발간등록번호
11-1360620-000168-10

기상업무지원기술개발연구

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

황사·연무기술 지원 및 활용연구

Development and Application of Technology for Asian Dust and Haze

2019

환경기상연구과

기상청

국 립 기 상 과 학 원

National Institute of Meteorological Sciences

Korea Meteorological Administration

국립기상과학원

책임운영기관

연 구 보 고 서

1. 제　　목 : 황사·연무기술 지원 및 활용연구

Development and Application of Technology for Asian Dust and Haze

2. 연 구 부 서 : 국립기상과학원 환경기상연구과

3. 연 구 기 간 : 2019. 1. 1. - 2019. 12. 31.

4. 연구책임자 : 박영산

5. 참여연구원 :

류상범	전영신	이영곤	이상삼	류제규
고홍표	박종혁	이재일	김정은	김수민
이해영	유희정	조정훈	임윤규	고희정
한형욱	이다정	고미영	서원익	이 단
정지영	이세표	최남원	김미경	김재민
신대근	이상만	오세호	김영보	김인선
함지영				

목 차

목차 ····· i
표 목차 ····· iii
그림 목차 ····· iv
국문 요약문 ····· ix
영문 요약문 ····· xvi

제 1 장 서 론 ····· **1**

제 2 장 동아시아 황사 종합감시능력 향상 ····· **3**

제 1 절 서해상 집중관측을 통한 황사·연무 분석기술 개발 ····· 3
1. YES-AQ기간 중 지상, 선박에서 관측된 에어로졸과 반응가스 특성 ····· 3
2. 고농도 사례 시 입체관측 결과 종합 분석 ····· 16

제 2 절 황사·연무 발생 기원 규명을 위한 에어로졸 특성 분석기술 개발 ····· 22
1. 통계기법을 이용한 에어로졸 오염원별 시공간적 기여도 변화 분석 ····· 22
2. 2019년 3월 고농도 사례의 기상학적 원인과 에어로졸 기원 분석 ····· 26

제 3 장 황사·연무통합예측모델 및 예측기술 개발 ····· **30**

제 1 절 현업 황사·연무통합예측모델 개선 ····· 30
1. 국내 환경감시망 관측자료 품질검사법 개선 ····· 30

제 2 절 황사·연무 예측체계 개선을 위한 기반 구축
1. 황사·연무 앙상블 예측체계 시험 운영 ····· 33
2. 앙상블 기반의 자료동화체계 개발 ····· 36
3. 라이다 관측 소산계수 자료동화를 위한 관측자료 특성 분석 ····· 39

제 3 절 차세대 예측 모델 운영을 위한 기반 구축 ····· 42
1. 황사·연무통합예측모델의 한국형수치예보모델 연동 체계 개발 ····· 42
2. 대기-환경 양방향 예측모델(AQUM)의 기상 예측성 평가 ····· 45

제 4 절 위험물질 확산 대비 비상대응 지원체계 개선 ····· 47
1. 고해상도 위험물질 확산예측체계 구축 ····· 47

제 4 장 한반도 대기조성물질 장기변화 특성 연구 ····· 49

제 1 절 환경기상 관측자료 품질관리기술 개발 ····· 49
1. 온실·반응가스 최신 관측기술 적용 연구 ····· 49
2. 부유분진측정기 등가성 평가 ····· 56
3. WMO/GAW 관측지침에 따른 에어로졸 관측환경 개선 ····· 58

제 2 절 한반도 대기조성물질 장기변화경향 분석 ····· 62
1. 안면도와 고산 지역의 장기간 강수성분 조성 및 중화 특성 ····· 62
2. 한반도에서 관측되는 이산화탄소의 시공간적 특성 분석 ····· 68

제 3 절 제20차 WMO/IAEA 온실가스 전문가 회의 개최 결과 ····· 73

제 5 장 결 론 ····· 75

참고 문헌 ····· 80

부록 (연구용역 요약)
1. 황사감시기상탑을 활용한 발원지 특성 연구(Ⅲ) ····· 85
2. 서해상 대기질 입체관측자료 활용기술 개발 ····· 87
3. 웹기반 대기조성물질 분석 기술 개발 ····· 89

LIST OF TABLES

Table 2.2.1. PM_{10} Aerosols Site and Period, Number of Sample. ····· 22
Table 3.1.1. RMSEs of PM_{10} concentration with different QC (quality check) methods ('Old': original method, 'New': improved method). ····· 32
Table 3.2.1. Perturbation members of each initial time. ····· 34
Table 3.3.1. Operational configuration of AQUM in KMA. ····· 45
Table 3.3.2. BIAS and RMSE of 10 m wind speed and surface air temperature from CTL and EXP. ····· 46
Table 3.4.1. Meteorological input data used in HYSPLIT. ····· 47
Table 4.1.1. The repeatability, short-term and long-term reproducibility assessment by ICOS and GC-μECD. Unit is ppb. ····· 52
Table 4.1.2. Mean and standard deviation of zero gas by NDIR. ····· 54
Table 4.1.3. The repeatability, short-term and long-term reproducibility assessment by ICOS and GC-μECD. ····· 55
Table 4.1.4. Equivalence test result for Class I instrument (gravimetric method) by National Institute of Environment Sciences. ····· 57
Table 4.2.1. The volume-weighted mean ionic concentration (μeq L^{-1}) of precipitation at Anmyeon-do (AMY), Jeju Gosan (JGS) and other sites. ····· 65

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1.1. Variation of aerosol and reactive gases during 15 ~ 24 April at Anmyeondo. (a) Aerosol volume size distribution, (b) PM_{10} mass concentration, (c) aerosol light scattering coefficient, (d) scattering Ångström exponent, (e) ozone (O_3) and CO concentration, (f) NO, NOx, SO_2 concentration. ····· 5

Fig. 2.1.2. Variation of aerosol properties during 15 April ~ 24 measured on Gisang1 vessel. (a) Aerosol volume size distribution, (b) PMx mass concentration, (c) aerosol light scattering coefficient, (d) scattering Ångström exponent, (e) ion components, and (f) composition ratio of ion components. ····· 6

Fig. 2.1.3. Variation of aerosol and reactive gases during 1 ~ 10 May at Anmyeondo. (a) Aerosol volume size distribution, (b) PM_{10} mass concentration, (c) aerosol light scattering coefficient, (d) scattering Ångström exponent, (e) ozone (O_3) and CO concentration, (f) NO, NOx, SO_2 concentration. ····· 8

Fig. 2.1.4. Variation of aerosol properties during 1 ~ 10 May measured on Gisang1 vessel. (a) Aerosol volume size distribution, (b) PMx mass concentration, (c) aerosol light scattering coefficient, (d) scattering Ångström exponent, (e) ion components, and (f) composition ratio of ion components. ····· 9

Fig. 2.1.5. Variation of aerosol and reactive gases during 15 ~ 24 May at Anmyeondo. (a) Aerosol volume size distribution, (b) PM_{10} mass concentration, (c) aerosol light scattering coefficient, (d) scattering Ångström exponent, (e) ozone (O_3) and CO concentration, (f) NO, NOx, SO_2 concentration. ····· 11

Fig. 2.1.6. Variation of aerosol properties during 15 ~ 24 May measured on Gisang1 vessel. (a) Aerosol volume size distribution, (b) PMx mass concentration, (c) aerosol light scattering coefficient, (d) scattering Ångström exponent, (e) ion components, and (f) composition ratio of ion components. ····· 12

Fig. 2.1.7. Variation of aerosol and reactive gases during 4 ~ 13 June at Anmyeondo. (a) Aerosol volume size distribution, (b) PM_{10} mass concentration, (c) aerosol light scattering coefficient, (d) scattering Ångström exponent, (e) ozone (O_3) and CO concentration, (f) NO, NOx, SO_2 concentration. ····· 16
Fig 2.1.8. Variation of aerosol properties during 4 ~ 13 June measured on Gisang1 vessel. (a) Aerosol volume size distribution, (b) PMx mass concentration, (c) aerosol light scattering coefficient, (d) scattering Ångström exponent, (e) ion components, and (f) composition ratio of ion components. ····· 15
Fig. 2.1.9. Airborne observation results and aircraft operating route on 21 May. (a) aerosol light scattering coefficients, (b) total number concentration (>250 nm), (c) $PM_{2.5}$ mass concentration and Himawari satellite RGB image. ····· 17
Fig. 2.1.10. Gisang1 vessel observation results on 21 May. (a) ionic components, (b) aerosol light scattering coefficients. ····· 18
Fig. 2.1.11. Aerosol volume size distribution from the (a) aircraft, (b) Gisang1 vessel and (c) Anmyeondo on 21 May. ····· 19
Fig. 2.1.12. Aerosol light scattering coefficients from the (a) aircraft, (b) Gisang1 vessel and (c) Anmyeondo on 21 May. ····· 20
Fig. 2.1.13. Comparison of $PM_{2.5}$ mass concentration from aircraft measurement and ADAM-3 prediction on 21 May. ····· 21
Fig. 2.2.1. Principal Component Analysis Result in Seoul, Anmyeon-do, and Gosan. ····· 23
Fig. 2.2.2. Principal Component Analysis Result in Seoul, Anmyeon-do, and Gosan (2017. 4. ~ 5.). ····· 24
Fig. 2.2.3. Positive matrix factorization Result in Seoul from April to May 2017. ····· 25
Fig. 2.2.4. Time series of (a) PM_{10} Ionic Concentrations and (b) Ionic Compositions (c) Aerosol Size Distributions from April to May 2017. ····· 26
Fig. 2.2.5. Time series of PM_{10} in Seoul (39 sites of Ministry of Environment) from 28 February to 8 March 2019. ····· 27

Fig. 2.2.6. Synoptic patterns around Korean peninsula during the period of 28 February to 8 March 2019. ····· 28
Fig. 2.2.7. Time series of (above panel) mean PM_{10} and $PM_{2.5}$ and (below panel) wind rose in Seoul from 28 February to 8 March 2019. ····· 28
Fig. 2.2.8. Vertical structure of aerosol and cloud from lidar in Seoul (Korea aerosol lidar observation network). ····· 29
Fig. 2.2.9. Backward trajectory of Type A, B, and C, and PSCF results with initial height of 500 m. ····· 29
Fig. 3.1.1. The distribution of observed PM_{10} concentration used in the data assimilation system from air quality monitoring network in South Korea at (a) February 19, 2019 00 UTC and (b) May 28, 2019 00 UTC. ····· 31
Fig. 3.2.1. Conceptual diagram of ensemble forecast system. ····· 34
Fig. 3.2.2. (a) Analysis example of ROC and (b) AUC time series of 200 $\mu g/m^3$ and optimal concentration. ····· 35
Fig. 3.2.3. Flowchart of ensemble based 3DVAR system for ADAM3. ····· 36
Fig. 3.2.4. (a) Horizontal length scale and (b) vertical length scale derived from the ensemble ADAM3 modeling system at December 1, 2019 00 UTC. ····· 37
Fig. 3.2.5. PM_{10} increment from (a) 3DVAR and (b) 3DOI at lowest model level at January 10, 2020 06 UTC. ····· 38
Fig. 3.2.6. Seasonal mean extinction coefficient of lidar at Anmyeondo. ····· 40
Fig. 3.2.7. Valid data ratio of lidar extinction coefficient at Anmyeondo. ····· 41
Fig. 3.2.8. Seasonal scatter plot of lidar extinction coefficient with surface PM_{10} concentration. ····· 41
Fig. 3.3.1. Forecasted dust and non-dust PM_{10} concentration of UM-ADAM3 (a, c, e, g) and KIM-ADAM3 (b, d, f, h) at 09 KST, 21 KST December 8, 2019. ····· 43
Fig. 3.3.2. Differences of 10 m wind speed and relative humidity between KIM and UM at East Asia region in daytime and nighttime. ····· 44
Fig. 3.4.1. Example of web-based input screen for radioactive material (left) and result of dispersion forecast using HYSPLIT model (right). ····· 48

Fig. 4.1.1. The Linearity test of (a) GC-μECD and (b) ICOS for N_2O. X-axis is standard tank and y-axis the instrument response (top). The residuals indicate the difference between theoretical value and observed value (bottom). The black line represents the linear function and the dots are the residuals between theoretical value from the linear function and observed values. The red lines and dots are derived from secondary polynomial formula. The compatibility goal (±0.1 ppb) and extended compatibility goal (±0.3 ppb) were shaded. ····· 51
Fig. 4.1.2. The Linearity test of (a) NDIR and (b) ICOS for CO. X-axis is standard tank and y-axis the instrument response (top). The residuals indicate the difference between theoretical value and observed value (bottom). The black line represents the linear function and the dots are the residuals between theoretical value from the linear function and observed values. The red lines and dots are derived from secondary polynomial formula. The compatibility goal (±2 ppb) and extended compatibility goal (±5 ppb) were shaded. ····· 54
Fig. 4.1.3. Equivalence test result for Class I instrument. ····· 57
Fig. 4.1.4. Measuring Instrument Installation. ····· 58
Fig. 4.1.5. Installation of nafion dryer for scanning mobility particle sizer (SMPS). ····· 59
Fig. 4.1.6. Air dilutor system: (a) providing clean dry air, (b) flowmeters, (c) air dilutor, and (d) flowrate monitoring. ····· 60
Fig. 4.1.7. (a) Relative humidity of nephelometer and (b) ambient relative humidity in June, 2018 and 2019. ····· 61
Fig. 4.2.1. Annual volume-weighted mean (a) pH (b) concentration (μeq L^{-1}), and (c) composition ratio of ionic species of precipitation at Anmyeon-do (AMY) and Jeju Gosan (JGS) Site. ····· 64
Fig. 4.2.2. Relationship between $\Sigma([H^+]+[NH_4^+]+[nss\text{-}Ca^{2+}])$ and $\Sigma([nss\text{-}SO_4^{2-}]+[NO_3^-])$ at (a) Anmyeon-do (AMY) and (b) Jeju Gosan (JGS) Site. · 62
Fig. 4.2.3. Schematic of the in-situ system at Anmyeondo (AMY), Jejudo Gosan

Suwolbong (JGS), and (d) Ullengdo (ULD) stations. ····· 68
Fig. 4.2.4. L2 hourly (yellow dots, CO_2 OBS), L2 daily (blue dots) averaged, and smoothed curves fitted to L2 daily averages (red line, CO_2BG) (left panel) the mean diurnal variations of CO_2 mole fraction (right panel) at (a), (b) of AMY (c), (d) of JGS, (e) and (f) of ULD. ····· 70
Fig. 4.2.5. (a) Long-term trend of atmospheric CO_2 and its (b) instantaneous growth rate at WLG, AMY and RYO. Overlaid grey line indicated the period of the negative (in 2004 and 2006) and positive (in 2012) growth rates at AMY compared to other two East Asia stations (WLG and RYO). ····· 71
Fig. 4.3.1. The group photo in GGMT-2019. ····· 73
Fig. 4.3.2. The scale correction between X2019 and X2017. Courtesy of Brad Hall (GGMT-2019). ····· 74
Fig. 4.3.3. The recommended network compatibility table from WMO/GAW report No.242. ····· 75

요 약 문

I. 제목

황사·연무기술 지원 및 활용연구

II. 연구의 필요성

최근 황사와 더불어 미세먼지에 의한 심각한 대기오염이 현상이 빈번하게 발생함에 따라 국민들의 관심이 증가하고 있다. 특히, 황사와 미세먼지 모두 장거리 이동이 가능하다는 점에서 현재 운영하고 있는 황사 현업모델의 정확도를 높이기 위한 이들의 정확한 관측, 특성 연구가 불가피하다. 이러한 에어로졸이 우리나라에서 발생되는 국지적 오염원뿐만 아니라, 중국 등 산업단지의 장거리 이동 대기오염물질 등과 더불어 악영향을 미치기 때문에 이를 사전에 예방하고 대처하기 위한 노력이 필요하다.

국립기상과학원 환경기상연구과에서는 황사·연무의 발원 및 이동에 대한 감시체계를 구축하고 이를 활용하여 정확한 예측정보 생산을 위한 역량을 개발하여야 한다.

III. 연구개발 목표

국립기상과학원 환경기상연구과의 연구개발 목표는 국내·외 황사 및 에어로졸 감시망을 체계적으로 운영하여 양질의 관측자료를 산출하고 관측된 자료에 대하여 체계적인 분석을 통해 황사·연무의 기원추적 및 수송과정 등을 종합적으로 판단하여 예보에 기여한다. 그리고 황사·연무통합예측모델 정확도 향상을 위한 지속적인 개선과 더불어 원활한 현업 운영 지원, 나아가 예측 역량 향상에 그 목적이 있다.

IV. 연구 내용 및 결과

(1) 동아시아 황사 종합감시능력 향상

2019 서해상 대기질 입체관측(YES-AQ) 기간에 안면도와 선박(기상1호), 항공기에서 서해상으로 유입된 황사와 연무의 에어로졸의 물리, 광학, 화학 특성을 측정하였다. 에어로졸은 두 지점에서 대체로 유사하게 변동하였으나 입자 크기 분포, 고농도 유입 시간과 농도에는 다소 차이가 있는 사례가 있었다. 안면도에서 관측한 질소산화물의 농도 변화로부터 지역 오염원 영향 여부를 파악할 수 있었고, 두 지점 모두에서 고농도 미세입자 사례 시에는 CO의 농도도 증가하는 것이 관측되었다. 선박 운항 경로 상공에서 항공관측(입자 크기 분포와 에어로졸 광산란계수)을 수행하여 오염 플룸의 고도(0 ~ 3.5 km)와 입자 크기 분포를 파악하고, 황사·연무 통합예측모델의 서해상 농도 예측결과와 비교하였다. 미세입자 증가 사례가 여러 차례 관측되었는데, 4월 19일과 6월 6일을 제외하고는 안면도에서보다 서해상에서 에어로졸 광산란계수와 미세입자 농도가 높았다. 미세입자 농도가 증가한 시기에 기상1호의 이차오염물질(nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+)의 조성비는 전체 이온의 최대 95%까지 차지하였다. 이 중 NO_3^-의 변동은 에어로졸 광산란계수의 시간변동과 매우 유사하게 관측되었고, 안면도의 반응가스 중에서는 O_3와 CO 농도 증가가 두드러졌다. 특히 5월 24일에는 종일 O_3 농도가 100 ppb 이상으로 관측되었는데, 광화학 반응이 없는 밤과 새벽 시간대에도 농도가 떨어지지 않는 것으로 보아 외부에서 이동한 공기괴의 영향을 받은 것으로 추정할 수 있었다. 조대입자가 우세한 기간에는 산란 옹스트롬지수가 최저 0까지 낮아졌고, 에어로졸 광산란계수는 거의 변동이 없었다.

서울, 안면도, 고산 세 지역에서 PM_{10} 에어로졸의 주성분분석을 이용하여 대기 에어로졸의 발생원을 파악하였다. 모든 지역에서는 도로 및 토양오염원의 기여율이 가장 높았지만, 인위적 발생오염원의 기여율은 서울지역이 가장 많이 받는 것으로 보였다. 양행렬인자분석법의 전체 기여도를 채취된 일별기간 기여도에 적용한 결과, 2017년 4월 1 ~ 8일까지 질산암모늄과 같은 이차오염물질의 기여율이 높고, 2017년 4월 11, 12일, 18 ~ 20일, 5월 5 ~ 8일은 토양먼지의 기여율이 가장 높게 나타났다. 특히 2017년 5월 5일 ~ 9일에 공기역학입자계수기의 에어로졸 부피농도와 비교한 결과, 조대입자영역의 부피농도증가는 토양먼지의 증가하는 경향과 일치하였다.

2019년 3월 초 서울에서의 고농도 에어로졸 현상에 대한 기상학적 원인과 그 기원을 정성적으로 분석하였다. 그 결과 중국 화중지방에서 우리나라로 동진하는 고기압을 따라 중국에서 형성된 고농도 에어로졸이 산둥지방, 발해만, 서해상을 지나 2 km 이하의 낮은 고도로 우리나라에 유입되어 발생한 것으로 추정되었다.

(2) 황사·연무통합예측모델 및 예측기술 개발

현재 황사·연무통합예측모델 초기자료 개선을 위한 지상 PM_{10} 농도 자료동화시 지상 관측자료 품질검사를 수행된다. 기존 품질검사에서는 관측 지점으로부터 반경 25 km 내의 유효 PM_{10} 농도 평균값과 비교를 통해 관측값을 걸러내는 공간정합성 검사를 수행하고 있으나 유효 관측 자료가 부족한 경우 공간정합성검사가 수행되지 않는 문제가 있다. 따라서 우리나라 환경감시망의 PM_{10} 관측값에 대하여 PM_{10} 농도의 물리한계 검사, 높은 빈도로 나타나는 특정 농도의 PM_{10} 관측값 제거, 그리고 반경을 확대한 공간정합성검사를 기존 품질검사에 추가하였다. 그 결과 개선된 품질검사법에 따른 모델 예측성 평가에서 2019년 상반기 평균 RMSE가 0.76 $\mu g/m^3$ (3.97%) 감소함을 확인하였다.

황사와 연무의 확률예측정보를 생산하기 위해 개발된 황사·연무 앙상블 예측체계를 시험 운영 하였으며 이를 통해 황사·연무 확률예측정보의 생산을 안정화 하였다. 이 체계를 통해 미세먼지와 황사 특보 기준이 고려된 PM_{10} 농도(150, 300, 800 $\mu g/m^3$)에 대한 발생 확률과 위험 수준 판단표에 따른 위험 수준 예측 정보가 생산된다. 앙상블 모델의 편차를 보정하기 위해 앙상블 예측성 검증에 사용되는 통계적인 방법을 통해 황사 현상 예측을 위한 최적예측농도를 산출하고 평가하였다.

황사·연무 앙상블예측체계를 활용하여 자료동화를 위한 배경오차공분산을 산출하고, 지상 PM_{10} 관측 자료를 자료동화하여 PM_{10} 분석장을 산출할 수 있는 시험운영체계를 구축하여 2019년 11월부터 운영하였다. 기존 자료동화체계와 비교 결과 수평길이규모의 차이, 관측오차의 차이, 자료동화기법의 차이로 기존 자료동화체계와 비교하여 분석 증분의 크기가 작고 평활된 형태로 나타났다.

황사·연무예측모델의 에어로졸 연직구조 초기장 개선을 위한 기초연구로 안면도 라이다 자료의 소산값 특성을 분석하였다. 안면도 라이다 소산값 수집률은 전체

기간 동안 0.32 수준이고, 라이다 소산값 및 지상 PM_{10} 상관계수는 가을에 0.69로 가장 높고, 겨울, 봄, 여름에 각각 0.59, 0.32, 0.33으로 나타났다.

준현업으로 운영되고 있는 한국형 수치예보모델(Korean Integrated Model, KIM)의 현업 운영 일정이 2020년에 예정됨에 따라 KIM과 황사·연무통합예측모델(Asian Dust Aerosol Model 3, ADAM3)을 연동하는 체계를 개발하였다. 이 과정에서 수치예보모델 예측 결과의 좌표계 변환이 수행되었으며 연직 내삽을 통해 화학수송모델의 기상 입력 자료를 생산하는 KIM-MCIP 프로그램을 개발하였다. 또한 황사 사례 실험을 통해 UM과 KIM 모델을 각각 적용한 결과를 비교 분석하였다.

대기-환경 양방향 예측모델(AQUM)의 기상 예측성을 평가하기 위해 2017년 12월 26일부터 1월 10일까지 16일 동안 에어로졸의 대기 복사 영향 유무에 따라 대조군과 실험군을 설정하여 실험하였다. 예측 결과를 국내 95개소 지상 관측 지점의 관측 자료로 검증한 결과, 에어로졸 대기 복사 영향을 고려한 실험에서 지상 온도가 편차와 평균제곱근오차에서 약 10% 개선되었다.

국내 방사성물질 누출과 같은 비상상황에 대비하기 위해 UM 기반의 국지예보모델 결과인 수평해상도 1.5 km의 고해상도 기상자료와 미국 해양대기청의 확산예측모델(HYSPLIT)을 사용하여 한반도 지역의 상세한 방사성물질 확산예측체계를 구축하였다. 예측체계는 신속한 대응을 위해 웹기반으로 구축하였으며 사용자는 웹페이지를 통해 기본정보를 입력하면 1시간 단위의 고도별 확산예측결과를 볼 수 있다.

(3) 한반도 대기조성물질 장기변화 특성 연구

근래 개발된 온실·반응가스의 최신 관측 장비(공진출력분광기)를 기존 관측 장비(가스크로마토그래프, 비분산적외선분광기)와 비교하여, N_2O와 CO의 고품질 자료 생산에 대한 연구를 진행하였다. 본 연구를 통해 공진출력분광기의 기기 선형성, 안정도, 반복성, 재현성 등이 기존 관측 장비보다 뛰어남을 증명하였다. 다만 검교정 시 분석하고자 하는 가스의 농도와 유사한 표준가스의 사용과 1주일에 2회 이상의 검교정 진행으로 보다 정밀하고 정확한 측정값을 얻을 수 있음을 제시하였다.

기후변화감시소에서 운영 중인 저용량미세먼지채취기를 기준장비로 하여 부유분진측정기에서 생산되는 PM_{10} 질량농도에 대한 등가성 평가를 자체적으로 수행하

였다. 2019년 12월에 국립기상과학원 기상관측장비 연구 및 실험시설 3층과 옥상에 등가성 평가체계구축을 하였다.

WMO 에어로졸세계표준센터(World Calibration Centre for Aerosol Physics, WCCAP) 권고에 따라 에어로졸 관측장비 유입 공기의 제습방법을 개선하였다. 전자기유도입자계수기에는 입자 손실을 줄이기 위해 나피온 건조기를 도입하고, 광산란계수측정기와 광흡수계수측정기에는 건조공기 유입 방법을 새로 적용하였다. 건조공기 유입 방식을 채택한 이후에 장비 내 상대습도는 광산란계수측정기의 경우 기존 대비 절반 수준으로 감소하는 효과를 확인하였다.

안면도, 고산지역 기후변화 감시소에서 2008년부터 2017년까지 약 10년간 강수 시료를 채취하여 pH, 전기전도도와 9가지 이온 성분을 분석하였다. 주요성분 간의 이온수지, 전기전도도 비교법으로 강수 분석데이터의 신뢰도는 좋은 결과를 보였다. 안면도, 고산지역 강수 성분의 부피가중평균 pH는 각각 4.7, 4.9로 약산성이며, 강수량별 pH 범위에 의해 두 지역 모두 강수의 washout과 rainout 현상이 일어났다. 안면도 지역 강수성분은 해염성분과 이차반응물질의 조성비는 비슷한 결과를 보였고, 고산지역 강수는 해염성분이 이차반응물질보다 더 큰 영향 주었다. 두 지역 모두 암모니아에 의한 중화율이 가장 많이 일어나는 것을 알 수 있었다. 또한, 강수의 산성화 및 중화는 nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, H^+, NH_4^+, nss-Ca^{2+}성분들에 의해 일어나며, 이 외에 다른산과 염기성분들의 기여도는 크지 않는 것을 알 수 있었다.

정책지원을 위해 탄소 순환을 이해하기 위해서는 고밀도의 정밀한 이산화탄소 측정망이 필수적이다. 2012년 기상청에서는 안면도, 제주고산, 울릉도독도에 동일한 관측시스템을 설치하여 이산화탄소 측정을 시작하였다. 배경농도를 제외한 이산화탄소의 농도는 안면도에서 4.3±3.3 ppm 로 가장 크게 나타났으며, 제주고산은 1.7±1.3 ppm, 울릉도독도는 1±1.9 ppm 으로 관측되어 안면도 관측소에서 고농도 이산화탄소를 빈번하게 관측함을 나타냈다. 안면도의 장기관측자료를 다른 동아시아 관측소와 비교했을 때, 전체 증가경향성은 비슷하게 나타났으나 증가율이 일부 다르게 나타났다. 이를 통해 기후학적 요소와 지역규모의 식생의 영향 뿐 아니라 관측의 질 또한 증가율에 기여함을 나타냈다.

CO를 측정하는 최신관측기법인 공진출력분광법(ICOS)와 기존의 측정법인 비분산적외선흡광법(NDIR)으로 제로가스와 표준가스를 분석하고 그 결과를 비교하였다.

이 비교실험을 통해 제로가스, 선형성, 반복성과 재현성 모두 ICOS가 NDIR에 비해 더 정확하고 안정된 결과를 보였다. 7일 간격의 장기변동성 결과를 볼 때, ICOS의 교정 주기는 최소 2주 1회가 안전하다.

제20차 WMO/IAEA 온실가스 전문가회의 (The 20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Measurement Techniques)는 2019년 9월 1일(월)부터 5일(목)까지 제주도 중문 롯데호텔에서 개최되었다. 약 20개국 200여명이 총 115편(구두 50, 포스터 65)의 연구 성과를 발표하였으며, 동위원소와 도시관측이 향후 연구를 주도할 것으로 예측되었다. 이산화탄소의 척도변화와 SF_6와 $^{14}CO_2$의 배경농도 수준이 변경되는 주요결과가 도출되었다.

V. 기대효과 및 활용 방안

2019년 서해상을 중심으로 장거리 이동되는 에어로졸의 특성에 대한 전반적인 연구를 위하여 선박, 지상, 항공관측자료를 이용한 입체분석을 시도하였다. 이러한 다양한 접근을 통한 통합적인 연구는 장거리 이동되는 에어로졸이 서해상에서 어떻게 생성되고 변화되는지, 그리고 우리나라에 어떠한 영향을 주는지에 대한 연구의 기초자료로 활용될 것으로 판단된다. 또한 천리안2호 위성의 에어로졸 산출물이나 수치모델 개선을 위한 기초자료로도 활용될 것으로 기대한다.

국내 환경감시망 관측자료 품질검사법 개선 결과는 현업 모델의 초단기 예측 결과를 개선하여 보다 안정적인 현업 예보 지원이 가능하게 되었다. 현업 모델 개선과 함께 수행한 다양한 기반 기술 개발을 통해 향후 현업 황사·연무통합예측모델 개선을 위한 핵심 기술을 확보할 수 있었고 향후 연구를 통해 현업 모델의 예측성 향상 및 수요자 중심의 예측 정보 생산에 활용될 예정이다.

마지막으로 환경기상 관측자료 품질관리기술 개발을 위해 온실·반응가스 최신 관측기술을 적용, 부유분진 측정기 등가성 평가, WMO/GAW 관측지침에 따른 에어로졸 관측환경 개선 등을 실시하였다. 공진출력분광기는 최근 개발된 기기로 현재 그 사용방법과 검교정에 대한 여러 다양한 연구가 진행 중이다. 또한 장비의 불확도는 자료의 불확도와 연결된다. 본 연구를 통해 같은 장비를 사용하는 사용자들에게 정확도 높은 자료 산출하는 방법을 제시하였으며, 기상청에서 제공하는 N_2O,

CO에 대한 관측불확도 산정에 기여하는 요소들을 제공하였다. 특히 한반도 이산화탄소 관측방법, 자료생산 방법 등에 대한 정보는 제한적이었기 때문에 자료의 사용에 있어 한계가 있었다. 본 연구를 통해 자료를 사용하는 국민과 과학자들에게 자료의 생산 정보를 제시하여 신뢰를 향상시키고, 각 관측소의 이산화탄소 특성과 장기 관측자료의 비교를 통해 기상청에서 제공하는 자료의 품질을 보증하였다. 또한 제20차 WMO/IAEA 온실가스 전문가회의 유치를 통해 기상청의 온실가스 관측기술을 알리는 중요한 기반이 되었으며, 최신 연구 동향을 습득하는 계기가 되었다.

Summary

I. Title

Development and Application of Technology for Asian Dust and Haze

II. Necessities of the Research

Recently, Korea has been suffering not only from Asian dust but also from frequent occurrence of haze caused by fine particles, which has sort of big concern to Korean as it could potentially cause health problems to the public in general as well as damages to the industries requiring clean air conditions. Especially, since those phenomena can be observed through long-range transported airmass it is necessary to analyze their sources, physicochemical characteristics, and high accuracy measurement for the improvement of the Asian dust forecast model. And also accurate information of the Asian dust and Haze on the current and future status should be provided with the public in as best quality as possible.

This research tries to develop the Asian dust and Haze monitoring and forecasting technology that is capable of providing such highly accurate prediction information.

III. Objectives of the Research

This research and development objective of environmental meteorology of NIMS (National Institute of Meteorological Sciences), KMA is systematically operate domestic and foreign dust and aerosol monitoring networks to produce high quality observational data.

In addition, it systematically analyzes the observed data and contributes to the forecast by comprehensively judging the origins of Asian dust, haze and the transportation process. And continuous improvement to advance the accuracy of ADAM3, it is aimed to support operational model of KMA and improve forecasting capability.

IV. Research Contents and Results

The research contents consist of (1) Improvement of the integrated monitoring activities for Asian dust in East Asia (2) Establishment of advanced environment meteorology forecast system.

(1) Improvement of the integrated monitoring activities for Asian dust in East Asia

During the 2019 Yellow Sea-Air Quality (YES-AQ) Campaign period, the physical, optical and chemical characteristics of aerosol transported over the Yellow Sea were measured at the surface(Anmyeondo) and in the vessel. Aerosol characteristics varied broadly similarly in both points, but there were some difference in size distribution, inflow time and concentrations in some cases. Reactive gases at Anmyeondo had good correlation with aerosol characteristics; it was possible to determine whether the local pollutants affected the observatory the variation in nitrogen oxides concentration observed in Anmyeondo, Airborne measurements were carried out over the same route of the vessel to identify the altitude and size distribution of the aerosol and to compare with the predicted PM concentration by ADAM3 (Asian Dust Aerosol Model). During haze events, the aerosol light scattering coefficients and the fine particle concentration in the vessel (over the Yellow Sea) were higher than in Anmyeondo with the exception of the two cases. During the period, composition ratio of secondary pollutants (nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+) reached up to 95% of the total ions. Variation of NO_3^- was well correlated with that of the aerosol light scattering coefficient. O_3 and CO concentrations were

increased markedly among reactive gases in Anmyeondo during the haze period. Especially, O_3 concentration on 24 May was over 100 ppb throughout the day, which could be inferred to have been affected by long-range transported air particle, as the concentration was not reduced event at nighttime when there was no photochemical reaction. In the period in which coarse mode particles were dominated, the scattering Angstrom exponent was minimized to zero, and the variation in the aerosol light scattering coefficient was not significant.

Principal component analysis of PM_{10} aerosol in Seoul, Anmyeon-do and Gosan was used to identify the source of atmospheric aerosol. The contribution rate of road and soil sources was the highest in all regions, but the contribution rate of artificially generated sources appeared to be the highest in Seoul. As a result of the PMF, he contribution rate of secondary pollutants such as ammonium nitrate from April 1-8, 2017, and that the contribution of soil dust from April 11, 12, 18-20 and May 5-8, 2017 was the highest. In particular, as compared with the aerosol volume concentration of the aerodynamic particle counter on May 5-9, 2017, the increase in the volume concentration of the coarse particle area was consistent with the increasing trend of soil dust.

The synoptic patterns and origins of high concentration aerosols in Seoul in early March 2019 were analyzed qualitatively. As a result, it was estimated that high concentration aerosols formed in China along the high pressure system moving from Central China region to Korea were introduced to Korea at a low altitude of less than 2 kilometers through Shandong Province, Bohai Bay and the Yellow Sea.

(2) Establishment of advanced environment meteorology forecast system

We upgraded the quality check(QC) method of surface PM_{10} observation data from air quality monitoring network in South Korea which has been used in data assimilation system for improvement of initial condition data of ADAM3.

To complement the limitations of existing QC methods, a physical limitation check of PM_{10} concentration, removal of several anomalous high concentration cases and additional buddy check of PM_{10} concentration with a wider spatial range were added in the original one. By applying the upgraded QC method, the RMSE was improved by 3.97% for the period from January to June of 2019.

We operated ensemble forecast system to produce probability prediction information for the forecast of Asian dust. Based on the test operation, we stabilized model operation. This system produce probability information for each specific PM_{10} concentration and crisis level. To compensate bias of model, we used statistical method to predict occurrence of Asian dust event which evaluates optimal concentration.

Ensemble based 3DVAR(3-dimensional Variational) data assimilation system for ADAM3 (Asian dust and aerosol model version 3) has been developed and run with observed surface PM_{10} concentration since November 2019. Compared with orignal data assimilation system using the optimal interpolation, difference of horizontal scale length, vertical scale length, observation error and data assimilation method itself make the increment smaller in magnitude and smoother spatially.

As a basic study to improve the initial field of aerosol vertical structure of ADAM3, the characteristics of extinction coefficient of Lidar at Anmyeondo were analyzed. The Lidar extinction coefficient collection rate was 0.32 for the whole period, and the correlation coefficient of Lidar extinction coefficient and surface PM_{10} was the highest at 0.69 in autumn and 0.59, 0.32 and 0.33 in winter, spring and summer, respectively.

