배치 규칙에 따라 다양한 유형의 측정소로 구분되며, 2022년 PM_{2.5} 기준 2023개 측정소이며 이 중 EU 27개국 소속 측정소가 1781개소, NonEU 소속 측정소가 242개소이다 (EEA, 2024).

기타 유럽은 다양한 연구 기반 모니터링 체계 (Res-

earch infrastructures)를 가지고 있다. ACTRIS (Aerosol, Clouds und Trace Gases Research Infrastructure)는 대기 중의 에어로졸, 구름, 그리고 미량 기체를 연구하는 유럽 기반의 연구 인프라로, 대기과 기후변화에 관한 데이터를 수집하고 분석한다 (Laj *et al.*, 2024).

4. 4 일본의 측정망 운영체계

일본은 1970년대에 CO, SO₂, NO₂, 산화물 (OX_s), 그리고 먼지 (Suspended Particulate Matter, SPM)에 대한 환경기준을 설정하였으며, PM_{2.5}에 대한 기준은 2009년에 설정하였다. 이후 비메탄 탄화수소 (NMHC)에 대한 환경 지침을 1976년에 제정하였으며, 1970년대 초반부터 자동 측정 기기를 사용하여 대기오염물질 농도의 연속 시간 모니터링을 실시해 오고 있다. 표 8은 2018년 현재 운영되는 대기오염물질별 측정소의 수를 비교한 결과이다 (Ito *et al.*, 2021). 대기오염 및 기상 상황은 지방정부 주관으로 모니터링되며, 일본 환경청 (MOE)에서 최종 요약된다. 대기질 모니터링의 주요 역할은 대기오염 경고 및 비상 경보 발령에 활용하는 것인데, 이를 위해 신속한 데이터 획득과 정보 전달, 대기질 기준에 따른 대기질 평가에 활용한다. 일본은 미국과 비슷하게 측정목적 중심이 아닌 측

Table 8. Status of monitoring stations for different pollutants in Japan as of 2018 (Ito *et al.*, 2021).

Species	Abbreviation	Start year	Number of monitoring stations		
			Total	AAQMS	RsAQMS
PM _{2.5}	PM _{2.5}	2010	1088	849	239
Suspended Particulate Matter	SPM	1970	1703	1314	389
Ozone	O ₃	1970	1193	1165	28
Nitrogen Oxide	NO _x , NO ₂	1970	1658	1260	398
Non-Methane Hydrocarbon	NMHC	1970	482	333	149
Sulfur Dioxide	SO ₂	1970	1010	960	50
Carbon Monoxide	CO	1970	293	60	233

*AAQMS: Ambient Air Quality Monitoring Station; RAQMS: Roadside Air Quality Monitoring Station.

정물질별 측정소를 운영하고 있다 (Morikawa *et al.*, 2023).

일본의 대기질 모니터링 측정소는 크게 대기질 모니터링 스테이션(AAQMS), 도로변 대기질 모니터링 측정소(RsAQMS), 그리고 산성비 모니터링 스테이션의 세 가지 범주로 분류된다. AAQMS는 동일 지역에서의 대기질의 지속적 기록, 오염물질 배출원 탐지, 높은 오염물질 농도가 있는 지역 식별, 오염 방지 조치의 효과 추정 등을 목적으로 한다. RsAQMS는 차량 배기가스로 인해 오염된 것으로 간주되는 교차로, 도로 및 도로변에서 대기질을 정기적으로 모니터링한다. 그 외, 산성비 모니터링 측정소는 장거리 국경을 초월한 운반 및 장기적인 오염물질 추세를 결정 한다(산성비 유발물질, O₃ 등 포함). 또한 PM_{2.5} 조성 측정망이 있는데 130개 AAQMS와 33개 RsAQMS 측정소에서 1년에 4회 2주간 측정하고 있다. PM_{2.5} 조성 측정 항목은 무기이온, 유기탄소 성분, 중금속, 그리고 levoglucosan 등의 유기 트레이서 물질들이며, 이 중 10여 개의 지점에서 고해상도 PM_{2.5} 조성 및 금속 측정이 시행되고 있다. NMHCs는 AAQMS 333개, RsAQMS 149개 측정소에서 측정되고 있으며, 이들 대기 NMHC 수준에 대한 가이드라인은 1976년에 설정되었다.

VOCs 조성 측정은 2017년 5월부터 하루에 2번 측정하고 있으며, 전국적으로 5개 측정소(Tokyo, Saitama, Gunma, Tsushima, Nonodake)에서 측정하고 있다. 그 외, 도쿄시에서 관리하는 3개 지점에서 16개

VOCs 물질을 매시간 측정하고 있다 (Morikawa *et al.*, 2023).

4.5 중국의 측정망 운영체계

중국의 대기질 모니터링 네트워크는 도심 대기질 모니터링에 중점을 두고 1970년대에 시작되었으며, 1990년대 초에는 SO₂, NO_x, 총 부유 먼지(TSP) 농도를 모니터링하는 도시 대기 모니터링 측정소로 구성된 네트워크로 확장되었다. 2012년부터는 모니터링되는 물질의 수가 오존과 초미세입자를 포함하는 6개로 증가하였으며, SO₂, 이산화질소(NO₂), 미세 입자(PM₁₀), 초미세 입자(PM_{2.5}), 일산화탄소(CO), 오존(O₃)이 포함되었다(Wang *et al.*, 2014). 표 9는 중국의 대기질 측정망을 보여준다. 이들 측정망 중 도시 측정소는 도심 지역의 주변 공기질의 전반적인 상태 및 변화 추세를 모니터링, 도시 주변 공기질 평가를 목적으로 하며, 총 338개 도시(1,436개의 모니터링 지점)에서 시행되고 있다. 지역 측정소는 지역의 대기질 상태 및 오염물질의 전파 및 영향 범위를 모니터링하고 주변 대기질 평가에 참여하기 위하여 설립되었으며, 국가 대기질 모니터링 네트워크의 적용 범위를 더욱 확대하고, 주요 지역/도시의 오염물질 수송 특성을 모니터링하고, 지역 공동 예방 및 통제와 대기질 조기 정보 및 예측을 위한 기술 지원을 제공하는 것을 목적으로 한다. 2018년 기준 92개의 지역 대기질 모니터링 관측소로 확대되었다. 기타 16개의 배경 대기질 모니터링 측정망(대기 배경 스테이션)에서 국가 또는 지역 규모에서

Table 9. China's national-level air quality monitoring network system as of 2018 (Zhong *et al.*, 2023).

Category/Network	Sites	Indicators	Method
Urban air	1436 sites (338 urban cities)	SO ₂ , NO ₂ , CO, O ₃ , PM _{2.5} , Five meteorological parameters, visibility, etc.	Automatic
Regional air	92 sites		
Background	16 sites		
Acid deposition	440 sites, 359 cities	Precipitation, pH, EC, SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , F ⁻ , NH ₄ ⁺ , Cl ⁻ , major cations (Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺)	
Sand storm and dust	78 sites (78 urban cities)	TSP, PM ₁₀ , visibility, wind speed, wind direction	
Greenhouse gases	10 sites	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Automatic
PM composition	49 sites (42 urban cities)	PM _{2.5} water soluble ions, inorganic, OC/EC, online PM mass spectrometer	Automatic & Manual
Photochemical pollutants	78 sites (78 urban cities)	Alkanes, Olefins, Aromatics, Oxygen-containing volatile organic compounds, Halogenated hydrocarbons	Automatic & Manual

의 주변 공기질의 배경 수준을 모니터링하고, 모래 폭풍 모니터링은 78개의 지역 환경 모니터링 측정소를 통해 모래 폭풍 모니터링 네트워크를 구축하고 있으며, 산성비 모니터링 네트워크는 359개 도시, 440개 지점에서 도시중국산성비 오염의 현황과 발전 추세를 파악(자동 강수량 샘플러, 이온 측정)하고 있다. 중국 역시 PM 조성 측정망을 운영하고 있으며, 42개 도시, 49개 지점에서, PM_{2.5}, 이온 조성, OC/EC 등을 측정하고 있다. 마지막으로 광화학 측정망이 78개 도시에서 78개 지점에서 운영되고 있다 (Kong *et al.*, 2021; https://www.cnemc.cn/en/main_responsibilities/).

4.6 측정망 운영체계 비교를 통한 시사점

이상의 측정망 운영체계의 비교를 통해 볼 수 있듯이 각국은 전반적으로 국가별 행정체계 특성에 맞는 측정망 운영체계를 유지하고 있다. 미국은 EPA 중심으로 주 및 지방정부가 대기오염 측정망을 운영하며, EU는 Euroairnet과 EMEP 네트워크로 각국 데이터를 통합하여 공공에 제공한다. 일본은 지방정부가 모니터링을 주관하고, 환경청이 요약하여 긴급 대책 등에 활용하고 있으며, 중국은 국가 차원에서 대규모 측정망을 운영하며, 주요 도시와 배경 오염을 추적하고

있다.

