한국도시환경학회지 제22권 2호 91 - 99 (2022.6.30) ISSN 1598-253X
Journal of the Korean Society of Urban Environment (2022) Vol. 22, No. 2, pp. 91 - 99
https://doi.org/10.33768/ksue.2022.22.2.91

A Study on the Characteristics of Aerosol Chemical Components Over the Seoul Air-Shed(I) - Chemical Evolution of PM-1.0

Hyunjae Kim[1,2] · Jinsoo Choi[2] · Joonyoung Ahn[2] · Jeongho Kim[3]
Taehyoung Lee[4] · Seogyeon Cho[1] · Jinsoo Park[2†]

[1]Department of Environmental Engineering, Inha University, Incheon, Republic of Korea
[2]Climate&Air Quality Research Department Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research
[3]Fine Particle Lab Co., LTD.
[4]Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies

(Received 02 June 2022 : Revised 17 June 2022 : Accepted 27 June 2022)

서울 상공의 에어로졸 화학적 성분 특성에 관한 연구(I) - NR-PM-1.0의 화학적 구성

김현재[1,2] · 최진수[2] · 안준영[2] · 김정호[3] · 이태형[4] · 조석연[1] · 박진수[2†]

[1]인하대학교 환경공학과
[2]국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과
[3]미세먼지연구소(주)
[4]한국외국어대학교 환경공학과

(2022년 6월 2일 접수, 2022년 6월 17일 수정, 2022년 6월 27일 채택)

Abstract

In this study, we carried out the aircraft measurement over Seoul air-shed with a HR-ToF-AMS integrated on an aircraft in the spring of 2020. During the aircraft measurement period, the westerly wind was dominant in the Korean Peninsula and the high-concentration fine dust phenomenon occurred in the Seoul metropolitan area from March 21 to 23, 2020. The average concentration of NR-PM-1.0 for 6 research flights (RF01 to RF06) was 10.0 ± 2.7 μg/m^3 to 52.9 ± 14.4 μg/m^3. The chemical composition of NR-PM-1.0 was 36-57% organic, 12-34% sulfate, 11-25% nitrate, and 10-14% ammonium, and organic component was dominant. The NR-PM-1.0 concentration (52.9 ± 14.4 μg/m^3) of the Seoul flight corresponding to RF05 was the highest, and organic components and sulfate were identified as major components. The flight zone was designed into three zones according to the flight route. The highest NR-PM-1.0 concentration was shown in the Seoul downtown area (a), and the organic component was confirmed as the dominant component of NR-PM-1.0 at a level of about 50%. It was found that the aerosol flowed into the Seoul air-shed with a strong westerly wind and moved to the east and affected rural areas in the downwind direction.

Key words : NR-PM-1.0 (Non Refractory-Particulate Matter), HR-ToF-AMS (High Resolution – Time of Flight – Aerosol Mass Spectrometer), Aircraft Measurement, Chemical components

†Corresponding author
E-mail : airchemi@korea.kr Tel : +82-32-560-7272

요 약 문

2020년 봄철 항공기에 HR-ToF-AMS를 탑재하여 서울 상공에서 항공관측을 수행하였다. 고농도 미세먼지 사례시 NR-PM-1.0의 화학적 성분의 특성을 파악하였다. 고농도 미세먼지 현상은 2020년 3월 21부터 23일에 걸쳐 수도권에 광역적으로 발생하였다. 항공관측 기간동안 우리나라를 포함한 한반도는 서풍이 지배적으로 나타났다. 항공관측 기간 우리나라를 포함한 서울지역은 서풍이 유입되는 조건에서 고농도 미세먼지 현상이 발생하였으며, 서울과 경기 지역의 PM-2.5는 24 ± 12 μg/m^3, 30 ± 16 μg/m^{3}으로 년평균 기준치보다 높은 수준으로 나타났다. 연구비행 6회에 대한 NR-PM-1.0 평균 농도는 10.0 ± 2.7 μg/m^3 - 52.9 ± 14.4 μg/m^{3}이었고, 유기성분 36-57%, 황산염 12-34%, 질산염 11-25%, 암모늄 10-14% 비율로 유기성분이 가장 높은 구성비를 보였다. 유기성분에 대한 OM/OC 비는 1.85-2.02, H/C는 1.42-1.51, O/C는 0.54-0.67 범위로 산화비율이 높은 특징을 나타냈다. RF05에 해당하는 서울 비행의 NR-PM-1.0 농도(52.9 ± 14.4 μg/m^3)가 가장 높았는데, 유기성분과 황산염이 주요성분으로 확인되었다. 비행경로에 따라 3권역으로 구분하였다. 서울을 포함한 수도권역 (a), 충남 대형 배출원을 포함한 태안권역 (b), 강원도 전원(숲) 지역을 포함한 (c) 영역으로 구분한다. 도심지인 (a) 영역에서 가장 높은 NR-PM-1.0 농도를 보였으며, 유기성분이 약 50% 수준으로 NR-PM-1.0의 주요성분으로 확인되었다. 에어로졸은 강한 서풍을 타고 유입되었고, 동쪽으로 이동하며 풍하 방향의 전원 지역에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

주제어 : 비내화성 PM-1.0, NR-PM-1.0, 고분해능에어로졸질량분석기, 항공관측, 화학적성분

I. 서 론

대기 중 미세 에어로졸 입자인 NR-PM-1.0의 화학적 성분을 실시간으로 분석하여 오염 현상을 파악하고, 생성 원인을 규명하기 위한 연구에 고분해능 에어로졸 비행시간 질량분석기(HR-ToF-AMS, High Resolution – Time of Flight – Aerosol Mass Spectrometer)가 광범위하게 활용되고 있다[1-3]. 지구적으로 다양한 현장 관측을 통해 유기성분이 PM-1.0의 20-90%를 차지하며, 자연적 및 인위적으로 배출된 휘발성유기화학물질이 유기성분의 주요한 생성 인자로 밝혀지고 있다. 유기성분과 함께 sulfate, nitrate, ammonium과 같은 무기성분 또한 에어로졸의 주요한 화학적 성분이며, 대기 중 SO_2, NOx, NH_3가 전구물질로 작용하여 2차 생성되는 기원을 가진다[2].

