

발간등록번호

11-1360620-000122-10

기상업무지원기술개발연구

Research and Development for KMA Weather, Climate, and Earth
system Services

기상항공기 활용기술 개발 연구 (Ⅲ)

Development of Application Technology on Atmospheric Research
Aircraft (Ⅲ)

2019

관측예보연구과



국립기상과학원
National Institute of Meteorological Sciences
Korea Meteorological Administration



연구 보고서

1. 제목: 기상항공기 활용기술 개발 연구 (Ⅲ)

Development of Application Technology on Atmospheric Research Aircraft (Ⅲ)

2. 연구부서: 국립기상과학원 관측예보연구과

3. 연구기간: 2019. 1. 1. ~ 2019. 12. 31.

4. 연구책임자: 김 승 범

5. 참여연구원:

이철규	정승필	고희종	윤종환	홍성은	김지형
양효진					
하종철	차주완	정운선	김경익	채상희	고아름
노용훈	황현준	구정모	김부요		
박영산	류상범	이상삼	유희정	김정은	김수민
이상만	오세호				
변영화	구태영	이선란			

목 차

목 차	i
LIST OF TABLES	iii
LIST OF FIGURES	v
요 약 문	xv
Summary	xvii
약 어	xx
제 1 장 서론	1
제 2 장 항공관측 활용기술 개발	2
제 1 절 구름물리 등 항공관측 기반연구	2
1. 인공증우(설) 항공실험	2
(1) 2019년 6월 27일 사례 (흡습성 시딩실험)	4
(2) 2019년 11월 28일 사례 (빙정핵 시딩실험)	24
제 2 절 위험기상 선행관측 및 관측전략 기반연구	43
1. 기상항공기 드롭존데 관측자료의 수치예측 영향분석	43
(1) 실험설계 및 분석방법	43
(2) 집중호우 사례	46
(3) 태풍 사례	49
(4) 요약	53
2. 기상항공기 관측자료 품질관리 기술 개발 및 운영관리시스템 개선	54
(1) 품질관리 기술 개발	54
(2) 운영관리시스템 개선	59
(3) 보안자료 전송기능 구현	61
3. 대기-해양 상호작용이 대설에 미치는 영향	62

(1) 드롭존데 관측 및 자료분석 방법	62
(2) 분석결과	63
제 3 절 대기 상층 공기질 감시와 기후영향 분석	68
1. 서해상 에어로졸 특성분석	69
(1) 2019년 4월 19일 비행	69
(2) 2019년 5월 8일 비행	75
(3) 2019년 5월 22일 비행	82
2. 반응가스 최적 항공관측기법 개발	89
(1) 인렛 및 펌프 등 관측장비 개선	89
(2) 관측장비 개선 결과 - 10월 31일 사례	95
3. 항공기를 이용한 대기질 관측장비 교정 및 분석기술 개발	97
(1) 지상관측 결과와 비교를 통한 SP2 자료 신뢰도 검증	97
(2) 서해상 BC 수농도, 질량농도 분포 관측자료 산출	100
제 4 절 연직 이산화탄소와 메탄에 대한 항공·위성·모델의 종합 비교 분석	102
1. 온실가스 (CO ₂ , CH ₄)의 항공관측 방법	102
(1) 온실가스 관측 방법	102
(2) 관측 자료의 정확성 분석 결과	105
(3) 비행관측 임무 개요	108
2. 온실가스의 연직분포 관측 연구	111
(1) 월별 연직분포 특성 분석	111
(2) 연직 고농도 사례 분석	112
3. 온실가스의 수평분포 관측 연구	117
(1) 시공간 분포 특성 분석	117
(2) 전지구 배경농도와의 비교	119
제 3 장 요약 및 결론	121
참고 문헌	123

LIST OF TABLES

Table 2.1.1. Results of weather modification experiment by atmospheric research aircraft in 2019.	3
Table 2.1.2. Mean and standard deviation for observation sections.	7
Table 2.1.3. Average and increase in total number concentration for each observation section at the seeding level (2.1 km, left) and 2.3 km (right). (unit, CDP: cm^{-3})	19
Table 2.1.4. Mean and standard deviation for observation sections	26
Table 2.1.5. Average and increase in total number concentration for each observation section (unit, CDP: cm^{-3} , CIP&PIP: L^{-1}).	38
Table 2.2.1. List of dropsonde observation cases in 2019.	45
Table 2.2.2. Verification indices for dropsonde data assimilation.	45
Table 2.2.3. Verification result of dropsonde data assimilation and improvement rate for heavy rain and typhoon cases.	53
Table 2.3.1. Summary of the flights.	68
Table 2.3.2. Summary in improvement activities.	89
Table 2.3.3. Summary in modified orifice with diameter index.	90
Table 2.3.4. Guide for sample chamber pressure under const. 800 hPa inlet.	92
Table 2.3.5. Summary of aerosol measurements conducted at Korea University in Anam-dong, Seoul during 29 July, 2019 ~ 9 August, 2019.	98
Table 2.3.6. Meteorological factors (temperature, relative humidity, wind speed, pressure) and flow average, standard deviations, and minimum values of SP2.	100
Table 2.3.7. Aerosol concentration from aircraft observation.	101
Table 2.4.1. The total uncertainty of KMA aircraft based CO_2 , CH_4 and CO measurements for 2019.	108
Table 2.4.2. KMA Kingair campaign flight details for 2019. The maximum and	

minimum temperature, CO₂, CH₄ levels observed during flight are shown. 110

Table 2.4.3. The aircraft measurements of CO₂ and CH₄ mean concentrations below 2 km and above 3 km, respectively, and comparison to Global Marine boundary layer(MBL) levels from NOAA. 112

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1.1. Pictures of clouds (left) and burning CaCl ₂ flares (right) seen from 6,500 ft with the aircraft (King-air 350).	4
Fig. 2.1.2. Total flight path (top) and observation altitude (bottom). B (red), b (sky blue)/ s (pink)/ a (blue), A (yellow) are the observation sections for before, during and after the seeding material. _S1-S2: seeding line, OB1-OB2: observation line, ODO: O-dae Mt., CPO: Cloud physics, YPO: Yongpyong, JBO: Jinbu, BWO: Barwang Mt., and DRO: Daegi-ri Observatory)	6
Fig. 2.1.3. Time series (left) and vertical distribution (right, mean and standard deviation) of temperature, wind speed, wind direction, and vertical velocity observed with AIMMS-20 and liquid water content from CDP.	8
Fig. 2.1.4. The averaged variations of SST (a) Normal cases, (b) East region cases, and (c) South region cases The accumulated CaCl ₂ number concentration (unit: # m ⁻³) for the seeded simulation from the surface to model top on 27 June 2019. The vector represents the wind field at the seeding heights(2 km). Red line is seeding line and red points is observation site.	10
Fig. 2.1.5. The time series of accumulated CaCl ₂ number concentration (unit: # m ⁻³) for the seeded simulation from the surface to model top at YWJC AWS site.	11
Fig. 2.1.6. The vertical cross section of accumulated CaCl ₂ number concentration (unit: # m ⁻³) and temperature for the seeded simulation from the surface to 4 km.	11
Fig. 2.1.7. Surface and 850 hPa weather chart issued at 0000 UTC 27 June, 2019(red box: Korean Peninsula).	12

Fig. 2.1.8. The cloud top height and temperature, cloud type(ISCCP), cloud phase, and cloud optical thickness observed by COMS(gray line: flight path).	14
Fig. 2.1.9. Reflectivity images (PPI 0.8) of Gwangdeoksan radar (Green circle: CPOS, Balck box: Seeding line, PPI elevation of CPOS: 2.0 km).	15
Fig. 2.1.10. Time series of Gwangdeoksan radar reflectivity (PPI 0.8) and radar precipitation in YWJC.	16
Fig. 2.1.11. Scatter plots of total number concentration (top), effective diameter (middle), vertical velocity (bottom) according to liquid water content calculated by CDP at the seeding level (2.1 km, left) and 2.3 km (right).	18
Fig. 2.1.12. Average particle size distribution observed by CDP at the seeding level (2.1 km, left) and 2.3 km (right).	19
Fig. 2.1.13. Altitude reflectivity in micro rain radar and number of particle and average particle diameter in Parsivel2 from CPOS.	20
Fig. 2.1.14. Rainfall detection and hour precipitation in AWS(CPC).	21
Fig. 2.1.15. Rainfall detection and hour precipitation in AWS(YWJC).	22
Fig. 2.1.16. Differences between the accumulated SEED and NOSEED precipitation (unit: mm) from seeding start time on 27 June 2019. Black line is seeding path.	23
Fig. 2.1.17. Pictures of clouds (left) and burning AgI flares (right) seen from 6,500 ft with the aircraft (King-air 350).	24
Fig. 2.1.18. Total flight path (top) and observation altitude (bottom). The sky blue (b), pink (S) and blue (a) lines mean observation paths on the before, during and after seeding (ODO: O-dae Mt., CPO: Cloud physics, YPO: Yongpyong, JBO: Jinbu, BWO: Barwang Mt., and DRO: Daegi-ri Observatory).	25
Fig. 2.1.19. Time series (left) and vertical distribution (right, mean and standard deviation) of temperature, wind speed, wind direction, and vertical	

velocity observed with AIMMS-20 and liquid water content from CDP.	27
Fig. 2.1.20. The accumulated AgI number concentration (unit: # m ⁻³) for the seeded simulation from the surface to model top on 28 November 2019. The vector represents the wind field at the seeding heights. Red line is seeding line and red points is observation site.	28
Fig. 2.1.21. Surface and 850 hPa weather chart issued at 0000 UTC 28 November, 2019(red box: Korean Peninsula).	29
Fig. 2.1.22. The cloud top height and temperature, cloud type(ISCCP), cloud phase, and cloud optical thickness observed by COMS(gray line: flight path).	31
Fig. 2.1.23. The time series of the cloud top height(red) and cloud base height(bottom of green box), cloud thickness(green box), observation altitude of the aircraft(black), liquid water path(blue), cloud phase (W: water), and cloud type(Cs: cirrostratus, Sc: stratocumulus).	33
Fig. 2.1.24. Reflectivity images (1.95 km CAPPI) of Gwangdeoksan radar (Red box: Seeding line and near target area).	34
Fig. 2.1.25. Time series of Gwangdeoksan radar reflectivity (1.95 km CAPPI) and radar precipitation in the ODO and GNG.	35
Fig. 2.1.26. Scatter plots of effective diameter (top) and total number concentration (bottom) calculated by CDP according to temperature (left) and vertical velocity (right). Before, during and after seeding are indicated by sky blue, pink and blue dots, respectively.	37
Fig. 2.1.27. Average particle size distribution from CDP (left, solid line), CIP (right, solid line) and PIP (right, dotted line).	38
Fig. 2.1.28. Altitude reflectivity in micro rain radar and liquid water content from CPOS, CPC, DRO, ODO.	39
Fig. 2.1.29. Number of particle and average particle diameter in Parsivel2 in CPOS, CPC, DRO, ODO.	40

Fig. 2.1.30. Hour precipitation in CPOS and 5 point.	41
Fig. 2.1.31. Differences between the accumulated SEED and NOSEED precipitation (unit: mm) from seeding start time on 28 November 2019. Black line is seeding path.	42
Fig. 2.2.1. Numerical model configuration and domain for dropsonde data assimilation experiment.	44
Fig. 2.2.2. Increment fields of numerical model simulation at initial time according to dropsonde data assimilation at 26 Jun 2019 heavy rain case.	46
Fig. 2.2.3. Distributions of precipitation amount estimated by AWS observation data(left), numerical model output(middle), and those difference between EXP and CTL for three rainfall cases as RN-1, RN-2, and RN-3.	47
Fig. 2.2.4. Same as Fig. 2.2.3 except for three rainfall cases as RN-4, RN-5, and RN-6.	48
Fig. 2.2.5. Averaged values of verification for numerical model data assimilation experiments as CTL(without dropsonde) and EXP(with dropsonde).	49
Fig. 2.2.6. Increment fields of numerical model simulation at initial time according to dropsonde data assimilation at 6 Aug 2019 typhoon (8th FRANCISCO) case.	50
Fig. 2.2.7. Distributions of precipitation amount estimated by AWS observation data(left), numerical model output(middle), and those difference between EXP and CTL for three rainfall cases as TP-1, TP-2, and TP-3.	51
Fig. 2.2.8. Same as Fig. 2.2.7 except for three rainfall cases as TP-4, TP-5, and TP-6.	52
Fig. 2.2.9. Same as Fig. 2.2.5 except for Typhoon cases	53
Fig. 2.2.10. Atmospheric research aircraft observation data process.	54
Fig. 2.2.11. Quality control flowchart for (a) dropsonde and (b) GVR.	55
Fig. 2.2.12. Same as Fig. 2.2.11 except for CIP and Nephelometer.	56
Fig. 2.2.13. Example of manual quality control process using atmospheric research aircraft operation and management system.	58

Fig. 2.2.14. Before and after skew T log P diagram in atmospheric research aircraft operation and management system: (a) ASPEN output and (b) KMA format.	59
Fig. 2.2.15. Before and after sea surface wind speed of SFMR in atmospheric research aircraft operation and management system.	60
Fig. 2.2.16. Vertical distribution of moisture flux(Q) using dropsonde data during winter season 2018.	63
Fig. 2.2.17. Temporal variation of integrated water vapor transport during winter season 2108.	64
Fig. 2.2.18. Vertical distribution of moisture flux(Q) for snowfall cases.	65
Fig. 2.2.19. Variations of moisture flux(Q) for snowfall cases.	66
Fig. 2.3.1. Aerosol light scattering coefficient distribution ((A) stereoscopic fight route, (B) plane fight route) and aerosol total concentration ((C) stereoscopic fight route, (D) plane fight route) for aircraft route on April 19.	71
Fig. 2.3.2. Mass concentration of meteorological aircraft-observed ship-Anmyeondo observatory over aircraft observation time (April 19, 2019).	72
Fig. 2.3.3. Particle size distribution of meteorological aircraft-observed ship-Anmyeondo observatory over aircraft observation time (April 19, 2019).	73
Fig. 2.3.4. Aerosol light scattering coefficient of meteorological aircraft-observed ship-Anmyeondo observatory over aircraft observation time (April 19, 2019).	74
Fig. 2.3.5. Comparison of PM _{2.5} mass concentrations as measured by Sky-OPC mounted on meteorological aircraft on the west sea on April 19, 2019 and PM _{2.5} concentrations of ADAM3.	75
Fig. 2.3.6. Aerosol light scattering coefficient distribution ((A) stereoscopic fight route, (B) plane fight route) and aerosol total concentration ((C) stereoscopic fight route, (D) plane fight route) for aircraft route on May 8.	78

Fig. 2.3.7. Mass concentration of meteorological aircraft-observed ship-Anmyeondo observatory over aircraft observation time (May 8, 2019).	79
Fig. 2.3.8. Particle size distribution of meteorological aircraft-observed ship-Anmyeondo observatory over aircraft observation time (May 8, 2019).	80
Fig. 2.3.9. Aerosol light scattering coefficient of meteorological aircraft-observed ship-Anmyeondo observatory over aircraft observation time (May 8, 2019).	81
Fig. 2.3.10. Comparison of PM _{2.5} mass concentrations as measured by Sky-OPC mounted on meteorological aircraft on the west sea on May 8, 2019 and PM _{2.5} concentrations of ADAM3.	82
Fig. 2.3.11. Aerosol light scattering coefficient distribution ((A) stereoscopic fight route, (B) plane fight route) and aerosol total concentration ((C) stereoscopic fight route, (D) plane fight route) for aircraft route on May 22.	84
Fig. 2.3.12. Mass concentration of meteorological aircraft-observed ship-Anmyeondo observatory over aircraft observation time (May 22, 2019).	85
Fig. 2.3.13. Particle size distribution of meteorological aircraft-observed ship-Anmyeondo observatory over aircraft observation time (May 22, 2019).	86
Fig. 2.3.14. Aerosol light scattering coefficient of meteorological aircraft-observed ship-Anmyeondo observatory over aircraft observation time (May 22, 2019).	87
Fig. 2.3.15. Comparison of PM _{2.5} mass concentrations as measured by Sky-OPC mounted on meteorological aircraft on the west sea on May 22, 2019 and PM _{2.5} concentrations of ADAM3.	88
Fig. 2.3.16. Pressure regulation equipment (a) Front panel (① Absolute pressure display, ② Bypass flow display, ③ Inlet flow metering valve, ④ Power switch), (b) Rear panel (⑤ Manifold to instrument, ⑥ Inlet, ⑦ Bypass pump, ⑧ RS485 Communication, ⑨ Power plug), (c) Internal structure, (d) Connection & configuration.	91

Fig. 2.3.17. Sample chamber pressure measured on Oct 1, 2019 (a) in case of O ₃ , SO ₂ , NO _x analyzer, (b) in case of NO _y analyzer.	92
Fig. 2.3.18. External converter for NO _y analyzer and replacement parts (a) Exchanged parts in external converter(⊖, ⊕) 및 Re-fitting position(⊗), (b) Part for ⊖, (c) Part for ⊕.	93
Fig. 2.3.19. Organized NO _y analyzer for the air-plane and schematic drawing for external equipment for NO _y analyzer (a) Aircraft rack configuration (① External converter, ② External sampling equipment, ③ NO _y analyzer), (b) Internal configuration of external equipment for NO _y analyzer and positions(⊖, ⊕, ⊗) for replacement parts.	93
Fig. 2.3.20. Connection & configuration for const inlet pressure with 800 hPa on Sep 27, 2019.	94
Fig. 2.3.21. Sample chamber pressure on Oct. 16, 2019 (a) in case of O ₃ , SO ₂ , NO _x analyzer, (b) in case of NO _y analyzer.	94
Fig. 2.3.22. Measuring reactive gases under constant inlet pressure with 800 hPa on Oct 31, 2019 (a) Aircraft observation path, (b) Concentration of reactive gases depending on its altitude.	95
Fig. 2.3.23. Sample chamber pressure under constant inlet pressure with 800 hPa on Oct 31, 2019 (a) in case of O ₃ , SO ₂ , NO _x analyzer, (b) in case of NO _y analyzer.	96
Fig. 2.3.24. Time-series of aerosol concentrations, size and meteorological parameters for the whole measurement period. SP2 data was averaged for 10 minutes, and the others are 1 hours averaged.	98
Fig. 2.3.25. The size distributions of rBC particles. (a) number size distribution, (b) mass size distribution, and (c) a relationship between rBC mass concentration and MMD. In (a) and (b), the data on 5 August 2019 was used for example.	99
Fig. 2.3.26. The relationship of rBC and EC mass concentrations. The data is color coded by OC/EC ratio, and the error bar stands for a standard	

deviation of rBC mass concentrations.	99
Fig. 2.3.27. Time series distribution of rBC. (a) mass concentration, (b) number concentration (1 second, 5 second average, 10 second average, 15 second average, 20 second average from above).	101
Fig. 2.4.1. The external view of KMA Kingair 350 (left) and inlet plate (right).	103
Fig. 2.4.2. Measurement flow chart and laboratory calibration scheme.	104
Fig. 2.4.3. The picture of Nafion membrane tube(24“ length) installed in acrylic box (left), and it filled with chemical dryer of silica gel (right).	105
Fig. 2.4.4. The residuals of CO ₂ and CH ₄ dry mole fractions corrected by Picarro manufacture provided water correction parameter corresponding to NOAA standard gas at mole fraction of 467 ppm for CO ₂ and 2325.4 ppb for CH ₄ with gradually increasing water vapor content from 0.3 to 2.3%.	106
Fig. 2.4.5. The CO ₂ and CH ₄ dry mole fractions of NOAA standard gas at mole fraction of 467 ppm for CO ₂ and 2325.4 ppb for CH ₄ corresponding to simulated flight conditions over the pressure range of 320–1000 hPa.	107
Fig. 2.4.6. Flight designs and typical tracks for CM-01 (left) and CM-02 missions (right).	109
Fig. 2.4.7. The vertical distributions of CO ₂ (left) and CH ₄ (right) for each flight campaign during period of 2018.12–2019.11.	111
Fig. 2.4.8. Vertical descending profiles of CH ₄ near Anmyeon-do on 1 and 15 December, 2018.	113
Fig. 2.4.9. Distribution of CH ₄ and CO profiles colored with CO ₂ measured (a) below PBL height on 1 Dec. and (b) between 500 and 700 hPa heights on 15 Dec. 2018 over AMY and linear fit shown as black line.	116
Fig. 2.4.10. Five days HYSPLIT back-trajectories arrived at AMY (36.53N, 126.33E) at 950 (600 m) and 500hPa (5600 m) heights, respectively	

for (a) 1 and (b) 15 December, 2018. The numbers mark position and time of the particles before arrival at AMY. 116

Fig. 2.4.11. The colored bar chart of horizontal transection measurements of ΔCO_2 (left), ΔCH_4 (right) at 15 May and 4 July along with Kimpo-Juju commercial airline route. 117

Fig. 2.4.12. The spatio-temporal distributions of CO_2 (left) and CH_4 (right) observed based on Kingair 350 along with Kimp-Juju commercial airline route between 0.6-2 km altitude. 118

Fig. 2.4.13. The monthly box plot (left) of CO_2 and CH_4 observed based on Kingair 350 along with Kimpo-Juju commercial airline route between 0.6-1.5km altitude and difference value (right) with monthly MBL global baseline levels. 119

요 약 문

I. 제목

관측기술 지원 및 활용 연구 - 기상항공기 활용기술 개발 (Ⅲ)

II. 연구의 필요성

- 해상 및 상층 관측 자료의 절대적 부족으로 기상현상에 대한 정확한 이해와 수치모델 성능 향상 제한
- 황사, 에어로졸 등 환경기상 정보에 대한 국민적 관심 증대에 따른 3차원 입체관측과 예측모델 개선 요구
- 연속적이고 정밀한 온실가스 관측 필요성 증대에 따른 항공관측기술 확보 필요
- 수자원 확보를 위한 기상조절 실용화 기술력의 확보 시급
- 기상항공기를 이용한 위험기상 선행관측, 환경기상 감시, 온실가스 감시, 구름물리 관측 및 기상조절 실험 역량 향상 필요

III. 연구개발 목표

- 기상항공기를 활용한 위험기상 선행관측, 환경기상 감시, 온실가스 감시, 구름물리·기상조절 관측기법 개발 및 연구수행

IV. 연구 내용 및 결과

- 가. 구름물리 등 항공관측 기반연구
 - 인공증우·증설 실험 및 구름물리 변화 관측 수행
 - 선진기술 확보를 위한 국제공동 연구
- 나. 위험기상 선행관측 및 관측전략 기반연구
 - 기상항공기 드롭존데 관측자료의 수치예측 영향분석
 - 기상항공기 관측자료 품질관리 기술 개발 및 운영관리시스템 개선

- 대기-해양 상호작용이 대설에 미치는 영향 분석
- 다. 대기 상층 공기질 감시와 기후영향 분석
 - 에어로졸 및 반응가스 최적 항공관측기법 개발
 - 서해상 대기관측을 통한 에어로졸 및 반응가스 관측자료 검증
- 라. 연직 이산화탄소와 메탄에 대한 항공·위성·모델의 종합 비교 분석
 - 항공관측자료 정확성 확보를 위한 관측 전략 및 시스템 개선
 - 안면도에서 온실가스의 연직관측 및 연직분포 특성 분석
 - 한국 내륙지역에서의 저고도 수평 관측 수행 및 특성 분석

V. 기대 효과 및 활용 방안

- 구름물리 등 항공관측 기반연구
 - 인공강우 실험 및 검증 기술 강화를 통한 가뭄 등 국가적 이슈 대응
 - 구름응결핵·구름입자 크기/농도 연직분포 산출로 현업예측모델 개선기반 자료 구축
- 위험기상 선행관측 및 관측전략 기반연구
 - 기상항공 드롭존데 관측자료 자료동화하여 현업예보 강수 예측성 향상
 - 기상항공기 관측자료 품질관리 기술 적용 및 활용 기반 구축
- 대기 상층 공기질 감시와 기후영향 분석
 - 서해상 에어로졸의 물리·광학적 특성과 생성·이동·소멸 메커니즘 연구 및 장거리 이동 오염물질의 특성 분석
 - 황사·연무통합예측모델 및 위성 에어로졸 산출물의 검증
- 연직 이산화탄소와 메탄에 대한 항공·위성·모델의 종합 비교 분석
 - 온실가스의 고해상도 항공관측자료 생산을 통한 지상·위성 자료 검증 지원
 - 한국에서의 CO₂ 와 CH₄ 시·공간분포 특성에 대한 과학적인 정보 제공

Summary

I. Title

- Development and Application of Technology for Atmospheric Observation
– Development of Application Technology on Atmospheric Research Aircraft (III)

II. Introduction - Needs for the Research

- The lack of observations in the atmospheric vertical structure leads to the limited improvement of predictability of numerical models and difficulty in precise understanding of weather phenomena.
- Needs for improvement of forecast model and integrated observation as the increasing interest of public for the environmental meteorological phenomena such as aerosols and Asian Dusts
- Need to secure accurate and in-situ aircraft observation technique due to the continuous increasing of greenhouse gases,
- Needs for the preceding observation of severe weather, monitoring of environmental meteorology, and improvement of the capability of weather modification experiments using the atmospheric research aircraft.

III. Objectives

- Research on the cloud, aerosol, greenhouse gas and high impact weather using the KMA research aircraft

IV. Results

- A. Aircraft observations of cloud physics research
 - Weather modification experiments (artificial rainfall and snowfall) and cloud physics observation

- International joint research for advanced weather modification technique
- B. Preceding observation of severe weather
 - Analysis of data assimilation effect using aircraft dropsonde data
 - Development of aircraft data quality control technology and improvement of operation and management system
 - Analysis of interaction between atmosphere and ocean for heavy snowfall phenomena
- C. Air quality monitoring and its climate impact analysis in upper troposphere
 - Development of optimal air observation techniques for aerosol and reactive gases
 - Verification of observation data of aerosol and reactive gas through analysis of aerosol characteristics over the Yellow Sea
- D. In-situ aircraft observations of main greenhouse gases (CO₂ and CH₄)
 - Evaluation of aircraft measurements system for obtaining high quality data
 - Analysis of vertical/horizontal distribution of GHGs at Anmyeondo and Western land region in Korea.

V. Expected Impacts and Applications

- Aircraft observations of cloud physics research
 - Response to the national issues about improvement of cloud seeding and its technique
 - Assistance of numerical model by vertical properties of cloud condensation nuclei and cloud droplet
- Preceding observation of severe weather
 - Improvement of predictability for severe weather using aircraft dropsonde data assimilation
 - Application of data quality control technology and development of aircraft observation data utilization system

- Air quality monitoring and its climate impact analysis in upper troposphere
 - Study on the physical and optical properties and formation, transport, and extinction mechanisms of aerosols in Yellow Sea and characterization of long-range transport of air pollutants
 - Verification of Asian dust and haze prediction model and satellite aerosol outputs
- In-situ airborne observations of main greenhouse gases (GHGs)
 - Verification of ground and satellite greenhouse gas data using the high-resolution aircraft measurements data.
 - Providing scientific informations on the spatio-temporal distribution of CO₂ and CH₄ over Korea

약 어

ADPAA	항공관측 자료처리 프로그램	Airborne Data Processing and Analysis
ADAM	황사·연무통합예측모델	Asian Dust and Haze Model
AIMMS-20	항공자료조사시스템	Aircraft Integrated Meteorological Measuring System-20
ARCTAS	Arctic의 대류권에서의 항공·위성 관측 연구 캠페인	NASA Arctic Research of Composition of the Troposphere from Aircraft and Satellite
BC	탄소 에어로졸	Black Carbon
CalNex	캘리포니아 대기질과 기후변화의 융합 연구 항공 캠페인	California Research at the Nexus of Air Quality and Climate Change
CCP	구름 입자 통합 측정기	Cloud Combination Probe
CDP	구름 입자 측정기	Cloud Droplet Probe
CIP	구름 영상 측정기	Cloud Imaging Probe
CRDS	공동감쇠분광기	Cavity Ring-Down Spectroscopy
GVR	G-밴드 수증기 라디오미터	G-band Water Vapor Radiometer
LWC	액체수함량 측정 센서	Hot-wire Liquid Water Content Sensor
M300	자료 수집·표출 시스템	Model 300 Data Acquisition System
MFC	자동유량조절기	Mass Flow Controller
Neph	광산란 계수측정기	Nephelometer
PIP	강수 입자 측정기	Precipitation Imaging Probe
SFMR	해상풍 측정 마이크로웨이브 복사계	Stepped Frequency Microwave Radiometer
Sky-OPC	광학 입자계수기	Sky-Optical Particle Counter
SP2	탄소입자분석기	Single Particle Soot Photometer
TWC	총수함량	Total Water Content
WCM-2000	수함량 측정기	Multi-Element Water Content system

제 1 장 서론

국립기상과학원은 기상항공기 나라(NARA)¹⁾의 효율적인 운영과 연구업무 수행을 위하여 다음과 같은 주요임무 지정하였다. ①구름물리 관측 및 기상조절 실험(응용기상연구과), ②위험기상 선행관측(관측예보연구과), ③환경기상 감시(환경기상연구과), ④온실가스 감시(기후연구과). 또한, 관측예보연구과는 기상항공기 운영 총괄부서로서, 항공기의 운항, 관측 장비의 관리, 관측자료의 처리 및 품질관리 등을 담당한다. 본 보고서에서는 각 부서의 임무별 연구결과를 기술하였다.

지난 2018년이 기상항공기의 실제적 활용이 이루어진 해라면, 2019년은 본격적인 연구수행을 위한 기반을 마련한 해이다. 2018년 관측을 수행하면서 습득한 노하우와 교정 기술 등을 반영하여, 2019년에 연구업무를 관측전략을 개선하여 수행하였다. 응용기상연구과는 2019년 한 해 동안 15회의 구름물리 관측 및 기상조절 실험, 5회의 구름관측과 2회의 기상위성 자료처리 알고리즘 검증을 수행하였다. 특히, 겨울철에는 미국 기상조절 전문가와의 국제공동 기상조절실험을 수행하였다. 관측예보연구과는 집중호우, 태풍과 같은 위험기상 현상에 대한 드롭존데 관측자료의 수치예측 영향을 분석하였고, 대설 관측자료를 이용하여 대기-해양 상호작용에 관해 연구하였다. 또한, 품질관리 기술의 개발 및 운영관리시스템을 개선하여 고품질의 자료를 취득 및 제공하기 위해 노력하였다.

환경기상연구과는 서해상에서 에어로졸 특성 분석을 수행하였으며, 관측장비의 관측환경을 최적화하기 위하여, 반응가스의 흡입구(Inlet)에 정압장치를 설치하고 외장펌프를 활용하는 방법을 시험하였다. 기후연구과는 관측자료의 정확성 확보를 위해 관측전략 및 시스템을 개선하였고, 안면도 부근의 온실가스 연직분포와 김포-제주 항로의 수평분포 특성을 조사하였다. 각각의 임무를 통해 취득된 3차원 입체관측 자료는 기존 관측 공백 지역을 메꾸는 새로운 자료로서, 기상 현상에 대한 이해뿐만 아니라, 수치모델·원격탐사자료의 검증자료로 활용될 수 있다. 향후, 누적될 기상항공기 관측자료는 다양한 기상연구의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

1) 기상항공기 공식 명칭: 나라(NARA), KMA/NIMS Atmospheric Research Aircraft
※ 나라(날아) 발음으로 국가기관 항공기로 하늘 높이 비상함을 상징

제 2 장 항공관측 활용기술 개발

기상항공기는 구름물리 관측 및 기상조절 실험, 위험기상 선행관측, 환경기상 감시, 온실가스 감시의 4가지 주요임무를 수행하였다. 각 절에서는 2019년의 각 임무에 따른 주요 연구결과를 기술하였다.

제 1 절 구름물리 등 항공관측 기반연구

1. 인공증우(설) 항공실험

기상항공기에는 구름응결핵계수기, 광학입자계수기, 구름입자측정기, 강수입자측정기, 수함량측정기, 항공카메라, 항공자료조사시스템 등이 탑재되어 있다. 이러한 장비를 이용하여 기상조절 실험을 통한 구름물리 분석을 수행하였다. 2019년 구름물리 관측 및 기상조절 실험은 총 15회로, 다양한 구름에 대해 실험이 수행되었다. 대상지역은 강원도 및 서해상을 대상으로 기상조절 실험을 수행했으며, 특히 대관령지역은 구름물리 관측망 6개소(대관령 구름물리선도센터, 대관령 구름물리관측소, 용평관측소, 오대산관측소, 진부관측소, 대기리관측소)를 운영하여 구름물리 검증을 위해 주 실험지역으로 활용하였다. 시딩물질은 염화칼슘(CaCl_2)과 요오드화은(AgI) 연소탄을 이용하여 실험을 수행하였다. Table 2.1.1은 2019년도 기상항공기 기상조절 실험을 나타내었다. 본 보고서에서는 2019년 6월 27일 흡습성 시딩실험과 2019년 11월 28일 빙정핵 시딩실험 결과를 자세히 설명한다.

Table 2.1.1. Results of Weather modification experiments by atmospheric research aircraft in 2019.

번호	날 짜	지 역	연소물질	실험고도 (km)
1	2019. 1. 25.	서해상	요오드화은	1.5
2	2019. 04. 10.	강원도 일대	요오드화은	2.7
3	2019. 06. 27.	강원도 일대	염화칼슘	2.0
4	2019. 06. 28.	강원도 일대	염화칼슘	2.5
5	2019. 08. 27.	서해상	염화칼슘	0.6~0.9
6	2019. 10. 24.	강원도 일대	요오드화은	4.6~4.8
7	2019. 11. 24.	서해안	요오드화은	2.5~3.1
8	2019. 11. 25.	강원도 일대	요오드화은	1.9
9	2019. 11. 28.	강원도 일대	요오드화은	1.9
10	2019. 12. 01.	서해안	요오드화은	1.9
11	2019. 12. 02.	서해안	요오드화은	1.2
12	2019. 12. 03.	서해안	요오드화은	1.6
13	2019. 12. 07.	서해안	요오드화은	1.48
14	2019. 12. 17.	서해안	염화칼슘	0.9
15	2019. 12. 18.	강원도 일대	요오드화은	1.2

(1) 2019년 6월 27일 사례 (흡습성 시딩실험)

1) 실험 정보

2019년 6월 27일 강원도 평창군 일대에서 인공증우 항공실험을 수행하였다. 이 사례는 북풍계 시스템에 의한 구름을 대상으로 풍상측 직선시딩과 풍하측 직선관측을 수행하였다. 구름에 응결핵(시딩물질, CaCl_2 연소탄) 제공을 위해 2발씩 총 24발 (4.32 kg)을 살포하였다. Fig. 2.1.1은 6,500 ft 고도에서 시딩 전에 관측된 구름(북강릉 목측: 난층운) 상태와 시딩 하는 중의 모습이다.



Fig. 2.1.1. Pictures of clouds (left) and burning CaCl_2 flares (right) seen from 6,500 ft with the aircraft (King-air 350).

대관령 상공에서 비행경로 및 고도를 Fig. 2.1.2에 나타내었다. 하늘색, 분홍색, 파란색 구간은 각각 시딩 전, 중, 후의 시딩고도와 동일한 고도의 관측구간을 의미하며, 빨간색과 노란색 구간은 시딩 전과 후의 시딩고도로부터 약 160 m 더 높은 고도에서 관측구간을 의미한다. 시딩물질은 풍상측 S1-S2 라인으로 약 2.1 km 고도에 10시 38분부터 11시 22분까지 약 44분 동안 살포하였다. 구름 및 시딩효과 검증 관측은 시딩 전 풍상측(S1-S2; B, b) 지역을 9시 28분부터 9시 38분까지 10분 동안 관측하였고, 시딩 후에 풍하측(OB1-OB2; a, A)지역을 10시 22분부터 10시 44분까지 22분 동안 관측하였다. 이때 관측한 고도는 시딩 전과 후에 각각 2개 고도씩(약 2.3 km, 약 2.1 km) 관측하였다.

각 구간별 기온, 풍향, 풍속, 연직속도, 액체수함량의 평균 및 표준편차를 Table 2.1.2에, 시계열을 Fig. 2.1.3에 나타내었다. 시딩고도(약 2.1 km)의 평균 기온은 약 11 °C으로 풍상측(b, s)과 풍하측(a)이 유사하였다. 한편, 약 2.3 km 고도는 풍상측(B, 14 °C) 대비 풍하측(A, 약 11 °C)의 평균 기온이 약 3 °C 더 낮았다. 풍상·하측 지역 두 고도의 풍속은 약 3 ms⁻¹으로 약하고, 풍향은 서풍이 관측되었다. 시딩고도의 평균 액체수함량은 시딩 전(b) 0.28 (±0.17) gm⁻³에서 시딩 중(s) 0.70 (±0.64) gm⁻³, 시딩 후(a) 0.58 (±0.32) gm⁻³로 시딩 전과 비교해 증가하였다. 2.3 km 고도에서는 풍상측(B, 0.46 gm⁻³) 대비 풍하측(A, 0.81 gm⁻³)에서 약 0.3 gm⁻³ 더 증가하였다. 여기서 액체수함량은 CDP로부터 산출한 값이며, 액체수함량이 0.01 gm⁻³ 이상인 구간만을 구름으로 간주해 평균하였다. 연직바람은 두 고도에서 평균 -0.3~-0.5 ms⁻¹로 약한 하강기류가 관측되었다.

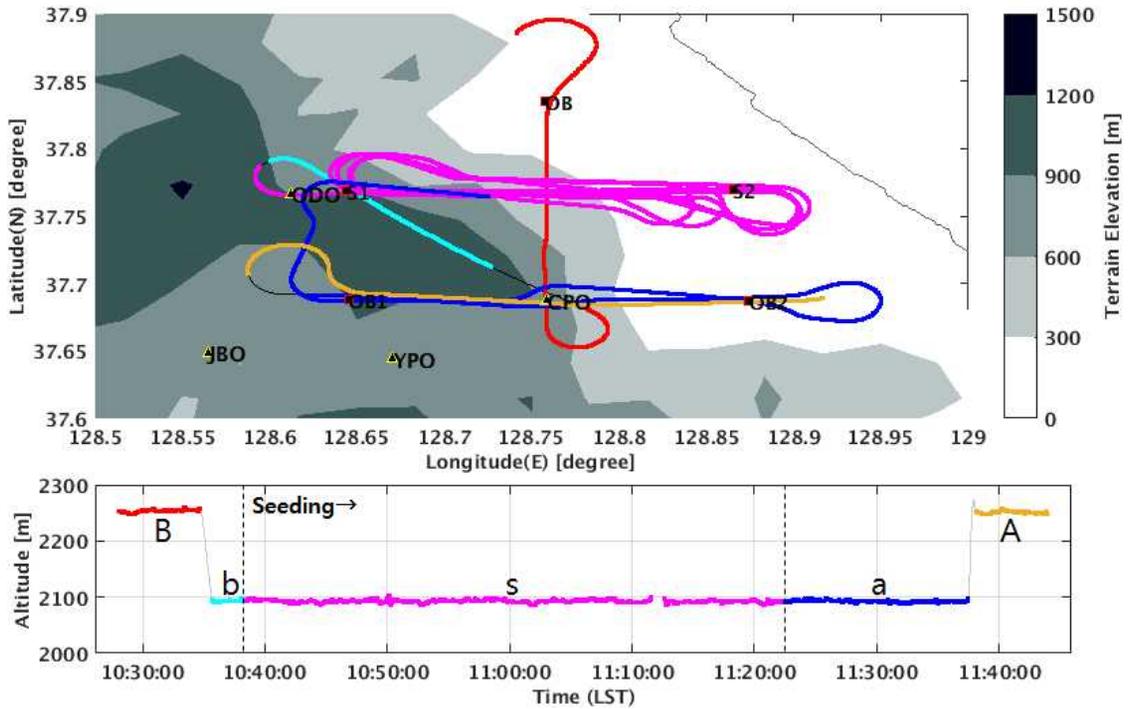


Fig. 2.1.2. Total flight path (top) and observation altitude (bottom). B (red), b (sky blue)/ s (pink)/ a (blue), A (yellow) are the observation sections for before, during and after the seeding material. (S1-S2: seeding line, OB1-OB2: observation line, ODO: O-dae Mt., CPO: Cloud physics, YPO: Yongpyong, JBO: Jinbu, BWO: Barwang Mt., and DRO: Daegi-ri Observatory)

Table 2.1.2. Mean and standard deviation for observation sections.

Variable	Before seeding		During seeding, S	After seeding	
	B	b		a	A
Altitude (m)	2,254 (± 3)	2,093 (± 2)	2,093 (± 2)	2,093 (± 2)	2,251 (± 2)
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	14.1 (± 0.2)	11.6 (± 0.6)	11.4 (± 0.7)	11.3 (± 0.1)	10.5 (± 0.5)
Wind speed (m s^{-1})	2.5 (± 0.7)	2.6 (± 0.6)	2.8 (± 0.8)	2.6 (± 0.8)	2.8 (± 0.7)
Wind direction ($^{\circ}$)	267 (± 27)	246 (± 25)	274 (± 53)	269 (± 35)	274 (± 31)
Vertical velocity (m s^{-1})	-0.5 (± 0.4)	-0.3 (± 0.4)	-0.4 (± 0.4)	-0.3 (± 0.4)	-0.4 (± 0.4)
Liquid water content (g m^{-3})	0.46 (± 0.41)	0.28 (± 0.17)	0.70 (± 0.64)	0.58 (± 0.32)	0.81 (± 0.54)

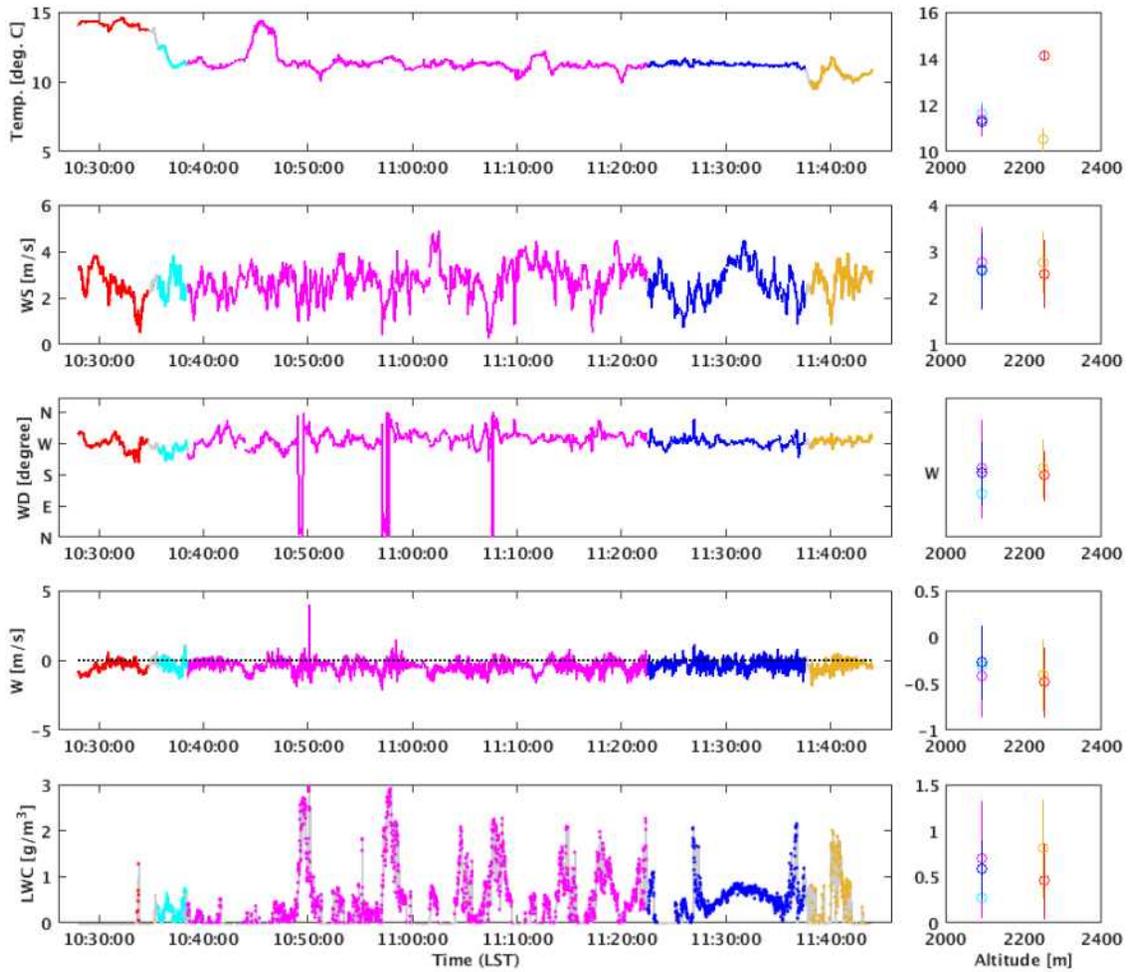


Fig. 2.1.3. Time series (left) and vertical distribution (right, mean and standard deviation) of temperature, wind speed, wind direction, and vertical velocity observed with AIMMS-20 and liquid water content from CDP.

2) 시딩물질 확산 모의

빙정핵 시딩 물질인 요오드화은(AgI)와 흡습성 시딩물질인 염화칼슘(CaCl_2)에 대한 인공증우(설) 효과를 모의하기 위해서 WRF V3.8 기반의 인공증우(설) 통합모델을 사용하였다. 본 모델은 구름미세물리방안(Morrison, 2009)에 AgI와 CaCl_2 의 수농도와 질량농도를 예단하고, 시딩물질 살포로 인해 시딩효과를 모의할 수 있도록 모수화되었다. 요오드화은의 크기분포는 Meyer et al. (1995)에서 제시된 크기분포를 사용하였으며 과냉각 상태로 존재하는 구름물입자에 요오드화은이 주입되면서 냉각되어 빙정이 생성되는 접촉핵형성(contact nucleation)과 과냉각상태에서 구름입자가 생성됨과 동시에 냉각이 발생하여 빙정으로 생성되는 응결핵형성(condensation freezing), 수증기가 빙정핵 표면에 직접으로 침착하여 승화에 의해서 빙정이 생성되는 침적핵형성(deposition nucleation)과정이 고려되어 있다. 또한 Morrison 스킴(two-moment) 안에 Bruintjes et al. (2012)에서 제시한 흡습성 시딩물질인 CaCl_2 의 입자크기분포를 적용하였으며 과포화(super-saturation)에 의해 생성되는 구름을 계산하는 과정인 activation과 Mechem and Kogan(2008)에서 제안한 흡습성물질의 직경이 $10\ \mu\text{m}$ 보다 큰입자에 대해서만 선택적으로 autoconversion (구름방울이 빗방울로 전환) 되는 과정을 고려하여 증우효과를 구현하였다. 입력장과 경계장은 기상청 현업 국지예보 모델(UM LDAPS0 분석장(수평해상도 $1.5\ \text{km}$, 3시간 간격)을 사용하였다. 모델 도메인 영역은 강원도지역을 중심으로 설정하였으며, $1\ \text{km}$ 해상도로 단일 도메인으로 설정하였다. 또한 도메인 크기는 동서방향 격자는 총 180개, 남북방향 격자는 140개, 연직방향으로는 40개층을 설정하였다. 이 중 연직개층은 $1\sim 3\ \text{km}$ 까지는 약 100m 단위로 모델면을 설정하고 수치모의 하였다. 그 이유는 시딩고도에 해당하는 고도에서 수치모의를 더 현실적으로 수행하기 위해서이다. 주요 물리방안은 YSU(Hong et al., 2006) 대기경계층 방안, Noah(Chen and Dudhia, 2001) 지면모델, RRTM(Mlawer et al., 1997) 장파복사 모델 방안, Goddard(Chou and Suarez, 1994) 단파복사 방안을 선택하여 수치모의 하였다. 적은 모수화 스킴은 도메인 격자 해상도가 $1\ \text{km}$ 로 작은 규모이기 때문에 사용하지 않았다. 또한 기상항공기에서 관측된 1초간격의 GPS자료를 이용하여서 시딩정보 입력자료를 산출하여서 더 현실적으로 수치모의 하였다.