측정망의 유형적 구분에 근거해서 살펴보면, 우리나라의 측정망은 중국의 측정망체계와 비슷한 특징을 가지고 있다. 반면 일본과 미국은 오염물질별 측정소를 운영하고 있다. 미국은 측정물질별 측정소 기반의 체계를 가지고 있어 모니터링 네트워크에 따라 측정소가 중복되기도 하며, 얽혀 존재한다. 따라서 우리나라의 측정망 중심의 측정망체계와 직접적인 비교나 이해가 어려운 특징을 갖는다. 그러나 우리나라 종합 대기측정소에서 여러 측정망의 측정을 한 측정소에서 수행하는 것은 미국의 NCore 사이트에서 STN, PAMS, NATTS 사이트를 같이 운영하는 것과 같이 유사한 점도 있다. 측정망체계가 나라마다 다르지만, 일반 측정망에서는 SO₂, NO₂, CO, O₃, PM_{2.5} 등을 측정하고, PM_{2.5} 화학조성, 광화학반응 전구물질, 유해대기오염물질, 산성강하 등의 특수 물질 또는 특수 목적 측정을 수행하는 것은 공통적이다.

운영체계의 측면에서 각국은 각기 상이한 행정체계를 가지고 있으며 중앙정부와 지방정부의 권한 이위임 체계나 부처별 권한의 정도에 따라 국가별 다른 체계를 유지하고 있다. 따라서 국가별 특성을 배제하고 일률적인 측정체계를 비교하는 것은 자칫 국가별 특

Table 10. Comparison of numbers of monitoring station.

Country	Pollutants	Number of station	Population (10,000)	Area (km ²)	Number of station per million	Number of station per 10,000 km ²
USA (Active)	SO ₂	605 (519)	34,181	9,831,510	1.8	0.6
	NO ₂	378 (422)			1.1	0.4
	O ₃	1,000 (1,216)			2.9	1.0
	CO	251 (389)			0.7	0.3
	PM _{2.5}	1,000 (947)			2.9	1.0
Japan	SO ₂	1,010 (1,350)	12,263	377,974	8.24	26.72
	NO _x	1,658 (1,840)			13.5	43.9
	O ₃	1,193 (1,160)			9.7	31.6
	CO	293 (390)			2.4	7.8
	SPM	1,703 (1,880)			13.9	45.1
	PM _{2.5}	1,088			8.9	28.8
China		2,189	142,517	9,600,130	1.5	2.3
China (Urban network only)		1,436			1.0	1.5
Korea		919	5,175	100,431	17.8	91.5
Korea (Urban network only)		521			10.1	51.9

The number in the parenthesis in the number of station column is the number of station reported in ME (2014).

성을 고려하지 못하는 실수를 범할 수 있다. 표 10은 각국의 대기오염 측정소 현황 관련 문헌과 자료를 바탕으로 산정한 미국, 일본, 중국, 그리고 한국(도시 네트워크)의 대기질 측정소 수를 인구와 면적에 대해 비교하고 있다. 각 국가별로 SO₂, NO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} 등 오염물질에 대한 측정소 수를 보여주고 있다. 표 10에서 볼 수 있듯이, 미국의 경우 O₃와 PM_{2.5}에 대한 측정소가 각각 1,000개로 가장 많으며, SO₂ 기준으로 인구 1백만 명당 측정소 수는 1.8개, 면적 1만 km²당 측정소 수는 0.6개 수준을 유지하고 있다. 일본의 경우 SPM(부유입자물질)과 PM_{2.5}에 대한 측정소 수가 각각 1,703개와 1,088개로 많으며, SO₂ 기준으로 인구 1백만 명당 측정소 수는 8.24개, 면적 1만 km²당 측정소 수는 26.72개로, 인구밀도와 면적 대비 측정소 수가 높은 편에 속한다. 이에 비해 중국은 인구 1백만 명당 측정소 수는 1.5개, 면적 1만 km²당 측정소 수는 2.3개로 최근 들어 측정망 수의 급격한 증가에도 불구하고 단위 인구 및 면적당 측정소 수는 일본이나 우리나라에 비해 낮은 수준이다. 우리나라는

인구 1백만 명당 측정소 수는 17.8개, 면적 1만 km²당 측정소 수는 91.5개로, 인구밀도와 면적 대비 측정소 수가 매우 높으며, 비교대상 국가에 비해서도 월등히 높은 편이다. 또한 미국과 일본의 측정소 수는 환경부(ME, 2014)에 제시된 측정소 수에 비해, 우리나라보다는 크게 변하지 않은 것을 알 수 있다. 이는 우리나라가 미세먼지가 사회문제화되면서 측정소 수가 2016년 이후 급증하였기 때문이다. 측정소의 수가 단위면적당 혹은 인구밀도에 비하여 높다는 것은 보다 상세한 대기질 정보를 제공한다는 뜻에서 긍정적이다. 그러나 측정망 증설에 따라 요구되는 인적, 물적 자원을 고려해 볼 때, 이에 대한 충분한 지원 없이 측정소를 증설하는 경우 자료의 신뢰성, 정도관리 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 기준 측정소를 무조건적으로 증설하기보다는 측정소의 질관리에 들어가는 비용과 효과를 면밀히 검토하여 최적화할 필요가 있다. 예를 들어 우리나라는 오염물질별 측정소보다는 목적별 측정망을 운영하고 있어 도시대기 측정망은 대기환경기준물질 6종 전부와 기상 요소를 측정하는

것을 원칙으로 하고 있다(NIER, 2023). 여러 조건이 충족되면 도시대기 측정망에서도 SO₂나 CO 측정을 하지 않을 수 있도록 제시되어 있기는 하지만(NIER, 2022a), 대부분의 측정소에서는 이들 항목을 측정하고 있다. 그러나 전국 대부분의 도시대기 측정망 측정소에서 이 두 물질은 지난 10년 동안 대기환경기준을 만족하고 있고, 황산화물과 일산화탄소 배출량도 전국적으로 감소하고 있어, 보다 유연한 측정망 운영이 바람직하다.

5. 온실가스 측정망 운영체계

5.1 온실가스 측정 동향

전 지구적, 지역적, 국가적, 그리고 지역적 온실가스(GHG) 평가는 파리 협정의 기후 목표를 달성하는 데 필수적이다. 교토 의정서와는 달리, 파리 협정의 모든 당사국은 인간 활동에 의해 발생하는 온실가스 배출량에 대한 국가 목록과 국가별 기여(Nationally Determined Contributions, NDC)를 제공할 의무가 있다. 투명성을 보장하기 위해, 파리 협정은 협정의 목적과 장기 목표 달성을 향한 전 세계의 집합적 진전을 평가하기 위해 매 5년마다 실시되는 글로벌 이행(Global Stocktake, GST)을 승인했다(UN, 2015).

온실가스의 추정은 “하향식(top-down)” 또는 “상향식(bottom-up)” 방법을 사용하여 추정할 수 있으며 두 가지 방법은 상호 보완적이다. “하향식” 접근 방식은 대기 관측의 변화를 기반으로 탄소원과 흡수원을 추정한다. 반면, “상향식” 접근 방식은 각 배출원 부문에 대한 화석 연료 사용 데이터를 특정 연료 유형의 탄소 함량 추정치와 결합하여 계산한다.

온실가스 모니터링은 크게 다양한 시공간 수준에서 측정되고 있다. 전 지구적 수준의 온실가스 모니터링 네트워크로 세계기상기구(WMO)의 GAW(Global Atmospheric Watch) 네트워크를 들 수 있으며, 전 세계 모든 대륙을 포괄하며 80여 국이 참여하고 있다. 현재 30개의 글로벌 측정소, 400개 이상의 지역 측정

소, 기타 100개 이상의 측정소가 있다(<https://community.wmo.int/en/activity-areas/gaw>). 온실가스 측정은 주로 지상(ground)과 항공기 기반(aircraft-based) 측정으로 구성되어 있는데 고 정밀도 고정관측(High-precision stationary measurements), 온실가스 In-situ 연속 관측(In-situ continuous monitoring of GHG concentrations) 등의 방법을 이용하여 측정하고 측정된 자료는 주로 top-down 분석에 사용된다(JACCO, 2020; OCCCO, 2018).

그 외 항공플랫폼 측정(in-situ airborne platforms), 플라스크 측정(Whole air samples (flasks))(NOAA Global Monitoring Laboratory) 체계가 있으며, 최근 저비용, 저정확도 센서를 이용한 Lower-cost, lower-precision measurements(NIST) 등 다양한 방법으로 측정이 병행되고 있다(The White House, 2023).

