



기술자료

대기질 입체감시를 위한 항공측정 플랫폼 구축

Airborne Inlets and Instrumentation on Aircraft Platform for Air Quality Observation

서범근¹⁾, 박수복²⁾, 이도영¹⁾, 유명상¹⁾, 유정훈⁴⁾, 배귀남⁵⁾, 안준영⁶⁾,
 박진수⁷⁾, 김세웅⁸⁾, 이태형⁹⁾, 김중호^{1),3),*}

- ¹⁾한서대학교 환경연구소, ²⁾한서대학교 항공운항학과
- ³⁾한서대학교 인프라시스템학과, ⁴⁾한서대학교 대학원 환경공학과
- ⁵⁾한국과학기술연구원 미세먼지 범부처 프로젝트 사업단
- ⁶⁾국립환경과학원 기후대기연구부 대기질통합예보센터
- ⁷⁾국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과
- ⁸⁾캘리포니아대학교 어바인 지구시스템학과
- ⁹⁾한국외국어대학교 환경학과

접수일 2019년 11월 27일
 수정일 2019년 12월 11일
 채택일 2019년 12월 12일

Received 27 November 2019
 Revised 11 December 2019
 Accepted 12 December 2019

*Corresponding author
 Tel : +82-(0)41-660-1431
 E-mail : kimjh@hanseo.ac.kr

Beom-Keun Seo¹⁾, Soo bog Park²⁾, Doyoung Lee¹⁾, Myeongsang Yu¹⁾, Jeonghun Yu⁴⁾, Kwi-Nam Bae⁵⁾,
 Joonyoung Ahn⁶⁾, Jinsoo Park⁷⁾, Saewung Kim⁸⁾, Taeyoung Lee⁹⁾, Jongho Kim^{1),3),*}

- ¹⁾Institute of Environmental Research, Hanseo University, Seosan, Republic of Korea
- ²⁾Department of Flight Operation, Hanseo University, Seosan, Republic of Korea
- ³⁾Department of Infra System, Hanseo University, Seosan, Republic of Korea
- ⁴⁾Department of Environmental Engineering, Hanseo University Graduate School, Seosan, Republic of Korea
- ⁵⁾Center for Particulate Air Pollution and Health, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Republic of Korea
- ⁶⁾Air Quality Forecasting Center, Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea
- ⁷⁾Air Quality Research Division, Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea
- ⁸⁾Department of Earth System Science, University of California, Irvine, Irvine, CA, United States
- ⁹⁾Department of Environment Science, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Republic of Korea

Abstract At present, the well-equipped aircraft is the mostly sought-after research platform to measure both the vertical and spatial distributions of air quality parameters. In this study, Beechcraft B1900D was custom configured and modified for continuous and constant-flow samplings of aerosol and gaseous species mainly within planetary boundary layer. The aircraft has a maximum takeoff weight of 7,765 kg with 1,984 kg maximum payload and maximum power output of 22.4 kW. Two iso-kinetic aerosol inlets were designed and mounted on the roof of aircraft fuselage. Four gas inlets were mounted on each side of fuselage in ahead of aircraft wings. Currently, aircraft is capable for simultaneous installation of various instruments including HR-ToF-AMS, PTR-ToF-MS, CIMS, major reactive gas analyzers with up to six operators. Recent test flight indicated that the performance of newly adapted sampling systems in this aircraft was suitable for future intensive airborne observations.

Key words: Aircraft measurement platform, Airborne observations, Long-range transport, Local large point source

1. 서론

한국, 중국, 일본 등이 포함된 동북아시아는 편서풍과 계절풍(북서풍, 서풍, 남서풍)이 형성되는 지역이며, 우리나라 서쪽에 베이징, 톈진, 상하이, 난징 등의 거대 도시와 산업 단지들이 중국의 동쪽 해안지역에 위치해 있다(Ge *et al.*, 2017; Guo *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2016). 우리나라의 대기질은 국내 배출원과 장거리 이동에 의한 영향으로 대기오염물질 고농도 사례가 관측되고 있다(Kang *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2018; Choi *et al.*, 2016a, b; Lee *et al.*, 2011; Han *et al.*, 2006). 대기오염물질의 농도는 기상요소, 배출원 등이 변화되면 그 농도 추이와 기원이 달라지므로 지속적인 관찰이 필요하다.

대기질 측정은 방법에 따라 지상측정, 위성측정, 항공측정 등으로 분류할 수 있으며 지상측정은 정확한 정성·정량분석이 가능하지만 연직 혹은 상공의 분석이 어렵고 주변 환경의 영향을 크게 받는다. 위성관측은 넓은 영역을 분석하여 농도 산정 및 농도의 분포를 알 수 있지만, 최소 관측범위와 최소 측정주기는 각각 수 분 이상 간격이고, 지상측정 값과의 오차도 존재한다(Kim *et al.*, 2019; Park *et al.*, 2019). 항공관측은 측정장비의 성능이 향상됨에 따라 항공기에 탑재하고 넓은 지역의 상공을 직접 측정할 수 있는 장점이 있어 지상관측과 위성관측의 한계를 보완할 수 있

다(Guo *et al.*, 2017). 또한, 항공관측은 장거리의 이동 경로와 배출원 상공을 비행하며 측정할 수 있다.

우리나라의 대기질 항공관측 연구(표 1)는 1994년에 국립환경과학원에서 Chang-gong 91 (5인승 비행기, 최대이륙중량: 1,259 kg)에 흡입구를 설치하여 서해 상공의 황사를 포집하였다(Jeong *et al.*, 1994). 1996~2009년에는 Vulcanair SF-600 (12인승, 최대이륙중량: 3,300 kg, 이하 SF-600), Piper Chieftain PA31-350 (10인승, 최대이륙중량: 3,175 kg, 이하 PA31-350)을 이용하여 SO₂, NO_x, O₃, 입자개수 농도 등을 실시간으로 측정하였다(Chang *et al.*, 2010; Song *et al.*, 2009; Han *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2001, 1999, 1997). 그 이후 2011년, 2012년에는 서해 근해, 경기도 남부 지역과 충청남도 북부지역에서 한서대의 Beechcraft KingAir-C90GT (8인승, 최대이륙중량: 4581 kg, 이하 C90GT)를 이용하여 PM₁₀과 가스상물질(SO₂, NO_x, NO_y, CO, O₃, PAN)을 측정하였다(NIER, 2011, 2012). 2015년과 2016년에는 각각 MAPS-Seoul과 KORUS-AQ 캠페인을 C90GT를 이용하여 PM_{1.0}의 성분을 측정하였다(Kim *et al.*, 2018; NIER, 2016, 2015a, b). 기상청에서도 2008년부터 Cessna 206 (6인승, 최대이륙중량: 1,633 kg)를 이용하여 기상연구를 하였고 2017년 말에는 관측항공기 Beechcraft Super King Air-B350 (13인승, 최대이륙중량: 6,804 kg, 이하 B350)을 도입하여 기상관측, 환경기상관측, 기후감시

Table 1. The status of aircraft measurement for air quality in Korea.

Year	Aircraft model	Observation species	Reference
1994	Chang-gong 91	TSP	Jeong <i>et al.</i> , 1994
1996	SF-600	SO ₂ , NO, NO ₂	Kim <i>et al.</i> , 1997
1997~2009	PA31-350	SO ₂ , NO _x , O ₃ , particle number concentration, CO, PAN, VOCs, PM _{2.5} ion	Kim <i>et al.</i> , 1999, 2001 Han <i>et al.</i> , 2006 Song <i>et al.</i> , 2009 Chang <i>et al.</i> , 2010
2011	C90GT	SO ₂ , NO _x , NO _y , CO, O ₃ , PAN, particle size distribution	NIER, 2011
2012		CO, O ₃ , NO _x , particle number concentration, VOCs, TSP	NIER, 2012
2015		CO, SO ₂ , particle number concentration mass concentration and species of PM _{1.0}	NIER, 2015a NIER, 2015b Kim <i>et al.</i> , 2018
2016		NO ₂ , CO, SO ₂ , O ₃	NIER, 2016
2019~	B1900D	VOCs, CO, SO ₂ , NO ₂ , NH ₃ , mass concentration and species of PM _{1.0} , particle number concentration	Prepare in this study

등을 수행하고 있다.

