

## 대기오염물질 항공관측의 국내외 연구 및 동향

# Review and Recommendations of Domestic and International Research on Aircraft-based Measurements for Air Pollutants

박태현, 반지희, 안준영<sup>1)</sup>, 이태형\*, 박진수<sup>1),\*</sup>

한국외국어대학교 환경학과, <sup>1)</sup>국립환경과학원 대기환경연구과

Taehyun Park, Jihee Ban, Joon Young Ahn<sup>1)</sup>, Taehyoung Lee\*, Jinsoo Park<sup>1),\*</sup>

Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Republic of Korea

<sup>1)</sup>Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

접수일 2023년 8월 8일  
수정일 2023년 9월 13일  
채택일 2023년 9월 13일

Received 8 August 2023  
Revised 13 September 2023  
Accepted 13 September 2023

\*Co-corresponding author  
Tel : +82-(0)31-330-4039  
E-mail : thlee@hufs.ac.kr;  
airchemi@korea.kr

**Abstract** The atmospheric aircraft-based measurement technology has ushered in a new era in atmospheric science, atmospheric chemistry, and meteorology. Removing the spatial constraints of traditional ground-based measurement, this technology has enabled researchers to actively study atmospheric phenomena from many perspectives. Aircraft-based measurements have the unique advantage of being able to physically access areas that are otherwise difficult to reach, such as high altitudes, maritime regions, and polar zones. This capability provides invaluable data that significantly enhance our understanding of atmospheric phenomena and environmental changes on Earth. However, despite their significant contributions, aircraft-based measurements have limitations. High operational costs and limited payload are among the primary challenges that need to be addressed. We recommend several strategies for better aircraft-based measurements. These include larger aircraft for atmospheric pollution observations, which would allow for extended flight duration and increased payload capacity. We also suggest cultivating specialized operational personnel for aircraft-based measurements to ensure the efficient use of these resources. Furthermore, we recommend establishing a simplified official contact system (Hot-line) to facilitate the negotiation of aircraft-based measurement flight paths. This paper attempts to review the findings from various aircraft observation studies conducted both domestically and internationally, with a focus on atmospheric pollutants. Also, we provide valuable insights and considerations for future atmospheric pollution aircraft observations in South Korea. We hope to minimize trial and error in future aircraft-based measurements in South Korea, thereby contributing to more scientifically meaningful results.

**Key words:** Aircraft-based measurement, Airborne measurement, Air pollution, Review, Recommendation

### 1. 서 론

항공기 기반의 대기 관측 기술의 발달은 기존 지상에서 수동적으로 연구하던 대기 과학, 대기 화학 및 기상학 등의 연구 분야에서 공간적인 제약을 깨고 다양한 각도에서 관찰하며 능동적인 연구를 할 수 있도록 했다(Brunke *et al.*, 2022; Crawford *et al.*, 2021; Decker *et al.*, 2021; Herman *et al.*, 2018; Nault *et al.*, 2018; Fishman *et al.*, 1996; Pickering *et al.*, 1996;

Thompson *et al.*, 1996; Harriss *et al.*, 1994, 1992, 1990; 1988; McNeal *et al.*, 1983). 지상관측은 고정된 장소에서 해당 지점에서 발생하는 과학적 현상을 관찰하거나 관측 지점으로 유입되어 거처가는 대기를 관측하는 고정형 관측이기 때문에 계속해서 이동하는 대기를 이해하는 데 어려움이 있다(Park and Kim, 2023; Rickly *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023a, 2023b; Cui *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2013; Shao *et al.*, 2009). 이러한 지상관측의 공간적인 한계에

서 비롯된 과학적 현상의 이해에 대한 갈망은 지상의 관측 지점을 무수히 넓혀서 대기의 이동에 따라 변화하는 현상들을 추적 관찰할 수 있도록 하였지만 관측 지점이 지표로 제한되어 있기 때문에 전체적인 대기 현상 이해에 대한 한계가 있다(Sun *et al.*, 2023; Wetherbee *et al.*, 2019; Benedict *et al.*, 2013).

항공관측은 지상에서 접근하기 힘든 지역(높은 고도, 해상, 극지방 등)들을 물리적으로 접근하여 데이터를 수집하고 대기 현상 이해에 필요한 부분들을 제공하고 있다(Prather *et al.*, 2023; Thompson *et al.*, 2022; Park *et al.*, 2020b; Shingler *et al.*, 2016). 이러한 항공관측의 이점은 대기 연구 분야에서 특히, 기상 시스템의 역학, 대기오염물질의 확산, 기후 변화의 영향에 대한 이해를 높이는 데 많은 역할을 하고 있다(Park *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2011; van Donkelaar *et al.*, 2008). 지표에서 벗어난 상층부의 대기를 원격 관측이나 존데 비약을 통해 연구할 수 있지만 기상 영향(강수, 구름, 바람) 등에 의해 관측이 제한되기도 하며, 측정 대상에 따라서 오차가 클 수 있다(Bechle *et al.*, 2013; Velasco *et al.*, 2008). 항공관측은 지상원격관측과 위성원격관측 사이에서 항공기 내부에 보다 신뢰성 높은 측정 장비들을 탑재하여 보다 높은 공간 및 시간 해상도의 데이터를 관측할 수 있으며, 위성 및 지상 원격관측에서 수집한 데이터를 검증하고 개선하는 데 필요한 자료를 산출하기도 한다(Ryu *et al.*, 2021; Shilling *et al.*, 2018; Spinei *et al.*, 2018). 또한, 기상정보 및 대기오염물질 등을 동시에 관측할 수 있는 다양한 측정 장비를 탑재하여 종합적인 연구를 통해 복잡한 대기 과학 및 대기 화학적 변화를 측정할 수 있다(Sun *et al.*, 2022; DeCarlo *et al.*, 2010, 2008). 그리고 항공관측은 뛰어난 이동성을 바탕으로 야생산불이나 화산 폭발 등 갑작스러운 현상에 투입되어 실시간으로 상황을 관측하고 이로 인한 2차적인 피해를 줄이는 데 필요한 데이터를 산출할 수 있다(Fu *et al.*, 2015; Dupont *et al.*, 2012; Weber *et al.*, 2012).

항공관측은 지구의 대기와 환경 변화에 대한 이해도를 높이는 데 많은 기여를 하였지만 지상관측과 마

찬가지로 한계가 있다. 가장 큰 단점은 항공관측의 높은 운영 비용이다. 항공관측은 이동 측정이 가능한 장점이 있지만 비행을 위해 연료 소모는 필수 불가결이며, 연구를 위해 측정 장비 외 항공기 구입 및 유지 보수 비용과 항공기 조종 및 유지 보수를 위한 조종사와 정비사의 고용 비용이 발생된다. 또한 연구용 항공기 보관 및 주차를 위한 격납고(Hangar) 또는 계류장(Apron), 비행을 위한 활주로 사용료 등 각종 부대비용이 발생한다. 항공관측을 위해 부가적으로 발생하는 높은 연구 비용은 장기적이고 지속적인 연구활동을 하는 데 제한 사항으로 작용할 수 있으며, 연구 비용 문제로 인한 단발적인 항공관측은 대표성이 없는 데이터를 제공하여 대기 현상을 잘못 이해할 여지를 줄 수 있다. 항공기의 제한적인 비행 시간도 항공관측의 한계이다. 항공관측은 비행 가능한 시간 동안 비행 영역 내에서 자세한 대기 관측활동을 할 수 있지만, 주유된 연료량에 비례하여 비행할 수 있기 때문에 지속적인 관측이 어렵다. 그로 인해 높은 공간 해상도를 갖지만 위성 원격관측과 같이 지속적이고 넓은 범위를 관측할 수 없어서 대규모 대기 과정이나 지구 환경 변화를 연구하는 데 한계가 있다.

항공관측은 앞서 서술한 바와 같이 다른 관측법(지상, 원격, 위성)들처럼 장점과 단점이 모두 있는 관측 방법이다. 하지만 대기 현상의 과학적 이해도를 높이기 위한 장점이 더 큰 만큼 많은 연구자들이 지속적으로 관측활동을 하고 있다.

본 연구의 목적은 국내외에서 수행된 항공관측 중 대기오염물질을 대상으로 한 항공관측 연구들을 정리하고, 대기오염 항공관측에 고려되어야 할 내용들을 제언하여 앞으로 우리나라에서 지속적으로 수행될 많은 항공관측들의 시행착오를 줄이고 과학적으로 보다 유의미한 결과를 얻는 데 보탬이 되고자 한다.

## 2. 대기오염 항공관측 연구 동향

### 2.1 해외 연구 동향

대기오염 항공관측은 대류권과 성층권의 대기 화

**Table 1.** List of NASA Global Tropospheric Experiment (GTE) missions between 1983 and 2001 (Adapted from GTE: Aircraft-Based Missions, NASA Langley Research Center, 2022b).

Categories	MISSION (Locale)	Objectives	Aircraft	Study period
Instrument Development	CITE <sup>a</sup> -1A Wallops Island	Ground Based Instrument Intercomparisons	Ground Based	Jul. 1983
	CITE-1B Hawaii	Airborne Instrumentation Intercomparisons	CV-990	Nov. 1983
	CITE-1C Pacific-CA coast	Airborne Instrumentation Intercomparisons	CV-990	Apr. 1984
	CITE-2 West Coast-U.S.	Test and Intercomparisons: Nitrogen Budget Experiments	Electra	Aug. 1986
	CITE-3 Tropical Atlantic	Intercomparisons of Sulfur Budget Experiments	Electra	Sep. 1989
	Biosphere Atmosphere Exchange	ABLE <sup>b</sup> -1 Tropical Atlantic Ocean (Barbados)	Boundary Layer Chemistry and Dynamics-Precursor	Electra
ABLE-2A Brazilian rainforest		Boundary Layer Study of CO/O <sub>3</sub> /NO <sub>x</sub> - Dry Season	Electra	Jul.~Aug. 1985
ABLE-2B Brazilian rainforest		Boundary Layer Study of CO/O <sub>3</sub> /NO <sub>x</sub> - Wet Season	Electra	Apr.~May. 1987
ABLE-3A Northern wetlands (Alaska)		Photochemistry and Biogenic Sources of Tropospheric Gases	Electra	Jul. 1988
ABLE-3B Northern wetlands (Canada)		Photochemistry and Biogenic Sources of Tropospheric Gases	Electra	Jul. 1990
Long Range Transport		PEM <sup>c</sup> -West-A Western Pacific	Photochemistry and Transport of Gases and Aerosols	DC-8
	TRACE-A <sup>d</sup> Tropical Atlantic	Transport and Photochemistry of Ozone in the Tropics	DC-8	Sep. 1992
	PEM-West-B Western Pacific	Photochemistry and Transport of Gases and Aerosols	DC-8	Feb.~Mar. 1994
	PEM-Tropics A South Central Tropical Pacific	Ozone and Sulfur Photochemistry/ Transport of Gases and Aerosols	DC-8 P-3B	Aug.~Sep. 1996
	PEM-Tropics B Central and Eastern Tropical Pacific	Ozone and Sulfur Photochemistry/ Transport of Gases and Aerosols	DC-8 P-3B	Mar.~Apr. 1999
	TRACE-P <sup>e</sup> Western Pacific	Transport and Photochemistry of Gases and Aerosols	DC-8 P-3B	Feb.~May. 2001

<sup>a</sup>Chemical Instrumentation Test and Evaluation; <sup>b</sup>Atmospheric Boundary Layer Experiment; <sup>c</sup>Pacific Exploratory Missions; <sup>d</sup>Transport and Chemistry near the Equator in the Atlantic; <sup>e</sup>Transport and Chemical Evolution over the Pacific

학을 이해하기 위한 관측활동들을 바탕으로 발전하였다. 이에 가장 큰 영향을 준 연구로 미국 항공우주국 (National Aeronautics and Space Administration, NASA)의 Global Tropospheric Experiment (GTE) 연구가 있다(표 1) (McNeal, 1998, 1987; Hoell, 1985). GTE는 대류권에서 일어나는 대기 화학 반응과, 육지와 바다 그리고 성층권과의 상호 작용을 이해하기 위한 항공관측 중점의 연구로 1983년에 시작되어 2001년에

종료되었다(Raper *et al.*, 2001; Hoell *et al.*, 1999, 1997, 1996, 1993, 1990; Andreae *et al.*, 1996; Harriss *et al.*, 1994, 1992, 1990, 1988; Beck *et al.*, 1987). NASA의 GTE 연구는 크게 세 개로 분류할 수 있으며, 1) 항공관측에 필요한 고성능의 측정 장비 개발 및 검증 (Instrument development), 2) 생물권과 대기의 상호 작용 (Biosphere atmosphere exchange), 3) 대기의 장거리 이동 (Long range transport)으로 구분할 수 있다

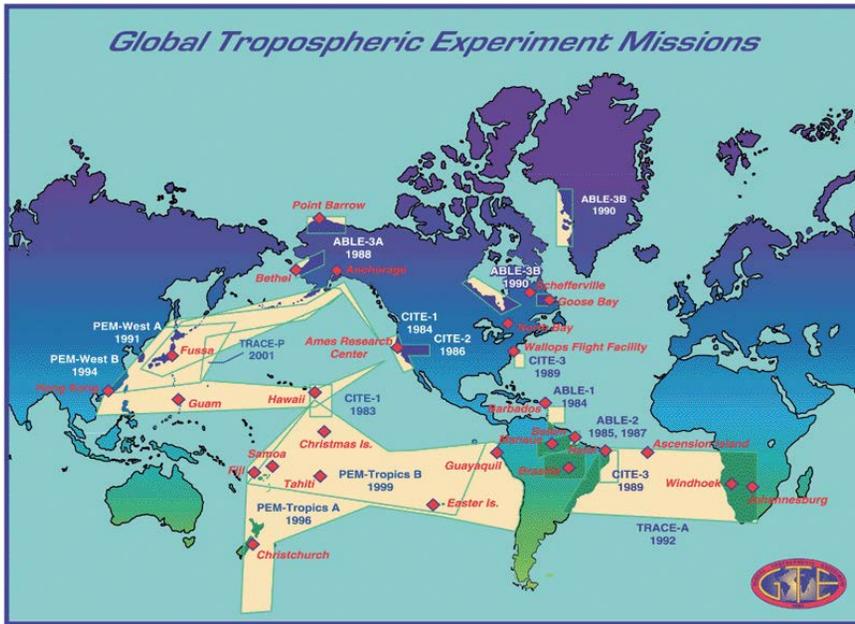


Fig. 1. Map illustrating the locations of NASA Global Tropospheric Experiment (GTE) missions conducted between 1983 and 2001 (Adapted from GTE Expeditions, NASA Langley Research Center, 2022a).

(표 1, 그림 1) (McNeal *et al.*, 1998).

첫 번째는 항공관측에 필요한 측정 장비를 개발하고 검증하는 단계로 Chemical Instrumentation Test and Evaluation (CITE)라는 연구명으로 1983년부터 1989년까지 3개의 연구사업으로 진행되었다(표 1). CITE-1의 주 목적은 CO, NO, OH를 분석하기 위한 측정 장비 개발과 검증 작업으로, NASA CV-990 항공기에 탑재하여 1983년 11월(미국 하와이 - 캘리포니아)과 1984년 4월(미국 캘리포니아)에 항공관측을 수행하였다(그림 1) (Chameides *et al.*, 1989; Beck *et al.*, 1987; Bradshaw *et al.*, 1985). CITE-1 결과, 레이저를 활용한 Laser differential absorption 방식과 laser-induced fluorescence (LIF) 방식이 각각 CO와 NO를 대기 중의 다른 물질들과 간섭 현상 없이 높은 시간 해상도로 측정할 수 있음을 확인하여 레이저 측정법의 장점을 확인하였다(Hoell *et al.*, 1987, 1984; Bradshaw *et al.*, 1985). CITE-2 (1986년)는 질소 관련 물질인 NO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, peroxyacetyl nitrate (PAN)을 대상으로 한 측정법들을

검토하였으며(Gregory *et al.*, 1990; Hoell *et al.*, 1990; Ridley *et al.*, 1990; Sandholm *et al.*, 1990; Singh *et al.*, 1990), CITE-3 (1989년)에서 황 관련 물질(SO<sub>2</sub>, CS<sub>2</sub>, COS, H<sub>2</sub>S, Dimethyl sulfide (DMS))의 측정법을 검토하였다(표 1, 그림 1) (Farwell *et al.*, 1995; Gregory *et al.*, 1993; Hoell *et al.*, 1993).

NASA의 CITE 연구와 비슷한 시기에 미국 해양 대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서도 대기오염 측정을 위한 항공관측을 수행하였으며, Schnell *et al.* (1987)은 1986년 1월 수행된 미국 동부 해안에서 대서양으로 이동하는 대기오염물질을 관측하기 위한 Western Atlantic Ocean Experiment (WATOX-86) 연구를 보고하였다. WATOX-86의 결과를 통해 대기오염물질(입자상, 가스상)의 연직 분포 등이 보고되었는데(Luke and Dickerson, 1987; Misanchuk *et al.*, 1987; Thornton *et al.*, 1987; Whelpdale *et al.*, 1987), Luke and Dickerson (1987)은 NO<sub>y</sub> (NO + NO<sub>2</sub> + NO<sub>3</sub> + HNO<sub>3</sub> + 2N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> +

HONO + R-ONO<sub>x</sub> + NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + peroxyacetyl nitrate (PAN))의 연직 분포를 관측하여 대기경계층(Planetary Boundary Layer, PBL) 내 NO<sub>y</sub> 평균농도(1.35 ppbv)가 미국 동부 해안의 시골 지역농도와 유사하고, 자유대류권(Free troposphere, FT)의 농도는 배경농도 수준(0.54 ppbv)인 것을 확인하였다. 또한 Filter Pack (직경 47 mm, 1.0 μm 공극, 필터재질: Teflon, nylon 등)과 Aethalometer를 사용하여 PBL 내 입자상 물질인 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Black carbon (BC)과 가스상 물질인 SO<sub>2</sub>와 HNO<sub>3</sub>를 관측하였다(Whelpdale *et al.*, 1987). 이를 통해 입자상 물질의 연직 분포를 관측하여 FT와 PBL의 농도 차이와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 구성비 및 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 결합상태를 보고하였다(Whelpdale *et al.*, 1987). 하지만 WATOX-86가 수행된 1986년 1월에는 CITE-1까지만 수행되었기 때문에 항공 측정 기술의 한계로 인하여 대기오염물질별 분석 시간이 3초(가스상)에서 34분(입자상)까지 다양했다. 이는 항공관측에서 시간 해상도의 중요성과 CITE 연구가 대기오염 항공관측 발전에 큰 기여를 했음을 나타낸다.