먼저 시딩라인으로부터 시딩물질이 어떻게 확산되었는지 확인해보았다. 이를 위해 수

치모델을 이용하여서 확산장을 산출하여서 분석하였다. Fig. 2.1.4는 수치모델을 통해 실제 실험이 수행된 시딩라인을 따라 시딩모의를 하여 산출한 시딩물질의 확산분포이다. 여기서 파란색 음영이 시딩물질이며, 붉은색 라인은 시딩라인을 나타낸 것이고 붉은색 지점은 주요 관측사이트를 나타낸 것이다. CPOS지점은 구름물리관측소를 의미하고, YWJC는 영월주천 AWS 지점을 의미한다. 시딩물질은 북풍 및 북서풍의 영향으로 인해서 북풍 및 북서풍의 영향으로 주로 남쪽방향으로 이류하였고, 검증 사이트인 빨간색 점이 있는 방향으로 잘 이류 되었다. 특히 YWJC AWS 지점으로 시딩물질이 약 1430 LST 이후부터 1800 LST 이후까지 시딩물질이 존재하였다(Fig. 2.1.5).

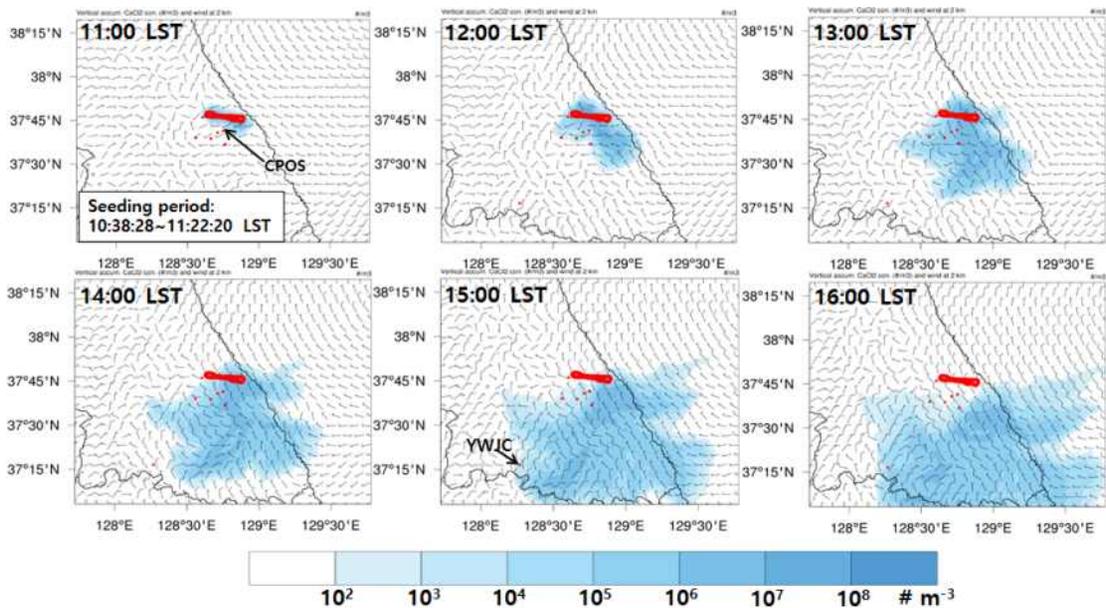


Fig. 2.1.4. The averaged variations of SST (a) Normal cases, (b) East region cases, and (c) South region cases. The accumulated CaCl_2 number concentration (unit: $\# \text{ m}^{-3}$) for the seeded simulation from the surface to model top on 27 June 2019. The vector represents the wind field at the seeding heights (2 km). Red line is seeding line and red points are observation sites.

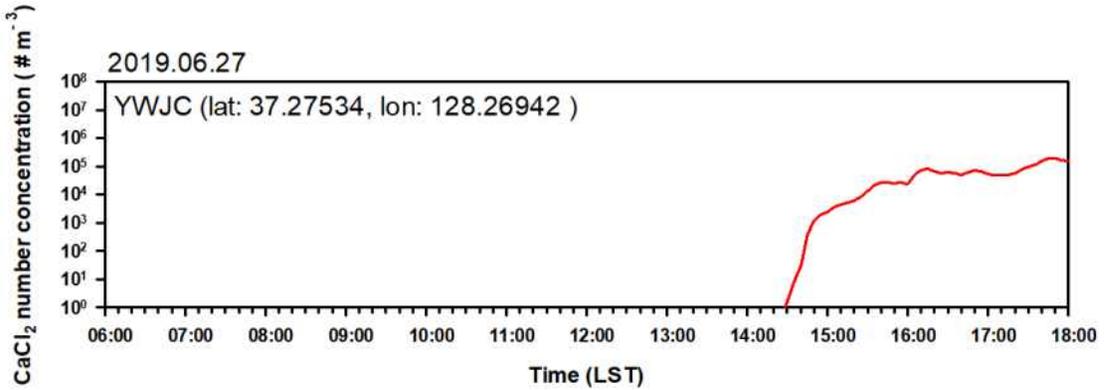


Fig. 2.1.5. The time series of accumulated CaCl_2 number concentration (unit: $\# \text{ m}^{-3}$) for the seeded simulation from the surface to model top at YWJC AWS site.

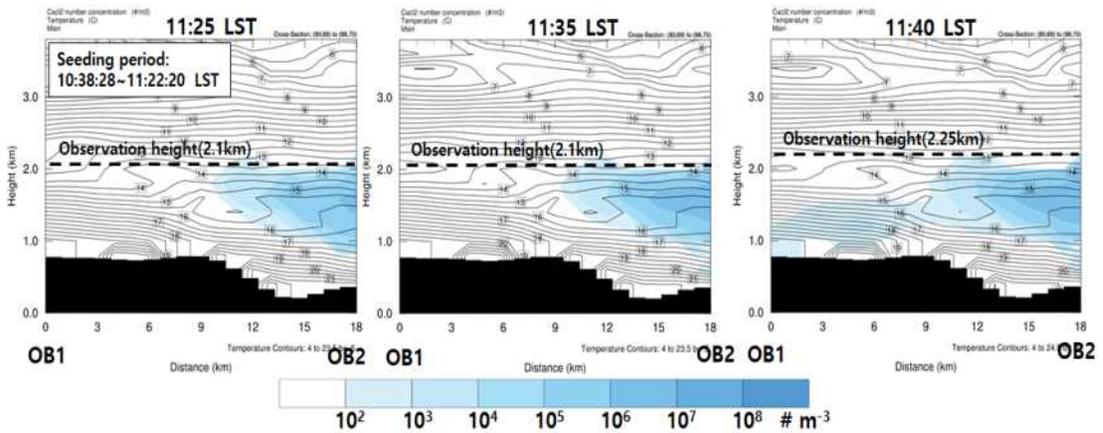
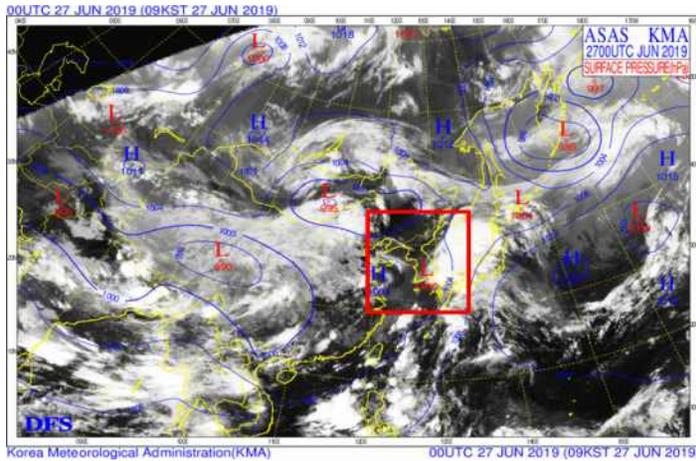


Fig. 2.1.6. The vertical cross section of accumulated CaCl_2 number concentration (unit: $\# \text{ m}^{-3}$) and temperature for the seeded simulation from the surface to 4 km.

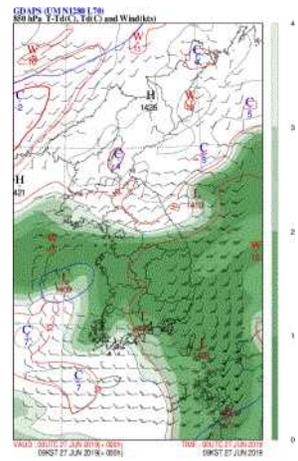
또한 시딩물질이 항공기가 관측한 고도에 시딩물질이 존재하는지 알아보기 위해서 관측라인에 해당하는 연직단면도를 산출해 보았다(Fig. 2.1.6). 파란색 음영이 시딩물질의 수농도 이고, 검은색 실선은 기온이다. 여기에서 OB1과 OB2는 시딩이후 항공기로 관측한 지점의 양끝지점이다. 이와 같은 연직단면도 그림을 통해 관측시간 및 관측 고도에서 시딩물질이 존재하는 것을 확인하였고 기온은 관측 고도에서 약 $12 \text{ }^\circ\text{C}$ 정도인 것을 확인할 수 있었다.

3) 위성 자료 분석

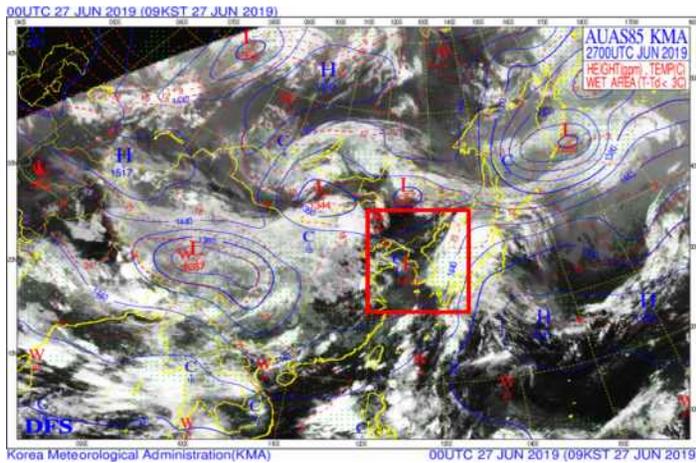
2019년 6월 27일 사례 0900 LST의 한반도 주변 지상 및 상층 일기상태는 Fig. 2.1.7과 같이 분포하였다. 한반도에 위치한 열대저압부 전면에서 북상한 구름대는 중남부지방과 강원 영서 북부에 영향을 미쳤다. 목표지역 주변 시딩고도 이하에서 습수가 4 K 이상 크게 나타났고 기온은 약 16 °C 그리고 북동풍 계열의 바람이 불었다.



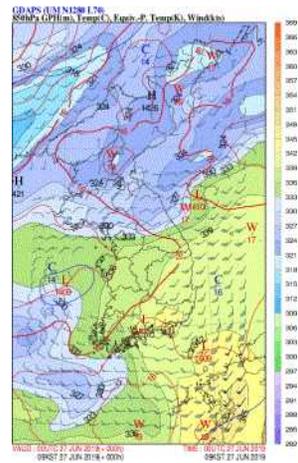
Surface weather chart



850 hPa wet number



850 hPa weather chart



850 hPa temperature

Fig. 2.1.7. Surface and 850 hPa weather chart issued at 0000 UTC 27 June, 2019(red box: Korean Peninsula).

이 사례에서 관측된 구름특성을 분석하기 위하여 COMS (Communication, Ocean and Meteorological Satellite) 위성의 기상자료를 활용하였다. COMS 위성은 매 3시간 간격의 전구영역과 매 15분 간격의 로컬영역을 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 의 공간해상도로 기상자료를 제공한다. 이 자료들은 단파채널 1개와 장파채널 4개의 협대역 채널들의 복사특성과 기상변수 사이의 상관관계로부터 산출된다. 단, 장파채널을 사용하는 기상변수(예: 운정고도)는 주야간 모두 산출이 가능하며 단파채널만을 사용하는 기상변수(예: 구름광학두께)는 주간에만 산출이 가능하다.

위성자료는 목표지역인 대관령 주변 $2^\circ \times 2^\circ$ 영역(경도: $127.7^\circ\text{E} \sim 129.7^\circ\text{E}$, 위도: $36.7^\circ\text{N} \sim 38.7^\circ\text{N}$)의 COMS 운정고도, 운정온도, 운상, 운형, 구름광학두께 자료를 시딩 전과 도중 그리고 후에 관측된 분포를 각각 나타내었다(Fig. 2.1.8). 이때 흰색 바탕의 영역은 구름이 없는 맑은 지역으로 목표지역을 포함한 영동과 동해 지역에 구름이 분포한 사례이다. 이 사례에서 기상항공기 주변으로 관측된 운정고도는 2~3 km로 하층운인 층적운이 존재하였고 실험 내에 운정고도와 운형의 변화는 크지 않았다. 운정온도는 285~295 K($12 \sim 22^\circ\text{C}$)로 시딩물질인 염화칼슘 사용에 적합한 온도 분포를 보였다. 그리고 구름광학두께는 5~15로 광학적으로 두꺼운 구름에 시딩 및 구름 관측이 수행되었다.

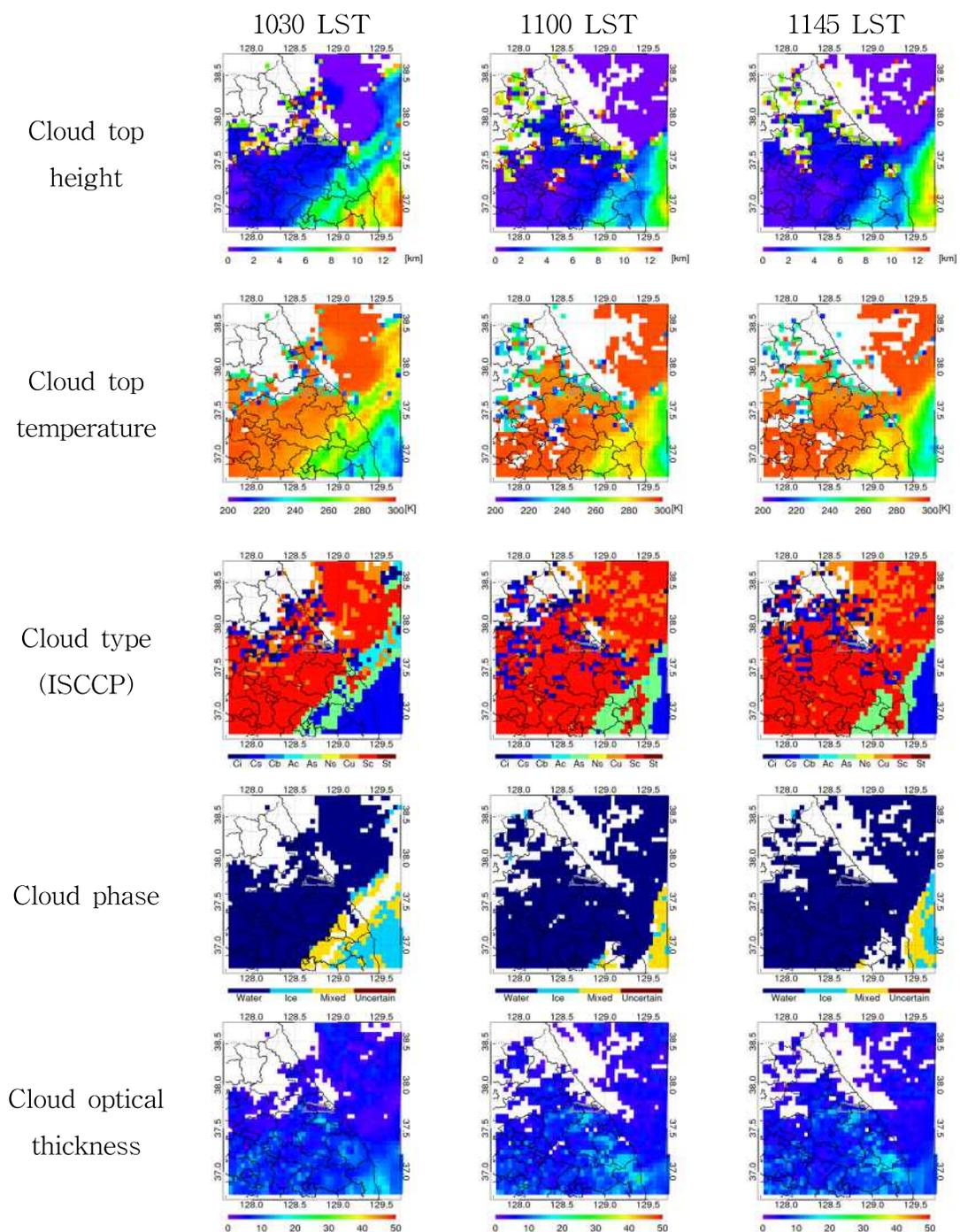


Fig. 2.1.8. The cloud top height and temperature, cloud type(ISCCP), cloud phase, and cloud optical thickness observed by COMS(gray line: flight path).

4) 레이더 자료 분석

시딩효과 분석을 위해 레이더 자료는 광덕산 레이더 자료를 사용하였다. 광덕산 레이더는 위도 37.1174 N, 경도 127.4336 E, 고도 1,064 m인 지점에 설치되어 있다. 레이더 중심에서 반경 250 km의 영역을 관측하고 있어서 광덕산 레이더는 대관령 지역에서 수행되는 기상조절 실험의 항공기 비행 권역을 모두 관측할 수 있다. 레이더 자료는 평균 시딩고도가 6,500 ft (1.95 km)인 것을 고려하여 CPOS 지점까지의 PPI 고도가 2 km 이내로 나타난 광덕산 레이더 PPI 0.8° 자료를 분석하였다. 시딩 전인 10시 30분부터 시딩 후 16시까지 광덕산 레이더 반사도 PPI 0.8° 영상을 나타내면 다음 Fig. 2.1.9와 같다.

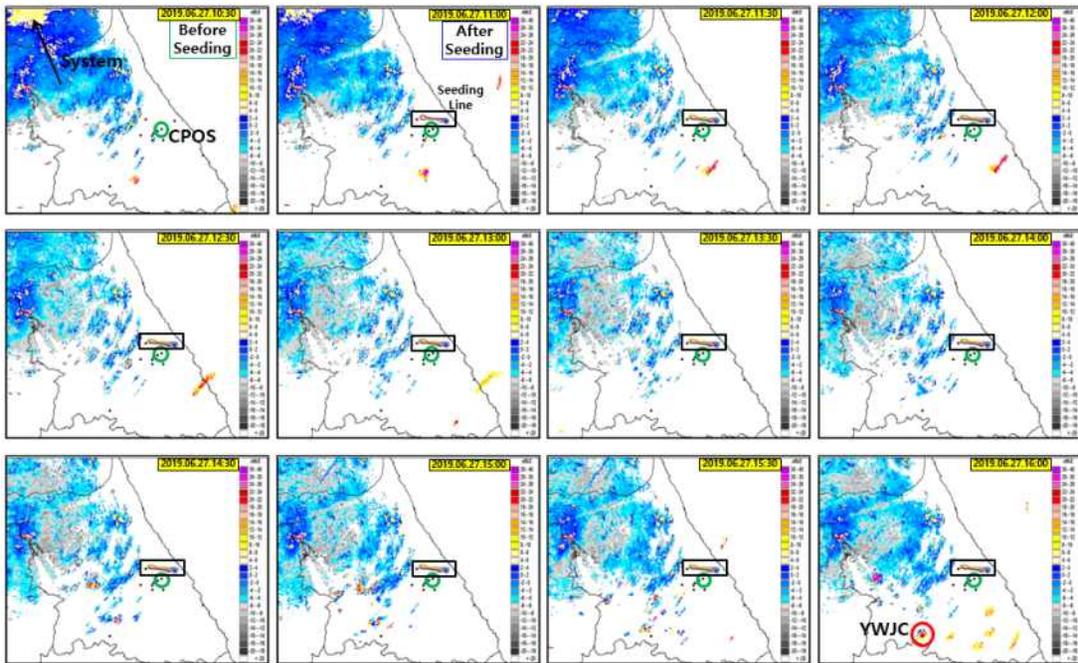


Fig. 2.1.9. Reflectivity images (PPI 0.8) of Gwangdeoksan radar (Green circle: CPOS, Balck box: Seeding line, PPI elevation of CPOS: 2.0 km)

Fig. 2.1.9에서 알 수 있듯이 시딩 전 목표지역인 대관령 북서쪽 상단에 자연 강수가 일부 유입되어 있었던 것으로 나타났으나 CPOS 부근으로 유입되지 않은 것으로 나타났다. 시딩 기간에도 시딩 라인 주변에서는 자연강수의 영향이 없는 것으

로 나타났다. 시딩 후에는 목표지역과 주변 지역에서 반사도의 증가가 뚜렷하게 나타나지 않았다.

모델 확산장 결과와 비교하면 시딩물질은 대관령 지역에서 남서쪽으로 위치한 영월주천(YWJC) 관측소 상공을 통과하는 것으로 나타났고, 이 부근에서는 시딩 후 16시 부근에 반사도가 다른 지역과 비교하여 일시적으로 크게 증가한 것으로 나타났다. 이러한 결과를 상세하게 분석하기 위해 시딩 전후 18시까지 YWJC 지점에서 반사도 변화를 다음 Fig. 2.1.10에 나타냈다.

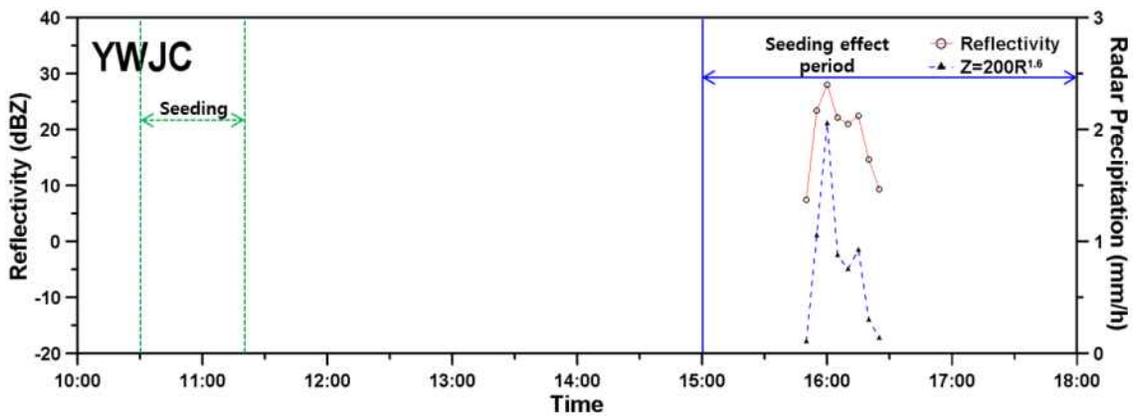


Fig. 2.1.10. Time series of Gwangdeoksan radar reflectivity (PPI 0.8) and radar precipitation in YWJC.

그림에서 ○는 반사도, ▲는 레이더 강수 추정에 주로 사용되는 $Z=200R^{1.6}$ (Marshall and Palmer, 1948) 식을 이용하여 산정한 강수 강도를 나타낸다. Fig. 2.1.10에서 확인할 수 있는 것처럼 YWJC 지점에서는 시딩 전과 시딩 후 15시 40분까지는 반사도가 따로 감지되지 않은 것을 알 수 있다. 그러나 모델 확산장 결과에 나타난 것처럼 시딩물질이 영향을 주었을 것으로 예상되는 16시 부근에 레이더 반사도가 일시적으로 30 dBZ 정도까지 증가하였다가 16시 30분까지 감소한 것으로 나타났다. 이때 레이더 강수 강도는 16시에 순간적으로 2 mm hr^{-1} 까지 매우 크게 증가한 것으로 나타났다. 이는 다른 지점과 달리 시딩 이후 시딩물질이 영향을 주었을 것으로 예상되는 시간에 반사도가 크게 증가한 것이기 때문에 YWJC 지점에

서 단기간에 시딩효과가 크게 나타난 것으로 판단할 수 있다.

5) 항공 구름 및 강수 입자 변화 확인

시딩 전과 후의 구름 미세물리 특성 변화를 분석하기 위해 관측한 2개의 고도 (2.1 km, 2.3 km)로 나누어 CDP로 산출된 액체수함량에 따른 총 수농도, 유효직경, 연직속도의 산포도를 Fig. 2.1.11에 나타내었다. 먼저, 시딩고도(2.1 km)에서 액체수함량에 따른 총 수농도를 보면 액체수함량은 최대 3 gm^{-3} 까지 관측되며, 액체수함량이 증가할수록 총 수농도가 증가하였다(시딩 중(s, 분홍색) 최대 $3,500 \text{ cm}^{-3}$). 유효직경은 $8\sim 18 \mu\text{m}$ 으로 관측되었고, 액체수함량 1 gm^{-3} 이하의 유효직경별 액체수함량은 시딩 전(b, 하늘색) 대비 시딩 후(a, 파란색)가 더 높았다. 한편, 2,250 m 고도에서는 액체수함량은 최대 2 gm^{-3} 까지 관측되며, 총 수농도는 시딩 전(B) 최대 $1,000 \text{ cm}^{-3}$ 에서 시딩 후(A) 최대 $2,000 \text{ cm}^{-3}$ 으로 증가하였다. 유효직경은 시딩 전 (B) $16 \mu\text{m}$ 내외에서 시딩 후(A) $12\sim 15 \mu\text{m}$ 으로 감소하였고 일부 상승역이 관측되었다.

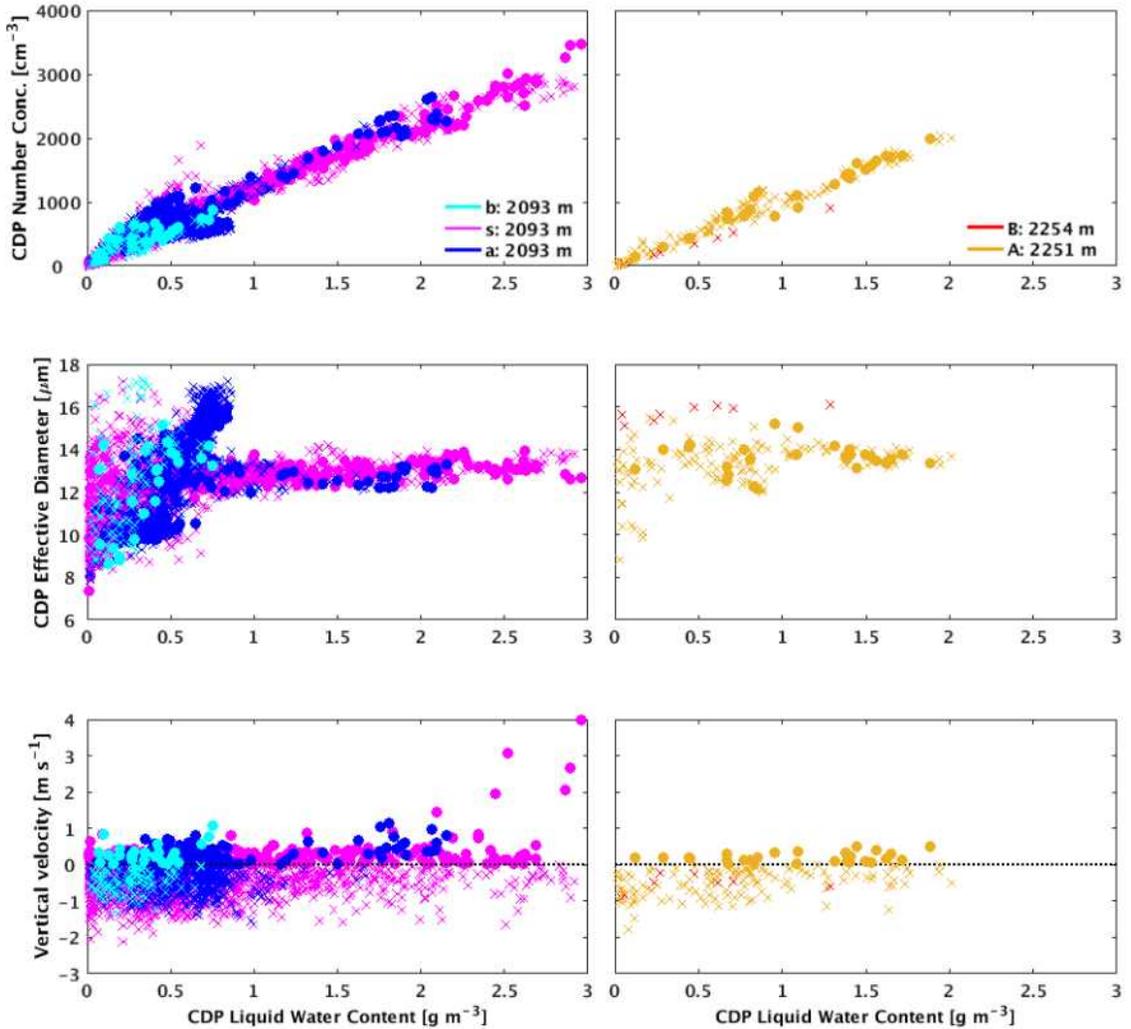


Fig. 2.1.11. Scatter plots of total number concentration (top), effective diameter (middle), vertical velocity (bottom) according to liquid water content calculated by CDP at the seeding level (2.1 km, left) and 2.3 km (right).

Table 2.1.3은 고도에 따른 CDP로 관측된 입자의 총 수농도의 평균값을 나타낸 것이다. 이 사례에서는 CIP 관측자료 이상, PIP 관측자료 부재로 분석에서 제외하였다. 먼저, 2.1 km (시딩고도)에서 시딩 전(b) 대비 후(a)의 구름입자의 평균 수농도는 1.96배 증가하였고, 특히 시딩 중(s)에 가장 많은 구름입자가 생성되었다. 2.3

km (시딩 고도로부터 160 m 위의 층) 고도에서는 시딩 전(B) 대비 후(A)에 구름입자의 평균 수농도는 2.49 배 증가하였다. 시딩고도와 비교해 2.3 km 고도에서 더 많은 구름입자가 증가하였다. 각 관측 구간별 평균 입자크기분포를 Fig. 2.1.12에 나타내었다. 5개의 관측구간의 구름입자는 D(직경) ≤ 30 μm 범위에서 관측되며, 약 10 μm에서 피크가 나타났다. 시딩고도 및 2.3 km 고도에서 전 직경에 대한 수농도가 시딩 전 대비 후에 증가하였다.

Table 2.1.3. Average and increase in total number concentration for each observation section at the seeding level (2.1 km, left) and 2.3 km (right). (unit, CDP: cm⁻³)

Altitude	Obs. sections	CDP
2.1 km (Seeding level)	Before seeding (b)	360
	During seeding (S)	851
	After seeding (a)	704
	Increase (b vs. a)	1.96
2.3 km	Before seeding (B)	342
	After seeding (A)	853
	Increase (B vs. A)	2.49

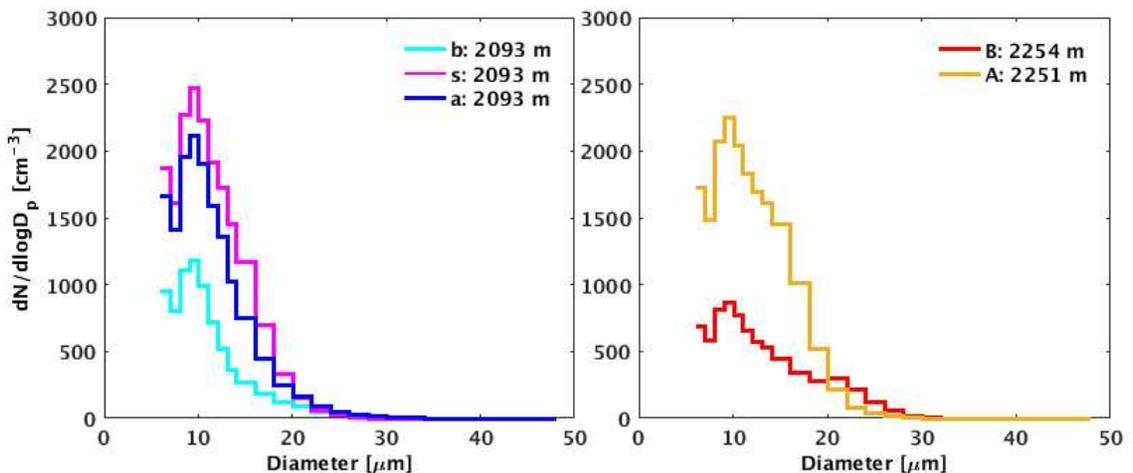


Fig. 2.1.12. Average particle size distribution observed by CDP at the seeding level (2.1 km, left) and 2.3 km (right).

6) 지상강수 증가 및 강수입자 변화 확인

자연강수의 유입 및 시딩 효과의 확인을 위하여, 대관령 6개소에 설치되어있는 연직강우레이더와 광학우적계의 자료를 활용하였다. 6개소는 대관령 구름물리관측소(CPOS)와 선도센터(CPC), 용평(YPO), 진부(JBO), 오대산(ODO), 대기리(DRO)에 설치되어있으며, 연직강우레이더를 통하여 고도별 반사도의 변화와 액체 수 함량의 변화를 확인하였으며, 광학우적계를 통하여, 입자의 평균 크기 및 입자 수의 변화를 다음 Fig. 2.1.13에 나타내었다.

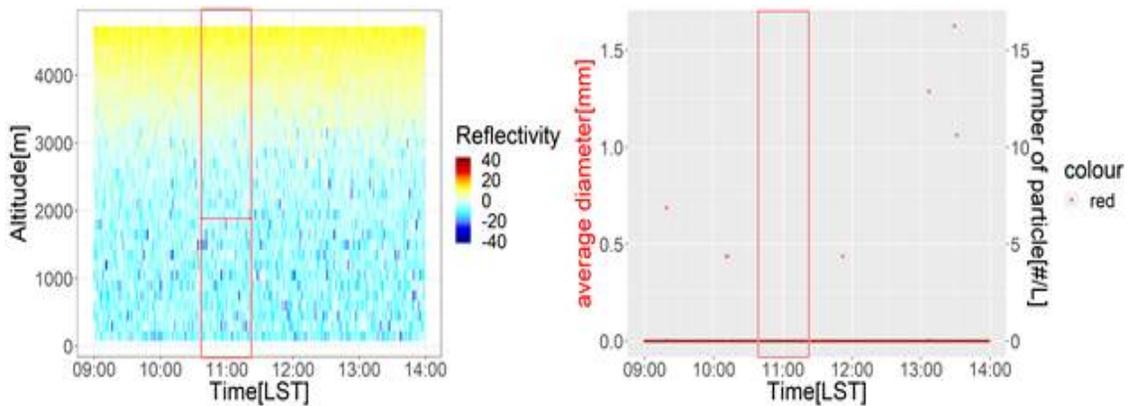


Fig. 2.1.13. Altitude reflectivity in micro rain radar and number of particle and average particle diameter in Parsivel2 from CPOS.

Fig. 2.1.13을 통하여 알 수 있듯이 구름물리 관측소 지점에서 시딩고도 아래에서 반사도변화는 나타나지 않았으며, 액체 수 함량의 변화도 나타나지 않았다. 또한 입자의 평균 크기 및 입자 수의 변화도 확인할 수 없었다. CPOS지점 외의 CPC, YPO, JBO, ODO, DRO 지점에서도 반사도 변화 및 입자의 수 및 평균 입자의 변화를 확인할 수 없었다.

다음으로 기상청 AWS의 강우감지 자료와 강수량자료를 확인하였다. AWS는 시딩 목표지점인 구름물리 선도센터와 용평, 진부, 강릉왕산(대기리) 지점에 위치하고 있으며, 각 지점의 전도식 우량계를 통하여 강수량을 확인할 수 있다. 강수감지 및 강수량의 변화는 15시까지 관측하였으며, 관측한 결과는 다음 Fig. 2.1.14와 같다.

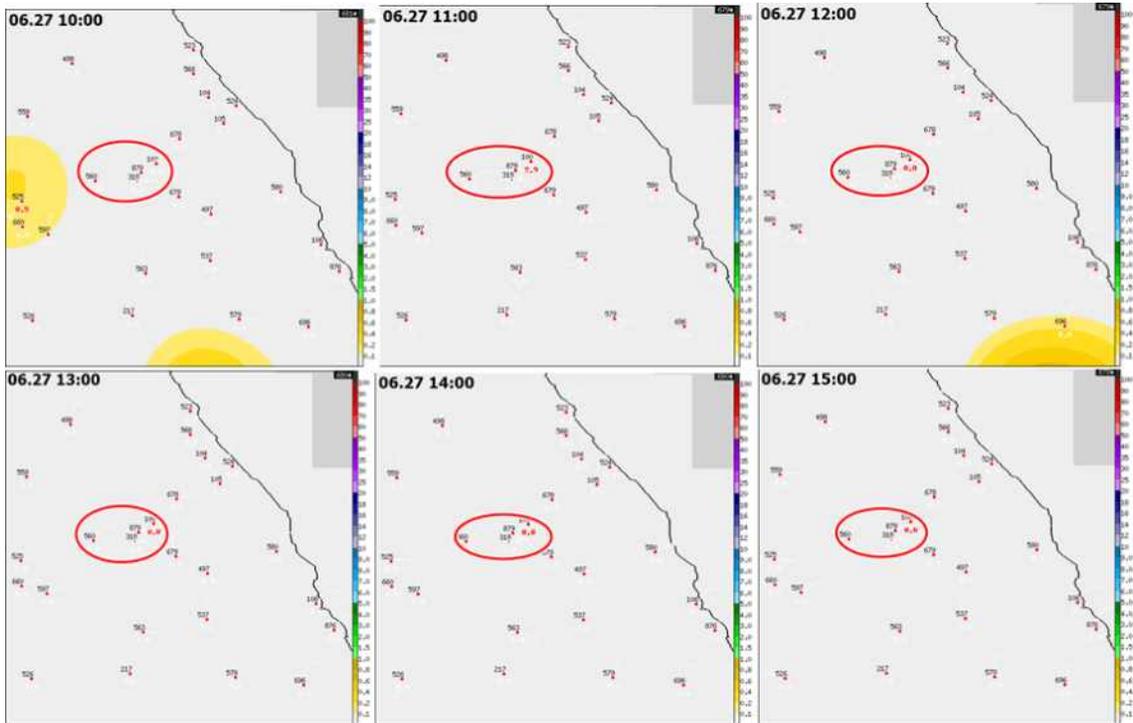


Fig. 2.1.14. Rainfall detection and hour precipitation in AWS(CPC).

연직강우레이더와 광학우적계의 결과와 함께 목표지점에서 강우감지 및 강수량변화는 나타나지 않았다. 시딩 효과는 장기적으로 나타날 수 있음을 고려하여 추가로 23시까지의 자료를 확인하였지만 큰 변화를 확인할 수는 없었다.

모델장 확산 결과를 참고하여 시딩 물질이 대관령지역 남서쪽에 위치한 영월주천 관측소를 통과하는 것을 확인하였고, 이 부근의 AWS강우 감지결과와 강수량 변화를 확인하여 다음 Fig. 2.1.15로 나타냈다.

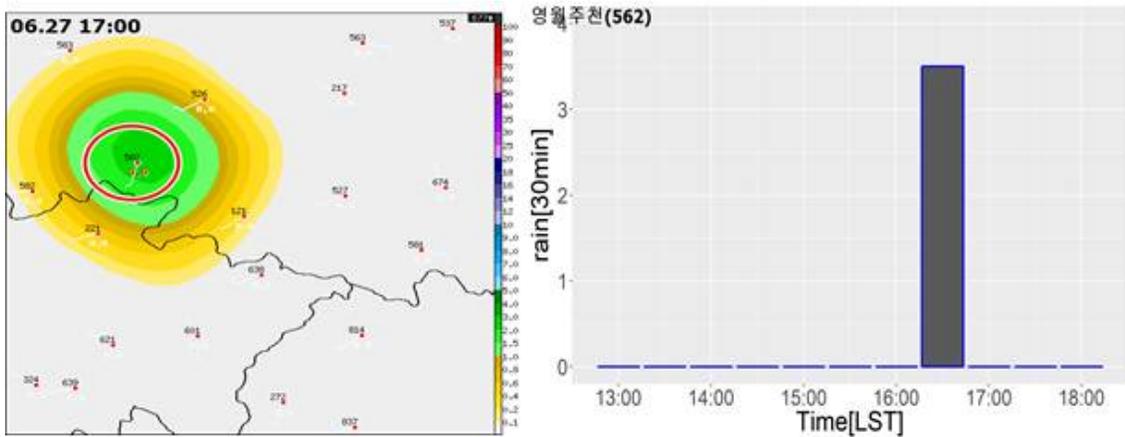


Fig. 2.1.15. Rainfall detection and hour precipitation in AWS(YWJC).

시딩 이후 16시까지 강우감지 및 강수량의 변화는 나타나지 않았으나, 모델 확산장 결과에 나타난 것처럼 시딩물질이 영향을 주었을 것으로 예상되는 16시 부근부터 강우감지가 나타났으며, 16시 04분부터 16시 27분까지 최대 3.5 mm의 강수량을 기록하였다. 지상 관측결과에서도 다른 지점과 달리 시딩 물질이 영향을 주었을 것으로 예상되는 시간에 강수량이 나타났으며 그 강도는 최대 3.5 mmhr^{-1} 까지 매우 크게 증가한 것으로 판단할 수 있다.

7) 누적강수량 변화 모의

Fig. 2.1.16은 시딩효과를 살펴보기 위하여 시딩모의 실험(SEED)과 비시딩모의 실험(NOSEED) 사이의 누적강수량의 차이(변화)를 나타낸 것이다. 시딩이 시작되는 약 10시 38분부터 선정된 시간까지 누적강수량 변화이고, 붉은색 음영이 나타내는 의미는 시딩으로 강수량이 증가를 의미하며, 파란색 음영은 시딩으로 강수가 감소한 것을 의미한다. 검은색 실선은 시딩라인을 나타낸 것이다. 누적 강수량 변화를 통해서 시딩물질이 확산된 영역으로 강수의 변화가 나타난 것을 확인할 수 있었다. 특히 영월주천 (YWJC) AWS 부근으로 누적강수량 증가 및 감소 영역이 뚜렷하게 나타났으며, 이는 관측과 일치하였다.

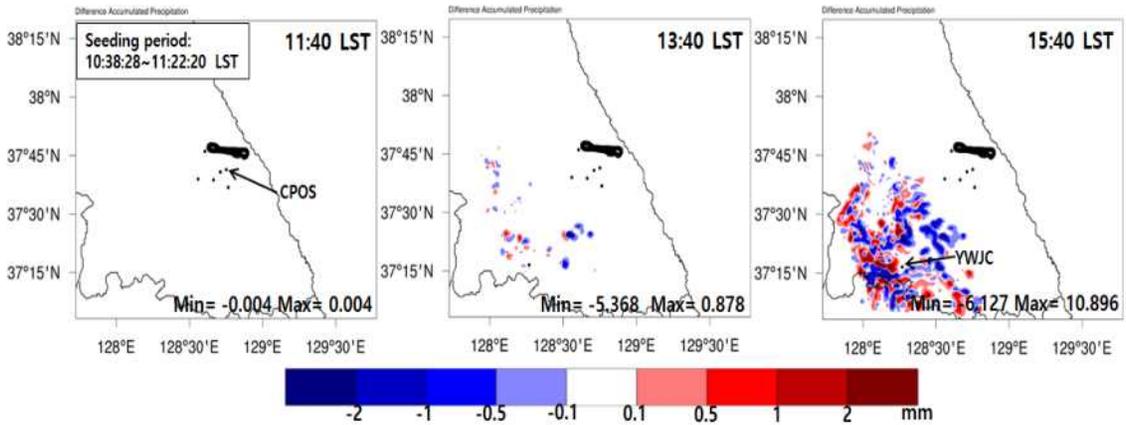


Fig. 2.1.16. Differences between the accumulated SEED and NOSEED precipitation (unit: mm) from seeding start time on 27 June 2019. Black line is seeding path.

Fig. 2.1.16은 시딩효과를 살펴보기 위하여 시딩모의 실험(SEED)과 비시딩모의 실험(NOSEED) 사이의 누적강수량의 차이(변화)를 나타낸 것이다. 시딩이 시작되는 약 10시 38분부터 선정된 시간까지 누적강수량 변화이고, 붉은색 음영이 나타내는 의미는 시딩으로 강수량이 증가를 의미하며, 파란색 음영은 시딩으로 강수가 감소한 것을 의미한다. 검은색 실선은 시딩라인을 나타낸 것이다. 누적 강수량 변화를 통해서 시딩물질이 확산된 영역으로 강수의 변화가 나타난 것을 확인할 수 있었다. 특히 영월주천(YWJC) AWS 부근으로 누적강수량 증가 및 감소 영역이 뚜렷하게 나타났으며, 이는 관측과 일치하였다.

(2) 2019년 11월 28일 사례 (빙정핵 시딩실험)

1) 실험 정보

2019년 11월 28일 강원도 평창군 일대에서 인공증설 항공실험을 수행하였다. 이 사례는 국제공동연구 사례 중 하나로 미국 기상조절 전문가에 의해 설계되었다. 동풍계 시스템에 의한 구름을 대상으로 풍상측 직선시딩과 풍상측 및 풍하측 지역을 교차로 지그재그 관측을 수행하였다. 구름에 지속적 빙정핵(시딩물질, AgI 연소탄) 제공을 위해 2분 간격으로 각 날개의 2개의 연소탄을 동시에 연소하는 방식으로 총 14발(2.10 kg)을 살포하였다. Fig. 2.1.17은 6,500 ft 상공에서 관측한 층운형 구름 및 기상항공기에 탑재된 AgI 연소탄을 이용해 시딩하는 모습이다.



Fig. 2.1.17. Pictures of clouds (left) and burning AgI flares (right) seen from 6,500 ft with the aircraft (King-air 350).

대관령 상공에서 기상항공기 비행경로 및 고도를 Fig. 2.1.18에 나타내었다. 하늘색, 분홍색, 파란색 구간은 각각 시딩 전, 중, 후의 관측구간을 의미한다. 시딩물질은 풍상측 CHERI-CPO라인으로 약 1.9 km 고도에 11시 24분부터 11시 52분까지 약 28분 동안 살포하였다. 구름 및 시딩효과 검증관측은 시딩 전 풍상측 지역을 11시 15분부터 11시 24분까지 9분 동안 평균 약 2.2 km 고도를 관측하였고, 시딩 후에는 풍하측(일부 풍상측 관측) 약 1.9 km 고도를 35분(1152~1227 LST) 동안 관측하였다. 각 구간별 기온, 풍향, 풍속, 연직속도, 액체수함량의 평균 및 표준편차를 Table 2.1.4에, 시계열을 Fig. 2.1.19에 나타내었다. 시딩고도(1.9 km)의 평균 기온은 -8

℃, 풍속은 5 m s^{-1} , 풍향은 남동으로 관측되었다. 연직속도는 시딩 전·중·후 평균 약 $-0.2 \sim -0.4 \text{ m s}^{-1}$ 로 약한 하강기류가 관측되었고, 액체수함량은 시딩 전 약 $0.10 (\pm 0.05) \text{ g m}^{-3}$ 에서 시딩 후 $0.06 (\pm 0.05) \text{ g m}^{-3}$ 으로 감소하였다. 여기서 액체수함량은 CDP로부터 산출한 값이며, 액체수함량이 0.01 g m^{-3} 이상인 구간만을 구름으로 간주해 평균하였다.