또한, 2016년에 ‘한·미 협력 국내 대기질 공동조사 연구(KORUS-AQ)’를 통해 미국 NASA (National Aeronautics and Space Administration)의 Douglas DC-8 (189인승, 최대이륙중량: 151,953 kg, 이하 DC-8)과 C90GT로 항공측정을 실시하였다(Jeong *et al.*, 2019; NIER, 2016). DC-8에서는 VOCs, CO, NO_x, NO_y, HONO, O₃, PM_{1.0} 성분분석, 나노입자개수농도, 입자개수농도 등 가스상물질과 입자상물질을 동시에 측정하였으며, C90GT으로는 NO₂, CO, SO₂, O₃을 측정하였다. 이를 계기로 우리나라에서도 대기질 측정에서 항공관측의 중요성과 큰 규모의 항공기가 필요함을 인식하였다.

국외에서는 항공관측을 위해 다양한 항공기를 이용하고 있다. 미국 NASA와 NCAR (National Center for Atmospheric Research)는 DC-8, Beechcraft King-Air-B200 (8인승, 최대이륙중량: 5,670 kg, 이하 B200), Lockheed Martin P-3B (21인승 군용비행기, 최대이륙중량: 61,235 kg, 이하 P-3B), Gulfstream-G500 (18인승, 최대이륙중량: 41,050 kg, 이하 G500)을 이용하여 VOCs, NO_x, NO_y, HONO, PM_{1.0} 성분, 나노입자개수농도, CO, BC (Black Carbon), O₃, radiation, 응결핵, 입자농도, 구름 미세물리 입자 등 대기질과 기상측정을 수행하고 있다(Braun *et al.*, 2013; Hecobian *et al.*, 2011; Palmer *et al.*, 2003). 독일의 High Altitude and Long Range Research Aircraft (HALO)에서는 Gulfstream-G550 (21인승, 최대이륙중량: 41,277 kg)을 이용하여 유럽의 과학자들과 공동연구로 입경분포, radiation, H₂O profile, 나노입자개수농도, O₃, NO_x, NO_y, SO₂, HCHO, BrO, OClO 등 측정을 수행하고 있다(Voigt *et al.*, 2017).

중국은 2005~2015년 동안 Harbin Yun-12 (19인승 비행기, 최대이륙중량: 5,300kg, 이하 Y-12)를 이용하여 SO₂, NO_x, O₃, CO, BC 등을 측정하여 풍상 측의 주변국에 대한 장거리 이동과 도시 상공의 대기질을 측정하고 있다(Yang *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2012). 또한, 중국 기상청 (China Meteorological Administration;

CMA)에서는 Y-12와 B350 (13인승, 최대이륙중량: 6,804 kg)을 이용하여 PM_{1.0} 성분 등을 측정하고 있다(Liu *et al.*, 2018).

일본은 1996년에 Cessna 402 (8인승, 최대이륙중량: 3,107 kg)를 이용하여 입자개수농도를 측정하고 있어(Sakai *et al.*, 2003), 한국과 중국에 비해 운영되는 항공기 규모는 적다. 그렇지만 일본항공(JAL)의 대형항공기를 이용하여 운항항로에서 1984년~1985년, 1993년~2013년에 온실기체(CO₂)를 관측하여 기후변화를 감시하고 있다(Matsueda *et al.*, 2015; Nakazawa *et al.*, 1991).

이와 같이 항공기를 이용한 대기질 관측은 대기오염과 기상, 기후변화 등의 분야에서 다양한 측정항목들의 공간적인 농도분포를 파악하는 등의 많은 역할을 하고 있다. 대기질 항공관측의 항공기 규모도 가스상물질과 입자상물질을 동시에 측정하기 위해 점차 확대되고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 수행된 기존의 항공측정 환경을 개선하고 측정항목을 확대하고자 한서대에서 보유한 중형항공기(Beechcraft B1900D, 21인승, 최대이륙중량: 7,765 kg, 이하 B1900D)를 개조하여 항공측정플랫폼을 구축하였고 이 플랫폼을 이용한 장거리 이동 오염물질 및 배출원에서 발생하는 대기오염물질을 측정할 수 있는 기틀을 마련하였다.

2. 항공측정 시스템 구축

2.1 항공기 제원

대기질 항공측정을 위해 개조된 항공기(이하 관측항공기)는 한서대학교에서 보유한 B1900D 모델이며 2개의 터보프롭 엔진(turboprop Engine)을 장착한 항공기로서 1996년 미국의 Beechcraft사에서 제작되었으며, 항공기의 일반적인 제원과 사진은 표 2와 그림 1에 나타내었다. 이 항공기의 최대이륙중량은 7,765 kg이고, 항공기 중량(empty weight)은 4,733 kg이다. 항공기의 전원은 각 날개의 엔진에 장착된 발

Table 2. Performance and specifications of aircraft.

Contents	Performance/Specification	Contents	Performance/Specification
Model	B1900D	Empty weight	4,733 kg
Maximum speed	519 km/h	Engine model	PT6A-67D (2 Qty)
Maximum altitude	7,620 m	Generation capacity	DC 28 V (300 A, 2 Qty)
Take off distance	1,058 m	Exterior height	4.7 m
Landing distance	853 m	Length	17.6 m
Ferry range	2,306 km	Wing span	17.6 m
Fuel capacity	2,022 kg	Cabin height	1.8 m
Maximum take off weight	7,765 kg	Cabin width	1.3 m
Maximum payload	1,984 kg	Passengers	21 (2 pilots)
Payload useful	2,883 kg	Registration marks	HL5238

**Fig. 1.** Observation aircraft (B1900D, Hanseo university).

전기(300A, DC 28 V) 2기에서 공급되며, 총 발전용량은 16.8 kW이다.

관측항공기는 21인승(조종사 2명 포함)용으로 국내 연구진이 기존에 항공관측 분야 연구(Kim *et al.*, 2018)에서 사용했던 C90GT(8인승, 조종사 2명 포함)보다 커서 입자상물질, 가스상물질 등 좀 더 다양한 측정장비들을 탑재할 수 있고 터보프롭 엔진이 장착되어 있어 행성경계층(Planetary Boundary Layer) 내의 저고도 비행이 용이하다.

2.2 측정장비 제원과 비행시간

항공기에서 발전용량과 최대이륙중량 등 제한사항이 있으므로 항공기 내에 탑재되는 측정장비는 대기질 항공측정 목적에 따라 항공기 개조 전에 사용되는 측정장비들의 소비전력과 중량을 고려해야 한다. 측정장비는 입자상물질 측정장비 4종과 가스상물질 측

정장비 6종을 표 3과 같이 선정하였고 장비들의 무게와 소비전력은 각각 1,315 kg과 12.4 kW로 조사되었다.

항공측정을 위해 소요되는 전력량은 측정장비의 수요전력량(약 12.4 kW)과 항공기 운영으로 소비되는 전력량(7.2 kW)을 합산한 19.6 kW이다(Textron Aviation Inc., 1991). 이는 항공기의 기본 발전량(300 A, DC 28 V, 2개)으로는 공급이 부족하므로 추가적인 전원공급이 필요하다. 이에 본 연구에서는 용량이 큰 발전기로 교체하는 개조방안을 채택하였다.

또한, 표 2에 나타난 것과 같이 항공기의 최대적재중량은 1,984 kg이고, 최대연료적재량은 2,022 kg이다. 항공관측은 순항고도 및 속도에 비해 저고도(지상 300~1,000 m)에서 느린 속도(270~300 km/hr)로 비행하며 수행하는데, 이 조건으로 항공관측 시 연료는 경험적으로 약 363 kg/hr만큼 소비된다(표 4). 연

Table 3. Power requirements and weights for on-board instruments.