NASA GTE 연구의 두 번째 연구 주제는 생물권과 대기의 상호 작용 연구를 위한 Atmospheric Boundary Layer Experiment (ABLE)이다(표 1, 그림 1). ABLE은 대기경계층과 육지 및 바다 생물권의 지속적인 상호 작용에 의해 변화하는 대기 화학 과정을 연구하는 것이 주 목적으로 CITE 연구와 비슷한 시기인 1984년부터 1990년까지 NASA Electra 항공기를 이용하여 수행되었다(Harriss *et al.*, 1990, 1988). ABLE은 연구 목적에 부합하기 위하여 다양한 자연환경(ABLE-1: 북대서양, ABLE-2: 브라질 열대 우림, ABLE-3: 북부(알래스카, 캐나다) 습지)에서 연구를 수행하였다. ABLE-1은 1984년 6월 기간 중 북대서양에 위치한 바베이도스에서 열대 대서양 지역에서 수행되었고, 사하라 사막에서 기원한 입자상 물질(Saharan dust, 사하라 더스트)이 장거리 이동에 의해 1.5~3.5 km 고도로 유입되는 것을 관측하였다(Gregory *et al.*, 1986; Talbot *et al.*, 1986). 이를 바탕으로 건조한 아프리카와 아시아 지역의 지각기원 물질들이 장거리 이동에 의

해 전 지구적으로 영향을 줄 수 있음을 확인하였다(Talbot *et al.*, 1986). 또한 북대서양 상공에서 항공관측을 통해 해양의 식물성 플랑크톤에서 기원한 DMS가 자연적 황 배출원의 많은 부분을 차지한다고 평가하였다(Ferek *et al.*, 1986).

ABLE-2은 브라질 열대 우림(아마존)에서 1985년 7~8월(ABLE-2A, 건기)과 1987년 4~5월(ABLE-2B, 우기)에 항공관측과 지상관측이 함께 수행되었으며(표 1, 그림 1)(Harriss *et al.*, 1990, 1988), 아마존이 대기 순환에 중요한 역할을 한다고 보고하였다(Andreae *et al.*, 1990, 1988; Gregory *et al.*, 1988). 우기에는 강수로 인해 대기질이 매우 좋지만 건기에는 아마존 외 각 지역의 생물성 연소(Biomass burning)로 인하여 대기질이 매우 나쁜 것으로 보고되었다(Harriss *et al.*, 1990; Sachse *et al.*, 1988). 아마존 건기의 생물성 연소는 온난화물질인 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>뿐만 아니라 CO, NH<sub>3</sub> 등의 주요 배출원으로 기여한다고 보고하였으며(Andreae *et al.*, 1988; Sachse *et al.*, 1988), CO의 경우 아마존의 식생에서 배출된 isoprene의 산화에 의한 생성도 CO의 주요 배출 경로인 것으로 확인하였다(Rasmussen and Khalil, 1988; Zimmerman *et al.*, 1988).

1988년 7월(ABLE-3A)과 1990년 7월(ABLE-3B)에 수행된 ABLE-3는 각각 미국 알래스카의 영구동토층(툰드라)과 캐나다 북부의 아북극 및 북극 지역을 대상으로 항공관측과 지상관측을 이용하여 툰드라와 습지 등의 지표와 대기의 상호작용(특히, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>, CO 등)을 중점적으로 연구하였다(표 1, 그림 1)(Harriss *et al.*, 1994, 1992; Ritter *et al.*, 1994). ABLE-3를 통해 알래스카의 영구동토층이 CH<sub>4</sub>의 주요 배출원임을 확인하였으며(5~6천만 kg/yr) 지표 기온 상승시 영구동토층의 CH<sub>4</sub> 배출량 상승을 야기하여 지구온난화에 영향을 줄 수 있다고 보고되었다(Hamilton *et al.*, 1994; Bartlett *et al.*, 1992; Houghton *et al.*, 1992).

NASA의 세 번째 GTE 연구는 대기의 장거리 이동에 관하여 주로 대양에서 진행되었으며, 태평양을 중심으로 한 Pacific Exploratory Missions (PEM)과, 대서양 및 태평양을 대상으로 한 연구하는 Transport and

Chemistry near the Equator in Atlantic (TRACE-A) 과 Transport and Chemical Evolution over the Pacific (TRACE-P)이 진행되었다(Raper *et al.*, 2001; Hoell *et al.*, 1999, 1997, 1996; Andreae *et al.*, 1996; Fishman *et al.*, 1996).

그 중 PEM은 1991년 9월부터 1999년 4월까지 크게 두 개의 연구로, 북서태평양(PEM-West)과 남태평양(PEM-Tropics)에서 수행되었다. PEM-West는 북서태평양(일본, 홍콩, 대만, 괌 등) 지역에서 따뜻한 시기(1991년 9~10월)와 추운 시기(1994년 2~3월)의 O<sub>3</sub> 및 O<sub>3</sub> 생성 전구체에 대하여 인위적, 자연적인 배출 영향을 관찰하고, 대기 중 황화합물의 순환에 대해 연구하였다(Hoell *et al.*, 1997, 1996). PEM-West 연구 기간 중 북서태평양 지역에서 High-NO<sub>x</sub> (NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>) 사례(NO<sub>x</sub> > 20 ppb)는 주로 아시아 대륙에서 기원하고 Low-NO<sub>x</sub> 사례(NO<sub>x</sub> < 20 ppb)는 태평양 해상에서 기원하였으며, O<sub>3</sub> 생성은 High-NO<sub>x</sub>가 Low-NO<sub>x</sub>보다 약 2~6배 높은 것으로 나타났다(Crawford *et al.*, 1997). PEM-West 기간 동안의 SO<sub>2</sub>는 동아시아의 인위적 오염원과 화산 폭발에 기원하여 장거리 이동을 통해 서태평양 열대 지역의 자유 대류권(Free troposphere) 상층으로 유입되는 것을 확인하였으며, 이는 산화를 통해 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 형성하여 구름 응결핵(Cloud condensation nuclei, CCN)으로 작용할 수 있다고 보고되었다(Thornton *et al.*, 1997).

PEM-Tropics 항공관측은 남태평양과 북태평양(PEM-Tropics B 한정) 지역에서 1996년 8~10월(PEM-Tropics A, 건기)과 1999년 2~4월(PEM-Tropics B, 우기)에 수행되었다(Raper *et al.*, 2001; Hoell *et al.*, 1999). PEM-Tropics A 기간 중 남아메리카와 남아프리카 지역에서 발생된 생물성 연소에 기원한 대기오염물질이 장거리 이동을 통해 남태평양 지역으로 유입됨을 확인하였다(Browell *et al.*, 2001; Blake *et al.*, 1999; Singh *et al.*, 1996). PEM-Tropics B 기간 중 열대 북태평양(하와이 지역)의 경우, 유라시아(유럽과 아시아)에 발생된 대기오염물질이 장거리 이동에 의해 열대 북태평양으로 유입되어 배출원이 적은 해상 지역의 대기

질 저하에 영향을 주는 것을 확인하였다(Clarke *et al.*, 2001; Staudt *et al.*, 2001). 앞서 서술한 NASA의 GTE 연구는 항공관측의 필요한 측정 장비 개발 및 검증부터 대기 화학의 이해를 높이기 위한 국제적인 항공관측활동을 통해 대기오염 항공관측의 방법론과 방향성을 제시하는 데 큰 기여를 하였다(표 1, 그림 1).

2000년대 이전에도 NASA의 GTE 연구와 연관된 대기오염 항공관측 이외에 여러 항공관측들이 수행되었으나(Dulac and Chazette, 2003; Marengo *et al.*, 1998; Brandtjen *et al.*, 1994; Andreae *et al.*, 1992), NASA의 GTE 연구가 종료된 2000년 이후부터는 많은 국가들에서 대기오염 항공관측이 활발히 수행되었다. 2000년 이후의 항공관측은 주로 각 국가 주변의 대기 화학 및 대기오염물질 조성과, 주변 국가 및 다른 대륙으로의 장거리 이동 등을 이해하기 위한 조금 더 집중된 목적의 항공관측으로 수행되었다(표 2)(Benish *et al.*, 2020; Srivastava *et al.*, 2012; Paris *et al.*, 2010, 2009a, 2009b; de Gouw *et al.*, 2001; Ramanathan *et al.*, 2001).

먼저 미국에서는 NASA의 GTE 연구를 바탕으로 2000년대 이후에도 전 세계에서 가장 활발히 항공관측을 수행하였다. 2000년대 이후에 미국에서 진행된 대표적인 항공관측으로는, 위성원격관측을 이용한 대기오염물질 측정 정확성을 높이기 위한 기초 자료 생성의 목적의 Deriving Information of Surface Conditions from Column and Vertically Resolved Observations Relevant to Air Quality (DISCOVER-AQ) 캠페인(Lee *et al.*, 2018; Sawamura *et al.*, 2017; Ziemba *et al.*, 2013)과, 2019년에 미국에서 빈번하게 발생하는 서부의 산불(wildfires)과 남동부 지역의 농업 화재(agricultural fires) 시 배출되는 대기오염물질이 대기와 기상 및 기후에 주는 영향을 연구하기 위한 Fire Influence on Regional to Global Environments and Air Quality (FIREX-AQ) 등이 있다(Warneke *et al.*, 2023; Bourgeois *et al.*, 2022; Liao *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2021)(표 2).

아시아에서는 우리나라와 중국에서 항공관측이 활

**Table 2.** List of airborne measurement campaign for air pollution.

Geographical scale	Campaign (Locale)	Measured species	Aircraft	Study period	Reference
Regional	IPAC-NC <sup>1</sup> (North China Plain)	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, NMHCs	Y-12	Apr.~May 2006	Ma <i>et al.</i> , 2013
Regional	ARIAs <sup>2</sup> (North China Plain)	O <sub>3</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, VOCs, SO <sub>2</sub> , BC, Aerosol	Y-12	Jun. 2016	Benish <i>et al.</i> , 2020
Regional	INDOEX <sup>3</sup> (India)	O <sub>3</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , VOCs, NMHCs, Aerosol	C-130	Feb.~Mar. 1999	Clarke <i>et al.</i> , 2022; de Gouw <i>et al.</i> , 2001; Ramanathan <i>et al.</i> , 2001
Regional	WICARB <sup>4</sup> (Bay of Bengal)	O <sub>3</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , VOCs	King air B200	Jan. 2009	Srivastava <i>et al.</i> , 2012
Continental	YAK-AEROSIB <sup>5</sup> POLARCAT <sup>6</sup> (Eurasia)	CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , Aerosol	Antonov-30	Apr., Sep. 2006 Apr. 2007 Jul.2008	Paris <i>et al.</i> , 2010, 2009a, 2009b
Continental	EUCAARI <sup>7</sup> (Europe)	Aerosol, Trace gases	DLR Falcon 20, ATR-42, BAe-146	May. 2008	Crumeyrolle <i>et al.</i> , 2013; Hamburger <i>et al.</i> , 2011; Kulmala <i>et al.</i> , 2009
Continental	EMeRGe <sup>8</sup> (Europe, Asia)	VOCs, CO, HO <sub>2</sub> , RO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , Aerosol	HALO <sup>9</sup>	Jul. 2017 Apr. 2018	Förster <i>et al.</i> , 2023; George <i>et al.</i> , 2023; Hernández <i>et al.</i> , 2022
Continental	MILAGRO <sup>10</sup> (Mexico)	Aerosol, Trace gases	C-130, G-1, Twin Otter, NASA J-31, King air	Mar. 2006	Molina <i>et al.</i> , 2010
Regional	DISCOVER-AQ <sup>11</sup> (Baltimore- Washington D.C., San Joaquin Huston)	NO <sub>x</sub> , NO <sub>y</sub> , BC, CO, VOCs, O <sub>3</sub> , WSOC, dry aerosol extinction	P-3B, King air	Jul. 2011 Jan.~Feb. 2013 Sep. 2013	Lee <i>et al.</i> , 2018 Sawamura <i>et al.</i> , 2017; Ziemba <i>et al.</i> , 2013
Regional	AMMA <sup>12</sup> (West Africa)	O <sub>3</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , NO <sub>y</sub> , HCHO, HO <sub>2</sub>	BAe 146, ATR-42, F-F20, D-F20, M55	Jun.~Aug. 2006	Kartal <i>et al.</i> , 2010; Reeves <i>et al.</i> , 2010; Chou <i>et al.</i> , 2008; Redelsperger <i>et al.</i> , 2006
Regional	MOYA <sup>13</sup> (Senegal, Uganda)	CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , CO, N <sub>2</sub> O	BAe 146-301	Feb.~Mar. 2017 Jan. 2019	Barker <i>et al.</i> , 2020

<sup>1</sup>Influence of Pollution on Aerosols and Cloud Microphysics in North China; <sup>2</sup>Air Chemistry Research in Asia; <sup>3</sup>Indian Ocean Experiment; <sup>4</sup>Winter phase of Integrated Campaign for Aerosols, gases and Radiation Budget; <sup>5</sup>YAK-Airborne Extensive Regional Observation in Siberia; <sup>6</sup>Polar Study using Aircraft, Remote Sensing, Surface Measurements and Models, of Climate, Chemistry, Aerosols, and Transport; <sup>7</sup>European integrated project on Aerosol Cloud Climate and Air Quality Interactions; <sup>8</sup>Effect of Megacities on the transport and transformation of pollutants on the Regional to Global scales; <sup>9</sup>High Altitude and Long Range Research Aircraft; <sup>10</sup>Megacity Initiative: Local And Global Research Observations; <sup>11</sup>Deriving Information of Surface Conditions from Column and Vertically Resolved Observations Relevant to Air Quality; <sup>12</sup>African Monsoon Multidisciplinary Analyses; <sup>13</sup>Methane Observations and Yearly Assessments

발히 수행되었다(표 2). 중국은 자체적인 대기오염 물질의 조성 파악을 위하여 다양한 연구자들에 의해 항공관측이 수행되었으며(Ma *et al.*, 2013), Geng *et al.* (2009)은 2007년 10월 양쯔강 삼각주 지역에서 대기 오염물질 중 가스상 전구물질(O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, Volatile organic compounds (VOCs))의 공간 분포 관측과 함께 O<sub>3</sub>-NO<sub>x</sub>-VOCs의 민감도 분석을 수행하였다.

Chen *et al.* (2013)은 2007부터 2010년까지 수행된 217건의 항공관측 자료를 바탕으로 베이징 지역의 O<sub>3</sub> 연직 분포를 분석하여 도심지역에서 O<sub>3</sub>가 지속적으로 생성되며, O<sub>3</sub>의 생성은 지표와 가까워질수록 VOC-limited 조건임을 보고하였다. Liu *et al.* (2013)은 항공용 canister 샘플링을 이용한 BTEX (Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene) 측정방법을 개발하여 2009

년 베이징 지역 상공의 BTEX를 분석하였고, Liu *et al.* (2019)은 2011년 베이징 지역의 비내화성 극미세먼지(Non-refractory-PM<sub>1.0</sub>, NR-PM<sub>1.0</sub>)의 화학적 조성을 관측하여 NR-PM<sub>1.0</sub>의 성분(Organic aerosols(OA), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>)별 연직 분포비를 보고하였다. Benish *et al.* (2020)은 2016년 5월과 6월 중 Air Chemistry Research in Asia (ARIAs)를 수행하며 중국 허베이 지역의 O<sub>3</sub> 생성 관련 물질과 대기오염물질의 조성을 관측하였다.

아프리카에서 수행된 항공관측은(표 2), 2008년 6월 African Monsoon Multidisciplinary Analyses (AMMA) 캠페인을 통해 서아프리카 지역에서 우기(Monsoon) 기간에 대류권의 대기오염물질 조성(사하라 더스트)을 측정하였으며(Chen *et al.*, 2011; Reeves *et al.*, 2010; Chou *et al.*, 2008; Redelsperger *et al.*, 2006), 2017년 2월과 2019년 1월에 Methane Observations and Yearly Assessments (MOYA) 캠페인을 통해 세네갈과 우간다 지역의 넓은 영역에서 발생하는 생물성 연소와 습지 등에서 배출되는 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO 등을 관측되었다(Shaw *et al.*, 2022; Barker *et al.*, 2020).

유럽에서는 국지적인 연구와 더불어 대륙을 넘어서는 항공관측이 수행되었다(표 2). 대표적으로 2008년 European Integrated Project on Aerosol Cloud Climate and Air Quality interactions (EUCAARI) 캠페인을 통해 기후와 대기오염의 상호관계를 연구하였으며(Crumeyrolle *et al.*, 2013; Hamburger *et al.*, 2011; Kulmala *et al.*, 2009), Effect of Megacities on the transport and transformation of pollutants on the Regional to Global scales (EMeRGe) 캠페인을 통해 주요 인구 밀집지역에서 배출된 대기오염물질의 국지적인 영향과 유럽 및 다른 대륙으로의 확산에 관한 연구를 수행하였다(Förster *et al.*, 2023; George *et al.*, 2023; Hernández *et al.*, 2022).

## 2.2 국내 연구 동향

우리나라의 대기오염 항공관측은 1990년대 초반(1993년)부터 시작되어 벌써 25년 이상의 역사를 가

지고 있다. 1990년대 이전에는 해외 연구 기관과 협력하여 국내 대기오염 항공관측을 수행하였으나, 1993년도에 창공-91 항공기를 이용한 항공관측이 첫 시도되고(Jeong *et al.*, 1994), 1996년부터 국립환경과학원에 의해 우리나라의 독자적인 대기오염 항공관측이 본격적으로 수행되기 시작하였다(Kim *et al.*, 1997). Kim *et al.* (1997)은 1996년 3월 1일부터 3월 3일까지 SF-600 항공기를 이용하여 우리나라 서해안 상공에서 장거리 이동으로 국내로 유입되는 SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>를 대상으로 항공관측을 시도하였다. 김포공항과 광주공항을 이용해서 강화군과 신안군 서쪽 해상을 가로지르는 관측 비행은 국내로 유입되는 대기오염물질의 공간(수평, 수직) 분포를 파악하고 유출입량(Flux) 산정을 시도하여 항공측정기반의 장거리 이동 영향을 평가하는 방향성을 제시하였다(Kim *et al.*, 1997). 이후 국립환경과학원은 1997년부터 현재까지 계속해서 우리나라 서해상에서 국내로 유입되는 장거리 이동 대기오염물질의 공간 분포 및 화학적 조성 측정을 위한 항공관측을 계속적으로 수행하고 있다(Park *et al.*, 2023, 2020a, 2020b; Lee *et al.*, 2016; Song *et al.*, 2009; Han *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2001).