Korean Integrated Model (KIM) which is under testing will be in operation at April 2020. We developed system that coupled ADAM3 with KIM. It transformed the coordinate system of predicted result from KIM. Also we made the program called KIM-MCIP which produced meteorological input data from KIM for chemical transport model using vertical interpolation. With the

experiment about Asian dust case, we compared the forecast result from UM and KIM respectively.

AQUM(Air Quality in unified model) experiments with or without aerosol radiation effect are performed from December 26, 2017 to January 26, 2018, about 70 days. As a result of verification with observed 10 m wind speed and surface air temperature in South Korea, radiation effect leads 10 % improvement of forecasted surface air temperature in aspects of BIAS and RMSE.

In order to prepare for emergencies such as domestic radioactive material leaks, the detailed dispersion forecasting system for radioactive material on the Korean Peninsula was developed by using the high resolution meteorological data of 1.5 km horizontal resolution, which is the result of the local forecasting model based on UM, and the dispersion forecasting model(HYSPLIT). The forecasting system was built on web for quick response, and users can see the dispersion forecasting results by 1-hour intervals by altitude as entering basic information through the web page.

(3) The study for long-term variability and its characteristics on atmospheric compositions in Korea

The off-axis integrated cavity output spectroscopy (OA-ICOS) as one of advanced measurement method was compared to the conventional methods for N_2O and CO, respectively, for the high-quality atmospheric measurement in this study. we confirmed that OA-ICOS showed better performance on the linearity, the stability, the repeatability, and the reproducibility than previous traditional techniques. On the other hand, we suggested that it is necessary to use similar level of the reference gas to the target level with the calibration frequency of less than twice in a week for more precise and accurate atmospheric data.

The equivalence test of the PM_{10} mass concentration produced by PM_{10} monitor (β-ray attenuation method) at the Korea GAW stations was evaluated with a low-volume aerosol sampler as a reference. In December 2019, an

equivalence assessment system was established at the National Institute of Meteorological Sciences.

According to WMO/GAW WCCAP recommendation, inlet drying method for aerosol measurement was improved. Nafion membrane dryer was installed to reduce the diffusional loss, and air diluting method was applied to nephelometer and aethalometer. Since adopting air dilutor to the nephelometer, the relative humidity in the equipment has been reduced almost by half compared to the previous one.

Precipitation samples were collected at the GAW Stations in Anmyeon-do and Gosan for 10 years (2008-2017) to analyze pH, electrical conductivity and NH_4^+, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, SO_4^{2-}, NO_3^-, Cl^-, and F^- ions. In the comparison of ion balance and conductivity for the validation of analytical data, the correlation coefficients were within the range of 0.996~0.999, implying good linear relationship. The volume-weighted pH of the Anmyeon-do and Gosan areas were 4.7 and 4.9, respectively. The pH of the rainfall was affected by washout and rainout in both areas. The composition ratio of ionic species were 44.7% and 57.5% for marine sources (Na^+, Mg^{2+}, Cl^-), 40.6% and 22.2% for the secondary inorganic components (NH_4^+, nss-SO_4^{2-}, NO_3^-), and 5.6% and 4.0% for the soil source(nss-Ca^{2+}), respectively. Thus, both regions have the highest rate of neutralization caused by ammonia. As pH increased in Anmyeon-do and Gosan, change in calcium carbonate became greater than that in ammonia.

To understand the carbon cycle at policy-relevant spatial scales, a high density of high-quality CO_2 measurement sites is needed. In 2012, the Korea Meteorological Administration (KMA) installed CO_2 monitoring systems at Anmyeondo (AMY) in the west, Jejudo Gosan Suwolbong (JGS) in the southwest, and Ullengdo (ULD) in the east of South Korea.

Average monthly CO_2 enhancements above the local background at each station were 4.3±3.3 ppm at AMY, 1.7±1.3 ppm at JGS, and 1±1.9 ppm (1σ) at ULD, respectively, during 2012 to 2016. Through the comparison of long-term

trends and growth rates at AMY with other East Asian stations over 15 years, it was suggested that they could be affected not only by local vegetation but also by measurement quality.

Intercomparison experiment between ICOS and NDIR was performed in Gosan Station. We analyzed zero gase and standard gases in various ranges and looked into the linearity. The results of ICOS indicated more accurate and stable than NDIR. Through the results, we found the calibration period of ICOS would appropriate at least fortnightly interval.

The GGMT-2019 was held in Jeju, Republic of Korea from 2 to 5 September 2019. The GGMT-2019 covered the advances in the traditional greenhouse gas measurement techniques, emerging observation techniques, isotope measurement techniques, greenhouse gas observations from different platforms including urban observations and networks, and remote sensing, as well QA/QC. The GGMT community revised the recommendations related to network compatibility and on the quality assurance procedures.

V. Expected Effect and Utilization Methods

For the understanding of long-rang transported aerosol characteristics, 2019 Yellow Sea-Air Quality Campaign (2019 YES-AQ) was carried out accompanying the integrated measurement platforms such as in situ, vessel, and aviation. Those results will be used as basic data for future analysis about aerosol formation and transformation process. It is also expected that these results will be used to verify GK-2A's aerosol products and ADAM3.

Improvement of quality check method for domestic environmental monitoring network has been applied on operational ADAM3 modeling system and contributes to produce better and more stable short-term forecast. Various developments on the aerosol modeling system along with the improvement of

the operatonal model will be used to improve the predictability of the operational model and to produce user-oriented forecast information.

Finally, the application of the latest observation technology for greenhouses and reactive gases, equivalence test for PM_{10} mass monitor, improvement of aerosol observation environment according to the WMO/GAW measurement guidelines were conducted in order to develop the technology for quality control of environmental meteorology observation data. The off-axis integrated cavity output spectroscopy (OA-ICOS) was recently commercialized so that its performance level and calibration strategy were reported by several and diverse assessment. Especially the instrument uncertainty is reflected to the measurement uncertainty. Through this experiment, we suggested the method to provide high quality data of N_2O and CO for users who use similar and same instrument. The all factors are related to the measurement uncertainty and make data users understand KMA N_2O and CO data characteristics. The users have insufficient understanding for the CO_2 data served by KMA because of the limitation of the information for the CO_2 measurement and the processing method. In this study we described all information related to CO_2 characteristics at each station for the reliable data and the data quality confirmation through the comparison to other East Asian stations. Also the GGMT-2019 meeting underlay to inform the WMO communities the KMA greenhouse gases monitoring techniques and relevant studies and, vise versa, became a great opportunity to KMA to learn the advanced and recent issues on greenhouse gases.

제 1 장 서 론

황사는 중국과 몽골에 걸쳐있는 건조한 고비사막과 만주지역 등 황사발원지의 모래먼지가 바람에 의해 공기 중으로 떠올라 상층기류의 이동에 따라 우리나라까지 날아오는 현상이다. 최근 황사는 기상과 기후의 영향으로 발원량과 발생빈도가 달라지고 있음을 시사한 바 있다(Zhang et al., 2003). 우리나라의 2019년 봄철 황사 관측일수는 0.4일로 지난 10년(2010 ~ 2019년) 봄철 평균값인 4.1일보다는 적었지만 오히려 가을철에 5일(10월 28일 ~ 11월 2일)에 걸친 황사의 영향을 받았다. 이와 같이 점차 심각한 문제로 대두되는 황사에 대한 효과적인 대응을 위해 정부는 2008~2012년(5년간) 정부기관 14개 부처에서 「제1차 황사피해방지 종합대책」을 추진하여 국민의 황사피해 방지를 위한 기반을 확보하였으며, 이후 2013-2017년(5년간)까지 14개 부처 합동으로 「제2차 황사피해방지 종합대책」을 수립·시행하여 왔다. 현재는 황사와 미세먼지를 종합적으로 관리하기 위해 정부기관 15개 부처에서 「제1차 장거리이동대기오염물질 피해방지 종합대책(2018~2022)」을 수립·시행하고 있다.

연무는 시정이 10 km 이하 일 때로, 주로 습도가 낮고 대기 중에 연기나 먼지와 같은 미세한 입자에 기인한다. 이러한 미세입자는 황사와 같이 국외로부터 장거리 이동되거나, 국내에서 발생하여 대기질 뿐 아니라 국민 보건에도 영향을 미친다. 기상과 기후의 영향, 예를 들면 해빙의 확대, 지역 강수, 지표면의 변화 등이 연무 농도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Wang et al., 2016). 황사와 연무는 엄연히 다른 기상현상이지만, 다른 지역에서 장거리 이동으로 인해 우리나라에 영향을 줄 수 있다는 점, 기상기후학적 특성이 이들의 발원 및 농도와 빈도를 결정할 수 있다는 점에서 상당히 유사하며, 이들의 특성을 정확히 이해하여 정보를 제공하고, 예측의 정확도를 높이는 일은 가장 효과적인 대책이라 할 수 있다.

기상청 국립기상과학원은 황사와 연무 등 에어로졸에 대한 정확한 관측과 예보 및 예보기술 고도화 등을 통해 조기경보와 정확한 예측을 지원하고 피해를 사전 예방하는 핵심 역할을 수행하고 있다.

첫째, 정확한 관측과 분석을 통해 황사 및 에어로졸의 물리화학적 특성과 발원

과 이동경로 등을 이해하고 이 결과를 토대로 모델을 개선하기 위하여 「동아시아 황사 종합감시 능력 향상」, 「황사·연무통합예측모델 및 예측기술 개발」과 「한반도 대기조성물질 장기변화 특성 연구」를 이행하였다. 특히 2018년부터 서해상 대기질 입체관측(Yellow Sea-Air Quality Campaign)을 통해 장거리로 이동되는 에어로졸 및 가스상 물질들의 특성을 시험연구 하였다. 또한 황사·연무 발생기원 규명을 위한 에어로졸 오염원별 시공간적 기여도를 분석하였다.

둘째, 예보의 정확성을 향상시키기 위해서 「황사·연무통합예측모델 및 예측기술 개발」을 이행하였다. 현재 예보에 활용되고 있는 황사연무통합예측모델의 정확도 향상을 위하여 지상기반 PM_{10} 농도와 자료동화체계를 시험 운영하였으며, 앙상블 기반의 자료동화체계 개발과 라이다 관측 소산계수 자료동화를 위한 관측자료 특성을 분석하였다. 또한 황사·연무통합예측모델의 한국형수치예보모델 연동 체계 개발 등 차세대 예측 모델 운영을 위한 기반을 구축하였다.

셋째, 환경기상 관측자료 품질 향상을 위해 「한반도 대기조성물질 장기변화 특성 연구」를 이행하였다. 신뢰성 높은 자료 생산을 위해 온실·반응가스 최신 관측기법 분석을 실시하였고, 부유분진측정기 등가성 평가와 WMO/GAW에서 권고하는 관측방식에 따라 에어로졸 관측환경을 개선하였다. 또한 한반도 대기조성물질에 대하여 장기변화경향 분석을 실시하였고 그 결과를 본 보고서에 실었다.

본 보고서에서는 현재 국립기상과학원에서 이행하고 있는 이러한 연구내용을 심도 있게 다루었으며, 이를 통해 황사의 조기경보 및 정확한 황사예측에 따른 국민피해 사전 예방과 확보된 자료의 과학적 분석을 통한 예보기술 고도화를 기대한다.

제 2 장 동아시아 황사 종합감시능력 향상

제 1 절 서해상 집중관측을 통한 황사·연무 분석기술 개발

1. YES-AQ 기간 중 지상, 선박에서 관측된 에어로졸과 반응가스 특성

황사와 미세먼지 등의 에어로졸은 기체상 오염물질과 상호작용하여 형성·변화되고, 서해상으로 유입되어 한반도에 영향을 준다. 서해상 대기질의 특성을 이해하기 위해서 2018년부터 서해상 대기질 입체관측(2018 YEllow Sea-Air Quality Campaign, 이하 2018 YES-AQ)을 실시하여 에어로졸과 반응가스를 선박, 항공기, 지상에서 입체적으로 관측했다. 이 보고서에는 2019 YES-AQ 기간 동안 안면도 기후변화감시소(이하 안면도)와 기상1호에서 관측한 에어로졸과 반응가스의 특성 분석 결과를 기술하였다. 에어로졸 관측요소는 입자크기별 부피농도(0.5 ~ 20 ㎛), PM_{10} 질량농도, 광산란계수, PM_{10} 이온성분이고, 반응가스 관측요소는 O_3, CO, NO_X, SO_2이며 1시간 평균 자료를 분석하였다. 기상 1호는 대부분 인천과 목포 구간((37°20′N ~ 35°20′N) - (124°17′E))을 왕복 운항하였으며, 1항차에서 3항차까지 각 1회 야간 운항을 진행하였다. 기상 1호 선교(Bridge)의 컨테이너안에 공기역학입자계수기(Aerodynamic particle sizer, 이하 APS), 광학입자계수기(optical particle counter, 이하 OPC)와 광산란계수측정기(Nephelometer), 대기 중 가스 및 에어로졸 이온분석기를 설치하여 2019년 4월 15일 ~ 6월 13일까지 서해상의 반응가스와 에어로졸을 실시간 관측하였다.

1.1. 1항차(4월 15일 ~ 24일)

Fig. 2.1.1은 1항차 동안 안면도에서 관측한 에어로졸과 반응가스 농도이며, Fig. 2.1.2는 같은 기간 기상1호에서 관측한 에어로졸의 물리, 광학, 화학성분의 시계열이다. APS로 관측한 입자크기별 부피농도 분포를 보면 안면도와 기상1호 모두 4월 15일

부터 17일 오전까지 조대입자가 우세하고, 15일 밤과 16일 새벽 사이 일시적으로 미세입자가 증가하는 등 유사한 변화 경향을 보였으나, 입자크기와 농도는 약간 달랐다. 서해상에서 미세입자 농도가 증가한 15일 밤과 16일 사이 에어로졸 광산란계수가 170 Mm^{-1}까지 증가했으며, 이는 안면도의 같은 기간 최댓값(103 Mm^{-1})보다 약 65% 높은 수치이다. 또한, 이차오염물질인 nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+의 조성비는 약 80%를 차지하였다. 조대입자가 우세한 기간에는 낮은 옹스트롬 지수와 낮은 에어로졸 광산란계수를 보여 APS에서 관측된 입자크기 분포와 변화경향과 상관성이 높았다. 15일부터 17일 오전까지 조대입자 부피농도가 높은 기간 안면도는 남서 방향 바람이 불었고, O_3 농도는 18일과 비슷한 수준으로 낮았으나 CO, NOx, SO_2의 농도는 높게 나타나 해상에서 유입된 공기괴가 오염물질을 포함하였을 가능성을 보였다.

안면도에서는 4월 19일에 미세입자 영역의 농도가 크게 증가하는 반면, 기상1호에서는 그렇지 않았다. 이 기간 위성영상에서는 기상1호 항로상에 해무가 관측되고, 안면도 주변의 에어로졸 광학두께가 0.5 ~ 1.0 사이로 서해상보다 높은 값을 보여 안면도는 지역 오염원의 영향을 주로 받았을 것으로 판단된다. 4월 15일부터 23일까지 nss-Ca^{2+}, CO_3^{2-} 성분의 조성이 최대 26.2%로 나타나 다른 기간에 비해 황사의 영향을 더 많이 받은 것으로 판단된다. 22 ~ 24일에 미세입자가 관측되었지만, 고농도 유지 기간은 안면도에서보다 기상1호에서 더 짧았다. 기상1호에서의 에어로졸 광산란계수는 23일 일시적으로 증가한 미세먼지로 인해 최대 264 Mm^{-1}까지 관측되었는데, 이는 같은 기간 안면도에서보다 약 13% 높은 값이다. 19일과 24일 사이에는 미세입자가 우세하여 산란옹스트롬 지수는 1 ~ 2 사이의 높은 값을 유지하였다. 안면도에서 관측된 CO, NOx, SO_2의 평균 농도도 높았는데 특히 22일 일평균 농도가 389.8 ppb, 10.8 ppb, 2.7 ppb로 1항차 기간 중 가장 높게 나타났다. 이 시기에 북서풍이 2.5 m/s 이하로 불었으며 반응 속도가 빨라 대기 내 수명이 짧은 NOx가 18일 평균보다 4배 이상 높게 나타나, 이 때 공기괴는 안면도 부근의 물질을 포함한 것으로 보인다. 이차오염물질인 nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+은 에어로졸 광산란계수의 시간변동과 매우 유사하게 관측되어 자료의 신뢰성을 높였다.

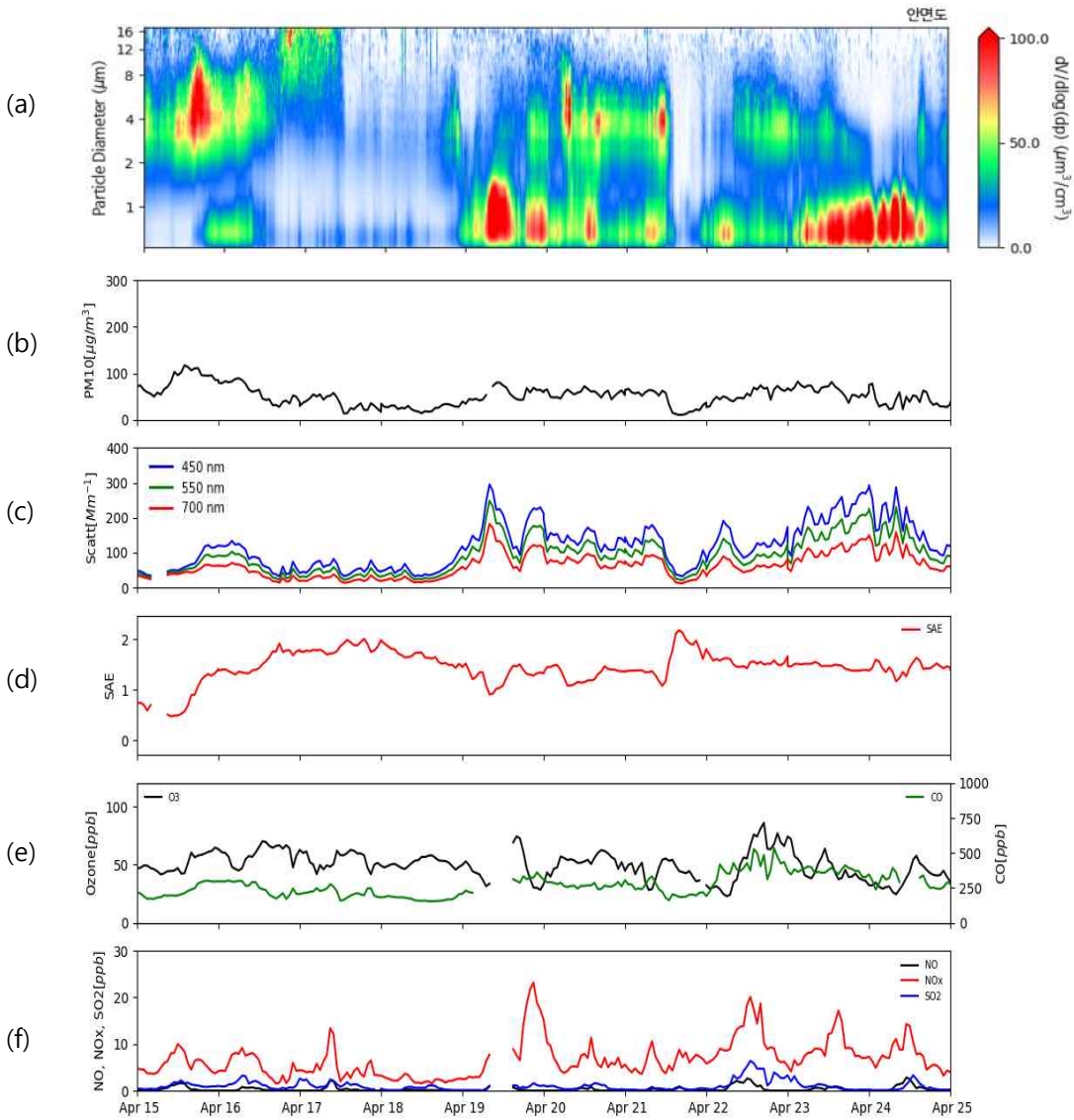


Fig. 2.1.1. Variation of aerosol and reactive gases during 15 ~ 24 April at Anmyeondo. (a) Aerosol volume size distribution, (b) PM_{10} mass concentration, (c) aerosol light scattering coefficient, (d) scattering Ångström exponent, (e) ozone (O_3) and CO concentration, (f) NO, NOx, SO_2 concentration.

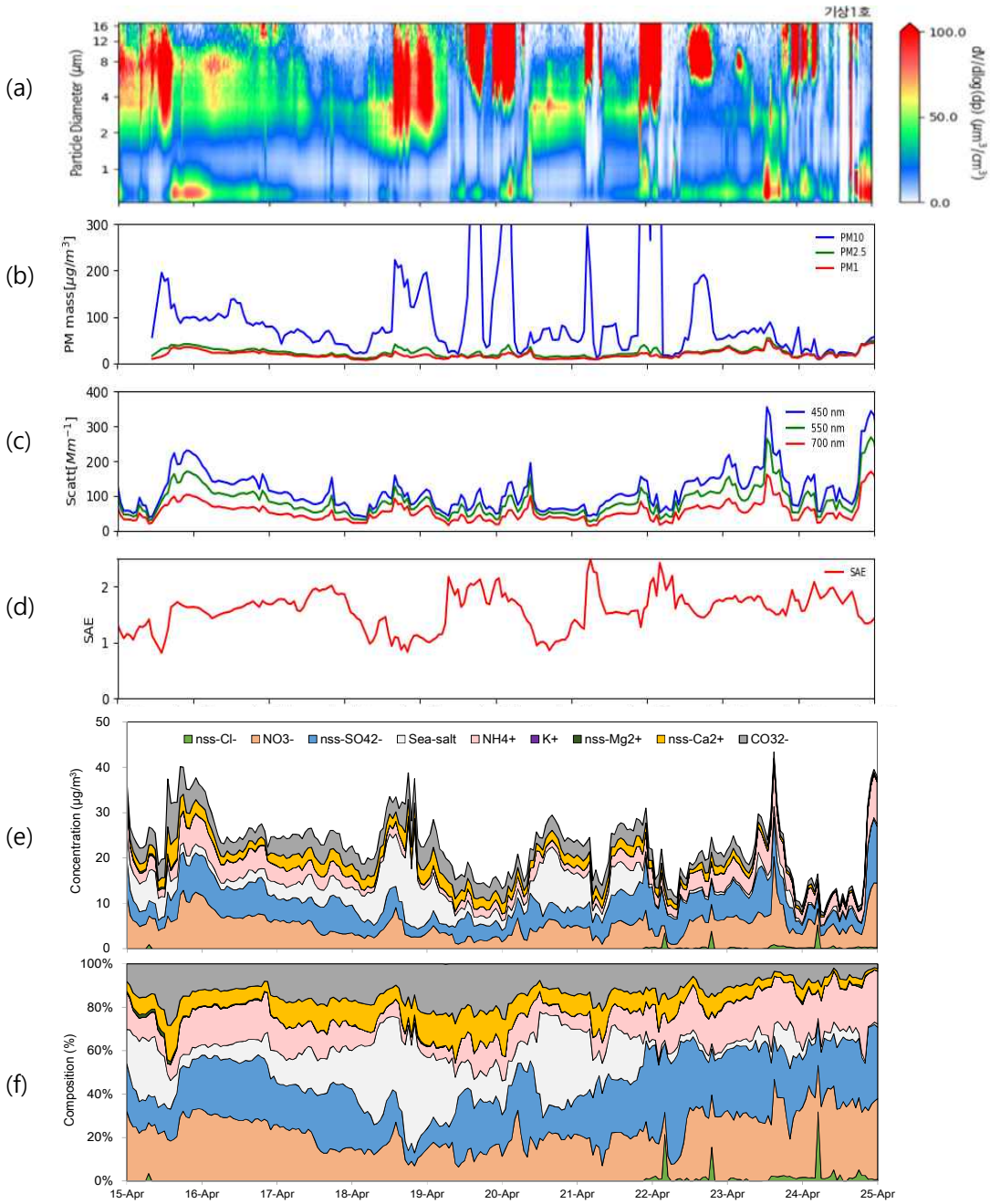


Fig. 2.1.2. Variation of aerosol properties during 15 April ~ 24 measured on Gisang1 vessel. (a) Aerosol volume size distribution, (b) PM_x mass concentration, (c) aerosol light scattering coefficient, (d) scattering Ångström exponent, (e) ion components, and (f) composition ratio of ion components.

1.2. 2항차(5월 1일 ~ 10일)

2항차 기간은 중국에서 동진하는 고기압의 영향으로 강수 없이 맑거나 구름 낀 날씨가 지속되었다. Fig. 2.1.3은 2항차 동안 안면도에서 관측한 에어로졸과 반응가스 농도이며, Fig. 2.1.4는 같은 기간 기상1호에서 관측한 에어로졸의 물리, 광학, 화학 성분의 시계열이다. 두 지점의 입자크기분포 변화 경향은 유사하지만 기상1호에서 농도가 대체로 더 높았다. 5월 1일 낮 동안 미세입자 영역의 농도가 높다가 그 이후 조대입자가 증가하여 황사가 유입된 것으로 보인다. 기상1호에서 미세입자 농도는 안면도에서보다 높고, 조대입자(황사)의 유입 시간은 더 빨랐다. 1일에 서해상에서 관측된 미세입자는 0.5 ~ 2 ㎛ 범위로 안면도에서보다 상대적으로 큰 입자가 많이 관측되었고, 입자 농도도 높아서 에어로졸 광산란계수가 467 Mm^{-1} (at 500 nm)이며 안면도(142 Mm^{-1})의 약 2.3배 수준이었다. 그러나 안면도에서보다 큰 입자로 인해 산란 옹스트롬 지수는 1 내외의 상대적으로 낮은 값을 보였다. PM_{10} 농도 최댓값은 기상1호에서 423 ㎍/㎥로 안면도(276 ㎍/㎥)에서보다 53% 높았다. 에어로졸 광산란계수는 황사 유입 직전 미세입자 농도가 높을 때 일시적으로 증가하였고, 황사 유입 직후 감소하였으며, 특히 옹스트롬 지수는 거의 0에 가까워졌다. 이 기간 동안 nss-Ca^{2+}, CO_3^{2-}, Sea-salt의 조성이 최대 68.0%까지 증가하였다.

3일 저녁부터 5일까지 고농도 미세먼지가 관측되었는데 안면도에서 관측된 PM_{10} 질량농도는 기상1호의 절반 이하였다. 에어로졸 광산란계수는 기상1호에서 413 Mm^{-1}로 안면도 최댓값(273 Mm^{-1})보다 50% 이상 높았으며, 산란 옹스트롬 지수도 약 2까지 증가하였다. 이차오염물질인 nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+의 조성비가 최대 95%까지 증가하였다. 반응가스 중에서는 O_3와 CO 농도 증가가 두드러졌다.

6일 오후부터 7일까지 두 지점 모두 조대입자가 증가하여 기상1호의 PM_{10} 질량농도가 196 ㎍/㎥으로 안면도 최댓값의 약 2배의 농도를 보였으며, 산란 옹스트롬 지수도 0.8로 감소하였다. nss-Ca^{2+}와 CO_3^{2-} 조성비가 34.6%로 증가하여 황사의 특성을 보였다. 7일 안면도 CO의 농도가 기간 중 가장 높게 관측되었는데, 이 때 서남서풍이 2.5 ~ 4.1 m/s 로 불어 바다 방향에서 이동해온 공기의 영향을 받았음을 알 수 있다. 그러나 에어로졸이나 다른 반응가스와의 연관성이 낮아 향후 고농도

CO의 원인에 대한 추가 분석이 필요하다.

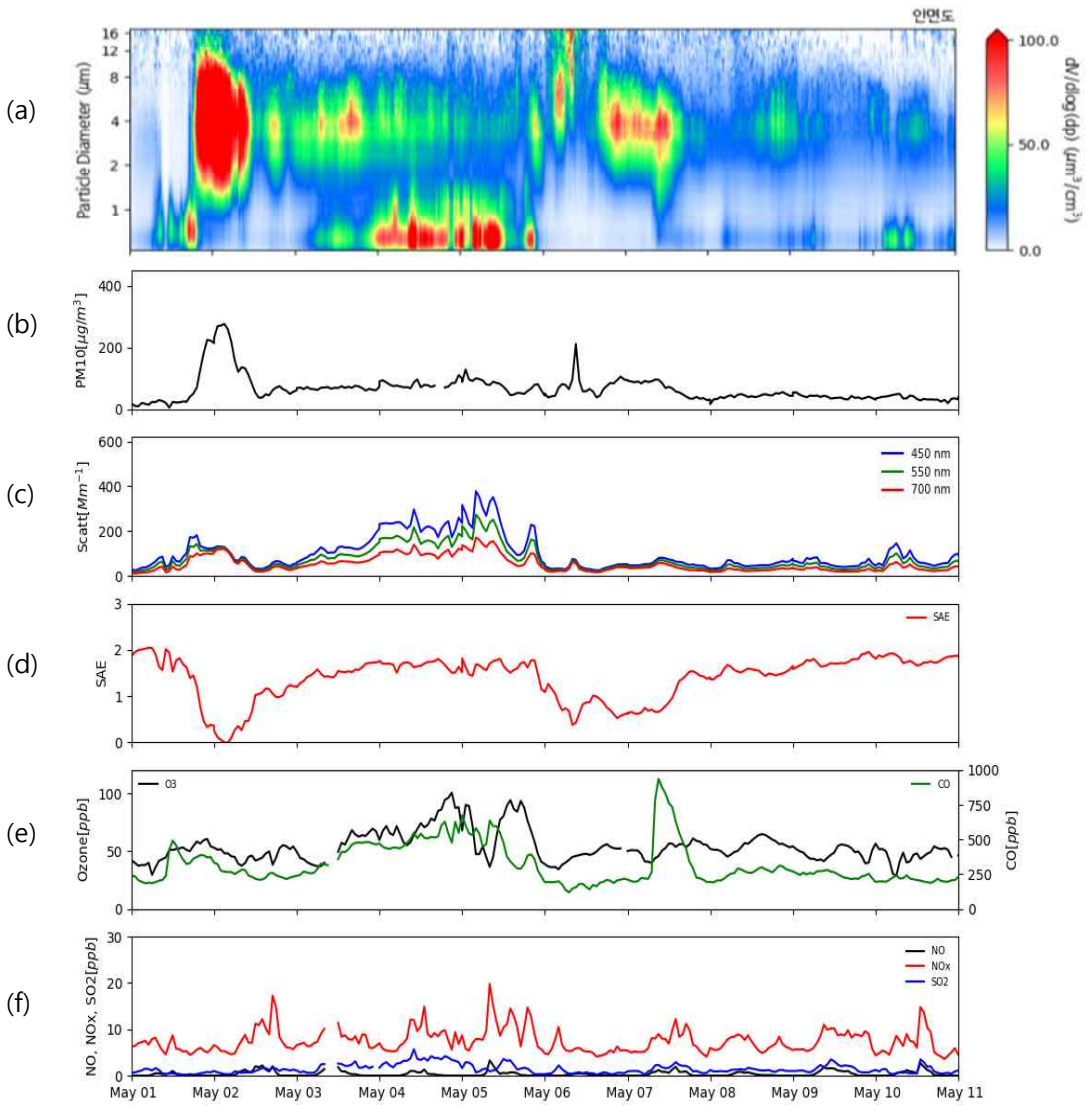


Fig. 2.1.3. Variation of aerosol and reactive gases during 1 ~ 10 May at Anmyeondo. (a) Aerosol volume size distribution, (b) PM_{10} mass concentration, (c) aerosol light scattering coefficient, (d) scattering Ångström exponent, (e) ozone (O_3) and CO concentration, (f) NO, NOx, SO_2 concentration.

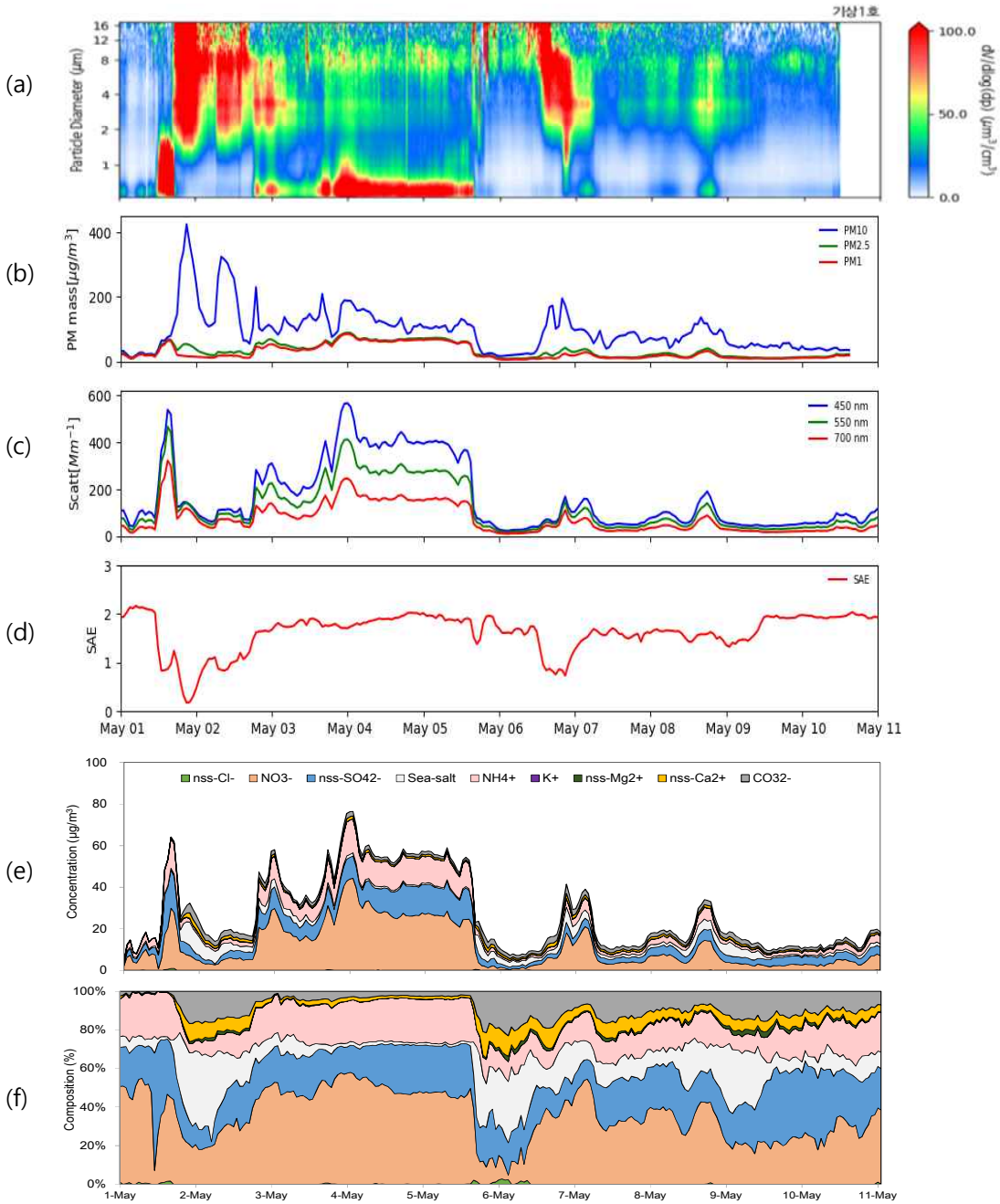


Fig. 2.1.4. Variation of aerosol properties during 1 ~ 10 May measured on Gisang1 vessel. (a) Aerosol volume size distribution, (b) PM_x mass concentration, (c) aerosol light scattering coefficient, (d) scattering Ångström exponent, (e) ion components, and (f) composition ratio of ion components.

1.3. 3항차(5월 15일 ~ 24일)

5월 15일에서 16일까지 동해상에 위치한 고기압의 영향을 받아 전국이 대체로 맑았으나, 17일에서 20일 오전까지 서해상에 위치한 기압골의 영향으로 강수가 발생했고, 20일 오후부터 중국 중부 및 남부지방에서 동진하는 고기압의 영향으로 다시 맑은 날씨가 이어졌다. Fig. 2.1.5는 3항차 동안 안면도에서 관측한 에어로졸과 반응가스 농도이며, Fig. 2.1.6은 같은 기간 기상1호에서 관측한 에어로졸의 물리, 광학, 화학성분의 시계열이다. 5월 15일 ~ 17일 사이 안면도의 일평균 풍속은 2.2 m/s 이하로 낮았으며, 미세입자가 우세하였다. 입자크기분포 변화 경향은 두 지점이 유사하지만, 안면도의 미세입자 영역 농도와 크기 영역이 더 넓으며, 지속시간도 17일까지로 더 길었다. 선박에서 관측한 이온 성분 중 이차오염물질인 nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+의 조성이 전체 이온성분의 83.6% ~ 90.7%를 차지하였다. 이 기간에 반응가스 농도도 높았다. 기상1호에서는 18일 새벽에 2 ~ 8 ㎛ 크기의 입자가 일시적으로 증가하였는데, 이는 실시간 화학성분 중 Sea-salt 성분이 증가하는 시간과 일치한다. 한편, 같은 시간 동안 PM_{10} 질량농도나 에어로졸 광산란계수 증가에는 크게 기여하지 않았다.