Index ¹⁾	Classification	Instruments	Task (Observation species)	Power (kW) at AC ²⁾ 230V/50 Hz	Power (kW) at DC ³⁾ 28V	Weight (kg)
1	Aerosol	HR-ToF-AMS	Aerosol chemical composition	1.20		195.04
2		SP2, UHSAS, and PILS	Aerosol chemical composition and size distribution	0.60		181.44
3	Gas	PTR-ToF-MS	Volatile organic compounds	1.50		317.51
4		CIMS	Reactive nitrogen Compounds	1.20		136.08
5		Trace Gas	CO and NH ₃	0.70		99.79
6		NO _x , NO _y , and O ₃	1.00		181.44	
7		CRDS	Reactive nitrogen compounds	1.50		136.08
8		WAS	Sampling gas	0.50		68.04
9	Data collection system	Mission computer	Mission data Storage, Time stamp & Position distribution		0.750	(TBD)
		Network switch	Ethernet communication	0.15		(TBD)
		Time server	Data time stamp		0.003	(Neg)
		Security gateway	-		0.007	
10	Pylon / Canister	UHSAS-A AC power	(Pod provision)	0.20		
		UHSAS-A anti-ice power	(Pod provision)		-	
		PCASP AC power	(Pod provision)	0.10		
		PCASP DC anti-ice power	(Pod provision)		-	
11	Pump (for canister)	2680CGHI42	Pump #1	0.50		
		2680CGHI42	Pump #2	0.50		
12	Aerosol inlet	Aerosol inlet heater	4 Heaters at 30 W		0.120	
		Omega temperature controller	Aerosol inlet heat control		0.005	
13	Meteorological measurement (AIMMS-30)	VecTrax-10 IGPM	Electronics/CAN power		0.009	
		ARIM200 air data probe	Anti-ice		0.185	
		ARIM200 air data probe	Environmental		0.050	
Total AC system load:				9.65		
Total DC system load: (Not including inverter DC load)					1.129 (40.32 A)	
Inverter DC Max continuous load:					11.221 (400.75 A)	
Total DC load:					12.350 (441.07 A)	
Total weight:						1,315.42

Index¹⁾: Index (#1 ~ #8, #11) are owned by the research institutes (NIER).

Index (#9 ~ #10, #12 ~ #13) were installed as auxiliary part (sensor) and wiring for aircraft observation in this study.

AC²⁾: Alternating Current

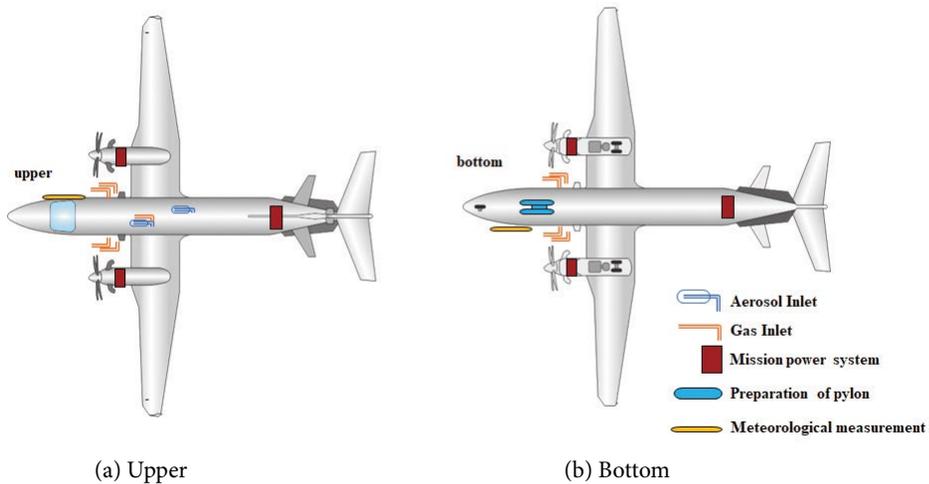
DC³⁾: Direct Current

Table 4. Flight time vs payload weight.

Payload (kg)	Fuel amount (kg)	Useful Load (kg)	Flight time ¹⁾ (hr)	Actual flight time (hr)	Remarks
861	2,022		5.6	4.8	Maximum fuel
1,069	1,814		5.0	4.2	-
1,315	1,568		4.3	3.5	Payload (this study)
1,432	1,451		4.0	3.2	-
1,794	1,089	2,883	3.0	2.2	-
1,984	899		2.5	1.7	Maximum payload
-	726		2.0	1.2	-
-	363		1.0	0.2	-
-	272		0.8	0.0	Preliminary fuel ²⁾

Flight time¹⁾: The flight time was calculated at 363 kg/hr which is the empirical consumption amount of fuel obtained from aircraft observation with the B1900D. The flight time is depended on the flight conditions, such as aircraft speed, and altitude.

Preliminary fuel²⁾: According to 'Enforcement rule of the Aviation Safety Act, Article 119, Attached Table 17'; this fuel is used for delayed landing, or secondary landing. It is also used to land after moving to another air field in an emergency.

**Fig. 2.** Schematic of inlet, sensors and power systems.

료를 최대 주입할 때 경험적 연료 소비량으로 계산하면 최대 비행시간은 약 5.6시간이다. 또한, 항공기의 최대이륙중량에서 항공기 중량을 빼면, 최대유효중량(연료량+적재량, Useful Load)은 2,883 kg로 계산되는데, 측정장비 중량(약 1,315kg)으로 약 4.3시간 동안 비행이 가능하다. 그러나 항공관측 시 실제 연료 소비량은 비행속도와 고도에 따라 영향을 받으므로 실제 비행시간은 변동될 수 있다.

아울러 ‘항공안전법 시행규칙 119조 별표 17(항공기에 실어야 할 연료 및 오일 양)’에 따르면, 연료는 최초 착륙예정 비행장까지 비행에 필요한 양과 순항고

도에서 약 45분간 더 비행할 수 있는 양을 신고 있어야 한다. 이는 비행 시 비상상황이 발생하면 착륙지연 혹은 재착륙 시도를 하거나 타 비행장으로 이동 후 착륙을 해야 하므로 실제 비행 가능한 시간은 감소하게 된다. 따라서 조종사와 정비사가 협의하여 엔진 시동 후 활주로로 이동할 때까지 소비되는 연료량을 고려하여 가능한 최대 연료를 주유하고 활주로에서 이륙 시 최대이륙중량으로 비행하는 것이 필요하다.

2.3 항공측정 시스템 개조 및 구성요소

항공기 개조는 엔지니어링과 현장개조로 구분하여

Table 5. Installation features of airborne equipments.

	List	Features	Equipments
Air quality	Aerosol inlet	- Aerosol sampling	- 2 airbrone aerosol inlets (DMT, USA) - 1 'ㄱ' type gas tube inlet - 2 discharge tubes
	Gas inlet	- Gas sampling	- 4 trace gas inlets (UCI, USA) > 3 TGIs (included heating line), 1 TGI (non-heating line)
	Provision of pylon	- Wiring installation of pylon	- Pylon adaptor
Weather	Meteorological observation equipment	- Measuring temperature, relative humidity, 3 dimension wind vector, pressure etc.	- AIMMS-30 system 1 set (Aventech, Canada) > central processing module (Vectrex-10), display module (Mettrack-10), air data probe (ARIM 200)
Power supply	Mission power system	- Power supply control	- Main power switch
		- Converting from DC to AC	- Mission power distribution panel
		- Expansion of electronic power capacity	- 6 inverters (AC 230 V, 50 Hz)
		- Safety flight, and stable power supply	- Upgrade 2 starter generators(300 A → 400 A, DC 28 V)
		- AC power supply (less than 6 A each outlet)	- Engine overhaul - 8 outlets (AC 230 V, 50 Hz)
Communication	Interphone system	- Communication between pilot and scientist	- PM 1000 DAP (PS Engineering Inc., USA)
Synchronization	Mission network system	- Time synchronization, and data collection	- Zmicro ZX2 2U computer (Zmicro Inc., USA), time server, network switch, ethernet port etc.
Other	GPS system	- Provide the high-resolution GPS information > 15 channels receiver, high resolution terrain data	- GTN 625 (Garmin International Inc., USA)
	Rack	- Frame for measurement equipment	- Hanseo Rack (H-Rack)

수행하였다. 엔지니어링은 항공기를 개조하기 위한 도면을 설계하고 개조도면과 개조 후 항공기의 가동 및 비행 상태를 점검하여 안전성 인증을 획득하는 것으로 Global Aviation Technologies (미국)에서 진행하였다. 현장개조는 엔지니어링을 통해 설계된 도면에 따라 직접 개조를 수행하는 것으로 Air Asia (대만)에서 실시하였다. GAT는 미국의 공군항공기 등을 개조한 경험이 있고, 미국 연방항공국 (Federal Aviation Administration; FAA)으로부터 수리·개조 인증을 획득한 전문업체이다. Air Asia는 국토교통부 부산지방항공청 (Korea office of Civil Aeronautics Authority)에서 B1900D를 정비할 수 있도록 인증받은 업체이다.