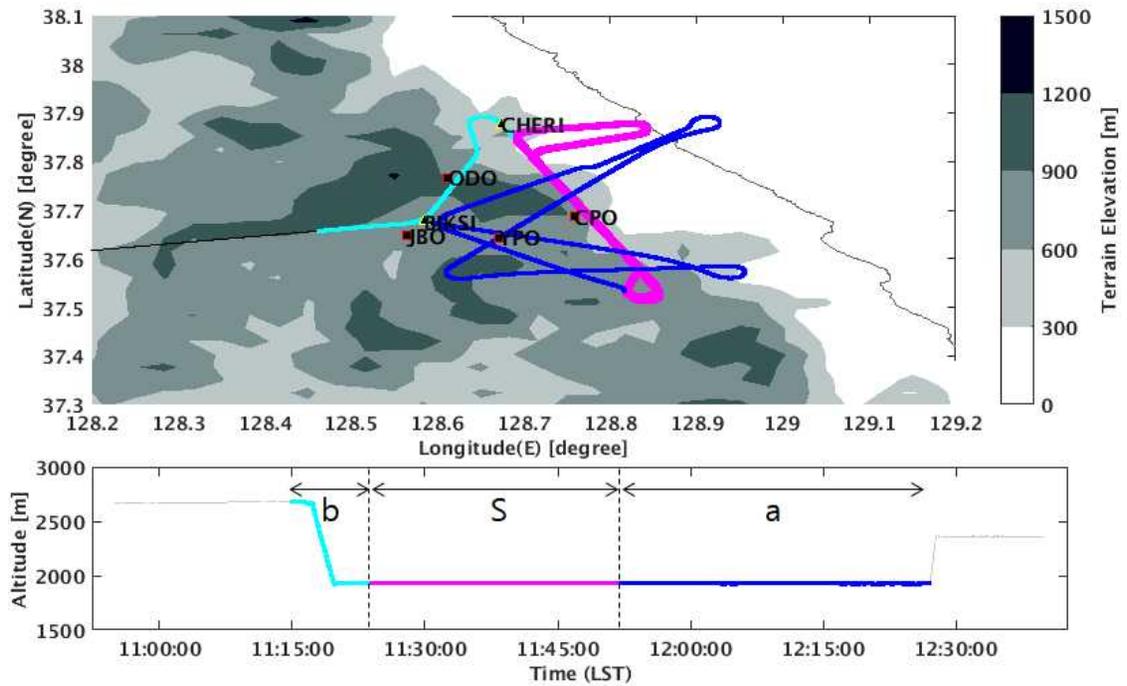


Fig. 2.1.18. Total flight path (top) and observation altitude (bottom). The sky blue (b), pink (S) and blue (a) lines mean observation paths on the before, during and after seeding (ODO: O-dae Mt., CPO: Cloud physics, YPO: Yongpyong, JBO: Jinbu, BWO: Barwang Mt., and DRO: Daegi-ri Observatory).

Table 2.1.4. Mean and standard deviation for observation sections

Variable	Before seeding (b)	During seeding (S)	After seeding (a)
Altitude (m)	2,212 (± 324)	1,931 (± 2)	1,928 (± 2)
Temperature($^{\circ}\text{C}$)	-9.5 (± 1.8)	-7.5 (± 0.3)	-7.2 (± 0.3)
Wind speed (m s^{-1})	5.1 (± 1.2)	4.8 (± 0.7)	4.2 (± 0.8)
Wind direction ($^{\circ}$)	179 (± 61)	122 (± 10)	138 (± 23)
Vertical velocity (m s^{-1})	-0.3 (± 0.3)	-0.4 (± 0.3)	-0.2 (± 0.4)
Liquid water content (g m^{-3})	0.10 (± 0.05)	0.07 (± 0.06)	0.06 (± 0.05)

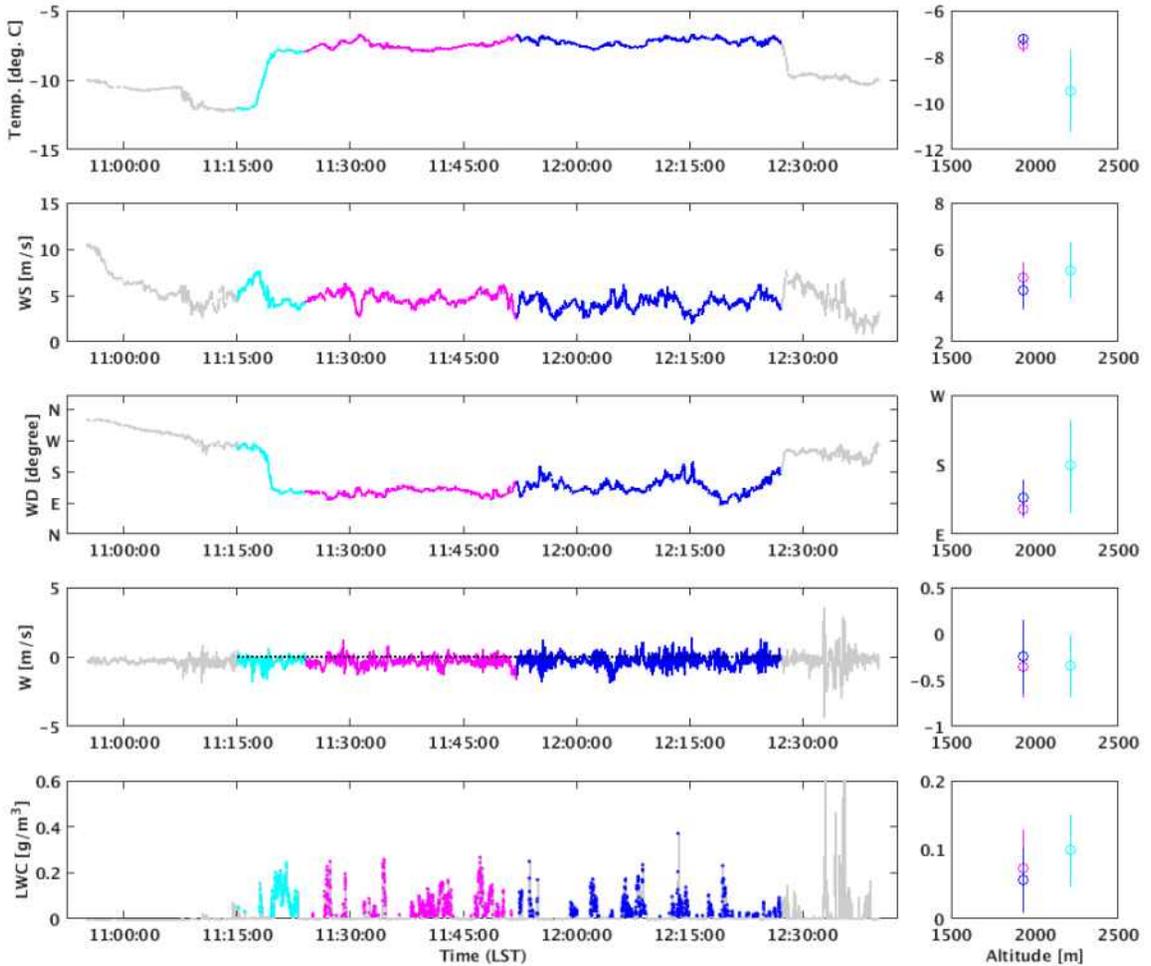


Fig. 2.1.19 Time series (left) and vertical distribution (right, mean and standard deviation) of temperature, wind speed, wind direction, and vertical velocity observed with AIMMS-20 and liquid water content from CDP.

2) 시딩물질 확산 모의

본 사례일은 기상조절 국제공동 실험의 일환으로 대관령일대에서 이루어진 실험으로 요오드화은(AgI) 연소탄을 이용하였다. 마찬가지로 LDAPS 분석장을 이용하였으며, 상세 수치모의를 위해서 1초 간격의 GPS자료를 이용하여서 시딩입력자료를 생산하여서 수치모의 하였다.

시딩물질의 확산분포를 확인하기 위해서 AgI의 수농도 변수를 이용하여서 연직 누적

하여서 시간대별 그림을 그려보았다(Fig. 2.1.20). 여기서 붉은색 선은 시딩라인을 의미하고 붉은색 점은 관측사이트를 의미한다. 시딩 초반인 1200 LST의 경우 주로 동풍의 영향으로 시딩물질이 시딩라인을 기준으로 하였을 때 관측사이트가 있는 서쪽으로 확산이 되었다. 그 이후부터 풍계가 변화하면서 시딩라인을 기준으로 양방향으로 확산되었고, 매우 약한 풍속으로 인해서 이류가 잘 되지 않아 관측 사이트 지점에 시딩물질이 2100 LST 이후 까지 존재하는 것을 확인하였다.

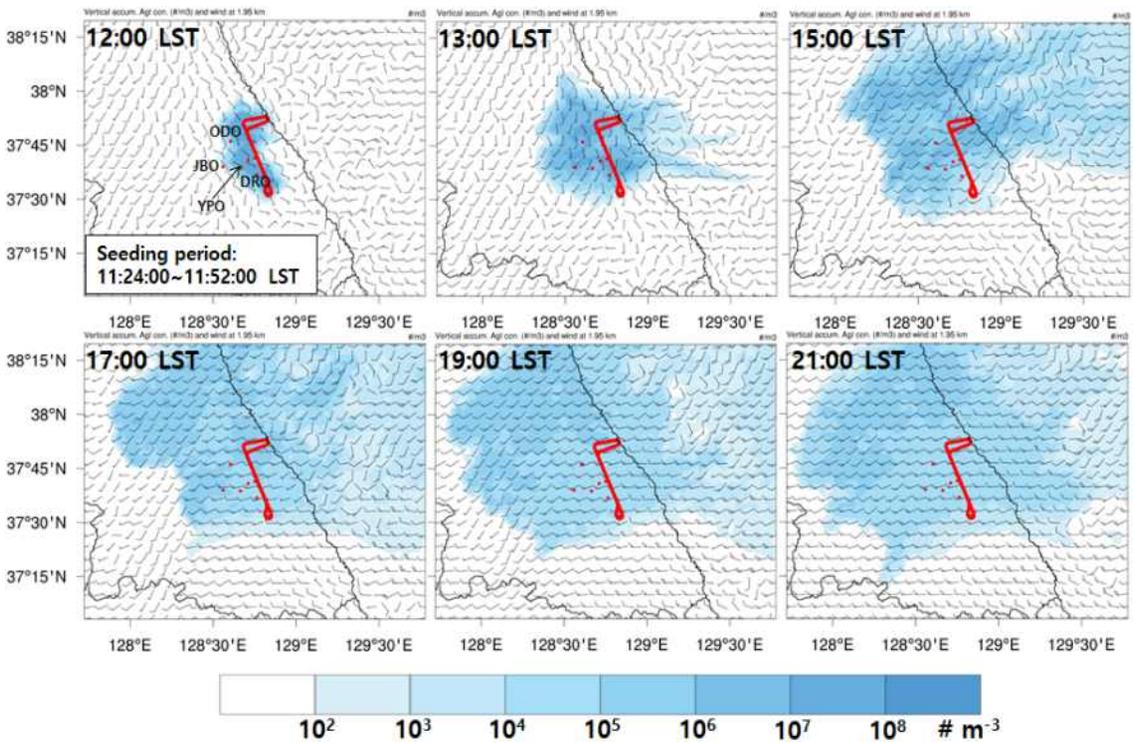
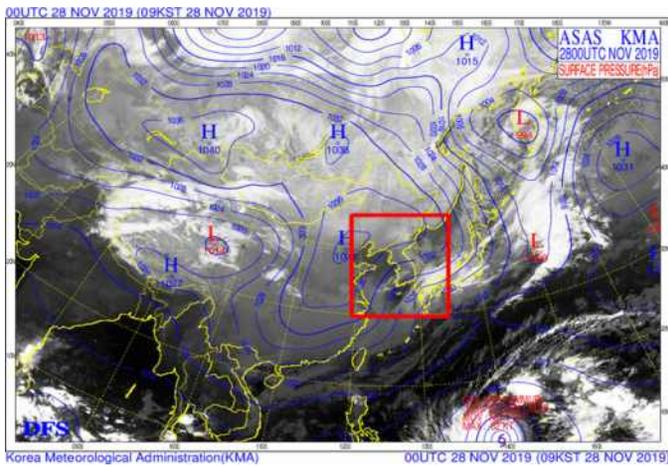


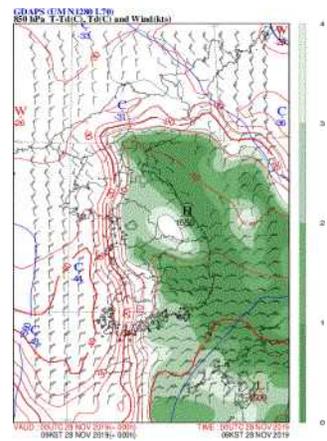
Fig. 2.1.20. The accumulated AgI number concentration (unit: # m⁻³) for the seeded simulation from the surface to model top on 28 November 2019. The vector represents the wind field at the seeding heights. Red line is seeding line and red points is observation site.

3) 위성 자료 분석

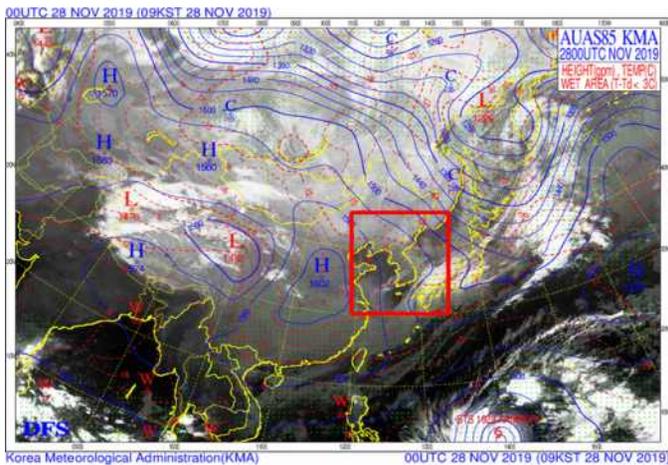
2019년 11월 28일 사례 0900 LST의 한반도 주변 지상 및 상층 일기상태는 Fig. 2.1.21과 같이 분포하였다. 한반도는 지상 고기압 가장자리에 위치하여 동풍에 의한 적운열의 하층운대가 지속적으로 유입되었고 내륙으로 유입된 적운열은 운정고도 4 km로 성장하였다. 목표지역 주변 시딩고도 이하에서 습수가 0~2 K로 나타났고 기온은 약 -6 °C 그리고 동풍 계열의 바람이 불었다.



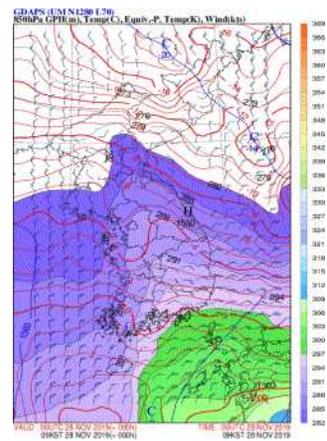
Surface weather chart



850 hPa wet number



850 hPa weather chart



850 hPa temperature

Fig. 2.1.21. Surface and 850 hPa weather chart issued at 0000 UTC 28 November, 2019(red box: Korean Peninsula).

위성자료는 목표지역인 대관령 주변 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 영역(경도: $127.7^{\circ}\text{E} \sim 129.7^{\circ}\text{E}$, 위도: $36.7^{\circ}\text{N} \sim 38.7^{\circ}\text{N}$)의 COMS 운정고도, 운정온도, 운상, 운형, 구름광학두께 자료를 시딩 전과 도중 그리고 후에 관측된 분포를 각각 나타내었다(Fig. 2.1.22). 이 사례에서는 동해안을 따라 넓게 육상에 1~4 km의 하층운(층적운과 적운)과 해상에 3~5 km의 중층운(고층운)이 분포하였다. 기상항공기 주변으로 관측된 운정고도는 1~3 km로 하층운인 층적운이 존재하였고 실험 내에 운정고도와 운형의 변화는 크지 않았다. 운정온도는 255~275 K($-18 \sim 2^{\circ}\text{C}$)로 시딩물질인 요오드화은 사용에 적합한 온도 분포를 보였다. 그리고 구름광학두께는 5~10으로 6월 27일 사례보다는 광학적으로 얇은 구름에서 시딩 및 구름 관측이 수행되었다.

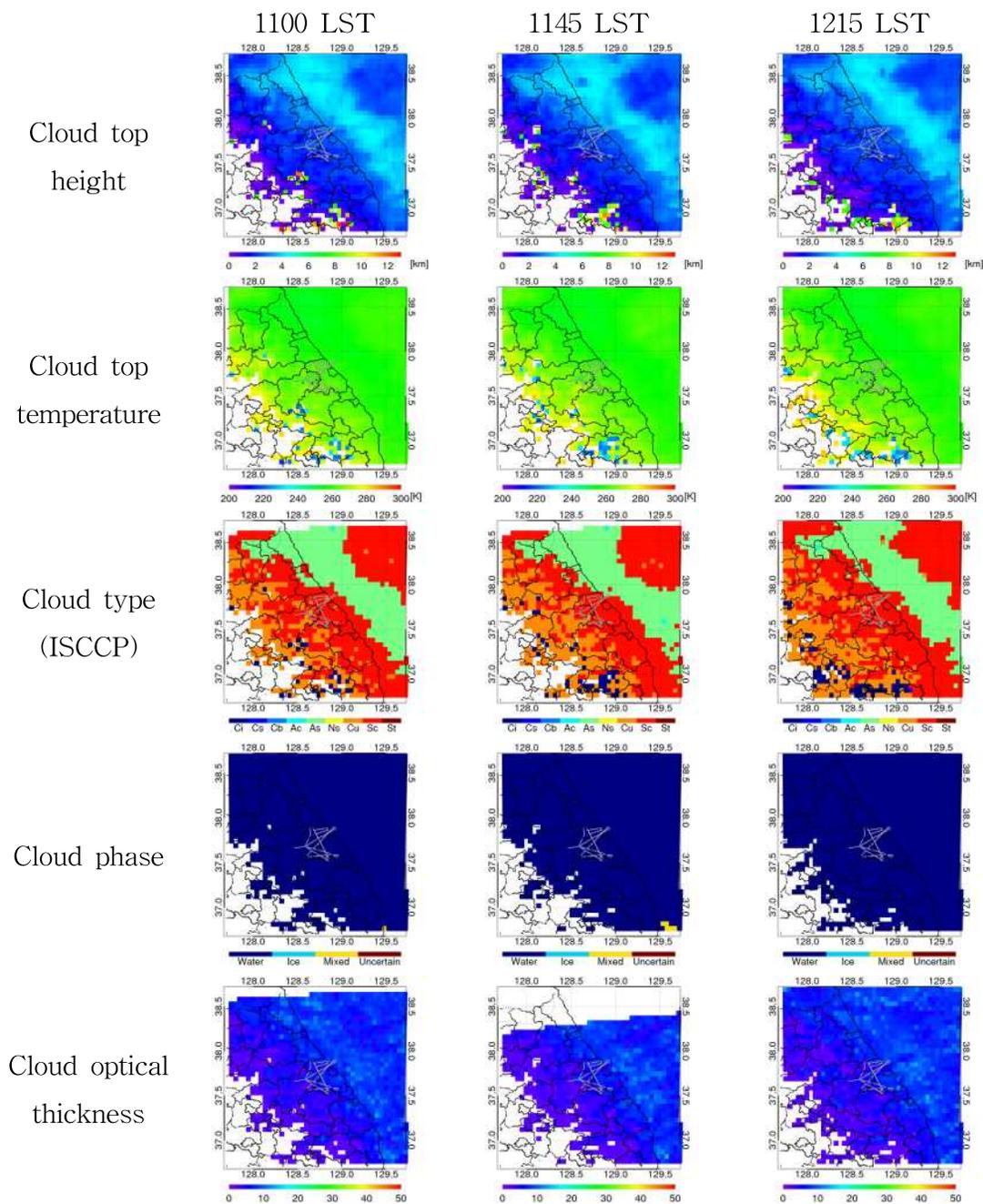


Fig. 2.1.22. The cloud top height and temperature, cloud type (ISCCP), cloud phase, and cloud optical thickness observed by COMS (gray line: flight path).

COMS 위성과 항공 기상관측 자료를 이용하여 Fig. 2.1.23와 같이 운저고도를 산출하였고 항공경로에서 관측된 기상정보와 구름특성을 가시화하였다. 이때 구름두께(ΔZ)는 운정고도(CTH)와 운저고도(CBH)의 차이로 정의할 수 있으며 운저고도는 식 (2.1.1)~(2.1.3)으로부터 산출될 수 있다(Hutchison, 2002, Sharma et al., 2016).

$$CBH = CTH - \Delta Z \quad (2.1.1)$$

$$\Delta Z = \frac{LWP}{LWC} \quad (2.1.2)$$

$$LWP = \frac{2}{3} \rho \times COT \times r_{eff} \quad (2.1.3)$$

여기서 LWC 와 r_{eff} 는 항공관측을 통해 관측된 입자별 수농도로부터 산출되고 (Kumar et al., 2016) LWC 는 각 샘플당 0.01 gm^{-3} 이상인 자료만을 사용하였다. 그리고 COT 는 구름광학두께이며 ρ 는 1 kgm^{-3} 으로 사용하였다(Poulsen et al., 2012).

가시화된 구름특성 정보로부터 항공경로의 시간별 운정고도와 운저고도, 구름두께, 항공관측 고도, LWP, 운상, 운형을 파악할 수 있다. 이때 항공경로상 구름두께는 약 0.5 km로 추정되었고 운정과 운저는 1.9~3 km 고도 내에 분포하였으며 관측고도 이내에 운정 및 운저에서 시딩 및 구름 관측이 수행되었다. 그리고 액체상 하층운인 층운과 층적운이 분포하였고 LWP는 $10 \sim 50 \text{ gm}^{-2}$ 으로 나타났다.

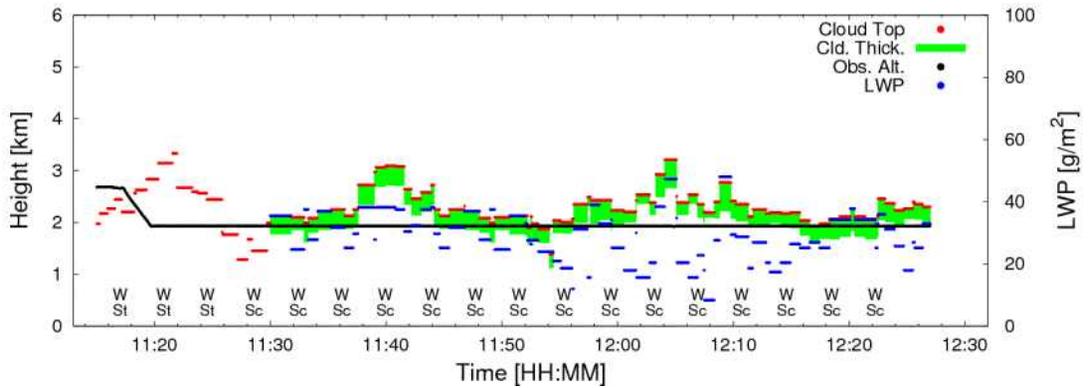


Fig. 2.1.23. The time series of the cloud top height(red) and cloud base height(bottom of green box), cloud thickness(green box), observation altitude of the aircraft(black), liquid water path(blue), cloud phase (W: water), and cloud type(Cs: cirrostratus, Sc: stratocumulus).

4) 레이더 자료 분석

레이더 자료는 광덕산 레이더 자료를 이용하였으며, 시딩고도와 관측고도가 6500 ft (1.95 km)로 동일한 것을 고려하여 1.95 km CAPPI 반사도 자료를 분석하였다. 시딩 전인 10시 30분부터 시딩 후 18시까지 광덕산 레이더 반사도 1.95 km CAPPI 영상을 나타내면 다음 Fig. 2.1.24와 같다.

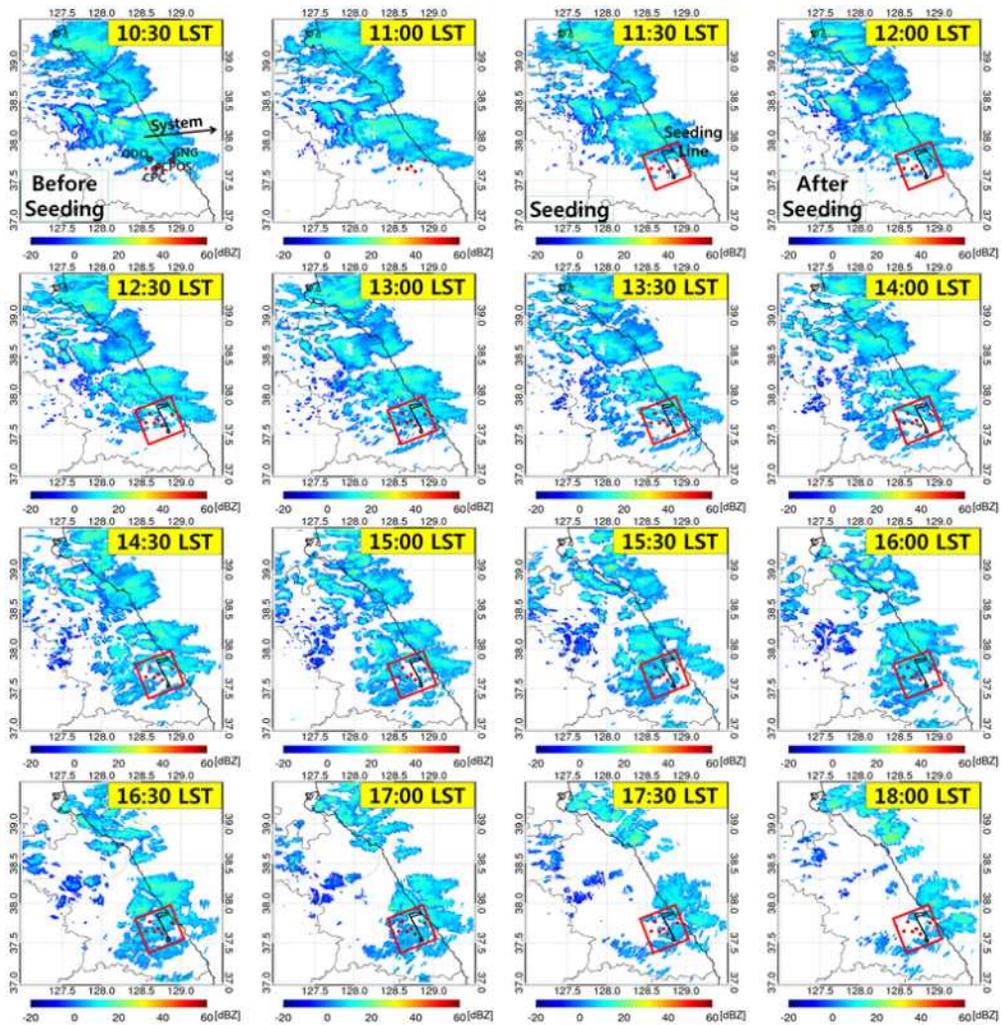


Fig. 2.1.24. Reflectivity images (1.95 km CAPPI) of Gwangdeoksan radar (Red box: Seeding line and near target area).

그림에서 알 수 있듯이, 시딩 전부터 대관령 주변 지역에 반사도 10 dBZ 내외의 자연 강수가 유입되어 있는 것으로 나타났고, 점차 북동쪽으로 이동하는 양상을 보였다. 시딩 기간과 시딩 후에는 시딩라인을 기준으로 풍상측에 위치한 오대산(ODO)과 풍하측에 위치한 강릉(GNG) 주변에서 10 dBZ 내외의 자연 강수가 영향을 준 것으로 나타났다. 모델 확산장 결과에서는 대관령 지역 전체적으로 시딩 후 시딩물질의 영향이 있는 것으로 나타났고, 레이더 반사도 영상과 비교하면 유입된 자연강수에 시딩효과가 혼합될 가능성이 있는 것을 예상할 수 있다. 18시 이후에는 강수 구름이 동해로 이동함에 따라 대관령 지역 관측소 주변에서 강수 영역이 점차 감소하는 것처럼 나타났다. 시딩효과를 상세하게 분석하기 위해 시딩 전후 시딩라인의 풍상측에 위치한 오대산(ODO)과 풍하측에 위치한 강릉(GNG) 지점에서 광덕산 레이더 반사도 변화를 다음 Fig. 2.1.25에 나타냈다.

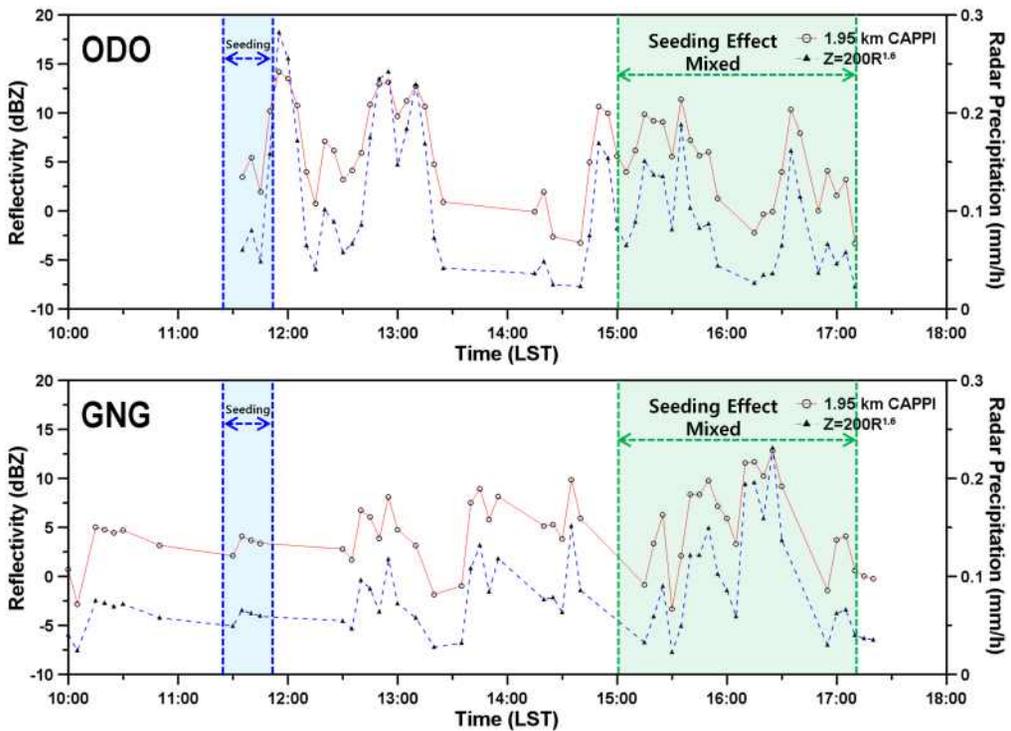


Fig. 2.1.25. Time series of Gwangdeoksan radar reflectivity (1.95 km CAPPI) and radar precipitation in the ODO and GNG.

그림에서 ○는 반사도, ▲는 레이더 강수 추정에 사용되는 $Z=2000R^{2.0}$ 식을 이용하여 산정한 강수 강도를 나타낸다. Fig. 2.1.25에서 알 수 있듯이, 시딩라인의 풍상측에 위치한 ODO에서는 시딩 기간 동안에는 자연 강수가 감지된 것으로 나타났다. 모델 확산장 결과에 따라 자연강수와 시딩효과가 혼합된 것으로 예상되는 15시부터 17시까지 반사도가 최대 11.4 dBZ로 나타났으며, 이때 레이더 강수 강도는 0.19 mm hr^{-1} 까지 증가한 것으로 나타났다. 반면, 시딩라인의 풍하측에 위치한 GNG에서도 시딩 전후 자연강수의 영향을 받은 것으로 나타났다. 시딩 이후 시딩효과와 혼합된 자연강수의 영향으로 16시 25분에 반사도는 최대 12.8 dBZ, 레이더 강수는 0.23 mm hr^{-1} 까지 증가한 것으로 나타났고, 이는 시딩라인의 풍상측에 위치한 ODO보다 반사도가 더 크게 나타난 것을 알 수 있다. 17시 30분 이후에는 두 개 관측소 지점 모두 강수 구름이 점차 동해로 진출함에 따라 반사도가 감지되지 않는 것으로 나타났다.

전반적으로 시딩효과의 영향을 받지 않았을 때도 두 지점에서 자연강수의 영향으로 반사도가 10 dBZ 이상으로 나타났기 때문에 시딩효과와 자연강수의 영향을 분류하기는 어려운 것을 알 수 있다. 그러나 모델 확산장 결과와 비교하면, 시딩효과 예상 시간대에 증가한 이러한 반사도가 확산된 시딩물질의 영향을 받은 것으로 예상할 수 있다.

5) 항공 구름 및 강수 입자 변화 확인

시딩 전과 후의 구름 미세물리 특성 변화를 분석하기 위해 고도 1.6~2.2 km (600 m)내의 구름 특성을 분석하였다. 여기서 1.6~2.2 km 고도는 시딩고도(1.9 km)를 기준으로 $\pm 300 \text{ m}$ (약 1,000 ft)로 정의하였다. Fig. 2.1.26은 기온 및 연직속도에 따른 CDP로 산출한 유효직경과 총 수농도의 산포도를 나타낸 것이다. 먼저, 기온에 따른 유효직경 그래프를 보면, 유효직경 $12 \mu\text{m}$ 이하의 작은 입자가 시딩 전 대비 시딩 중과 후에 증가하였다. 이때, 기온은 시딩 전 대비 후에 최대 약 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 증가하였다. 상승역($W>0$)은 시딩 전과 비교해 시딩 후에 증가하였다. 다음으로 입자 총 수농도는 시딩 전 대비 시딩 중과 후에 상대적으로 높은 농도($140\sim 300 \text{ cm}^{-3}$)가 관측되었고, 상승 및 하강역이 혼재하여 나타났다. 한편, 입자 총 수농도 140

cm^{-3} 이하에서는 주로 하강역($W < 0$)이 관측되며 시딩 중과 후에 일부 상승역($W > 0$)이 관측되었다.

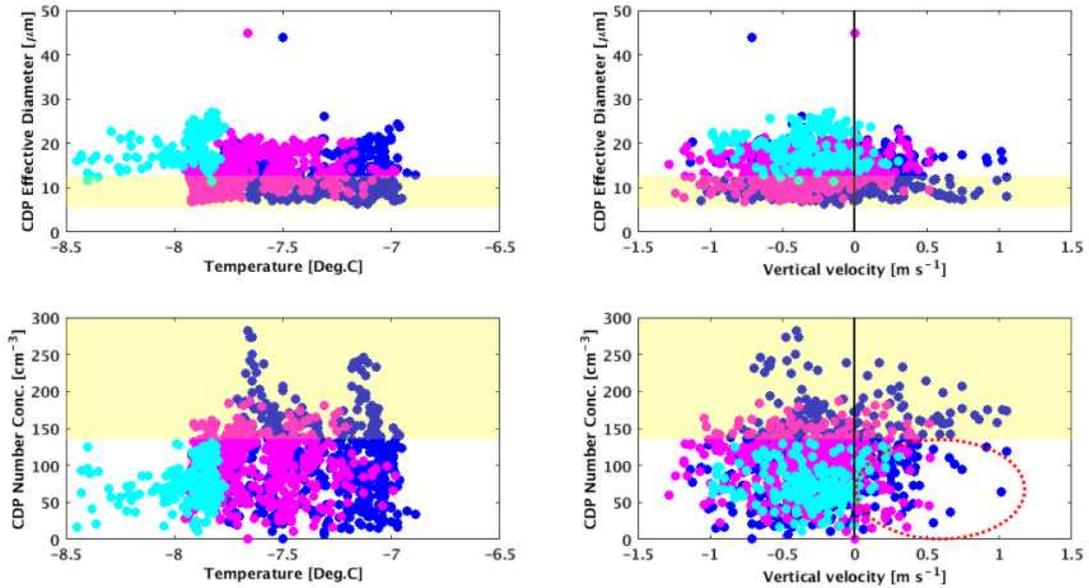


Fig. 2.1.26. Scatter plots of effective diameter (top) and total number concentration (bottom) calculated by CDP according to temperature (left) and vertical velocity (right). Before, during and after seeding are indicated by sky blue, pink and blue dots, respectively.

Table 2.1.5는 각 관측구간별 입자크기 스펙트럼이 서로 다른 CDP, CIP, PIP로 관측된 입자의 총 수농도의 평균값을 나타낸 것이다. 시딩 전과 후의 CDP로 관측된 구름입자(droplet)의 평균 수농도는 약 1.47배 증가하였다. 반면, CIP와 PIP로부터의 강수입자(drizzle~rain drop)는 각각 0.22배, 0.96배로 감소하였다. 장비별 입자 크기분포(Fig. 2.1.27)을 보면, CDP로부터의 구름입자 평균 크기분포는 직경 $\leq 13.5 \mu\text{m}$ 에서 시딩 전 대비 후의 수농도가 증가하였고, 그 이상에서는 감소하였다. CIP와 PIP로부터의 강수입자($D: 30 \sim 6,100 \mu\text{m}$)는 서로 overlap되는 범위에서 대체로 잘 일치하였다. 평균 크기분포에서 직경 $\leq 60 \mu\text{m}$ 의 수농도는 시딩 전 대비 시딩 후에

감소하였고, 그 이상의 직경에서는 유사하게 나타났다.

Table 2.1.5. Average and increase in total number concentration for each observation section (unit, CDP: cm^{-3} , CIP&PIP: L^{-1}).

Obs. sections	CDP	CIP	PIP
Before seeding (b)	74	7.84	0.26
During seeding (S)	98	1.39	0.21
After seeding (a)	109	1.69	0.25
Increase (b vs. a)	1.47	0.22	0.96

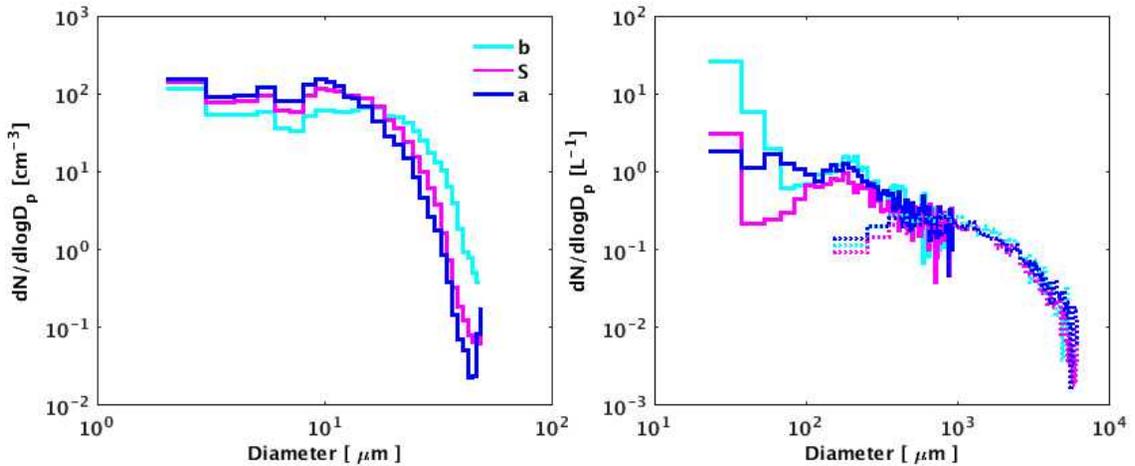


Fig. 2.1.27. Average particle size distribution from CDP (left, solid line), CIP (right, solid line) and PIP (right, dotted line).

6) 지상강수 증가 및 강수입자 변화 확인

고도별 반사도 변화 자료는 대관령 6개소에 있는 연직강우 레이더의 자료를 활용하였으며, 6개소 중 반사도 변화가 가장 유사하게 나타나는 CPOS, CPC, DRO, ODO지점을 중심으로 19시까지 분석하였으며, 붉은색 박스와 선을 이용하여 시딩 시간과 시딩 고도를 나타냈다(Fig. 2.1.28). 다음으로 4개소의 광학우적계를 통하여 입자의 크기변화와 입자 수의 변화를 확인하였다(Fig. 2.1.29).

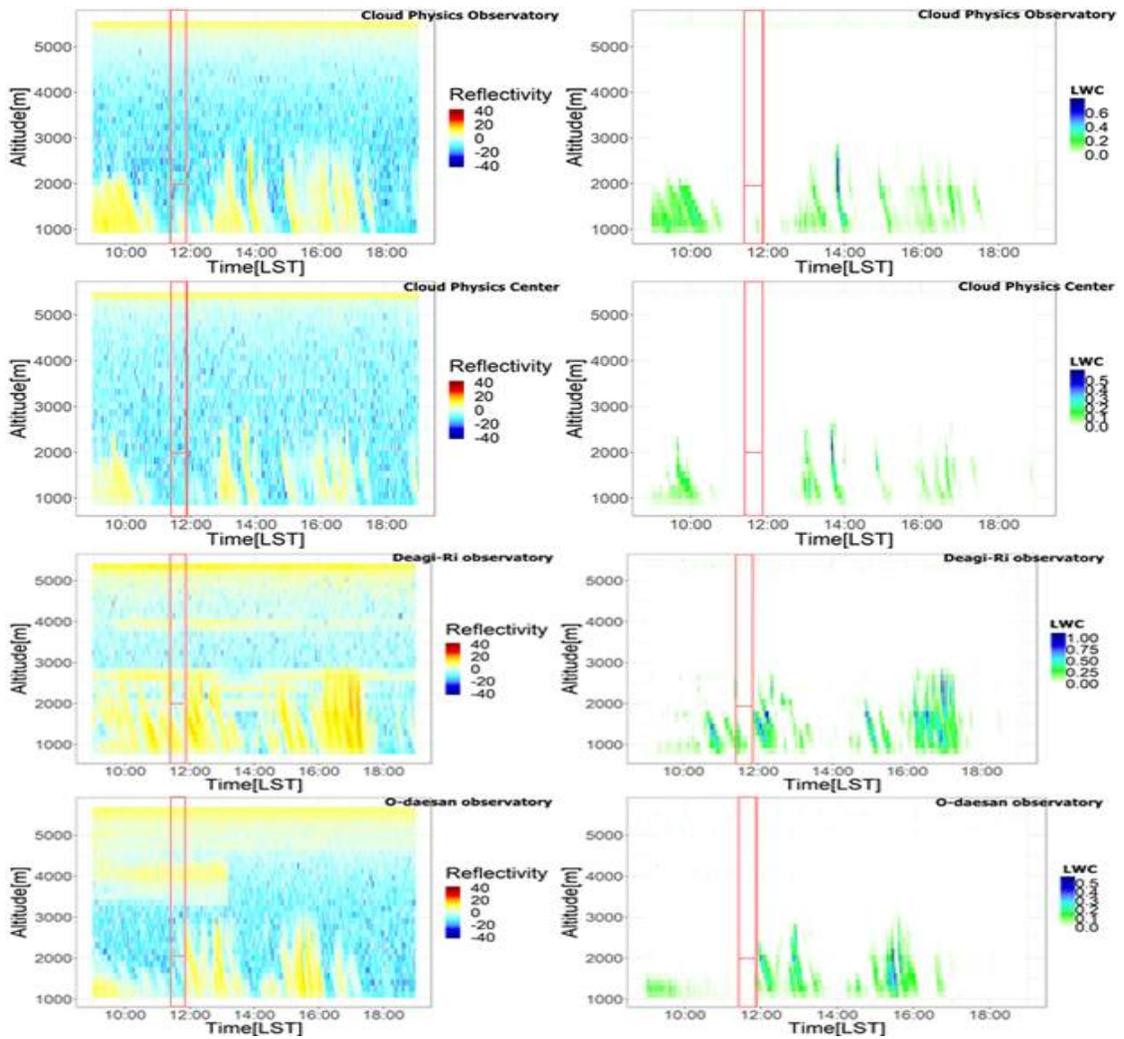


Fig. 2.1.28. Altitude reflectivity in micro rain radar and liquid water content from CPOS, CPC, DRO, ODO.

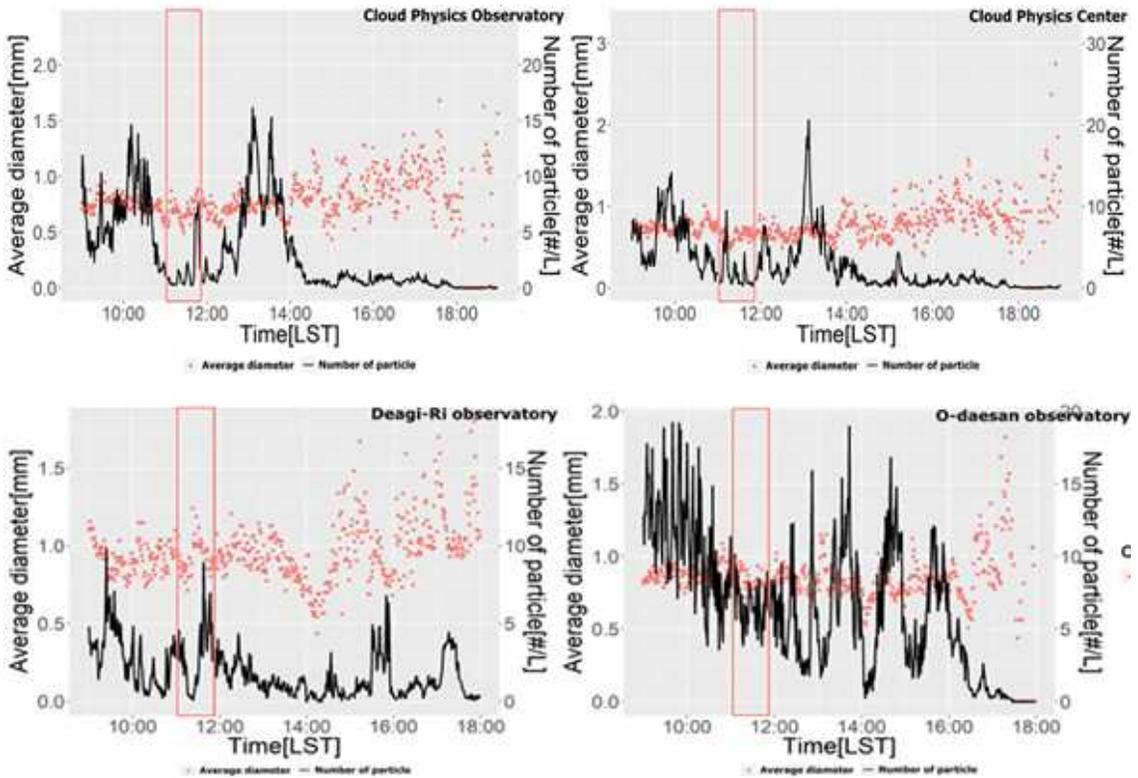


Fig. 2.1.29. Number of particle and average particle diameter in Parsivel2 in CPOS, CPC, DRO, ODO.