5.2 우리나라의 온실가스 측정 현황

3.1절에서 보인 것처럼 우리나라 대기환경보전법은 환경부장관이 대기오염물질과 함께 온실가스를 포함한 기후·생태계 변화유발물질 실태를 파악하도록 되어 있다. 또한 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(37조 1,2항)에 따르면 정부는 대통령령으로 정하는 바에 따라 대기 중의 온실가스 농도 변화를 상시 측정·조사하고 기상현상에 대한 관측·예측·제공·활용 능력을 높이며 기후위기에 대한 감시·예측의 정확도를 향상시키는 기상정보관리체계를 구축·운영하여야 하며, 기후위기가 생태계, 생물다양성, 대기, 물환경, 보건, 농림·식품, 산림, 해양·수산, 산업, 방재 등에 미치는 영향과 취약성, 위험 및 사회적·경제적 파급효과를 조사·평가하는 기후위기 적응 정보관리체계를 구축·운영하여야 한다(ME, 2022a). 이에 따라 환경부장관 및 기상청장은 대기 중의 온실가스 농도 변화를 상시 측정·조사하여 해당 정보를 환경부와 기상청의 인터넷 홈페이지에 각각 공개해야 한다(시행령 40조)(ME, 2022b). 온실가스는 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 수소불화탄소, 과불화탄소, 육불화황, 기후·생태계 변화유발물질은 염화불화탄소와 수소염

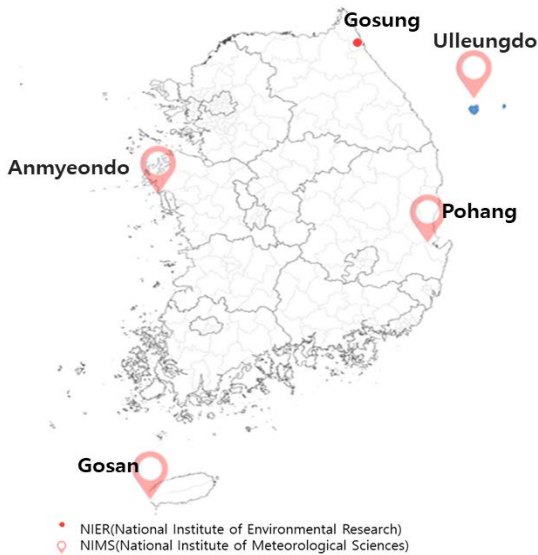


Fig. 4. Greenhouse gas monitoring station for climate change surveillance.

화불화탄소이다.

현재 우리나라 배경지역에서는 환경부(국립환경과학원) 1개소와 기상청(국립기상과학원) 4개소에서 기후변화 감시 목적으로 온실가스를 측정하고 있다(그림 4). 도시지역에서는 국립환경과학원이 대기환경연구소 4개소에서 이산화탄소와 메탄을 측정하고 있으며(NIER, 2023, 2022b), 서울시 등의 지방정부, 산림청, 농진청 등의 기관에서도 각각 산림과 농축산에서 발생하는 온실가스를 측정하고 있다. 그러나 이들 자료는 각 기관에서만 사용되고 있어, 그 활용도가 낮은 편이다.

5.3 미국의 온실가스 측정망 운영현황

5.3.1 미국 온실가스 측정망의 부처 간 협업체계

미국 EPA는 화력발전소, 공장 및 자동차에서 화석 연료의 연소로 배출되는 CO₂를 포함한 6가지 온실가스를 CAA (Clean Air Act)의 규제물질로 추가하여 대기오염물질과 통합적으로 관리하고자 하고 있다. 미국 국립해양대기청(NOAA)의 Global Greenhouse Gas Reference Network (GGGRN)은 온실가스 현장

모니터링을 위한 네트워크를 운영한다. 그 외 NOAA ESRL (Earth System Research Laboratory)의 고층 타워 온실가스 관측 네트워크(Tall Tower Greenhouse Gas Observing Network)에서 CO₂, CO 및 CH₄를 측정하고 있다(Andrews *et al.*, 2013). 또한 미국 국립과학재단(NSF) 네트워크의 국립생태관측망(NEON)에는 47개의 육상(terrestrial) 기지와 34개의 수변 관측소(freshwater aquatic sites)를 포함하여 총 81개의 현장 관측소에서, 생태 기후에서의 메탄 관측을 수행하고 있으며, NASA OCO (Orbiting Carbon Observatory)와 TCCON (Total Carbon Column Observation Network)은 온실가스의 위성 관측 및 지상 보정을 수행하고 있다(Wunch *et al.*, 2011).

2023년 미국 백악관에서 발간한 미국 통합 온실가스 측정, 모니터링 및 워킹그룹에서 발간한 국가 전략 보고서(National Strategy to Advance an Integrated U.S. Greenhouse Gas Measurement, Monitoring, and Information System)를 보면 미국의 온실가스 측정, 모니터링 통합체계를 계획하고 있다(The White House, 2023). 보고서에 따르면 온실가스 통합모니터링 체계의 구체적인 주요 목표는 1) 활동 기반 GHG 정량화 개선, 2) 대기 측정 기반 GHG 정량화 개선(대기 중 GHG 농도 데이터를 배출 데이터로 변환하는 방법론을 개선, 정확성과 범위를 높이기 위해 GHG 원격 탐지 기술 투자), 3) 상향(활동량 기반) 및 하향(대기 측정) 기반 접근법 조정(두 가지 접근법을 사용하여 GHG 추정치를 상호 검증하고 개선), 4) 데이터 지원, 완전성, 상호 운용성 및 접근성 개선(다양한 데이터 세트 및 시각화를 제공하는 GHG 데이터 포털을 개발), 5) 정기적인 이해관계자와 소통, 6) 과학 기반 표준 개발 지원(다양한 플랫폼과 방법을 통해 일관되고 정확한 GHG 측정을 보장하는 표준의 생성과 채택을 지원) 등이다. 이를 위해 우선적으로 기존의 연방 및 비연방 GHG 측정 및 모니터링 체계를 통합하고, 다양한 기관 간의 조정을 위한 미국 온실가스 센터를 설립하여, 도시 규모의 GHG 모니터링 프로토타입을 개발하는 단기적 시범 프로젝트를 시작하고자 하고 있다.

이를 위해 미국은 GHGMMIS (U.S. Greenhouse Gas Measurement, Monitoring, and Information System) 체계를 계획하고 있는데 GHGMMIS는 미국의 온실가스(GHG) 배출 및 제거를 측정, 모니터링 및 정보를 제공하는 통합 시스템으로, 이 시스템은 활동 기반 데이터와 대기 기반 데이터를 활용하여 고품질의 GHG 정보를 제공하는 것을 목적으로 한다.

GHGMMIS의 주요 운영 기관인 ghg center (U.S. Greenhouse Gas Center, <https://earth.gov/ghgcenter>)는 GGHGMMIS의 목표와 기능을 실현하기 위해 핵심적인 역할을 수행한다(The White House, 2023). GHGMMIS는 ghg center를 포함하여 다양한 기관과 협력하여 GHG 데이터를 통합하고 배포한다. 이를 통해 NASA, EPA, NIST, NOAA가 주도하여 센터를 운영하고, 연방 및 비연방, 국내 및 국제 기관 간의 협력을 촉진하고, 다양한 GHG 데이터 세트와 시각화를 제공하는 온라인 포털을 개발하여 정책 입안자와 대중에게 접근성을 제공하며, 일관되고 정확한 GHG 측정을 위한 과학 기반의 표준을 지원하고 개발할 계획이다. 그 외 지상 및 항공 관측을 통해 위성 데이터의 정확성을 검증하고 개선하려 하고 있다. 예를 들어 USDA (미국 농무부)는 장기 관측 네트워크를 지원하고, 산림 및 농업 부문의 GHG 배출 및 제거를 모니터링하는 역할을 하고 NIST (국립표준기술연구소)는 도시 테스트베드 프로그램 (Urban Testbed Program)를 통해 대학, 연방부처, 민간 영역과 협력하여 도시의 GHG 배출량을 예측하고 대기 중 GHG 농도를 측정한다(USDA, 2024; The White House, 2023).

5.3.2 도심 규모의 온실가스 측정

도시 규모 GHGMMIS 체계의 구축사례 (Urban-Scale Prototype of the U.S. GHGMMIS Framework)를 살펴보면, 우선 NOAA의 대기자원연구소(Air Resources Laboratory, ARL)는 다른 연구소 및 국립표준기술연구소(NIST)와 협력하여 Urban-GEMMS (Greenhouse gas Emissions Monitoring and Modeling System)를 개발 중이다. 이 시스템은 미국의 도시지역, 특히 워

싱턴 DC-볼티모어 지역의 온실가스(GHG) 배출을 측정하고 모델링한다. 향후 다른 도시 및 더 큰 규모로 확장할 계획이다(<https://www.arl.noaa.gov/research/atmospheric-transport-and-dispersion/urban-gemms/>).

Urban-GEMMS의 주요 목표는 데이터 수집과 GHG 배출 추정치 제공 간의 시차를 줄이는 것이다. 이 시스템은 기존 배출 추정 방법을 보완하며 독립적인 품질 관리를 제공한다.