우리나라와 인접한 중국의 대도시에서 관측한 NR-PM-1.0 결과는 유기성분 보다 무기성분의 비중이 큰 것으로 나타나고 있는데, 화석연료에 포함된 황 성분의 연소를 통해 대기 중으로 배출된 SO_2를 기원으로 생성된 sulfate 성분이 가장 높은 수준을 보이는 것으로 파악되고 있다[4,5]. 우리나라는 배경 지역의 백령도[6-10] 및 서울 도심의[11,12] 지상관측에서 측정한 다수의 측정 및 분석 사례가 있다. 이들 결과에서 수년에 걸쳐있는 측정 결과를 통해 NR-PM-1.0의 구성성분에 큰 변화를 보이는데, SO_2 기원의 sulfate 성분은 감소하였지만, 연소 및 내연기관을 통해 배출되는 NOx 기원의 nitrate 성분이 큰 폭으로 증가한 것을 볼 수 있다.

이와 같은 지상관측은 장기간에 걸쳐 지표 부근에 존재하는 에어로졸의 화학적 성분을 파악할 수 있으나 공간적 제약이 존재한다. 측정소 주변의 입지 조건(배경지, 교외지, 주거지, 상업지, 산업단지, 도로변, 항만 등)에 따라 측정자료에 해당 특징이 반영됨으로 인해 지역적인 특징을 제시할 수 있으나, 최근 증가하고 있는 고농도 미세먼지 사례와 같은 광역적인 오염 현상의 파악에 한계가 있다.

이와 같은 국지적인 지상관측 및 고정측정의 제약을 보완하여 공간의 이동에 초점을 맞춘 이동관측이 광역적으로 발생하는 오염 현상의 이해와 연구에 활용되고 있다[13]. 이동관측은 이동차를 이용한 지상이동관측과 항공기를 이용한 항공관측으로 분류할 수 있는데 특히 항공관측은 무엇보다도 빠른 공간 이동의 장점으로 광역적으로 발생하는 대기오염 현상을 파악하고, 지구 대기권에서 대류권의 오염 현상 관측에 폭넓게 활용되고 있다. 우리나라 환경부는 과학적 연구의 목적으로 중형 항공기를 플랫폼을 도입하였으며, 대기질 입체감시를 위한 목적으로 서해상에서 장거리 이동 오염물질의 관측을 수행해오고 있다[14].

항공관측은 매우 빠른 속도로 이동하기 때문에 탑재한 분석 장비의 측정 주기가 짧을수록 공간해상도가 높아진다. 항공관측에 에어로졸 질량분석기를 이용해 밀리 (milly)초 분해능에서 측정할 수 있는 분석 방법이 수립되었고[15], 다수의 국제협력연구인 BREARPEX-1 캠페인, ARCTAS 캠페인, MAPS-Seoul 캠페인, KORUS-AQ 캠페인에 활용되었다[16]. 특히 2016년 봄철 우리나라 전역의 상공에서 항공관측을 실시한 KORUS-AQ 캠페인 연구 결과 미세먼지 오염의 4분의 3 이상이 2차 생성이 주요한 원인으로 밝혀졌으며, 이러한 2차 생성에 대한 원인을 파악하는 데에 연구의 초점이 맞춰지고 있다.

본 연구에서는 환경부 항공관측 플랫폼을 기반으로 HR-ToF-AMS를 이용하여 NR-PM-1.0을 측정 및 분석하였으며, 우리나라 서울 상공을 중심으로 실시간 NR-

PM-1.0의 화학적 성분의 구성과 분포를 살펴보았다.

II. 연구방법

1. 연구비행(RF, Research Flight)

서울 항공관측을 목적으로 총 6회의 RF를 계획하여 수행하였다. RF01-RF06에 대한 경로를 정리하여 Table 1에 제시하였다. 2020년 3월 21일부터 3월 23에 걸쳐 오전 및 오후 비행을 통해 총 6회 관측하였다. Fig. 1에는 한반도 중부 지역의 지도를 나타내며, 항공기 위치정보시스템으로 수집한 이동 경로 좌표를 표시하였다. RF에 대하여 (a) 서울, (b) 대형배출원, (c) 교외로 분류할 수 있다.

항공관측 세부 경로는 다음과 같다. 서울을 포함한 (a)는 김포공항을 이륙하여 서울을 포함한 수도권을 관측하고 김포공항으로 돌아오는 경로이다. 강서에서 강동 방향으로 한강과 올림픽대로를 따라 서쪽에서 동쪽으로 이동하여, 롯데타워를 오른쪽으로 두고 선회하여 서울공항 방면으로 남하한다. 한강 이남의 경기 지역은 성남공항과 광교산(수원) 및 안양시 상공을 순차적으로 거쳐 시흥, 부천, 인천을 비행한 후 계양산(인천)을 옆에 두고 김포공항에 도달함으로 선회비행을 1회 완성한다. 비행고도는 500-600 m이다. 대형배출원을 포함하는 (b)는 충남 태안반도 상공을 경유하는 경로로 태안화력, 대산석유화학단지, 당진화력, 현대제철, 평택항을 통과한다. 교외로 분류된 (c)는 한강 상류인 남한강을 거슬러 올라가는 경로이며, 최종 목적지는 강원도 원주이다.