우리나라는 한-미 협력 국내 대기질 공동조사(KORea-United State Air Quality study, KORUS-AQ)를 준비하는 과정 중 선행 연구로 2015년 5월부터 6월까지 메가시티 오염 발생 메커니즘 규명을 위한 국제관측 캠페인(Megacity Air Pollution Studies, MAPS)을 수행하였으며(Kim and Lee, 2018), King Air C90GT 항공기에 High Resolution Time-of-Flight Aerosol Mass Spectrometer(HR-ToF-AMS)와 Ultra-High-Sensitivity Aerosol Spectrometer(UHSAS)를 탑재하여 총 7회의 항공관측을 통해 국내 서해상뿐만 아니라 수도권 지역 상공 PM<sub>1.0</sub>의 물리화학적 특성을 연구하였다(Park *et al.*, 2020b; Kim *et al.*, 2018). MAPS-Seoul 기간 중 HR-ToF-AMS로 측정된 국내 상공의 NR-PM<sub>1.0</sub>의 화학 성분(OA, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)별 공간 분포와 조성비는 국내 자체적으로 측정된 첫 사례로 보고되었지만(Park *et al.*, 2020b), 다른 가스상 대기오염물질(O<sub>3</sub>,

**Table 3.** Airborne instrumentation onboard research aircraft during the KORUS-AQ (Adapted from Crawford *et al.*, 2021).

Investigator, Institution	Instrument Name/Technique	Species/Parameters Measured
<b>NASA DC-8 trace gas measurements</b>		
Andrew Weinheimer, National Center for Atmospheric Research (NCAR)	NCAR 4-Channel chemiluminescence instrument	O <sub>3</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>y</sub>
Glenn Diskin, NASA Langley	Diode laser spectrometer (Differential Absorption Carbon monOxide Measurement, DACOM)	CO, CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O
Glenn Diskin, NASA Langley	Diode Laser Hygrometer (DLH)	H <sub>2</sub> O(v)
Joshua DiGangi, NASA Langley	Nondispersive infrared spectrometer	CO <sub>2</sub>
Donald Blake, University of California, Irvine	Whole Air Sampler (WAS)	C <sub>2</sub> -C <sub>10</sub> alkanes, C <sub>2</sub> -C <sub>4</sub> alkenes, C <sub>6</sub> -C <sub>9</sub> aromatics, C <sub>1</sub> -C <sub>5</sub> alkylnitrates, C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub> halocarbons, isoprene, monoterpenes, 1,3-butadiene, carbonyl sulfide (OCS), dimethylsulfide (DMS)
Alan Fried, University of Colorado, Boulder	Compact Atmospheric Multi-species Spectrometer (CAMS)	CH <sub>2</sub> O, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
L. Gregory Huey, Georgia Institute of Technology	Georgia Tech-Chemical Ionization Mass Spectrometer (GT-CIMS)	Peroxyacetylnitrate (PAN), peroxypropionynitrate (PPN), peroxyacryloynitrate (APAN), peroxybenzoylnitrate (PBZN), SO <sub>2</sub> , HCl
William Brune, Penn State	Airborne Tropospheric Hydrogen Oxides Sensor (ATHOS)	OH, HO <sub>2</sub> , OH reactivity
Ronald Cohen, University of California, Berkeley	Thermal Dissociation-Laser-Induced Fluorescence (TD-LIF)	NO <sub>2</sub> , sum of peroxy nitrates, sum of alkyl nitrates, aerosol-phase organic nitrates
Saewung Kim, University of California, Irvine	Chemical Ionization Mass Spectrometer (CIMS)	CINO <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub>
Kyung-Eun Min, Gwangju Institute of Science and Technology	CAvity-Enhanced absorption Spectrometer for Atmospheric Research (CAESAR)	NO <sub>2</sub> , CHOCHO
Jeong-Hoo Park, NIER	Proton TRansfer, High Resolution, Time-of-Flight, Mass Spectrometer (PTR-HR-ToF-MS)	Toluene
Paul Wennberg, California Institute of Technology	Caltech CIMS (CIT-CIMS)	HNO <sub>3</sub> , HCN, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , organic peroxides, organic nitrates, organic hydroxynitrates, peroxyacetic acid, cresol, glycoaldehyde
Armin Wisthaler, University of Oslo	Proton TRansfer Time-of-Flight Mass Spectrometer (PTR-ToF-MS)	Methanol, acetonitrile, acetone, methyl ethyl ketone, acetaldehyde, benzene, toluene, C <sub>8</sub> -alkylbenzenes, isoprene, isoprene oxidation products, monoterpenes

NO, NO<sub>2</sub>, CO 등)과 항공 기상(풍향, 풍속, 온도, 압력 등) 정보의 측정은 미수행되었다.

우리나라의 대기오염 항공관측은 2016년 5월부터 6월까지 수행된 KORUS-AQ를 기점으로 크게 확장되었다(Crawford *et al.*, 2021). KORUS-AQ는 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)와 O<sub>3</sub> 등 우리나라 대기질 저하에 영향을 주는 원인과 현상을 파악하기 위해 지상, 항공, 선박,

위성, 모델링 등을 이용하여 전방위적인 국제 공동 연구이다(Crawford *et al.*, 2021). KORUS-AQ 기간 항공관측은 총 3대(DC-8, King Air B200, King Air C90GT)의 항공기가 23일간 83회(DC-8: 20회, King Air B200: 30회, King Air C90GT: 33회)의 항공관측에 투입되어 대기오염물질 중 O<sub>3</sub> 관련 물질과 PM<sub>2.5</sub> 관련 물질들을 동시에 측정하여 국내 대기오염물질의 공간 분

Table 3. Continued.

Investigator, Institution	Instrument Name/Technique	Species/Parameters Measured
<b>NASA DC-8 aerosol measurements</b>		
Bruce Anderson, NASA Langley	Langley Aerosol Research Group Experiment (LARGE)	Aerosol number, size distribution, optical and microphysical properties
Jack Dibb, University of New Hampshire	Soluble Acidic Gases and Aerosol (SAGA)	Bulk aerosol ionic composition, fine aerosol sulfate, HNO <sub>3</sub> (and submicron NO <sub>3</sub> aerosol)
Jose Jimenez, University of Colorado-Boulder	High-Resolution Time-of-Flight Aerosol Mass Spectrometer (HR-ToF-AMS)	Chemically-speciated submicron non-refractory particulate mass and size distribution
Taehyoung Lee, Hankuk University of Foreign Studies	High-Resolution Time-of-Flight Aerosol Mass Spectrometer (HR-ToF-AMS)	Chemically speciated submicron non-refractory particulate mass
Joshua Schwarz, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)	Humidified Dual Single Particle Soot Photometer (HD-SP2)	Black carbon (BC) concentration, size distribution, mixing state, and hygroscopicity of BC containing particles
Seong Soo Yum, Yonsei University	CPC3010, DMT Cloud Condensation Nuclei Counter (CCNC)	Aerosol number, cloud condensation nuclei concentration (0.6% supersaturation)
<b>NASA DC-8 remote sensing measurements</b>		
Samuel Hall, NCAR	Charge-coupled device (CCD) Actinic Flux Spectrometers (CAFS)	4- $\pi$ sr Actinic flux and derived photolysis frequencies
John Hair, NASA Langley	Differential Absorption Lidar and High Spectral Resolution Lidar (DIAL/HSRL)	Zenith and Nadir O <sub>3</sub> ; aerosol backscatter, depolarization, extinction, and other retrieved aerosol parameters
Jens Redemann, NASA Ames	Spectrometers for Sky-Scanning, Sun-Tracking Atmospheric Research (4STAR)	Zenith measurements of aerosol optical depth; column water vapor, O <sub>3</sub> , and NO <sub>2</sub>
<b>NASA King Air remote sensing measurements</b>		
Scott Janz, NASA Goddard	Geostationary Trace gas and Aerosol Sensor Optimization (GeoTASO)	Nadir column densities of NO <sub>2</sub> and CH <sub>2</sub> O
<b>Hanseo University King Air trace gas measurements</b>		
Jinsoo Park, NIER	Teledyne API T400 AeroLazer AL5002 LGR GGS 24 EP Thermo TEI 43i	O <sub>3</sub> CO CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O SO <sub>2</sub>
Tom Hanisco, NASA Goddard	Compact Airborne Formaldehyde Experiment	CH <sub>2</sub> O

포 및 거동과 대기 화학적 변화 등의 연구에 필요한 자료들을 수집하였다(표 3)(Crawford *et al.*, 2021; Fried *et al.*, 2020; Simpson *et al.*, 2020; Nault *et al.*, 2018). KORUS-AQ 항공관측 결과, 기상 조건(대기 정체)에 따라 우리나라에서 자체적으로 배출된 VOCs에 의해 국지적인 2차 유기 에어로졸(Secondary Organic Aerosol, SOA) 생성이 제시되었고(Nault *et al.*, 2018), 서울 지역의 VOCs 배출원들을 분류하였으며(Simpson *et*

*al.*, 2020), 충남 대산산업단지의 VOCs 배출 인벤토리와 항공측정 기반의 VOCs 배출량 추정치가 차이가 있음이 제시되었다(Cho *et al.*, 2021; Fried *et al.*, 2020). 또한, 항공측정으로 수집된 결과를 대기질 모델 개선과, 배출 인벤토리 개선 등 우리나라 대기오염의 이해와 개선을 위한 다양한 연구에 활용하여 항공관측이 결합된 종합적인 대기오염 관측의 필요성을 확인하였다(Tang *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2022a; Choi *et al.*, 2021;

Kwon *et al.*, 2021; Park *et al.*, 2021; Jordan *et al.*, 2020; Schroeder *et al.*, 2020; Sourri *et al.*, 2020; Oak *et al.*, 2019; Spinei *et al.*, 2018; Tang *et al.*, 2018).

KORUS-AQ 이후 국내 기상 및 대기오염 항공관측을 위한 관측용 항공기가 도입 및 개조되었다(Kim *et al.*, 2022b; Seo *et al.*, 2019). 국립기상과학원은 2017년 말 King air 350HW를 도입 및 개조하여, 기상 및 기후 관측과 대기 환경 관측을 수행하고 있다(Kim *et al.*, 2023b; Ku *et al.*, 2023, 2020; Jung *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2022b; Kang *et al.*, 2021). 또한, 종합적인 대기오염 항공관측을 위해 2017년 미세먼지 국가전략프로젝트(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부)와 국립환경과학원의 지원으로 한서대학교에서 보유한 21인승 중형항공기 Beechcraft 1900D (B1900D)를 국내 대기오염 및 대기 화학 이해를 위한 관측용 항공기 개조하여 국내 대기오염 개선을 위한 종합적인 항공관측이 수행되고 있다(Seo *et al.*, 2019). B1900D는 기존 King air C90GT 대비 여유로운 유효 탑재량을 바탕으로 다양한 대기오염물질(가스상: O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, VOCs, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>; 입자상: Black carbon, NR-PM<sub>1.0</sub> 화학 성분(OA, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 등), 입경분포)을 측정할 수 있는 측정 장비를 탑재하여, 장거리 이동 대기오염물질과 국내 대형 산업단지 및 도심, 산림, 해상지역 등 다양한 환경에서 대기오염물질의 조성과 공간 분포를 관측하여 대기오염 개선에 필요한 연구들이 수행되고 있다(Kim *et al.*, 2023a; Park *et al.*, 2023; Park *et al.*, 2022; Sarkar *et al.*, 2021; Park *et al.*, 2020a; Seo *et al.*, 2019). 위와 같이 국내 대기오염 항공관측의 기술 발전과 측정 인프라의 확장은 산업단지, 도심지역, 해상 등과 같이 넓은 대기오염 배출지역을 관측하고 위성 및 지상원격관측 검교정에 필요한 기초 자료 수집을 통해 국내 대기질 개선 연구활동에 기여함으로써 항공관측의 중요성과 필요성이 점점 대두되고 있다. 또한, 타국에 의존하지 않고 국내 자체적으로 대기오염 항공관측을 수행하여 동아시아와 같은 지역적 대기오염 현상을 연구하는 것에 있어서 국제적으로 기여할 수 있는 역량을 확보하였다.

### 3. 대기오염 항공관측 고려사항

#### 3.1 측정 기압의 변화

항공관측은 지상관측과는 달리 측정 고도의 변화를 동반한다. 측정 목적이 PBL 내의 측정이라면 지표와 가깝게 비행하기 때문에 비행고도가 약 1 km 수준으로 높지 않다. 만약 대기오염물질의 연직 분포를 측정하는 것이 목적이라면 측정하고자 하는 고도의 영역 내에서 계속적인 측정 고도의 변화가 발생한다(Park *et al.*, 2023, 2020b; Nussbaumer *et al.*, 2021; Pollack *et al.*, 2019; Müller *et al.*, 2014). 이때 가장 고려되는 부분은 고도변화에 따른 기압 변화이다. 예를 들면, 해수면(고도 0 m, 15°C 기준)에서 기압이 약 1,013 hPa이지만, 3 km 상공에서의 기압은 약 701 hPa이고, 6 km 상공의 기압은 약 472 hPa이다(Cavcar, 2000). 이처럼 고도에 따라서 기압이 변하게 되면 항공 측정 장비에 유입되는 시료의 부피도 함께 변할 수 있다. 일정한 양의 가스 시료가 기압이 감소하면 부피가 증가하게 되는데, 만약 측정 장비가 질량 유량(1,013 hPa, 15°C 기준)을 사용하여 시료가 유입된다면 고도 상승에 따른 기압 저하로 인해 동일한 질량 유량을 유지하기 위하여 더 많은 부피가 유입되어야 한다(Mills, 2016).

대기오염 연구를 위해 사용하는 대부분의 실시간 측정 장비들은 대기오염 시료의 유입을 위해 진공펌프(vacuum pump)를 사용한다(DeCarlo *et al.*, 2008; Nelson *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 1993). 각 진공펌프들은 각 측정 장비들이 정상적으로 운영이 될 수 있는 진공압(Vacuum Pressure)을 형성하여 유량조절기들을 통해 적정 유량으로 시료를 유입시키는 역할을 한다. 일반적으로 지상에서 사용하는 실시간 대기오염 측정 장비들은 표준대기압(1,013 hPa, 해수면, 15°C) 수준에서 정상적으로 작동하는 진공펌프를 사용하는데, 이를 항공 측정에 사용할 경우 고도 변화에 따라 작동 환경(기압)이 변하기 때문에 진공펌프가 정상적으로 작동하지 못할 수 있다. 일정 고도 이상에서 측정에 필요한 진공압을 형성하지 못한다면, 1) 진공펌프의 교체 또는 2) 진공펌프를 추가 장착하거나 3) 측정 장

비의 교체가 필요하다.

진공펌프를 교체하는 방법은 기존에 사용하는 진공 펌프보다 더 큰 용량의 진공펌프로 교체하여 기압이 낮아진 환경에서도 측정에 필요한 진공압을 충분히 형성할 수 있게 하는 방법인데, 이 방법의 경우 비행 고도가 높지 않은 상황에서 측정 장비 내부의 압력이 정상 작동 압력 범위보다 과도하게 낮아져서 측정 장비가 비정상적으로 작동될 수 있다.

진공펌프를 추가적으로 장착하는 방법은 측정 장비 시료유입구에 진공펌프를 추가하여 측정 장비를 거치지 않고 사전 조건(Precondition)을 형성하는 방법이다(Bahreini *et al.*, 2008; Wert *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 1993). 이 방법은 진공펌프와 압력조절기 등을 이용하여 항공관측을 수행하고자 하는 고도 중 최고 고도의 기압보다 낮게 사전 압력을 형성하여 측정 장비가 일정한 기압에서 시료를 유입할 수 있게 조건을 만들어 주는 방법이다. 이와 같은 방법은 시료유입로 내의 체류 시간(Residence time)을 줄여주는 장점이 있으며, 구성 방법에 따라서 가스상 물질의 확산이나 입자상 물질의 손실을 줄여 측정의 정확성을 높일 수 있는 장점이 있다(Bahreini *et al.*, 2008; Wert *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 1993).

마지막으로 측정 장비의 교체는 위의 두 가지 방법으로 해결이 되지 않는 경우에 기존과 다른 측정법(Method)을 사용하는 측정 장비로 교체하여 대기오염물질 측정 장비의 근본적인 한계를 해결하는 방법이며, 문제 해결에 필요한 시간과 비용이 가장 많이 발생할 수 있기 때문에 사전에 측정 장비의 적합성을 평가하여 이와 같은 문제 발생을 최소화해야 한다.

### 3.2 항공용 대기오염물질 측정 장비

항공기를 이용한 대기오염물질 측정은 단시간 내에 넓은 지역을 이동하며 측정하는 장점이 있지만, 빠른 속도로 이동하는 항공관측의 특성으로 인해 측정 장비를 선정할 때 분석 시간과 검출한계 등 여러 부분을 고려해야 한다. 국내 항공관측에서 주로 사용하는 Beechcraft C90GT나 Beechcraft 1900D의 경우 항공

관측 시 평균 300 km/hr로 비행하고, KORUS-AQ에 사용된 NASA DC-8의 경우 약 850 km/hr로 비행할 수 있으며 각각 1초에 83 m와 236 m를 이동할 수 있다. 이와 같이 빠른 속도로 이동하면서 측정을 수행하는 항공관측은 1초 이하의 빠른 분석이 요구된다.