CO₂-USA urban greenhouse gas monitoring networks는 미국의 다양한 연구 기관, 정부 기관, 그리고 대학들이 협력하여 미국 전역의 도시와 특정 지역에서 이산화탄소의 농도를 모니터링하는 네트워크를 운영한다. 현재 8개 도시에서 여러 센서를 사용하여 대기 중의 CO₂ 농도를 실시간으로 측정하고, 측정된 데이터를 수집하고 분석하여, CO₂ 농도의 변화와 추세를 파악한다. 이 프로젝트는 커뮤니티와 정책 입안자의 요구를 파악하는 워크숍, CO₂, CH₄, CO의 대기 데이터 세트 구축, 배출량 인벤토리 개발, 대기 모델 업데이트를 포함하며, 이를 통해 도시 탄소 배출을 추정하고, 결과를 이해관계자와 공유한다(Xiong *et al.*, 2023; Mitchell *et al.*, 2022).

5.4 EU의 온실가스 측정망

5.4.1 ICOS 개요

통합탄소관측시스템(ICOS)은 유럽의 온실가스 균형을 측정하고 이해하기 위한 연구 인프라로, 2015년 11월에 유럽연구인프라컨소시엄(ERIC)으로 지정되었다. ICOS는 고정밀, 장기적인 온실가스 농도와 플럭스를 모니터링하며, 이를 통해 대기와 지상 관측 데이터를 통합하여 탄소 플럭스를 평가하고, 대기, 육지, 해양 간의 교환 과정을 이해하는 데 도움을 준다.

ICOS는 데이터 동화 모델 개발을 지원하며, 원격 탐사 제품의 검증을 돕는 기능을 하며, 2022년 현재 12개 회원국을 포함하며, 140여 개 관측소가 운영 중으로 회원국 및 관측소 수는 계속 증가하고 있다(Heiskanen *et al.*, 2022).

5.4.2 도심 규모의 온실가스 측정: ICOS Cities

ICOS Cities는 도시 환경에서의 온실가스 모니터링과 연구를 목표로 하는 프로젝트로, ICOS (Integrated Carbon Observation System) 네트워크의 일환으로 진행되고 있다(ICOS, 2021). 주요 목표는 1) 도시지역에서 온실가스의 농도와 배출원을 정확하게 측정하고 모니터링하여, 도시 환경의 기후변화 영향을 평가, 2) 정책 지원 및 조정: 수집된 데이터를 기반으로 도시의 기후 정책을 조정하고, 온실가스 감축을 위한 전략을 개발, 3) 도시 환경에서의 모니터링을 위한 새로운 기술과 방법론을 연구하고, 이를 ICOS 네트워크와 통합하여 보다 정확한 데이터를 제공하는 것이다.

다양한 측정 기술과 전략을 통해 ICOS Cities 프로젝트는 도시의 온실가스 배출을 효과적으로 모니터링하고, 기후변화 대응을 위한 중요한 정보를 제공한다. 참여하는 시범 도시는 그림 5에서 보듯이 파리(Paris), 뮌헨(Munich), 취리히(Zurich)이며, 네트워크 도시로 앤트워프(Antwerp), 바르셀로나(Barcelona), 코펜하겐(Copenhagen) 등 12개 도시가 참여하고 있다. 고층 타워 농도 (high-precision tall tower concentrations), 거리 수준 네트워크 (roof- and street-level networks), 위성 관측 (satellite total column observations) 등 다양한 기술을 사용하며, 고해상도 (high-resolution)의 도시 배출 인벤토리의 제공과 기후 거버넌스 구조 (climate governance structures) 분석에 중점을 두고 있다 (ICOS, 2021).



Fig. 5. ICOS Cities network (<https://www.icos-cp.eu/projects/icos-cities>).

5.5 일본의 온실가스 측정망

일본 역시 파리 협정의 장기 목표를 달성하기 위해 온실가스 (GHG) 배출량 모니터링과 평가를 위해 다양한 관측 플랫폼 (위성, 항공기, 선박, 지상 관측소 등)을 운영하고 있다 (JACCO, 2020; OCCCO, 2018). 일본의 지상 기반 GHG 모니터링은 일본 기상청 (JMA)과 국립환경연구소 (NIES) 등 여러 기관에 의해 수행되고 있으며, 다양한 지상 관측소에서 CO₂를 포함한 여러 GHG의 농도를 모니터링하고 있다. 이 데이터는 WDCGG (World Data Centre for Greenhouse Gases) 및 NIES 웹사이트를 통해 공개된다.

JMA은 1987년부터 CO₂ 모니터링을 시작했으며, 일본의 여러 지역에서 지속적으로 온실가스를 관측하고 있다. 또한 JMA와 NIES는 서태평양과 일본-동남아시아 항로에서 연구선을 통해 해양 표면 CO₂를 모니터링하고 있으며, 이를 통해 대기-해양 CO₂ 교환 및 해양 산성화를 평가한다. JAMSTEC은 대형 연구선 R/V (research vessel) Mirai을 운영하며, 지구 온난화의 영향을 밝히기 위해 대기와 해수의 CO₂ 농도를 관측하고 있다 (JAMSTEC, 2023). 또한 CONTRAIL (Comprehensive Observation Network for TRace gases by AirLiner) 프로젝트를 통하여 상용 항공기를 활용하여 대기 중 CO₂ 및 기타 GHG를 관측하여 관측 빈도와 지리적 범위를 크게 향상시키고 있다 (<https://www.cger.nies.go.jp/contrail/index.html>). JMA는 방위성의 지원을 받아 정기적으로 항공기를 통해 대기 상부의 GHG를 관측한다. 위성 기반 모니터링 체계를 보면, 세계 최초의 GHG 관측 위성인 GOSAT/GOSAT-2를 통해 대기 중 CO₂와 CH₄ 농도를 측정하고 있다.

5.6 중국의 온실가스 측정망

중국의 온실가스 측정망은 중국 기상청 (CMA) 위주의 CGHNET (China's Greenhouse Gas Observation Network)과 환경생태부 산하 CNEMC (China National Environmental Monitoring Center)에서 관리하는 온실가스 네트워크로 구분된다. CMA는

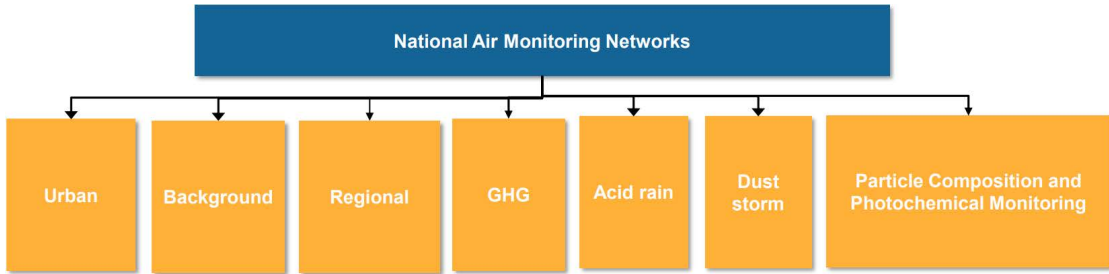


Fig. 6. China's Air Quality Monitoring Network (GHG: Greenhouse Gas Measurement Network within the Air Quality Monitoring System).

CGHGNET (중국 온실가스 관측 네트워크)을 운영하고 있다. CGHGNET에는 2023년 현재 59개의 현장 CO₂ 관측소가 있으며, 이 중 39개는 2018~2021년 동안 고품질의 비교적 완전한 데이터를 제공하여 역산 모델링 (inverse modelling)에 사용하고 있다. 39개 관측소는 7개의 GAW 글로벌/지역 배경 관측소와 CO₂ 배출량이 국가 총 배출량의 60% 이상을 차지하는 중부 동부 (Central East China, CEC)의 23개 관측소를 포함한다. 이들 관측소는 CO₂ 농도를 매시간 측정하며, 그 외 허베이 (Hebei)의 진샤 (Jinsha)와 신장 (Xinjiang)의 아케달라 (Akedala)의 두 관측소는 주간 플라스크 측정을 실시한다. 모니터링 사이트는 최근 급속히 증가하고 있으나, 농촌 및 서부 지역 모니터링 수는 중부 및 동부 지역에 비하여 부족하여 해당 지역 GHG 모니터링 측정소의 수를 확대할 필요성이 제기되고 있다 (Li *et al.*, 2024; Zhong *et al.*, 2023; Sun *et al.*, 2022).