20일부터 24일에는 조대입자가 높은 농도 수준을 유지하였는데, 에어로졸 광산란계수는 큰 변동이 없으나 산란 옹스트롬 지수는 조대입자의 영향으로 20일 새벽에 0.2까지 감소하였다. 기상1호의 실시간 이온 성분 중 nss-Ca^{2+}와 CO_3^{2-} 농도가 증가하고, 특히 Sea-salt 농도가 크게 증가해 이온 성분의 최대 59.6%를 차지하였다. 이는, 황사와 더불어 19일 밤 이후 서해상의 강풍에 의해 생성된 해염 입자의 영향으로 생각된다. 22일부터 미세입자가 증가하기 시작하였는데, 기상1호에서는 23일 밤, 안면도에서는 24일 새벽에 가장 높은 농도로 관측되었다. 안면도의 O_3과 CO 농도는 20일부터 24일까지 꾸준히 증가하였고, 특히 24일 종일 O_3 농도가 100 ppb 이상으로 나타났으며, 광화학 반응이 없는 밤과 새벽 시간대에도 농도가 떨어지지 않아 외부에서 이동한 공기괴의 영향을 받은 것으로 보인다. 23일의 기상1호의 에어로졸 광산란계수는 3항차 기간 중 최대였다(457 Mm^{-1} at 550 nm). 같은 기간의 이온 성분 중 이차오염물질인 nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+의 조성이 70.6% ~ 86.0%까지 차지하였다.

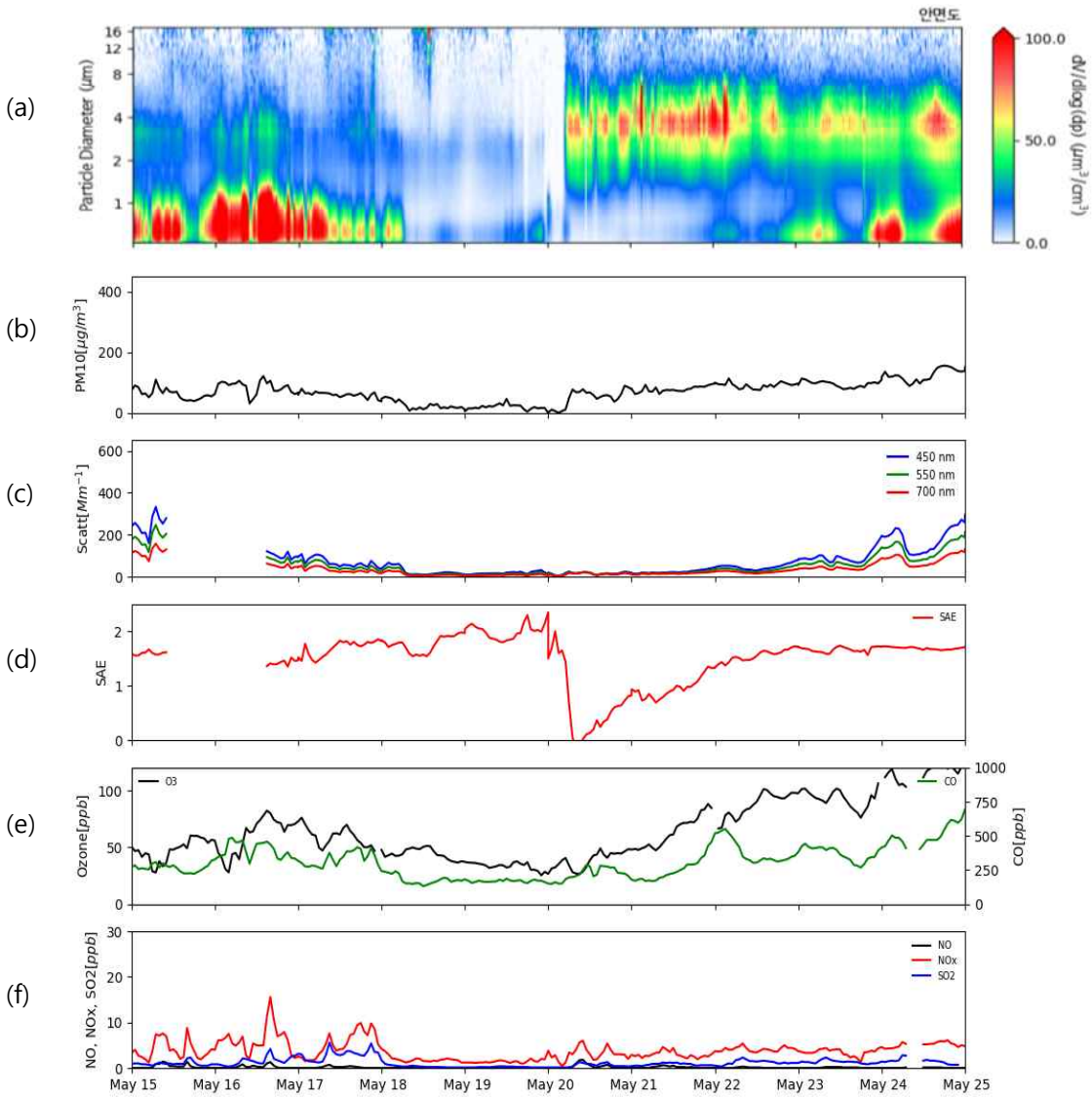


Fig. 2.1.5. Variation of aerosol and reactive gases during 15 ~ 24 May at Anmyeondo. (a) Aerosol volume size distribution, (b) PM_{10} mass concentration, (c) aerosol light scattering coefficient, (d) scattering Ångström exponent, (e) ozone (O_3) and CO concentration, (f) NO, NOx, SO_2 concentration.

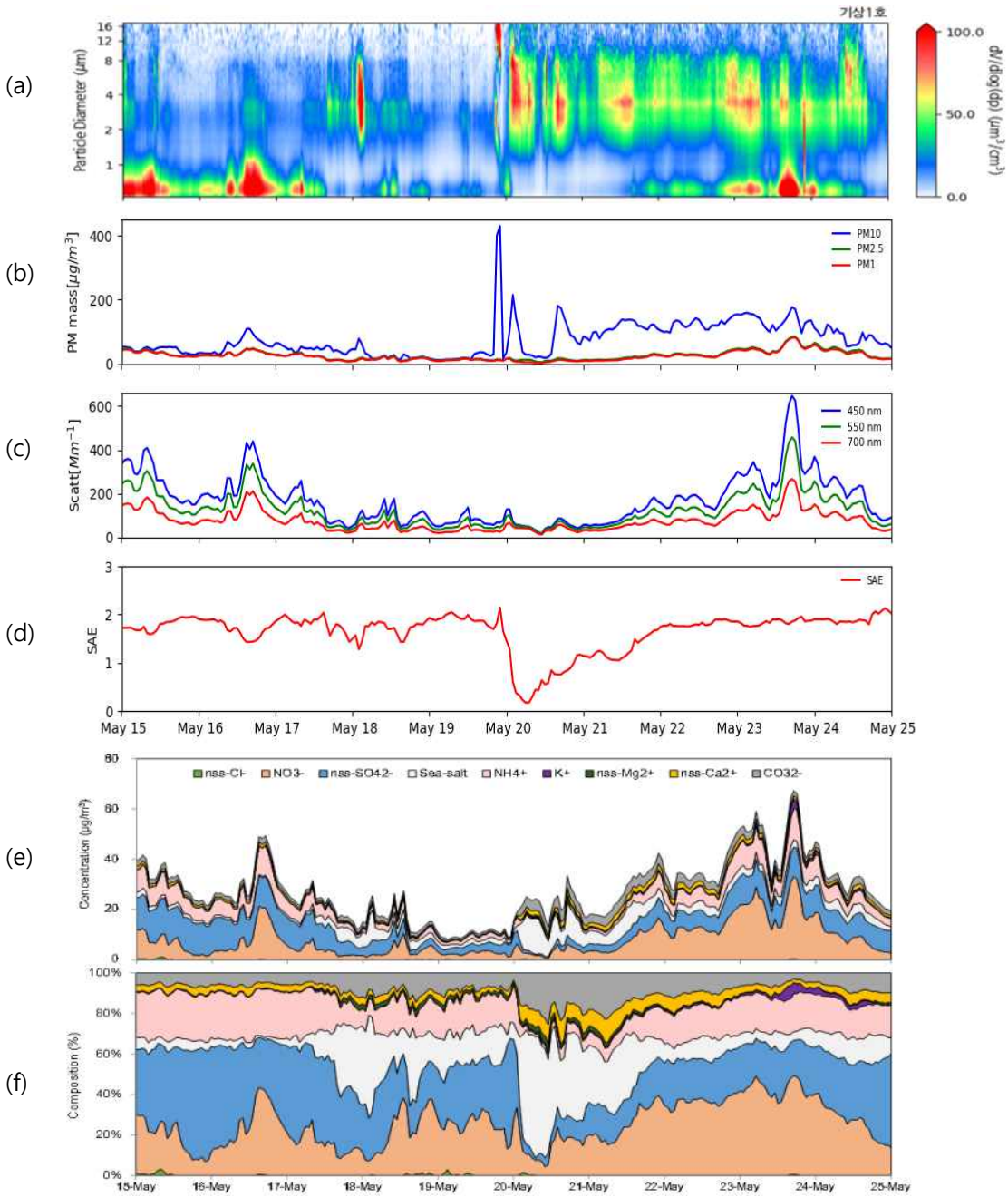


Fig. 2.1.6. Variation of aerosol properties during 15 ~ 24 May measured on Gisang1 vessel. (a) Aerosol volume size distribution, (b) PM_x mass concentration, (c) aerosol light scattering coefficient, (d) scattering Ångström exponent, (e) ion components, and (f) composition ratio of ion components.

1.4. 4항차(6월 4일 ~ 14일)

6월 4일과 5일은 남해상에 위치한 고기압의 영향으로 대체로 맑았으나, 6일 밤부터 7일까지는 중국 중부지방에서 다가오는 저기압의 영향으로 강수가 발생하였다. 8일에는 서해상 고기압의 영향으로 잠시 날씨가 맑아졌으나, 9일과 10일에 북서쪽에서 남동진하는 기압골의 영향으로 강수가 발생했다가, 11일부터는 동해상에 위치한 고기압의 영향으로 맑은 날씨가 이어졌다. Fig. 2.1.7은 4항차 동안 안면도에서 관측한 에어로졸과 반응가스 농도이며, Fig. 2.1.8은 같은 기간 기상1호에서 관측한 에어로졸의 물리, 광학, 화학성분의 시계열이다.

안면도에서는 6월 4일과 6일에, 기상1호에서는 4일에 미세입자가 우세하였다. 4일 기상1호에서의 에어로졸 광산란계수 최댓값은 227 Mm^{-1}로 안면도에서보다 2배 이상 높은 값을 보였다. 같은 기간에 기상1호에서는 NO_3^-의 조성비가 증가하다가 4일 저녁부터 감소하였고, 이후 nss-SO_4^{2-}가 전체의 최대 80.4%를 차지할 정도로 급격하게 증가하였고, 6일 오전까지도 약 50%의 높은 조성비를 보였다. 같은 기간 안면도에서도 유사한 입자 크기 분포가 관측되었으나, 농도는 더 낮았다. 5일 새벽 8 ㎛ 이상 입자가 증가한 것은 해무 영향으로 판단된다. 반면, 6일에는 안면도에서만 고농도 미세입자가 관측되었고 PM_{10} 최고 농도는 69 ㎍/㎥, 에어로졸 광산란계수(550 nm) 최댓값은 192 Mm^{-1}였다. 이로부터 약 8시간 후인 17시에 NOx 농도는 기간 중 최고였다. 미세입자가 우세하긴 하나 입자크기는 2 ㎛ 정도까지로, 다른 고농도 사례에 비해 크기가 큰 입자를 포함하고 있어, 옹스트롬 지수는 최저 0.85로 상대적으로 낮았다. 6월 7일 이후 CO 농도는 170 ~ 250 ppb 사이로 일정하게 나타난 반면 NOx는 높은 농도가 종종 나타나 이 기간에 국지오염의 영향을 자주 받았을 것으로 추정된다.

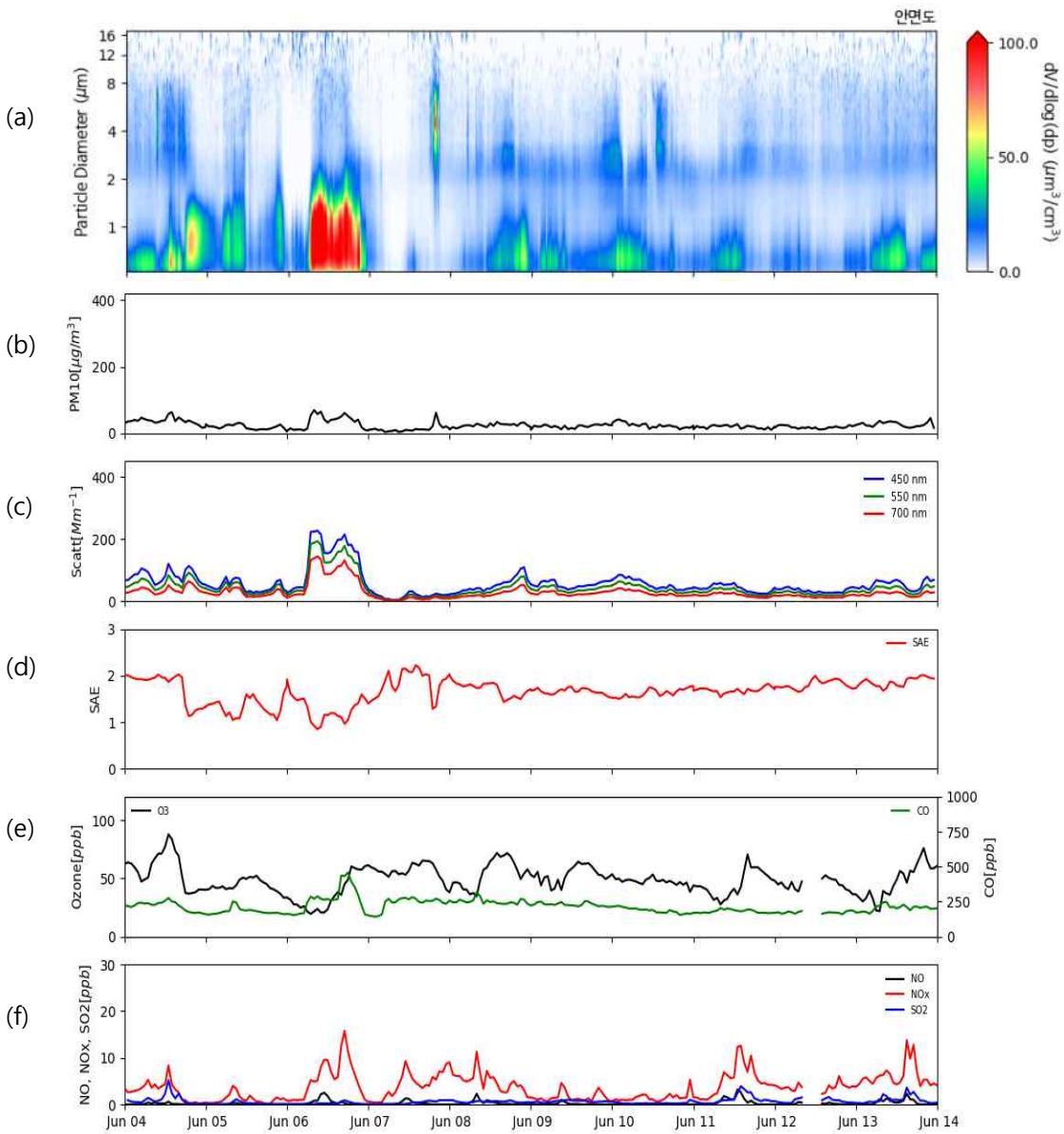


Fig. 2.1.7. Variation of aerosol and reactive gases during 4 ~ 13 June at Anmyeondo. (a) Aerosol volume size distribution, (b) PM_{10} mass concentration, (c) aerosol light scattering coefficient, (d) scattering Ångström exponent, (e) ozone (O_3) and CO concentration, (f) NO, NOx, SO_2 concentration.

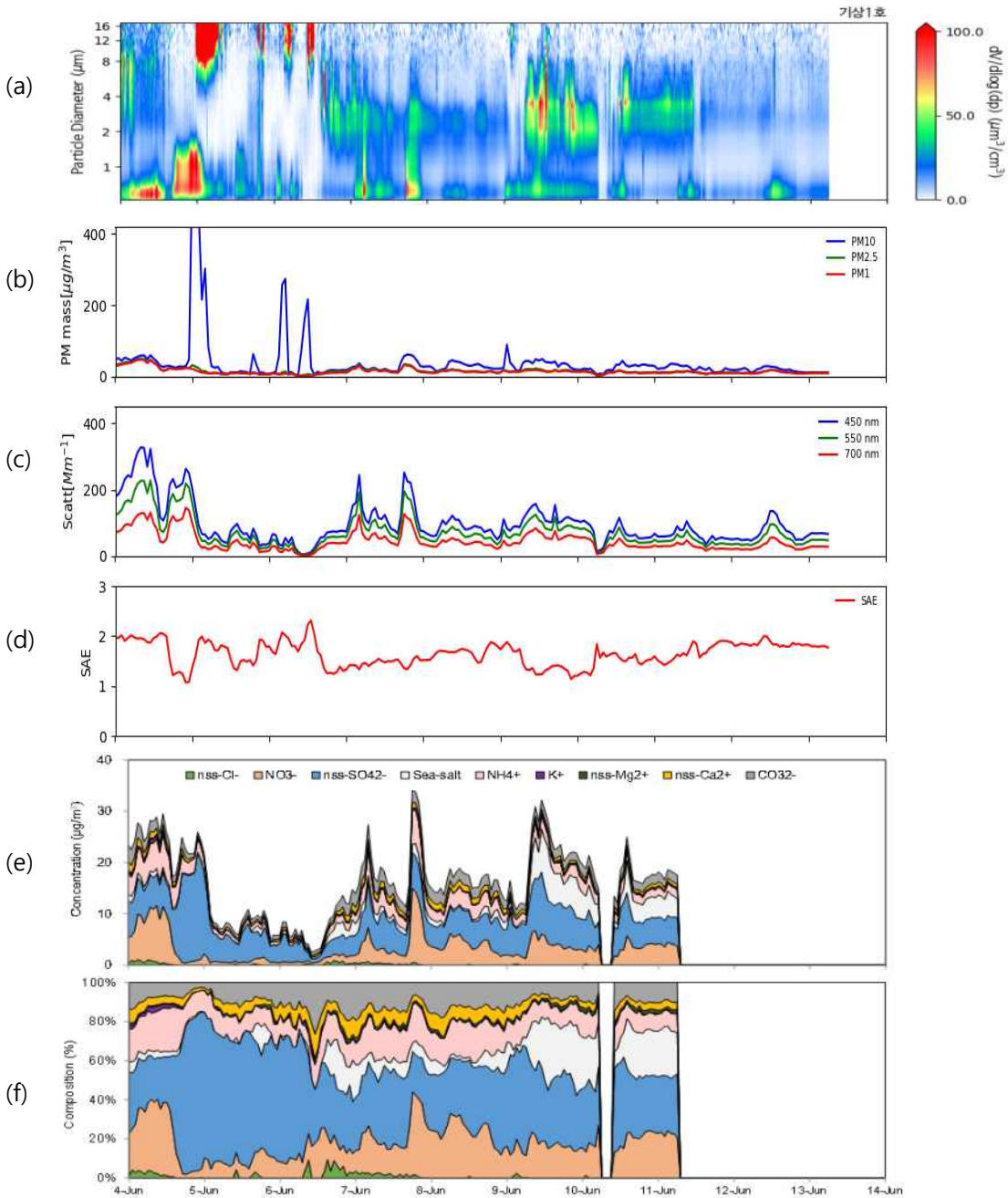


Fig. 2.1.8. Variation of aerosol properties during 4 ~ 13 June measured on Gisang1 vessel. (a) Aerosol volume size distribution, (b) PM_x mass concentration, (c) aerosol light scattering coefficient, (d) scattering Ångström exponent, (e) ion components, and (f) composition ratio of ion components.

2. 고농도 사례 시 입체관측 결과 종합 분석

5월 19일에 고비사막과 내몽골에서 발원한 황사로 인해 20일 새벽부터 25일까지 안면도와 서해상(기상1호)에서는 조대입자가 우세하게 관측되었으나(Fig. 2.1.5 ~ 2.1.6). 위성에서는 우리나라 부근에 황사 신호가 탐지되지 않았고, 목측으로 관측할 만큼 높은 농도는 아니었다. 5월 21일 13시 28분부터 서울 김포공항에서 이륙하여 약 3시간 3분 동안 서해 상공에서 항공 관측을 수행하였으며, 기상1호가 운항하는 경도 상(124° 12′ 35″E ~ 124° 37′ 23″E)에서 위도 34° 48′ 44″N ~ 36° 44′ 52″N를 왕복 운항하였다. 관측 타겟 지역의 운항 시간은 약 14시 20분부터 15시 55분 무렵까지이며, 운항고도는 남하 시 3,000 ft에서 시작하여 약 7분 동안 고도를 유지하며 관측 후 300 ft씩 하강하여 1,500 ft까지 내려가고 북상 시에는 300 ft씩 상승하여 3,000 ft 지점까지 관측이 진행되었다. Fig. 2.1.9는 5월 21일 비행한 기상항공기의 입체 및 평면 운항 경로, 위도 변화 및 경도변화에 따른 운항고도이며, 경로의 색깔은 에어로졸 수농도 또는 에어로졸 광산란계수(550 nm)이다. 에어로졸 수농도와 광산란계수 모두 약 37°N, 고도 1 ~ 3.5 km 부근에서(14시 20분, 16시 경) 값이 증가하였다. 히마와리 위성 RGB 영상을 보면 고농도가 관측된 위치와 산둥반도 사이에 에어로졸 플룸이 탐지된다(Fig. 2.1.9 (c)). 기상1호는 16시 경까지 북상하다가 이 지점에서 다시 남하하였는데, 이 부근에서 이차오염물질의 농도가 증가한 것이 확인되며, 특히 NO_3^-의 농도 증가가 두드러졌고 에어로졸 광산란계수도 유사한 변동을 보였다(Fig. 2.1.10). 기상1호와 항공기 에어로졸 고농도가 관측된 자료로부터 위성에서 확인되는 플룸은 고도 0 ~ 3.5 km 사이에 존재했을 것으로 추정할 수 있다. Fig. 2.2.11과 Fig. 2.2.12는 각각 항공기와 선박, 안면도에서 측정한 입자크기별 부피농도 분포와 에어로졸 산란계수이다. 19일 발원한 황사의 영향으로 항공기와 선박, 안면도(지상)에서 공통적으로 조대입자가 우세하였는데, 21일 오후에는 서해상에만 미세입자가 유입된 것으로 보이며 항공관측 결과와 선박관측, 위성 영상이 서로 일치하는 결과를 보여주었다.

Fig. 2.2.13은 5월 21일 서해상에서 기상항공기에 탑재된 Sky-OPC로 관측한 $PM_{2.5}$ 질량 농도와 00 UTC (09 KST)에 예측한 기상청 현업 황사·연무통합예측모델

(ADAM3)의 $PM_{2.5}$ 농도 결과를 비교한 것이다. 비교 결과 모델은 약 35°N ~ 36°N 사이에 고농도 띠를 예측하고 있는 반면 항공관측에서는 37°N 부근에서 가장 높은 농도를 보였다.

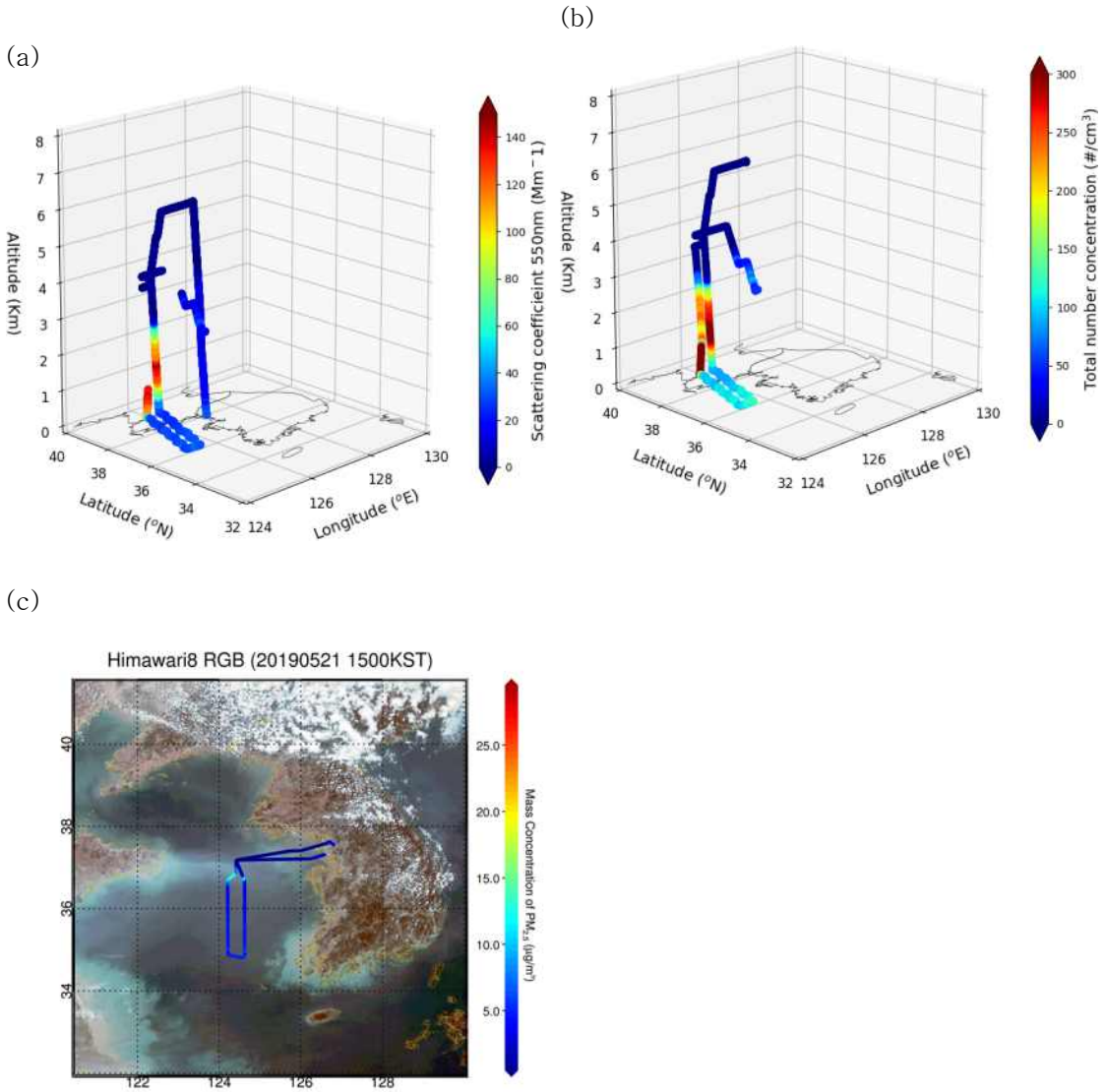


Fig. 2.1.9. Airborne observation results and aircraft operating route on 21 May. (a) aerosol light scattering coefficients, (b) total number concentration (>250 nm), (c) $PM_{2.5}$ mass concentration and Himawari satellite RGB image.

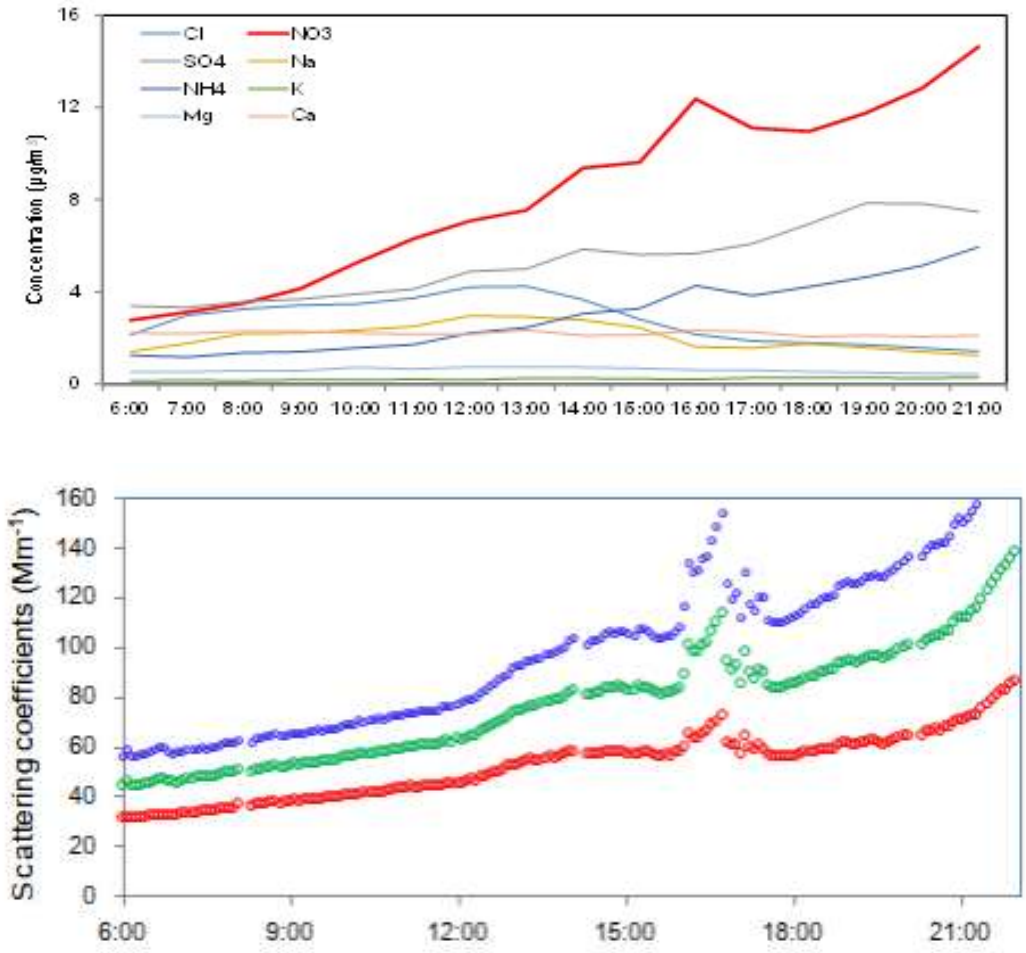


Fig. 2.1.10. Gisang1 vessel observation results on 21 May. (a) ionic components, (b) aerosol light scattering coefficients.

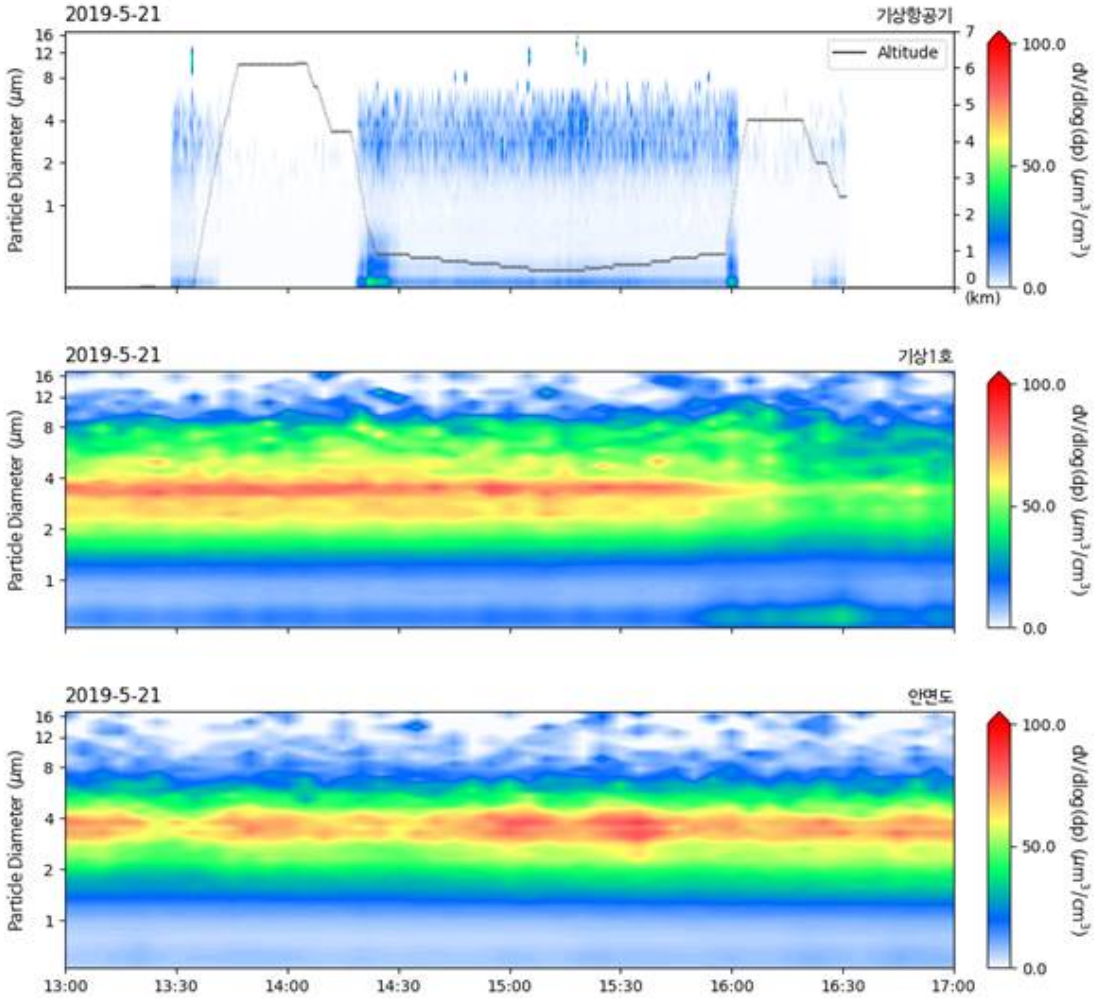


Fig. 2.1.11. Aerosol volume size distribution from the (a) aircraft, (b) Gisang1 vessel and (c) Anmyeondo on 21 May.

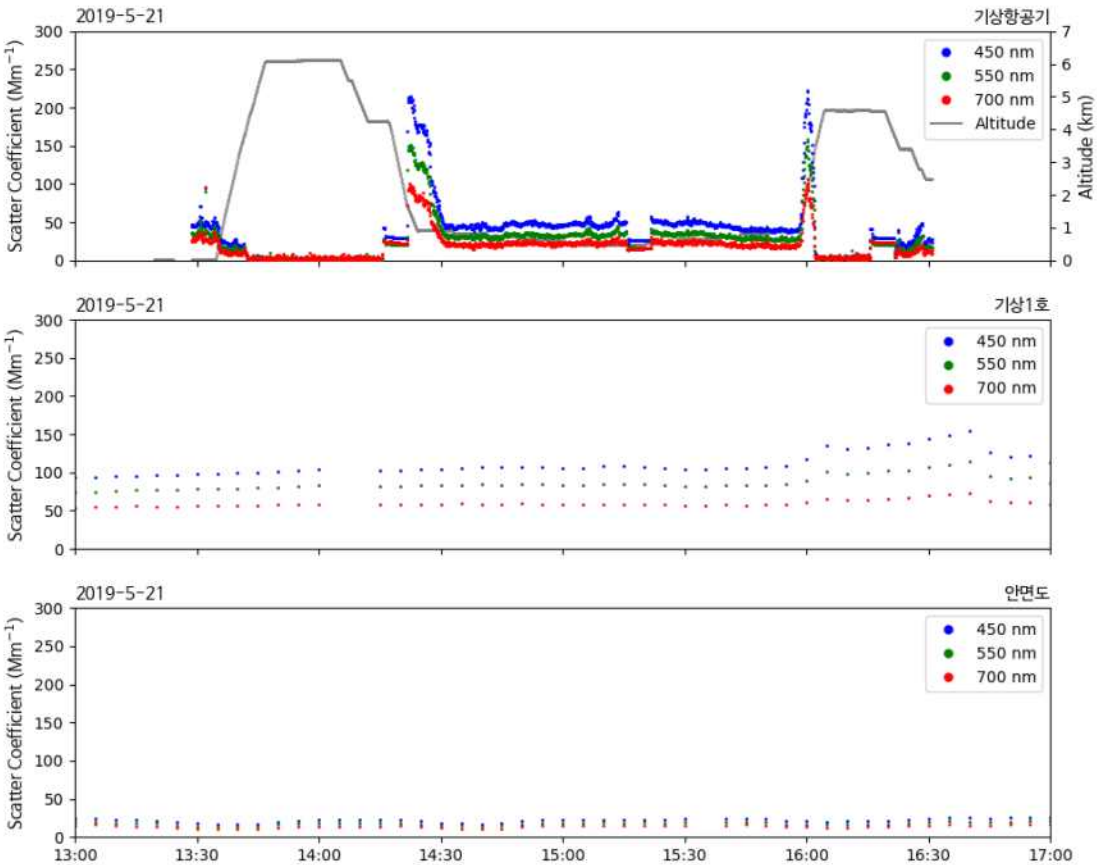


Fig. 2.1.12. Aerosol light scattering coefficients from the (a) aircraft, (b) Gisang1 vessel and (c) Anmyeondo on 21 May.