그림을 통하여 알 수 있듯이, 시딩 전부터 4개소 모두 반사도가 10 dBZ 내외의 자연 강수가 유입이 되어있었고 대기리 지점을 제외한 나머지 3개소는 11시 부근부터 반사도의 증가는 확인되지 않았고, 소강상태에 들어간 것으로 보인다. 하지만 시딩이 끝난 후인 13시 30분부터 반사도가 다시 증가하여, 시딩고도 아래에서는 자연 강수와 혼합되어 최대 22 dBZ까지 반사도가 증가하였으며, 동일한 고도에서 액체 수 함량의 변화도 함께 확인하였다. 액체 수함량은 최대 0.84 gm^{-3} 까지 증가한 것을 확인할 수 있었다. 입자 수 농도와 평균 입자의 크기 또한 4개소 모두 시딩 이후인 12시 55분부터 증가하여 1335 LST에 최대치를 찍은 후에 다시 감소한 것을 확인 할 수 있었다.

마지막으로 지상 강수를 확인하여 시딩 전·후로 강수량이 얼마나 있었는지를 확

인하기 위하여 6개소에 있는 이중형 강수량계를 통하여 강수량을 확인하였고, 신적설 또한 같이 확인하였다. Fig. 2.1.30은 6개소의 설치된 이중형강수량계에 기록된 시간당 강수량이며, 붉은색 박스부분은 시딩 이후에 나타난 강수량을 나타낸다.

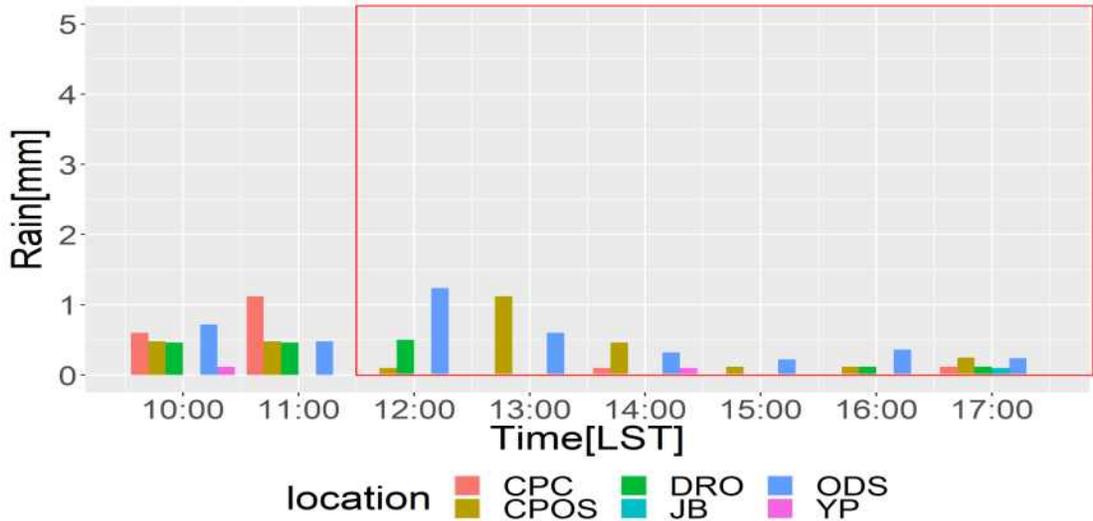


Fig. 2.1.30. Hour precipitation in CPOS and 5 point.

시딩 전과 후의 가장 큰 차이를 나타내는 곳은 오대산이었으며, 시딩 전 오대산은 0.7 mm의 강수량을 기록했지만 시딩 이후 1.2 mm까지 강수의 증가가 나타났다. 또한 구름물리 관측소에서도 0.5 mm이던 강수량이 최대 1.1 mm까지 강수가 증가된 것을 확인할 수 있었다. 다음으로 시딩 후인 12시 이후로 강수가 나타나지 않았다가 강수가 발생한 사례로 선도센터와 대기리, 용평과 진부에서 각각 0.1 mm의 강수를 관측할 수 있었다. 하지만 이 때 당시 온도가 평균 0 °C 내외로 따뜻한 상태여서 신적설로 기록되지 않았다. 하지만 오대산에서는 시딩 이후 레이저 적설계에 1 cm의 신적설을 확인하였으며 시딩물질의 영향을 받아 강수량 및 신적설로 기록된 것으로 예상할 수 있다.

7) 누적강수량 변화 모의

Fig. 2.1.31은 시딩으로 인해서 누적강수량 변화를 살펴보기 위해서 SEED와 NOSEED의 누적강수량의 차이를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 검은선은 시딩 라인을 의미하고 파란색 음영은 누적강수량 감소를 의미하고 붉은색 음영은 누적강수량 증가를 의미한다. 시딩물질이 확산된 영역으로 누적강수량 변화가 나타났으며, 특히 오대산 관측소(ODO)에서 시딩으로 인한 누적강수량 증가가 뚜렷하게 나타났으며, 대기리 관측소(DRO), 용평 관측소(YPO)에서 미세하게 증가하였다. 1700 LST에서 오대산 부근에서 최대 5.6 mm가 시딩으로 인해 누적강수량이 증가 하였다.

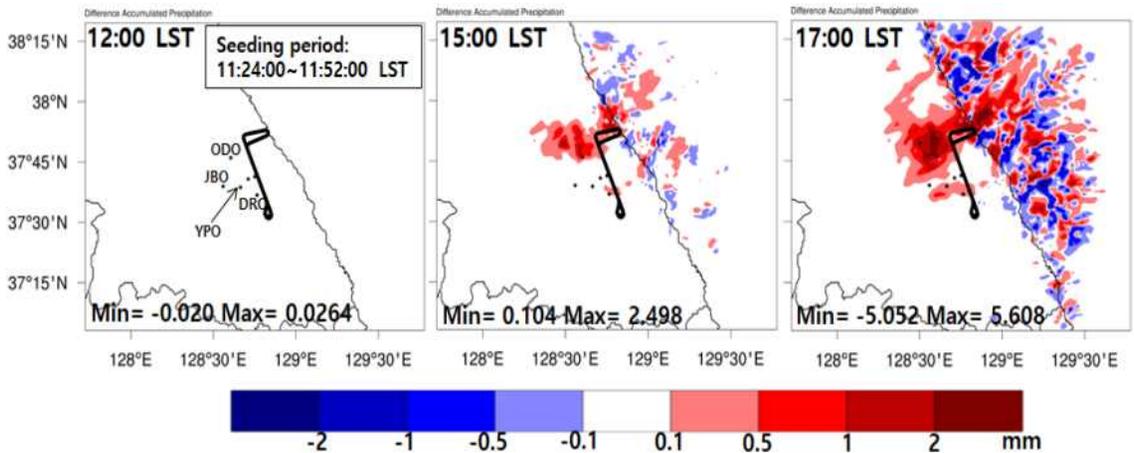


Fig. 2.1.31. Differences between the accumulated SEED and NOSEED precipitation (unit: mm) from seeding start time on 28 November 2019. Black line is seeding path.

제 2 절 위험기상 선행관측 및 관측전략 기반연구

기상항공기에는 태풍, 집중호우, 대설과 같은 위험기상 현상의 특성을 이해하고, 현업예보 지원을 위해 드롭존데, 해상풍 라디오미터(Stepped Frequency Microwave Radiometer, SFMR), 그리고 G밴드 수증기 라디오미터(G-band water Vapor Radiometer, GVR)가 탑재되어 있다. 이들 장비는 위험기상 현상과 관련된 연직기상정보(vertical profile), 해상풍속과 강우강도, 그리고 상층 수증기량을 관측할 수 있다. 관측예보연구과에서는 이들 장비를 활용하여 위험기상 선행관측을 수행하고, 기상항공기 관측자료의 수집·저장·표출과 운항 및 장비관리가 가능한 운영관리시스템을 개발하여 운영하고 있다. 본 보고서에서는 위험기상 현상에 대한 수치모델의 예측성 향상연구 결과를 기술하였고, 운영관리시스템의 개발 및 개선 현황에 대하여 다루었다. 마지막으로, 기상항공기 관측자료를 활용한 대기-해양 상호작용에 관하여 기술하였다.

1. 기상항공기 드롭존데 관측자료의 수치예측 영향분석

기상항공기 드롭존데 관측자료의 기상청 현업수치예보모델 입력체계가 2018년에 구축되었으며, 평창동계올림픽 기간 동안 초단기수치예측모델(UM VDAPS)을 이용한 자료동화 민감도 실험을 수행하였다(국립기상과학원, 2018a; 국립기상과학원, 2018b). 이들 연구에서는 드롭존데 관측자료가 적용되어, 3-8시간 예측기온과 예측 풍속의 RMSE가 각각 0.2~0.5와 0.5~1 개선됨을 보였다. 본 연구에서는 2019년 여름철의 위험기상 현상(집중호우와 태풍)에 대하여 강수예측 영향분석을 수행하였다.

(1) 실험설계 및 분석방법

기상항공기는 소형항공기이기 때문에 태풍과 집중호우와 같은 위험기상 현상을 직접 관측하기에는 어려움이 있다. 따라서 집중호우 발생 예상지역 또는 태풍 이동 예상 경로에서 선행관측을 수행하여야 한다. 2018년에 구축된 초단기수치예측모델의 입력체계가 가지는 예측시간의 한계를 극복하기 위하여, 본 연구에서는 48시간의 예측시간을 가지는 국지예보모델(UM LDAPS)을 활용하였다.

실험에 사용된 LDAPS 모델의 버전은 10.1이며, 가변격자체계의 도메인으로 구성

되어 있다(Fig. 2.2.1). 가변격자 영역을 포함한 격자 크기는 744x928이고, 해상도는 4 km이다. 가변격자 영역보다 모델 중심 쪽에 위치한 고정격자 영역은 크기와 해상도는 각각 622x810과 1.5 km이고, 연직으로는 70개 층을 가진다. 드롭존데 관측자료는 3차원 변분 자료동화(3DVAR)기법을 이용하여 적용하였고, 모델구동에 적용된 도메인과 물리과정 등의 옵션은 Fig. 2.2.1에 자세히 기술하였다.

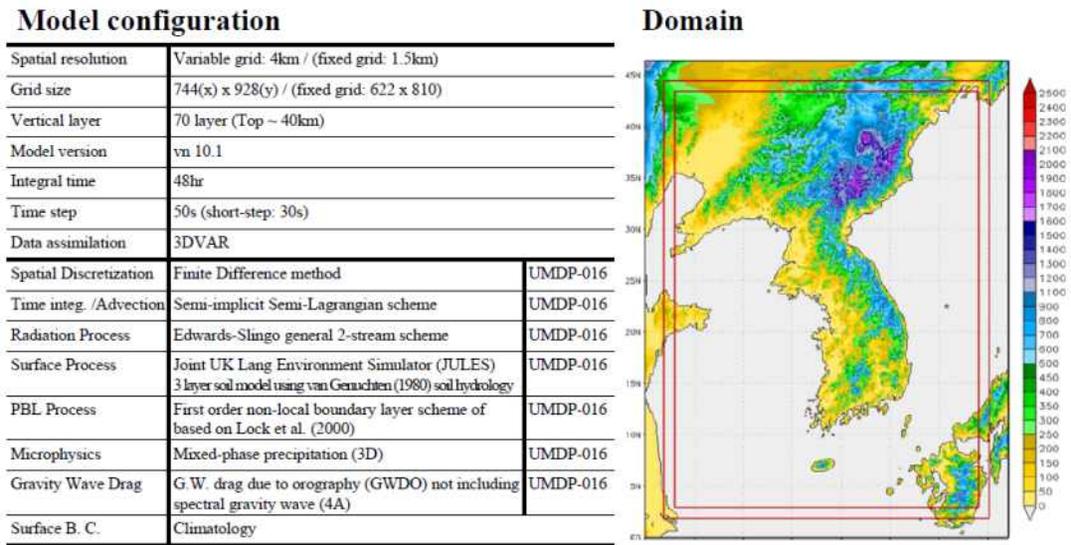


Fig. 2.2.1. Numerical model configuration and domain for dropsonde data assimilation experiment.

2019년 여름철(5~9월) 동안 드롭존데를 이용한 위험기상 선형관측은 총 12회가 수행되었다(Table 2.2.1). 집중호우와 태풍 사례가 각각 6회씩이며, 관측은 서해상, 제주도 남서해상, 그리고 동해상에서 이루어졌다. 각 사례에 따라 드롭존데의 낙하 개수에는 차이가 있으며, 이는 관측환경(낙하 고도 및 공역확보시간 등)에 기인한다. 드롭존데는 15 KST를 기준으로 낙하하였고, 서해상, 제주도 남서해상, 그리고 동해상의 드롭존데 낙하 고도는 각각 14,000 ft, 20,000 ft, 그리고 30,000 ft이다.

드롭존데 관측자료의 수치예측 영향을 분석하기 위하여, 드롭존데 자료동화 미적용(CTL) 실험과 적용(EXP) 실험을 각각 수행하였다. 즉, CTL실험 12회, EXP실험

12회를 수행하였고, 12개 사례에 대한 실험결과를 비교·분석하였다. 분석을 위해서 Threat Score(TS), Probability of Detection(POD), 그리고 False Alarm Rate(FAR)를 활용하였고, 각 지수의 계산 방법은 Table 2.2.2에 나타내었다. 각 수치모델 실험의 강수 예측결과와 기상청 53개 주요 관측소의 12시간 누적강수량을 이용하여 각 지수(score)를 계산하였고, CTL과 EXP의 차이로 강수 예측성 영향을 분석하였다.

Table 2.2.1. List of dropsonde observation cases in 2019.

Case	Date	Launched area	# of dropsonde	Remark*
RN-1	5. 17.	Yellow sea	8	204.5 mm/12 hr
RN-2	5. 26.	Yellow sea	8	60.0 mm/12 hr
RN-3	6. 26.	Southwest sea of Jeju island	4	145.0 mm/12 hr
RN-4	7. 10.	Yellow sea	9	104.5 mm/12 hr
RN-5	7. 30.	Yellow sea	14	41.0 mm/12 hr
RN-6	9. 4.	Yellow sea	6	117.5 mm/12 hr
TP-1	8. 5.	Southwest sea of Jeju island	10	8 th FRANCISCO
TP-2	8. 6.	East sea	8	8 th FRANCISCO
TP-3	8. 9.	Southwest sea of Jeju island	16	9 th LEKIMA
TP-4	8. 10.	Yellow sea	17	9 th LEKIMA
TP-5	9. 5.	Southwest sea of Jeju island	7	13 th LINGLING
TP-6	9. 6.	Yellow sea	4	13 th LINGLING

* AWS maximum rain rate or name of typhoon

Table 2.2.2. Verification indices for dropsonde data assimilation.

		Observation (AWS)		$TS = \frac{H}{H + F + M}$
		Yes	No	
Forecast (EXP, CTL)	Yes	H (Hit)	F (False Alarms)	$POD = \frac{H}{H + M}$
	No	M (Miss)	C (correct negatives)	$FAR = \frac{F}{H + F}$

(2) 집중호우 사례

드롭존데 관측자료의 수치모델 예측결과를 비교하기에 앞서, 3차원 변분 자료동화과정이 적용된 초기장의 증분을 살펴보았다. Fig. 2.2.2는 6월 26일 집중호우 사례의 15 KST(06 UTC) 모델 초기장의 925, 850, 500 hPa 상당온위 증분이다. 여기서, 빨간색 동그라미 과선은 드롭존데 관측자료가 적용된 영역을 의미한다. 드롭존데 관측자료가 적용되지 않은 CTL에서는 주변 지역과 유사한 증분을 확인할 수 있다. 하지만, 드롭존데 관측자료가 적용된 EXP에서는 약 200 km의 반경을 가지는 증분 영역이 나타난다. 이러한 증분반경은 모델의 자료동화 설정에서 유효반경과 관련이 있다.

6월 26일 사례의 경우, 925와 850 hPa의 상당온위 증분 차이가 제주도 남서해상에서 나타났다. 약 0.1-1.0 K의 양의 증분을 확인할 수 있고, 500 hPa에서는 0.1-0.5 K의 양의 증분을 보인다. 그보다 상층인 300 hPa에서는 뚜렷한 차이가 나타나지 않았으며, 이는 해당 사례의 드롭존데 낙하 고도가 20,000 ft(~6 km)였기 때문이다.

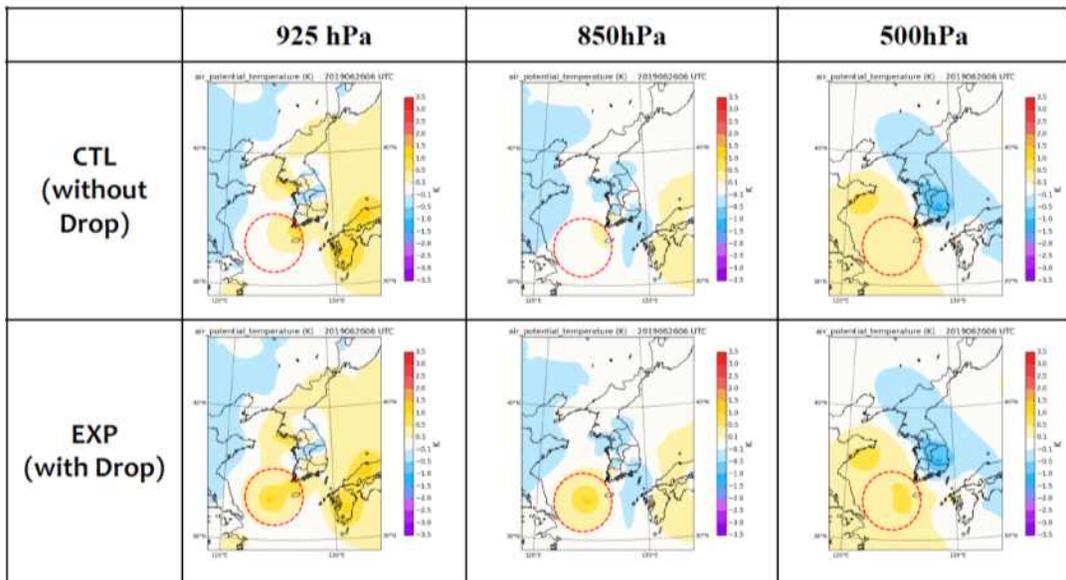


Fig. 2.2.2. Increment fields of numerical model simulation at initial time according to dropsonde data assimilation at 26 Jun 2019 heavy rain case.

드롭존데 관측자료 자료동화의 강수예측 영향을 분석하기 위하여, 집중호우 6개 사례의 AWS 12시간 누적강수량, 수치모델(CTL, EXP) 12시간 예측 강수량, 그리고 수치모델 실험 간의 차이(EXP-CTL)를 제시하였다(Fig. 2.2.3와 Fig. 2.2.4). 여기서, 좌측 AWS 강수분포의 빨간 파선의 영역은 드롭존데 관측영역을 의미한다. 각 사례의 수치모델 결과와 AWS의 강수분포 경향은 유사함을 확인하였다. 드롭존데 자료동화에 의한 전반적인 강수분포 변화는 크지 않았고, 드롭존데 낙하지점(해상)에서부터 강수량 변화가 나타나고 있는 것을 확인하였다. 이는 초기장의 증분변화에 의해 수증기량 또는 바람의 변화에 영향인 것으로 생각된다.

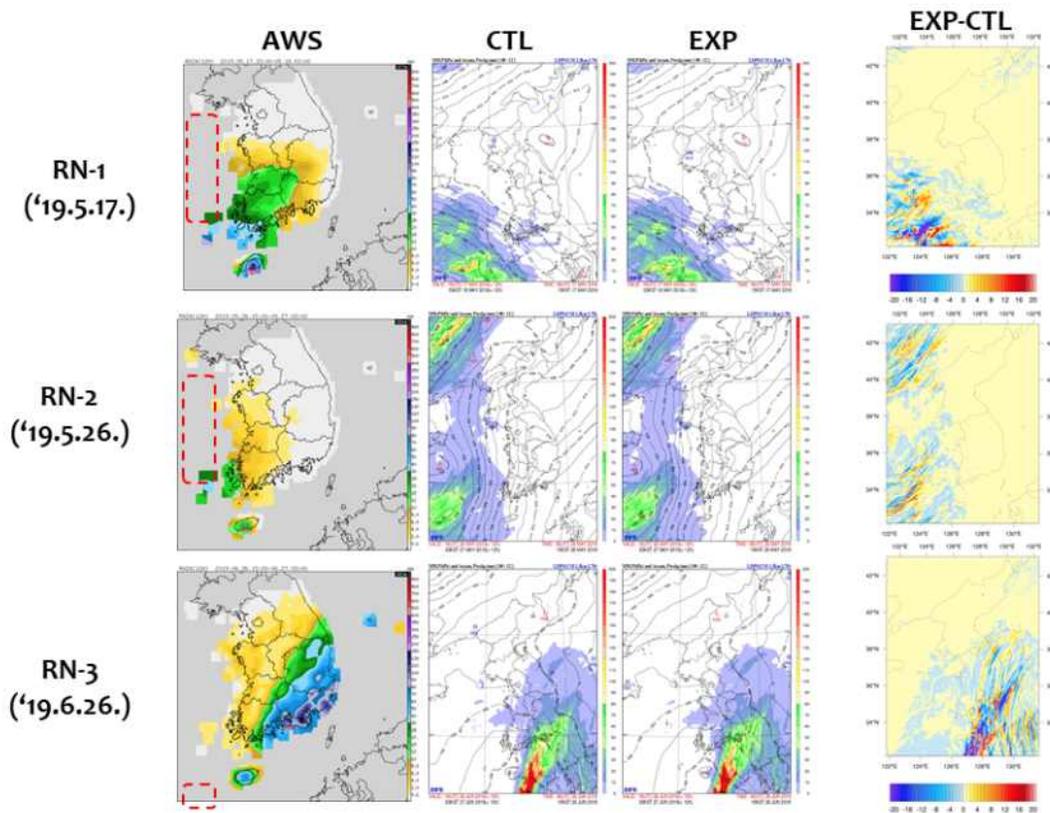


Fig. 2.2.3. Distributions of precipitation amount estimated by AWS observation data(left), numerical model output(middle), and those difference between EXP and CTL for three rainfall cases as RN-1, RN-2, and RN-3.

나머지 3개 강수 사례도 앞서 언급된 사례와 유사한 특징을 보였다(Fig. 2.2.4). 전반적인 강수분포의 변화는 나타나지 않았지만, 드롭존데 관측영역 부근에서부터 강수량 변화가 나타났다. 6개 사례의 특징을 종합하면, 드롭존데 관측자료 자료동화가 강수량의 전반적인 분포변화에 미치는 영향은 적었다. 또한, 1 mm이하의 약한 강수량 감소 영역(Fig. 2.2.3과 Fig. 2.2.4 참조)이 가장 넓게 나타났으며, 드롭존데 낙하지점 부근에서는 ± 20 mm이상의 강수량 변화를 확인하였다.

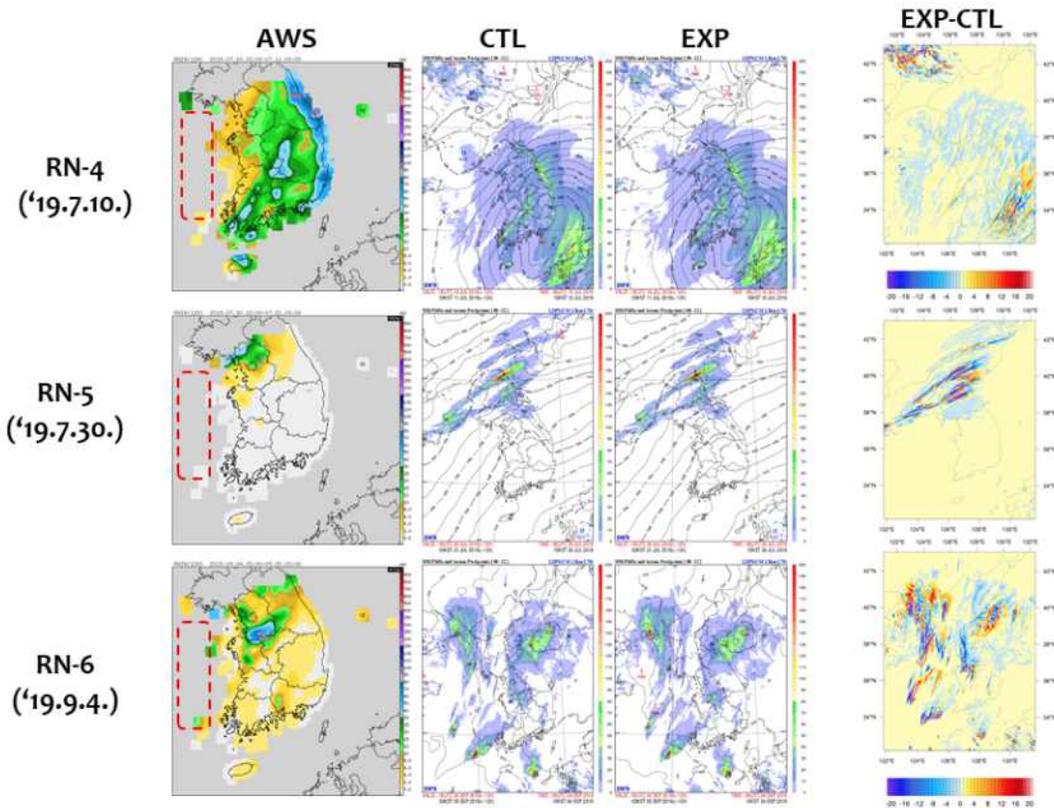


Fig. 2.2.4. Same as Fig. 2.2.3 except for three rainfall cases as RN-4, RN-5, and RN-6.

앞서 강수분포를 확인한 6개 사례의 강수예측 정확도 검증을 위해 TS, POD, FAR을 이용하였다(Table 2.2.2). 검증을 위해서 0.1 mm에서부터 0.5, 1, 5, 10 그리고 20 mm까지 총 6개의 임계값을 설정하였다. Fig. 2.2.5는 AWS 강수량을 이용한

집중호우 6개 사례의 드롭존데 미적용(CTL)과 적용(EXP) 실험의 강수검증 결과이다. 먼저, 강수예보가 맞을 확률을 의미하는 TS와 POD는 1에 가까울수록 강수예측 정확도가 높은 것을 의미한다. TS의 변화는 크지 않지만, 0.5와 1 mm에서 약 0.02 개선됨을 확인하였고, 나머지 강수 임계치에서는 뚜렷한 변화가 나타나지 않았다. POD는 1 mm이하의 약한 강수에서 약 0.02 개선되었지만, 그보다 강한 강수에서는 0.01 정도 낮아졌다. FAR은 강수예보가 틀릴 확률로서 0에 가까울수록 강수예보가 틀리지 않음(정확도가 높아짐)을 의미한다. FAR은 0.5, 5, 20 mm에서 약 0.03가량 개선됨을 확인할 수 있었다. 즉, 드롭존데 관측자료가 자료동화 됨으로써 강수예측이 틀릴 확률이 개선됨(낮아짐)을 의미한다.

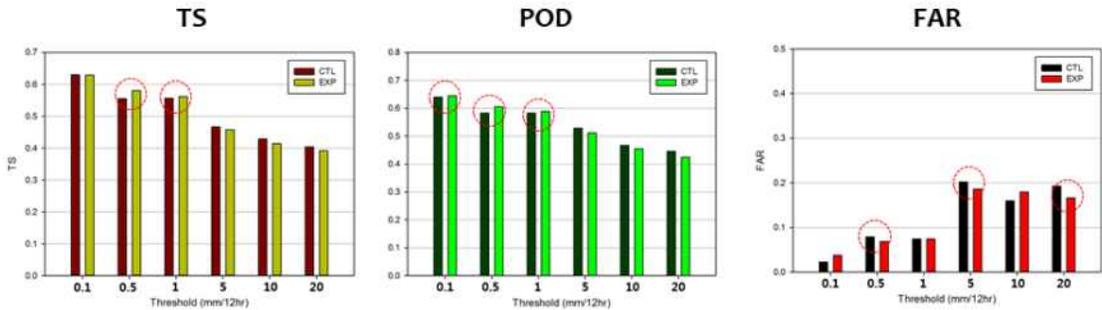


Fig. 2.2.5. Averaged values of verification for numerical model data assimilation experiments as CTL(without dropsonde) and EXP(with dropsonde).

(3) 태풍 사례

다음으로 태풍 사례에 대한 드롭존데 관측자료동화의 영향을 살펴보기 위하여 8호 태풍인 프란시스코 사례의 초기장 증분을 살펴보았다(Fig. 2.2.6). 해당 사례의 경우, 태풍이 한반도 남부지방을 관통하여 동해안에 호우 및 풍랑주의보가 발효된 사례로, 드롭존데 관측은 동해에서 수행되었다. 8월 6일 15 KST(06 UTC) 모델 초기장의 925, 850, 500 hPa 상당온위 증분을 살펴보면, 호우 사례에서 언급한 것과 같이 드롭존데 관측자료가 적용된 EXP에서 약 200 km의 반경을 가지는 증분영역이 나타난다. 925와 850 hPa에서는 약 0.1-0.5 K의 양의 증분이 나타나고, 500 hPa에서는 0.1-1.0 K의 양의 증분을 보인다. 앞서 6월 26일 호우 사례에서는 500 hPa의 변

화가 상대적으로 적었지만, 이 사례에서는 오히려 변화가 컸다. 이는 드롭존데 낙하 고도가 30,000 ft(~9 km)로 6월 26일 사례(20,000 ft) 보다 상대적으로 높기 때문이다.

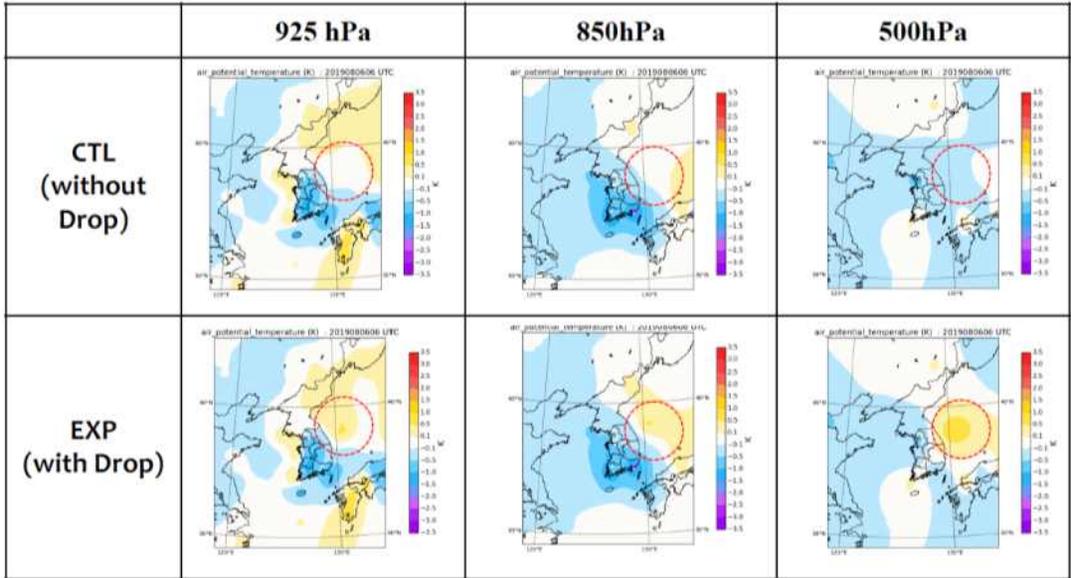


Fig. 2.2.6. Increment fields of numerical model simulation at initial time according to dropsonde data assimilation at 6 Aug 2019 typhoon (8th FRANCISCO) case.

추가적으로, 본 사례의 바람 증분을 살펴보았다. 동서바람은 약 200 km반경으로 0.5에서 2.0 m/s의 음의 증분이 나타났고, 남북은 0.5에서 1.0 m/s의 양의 증분이 나타남을 확인하였다. 다른 변수에 비해 동서바람의 변화가 뚜렷하게 나타났는데, 이는 태풍 이동경로 북동쪽에서 관측된 드롭존데 관측자료의 영향으로 동해상으로 유입되는 서풍 또는 북풍이 강화되었음을 의미한다(Fig. 2.2.7 참조).

드롭존데 관측자료 자료동화의 강수예측 영향을 분석하기 위하여, 태풍 6개 사례의 AWS 12시간 누적강수량, 수치모델(CTL, EXP) 12시간 예측 강수량, 그리고 수치모델 실험 간의 차이(EXP-CTL)를 제시하였다(Fig. 2.2.7과 Fig. 2.2.8). 여기서, 좌측 AWS 강수분포의 빨간 파선의 영역은 드롭존데 관측영역을 의미한다. 앞서 언급한 것과 같이 기상항공기를 활용하여 태풍의 직접관측에는 한계가 있어서 태풍

사례는 태풍 상륙 1일 또는 2일 전에 관측을 수행하였다. 집중호우 사례와 유사하게 드롭존데 낙하지점(해상)에서부터 강수량 변화가 나타나고 있는 것을 확인할 수 있었고, 이는 드롭존데 관측자료 자료동화에 의한 초기장 증분 변화에 영향인 것으로 생각된다.

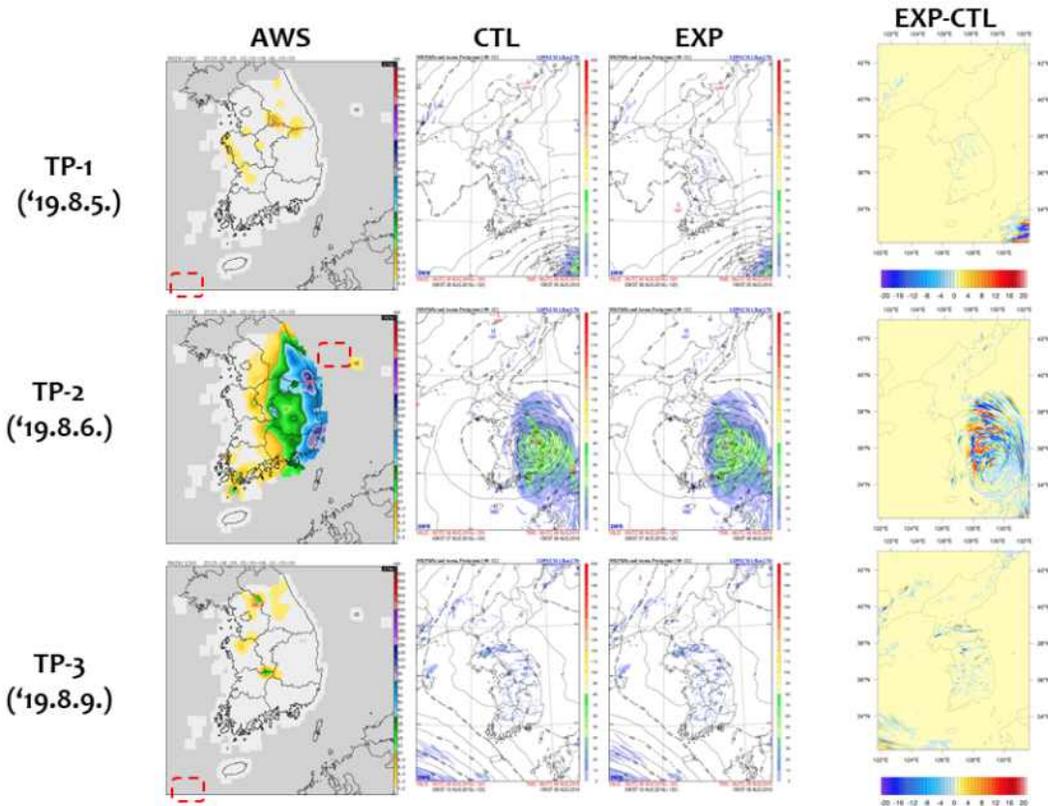


Fig. 2.2.7. Distributions of precipitation amount estimated by AWS observation data(left), numerical model output(middle), and those difference between EXP and CTL for three rainfall cases as TP-1, TP-2, and TP-3.

6개 사례의 종합적인 특징을 살펴보면, 앞서 집중호우 사례에서 나타난 특징과 같이 전반적인 강수분포의 변화는 나타나지 않았지만, 드롭존데 관측영역 부근에서부터 강수량 변화가 나타났다. 그리고, 1mm이하의 약한 강수량 감소 영역(Fig. 2.2.7

과 Fig. 2.2.8 참조)이 가장 넓게 나타났으며, 드롭존데 낙하지점 부근에서는 ± 20 mm이상의 강수량 변화를 확인하였다.

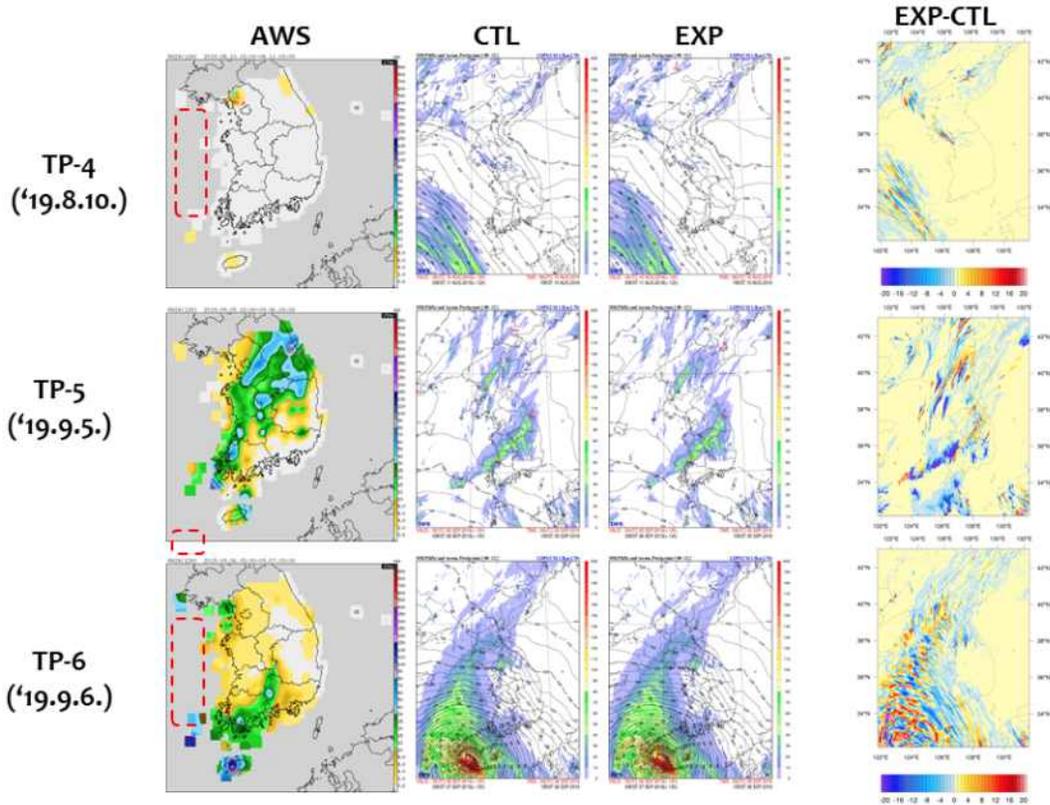


Fig. 2.2.8. Same as Fig. 2.2.7 except for three rainfall cases as TP-4, TP-5, and TP-6.

다음으로, 태풍 사례의 강수예측 정확도 검증을 위해 TS, POD, FAR을 이용하였고, 검증을 위해 사용한 6개 임계값(0.1, 0.5, 1, 5, 10, 20 mm)은 집중호우 사례와 같다. Fig. 2.2.9는 AWS 강수량을 이용한 태풍 6개 사례의 드롭존데 미적용(CTL)과 적용(EXP) 실험의 강수검증 결과이다. 1에 가까울수록 강수예측정확도가 높음을 의미하는 TS와 POD를 살펴보았다. 0.1~1 mm에서는 TS가 약 0.03 개선, 10~20 mm에서는 TS가 약 0.04 개선되었다. 즉, 대부분의 TS값이 0.03 가량 개선됨을 알 수 있었다. 그러나, POD는 20 mm에서만 0.03 개선되었다. 다음으로, 0에 가까울수록 강수예보가 틀릴 확률이 줄어들음을 의미하는 FAR에서는 뚜렷한 개선 효과를 확인할 수

있었다. 모든 강수 임계값에서 0.03~0.05의 개선 효과가 나타나고 있었다. 즉, 드롭존데 관측자료가 자료동화 됨으로써 강수예측이 틀릴 확률이 개선됨(낮아졌음)을 의미한다.

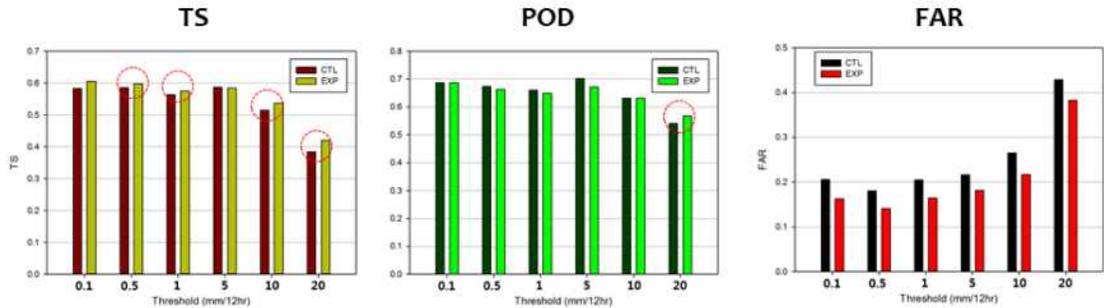


Fig. 2.2.9. Same as Fig. 2.2.5 except for Typhoon cases.

(4) 요약

Table 2.2.3은 앞서 조사한 집중호우와 태풍 사례의 드롭존데 자료동화 적용에 대한 검증지수와 강수예측 개선율 결과이다. 여기서, 개선율은 규준실험(CTL)대비 개선율을 의미한다. 전반적으로 약 5~10% 개선됨을 알 수 있고, FAR의 개선 효과가 15와 12%로 높게 나타났다. 즉, 드롭존데 관측자료의 자료동화를 통해 강수예측이 틀릴 확률이 뚜렷하게 낮아짐(개선됨)을 확인할 수 있었다.

Table 2.2.3. Verification result of dropsonde data assimilation and improvement rate for heavy rain and typhoon cases.

Case	Index	Verification result		Improvement rate
		CTL	EXP	
Heavy Rain	Threat score(TS)	0.55	0.58	5 %
	Probability of detection(POD)	0.58	0.61	5 %
	False alarm rate(FAR)	0.19	0.16	15 %
Typhoon	Threat score(TS)	0.38	0.42	11 %
	Probability of detection(POD)	0.54	0.57	6 %
	False alarm rate(FAR)	0.43	0.38	12 %

2. 기상항공기 관측자료 품질관리 기술 개발 및 운영관리시스템 개선

국립기상과학원 관측예보연구과는 기상항공기 관측자료의 수집·저장·표출 및 국내 유관기관 공유를 위해 기상항공기 운영관리시스템(이하 운영관리시스템)을 운영 중이다. 운영관리시스템은 관측자료 관리뿐만 아니라, 운항일정, 정비이력, 관측장비 유리관리 이력 등 기상항공기와 관련된 다양한 기능을 제공한다. 이러한 운영관리시스템은 웹페이지 기반으로 구축되어 운영 중이다. 본 항에서는 운영관리시스템의 관측자료 품질관리 개선 및 유관기관 공유를 위한 보안자료전송 구현 등 개선결과에 관하여 기술하였다.

(1) 품질관리 기술 개발

기상항공기로부터 관측된 자료는 M300을 통해 수집·저장·표출이 이루어진다(양효진 등, 2019). M300으로 수집된 자료는 기상항공기 자료 서버를 거쳐 운영관리시스템에 표출된다(Fig. 2.2.10). 기상항공기 자료 서버에서는 바이너리(binary) 형식의 원시자료(Level 0)를 ADPAA(Airborne Data Processing And Analysis) 소프트웨어 패키지를 이용하여 아스키(ASCII, Level 1) 형식으로 변환하고, 구름 및 강수 입자와 관련된 이미지(image)를 생성한다.

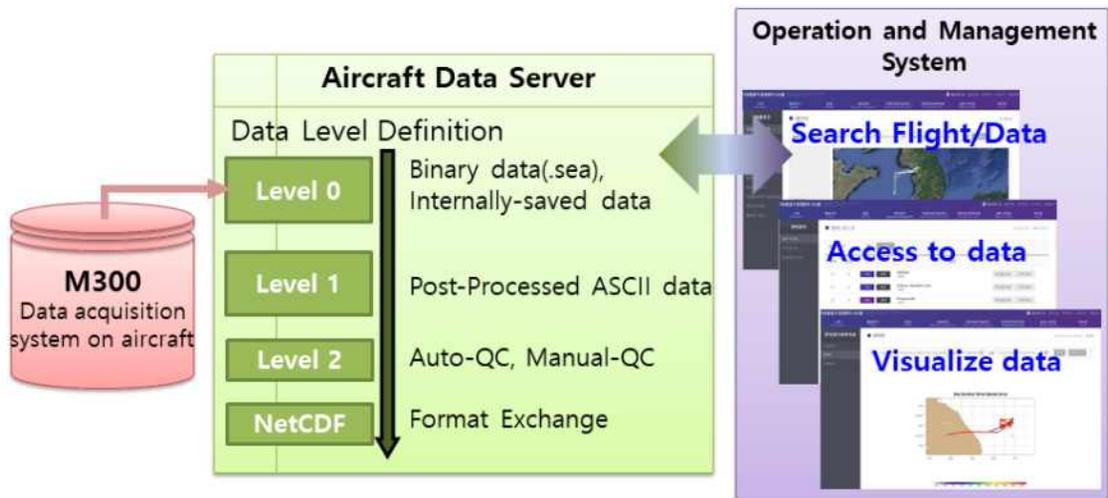


Fig. 2.2.10. Atmospheric research aircraft observation data process.

ADPAA를 통해 생산된 아스키형식의 자료는 품질관리 과정을 거쳐 Level 2 자료로 가공된다. 품질관리 과정은 기본적으로 관측장비의 매뉴얼에 기초하여, 한계치 및 이상값 제거 등이 이루어지고, 자동품질관리(Auto QC)와 수동품질관리(Manual QC)로 구분된다.

Fig. 2.2.11은 기상항공기에 탑재된 위험기상 관측장비(드롭존데와 GVR)의 자동 품질관리 알고리즘이다. 드롭존데 품질관리는 일차적으로 미국 국립대기과학 연구소(National Center for Atmospheric Research, NCAR)에서 개발된 ASPEN(Atmospheric Sounding Processing ENvironment) 프로그램을 이용한다 (Martin, 2009). 이 프로그램에는 각 센서의 한계치와 이상 값을 제거하고, 관측자료의 연속성 검사 등 총 24단계의 품질관리가 이루어진다. 이 과정을 거쳐 EOL²⁾형식의 아스키 자료를 산출하게 되며, 이후 정확한 바람 자료의 산출 및 제공을 위해 GPS 에러 검사를 수행한다. 또한, GPS의 신뢰가 낮은 자료를 제거하는 과정을 거친다.