CGHGNET과 별개로 중국 국가 환경 모니터링 센터 (China National Environmental Monitoring Center, CNEMC)는 중국 환경생태부 산하의 대기환경 모니터링 기관으로, 광범위한 대기질 측정 네트워크를 운영하고 있는데 이 중 약 16개는 온실가스를 포함한 다양한 대기오염물질을 측정한다 (그림 6). CNEMC의 온실가스 측정소는 온실가스 농도를 포함한 종합적인 대기환경 데이터를 제공할 수 있다. CGHGNET는 CO₂ 전용 관측소를 운영하며, CO₂의 배출원 및 흡수원을 정밀하게 모니터링하여 상향식 및 하향식으로 데이터를 분석하는 역할을 하는 반면, CNEMC의

대기질 측정 네트워크는 대기질과 온실가스를 종합적으로 측정하고, 동시에 대기환경 데이터를 제공할 수 있다.

5.7 국가별 온실가스 측정망체계를 통한 시사점

이상의 온실가스 측정망체계에서 볼 수 있듯이 각국은 온실가스 측정체계를 지속적으로 확충하고 있다. 미국은 EPA, NOAA, NASA 등 여러 기관이 협력하여 온실가스 배출량을 모니터링하고, GHGMMIS 시스템을 통해 통합 관리하는 체계를 구축하고 있으며, EU는 ICOS 네트워크를 통해 고정밀 온실가스 농도와 플럭스를 모니터링하며, 도시별로도 세부적인 관측을 실시하고 있다. 일본은 JMA와 NIES가 주도하여 지상 관측소와 위성을 통해 온실가스를 모니터링하며, CONTRAIL 프로젝트를 통해 항공기 기반 관측을 수행하고 있으며, 중국은 CMA와 CNEMC가 각각 CGHGNET과 종합 대기질 측정 네트워크를 운영하여 온실가스를 모니터링하고 있다. 표 11은 각 국가별 온실가스 측정 현황과 기관 운영 현황을 보여주고 있다. 최근 들어 도시지역 온실가스 측정의 중요성이 강조되면서 미국과 유럽은 도시지역 온실가스 측정망을 구축하거나 관련한 프로젝트를 통해 도시지역 온실가스 측정체계를 고도화 하고 있다.

반면 중국과 일본은 온실가스 측정 주체에 있어서 이원화된 경향을 보이는데 이는 우리나라와 비슷한 측면이 있다. 예를 들어, 중국의 경우 중국 기상청 (CMA)이 운영하는 CCHGNET과는 독립적으로

CNEMC에서 운영하는 대기질 측정체계에 온실가스 측정망이 편입되어 있다. 우리나라의 경우 배경대기의 온실가스는 기상청을 중심으로 측정이 이루어져 온 반면, 도시지역 온실가스는 환경부가 주관이 되어 측정체계 구축을 계획하고 있다(NIER, 2022b). 이러

한 다분화된 온실가스 관리체계는 측정목적에 따른 전문성을 제고할 수 있고, 기존 측정체계를 유지한다는 점에서 장점이 될 수 있으나, 대기오염과 온실가스의 통합관리, 도시와 교외, 배경대기 등 다양한 배출원에 대한 종합적 관리 등의 측면에서 이들 측정체계를

Table 11. Greenhouse gas monitoring networks/programs by country.

Country	Agency	Program	Contents	Sites
USA	NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)	GGGRN (Global Greenhouse gas reference network) https://gml.noaa.gov/ccgg/about.html	Long-term monitoring of major greenhouse gases (carbon dioxide and methane)	Continuous in-situ measurements (4 baseline background sites) 8 tall towers, flask-air samples (50 regional background site)
	NOAA, NASA, DOE (Department of Energy)	AGAGE https://www-air.larc.nasa.gov/missions/agage/ , TCCON https://tccon.caltech.edu/	<ul style="list-style-type: none"> AGAGE: Long-term monitoring of atmospheric composition globally TCCON: Global monitoring of greenhouse gas concentrations using FTIR 	Global Network
	NIST (National Institute of Standards and Technology)	Urban Test bed program https://www.nist.gov/greenhouse-gas-measurements/urban-test-beds	Prediction of greenhouse gas emissions and measurement of atmospheric concentrations within the city	29 NEC network observation stations operating in 7 cities, including Indianapolis and Los Angeles
	NASA	OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2) https://ocov2.jpl.nasa.gov/	Analysis of greenhouse gas fluxes and concentrations using satellite data	Global
EU	ICOS ERIC (European Research Infrastructures created by the European Commission)	ICOS (Integrated Carbon Observation System) https://www.icos-cp.eu/	Monitoring carbon cycles and greenhouse gases in Europe, collecting continental-scale GHG flux data	More than 140 observation stations across Europe
	ICOS ERIC	ICOS-Cities https://www.icos-cp.eu/projects/icos-cities	Precisely monitoring greenhouse gas emissions and absorption within the city to support urban greenhouse gas management and policy development	Pilot cities (Paris, Helsinki, and Zurich) operating with 12 Network cities
	ESA (European Space Agency)	CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) https://atmosphere.copernicus.eu/	Monitoring atmospheric greenhouse gas concentrations using satellite data.	Global

Table 11. Continued.

Country	Agency	Program	Contents	Sites
Japan	JMA (Japan Meteorological Agency)	JMA greenhouse gas observation stations https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ghg_obs/en/station/	Measurement of CO ₂ and other GHG concentrations, study of air-sea CO ₂ exchange and ocean acidification, and aerial observations	<ul style="list-style-type: none"> • Ryor (RYO)i: The first GAW (Global Atmosphere Watch) regional observatory in Japan, from 1987. • Minamitorishima (MNM): A GAW global observatory. • Yonagunijima (YON): A GAW regional observatory.
	NIES (National Institute for Environmental Studies)	Ground-based measurement network https://db.cger.nies.go.jp/ged/ja/ Satellite measurement (GOSAT) https://www.gosat.nies.go.jp/en/about_%ef%bc%92_observe.html	Analysis of changes in the mixing ratios and isotopic ratios of GHGs and other related atmospheric species	Cape Ochiishi Hateruma Island Mt. Fuji Global
China	CMA (China Meteorological Administration)	CGHGNET	Nationwide measurement of greenhouse gas concentrations and estimation of emissions, precise analysis of CO ₂ concentrations	More than 50 measurement stations nationwide
	CNEMC (China National Environmental Monitoring Center)/ MEE (Ministry of Ecology and Environment)	National greenhouse gas measurement network.	Contributing to greenhouse gas monitoring in China, enhancing the accuracy and scope of data, and supporting national air quality management and policy development.	Comprehensive air quality data and greenhouse gas measurements provided from over 10 monitoring stations
	CAS (Chinese Academy of Sciences)	TanSat (Chinese Carbon Dioxide Observation Satellite Mission)	Measurement of CO ₂ concentrations in the atmosphere, as well as greenhouse gas concentrations and fluxes at urban and regional levels	Global

어떻게 통합적으로 관리하는 것이 효율적인가에 대해서는 고민이 필요하다. 예를 들어 기존의 대기질 측정망에 온실가스 측정망을 편입시키는 문제는 이러한 측정체계의 관리 주체의 문제와 관련이 된다. 특히 배경대기의 온실가스 측정은 글로벌 네트워크(WMO의 GAW)에 편입되어 있는 특징도 고려가 필요하다.

6. 결론 및 제언

대기질 측정망은 공공 건강 보호, 환경 보호, 정책 수립 지원, 지역별 특성에 맞춘 관리, 환경 인식 제고 등 다양한 목적을 가지고 운영되고 있으며, 그 활용도는 더욱 확대되고 있다. 측정 모니터링 체계는 국가별

로 대기관리 및 운용의 주체가 달라 각 국가별 상황을 고려하여, 우리나라 현황에 맞는 체계에 참조하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 미국, EU, 일본, 중국 등의 해외 대기질 모니터링 체계 및 운영 목적 등을 검토하였다. 이상의 사례를 볼 때 대기질 측정망은 각 국가별 고유의 체계를 가지고 있음을 알 수 있다. 미국의 측정망은 관리, 정도관리(QA/QC), 각종 아카이브(Archive)와 매뉴얼 등이 미국의 CFR에 근거하여 구체적이고 체계적으로 정리되어 있다. 관리체계에 있어서는 EPA-주(State)-지역(Local)-부족(Tribes)으로 구성되어 있고 행정체제와 위수임 업무와 관련된 권한과 책임이 달라 운영체제 자체를 우리나라에 바로 적용하는 것은 한계가 있다. EU는 EMEP, Euroairnet 등의 대기측정망체계를 참조할 수 있다. EU의 경우 국가 간 연합 네트워크 체계로 구성되어 있어 국가별 체계를 직접 비교하기에는 한계가 있다. 다만, QA/QC나 자료 공개 시스템은 국내 활용 사례를 검토할 수 있을 것으로 사료된다. 중국의 경우 대기오염에 대한 관심 증대와 더불어 2005년 이후 급격한 측정망 증가 및 모니터링 체계를 구축하고 있다. 전술한 국외사례를 바탕으로 한 우리나라의 측정망 관리체계에 대한 시사점을 다음과 같이 제한할 수 있다.