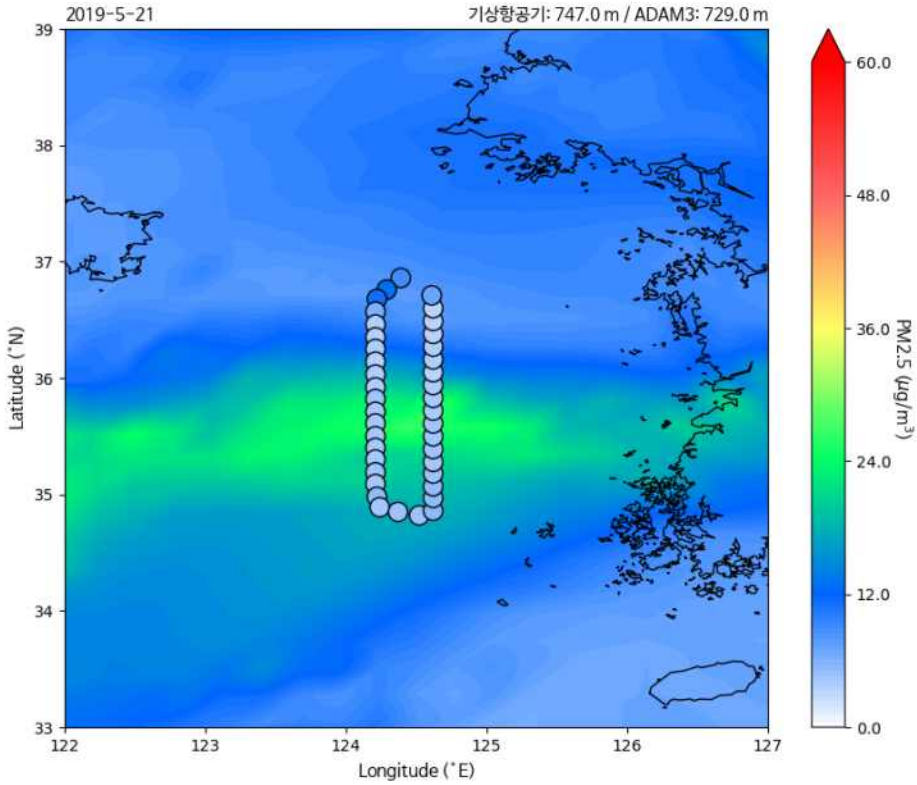


Fig. 2.1.13. Comparison of $PM_{2.5}$ mass concentration from aircraft measurement and ADAM-3 prediction on 21 May.

제 2 절 황사·연무 발생 기원 규명을 위한 에어로졸 특성 분석 기술 개발

1. 통계기법을 이용한 에어로졸 오염원별 시공간적 기여도 변화 분석

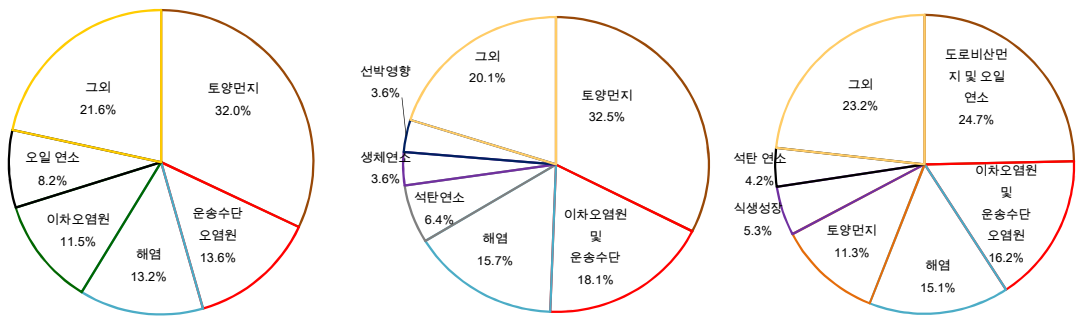
대기 중의 입자상 물질은 물리·화학적 특성 및 발생기원이 다르다. 따라서 대기질의 영향을 미치는 오염원을 확인하고 기여도를 정략적으로 파악하기 위해 수용모델링(receptor modeling) 연구가 필요하다. 수용모델은 크게 이화학적 분석 분야와 여기서 도출된 자료에 따라서 결과를 해석하는 응용통계학적 분석 분야로 나눌 수 있다. 특히, 응용통계학적 분석 분야의 종류는 농축계수법(Enrichment Factor, EF), 화학질량수지법(Chemical Mass Balance, CMB), 군집분석법(Cluster Analysis, CA), 주성분분석법(Principal Component Analysis, PCA), 양행렬인자분석법(Positice matrix factorization, PMF)등이 있다(Lee *et al.*, 2009). 본 연구에서는 서울황사감시센터(서울), 안면도기후변화감시소(안면도), 고산기후변화감시소(고산) 세 지역에서 PM_{10} 에어로졸의 수용성이온과 원소성분농도를 주성분석법을 이용하여 대기 에어로졸의 발생원을 파악하였다(표 2.2.1.1.참고).

Table 2.2.1. PM_{10} Aerosols Site and Period, Number of Sample.

장소	서울 황사감시센터	안면도 기후변화감시소	고산 기후변화감시소
채취기간	2014.12.31. ~ 2017.5.30.	2017.4.4. ~ 2019.6.30.	2016.5.12. ~ 2019.7.4.
시료수	415	654	604

서울, 안면도, 고산지역 PM_{10} 에어로졸이 주로 어떠한 배출원과 연계되어 있는지를 확인하기 위해 통계 프로그램(SPSS 18)을 이용하여 주성분 분석을 하였다. 주성분 분석 시 최적인자의 수는 고유값(eigenvalue) 1 이상으로 서울, 안면도, 고산지역에 각각 5, 6, 6개의 인자를 추출하였고 베리맥스(varimax) 회전법을 이용하여 산출하였다.

이러한 방법으로 서울, 안면도, 고산지역에 따른 전체기간에 채취된 에어로졸에 대해 주성분 분석을 실시한 결과를 그림 2.2.1.에 수록하였다. 서울의 주성분 분석결과 78.4%의 설명력을 보였다. 토양먼지 > 운송수단오염원 > 해염 > 이차오염원 > 오일연소의 영향 순으로 서울지역 에어로졸성분에 영향을 주었다. 그리고 안면도의 분석결과 79.9%의 설명력을 가지며, 서울과 마찬가지로 토양먼지의 영향을 가장 많이 받았고, 그다음으로 이차오염원 및 운송수단, 그리고 해염영향의 순이었다. 또한, 10% 이하의 영향에서는 석탄연소(6.4%) > 생체연소(3.6%) > 선박영향(3.6%) 순으로 나타났다. 마지막 지역인 고산지역의 주성분 분석결과 다른 지역과는 다르게 도로비산먼지 및 오일연소에 의한 영향이 24.7%를 보였고, 이차오염원 및 운송수단 오염원이 16.2%를 차지했다. 그다음으로는 해염성분과 토양먼지 순으로 나타났으며 식생성장과 석탄연소에 영향도 제주도 고산지에 에어로졸에 영향을 미치는 것으로 판단된다.



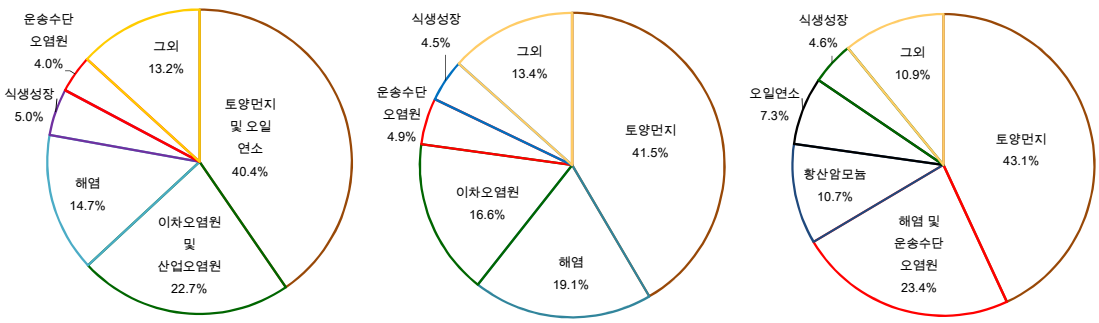
Seoul Anmyeon-do Gosan

Fig 2.2.1. Principal Component Analysis Result in Seoul, Anmyeon-do, and Gosan.

서울, 안면도, 고산지역에서 공통으로 2017년 4월부터 5월까지 채취된 PM_{10} 에어로졸은 주성분 분석(PCA)을 하였고, 특히 서울지역은 양행렬인자분석(PMF)법을 추가로 확인하여 주성분 분석결과와 비교하였다(그림 2.2.2 ~ 2.2.4.).

먼저 서울의 주성분 분석결과를 보면, 5개의 인자를 추출했을 때 86.8%의 설명력을 보였다. 첫 번째 인자는 토양먼지 및 오일연소의 영향을 받은 것으로 추정되며, 40.4%를 차지하였다. 두 번째 인자는 22.7%의 설명력을 보였고, 대표적인 이차오염

원성분들과 산업오염원인 H^+, NH_4^+, SO_4^{2-}, NO_3^-, $CH_3SO_3^-$, S, Zn, Cr, Mn, Pb 성분이 큰 적재값을 나타냈다(Sharma et al., 2016; Jain et al., 2017). 세 번째 인자는 14.7%이며, Na^+, Mg^{2+}, Cl^-, Sea-Salt, Na 성분들이 높은 적재값을 보여 이는 해염에 의한 오염원이라고 추정된다(Wang et al., 2005; Xu et al., 2012; Yin et al., 2014). 그리고 식생성장과 운송수단오염원에 영향을 받는 것으로 추정되며, 두 영향은 약 9.0%를 차지하였다. 안면도의 주성분 분석결과는 총 86.6%의 설명력을 보였으며, 그중 첫 번째 인자는 41.5%를 차지하였고, 토양먼지의 영향을 가장 많이 받았다. 두 번째는 19.1%로 해염성분의 영향이 크고, 세 번째는 이차오염에 의한 영향으로 16.6%를 차지하였다. 그리고 네 번째와 다섯 번째는 운송수단과 식생성장에 영향을 받았으며 이는 약 9.1%를 차지하였다. 마지막 지역인 고산지역의 주성분 분석결과는 89.1%의 설명력을 가지고 있으며, 첫 번째 인자는 서울, 안면도지역과 마찬가지로 토양먼지의 영향이 43.1%를 차지하였다. 두 번째 인자는 해염및운송수단오염원의 영향으로 23.4%를 보였고, 세 번째 인자는 황산암모늄의 영향을 10.7%를 받았다. 그리고 네 번째 인자는 오일연소로 7.3%, 식생성장에 의한 영향을 4.6%를 받은 것을 판단된다. 이를 종합적으로 비교해 본 결과, 모든 지역에서는 도로 및 토양오염원의 기여율이 가장 높았지만, 인위적 발생오염원의 기여율은 서울지역이 가장 많이 받는 것으로 보였다.



Seoul Anmyeon-do Gosan

Fig 2.2.2. Principal Component Analysis Result in Seoul, Anmyeon-do, and Gosan (2017. 4. ~ 5.).

서울지역은 같은 2017년 4 ~ 5월까지 양행렬인자분석(PMF)법을 실시하였고, 6개의 오염원으로 분류하였다. 또한, 그림 2.2.3. ~ 2.2.4.와 같이 오염원별 PM_{10}의 일별분포를 확인하고 공기역학입자계수기를 이용하여 검증하였다. 분리된 인자 중 평균기여도가 가장 높은 것은 29.0%의 토양먼지로 분석되었다. 그다음은 질산암모늄오염원과 운송수단오염원은 평균 22.9%와 18.8%의 기여도를 보였다. 이들 오염원은 차량운행과 관련된 것으로 도시지역의 특성을 반영된 것으로 보인다. 생체연소오염원, 황산암모늄 및 산업오염원, 해염오염원은 13.0%, 10.9%, 5.4% 순으로 구분되었다. 양행렬인자분석법의 전체 기여도를 채취된 일별기간에 기여도를 적용한 결과, 2017년 4월 1 ~ 8일까지 질산암모늄과 같은 이차오염물질의 기여율이 높고, 그 이후는 일차오염원(운송수단 등)에 대한 영향이 증가하였다. 2017년 4월 11, 12일, 18 ~ 20일, 5월 5 ~ 8일은 토양먼지의 기여율이 가장 높게 나타났다. 특히 2017년 5월 5일~9일에 토양먼지의 높은 농도와 기여율을 확인한 결과, 이 기간은 황사현상이 발생한 기간으로 109.8 $\mu g/m^3$의 평균질량농도와 전체의 71.6%의 평균 기여도를 보여 서울지역이 황사의 영향을 받은 것으로 판단하였다. 추가로 같은 기간 공기역학입자계수기의 에어로졸 부피농도와 비교한 결과, 조대입자영역의 부피농도증가는 토양먼지의 증가하는 경향과 일치하였다.

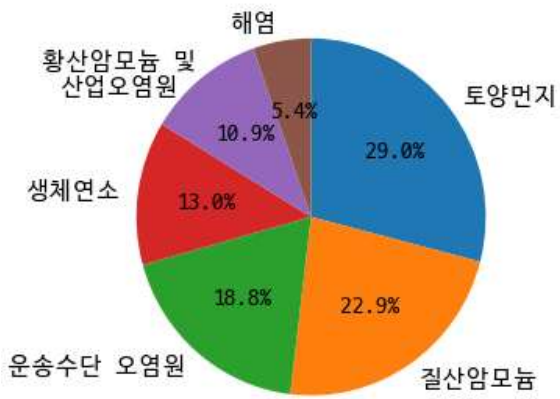


Fig 2.2.3. Positive matrix factorization Result in Seoul from April to May 2017.

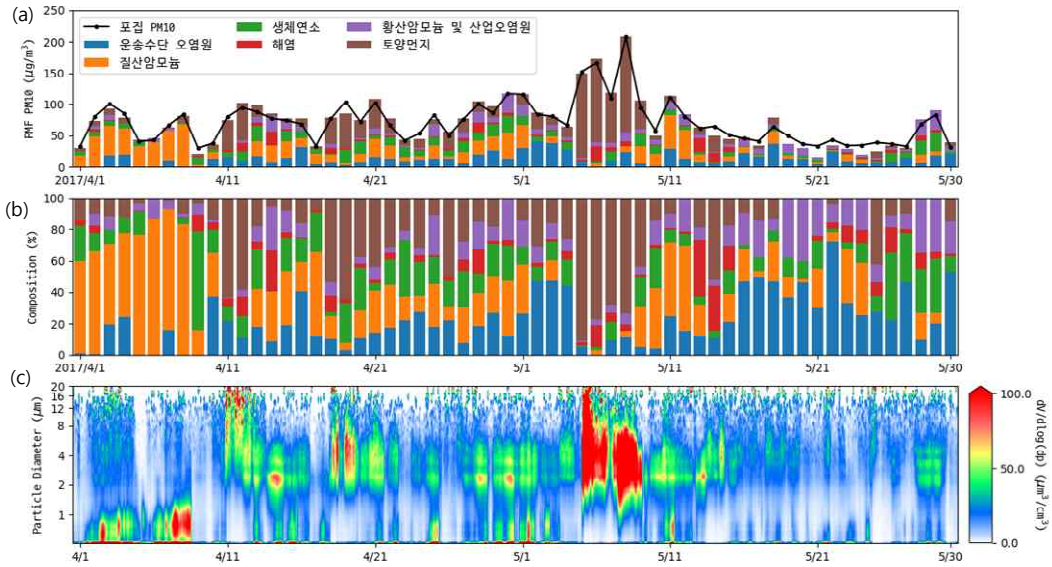


Fig 2.2.4. Time series of (a) PM_{10} Ionic Concentrations and (b) Ionic Compositions (c) Aerosol Size Distributions from April to May 2017.

2. 2019년 3월 고농도 사례의 기상학적 원인과 에어로졸 기원 분석

지난 2019년 3월 초 서울을 중심으로 고농도 에어로졸 현상이 나타났다. 환경부에서 관측한 서울지역의 39 지점 PM_{10} 시계열을 Fig. 2.2.5에 나타내었다. 2월 28일 오후부터 서울의 PM_{10}, $PM_{2.5}$ 농도가 미세먼지 '나쁨' (PM_{10} > 80 $\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ > 35 $\mu g/m^3$)을 기록하다가 3월 4일에서 6일까지 3일간 미세먼지 '매우 나쁨' (PM_{10} > 150 $\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ > 75 $\mu g/m^3$)을 기록한 후 7일부터 고농도 에어로졸 현상이 해소되었다.

일주일 이상 미세먼지 '나쁨'이 기록될 정도로 드문 고농도 사례였으며, 이의 기상학적인 원인을 살펴보고자 기상일기도(850 hPa, 지상)를 이용하여 3가지 형태의 기압계 변화로 분류하였다(Fig. 2.2.6). 먼저 형태 A는 중국 화중지방에서 형성된 고기압이 느리게 우리나라를 통과하는 형태로서 2월 28일부터 3월 3일 오전까지 영향을 주었다. 형태 B는 가장 고농도 현상이 발생했던 3월 3일 오후부터 3월 5일 오후까지로서

우리나라 남쪽에서 형성된 저기압이 일본 동쪽으로 느리게 북동진하면서 중국 화중 지방에서 이동해 온 고기압이 우리나라 부근에서 정체된 형태이다. 마지막으로 형태 C는 3월 6일 이후의 기압계로서 중국 화북지방에서 형성된 고이압이 우리나라로 남동진하는 형태이다. 각 종관기압 형태별로 서울의 지상 에어로졸 농도의 변화를 살펴보기 위해 환경부에서 관측한 서울지역의 PM_{10}(39 지점)과 $PM_{2.5}$(36지점)의 평균 시계열과 기상청 서울관측소(송월동)의 풍계를 이용한 바람장미를 Fig. 2.2.7에 나타내었다.

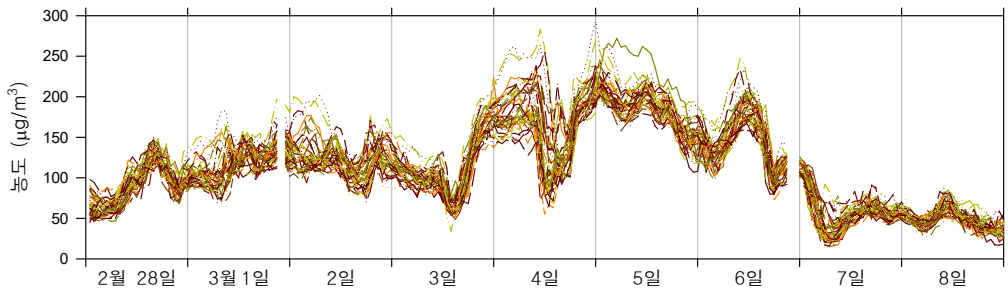


Fig 2.2.5. Time series of PM_{10} in Seoul (39 sites of Ministry of Environment) from 28 February to 8 March 2019.

Fig. 2.2.7에 의하면 형태 A에서는 북서-서풍 계열이 주를 이루고 있어 서쪽으로부터 에어로졸의 유입이 용이하게 나타났다. 형태 B는 서풍 계열이 주를 이루고 있으나 대기가 정체되어 전체적으로 풍속이 약했다. 반면 형태 C에서는 북서풍 계열이 주를 이루고 있고, 전반적으로 풍속이 강하여 에어로졸이 해소되기 용이한 풍계로 나타났다.

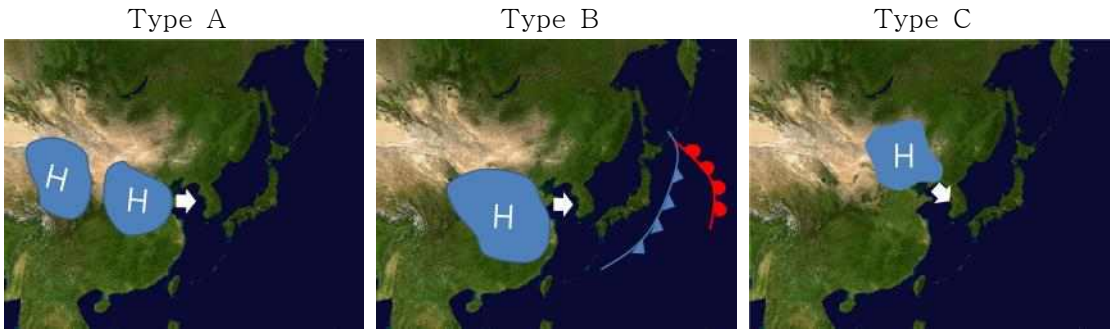


Fig 2.2.6. Synoptic patterns around Korean peninsula during the period of 28 February to 8 March 2019.

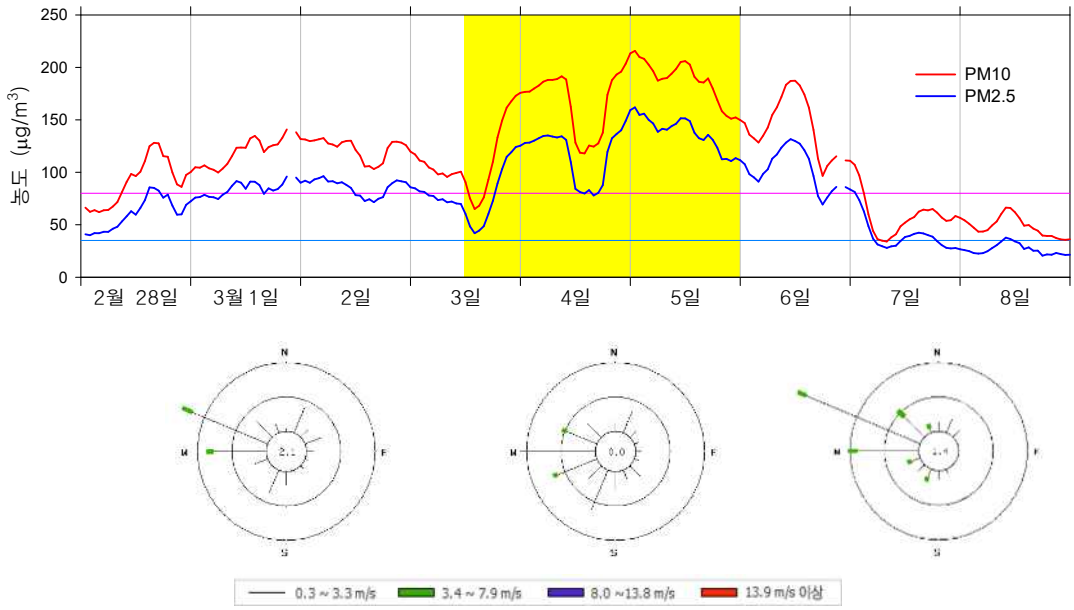


Fig 2.2.7. Time series of (above panel) mean PM_{10} and $PM_{2.5}$ and (below panel) wind rose in Seoul from 28 February to 8 March 2019.

또한 고농도 에어로졸의 연직분포를 살펴보기 위해 서울대학교에서 관측한 에어로졸 라이다 자료를 Fig. 2.2.8에 나타내었다.

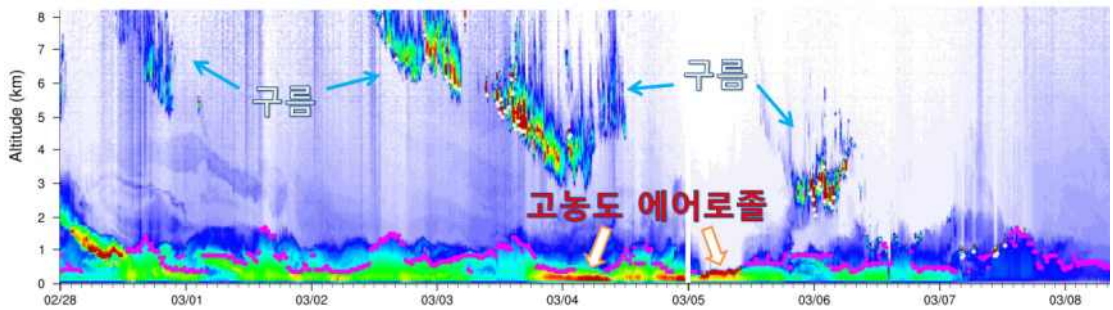


Fig 2.2.8. Vertical structure of aerosol and cloud from lidar in Seoul (Korea aerosol lidar observation network).

2월 28일부터 3월 7일까지 고농도 에어로졸은 대부분 대기혼합층(분홍색 점) 이내에서 관측되었고, 특히 서울에서 미세먼지 '매우 나쁨'이었던 3월 4일과 5일에는 고농도 에어로졸이 지상 근처에 강하게 형성되었으며, 분석 전체기간동안 고농도 에어로졸은 대부분 고도 1 km 이하의 대기 하층에 존재함을 알 수 있다.

이러한 고농도 에어로졸이 어디에서부터 기원했는지 조사하기 위해 각 형태별 후방궤적과 오염원 위치에 대한 확률정보를 제공하는 PSCF(Potential Source Contribution Function; 잠재적 오염원 기여 함수) 분석을 실시하였다(Fig. 2.2.9). 그 결과 서울에서 발생한 고농도 에어로졸과 관련된 공기덩이는 산둥반도, 발해만, 서해상을 통해 유입되었을 가능성이 높은 것으로 분석되었다. 보다 정량적인 기여율을 산출하기 위해서는 황사연무예측모델을 이용한 심도 있는 분석이 추가적으로 이루어져야할 것으로 사료된다.

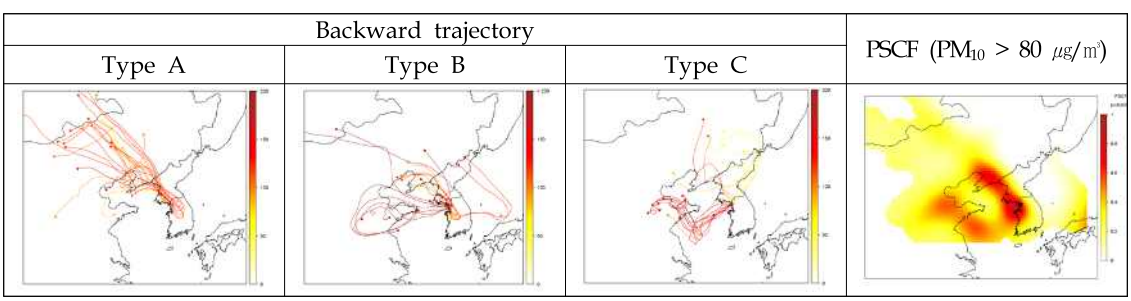


Fig 2.2.9. Backward trajectory of Type A, B, and C, and PSCF results with initial height of 500 m.

제 3 장 황사·연무통합예측모델 및 예측기술 개발

제 1 절 현업 황사·연무통합예측모델 개선

1. 국내 환경감시망 관측자료 품질검사법 개선

황사·연무통합예측모델 초기자료를 개선하기 위해 최적내삽법을 활용하여 지상 관측 PM_{10} 농도를 자료동화한다. 사용하는 관측 자료는 중국 환경감시망 1,498개소, 기상청 황사관측망 27개소, 환경부 환경감시망 339개소, 그리고 한·중 황사공동감시망 15개소에서 관측한 1시간 간격 PM_{10} 농도이다. 자료동화에 앞서 물리한계검사와 함께 주변 관측자료와 비교하여 튀는값을 제거하는 공간정합성검사를 활용하여 비정상 자료를 제거한다. 공간정합성검사는 관측 지점으로부터 반경 25 km 내 3개 이상의 유효한 관측 농도로부터 계산된 평균 PM_{10} 농도와 비교하여 기준값 이상 차이가 나는 자료를 걸러내도록 설계되었다. 하지만 기존 공간정합성검사는 주변(반경 25 km 내)에 비교할 관측 자료가 충분하지 않을 때 수행될 수 없다는 문제가 있었다.

예를 들어 2019년 2월 19일 00 UTC의 품질검사 후 국내 환경감시망 PM_{10} 농도 분포를 보면(Fig. 3.1.1 (a)), 김포 석모리 지점의 농도가 985 $\mu g/m^3$로 주변 지점들보다 매우 높은 값을 보임에도 기존의 품질검사법로 제거되지 않은 것을 확인할 수 있다. 2019년 5월 28일 00 UTC의 사례에서도 주변 지점과의 비교가 불가능한 군산 소룡동 지점에서 높은 PM_{10} 관측 값(1983 $\mu g/m^3$)이 자료동화에 사용되었다(Fig. 3.1.1 (b)).

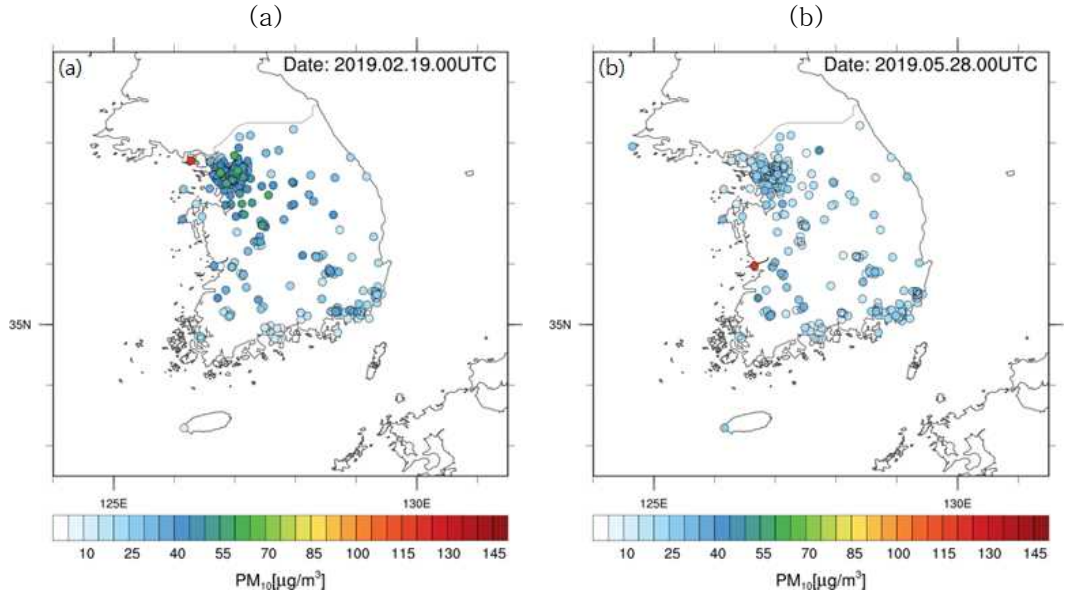


Fig. 3.1.1. The distribution of observed PM_{10} concentration used in the data assimilation system from air quality monitoring network in South Korea at (a) February 19, 2019 00 UTC and (b) May 28, 2019 00 UTC.

또한 2018년 한 해 동안 환경부 환경감시망 PM_{10} 농도 중 500 $\mu g/m^3$ 이상의 빈도를 조사한 결과 985, 1985, 995 $\mu g/m^3$ 등의 특정 농도가 998회, 52회, 50회 등 빈번하게 나타났다. 이 값들은 유효한 관측값이 아니라 관측기의 오류를 표시하는 값으로 자료동화 전에 걸러내야 한다. 이런 특이값들은 일반적으로 주변(25 km 이내) 비교할 관측 자료가 충분한 경우 기존 공간정합성검사를 통해 걸러지지만, 주변 지점들의 부재 혹은 부족(2개 이하)으로 인해 공간정합성검사가 수행되지 않은 지점들에서 유효한 관측값으로 간주되어 자료동화되어 모델 초기장에 악영향을 주었다. 따라서 국내 환경감시망에서 나타나는 비정상적으로 높은 농도의 관측자료 제거를 위해 품질검사법을 개선하였다.

기존에 사용하고 있는 품질검사법에 다음 세 가지의 검사법을 추가하여 해당 경우는 자료동화를 위한 지상관측자료에서 제외하였다: ① 높은 빈도로 나타나는 특정 농도(985, 995, 1000, 1985, 2000, 4985 $\mu g/m^3$)인 경우, ② PM_{10} 농도의 물리한계(2000 $\mu g/m^3$) 이상인 경우, ③ 반경 25 km내에 비교 지점이 없는 지점에 한하여, 반경

200 km 내에 네 지점 이상에서의 PM_{10} 관측 값이 존재할 때 네 지점 평균 농도와 비교하여 5배 이상 차이가 나는 경우.

개선된 품질검사법에 따른 황사·연무통합예측모델 예측성 평가를 수행하였다. 모델 평가 기간은 2019년 1월 1일 ~ 2019년 6월 30일, 평가 지점은 기상청 황사관측망 27개 지점이다. 모델 초기시각(00 UTC)로부터 6시간 간격의 모델과 관측 PM_{10} 평균 농도간의 평균제곱근오차(Root Mean Square Error; RMSE)를 통해 기존 품질검사법과 개선된 품질검사법에 따른 모델 예측성을 비교하였다. Table 3.1.1은 평균 시간마다 월별 및 평가기간 전체(1 ~ 6월) 평균 RMSE를 정리한 것이다. 품질검사법 개선 전·후에 관측과 모델 PM_{10}의 RMSE는 초기시각에 가까운 1 ~ 6시간 평균에서 가장 높은 개선율을 보였으며, 최대 개선율은 4월에 1.54 $\mu g/m^3$ (8.27%), 기간 전체에 대해서는 평균 0.76 $\mu g/m^3$ (3.97%)으로 나타났다.

Table 3.1.1. RMSEs of PM_{10} concentration with different QC (quality check) methods ('Old': original method, 'New': improved method).

Average time(hr) / Month	QC method	1-6	7-12	13-18	19-24	25-30	31-36	37-42	43-48
1	Old	18.00	20.83	22.33	24.20	23.43	23.48	24.53	25.69
	New	17.98	20.83	22.33	24.20	23.43	23.49	24.53	25.69
	New - Old	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
2	Old	20.96	21.37	28.05	31.77	25.36	22.21	21.70	22.16
	New	20.18	20.96	27.85	31.71	25.36	22.21	21.69	22.16
	New - Old	-0.78	-0.41	-0.20	-0.06	0.00	0.00	-0.01	0.00
3	Old	23.28	20.21	23.23	26.09	21.35	18.53	21.49	22.06
	New	23.27	20.21	23.23	26.09	21.36	18.53	21.49	22.06
	New - Old	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
4	Old	18.62	18.45	21.13	23.46	24.56	21.73	24.34	24.22
	New	17.08	18.01	20.98	23.36	24.55	21.71	24.29	24.18
	New - Old	-1.54	-0.44	-0.15	-0.10	-0.01	-0.02	-0.05	-0.04
5	Old	17.22	16.08	22.18	23.78	19.10	17.31	23.48	28.12
	New	15.93	15.90	22.16	23.77	19.11	17.31	23.48	28.12
	New - Old	-1.29	-0.18	-0.02	-0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
6	Old	16.64	14.57	18.07	19.33	17.49	15.64	17.59	19.32
	New	15.72	14.50	18.02	19.31	17.49	15.63	17.59	19.31
	New - Old	-0.92	-0.07	-0.05	-0.02	0.00	-0.01	0.00	-0.01
1 ~ 6	Old	19.12	18.59	22.50	24.77	21.88	19.82	22.19	23.59
	New	18.36	18.40	22.43	24.74	21.88	19.81	22.18	23.59
	New - Old	-0.76	-0.19	-0.07	-0.03	0.00	-0.01	-0.01	0.00

제 2 절 황사·연무 예측체계 개선을 위한 기반 구축

1. 황사·연무 앙상블 예측체계 시험 운영

황사와 연무의 확률예측정보를 생산하기 위해 황사·연무 앙상블 예측체계를 개발하였으며(국립기상과학원, 2018), 구축된 앙상블예측 체계의 검증 및 예보 가이던스 개발을 위해 시험 운영하였다. 이를 바탕으로 황사·연무 확률예측정보의 생산을 안정화하였다. 앙상블 모델의 편차를 보정하기 위해 앙상블 예측성 검증에 사용되는 통계적인 방법을 통해 황사 현상 예측을 위한 최적예측농도를 산출하고 평가하였다.