대기오염물질 항공관측에서 가장 많이 쓰이는 측정 방법은 대표적으로 질량분석법(Mass spectrometry), 화학발광법(Chemiluminescence), 레이저 분광법(Laser spectroscopy)이 사용되며, 라디오미터(radiometer)와 라이다(Light Detection and Ranging; LiDAR)를 이용한 다양한 광학 측정들도 사용된다(표 4). 이 측정 방법들의 공통적인 특징은 분석 시간이 1초 이하로 매우 빠르다는 것이다. 분석 시간이 길어질 경우 빠른 속도로 비행하는 항공기로 인하여 측정 장비를 통해 검출된 대기오염물질의 검출 장소를 특정화하기 어렵다.

대기오염물질 항공관측에서 사용되는 질량분석기는 대표적으로 미세입자의 화학성분 분석을 위한 HR-ToF-AMS와 VOCs 및 그 외 가스상 물질( $H_2O_2$ ,  $SO_2$ ,  $HNO_3$ , Organic acids 등)을 분석하는 Proton Transfer Reaction ToF Mass Spectrometer (PTR-ToF-MS)와 Chemical Ionization MS (CIMS)가 있다. 이 HR-ToF-AMS, PTR-ToF-MS, CIMS는 ToF 질량분석기를 사용하여 높은 질량 분해능(Mass resolution)을 바탕으로 측정 정확도와 정밀도가 높고, 1 Hz 이상의 고해상도 측정이 가능하며, 각 측정 장비가 한 번에 여러 가지의 대기오염물질을 측정할 수 있는 장점이 있다(Park *et al.*, 2023, 2020b; Bourgeois *et al.*, 2022; Nault *et al.*, 2018; Müller *et al.*, 2014; Ren *et al.*, 2012; Eerdeken *et al.*, 2009; DeCarlo *et al.*, 2008).

항공관측에서 화학발광법은 대기오염물질 중 주로 NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 등을 측정할 때 사용한다(Nussbaumer *et al.*, 2021; Tadic *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2021; Ashworth *et al.*, 2020; Flocke *et al.*, 2020). 화학발광법은 두 화학물질이 반응(예, NO + O<sub>3</sub> = NO<sub>2</sub>)하며 생성된 전자적으로 여기된 화학물질(예, NO<sub>2</sub>\*)이 기저상태로 돌아오며 화학발광에 의해 방출되는 빛을 측정하는 방식이며, 높은 민감도와 낮은 검출한계로 측정할 수

**Table 4.** Instruments for airborne measurement of air pollution

Category	Instrument	Aircraft	Measurement	Reference
Mass spectrometry	High resolution time of flight aerosol mass spectrometer	C-130	NR-PM <sub>1</sub> (OA, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	DeCarlo <i>et al.</i> , 2008
		DC-8		Nault <i>et al.</i> , 2018
		King Air C90GT Beechcraft 1900D		Park <i>et al.</i> , 2020b Park <i>et al.</i> , 2023
	Proton transfer reaction mass spectrometer	Learjet 35A	BVOCs	Eerdeken <i>et al.</i> , 2009
		P-3B	VOCs	Müller <i>et al.</i> , 2014
		DC-8	Hydrocarbons	Nault <i>et al.</i> , 2018
	Chemical ionization mass spectrometer	DC-8	OH, HO <sub>2</sub>	Ren <i>et al.</i> , 2012
		DC-8	HCN, HNO <sub>3</sub> , DHT, SO <sub>2</sub> , PAN, PPN	Nault <i>et al.</i> , 2018
		DC-8	HONO	Bourgeois <i>et al.</i> , 2022
Chemiluminescence	Custom built	FAAM BAe-146	NO, NO <sub>2</sub>	Ashworth <i>et al.</i> , 2020
	Custom built	C-130, P-3B	O <sub>3</sub> , NO, NO <sub>2</sub>	Flocke <i>et al.</i> , 2020
	CLD-790 SR	Gulfstream G550	NO, NO <sub>2</sub>	Nussbaumer <i>et al.</i> , 2021
	Fast AIRborne Ozone	Gulfstream G550	O <sub>3</sub>	Tadic <i>et al.</i> , 2021
	Thermo 42i	Harbin Yun-12	NOx	Zhao <i>et al.</i> , 2021
Laser spectrometry	Four-channel TD-LIF <sup>a</sup>	BAe 146-301	NO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub>	Di Carlo <i>et al.</i> , 2013
	QEPAS <sup>b</sup> sensor	P-3B	CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O	Jahjah <i>et al.</i> , 2014
	DFG <sup>c</sup> -based laser spectrometer	DC-8, C-130	CH <sub>2</sub> O, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Richter <i>et al.</i> , 2015
	QC-TILDAS <sup>d</sup>	C-130	NH <sub>3</sub>	Pollack <i>et al.</i> , 2019
	CAMS <sup>e</sup>	DC-8	CH <sub>2</sub> O, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Fried <i>et al.</i> , 2020
	G2401-m	King Air 350	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO	Li <i>et al.</i> , 2020
	EAA-30r-EP analyzer <sup>f</sup>	Beechcraft 1900D	NH <sub>3</sub>	Park <i>et al.</i> , 2023

<sup>a</sup>Thermal Dissociation Laser Induced Fluorescence; <sup>b</sup>Quartz-Enhanced Photoacoustic Absorption Spectroscopy; <sup>c</sup>Difference Frequency Generation; <sup>d</sup>Quantum Cascade Tunable Infrared Laser Differential Absorption Spectrometer; <sup>e</sup>Cavity ring-down spectroscopy; <sup>f</sup>Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy

있는 장점이 있다(Nussbaumer *et al.*, 2021; Demerjian, 2000).

항공관측에서 레이저 분광법은 가스상 대기오염물질(NH<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, HONO, CO, CH<sub>2</sub>O, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 등)들과 온실가스(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 등)들을 측정할 때 주로 사용된다(Park *et al.*, 2023; Fried *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2020; Pollack *et al.*, 2019; Jahjah *et al.*, 2014; Di Carlo *et al.*, 2013). 레이저 분광법은 적외선 영역 또는 특정 파장의 레이저는 조사하여 시료에서 흡수 또는 산란 등에 의해 변화하는 스펙트럼을 측정하는 방법으로 낮은 검출한계와 높은 민감도 및 빠른 분석 시간이 장점이다(Richter *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2011; Santoni *et al.*, 2011; Nelson *et al.*, 2004).

앞서 설명한 측정 장비 외에도 1초 이하의 분석 시간과 높은 민감도 및 대기오염물질 배출원이 적은 상

층 대기에서 측정 가능한 낮은 검출한계를 만족하는 대기오염물질 측정 장비는 연구자에 선택에 따라 적용 가능하지만 공간 및 전력 사용에 제한이 있는 항공관측 특성상 유효 탑재량(Payload)을 고려하여 최종 선정해야 한다.

### 3.3 유효 탑재량(Payload)

대기오염 항공관측은 연구용 항공기 내부에 연구장비와 연구자가 탑승하여 상공을 비행하며 관측을 수행한다. 항공관측의 미션수행 시간과 관측비행영역은 항공기의 비행가능 시간 및 거리에 따라서 제한될 수 있으며, 이는 항공기에 탑재된 측정 장비와 탑승 연구진의 무게에 큰 영향을 받는다. 항공기의 무게는 크게 세 개의 그룹으로 1) 항공기 동체와 가동을 위한 기초 장비들의 무게(Operation Empty Weight, OEW), 2)

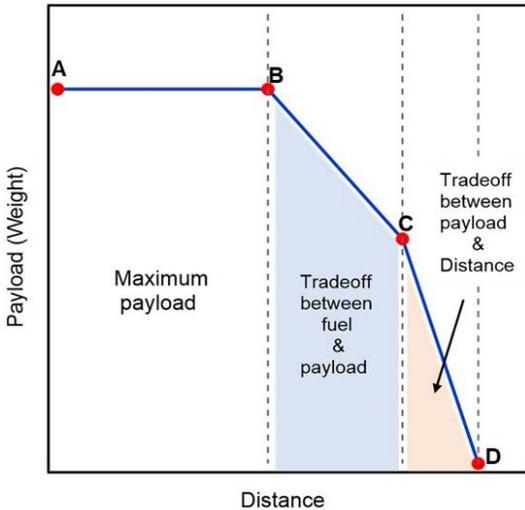


Fig. 2. Standard payload-distance diagram (Adapted from Ackert, 2013).

항공기 연료(Total fuel), 3) 유효 탑재량(Payload)으로 나눌 수 있다(Chatl and Balakrishnan, 2018; Ackert, 2013). 항공기의 무게 중 OEW는 줄일 수 없으며, 항공기 연료량과 유효 탑재량을 조절하여 비행거리를 조절할 수 있다(그림 2). 예를 들어 그림 2의 D지점은 항공기에 항공기 연료를 가득 주유하고 측정 장비와 연구자가 탑승하지 않았을 때 가장 긴 거리를 비행할 수 있음을 의미한다(최대비행거리). D지점에서 측정 장비가 탑재된다면 항공기의 무게 상승으로 인해 비행거리가 줄어들게 된다(D to C). C지점은 항공기의 최대이륙무게(Maximum Takeoff Weight, MTOW)를 의미하며, 탑재되는 측정 장비가 더 증가할 경우 MTOW를 초과하지 않도록 항공기 연료를 줄여야 한다(C to B) (Ackert, 2013). 따라서 더 많은 종류의 대기오염물질을 관측하기 위하여 많은 측정 장비를 탑재할 경우 비행 시간의 감소로 비효율적인 관측비행이 수행될 수 있다.

다음 고려사항은 측정 장비의 소비전력이다. 항공관측 중 측정 장비의 전기공급은 항공기 엔진에서 발전되는 전기를 사용하는데 항공기 엔진에서 생산될 수 있는 발전량이 정해져 있기 때문에 소비전력이 큰

연구 장비는 탑재하기 어렵다. 추가적으로 국내에서 대기오염 항공관측으로 주로 사용되는 Beechcraft C90GT와 B1900D는 직류(Direct Current, DC)를 생산하는데, 이를 인버터를 사용하여 측정 장비를 가동시킬 수 있는 교류(Alternating Current, AC)로 변환한다. 인버터를 이용하여 DC에서 AC로 변환될 때 인버터의 AC 출력 용량이 정해져 있기 때문에 항공기에 탑재될 수 있는 총 측정 장비는 인버터의 AC 출력 용량 이하로 제한된다. 국내에서 대기오염 종합관측을 위해 활용되는 B1900D의 경우 약 1,650 W (220 V, 7.5 A) 출력 용량의 인버터를 총 6개 탑재하여 약 9,900 W 이내의 전력을 연구 장비 가동을 위해 공급할 수 있다.

마지막으로 항공기의 내부 공간은 항공기에 따라서 매우 협소할 수 있어서 측정 장비의 무게와 소비전력 조건을 만족하더라도 내부 공간의 제약으로 인해 탑재하지 못할 수 있기 때문에 항공관측을 계획하는 과정 중에 대기오염물질의 측정 대상과 탑재 장비의 선별이 필요하다.

#### 4. 맺음말

항공관측은 기상 현상과 대기 화학 및 거동을 이해하는 데 많이 활용되어 왔으며, 특히 대기오염을 연구하는 데 중요한 역할을 한다. 대기오염 항공관측의 저변 확대는 대기질 개선에 필요한 과학적 자료를 산출하여 과학적 이해도 향상과 공공 보건 개선을 위한 정책 마련에 밑거름이 된다.

하지만 항공관측은 지상 측정 대비 높은 운영 비용과 유효 탑재량의 제한으로 인하여 복합적인 대기 화학 과정을 이해하기 위해 필요한 측정 장비를 모두 탑재할 수 없기 때문에 측정 대상에 대한 선택과 집중이 요구된다. 또한, 항공관측 비행경로는 공역관리규정(국토교통부고시 제2020-839호)에서 규정하는 비행제한구역과 비행금지구역 등으로 인하여 제한적인(수동적인) 비행경로로 수행되는 실정이다. 제한적인 비행경로의 주요 원인은 국내 곳곳에 위치한 공항에

서 발생하는 항공 교통량(비행경로 간섭)과 군사 훈련(비행, 낙하, 사격 등) 및 국가 보안 시설 등의 영향이 있다. 제한된 항공관측 비행경로는 군사기관 및 정부기관(지방 항공청 등)과 사전 협의를 통해서 더 과학적 가치가 높은 항공관측 비행경로로 일정 부분 조율할 수 있지만, 갑작스럽게 발생하는 고농도 미세먼지 현상과 같은 대기오염 현상을 미리 예측하여 관련 기관과 사전 협의하는 것은 매우 어렵다. 또한 대기오염 항공관측은 강수(대기오염물질의 습식 침적 등), 안개와 같은 기상 현상들의 영향을 받기 때문에 사전 협의를 통해 항공관측을 계획하였더라도 기상 현상 등 기타 요인에 의해 계획된 항공관측을 수행하지 못하기도 한다. 이와 같이 대기오염 항공관측을 수행하는데 제한이 되는 부분들을 개선하기 위해 다음의 사항을 제안한다.

#### 1) 대기오염 항공관측을 위한 대형 항공기 도입:

B1900D와 King Air C90GT 같은 중·소형 항공기는 좁은 회전반경으로 공간 해상도가 높은 비행이 가능하고, 제트엔진 대비 작은 소음으로 인구 밀집 지역에서 저공 비행이 가능하다는 장점이 있지만, 제한된 유효 탑재량으로 인해 측정 장비의 선택적인 탑재가 요구되며 4시간 내의 짧은 비행 시간으로 인하여 1회의 항공관측으로 관측 가능한 영역이 일부 구역으로 제한된다. 이는 항공관측을 통해 대기오염물질의 확산과, 확산 과정 중 역동적으로 변화하는 대기 화학 반응을 연구함에 있어서 연속적이지 못한(관측활동의 중단) 관측 결과를 초래한다. 대형 항공기의 도입은 상대적으로 더 많은 유효 탑재량을 바탕으로 비행 가능 시간(거리)의 확대와 측정 장비의 추가 탑재가 가능한 장점이 있으며, 1회의 항공관측만으로도 국내 전역을 비행(한반도 순환 비행)하며 국내 상공에 분포하고 있는 대기오염물질을 종합적으로 관측할 수 있다. 이는 지난 2016년 수행된 KORUS-AQ에 투입된 DC-8의 항공관측 수행 능력을 통해 이미 확인되었다. 이러한 대형 항공기의 도입은 항공기 구입 및 개조 비용뿐만

아니라 운영 비용 등을 수반하기 때문에 많은 비용이 필요하다. 대기오염 항공관측은 궁극적으로 국민건강을 저해하는 대기오염의 원인을 파악하는 것에 목적을 두기 때문에 정부와 민간, 학계 등 모든 부분의 관심과 지원이 필요하다. 선례로 현재 국내 대기오염 항공관측의 사용되는 B1900D는 과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부 및 국립환경과학원 등 여러 정부기관의 지원으로 도입되었다. B1900D 사례와 같이 정부가 주도하고 민간 및 학계가 함께 참여한다면 대기오염 관측을 위한 대형 항공기 도입도 가능할 것으로 판단된다.

2) 항공관측 전문 운영 인력 배양: 항공관측은 연구자 외에도 항공기 조종사 및 항공기 정비사가 함께 참여하여 운영된다. 국내 대기오염 항공관측은 시계 비행이 가능한 낮 시간(일몰 전)에만 항공관측이 수행되고 있기 때문에, 대기오염물질의 야간 화학 반응(night-time chemistry)에 관한 연구를 수행할 수 없다. 영국의 경우 야간 항공관측을 통해 HO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 등 야간 화학 반응에 기여하는 화학 성분들을 직접 관측하여 야간 화학 반응에 의한 대기오염의 영향을 연구하였다(Stone *et al.*, 2014; Kennedy *et al.*, 2011). 항공관측의 전문 운영 인력 배양은 항공관측에 필요한 운영 인력을 안정적으로 확보하고 항공관측의 적합한 비행 능력을 고도화하여, 아직 국내에서 연구가 미흡한 야간 대기오염물질의 분포와 화학 반응에 대한 연구를 수행할 수 있는 기틀을 마련할 수 있다.

3) 대기오염 항공관측 비행경로 협의를 위한 간소화된 공식 연락 체계(Hot-Line) 구축: 항공관측 비행 경로 협의는 군사기관 및 정부기관(지방 항공청 등)과 항공관측이 수행되기 1주일 전에서 1달 전 사이에 협의가 진행되며, 항공관측 연구 규모에 따라서 수 개월 이전에 협의를 하기도 한다. 항공기 운항에 안전을 위한 행정 절차는 꼭 필요하지만, 복잡한 행정 절차는 고농도 미세먼지 현상과 같이 갑작스럽게 발생한 대기오염을 대상으로 한 항공관측의 수행을 어렵게 한다. 일반적으로 국내 대기오

염 항공관측은 정부 주체로 수행되기 때문에 사익을 추구하기보다는 공익을 추구한다. 비행경로 협의의 위한 각 기관 담당자(실무자 및 승인권자)들 간의 연락체계가 구축된다면 대기오염 항공관측을 수행함에 있어 보다 능동적인 연구가 가능할 것으로 판단된다.

우리나라 대기오염 문제의 원인 파악과 대기질 개선을 위한 연구 및 정책 활동들이 계속적으로 진행되고 있다. 특히 2024년에는 KORUS-AQ의 뒤를 잇는 대기질 국제공동조사 연구 3단계(Satellite Integrated Joint Monitoring of Air Quality-III, SIJAQ-III)와 Airborne and Satellite Investigation of Asian Air Quality (ASIA-AQ)가 함께 수행될 예정으로, KORUS-AQ 이후에 반영된 대기오염 저감정책들과 KORUS-AQ 대비 개선된 대기질을 평가할 수 있는 좋은 원년이 될 수 있다. 본 논문을 통해 국내 대기오염 항공관측의 발전과 SIJAQ과 ASIA-AQ의 성공적인 연구 활동을 기원한다.

### 감사의 글

이 논문은 국립환경과학원의 재원으로 ‘입체관측을 통한 유기미세입자 및 주요 2차 입자상물질의 국가간 이동파악을 위한 항공관측’의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2023-01-01-142). 대기오염 항공관측을 함께 수행하고 도움 주시는 모든 연구자분들과 관계자분들의 노고에 감사드립니다.