Table 1. Summary on the research flight pathways

Research flight #	Date	Time	Flight path
RF01	March 21, 2020	08:40-11:00	Taean-Gimpo-SMA[1)]-Gimpo
RF02	March 21, 2020	14:25-16:50	Gimpo-SMA-Gimpo
RF03	March 22, 2020	09:00-11:20	Gimpo-SMA-Gimpo
RF04	March 22, 2020	14:00-16:20	Gimpo-Wonju
RF05	March 23, 2020	09:00-11:20	Gimpo-SMA-Gimpo
RF06	March 23, 2020	14:10-17:20	Gimpo-Wonju-Taean

[1)]SMA: Seoul Metropolitan Area

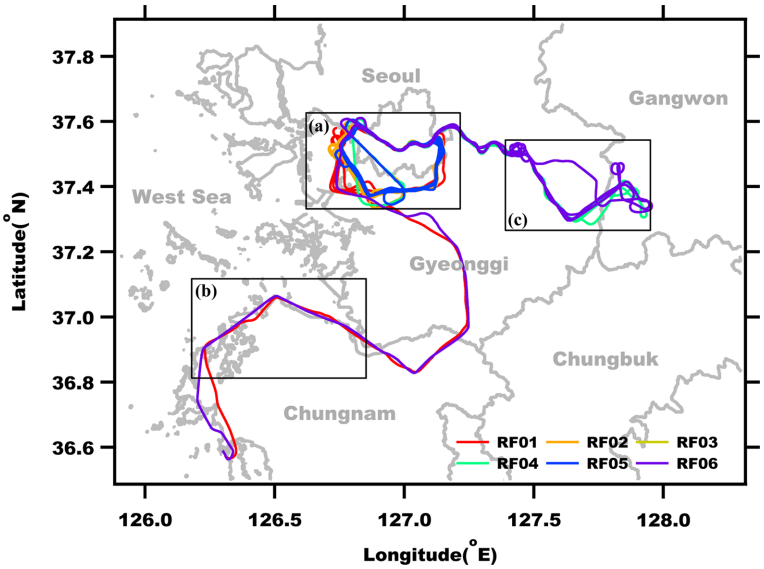

Fig. 1. Map of Central region of the South Korean peninsula and the flight tracks of the research flights (RFs) aboard the BeachCraft (B1900D) aircraft - (a) Seoul metropolitan area, (b) the large-scale emission facility area, (c) the rural forest area.

2. HR-ToF-AMS

HR-ToF-AMS는 에어로졸 입자에 대하여 1 μm 이하 초미세입자의 실시간 화학성분 분석을 수행하는 장비로 초 단위의 시간 해상도를 가지며 무기물질과 유기물질의 실시간 질량스펙트럼을 분석한다. 장비의 원리 및 분석 방법은 이전 연구들에서 자세히 기술되어 있으며, HR-ToF-AMS의 분석조건을 정리하여 Table 1에 제시하였다[2,3,6,7,12].

항공관측 플랫폼에 사용하는 항공기(BeachCraft, B1900D)는 최대 약 520 km/h 속도로 비행할 수 있으며, 항공관측에는 300 km/hr 등속도로 비행하면서 자료를 수집한다. 항공 관측용 에어로졸 프로브(Aerosol Inlet, DMT, USA)는 비행속도와 관계없이 100 L/min에서 등속 흡인할 수 있는 설계 및 제작 사양을 가진다[14]. 항공관측에서 적용한 ToF-AMS 에어로졸 측정 방법은 Fast-MS 방식으로 1hz 간격으로 자료를 수집하는 방법이다[15]. Fast-MS는 open mode 110초, closed mode 10초로 설정하였으며, 2분 주기를 가진다. 최종 자료는 2분에 연속적으로 110초, 즉 110개에 대한 에어로졸의 질량스펙트럼 자료를 수집하여 분석하였다. 정도관리를 위해 HR-ToF-AMS 표준운영절차에 따라 측정 전 유량 교정, 이온화효율 교정, 입자크기 교정을 수행하였다. 수집된 자료는 IGOR Pro 상용 소프트웨어(Wavemetrics, USA) 기반에서 ToF-AMS Toolkit (Version UMR 1.65B, HR 1.25B)을 이용하여 처리하였으며, CDCE(Chemical Dependence Collection Efficiency)를 적용하여 NR-PM-1.0의 화학적 성분농도(organic, nitrate, sulfate, ammonium, chloride) 및 유기성분의 원소비(O/C, H/C)를 산정하였다[10,12,16].

III. 결과 및 고찰

1. 기상 현황

관측 기간 남-북 방면의(180-360°) 바람의 빈도가 높았고, 주 풍향은 서풍으로 우리나라를 포함한 동아시아 지역은 남서 방향으로 길게 늘어선 저기압 영역하에 발해만 북서쪽에 있던 약한 대륙 고기압 세력이 한반도로 남동진하였다[17].

항공관측 항공기상 정보를 (a), (b), (c) 권역별로 정리하여 Fig. 2에 나타냈다. 서울을 포함한 (a) 권역에서는 남서, 북서 계열의 바람이 5-15 m/s 범위에서 강하게 나타났다. 태안의 배출원을 포함하는 (b) 권역은 주로 남풍과 남서풍 계열에서 15-20 m/s 바람의 빈도가 높았고, 주로 서해상에서 불어오는 바람의 영향을 받고 있었다. 남한강 수계 상공을 포함하는 서울의 풍하 지역인 (c) 권역은 주로 서풍 계열의 10-15 m/s 바람의 빈도가 높은 특징을 보였다.