(1) 황사·연무 앙상블 예측체계 개요

전구 앙상블예측시스템은 기상 입력 자료에 차이가 있는 48개의 섭동 멤버로 구성되어 있으며 01 ~ 24번은 00 UTC, 25 ~ 48번은 12 UTC에 288시간 예측이 수행된다. 황사·연무 앙상블 예측체계는 전구앙상블 예측체계의 멤버들과 연동하여 초기 시각에 따라 컨트롤과 24개의 섭동 멤버를 이용해 예측을 수행한다. 초기 시각으로부터 180시간 예측을 수행하며 확률예측정보 생산을 위해 초기 시각의 12시간 이전 결과를 함께 사용하여 총 50개의 앙상블 멤버를 사용한다. 따라서 확률예측정보는 초기 시각으로부터 168시간(7일)까지 생산된다(Fig. 3.2.1). 황사·연무 앙상블 예측체계에서는 미세먼지와 황사 특보 기준이 고려된 PM_{10} 농도(150, 300, 800 $\mu g/m^3$)에 대한 발생 확률과 위험 수준 판단표에 따른 위험 수준 예측 정보를 동아시아와 남한 지역에 대하여 각각 산출한다.

전지구 앙상블 예측 시스템의 수행 주기가 12시간에서 6시간(00, 06, 12, 18 UTC)으로 변경됨에 따라 황사·연무 앙상블 예측체계의 수행 주기도 동일하게 변경하였다. 따라서 초기 시각별로 13개의 섭동 멤버를 이용해 예측을 수행한다(Table 3.2.1). 확률예측정보 생산을 위해 초기 시각 이전 6, 12, 18시간의 결과를 사용하여 총 50개의 앙상블 멤버를 사용하도록 구성하였다(Fig. 3.2.1). 한편 최대 180시간을

예측하는 앙상블 체계 수행 시 슈퍼컴퓨터 서버의 메모리 등의 문제로 모델 수행에 오류가 빈번하게 발생하였다. 따라서 최대 예측 시간을 180시간에서 90시간으로 변경하여 보다 안정적으로 모델 수행이 가능하도록 하였으며 확률예측정보는 초기 시각으로부터 72시간(3일)까지 생산된다.

Table 3.2.1. Perturbation members of each initial time.

Initial time	Perturbation member
00 UTC	00, 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12
06 UTC	00, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24
12 UTC	00, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36
18 UTC	00, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48

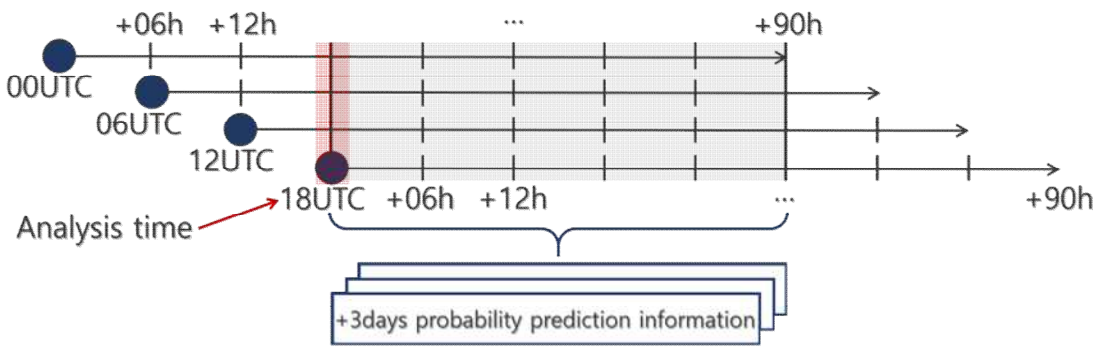


Fig. 3.2.1. Conceptual diagram of ensemble forecast system.

(2) 시험 운영 결과 평가

시험 운영을 통해 산출된 봄철 (3 ~ 5월) 예측 결과를 ROC (Receiver Operating Characterisitc) 방법으로 분석하여 황사 발생을 예측하기 위한 모델의 최적예측농도를 조사하였다. Fig. 3.2.2의 (a)는 임계값에 따른 사건 발생 예측 성능을 나타내는 ROC 분석 결과의 예시이다. 곡선 아래의 면적인 AUC (Area Under Curve)가 1에

가까울수록 예측 성능이 좋음을 나타내며, 0.5 미만인 경우는 임의 선택하는 경우보다 예측 성능이 나쁨을 의미한다. 황사 발생 탐지확률을 계산하기 위하여 분석시각 이전 20일의 관측 및 예측 PM_{10} 농도를 사용하였다. 100 ~ 500 $\mu g/m^3$ 사이의 PM_{10} 농도를 5 $\mu g/m^3$ 간격으로 조정하며 AUC가 가장 높은 200 $\mu g/m^3$을 관측기준농도로 설정하였다. 관측기준농도를 임계값으로 사용하여 AUC를 평가하였며, 또한 AUC가 최대가 되게 하는 모델의 최적예측농도를 산출하였다. Fig. 2.1.2 (b)는 AUC를 시간에 따라 분석한 결과이며 파란색 선은 관측기준농도, 빨간색 선은 각 예측 시각별로 예측 성능을 가장 좋게 하는 최적예측농도일 때의 AUC를 나타낸 것이다. 관측기준농도 단일값을 임계값으로 사용하면 AUC가 0.5 미만으로 떨어지는 경우가 발생하였다. 최적예측농도는 예측시간에 따라 변화하는 경향을 보여주며 단일값을 사용했을 때보다 예측 성능이 좋은 것으로 나타났다. 추후 기계학습을 이용하여 예측 시간에 따라 최적예측농도를 보정하는 방법이 모델 편차를 보정하기 위한 하나의 방법으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

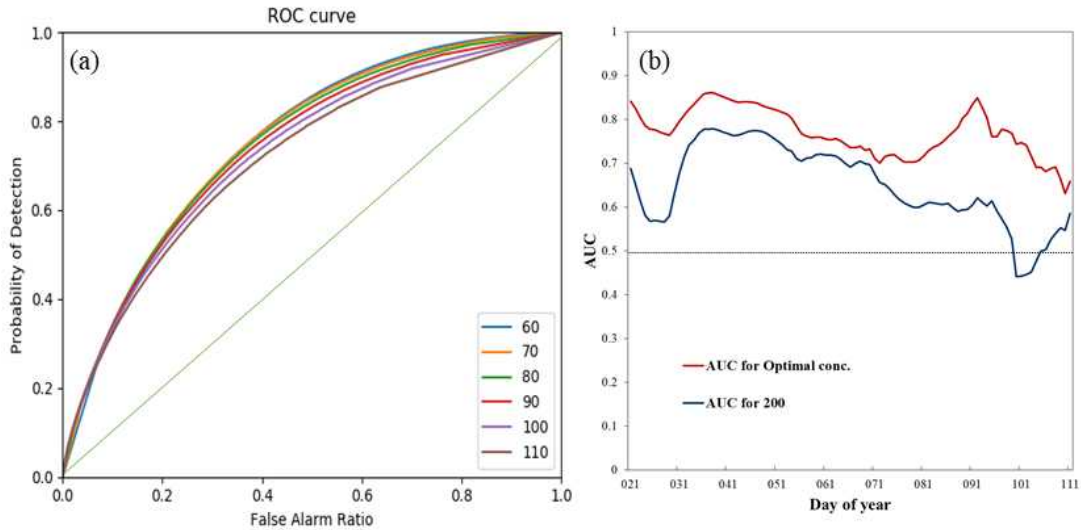


Fig. 3.2.2. (a) Analysis example of ROC and (b) AUC time series of 200 $\mu g/m^3$ and optimal concentration.

2. 앙상블 기반의 자료동화체계 개발

현업 황사·연무통합예측모델의 예측성 향상을 위해 지상관측 PM_{10} 농도와 위성관측 AOD를 최적내삽법을 활용하여 자료동화하고 있다(국립기상과학원 2017, 2018). 최적내삽법의 한계 극복 및 향후 관측자료 확대 적용을 위해 GSI (Grid-point Statistical Interpolation, Wu et al., 2002; Purser et al., 2003a, b) 시스템의 도입하고 황사·연무 앙상블 예측체계 결과를 활용하여 배경오차공분산을 산출하였다(국립기상과학원 2019). 황사·연무 앙상블 예측체계 변경에 따른 배경오차공분산 산출 방법을 변경하고, 위도와 층별로 배경오차공분산을 계산하도록 변경하고 황사·연무통합예측모델의 예측 PM_{10} 농도를 배경장으로 사용하고 지상관측 PM_{10} 농도를 자료동화할 수 있는 시험운영체계를 구축하였다.

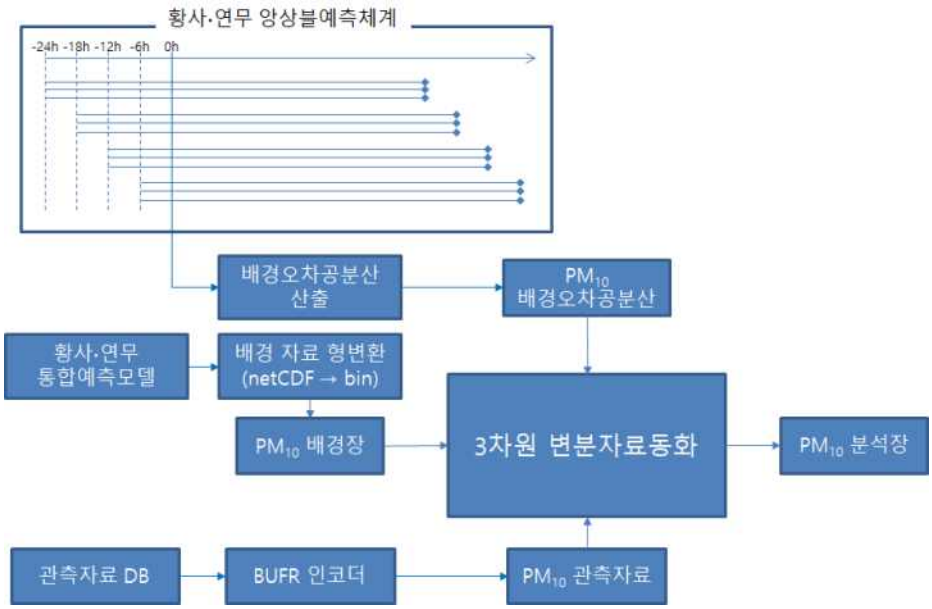


Fig. 3.2.3. Flowchart of ensemble based 3DVAR system for ADAM3.

Fig. 3.2.3은 앙상블 기반 3차원변분자료동화체계를 이용한 시험운영의 흐름도이다. 황사·연무 앙상블예측체계에서 6시간 간격으로 13개 멤버씩 최대 52개 멤버가 예측한 분석 시각의 예측 결과로부터 배경오차공분산을 산출하였다. 배경오차공분산은 5°S

~ 60°N까지 5°간격으로 13개 구간으로 나누고 모델의 각 층마다 계산하였다. Fig. 3.2.4는 2019년 12월 1일 00 UTC에 계산한 연직길이규모와 수평길이규모이다. 그림을 보면 적도 지역에서 약 110 km 정도의 수평길이규모를 가지며 북쪽으로 갈수록 낮아져서 북위 20°에서 40°사이에서 약 60 ~ 80 km 정도였다. 연직길이규모는 수평길이규모에 비해 상대적으로 작은 값을 가지고 있으며, 혼합이 일어나는 지표면 부근에서 높고, 상층으로 갈수록 낮아지는 분포를 보였으며 혼합고가 높아지는 낮에 크게 나타나고 밤에 작게 나타나는 일변화를 하였다. 이런 분포 경향은 시험운영이 시작된 11월부터 2020년 1월까지 비슷하였다.

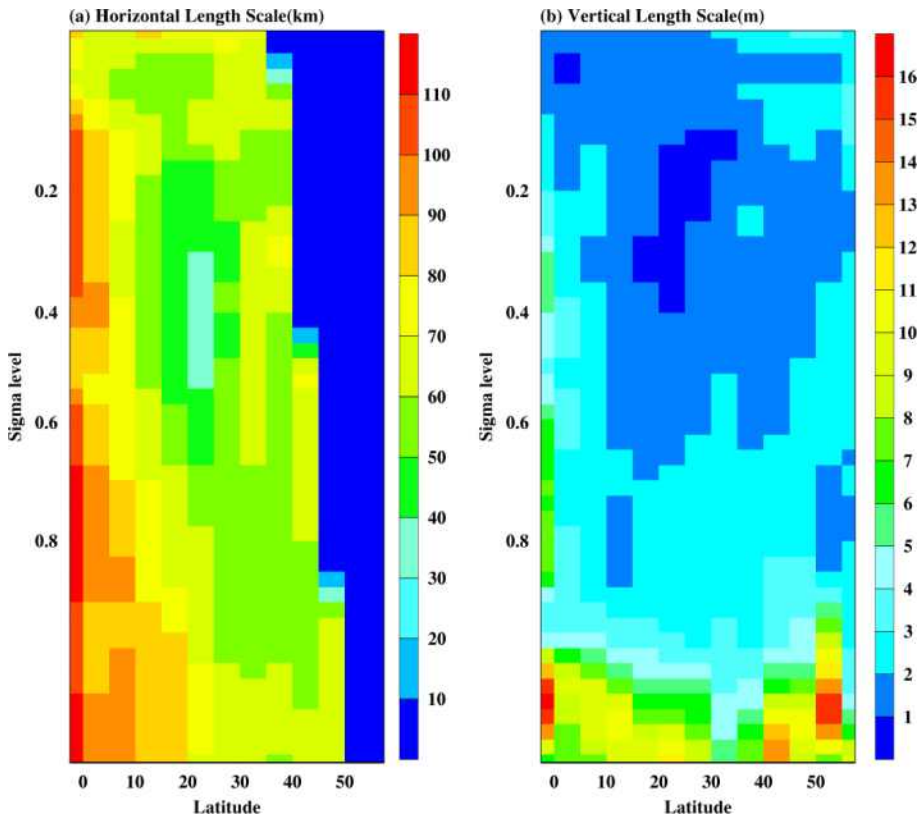


Fig. 3.2.4. (a) Horizontal length scale and (b) vertical length scale derived from the ensemble ADAM3 modeling system at December 1, 2019 00 UTC.

현업 황사·연무통합예측모델 예측 결과를 배경장으로 활용하기 위해 황사·연무통합예측모델 예측결과로부터 에어로졸 농도 관련 변수들을 추출하여 GSI 시스템

입력 자료 형식으로 변경하고 기존 지상관측 PM_{10} 농도 자료동화에 사용되던 관측 자료를 BUFR 형식으로 변경하였다. Fig. 3.2.5는 시험운영 기간에 산출된 2020년 1월 10일 06 UTC의 앙상블 기반 3차원변분자료동화와 기존 최적내삽법으로 계산된 분석증분이다. 기존 최적내삽법에서 사용한 수평상관길이가 250 km인데 반해 앙상블예측체계 결과에서 산출한 수평길이규모가 최대 110 km로 기존 수평상관길이의 절반에 못 미치고 있어 기존 최적내삽법으로 계산한 분석증분에 비해 관측자료의 영향이 공간적으로 좁게 나타났다. 그것과는 별개로 3차원변분자료동화가 전역 최소화 과정을 사용하는 반면 최적내삽법이 격자 주위 제한된 개수의 관측(50개)만을 이용하여 분석결과를 산출하기에 분석증분의 수평 분동성은 최적내삽법을 사용한 경우에 더 크게 나타났다. 또한, 분석증분의 크기도 대체로 기존 최적내삽법에 비해 적었는데, 이는 최적내삽법에서 사용한 오차특성보다 GSI 시스템 내부에서 산출된 관측오차가 크게 정의되었기 때문이다. 이런 특성은 시험운영 전 기간 동안 비슷하게 나타났다. 향후 PM_{10} 분석 증분을 모델 초기자료에 반영하는 체계를 구축하고 모델 수행을 통해 예측성능 평가를 수행하여 보다 앙상블 기반 3차원변분자료동화체계가 가지는 특성을 면밀히 분석할 예정이다.

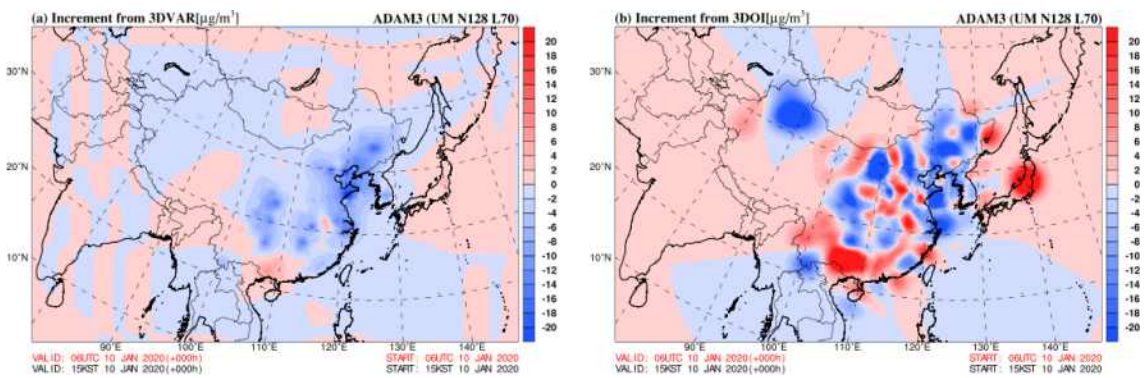


Fig. 3.2.5. PM_{10} increment from (a) 3DVAR and (b) 3DOI at lowest model level at January 10, 2020 06 UTC.

3. 라이다 관측 소산계수 자료동화를 위한 관측자료 특성 분석

황사·연무 감시 및 예측모델 개선을 위한 다양한 원격관측자료 활용 기반기술 개발이 필요함에 따라 2010년부터 황사 및 에어로졸의 연직 감시를 위한 목적으로 안면도에 설치되어 운영 중인 라이다 자료의 특성을 분석하였다. 라이다 관측자료는 황사·연무예측모델의 에어로졸 연직구조 초기장 개선을 위한 자료로 활용될 수 있다.

라이다 자료 분석을 위해 최근 3년간(2016 ~ 2018) 안면도 라이다 소산값과 지상 PM_{10} 관측자료를 사용하였다. 라이다 소산값은 한반도 에어로졸 라이다 관측 네트워크(Korea Aerosol LIDAR Observation Network, KALION)에서 산출된 값이 이용되었다. 라이다 소산값 수집률 및 계절별 특성을 살펴보고 오차 특성파악을 위한 소산값 및 지상 PM_{10} 농도와의 상관관계 분석을 수행하였다. 안면도 지상 PM_{10} 농도와의 상관 비교를 위해 라이다 소산값은 최하층 지상(50 ~ 200m) 값을 평균하여 사용하였다.

Fig. 3.2.6은 계절별 평균 소산값을 나타낸 것으로 계절별, 시간별 분포패턴에 차이가 있음을 알 수 있다. 봄철은 2 km 이하 고도에서 일정한 수준의 강도가 분포하고 여름철은 봄철보다 낮은 고도에서 일정한 수준의 강도가 분포하며 낮 시간대에 소산값 강도가 뚜렷해지는 특성을 보인다. 가을은 1km 이하 고도에서 가장 높은값이 분포하고 연직 층별로 소산값 분포 계층이 보다 뚜렷하게 나타난다. 겨울은 1.5 km 이하 고도에서 가장 높은 소산값 영역이 분포하나 주변 공간으로 퍼진 형태를 보인다.

Fig. 3.2.7은 라이다 소산값 수집률을 나타낸 것이다. KALION 표준 알고리즘에는 2 km 이하고도 구름 존재 시 소산값을 산출하지 않는다. 안면도 라이다 소산값 수집률은 전체기간 동안 0.32로서 가을이 0.37로 가장 높고, 겨울이 0.28로 가장 낮은 수준으로 나타났다.

Fig. 3.2.8에 최하층(50 ~ 200 m) 라이다 소산값 및 지상 PM_{10} 상관분석 결과를 나타내었다. 전체 상관계수는 0.48로 나타났고 계절별 상관계수는 가을에 0.69로 가장 높고, 겨울, 봄, 여름에 각각 0.59, 0.32, 0.33으로 나타났다.

a)
spring

b)
summer

c)
autumn

d)
winter

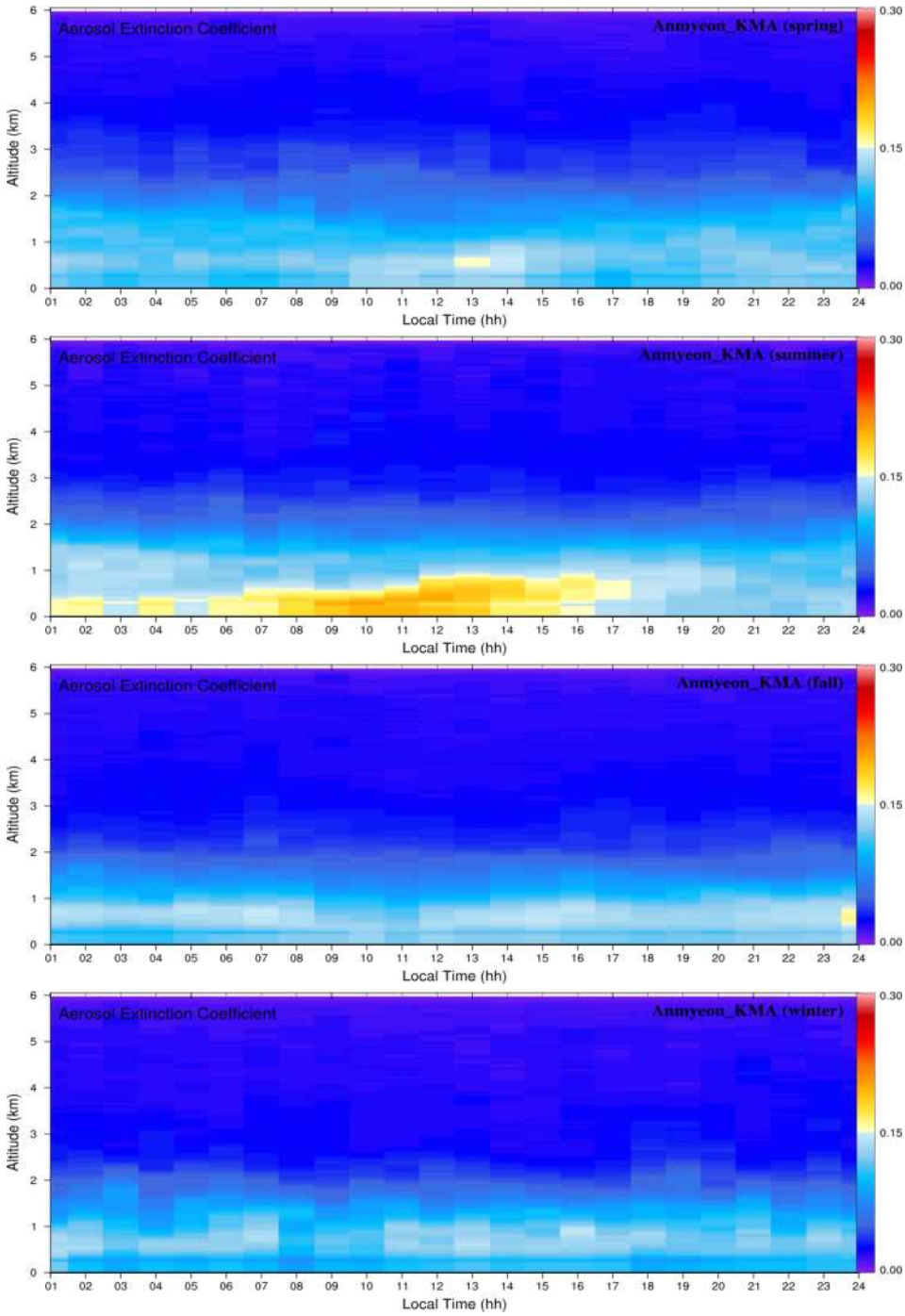


Fig. 3.2.6. Seasonal mean extinction coefficient of lidar at Anmyeondo.

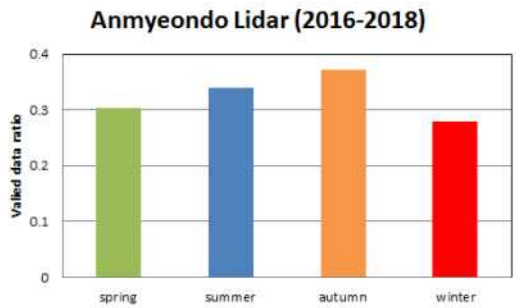
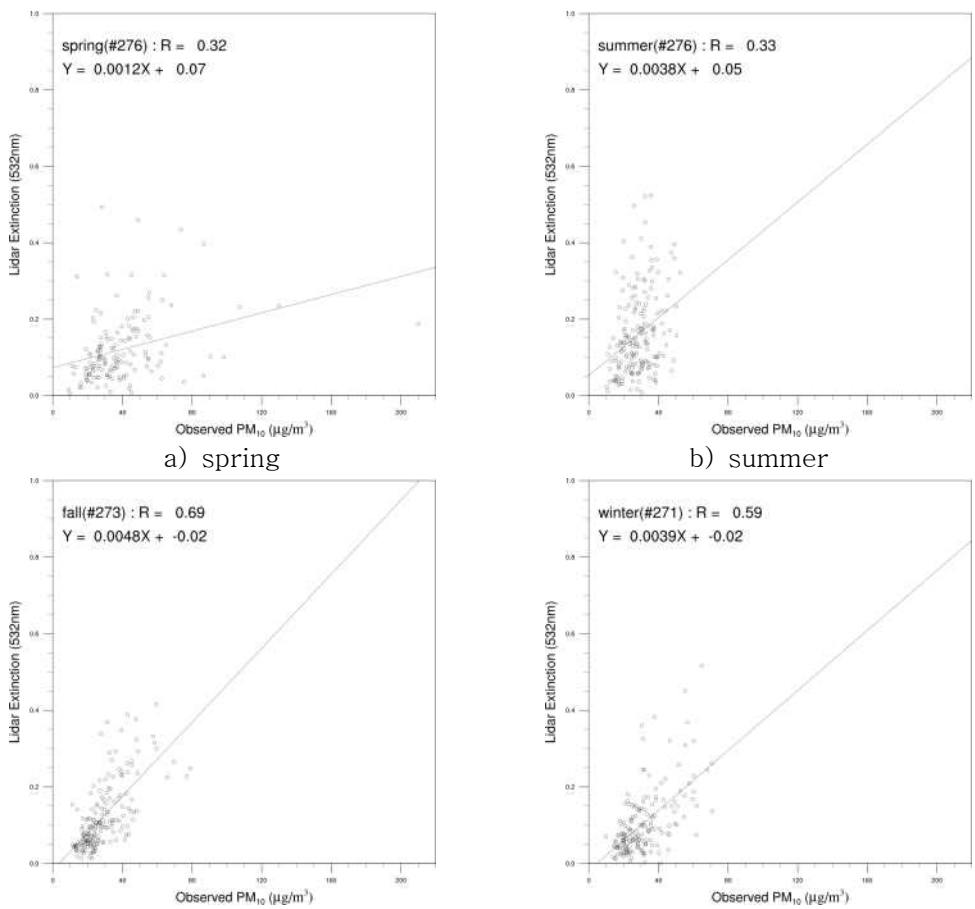


Fig. 3.2.7. Valid data ratio of lidar extinction coefficient at Anmyeondo.



a) spring b) summer

c) autumn d) winter

Fig. 3.2.8. Seasonal scatter plot of lidar extinction coefficient with surface PM_{10} concentration.

제 3 절 차세대 예측 모델 운영을 위한 기반 구축

1. 황사·연무통합예측모델의 한국형수치예보모델 연동 체계 개발

기상청은 2011년부터 한국형 수치예보모델(Korea Integrated Model, KIM)을 개발했으며 2019년 4월부터 전지구 준현업 시스템을 구축하여 운영하고 있다. 2020년에 예정된 KIM의 현업 운영 일정에 따라 KIM과 황사·연무통합예측모델(Asian Dust Aerosol Model 3, ADAM3)을 연동하는 체계를 개발하고 황사 사례 실험을 통해 성능을 평가하였다.

(1) 한국형 수치예보모델 연동 체계

KIM의 해상도는 수평으로 12 km, 연직으로 91층이며 자료동화 기법으로는 Hybrid-4DEnVar을 사용한다. 모델 수행 주기는 12시간(00, 12 UTC)이고 최대 예측 시간은 243시간이다. KIM은 통합모델(Unified Model, UM)과 달리 지면 근처에서 지형을 따르는 시그마 좌표계를 사용하고 일정 고도 이상에서는 다른 좌표계를 사용하는 하이브리드 좌표계(Hybrid sigma coordinate system)를 사용한다. KIM 예측 결과를 화학수송모델(Community Multiscale Air Quality Model, CMAQ)의 입력 자료로 사용하기 위해 좌표계 변환과 CMAQ 입력 자료 형식에 맞는 기상 입력 자료가 필요하다. 하이브리드 좌표계를 3차원 위경도 좌표계로 변환하는 과정은 remapper 프로그램을 사용하였다. 그리고 수치예보모델에서 생산된 기상장 예측 결과를 CMAQ의 입력 자료 형태로 만들기 위해 KIM-MCIP 프로그램을 개발하였다. UM과 KIM은 모델 연직 해상도가 다르기 때문에 KIM-MCIP에서 연직 내삽 과정을 거쳐 UM과 동일하게 49층으로 변환하도록 하였다. 모델 수행 체계는 현업으로 운영 중인 UM과 연동하는 ADAM3에서 산출된 배출량과 모델 초기 입력장을 사용하고 기상 입력 자료만 KIM 결과를 사용하도록 구성되어 있다. 수행 주기는 6시간(00, 06, 12, 18 UTC)이며 초기 시각으로부터 72시간(3일)까지 예측을 수행한다.

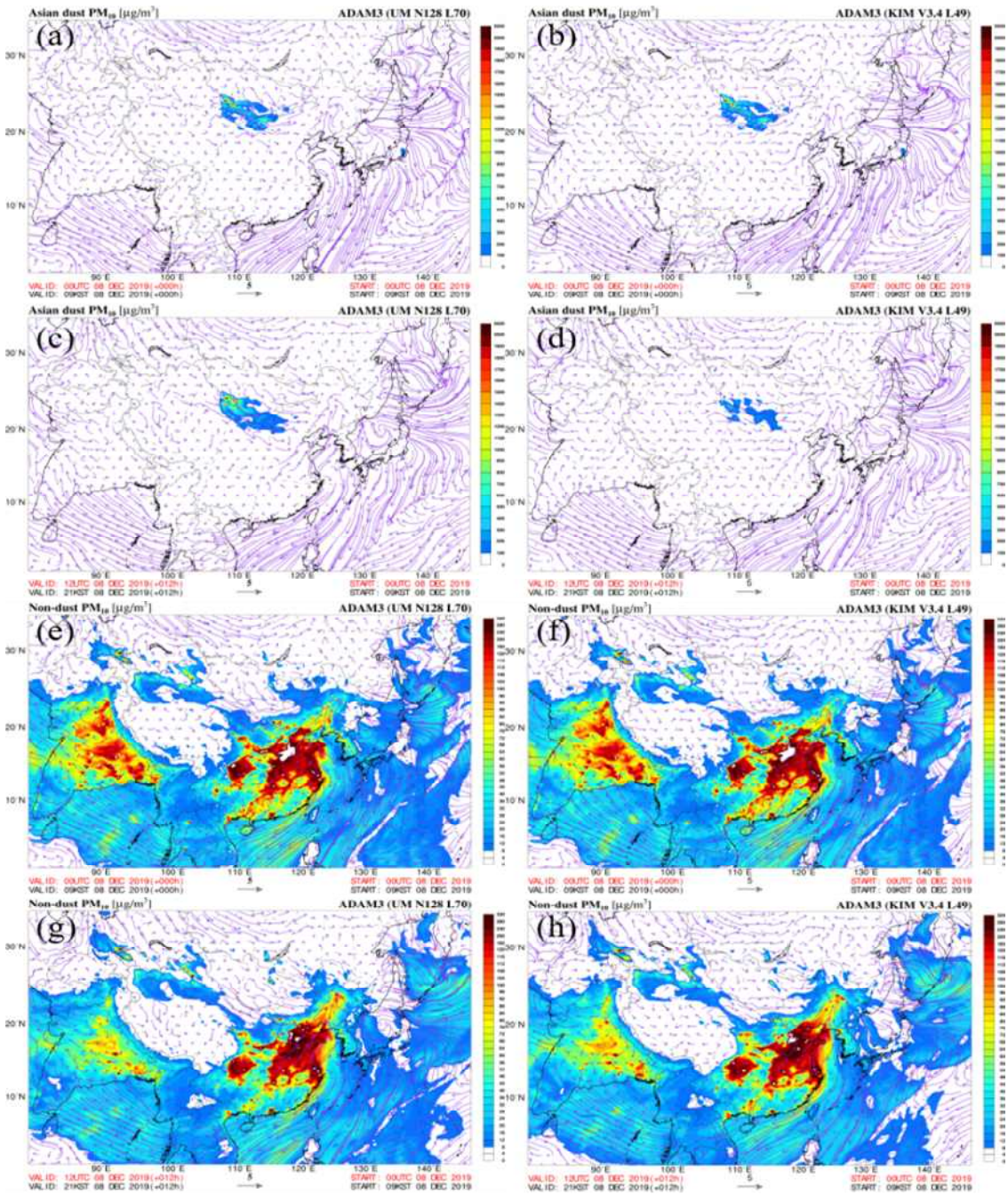


Fig. 3.3.1. Forecasted dust and non-dust PM_{10} concentration of UM-ADAM3 (a, c, e, g) and KIM-ADAM3 (b, d, f, h) at 09 KST, 21 KST December 8, 2019.

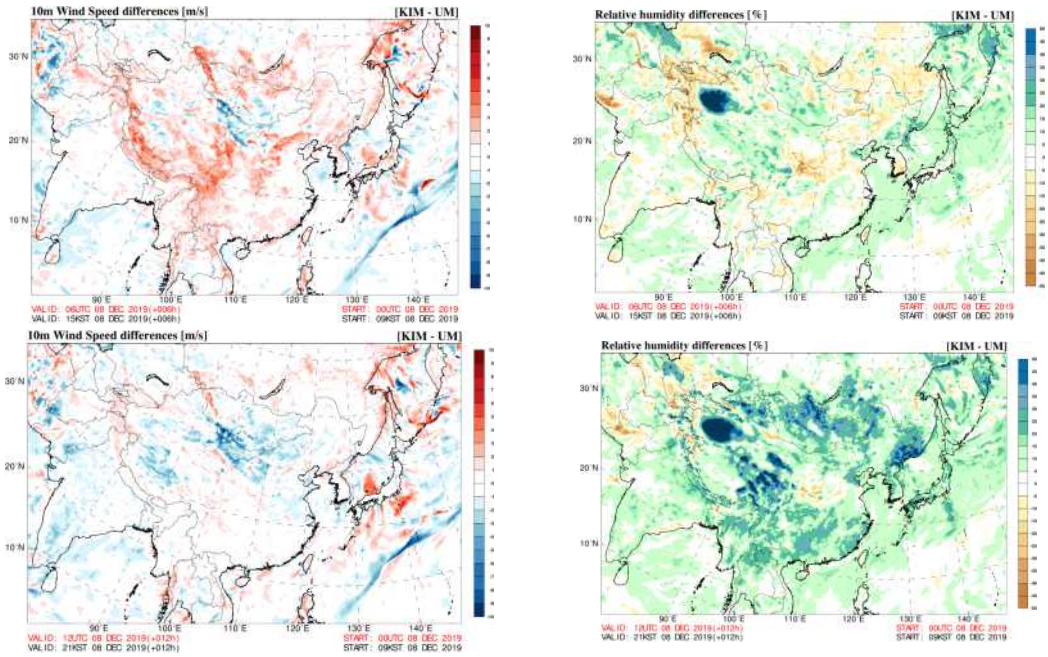


Fig. 3.3.2. Differences of 10 m wind speed and relative humidity between KIM and UM at East Asia region in daytime and nighttime.

(2) 사례 실험 결과 비교

UM과 KIM을 각각 연동한 결과를 비교 분석하기 위해 2019년 12월 8일(00 UTC)의 황사 사례에 대한 72시간 모델 수행 결과를 비교하였다. Fig. 3.1.1은 09 KST, 21 KST의 황사, 비황사 예측 결과를 보여준다. KIM 기상 입력 자료를 사용하는 경우, 황사 PM_{10}의 확산 경향을 잘 예측하고 있으나 발원량은 적게 예측하였다. 이는 각 수치 모델에서 모의된 발원 지역의 기상장 차이에 기인한 것으로, Fig. 3.1.2에 제시된 결과에서 KIM과 UM의 10 m 풍속 및 상대습도 차이에서 발원지 부근의 풍속을 약하게 모의 하는 것으로 나타났다. 상대습도의 경우 낮과 밤의 일변화는 잘 모의하지만 발원지 부근에서는 대체로 낮게 모의하였다. 비황사 PM_{10}의 경우 UM 기상장을 사용했을 때와 유사하게 농도와 확산 패턴을 모의하였다. 추후에는 겨울철(12 ~ 1월)의 시험 운영 결과를 바탕으로 UM과 KIM의 기상장에 대한 상세

비교 분석과 예측성 평가를 수행하고자 한다. 또한, 현업에 적용 가능 하도록 모델 수행 체계를 보완하고자 한다.