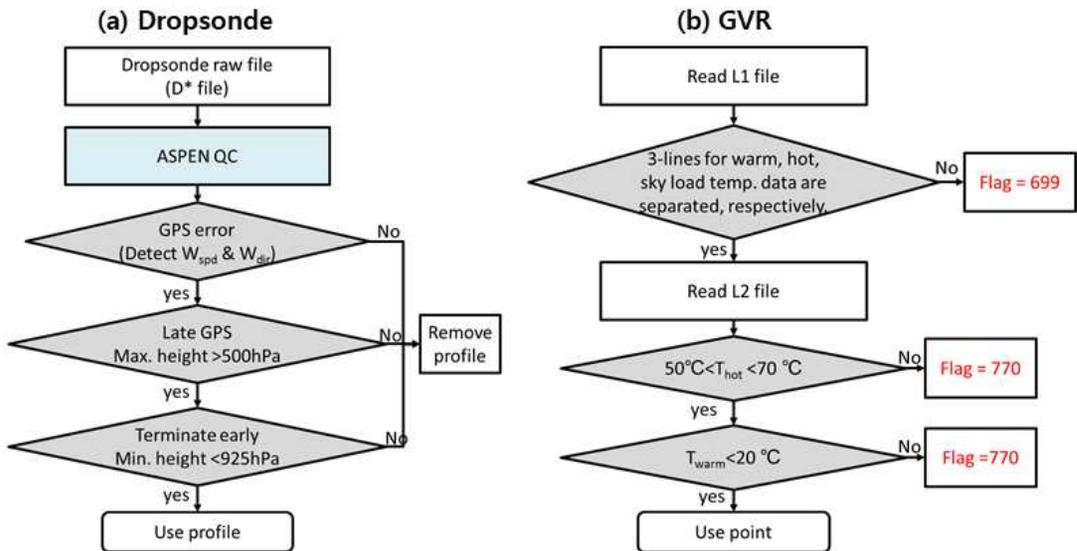


Fig. 2.2.11. Quality control flowchart for (a) dropsonde and (b) GVR.

2) EOL(Earth Observation Laboratory): 미국 NCAR의 지구관측연구 그룹에서 개발한 ASPEN 품질관리 프로그램의 산출물 형식

GVR의 Level 1 자료의 첫 번째 품질관리 과정은 다음과 같다. GVR의 4개의 채널(183 ± 1 , ± 3 , ± 7 , ± 14)에서 측정된 전력이 3개의 선으로 구분이 되는지를 확인한다. GVR은 Sky, Hot, Sky, Warm 순서로 각각 2초마다 관측을 수행하는데, 이러한 결과로 3개의 선이 형성되는지를 확인한다(국립기상과학원, 2019a). 이러한 과정을 거쳐 Level 2 자료를 생산하고, 두 가지 온도(Hot, Warm) 값을 확인하여 기준치를 벗어난 자료는 제거하게 된다. 여기서 Hot 온도의 기준치는 $50 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ 이고, Warm 온도는 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 보다 낮아야 한다.

다음으로, 구름물리와 환경기상 관측장비 중 하나인 CIP와 Nephelometer의 자동 품질관리 과정이다. 각 장비로 취득된 원시관측(raw) 자료는 4단계의 품질관리 과정을 거치게 된다. CIP의 경우, 1, 64, 그리고 32 다이오드 전압값이 5V 이상 인지 확인한 후, LWC hotwire와 Laser current의 전압 및 암페어를 확인한다. Nephelometer의 경우, 장비 상태메시지 및 자료의 신뢰도 검사를 수행하게 된다. 여기서, 각 자료에 Flag를 남겨 관측자료가 제거된 이유의 확인이 가능하다. Flag 699는 기계적인 문제로 발생원인이 명확하지 않음을 의미한다. Flag 771은 범위 이상의 값 또는 한계치가 포함된 경우를 의미한다. Flag 781은 탐지 가능한 수준보다 낮은 값을 나타낸다(국립기상과학원, 2019b; 국립기상과학원, 2019c).

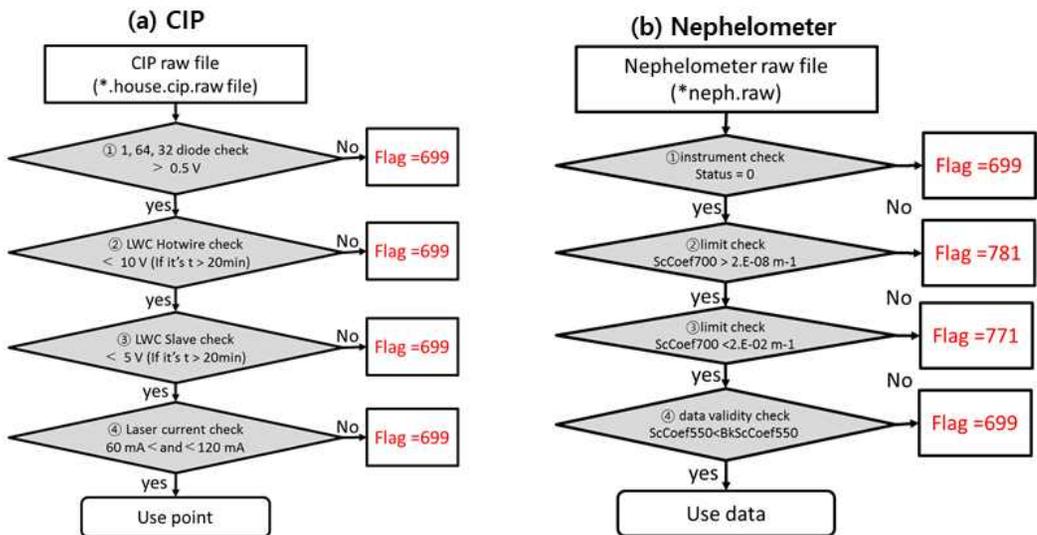


Fig. 2.2.12. Same as Fig. 2.2.11 except for CIP and Nephelometer.

앞서 언급된 장비 외에도, 기상항공기에 관측된 다양한 장비의 교정 및 품질관리 방법을 개발하여 적용하였다. 각 관측장비의 실험목적은 크게 4가지로 분류하여 기술노트를 발간하였으며, 분류결과는 다음과 같다. ①위험기상 선행관측 장비(국립기상과학원, 2019a), ②구름물리 관측 및 기상조절 실험 장비(국립기상과학원, 2019b), ③환경 및 온실가스 관측장비(국립기상과학원, 2019c), 그리고 ④기본기상관측장비(국립기상과학원, 2019d). 자세한 내용은 각 기술노트를 참고하길 바란다.

이 외에도, 운영관리시스템을 이용한 수동품질관리 기술을 개발하였다. 운영관리시스템을 이용하여 각 부서의 장비관리자는 관측장비별 관측요소의 수동품질관리가 가능하다. Fig. 2.2.13은 해상풍 관측장비(SFMR)의 품질관리 예시이다. 여기서, 수동품질관리 과정에 대한 이해를 돕기 위하여 자동품질관리가 이루어지지 않은 원시자료(raw)에 대한 수동품질관리 과정을 예시로 제시하였다. 자동품질관리가 적용된 자료에서는 기상항공기 이륙 전 또는 육지 관측으로 해상풍의 이상 값(Fig. 2.2.13의 14:40 이전)은 에러로 인식되어 자동으로 제거된다.

운영관리시스템을 이용한 수동품질관리 과정의 순서는 다음과 같다. ①활용연구 및 캠페인 등을 선택하여 품질관리를 수행하고자 하는 비행일정을 선택한다. ②관측장비 및 관측파일 종류(Raw, AQC, MQC)를 선택한다. ③장비로부터 산출된 데이터(파일 단위)와 관측요소(파일 내에 기록된 정보 단위)를 선택한다. 이후, Fig. 2.2.13과 같이 선택한 관측요소의 시계열 그래프와 테이블 자료가 표출되면, ④수동품질관리가 필요한 시간을 선택하여 수정값을 입력하고 품질관리 Flag를 선택한다. 이렇게 수정된 수동품질관리 결과는 MQC파일로 새롭게 저장되고, 품질관리 내역은 log에 기록된다.

자료처리

처리현황

수동QC

자료다운로드

수동QC ▶ 자료처리 - 수동QC

활용연구 (SW)위험기상 선행관측 ▼ 캠페인 (SW-01)호우 발생에 대한 해상의 대 ▼ 관측 (SW-01_OB2018-RF001)호우 발생에 ▼

구분 SW-01_OB2018-RF001_F01 ▼ 검색 관측리스트

자료선택

관측장비 >

관측파일종류 >

관측데이터 >

관측 요소 >

SFMRSerial(None)	SFMR5_Hour(hours)	SFMR5_Min(minutes)	SFMR5_Sec(seconds)
SFMR5WndSpd(m/s)	SFMR5RainRt(mm/hr)	SFMR5Error(%/10)	SFMR5Valid(None)
SFMR5InstHeal(None)			

자료보기

DATA SW-01_OB2018-RF001.F01_18_06_27_04_56_38.serial.sfmr.raw 2018-06-27 14:27:00.100

- 그래프 자료

- 테이블 자료

QCed 파일 저장 및 생성	QC Flag 설명	QC 이력		
2018-06-27 14:27:05.840		40		수정 적용
2018-06-27 14:27:06.970		40		수정 적용
2018-06-27 14:27:08.110		40	QC Flag 000 ▼	수정 적용
2018-06-27 14:27:09.240		40		수정 적용
2018-06-27 14:27:10.360		40		수정 적용
2018-06-27 14:27:11.500		40		수정 적용

Fig. 2.2.13. Example of manual quality control process using atmospheric research aircraft operation and management system.

(2) 운영관리시스템 개선

웹페이지 기반으로 구축된 운영관리시스템은 기상항공기 관측자료의 품질관리 기술 개발과 함께 성능을 개선하였다. 기존 관측자료의 처리 과정은 직렬화로 수행되어서 관측자료의 처리시간이 2시간가량 소비되었다. 운영관리시스템의 자료처리시간을 단축하기 위하여 병렬화 처리 과정으로 새롭게 변경한 결과, 관측자료 처리시간이 약 1시간으로 단축됨을 확인하였다. 여기서, 자료처리시간은 구름물리 관측장비의 이미지 자료 처리시간을 제외한 시간이다. 또한, 대용량 자료의 전송속도를 개선하기 위하여 유관기관망을 구축하였다. 그 결과, 기존 초당 5 Mb에서 100 Mb로 전송속도가 뚜렷하게 향상됨을 확인하였다.

기상항공기의 관측자료 중 드롭존데 관측자료는 운영관리시스템에서 단열선도로 표출된다. 그러나, 기존의 단열선도는 ASPEN 품질관리 과정에서 산출되는 이미지로 기상청 현업 예보관들이 활용하는 단열선도와 다소 차이가 있다(Fig. 2.2.14). 따라서, 운영관리시스템의 단열선도를 기상청 현업에서 활용하는 단열선도와 통일할 필요가 있었다. Fig. 2.2.14b는 개선된 단열선도 표출페이지이며, 기상청 형식의 단열선도 뿐만 아니라, 드롭존데 낙하 위치를 지도와 함께 표시하여 가시성을 높였다.

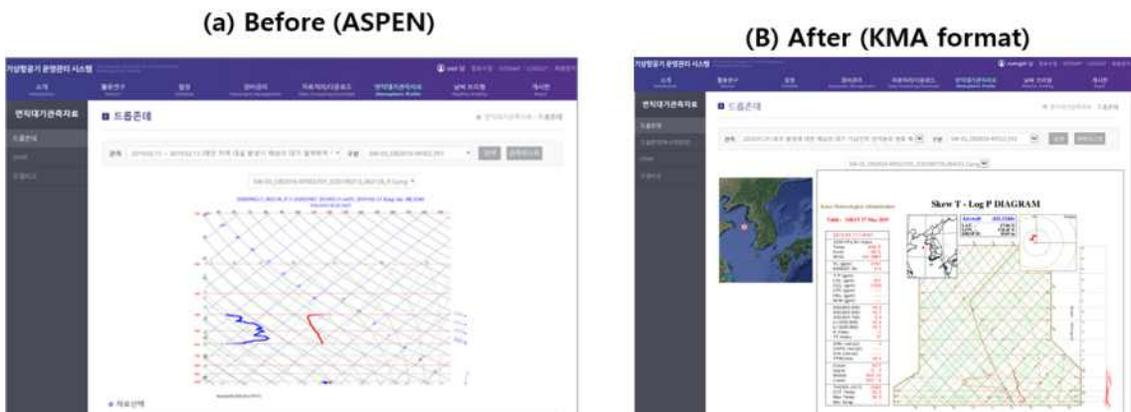


Fig. 2.2.14. Before and after skew T log P diagram in atmospheric research aircraft operation and management system: (a) ASPEN output and (b) KMA format.

또한, 운영관리시스템의 자료전송기능을 개선하여 드롭존데 관측자료(TEMP, 원시자료, BUFR)를 기상청 종합기상정보시스템(COMIS 4)에 전송하였다. 이를 통해, 현업 예보관들이 COMIS 4를 이용하여 드롭존데 관측자료의 전문, 단열선도, 원시자료의 모니터링이 가능한 체계를 구축하였다. 이 외에도, 드롭존데 BUFR 형식의 전문을 기상청 정보통신기술과의 협조로 8월 30일부터 Global Telecommunication System(GTS) 방송 시작하였다.

운영관리시스템에서 표출되는 해상풍 관측장비(SFMR)의 해상풍속은 저장되는 파일 단위로 표출되어 가시성이 떨어졌다(Fig. 2.2.15a). 또한, GPS의 신호가 안정화되는 동안 올바르지 않은 위경도가 표기되는 문제가 나타났다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여, 같은 비행에 생산되는 파일을 하나로 통합(merge)하는 기능과 부적절한 위경도를 제외하는 기능을 구현하여 SFMR 해상풍속의 가시성을 높였다.

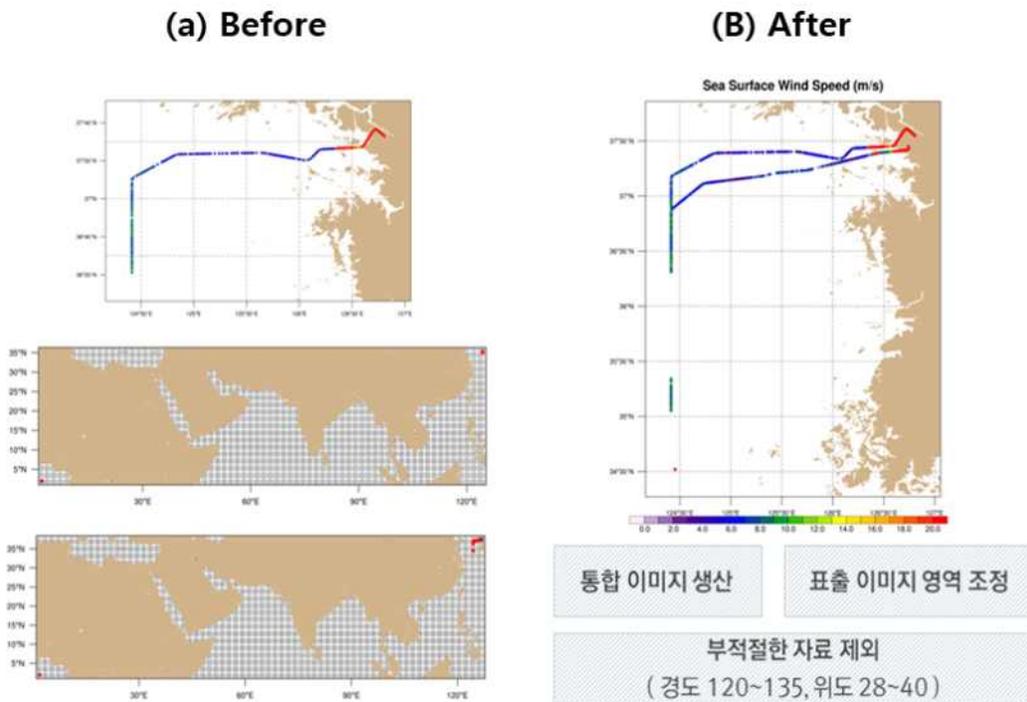


Fig. 2.2.15. Before and after sea surface wind speed of SFMR in atmospheric research aircraft operation and management system.

(3) 보안자료 전송기능 구현

기상항공기 관측자료 국내 유관기관 공유체계 구축을 위해서는 보안자료 전송기능이 우선적으로 구현되어야 한다. 이를 위해 가상 사설망 장비(Virtual Private Network, VPN)를 사용하여 관측자료가 수집되도록 시스템을 구축하였다. 그리고, 기상항공기 관측자료 수집 서버로 접속하는 전용 포트 번호를 부여하여 보안 기능을 강화하였다. 또한, (2) 운영관리시스템 개선에서 언급한 것과 같이, 향후 유관기관과의 자료 공유를 위해 전용회선(유관기관망)을 설치하여 자료 전송속도를 기존 초당 5 Mb에서 100 Mb로 개선하였다.

웹기반 운영관리시스템의 사용자등급별 접속 권한을 제한하였다. (1) 품질관리 기술 개발에서 언급한 수동품질관리 등의 기능은 제한된 계정에만 부여하여 관리할 수 있도록 하였다. 반면, 비회원접속자(guest)를 포함한 모든 사용자가 기상항공기 운항일정 및 관측자료 모니터링이 가능하게 하였다. 이를 통해, 기상항공기 관측자료의 활용도를 높일 수 있을 것으로 기대한다.

3. 대기-해양 상호작용이 대설에 미치는 영향

기상항공기 드롭존데는 낙하 고도에서 해면까지의 연직 기상정보를 관측할 수 있는 장비로서, 태풍, 집중호우, 대설과 같은 위험기상 현상의 선행관측에 활용되고 있다. 앞서 1항 기상항공기 드롭존데 관측자료의 수치예측 영향분석에서 언급한 것과 같이 태풍, 집중호우 현상의 경우, 안정상의 문제로 직접관측에 한계가 있다. 반면, 낮은 층운형 구름에 의해 발생하는 대설현상에서는 기상항공기가 높은 고도로 비행하며 드롭존데를 낙하한다면 대설현상의 직접관측이 가능하다. 또한, 국립기상과학원(2018a)은 대설 선행관측 개발 기반연구를 수행하여 대설이 발생한 사례에서 해수면 온도(Sea Surface Temperature, SST)의 아노말리 변동성이 동해안에서 크게 나타남을 확인하였다. 국립기상과학원은 평창동계올림픽의 기상지원을 위하여, 2018년 2월 6일에서 3월 18일까지 동해안 기상관측자료를 생산·제공하였다. 본 보고서에서는 기상항공기 드롭존데 관측자료를 활용하여 대설현상의 대기-해양 상호작용 연구결과를 기술하였다.

(1) 드롭존데 관측 및 자료분석 방법

대기-해양 상호작용을 분석하기 위해 기상항공기의 드롭존데 관측자료를 활용하였다. 기상항공기 드롭존데 관측은 2018년 2월 2일부터 3월 16일까지의 기간 중 총 21일 동안 수행되었다. 드롭존데 낙하지역은 동해상 민항기 훈련공역(Civil Aircraft Training Area 1, CATA 1)이고, 낙하 고도는 30,000 ft(약 9 km)이다. 드롭존데 관측자료를 이용하여 해양에서 대기로 유입되는 플럭스(flux)를 계산하였다. 플럭스는 유체, 입자 또는 에너지의 이동 또는 흐름을 의미한다. 수증기 플럭스는 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다. 여기서, 좌측항의 Q 는 수증기 플럭스(moisture flux)를 의미하고, 우측항의 q 는 비습, V_h 는 수평 바람(horizontal wind)이다.

$$\vec{Q} = q \vec{V}_h$$

수증기 플럭스를 대기 하층에서 상층까지 적분하면, 연직 수증기 수송량(Integrated Water Vapor Transport, IWVT)을 알 수 있고, 그 식은 아래와 같다.

$$IWVT = \int_{sfc}^{Trop} q \overrightarrow{V}_h dz = \frac{1}{\rho} \int_{sfc}^{Trop} q \overrightarrow{V}_h dp$$

드롭존데 관측이 수행된 21일 동안의 수증기 플럭스 계산 결과는 Fig. 2.2.16에 나타내었다. 본 연구에서는 수증기 플럭스와 이를 적분하여 얻은 연직 수증기 수송량을 이용하여, 대기-해양의 상호작용이 대설현상에 미치는 영향을 분석하였다.

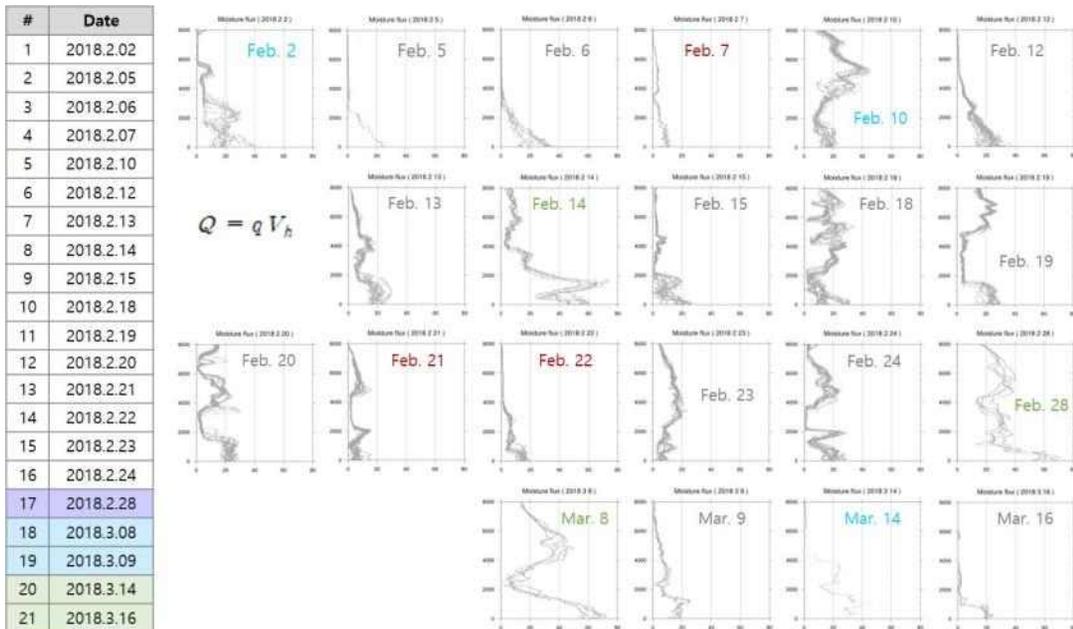


Fig. 2.2.16. Vertical distribution of moisture flux(Q) using dropsonde data during winter season 2108.

(2) 분석결과

드롭존데 관측 기간에 강설 발생일은, 2월 28일, 3월 8-9일, 그리고 3월 14-16일이다. 수증기 플럭스의 전반적인 특징을 살펴보면, 대체로 수증기 플럭스는 $30 \text{ g kg}^{-1} \text{ m s}^{-1}$ 이하로 유지되는 것을 알 수 있다. 그러나 강설이 발생하였던, 2월 28일, 3월 8일, 3월 14일에는 해수면에서 약 1.5 km까지 수증기 플럭스의 증가가 나타났다. 특히, 41.2 cm와 13.6 cm의 강설이 기록된 2월 28일과 3월 8일에는 수증기 플럭

스가 $60 \text{ g kg}^{-1} \text{ m s}^{-1}$ 이상으로 증가하였다. 3월 14일은 7.4 cm의 강설을 기록하였고 이때의 수증기 플럭스는 약 $40 \text{ g kg}^{-1} \text{ m s}^{-1}$ 로 증가하였다.

수증기 플럭스 변화를 확인하기 위하여, 연직 수증기 수송량의 시계열 변화를 살펴 보았다(Fig. 2.2.17). 여기서, IWVT의 증가가 나타나는 대기층을 확인하기 위하여, 적 분 구간을 대기 하층(해수면-700 hPa), 중층(해수면-500 hPa), 그리고 상층(해수면-Top)으로 구분하여 IWVT를 계산하였다. 앞서, 드롭존테의 낙하고도가 30,000 ft임을 고려하면 상층(Top)은 약 300 hPa에 해당한다. 전반적인 IWVT의 변화를 살펴보면, 수증기 플럭스의 유사한 특징을 확인할 수 있다. 강설 발생일을 제외한 대부분의 일 자에서는 IWVT가 $100,000 \text{ g kg}^{-1} \text{ m s}^{-1}$ 이하로 유지되고 있으며, 상하층간의 차이가 크지 않다. 그러나 강설이 발생한 일자의 IWVT는 약 $200,000 \text{ g kg}^{-1} \text{ m s}^{-1}$ 으로 2배 이상 증가하는 것을 볼 수 있으며, 특히 하층(해수면-700 hPa)의 증가가 뚜렷하다. 즉, 강설 발생 기간 동안 해수면에서 대기로 향하는 수증기가 증가함을 의미한다.

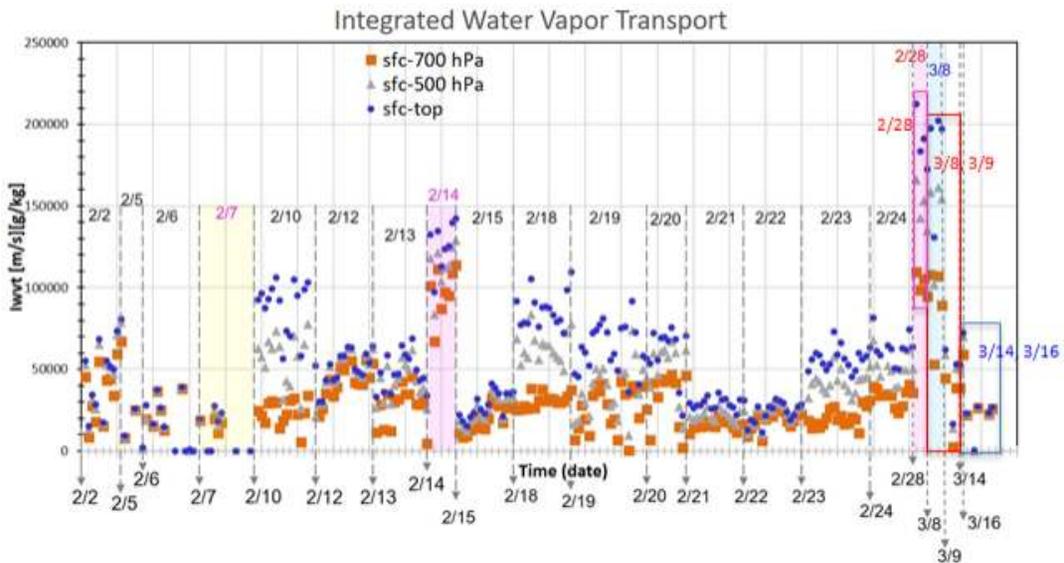


Fig. 2.2.17. Temporal variation of integrated water vapor transport during winter season 2108.

해상(먼바다와 가까운 바다)의 수증기 플럭스의 변화를 살펴보기 위하여, 강설일

전·후의 수증기 플럭스 분포를 비교하였다(Fig. 2.2.18). 여기서, 3월 14일은 구름물리 실험을 위해 1개의 드롭존데 관측자료만 존재하여 해상의 변화를 살펴보는 데 한계가 있어서 제외하였다. 약 40 cm의 강설을 발생한 2월 28일에는 동쪽(먼바다)보다 서쪽(가까운 바다)의 수증기 플럭스가 크게 나타나고 있으며, 나머지 사례에서는 동쪽(먼바다)의 수증기 플럭스가 크거나 동-서간의 수증기 플럭스의 변화가 크지 않다. 즉, 동쪽(먼바다)에서 영동지역 해안(가까운 바다) 방향으로 수증기 플럭스가 증가할수록 강설이 증가함을 알 수 있다.

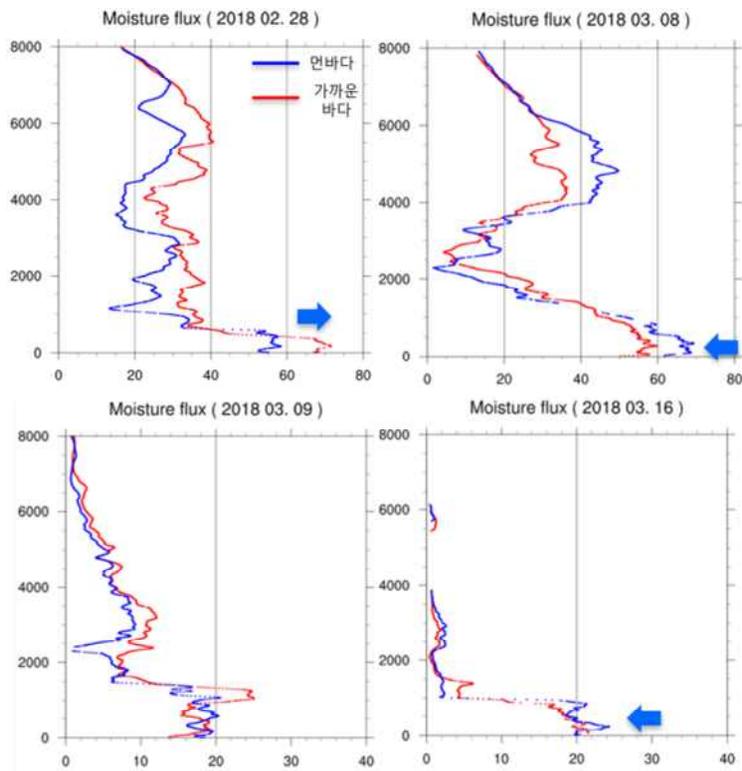


Fig. 2.2.18. Vertical distribution of moisture flux(Q) for snowfall cases.

또한, 이들 사례의 동풍을 발생시킨 중관기압계를 분류하여 그 특징의 차이를 비교하였다. 먼저 2월 28일과 3월 8일은 한반도 남쪽을 통과하는 저기압의 영향을 받은 사례이다. 이들 사례에서는 해수면에서 8 km까지 $20 \text{ g kg}^{-1} \text{ m s}^{-1}$ 이상으로 수증

기 플럭스가 증가하였다. 반면, 북쪽의 고기압이 영향을 받은 3월 9일과 3월 16일에서는 해수면에서 1 km까지의 하층에서만 수증기 플럭스가 $20 \text{ g kg}^{-1} \text{ m s}^{-1}$ 로 증가하였다. 즉, 동풍을 발생시킨 기압계의 영향에 따라서 수증기 플럭스가 증가하는 크기와 높이가 다르게 나타남을 의미한다.

이해를 돕기 위하여 드롭존데 관측 전일과 당일의 SST 변화를 살펴보았다(Fig. 2.2.19). 2월 28일과 3월 8일에는 양의 수증기 플럭스 변화를 확인할 수 있다. 이는 1일 전보다 해양에서 대기로 상향 플럭스(현열+잠열)가 증가하였음을 의미한다. 반면, 3월 9일에는 음의 플럭스 변화가 나타나고, 이는 상향 플럭스가 감소하였음을 나타낸다. 이는 전날(3월 8일)의 해수면 플럭스가 크기 때문에, 강설이 약해진 3월 9일에는 음의 플럭스가 나타난 것이다. 마지막으로, 3월 16일에는 양의 플럭스 변화가 나타나고, 상향 플럭스의 증가를 의미한다.

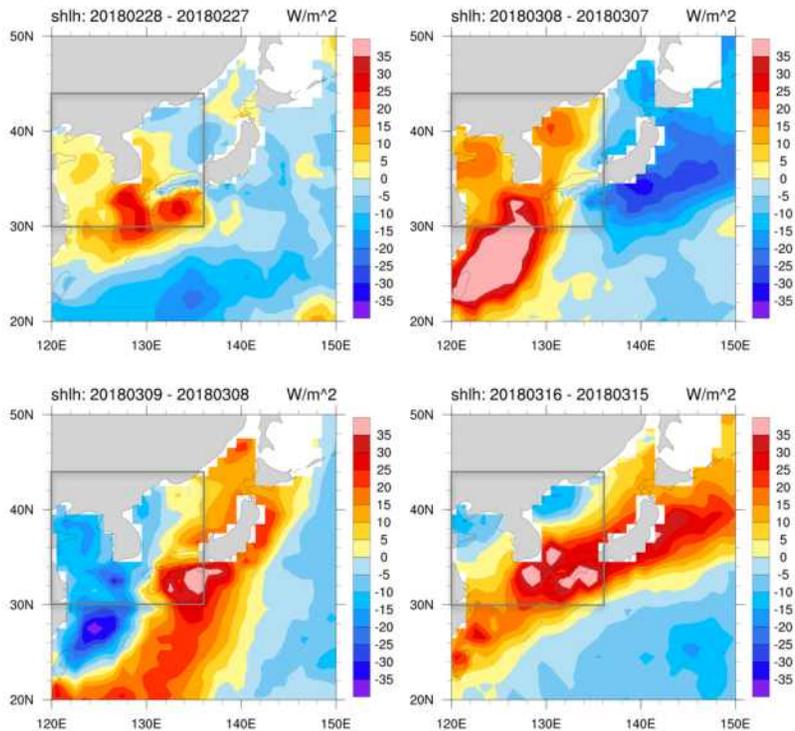


Fig. 2.2.19. Variations of moisture flux(Q) for snowfall cases.

요약하면, 강설 전날보다 강설 당일에 해양에서 대기로 공급되는 플럭스의 증가가 나타남을 의미한다. 그러나, 이러한 결과는 제한된 사례 분석결과이기 때문에 일반화하기에는 한계가 있으며, 향후 추가적인 대설 관측과 세부적인 분석을 수행하여 이러한 결과를 일반화할 필요가 있다.

제 3 절 대기 상층 공기질 감시와 기후영향 분석

기상항공기를 활용한 환경기상연구과 임무는 상층을 통해 우리나라로 유입하는 물질의 특성을 조사하기 위하여 서해상공 공기질을 감시하는 것이다. 이 관측결과는 국내외 오염물질로 인해 복잡하게 변하는 서해상 공기질의 특성을 분석하고, 오염의 기원을 추정하고, 궁극적으로 기후에 미치는 영향을 분석하는데 활용된다.

2019년의 환경기상 항공관측은 서해상에서 황사, 연무 등의 고농도 에어로졸 사례와 배경대기 관측과 항공기를 이용한 대기질 관측장비 교정 및 분석기술 개발 및 반응가스 관측장비의 관측환경 최적화를 위해 정압장치 설치에 중점을 두었다.

2019년에 있었던 환경기상연구를 위한 항공관측은 Table 2.3.1과 같다.

Table 2.3.1. Summary of the flights.

Date	Time (LST)	Latitude/Longitude	Altitude(m)	Remarks
1 2019. 01. 17.	10:30 - 13:40		600~1000	Aerosol decrease test
2 2019. 04. 16.	15:00 - 17:40		600~1000	Analysis of aerosol characteristic
3 2019. 04. 19.	11:20 - 14:10		600~1000	Analysis of aerosol characteristic
4 2019. 05. 03.	14:30 - 17:00		600~1000	Analysis of aerosol characteristic
5 2019. 05. 08.	11:30 - 13:30		600~1000	Analysis of aerosol characteristic
6 2019. 05. 21.	13:30 - 16:30		600~1500	Analysis of aerosol characteristic
7 2019. 05. 22.	10:20 - 13:00	37°20' N-35°20' N/ 124°30' E	1000~1500	Analysis of aerosol characteristic
8 2019. 08. 01.	13:40 - 16:40		600~2000	Recative gases pressure regulator test
9 2019. 08. 26.	10:00 - 13:20		800~1800	Recative gases pressure regulator test
10 2019. 09. 10.	13:30 - 16:55		2000~15000	SP2 tes flight
11 2019. 10. 21.	10:00 - 12:30		1000~1500	Recative gases pressure regulator test
12 2019. 10. 31.	14:00 - 17:20		600~3000	Recative gases pressure regulator test
13 2019. 11. 18.	08:50 - 12:50		2000~12000	Recative gases pressure regulator test

1. 서해상 에어로졸 특성분석

서해상 에어로졸 특성분석은 기상항공기에 탑재된 항공관측용 광합입자계수기(Sky-OPC)와 광산란계수측정기(Nephelometer)를 활용해 6차례(4월 16일, 4월 19일, 5월 3일, 5월 8일, 5월 21일과 5월 22일)에 걸쳐 에어로졸의 크기별 수농도와 PM_{2.5} 질량농도, 그리고 광산란계수를 관측하였다.

(1) 2019년 4월 19일 비행

4월 19일 비행은 10시 18분 서울 김포공항에서 이륙하여 약 3시간 51분 동안 서해 상공을 운항하였으며, 기상 1호의 운항 경도인 124° 24′ 53″E에서 위도 36° 42′ 02″N ~ 34° 47′ 48″N 를 1회 반복 운항하였다. 관측 타겟 지역의 운항 시간은 약 11시 20분부터 12시 50분 무렵까지이며, 운항고도는 4월 16일과 동일하게 남하 시 3000 ft (약 900 m)에서 시작하여 약 7분 동안 고도를 유지하며 관측 후 200 ft씩 하강하여 2000 ft (약 600 m)까지 내려간 뒤, 북상 시 2000 ft부터 다시 역으로 200 ft씩 상승하여 3000 ft 지점까지 관측이 진행되었다. Fig. 2.3.1은 4월 19일 비행한 기상항공기의 입체 운항 경로에 따른 에어로졸 광산란계수 분포와 총수농도 분포이다. 목표 운항 경로의 가장 남쪽지점에서 일시적으로 에어로졸 농도가 증가하였다.

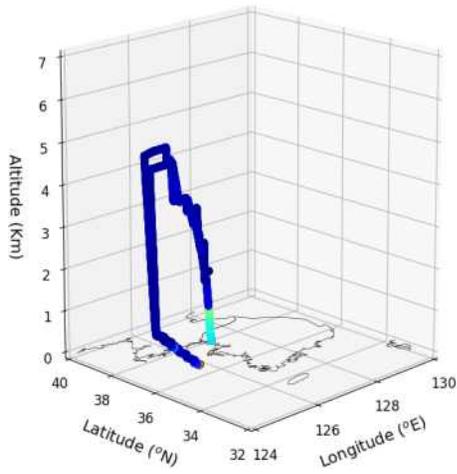
항공 관측 자료 분석에서는 비행 목표구역에서 관측한 자료만 사용했다. Fig. 2.3.2는 항공기 탑재장비인 Sky-OPC로 관측한 PM_{2.5}의 질량농도를 운항 시간과 운항 고도에 따라 표현한 그림으로 고도 2600 ft 이하에서 PM 질량농도가 증가하였으며, 특히 고도 2000 ft 부근에서의 PM_{2.5} 농도는 지상과 유사한 30.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준까지 증가하였다. Fig. 2.3.3은 기상항공기 관측시간에 따른 기상항공기-기상1호-안면도 기후변화감시소에서 관측된 입경분포이다. 항공관측에서 가장 낮은 관측고도인 2000 ft 부근에서 미세입자와 조대입자가 모두 증가하였으나, 지상에서는 미세입자가 우세하였고 기상1호에서는 12시 ~ 12시 30분 사이에 에어로졸 사이즈 8 μm 이상의 조대입자가 일시적으로 증가하는 모습을 보였다. Fig. 2.3.4는 기상항공기 탑재장비인 광산란계수측정기를 이용하여 4월 19일 관측한 3파장(450 nm; 파랑, 550 nm; 초록, 700 nm; 빨강)에서의 광산란계수이다. 에어로졸 광산란계수 또한 항공관측에서 가장 낮은 관측고도인 2000 ft에서 지상에서 관측된 수준까지 증가하는 모

습을 보였다. 하지만, 기상1호에서 관측된 에어로졸 광산란계수는 지상보다 낮게 관측되었다.

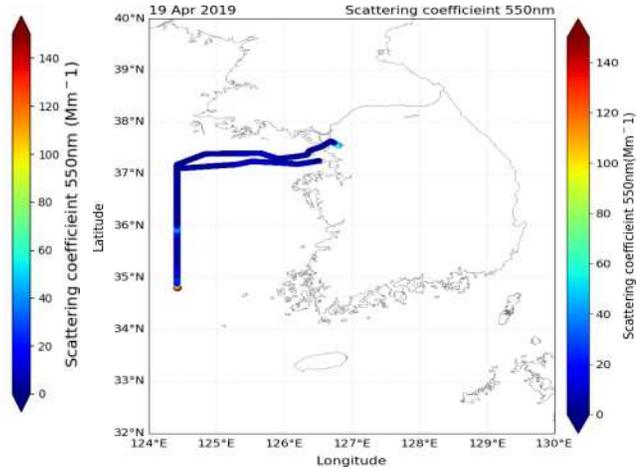
광산란입자계수기로 관측된 3파장(450, 550, 700 nm) 광산란계수의 경우 인천에서 목포방향으로 남하하는 방향에서 관측된 평균 산란계수는 각 파장별로 $16.1 \pm 30.0 \text{ Mm}^{-1}$, $34.3 \pm 24.6 \text{ Mm}^{-1}$, $26.4 \pm 20.4 \text{ Mm}^{-1}$ 이었고, 목포에서 인천방향으로 북상하는 방향에서 관측된 평균 산란계수는 각 파장별로 $28.7 \pm 54.2 \text{ Mm}^{-1}$, $10.2 \pm 42.1 \text{ Mm}^{-1}$, $7.7 \pm 31.9 \text{ Mm}^{-1}$ 수준으로 450 nm는 남하 때 작게 관측 되었으며, 550 nm와 700 nm는 북상 때 작게 관측되었다. 비행 목표구역 전 지역에서 관측된 평균 산란계수는 각 파장별로 $23.0 \pm 45.2 \text{ Mm}^{-1}$, $20.9 \pm 35.6 \text{ Mm}^{-1}$, $16.0 \pm 27.5 \text{ Mm}^{-1}$ 이다.

Fig. 2.3.5는 2019년 4월 19일 서해상에서 기상항공기에 탑재된 Sky-OPC로 관측한 $\text{PM}_{2.5}$ 질량 농도와 2019년 4월 19일 00 UTC (09 KST)에 예측한 기상청 현업 황사·연무통합예측모델(ADAM3)의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 결과와 비교한 것이다. 비교 결과 항공관측 최남단인 $34^{\circ} 52' \text{N}$ 부근에서 모델값과 유사하게 $20 \sim 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 나타났으며, 그 외는 항공관측결과가 낮게 나타났다.

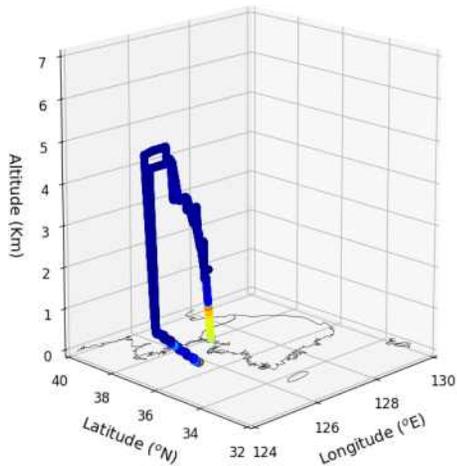
(A)



(B)



(C)



(D)

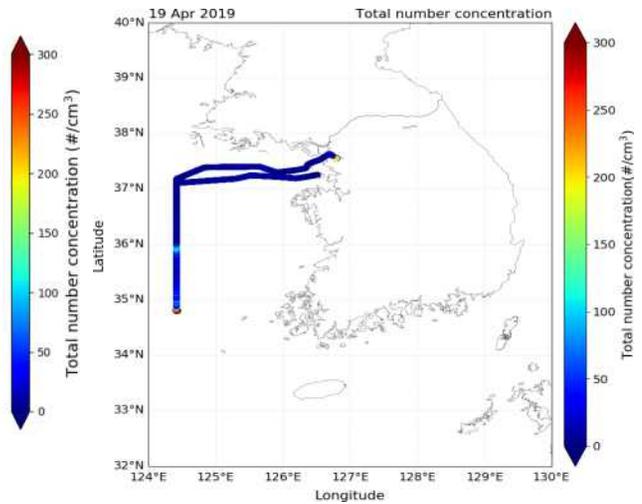


Fig. 2.3.1. Aerosol light scattering coefficient distribution ((A) stereoscopic flight route, (B) plane flight route) and aerosol total concentration ((C) stereoscopic flight route, (D) plane flight route) for aircraft route on April 19.

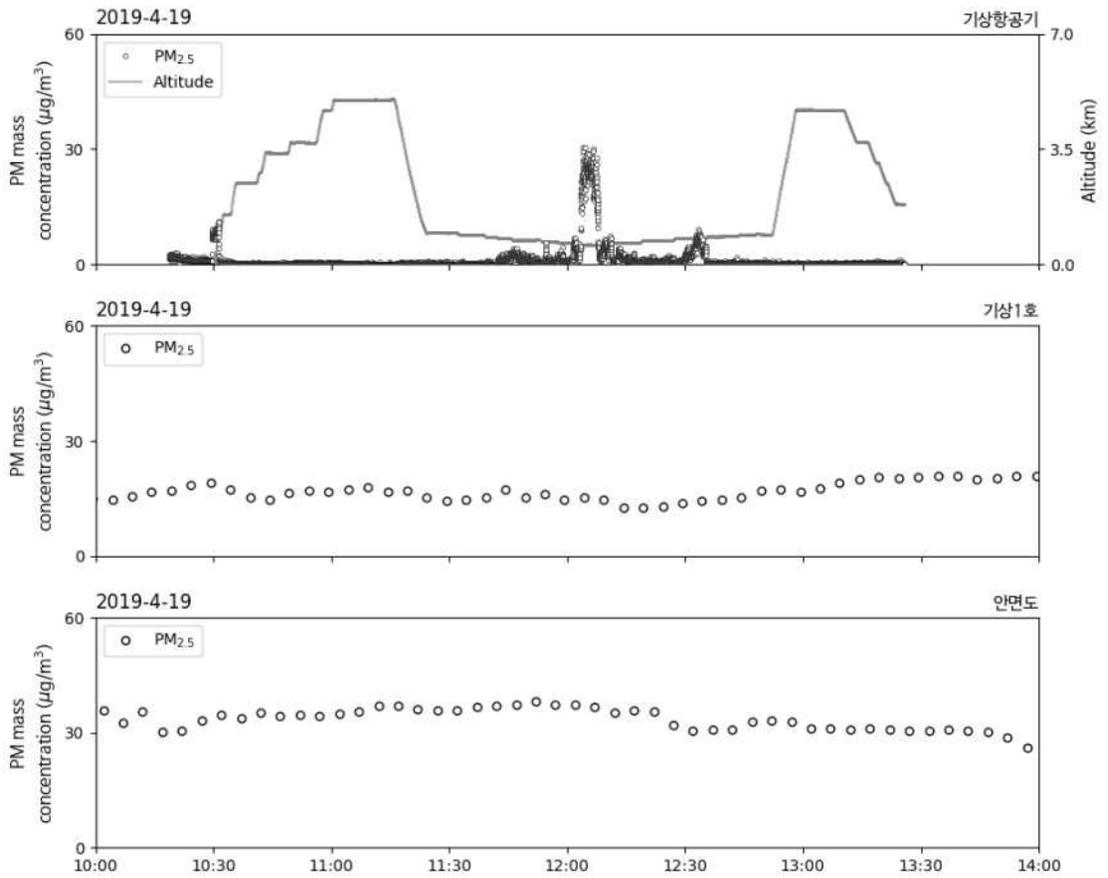


Fig. 2.3.2. Mass concentration of meteorological aircraft-observed ship-Anmyeondo observatory over aircraft observation time (April 19, 2019).