항공측정 시스템의 구성요소는 표 5에 나타난 것과 같이 입자상물질, 가스상물질, 기상을 측정하는 부분과 전원공급, 장치들의 시간동기화, 자료수집, 항공

기 내 의사소통 등 측정을 지원하는 부분들이다. 개조 요소별 항공기의 설치 위치와 모식도는 그림 2에 나타내었다.

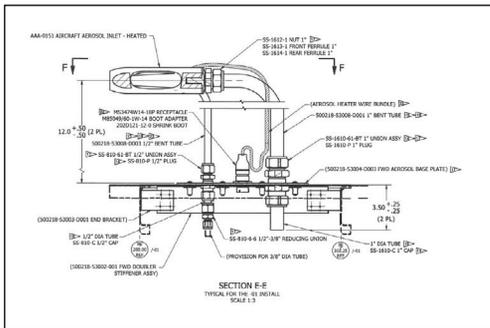
2.3.1 에어로졸 시료채취구

(Airborne Aerosol Inlet; AAI)

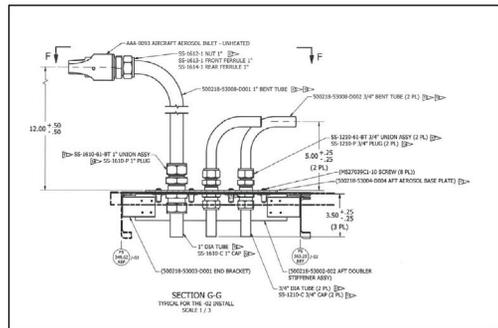
항공기에 부착한 에어로졸 시료채취구 (Airborne Aerosol Inlet, Droplet Measurement Technology, USA)는 항공관측 시 비행속도의 변화와 관계없이 100 L/min으로 등속흡입되도록 설계되어 있다 (McNaughton *et al.*, 2007). 에어로졸 시료채취구의 설치 위치는 항공기 내 측정장비에 연결하는 시료채취관의 길이를 최소화할 수 있도록 항공기의 상부 2곳에 설치하였다 (그림 3). 첫 번째 (전면부) 에어로졸 시료채취구의 설치 위치는 상부의 중앙선을 기준으로 왼쪽 부분으로 Fuselage Station (FS) 295.5지점이며, 두 번째 (후



(a)

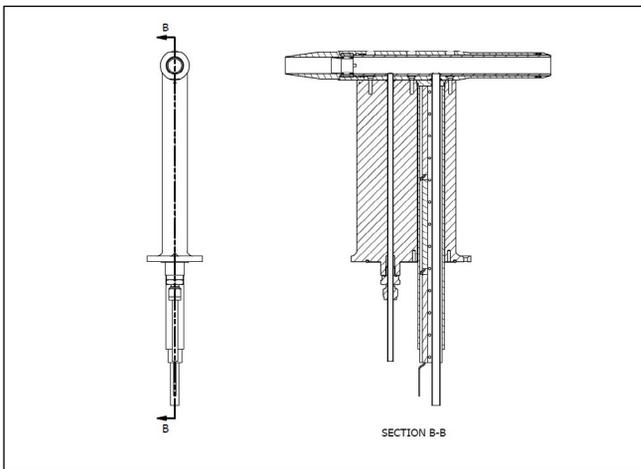


(b)



(c)

Fig. 3. (a) Picture and drawings of the (b) 1st AAI and (c) 2nd AAI.



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Drawing and (b) picture of trace gas inlet.

면부)는 중앙선 기준으로 오른쪽 부분이고 FS 355.75 지점이다. 전면부의 에어로졸 시료채취구 부분에는

측정의 확장성을 고려하여 ‘ㄱ’ 형태의 가스흡입구를 1개 설치하였으며, 후면부에는 유입된 공기를 배

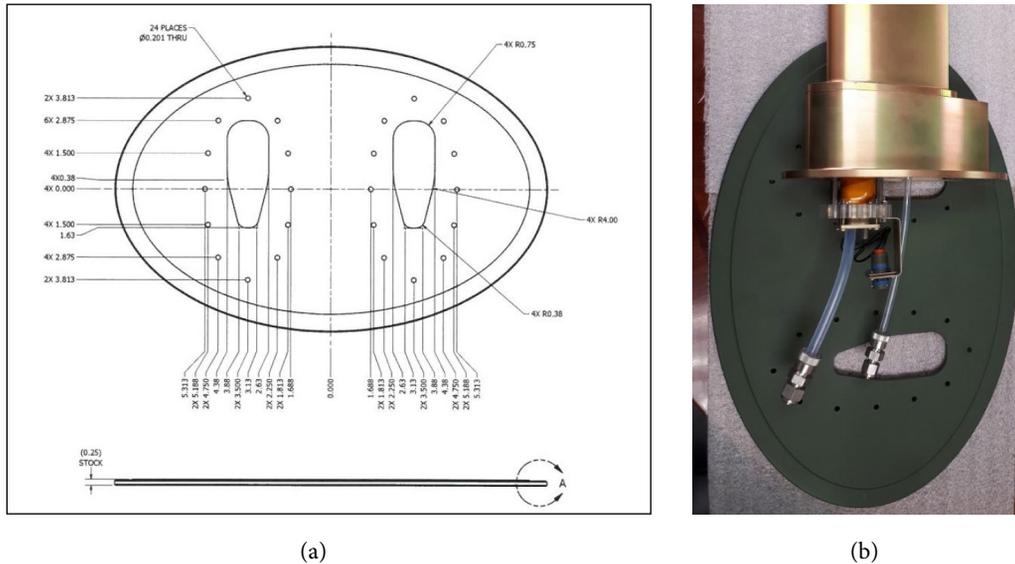


Fig. 5. (a) Drawing and (b) picture of window plate.



Fig. 6. (a) Drawing and (b) picture of the pylon adaptor.

출하기 위한 배출관(Discharge tube)을 2개 설치하였다. 또한, 첫 번째 에어로졸 시료채취구에는 항공관측 시 온도변화에 따른 시료채취구의 결빙 현상을 억제하기 위해 열선을 설치하였다.

2.3.2 가스 흡입구(Trace Gas Inlet; TGI)

가스 흡입구는 항공기 엔진의 배기구보다 앞에 있는 양쪽 첫 번째 창문에 각각 2개씩 설치하였다. 미국 University of California, Irvine (UCI)에 의뢰하여 가스 흡입구를 제작하였으며, 이 대학의 연구진은 KORUS-AQ에서 NASA와 함께 참여하여 가스상물질

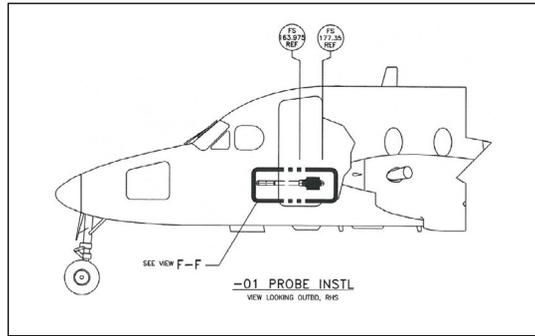
측정을 수행한 바 있다(Jeong *et al.*, 2019). 이 흡입구의 특징은 항공측정 시 공기 흐름의 저항을 최소화하기 위해 비행기의 날개와 같은 유선형이며, 상부에 관처럼 생긴 유입구가 있다(그림 4). 부착방법은 이 가스 흡입구를 알루미늄 합금 소재의 창문 판(window plate, 그림 5)에 장착하였고, 항공기의 첫 번째 창문과 교체하여 설치하였다.