2. 항공관측 기간 PM-10 및 PM-2.5 농도분포

항공관측 기간 미세먼지 분포를 파악하기 위하여 지상에서 관측한 PM-10과 PM-2.5 농도를 정리하여 Table 2에 제시하였다. PM-10 및 PM-2.5는 베타선 흡수방식으로 측정한 1시간 농도를 나타내며 정도관리

Table 2. Summary on the HR-ToF-AMS analytic conditions

Items		Contents
Model / Manufacture		HR-ToF-AMS / Aerodyne, U.S.A
Sampling flow		1.5 ml/sec (90 ml/min)
Critical orifice		130 μm pin hole
PToF chamber	Particle flight pathway length	0.293 m
Vaporizer	Filament emission current	1.5 mA
	Electron impaction energy	70 eV
	Temperature	600°C
HR-ToF Analyzer (TOFWERK,SWT)	Mass range	m/z 10 - m/z 300
	Mass resolution	m/△m = 1,500 - 3,000
	Ion flight pathway length	1.2 m (V mode)
	Data acquisition mode	Fast Mass Mode, 1 Hz
	Pulse extraction	25 kHz
	Detector (MCP) voltage	2,100 VdC

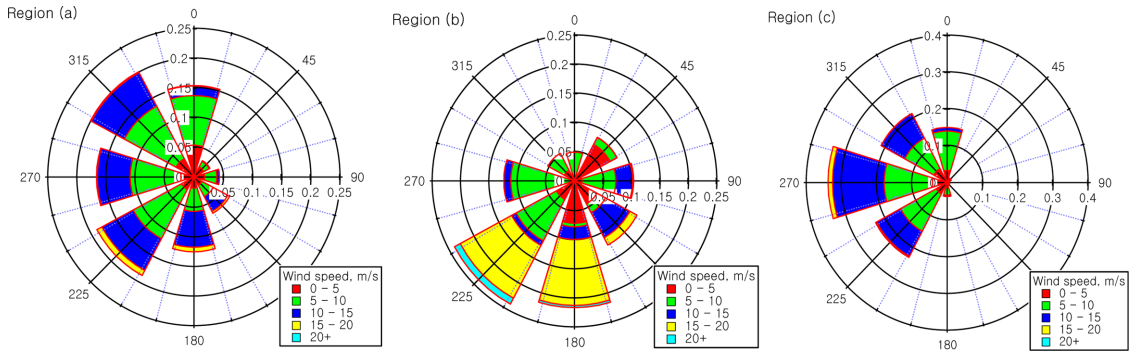

Fig. 2. Wind rose for the region (a), (b) and (c) by research flights.

및 등가성 평가 기준을 충족하는 장비이다. 각각 국립환경과학원 수도권대기환경연구소(SIMS, Sudogwon Intensive Monitoring Station)와 경기권대기환경연구소(GIMS, Gyunggigwon Intensive Monitoring Station)로서, SIMS는 서울시 불광동 소재, GIMS는 경기도 안산시에 소재하는 연구소로 우리나라 대기오염집중측정소의 기능과 역할을 가진다.

해당 기간 미세먼지 농도를 살펴보면 PM-10은 평균 52 ± 18 μg/m^3, 56 ± 17 μg/m^{3}이었고, PM-2.5는 24 ± 12 μg/m^3, 30 ± 16 μg/m^{3}으로 GIMS에서 측정된 미세먼지가 SIMS 보다 높은 것으로 파악된다. PM-10 최대농도는 SIMS(102 μg/m^3)와 GIMS(103 μg/m^3)가 비슷한 수준이었으나, PM-2.5의 최대농도는 GIMS(73 μg/m^3)가 SIMS(52 μg/m^3)보다 21 μg/m^3 높은 것을 알 수 있다. 두 지점에서 관측된 PM-2.5는 연평균 기준(15 μg/m^3)을 약 2배 상회하는 수치이다. PM-2.5/PM-10 비율은 SIMS 0.47 ± 0.21, GIMS 0.52 ± 0.19로 미세(fine)영역과 조대(coarse)영역 입자의 비율이 비슷한 수준으로 파악된다.

2020년 3월 20일부터 3월 25일 까지 총 6회의 연구비행(RF, Research Flight)을 실시하였으며, Fig. 6에 SIMS와 GIMS에서 관측한 PM-10, PM-2.5 시계열 분포와 함께 RF1–RF6에 대한 기간을 도식하여 나타냈다. RF01과 RF02는 미세먼지 농도가 증가하는 구간으로, SIMS에서는 RF02에 해당하며 PM-10 최대농도가 출현한 시기이다. 그리고 RF03과 RF04는 미세먼지 농도가 감소하며 변곡점을 나타내는 구간으로 관측 기간 제일 낮은 농도 수준을 보이며, RF05와 RF06은 다소 완만하게 미세먼지 농도가 증가하는 구간의 특징을 가진다.