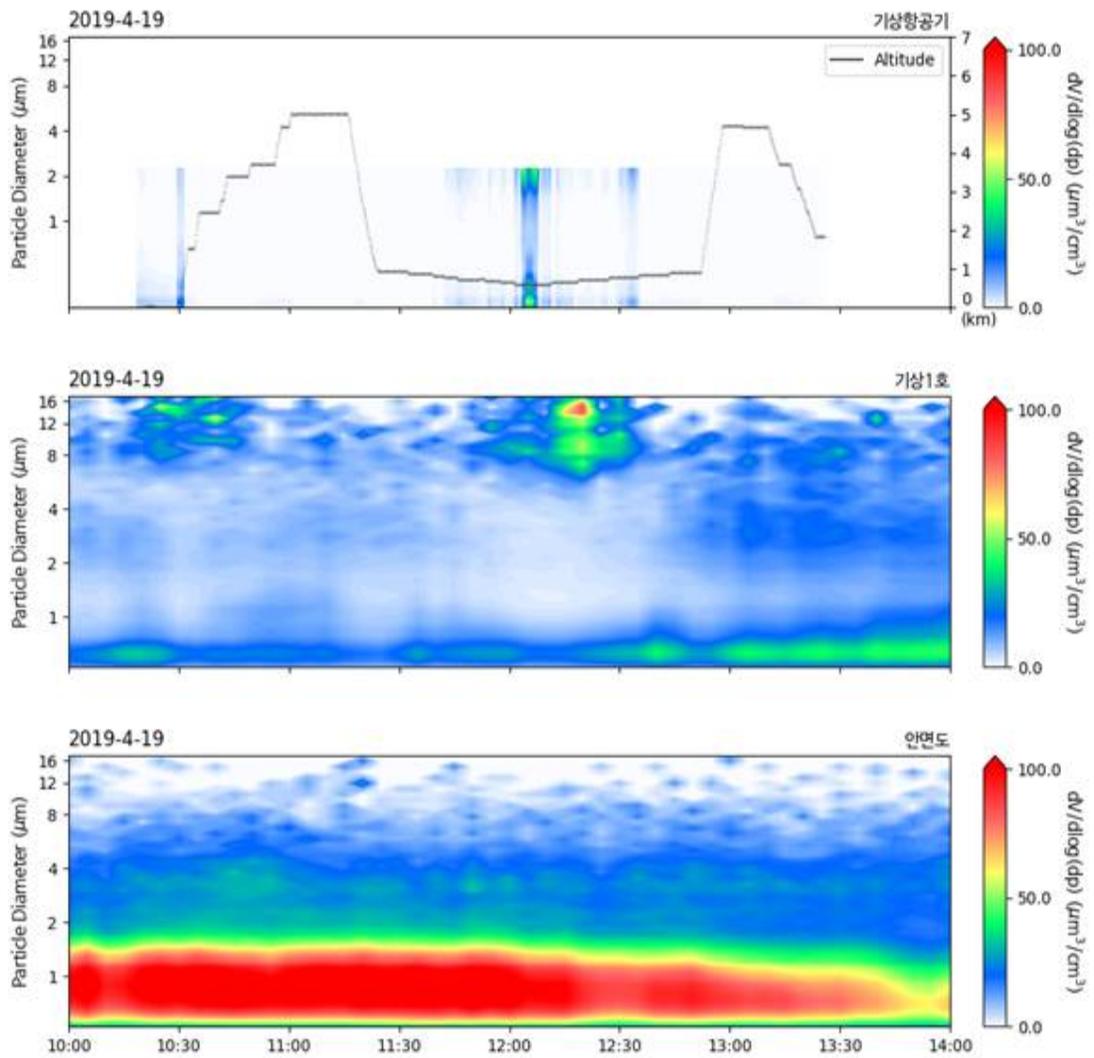


Fig. 2.3.3. Particle size distribution of meteorological aircraft-observed ship-Anmyeondo observatory over aircraft observation time (April 19, 2019).

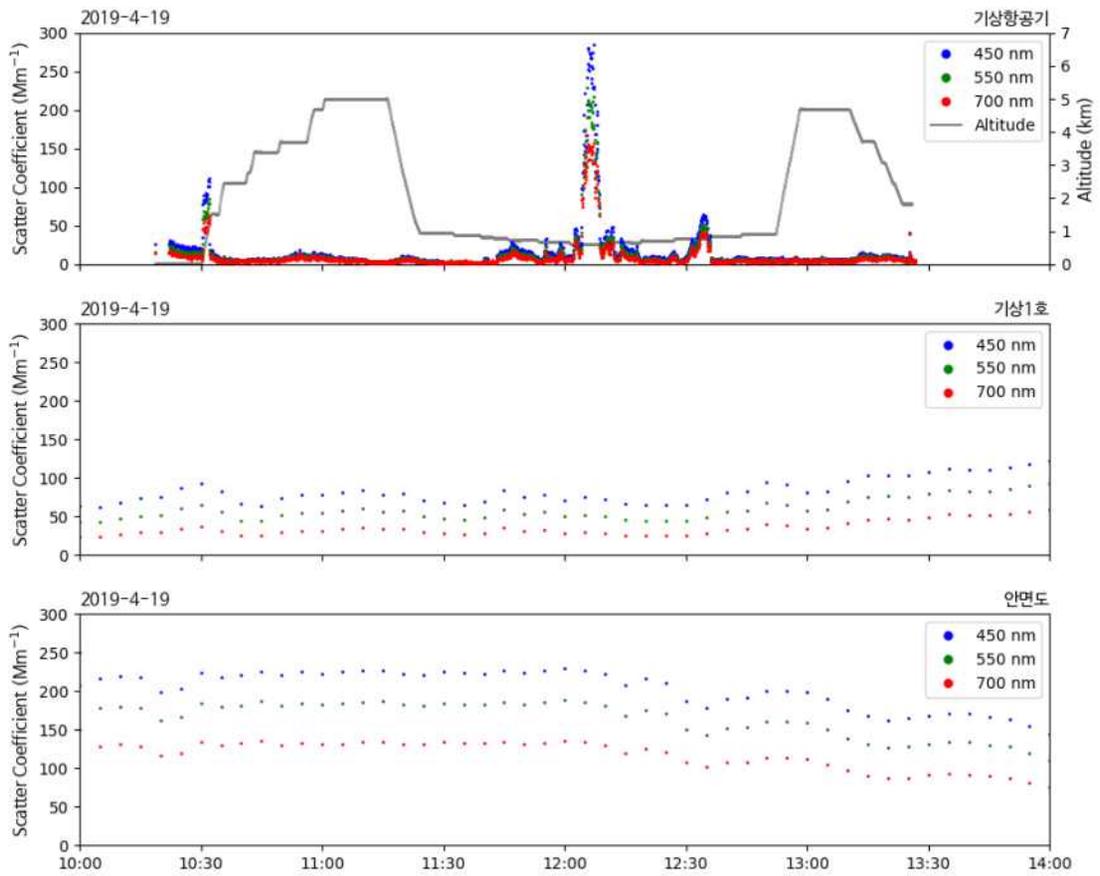


Fig. 2.3.4. Aerosol light scattering coefficient of meteorological aircraft-observed ship-Anmyeondo observatory over aircraft observation time (April 19, 2019).

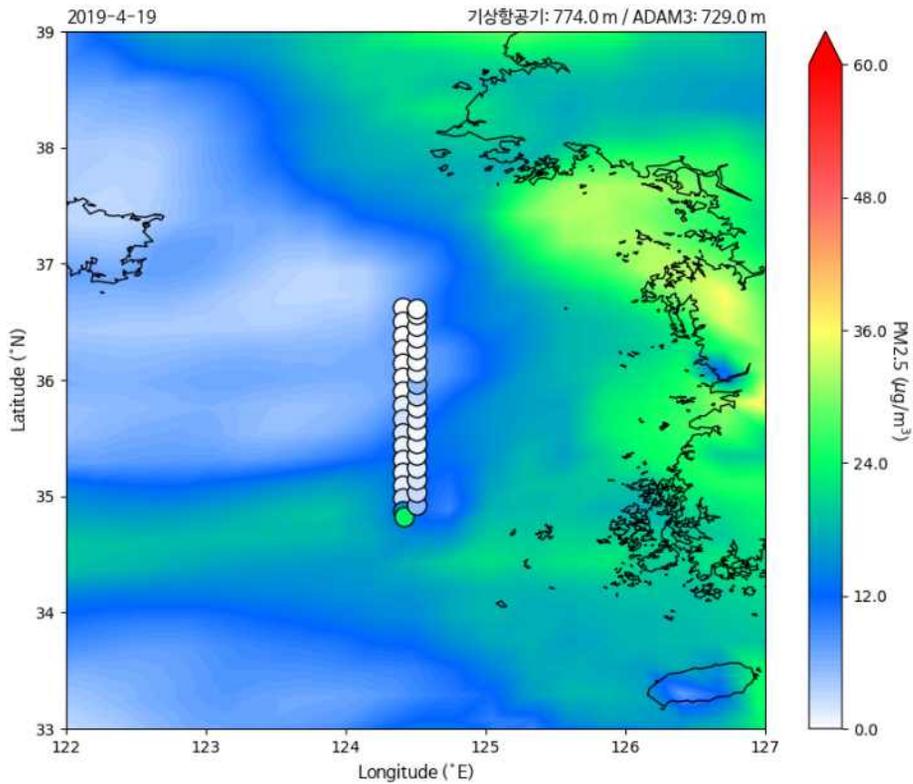


Fig. 2.3.5. Comparison of $PM_{2.5}$ mass concentrations as measured by Sky-OPC mounted on meteorological aircraft on the west sea on April 19, 2019 and $PM_{2.5}$ concentrations of ADAM3.

(2) 2019년 5월 8일 비행

5월 8일 비행은 10시 38분 서울 김포공항에서 이륙하여 약 3시간 4분 동안 서해 상공을 운항하였으며, 기상1호의 운항 경도인 $124^{\circ} 24' 52''E$ 에서 위도 $36^{\circ} 41' 36''N \sim 34^{\circ} 49' 13''N$ 를 1회 반복 운항하였다. 관측 타겟 지역의 운항 시간은 약 11시 35분부터 13시 10분 무렵까지이며, 운항고도는 남하 시 3000 ft (약 900 m)에서 시작하여 약 7분 동안 고도를 유지하며 관측 후 300 ft씩 하강하여 1500 ft (약 400 m)까지 내려간 뒤, 북상 시 1500 ft부터 다시 역으로 300 ft씩 상승하여 3000 ft 지

점까지 관측이 진행되었다. Fig 2.3.6은 5월 8일 비행한 기상항공기의 입체 운항 경로, 평면 운항 경로, 위도 변화에 따른 운항고도와 경도변화에 따른 운항고도이다. 4항차의 경우 목표 운항 경로 중 약 35° 70'N ~ 36° 60'N 구간에서 에어로졸의 농도가 증가하였다.

항공 관측 자료 분석에서는 비행 목표구역에서 관측한 자료만 사용했다. Fig. 2.3.7은 항공기 탑재장비인 Sky-OPC로 관측한 PM_{2.5}의 질량농도를 운항 시간과 운항 고도에 따라 표현한 그림으로 고도 2400 ~ 3000 ft 사이에서 PM 질량농도가 증가하여 약 20 ~ 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 관측되었고 기상1호의 13.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준과 지상에서의 11.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다는 높은 수준이었다. Fig. 2.3.8은 기상항공기 관측시간에 따른 기상항공기-기상1호-안면도 기후변화감시소에서 관측된 입경분포이다. 항공관측 고도 2400 ~ 3000 ft 사이에 관측된 에어로졸은 1 μm 보다 작은 미세입자가 우세하였으나, 기상1호에서는 조대입자가 주로 관측되었으며, 지상에서는 기상1호보다 낮은 농도의 조대입자가 관측되었다. Fig. 2.3.9는 기상항공기 탑재장비인 광산란계수측정기를 이용하여 5월 8일 관측한 3파장(450 nm; 파랑, 550 nm; 초록, 700 nm; 빨강)에서의 광산란계수이다. 항공관측에서 관측된 에어로졸 산란계수는 운항고도가 2400 ~ 3000 ft 사이에 50 ~ 400 Mm^{-1} 이었으며, 고도 2100 ft보다 낮아지면서 50 Mm^{-1} 미만으로 낮게 관측되었다. 기상1호와 지상에서는 항공관측 결과보다 훨씬 낮은 수준의 에어로졸 광산란계수가 관측되었다.

광산란입자계수기로 관측된 3파장(450, 550, 700 nm) 광산란계수의 경우 인천에서 목포방향으로 남하하는 방향에서 관측된 평균 산란계수는 각 파장별로 189.6±135.5 Mm^{-1} , 133.7±96.0 Mm^{-1} , 85.4±60.9 Mm^{-1} 이었고, 목포에서 인천방향으로 북상하는 방향에서 관측된 평균 산란계수는 각 파장별로 136.6±129.6 Mm^{-1} , 97.3±93.7 Mm^{-1} , 63.6±61.2 Mm^{-1} 수준으로 남하 때 모든 파장에서 높게 관측되었다. 비행 목표구역 전 지역에서 관측된 평균 산란계수는 각 파장별로 157.3±134.4 Mm^{-1} , 111.5±96.3 Mm^{-1} , 72.1±62.0 Mm^{-1} 이다. 남하 때와 북상 때 모두 2400 ~ 3000 ft 사이에서 산란계수가 증가하는 모습을 보였는데 이는 에어로졸 층이 2400 ~ 3000 ft 사이에 존재하고 있던 것으로 볼 수 있다.

Fig. 2.3.10은 2019년 5월 8일 서해상에서 기상항공기에 탑재된 Sky-OPC로 관측한 PM_{2.5} 질량 농도와 2019년 5월 8일 00 UTC (09 KST)에 예측한 기상청 현업 황

사·연무통합예측모델(ADAM3)의 $PM_{2.5}$ 농도 결과와 비교한 것이다. 비교 결과 약 $35^{\circ} 70'N \sim 36^{\circ} 60'N$ 부근 기상항공기에서 관측된 에어로졸 고농도 영역이 모델에 서는 모의가 되지 않은 것을 알 수 있었다.

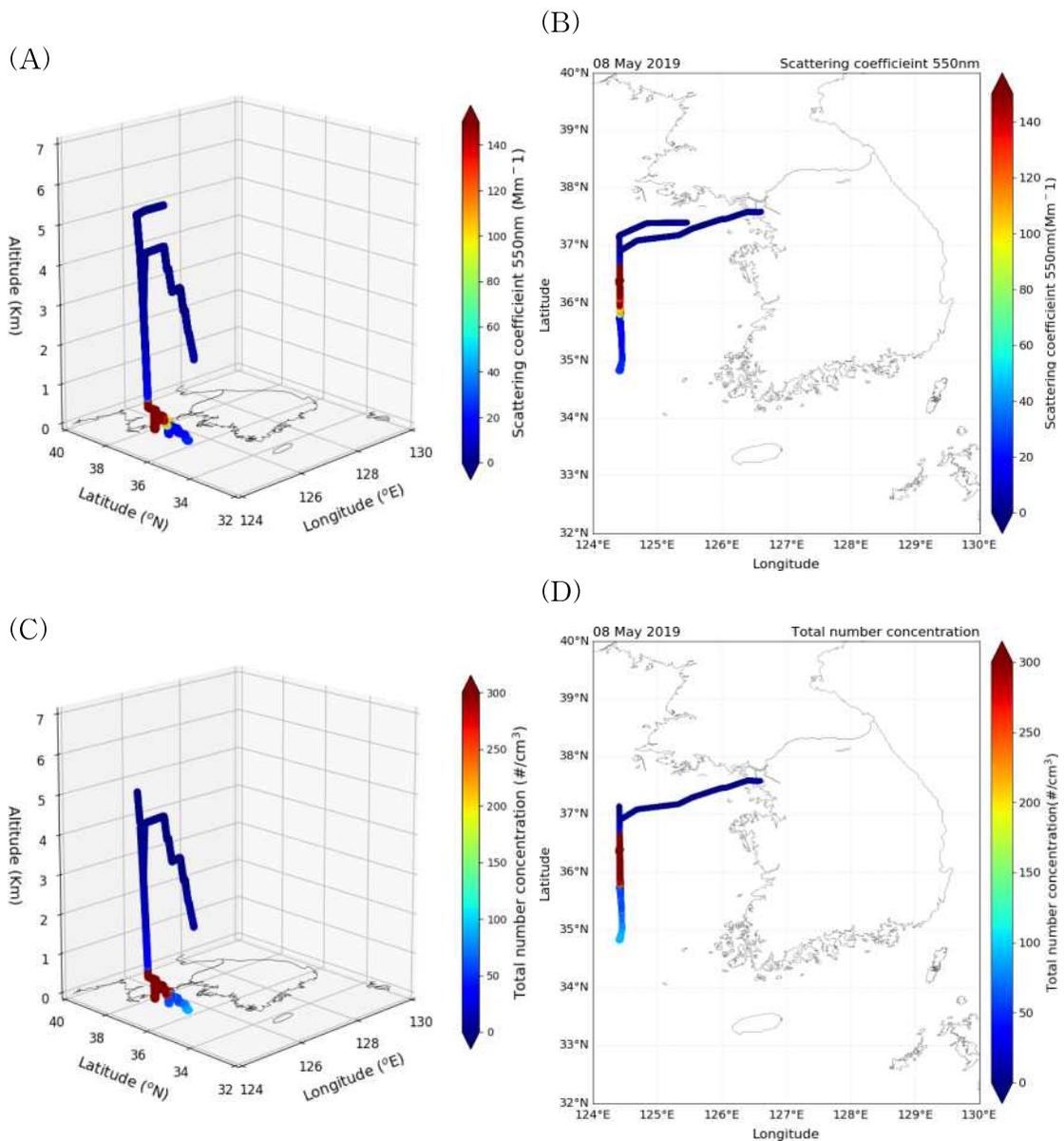


Fig. 2.3.6. Aerosol light scattering coefficient distribution ((A) stereoscopic flight route, (B) plane flight route) and aerosol total concentration ((C) stereoscopic flight route, (D) plane flight route) for aircraft route on May 8.

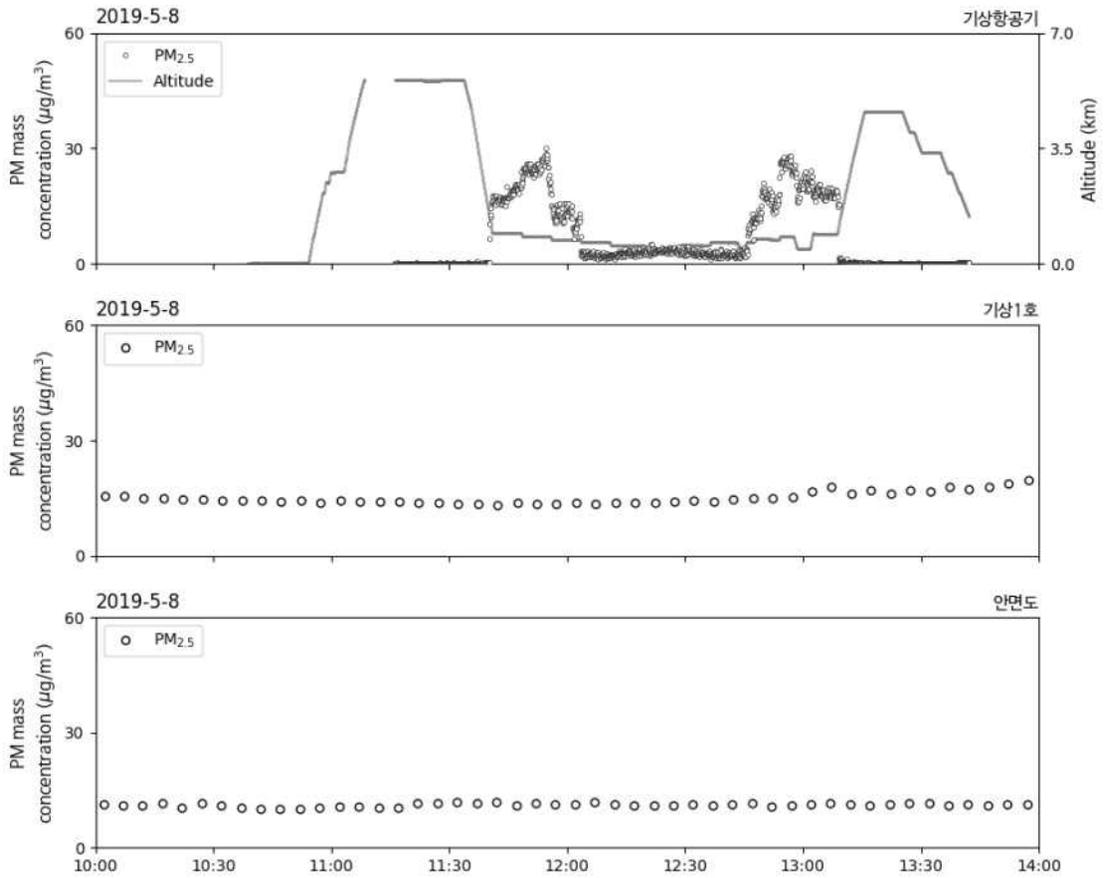


Fig. 2.3.7. Mass concentration of meteorological aircraft-observed ship-Anmyeondo observatory over aircraft observation time (May 8, 2019).

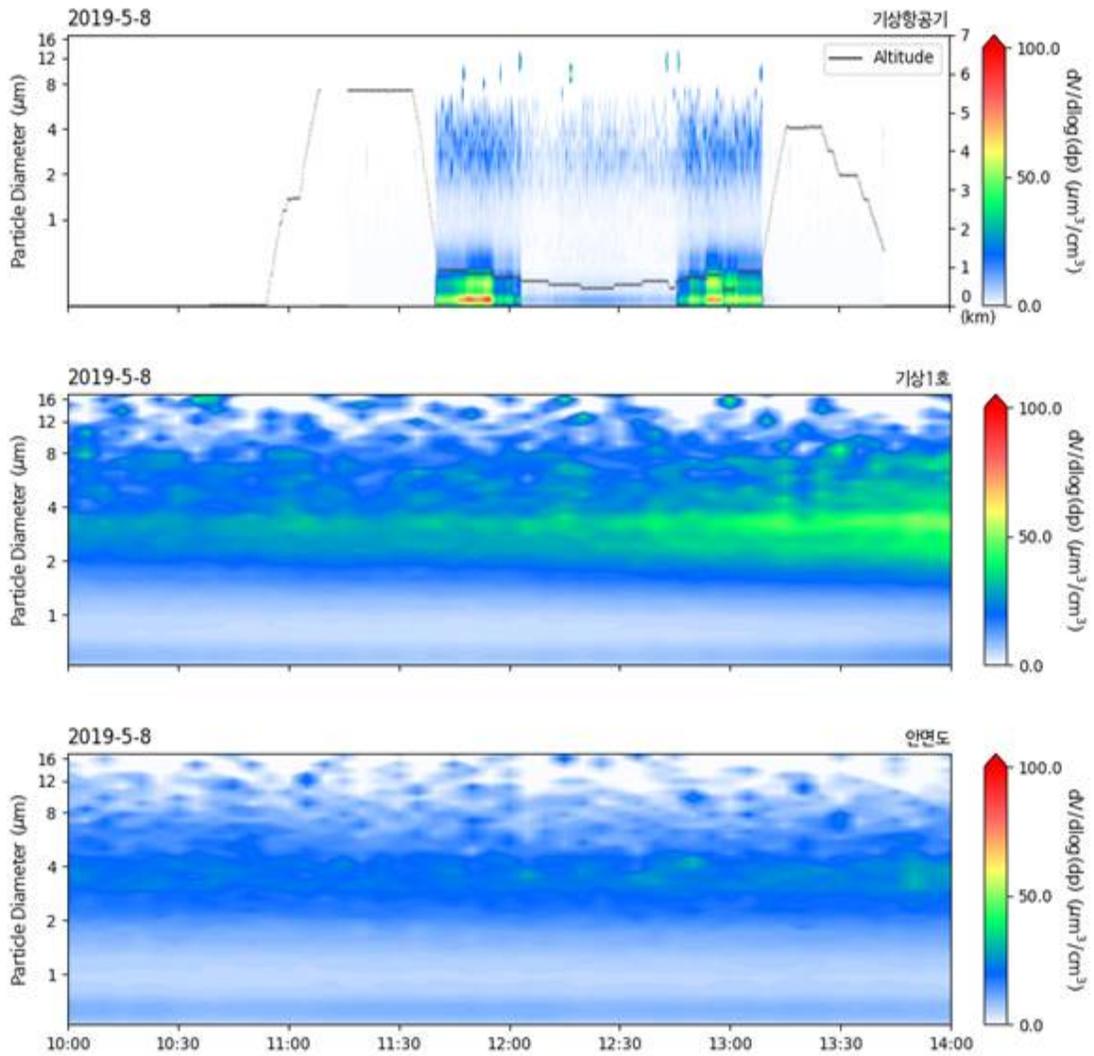


Fig. 2.3.8. Particle size distribution of meteorological aircraft-observed ship-Anmyeondo observatory over aircraft observation time (May 8, 2019).

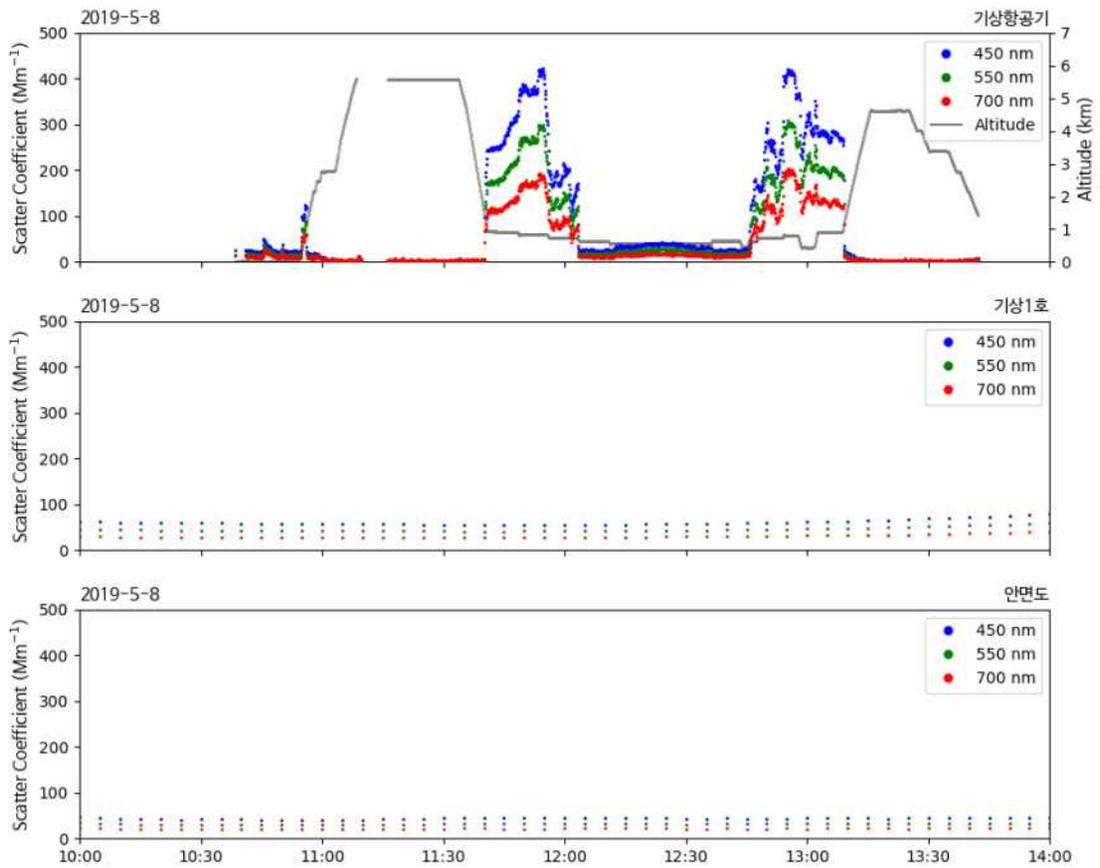


Fig. 2.3.9. Aerosol light scattering coefficient of meteorological aircraft-observed ship-Anmyeondo observatory over aircraft observation time (May 8, 2019).

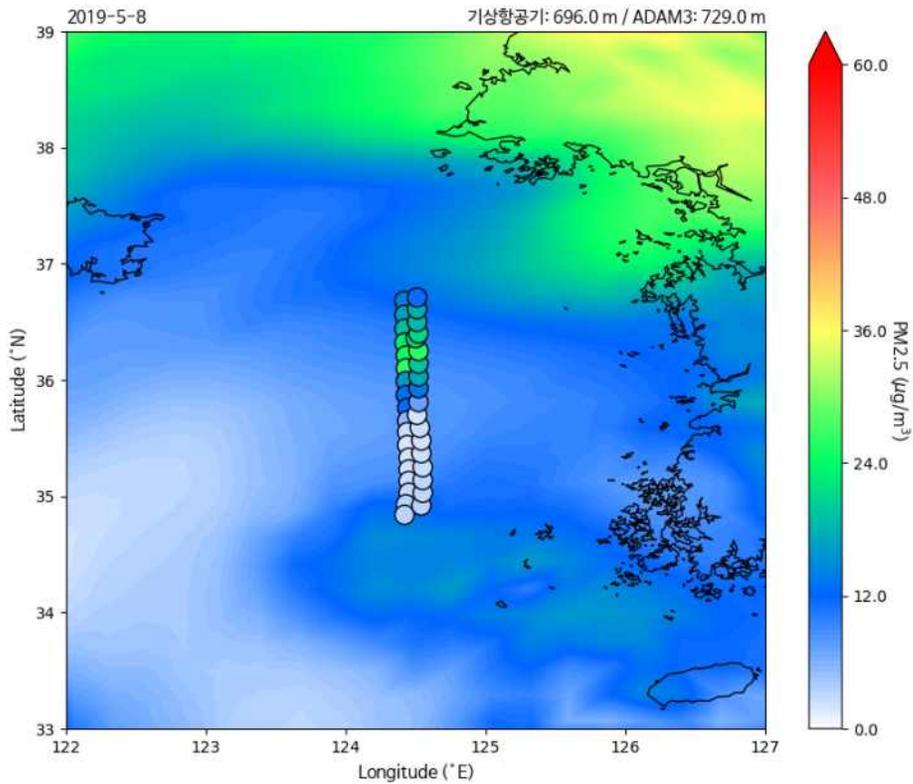


Fig. 2.3.10. Comparison of PM_{2.5} mass concentrations as measured by Sky-OPC mounted on meteorological aircraft on the west sea on May 8, 2019 and PM_{2.5} concentrations of ADAM3.

(3) 2019년 5월 22일 비행

5월 22일 비행은 10시 03분 서울 김포공항에서 이륙하여 약 2시간 55분 동안 서해 상공을 운항하였으며, 기상1호의 운항 경도인 124° 12′ 26″E ~ 124° 37′ 23″E에서 위도 36° 39′ 31″N ~ 34° 48′ 32″N 를 1회 반복 운항하였다. 관측 타겟 지역의 운항 시간은 약 11시 00분부터 12시 30분 무렵까지이며, 운항고도는 남하 시 3000 ft (약 900 m)에서 시작하여 약 5분 동안 고도를 유지하며 관측 후 약 300 ft씩 하강하여 1000 ft (약 400 m)까지 내려간 뒤, 북상 시 1300 ft 5분 관측 후 1000 ft로

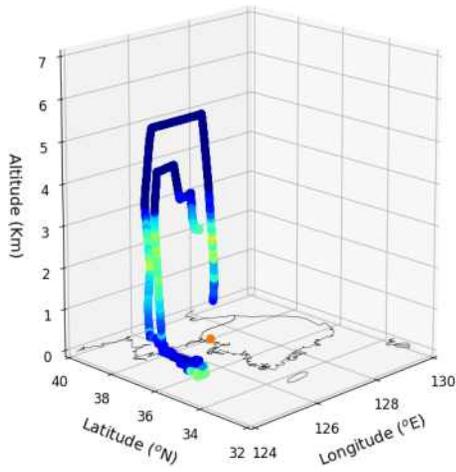
유지하며 관측을 진행하였다. Fig. 2.3.11은 5월 22일 비행한 기상항공기의 입체 운항 경로, 평면 운항 경로, 위도 변화에 따른 운항고도와 경도변화에 따른 운항고도이다. 6항차의 경우 목표 운항 경로 중 약 37°N과 37°N 부근에서 에어로졸의 농도가 약간 증가하였다.

항공 관측 자료 분석에서는 비행 목표구역에서 관측한 자료만 사용했다. Fig. 2.3.12는 항공기 탑재장비인 Sky-OPC로 관측한 PM_{2.5}의 질량농도를 운항 시간과 운항 고도에 따라 표현한 그림으로 고도 1000 ft 부근에서 PM_{2.5} 질량농도가 10 µg/m³ 수준으로 다소 증가하였으나, 기상1호의 약 30 µg/m³와 지상의 18.6 µg/m³보다는 낮았고, 그 이외의 영역에서는 5 µg/m³ 이하로 낮게 관측되었다. Fig. 2.3.13은 기상항공기 관측시간에 따른 기상항공기-기상1호-안면도 기후변화감시소에서 관측된 입경분포이다. 항공관측에서는 미세입자가 우세하였고, 기상1호에서는 미세입자와 조대입자 모두, 그리고 지상에서는 조대입자가 우세였다. Fig. 2.3.14는 기상항공기 탑재장비인 광산란계수측정기를 이용하여 5월 22일 관측한 3파장(450 nm; 파랑, 550 nm; 초록, 700 nm; 빨강)에서의 광산란계수이다. 항공관측에서 관측된 에어로졸 산란계수는 항공기를 하강하고 상승시키는 지점인 37°N 부근의 고도 12000 ~ 5000 ft 사이와 35°N 부근의 1000 ~ 1300 ft 사이에서 증가하였으며, 지상에서보다 높게 관측되었다. 하지만 기상항공기-기상1호-안면도 기후변화감시소 3지점 중 기상1호에서 가장 높은 값의 에어로졸 광산란계수가 관측되었다.

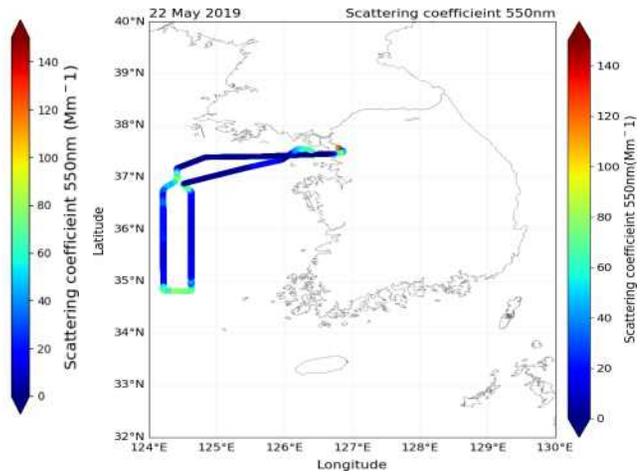
광산란입자계수기로 관측된 3파장(450, 550, 700 nm) 광산란계수의 경우 인천에서 목포방향으로 남하하는 방향에서 관측된 평균 산란계수는 각 파장별로 47.0±34.7 Mm⁻¹, 32.5±24.0 Mm⁻¹, 20.9±15.5 Mm⁻¹ 이었고, 목포에서 인천방향으로 북상하는 방향에서 관측된 평균 산란계수는 각 파장별로 37.3±31.2 Mm⁻¹, 26.3±21.2 Mm⁻¹, 17.3±13.5 Mm⁻¹ 수준으로 남하 때 모든 파장에서 높게 관측되었다. 비행 목표구역 전 지역에서 관측된 평균 산란계수는 각 파장별로 42.9±33.6 Mm⁻¹, 29.8±23.1 Mm⁻¹, 19.4±14.8 Mm⁻¹ 이다.

Fig. 2.3.15는 2019년 5월 22일 서해상에서 기상항공기에 탑재된 Sky-OPC로 관측한 PM_{2.5} 질량 농도와 2019년 5월 22일 00 UTC (09 KST)에 예측한 기상청 현업 황사·연무통합예측모델(ADAM3)의 PM_{2.5} 농도 결과와 비교한 것이다. 비교 결과 대부분의 영역에서 모델보다 낮은 농도로 항공관측이 이루어 졌다.

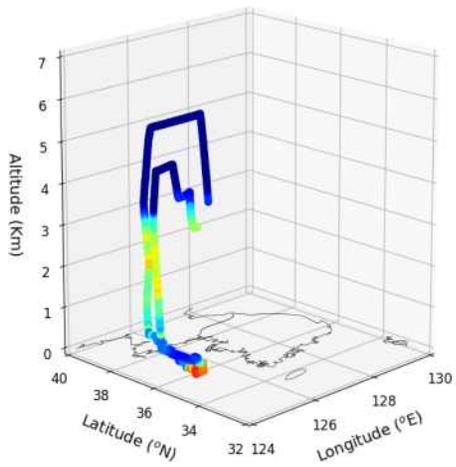
(A)



(B)



(C)



(D)

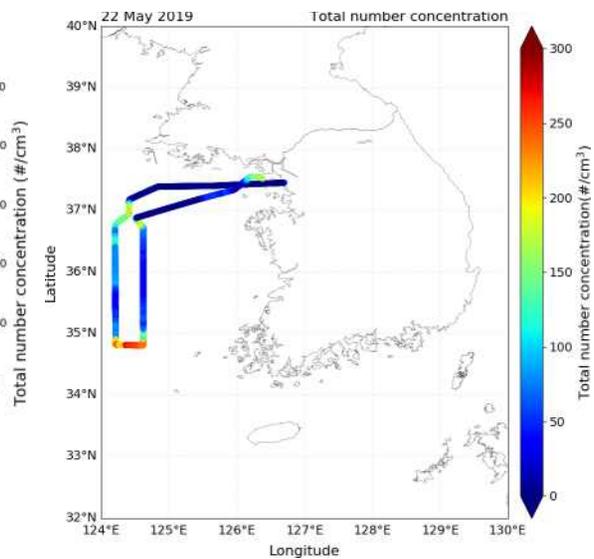


Fig. 2.3.11. Aerosol light scattering coefficient distribution ((A) stereoscopic flight route, (B) plane flight route) and aerosol total concentration ((C) stereoscopic flight route, (D) plane flight route) for aircraft route on May 22.

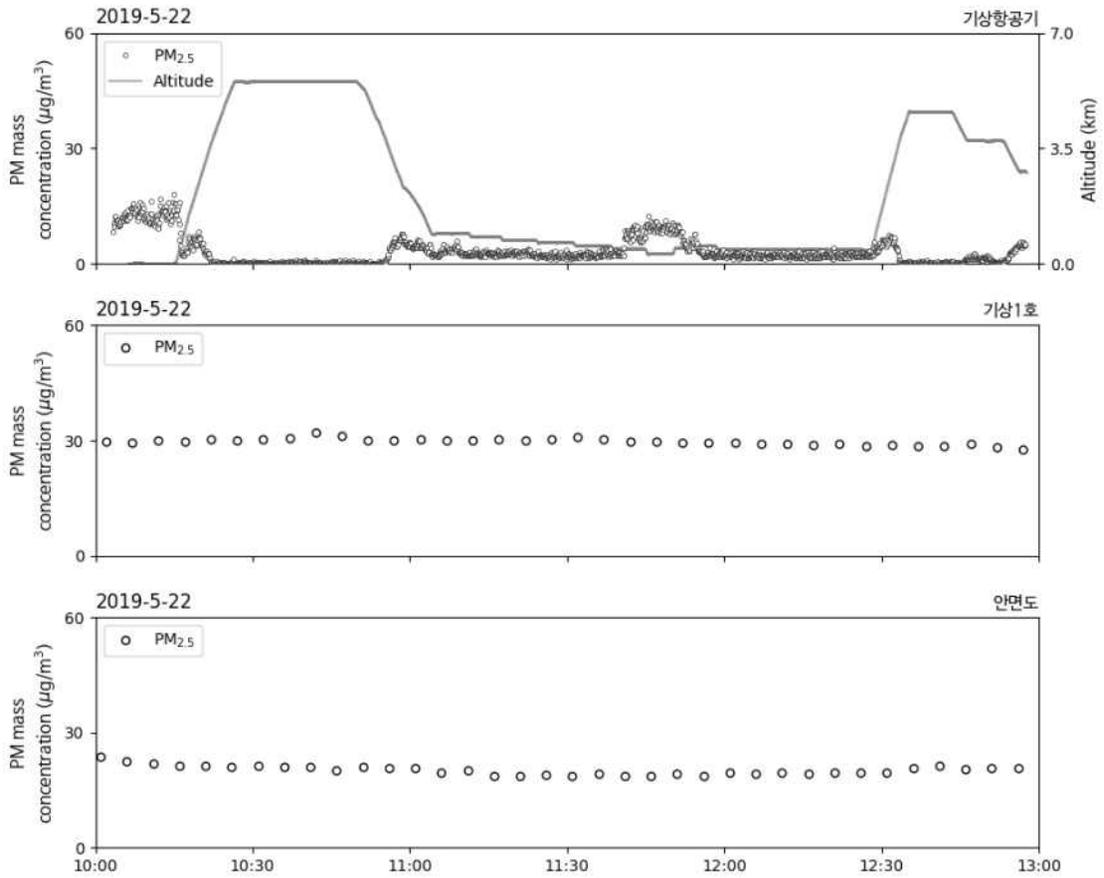


Fig. 2.3.12. Mass concentration of meteorological aircraft-observed ship-Anmyeondo observatory over aircraft observation time (May 22, 2019).

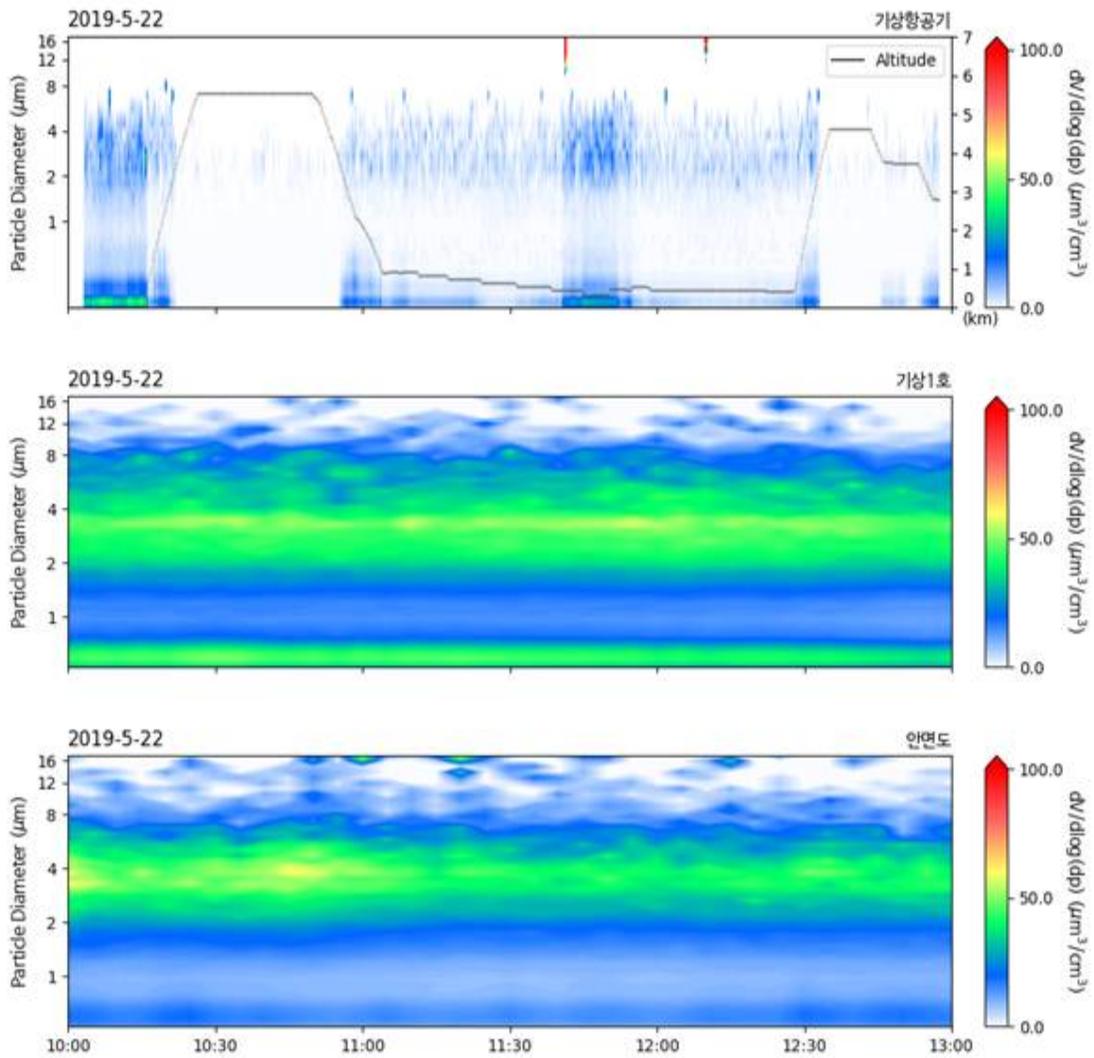


Fig. 2.3.13. Particle size distribution of meteorological aircraft-observed ship-Anmyeondo observatory over aircraft observation time (May 22, 2019).

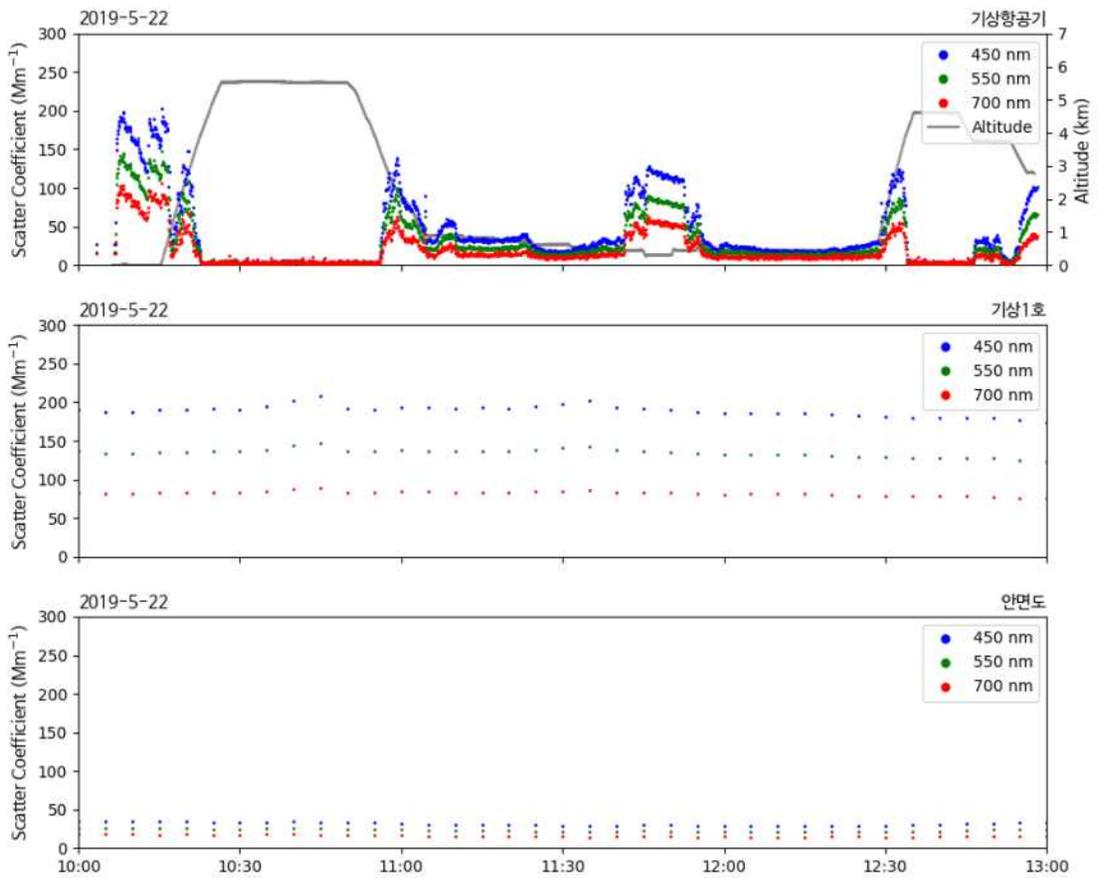


Fig. 2.3.14. Aerosol light scattering coefficient of meteorological aircraft-observed ship-Anmyeondo observatory over aircraft observation time (May 22, 2019).