2.3.3 Pylon

Pylon은 항공기 외부에 측정장비를 보완·추가할 수 있어 측정항목의 확장성을 갖게 해 준다. 본 연구



(a)



(b)

Fig. 7. (a) Air data probe (ARIM200), and (b) installation drawing for ADP.

에서는 pylon과 관련한 측정장비 설치를 계획하였다. 대기질 측정을 위해서 pylon 설치가 가능하도록 adaptor를 설치하고(그림 6a) 관련 배선을 매립하였다. Pylon adaptor 설치 위치는 FS 198.25~213.25지점에 항공기의 동체 아래인 STRINGER (STGR) 14R ~ 15R 구역이다(그림 6b).

2.3.4 기상측정장비

일반적으로 대형항공기에는 기상측정센서로부터 Aircraft Communication Addressing Reporting System (ACARS), Aircraft Meteorological Data Reporting (AMDAR)가 생산되는데, 이 자료의 시간해상도는 수 초 혹은 5~6분으로(Park and Kim, 2002) 알려져 있다.

본 연구에서는 20 Hz까지 측정 가능한 Aircraft Integrated Meteorological Measurement System-30 (AIMMS-30, Aventech, Canada)을 설치하였다. 이 기상측정 시스템은 기상측정센서(기온, 습도, 3차원 바람, 기압 등 측정, 그림 7)와 관성장비가 내장되어 있어 바람 성분을 계산하며, 측정된 기상 자료는 메인 메모리에 저장되고 항공관측이 완료되면 자동으로 USB flash memory에 저장된다.

기상측정센서의 설치 위치는 FS 163.975~FS 177.35이고 STRG 9R~10R로서 탑승구 반대편에 있는 외벽 아랫부분이다. 또한, AIMMS-30는 2개의

Global Position System (GPS) 안테나로부터 신호를 받아서 위치정보와 시간정보를 동시에 수집한다. 앞쪽의 GPS 안테나는 항공기에 기존에 설치(설치 위치: FS 268.0)되어 있으며, 뒤쪽의 GPS 안테나는 FS 430.0 지점에 추가로 설치하였다.

2.3.5 측정용 전원공급과 측정 네트워크 구축

전원공급시스템(Electrical Power Control System)은 항공기의 발전기에서 생산된 전기를 분배하여 각 측정장비로 공급하는데, 400 A 발전기 2기, AC 230 V 인버터 6기, 콘센트 8개로 구성된다. 이 시스템에는 비행 중에 발전기가 미작동되는 긴급 상황이 발생하거나 항공기 내에 과전류가 흐르게 되면 측정장비에 공급되는 모든 전원을 차단하고 최소 전력만 소비하도록 안전장치가 설계되어 있다.

측정장비 간의 시간동기화와 측정자료수집은 항공기 내에서 이뤄져야 하므로 측정 네트워크를 구성하였다. 측정 네트워크는 타임서버를 통해 측정장비들의 시간동기화를 할 수 있고 자료수집서버(mission server)를 통해 측정자료를 전송하고 내려받는 것이 가능하도록 이더넷(ethernet)으로 연결된 망(web)이다. 이는 측정장비의 컴퓨터 8대를 연결하여 동시에 시간동기화와 자료수집을 할 수 있다.

구성요소별 설치 위치는 발전기의 경우에 양쪽의 엔진과 연결된 기존 발전기를 탈착하고 새로운 발전

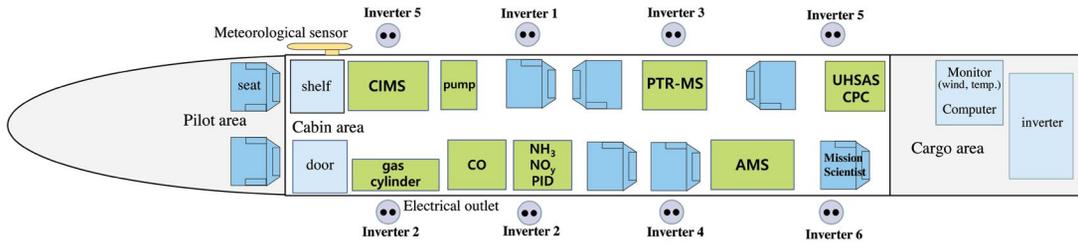


Fig. 8. Arrangement of seats, measurement instruments, and electrical outlets inside the aircraft.

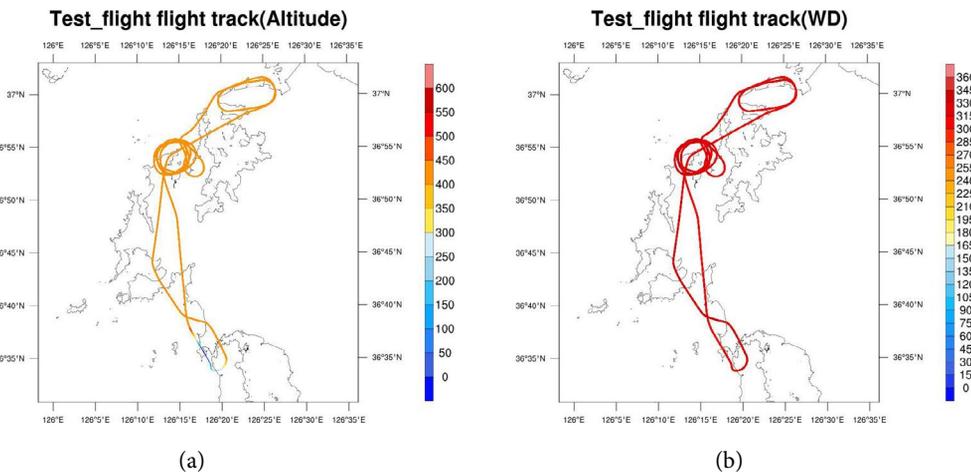


Fig. 9. (a) Altitude (m) and (b) wind direction (o) of the test flight.

기 (400 A, DC 28 V)로 교체하여 최대 22.4 kW, 직류를 교류로 전환해주는 인버터와 자료수집서버 및 타임서버, 네트워크 장비는 항공기 뒤의 적재공간에 설치하였다. 콘센트와 랜선 연결구는 항공기 객실 내 양쪽 벽면에 일정한 간격으로 총 8개를 설치하였다.

측정장비 컴퓨터는 별도의 프로그램을 설치 없이 기내의 네트워크에 연결하여 시간동기화를 할 수 있다. 네트워크는 각 컴퓨터의 설정에서 동적 호스트 구성 프로토콜(Dynamic Host Configuration Protocol; DHCP)를 선택하면 Internet Protocol (IP) 주소를 자동으로 할당받아 연결된다. 시간동기화는 네트워크에 연결된 컴퓨터마다 시간 설정에서 time server의 IP 주소(10.0.0.10)를 직접 입력한 후 동기화를 수행하면 된다. 시간동기화의 기준 시간 정보는 GPS 위

성으로부터 수신되며 각 장비의 컴퓨터별로 네트워크를 통해 송신하므로 각 측정장비의 시간은 같아진다. 자료수집은 컴퓨터의 인터넷 브라우저를 실행시킨 후 URL 주소에 mission server의 주소(<http://10.0.0.4>)를 입력하면 웹 기반의 자료 저장용 User Interface (UI)를 확인할 수 있다.