3. 항공관측 PM-1.0 농도 및 화학적 성분 구성

총 6회의 연구비행에 대한 결과를 정리하여 NR-PM-1.0의 농도, 화학적 성분 및 원소비를 Table 4에 제시하였다. 연구비행 기간 서울과 경기 지역의 지상 미세먼지(PM-10, PM-2.5)가 높은 수준(13-103 μg/m^3, 5-73 μg/m^3)이었고, RF02는 서울과 경기 지역에 고농도 미세먼지 현상이 지속된 날에 속하며, RF05는 서울과 경기의 미세먼지 농도가 증가하는 날에 해당한다. NR-PM-1.0 평균농도는 10.0 ± 2.7 μg/m^3(RF04)에서 53.9 ± 14.4 μg/m^3(RF05) 범위로 나타났으며, RF05 > RF02 > RF06 > RF01 > RF04 순이었다. NR-PM-1.0 화학적 성분의 구성은 유기성분(organic)이 36-57% 범위로 가장 높았으며, 황산염(sulfate, SO_4^{2-}) 12-34%, 질산염(nitrate, NO_3^-) 11-25%, 암모늄(ammonium, NH_4^+) 10-

Table 3. Summary on the PM-10 and PM-2.5 at SIMS and GIMS during the Research Flight (20th Mar. 2020 to 25th Mar. 2020), μg/m^3

Items	SIMS		GIMS	
	PM-10	PM-2.5	PM-10	PM-2.5
Mean	52	24	56	30
S.D.	18	12	17	16
Min.	13	5	23	6
Max.	103	52	102	73

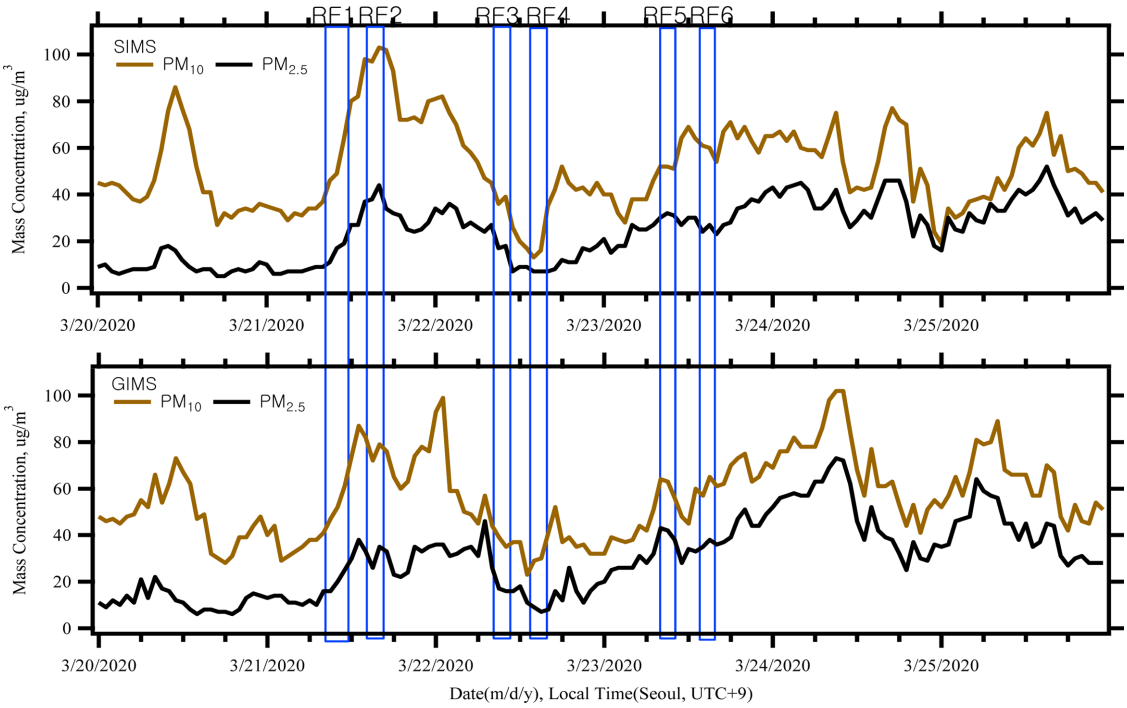

Fig. 3. PM-10 and PM-2.5 mass concentrations at SIMS (upper) and GIMS (lower) during the research flights (RF1 to RF6) period (Mar/21/2020 to Mar/25/2021).

Table 4. The overall mean NR-PM1 concentrations and the elemental ratio of for each research flight

Research Flight #	Items	Concentration (μg/m^3)						Ratio		
		NR-PM-1.0	organic	nitrate	sulfate	ammonium	chloride	OM[b]/OC[c]	H/C	O/C
RF01	Mean	25.33	9.07	6.31	4.93	3.35	1.66	1.85	1.51	0.54
	S.D.[a]	7.56	2.64	2.52	2.04	1.18	0.90	0.11	0.09	0.08
RF02	Mean	46.54	18.72	6.02	13.64	6.25	1.92	1.90	1.50	0.58
	S.D.	9.06	3.32	1.00	3.89	1.37	0.54	0.07	0.06	0.05
RF03	Mean	18.58	10.05	3.18	3.14	1.85	0.30	1.92	1.50	0.59
	S.D.	6.71	3.56	1.00	1.65	0.75	0.21	0.07	0.07	0.06
RF04	Mean	10.04	5.68	2.12	1.17	0.95	0.06	1.97	1.42	0.63
	S.D.	2.65	1.69	0.62	0.57	0.27	0.04	0.08	0.07	0.06
RF05	Mean	52.86	19.72	6.06	17.88	7.51	1.68	1.98	1.51	0.63
	S.D.	14.36	5.21	1.03	5.57	2.16	0.94	0.07	0.06	0.05
RF06	Mean	30.19	11.85	3.70	9.84	4.17	0.38	2.02	1.49	0.67
	S.D.	12.65	5.39	1.42	4.67	1.82	0.36	0.09	0.12	0.07

[a]Standard Deviation, [b]OM: Organic Matter, [c]Organic Carbon

14% 순이었다. 유기성분에 대한 OM/OC 비는 1.85-2.02, H/C는 1.42-1.51, O/C는 0.54-0.67 범위에 분포하였다. RF04 비행은 Fig. 3에서와 같이 지상의 미세먼지 농도가 감소하는 구간으로, 항공관측에서도 가장 낮은 농도 수준을 보였다. RF04의 유기성분의 H/C는 1.42로 가장 낮은 휘발 수준이었고, O/C는 0.63으로 전

체 RF에서 비교적 높은 산화 수준을 나타내, 새롭게 생성되는 유기 성분의 기여가 낮았던 것으로 사료 된다[10,16].