2. 대기-환경 양방향 예측모델(AQUM)의 기상 예측성 평가

에어로졸이 기상에 미치는 영향을 평가하고 수치모델 개발 방안을 모색하기 위해 통합모델 기반의 대기-환경 양방향 모델을 도입하고 수행체계를 구축하였으며(국립기상과학원, 2018), 사례 실험을 통해 에어로졸이 기상 요소의 예측성에 미치는 영향을 분석하였다. 보다 안정적이고 정량적인 비교 결과를 산출하기 위해 2017년 12월 26일부터 2018년 3월 7일까지 시험운영한 결과를 바탕으로 에어로졸의 복사 영향 여부에 따른 모델 예측성 변화를 분석하였다. 사용한 AQUM의 수행체계 구성은 Table 3.3.1과 같다. 에어로졸의 복사 영향 옵션을 켠 실험(CTL)을 기준으로 2017년 12월 26일 00 UTC부터 2018년 3월 7일까지 24시간 간격으로 연속 실험 후 같은 초기자료를 이용하여 복사 영향 옵션을 끈 실험(EXP)을 수행하였다.

Table 3.3.1. Operational configuration of AQUM in KMA.

Model	UM with CLASSIC and UKCA	
Domain	East Asia region	same as RDAPS
Resolutions	12 km / 38 layers (0-40 km)	
Lateral boundary condition	GDAPS output	Meteorological fields
	ADAM3 output	Environmental fields
Initial condition	- Prior model output - GDAPS output	Meteorological fields
	- Prior model output - Monthly climatology	Environmental fields
Emission input data	MICS-Asia	
Maximum foreacast time	72 hours (3 days)	
Initial time	00 UTC	
Operation tool	ROSE/CYLC	Operational management tool

모델 수행 결과는 지상 관측 풍속, 온도를 국내 지상 관측 지점 95개소에서 비교하였다. Table 3.3.2는 95개소 관측 지점 중 대표 지점 16개 지점에서 계산한 편차와 평균제곱근오차와 95개소 평균값이다. 10 m 풍속의 경우 에어로졸 복사 영향 옵션 유모에 따라 유의미한 예측성 개선을 보이지 않았다. 이에 반해 기온의 경우 검증에 사용한 95개소 중 편차의 경우 71개소, 평균제곱근오차의 경우 70개소에서 에어로졸 복사 영향 옵션이 사용하지 않은 실험(CTL)보다 옵션을 사용한 실험(EXP)에서 예측성 개선 효과가 나타났으며, 95개소 전체 평균 약 10%의 편차와 평균제곱근오차 개선 효과를 보였다.

Table 3.3.2. BIAS and RMSE of 10 m wind speed and surface air temperature from CTL and EXP.

	BIAS				RMSE			
	10 m wind spead		surface air temperature		10 m wind spead		surface air temperature	
	CTL	EXP	CTL	EXP	CTL	EXP	CTL	EXP
Chuncheon	1.27	1.20	-2.87	-2.11	1.83	1.82	3.76	3.26
Gangneung	0.82	0.53	-4.68	-4.75	2.11	1.98	5.01	4.96
Seoul	0.95	0.97	-2.70	-2.27	1.64	1.67	3.03	2.59
Incheon	1.68	2.00	-1.80	-0.94	2.58	2.89	2.77	1.66
Chungju	1.47	1.72	-2.33	-1.66	2.01	2.26	3.12	2.72
Daejeon	1.48	1.50	-2.80	-2.28	2.07	2.05	3.32	2.78
Andong	1.53	1.48	-3.02	-2.80	2.05	1.99	3.57	3.22
Daegu	0.75	0.58	-3.81	-4.00	1.56	1.46	4.23	4.31
Jeonju	1.20	1.24	-3.04	-2.53	1.86	1.85	3.40	2.81
Ulsan	1.77	1.93	-3.91	-3.97	2.57	2.60	4.21	4.23
Changwon	2.27	2.26	-2.41	-2.54	2.92	2.67	2.82	2.88
Gwangju	1.74	1.74	-3.29	-3.06	2.47	2.44	3.66	3.37
Busan	1.96	2.14	-1.90	-1.80	3.06	2.97	2.74	2.61
Mokpo	2.91	3.21	-0.72	-0.04	3.78	3.98	2.70	1.89
Hongseong	1.91	1.86	-1.82	-1.49	2.56	2.53	2.79	2.33
Jeju	3.06	2.99	-2.53	-2.52	3.70	3.52	2.84	2.76
Average(95 stations)	1.79	1.80	-2.38	-2.14	2.62	2.63	3.58	3.20

제 4 절 위험물질 확산 대비 비상대응 지원체계 개선

1. 고해상도 위험물질 확산예측체계 구축

국립기상과학원은 동아시아 지역의 화산 폭발, 원전 사고 또는 핵실험 등으로 인한 위험물질(화산재 및 방사성물질)의 확산이 일어날 경우를 대비해 확산예측모델을 이용하여 2018년까지 비상대응 체계를 구축·운영해 왔다. 2019년에는 국내에서 발생 가능한 방사성물질 확산과 관련한 비상대응을 위해 고해상도의 기상예측자료를 이용하여 한반도 지역의 상세한 확산예측정보 생산체계를 구축하였다.

확산예측모델은 미국 국립해양대기청(NOAA)에서 개발한 HYSPLIT(revision 976)을 사용하였고, 모델에 입력되는 고해상도 기상예측자료는 영국기상청의 수치예보모델(UM N128) 기반의 국지예보모델(LDAPS) 예측결과를 HYSPLIT 모델의 기상입력자료 형식으로 변환하여 사용하였다. HYSPLIT 모델에 사용되는 기상자료는 Table. 3.4.1과 같다.

Table. 3.4.1. Meteorological input data used in HYSPLIT.

Item	Description
Horizontal resolution	1.5km (519 × 738)
Vertical resolution	61 layers (including surface layer)
Map projection	Lambert Conformal conic projection
Upper level parameters	Pressure, U/V/W-wind component, Temperature, Specific humidity
Surface level parameters	Pressure at Surface, Surface sensible heat flux, Latent heat net flux, Planetary boundary layer height, 10M U/V-wind component, Surface height, 1-Hour accumulated precipitation

방사성물질에 관한 HYSPLIT 모델 설정은 다음과 같다. I2-131과 Cs-137은 원전 사고 대응을 위해 지상 0 ~ 100 m에서 방출되도록 설정하였고, Xe-133은 핵실험

중 발생하지만 자연 상태에서는 거의 발견되지 않아 핵실험의 증거로 쓰이기 때문에 지하 핵실험을 대비하여 지표면(고도 0m)에서 방출되는 것으로 설정했다. 원전 사고와 핵실험 모두 정량적인 방출량은 알 수 없어 단위 방출량($1Bq \cdot hour^{-1}$)을 사용했다. 모델계산영역과 결과표출영역은 위도 32.8°N ~ 43.0°N, 경도 121.8°E ~ 130.9°E 범위이다.

확산예측모델은 비상상황에 신속히 대응할 수 있도록 웹기반으로 구축되었다. 그림 3.4.1은 입력화면(좌측)과 예측결과화면(우측)이다. 웹페이지에서 기본정보만 입력하면 확산예측결과를 보여준다. 기본입력자료는 방사성물질의 종류, 방출지점의 위경도, 방출시각, 방출기간, 표출농도장의 높이, 총 예측기간이다. 지도상의 빨간점을 선택하면 그 지점의 위경도와 현재시간 기준으로 방출시각이 자동 입력된다. 웹에서 모델을 수행하면 수분 이내에 입력시 선택한 표출농도장 높이 사이의 1시간 간격 평균 방사성물질 농도와 누적침적량을 볼 수 있다.

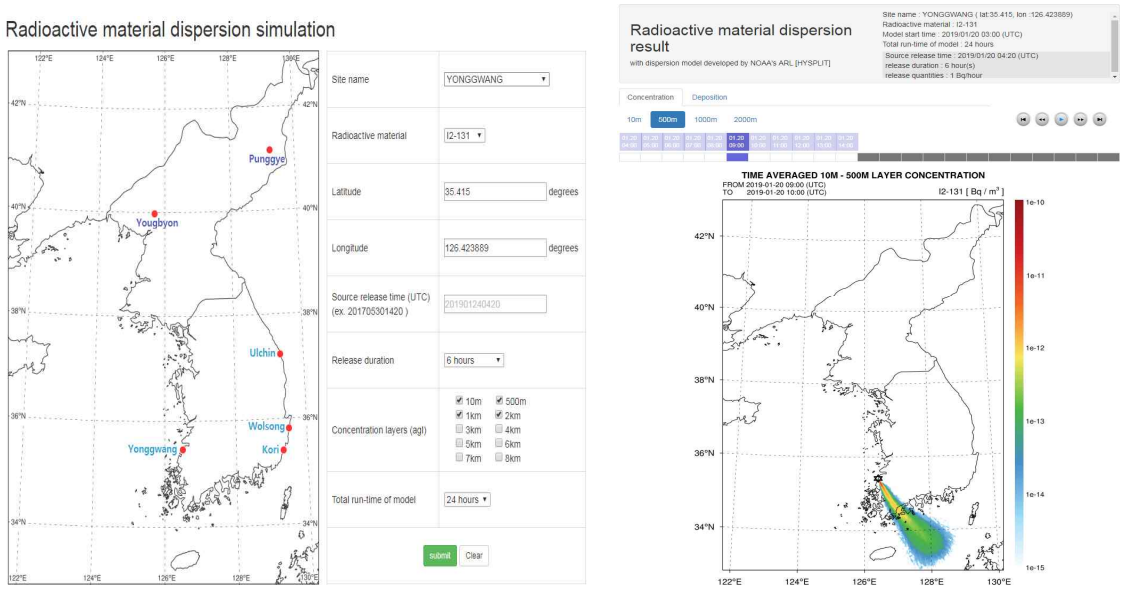


Fig. 3.4.1. Example of web-based input screen for radioactive material (left) and result of dispersion forecast using HYSPLIT model (right).

제 4 장 한반도 대기조성물질 장기변화 특성 연구

제 1 절 환경기상 관측자료 품질관리기술 개발

1. 온실·반응가스 최신 관측기술 적용연구

아산화질소(N_2O, Nitro Oxide)는 온실가스 중 3번째로 중요한 관측요소로 기후변화와 성층권오존파괴 메카니즘에 깊게 관여하고 있다(Crutzen, 1970, Prather et al., 2012, Myhre et al., 2013). 일산화탄소(CO, Carbon Monoxide)는 대기 내 화학반응을 통해 온실가스인 CO_2, CH_4, O_3의 수명이 변하게 되므로써 궁극적으로 기후변화에 관여하고 있다. 이러한 화학반응과 관련된 간접적인 강제력은 0.23 [0.16 ~ 0.3] $W \cdot m^{-2}$로 추정된다(IPCC, 2013).

현재 국가 혹은 지역별 bottom-up 방식의 인벤토리를 검증하기 위한 방법으로 논의되고 있는 Top-down 모델 개발을 위해서는 대기 중 온실가스 혹은 반응가스의 정확한 관측과 정밀한 관측망은 필수적이다(Saikawa et al., 2014, Wells et al., 2018).

N_2O는 전통적으로 가스크로마토그래프의 전자유도검출기(GC-μECD, Gas Chromatography-Electro Detector)를 통해 관측되어왔다. GC-μECD는 비교적 저렴한 장비로 사용자가 원하는 방식대로 조립이 가능하다는 장점이 있는 반면, 표류오차(drift)가 심해 잦은 검교정이 필요하며, 시료의 분석시간이 4 ~ 6분이 걸려 많은 자료를 얻을 수 없는 단점이 보고되어 왔다. 일산화탄소는 비분산적외선(NDIR, Non-dispersive infrared) 흡수법이 경제적이고 일반적이지만 검출한계가 높아 도심지와 같은 고농도 지역에서 측정하는데 적합하다. 검출한계가 낮은 측정법에는 GC-FID나 GC-HgO 등이 있으나 연속적으로 측정하기가 어렵다.

최근 이러한 단점을 보완하는 장비가 개발되어 왔으며, 그 중 하나가 공진출력분광기(OA-ICOS, Off-axis integrated cavity output spectroscopy)이다. 공진출력분광기의 원리는 진공상태인 공동으로부터 실시간 투과되는 신호의 직접적인 세기의 감소를 통해 대상 기체의 특정 파장에서 흡수도를 획득하는 기법이다. 본 연구에서

사용된 ICOS는 4.6 μm 영역대의 튜너블 레이저와 408 mL의 공동이 장착된 Los Gatos의 EP-40 모델이다. 2017년에 WCC-Empa에서 온실가스와 반응가스의 적합성 평가를 받았을 때 ICOS, GC-μECD와 NDIR은 다양한 농도의 WMO scale의 표준가스를 분석하여 비교하였다. 그 결과 N_2O와 CO의 두 항목 모두 GC-μECD와 NDIR에 비해 ICOS 분석값이 더 좋은 결과를 보였으며 대부분이 WMO 호환성 범위 내에 있었다(WCC-Empa Report 17/1, 2018).

최신 관측기술인 ICOS를 주요 관측장비로 사용하기 위하여 현장에 적합한 검교정 방법 및 유지 관리법을 찾고자 고산 기후변화감시소에서 GC-μECD와 NDIR와 비교실험을 수행하였다. 본 연구는 GC는 Back-flush 법으로 1시간에 3개의 관측자료를 얻을 수 있으며, ICOS의 경우 10초 단위로 값이 생산된다. 표준가스는 WMO-X2006A 척도를 사용하였다.

1.1 N_2O 장비의 비교실험

각 장비에 대해 여러 농도대의 표준가스를 주입하였을 때 기기 반응값과의 상관관계를 통해 장비의 선형성을 테스트 하였다. 이 때 표준가스 1시간, 타겟가스(드리프트 보정용) 1시간 씩을 교체 주입하였다.

그간 GC-μECD의 비선형적 특성으로 그 관측불확도가 높다고 보고되어왔다. 실제 이번 실험에서도 선형성 실험을 한 결과 대기 중 농도 수준인 330~335 ppb에서 농도의 비선형성이 심한 것을 확인 할 수 있었다(Figure 4.1.1(a)).

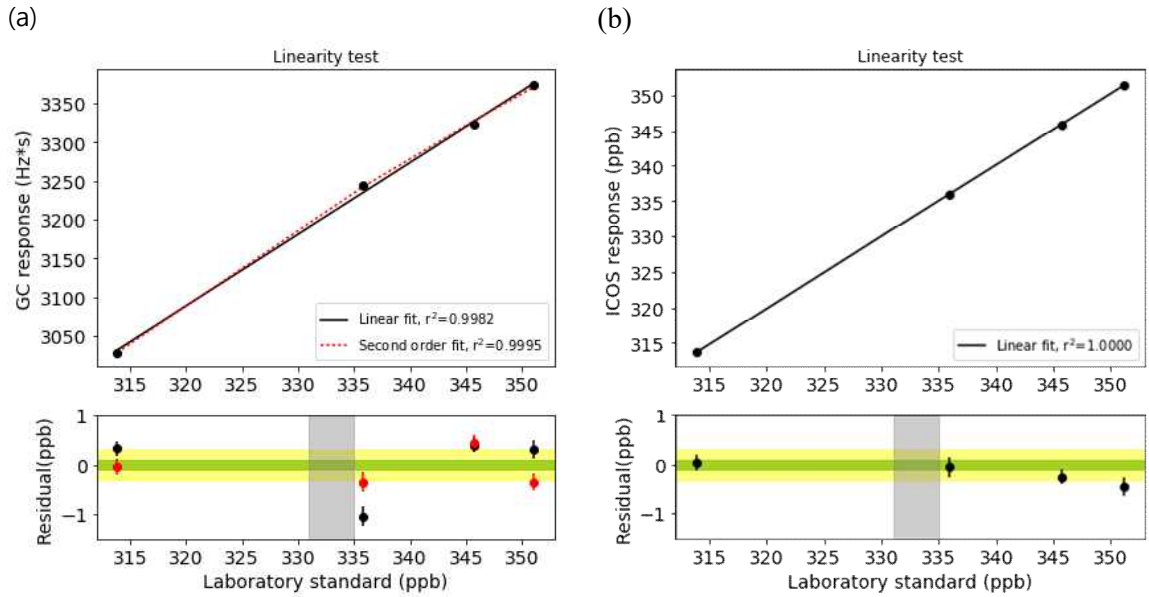


Fig 4.1.1. The Linearity test of (a) GC-μECD and (b) ICOS for N_2O. X-axis is standard tank and y-axis the instrument response (top). The residuals indicate the difference between theoretical value and observed value (bottom). The black line represents the linear function and the dots are the residuals between theoretical value from the linear function and observed values. The red lines and dots are derived from secondary polynomial formula. The compatibility goal (±0.1 ppb) and extended compatibility goal (±0.3 ppb) were shaded.

반면 OA-ICOS는 선형성을 나타냈다. 다만, 농도가 높이 올라갈수록 WMO에서 기준한 허용범위(Compatibility goal)에서 멀어져 검교정 시 목적하는 농도대의 표준가스를 사용하는 것이 중요함을 밝혔다. 이는 제로에어(zero air, N_2+O_2+Ar 혼합) 주입실험에서도 같은 결과를 보였다. 본래 OA-ICOS는 공동의 상태를 '0' 점으로 잡는 1차 선형식을 알고리즘으로 가지고 있으나, 제로에어를 주입했을 때 1~2 ppb 의 값을 보여, 실제 가스가 주입되었을 때 일부 간섭이 있을 수 있음을 나타냈다. 따라서 y=ax 의 수식보다는 y=ax+b 의 선형성을 보이며, 분석하고자 하는 농도대를 명확히 하는 것이 검교정 시 중요하다.

장비의 반복성은 같은 표준가스가 1시간동안 주입되었을 때 나타내는 표준편차로 산정하였으며, 각 표준편차의 평균을 구하기 위해 합동표준편차(pooled standard deviation)을 대입하여 구하였다 (Lee et al., 2019). GC-μECD는 이미 WMO의 허용범위(±0.1)를 초과한 ±0.26 ppb를 나타냈으며, ICOS는 그 값보다는 안정된 ±0.03 ppb를 보였다. 따라서 한 시간내에도 GC-μECD는 표류오차가 큰 값으로 존재함을 나타냈다(Table 4.1.1).

장비의 재현성은 짧은 기간의 재현성(S-reproducibility)과 긴 기간의 재현성(L-reproducibility)으로 구분하였다. S-reproducibility는 표준가스를 1시간 주입한 후 7시간 후에 다시 같은 표준가스를 주입하여 그 값의 차이를 확인하였다. 이 실험은 1회만 실행하였다.

Table 4.1.1. The repeatability, short-term and long-term reproducibility assessment by ICOS and GC-μECD. Unit is ppb.

Analyzer	Repeatability (1σ in an hour)	S-reproducibility (7 hours)	L- reproducibility				
			Month	Initial Level	+7 day	+ 14 day	+ 21day
ICOS	±0.03 (0.02-0.04)	+0.07	Mar.	351.09	-0.5	-0.1	+1.1
				0	-0.2	-0.1	-0.02
			Dec.	351.09	-0.5	-0.4	-0.5
				0	-0.1	-0.1	-0.4
GC-μECD	±0.26 (0.20-0.36)	+1.9					

이 때 ICOS는 7시간 후 차이값이 호환성 범위 ±0.1 ppb 내에 있었으나, GC-μECD는 1.9 ppb가 증가하면서 호환성 범위를 벗어났다 (Table 4.1.1). 따라서 GC-μECD는 매시간 drift를 보정해주어야 하는 기존 연구와 같은 결과를 보였다. ICOS에 대해서만 교정 주기를 결정하기 위한 L-reproducibility를 측정하는 실험을 시행하였다. 1주일마다 가장 저농도인 zero air와 가장 고농도인 351.09 ppb를 한 시간동안 주입하여, 그 값의 차이값을 측정하였다. 이 실험은 3월에 1회 12월에 1회를 실행하였다. 본 실험 결과 저농도 영역에서는 대부분 14일간은 그 차이값이 WMO 확장 허용범위(±0.3 ppb)에 있었으나, 고농도의 경우 7일 후에는 WMO의 확장 허용범위 마저 벗어

났다(Table 4.1.1). 따라서 ICOS는 1주일 이내에 교정을 해 주는 것이 고품질의 자료 산출에 필 수 적이다.

1.2 CO 장비의 비교실험

본 연구를 통해 현장에 적합한 ICOS의 검교정 및 유지관리법을 찾고, 동시에 NDIR의 관측조건을 개선하여 지속적으로 활용하고자 한다. ICOS의 경우 장비 개발 단계에서 CO의 제로값을 확인한 후 CO 농도가 30 ~ 40 ppb 이하에서는 작동하지 않도록 하였다. ICOS로 측정한 CO의 선형성이 매우 좋으므로, 제로값 확인없이 1개의 표준가스로 교정이 가능하다.

NDIR 측정법은 전세계적으로 널리 사용되고 있으나, 검출한계가 높고 수분의 영향을 많이 받는 단점이 있다. 수분의 영향을 줄이기 위해 고산 기후변화감시소에서는 2018년부터 NDIR에 온실가스와 같이 냉동제습기를 통과한 건조공기를 연속적으로 주입하여 관측하고 있다. 검출한계를 낮추기 위해서는 교정에 사용하는 제로가스의 품질이 매우 중요하다. NDIR로 제로가스 공급기(Zero Air Supply)를 통한 제로가스, 제로가스(실린더), Sofnocat으로 CO를 필터링한 제로가스를 분석하여 그 결과를 비교하였다. 제로가스 공급기는 CO를 포함하여 O_3, NOx, SO_2 와 같은 대기환경 기준물질을 측정하는 장비를 교정할 때 일반적으로 사용하는 장비이다. 실험실 공기를 콤프레샤를 통해 높은 유량과 압력으로 압축한 후 300℃이상의 오븐을 통과한 CO를 스크러버로 제거하므로써 제로가스를 생산한다. 이 때 실험실 내부공기를 필터링하는 과정에서 수분은 완전하게 제거되지 않는다. 실린더형 제로가스는 가스실린더 내부에 CO가 없고 N_2와 O_2의 비율이 자연대기 조성과 유사하게 합성된 건조공기이다. WCC-Empa에서는 Sofnocat으로 촉매반응을 통해 CO를 산화하여 제거한 제로가스의 사용을 권하고 있다.

세 종류의 제로가스를 각 30분간 분석하였고, 안정화된 마지막 10분의 평균값과 표준편차를 보면 Sofnocat을 사용한 제로가스의 평균값이 1.3 ppb로 제로가 가깝고, 표준편차도 3.2 ppb로 가장 적었다(Table 4.1.2).

Table 4.1.2. Mean and standard deviation of zero gas by NDIR.

(unit: ppb)

Zero gas	NDIR	
	Mean	S.D.
Zero Air Supplier(not dry air)	21.6	7.1
Cylinder	13.9	3.3
Zero air using Sofnocat	1.3	3.2

이 실험 이후 NDIR의 영점 교정은 Sofnocat을 통과한 제로가스를 사용하였다. 고산에서 CO는 기류에 따라 수십 ppb에서 수백 ppb까지 다양한 농도대로 관측되고 있어 관측범위 내 다양한 농도의 표준가스를 NDIR과 ICOS로 분석하여 장비의 선형성을 확인하였다. 선형성 확인에 사용한 표준가스 농도는 100.5, 102.4, 109.2, 207.9, 465.2 ppb 이다. 표준가스 분석결과 NDIR은 비선형성이 뚜렷하였다(그림 4.1.2)

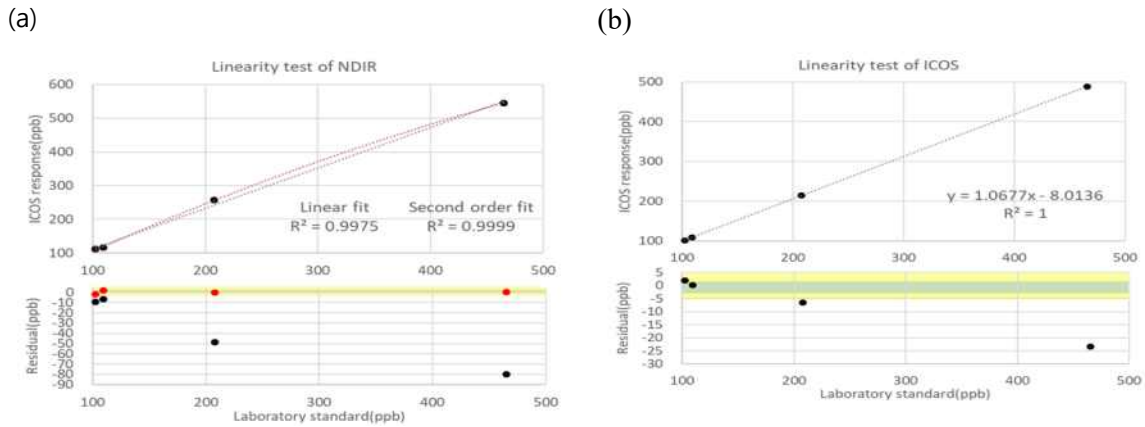


Fig 4.1.2. The Linearity test of (a) NDIR and (b) ICOS for CO. X-axis is standard tank and y-axis the instrument response (top). The residuals indicate the difference between theoretical value and observed value (bottom). The black line represents the linear function and the dots are the residuals between theoretical value from the linear function and observed values. The red lines and dots are derived from secondary polynomial formula. The compatibility goal (±2 ppb) and extended compatibility goal (±5 ppb) were shaded.

표준가스 농도(x축)와 NDIR 분석값(y축)을 2차 곡선으로 피팅하였을 때 표준가스 농도와 NDIR 분석값의 차이가 WMO에서 권장하는 허용범위 내였다. NDIR은 지금까지 2점(zero, span) 교정하여 장비에 내재된 설정 방식에 따라 구해진 선형식을 통해 자료를 생산하였다. 그러나 이 실험을 통해 sofnocat을 이용한 제로값 설정 후 3점 이상의 다양한 농도대의 표준가스를 분석한 후 2차 곡선으로 피팅한 교정곡선을 사용하여 분석값을 계산하면 더 정확한 관측농도를 얻을 수 있다.

ICOS의 표준가스 분석값들은 선형성이 좋았으나, 장비에 내재된 설정방식에 따라 구해진 분석값보다 분석값의 1차 선형식을 사용하였을 때 더 정확한 농도를 보였다.

ICOS의 안정성을 확인하고 검교정 주기를 정하기 위하여 반복성(repeatability)과 재현성(reproducibility) 실험을 하였다. 반복성은 표준가스를 1시간 동안 분석한 자료를 분단위로 평균을 낸 후 그 표준편차로 나타내었다. 재현성은 장비의 조건을 바꾸지 않고 같은 표준가스를 일정 시간 간격으로 분석한 값의 변화로 나타내었다. 이때 7시간 뒤의 분석값으로 단기 변동성(S-reproducibility)을 확인하고, 7일 간격으로 분석한 값으로 장기 변동성(L-reproducibility)을 확인하였다(표4.1.3.)

Table 4.1.3. The repeatability, short-term and long-term reproducibility assessment by ICOS and GC-μECD.

(unit: ppb)

Analyzer	Repeatability (1σ in an hour)	S-reproducibility (7 hours)	L-reproducibility					
			Month	Initial Level	+7 day	+14day	+21day	+28day
ICOS	±0.06 (0.02~0.09)	+0.09	Mar.	490.15	+0.11	+0.01	+1.09	+0.33
			Dec.	100.69	-0.03	+0.06	+0.58	-
NDIR	±5.2 (4.9~5.5)	+11.8						

장기 변동성을 확인하기 위하여 2019년 3월과 12월 한 달 동안 장비를 교정하지 않았다. 7시간 동안의 단기 변동성은 +0.09ppb로 미미하였다. 장기 변동성은 한달 동안 모두 그 변화량이 WMO의 호환성 범위(±2 ppb)내에 있으나, 21일째에 변동폭이 가장 컸다. 이 결과를 통해 ICOS의 교정은 최소 2주에 1회 이상이 필요함을 확인하였다.

NDIR은 반복성과 단기 변동성에서 이미 WMO의 확장된 호환성 범위(±5 ppb)를 넘었기 때문에 ICOS보다 더 자주 교정해야 한다. 고산 기후변화감시소의 NDIR은 표류오차(drift)를 줄이기 위하여 매 6시간 마다 자동으로 제로가스를 분석하여 영점을 교정하고 있다.

이 비교실험을 통해 제로가스, 선형성, 반복성과 재현성 모두 ICOS가 NDIR에 비해 더 정확하고 안정된 결과를 보였다. 향후 ICOS를 CO 측정 대표장비로 하고 NDIR은 ICOS와 관측값 비교를 통해 자료처리방법을 개선하여 지속적으로 활용할 예정이다.

2. 부유분진측정기 등가성 평가

황사의 정량적 예보를 위해 기상청은 황사관측망에서 부유분진측정기를 이용하여 실시간 PM_{10} 질량농도를 감시하고 있으며, 기후변화감시요소로서 국립기상과학원은 안면도, 고산, 울릉도・독도 기후변화감시소에서 부유분진측정기를 운영 중이다. 환경측정기기의 형식승인 ・정도검사 등에 관한 고시(제2018-68호) 및 대기오염측정망 운영 지침(2019)에 따라 국가표준장비와 저용량 미세먼지기준채취기(Class Ⅰ)의 등가성 평가를 국립환경과학원 수도권집중측정소에서 비교 측정을 통해 검증받았다(2019. 2. 13. ~ 2. 27.). 총 3대의 저용량 미세먼지채취기에 대해 국가기준측정시스템과 비교 평가를 수행하였으며, 그 결과 기울기와 절편 모두 허용 기준 이내였다(Table 4.1.4 참고).

안면도에서는 3월 20일부터 4월 30일까지의 시료(시료 수=29)를 대상으로 중량법과 부유분진측정기 자료를 비교하였는데, 이들의 선형회귀식 기울기 0.99, 절편 4.57로 등가성 평가 기준을 만족하였다. 고산에서는 4월 4일부터 4월 30일까지 17개 시료를 대상으로 비교한 결과 선형회귀식의 기울기가 0.97, 절편은 3.41로 등가성 평가 기준을 만족하였다. 한편, 울릉도는 2018년 10월 20일부터 2019년 1월 27일까지 총 88개의 시료를 대상으로 고산기후변화감시소에서 예비용 부유분진측정기로 등가성 평가를 실시하였다. 따라서 울릉도 지역의 등가성 평가결과는 기울기 0.93, 절편 1.12로써 기준을 만족하여 정도검사 완료 후 2019년 4월 29일부터 예비용 부유분진측정기를 운영하고 있다(Fig. 4.1.3).

2019년 12월에 국립기상과학원 기상관측장비 연구 및 실험시설 3층과 옥상에 기준채취기(중량법), 부유분진측정기 각 1조, 부유분진측정기용 흡입관, 온습도 센서 및 콘트롤러 각 5조를 구성하였다. 이는 2018년부터 기상청에서 부유분진측정기의 등가성 평가를 외부용역으로 수행하고 있어, 환경기상연구과에서 2020년에는 기상청 현업용 부유분진측정기 예비품 등가성 평가를 직접수행할 예정이다(Fig. 4.1.4).

Table. 4.1.4. Equivalence test result for Class I instrument (gravimetric method) by National Institute of Environment Sciences.

지역	제조번호	구분	기울기	절편	평가결과
PMS-104	1711831	PM_{10}	1.01	-1.07	기준이내
PMS-104	1711832	PM_{10}	1.01	-0.95	기준이내
PMS-104	1802844	PM_{10}	1.01	0.01	기준이내

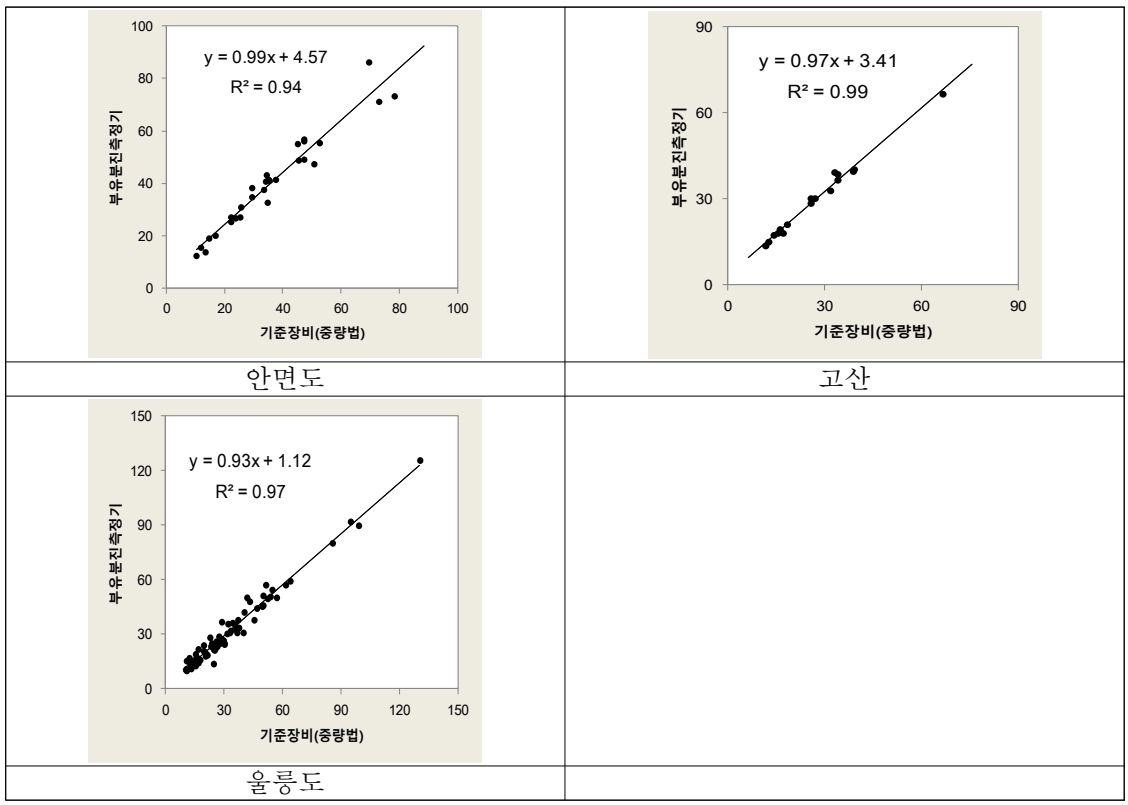


Fig. 4.1.3. Equivalence test result for Class I instrument.



3층(부유분진측정기)





옥상(기준채취기 및 부유분진측정기 흡입관)

Fig. 4.1.4. Measuring Instrument Installation.