2.3.6 측정장비 탑재 및 전원 분배

측정장비의 탑재는 목적에 따라 장비의 무게, 전력 사용량을 고려하여 탑재하도록 하였다. 2019년 봄의 항공관측 시에 탑재한 장비를 보면, 가스흡입구와 에어로졸 시료채취구의 위치와 측정장비 무게, 전력사용량을 고려하여 앞쪽에는 가스상물질의 측정장비를 배치하였고, 항공기 뒤쪽에는 입자상물질의 측정장

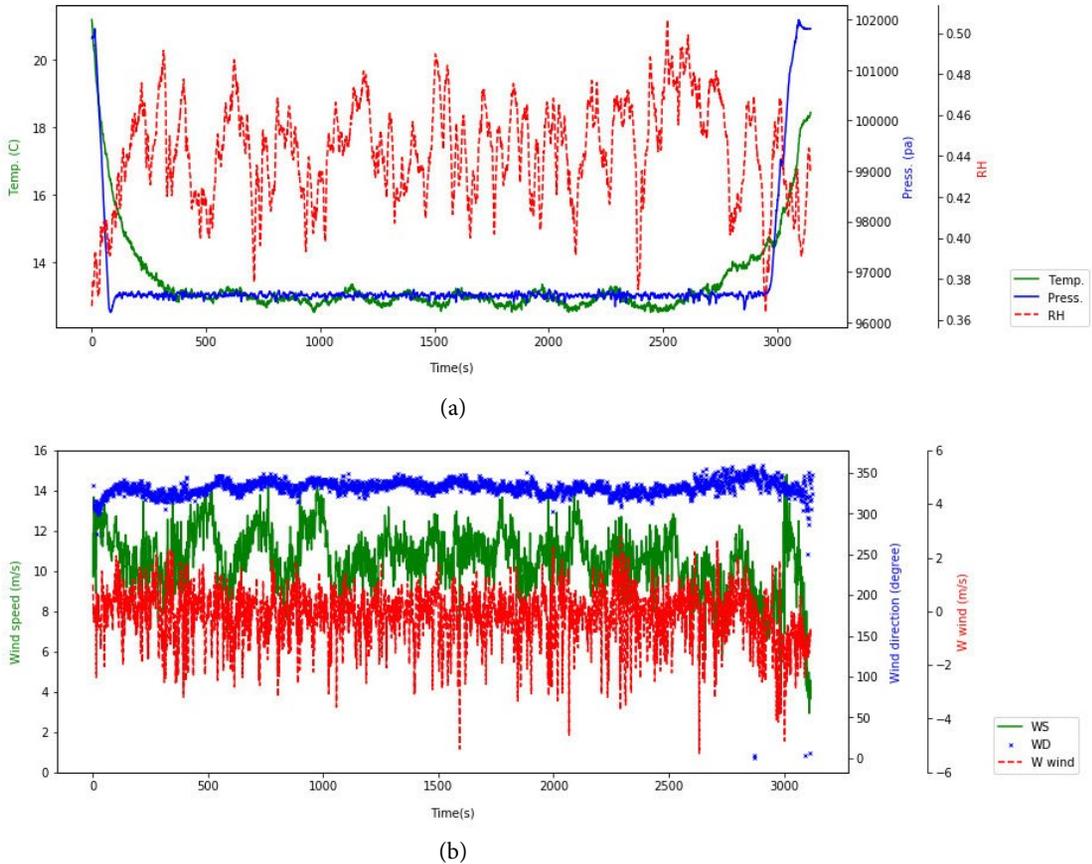


Fig. 10. Time series of (a) temperature, barometric pressure, relative humidity, and (b) wind speed, wind direction, W wind.

비를 배치하였으며 좌·우의 무게가 균일하도록 하였다(그림 8). 항공기 내에 측정장비를 고정한 후에는 에어로졸 시료채취구, 가스흡입구, 가스배출관 등에서 누출이 있는지 확인하였다.

관측 항공기에는 앞에서 설명한 것처럼 6개의 인버터가 설치되어 있고 8개의 콘센트가 연결되므로 인버터 #2와 #5는 각각 2개의 콘센트에 나뉘서 연결되어 있다. 나머지는 각각 인버터 1개에 콘센트 1개가 연결되어 있다. 1개의 콘센트에서 사용 가능한 최대 전류량은 7A (AC 230V, 50Hz, 초과 시 자동차단) 미만이어야 하며, 항공기 안전(전기화재 예방)을 위해 약 85%인 6A 미만으로 분배하였다(그림 8).

2.4 시험비행

항공관측을 위해 기상측정장비의 교정비행을 먼저 실시하였다. 교정비행은 기상측정센서의 관측값을 B1900D에 맞도록 보정하기 위해 항공측정 전에 실시되는 비행이다. 교정비행 후에는 기상측정센서의 시험비행을 약 1시간 동안 태안비행장의 주변을 비행하며 실시하였다. 시험비행 시 측정된 고도와 풍향의 경로는 그림 9와 같이 나타났다. 그림 9a는 AIMMS-30 장비로 수신된 위도, 경도, 고도이며 이륙 후 약 350~400 m 고도에서 비행한 경로가 잘 나타났다. 풍향(그림 9b)은 항공기의 기상측정센서로부터 측정된 U 성분과 V 성분 바람으로부터 산출되었으며 항공기의 방향(heading)에 상관없이 북서풍으로 관측됨을

알 수 있다.

그림 10은 시험비행 동안의 기온, 기압, 상대습도, 풍속, 풍향, 연직(W 성분) 바람을 시계열로 나타낸 것이다. 기온과 기압은 항공기가 이륙하여 고도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으며 상대습도는 맑은 날씨였기 때문에 $44 \pm 2\%$ 임을 알 수 있다. 풍향은 북서풍계열 ($333 \pm 14^\circ$)로 관측되었고 풍속은 $10.6 \pm 1.5 \text{ ms}^{-1}$ 이었으며, 연직바람은 $0.1 \pm 1.0 \text{ ms}^{-1}$ 로 양(+)과 음(-)의 값이 반복적으로 나타났다.

항공측정의 시험비행도 태안 비행장을 주변을 비행하며 측정장비의 작동상태, 시료관의 누출 여부 등을 살펴보았다. 항공기 내에 탑재된 측정장비는 배출원의 상공을 지날 때 오염물질의 농도가 상승하였고 그렇지 않은 지역을 통과할 때는 농도가 낮아졌으며 배출원의 특성에 따라 특정 성분의 농도가 상승하였다. 또한, blank test도 실시하여 누출이 없는 것을 확인하였다. 이는 관측항공기가 오염물질이 분포하는 지역을 통과하는 동안에 측정장비는 짧은 시간(1초) 내에 반응하고 분석되어 올바르게 측정하는 것을 의미한다. 이에 항공관측을 본격적으로 시행한다면 대기오염물질의 고농도 시기에 장거리 영향과 배출원의 영향을 분석할 수 있을 것으로 사료된다.

3. 결 론

항공기를 이용한 대기질 관측은 배경농도, 배출원 및 국외 유입 대기오염물질의 주요성분 및 특성을 입체적으로 짧은 시간 내에 파악할 수 있다. 우리나라에서 본격적인 항공관측은 1993년에 국립환경과학원에서 소형항공기(5인승)로 시작하였고, 점점 그 규모가 확대되어 2011년부터는 8인승 항공기(C90GT)를 사용하였으나, 항공기의 크기가 작아 측정항목은 제한적이었다. 따라서 본 연구에서는 기존 항공기(C90GT)보다 큰 항공기(B1900D, 21인승)를 개조하여 대기질 항공측정 시스템을 구축하였다.

관측항공기는 쌍발-터보프롭 엔진으로 대기경계

층 내 비행이 용이하며, 항공관측 시 저속도(270~300 km/hr)로 비행할 수 있으며, 가스상과 입자상의 대기질 측정장비들을 탑재하고 5~6명의 연구진이 탑승할 수 있도록 설계하였다. 대기질 항공측정을 하고자 항공기에 개조하고 설치한 장치는 에어로졸 시료채취구, 가스흡입구, 기상측정시스템, 전원공급을 위한 고용량 발전기, 인버터, 기내 소통 인터폰 등이며, 탑재된 측정장비로는 HR-ToF-AMS, SP2, UHSAS, PTR-ToF-MS, CIMS, CO, NH₃, NO_x, NO_y, O₃ 분석기 등이 있으며, 향후에는 PILS, WAS 등을 추가로 탑재할 계획이다.

항공기의 개조과정은 엔지니어링을 통해 도면을 작성한 후에 에어로졸 시료채취구, 가스흡입구와 기상측정센서 등을 설치하였다. 개조가 완료된 후에는 지상 테스트와 시험비행을 시행하여 개조한 사항에 대해 작동 여부, 손실, 파손 여부를 최종 점검으로 개조 승인을 획득하였다. 본 연구를 통해 마련된 대기질 관측항공기에는 국립환경과학원의 지원으로 측정장비가 탑재하였고 시험비행을 실시하여 기상과 대기질 측정은 성공적으로 이뤄짐을 알 수 있었다.