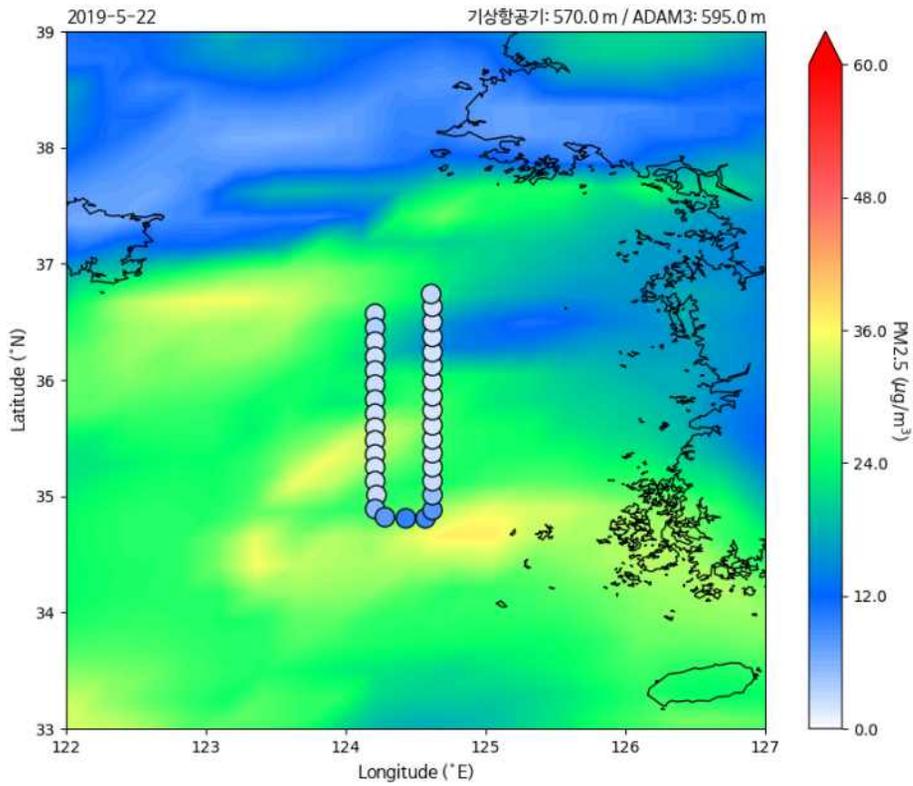


Fig. 2.3.15. Comparison of PM_{2.5} mass concentrations as measured by Sky-OPC mounted on meteorological aircraft on the west sea on May 22, 2019 and PM_{2.5} concentrations of ADAM3.

2. 반응가스 최적 항공관측기법 개발

(1) 인렛 및 펌프 등 관측장비 개선

기상항공기 운항시 반응가스 관측을 위한 개선작업을 Table 2.3.2와 같이 진행하였다.

Table 2.3.2. Summary in improvement activities

Date	Equipments	Activities
2019.6.24	Analyzers	Increasing flow rate & re-calibrated (O ₃ , SO ₂ , NO _x) - Modification : Orifice diameter
	P. regulator	Operated with 3 reactive gases analyzers - Working pressure : 800 hPa - Connection : O ₃ , SO ₂ and NO _x analyzers
	Pump	Added to pressure regulator for bypass - Capacity : 44 L/min
2019.9.27	Analyzers	Removing internal leakages of NO _y analyzer - 3 points within external converter Bypass the external sampling equipment Increasing flow rate & re-calibrated (NO _y) - Reuse orifices of the external sampling equipment
	P. regulator	Operated with 4 reactive gases analyzers - Working pressure : 800 hPa - Connection : O ₃ , SO ₂ , NO _x and NO _y analyzers

개선작업은 기존에 운용하였던 반응가스 관측장비 개조 작업과 펌프와 정압장치와 같은 새로 장치를 구성하는 작업 등 크게 2가지 작업으로 나눌 수 있으며, NO_y 관측장비 단독운용 여부에 따라 총 2회에 걸쳐 실시되었다. 반응가스 관측장비의 유효 유량을 증대하기 위해서 Table 2.3.3과 같이 반응가스 관측장비 내부의 오리피스를 교체하고 정압장치 바이패스 후단에 펌프를 설치하였다.

Table 2.3.3. Summary in modified orifice with diameter index

Date	Replacement parts		Before	After
2019.6.24	O ₃ analyzer	Sample Cell A	15	22
		Sample Cell B	15	22
	SO ₂ analyzer	Sample Cell	13	20
	NO _x analyzer	Sample Cell	20	22
		Dry Air	8	10
2019.9.27	NO _y analyzer	Ext. sampling for NO	22	n/a
		Ext. sampling for NO _y	22	n/a
		Sample Cell	20	22
		Dry Air	10	13

또한, 반응가스 관측장비의 관측 정확도 향상 및 관측장비 내부의 샘플 챔버에 일정한 압력으로 반응가스를 채우기 위해 정압장치를 개발하였다(Fig. 2.3.16). 정압장치는 Inlet 유량을 수동으로 조절하는 needle 밸브와 일정한 압력을 유지하기 위해 설정값보다 많은 유량이 유입되었을 때 자동으로 바이패스하기 위한 MFC, 그리고 일정한 압력으로 유지된 Inlet 샘플을 4개의 반응가스 관측장비로 일정하게 내보내기 위한 Manifold 등 크게 3 부분으로 구성된다. 이 외에도 실제 반응가스 관측장비로 공급되어지는 샘플 압력을 관측하고 관측된 압력값을 확인하여 설정값으로 Inlet 압력이 운용되고 있는지 현장에서 정압장치 앞면의 Display 화면에서 확인할 수 있다. 6월에 개발 완료된 정압장치는 반응가스 관측장비와 Inlet에 Fig. 2.3.16 (d)와 같이 NO_y 관측장비를 제외하고 구성되어 기상항공기에 장착되었다.

Fig. 2.3.17은 8월 1일 기상항공기 운항 고도에 따른 반응가스 관측장비 챔버 압력을 나타낸 그래프이다. 정압장치와 연결된 O₃, SO₂, NO_x 관측장비의 챔버 압력은 고도 변화와 무관하게 일정한 챔버 압력이 관측됨을 알 수 있었다. 800 hPa 외기 압력(AIMMS Barometer)에서 800 hPa 정압유지가 다소 흔들려 Inlet 밸브를 다소 조정하였을 때, 관측된 반응가스 관측장비 챔버 압력의 작은 변동이 15:30 부근에서

발생하였다. 정압장치와 연결되지 않았던 NO_y 관측장비의 챔버 압력은 기상항공기 운항 고도에 영향을 받는 외기압력과 유사한 압력변화 경향을 확인함으로써 다른 반응가스 관측장비와 함께 운용중인 정압장치가 정상적으로 작동하고 있음을 알 수 있었다.

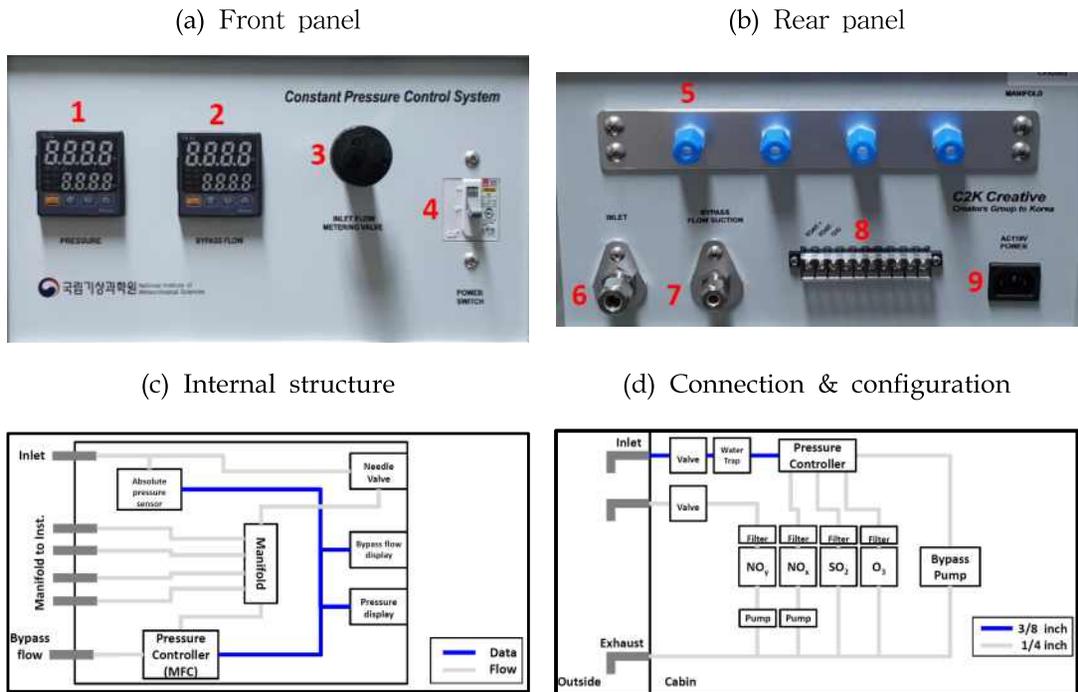
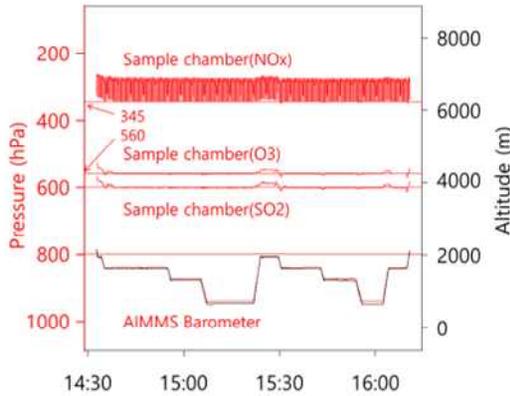


Fig. 2.3.16. Pressure regulation equipment (a) Front panel (① Absolute pressure display, ② Bypass flow display, ③ Inlet flow metering valve, ④ Power switch), (b) Rear panel (⑤ Manifold to instrument, ⑥ Inlet, ⑦ Bypass pump, ⑧ RS485 Communication, ⑨ Power plug), (c) Internal structure, (d) Connection & configuration.

(a) Altitude and chamber pressure for O₃, SO₂ and NO_x analyzers



(b) Altitude and chamber pressure for NO_y analyzer

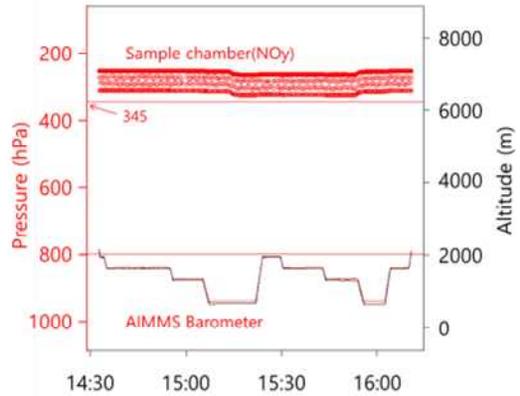


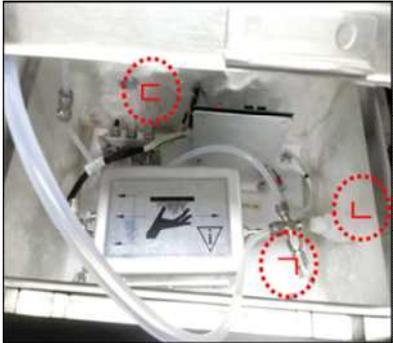
Fig. 2.3.17. Sample chamber pressure measured on Oct 1, 2019 (a) in case of O₃, SO₂, NO_x analyzer, (b) in case of NO_y analyzer.

Table 2.3.4. Guide for sample chamber pressure under const. 800 hPa inlet.

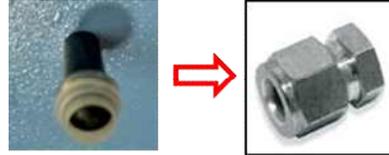
Date	Type of Analyzer	Pressure (hPa)
2019.6.24	O ₃ analyzer	600 (ref. value)
	SO ₂ analyzer	560 (ref. value)
	Case A	345 (ref. value)
	NO _x analyzer Case B	285
	Case C	277
2019.9.27	Case A	330 (ref. value)
	NO _y analyzer Case B	265
	Case C	263

NO_y 관측장비를 정압장치와 함께 운용하기 위해 관측장비 내부의 부품을 일부 교체하거나 특정 영역의 Fitting을 재진행 하였으며(Fig. 2.3.18), 외장 샘플링 장치를 구성에서 제외하였다(Fig. 2.3.19).

(a) Internal leakages in Ext. Converter



(b) Replacement at ⊖ point



(c) Replacement at ⊕ point

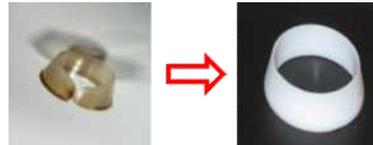
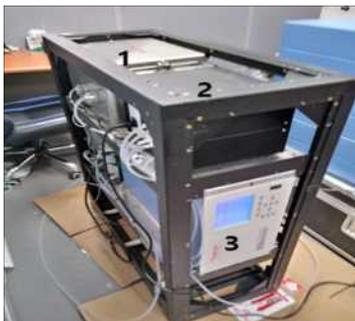


Fig. 2.3.18. External converter for NO_y analyzer and replacement parts (a) Exchanged parts in external converter(⊖, ⊕) 및 Re-fitting position(⊗), (b) Part for ⊖, (c) Part for ⊕.

(a) NO_y analyzer



(b) Schematic change of Ext. sampling equipment in NO_y analyzer

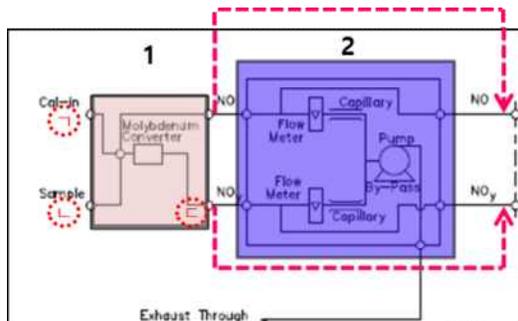


Fig. 2.3.19. Organized NO_y analyzer for the air-plane and schematic drawing for external equipment for NO_y analyzer (a) Aircraft rack configuration (① External converter, ② External sampling equipment, ③ NO_y analyzer), (b) Internal configuration of external equipment for NO_y analyzer and positions(⊖, ⊕, ⊗) for replacement parts.

9월 27일 NO_y 관측장비를 포함한 모든 반응가스 관측장비를 Fig. 2.3.20과 같이 정압장치에 연결하였다. Fig. 2.3.21은 9월 27일 기상항공기 운항 고도에 따른 반응가스 관측장비 챔버 압력을 나타낸 그래프이다. 그래프의 녹색 배경을 가진 관측 시간대는 다른 시간대에 비해 기상항공기 운항 고도에 따른 외기 압력(AIMMS)이 변화함에도 불구하고 모든 반응가스 관측장비의 챔버 압력은 일정하게 유지되었다. 따라서 NO_y를 포함한 O₃, SO₂, NO_x 반응가스 관측장비 4대에 연결된 정압장치가 정상적으로 작동하고 있음을 알 수 있었다.

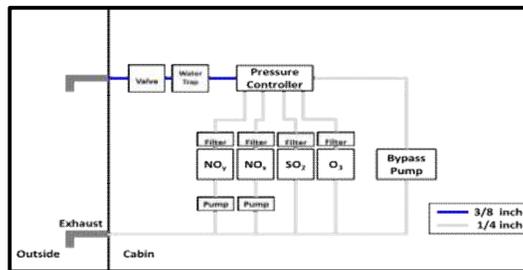
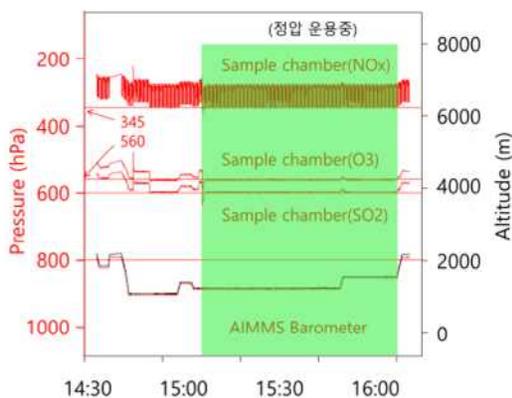


Fig. 2.3.20. Connection & configuration for const inlet pressure with 800 hPa on Sep 27, 2019.

(a) Altitude and chamber pressure for O₃, SO₂ and NO_x analyzers



(b) Altitude and chamber pressure for NO_y analyzer

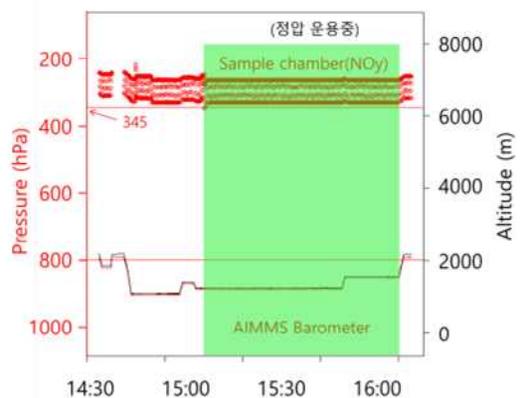


Fig. 2.3.21. Sample chamber pressure on Oct. 16, 2109 (a) in case of O₃, SO₂, NO_x analyzer, (b) in case of NO_y analyzer.

(2) 관측장비 개선 결과 - 10월 31일 사례

정압장치는 기상항공기 이륙과 동시에 800 hPa로 운용되었으며, 서해상 반응가스 특성을 알아보기 위해 기상항공기는 안면도 앞바다 일정한 경도(124°17' E)에서 남북(37°N ~ 36°N)으로 왕복하였다(Fig. 2.3.22), 고도는 10,000 ft (3,090 m)에서 2,000 ft (610 m)까지 2,000 ft씩 낮추면서 관측하였으며, 정압장치 운용에 따라 기상항공기 외부에서 일정한 압력으로 샘플링될 것으로 추정되는 고도 6,000 ft (1,860 m), 4000 ft (1230 m), 2000 ft (610 m)에서 관측된 반응가스 농도를 Fig. 2.3.22와 같다.

오존(O₃), SO₂, NO_y 반응가스는 고도가 낮아질수록 농도가 증가하는 경향을 보였다. 특히, 1,230 m 고도에서 남쪽(36°N)과 북쪽(37°N) 인근 지역에서 관측된 반응가스 농도차가 다른 고도에 비해 높게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 전 영역에서 NO_x 농도는 전체적으로 0 ppb 보다 낮게 분석되었다. 다만, NO_y 농도와 유사한 경향을 보이는 것으로 표준가스 교정을 통해서 정확하게 분석 가능할 것으로 판단된다.

(a) Flight(black) & observation(red) path

(b) Conc. of gases VS altitude

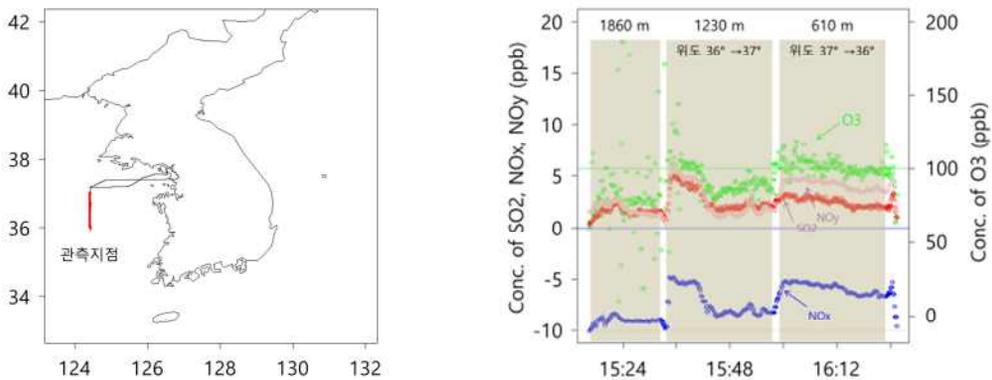
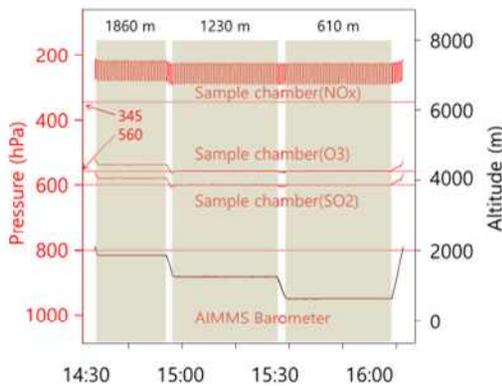


Fig. 2.3.22. Measuring reactive gases under constant inlet pressure with 800 hPa on Oct 31, 2019 (a) Aircraft observation path, (b) Concentration of reactive gases depending on its altitude.

관측 기간에 1,860 m 이하 고도에서 기상항공기가 운항할 때, 외기에서 Inlet을 통해 샘플링되는 반응가스 관측장비 챔버 압력의 그림 Fig. 2.3.23과 같다. 기상항공기 운항고도 1,860 m에서 관측 기압이 800 hPa보다 조금 높게 관측될 경우에만 NOx를 제외한 반응가스 관측장비의 챔버 압력은 참조값보다 약 10 ~ 20 hPa 낮게 관측되었다. 이는 정압장치의 운용시 바이패스 밸브가 완전히 잠기는 경우가 없기 때문에 발생하는 현상으로 파악된다. 다만, NOx 관측장비 챔버 압력은 일정하게 유지되긴 하지만 10월 16일 관측되었던 345 hPa보다 낮게 관측되었다.

(a) Altitude and chamber pressure for O₃, SO₂ and NO_x analyzers



(b) Altitude and chamber pressure for NO_y analyzer

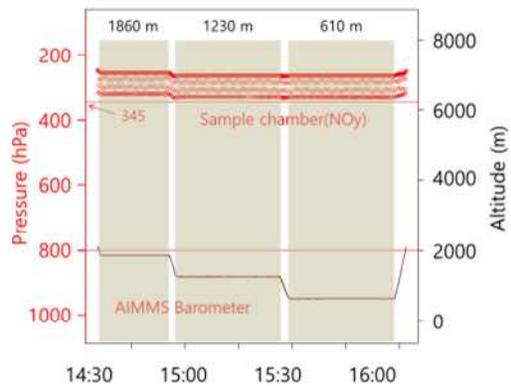


Fig. 2.3.23. Sample chamber pressure under constant inlet pressure with 800 hPa on Oct 31, 2019 (a) in case of O₃, SO₂, NO_x analyzer, (b) in case of NO_y analyzer.

기상항공기의 다양한 운항 고도에서 유효유량 확보하고 정확한 반응가스 농도를 관측하기 위한 인렛 및 펌프 등 정압장치를 포함한 관측장비 개선작업을 진행하였고 서해상 해상관측을 통해 개선효과를 알아보았다. 기상항공기 운항 중에 고도를 변경하여도 약 2,000 m (800 hPa) 이하의 고도에서는 운항고도의 대기를 일정한 압력으로 샘플링 하여 반응가스 농도를 관측할 수 있었으며, 관측 위치/고도에 따른 반응가스 농도 차이를 확인할 수 있었다. 향후에는 서해상 반응가스 농도 관측뿐만 아니라 지상 관측 장비와 비교실험과 2,000 m 이상의 고도에서 정압장치 운용실험을 진행하고자 한다.

3. 항공기를 이용한 대기질 관측장비 교정 및 분석기술 개발

탄소 에어로졸(BC)은 화석연료의 연소와 식생연소로부터 대기 중으로 직접 방출되는 일차생성 입자이다. BC는 인간건강, 기후변화, 에어로졸 이차생성 등의 영향을 주어 국내외적으로 활발한 연구가 진행되고 있다. 국립기상과학원은 기상항공기에 SP2를 설치하여 BC관측을 준비하고 있다.

(1) 지상관측 결과와 비교를 통한 SP2 자료 신뢰도 검증

2019년 7월 29일부터 8월 9일까지 서울 성북구 안암동에 위치한 고려대학교에서 SP2를 이용하여 내화성 탄소 에어로졸(refractory BC, rBC)를 관측하였다. Fig. 2.3.24는 지상관측기간 rBC 평균 질량농도와 수농도를 그린 것이며, 그 결과는 Table 2.3.5와 같이 각각 $0.58 \pm 0.32 \mu\text{g m}^{-3}$ 와 $335.9 \pm 189.8 \# \text{cm}^{-3}$ 이었다. 일변화에서 rBC와 무기탄소(elemental carbon, “EC”)는 오후시간에 비하여 오전시간에 상대적으로 고농도로 관측되었고 배출원 특성과 대기 중 노화정도 확인하기 위한 질량중앙입경(mass median diameter, MMD)(Fig. 2.3.25)과 EC/rBC 비(Fig. 2.3.26)가 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 rBC가 외부유입보다는 도시에서 국지적으로 자동차 등에 의해 발생하는 이동오염원의 영향을 크게 받았음을 알 수 있었다. 비교 관측기간 EC의 질량농도는 rBC보다 35%가 높았고 이러한 rBC와 EC의 질량농도 차이는 상이한 측정 입경범위, 내화성 정도, 측정 불확도에 의해 야기되었음을 확인하였다.

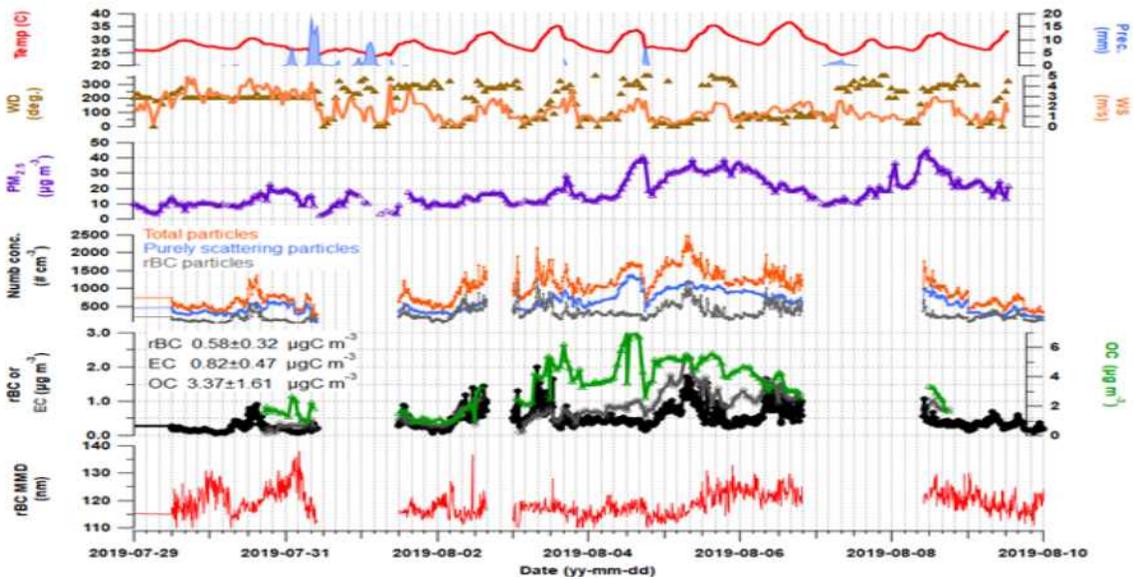


Fig. 2.3.24. Time-series of aerosol concentrations, size and meteorological parameters for the whole measurement period. SP2 data was averaged for 10 minutes, and the others are 1 hours averaged.

Table 2.3.5. Summary of aerosol measurements conducted at Korea University in Anam-dong, Seoul during 29 July, 2019 ~ 9 August, 2019.

	Mean±std	25 percentile	50 percentile	75 percentile
rBC mass conc. (μg m ⁻³)	0.58±0.32	0.35	0.49	0.78
rBC number conc. (# cm ⁻³)	335.9±189.8	202.9	288.8	454.9
rBC MMD (nm)	119.5±4.7	116.1	118.9	122.6
PM _{2.5} (μg m ⁻³)	176.±9.1	10	16	22
EC (μg m ⁻³)	0.82±0.47	0.42	0.80	1.1
OC (μg m ⁻³)	3.4±1.6	1.8	3.5	4.7
OC/EC	5.3±5.1	2.9	4.1	5.9
EC/rBC	1.5±0.6	1.1	1.5	1.8

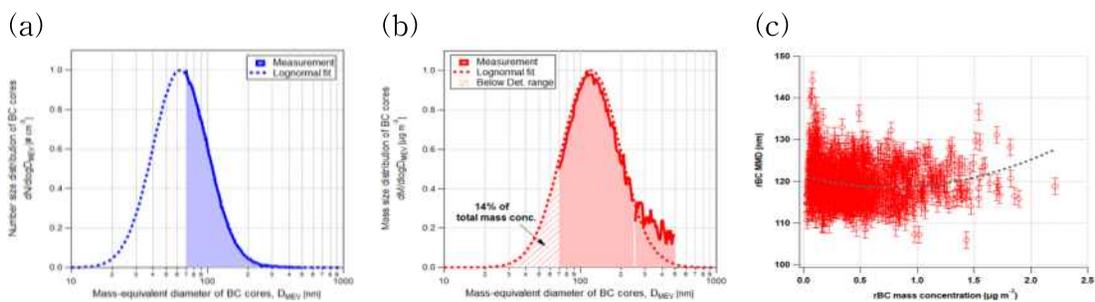


Fig. 2.3.25. The size distributions of rBC particles. (a) number size distribution, (b) mass size distribution, and (c) a relationship between rBC mass concentration and MMD. In (a) and (b), the data on 5 August 2019 was used for example.

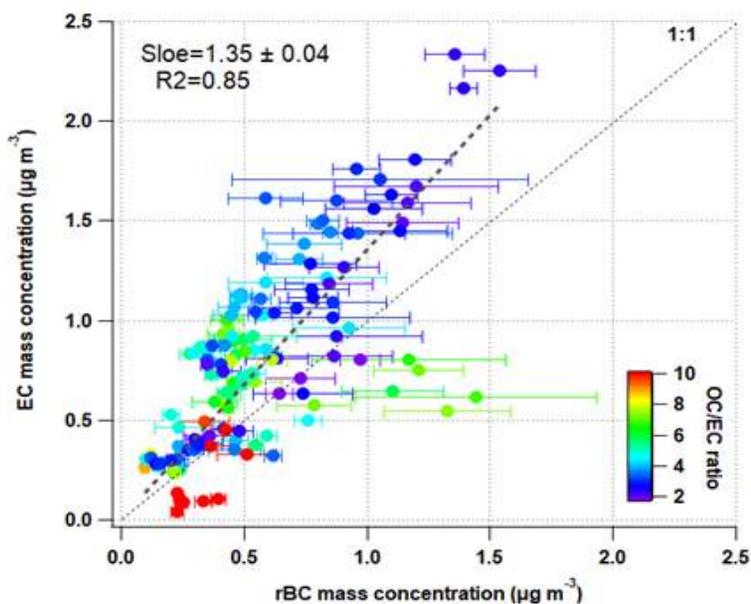


Fig. 2.3.26. The relationship of rBC and EC mass concentrations. The data is color coded by OC/EC ratio, and the error bar stands for a standard deviation of rBC mass concentrations.

(2) 서해상 BC 수농도, 질량농도 분포 관측자료 산출

2019년 9월 10일 15시 15분부터 15시 43분까지 총 28분 동안 서해상(35.6°N ~ 36.1°N, 124.2°E ~ 124.4°E, 고도 600 ~ 680 m)에서 기상항공기에 설치된 SP2를 이용한 rBC 항공관측이 수행되었고 항공관측기간 당시의 기상조건은 Table 2.3.6과 같다. 항공관측기간 rBC의 평균 질량농도와 평균 수농도를 Table 2.3.7에 정리하였으며, 그 결과는 각각 $0.027 \pm 0.015 \mu\text{g m}^{-3}$ 와 $10.3 \pm 2.8 \# \text{cm}^{-3}$ 이었다. 항공관측기간 rBC 평균 질량농도는 매우 낮은 수준이었다(Fig. 2.3.27). 아시아, 미국, 유럽에서의 항공관측 rBC 평균 질량 농도는 대략 $0.2 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상인데 반하여 본 실험기간 rBC 질량농도는 10배 정도 낮은 수준이었고, 이는 에어로졸의 장거리이동으로 농도가 증가하는 봄철 북극지역의 rBC 수준과 유사하였다. 항공관측 전날 강수로 인하여 rBC 질량농도 관측값이 낮아 본 항공관측기간 관측된 rBC 질량농도는 서해상 배경대기 농도 수준임을 확인할 수 있었다.

Table 2.3.6. Meteorological factors (temperature, relative humidity, wind speed, pressure) and flow average, standard deviations, and minimum values of SP2.

	temp (°C)	RH (%)	Ws (m/s)	P (hPa)	Sample Flow (vccm)
Average	23.8	97.9	85.7	940.6	119.9
(STDEV)	(0.17)	(1.05)	(2.85)	(0.37)	(0.89)
MIN	23.4	94.5	79.4	939.2	116.7
MAX	24.4	100	94.3	941.6	122.8

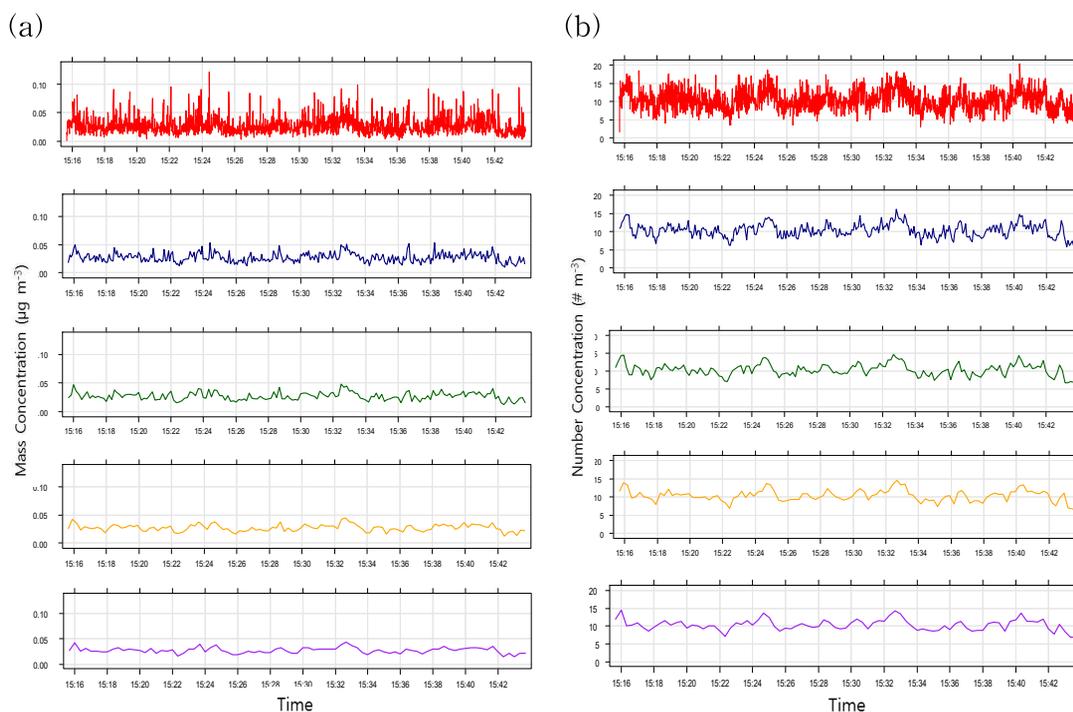


Fig. 2.3.27. Time series distribution of rBC. (a) mass concentration, (b) number concentration (1 second, 5 second average, 10 second average, 15 second average, 20 second average from above).

Table 2.3.7. Aerosol concentration from aircraft observation.

	Total triggered particle Number Conc. ($\# \text{m}^{-3}$)	rBC Number Conc. ($\# \text{m}^{-3}$)	Scatter Number Conc. ($\# \text{m}^{-3}$)	rBC Mass Conc. ($\mu\text{g m}^{-3}$)
mean \pm std	18.7 \pm 4.9	10.3 \pm 2.8	8.9 \pm 3.8	0.027 \pm 0.015
minimum	5.5	3.0	1.0	0.002
25 percentile	38.0	8.5	6.1	0.017
50 percentile	15.4	10.0	8.5	0.024
75 percentile	18.4	12.0	10.9	0.033
maximum	21.9	20.4	22.5	0.121

제 4 절 연직 이산화탄소와 메탄에 대한 항공·위성·모델의 종합 비교 분석

기상항공기 Kingair 350에는 대기 중 온실가스(CO_2 , CH_4)와 CO를 관측하기 위한 Picarro사의 Cavity Ring Down Spectroscopy (CRDS - 2401m)가 설치되어 있으며 2018년 2월부터 1초 간격으로 연속관측을 수행하고 있다. CRDS 장비는 현재 온실가스 항공관측에 광범위하게 사용되고 있으며, 기존의 관측 장비에 비해 광분해능이 높기에 시간에 따른 오차가 적고, 수분의 간섭을 최소화할 수 있다. 최근 항공기를 이용한 온실가스의 연속관측은 관측기술의 발전으로 활발하게 진행되고 있다.

위성 및 지상관측에 비해 항공관측은 정기적인 시·공간 자료 생산에 한계가 있지만, 다양한 장소에서 정밀 연직분포자료를 제공할 수 있다는 장점이 있다. 위성관측자료 검증 및 전 지구적인 온실가스 연직분포의 장기 변동성 파악을 위하여, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)/Earth System Research Laboratory (ESRL)/Alaska Coast Guard (ACG)는 정기 관측 캠페인을 통해 장기간의 항공관측을 수행하였다. 최근에는 오염원 근처에서의 직접적인 항공관측을 통해 탑다운(top-down)방식의 탄소 플럭스 산출 연구가 활발히 진행되고 있다. 한반도에서의 온실가스 항공관측은 2016년 5-6월 한미 대기질 공동조사 캠페인에서도 수행되었으며 관측 자료는 화학예측 모델 검증 등에 활용되었다(Tang et al., 2019).

한국은 동아시아의 주요 배출국인 중국과 인접해 있고, 인구밀도 대비 온실가스 배출도 높게 나타나고 있다. 따라서 장기적인 항공관측 자료는 온실가스의 연직분포 및 대류권을 통한 오염물질의 장거리 수송 등에 관한 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대한다. 본 보고서에서는 2019년 온실가스 관측자료 수집을 위한 정확성 분석실험(검·교정, 압력 민감도, 수분 오차) 전략과 관측 장비 개선, 2018년 12월부터 2019년 12월까지 수행한 온실가스 관측 및 분석결과를 자세히 기술하였다.

1. 온실가스(CO_2 , CH_4)의 항공관측 방법

(1) 온실가스 관측 방법

온실가스 관측을 위한 외부공기 흡입구는 Kingair 350의 좌측면 전단에 위치하고 있으며, $\frac{1}{2}$ " 구경의 Stainless Steel (SS) 재질이다(Fig. 2.4.1). 흡입구는 비행 역방향으로 배치되어 큰 먼지 입자, 물방울 등의 유입을 최소화하였고, 항공기 안쪽의 모

든 배관 또한 1/8"의 SS 재질로 구성하였다. 현재 기상항공기에 탑재되어 있는 CRDS-2401m은 항공관측에 최적화되어 있는 장비이기에, 장비 전단에 큰 물방울 유입을 방지하기 위한 수분 트랩(Water trap, 5 μ m air filter)을 장착하였고, 2019년 10월 이후부터는 수분오차를 줄이기 위하여 추가적으로 Nafion 수분 교환막을 이용한 제습제를 장착하여 관측을 수행하고 있다(Fig. 2.4.2). 온실가스의 수분희석효과를 보정하기 위하여 Picarro사에서 제공한 보정 변수를 사용하고 있지만, 기존 연구에 의하면 대기 중 수분 함량이 2%를 초과하게 되면 제조사에서 제공한 변수에 의한 보정 오차가 커지기 때문에 정밀관측을 위하여 온실가스농도에 미치는 수분의 영향을 최소화할 필요가 있다. 그에 따른 제습제의 설계 및 제습 효과는 아래 절에서 더 자세히 다루도록 하겠다.



Fig. 2.4.1. The external view of KMA Kingair 350 (left) and inlet plate (right).

CRDS는 주기적으로 NOAA/WMO 표준가스를 이용하여 실험실에서 검·교정 된다. 항공관측용 CRDS는 대기압 혹은 그 이하의 압력 환경에서도 공동내의 압력이 일정하게 유지되지만, 검·교정 시에는 높은 압력의 표준가스(30 L 실린더, 2700 psi)를 사용하기 때문에, 표준가스 주입압력을 대기압과 유사한 상태로 조절해 줄 필요가 있다. 이를 위해 자동 압력조절 및 자동 시료 주입이 가능한 검·교정 시스템을 자체 제작하여 검·교정을 수행하였다(Fig. 2.4.2). 이 시스템의 작동 및 제어 원리는 첫째, 실린더에 장착된 압력조절기로 표준가스 주입압력을 일차적으로 조절

한다. 둘째, RS-232통신방식의 8구 선택 밸브(Valco사)를 자동 제어하여 저농도에 서 고농도 순서로 표준시료를 40분씩 순차 주입한다. 셋째, 표준가스 실린더 후단에 설치한 전자압력조절기(모델:ITV-X)의 전광 패널에 최적의 설정압력을 입력하고(대 기압보다 약 0.5 ~ 0.7 bar이상), CRDS장비 전단에 설치한 압력 센서에서 감지한 압 력과 설정압력이 일치할 때까지 자동압력조절기에서 유량을 자동 제어해주는 방식 으로 시료 주입압력을 정밀하게 제어한다.

NOAA에서 제작된 표준가스는 한반도 온실가스 농도를 대표하고, 세계기상기구 규격(Calibration scale: WMO-CO₂-X2007, WMO-CH₄-X2004A, WMO-CO-X2014A) 세 개의 표준가스를 사용하였다(CO₂: 374.06, 419.45, 467.78 ppm; CH₄:1756.5, 1901.3, 2325.4 ppb; CO:89.7, 311.1 ppb). CO의 경우 제로가스를 추가하여 함께 3점 교정³⁾을 수행하였고, 모든 관측결과는 3점 교정을 이용하여 보정되었다. 2018년 11 월, 12월에 검 · 교정을 수행한 결과 한 달 사이 장비 오차는 CO₂의 경우 0.03 ppm, CH₄은 0.9 ppb로 나타났으며, WMO/GAW의 호환성 범위(CO₂: 0.1 ppm; CH₄: 2 ppb)내에서 무시할 수 있는 오차 수준이다. 국립기상과학원 기상항공기 운항여건을 고려하여 2019년에는 3월, 6월, 8월, 9월에 각각 WMO규격의 표준가스를 이용한 실험실 검 · 교정이 수행되었다.

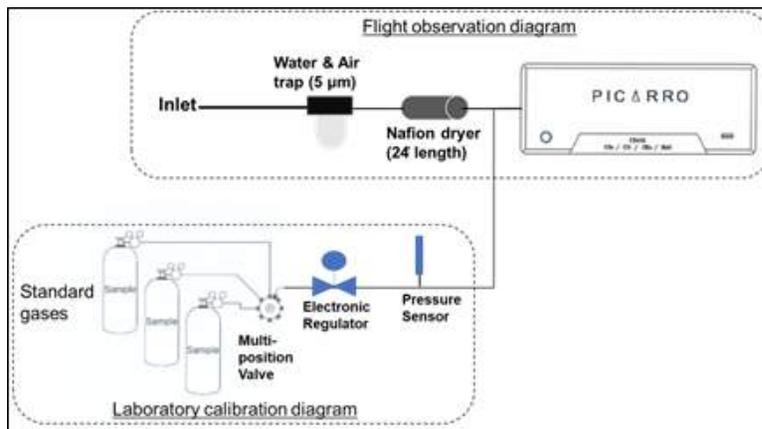


Fig. 2.4.2. Measurement flowchart and laboratory calibration scheme.

3) 서로 다른 3개의 표준가스 농도를 이용한 선형성 검증 및 교정 방법

(2) 관측 자료의 정확성 분석 결과

기상항공기 온실가스 관측 장비의 불확도는 기기의 정밀도(Precision), 수분 희석 효과 보정에 따른 오차, 압력민감도에 따른 오차 등이 고려되었다. 장비의 정밀도는 실험실에서 표준가스를 2시간 주입하여 계산한 표준편차로 산정하였으며, 2019년 4차례 검·교정과정에서 산정된 평균 표준편차는 CO₂, CH₄, CO에 대해서 각각 0.03 ppm, 0.1 ppb, 2.2 ppb로 나타났다. CRDS-2401m은 수분의 농도도 관측가능하며 수분보정을 거친 건조공기농도(dry-mole fraction)를 기기에서 산출한다. 기상항공기로 관측한 온실가스 농도는 모두 Picarro사에서 제공하는 수분보정 변수를 사용하여 산출한 값이며, 이 오차를 산출하기 위하여 수분 보정 오차 검증 실험을 수행하였다. 이 실험에는 수분 유입/제거가 동시에 가능한 Nafion 수분 교환막 튜브(길이:24")가 장착된 밀폐 아크릴 박스를 사용하였다(Fig. 2.4.3).



Fig. 2.4.3. The picture of Nafion membrane tube(24" length) installed in acrylic box (left), and it filled with chemical dryer of silica gel (right).

Nafion 튜브로는 NOAA에서 제작한 표준시료(CO₂: 467.78 ppm; CH₄: 2325.4 ppb)를 유입시키고, 아크릴 박스 내에는 인위적으로 수증기를 제공하였다. 이는 표준시료 내 인위적 수분 증가를 유발시키며, 이로 인한 표준시료의 농도변화를 실험하였다. Fig. 2.4.4에 CRDS에서 보고하는 수증기 농도에 따른 CO₂와 CH₄의 건조공기

몰농도(제조사의 수분 변수로 보정된 건조 몰농도)와 실제 표준시료 농도와의 잔차(Residual)를 나타냈다. 수분의 유입농도가 증가 할수록 잔차는 증가하고 있으며 약 1.5%까지의 수분농도범위에서는 급격하게 증가하지만 1.5-2.5% 사이에서는 실제 보정된 농도와 표준시료 농도와의 잔차가 완만하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 2019년 관측을 수행하면서 CRDS에서 관측한 수분 농도의 범위를 살펴보면 약 0.03-1.3%내에 있으며, 이 실험결과를 기준으로 살펴보면 2019년 전체 관측 기간 수분 보정 오차는 CO₂와 CH₄에 대해 각각 0.16ppm, 1.7ppb로 산정되었고, CO의 수분 희석오차는 아주 미미하게 나타났으며 약 0.5 ppb로 산정되었다.

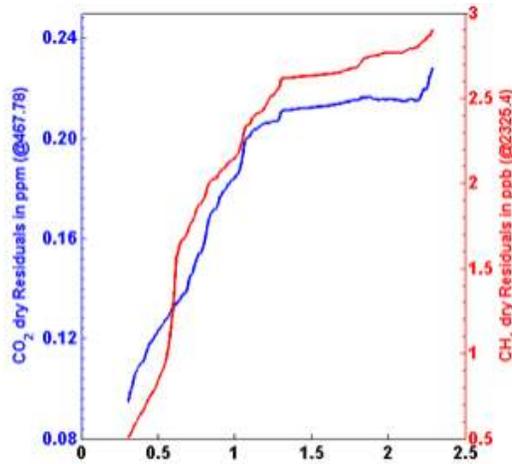


Fig. 2.4.4. The residuals of CO₂ and CH₄ dry mole fractions corrected by Picarro manufacture provided water correction parameter corresponding to NOAA standard gas at mole fraction of 467 ppm for CO₂ and 2325.4 ppb for CH₄ with gradually increasing water vapor content from 0.3 to 2.3%.