### References

- Ackert, S. (2013) Aircraft payload-range analysis for financiers. Aircraft Monitor.
- Andreae, M.O., Berresheim, H., Bingemer, H., Jacob, D.J., Lewis, B.L., Li, S.-M., Talbot, R.W. (1990) The atmospheric sulfur cycle over the Amazon Basin: 2. Wet season, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 95, 16813-16824.
- Andreae, M.O., Browell, E.V., Garstang, M., Gregory, G.L., Harriss, R.C., Hill, G.F., Jacob, D.J., Pereira, M.C., Sachse, G.W., Setzer, A.W., Dias, P.L.S., Talbot, R.W., Torres, A.L., Wofsy, S.C. (1988) Biomass-burning emissions and associated haze layers over Amazonia, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 93, 1509-1527.
- Andreae, M.O., Chapuis, A., Cros, B., Fontan, J., Helas, G., Justice, C., Kaufman, Y.J., Minga, A., Nganga, D. (1992) Ozone and Aitken nuclei over equatorial Africa: Airborne observations during DECAFE 88, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 97, 6137-6148.
- Andreae, M.O., Fishman, J., Lindsay, J. (1996) The Southern Tropical Atlantic Region Experiment (STARE): Transport and Atmospheric Chemistry near the Equator-Atlantic (TRACE A) and Southern African Fire-Atmosphere Research Initiative (SAFARI): An introduction, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 101, 23519-23520.
- Ashworth, K., Bucci, S., Gallimore, P.J., Lee, J., Nelson, B.S., Sanchez-Marroquin, A., Schimpf, M.B., Smith, P.D., Drysdale, W.S., Hopkins, J.R., Lee, J.D., Pitt, J.R., Di Carlo, P., Krejci, R., McQuaid, J.B. (2020) Megacity and local contributions to regional air pollution: an aircraft case study over London, Atmospheric Chemistry and Physics, 20, 7193-7216.
- Bahreini, R., Dunlea, E.J., Matthew, B.M., Simons, C., Docherty, K.S., DeCarlo, P.F., Jimenez, J.L., Brock, C.A., Middlebrook, A.M. (2008) Design and Operation of a Pressure-Controlled Inlet for Airborne Sampling with an Aerodynamic Aerosol Lens, Aerosol Science and Technology, 42, 465-471.
- Barker, P.A., Allen, G., Gallagher, M., Pitt, J.R., Fisher, R.E., Bannan, T., Nisbet, E.G., Bauguitte, S.J.B., Pasternak, D., Cliff, S., Schimpf, M.B., Mehra, A., Bower, K.N., Lee, J.D., Coe, H., Percival, C.J. (2020) Airborne measurements of fire emission factors for African biomass burning sampled during the MOYA campaign, Atmospheric Chemistry and Physics, 20, 15443-15459.
- Bartlett, K.B., Crill, P.M., Sass, R.L., Harriss, R.C., Dise, N.B. (1992) Methane emissions from tundra environments in the Yukon-Kuskokwim delta, Alaska, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 97, 16645-16660.
- Bechle, M.J., Millet, D.B., Marshall, J.D. (2013) Remote sensing of exposure to NO<sub>2</sub>: Satellite versus ground-based measurement in a large urban area, Atmospheric Environment, 69, 345-353.
- Beck, S.M., Bendura, R.J., McDougal, D.S., Hoell Jr., J.M., Gregory, G.L., Curfman Jr., H.J., Davis, D.D., Bradshaw, J., Rod-

- gers, M.O., Wang, C.C., Davis, L.I., Campbell, M.J., Torres, A.L., Carroll, M.A., Ridley, B.A., Sachse, G.W., Hill, G.F., Condon, E.P., Rasmussen, R.A. (1987) Operational overview of NASA GTE/CITE 1 airborne instrument intercomparisons: Carbon monoxide, nitric oxide, and hydroxyl instrumentation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 92, 1977-1985.
- Benedict, K.B., Day, D., Schwandner, F.M., Kreidenweis, S.M., Schichtel, B., Malm, W.C., Collett, J.L. (2013) Observations of atmospheric reactive nitrogen species in Rocky Mountain National Park and across northern Colorado, *Atmospheric Environment*, 64, 66-76.
- Benish, S.E., He, H., Ren, X., Roberts, S.J., Salawitch, R.J., Li, Z., Wang, F., Wang, Y., Zhang, F., Shao, M., Lu, S., Dickerson, R.R. (2020) Measurement report: Aircraft observations of ozone, nitrogen oxides, and volatile organic compounds over Hebei Province, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 14523-14545.
- Blake, N.J., Blake, D.R., Wingenter, O.W., Sive, B.C., McKenzie, L.M., Lopez, J.P., Simpson, J.J., Fuelberg, H.E., Sachse, G.W., Anderson, B.E., Gregory, G.L., Carroll, M.A., Albercook, G.M., Rowland, F.S. (1999) Influence of southern hemispheric biomass burning on midtropospheric distributions of nonmethane hydrocarbons and selected halocarbons over the remote South Pacific, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104, 16213-16232.
- Bourgeois, I., Peischl, J., Neuman, J.A., Brown, S.S., Allen, H.M., Campuzano-Jost, P., Coggon, M.M., DiGangi, J.P., Diskin, G.S., Gilman, J.B., Gkatzelis, G.I., Guo, H., Halliday, H.A., Hanco, T.F., Holmes, C.D., Huey, L.G., Jimenez, J.L., Lamplugh, A.D., Lee, Y.R., Lindaas, J., Moore, R.H., Nault, B.A., Nowak, J.B., Pagonis, D., Rickly, P.S., Robinson, M.A., Rollins, A.W., Selimovic, V., St. Clair, J.M., Tanner, D., Vasquez, K.T., Veres, P.R., Warneke, C., Wennberg, P.O., Washenfelder, R.A., Wiggins, E.B., Womack, C.C., Xu, L., Zarzana, K.J., Ryerson, T.B. (2022) Comparison of airborne measurements of NO, NO<sub>2</sub>, HONO, NO<sub>y</sub>, and CO during FIREX-AQ, *Atmospheric Measurement Techniques*, 15, 4901-4930.
- Bradshaw, J.D., Rodgers, M.O., Sandholm, S.T., KeSheng, S., Davis, D.D. (1985) A two-photon laser-induced fluorescence field instrument for ground-based and airborne measurements of atmospheric NO, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 90, 12861-12873.
- Brandtjen, R., Klüpfel, T., Perner, D., Knudsen, B.M. (1994) Airborne measurements during the European Arctic Stratospheric Ozone Experiment: Observation of OCIO, *Geophysical Research Letters*, 21, 1363-1366.
- Browell, E.V., Fenn, M.A., Butler, C.F., Grant, W.B., Ismail, S., Ferrare, R.A., Kooi, S.A., Brackett, V.G., Clayton, M.B., Avery, M.A., Barrick, J.D.W., Fuelberg, H.E., Maloney, J.C., Newell, R.E., Zhu, Y., Mahoney, M.J., Anderson, B.E., Blake, D.R., Brune, W.H., Heikes, B.G., Sachse, G.W., Singh, H.B., Talbot, R.W. (2001) Large-scale air mass characteristics observed over the remote tropical Pacific Ocean during March-April 1999: Results from PEM-Tropics B field experiment, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106, 32481-32501.
- Brunke, M.A., Cutler, L., Urzua, R.D., Corral, A.F., Crosbie, E., Hair, J., Hostetler, C., Kirschler, S., Larson, V., Li, X.-Y., Ma, P.-L., Minke, A., Moore, R., Robinson, C.E., Scarino, A.J., Schlosser, J., Shook, M., Sorooshian, A., Lee Thornhill, K., Voigt, C., Wan, H., Wang, H., Winstead, E., Zeng, X., Zhang, S., Ziemba, L.D. (2022) Aircraft Observations of Turbulence in Cloudy and Cloud-Free Boundary Layers Over the Western North Atlantic Ocean From ACTIVATE and Implications for the Earth System Model Evaluation and Development, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2022JD036480.
- Cavcar, M. (2000) The international standard atmosphere (ISA), Anadolu University, Turkey, 30, 1-6.
- Chameides, W.L., Davis, D.D., Gregory, G.L., Sachse, G., Torres, A.L. (1989) Ozone precursors and ozone photochemistry over eastern North Pacific during the spring of 1984 based on the NASA GTE/CITE 1 airborne observations, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 94, 9799-9808.
- Chati, Y.S., Balakrishnan, H. (2018) Modeling of Aircraft Takeoff Weight Using Gaussian Processes, *Journal of Air Transportation*, 26, 70-79.
- Chen, G., Ziemba, L.D., Chu, D.A., Thornhill, K.L., Schuster, G.L., Winstead, E.L., Diskin, G.S., Ferrare, R.A., Burton, S.P., Ismail, S., Kooi, S.A., Omar, A.H., Slusher, D.L., Kleb, M.M., Reid, J.S., Twohy, C.H., Zhang, H., Anderson, B.E. (2011) Observations of Saharan dust microphysical and optical properties from the Eastern Atlantic during NAMMA airborne field campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 723-740.
- Chen, P., Quan, J., Zhang, Q., Tie, X., Gao, Y., Li, X., Huang, M. (2013) Measurements of vertical and horizontal distributions of ozone over Beijing from 2007 to 2010, *Atmospheric Environment*, 74, 37-44.
- Cho, C., Clair, J.M.S., Liao, J., Wolfe, G.M., Jeong, S., Kang, D.i., Choi, J., Shin, M.-H., Park, J., Park, J.-H., Fried, A., Weinheimer, A., Blake, D.R., Diskin, G.S., Ullmann, K., Hall, S.R., Brune, W.H., Hanco, T.F., Min, K.-E. (2021) Evolution of formaldehyde (HCHO) in a plume origi-

- nating from a petrochemical industry and its volatile organic compounds (VOCs) emission rate estimation, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 9.
- Choi, Y., Ghim, Y.S., Rozenhaimer, M.S., Redemann, J., LeBlanc, S.E., Flynn, C.J., Johnson, R.J., Lee, Y., Lee, T., Park, T., Schwarz, J.P., Lamb, K.D., Perring, A.E. (2021) Temporal and spatial variations of aerosol optical properties over the Korean peninsula during KORUS-AQ, *Atmospheric Environment*, 254, 118301.
- Chou, C., Formenti, P., Maille, M., Ausset, P., Helas, G., Harrison, M., Osborne, S. (2008) Size distribution, shape, and composition of mineral dust aerosols collected during the African Monsoon Multidisciplinary Analysis Special Observation Period 0: Dust and Biomass-Burning Experiment field campaign in Niger, January 2006, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113.
- Clarke, A.D., Collins, W.G., Rasch, P.J., Kapustin, V.N., Moore, K., Howell, S., Fuelberg, H.E. (2001) Dust and pollution transport on global scales: Aerosol measurements and model predictions, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106, 32555-32569.
- Crawford, J.H., Ahn, J.-Y., Al-Saadi, J., Chang, L., Emmons, L.K., Kim, J., Lee, G., Park, J.-H., Park, R.J., Woo, J.H., Song, C.-K., Hong, J.-H., Hong, Y.-D., Lefer, B.L., Lee, M., Lee, T., Kim, S., Min, K.-E., Yum, S.S., Shin, H.J., Kim, Y.-W., Choi, J.-S., Park, J.-S., Szykman, J.J., Long, R.W., Jordan, C.E., Simpson, I.J., Fried, A., Dibb, J.E., Cho, S., Kim, Y.P. (2021) The Korea-United States Air Quality (KORUS-AQ) field study, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 9.
- Crawford, J.H., Davis, D.D., Chen, G., Bradshaw, J., Sandholm, S., Kondo, Y., Merrill, J., Liu, S., Browell, E., Gregory, G., Anderson, B., Sachse, G., Barrick, J., Blake, D., Talbot, R., Poeschel, R. (1997) Implications of large scale shifts in tropospheric NO<sub>x</sub> levels in the remote tropical Pacific, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102, 28447-28468.
- Crumeyrolle, S., Schwarzenboeck, A., Roger, J.C., Sellegri, K., Burkhardt, J.F., Stohl, A., Gomes, L., Quennehen, B., Roberts, G., Weigel, R., Villani, P., Pichon, J.M., Bourriane, T., Laj, P. (2013) Overview of aerosol properties associated with air masses sampled by the ATR-42 during the EUCAARI campaign (2008), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 4877-4893.
- Cui, L., Wu, D., Wang, S., Xu, Q., Hu, R., Hao, J. (2022) Measurement report: Ambient volatile organic compound (VOC) pollution in urban Beijing: characteristics, sources, and implications for pollution control, *Atmospheric Chemistry and Physics* 22, 11931-11944.
- de Gouw, J.A., Warneke, C., Scheeren, H.A., van der Veen, C., Bolder, M., Scheele, M.P., Williams, J., Wong, S., Lange, L., Fischer, H., Lelieveld, J. (2001) Overview of the trace gas measurements on board the Citation aircraft during the intensive field phase of INDOEX, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106, 28453-28467.
- DeCarlo, P., Dunlea, E., Kimmel, J., Aiken, A., Sueper, D., Crouse, J., Wennberg, P., Emmons, L., Shinozuka, Y., Clarke, A. (2008) Fast airborne aerosol size and chemistry measurements above Mexico City and Central Mexico during the MILAGRO campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 4027-4048.
- DeCarlo, P.F., Ulbrich, I.M., Crouse, J., de Foy, B., Dunlea, E.J., Aiken, A.C., Knapp, D., Weinheimer, A.J., Campos, T., Wennberg, P.O., Jimenez, J.L. (2010) Investigation of the sources and processing of organic aerosol over the Central Mexican Plateau from aircraft measurements during MILAGRO, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 5257-5280.
- Decker, Z.C.J., Robinson, M.A., Barsanti, K.C., Bourgeois, I., Coggon, M.M., DiGangi, J.P., Diskin, G.S., Flocke, F.M., Franchin, A., Fredrickson, C.D., Gkatzelis, G.I., Hall, S.R., Halliday, H., Holmes, C.D., Huey, L.G., Lee, Y.R., Lindaas, J., Middlebrook, A.M., Montzka, D.D., Moore, R., Neuman, J.A., Nowak, J.B., Palm, B.B., Peischl, J., Piel, F., Rickly, P.S., Rollins, A.W., Ryerson, T.B., Schwantes, R.H., Sekimoto, K., Thornhill, L., Thornton, J.A., Tyndall, G.S., Ullmann, K., Van Rooy, P., Veres, P.R., Warneke, C., Washenfelder, R.A., Weinheimer, A.J., Wiggins, E., Winstead, E., Wisthaler, A., Womack, C., Brown, S.S. (2021) Nighttime and daytime dark oxidation chemistry in wildfire plumes: an observation and model analysis of FIREX-AQ aircraft data, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 16293-16317.
- Demerjian, K.L. (2000) A review of national monitoring networks in North America, *Atmospheric Environment*, 34, 1861-1884.
- Di Carlo, P., Aruffo, E., Busilacchio, M., Giammaria, F., Dari-Saliburgo, C., Biancofiore, F., Visconti, G., Lee, J., Moller, S., Reeves, C.E., Bauguitte, S., Forster, G., Jones, R.L., Ouyang, B. (2013) Aircraft based four-channel thermal dissociation laser induced fluorescence instrument for simultaneous measurements of NO<sub>2</sub>, total peroxy nitrate, total alkyl nitrate, and HNO<sub>3</sub>, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 971-980.
- Dulac, F., Chazette, P. (2003) Airborne study of a multi-layer aerosol structure in the eastern Mediterranean observed with the airborne polarized lidar ALEX during a STAA

- ARTE campaign (7 June 1997), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3, 1817-1831.
- Dupont, R., Pierce, B., Worden, J., Hair, J., Fenn, M., Hamer, P., Natarajan, M., Schaack, T., Lenzen, A., Apel, E., Dibb, J., Diskin, G., Huey, G., Weinheimer, A., Kondo, Y., Knapp, D. (2012) Attribution and evolution of ozone from Asian wild fires using satellite and aircraft measurements during the ARCTAS campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 169-188.
- Eerdeken, G., Ganzeveld, L., Vilà-Guerau de Arellano, J., Klüpfel, T., Sinha, V., Yassaa, N., Williams, J., Harder, H., Kubistin, D., Martinez, M., Lelieveld, J. (2009) Flux estimates of isoprene, methanol and acetone from airborne PTR-MS measurements over the tropical rainforest during the GABRIEL 2005 campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 4207-4227.
- Farwell, S.O., MacTaggart, D.L., Chatham, W.H., Everson, D.O., Samaranyake, K., Lim, Y.T. (1995) Airborne measurements of total sulfur gases during NASA Global Tropospheric Experiment/Chemical Instrumentation Test and Evaluation 3, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100, 7223-7234.
- Ferek, R.J., Chatfield, R.B., Andreae, M.O. (1986) Vertical distribution of dimethylsulphide in the marine atmosphere, *Nature*, 320, 514-516.
- Fishman, J., Hoell Jr., J.M., Bendura, R.D., McNeal, R.J., Kirchhoff, V.W.J.H. (1996) NASA GTE TRACE A experiment (September-October 1992): Overview, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101, 23865-23879.
- Flocke, F., Pfister, G., Crawford, J.H., Pickering, K.E., Pierce, G., Bon, D., Reddy, P. (2020) Air Quality in the Northern Colorado Front Range Metro Area: The Front Range Air Pollution and Photochemistry Experiment (FRAPPÉ), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD031197.
- Förster, E., Bönisch, H., Neumaier, M., Obersteiner, F., Zahn, A., Hilboll, A., Kalisz Hedegaard, A.B., Daskalakis, N., Poulidis, A.P., Vrekoussis, M., Lichtenstern, M., Braesicke, P. (2023) Chemical and dynamical identification of emission outflows during the HALO campaign EMERGE in Europe and Asia, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 1893-1918.
- Fried, A., Walega, J., Weibring, P., Richter, D., Simpson, I.J., Blake, D.R., Blake, N.J., Meinardi, S., Barletta, B., Hughes, S.C., Crawford, J.H., Diskin, G., Barrick, J., Hair, J., Fenn, M., Wisthaler, A., Mikoviny, T., Woo, J.-H., Park, M., Kim, J., Min, K.-E., Jeong, S., Wennberg, P.O., Kim, M.J., Crouse, J.D., Teng, A.P., Bennett, R., Yang-Martin, M., Shook, M.A., Huey, G., Tanner, D., Knote, C., Kim, J., Park, R., Brune, W. (2020) Airborne formaldehyde and volatile organic compound measurements over the Daesan petrochemical complex on Korea's northwest coast during the Korea-United States Air Quality study: Estimation of emission fluxes and effects on air quality, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 8.
- Fu, G., Lin, H.X., Heemink, A.W., Segers, A.J., Lu, S., Palsson, T. (2015) Assimilating aircraft-based measurements to improve forecast accuracy of volcanic ash transport, *Atmospheric Environment*, 115, 170-184.
- Geng, F., Zhang, Q., Tie, X., Huang, M., Ma, X., Deng, Z., Yu, Q., Quan, J., Zhao, C. (2009) Aircraft measurements of O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, VOCs, and SO<sub>2</sub> in the Yangtze River Delta region, *Atmospheric Environment*, 43, 584-593.
- George, M., Andrés Hernández, M.D., Nenakhov, V., Liu, Y., Burrows, J.P., Bohn, B., Förster, E., Obersteiner, F., Zahn, A., Harlaß, T., Ziereis, H., Schlager, H., Schreiner, B., Kluge, F., Bigge, K., Pfeilsticker, K. (2023) Airborne observations of peroxy radicals during the EMERGE campaign in Europe, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 7799-7822.
- Gregory, G.L., Browell, E.V., Warren, L.S. (1988) Boundary layer ozone: An airborne survey above the Amazon Basin, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 93, 1452-1468.
- Gregory, G.L., Davis, D.D., Thornton, D.C., Johnson, J.E., Bandy, A.R., Saltzman, E.S., Andreae, M.O., Barrick, J.D. (1993) An intercomparison of aircraft instrumentation for tropospheric measurements of carbonyl sulfide, hydrogen sulfide, and carbon disulfide, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98, 23353-23372.
- Gregory, G.L., Harris, R.C., Talbot, R.W., Rasmussen, R.A., Garstang, M., Andreae, M.O., Hinton, R.R., Browell, E.V., Beck, S.M., Sebacher, D.I., Khalil, M.A.K., Ferek, R.J., Harris, S.V. (1986) Air chemistry over the tropical forest of Guyana, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 91, 8603-8612.
- Gregory, G.L., Hoell Jr., J.M., Carroll, M.A., Ridley, B.A., Davis, D.D., Bradshaw, J., Rodgers, M.O., Sandholm, S.T., Schiff, H.I., Hastie, D.R., Kerecki, D.R., Mackay, G.I., Harris, G.W., Torres, A.L., Fried, A. (1990) An intercomparison of airborne nitrogen dioxide instruments, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 95, 10103-10127.
- Hamburger, T., McMeeking, G., Minikin, A., Birmili, W., Dall'Osto, M., O'Dowd, C., Flentje, H., Henzing, B., Junninen, H., Kristensson, A., de Leeuw, G., Stohl, A., Burkhardt, J.F., Coe, H., Krejci, R., Petzold, A. (2011) Overview of the synoptic and pollution situation over Europe during the EUCAARI-LONGREX field campaign, *Atmospheric*