본 대기질 관측항공기를 이용하면 장거리 이동하여 우리나라로 유입된 대기오염물질과 대규모 배출원에서 발생한 대기오염물질의 성분분석과 전구물질에 대해 규명을 하여 국내·외의 기여율을 파악할 수 있다. 또한, 항공관측자료는 대기질 수치예보모델의 정확도 향상과 환경위성자료의 개선을 위한 검증 자료로서 활용될 수 있다. 이와 같은 결과로 우리나라의 배출시설 관리방안의 신규 및 증설 등 대기질 개선 대책을 마련하기 위한 방향을 제시할 수 있는 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부)의 재원으로 한국연구재단-미세먼지전략프로젝트사업(20173D8A1090662)과 국립과

학원 (NIER-2018-01-01-016)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- Braun, S.A., Kakar, R., Zipser, E., Heymsfield, G., Albers, C., Brown, S., Durden, S.L., Guimond, S., Halverson, J., Heymsfield, A., Ismal, S., Lambriksen, B., Miller, T., Tanelli, S., Thomas, J., Zawislak, J. (2013) NASA's Genesis and Rapid Intensification Process (GRIP) Field Experiment, *Bulletin of the American Meteorological Society*, March 2013, 345-363. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00232.1>.
- Chang, L.-S., Sung, K.-H., Choi, J.-S., Ban, S.-J., Ahn, J.-Y., Seo, S.-J., Kim, S.-Y. (2010) Estimation of the impact of Long-range Transboundary air pollutants from aircraft measurement and air quality modeling, *Journal of Korea Society of Environmental Administration*, 16(2), 81-88. (in Korean with English abstract)
- Choi, J.-S., Kim, J.-H., Lee, T.-H., Choi, Y.-J., Park, T.-H., Oh, J., Park, J.-S., Ahn, J.-Y., Jeon, H.-E., Koo, Y.-S., Kim, S.-D., Hong, Y.-D., Hong, J.-H. (2016a) A Study on Chemical Characteristics of Aerosol Composition at West Inflow Regions in the Korean Peninsula I. Characteristics of PM Concentration and Chemical Components, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(5), 469-484. (in Korean with English abstract) <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.5.469>.
- Choi, J.-S., Kim, J.-H., Lee, T.-H., Choi, Y.-J., Park, T.-H., Ahn, J.-Y., Park, J.-S., Kim, H.-J., Koo, Y.-S., Kim, S.-D., Hong, Y.-D., Hong, J.-H. (2016b) A Study on Chemical Characteristics of Aerosol composition at West Inflow Regions in the Korea Peninsula II. Characteristics of Inorganic Aerosol Acidity and Organic Aerosol Oxidation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(5), 485-500. (in Korean with English abstract) <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.5.485>.
- Ge, X., He, Y., Sun, Y., Xu, J., Wang, J., Shen, Y., Chen, M. (2017) Characteristics and Formation Mechanisms of Fine Particulate Nitrate in Typical Urban Areas in China, *Atmosphere*, 8, 62. <https://doi.org/10.3390/atmos8030062>.
- Guo, H., Ling, Z.H., Cheng, H.R., Simpson, I.J., Lyu, X.P., Wang, X.M., Shao, M., Lu, H.X., Ayoko, G., Zhang, Y.L., Saunders, S.M., Lam, S.H.M., Wang, J.L., Blake, D.R. (2017) Tropospheric volatile organic compounds in China, *Science of the Total Environment*, 574, 1021-1043. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.116>.
- 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(1), 99-106. (in Korean with English abstract)
- Hecobian, A., Liu, Z., Hennigan, C.J., Huey, L.G., Jimenez, J.L., Cubison, M.J., Vay, S., Diskin, G.S., Sachse, G.W., Wisthaler, A., Crounse, J.D., Clair, J.S.T., Wang, Y., Weber, R. J. (2011) Comparison of Chemical Characteristics of 495 Biomass Burning Plumes Intercepted by the NASA DC-8 Aircraft during the ARCTAS/CARB-2008 Field Campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 13325-13337. <https://doi.org/10.5194/acp-11-13325-2011>.
- Jeong, D., Seco, R., Gu D., Lee, Y., Nault, B.A., Knote, C.J., Mcgee, T., Sullivan J.T., Jimenez, J.L., Campuzano-Jost, P., Blake, D.R., Sanchez, D, Guenther A.B., Tanner, D., Huey, L.G., Long, R., Anderson, B.E., Hall, S.R., Ullmann, K., Shin, H.-J., Herndon, S.C., Lee, Y.J., Kim, B, Ahn, J., Kim, S. (2019) Integration of Airborne and Ground Observations of Nitryl Chloride in the Seoul Metropolitan Area and the Implications on Regional Oxidation Capacity During KORUS-AQ 2016, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 12779-12795. <https://doi.org/10.5194/acp-19-12779-2019>.
- 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)
- Kang, E., Lee, M., Brune, W.H., Lee, T., Park, T., Ahn, J., Shang, X. (2018) Photochemical aging of aerosol particles in different air masses arriving at Baengyeong Island, Korea, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 6661-6677. <https://doi.org/10.5194/acp-18-6661-2018>.
- Kim, B.-G., Cha, J.-S., Han, J.-S., Park, I.-S., Kim J.-S., Na, J.-G., Choi, D.-I., Ahn, J.-Y., Kang, C.-G. (1997) Aircraft Measurement of SO₂, NO_x over Yellow Sea Area, *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, 13(5), 361-369. (in Korean with English abstract)
- Kim, B.-G., Ahn, J.-Y., Kim, J.-H., Park, C.-J., Han, J.-S., Na, J.-G., Choi R.-I. (1999) A Survey on the Long-range Transport of Sulfur Compounds by Aircraft Measurement over the Yellow Sea in 1998, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 15(6), 713-725.