온실가스 관측 장비의 압력민감도에 따른 정밀성(재현성) 실험을 위해, 시료주입 압력을 비행 상황과 비슷한 조건으로 모의하여 수행하였다. Fig. 2.4.5는 표준시료 주입압력을 1000~300hPa(비행관측범위)까지 조절하였을 때 장비에서 관측된 실제 농도 값이다. 현재 온실가스장비의 공동내의 압력을 기준으로 항공관측 최대비행고도를 340 hPa (약 8 km)까지로 설정하였으며, 압력민감도에 따른 오차는 반복실험

시간(약 3시간)에 대한 관측 자료의 표준편차로 계산하였으며, CO₂, CH₄, CO에 대하여 각각 0.03 ppm, 0.5 ppb, 3 ppb로 나타났다.

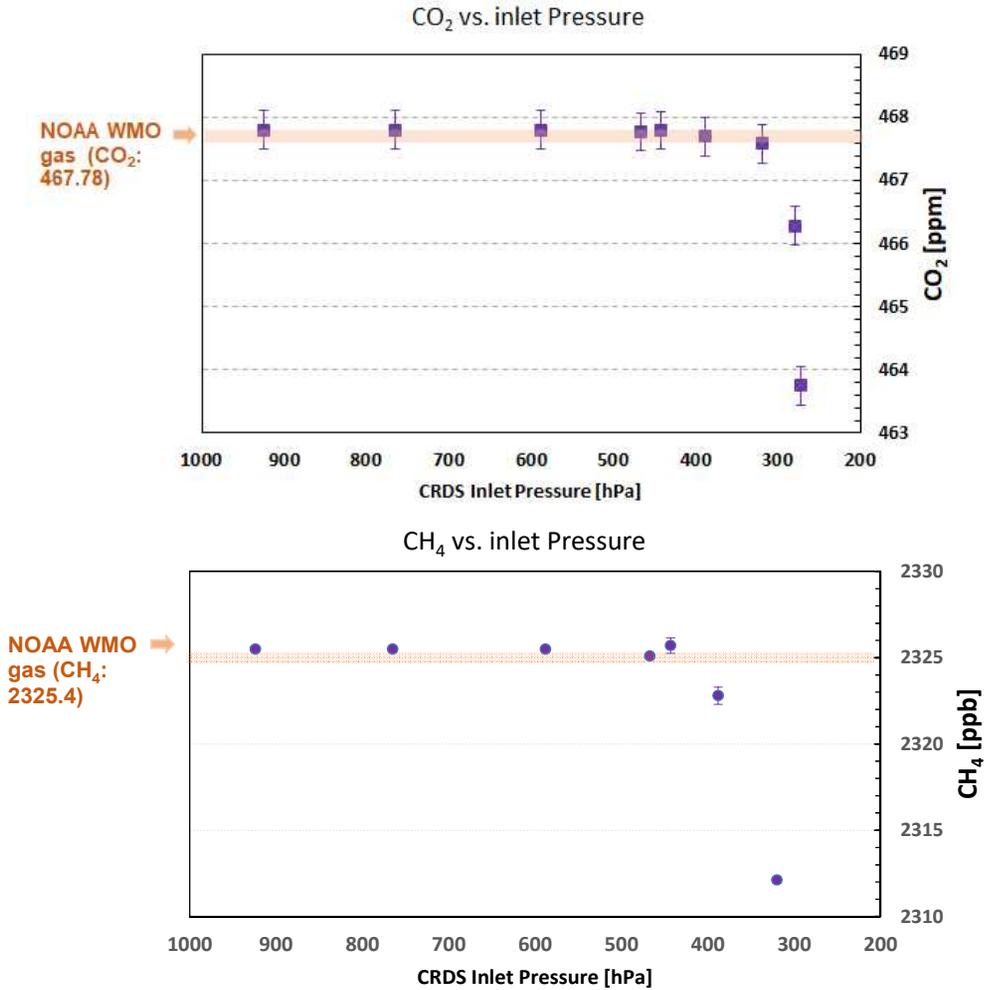


Fig. 2.4.5. The CO₂ and CH₄ dry mole fractions of NOAA standard gas at mole fraction of 467 ppm for CO₂ and 2325.4 ppb for CH₄ corresponding to simulated flight conditions over the pressure range of 320–1000 hPa.

기상항공기 온실가스 관측 장비의 불확도는 기기의 정밀도, 수분 보정에 따른 오차, 압력민감도에 따른 오차 등이 고려되었고, 전체 관측 불확도는 CO₂:0.16 ppm,

CH₄:1.8 ppb, CO:3.7 ppb로 각각 계산되었다. 항공기에 설치된 장비의 불확도 외에 NOAA에서 보고하는 표준시료에 대한 확장 불확도(Expanded Uncertainty)를 Table 2.4.1에 함께 나타냈으며, 향후 자료의 분석 및 활용과정에서 고려되어야 할 것이다.

Table 2.4.1. The total uncertainty of KMA aircraft based CO₂, CH₄ and CO measurements for 2019.

	CO ₂ (ppm)	CH ₄ (ppb)	CO (ppb)
Instrument precision	0.03	0.1	2.2
Water correction	0.16	1.7	0.5
Repeatability test simulated flight condition	0.03	0.5	3.0
Total uncertainty	0.16	1.8	3.7
Expanded uncertainty of NOAA standard	0.19	3.4	0.9

(3) 비행관측 임무 개요

2019년부터 온실가스 항공 관측은 기존에 진행하던 임무(CM-01: Climate Monitoring) 이외에 새로운 관측 임무(CM-02) 계획을 수립 및 확대하여 서로 다른 과학적 목적의 두 가지 관측임무를 각각 다른 임무일에 수행 하였다. 첫 번째 온실가스 항공관측은 안면도 기후변화감시소를 중심으로 나선형 비행을 통해 고도에 따른 온실가스 농도분포를 측정하는 것이다. 나선형 관측 고도범위는 0.5 ~ 8.5 km이며, 나선형 관측반경은 고도 2 km이하에서는 약 1-2 km, 그 이상고도에서는 9 km 이내로 유지하였다(Fig. 2.4.6). 이는 지표면에서의 빠른 배출 변화를 시·공간

적으로 조밀하게 관측하기 위함이다. 나선형 관측 상·하강율은 약 300 m/min, 비행속도는 77 m/s를 유지함으로써 수직 공간 해상도는 약 10 m이며 조밀한 공간해상도에서의 연속관측이 가능하다. 관측임무일은 위성 GOSAT이 안면도 근처를 통과하는 일정과 최대한 일치시킴으로써, 안면도에서 온실가스의 연직분포특성을 파악할 뿐만 아니라, 향후 관측 자료를 통해 항공·위성·모델의 종합적인 비교분석을 수행하고자 하였다.

두 번째 항공관측임무(CM-02)는 2019년부터 새롭게 수립한 관측임무로 김포-제주 여객기 항로를 따라 김포에서 완도까지 내륙지역 저고도 비행 관측이다(Fig. 2.4.1.). 비행속도는 77 m/s를 유지함으로써 수평 공간해상도는 약 80 m로, 상세하게 한국 서부지역에서의 고해상도 온실가스 농도를 관측하였다. CM-02 관측 임무를 통해 대기혼합경계층 내에서의 온실가스 농도를 지속적으로 관측함으로써, 한국의 온실가스농도 시·공간 분포특성과 자연적·인위적 배출 특성을 분석하고자 하였다.

2019년도에는 CM-01 관측 8회, CM-02 관측 9회를 각각 수행하였고, 자세한 관측 일정, 대기 온도와 CO₂, CH₄의 농도 범위를 Table 2.4.2에 제시하였다.

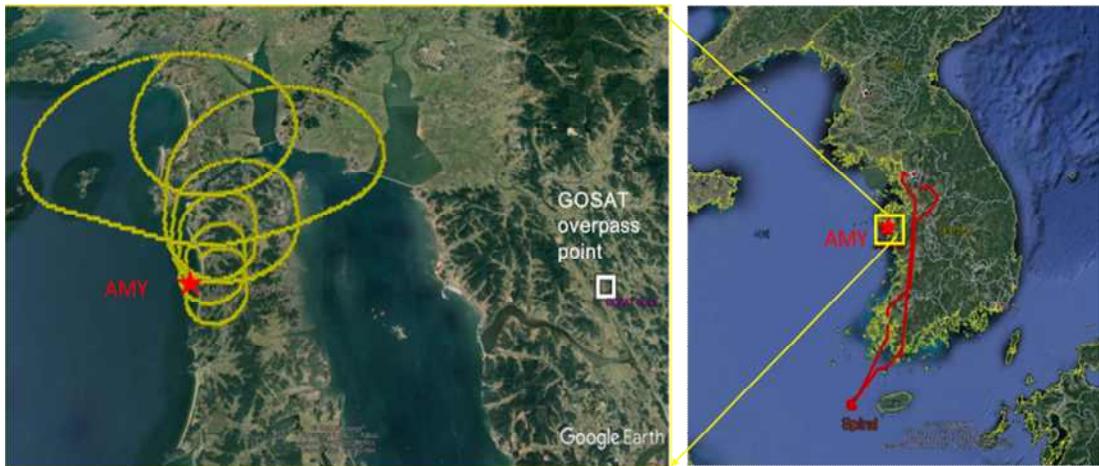


Fig. 2.4.6. Flight designs and typical tracks for CM-01 (left) and CM-02 missions (right).

Table 2.4.2. KMA Kingair campaign flight details for 2019. The maximum and minimum temperature, CO₂, CH₄ levels observed during flight are shown.

Flight	Flight date	Flight hours	Temperature		CO ₂		CH ₄	
			Min	Max	Min	Max	Min	Max
CM1.1	6 Jan	4:10	-46.2	-2.0	410.1	419.9	1889.4	1973.1
CM1.2	17 Feb	4:20	-49.3	6.6	410.8	428.2	1885.0	1977.0
CM1.3	27 April	3:10	-39.8	20.0	414.0	429.9	1891.1	1990.2
CM1.4	23 June	3:15	-40.7	34.5	393.9	414.1	1903.5	2076.2
CM1.5	3 Aug	4:05	-16.8	26.5	409.9	518.1	1852.9	2103.0
CM1.6	12 Oct	4:00	-20.5	28.3	407.4	418.4	1903.1	2010.4
CM1.7	16 Nov	4:10	-42.7	10.6	409.5	429.2	1892.5	2037.9
CM1.8	8 Dec	4:00	-49.8	7.2	408.3	433.2	1886.0	1991.4
CM2.1	18 Jan	5:25	-6.0	9.9	412.5	458.7	1920.4	2049.5
CM2.2	15 April	5:35	-	-	415.8	439.8	1937.1	2032.4
CM2.3	15 May	3:45	11.4	24.0	413.5	439.2	1937.5	2105.3
CM2.4	21 June	3:15	10.8	18.5	405.5	419.9	1920.7	2180.2
CM2.5	4 July	3:45	16.3	20.4	396.9	417.2	1923.5	2265.0
CM2.6	19 Aug	3:46	15.8	28.4	388.8	425.5	1947.8	2239.5
CM2.7	22 Oct	5:25	8.9	25.1	411.1	424.4	1936.9	2047.5
CM2.8	21 Nov	5:41	2.7	15.0	411.0	422.3	1916.3	1997.6
CM2.9	13 Dec	3:40	-2.9	4.1	413.9	437.6	1945.6	2178.5

2. 온실가스의 연직분포 관측 연구

(1) 월별 연직분포 특성 분석

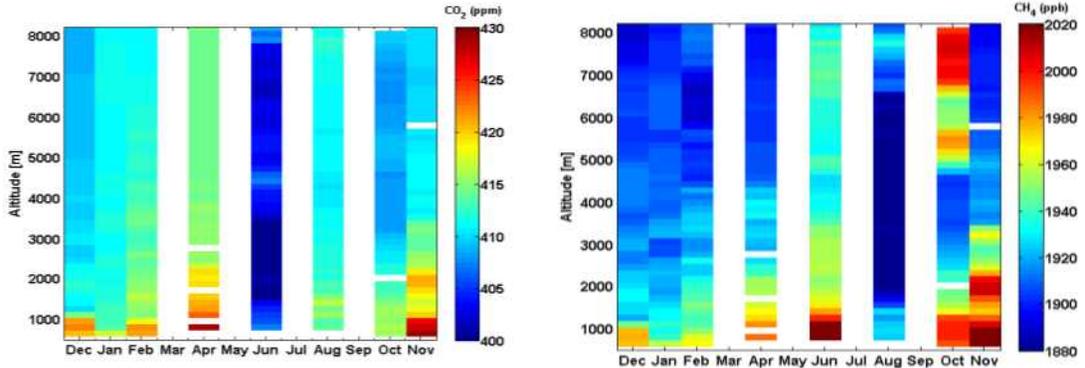


Fig. 2.4.7. The vertical distributions of CO₂ (left) and CH₄(right) for each flight campaign during period of 2018.12–2019.11

안면도에서 관측한 CO₂와 CH₄의 연직관측 농도를 고도 100 m 단위 평균값으로 살펴본 결과(Fig. 2.4.7), 전체 관측고도에 걸쳐 CO₂의 경우 12월부터 4월까지의 증가 패턴을 보이고 있다. 식물에 의한 흡수가 활발해지는 6월은 경계층 내(2 km 이내, BL)와 자유대류권(3 km 이상고도, FT)에서 각각 401.3, 404.5 ppm으로 나타났고, 이는 전 지구 배경대기 관측소들의 월별 평균값(MBL 배경농도) 410.35 ppm보다도 낮은 수준이다(Table 2.4.3). 8월은 CO₂의 활발한 흡수가 예상되는 월이지만 8월 3일 관측사례는 BL 뿐만 아니라 FT에서의 평균값도 MBL 배경농도 월 평균값보다 높은 수준을 보이고 있다. 전체적으로 북반구의 농도변화패턴(겨울과 봄철 증가, 여름철 감소)과 일치하는 것으로 나타났지만 6월에 나타나는 저농도의 연직분포는 몬순 기단의 영향 등 보다 상세하고 다양한 사례 분석이 요구된다. 전체 관측 기간 동안 FT에서의 평균 농도값은 CO₂의 경우 410.1 ppm으로 현재 MBL 평균 배경농도인 409.57 ppm과 비슷한 값을 보이고 있다. 상대적으로 겨울철이 더 일치하는 결과를 나타냈고 북반구 농도가 높아지는 봄철(4월)의 경우 FT의 평균 농도값이 MBL 배경농도에 비해 3 ppm 더 높게 나타났다.

CH₄은 BL과 FT 모두 MBL 평균값에 비해 각각 약 100, 40 ppb 높게 관측 되었

다. 이는 한반도에서의 메탄 배출강도가 높게 나타나고 있음을 설명하고 있다. 특히 6월과 11월 BL 평균농도가 MBL에 비해서 150 ppb 높게 나타났으며, 8월을 제외하면 북반구 메탄 농도 변화와 비슷한 양상을 보이고 있다. 전체 관측기간 중 FT에서의 최고 농도는 1956.7 ppb였으며, 10월 12일 발생하였다.

Table 2.4.3. The aircraft measurements of CO₂ and CH₄ mean concentrations below 2 km and above 3 km, respectively, and comparison to Global Marine boundary layer(MBL) concentrations from NOAA.

Observed date	CO ₂ (ppm)			CH ₄ (ppb)		
	below 2 km	above 3 km	Global MBL (month)	below 2 km	above 3 km	Global MBL (month)
1 Dec	415.0	409.1	408.95	1946.6	1902.5	1864.7
6 Jan	414.9	411.2	409.69	1945.3	1902.0	1864.7
17 Feb	417.8	411.7	410.14	1952.4	1909.3	1864.6
27 April	422.6	414.5	411.1	1970.0	1906.3	1865.2
23 June	401.3	404.5	410.35	2007.1	1936.3	1860.0
3 Aug	421.9	411.1	407.43	1929.2	1889.3	1863.6
12 Oct	415.5	408.5	408.80	1985.9	1956.7	1865.7
16 Nov	422.6	410.5	410.28	2010.6	1909.7	1866.2
08 Dec	416.4	411.0	409.6	1961.7	1923.4	1865.8

(2) 연직 고농도 사례 분석

연직 농도 분포는 관측 기간 및 시간, 기상 및 대기 상태에 따라 다양한 특징을 나타낸다. 2018년 12월 1일과 12월 15일 관측 사례는 이러한 특징의 대표적인 예이다(이

선란 등, 2019). 2018년 12월 CH₄의 전 지구 월평균 농도가 1866.8 ppb임을 감안하면, 12월 1일과 15일에서 관측한 CH₄의 분포특성은 모든 고도구간에서 전지구 배경농도에 비해 높은 것을 알 수 있다(Fig. 2.4.8). 12월 1일 사례의 경우 지표면 가까운 고도(약 600 m)에서 CH₄ 농도가 FT에서의 농도보다 60 ppb 높은 반면, 15일 사례의 경우 FT에서의 농도가 지표 근처보다 약 20 ppb 높게 관측되었다. 특히 12월 15일은 상층 700-500 hPa에서 CH₄ 농도의 급격한 증가패턴을 보였는데, 이와 같이 상세 연직분포 변동정보는 2초 간격의 고해상도 연속관측의 장점을 잘 보여주는 사례라고 볼 수 있다.

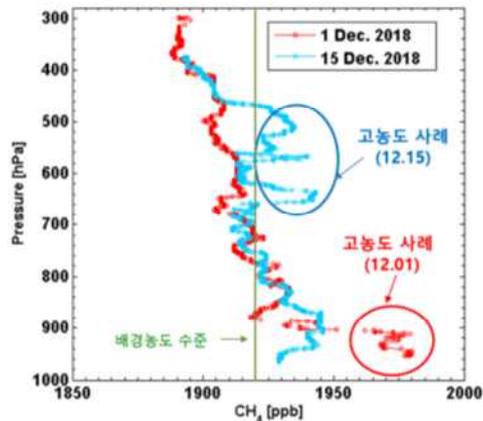


Fig. 2.4.8. Vertical descending profiles of CH₄ near Anmyeon-do on 1 and 15 December, 2018.

12월 1일 지표면 근처와 12월 15일 700-500hPa 범위에서 관측된 고농도 사례의 원인 분석을 위하여, CH₄와 CO의 상관성을 살펴보았다(Fig. 2.4.9). 대기 중 CO와 CH₄은 화석연료, 쓰레기 매립, 자동차 매연 등의 유사한 배출원 특성을 가지고 있다. 따라서 두 물질 사이의 높은 상관성은 동일 배출원/배출지역으로 귀결될 가능성이 높으며, 기울기를 통해 배출원/배출지역을 일차적으로 판단할 수 있다. 두 사례 모두 CO와 CH₄의 높은 상관성을($R^2 > 0.7$) 보였으나, 1일과 15일 고농도 사례의 CH₄(ppb)/CO(ppb) 기울기는 각각 0.30 ± 0.01 , 0.69 ± 0.02 로 나타났다. 이것은 두 번의 고농도 사례가 서로 다른 배출원/배출지역의 영향임을 시사한다. 12월 1일

CH₄/CO 기율은 일본 배경지역 Hateruma 관측소의 겨울철 기율기(0.2-0.4, (Tohjima *et al.*, 2014)) 범위에 근접한 수준이다. 일본 남단에 위치한 Hateruma 배경대기 관측소가 겨울철 중국동부 및 북부지역의 화석연료와 한반도 서쪽지역의 배출 영향을 주로 받는 것을 감안하면(Tohjima *et al.*, 2014), 12월 1일 CO, CO₂, CH₄ 고농도 사례는 주로 화석연료 사용에 의한 것으로 사료된다. 15일 FT에서 관측된 CH₄/CO기율은 2007-2008년 Pasadena (Wunch *et al.*, 2009)와 Mt. Wilson (Hsu *et al.*, 2010) 도심에서 관측된 CH₄/CO기율기인 0.66 ± 0.12 와 0.55 ± 0.03 유사하며, ARCTAS와 CalNex 항공기 캠페인을 통해 Log Angeles basin에서 관측된 CH₄/CO 기율기인 0.76 ± 0.04 와 0.74 ± 0.03 에 근접하는 값을 보이고 있다(Peischl *et al.*, 2013). 즉, 15일 안면도 FT에서 관측된 고농도 사례는 도심지역의 오염 특징과 유사한 것으로 추정된다.

안면도에 도달한 공기괴의 기원을 알아보기 위하여 12월 1일(Fig. 2.4.10(a))과 15일(Fig. 2.4.10(b)) 각각 950과 500 hPa 고도에 대한 총 5일의 HYSPLIT 역궤적을 계산하였다. 12월 1일 950 hPa (PBL 고도 이하: 600 m)에 도달한 공기괴는 중국의 동북부 지역을 빠르게 통과하여 서해, 한반도지역에서 2일 정체한 것으로 나타났다. 중국동부 지역 화석연료의 영향을 주로 받았다면 낮은 연소효율에 따라 높은 CO/CO₂ 기율기(0.02 - 0.04)를 보이지만(Halliday *et al.*, 2019), PBL고도 이하에서 관측된 CO/CO₂ 기율은 약 0.01 수준으로 낮게 나타났다. 또한 950 hPa 고도에서 관측된 풍속 2 m/s의 북동풍을 고려할 때, 12월 1일 사례는 한반도 서해근처의 화력발전소 및 산업단지의 영향을 받은 것으로 사료된다. 대기가 균일하게 희석된 상층에서는 공기괴가 주로 중국 중부 지역을 빠르게 통과하여 안면도에 도달한 것으로 나타났다.

12월 15일은 PBL고도이하와 이상에서 공기괴 기원이 선명한 차이를 보이고 있다. 950 hPa의 기단은 북극지역에서 빠르게 한반도로 유입된 것으로 보이며, 지상 최저기온이 영하 7.8°C로 나타난 것과 잘 일치하고 있다. 12월 15일 CH₄농도의 급격한 증가 패턴이 발생한 상층 500 hPa에 도달한 공기괴는 인도북부 지역 저고도 ($p=900$ hPa 이상)에서 3일을 정체한 공기가 빠른 속도, 높은 고도를 거쳐 안면도에 도달한 것으로 나타났다. 직접적인 배출원이 없는 한반도 상층 700-500 hPa에서 관측된 높은 수분함량과 CH₄농도는 인도북부 도심지역에서 기원했을 가능성이 높은

것으로 추정된다. 인도북부지역에서 밀집된 농업활동과 도심의 영향으로 높은 CH_4 농도가 이 지역에서 강화된 상승기류를 따라 빠르게 FT를 통해 15일 한반도 지역 상층대기로 전송된 것으로 사료된다. 이는 한파와 관련된 중위도-열대 상호작용에 의한 국지적 해들리 순환 강화에(하소영 등, 1997) 따라 열대지역의 온실가스과 수분의 유입을 보여주는 특징적인 사례일 것으로 사료되지만, 좀 더 많은 사례를 통해 기상-화학의 상관성을 살펴볼 필요가 있음을 제시한다.

결론적으로 CH_4/CO 기울기, 역궤적 분석, 연직속도 분석을 통해 12월 1일 PBL고도이하에서 관측한 CO_2 , CH_4 , CO 의 고농도사례는 한반도의 서해근처 산업단지와 화력발전소 화석연료에 의한 배출 영향으로 추정된다. 12월 15일 상층 700-500 hPa에서 관측한 고농도 사례의 경우 빠른 수평 및 수직적인 대류의 영향으로 인도북부도심지역의 강한 오염원의 영향을 받은 것으로 사료된다.

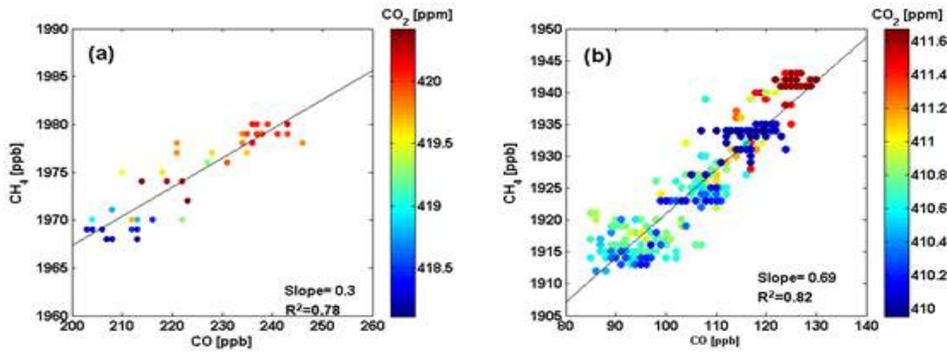


Fig. 2.4.9. Distribution of CH₄ and CO profiles colored with CO₂ measured (a) below PBL height on 1 Dec. and (b) between 500 and 700 hPa heights on 15 Dec. 2018 over Anmyeon-do and linear fit shown as black line.

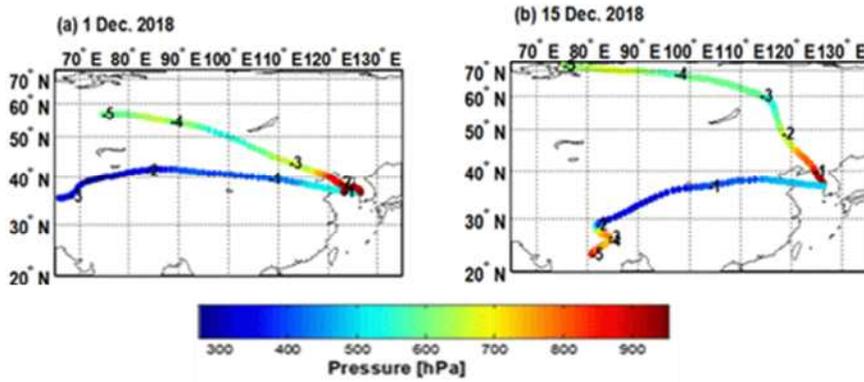


Fig. 2.4.10. Five days HYSPLIT back-trajectories arrived at Anmyeon-do stations (36.53°N, 126.33°E) at 950 (600 m) and 500 hPa (5600 m) heights, respectively for (a) 1 and (b) 15 December, 2018. The numbers mark position and time of the particles before arrival at AMY.

3. 온실가스의 한반도 수평분포 관측 연구

(1) 시공간 분포 특성 분석

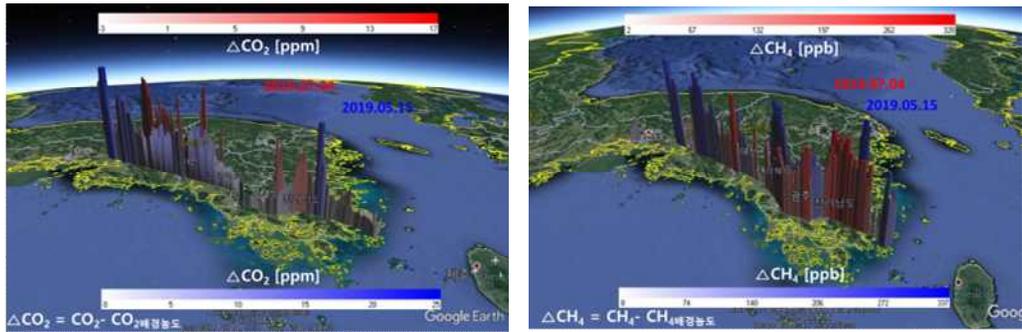


Fig. 2.4.11. The colored bar chart of horizontal transection measurements of ΔCO_2 (left), ΔCH_4 (right) at 15 May and 4 July along with Kimpo-Juju commercial airline route.

제주-김포 여객기 항로구간에서 김포-완도(약 34.2-37°N구간)까지 2 km이하에서 관측한 CO_2 와 CH_4 의 농도만을 선별하여 배경농도를 제거한 값을 Fig. 2.4.11에 나타냈다. 여기서 배경농도는 당일 2 km이상(대기혼합경계층 이상)고도에서 관측한 농도의 평균값을 의미한다. 메탄의 배출 및 이산화탄소의 흡수가 시작되는 시기인 5월과 활발할 것으로 예상되는 7월의 자료를 사례로 살펴보았다. 배경농도 대비 CO_2 의 농도 차이는 5월과 7월에 모두 서울과 경기 지역에서 높은 값(17-25 ppm)을 나타낸 반면, 남부 지역에서는 수 ppm으로 감소하였다. 5월 CH_4 의 경우 수도권 지역뿐만 아니라 대전, 광주, 김제 등 다수의 지역에서 높은 농도 차이(약 330 ppb)를 나타냈고, 7월은 주로 전라도 지역에서 큰 차이(약 320 ppb)를 보였다. 전형적인 계절 변동성은 Fig. 2.4.12에서 더욱 선명히 나타나고 있다. CO_2 의 농도는 전체 관측 기간에 걸쳐 서울·경기지역(37-36.5°N)에서 440 ppm이상의 값을 보이며 남쪽으로 갈수록 농도가 감소하여 약 415 ppm의 수준을 보이고 있다. 7-8월 사이는 CO_2 의 강한 흡수작용에 의해 제일 낮은 농도 수준을 보이며, 그 중 전라도 지역이 400ppm 보다 더 낮은 농도가 관측이 되었다.

CH_4 은 CO_2 와는 반대로 6월부터 8월까지 전라도 지역에서 강한 농도 분포를 나타

내고 있으며, 여름철 한국의 남부 지역이 메탄의 주요 배출원인 것을 알 수 있다. 물론 수도권에서의 메탄 배출 또한 무시할 수 없는 수준으로 예상되지만, 현재 국내 항공기 운항 여건상 김포에서 평택까지 저고도 관측은 많은 제약을 가지고 있기 때문에 본 관측결과를 통해 수도권의 CH₄ 농도 특성을 파악하는 것은 쉽지 않다. 다만 한국에서 농업활동이 왕성한 시기인 여름철에 메탄의 배출이 강하게 나타난다는 것은 향후 한반도에서의 메탄 배출저감 등 정책방향을 결정함에 있어서 중요한 기반 자료로 활용 될 것이다.

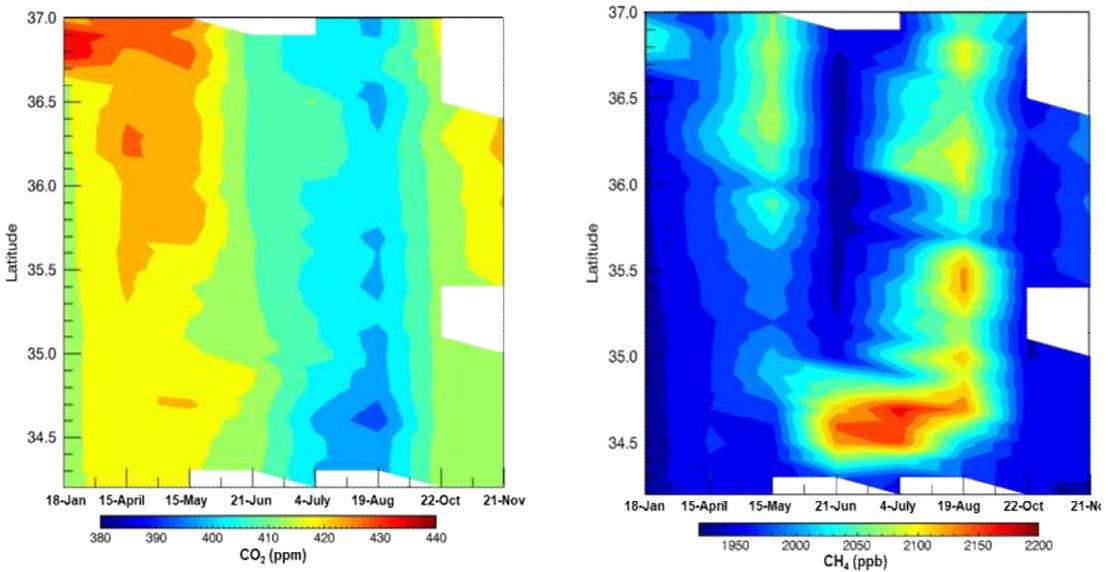


Fig. 2.4.12. The spatio-temporal distributions of CO₂(left) and CH₄(right) observed based on Kingair 350 along with Kimp-Juju commercial airline route between 0.6-2 km altitude.

(2) 전지구 배경농도와의 비교

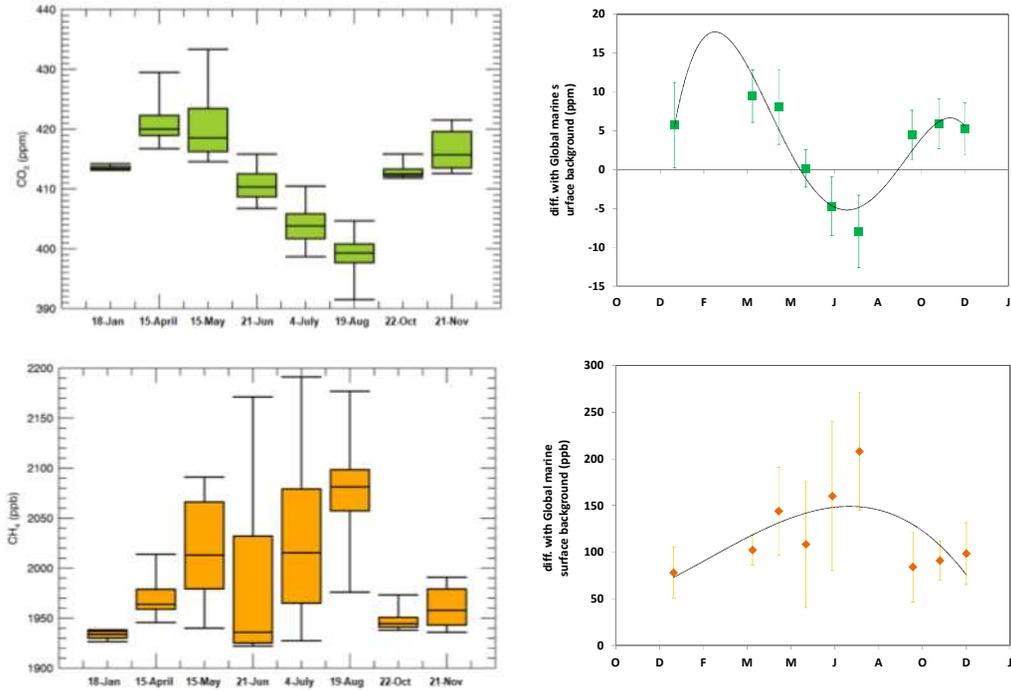


Fig. 2.4.13. The monthly box plot (left) of CO₂ and CH₄ observed based on Kingair 350 along with Kimpo-Juju commercial airline route between 0.6–1.5km altitude and difference value (right) with monthly MBL global baseline levels.

Fig. 2.4.13은 한반도에서 온실가스 오염원의 잠재적인 강도를 파악하기 위하여 전체 김포-완도 구간에서 관측한 CO₂와 CH₄의 월별 평균값과(왼쪽) 이 값에서 전지구 MBL 배경 농도를 뺀 차이(오른쪽)을 나타낸다. 이 차이를 통해 전 지구적인 평균 대비 한국의 잠재적인 오염/흡수 강도를 대략적으로 유추해볼 수 있다. CO₂의 평균값은 전체 관측구간에서 북반구의 계절변동성을 보이고 있다. 전지구 MBL 배경 농도와의 차이는 겨울과 봄철에는 약 5-10 ppm 범위로 나타났으며, 여름철에는 약 -10 ppm를 보이고 있다. 이는 겨울과 봄철 인위적인 배출에 의한 오염과 여름철 식물에 의한 흡수 강도가 전 지구적인 배경수준에 비해 잠재적으로 각각 약 1.2-2.4%와 2.5% 더 높음을 의미한다.

CH₄은 여름철에 주로 대기 중 OH 라디칼(수산화기)에 의해 소멸되기에 여름철에 낮은 값을 보이게 된다. Table 2.4.3의 MBL 배경농도를 보면 6-8월이 다른 계절에 비해 약 4-6 ppb 낮은 수준으로 약한 계절변동성을 보이고 있다. OH 라디칼의 농도에 따른 계절 변동폭은 지역에 따라 상이하겠지만 이는 전 지구적인 평균 수준을 나타낸다. Fig. 2.4.13을 보면 한국서쪽 내륙에서 관측한 메탄의 평균값은 MBL 배경농도에 비해 전 기간에 걸쳐 높게 나타나고 있으며, 겨울철은 약 50-100 ppb인 반면, 5-8월은 약 150 - 200 ppb의 차이를 보이고 있다. 2019년 시범적으로 관측한 내륙지역에서의 CH₄농도는 도심 오염원의 강도를 충분히 반영할 수 없었음에도 불구하고, 도심, 화석연료, 농업활동 등 인위적 영향에 따라 전 지구 배경수준에 비해 평균 약 10% 더 강하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 한국에서 CO₂의 오염원 강도에 비해 메탄의 오염 강도가 더 지배적임을 의미하며, 한국에서의 메탄의 배출원, 배출 강도 등의 정량화를 위해 정확하고 지속적인 모니터링이 더 필요한 실정이다.

향후, 기상항공기를 통한 한국의 온실가스 관측을 지속적으로 수행할 예정이며, 신뢰성 있는 관측자료 축적을 통해 계절적인 변동, FT를 통한 장거리 수송과정 및 위성관측자료 검증 등 다양한 연구를 수행할 예정이다.

제 3 장 요약 및 결론

기상항공기의 활용기술 개발 연구는 구름물리 관측 및 기상조절 실험, 위험기상 선행관측, 환경기상 감시, 기후변화 감시연구가 주요임무이며, 2019년 각 연구결과를 요약 정리하였다.

기상항공기를 이용한 인공증우(설) 항공실험을 수행하였으며, 다양한 구름에 대해 기상조절실험이 수행되었다. 구름물리 관측 및 기상조절 실험 15회, 구름관측 6회, 기상위성 자료처리 알고리즘 검증 2회를 수행하였다. 강원도 및 서해상을 대상으로 기상조절 실험을 수행했으며, 특히 대관령지역은 구름물리관측망 6개소(대관령 구름물리선도센터, 대관령 구름물리관측소, 용평관측소, 오대산관측소, 진부관측소, 대기리관측소)를 운영하여 구름물리 검증에 활용하였다. 시딩물질은 염화칼슘(CaCl_2)과 요오드화은(AgI)을 이용하였고, 연소탄을 연소하는 방법으로 시딩물질을 살포하였다. 본 실험결과를 통하여 다양한 구름에 대한 두 종류의 시딩 물질 인공강우 실험결과를 획득할 수 있었다.

집중호우와 태풍과 같은 여름철 위험기상 현상의 강수예측을 개선하기 위하여 드롭존데 관측을 수행하였고, 국지예보모델을 활용한 자료동화 영향평가 실험을 수행하였다. 그 결과, 드롭존데 관측자료가 자료동화 될 경우, 12시간 강수예측 정확도가 5~10%가량 개선됨을 확인할 수 있었다. 겨울철 위험기상 현상인 대설을 이해하기 위하여, 드롭존데 자료와 재분석 자료를 이용하여 대기과 해양의 상호작용을 분석하였다. 대설 발생 당일에 해양에서 대기로 공급되는 수증기 플럭스가 증가함을 확인할 수 있었다. 또한, 기상항공기 관측자료의 자동 품질관리 알고리즘을 개발 및 개선하였고, 이를 운영관리시스템에 적용하였다. 국내 유관기관과의 자료공유를 위해 자료전송·처리속도를 개선하였고, 보안전송기능을 강화하였다.

2019년의 대기 상층 공기질 감시와 기후영향 분석 관측은 서해상에서 황사, 연무 등의 고농도 에어로졸 사례와 배경대기 관측을 위해 고도 약 400 ~ 900 m 사에에서 총 6차례에 걸쳐 서해상 에어로졸 특성분석을 실시하였다. 위성관측에서 고농도 에어로졸 플룸과 항공관측에서 고농도 지점이 일치함을 보임으로써 항공관측자료의 품질을 간접적으로 검증하였다. 하지만 기상청 현업 황사·연무통합예측모델

(ADAM3)과 비교 결과 관측값과 예측값 사이에 오차를 보여 배출량 조정 및 상층 자료동화기법 개발이 필요할 것으로 사료된다.

반응가스 관측장비의 관측환경 최적화를 위해 정압장치 설치에 중점을 두어 실시하였다. 반응가스 최적의 관측조건을 찾기 위해 다양한 관측조건을 적용하여 비행 관측을 수행하였으며, 향후 지상관측장비와의 비교실험을 통하여 관측자료의 신뢰도를 높일 예정이다. 또한, 탄소 에어로졸 관측장비(SP2)에 대해서도 신뢰도를 향상시키기 위해 항공관측을 위한 교정시스템을 구축하였다.

기상항공기를 이용한 온실가스 관측은 안면도 연직분포관측 연구 총 8회, 한국 수평 저고도 관측 9회로 2019년 총 17회의 관측을 수행하였다. 정확성 분석실험 결과 2019년 기상항공기 온실가스 관측 장비의 불확도는 CO₂:0.16 ppm, CH₄:1.8 ppb, CO:3.7 ppb로 각각 계산되었다. 안면도에서 관측한 온실가스 연직 평균 농도는 북반구의 배출 패턴(겨울과 봄철 증가, 여름철 감소)과 대체적으로 일치하게 나타났다. 자유대류권(3 km고도 이상)에서의 CO₂ 평균농도는 전지구 평균농도와 비슷한 수준이지만 봄철에는 약 3 ppm 높게 관측되었고, CH₄의 경우 전 관측 기간에 걸쳐 평균 약 40 ppb 높게 나타났다. 2018년 12월에 안면도에서 관측한 대기경계층 이하 고농도 사례는 주로 한반도 서해 근처 산업단지와 화력발전소 배출 영향을 주로 받았지만, 대기 상층 고농도 사례는 빠른 수평 및 수직적인 대류의 영향으로 인도북부 도심지역의 배출영향을 받은 것으로 사료된다. 한반도 수평 관측을 통해 한국의 인위적인 배출에 의한 잠정 오염강도와 식물에 의한 흡수의 강도를 유추해보았다. CO₂는 전지구 평균에 비해 약 1.2-2.4%와 2.5% 높은 오염과 흡수 강도를 각각 나타냈으며 CH₄은 약 10% 더 높은 오염강도를 나타냈다. 이는 CO₂의 오염 강도에 비해 CH₄의 오염 강도가 더 지배적임을 의미하며, 온실가스 감축의 정확한 정책수립을 위한 정확하고 지속적인 모니터링이 필요한 것으로 사료된다.

참고 문헌

국립기상과학원, 2018a: 기상항공기 활용기술 개발 연구(Ⅱ). 국립기상과학원, 122pp.

국립기상과학원, 2018b: 위험기상에 대한 분석예보의 융합기술 고도화. 국립기상과학원, 130pp.

국립기상과학원, 2019a: 기상항공기 위험기상 선행관측 기상관측장비 사용자 매뉴얼. 국립기상과학원 관측예보연구과, 195pp.

국립기상과학원, 2019b: 기상항공기 구름물리 관측 및 기상조절실험 기상관측장비 사용자 매뉴얼. 국립기상과학원 관측예보연구과, 131pp.

국립기상과학원, 2019c: 기상항공기 환경기상 및 온실가스 감시 기상관측장비 사용자 매뉴얼. 국립기상과학원, 275pp.

국립기상과학원, 2019d: 기상항공기 기본 기상관측장비 사용자 매뉴얼. 국립기상과학원 관측예보연구과, 108pp.

양효진, 이철규, 김지형, 정승필, 고희중, 윤동환, 2019: 기상항공기 자료 수집·표출 시스템 (M300) 사용자 매뉴얼. 국립기상과학원, 66pp.

이선란, 구태영, 문혜진, Lev Labzovskii, Samuel Takele Kenea, 오영석, 이해영, 변영화, 2019: 항공기를 이용한 온실가스 CO₂와 CH₄의 연속관측: 안면도 겨울철 연직분포사례 분석, 대기, 29(5), 511-523.

하소영, 임규호, 권혁조, 1997: 겨울철 동아시아 상층제트류와 열대 대류운동과의 상호관련성, 대기, 33(2), 299-314.

Bruintjes, R. T., V. Salazar, T. A. Semeniuk, P. Buseck, D. W. Breed and J. Gunkelman, 2012: Evaluation of hygroscopic cloud seeding flares. *J. Wea. mod.*, 44, 69–94.

Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an advaced land–surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 569–585.

Chou, M.-D., and M. J. Suarez, 1994: An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. *NASA Tech. Memo.*, 104606, 3, 85pp.

Halliday, H. S., and Coauthors, 2019: Using short-term CO/CO₂ ratios to Assess air mass differences over the Korea Peninsula during KORUS–AQ. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2018JD029697.

Hong, S. -Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2318–2341, doi:10.1175/MWR3199.1.

Hsu, Y. K., and Coauthors, 2010: Methane emissions inventory verification in southern California. *Atmos. Environ.*, 44(1), 1–7, doi:10.1016/J.Atmosenv .2009.10.002.

Hutchison, 2002. The retrieval of cloud base heights from MODIS and three-dimensional cloud fields from NASA’s EOS Aqua mission. *International Journal of Remote Sensing*, 23(24), 5247–5263.

Kumar, V. A., Panditurai, G., Leena, P. P., Dani, K. K., Murugavel, P., Sonbawne, S. M., Patil, R. D., Maheskumar, R. S., 2016. Investigation of aerosol indirect effects on monsoon clouds using ground-based measurements over a high-altitude site in Western Ghats. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 8423–8430.

Marshall, J. S., and W. M., Palmer, 1948; The distribution of raindrops with size. *J. Atmos. Sci.*, 5(4), 165–166.

Martin, C., 2009: Atmospheric Sounding Processing Environment User manual. National Center for Atmospheric Research, Colorado, USA, 59pp.

Mechem, D. B., Kogan, Y. L., 2008: A Bulk Parameterization of Giant CCN, *J. Atmos. Sci.*, 65(7). 2458–2466, <http://www.dx.doi.org/10.1175/2007JAS2502.1>.

Meyer, M. P., P. DeMott, and W. R. Cotton, 1995: A Comparison of Seeded and Nonseeded Orographic Cloud Simulations with an Explicit Cloud Model, *J. Applied. Metero.*, 34, 834–846.

Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102(D14), 16663–16682.

Morrison, H., G. Ghomson, and V. Tatarskii, 2008: Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 991–1007.

Peischl, J., and Coauthors, 2013: Quantifying sources of methane using light al-

kanes in the Los Angeles basin, California, *Journal of Geophys. Res.: Atmospheres*, 118, 4974–4990.

Poulsen, C. A., Siddans, R., Thomas, G. E., Sayer, A. M., Grainger, R. G., Campmany, E., Dean, S. M., Arnold, C., Watts, P. D., 2012. Cloud retrievals from satellite data using optimal estimation: evaluation and application to ATSR. *Atmospheric measurement Techniques*, 5, 1889–1910.

Sharma, S., Vaishnav, R., Shukla, M. V., Kumar, P., Kumar P., Thapliyal, P. K., Lal, S., Acharya, Y. B., 2016. Evaluation of cloud base height measurements from Celiometer CL31 and MODIS satellite over Ahmedabad, India. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(2), 711–719.

Tang, W., and Coauthors, 2019a: Evaluating high-resolution forecasts of atmospheric CO and CO₂ from a global prediction system during KORUS-AQ field campaign. *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 11007–11030.

Tohjima, Y., and Coauthors, 2014: Temporal changes in the emissions of CH₄ and CO from China estimated from CH₄/CO₂ and CO/CO₂ correlations observed at Hateruma Island. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 1663–1677.