4. 비행권역별 화학적 성분 특성

비행권역별 NR-PM-1.0의 농도분포와 화학적 성분의 구성에 대하여 Fig. 4에 제시하였으며, Table 5에 요약하였다. NR-PM-1.0은 서울을 포함한 (a) 권역이 33.5 ± 17.7 μg/m^3, 대형배출원이 분포한 (b) 권역이 20.4 ± 6.2 μg/m^3, 남한강 수계인 한강 상류 지역인 (c) 권역이 18.3 ± 12.6 μg/m^{3}으로 항공관측기간 (a) 권역이 가장 높은 농도를 보였다. NR-PM-1.0의 화학적 조성은 유기 성분이 40-41%, 황산염 18-32%, 질산염 13-24%, 암모늄 13-14%를 차지하였으며, 유기 성분이 가장 우세한 것으로 파악된다.

서울 (a) 권역의 경우 RF01 일부, RF02, RF03, RF05 일부 구간이 포함되는데 유기 성분 다음으로 황산염이 가장 높은 특징을 나타냈다. 특히 RF02와 RF05는 서울 비행만 포함되어 있는데 유기 성분이 가장 높은 비율을 차지하고 있지만, RF05는 유기성분(19.7 ± 5.2 μg/m^3)과 황산염(17.9 ± 5.6 μg/m^3) 거의 비슷한 수준이다. 서울 상공에서 SO2 기원의 황산염 성분에 대한 급격한 증가는 서풍 조건에서 외부로부터 오염물질의 유입이 있음을 반영한다[6-8].

태안의 대형배출원을 포함하는 (b)는 RF1의 시작과 RF5 종료 구간 2회에 해당하며, 남풍-남서풍 계열의 바람이 유입되는 조건이었다. 해당 측정경로에서 대형배출원 상공에서 농도의 변화가 일부 확인되며 특히 서해대교가 위치한 평택항과 아산만 상공에서 고농도 구간들을 볼 수 있다. 그러나 (b) 권역의 측정은 배출원 상공을 지나가는 비행 특성상 배출원의 플룸(plume) 및 비산배출 오염물질을 정확히 측정한다고 볼 수 없는 한계점이 있으므로, 배출원 상공에서 고도별 선회비행 관측 방법을 통해 보완할 필요가 있다[16].

남한강 수계 상공으로 강원도 원주를 선회지점으로 하는 (c) 권역은 서풍의 바람이 유입되는 조건이었다. 교외 지역으로 분류할 수 있으며, 서울과 경기도의 오염물질이 유출되는 풍하 지역에 해당한다. RF04와 RF06 일부를 포함하고 있으며, (a) 권역에서 산정된 NR-PM1의 약 52% 이었고, 권역별 분류에서 가장 낮은 농도를 보였다. (a)와 (c)의 화학적 구성에 있어서 성분의 농도 차이는 있으나, 성분비 크기는 유기성분 > 황산염 > 질산염 > 암모늄 성분으로 동일하고 그 비율도 유사한 수준이었다. 이것은 서울과 경기 지역 상공에서 측정된 고농도 에어로졸이 강한 서풍하에서 동쪽으로 이동 및 확산하여 풍하 권역에 영향을 주고 있음을 추정할 수 있다.

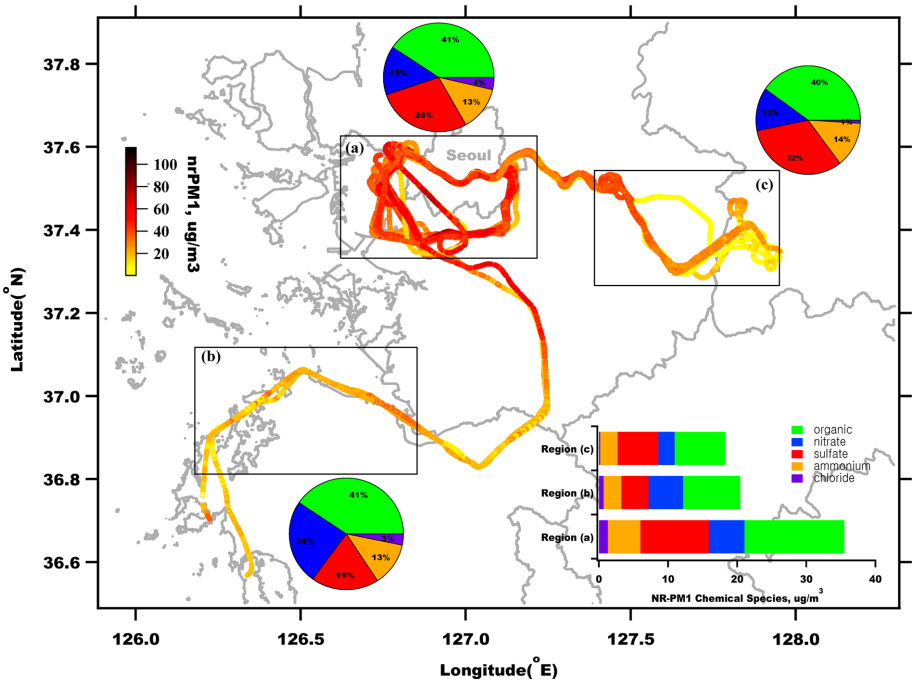

Fig. 4. Map of Central region of the South Korean peninsula and the distribution of NR-PM-1.0 chemical species.