- Chemistry and Physics, 11, 1065-1082.
- Hamilton, J.D., Kelly, C.A., Rudd, J.W.M., Hesslein, R.H., Roulet, N.T. (1994) Flux to the atmosphere of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> from wetland ponds on the Hudson Bay lowlands (HBLs), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99, 1495-1510.
- Han, J.S., Kim, Y.M., Ahn, J.Y., Kong, B.J., Choi, J.S., Lee, S.U., Lee, S.J. (2006) Spatial Distribution and Variation of Long-range Transboundary Air Pollutants Flux during 1997-2004, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22, 99-106.
- Harriss, R.C., Garstang, M., Wofsy, S.C., Beck, S.M., Bendura, R.J., Coelho, J.R.B., Drewry, J.W., Hoell Jr., J.M., Matson, P.A., McNeal, R.J., Molion, L.C.B., Navarro, R.L., Rabine, V., Snell, R.L. (1990) The Amazon Boundary Layer Experiment: Wet season 1987, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 95, 16721-16736.
- Harriss, R.C., Wofsy, S.C., Bartlett, D.S., Shipham, M.C., Jacob, D.J., Hoell Jr., J.M., Bendura, R.J., Drewry, J.W., McNeal, R.J., Navarro, R.L., Gidge, R.N., Rabine, V.E. (1992) The Arctic Boundary Layer Expedition (ABLE 3A): July-August 1988, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97, 16383-16394.
- Harriss, R.C., Wofsy, S.C., Garstang, M., Browell, E.V., Molion, L.C.B., McNeal, R.J., Hoell Jr., J.M., Bendura, R.J., Beck, S.M., Navarro, R.L., Riley, J.T., Snell, R.L. (1988) The Amazon Boundary Layer Experiment (ABLE 2A): dry season 1985, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 93, 1351-1360.
- Harriss, R.C., Wofsy, S.C., Hoell Jr., J.M., Bendura, R.J., Drewry, J.W., McNeal, R.J., Pierce, D., Rabine, V., Snell, R.L. (1994) The Arctic Boundary Layer Expedition (ABLE-3B): July-August 1990, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99, 1635-1643.
- Herman, J., Spinei, E., Fried, A., Kim, J., Kim, J., Kim, W., Cede, A., Abuhassan, N., Segal-Rozenhaimer, M. (2018) NO<sub>2</sub> and HCHO measurements in Korea from 2012 to 2016 from Pandora spectrometer instruments compared with OMI retrievals and with aircraft measurements during the KORUS-AQ campaign, *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 4583-4603.
- Hernández, M.D.A., Hilboll, A., Ziereis, H., Förster, E., Krüger, O.O., Kaiser, K., Schneider, J., Barnaba, F., Vrekoussis, M., Schmidt, J., Huntrieser, H., Blechschmidt, A.M., George, M., Nenakhov, V., Harlass, T., Holanda, B.A., Wolf, J., Eirenschmalz, L., Krebsbach, M., Pöhlker, M.L., Kalisz Hedegaard, A.B., Mei, L., Pfeilsticker, K., Liu, Y., Koppmann, R., Schlager, H., Bohn, B., Schumann, U., Richter, A., Schreiner, B., Sauer, D., Baumann, R., Mertens, M., Jöckel, P., Kilian, M., Stratmann, G., Pöhlker, C., Campanelli, M., Pandolfi, M., Sicard, M., Gómez-Amo, J.L., Pujadas, M., Bigge, K., Kluge, F., Schwarz, A., Daskalakis, N., Walter, D., Zahn, A., Pöschl, U., Bönisch, H., Borrmann, S., Platt, U., Burrows, J.P. (2022) Overview: On the transport and transformation of pollutants in the outflow of major population centres - observational data from the EMerGe European intensive operational period in summer 2017, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 5877-5924.
- Hoell, J.M., Davis, D.D., Jacob, D.J., Rodgers, M.O., Newell, R.E., Fuelberg, H.E., McNeal, R.J., Raper, J.L., Bendura, R.J. (1999) Pacific Exploratory Mission in the tropical Pacific: PEM-Tropics A, August-September 1996, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104, 5567-5583.
- Hoell, J.M., Davis, D.D., Liu, S.C., Newell, R., Shipham, M., Akimoto, H., McNeal, R.J., Bendura, R.J., Drewry, J.W. (1996) Pacific Exploratory Mission-West A (PEM-West A): September-October 1991, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101, 1641-1653.
- Hoell, J.M., Davis, D.D., Liu, S.C., Newell, R.E., Akimoto, H., McNeal, R.J., Bendura, R.J. (1997) The Pacific Exploratory Mission-West Phase B: February-March, 1994, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102, 28223-28239.
- Hoell, J.M., Gregory, G.L., Carroll, M.A., McFarland, M., Ridley, B.A., Davis, D.D., Bradshaw, J., Rodgers, M.O., Torres, A.L., Sachse, G.W., Hill, G.F., Condon, E.P., Rasmussen, R.A., Campbell, M.C., Farmer, J.C., Sheppard, J.C., Wang, C.C., Davis, L.I. (1984) An intercomparison of carbon monoxide, nitric oxide, and hydroxyl measurement techniques: Overview of results, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 89, 11819-11825.
- Hoell Jr., J.M. (1985) Preface [to special section on Global Tropospheric Experiment/Chemical Instrumentation Test and Evaluation Project], *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 90, 12807-12807.
- Hoell Jr., J.M., Albritton, D.L., Gregory, G.L., McNeal, R.J., Beck, S.M., Bendura, R.J., Drewry, J.W. (1990) Operational overview of NASA GTE/CITE 2 airborne instrument intercomparisons: Nitrogen dioxide, nitric acid, and peroxyacetyl nitrate, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 95, 10047-10054.
- Hoell Jr., J.M., Davis, D.D., Gregory, G.L., McNeal, R.J., Bendura, R.J., Drewry, J.W., Barrick, J.D., Kirchhoff, V.W.J.H., Motta, A.G., Navarro, R.L., Dorko, W.D., Owen, D.W. (1993) Operational overview of the NASA GTE/CITE 3 airborne instrument intercomparisons for sulfur dioxide, hydrogen sulfide, carbonyl sulfide, dimethyl sul-

- fide, and carbon disulfide, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98, 23291-23304.
- Hoell Jr., J.M., Gregory, G.L., McDougal, D.S., Sachse, G.W., Hill, G.F., Condon, E.P., Rasmussen, R.A. (1987) Airborne intercomparison of carbon monoxide measurement techniques, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 92, 2009-2019.
- Houghton, J.T., Callander, B.A., Varney, S.K. (1992) *Climate change 1992*. Cambridge University Press.
- Jahjah, M., Jiang, W., Sanchez, N.P., Ren, W., Patimisco, P., Spagnolo, V., Herndon, S.C., Griffin, R.J., Tittel, F.K. (2014) Atmospheric CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O measurements near Greater Houston area landfills using a QCL-based QEPAS sensor system during DISCOVER-AQ 2013, *Optics Letters*, 39, 957-960.
- Jeong, Y., Hang, M., Lee, J., Kim, C., Lee, K., Kim, J., Kang, W., Ryu, S. (1994) Chang Gong-91 Design Change for Air Sampling Inlet, *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 1994.11, 58-61, (in Korean).
- Jordan, C.E., Crawford, J.H., Beyersdorf, A.J., Eck, T.F., Halliday, H.S., Nault, B.A., Chang, L.-S., Park, J., Park, R., Lee, G., Kim, H., Ahn, J.-y., Cho, S., Shin, H.J., Lee, J.H., Jung, J., Kim, D.-S., Lee, M., Lee, T., Whitehill, A., Szykman, J., Schueneman, M.K., Campuzano-Jost, P., Jimenez, J.L., DiGangi, J.P., Diskin, G.S., Anderson, B.E., Moore, R.H., Ziemba, L.D., Fenn, M.A., Hair, J.W., Kuehn, R.E., Holz, R.E., Chen, G., Travis, K., Shook, M., Peterson, D.A., Lamb, K.D., Schwarz, J.P. (2020) Investigation of factors controlling PM<sub>2.5</sub> variability across the South Korean Peninsula during KORUS-AQ, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 8.
- Jung, W., Cha, J.W., Ko, A.R., Chae, S., Ro, Y., Hwang, H.J., Kim, B.-Y., Ku, J.M., Chang, K.-H., Lee, C. (2022) Progressive and Prospective Technology for Cloud Seeding Experiment by Unmanned Aerial Vehicle and Atmospheric Research Aircraft in Korea, *Advances in Meteorology*, 2022, 3128657.
- Kang, Y., Lim, S., Lee, M., Yoo, H.-J. (2021) Vertical Distributions of Refractory Black Carbon over the Yellow Sea during the Spring 2020, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37, 710-728.
- Kartal, D., Andrés-Hernández, M.D., Reichert, L., Schlager, H., Burrows, J.P. (2010) Technical Note: Characterisation of a DUALER instrument for the airborne measurement of peroxy radicals during AMMA 2006, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 3047-3062.
- Kennedy, O.J., Ouyang, B., Langridge, J.M., Daniels, M.J.S., Bauguitte, S., Freshwater, R., McLeod, M.W., Ironmonger, C., Sendall, J., Norris, O., Nightingale, R., Ball, S.M., Jones, R.L. (2011) An aircraft based three channel broadband cavity enhanced absorption spectrometer for simultaneous measurements of NO<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and NO<sub>2</sub>, *Atmospheric Measurement Techniques*, 4, 1759-1776.
- Kim, B., Cha, J., Han, J., Park, I., Kim, J., Na, J., Choi, D., Ahn, J., Kang, C. (1997) Aircraft Measurement of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> over Yellow Sea Area, *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, 13, 361-369.
- Kim, B.-G., Han, J.-S., Park, S.-U. (2001) Transport of SO<sub>2</sub> and aerosol over the Yellow sea, *Atmospheric Environment*, 35, 727-737.
- Kim, C.-H., Jo, H.-Y., Park, S.-Y., Jo, Y.-J., Lee, J.-J., Yang, G.-H., Park, T., Lee, T., Lee, H.-J., Kang, J.-E. (2018) Meteorological Overview and Signatures of Long-range Transport Processes during the MAPS-Seoul 2015 Campaign, *Aerosol and Air Quality Research*, 18, 2173-2184.
- Kim, H., Park, R.J., Kim, S., Brune, W.H., Diskin, G.S., Fried, A., Hall, S.R., Weinheimer, A.J., Wennberg, P., Wisthaler, A., Blake, D.R., Ullmann, K. (2022a) Observed versus simulated OH reactivity during KORUS-AQ campaign: Implications for emission inventory and chemical environment in East Asia, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 10.
- Kim, J., Seo, B.-k., Lee, T., Kim, J., Kim, S., Bae, G.-N., Lee, G. (2023a) Airborne estimation of SO<sub>2</sub> emissions rates from a coal-fired power plant using two top-down methods: A mass balance model and Gaussian footprint approach, *Science of The Total Environment*, 855, 158826.
- Kim, J.-H., Goo, T.-Y., Jung, S.-P., Kim, M.-S., Lee, K., Kang, M., Lee, C., Yang, J., Hong, S., Ko, H., Yun, J.H. (2022b) Overview of the KMA/NIMS Atmospheric Research Aircraft (NARA) and its data archive: Annual airborne observations over the Korean peninsula, *Geoscience Data Journal*. <https://doi.org/10.1002/gdj3.182>
- Kim, M.-S., Kwon, B.H., Goo, T.-Y., Jung, S.-P. (2023b) Dropsonde-Based Heat Fluxes and Mixed Layer Height over the Sea Surface near the Korean Peninsula, *Remote Sensing*, 15, 25.
- Kim, Y.P., Lee, G. (2018) Trend of Air Quality in Seoul: Policy and Science, *Aerosol and Air Quality Research*, 18, 2141-2156.
- Ku, J.M., Chang, K.-H., Chae, S., Ko, A.R., Ro, Y., Jung, W., Lee, C. (2023) Preliminary Results of Cloud Seeding Experiments for Air Pollution Reduction in 2020, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 59, 347-358.
- Ku, J.M., Ko, A.R., Chae, S., Hwang, H.J., Ro, Y., Jung, W. (2020) Analysis of Cloud Seeding Experiment by Aircraft: A Case Study of an International Joint Experiment in

- 2019, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 20, 67-78.
- Kulmala, M., Asmi, A., Lappalainen, H.K., Carslaw, K.S., Pöschl, U., Baltensperger, U., Hov, Ø., Brenquier, J.L., Pandis, S.N., Facchini, M.C., Hansson, H.C., Wiedensohler, A., O'Dowd, C.D. (2009) Introduction: European Integrated Project on Aerosol Cloud Climate and Air Quality interactions (EUCAARI) - integrating aerosol research from nano to global scales, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 2825-2841.
- Kwon, H.-A., Park, R.J., Oak, Y.J., Nowlan, C.R., Janz, S.J., Kowalewski, M.G., Fried, A., Walega, J., Bates, K.H., Choi, J., Blake, D.R., Wisthaler, A., Woo, J.-H. (2021) Top-down estimates of anthropogenic VOC emissions in South Korea using formaldehyde vertical column densities from aircraft during the KORUS-AQ campaign, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 9.
- Lee, B.H., Wood, E.C., Zahniser, M.S., McManus, J.B., Nelson, D.D., Herndon, S.C., Santoni, G.W., Wofsy, S.C., Munger, J.W. (2011) Simultaneous measurements of atmospheric HONO and NO<sub>2</sub> via absorption spectroscopy using tunable mid-infrared continuous-wave quantum cascade lasers, *Applied Physics B*, 102, 417-423.
- Lee, B.P., Li, Y.J., Yu, J.Z., Louie, P.K.K., Chan, C.K. (2013) Physical and chemical characterization of ambient aerosol by HR-ToF-AMS at a suburban site in Hong Kong during springtime 2011, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 8625-8639.
- Lee, G., Oh, H.-R., Ho, C.-H., Kim, J., Song, C.-K., Chang, L.-S., Lee, J.-B., Lee, S. (2016) Airborne Measurements of High Pollutant Concentration Events in the Free Troposphere over the West Coast of South Korea between 1997 and 2011, *Aerosol and Air Quality Research*, 16, 1118-1130.
- Lee, H.J., Chatfield, R.B., Bell, M.L. (2018) Spatial analysis of concentrations of multiple air pollutants using NASA DISCOVER-AQ aircraft measurements: Implications for exposure assessment, *Environmental Research*, 160, 487-498.
- Lee, J.-K., Rubow, K.L., Pui, D.Y.H., Liu, B.Y.H. (1993) Design and Performance Evaluation of a Pressure-Reducing Device for Aerosol Sampling from High-Purity Gases, *Aerosol Science and Technology*, 19, 215-226.
- Lee, Y., Park, J., Kim, P., Ghim, Y.S. (2021) New particle formation and diurnal variations in number concentrations at a rural site downwind of Seoul, Korea, *Atmospheric Pollution Research*, 12, 214-223.
- Li, S., Kim, Y., Kim, J., Kenea, S.T., Goo, T.-Y., Labzovskii, L.D., Byun, Y.-H. (2020) In Situ Aircraft Measurements of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>: Mapping Spatio-Temporal Variations over Western Korea in High-Resolutions, *Remote Sensing*, 12, 3093.
- Liao, J., Wolfe, G.M., Hannun, R.A., St. Clair, J.M., Hanisco, T.F., Gilman, J.B., Lamplugh, A., Selimovic, V., Diskin, G.S., Nowak, J.B., Halliday, H.S., DiGangi, J.P., Hall, S.R., Ullmann, K., Holmes, C.D., Fite, C.H., Agastra, A., Ryerson, T.B., Peischl, J., Bourgeois, I., Warneke, C., Coggon, M.M., Gkatzelis, G.I., Sekimoto, K., Fried, A., Richter, D., Weibring, P., Apel, E.C., Hornbrook, R.S., Brown, S.S., Womack, C.C., Robinson, M.A., Washenfelder, R.A., Veres, P.R., Neuman, J.A. (2021) Formaldehyde evolution in US wildfire plumes during the Fire Influence on Regional to Global Environments and Air Quality experiment (FIREX-AQ), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 18319-18331.
- Liu, K., Quan, J., Mu, Y., Zhang, Q., Liu, J., Gao, Y., Chen, P., Zhao, D., Tian, H. (2013) Aircraft measurements of BTEX compounds around Beijing city, *Atmospheric Environment*, 73, 11-15.
- Liu, Q., Quan, J., Jia, X., Sun, Z., Li, X., Gao, Y., Liu, Y. (2019) Vertical Profiles of Aerosol Composition over Beijing, China: Analysis of In Situ Aircraft Measurements, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 76, 231-245.
- Luke, W.T., Dickerson, R.R. (1987) The flux of reactive nitrogen compounds from eastern North America to the western Atlantic Ocean, *Global Biogeochemical Cycles*, 1, 329-343.
- Ma, J., Wang, W., Liu, H., Chen, Y., Xu, X., Lelieveld, J. (2013) Pollution plumes observed by aircraft over North China during the IPAC-NC field campaign, *Chinese Science Bulletin*, 58, 4329-4336.
- Marengo, A., Thouret, V., Nédélec, P., Smit, H., Helten, M., Kley, D., Karcher, F., Simon, P., Law, K., Pyle, J., Poschmann, G., Wrede, R.V., Hume, C., Cook, T. (1998) Measurement of ozone and water vapor by Airbus in-service aircraft: The MOZIC airborne program, an overview, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103, 25631-25642.
- McNeal, R., Jacob, D., Davis, D., Liu, S. (1998) The NASA Global Tropospheric Experiment: recent accomplishments and future plans. *IGAC Newsletter*.
- McNeal, R.J. (1987) Preface [to special section on Global Tropospheric Experiment/Chemical Instrumentation Test and Evaluation Results], *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 92, 1976-1976.
- McNeal, R.J., Mugler Jr., J.P., Harris, R.C., Hoell Jr., J.M. (1983) NASA global tropospheric experiment, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 64, 561-562.