(1) 측정망 설치 목적에 대한 확대적 비전 제시가 필요하다. 우리나라는 대기환경보전법에 전국적인 대기오염 실태를 파악하기 위해 대기오염물질 측정장비를 설치·운영함을 명시하고 있다. 측정망의 기능 및 역할의 중요성이 더욱 증가하고 있으며 이에 대한 중요성을 강조하는 다른 나라와 비교해 볼 때, 우리나라의 측정망 설치 목적은 주로 실태 파악에 집중되어 있다. 물론 실태 파악은 건강영향평가, 과학적 검증 등 다른 측정망 운영의 목적의 기반이 되지만, 예를 들어 연구 목적의 측정기능 확대 등 대기질 측정의 활용 범위를 확대하기 위해서는 기존의 측정망 개념 및 설치 목적 등 측정망체계의 역할 확대(기존의 측정망 개념 확대, 역할 확대)가 필요하다.

(2) 유연하고 효율적인 측정체계의 구축을 고려할 필요가 있다. 예컨대 측정항목의 유연화, 동일 측정소 내 다양한 측정망 통합, 기관 간의 협력체계 강화, 그

리고 연구 목적 확대 등을 들 수 있다. 이를 항목별로 개괄하여 보면 다음과 같다.

(가) 우리나라의 경우 측정항목이 아닌 측정망 중심의 운영체계를 가지고 있어 일반 측정망 내 동일한 측정항목을 운영하고 있다. 이는 통계적 신뢰성과 일관성을 유지하는 장점을 가지고 있지만, 측정지점이 다른 나라에 비하여 월등히 많은 상황을 고려한다면, 모든 일반 측정망을 동일하게 측정하기보다는 지역, 측정물질의 특징에 따라 측정항목을 달리하는 측정소의 운영을 검토할 필요가 있다. 통계적 혹은 공간적 대표성을 확보하기 위한 측정망과 지역과 오염물질의 특성을 파악하는 측정망을 활용 시 구분하는 방법도 가능하다. 일본이나 미국의 경우 이러한 체계를 유지하고 있다.

(나) 측정항목을 달리하는 측정소의 운영은 미국의 Ncore 사례에서 볼 수 있듯이 동일한 측정소에 여러 측정망을 운영함으로써 측정자료의 활용도를 높이는 것이 바람직하다. NCore 다중 오염물질 측정소는 여러 모니터링 네트워크와 측정을 통합하기 위해 모든 주에서 최소한 하나의 NCore 사이트를 운영하고 있다. 우리나라도 종합대기측정소가 이러한 통합 측정소의 역할을 어느 정도 수행하고 있고, 대기환경연구소는 도시대기 측정망, 도시중금속 측정망, PM-2.5 성분측정망에서 측정하는 항목을 측정하고 있다. 이러한 통합 측정소의 운영과 자료 공유를 통해 측정자료 활용의 효율화 및 활용도를 제고할 수 있다.

(다) 대기질 측정망의 주요 목적 중 하나인 대기 모델의 검증 능력을 강화하고 건강에 영향을 미치는 다양한 오염물질의 현황을 파악하기 위해서는 기존 측정망을 유지하고 관측지점을 확대시키는 것에서 더 나아가 다양한 연구 목적의 측정을 강화하고 기존 측정망과의 연계 활용을 강화하는 것이다. EU의 경우, ACTRIS (Aerosol, Clouds, Trace gases Research Infrastructure, <https://www.actris.eu/>), 미국의 경우, 정부지원 하에 대학, 연구기관 등이 협업하여 ASCENT (Atmospheric Science

and Chemistry mEasurement NeTwork, <https://ascend.research.gatech.edu>) 등과 같이 다양한 측정기에 대한 연구 프로그램이 진행되고 있으며, 국립환경과학원의 대기환경연구소가 이와 같은 기능을 하고 있다. 이와 같은 사례를 참조하여 볼 때 향후 지속적으로 대기질 측정에 있어서의 연구기능의 확대가 필요하다.

(3) 시민 참여 측정의 확대가 중요하다. 미국이나 유럽의 경우 이미 시민과학자(citizen science) 프로그램의 확대 등을 통하여, 대기질 모니터링에 있어서의 시민 참여를 확대하고 있다(Picciano *et al.*, 2023). 이를 통해 공식적 대기측정망에 의한 대기질 측정 결과를 보완하고, 시민들이 대기질 개선을 위해 자동차 사용을 자발적으로 자제하는 등 중요한 행동의 변화를 유도하고 있다. 이러한 시민과학운동(citizen science initiative)은 대기질 측정과 대기질 정책의 패러다임을 바꿀 수도 있을 것으로 기대된다(EEA, 2020). 유럽 환경청(EEA)과 유럽환경보호기관네트워크(EPAs: European Network of Heads of Environmental Protection Agencies)는 2018년부터 시민들을 참여시켜 학교의 공기질을 측정하는 프로그램(Citizen Science Initiative: Clean Air@School)을 진행하고 있다. 유럽 환경청(EEA)은 참가자들이 학교에서 측정한 공기질 데이터를 온라인으로 공개하고, 이를 학교 인근의 기존 공기질 측정소(air quality measurement station)에서 측정된 공기질 데이터와 비교·분석하고 있다. 미국 EPA는 2022년 11월 3일 EPA 역사상 최대 규모의 지역사회 대기 모니터링에 대한 투자를 발표했다. 이를 통해 37개 주의 대기 모니터링 프로젝트가 바이든 대통령의 인플레이션 감축법(Inflation Reduction Act)과 미국 구조 계획(American Rescue Plan)으로부터 5,340만 달러의 지원을 받게 되었다(USEPA, 2024c). EPA는 환경 정의의 차원에서 서비스가 부족하고, 역사적으로 소외되고, 오염으로 인해 과중한 부담을 느끼는 지역사회에 초점을 맞춘 프로젝트를 선정했다(https://gispub.epa.gov/air/trendsreport/2023/#monitor_grants). 정확성과 일관성의 측면에서 시민 참여 측정이 기존 측정망을 대체하기는 힘들지만 측정의 목적

을 조금 확대하여 본다면 low-cost sensor를 활용한 시민 참여 측정은 대기질 개선에 대한 국민의 관심도 증대와 시공간적 자료 확대 등의 많은 긍정적인 효과를 가지고 있다. 따라서 중장기적으로 이러한 시민 참여 대기질 측정체계를 고려하고 활용도를 구상할 필요가 있다.

(4) 수직 증가 위주의 측정망 확대는 신중한 고려가 필요하다. 양질의 자료를 생산하는 데 제한된 자원을 집중하는 것이 효율적일 수 있다. 우리나라와 같이 측정망 수가 많은 상황에서도 더 많은 측정소가 요구되는 이유는 지역사회의 대기질에 대한 정보 제공의 수요가 있기 때문이다. 이러한 목적의 측정 및 활용에 대해서는 지역사회 모니터링(community monitoring)의 예를 참조할 필요가 있다. 미국의 사례에서 볼 수 있듯이, 저비용(Low-cost) 센서를 활용한 지역사회 모니터링 체계를 구축하고 이를 지역 주민의 대기질 관련 정보 제공으로 활용하되, 일정 수준의 질적 관리가 될 수 있도록 하는 것이 바람직할 수 있다.

(5) 온실가스 측정망, 특히 도시지역 온실가스 측정의 중요성은 계속 증가하고 있다. 여러 가지 상황으로 볼 때 이러한 측정망의 증가는 필수 불가결할 것으로 보인다. 다만 온실가스 측정망 구성의 목적과 활용방안을 구체화할 필요가 있다. 도시 이외의 지역으로 배출이 집중된 산업단지를 중심으로 하는 배출 집중지역을 위한 온실가스 측정망 구축도 고려해 볼 필요가 있다. 주요 배출원 특성에 따른 온실가스 측정망은 기존 배출량 중심의 상향식 온실가스 배출량 보정에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 온실가스 측정망은 온실가스 농도의 현황을 파악하는 목적 외 배출량을 하향식으로 검증하는 목적과 모델링의 고도화에 유용하게 활용될 수 있다.