3. WMO/GAW 관측지침에 따른 에어로졸 관측환경 개선

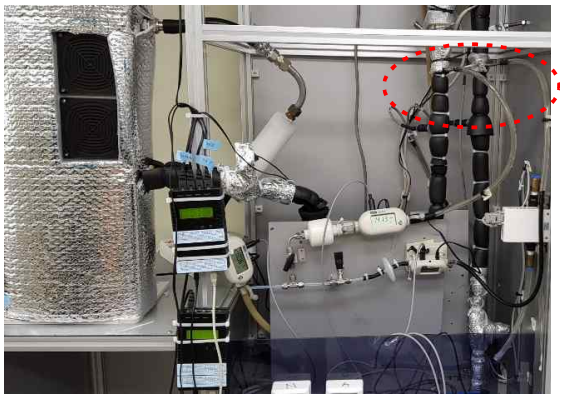
세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO) 지구대기감시(Global Atmosphere Watch, GAW) 프로그램에서는 관측자료 품질관리 방안의 일환으로 세계표준센터(Wolrd Calibration Centre)의 적합성평가를 수감하도록 권고하고 있다(WMO, 2017). 2018년 3월 안면도와 고산 기후변화감시소는 WMO 에어로졸세계표준센터(World Calibration Centre for Aerosol Physics, WCCAP)의 권고에 따라 관측자료의 품질 향상을 위해 장비 유입부 온·습도 센서 설치, 공기 제습장치 교체(가열방식 지양), WCCAP의 장비 교정 및 비교검정, 입자계수기 검정용 표준입자 도입, 에어로졸 세계자료센터(WMO/WDCA) 자료 등재, 중량법자료와 부유분진측정기 비교측정 등을 이행하였다. 공기 제습장치 관련하여, 1 ㎛ 미만의 입자를 측정하는 입자계수기(CPC, SMPS)는 확산건조기를 사용할 경우 입자의 손실(diffusional loss)이 커질 수 있어 나피온 건조기를 적용하도록 권고받았다. 2018년에는 CPC(응결핵계수기, condensation particle counter)에만 적용하였고, 2019년에는 SMPS(전자기유도입자계수기, scanning mobility particle sizer)에도 적용하였다(Fig. 4.1.5). 나피온 건조기는 유량이

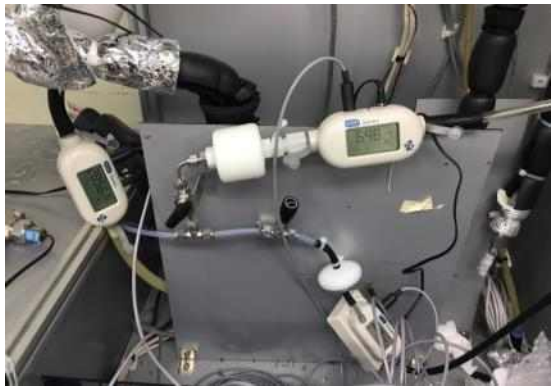
낮은 경우에만 적용이 가능하므로 광산란계수측정기와 광흡수계수측정기에는 건조공기 유입 방식을 채택하였다(Fig. 4.1.6). 유입되는 공기에 깨끗한 건조공기를 유입, 희석함으로써 장비에 유입될 공기의 상대습도를 낮춰준다. 건조공기가 유입되면 자료 처리 시 희석된 공기 비율에 대한 보정이 필요하여, 이를 위해 유량 감시 및 저장 시스템을 구축하였다(Fig. 4.1.6 (b)와 4.1.6 (d)). 건조공기 유입으로 인한 상대습도 저감 효과는 Fig. 4.1.7에서 확인할 수 있다. 광산란계수측정기에 유입된 공기의 상대습도는 2018년 6월에 최대 50%인 반면, 건조공기 유입 이후인 2019년 6월의 상대습도는 20% ~ 30%로 유지되었다(Fig. 4.1.7 (a)). 이 기간 외기의 상대습도는 2018년과 2019년에 유사하였다(Fig. 4.1.7 (b)).



Fig. 4.1.5. Installation of nafion dryer for scanning mobility particle sizer (SMPS).

(a) (b)





(c) (d)



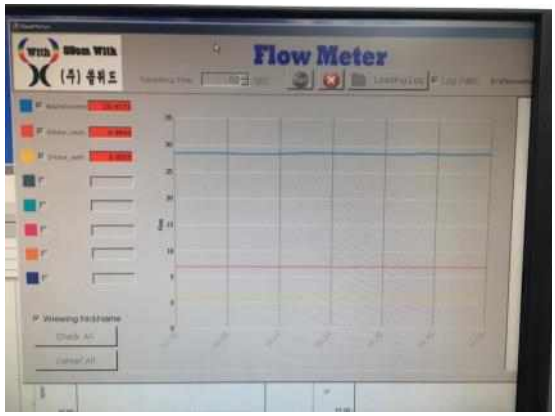
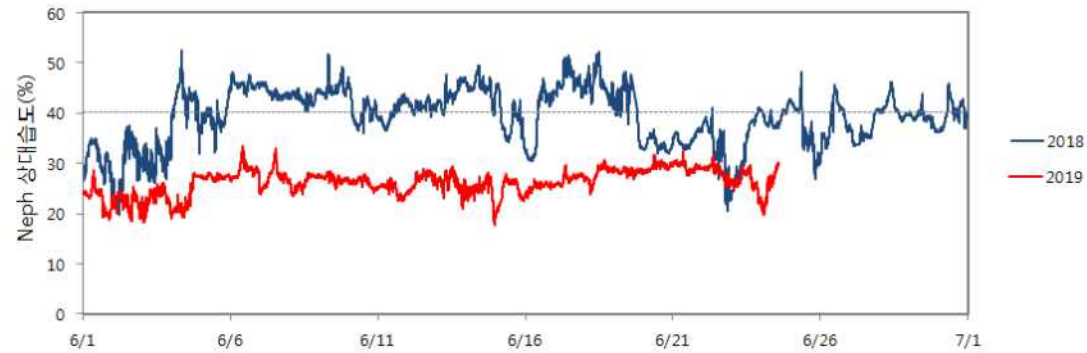


Fig. 4.1.6. Air dilutor system: (a) providing clean dry air, (b) flowmeters, (c) air dilutor, and (d) flowrate monitoring.

(a)



(b)

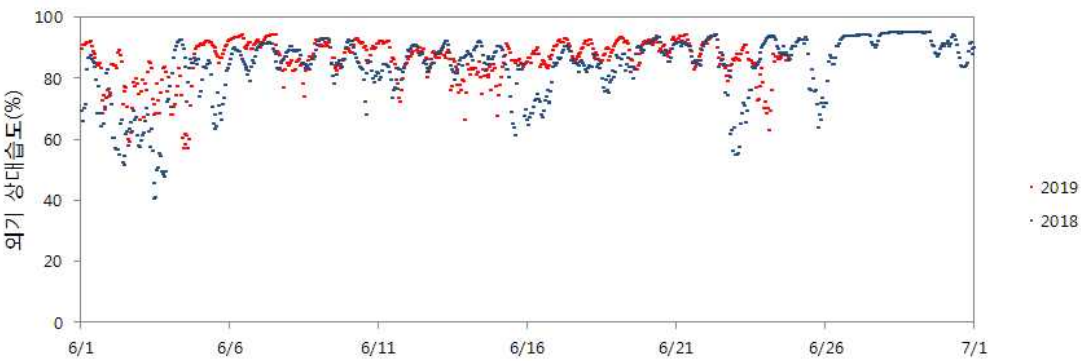


Fig. 4.1.7. (a) Relative humidity of nephelometer and (b) ambient relative humidity in June, 2018 and 2019.

제 2 절 한반도 대기조성물질 장기변화 경향분석

1. 안면도와 고산 지역의 장기간 강수성분 조성 및 중화특성

안면도와 고산 기후변화감시소에서 2008 ~ 2017년까지 최근 10년간 강수시료를 채취한 후, 각 시료의 pH와 주요이온성분을 분석하였다. 그리고 이를 기초로 한반도 강수성분의 농도 및 그에 따른 조성과 지역별 중화특성을 조사하였고, 타 지역과의 비교를 통해 연구지역의 화학적 특징을 확인하였다.

강수 시료의 분석은 용해된 미량 성분을 측정해야 하므로 시료 채취 및 보관, 시료 전처리, 분석 방법 등에 따라 그 결과가 크게 달라질 수 있다. 따라서 분석데이터들에 대한 신뢰도를 반드시 확인할 필요가 있다. 본 연구의 분석데이터 신뢰도를 확인하기 위해 국립기상과학원에서 발간하는 지구대기감시보고서에서 사용하는 이온수지 및 전기전도도 비교, 이온 차의 허용범위 및 전기전도도 차 허용범위 검사 등 4가지 방법을 사용하여 강수 시료의 품질관리를 한 결과 10년간 안면도와 고산 강수의 유효시료는 각각 636개와 694개이다.

2008년부터 2017년까지 약 10년간 측정된 안면도와 고산 강수의 연도별 부피가중 평균 pH는 각각 4.4 ~ 4.9, 4.6 ~ 45.1이며, 또한 10년간 강수의 부피가중평균 pH는 각각 4.7, 4.9로 안면도지역이 고산지역보다 약산성의 비가 더 내린 것으로 판단된다. 부피가중평균 전기전도도는 각각 28.5, 24.3 μS/cm로 조사되었다. 안면도와 고산지역의 연도별 pH와 농도 및 조성은 Table 4.2.1과 Fig. 4.2.1에 나타냈으며, H^+의 농도는 pH측정 결과로부터 계산하였다. SO_4^{2-}와 Ca^{2+} 는 두 지역이 해안가에 있으므로 비해염 (non-Sea-Salt)농도로 환산하였다. 안면도와 고산지역의 화학성분의 농도와 조성을 살펴보면, 고산지역이 안면도 지역보다는 해염성분인 Na^+, Cl^-, Mg^{2+}성분이 조성이 높고 반면에 안면도 지역은 이차반응물인 nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+성분에서 높은 농도와 조성을 보였다. 고산지역이 2010년과 2016년도에 해염성분의 농도와 조성이 높은 것을 제외하고는 안면도와 고산지역 모두 뚜렷한 연도별 경향성은 없는 것으로 판단된다.

안면도, 고산지역과 더불어 타 지역에서 분석한 강수이온성분들의 부피가중평균 농도를 계산하였다. 본 연구지역인 안면도, 고산의 강수이온성분과 국내에서 관측된 한라산 1100고지(Bu et al., 2017), 제주시(Bu et al., 2016), 그리고 국외지역인 Romania(Szep et al., 2017), 중국 지역 중 3곳(Beijing(Xu et al., 2015), Chizhou(Xu et al., 2015), Shenzhen(Huang et al., 2010)), Jordan(Al-Khashman et al., 2013), Niger(Galy-Lacaux et al., 2009)지역의 강수이온성분자료를 Table 4.2.1.에 비교하였다. 먼저 주요 이차반응물질인 SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+의 농도를 타 지역과 비교한 결과, 고산, 한라산 1100고지, 제주시, Jordan지역보다는 안면도 지역이 약 1.1 ~ 2.4배, 아프리카 지역인 Niger 보다는 안면도가 약 2.3 ~ 5.5배정도 더 높은 것으로 판단된다. 반면에 Romania지역의 NO_3^-성분과 중국 내 Chizhou, Shenzhen지역의 NO_3^-, NH_4^+ 성분은 안면도보다 더 높은 값을 나타내었다. 중국 수도인 Beijing 지역도 SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+성분이 안면도보다 약 1.3 ~ 8.3배 높았다. 제주도 고산지역은 아프리카 지역보다는 약 1.0 ~ 3.7배, Chizhou지역의 NO_3^-성분만 1.9배 높은 것을 제외하고는 다른 지역보다는 비슷하거나 낮은 농도를 보였다. 반면에 해염성분(Na^+, Cl^-)인 경우 아프리카 지역인 Niger와 중국 Beijing, Chizhou, Shenzhen은 안면도와 고산보다 약 2.2 ~ 17.6배 정도 낮은 농도를 보였고, Romania지역과 한라산 1100고지의 대부분 성분들이 안면도 지역보다 1.1 ~ 3.5배정도 낮았다. 제주도 고산지역이 제주시 지역보다는 해염성분이 높은 것을 나타나 이는 고산지역이 바다와 인접해 있어 해염입자의 유입이 많은 것으로 추정된다(Bu et al., 2016, 2017).

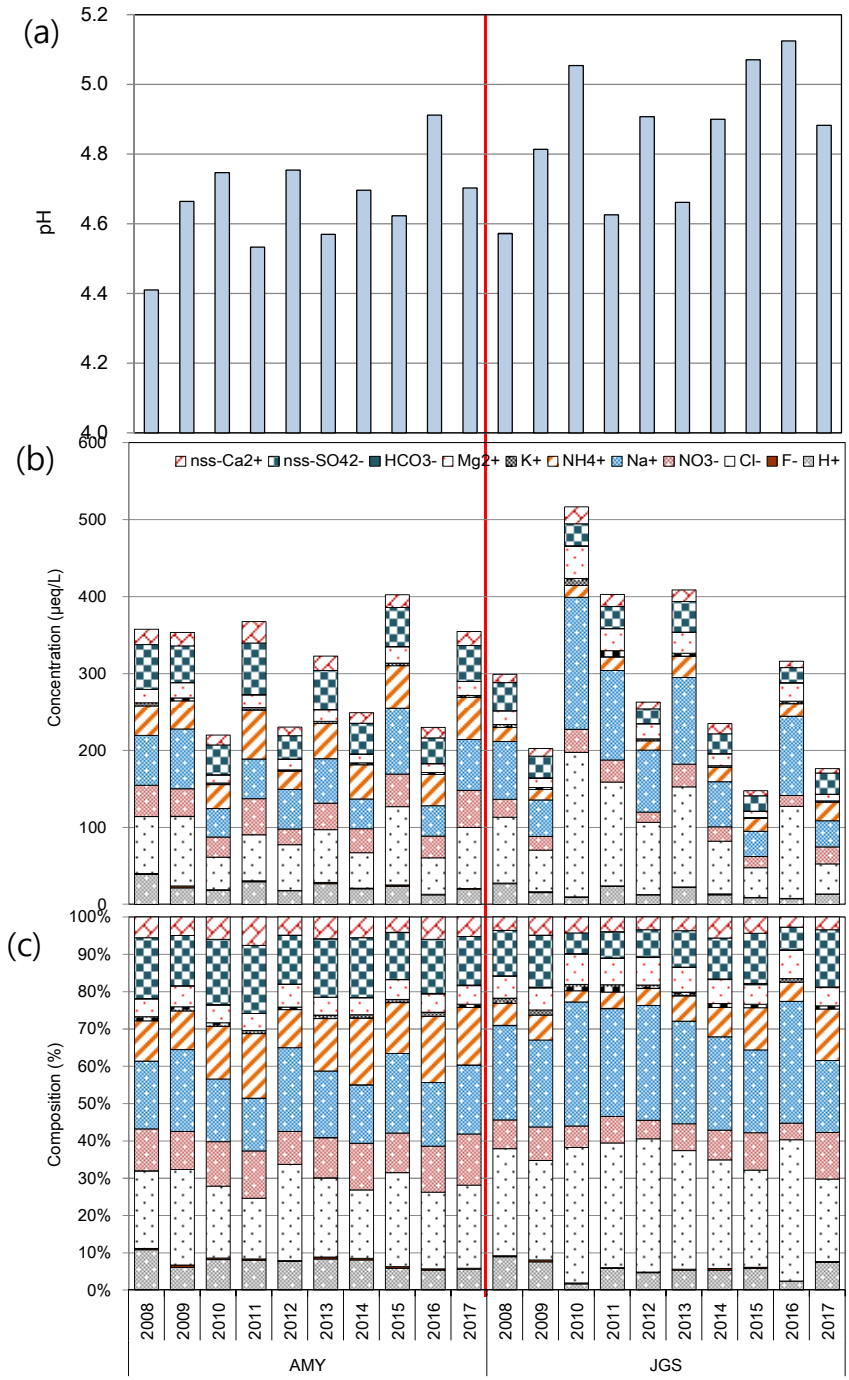


Fig. 4.2.1. Annual volume-weighted mean (a) pH (b) concentration (μeq L^{-1}), and (c) composition ratio of ionic species of precipitation at Anmyeon-do (AMY) and Jeju Gosan (JGS) Site.

Table 4.2.1. The volume-weighted mean ionic concentration (μeq L^{-1}) of precipitation at Anmyeon-do (AMY), Jeju Gosan (JGS) and other sites.

Year	AMY	JGS	1100m site of Mt. Halla[a]	Jeju UN.[b]	Romania[c]	Beijing[d]	Chizhou[d]	Shenzhen[e]	Jordan[f]	Niger[g]
Period	2008~2017	2008~2017	2015~2016	2009~2014	2016	2011~2012	2011~2012	2005~2009	2006~2011	1994~2005
pH	4.7	4.9	5.1	4.9	6.49	4.85	4.56	4.56	7.07	5.64
EC	28.5	24.3	15.9	22.7	-	82.0	23.0	-	85.0	-
H^+	22.49	13.50	-	-	0.60	-	-	27.4	0.62	2.3
F^-	1.24	0.68	0.2	0.8	-	12.0	6.12	1.72	-	-
Cl^-	63.61	91.31	46.7	68.8	40.34	5.09	14.1	20.6	73.3	8.7
NO_3^-	33.69	19.76	19.9	19.1	27.72	42.6	10.3	21.9	31.5	11.6
Na^+	54.44	79.82	43.2	71.8	22.55	21.5	3.09	11.2	70.2	8.7
NH_4^+	41.44	17.36	20.6	18.3	169.96	346	38.2	33.5	25.7	18.1
K^+	2.72	3.45	2.8	2.9	18.94	9.17	3.33	1.75	15.2	7.5
Mg^{2+}	14.90	19.36	11.6	15.9	16.02	53.3	5.71	3.26	60.4	6.7
HCO_3^-	0.22	0.37	-	-	32.57	-	-	-	121	-
SO_4^{2-}	51.8	35.2	29.5	37.2	54.61	357	178	64.7	40.1	9.4
Ca^{2+}	19.2	14.7	10.1	12.3	80.27	273	189	35.4	125.4	27.3
Count	636	694	137	284	362	-	-	208	205	305
Rainfall	8462.5	11472.2	-	-	-	-	-	4103	-	5941.1

[a)]Bu et al., 2017; [b)]Bu et al., 2016; [c)]Szep et al., 2017; [d)]Xu et al., 2015; [e)]Huang et al., 2010; [f)]Al-Khashman et al., 2013; [g)]Galy-Lacaux et al., 2009

강수의 산성화는 일반적으로 H_2SO_4, HNO_3, HCl, 유기산(RCOOH)등에 의해 일어난다. 따라서 이들 산성물질의 짝염기(nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, Cl^-, 유기산 등) 농도를 측정하면 각각의 산성화 기여율을 유추할 수 있다. 그러나 이 중 Cl^-성분의 경우 청정지역에서는 주로 해염에 의해 유입되는 것으로 알려져 있으며, 강수 pH에 미치는 영향은 미미한 것으로 조사되고 있다(Bu et al., 2016). 또한, 강수에서 산성물질들은 주로 NH_3, $CaCO_3$, $MgCO_3$등의 염기성물질에 의해 중화되는 것으로 알려져 있고, 이들 염기물질의 짝산(NH_4^+, nss-Ca^{2+}, Mg^{2+})의 농도를 측정하면 중화기여도를 유추할 수 있다(Kim et al., 2006; Bu et al., 2016, 2019). 따라서 중화기여도는 다음의 식(1)로부터 중화인자(NF, neutralization factor)를 구하여 평가할 수 있다. 식에서 [nss-SO_4^{2-}], [NO_3^-], [NH_4^+], [nss-Ca^{2+}]는 각 성분의 당량농도이다 (Bu et al., 2016).

$$NF_{(NH3\ or\ CaCO3)} = [NH_4^+ \text{or nss-}Ca^{2+}]/([\ \text{nss-}SO_4^{2-}]+[NO_3^-]) \qquad (1)$$

본 연구지역의 주요 산성음이온(nss-SO_4^{2-}, NO_3^-)의 합과 수소이온과 염기성양이온(H^+, NH_4^+, nss-Ca^{2+})합간의 상관성을 조사하여 Fig. 4.2.2에 도시하였다. 이들 산성음이온과 수소포함 염기성양이온 합간의 상관성이 클수록 강수의 산성화 및 중화는 주로 이들 성분에 의해 일어나고 있음을 의미한다(Kang et al., 2006; Bu et al., 2016). 반대로 이들의 상관성이 낮을수록 강수의 산성화 및 중화는 이들 외에 다른 성분들의 기여도가 높음을 의미한다(Kim et al., 2013). 따라서 안면도와 고산 강수 산성화 물질과 중화물질의 상관성을 조사해 본 결과, 상관계수(r)가 각각 0.964, 0.970으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 두 지역은 강수의 산성화 및 중화는 이들 주요성분에 의해 일어나며, 이 외에 다른 산과 염기성분들의 기여도는 크지 않는 것으로 판단된다.

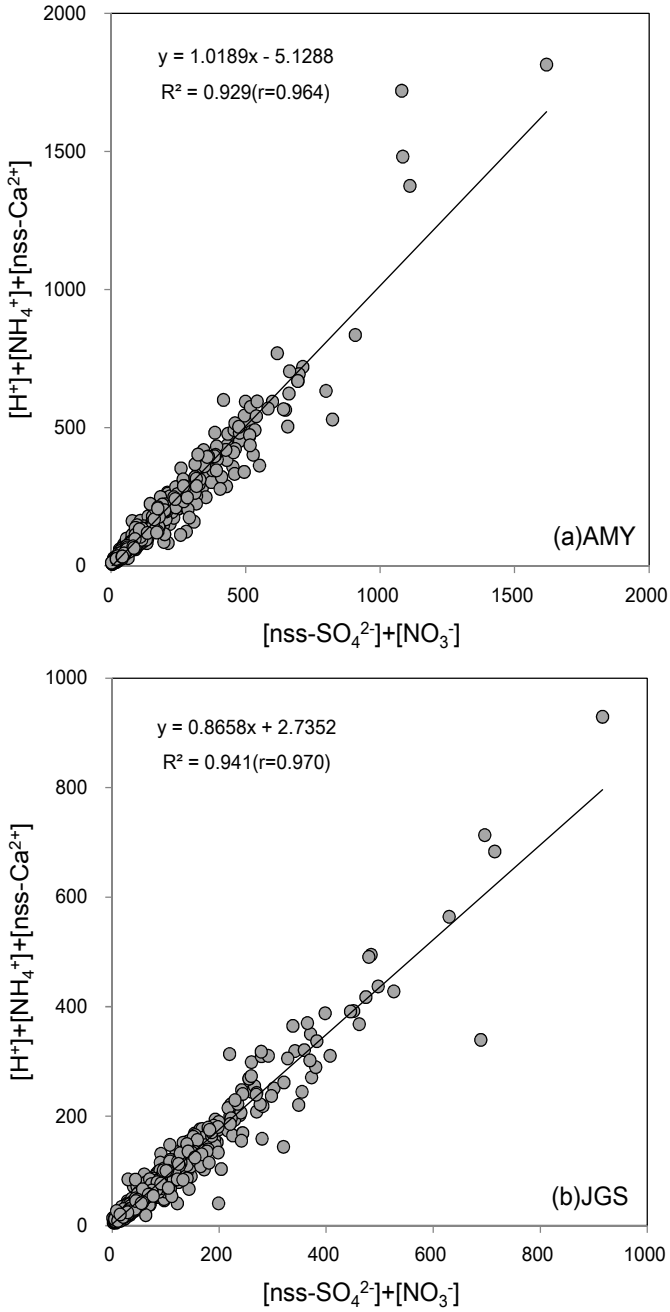


Fig. 4.2.2. Relationship between $\Sigma([H^+]+[NH_4^+]+[nss-Ca^{2+}])$ and $\Sigma([nss-SO_4^{2-}]+[NO_3^-])$ at (a) Anmyeon-do (AMY) and (b) Jeju Gosan (JGS) Site.

2. 한반도에서 관측되는 이산화탄소의 시공간적 특성 분석

한반도 대기 중 이산화탄소는 1999년부터 안면도에서 비분산적외선 분광기(NDIR)를 이용하여 실시간 관측을 시작하였으며 2012년부터 안면도(AMY, 126.32°E, 36.53°N, 47 m), 제주고산(JGS, 126.16°E, 33.30°N, 71.47 m), 울릉도독도(ULD, 130.90°E, 37.48°N, 260 m) 관측소에 동일한 시스템을 설치하여 관측을 시작하였다(Fig. 4.2.3). 관측 시스템에 대한 자세한 설명은 Lee et al.(2019)에 기술하였다.

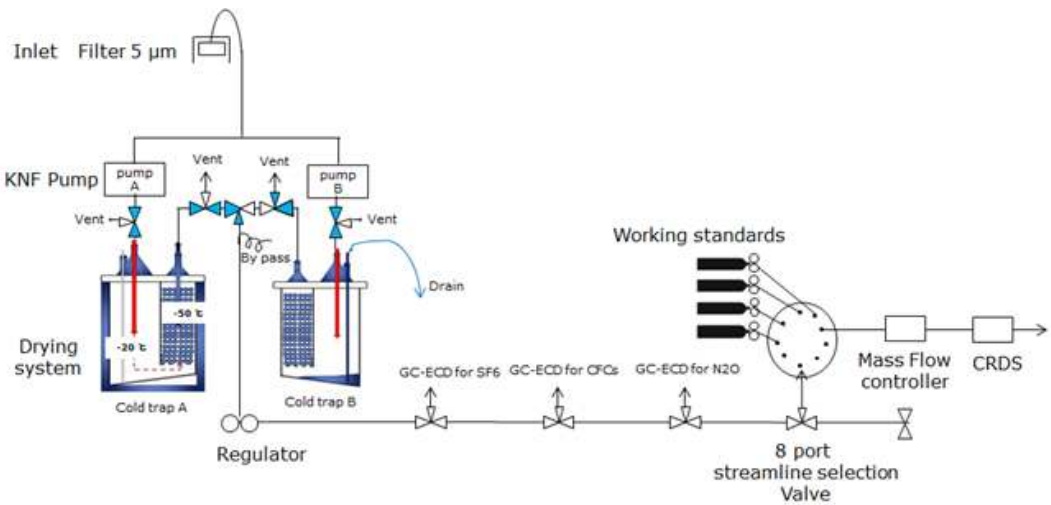


Figure 4.2.3. Schematic of the in-situ system at Anmyeondo (AMY), Jejudo Gosan Suwolbong (JGS), and (d) Ullengdo (ULD) stations.

2.1 각 관측소의 지역적 특성

한반도 온실가스의 자료품질은 5초마다 생산되는 원시자료(L0)를 시간자료로 평균한 후 자동품질관리(각 관측장비의 임계값 등 적용)과 수동품질관리(양호, 의심, 결측으로 총 21가지 플래깅)으로 L1자료를 생산하고, 유효자료를 확정하여 L2로 결정하는 과정을 거친다. 본 실험에서는 생산된 L2자료 중 AMY는 시간표준편차(A)와 연속하는 값의 차이값(B)가 1.8 ppm 이상일 때, JGS는 A와 B가 1 ppm 이상일 때, ULD는 A와 B가 0.8 ppm 이상일 때 기각되어 지역 배경대기농도를 선택한다. 이 자료를 일자료로 평균할 때 6 시간 이상의 자료가 없을 시 또한 기각된다. 이 때 산정된 일자료에 Thoning et al.,(1989)의 방법으로 피팅하여 최종 배경농도를 구하였다.

AMY, JGS와 ULD의 이산화탄소 농도 특성은 Figure 4.2.4 의 왼쪽 패널과 같다. 고농도 사례는 AMY에서 가장 많이 관측되었으며, ULD는 상대적으로 고농도 사례가 적었다. 실제로 연간 가장 높은 L2 시간 CO_2 값과 가장 낮는 값의 차이는 AMY가 ~ 102±12.1 ppm, JGS가 ~ 62.5±9.2 ppm, ULD가 ~ 55.1±9.6 ppm 으로 AMY가 가장 크고, ULD가 가장 적었다.

L2 시간자료를 월평균 한 값과 배경농도(Figure 4.2.4의 왼쪽 컬럼)를 월평균한 값의 차이를 보면, AMY는 4.3±3.3 ppm, JGS는 1.7±1.3 ppm, ULD는 1.0±1.9 ppm으로 나타나 AMY의 경우 CO_2 의 고농도를 나타낼 수 있는 다양한 기원이 관측소 주변에 존재함을 나타냈다. 또한 모든 관측소에서 여름철에 이 월별 차이값이 가장 컸고, AMY는 봄철에, JGS와 ULD는 겨울철에 가장 적은 차이값을 보였다. 그 이유는 여름철에 모든 관측소에서 풍속이 낮아지면서 지역의 고농도 사례를 많이 반영하는 것으로 사료되며, 봄철과 겨울철에는 시베리아 고기압이 확장되어 잘 혼합된 대기가 상대적으로 자주 관측되는 것에 기인한다.

각 관측소의 CO_2 일변화에 영향을 주는 것은 육상생태시스템 (광합성, 식생의 분포 등)과 지역 대기 순환과 관련이 깊다. Figure 4.2.4.의 오른쪽 컬럼에서 제시한 일변화는 여름철에 가까울수록 CO_2 일변화가 높음을 알 수 있다. 이는 타 관측소에서 나타나는 전형적인 결과로 일출 이후 지표가 데워지면서 대기경계층이 높아지기 때문에

CO_2 농도가 점차 낮아지며, 낮 동안 광합성이 활발히 이루어지므로 CO_2 의 농도는 더 낮아진다. 저녁이 될수록 대기가 차가워지면서 기온이 역전되어 대기 중에 CO_2 가 누적되게 된다.

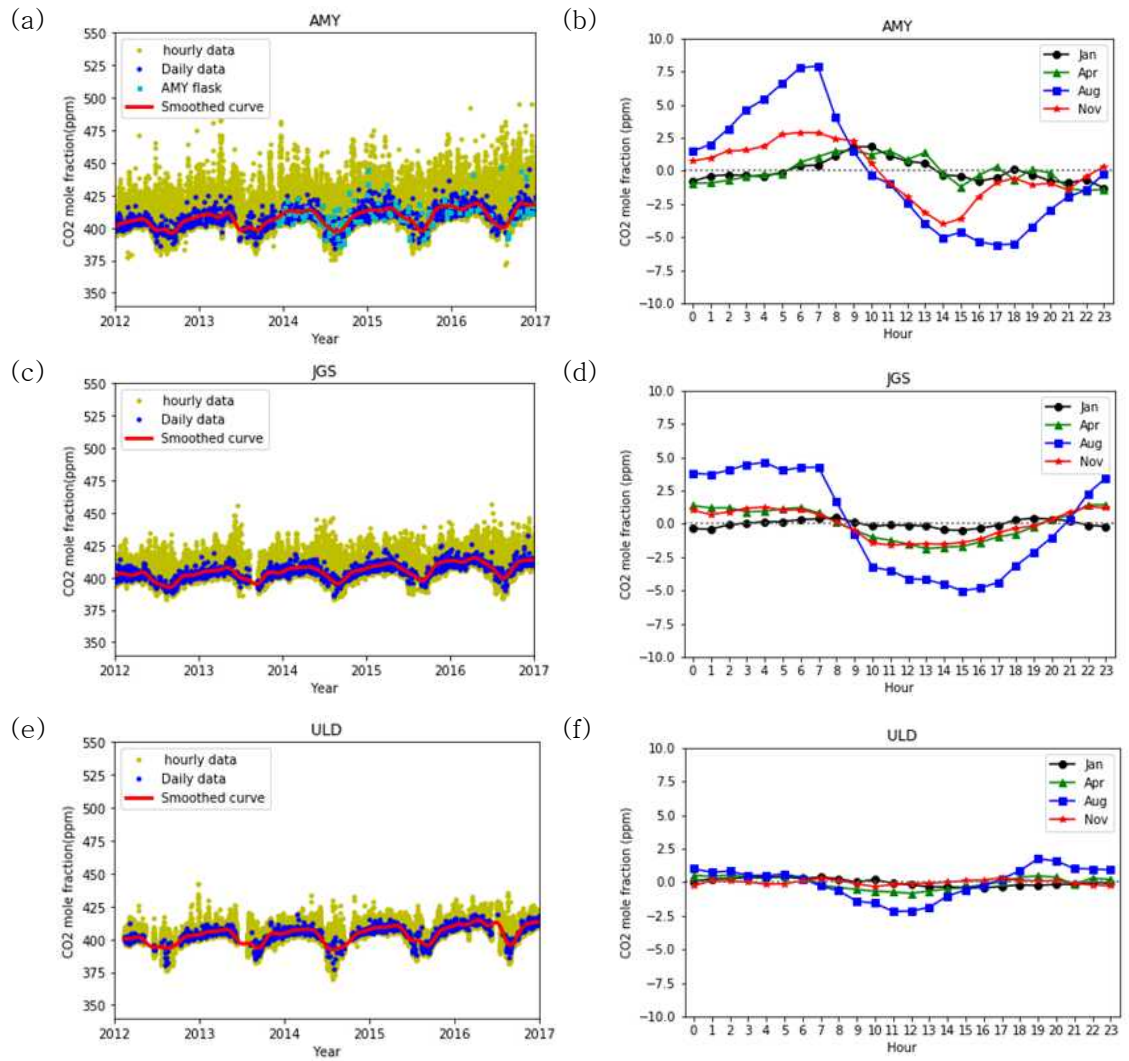


Figure 4.2.4. L2 hourly (yellow dots, CO_2 OBS), L2 daily (blue dots) averaged, and smoothed curves fitted to L2 daily averages (red line, CO_2BG) (left panel) the mean diurnal variations of CO_2 mole fraction (right panel) at (a), (b) of AMY (c), (d) of JGS, (e) and (f) of ULD.

반면 겨울철에는 지표의 식생활동이 줄어들고 강한 바람으로 대기의 환류 작용은 커지면서 일변화가 줄어들게 된다. 반면 ULD는 여름철에 다른 두 관측소와 다른 경향을 보이는데, 이는 주풍향과 오히려 관계가 깊고, 여름철의 대기경계층과는 관련이 낮다 (Lee et al., 2019). 반면 여전히 육상생태의 여름철 광합성 활동을 통해 낮 시간 동안은 낮은 CO_2값을 보인다.

2.2 안면도와 동아시아 관측소의 장기자료 특성 분석

안면도는 1999년부터 한반도에서 가장 오래된 실시간 관측자료를 보유하고 있다. 안면도의 2002년자료부터 2018년자료까지의 장기트렌드와 연간 성장률을 비슷한 위도의 관측소인 중국의 완리구완(WLG, 100.90°E, 36.28°N)과 일본의 료리(RYO, 141.82°E, 39.03°N) 비교하였다.

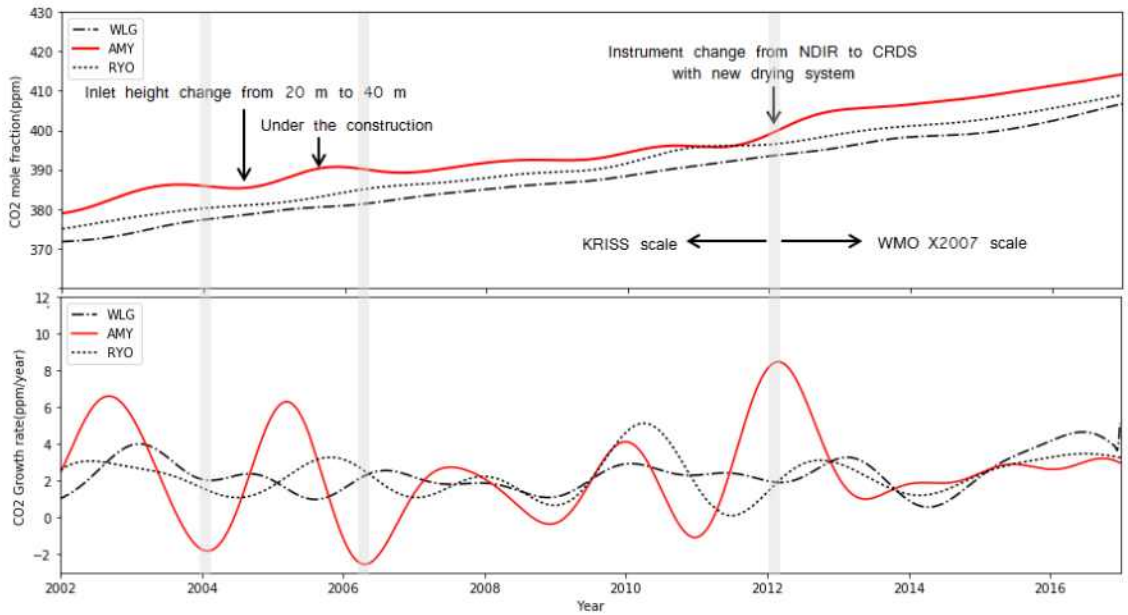


Figure 4.2.5. (a) Long-term trend of atmospheric CO_2 and its (b) instantaneous growth rate at WLG, AMY and RYO. Overlaid grey line indicated the period of the negative (in 2004 and 2006) and positive (in 2012) growth rates at AMY compared to other two East Asia stations (WLG and RYO).

AMY의 장기간 증가는 다른 관측소와 비슷한 기울기로 나타났으나 2004년과 2006년에 증가율이 음(-)의 값으로 나타났고, 2012년은 양(+)의 값으로 나타났다. 이는 다른 관측소에서는 나타나지 않은 특성이다. CO_2 의 증가율이 음의 값으로 나타난 것은 1992년 필리핀의 피나투보 화산 폭발로 인해 관측된 이래 북반구에서는 관측된 바가 없으며, 대부분 강한 양의 값은 엘리뇨 등의 영향이 크다 (Stenchikov et al., 2002; Heimann and Reichetein, 2008;WDCGG, 2017).

이러한 큰 기후시스템의 영향이 없이 AMY가 다른 동아시아 관측소와 다른 증가율을 나타낸 것은 관측환경의 변화와 관련이 있었다. 2004년 6월 AMY의 인렛은 20 m에서 40 m로 확장되어 설치되었다. 따라서 그 이전의 자료는 지역 오염원을 더 많이 반영했을 가능성이 높다 (Song et al., 2005). 2005년 AMY는 실험동 증축을 시작하였으며, 이 영향이 기기에 영향을 주었을 것으로 사료된다. 2012년 AMY는 다른 두 관측소와 동일한 방법으로 관측을 시작하였으며, 이 때 관측장비를 NDIR (비분산적외선분광기)에서 CRDS(공동감쇠분광기)로, 3단계 건조 시스템에서 1단계 건조시스템으로, 표준가스의 척도를 KRISS에서 NOAA로 변경하였다. 따라서 관측환경의 변화, 기기의 변경 등은 CO_2 의 증가율에 영향을 주므로, 보다 정확한 관측이 필요함이 또한 제시되었다.