- Mills, D. (2016) Chapter 9 - Airflow Rate Evaluation, in *Pneumatic Conveying Design Guide (Third Edition)*. Edited by Mills, D. Butterworth-Heinemann, 199-225.
- Misanchuk, B.A., Hastie, D.R., Schiff, H.I. (1987) The distribution of nitrogen oxides off the East Coast of North America, *Global Biogeochemical Cycles*, 1, 345-355.
- Molina, L.T., Madronich, S., Gaffney, J.S., Apel, E., de Foy, B., Fast, J., Ferrare, R., Herndon, S., Jimenez, J.L., Lamb, B., Osornio-Vargas, A.R., Russell, P., Schauer, J.J., Stevens, P.S., Volkamer, R., Zavala, M. (2010) An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 8697-8760.
- Müller, M., Mikoviny, T., Feil, S., Haidacher, S., Hanel, G., Hartungen, E., Jordan, A., Märk, L., Mutschlechner, P., Schottkowsky, R., Sulzer, P., Crawford, J.H., Wisthaler, A. (2014) A compact PTR-ToF-MS instrument for airborne measurements of volatile organic compounds at high spatiotemporal resolution, *Atmospheric Measurement Techniques*, 7, 3763-3772.
- NASA Langley Research Center (2022a) GTE Expeditions, pp. [https://www-gte.larc.nasa.gov/gte\\_map.htm](https://www-gte.larc.nasa.gov/gte_map.htm)
- NASA Langley Research Center (2022b) GTE: Aircraft-Based Missions, pp. [https://www-gte.larc.nasa.gov/gte\\_miss.htm](https://www-gte.larc.nasa.gov/gte_miss.htm)
- Nault, B.A., Campuzano-Jost, P., Day, D.A., Schroder, J.C., Anderson, B., Beyersdorf, A.J., Blake, D.R., Brune, W.H., Choi, Y., Corr, C.A., de Gouw, J.A., Dibb, J., DiGangi, J.P., Diskin, G.S., Fried, A., Huey, L.G., Kim, M.J., Knute, C.J., Lamb, K.D., Lee, T., Park, T., Pusede, S.E., Scheuer, E., Thornhill, K.L., Woo, J.H., Jimenez, J.L. (2018) Secondary organic aerosol production from local emissions dominates the organic aerosol budget over Seoul, South Korea, during KORUS-AQ, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 17769-17800.
- Nelson, D.D., McManus, B., Urbanski, S., Herndon, S., Zahniser, M.S. (2004) High precision measurements of atmospheric nitrous oxide and methane using thermoelectrically cooled mid-infrared quantum cascade lasers and detectors, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 60, 3325-3335.
- Nussbaumer, C.M., Parchatka, U., Tadic, I., Bohn, B., Marno, D., Martinez, M., Rohloff, R., Harder, H., Kluge, F., Pfeilsticker, K., Obersteiner, F., Zöger, M., Doerich, R., Crowley, J.N., Lelieveld, J., Fischer, H. (2021) Modification of a conventional photolytic converter for improving aircraft measurements of NO<sub>2</sub> via chemiluminescence, *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 6759-6776.
- Oak, Y.J., Park, R.J., Schroeder, J.R., Crawford, J.H., Blake, D.R., Weinheimer, A.J., Woo, J.-H., Kim, S.-W., Yeo, H., Fried, A., Wisthaler, A., Brune, W.H. (2019) Evaluation of simulated O<sub>3</sub> production efficiency during the KORUS-AQ campaign: Implications for anthropogenic NO<sub>x</sub> emissions in Korea, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 7.
- Paris, J.-D., Arshinov, M.Y., Ciais, P., Belan, B.D., Nédélec, P. (2009b) Large-scale aircraft observations of ultra-fine and fine particle concentrations in the remote Siberian troposphere: New particle formation studies, *Atmospheric Environment*, 43, 1302-1309.
- Paris, J.-D., Ciais, P., Nédélec, P., Stohl, A., Belan, B.D., Arshinov, M.Y., Carouge, C., Golitsyn, G.S., Granberg, I.G. (2010) New Insights on the Chemical Composition of the Siberian Air Shed from the Yak-Aerosib Aircraft Campaigns, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 625-642.
- Paris, J.D., Stohl, A., Nédélec, P., Arshinov, M.Y., Panchenko, M.V., Shmargunov, V.P., Law, K.S., Belan, B.D., Ciais, P. (2009a) Wildfire smoke in the Siberian Arctic in summer: source characterization and plume evolution from airborne measurements, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 9315-9327.
- Park, H., Jeong, S., Park, H., Kim, Y., Park, C., Sim, S., Kim, J., Park, J., Kim, H., Choi, J. (2022) Unexpected Urban Methane Hotspots Captured from Aircraft Observations, *ACS Earth and Space Chemistry*, 6, 755-765.
- Park, J., Choi, J., Moon, K., Kim, D., Kim, H.-J., Ahn, J., Lee, S., Seo, B.-K., Kim, J., Park, S., Kim, S. (2020a) Application of Chemical Ionization Mass Spectrometry in Airborne SO<sub>2</sub> Observation on Hanseo Beechcraft 1900D, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 14, 413-421.
- Park, R.J., Oak, Y.J., Emmons, L.K., Kim, C.-H., Pfister, G.G., Carmichael, G.R., Saide, P.E., Cho, S.-Y., Kim, S., Woo, J.-H., Crawford, J.H., Gaubert, B., Lee, H.-J., Park, S.-Y., Jo, Y.-J., Gao, M., Tang, B., Stanier, C.O., Shin, S.S., Park, H.Y., Bae, C., Kim, E. (2021) Multi-model intercomparisons of air quality simulations for the KORUS-AQ campaign, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 9.
- Park, T., Choi, Y., Choi, J., Ahn, J., Park, J., Lee, Y., Ban, J., Park, G., Kang, S., Kim, K., Seo, B.-K., Kim, J., Park, S., Kim, H., Jeon, H., Lee, T. (2020b) Aircraft Measurements of Physicochemical Evolution of Atmospheric Aerosols in Air Pollution Plumes over a Megacity and Suburban Areas, *Aerosol and Air Quality Research*, 20, 2485-2494.
- Park, T., Singh, R., Ban, J., Kim, K., Park, G., Kang, S., Choi, S., Song, J., Yu, D.-G., Bae, M.-S., Ahn, J., Jung, H.-J., Lim, Y.-J.,

- Kim, H.W., Hwang, T.K., Choi, Y.J., Kim, S.-Y., Kim, H.S., Chang, Y.W., Shin, H.J., Lim, Y., Lee, J., Park, J., Choi, J., Lee, T. (2023) Seasonal and regional variations of atmospheric ammonia across the South Korean Peninsula, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 17, 6.
- Park, Y., Kim, H. (2023) Real time measurements of the secondary organic aerosol formation and aging from ambient air using an oxidation flow reactor in Seoul during winter, *Environmental Pollution*, 327, 121464.
- Pickering, K.E., Thompson, A.M., Wang, Y., Tao, W.-K., McNamara, D.P., Kirchhoff, V.W.J.H., Heikes, B.G., Sachse, G.W., Bradshaw, J.D., Gregory, G.L., Blake, D.R. (1996) Convective transport of biomass burning emissions over Brazil during TRACE A, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101, 23993-24012.
- Pollack, I.B., Lindaas, J., Roscioli, J.R., Agnese, M., Permar, W., Hu, L., Fischer, E.V. (2019) Evaluation of ambient ammonia measurements from a research aircraft using a closed-path QC-TILDAS operated with active continuous passivation, *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 3717-3742.
- Prather, M.J., Guo, H., Zhu, X. (2023) Deconstruction of tropospheric chemical reactivity using aircraft measurements: the Atmospheric Tomography Mission (ATom) data, *Earth System Science Data*, 15, 3299-3349.
- Ramanathan, V., Crutzen, P.J., Lelieveld, J., Mitra, A.P., Althausen, D., Anderson, J., Andreae, M.O., Cantrell, W., Cass, G.R., Chung, C.E., Clarke, A.D., Coakley, J.A., Collins, W.D., Conant, W.C., Dulac, F., Heintzenberg, J., Heymsfield, A.J., Holben, B., Howell, S., Hudson, J., Jayaraman, A., Kiehl, J.T., Krishnamurti, T.N., Lubin, D., McFarquhar, G., Novakov, T., Ogren, J.A., Podgorny, I.A., Prather, K., Priestley, K., Prospero, J.M., Quinn, P.K., Rajeev, K., Rasch, P., Rupert, S., Sadourny, R., Satheesh, S.K., Shaw, G.E., Sheridan, P., Valero, F.P.J. (2001) Indian Ocean Experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106, 28371-28398.
- Raper, J.L., Kleb, M.M., Jacob, D.J., Davis, D.D., Newell, R.E., Fuelberg, H.E., Bendura, R.J., Hoell, J.M., McNeal, R.J. (2001) Pacific Exploratory Mission in the Tropical Pacific: PEM-Tropics B, March-April 1999, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106, 32401-32425.
- Rasmussen, R.A., Khalil, M.A.K. (1988) Isoprene over the Amazon Basin, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 93, 1417-1421.
- Redelsperger, J.-L., Thorncroft, C.D., Diedhiou, A., Lebel, T., Parker, D.J., Polcher, J. (2006) African Monsoon Multidisciplinary Analysis: An International Research Project and Field Campaign, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87, 1739-1746.
- Reeves, C.E., Formenti, P., Afif, C., Ancellet, G., Attié, J.L., Bechara, J., Borbon, A., Cairo, F., Coe, H., Crumeyrolle, S., Fierli, F., Flamant, C., Gomes, L., Hamburger, T., Jambert, C., Law, K.S., Mari, C., Jones, R.L., Matsuki, A., Mead, M.I., Methven, J., Mills, G.P., Minikin, A., Murphy, J.G., Nielsen, J.K., Oram, D.E., Parker, D.J., Richter, A., Schlager, H., Schwarzenboeck, A., Thouret, V. (2010) Chemical and aerosol characterisation of the troposphere over West Africa during the monsoon period as part of AMMA, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 7575-7601.
- Ren, X., Mao, J., Brune, W.H., Cantrell, C.A., Mauldin III, R.L., Hornbrook, R.S., Kosciuch, E., Olson, J.R., Crawford, J.H., Chen, G., Singh, H.B. (2012) Airborne intercomparison of HO<sub>x</sub> measurements using laser-induced fluorescence and chemical ionization mass spectrometry during ARCTAS, *Atmospheric Measurement Techniques*, 5, 2025-2037.
- Richter, D., Weibring, P., Walega, J.G., Fried, A., Spuler, S.M., Taubman, M.S. (2015) Compact highly sensitive multi-species airborne mid-IR spectrometer, *Applied Physics B*, 119, 119-131.
- Rickly, P.S., Coggon, M.M., Aikin, K.C., Alvarez, R.J., II, Baidar, S., Gilman, J.B., Gkatzelis, G.I., Harkins, C., He, J., Lamplugh, A., Langford, A.O., McDonald, B.C., Peischl, J., Robinson, M.A., Rollins, A.W., Schwantes, R.H., Senff, C.J., Warneke, C., Brown, S.S. (2023) Influence of Wildfire on Urban Ozone: An Observationally Constrained Box Modeling Study at a Site in the Colorado Front Range, *Environmental Science & Technology*, 57, 1257-1267.
- Ridley, B.A., Shetter, J.D., Gandrud, B.W., Salas, L.J., Singh, H.B., Carroll, M.A., Hübler, G., Albritton, D.L., Hastie, D.R., Schiff, H.I., Mackay, G.I., Karchi, D.R., Davis, D.D., Bradshaw, J.D., Rodgers, M.O., Sandholm, S.T., Torres, A.L., Condon, E.P., Gregory, G.L., Beck, S.M. (1990) Ratios of peroxyacetyl nitrate to active nitrogen observed during aircraft flights over the eastern Pacific Oceans and continental United States, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 95, 10179-10192.
- Ritter, J.A., Barrick, J.D.W., Watson, C.E., Sachse, G.W., Gregory, G.L., Anderson, B.E., Woerner, M.A., Collins Jr., J.E. (1994) Airborne boundary layer flux measurements of trace species over Canadian boreal forest and northern wetland regions, *Journal of Geophysical Research:*

- Atmospheres, 99, 1671-1685.
- Ryu, Y.-H., Min, S.-K. (2021) Long-term evaluation of atmospheric composition reanalyses from CAMS, TCR-2, and MER-RA-2 over South Korea: Insights into applications, implications, and limitations, *Atmospheric Environment*, 246, 118062.
- Sachse, G.W., Harriss, R.C., Fishman, J., Hill, G.F., Cahoon, D.R. (1988) Carbon monoxide over the Amazon Basin during the 1985 dry season, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 93, 1422-1430.
- Sandholm, S.T., Bradshaw, J.D., Dorris, K.S., Rodgers, M.O., Davis, D.D. (1990) An airborne compatible photofragmentation two-photon laser-induced fluorescence instrument for measuring background tropospheric levels of NO, NO<sub>x</sub>, and NO<sub>2</sub>, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 95, 10155-10161.
- Santoni, G.W., Lee, B.H., Wood, E.C., Herndon, S.C., Miake-Lye, R.C., Wofsy, S.C., McManus, J.B., Nelson, D.D., Zahniser, M.S. (2011) Aircraft Emissions of Methane and Nitrous Oxide during the Alternative Aviation Fuel Experiment, *Environmental Science & Technology*, 45, 7075-7082.
- Sarkar, C., Wong, G., Mielnik, A., Nagalingam, S., Gross, N.J., Guenther, A.B., Lee, T., Park, T., Ban, J., Kang, S., Park, J.S., Ahn, J., Kim, D., Kim, H., Choi, J., Seo, B.K., Kim, J.H., Kim, J.H., Park, S.B., Kim, S. (2021) Unexplored volatile organic compound emitted from petrochemical facilities: implications for ozone production and atmospheric chemistry, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 11505-11518.
- Sawamura, P., Moore, R.H., Burton, S.P., Chemyakin, E., Müller, D., Kolgotin, A., Ferrare, R.A., Hostetler, C.A., Ziemba, L.D., Beyersdorf, A.J., Anderson, B.E. (2017) HSRL-2 aerosol optical measurements and microphysical retrievals vs. airborne in situ measurements during DISCOVER-AQ 2013: an intercomparison study, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 7229-7243.
- Schnell, R.C., Bridgman, H.A., Naegele, P.S., Waston, T.B. (1987) The National Oceanic and Atmospheric Administration Wp-3d Meteorological, Aerosol, and Gas Systems, and flight operations, on Watox-86, *Global Biogeochemical Cycles*, 1, 297-307.
- Schroeder, J.R., Crawford, J.H., Ahn, J.-Y., Chang, L., Fried, A., Walega, J., Weinheimer, A., Montzka, D.D., Hall, S.R., Ullmann, K., Wisthaler, A., Mikoviny, T., Chen, G., Blake, D.R., Blake, N.J., Hughes, S.C., Meinardi, S., Diskin, G., Digangi, J.P., Choi, Y., Pusede, S.E., Huey, G.L., Tanner, D.J., Kim, M., Wennberg, P. (2020) Observation-based modeling of ozone chemistry in the Seoul metropolitan area during the Korea-United States Air Quality Study (KORUS-AQ), *Elementa: Science of the Anthropocene*, 8.
- Seo, B.-K., Park, S.b., Lee, D., Yu, M., Yu, J., Bae, K.-N., Ahn, J., Park, J., Kim, S., Lee, T., Kim, J. (2019) Airborne Inlets and Instrumentation on Aircraft Platform for Air Quality Observation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35, 815-830.
- Shao, M., Lu, S., Liu, Y., Xie, X., Chang, C., Huang, S., Chen, Z. (2009) Volatile organic compounds measured in summer in Beijing and their role in ground-level ozone formation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114.
- Shaw, J.T., Allen, G., Barker, P., Pitt, J.R., Pasternak, D., Bauguitte, S.J.-B., Lee, J., Bower, K.N., Daly, M.C., Lunt, M.F., Ganesan, A.L., Vaughan, A.R., Chibesakunda, F., Lambakasa, M., Fisher, R.E., France, J.L., Lowry, D., Palmer, P.I., Metzger, S., Parker, R.J., Gedney, N., Bateson, P., Cain, M., Lorente, A., Borsdorff, T., Nisbet, E.G. (2022) Large Methane Emission Fluxes Observed from Tropical Wetlands in Zambia. *Global Biogeochemical Cycles*, 36, e2021GB007261.
- Shilling, J.E., Pekour, M.S., Fortner, E.C., Artaxo, P., de Sá, S., Hubbe, J.M., Longo, K.M., Machado, L.A.T., Martin, S.T., Springston, S.R., Tomlinson, J., Wang, J. (2018) Aircraft observations of the chemical composition and aging of aerosol in the Manaus urban plume during Go Amazon 2014/5, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 10773-10797.
- Shingler, T., Crosbie, E., Ortega, A., Shiraiwa, M., Zuend, A., Beyersdorf, A., Ziemba, L., Anderson, B., Thornhill, L., Perring, A.E., Schwarz, J.P., Campazano-Jost, P., Day, D.A., Jimenez, J.L., Hair, J.W., Mikoviny, T., Wisthaler, A., Sorooshian, A. (2016) Airborne characterization of sub-saturated aerosol hygroscopicity and dry refractive index from the surface to 6.5 km during the SEAC4RS campaign, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 4188-4210.
- Simpson, J.J., Blake, D.R., Blake, N.J., Meinardi, S., Barletta, B., Hughes, S.C., Fleming, L.T., Crawford, J.H., Diskin, G.S., Emmons, L.K., Fried, A., Guo, H., Peterson, D.A., Wisthaler, A., Woo, J.-H., Barré, J., Gaubert, B., Kim, J., Kim, M.J., Kim, Y., Knote, C., Mikoviny, T., Pusede, S.E., Schroeder, J.R., Wang, Y., Wennberg, P.O., Zeng, L. (2020) Characterization, sources and reactivity of volatile organic compounds (VOCs) in Seoul and surrounding regions during KORUS-AQ, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 8.
- Singh, H.B., Condon, E., Vedder, J., O'Hara, D., Ridley, B.A., Gan-