(6) 도시 온실가스 측정망이 공간적 구성에 있어서는 국가별로 기존 대기오염 측정망에 온실가스 측정소를 추가하는 방법과 독립적인 네트워크를 구성하는 방법을 고려할 수 있다. 대부분의 국가에서 현재 측정망은 운영 및 관리 주체가 상이하여 대기오염 측정망과 통합관리되지 않는 것으로 보인다. 예를 들어, 중국의 경우 온실가스 측정망이 포함되어 있으나, 중국

기상청 중심의 온실가스 네트워크가 독자적으로 존재한다. 유럽의 경우 역시 대기질 측정 네트워크인 Euroairnet과 온실가스 측정을 담당하는 ICOS는 독립적으로 운영되는 것으로 보인다. 미국의 경우 다양한 측정망의 통합관리를 위한 계획을 수립하고 있으며, 이를 위한 조직체계 등이 정비되고 있다. 이러한 측면에서 온실가스 연구 및 모니터링에 있어서 관계 기관 간의 협업은 매우 중요하다. 우리나라의 환경부는 국립농업과학원, 국립생태원, 국립축산과학원 등 유관기관과 연구협체제를 구성하는 등 협업체계 구축 노력을 하고 있으나 보다 광범위한 협업체계의 구성이 필요하다. 일본의 Japanese Alliance for Climate Change Observation (JACCO) 역시 이러한 협업체계 구성의 예를 보여준다. 관계기관 간 협업은 단순한 기관 간 정보 교환의 차원을 넘어서 온실가스 측정과 배출량 자료 검증 등 배출량-농도 연계 사업을 비롯하여, 다양한 배출원에서의 배출 특성, 측정자료 등을 통합된 관리체계를 구축하는 것을 목표로 하여야 한다. 각 기관 간 이해관계를 통합 조정하기 위해서는 미국의 온실가스 센터(The White House, 2023; <https://earth.gov/ghgcenter>)와 같은 기관 차원을 넘어서선 통합된 기구의 운영도 고려해 볼 필요가 있다. 최적화된 측정망의 수는 온실가스 측정소의 목적을 고려하여 결정해 볼 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원의 “대기환경측정망 운영계획(2026~2030) 수립을 위한 기획 연구(과제번호 202404046CF-00)” 지원으로 수행되었습니다.

References

- Andrews, A., Kofler, J., Trudeau, M., Williams, J., Neff, D., Masarie, K., Chao, D., Kitzis, D., Novelli, P., Zhao, C., Dlugokencky, E., Lang, P., Crotwell, M., Fischer, Marc, Parker, M., Lee, J., Baumann, D., Desai, A., Stanier, C., De Wekker, S., Wolfe, D., Munger, J.W., Tans, P. (2013) CO₂, CO and CH₄ measurements from the NOAA Earth System Research Laboratory's Tall Tower Greenhouse Gas Observing Network: Instrumentation, uncertainty analysis and recommendations for future high-accuracy greenhouse gas monitoring efforts, *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 6, 1461-1553. <https://doi.org/10.5194/amtd-6-1461-2013>
- Bunge, M. (1983) *Treatise on basic philosophy - Vol. 6, epistemology and methodology II: Understanding the world*. Reidel.
- European Commission (EC) (2008) Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe, *Official Journal of the European Union L*, 152, 1-44.
- Economic Commission for Europe (ECE) (1998a) Executive Body for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, The 1998 Protocol on Heavy Metals. https://unece.org/sites/default/files/2021-10/ECE.EB_AIR_115_ENG.pdf
- Economic Commission for Europe (ECE) (1998b) Executive Body for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, The 1998 Protocol on Persistent Organic Pollutants. https://unece.org/sites/default/files/2021-10/ece.eb_air_104.e.pdf
- European Environment Agency (EEA) (2019) *Air Quality Monitoring in Europe*.
- European Environment Agency (EEA) (2020) *Air quality in Europe - 2020 report*. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report>
- European Environment Agency (EEA) (2024) *Europe's air quality status 2024*. <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2024>
- European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) (1979) *Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP)*, UNECE. <https://unece.org/environment-policy/air>
- Gallagher, C.L., Holloway, T. (2022) U.S. decarbonization impacts on air quality and environmental justice, *Environmental Research Letters*, 17, 114018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac99ef>
- Hacking, I. (1983) *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Heiskanen, J., Brümmner, C., Buchmann, N., Calfapietra, C., Chen, H., Gielen, B., Gkritzalis, T., Hammer, S., Hartman, S., Herbst, M., Janssens, I.A., Jordan, A., Juurola, E., Karskens, U., Kasurinen, V., Kruijt, B., Lankreijer, H., Levin, I.,

- Linderson, M., Loustau, D., Merbold, L., Myhre, C.L., Papale, D., Pavelka, M., Pilegaard, K., Ramonet, M., Rebmann, C., Rinne, J., Rivier, L., Saltikoff, E., Sanders, R., Steinbacher, M., Steinhoff, T., Watson, A., Vermeulen, A.T., Vesala, T., Vitkova, G., Kutsch, W. (2022) The Integrated Carbon Observation System in Europe, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(3), E855-E872. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0364.1>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022) *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*, Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/> (accessed on Aug. 23, 2024).
- Integrated Carbon Observation System (ICOS) (2015) *Integrated Carbon Observation System (ICOS) Research Infrastructure*, Integrated Carbon Observation System, (accessed on Aug. 23, 2024).
- Integrated Carbon Observation System (ICOS) (2020) *Integrated Carbon Observation System Annual Report*. Integrated Carbon Observation System, (accessed on Aug. 23, 2024).
- Integrated Carbon Observation System (ICOS) (2021) *ICOS Cities: Towards Integrated City Observatories for Greenhouse Gases (PAUL)*, Integrated Carbon Observation System, (accessed on Aug. 23, 2024).
- International Organization for Standardization (2015) *ISO 9001: 2015 Quality management systems - Requirements*. Geneva, Switzerland, (accessed on Aug. 23, 2024).
- Ito, A., Wakamatsu, S., Morikawa, T., Kobayashi, S. (2021) 30 years of air quality trends in Japan, *Atmosphere*, 12(8), 1072. <https://doi.org/10.3390/atmos12081072>
- Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) (2023) *Atmospheric and Oceanic CO₂ Concentration Observations*, JAMSTEC. <https://www.jamstec.go.jp/e/> (accessed on Aug. 23, 2024).
- Japanese Alliance for Climate Change Observation (JACCO) (2020) *Japanese Alliance for Climate Change Observation Report*, JACCO.
- Jutze, R.E., Tabor, J.E. (1963) Continuous Air Monitoring Program (CAMP), *Journal of the Air Pollution Control Association*, 13(2), 84-91.
- Joo, S., Lee, H., Hong, J., Kwon, D., Shim, C., Oh, Y., Li, S., Kenea, S.T., Lee, S., Kim, J.E., Boo, K.O. (2022) Consideration of Top-down Greenhouse Gas Estimation Approaches to Prepare Carbon Neutral Policy, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(6), 933-947. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.6.933>
- Kong, L., Tang, X., Zhu, J., Wang, Z., Li, J., Wu, H., Wu, Q., Chen, H., Zhu, L., Wang, W., Liu, B., Wang, Q., Chen, D., Pan, Y., Song, T., Li, F., Zheng, H., Jia, G., Lu, M., Wu, L., Carmichael, G.R. (2021) A 6-year-long (2013-2018) high-resolution air quality reanalysis dataset in China based on the assimilation of surface observations from CNEMC, *Earth System Science Data*, 13, 529-570. <https://doi.org/10.5194/essd-13-529-2021>
- Laj, P., Myhre, C.L., Riffault, V., Amiridis, V., Fuchs, H., Eleftheriadis, K., Petäjä, T., Salameh, T., Kivekäs, N., Juurola, E., Sapornaro, G., Philippin, S., Cornacchia, C., Alados Arboledas, L., Baars, H., Claude, A., De Mazière, M., Dils, B., Dufresne, M., Evangeliou, N., Favez, O., Fiebig, M., Haeffelin, M., Herrmann, H., Höhler, K., Illmann, N., Kreuter, A., Ludewig, E., Marinou, E., Möhler, O., Mona, L., Murberg, L.E., Nicolae, D., Novelli, A., O'Connor, E., Ohneiser, K., Altieri, R.M.P., Picquet-Varrault, B., van Pinxteren, D., Pospichal, B., Putaud, J.P., Reimann, S., Siomos, N., Stachlewska, I., Tillmann, R., Voudouri, K.A., Wandinger, U., Wiedensohler, A., Apituley, A., Comeron, A., Gysel-Beer, M., Mihalopoulos, N., Nikolova, N., Pietruczuk, A., Sauvage, S., Sciare, J., Skov, H., Svendby, T., Swietlicki, E., Tonev, D., Vaughan, G., Zdimal, V., Baltensperger, U., Doussin, J.F., Kulmala, M., Pappalardo, G., Sundet, S.S., Vana, M. (2024) *Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure (ACTRIS): The European Research Infrastructure Supporting Atmospheric Science*, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105(7), E1098-E1136. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0064.1>
- Li, J., Zhang, X., Guo, L., Zhong, J., Wang, D., Wu, C., Jiang, L. (2024) If Some Critical Regions Achieve Carbon Neutrality, How Will the Global Atmospheric CO₂ Concentration Change?, *Remote Sensing*, 16, 1486. <https://doi.org/10.3390/rs16091486>
- Mari, L., Wilson, M., Maul, A. (2023) *Measurement Across the Sciences: Developing a Shared Concept System for Measurement*. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-22448-5>
- Ministry of Environment of Korea (ME) (2014) *A Study for the Development of the Air Quality Monitoring Network Improvement Plan*, Final Report.
- Ministry of Environment of Korea (ME) (2020) *Air Pollution Monitoring Network Operation Plan (2021-2025)*.
- Ministry of Environment of Korea (ME) (2022a) *Framework Act on Carbon Neutrality and Green Growth for Coping with Climate Crisis*, National Law Information Center. <https://www.law.go.kr> (accessed on November. 3, 2024).
- Ministry of Environment of Korea (ME) (2022b) *Enforcement Decree of the Framework Act on Carbon Neutrality and Green Growth for Coping with Climate Crisis*,