제 3 절 제20차 WMO/IAEA 온실가스 전문가회의 개최 결과

제20차 WMO/IAEA 온실가스 전문가회의 (The 20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Measurement Techniques)는 2019년 9월 1일(월)부터 5일(목)까지 제주도 중문 롯데호텔에서 개최되었다. 약20개국 200여명이 총 115편(구두 50, 포스터 65)의 연구 성과를 발표하였으며 이 중 한국과학자들은 8편을 발표하였다. 본 회의는 그 간의 회의의 최대 규모로 기록되었다. 온실가스와 동위원소 관측, 자료 품질관리, 표준화 및 관련 기술 교류, 온실가스 관측 신기술(원격관측, 통합관측), 도시관측, 모바일관측(항공기, 선박, 드론, 기구), 빅데이터 활용 등 다양한 연구 내용이 발표되었다. 특히 동위원소 관측과 도시 관측에 대한 발표내용이 크게 증가하여 향후 온실가스의 연구가 전통적인 방법에서 점차 기원을 추적하는 연구로 확장될 것을 보였다.



Figure 4.3.1. The group photo in GGMT-2019.

회의 기간 동안 전문가들이 리드하는 온실가스 약 18개의 아젠다를 논의하였으며, 그 중 다음과 같은 주요 결과가 결정되었다.

1) 이산화탄소의 척도 변화

WMO/GAW의 중앙교정실험실에서 2014년 이후 배포한 이산화탄소 표준가스 값의 오류가 발견되어 보정값을 제공할 예정이다. 향후 X2019 척도는 아래의 수식을 반영하여 제공이 되고, 2020년 10월경 시작되는 국제순차순환비교실험을 진행하여 모든 관측소가 척도를 업데이트 하도록 유도할 예정이다.

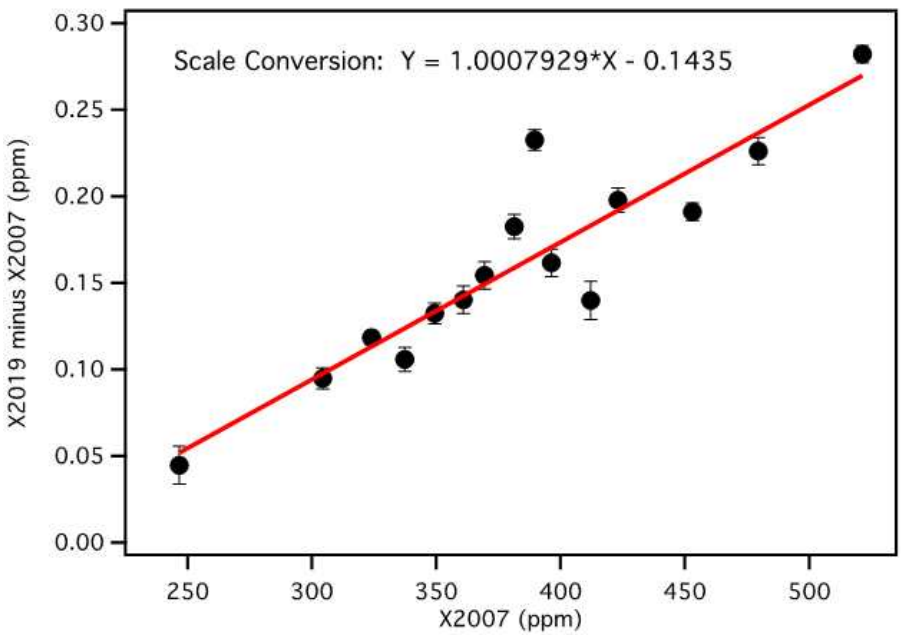


Figure 4.3.2. The scale correction between X2019 and X2017. Courtesy of Brad Hall (GGMT-2019).

2) SF_6와 $^{14}CO_2$의 배경농도 범위 변경

WMO/GAW에서 자료품질관리의 기준으로 가장 중요시 여겨지는 허용범위(compatibility goal)의 기준에 제시될 때 함께 논의되는 배경농도의 범위가 이번 회의에서 변경되었다. 인위적 기원이 대부분인 SF_6와 화석연료로 인한 CO_2 농도의 증가로 2017년 정해진 관측의 농도 범위가 조정되었다. SF_6는 9 ~ 11 ppt, $^{14}CO_2$는 -80 ~ 20‰ 로 수정되어 다음 보고서 때 반영되기로 결정되었다.

Table 1. Recommended network compatibility of measurements within the scope of WMO/GAW

Component	*Network compatibility goal*[1]	*Extended network compatibility goal*[2]	*Range in unpolluted troposphere (approx. range for 2017)*	*Range covered by the WMO scale*
CO_2	0.1 ppm (NH) 0.05 ppm (SH)	0.2 ppm	380 - 450 ppm	250 – 520 ppm
CH_4	2 ppb	5 ppb	1750 – 2100 ppb	300 – 5900 ppb
CO	2 ppb	5 ppb	30 – 300 ppb	30 - 500 ppb
N_2O	0.1 ppb	0.3 ppb	325 – 335 ppb	260 – 370 ppb
SF_6	0.02 ppt	0.05 ppt	8 – 10 ppt	2.0 – 20 ppt
H_2	2 ppb	5 ppb	400 – 600 ppb	140 - 1200 ppb
$\delta^{13}C\text{-}CO_2$	0.01 ‰	0.1 ‰	-9.5 to -7.5 ‰ (VPDB)	
$\delta^{18}O\text{-}CO_2$	0.05 ‰	0.1 ‰	-2 to +2 ‰ (VPDB-CO_2)	
$\Delta^{14}C\text{-}CO_2$	0.5 ‰	3 ‰	-50 to 50 ‰	
$\Delta^{14}C\text{-}CH_4$	0.5 ‰		50-350 ‰	
$\Delta^{14}C\text{-}CO$	2 molecules cm^{-3}		0-25 molecules cm^{-3}	
$\delta^{13}C\text{-}CH_4$	0.02 ‰	0.2 ‰	-51 to -46 ‰ (VPDB)	
$\delta^{2}H\text{-}CH_4$	1 ‰	5 ‰	-120 to -63 ‰ (VSMOW)	
O_2/N_2	2 per meg	10 per meg	-900 to -400 per meg (vs. SIO scale)	

[1] Scientifically desirable level of network compatibility for measurements of well-mixed background air. These represent the maximum bias that can generally be tolerated in measurements of well-mixed background air used in global models to infer regional fluxes. Some network compatibility goals may not be currently achievable within current measurement and/or scale transfer uncertainties. However, these network compatibility goals are targeted for application areas which require the smallest possible bias among different datasets or data providers, such as for the detection of small trends and gradients. Network compatibility goals are not direct metrics for instrument performance, however, instruments with significantly higher short-term imprecision make assessing network compatibility difficult.

[2] Extended network compatibility goals are provided as a guideline for many other studies in which the smallest bias is not required, for example, a regionally focused study with large local fluxes, or services related to urban air quality.

Figure 4.3.3. The recommended network compatibility table from WMO/GAW report No.242.

제 5 장 결 론

황사와 연무의 발원부터 이동과 이들 에어로졸의 물리화학적 특성을 분석하기 위하여 관측과 모델개선을 강화하였다.

2019 서해상 대기질 입체관측(2018 YES-AQ) 기간에 안면도와 선박(기상1호)에서 서해상으로 유입된 황사와 연무의 에어로졸의 물리, 광학, 화학 특성을 측정하였다. 에어로졸은 두 지점에서 대체로 유사하게 변동하였으나, 입자 크기 분포 시간과 농도에는 다소 차이가 있는 사례가 있었다. 안면도에서 관측한 질소산화물의 농도 변화로부터 지역 오염원 영향 여부를 파악할 수 있었고, 두 지점 모두에서 고농도 미세입자 사례 시에는 CO의 농도도 증가하는 것이 관측되었다. 선박 운항 경로 상공에서 항공관측(입자 크기 분포와 에어로졸 광산란계수)을 수행하여 오염 플룸의 고도(0 ~ 3.5 km)와 입자 크기 분포를 파악할 수 있고, 황사·연무통합예측모델의 서해상 농도 예측결과와 비교하였다.

서울황사감시센터, 안면도, 고산 세 지역에서 PM_{10} 에어로졸의 주성분석 결과, 모든 지역에서는 도로 및 토양오염원의 기여율이 가장 높았지만, 인위적 발생오염원의 기여율은 서울지역이 가장 많이 받는 것으로 보였다. 양행렬인자분석법의 전체 기여도를 채취된 일별기간에 기여도를 적용한 결과, 2017년 4월 1 ~ 8일까지 질산암모늄과 같은 이차오염물질의 기여율이 높고, 2017년 4월 11, 12일, 18 ~ 20일, 5월 5 ~ 8일은 토양먼지의 기여율이 가장 높게 나타났다. 특히 2017년 5월 5일 ~ 9일에 공기역학 입자계수기의 에어로졸 부피농도와 비교한 결과, 조대입자영역의 부피농도증가는 토양먼지의 증가하는 경향과 일치하였다.

2019년 3월 초 서울에서 관측된 고농도 에어로졸 현상은 중국 화중지방에서 우리나라로 동진하는 고기압 전면에서 1 ~ 2일 전 중국에서 형성된 고농도 에어로졸이 산둥지방, 발해만, 서해상을 지나 2 km 이하의 낮은 고도로 우리나라에 유입되어 발생한 것으로 추정된다. 특히 동진하던 고기압이 우리나라 부근에서 정체된 3월 4일과 5일에는 고농도 에어로졸의 강도가 더 심해졌다.

시험 운영을 통해 산출된 봄철 (3 ~ 5월) 예측 결과를 ROC 방법으로 분석하여 황사 발생을 예측하기 위한 모델의 최적예측농도를 조사하였다. 황사 발생 여부를

판별하는 임계값으로 관측기준농도 단일값을 사용하면 AUC가 0.5 미만으로 떨어지는 경우가 발생하였다. 최적예측농도는 예측시간에 따라 변화하는 경향을 보여주며 단일값을 사용했을 때보다 예측 성능이 좋은 것으로 나타났다. 추후 기계학습을 이용하여 예측 시간에 따라 최적예측농도를 보정하는 방법이 모델 편차를 보정하기 위한 하나의 방법으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

최적내삽법의 한계 극복 및 향후 관측자료 확대 적용을 위해 황사·연무통합예측모델을 위한 앙상블 기반 3차원변분자료동화체계를 개발하고 관측 PM_{10} 농도와 황사·연무통합예측모델 예측 결과를 자료동화하여 분석장을 만드는 체계를 시험운영하였다. 시험운영에서 확인한 배경오차공분산과 분석증분의 특성 분석을 통해 보다 정교하고 모델의 예측성을 높일 수 있는 자료동화체계 개발의 기반을 마련하였다.

안면도 라이다 소산값 수집률은 전체기간 동안 0.32 수준이고, 라이다 소산값 및 지상 PM_{10} 상관계수는 가을에 0.69로 가장 높고, 겨울, 봄, 여름에 각각 0.59, 0.32, 0.33으로 나타났다.

KIM의 현업 운영이 2020년에 예정됨에 따라 KIM 결과를 ADAM3와 연동하기 위한 기상 입력 자료를 생성 프로그램(KIM-MCIP)을 개발하였다. UM과 KIM 모델을 각각 적용한 황사 사례 실험한 결과, KIM 기상 입력 자료를 사용할 때 황사와 비황사 PM_{10}의 확산 경향을 잘 예측하지만 황사 PM_{10}의 발원량은 적게 예측하는 것으로 나타났다. 이는 UM과 KIM에서 모의된 발원 지역의 기상장 차이 때문으로 KIM에서 발원지 부근 10m 풍속 및 상대습도를 약하게 모의 하는 것으로 나타났다. 추후에는 겨울철(12 ~ 1월)의 시험 운영 결과를 바탕으로 UM과 KIM의 기상장에 대한 상세 비교와 예측성 평가를 수행하고 현업에 적용 가능하도록 모델 수행 체계를 보완하고자 한다.

대기-환경 양방향 예측모델(AQUM)의 기상 예측성 평가를 위해 16일 간의 비교실험을 수행하였다. 에어로졸의 대기 복사 영향 유무에 따라 대조군과 실험군을 정의하여 실험한 결과, 에어로졸의 대기 복사 영향이 지상 기온의 예측성능을 약 10 % 개선시켰다. 이는 에어로졸 농도의 예측성의 불확실성에도 불구하고 에어로졸의 대기 복사 영향을 기상 모델에 반영했을 때 예측성 향상에 도움이 될 수 있음을 의미하여 향후 기상 모델의 개선 방안 중 하나로 에어로졸 효과 반영을 중요하게 검토해야함을 의미한다.

방사성물질과 화산재와 같은 위험물질 확산예측을 통한 비상대응 체계를 강화하기 위하여 기존의 HYSPLIT과 NAME 확산예측모델을 이용해 구축된 확산예측체계에 추가적으로 FLEXPART 확산예측모델을 도입하여 비상상황시 즉각 대응할 수 있는 웹기반의 앙상블 확산예측체계를 구축하였다.

기후변화감시소 PM_{10} 질량농도 품질관리의 일환으로 부유분진측정기에서 생산되는 PM_{10} 질량농도에 대해 등가성 평가를 자체적으로 수행하였다. 2019년 12월에 국립기상과학원 기상관측장비 연구 및 실험시설 3층과 옥상에 등가성 평가체계구축을 하였다.

에어로졸 관측자료 품질 향상의 일환으로 장비 유입공기 제습방법을 교체하였는데, 광산란계수측정기의 경우 2019년 건조공기 유입 방식을 채택한 이후에 상대습도는 기존 대비 절반 수준으로 감소하는 효과를 확인하였다.

안면도, 고산지역의 주요성분 간의 이온수지, 전기전도도 비교법으로 강수 분석 데이터의 신뢰도는 좋은 결과를 보였다. 안면도, 고산지역 강수 성분의 부피가중평균 pH는 각각 4.7, 4.9로 약산성이며, 강수량별 pH 범위에 의해 두 지역 모두 강수의 washout과 rainout 현상이 일어났다. 안면도 지역 강수성분은 해염성분과 이차반응물질의 조성비는 비슷한 결과를 보였고, 고산지역 강수는 해염성분이 이차반응물질보다 더 큰 영향 주었다. 안면도 강수성분은 고산, 한라산 1100고지, 제주시, Jordan, Niger보다 이차반응물질의 농도가 높았으나, 중국 Chizhou, Shenzhen, Beijing, Romania지역보다는 낮은 농도를 보였다. 제주도 고산지역은 Niger보다는 높고, 다른 지역보다는 비슷하거나 낮은 농도를 보였다. 두 지역 모두 암모니아에 의한 중화율이 가장 많이 일어나는 것을 알 수 있었다. 또한, 강수의 산성화 및 중화는 $nss\text{-}SO_4^{2-}$, NO_3^-, H^+, NH_4^+, $nss\text{-}Ca^{2+}$성분들에 의해 일어나며, 이 외에 다른 산과 염기성분들의 기여도는 크지 않는 것을 알 수 있었다.

한반도 이산화탄소의 관측을 위해 안면도, 제주고산, 울릉도독도에 관측장비를 설치하여 운영하고 있다. 각 관측소의 지리학적 특성이 이산화탄소의 자료 특성에 반영되어 관측되고 있으며, 관측환경과 기기의 변경 등이 장기자료에도 영향을 미칠 수 있음을 밝혀 고품질 자료를 위해서는 무엇보다 정교한 관측이 중요함을 증명하였다.

CO를 측정하는 최신관측기법인 공진출력분광법(ICOS)과 기존의 측정법인 비분산 적외선흡광법(NDIR)으로 제로가스와 표준가스를 분석하고 그 결과를 비교하였다.

이 비교실험을 통해 제로가스, 선형성, 반복성과 재현성 모두 ICOS가 NDIR에 비해 더 정확하고 안정된 결과를 보였다. 7일 간격의 장기변동성 결과를 볼 때, ICOS의 교정 주기는 최소 2주 1회가 안전하다.

제20차 WMO/IAEA 온실가스 전문가회의 (The 20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Measurement Techniques)는 2019년 9월 1일(월)부터 5일(목)까지 제주도 중문 롯데호텔에서 개최되었다. 약20개국 200여명이 총 115편(구두 50, 포스터 65)의 연구 성과를 발표하였으며, 동위원소와 도시관측이 향후 연구를 주도할 것으로 예측되었다. 이산화탄소의 척도변화와 SF_6와 $^{14}CO_2$의 배경농도 수준이 변경되는 주요결과가 도출되었다. 또한 이 회의 유치를 통해 기상청의 온실가스 관측기술을 알리는 중요한 기반이 되었다.

참고문헌

Al-Khashman, O. A., A. Q. Jaradat, and E. Salameh, 2013: Five-year monitoring study of chemical characteristics of wet atmospheric precipitation in the southern region of Jordan, *Environ. Monit. Assess.,* **185(7)**, 5715-5727.

Bu, J.-O., J.-M. Song, S.-H. Shin, W.-H. Kim, and C.-H. Kang, 2016: Ionic composition and pollution characteristics of precipitation in Jeju Island during 2009 - 2014, *Anal. Sci. Technol.*, **29(1),** 1-10. (in Korean with English abstract).

Bu, J.-O., J.-M. Song, S.-H. Shin, W.-H. Kim, and C.-H. Kang, 2017: Acidification and neutralization factor contributions and characteristics of precipitation at Mt. Halla, Jeju Island, Korea, *J. Korean Soc. Environ. Anal.*, **20(1)**, 1-10. (in Korean with English abstract).

Bu, J.-O., J.-M. Song, L. K. Kim, S. Y. Kim, W. H. Kim, and C. H. Kang, 2019: Chemical characterization of precipitation by air pollutants on Jeju Island in Korea during 2015 - 2016, *Bull. Korean Chem. Soc.*, **40**, 157-162.

Crutzen, P. J.: The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content, Q. J. Roy. Meteorol. Soc., 96, 320 - 325, doi:10.1002/qj.49709640815, 1970.

Galy-Lacaux, C., D. Laouali, L. Descroix, N. Gobron, and C. Liousse, 2009: Long term precipitation chemistry and wet deposition in a remote dry savanna site in Afirca (Niger), *Atmos. Chem. Phys.,* **9**, 1579-1595.

Heimann, M. and Reichstein, M.: Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feddbacks, Nature, 451, 289 - 292, 2008.

Huang, X. F., X. Li, L. Y. He, N. Feng, M. Hu, Y. W. Niu, and L. W. Zeng,

2010: 5-Year study of rainwater chemistry in a coastal mega-city in South China, *Atmos. Res.*, **97(1-2)**, 185-193.

Jain, S., S. K. Charma, N. Choudhary, R. Masiwal, M. Saxena, A. Sharma, T. K. Mandal, A. Gupta, N. C. Gupta, and C. Sharma, 2017: Chemical characteristics and source apportionment of PM2.5 using PCA/APCS, UNMIX, and PMF at an urban site of Delhi, India, Environ Sci Pollut Res, 24, 14637-14656

Kang, C. H., S.-B. Hong, W.-H. Kim, H. J. Ko, S.-B. Lee, and J.-M. Song, 2006: Study on acidification and neutralization characteristics of precipitation in Jeju City between 1997 and 2005, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.,* **22(4)**, 487-498; (in Korean with English abstract).

Kim, S. B., B. C. Choi, S. Y. Oh, S. Kim, and G. U. Kang, 2006: Acidity and chemical composition of precipitation at background area of the Korean Peninsula (Anmyeon, Uljin, Gosan), *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **22(1)**, 15-24 (in Korean with English abstract).

Kim, K.-J., J.-O. Bu, W. H. Kim, Y.-S. Lee, D.-R. Hyeon, and C.-H. Kang, 2013: Pollution characteristics of rainwater at Jeju Island during 2009 - 2010, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.,* **29(6)**, 818-829 (in Korean with English abstract).

Lee, H.; Han, S.-O.; Ryoo, S.-B.; Lee J.-S.; Lee, G.-W. The measurement of atmospheric CO2 at KMA GAW regional stations, its characteristics, and comparisons with other East Asian sites. Atmos. Chem. Phys. 2019, 19, 2149 - 2163, doi.org/10.5194/acp-19-2149-2019

Lee T.-J., and J.-B. Huh, S.-M. Yi, S.-D. Kim, and D.-S. Kim, 2009: Estimation of PM10 Source Contributions on Three Cities in the Metropolitan Area by Using PMF Model, J.KOSAE, 25(4), 275-288.

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J.,Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B.,Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., and Zhang, H.: Anthropogenic and natural radiative forcing, in: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J.,Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. M., Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2013.

Prather, M. J., Holmes, C. D., and Hsu, J.: Reactive greenhouse gas scenarios: Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry, Geophys. Res. Lett., 39, L09803, https://doi.org/10.1029/2012gl051440, 2012.

Purser, R.J., Wu, W.-S., Parrish, A.F., and Roberts, N.M., 2003a, Numerical aspects of the application of recursive filters to variational statistical analysis. Part I: Spatially homogeneous Gaussian covariances, Monthly Weather Review, 131, 1524-1535.

Purser, R.J., Wu, W.-S., Parrish, A.F., and Roberts, N.M., 2003b, Numerical aspects of the application of recursive filters to variational statistical analysis. Part II: Spatially inhomogeneous and anisotropic general covariances, Monthly Weather Review, 131, 1536-1549.

Saikawa, E., R. G. Prinn, E. Dlugokencky, K. Ishijima, G. S. Dutton, B. D. Hall, R. Langenfelds, Y.Tohjima,T. Machida, M. Manizza, M. Rigby, S. O'Doherty, P. K. Patra, C. M. Harth, R. F. Weiss, P. B. Krummel, M. van der Schoot, P. J. Fraser, L. P. Steele, S. Aoki, T. Nakazawa, and J. W. Elkins: Global and regional emissions estimates for N2O, Atmos. Chem. Phys., 14, 4617-4641, 2014

Sharma, S. K., T. K. Mandal, M. K. Srivastava, A. Chatterjee, S. Jain, M. Saxena, B. P. Singh, Saraswati, A. Sharma, A. Adak, and S. K. Ghosh, 2016: Spatio-temporal variation in Chemical characteristics of PM10 over Indo Gangetio Plain of India, Environ Sic Pollut Res, 223, 18809-18822

Stenchikov, G., Robock, A., Ramaswamy, V., Schwarzkopf, M. D., Hamilton, K., and Ramachandran, S.: Arctic Oscillation response to the 1991 Mount Pinatubo eruption: Effects of volcanic aerosols and ozone depletion, J. Geophys. Res., 107, 4803, https://doi.org/10.1029/2002JD002090, 2002.

Szep, R., E. Mateescu, A. C., Nechifor, and A. Keresztesi, 2017: Chemical characteristics and source analysis on ionic composition of rainwater collected in the Carpathians "Cold Pole," Ciuc basin, Eastern Carpathians, Romania, Environ. Sci. Pollut. Res., 24(35), 27288-27302.

Wang Y., G. Zhuang, A. Tang, H. Yuan, Y. Sun, S. Chen, and A. Aheng, 2005: The ion chemistry the source od PM2.5 aerosol in Beijing, Atmospheric Environment, 39, 3771-3784

WCC-Empa Report 17/1: System and performance audit of surface ozone, carbon monoxide, methane, carbon dioxide and nitrous oxide at the regional GAW station Anmyeon-do, Republic of Korea, Jun 2017, 48p (2018)

WDCGG: WDCGG DATA SUMMARY, Greenhouse gases and other atmospheric gases, No. 41, 2017.

Wells, K. C,, D. B. Millet, N. Bousserez, D. K. Henze, T. J. Griffis, S. Chaliyakunnel, E. J. Dlugokencky, E. Saikawa, G. Xiang, R. G. Prinn, S. O'Doherty, D. Young, R. F. Weiss, G. S. Dutton, J. W. Elkins, P. B. Krummel, R. Langenfelds, and L. P. Steele, Top-down constraints on global N2O emissions at optimal resolution: application of a new dimension reduction technique, Atmos. Chem. Phys., 18, 735-756, 2018

Wu, W.-S., Purser, R.J., and Parrish, D.F., 2002, Three-Dimensional variational analysis with spatially inhomogeneous covariances, Monthly Weather Review, 130, 2905-2916.

Xu L., X. Chen, J. Chen, F. Zhang, C. He, K. Du, and Y. Wang, 2012: Characterization of PM10 atmospheric aerosol urban and urban background sites in Fuzhou city, China, Environ Sci Pollut Res., 19, 1443-1453

Xu, Z., Y. Wu, W.-J. Liu, C.-S. Ling, J. Ji, T. Zhao, and X. Zhang, 2015: Chemical composition of rainwater and acid neutralizing effect at Bejing and Chizhou city, China, Atmos. Res., 164-165, 278-285.

Yin L., Z. Niu, X. Chen, J. Chen, F. Zhang, and L. Xu, 2014: Characteristics of water-soluble inorganic ions in PM2.5 and PM2.5-10 in the coastal urban agglomeration along the Western Taiwan Strait Region, China, Environ Sci Pollut Res, 21, 5141-5156

용역 1	연구과제명	(용역)황사감시기상탑을 활용한 발원지 특성연구(Ⅲ)
	주관연구기관/ 연구책임자	(사)대기환경모델링센터 / 주승진

요약내용

1. 몽골(에르덴, 놈곤)에 설치한 황사감시기상탑의 안정적 운영

2019년 몽골의 에르덴과 놈곤 황사감시기상탑의 효율적인 운영을 위해 각각 6월과 10월 두 차례의 정기 방문 점검을 실시하였다.

1차 방문 점검(6월 24일 ~ 7월 6일)을 통해서 에르덴과 놈곤 사이트의 부유분진측정장치(FH62C14)의 펌프를 교체, 측정기기의 교정, 필터 교체, 그리고 흡입구(inlet) 및 각 기상관측기기의 청소와 점검을 실시하였다. 또한 부유분진측정장치의 공시험 검정(zero filter test)를 수행하여 에르덴과 놈곤 각각 2.1 $\mu g\ m^{-3}$ 와 3.7 $\mu g\ m^{-3}$ 을 기록하여 두 관측소의 부유분진측정장치가 정상적인 작동 범위내에 있음을 확인하였다. 자료 백업을 위한 CF카드의 교체, 인말새트 위성통신장치의 작동점검, 베타게이지 및 데이터로거의 배터리 교체 등을 포함하는 정기 점검을 수행하였다.

에르덴과 놈곤 관측소 인근에 식생 및 토양 환경 조사를 위한 특별 조사구를 선정하여 해당 지점에서 잎면적 지수(LAI)를 측정하였다. 그리고 울란바타르의 IRIMHE에서 IRIMHE의 Director인 G. Sarantuya 박사 및 P. Gomboluudev 박사와 공동 연구 협약을 체결하였다.

2차 방문점검(10월 18일 ~ 31일)을 통해서 에르덴과 놈곤 사이트의 부유분진측정장치의 교정, 필터 교체, 흡입구(Inlet) 및 각 기상관측기기를 청소하고 점검하였다. 자료 백업을 위한 CF카드의 교체, 인말새트 위성통신장치의 작동점검 등을 포함하는 정기 점검을 수행하였으며, 놈곤 황사감시기상탑의 4층(2, 4, 8, 16 m)의 노후한 온습도계를 교체설치하였고, UPS의 교체와 태양광 패널(100W) 설치를 통하여 황사감시기상탑의 각 기상관측기기에 안정적인 전기공급이 가능하도록 하였다.

특별 조사구에서 잎면적 지수(LAI)를 측정하였다.

2. 황사발원지 관측 자료를 통한 황사발원지 지표 특성 및 황사 발생조건 분석

2017년에서 2018년의 위성자료 및 황사감시기상탑 관측 자료를 이용하여 황사발원지 발생 조건 분석을 수행하였다. 각 관측 자료를 Aqua위성의 MODIS 자료와

같은 16일 간격의 시계열 자료로 변환하여 분석을 시도하였다. 두 관측소에서 2017년에 비해 2018년이 약간 더 높은 지표면 거칠기 길이(z0)값을 보였으며, 놈곤이 에르덴에 비해 약간 더 높은 값을 보였다. 에르덴과 놈곤의 2017년 평균 z0 값은 0.00147 m와 0.0026 m 였으며, 2018년에는 0.00179 m 와 0.00283 m 였다.

고비사막 황사 발원지인 에르덴과 놈곤 지역 모두 NDVI와 EVI 값들의 범위는 매우 낮았지만 그 범위 내에서도 뚜렷한 계절적인 변화를 나타냈다. 또한 인접한 사막스텝지역인 만달고비 지역은 여름철 강수량 증가에 따라 급격한 NDVI와 EVI 값들의 상승을 보였지만 비황사발원지인 몽골 테를지 국립공원지역과 비교하면 건조한 사막스텝과 고비사막 지표면 식생들의 분포 특성은 계절적으로 크게 변동되지 않았다.

황사 발원지 지표면의 식생 성장에 의한 NDVI와 EVI가 연중 가장 높은 값들을 나타내는 7월에서 8월의 여름철 기간 중에 황사 발생 이벤트는 없었지만 예외적으로 2018년도 놈곤 지역에서 같은 시기(7 ~ 8월)에 비교적 짧은 지속시간(20시간)의 낮은 황사 발생 이벤트(4회)를 나타냈다.

에르덴과 놈곤의 황사 발원지에서 16일 간격의 시간 평균 풍속이 8 m/s 이상(임계풍속)인 발생 빈도와 상대습도가 40% 미만인 발생 빈도를 분석한 결과, 시간 평균 풍속이 8 m/s 이상의 발생 빈도가 약 20 % 이상인 기간과 상대습도가 40% 미만의 발생 빈도가 약 60 ~ 70% 이상 일 때, 주로 봄철에 황사 발생 이벤트 빈도수 및 그 지속시간과 이벤트시의 시간 평균 PM_{10} 농도와 최대 PM_{10} 농도의 모든 값들이 높게 나타났다. 2017년과 2018년도 에르덴과 놈곤 지역에서 황사 발생 이벤트시의 연중 최대 PM_{10} 농도는 주로 봄철인 4 ~ 5월 기간 중에 각 약 3956 ~ 4182 $\mu g\ m^{-3}$과 3613 ~ 4211 $\mu g\ m^{-3}$을 나타냈다.

몽골 황사발원지(에르덴과 놈곤)에서 6월말 ~ 8월말 사이의 기간 동안에 연중 높은 강수에 의한 건조한 고비사막지역 식생들의 비교적 빠른 성장의 영향으로 초여름 시기보다 가을철에 LAI(leaf area index, ㎡/㎡)가 약 0.8 ~ 0.9배 증가하였고 계절변화에 따른 두 고비사막지역에서의 LAI 측정값들은 NDVI와 EVI의 식생지수 값들과 잘 일치하였다.

용역 2	연구과제명	(용역)2019 서해상 대기질 입체관측(YES-AQ) 자료 활용기술 개발연구(Ⅰ)
	주관연구기관/ 연구책임자	연세대학교 / 염성수

요약내용

1. 2019 YES-AQ 기간 중 선박 관측 수행

2019 YES-AQ 기간 중 안정된 선박 관측 기반 마련을 위해 2019 YES-AQ 기간 전 관측장비 점검 및 보정을 수행하였고, 항차별 기상 1호 출항 전 탑승자 순변교대 시 사전교육(관측장비 운영, 안전교육 등)을 실시하여 안정된 선박 관측의 기반을 마련하였다. 또한 참여 기관의 선박 관측장비에 대한 상세 운영 매뉴얼을 작성하여 2019 YES-AQ 기간 동안 선박 관측 수행에 차질이 없도록 하였으며, 기상 1호 운항일정에 맞추어 2인 이상의 인력이 기상 1호에 탑승하여 4항차 동안의 선박관측 및 관측장비를 운영하였다.

2. 지상-해상-항공-위성 관측을 포함한 입체관측 자료 분석

2019 YES-AQ에는 국립기상과학원이 주관하고, 국립환경과학원, 연세대학교, 고려대학교, 한양대학교 등 국내 9개 연구기관이 참여하였다. 여러 기관의 관측결과를 취합하여 종합적으로 분석한 결과는 다음과 같다.

서해에서 관측한 결과와 육지에서 관측한 결과를 비교하면 실질적으로 서해는 해양으로서의 배경대기 특성을 보이지만 도심지역 대기의 특성도 동시에 나타냈다. 2019년 서해상 대기질은 시간적 변동성이 컸으며, 봄철인 4, 5월에 비해 여름철인 6월이 더 청정하였다. 이는 6월에 주로 남쪽으로부터 유입된 기류의 영향 때문인 것으로 판단된다.

서해에서의 “NOx의 농도 증가와 함께 나타나는 O3 농도의 현저한 감소” 현상은 도기 대심에서 주로 나타나는 현상으로서, 이는 선박 배출의 영향으로 판단된다. 서해상 대기질을 분석한 결과, 묘박 시간을 제외한 측정 기간 중 6%가 선박 배출의 영향을 받은 것으로 추정되었다.

2019 YES-AQ 기간 동안 황사, 연무 등 고농도 에어로졸 사례가 다수 관측되었는데, 황사와 연무가 관측되었을 때 서해상에서 입자의 생성 혹은 성장하는 현상이

관측되었다. 즉, 서해상으로 황사가 유입될 때에 반응성 기체로부터 아주 작은 크기의 입자가 생성되는 에어로졸 생성현상이 관측되었고, 연무 사례 시에는 이미 대기 중에 존재하는 에어로졸에 반응성 미량기체가 응결되어 에어로졸을 더 성장시키는 현상이 관측되었다. 따라서 황사 유입 시에는 이차 생성에 의해 에어로졸의 수가 증가하였고, 연무 사례 시에는 이차 생성에 의해 에어로졸의 총 질량이 증가하였다.

입체관측 결과의 종합적인 분석을 통해 서해상 대기질은 시간적 변동성뿐만 아니라 공간적 변동성도 크다는 것을 알 수 있었다. 기상1호에서 관측한 서해상 해수면 근처의 관측 자료와 안면도에서의 관측 자료를 비교했을 때 대기질의 특성의 변화 경향은 유사하였으나 고농도 유입시기와 지속 시간에는 차이가 있었다. 그리고 서해상이라 할지라도 해수면 근처와 상층의 대기질의 특성이 다른 경우가 때때로 관측되었다. 특히 2019년 5월 21일 사례의 경우 서해상 해수면 근처는 황사 에어로졸의 특성이 관측되었지만, 상층에서는 특정 고도에서 연무와 같은 고농도의 에어로졸이 유입되었을 때의 대기질의 특성이 관측되었다. 그러므로 지상관측, 선박관측, 항공관측, 위성관측을 각각 단편적으로 해석하였을 때는 서해상의 대기질의 특성을 올바르게 이해하지 못할 가능성이 있으며, 입체관측 및 종합적인 분석이 반드시 이루어져야함을 알 수 있다.

앞으로도 서해상에서의 입체관측을 지속적으로 수행하여 서해상 대기질에 대한 이해도를 증진시키고 중국으로부터 서해상을 거쳐 한반도로 유입되는 과정에서 에어로졸이 어떻게 형성·변화되는지 종합적으로 분석할 예정이다.

용역 3	연구과제명	(용역)웹기반 대기조성물질 분석 기술 개발
	주관연구기관/ 연구책임자	에스제이엠앤씨 주식회사 / 윤정환

요약내용

1. 환경기상관측자료 통합품질관리시스템 개선

웹기반 기후변화감시소 및 관측장비 운영일지 작성·관리시스템를 개발하였다. 웹기반 운영 일지 작성 및 관리 시스템 설계를 위해서 업무담당자와 세 차례 인터뷰를 거쳐 요구사항을 정리하고 웹기반 운영일지 작성·관리시스템을 설계하고, 웹페이지로 구현하였다. 웹기반 운영일지 작성·관리시스템를 통해 사용자는 매일, 매주, 매달 이루어지는 주기적인 점검 사항과 수동품질검사 1단계를 위한 특이사항을 입력하고, 작성된 운영일지를 조회할 수 있다. 작성된 운영일지는 환경기상관측자료 1단계 수동품질검사를 연동하는 시스템을 개발하였다. 운영일지 작성 내용으로부터 1단계 수동품질검사가 자동적으로 수행되도록 설계하고 시스템을 구현하였다.

2. 웹기반 대기조성물질 관측자료 분석체계 개발

사용자 요구를 반영하여 품질검사된 자료(L1)와 통계자료(L2)의 분석을 위해 웹페이지로 자료를 표출하고 자료 형식을 변환하는 시스템을 개발하였다. 개발된 웹기반 자료분석체계를 포함하여 관측자료 통합관리체계를 개선하였다. 개선된 시스템의 메뉴 구성도는 Fig. 1과 같다.



Fig. 1 개선된 웹기반 관측자료 통합관리체계 메뉴 구성도