- drud, B.W., Shetter, J.D., Salas, L.J., Huebert, B., Hübler, G., Carroll, M.A., Albritton, D.L., Davis, D.D., Bradshaw, J.D., Sandholm, S.T., Rodgers, M.O., Beck, S.M., Gregory, G.L., LeBel, P.J. (1990) Peroxyacetyl nitrate measurements during CITE 2: Atmospheric distribution and precursor relationships, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 95, 10163-10178.
- Singh, H.B., Herlth, D., Kolyer, R., Chatfield, R., Viezee, W., Salas, L.J., Chen, Y., Bradshaw, J.D., Sandholm, S.T., Talbot, R., Gregory, G.L., Anderson, B., Sachse, G.W., Browell, E., Bachmeier, A.S., Blake, D.R., Heikes, B., Jacob, D., Fuelberg, H.E. (1996) Impact of biomass burning emissions on the composition of the South Atlantic troposphere: Reactive nitrogen and ozone, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101, 24203-24219.
- Song, H.-D., Choi, J.-S., Jang, I.-S., Kim, J.-S., Lee, S.-J. (2009) Studies on the Behavior of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> over Yellow Sea Area during Long Term Aircraft Measurements (1997-2007), *Journal of Environmental Science International*, 18, 569-578.
- Souri, A.H., Nowlan, C.R., Wolfe, G.M., Lamsal, L.N., Chan Miller, C.E., Abad, G.G., Janz, S.J., Fried, A., Blake, D.R., Weinheimer, A.J., Diskin, G.S., Liu, X., Chance, K. (2020) Revisiting the effectiveness of HCHO/NO<sub>2</sub> ratios for inferring ozone sensitivity to its precursors using high resolution airborne remote sensing observations in a high ozone episode during the KORUS-AQ campaign, *Atmospheric Environment*, 224, 117341.
- Spinei, E., Whitehill, A., Fried, A., Tiefengraber, M., Knepp, T.N., Herndon, S., Herman, J.R., Müller, M., Abuhassan, N., Cede, A., Richter, D., Walega, J., Crawford, J., Szykman, J., Valin, L., Williams, D.J., Long, R., Swap, R.J., Lee, Y., Nowak, N., Poche, B. (2018) The first evaluation of formaldehyde column observations by improved Pandora spectrometers during the KORUS-AQ field study, *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 4943-4961.
- Srivastava, S., Lal, S., Venkataramani, S., Guha, I., Bala Subrahmanyam, D. (2012) Airborne measurements of O<sub>3</sub>, CO, CH<sub>4</sub> and NMHCs over the Bay of Bengal during winter, *Atmospheric Environment*, 59, 597-609.
- Staudt, A.C., Jacob, D.J., Logan, J.A., Bachiochi, D., Krishnamurti, T.N., Sachse, G.W. (2001) Continental sources, transoceanic transport, and interhemispheric exchange of carbon monoxide over the Pacific, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106, 32571-32589.
- Stone, D., Evans, M.J., Walker, H., Ingham, T., Vaughan, S., Ouyang, B., Kennedy, O.J., McLeod, M.W., Jones, R.L., Hopkins, J., Punjabi, S., Lidster, R., Hamilton, J.F., Lee, J.D., Lewis, A.C., Carpenter, L.J., Forster, G., Oram, D.E., Reeves, C.E., Bauguitte, S., Morgan, W., Coe, H., Aruffo, E., Dari-Saliburgo, C., Giammaria, F., Di Carlo, P., Heard, D.E. (2014) Radical chemistry at night: comparisons between observed and modelled HO<sub>x</sub>, NO<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> during the RONOCO project, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 1299-1321.
- Sun, P., Nie, W., Chi, X., Huang, X., Ren, C., Xue, L., Shan, Y., Wen, L., Li, H., Chen, T., Qi, Y., Gao, J., Zhang, Q., Ding, A. (2022) Aircraft Study of Secondary Aerosols in Long-Range Transported Air Masses from the North China Plain by a Mid-Latitude Cyclone, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2021JD036178.
- Sun, Q., Gu, M., Wu, D., Yang, T., Wang, H., Pan, Y. (2023) Concurrent measurements of atmospheric ammonia concentrations in the megacities of Beijing and Shanghai by using cavity ring-down spectroscopy, *Atmospheric Environment*, 307, 119848.
- Tadic, I., Nussbaumer, C.M., Bohn, B., Harder, H., Marno, D., Martinez, M., Obersteiner, F., Parchatka, U., Pozzer, A., Rohloff, R., Zöger, M., Lelieveld, J., Fischer, H. (2021) Central role of nitric oxide in ozone production in the upper tropical troposphere over the Atlantic Ocean and western Africa, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 8195-8211.
- Talbot, R.W., Harriss, R.C., Browell, E.V., Gregory, G.L., Sebacher, D.I., Beck, S.M. (1986) Distribution and geochemistry of aerosols in the tropical north Atlantic troposphere: Relationship to Saharan dust, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 91, 5173-5182.
- Tang, B., Saide, P.E., Gao, M., Carmichael, G.R., Stanier, C.O. (2023) WRF-Chem quantification of transport events and emissions sensitivity in Korea during KORUS-AQ, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 11.
- Tang, W., Arellano, A.F., DiGangi, J.P., Choi, Y., Diskin, G.S., Agustí-Panareda, A., Parrington, M., Massart, S., Gaubert, B., Lee, Y., Kim, D., Jung, J., Hong, J., Hong, J.W., Kanaya, Y., Lee, M., Stauffer, R.M., Thompson, A.M., Flynn, J.H., Woo, J.H. (2018) Evaluating high-resolution forecasts of atmospheric CO and CO<sub>2</sub> from a global prediction system during KORUS-AQ field campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 11007-11030.
- Thompson, A.M., Pickering, K.E., McNamara, D.P., Schoeberl, M.R., Hudson, R.D., Kim, J.H., Browell, E.V., Kirchoff, V. W.J.H., Nganga, D. (1996) Where did tropospheric ozone over southern Africa and the tropical Atlantic come from in October 1992? Insights from TOMS, GTE TRACE A, and SAFARI 1992, *Journal of Geophysi-*

- cal Research: Atmospheres, 101, 24251-24278.
- Thompson, C.R., Wofsy, S.C., Prather, M.J., Newman, P.A., Hanisco, T.F., Ryerson, T.B., Fahey, D.W., Apel, E.C., Brock, C.A., Brune, W.H., Froyd, K., Katich, J.M., Nicely, J.M., Peischl, J., Ray, E., Veres, P.R., Wang, S., Allen, H.M., Asher, E., Bian, H., Blake, D., Bourgeois, I., Budney, J., Bui, T.P., Butler, A., Campuzano-Jost, P., Chang, C., Chin, M., Commane, R., Correa, G., Crouse, J.D., Daube, B., Dibb, J.E., DiGangi, J.P., Diskin, G.S., Dollner, M., Elkins, J.W., Fiore, A.M., Flynn, C.M., Guo, H., Hall, S.R., Hannun, R.A., Hills, A., Hints, E.J., Hodzic, A., Hornbrook, R.S., Huey, L.G., Jimenez, J.L., Keeling, R.F., Kim, M.J., Kupc, A., Lacey, F., Lait, L.R., Lamarque, J.-F., Liu, J., McKain, K., Meinardi, S., Miller, D.O., Montzka, S.A., Moore, F.L., Morgan, E.J., Murphy, D.M., Murray, L.T., Nault, B.A., Neuman, J.A., Nguyen, L., Gonzalez, Y., Rollins, A., Rosenlof, K., Sargent, M., Schill, G., Schwarz, J.P., Clair, J.M.S., Steenrod, S.D., Stephens, B.B., Strahan, S.E., Strode, S.A., Sweeney, C., Thames, A.B., Ullmann, K., Wagner, N., Weber, R., Weinzierl, B., Wennberg, P.O., Williamson, C.J., Wolfe, G.M., Zeng, L. (2022) The NASA Atmospheric Tomography (ATom) Mission: Imaging the Chemistry of the Global Atmosphere, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103, E761-E790.
- Thornton, D.C., Bandy, A.R., Blomquist, B.W., Bradshaw, J.D., Blake, D.R. (1997) Vertical transport of sulfur dioxide and dimethyl sulfide in deep convection and its role in new particle formation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102, 28501-28509.
- Thornton, D.C., Bandy, A.R., Driedger III, A.R. (1987) Sulfur dioxide over the western Atlantic Ocean, *Global Biogeochemical Cycles*, 1, 317-328.
- van Donkelaar, A., Martin, R.V., Leaitch, W.R., Macdonald, A.M., Walker, T.W., Streets, D.G., Zhang, Q., Dunlea, E.J., Jimenez, J.L., Dibb, J.E., Huey, L.G., Weber, R., Andreae, M.O. (2008) Analysis of aircraft and satellite measurements from the Intercontinental Chemical Transport Experiment (INTEX-B) to quantify long-range transport of East Asian sulfur to Canada, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 2999-3014.
- Velasco, E., Márquez, C., Bueno, E., Bernabé, R.M., Sánchez, A., Fentanes, O., Wöhrnschimmel, H., Cárdenas, B., Kamilla, A., Wakamatsu, S., Molina, L.T. (2008) Vertical distribution of ozone and VOCs in the low boundary layer of Mexico City, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 3061-3079.
- Warneke, C., Schwarz, J.P., Dibb, J., Kalashnikova, O., Frost, G., Al-Saad, J., Brown, S.S., Brewer, W.A., Soja, A., Seidel, F.C., Washenfelder, R.A., Wiggins, E.B., Moore, R.H., Anderson, B.E., Jordan, C., Yacovitch, T.I., Herndon, S.C., Liu, S., Kuwayama, T., Jaffe, D., Johnston, N., Selimovic, V., Yokelson, R., Giles, D.M., Holben, B.N., Goloub, P., Popovici, I., Trainer, M., Kumar, A., Pierce, R.B., Fahey, D., Roberts, J., Gargulinski, E.M., Peterson, D.A., Ye, X., Thapa, L.H., Saide, P.E., Fite, C.H., Holmes, C.D., Wang, S., Coggon, M.M., Decker, Z.C.J., Stockwell, C.E., Xu, L., Gkatzelis, G., Aikin, K., Lefer, B., Kaspari, J., Griffin, D., Zeng, L., Weber, R., Hastings, M., Chai, J., Wolfe, G.M., Hanisco, T.F., Liao, J., Campuzano Jost, P., Guo, H., Jimenez, J.L., Crawford, J., Team, T.F.-A.S. (2023) Fire Influence on Regional to Global Environments and Air Quality (FIREX-AQ), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2022JD037758.
- Weber, K., Eliasson, J., Vogel, A., Fischer, C., Pohl, T., van Haren, G., Meier, M., Grobóty, B., Dahmann, D. (2012) Airborne in-situ investigations of the Eyjafjallajökull volcanic ash plume on Iceland and over north-western Germany with light aircrafts and optical particle counters, *Atmospheric Environment*, 48, 9-21.
- Wert, B.P., Fried, A., Henry, B., Cartier, S. (2002) Evaluation of inlets used for the airborne measurement of formaldehyde, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107, ACH 3-1-ACH 3-13.
- Wetherbee, G.A., Benedict, K.B., Murphy, S.F., Elliott, E.M. (2019) Inorganic nitrogen wet deposition gradients in the Denver-Boulder metropolitan area and Colorado Front Range - Preliminary implications for Rocky Mountain National Park and interpolated deposition maps, *Science of The Total Environment*, 691, 1027-1042.
- Whelpdale, D.M., Keene, W.C., Hansen, A.D.A., Boatman, J. (1987) Aircraft measurements of sulfur, nitrogen, and carbon species during WATOX-86, *Global Biogeochemical Cycles*, 1, 357-368.
- Wu, Y., Nehrir, A.R., Ren, X., Dickerson, R.R., Huang, J., Stratton, P.R., Gronoff, G., Kooi, S.A., Collins, J.E., Berkoff, T.A., Lei, L., Gross, B., Moshary, F. (2021) Synergistic aircraft and ground observations of transported wildfire smoke and its impact on air quality in New York City during the summer 2018 LISTOS campaign, *Science of The Total Environment*, 773, 145030.
- Xu, L., Crouse, J.D., Vasquez, K.T., Allen, H., Wennberg, P.O., Bourgeois, I., Brown, S.S., Campuzano-Jost, P., Coggon, M.M., Crawford, J.H., DiGangi, J.P., Diskin, G.S., Fried, A., Gargulinski, E.M., Gilman, J.B., Gkatzelis, G.I., Guo, H., Hair, J.W., Hall, S.R., Halliday, H.A., Hanisco, T.F., Hannun, R.A., Holmes, C.D., Huey, L.G., Jimenez, J.L., Lam-

- plugh, A., Lee, Y.R., Liao, J., Lindaas, J., Neuman, J.A., Nowak, J.B., Peischl, J., Peterson, D.A., Piel, F., Richter, D., Rickly, P.S., Robinson, M.A., Rollins, A.W., Ryerson, T.B., Sekimoto, K., Selimovic, V., Shingler, T., Soja, A.J., St. Clair, J.M., Tanner, D.J., Ullmann, K., Veres, P.R., Walega, J., Warneke, C., Washenfelder, R.A., Weibring, P., Wisthaler, A., Wolfe, G.M., Womack, C.C., Yokelson, R.J. (2021) Ozone chemistry in western U.S. wildfire plumes, *Science Advances*, 7, eabl3648.
- Zhang, Q., Quan, J., Tie, X., Huang, M., Ma, X. (2011) Impact of aerosol particles on cloud formation: Aircraft measurements in China, *Atmospheric Environment*, 45, 665-672.
- Zhang, S., Li, G., Ma, N., He, Y., Zhu, S., Pan, X., Dong, W., Zhang, Y., Luo, Q., Ditas, J., Kuhn, U., Zhang, Y., Yuan, B., Wang, Z., Cheng, P., Hong, J., Tao, J., Xu, W., Kuang, Y., Wang, Q., Sun, Y., Zhou, G., Cheng, Y., Su, H. (2023a) Exploring HONO formation and its role in driving secondary pollutants formation during winter in the North China Plain, *Journal of Environmental Sciences*, 132, 83-97.
- Zhang, X., Bao, Z., Zhang, L., Zhou, J., Che, H., Li, Q., Tian, M., Yang, F., Chen, Y. (2023b) Biomass burning and aqueous reactions drive the elevation of wintertime PM<sub>2.5</sub> in the rural area of the Sichuan basin, China, *Atmospheric Environment*, 306, 119779.
- Zhao, R., Yin, B., Zhang, N., Wang, J., Geng, C., Wang, X., Han, B., Li, K., Li, P., Yu, H., Yang, W., Bai, Z. (2021) Aircraft-based observation of gaseous pollutants in the lower troposphere over the Beijing-Tianjin-Hebei region, *Science of The Total Environment*, 773, 144818.
- Ziemba, L.D., Lee Thornhill, K., Ferrare, R., Barrick, J., Beyersdorf, A.J., Chen, G., Crumeyrolle, S.N., Hair, J., Hostetler, C., Hudgins, C., Obland, M., Rogers, R., Scarino, A.J., Winstead, E.L., Anderson, B.E. (2013) Airborne observations of aerosol extinction by in situ and remote-sensing techniques: Evaluation of particle hygroscopicity, *Geophysical Research Letters*, 40, 417-422.
- Zimmerman, P.R., Greenberg, J.P., Westberg, C.E. (1988) Measurements of atmospheric hydrocarbons and biogenic emission fluxes in the Amazon Boundary layer, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 93, 1407-1416.

## Authors Information

- 박태현 (한국외국어대학교 환경학과 박사후연구원)  
(tpark@hufs.ac.kr)
- 반지희 (한국외국어대학교 환경학과 박사연구원)  
(cbjh0822@naver.com)
- 안준영 (국립환경과학원 연구관)  
(nierair@korea.kr)
- 이태형 (한국외국어대학교 환경학과 교수)  
(thlee@hufs.ac.kr)
- 박진수 (국립환경과학원 연구관)  
(airchemi@korea.kr)