- National Law Information Center. <https://www.law.go.kr> (accessed on November. 3, 2024).
- Ministry of Environment of Korea (ME) (2023) Clean Air Conservation Act, National Law Information Center. <https://law.go.kr/lsInfoP.do?lsiSeq=246843> (accessed on Aug. 23, 2024).
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2023) Special Act on the Improvement of Air Quality in Port Areas. <https://www.law.go.kr> (accessed on November. 3, 2024).
- Ministry of the Environment of Japan (MEOJ) (2017) Air Pollution Control Act. <https://www.env.go.jp/en/coop/pollution.html> (accessed on Aug. 23, 2024).
- Ministry of the Environment of Japan (MEOJ) (2022) Air Quality Monitoring Manual (6th ed.), Ministry of the Environment, (accessed on Aug. 23, 2024).
- Ministry of Ecology and Environment of China (MEE) (1989) Environmental Protection Law of the People's Republic of China (2020 Amendment). https://asiasociety.org/sites/default/files/inline-files/1989_Standing%20Committee_Environmental%20Protection%20Law%20of%20the%20People%27s%20Republic%20of%20China_C%20and%20E_%20Congress.pdf (accessed on Aug. 23, 2024).
- Ministry of Ecology and Environment of China (MEE) (2013) Air Pollution Prevention and Control Action Plan. <https://policy.asiapacificenergy.org/sites/default/files/Air%20Pollution%20Prevention%20and%20Control%20Action%20Plan%20%28EN%29.pdf> (accessed on Aug. 23, 2024).
- Ministry of Ecology and Environment of China (MEE) (2016) The 13th Five-Year Plan for Ecological and Environmental Protection. https://www.gov.cn/zhengce/content/2016-12/05/content_5143290.htm (accessed on Aug. 23, 2024).
- Ministry of Ecology and Environment of China (MEE) (2018) Air Pollution Prevention and Control Law (2018 Amendment). https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/fl/201811/t20181113_673567.shtml (accessed on Aug. 23, 2024).
- Ministry of Ecology and Environment of China (MEE) (2020) Environmental Protection Law of the People's Republic of China, (accessed on Aug. 23, 2024).
- Mitchell, L.E., Lin, J.C., Hutrya, L.R., Bowling, D.R. Cohen, R.C., Davis, K.J., DiGangi, E., Duren, R.M. Ehleringer, J.R., Fain, C., Falk, M., Guha, A., Karion, A., Keeling, R.F., Kim, J., Miles, N.L., Miller, C.E., Newman, S., Pataki, D.E., Prinzivalli, S., Ren, X., Rice, A., Richardson, S.J., Sargent, M., Stephens, B.B., Turnbull, J.C., Verhulst, K.R., Vogel, F., Weiss, R.F., Whetstone, J., Wofsy, S.C. (2022) A multi-city urban atmospheric greenhouse gas measurement data synthesis, *Scientific Data*, 9, 361. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01413-0>
- Morikawa, T., Ito, A., Wakamatsu, S. (2023) Regional and urban air quality in East Asia: Japan, in *Handbook of Air Quality and Climate Change*. Edited by Akimoto, H., Tanimoto, H., Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2760-9_65
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2013) Planning Study for the Establishment of an Advanced Management System for Air Pollution Monitoring Networks.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2020) Operation plan of air quality monitoring sites for more reliable monitoring data.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2021) Operational Plan for Air Pollution Monitoring Network (2021-2025).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2022a) Guidelines for the Installation and Operation of Air Pollution Monitoring Networks.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2022b) Planning research for the expansion and strengthening of greenhouse gas observations in Korea.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2023). Annual report of air quality in Korea 2022.
- Office for Coordination of Climate Change Observation (OCCCO) (2018) Current Status and Challenges of Greenhouse Gas Observation and Data Utilization. OCCCO.
- Park, M.B., Lee, T.J., Lee, E.S., Kim, D.S. (2016) A comparative study on the ambient air quality standard strength among Korea, the U.S.A., and the EU, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(6), 559-57, (in Korean with English abstract).
- Picciano, P., Qiu, M., Eastham, S.D., Yuan, M., Reilly, J., Selin, N.E. (2023) Air quality related equity implications of U.S. decarbonization policy, *Nature Communications*, 14, 5543. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41131-x>
- Shusterman, A.A., Kim, J., Lieschke, K.J., Newman, C., Wooldridge, P.J., Cohen, R.C. (2018) Observing local CO₂ sources using low-cost, near-surface urban monitors, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 13773-13785. <https://doi.org/10.5194/acp-18-13773-2018>
- Sun, Y., Yin, H., Wang, W., Shan, C., Notholt, J., Palm, M., Liu, K., Chen, Z., Liu, C. (2022) Monitoring greenhouse gases (GHGs) in China: status and perspective, *Atmospheric Measurement Techniques*, 15, 4819-4834. <https://doi.org/10.5194/amt-15-4819-2022>
- The White House (2023) National Strategy to Advance an Inte-

- grated U.S. Greenhouse Gas Measurement, Monitoring, and Information System. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2023/11/National-GHGMMISStrategy-2023.pdf>
- Tørseth, K., Aas, W., Solberg, S. (2023) The European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) - A coordinated effort to provide harmonized observation of air pollution and atmospheric composition, in Handbook of Air Quality and Climate Change. Edited by Akimoto, H., Tanimoto, H., Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2760-9_10 (accessed on Aug. 23, 2024).
- United Nations (UN) (2015) Paris Agreement. Retrieved from <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf> (accessed on Aug. 23, 2024).
- U.S. Department of Agriculture (USDA) National Resources Inventory (NRI) (2024) Long-term Observation Networks and Activity-based Data Collection. USDA NRI. <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/national/technical/nra/nri/> (accessed on Aug. 23, 2024).
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (1990) Clean Air Act. U.S. EPA. <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview> (accessed on Aug. 23, 2024).
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (2008) Ambient Air Monitoring Strategy for State, Local, and Tribal Air Agencies. https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-09/documents/aams_for_slts_-_final_dec_2008.pdf (accessed on Aug. 23, 2024).
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (2016) Clean Air Act (CAA) Stationary Source Compliance Monitoring strategy. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2013-09/documents/cmspolicy.pdf> (accessed on Aug. 23, 2024).
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (2017) Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems Volume II Ambient Air Quality Monitoring Program. https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/final_handbook_document_1_17.pdf (accessed on Aug. 23, 2024).
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (2022) Code of Federal Regulations, Title 40, Part 58: Ambient Air Quality Surveillance (accessed on Aug. 23, 2024).
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (2024a) National Ambient Air Quality Monitoring Network. U.S. EPA. <https://www.epa.gov/outdoor-air-quality-data> (accessed on Aug. 23, 2024).
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (2024b) Clean Air Status and Trends Network (CASTNET). 2021 Annual Report, U.S. EPA (accessed on Aug. 23, 2024).
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (2024c) Enhanced Air Quality Monitoring for Communities. U.S. EPA. <https://www.epa.gov/arp/arp-enhanced-air-quality-monitoring-communities-competitive-grant> (accessed on Aug. 23, 2024).
- Wang, Y., Ying, Q., Hu, J., Zhang, H. (2014) Spatial and temporal variations of six criteria air pollutants in 31 provincial capital cities in China during 2013-2014, Environment International, 73, 413-422. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.08.016>
- Wunch, D., Toon, G.C., Blavier, J.-F.L., Washenfelder, R.A., Notholt, J., Connor, B.J., Griffith, D.W.T., Sherlock, V., Wennberg, P.O. (2011) The Total Carbon Column Observing Network, Philosophical Transactions of the Royal Society A, 369, 2087-2112. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0240>
- Xiong, T., Liu, Y., Yang, C., Cheng, Q., Lin, S. (2023) Research overview of urban carbon emission measurement and future prospect for GHG monitoring network, Energy Reports, 9(Supplement 6), 231-242. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.04.047>
- Zhong, J., Zhang, X., Guo, L., Wang, D., Miao, C., Zhang, X. (2023) Ongoing CO₂ monitoring verify CO₂ emissions and sinks in China during 2018-2021, Science Bulletin, 68(20), 2467-2476. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.08.039>

Authors Information

정창훈 (경인여자대학교 보건의료행정학과 교수)

(jch@kiwu.ac.kr)

김용표 (이화여자대학교 명예교수, 환경블라인드스팟연구센터 연구원) (yong@ewha.ac.kr)