- (in Korean with English abstract)
- Kim, B-G., Han, J.-S., Park, S.-U. (2001) Transport of SO₂ and aerosol over the Yellow sea, *Atmospheric Environment*, 35, 727-737. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00344-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00344-7).
- Kim, C.H., Lee, H.J., Kang, J.E., Jo, H.Y., Park, S.Y., Jo, Y.J., Lee, J.J., Yang, G.H., Park T., Lee T. (2018) Meteorological Overview and Signatures of Long-range Transport Processes during the MAPS-Seoul 2015 Campaign, *Aerosol and Air quality Research*, 18, 2173-2184. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.10.0398>.
- Kim, J., Jeong, U., Ahn, M.-H., Kim, J.H., Park R.J., Lee, H., Song, C.H., Choi, Y.-S., Lee, K.-H., You, J.-M., Jeong, M.-J., Park, S.K., Lee, K.-M., Song, C.-K., Kim, S.-W. Kim, Y.-J., Kim, S.-W., Kim, M., Go, S., Liu, X., Chance, K., Miller, C.C., Al-Saadi, J., Veihelmann, b., Bhartia, P.K., Torres, O., Abad, G.G., Haffner, D.P., Ko, D.H., Lee, S.H., Woo, J.-H., Chong, H., Park, S.S., Nicks, D., Choi, W.J., Moon, K.-J., Cho, A., Yoon, J., Kim, S.-K., Hong, H., Lee, K., Lee, H., Lee, S., Choi, M., Veeffkind, P., Levelt, P., Edwards, D.P., Kang, M., Eo, M., Bak, J., Baek, K., Kwon, H.-A., Yang, J., Park, J., Han, K.M., Kim, B.-R., Shin, H.-W., Choi, H., Lee, E., Chong, J., Cha, Y., Koo, J.-H., Irie, H., Hayashida, S., Kasai, Y., Kanaya, Y., Liu, C., Lin, J., Crawford, J.H., Carmichael, G.R., Newchurch, M.J., Lefer, B.L., Herman, J.R., Swap, R.J., Lau, A.K.H., Kurosu, T.P., Jaross, G., Ahlers, B., Dobber, M., McElroy, C.T., Choi, Y. (2019) New Era of Air Quality Monitoring from space: Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS), *Bulletin of the American Meteorological Society*, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0013.1>.
- Lee, S.-W., Choi, M.-H., Choi, J.-S., Son, J.-S., Kim, S.-Y., Chang, S.-W., Kim, J.-C., Ban, S.-J., Jang, S.-K., Hwang, K.-C. (2011) Research of the impact of Long-range Transboundary air pollutants from aircraft measurement and air quality modeling, *Journal of Korea Society of Environmental Administration*, 17(3), 161-172. (in Korean with English abstract)
- Li, C., Stehr, J.W., Marufu, L.T., Li, Z., Dickerson, R.R. (2012) Aircraft Measurements of SO₂ and Aerosols over Northeastern China: Vertical Profiles and the Influence of Weather on Air Quality, *Atmospheric Environment*, 62, 492-501. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.076>.
- Liu, Q., Ding, D., Huang, M., Tian, P., Zhao, D., Wang, F., Li, X., Bi, K., Sheng, J., Zhou, W., Liu, D., Huang, R., Zhao, C. (2018) A study of elevated pollution layer over the North China Plain using aircraft measurements, *Atmospheric Environment*, 190, 188-194. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.07.024>.
- Matsueda, H., Machida, T., Sawa, Y., Niwa, Y. (2015) Long-term Change of CO₂ Latitudinal Distribution in the Upper Troposphere, *Geophysical Research Letters*, 42(7), 2508-2514. <https://doi.org/10.1002/2014GL062768>.
- McNaughton, C.S., Clarke, A.D., Howell, S.G., Pinkerton, M., Anderson, B., Thornhill, L., Hudgins, C., Windstead, E., Dibb, J.E., Scheuer, E., Maring, H. (2007) Results from the DC-8 Inlet Characterization Experiment (DICE): Airborne Versus Surface Sampling of Mineral Dust and Sea Salt Aerosols, *Aerosol Science and Technology*, 41, 136-159. <https://doi.org/10.1080/02786820601118406>.
- Nakazawa, T., Miyashita, K., Aoki, S., Tanaka, M. (1991) Temporal and spatial variations of upper tropospheric and lower stratospheric carbon dioxide, *Tellus*, 43B, 106-117. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1991.t011-1-00005.x>.
- National institute of environmental research (NIER) (2011) The characteristics of Long-range transport of hazardous air pollutants (I), <http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/report/reportSearchResultDetail.do?cn=TRKO201300007607> (accessed on May. 20, 2013).
- National institute of environmental research (NIER) (2012) The characteristics of Long-range transport of hazardous air pollutants (II), <http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/report/reportSearchResultDetail.do?cn=TRKO201700008225> (accessed on Oct. 12, 2017).
- National institute of environmental research (NIER) (2015a) The study on the physio-chemical characteristics of air pollution plume in Northeast Asia (III), <http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/report/reportSearchResultDetail.do?cn=TRKO201700007894> (accessed on Oct, 28, 2017).
- National institute of environmental research (NIER) (2015b) Source and evolution processes of submicron aerosols in Beongyeong Island, <http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/report/reportSearchResultDetail.do?cn=TRKO201700004492> (accessed on Sep. 20, 2017).
- National institute of environmental research (NIER) (2016) Study on the chemical characteristics of PM_{2.5} in case of high concentration episode (III), <http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/report/reportSearchResultDetail.do?cn=TRKO201700008051> (accessed on Oct. 28, 2017).
- Palmer, P.I., Jacob, D.J., Jones, D.B.A., Heald, C.L., Yantosca, R.M., Logan, J.A. (2003) Inverting for emissions of carbon

- monoxide from Asia using aircraft observations over the western Pacific, *Journal of Geophysical Research*, 198 (D21), 8828. <https://doi.org/10.1029/2003JD003397>.
- Park, O.-R., Kim, Y.-S. (2002) A study on the Verification and Sensitivity Test for the ACARS Data, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 38(4), 333-342. (in Korean with English abstract)
- Park, S., Shin, M., Im, J., Song, C.-K., Choi, M., Kim, J., Lee, S., Park, R., Kim, J., Lee D.-W., Kim, S.-K. (2019) Estimation of ground-level particulate matter concentrations through the synergistic use of satellite observations and process-based models over south Korea, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 1097-1113. <https://doi.org/10.5194/acp-19-1097-2019>.
- Park, T., Ban, J., Kang, S., Ghim, Y.S., Shin, H.-J., Park, J.S., Park, S.M., Moon, K.J., Lim, Y.-J., Lee, M.-D., Lee, S.-B., Kim, J., Kim, S.T., Bae, C.H., Lee, Y., Lee, T. (2018) Chemical Characteristics of PM1 using Aerosol Mass Spectrometer at Baengnyeong Island and Seoul Metropolitan Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 430-446. (in Korean with English abstract) <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.3.430>.
- Sakai, T., Shibata, T., Hara, K., Kido, M., Osada, K., Hayashi, M., Matsunaga, K., Iwasaka, Y. (2003) Raman Lidar and Aircraft Measurements of Tropospheric Aerosol Particle during the Asian Dust Event over Central Japan: Case Study on 23 April 1996, *Journal of Geophysical Research*, 108 (D12), 4349. <https://doi.org/10.1029/2002JD003150>.
- Song, H.-D., Choi, J.-S., Jang, I.-S., Kim, J.-S., Lee S.-J. (2009) Studies on the Behavior of SO₂ and NO_x over Yellow over Yellow Sea Area during Long Term Aircraft Measurements (1997~2007), *Journal of the Environmental Sciences*, 18(5), 569-578. (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5322/JES.2009.18.5.569>.
- Textron, A.I. (1991) Model 1900D Airliner Manual (Rev C0), 24-50-00-0 (Rev C0).
- Voigt, C., Schumann, U., Minkin, A., Abdelmonem, A., Afchine, A., Borrmann, S., Boettcher, M., Buchholz, B., Bugliaro, L., Costa, A., Curtius, J., Dollner, M., Dornbrack, A., Dreiling, V., Ebert, V., Ehrlich, A., Fix, A., Forster, L., Frank, F., Futterer, D., Giez, A., Graf, K., Groob, J.-U., Grob, S., Hemerl, K., Heinold, B., Huneke, T., Jarvinen, E., Jurkat, T., Kaufmann, S., Kenntner, M., Klingebiel, M., Klimach, T., Kohl, R., Kramer, M., Krisna, T.C., Luebke, A., Mayer, B., Mertes, S., Molleker, S., Petzold, A., Pfeilsticker, K., Port, M., Rapp, M., Reutter, P., Rolf, C., Rose, D., Sauer, D., Schafler, A., Schlage, R., Schafler A., Schlage, R., Schnaiter, M., Schneider, J., Spelten, N., Spichtinger, P, Stock, P, Walser, A., Weigel, R., Weinzierl, B., Wendisch, M., Werner, F., Wernli, H., Wirth, M., Zahn, A., Ziereis, H., Zoger, M. (2017) ML-CIRRUS: The Airborne Experiment on Natural Cirrus and Contrail Cirrus with the High-Altitude Long-Range Research Aircraft HALO, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 271-288. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00213.1>.
- Wang, J., Ge, X., Chen, Y., Shen, Y., Zhang, Q., Sun, Y., Xu, J., Ge, S., Yu, H., Chen, M. (2016) Highly time-resolved urban aerosol characteristics during springtime in Yangtze River Delta, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 9109-9127. <https://doi.org/10.5194/acp-16-9109-2016>.
- Yang, X., Xu, J., Bi, F., Zhang, Z., Chen, Y., He, Y., Han, F., Zhi, G., Liu, S., Meng, F. (2018) Aircraft Measurement over the Gulf of Tonkin Capturing Aloft Transport of Biomass Burning, *Atmospheric Environment*, 182, 41-50, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.03.020>.

Authors Information

- 서범근(한서대학교 환경연구소 연구교수)
 박수복(한서대학교 항공운항학과 교수)
 이도영(한서대학교 환경연구소 연구원)
 유명상(한서대학교 환경연구소 연구원)
 유정훈(한서대학교 대학원 환경공학과 박사과정)
 배귀남(한국과학기술연구원 미세먼지 범부처 프로젝트 사업단 단장)
 안준영(국립환경과학원 기후대기연구부 대기질통합예보센터 연구관)
 박진수(국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과 연구관)
 김세웅(캘리포니아대학교 어바인 지구시스템과학과 교수)
 이태형(한국외국어대학교 환경학과 교수)
 김종호(한서대학교 인프라시스템학과 교수)