Table 5. The mean NR-PM-1.0 concentrations and the elemental ratio of for each region

Region	Items	Concentration (μg/m^3)						Ratio		
		NR-PM-1.0	organic	nitrate	sulfate	ammonium	chloride	OM/OC	H/C	O/C
(a)	Mean	35.47	14.43	5.15	9.92	4.69	1.28	1.93	1.50	0.60
	S.D.	17.65	6.20	2.01	7.07	2.71	1.00	0.11	0.08	0.08
(b)	Mean	20.44	8.28	4.99	3.94	2.56	0.66	2.00	1.43	0.65
	S.D.	6.20	2.49	1.65	2.34	1.04	0.62	0.16	0.14	0.12
(c)	Mean	18.29	7.37	2.35	5.89	2.50	0.17	1.97	1.50	0.62
	S.D.	12.57	4.20	1.20	5.33	2.00	0.17	0.09	0.14	0.07

서울과 경기 지역에서 RF02의 고농도 NR-PM1은 깨끗한 공기가 유입되면서 RF03과 RF04에서 감소하였다. 서풍 조건에서 오염물질이 서쪽으로 이동해가면서 풍하 지역의 (c) 권역의 농도는 증가하였으며 (RF04), RF05와 RF06은 서울과 경기 지역의 미세먼지가 증가하는 시기이지만 (c) 권역의 농도는 낮아 오염물질의 이동에 대한 시간 차이가 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 항공관측 플랫폼을 이용하여 서울 상공의 에어로졸, NR-PM-1.0 화학적 성분을 파악하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 항공관측 기간 우리나라를 포함한 서울지역은 서풍이 유입되는 조건에서 고농도 미세먼지 현상이 발생하였으며, 서울과 경기 지역의 PM-2.5는 24 ± 12 μg/m^3 30 ± 16 μg/m^{3}으로 년평균 기준치보다 높은 수준으로 나타났다.
2. 연구비행 6회에 대한 NR-PM-1.0 평균 농도는 10.0 ± 2.7 μg/m^3 - 52.9 ± 14.4 μg/m^3 이었고, 유기성분 36-57%, 황산염 12-34%, 질산염 11-25%, 암모늄 10-14% 비율로 유기성분이 가장 높은 구성비를 보였다. 유기성분에 대한 OM/OC 비는 1.85-2.02, H/C는 1.42-1.51, O/C는 0.54-0.67 범위로 산화비율이 높은 특징을 나타냈다.
3. 6회의 연구비행에서 RF05에 해당하는 서울 비행의 NR-PM-1.0 농도(52.9 ± 14.4 μg/m^3)가 가장 높았는데, 유기성분 및 황산염이 주요성분으로 확인되었다.
4. 비행을 권역별로 분류하면, NR-PM-1.0은 서울지역의 농도가 가장 높았으며, 연구비행 기간 강한 서풍 조건에서 에어로졸이 동쪽으로 이동하며 풍하 방향의 강원지역에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 에어로졸, NR-PM-1.0에 대한 서울 상공에서의 분포 농도, 풍하 방향으로의 이동과 확산 및 배출원 상공을 신속히 파악할 수 있었고, 그 화학적 성분의 분포와 특징을 확인하였으며, 지속적인 관측을 통해 광역적으로 발생하는 대기오염 현상의 이해와 정책 수립에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 환경부 국립환경과학원의 재원으로 22년 입체관측사업(NIER-2022-01-01-100)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

1. DeCarlo, P. F., Dunlea, E. J., Kimmel, J. R., Aiken, A. C., Sueper, D., Crounse, J., Wennberg, P. O., Emmons, L., Shinozuka, Y., Clarke, A., Zhou, J., Tomlinson, J., Collins, D. R., Knapp, D., Weinheimer, A. J., Montzka, D. D., Campos, T., and Jimenez, J. L., “Fast airborne aerosol size and chemistry measurements above Mexico City and Central Mexico during the MILAGRO campaign”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **8**(14), 4027-4048 (2008).
2. Jimenez, J. L., Canagaratna, M. R., Donahue, N. M., Prevot, A. S. H., Zhang, Q., Kroll, J. H., DeCarlo, P. F., Allan, J. D., Coe, H., Ng, N. L., Aiken, A. C., Docherty, K. S., Ulbrich, I. M., Grieshop, A. P., Robinson, A. L., Duplissy, J., Smith, J. D., Wilson, K. R., Lanz, V. A., Hueglin, C., Sun, Y. L., Tian, J., Laaksonen, A., Raatikainen, T., Rautiainen, J., Vaattovaara, P., Ehn, M., Kulmala, M., Tomlinson, J. M., Collins, D. R., Cubison, M. J., Dunlea, E. J., Huffman, J. A., Onasch, T. B., Alfarra, M. R., Williams, P. I., Bower, K., Kondo, Y., Schneider, J., Drewnick, F., Borrmann, S., Weimer, S., Demerjian, K., Salcedo, D., Cottrell, L., Griffin, R., Takami, A., Miyoshi, T., Hatakeyama, S., Shimono, A., Sun, J.

Y., Zhang, Y. M., Dzepina, K., Kimmel, J. R., Sueper, D., Jayne, J. T., Herndon, S. C., Trimborn, A. M., Williams, L. R., Wood, E. C., Middlebrook, A. M., Kolb, C. E., Baltensperger, U., and Worsnop, D. R., "Evolution of organic aerosols in the atmosphere", *Science*, **326**(5959), 1525-1529 (2009).

3. Cubison M. J., Ortega, A. M., Hayes, P. L., Farmer, D. K., Day, D., Lechner, M. J., Brune, W. H., Apel, E., Diskin, G. S., Fisher, J. A., Fuelberg, H. E., Hecobian, A., Knapp, D. J., Mikoviny, T., Riemer, D., Sachse, G. W., Sessions, W., Weber, R. J., Weinheimer, A. J., Wisthaler, A., and Jimenez, J. L., "Effects of Aging on Organic Aerosol from Open Biomass Burning Smoke in Aircraft and Laboratory Studies", *Atmospheric Chemistry and Physics*, **11**, 12049-12064 (2011).
4. Sun, J. Y., Zhang, Q., Canagaratna, M. R., Zhang, Y. M., Ng, N. L., Sun, Y. L., Jayne, J. T., Zhang, X. C., Zhang, X. Y., and Worsnop, D. R. Worsnop, "Highly time- and size resolved characterization of submicron aerosol particle in Beijing using an Aerodyne Aerosol Mass Spectrometer", *Atmospheric Environment*, **44**(1), 131-140 (2010).
5. Sun, Y., Wang, Z., Dong, H., Yang, T., Li, J., Pan, X., Chen, P., and Jayne, J. T., "Characterization of summer organic and inorganic aerosols in Beijing, China with an Aerosol Chemical Speciation Monitor", *Atmospheric Environment*, **51**, 250-259 (2012).
6. Choi, J., Kim, J., Ahn, J., Park, J., Koo, Y., Yoon, G., and Kim, S., "A Case Study on the High Mass Loading Aerosol observed using an Aerodyne ToF-AMS in Baegryung Island, May 2011", *Journal of Korean Society of Urban Environment*, **13**(1), 19-32 (2013).
7. Choi, J., Kim, J., Lee, T., Choi, Y., Park, T., Oh, J., Park, J., Ahn, J., Jeon, H., Koo, Y., Kim, S., Hong, Y., and Hong, J., "A Study on Chemical Characteristics of Aerosol Composition at West Inflow Regions in the Korean Peninsula I. Characteristics of PM Concentration and Chemical Components", *Korean Society for Atmospheric Environment*, **32**(5), 469-484 (2016).
8. Choi, J., Kim, J., Lee, T., Choi, Y., Park, T., Oh, J., Park, J., Ahn, J., Jeon, H., Koo, Y., Kim, S., Hong, Y., and Hong, J., "A Study on Chemical Characteristics of Aerosol Composition at West Inflow Regions in the Korean Peninsula II. Characteristics of Inorganic Aerosol Acidity and Organic Aerosol Oxidation", *Korean Society for Atmospheric Environment*, **32**(5), 485-500 (2016).
9. Kim, J., Choi, J., Oh, J., Ahn, J., Park, J., Yoon, G., Kim, S., and Han, J., "Characteristics of Organic Components on the High Mass Loading Aerosol observed at Baengnyeong Island, May 2011", *Journal of Korean Society of Urban Environment*, **14**(3), 203-211 (2014).
10. Kim, J., Park, J., Choi, J., Park, J., Park, S., Song, I., Shin, H., Ahn, J., and Kim, S., "A Study on the Characteristics of PM1.0 and source of organic components during summertime at Seoul and Baengnyeong Island", *Journal of Korean Society of Urban Environment*, **17**(3), 213-230 (2017).
11. Park, S., Park, J., Song, I., Shin, H., Hong, Y., and Kim, J., "Characteristics of Oxygenated-VOCs and Oxidation of Organic Component in PM1.0 at an Urgan Site of Seoul during June, 2014", *Journal of Korean Society of Urban Environment*, **15**(3), 207-218 (2015).
12. Park, J., Song, I., Park, S., Shin, H., and Hong, Y., "Characteristics of Submicron Particle during High Concentration Episodes in Spring, 2014 at Seoul, Korea, using the Aerosol Mass Spectrometer", *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, **18**(1), 12-25 (2015).
13. Kim, J., Kim, C., Noh, S., Hwang, E., Park, D., Lee, J., and Kim, J., "A Study on spatial distribution characteristics of air pollutants in Bucheon-si using mobile laboratory", *Particle and Aerosol Research*, **17**(1), 9-20 (2021).
14. Seo, B., Park, S., Lee, D., Yu, M., Yu, J., Bae, K., Ahn, J., Park, J., Kim, S., Lee, T., and Kim, J., "Airborne Inlets and Instrumentation on Aircraft Platform for Air Quality Observation", *Korean Society for Atmospheric Environment*, **35**(6), 815-830 (2019).
15. Joel R. Kimmel, Delphine K. Farmer, Michael J. Cubison, Donna Sueper, Christian Tanner, Eiko Nemitz, Douglas R. Worsnop, Marc Gonin, and Jimenez, J.L., "Real-time aerosol mass spectrometry with millisecond resolution", *International Journal of Mass Spectrometry*, **303**(1), 15-26 (2011).
16. Park, T., Choi, Y., Choi, Y., 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. E., and Lee, T., "Aircraft Measurements of Physicochemical Evolution of Atmospheric Aerosols in Air Pollution Plumes over a Megacity and Suburban Areas", *Aerosol Air Quality Research*, **20**, 2485-2494 (2020).
17. Korea Meteorological Administration, "Monthly weather report 2020.3.", 11-30 (2020).